ISSN 0286-4630

建 築 研 究 資 料

Building Research Data

No. 170 April 2016

免震部材の多数回繰り返し特性と免震建築物の地震応答性状への影響に関する研究

Research on Characteristics of Isolators and Dampers under Multi-cyclic Earthquake Motions and Effects on Response of Seismically Isolated Buildings

飯場正紀、長島一郎、日比野浩、竹中康雄、近藤明洋、中西啓二
猿田正明、山本雅史、嶺脇重雄、小豆畑達哉、井上波彦
Masanori Iiba, Ichiro Nagashima, Hiroshi Hibino, Yasuo Takenaka, Akihiro Kondo,
Keiji Nakanishi, Masaaki Saruta, Masashi Yamamoto, Shigeo Minewaki,
Tatsuya Azuhata and Namihiko Inoue

国立研究開発法人　建 築 研 究 所

Published by
Building Research Institute
National Research and Development Agency, Japan

はしがき

平成 15 年に発生した十勝沖地震では、震央から 250km 離れた苫小牧市内で、長周期地震動によって石油タンクが被災し、社会的に大きな関心を集める結果となった。また、平成２３年３月に発生した東北地方太平洋沖地震により、都心の高層建築物が長時間揺れ続けたことは記憶に新しい。最近の地震動予測研究の進捗により、南海トラフを震源域とする巨大地震により、東京、名古屋、大阪などの大都市圏のある大規模堆積平野で長周期地震動が強く励起され、免震あるいは超高層建築物などの長周期構造物に大きな影響を及ぼす可能性が指摘されている。

建築研究所ではこのような課題に対応するために、平成 21 年度から個別重点研究課題「長周期地震動に対する超高層建物および免震建物の耐震性能評価技術の開発（平成 21～22 年度）」および「長周期地震動に対する超高層建築物等の応答評価技術の高度化（平成 23～24 年度）」を行い、設計用長周期地震動の作成手法や、RC 造、鉄骨造等の超高層建築物および免震建築物の応答評価技術等の検討を行ってきた。

これらの個別重点研究課題における、免震建築物の長周期地震動に対する応答性状の評価等については、国土交通省建築基準整備促進事業の調査事項「12 免震建築物の基準の整備に資する検討（平成 21 年度）」（事業主体：清水建設、小堀鐸二研究所、日本免震構造協会）および「27-3 長周期地震動に対する免震建築物の安全性検証方法に関する検討（平成 22～24 年度）」（事業主体：大成建設、鹿島建設、清水建設、竹中工務店）との共同研究として進めた。建築研究所は、本共同研究における調査研究の計画策定、研究成果の取りまとめに関して主たる役割を果たした他、実験や解析等に関しても事業主体とともに研究を行い、長周期地震動に対する免震材料の多数回繰り返し特性の評価および免震建築物の地震時挙動の解明に向けた検討を行った。

本資料は、上記の建築基準整備促進事業「12 免震建築物の基準の整備に資する検討」および「27-3 長周期地震動に対する免震建築物の安全性検証方法に関する検討」において、平成 21 年度～24 年度の 4 カ年で実施した調査の報告書を再構成し、4 年間の調査内容全体をわかりやすくなるように取りまとめたものである。建築基準整備促進事業を実施いただいた事業主体の方々に対して、4 年間の調査検討に対する多大なる貢献と本資料の出版へのご了解とご協力いただいたことに、厚く御礼申し上げる。

本資料が、長周期地震動に対する免震建築物の構造設計者、免震材料の製造会社の技術者および耐震安全性の評価を行う性能評価機関等において、免震建築物の地震応答評価のための基礎資料として有効に活用され、これまで以上に信頼性と構造安全性の高い免震建築物の建設に役立てられることを期待する。

平成 28 年 4 月

国立研究開発法人　建築研究所

理事長　坂本雄三

免震部材の多数回繰り返し特性と
免震建築物の地震応答性状への影響に関する研究

飯場正紀[1)]、長島一郎[2)]、日比野浩[2)]、竹中康雄[3)]、近藤明洋[3)]、中西啓二[4)]、
猿田正明[4)]、山本雅史[5)]、嶺脇重雄[5)]、小豆畑達哉[6)]、井上波彦[7)]

概　要

免震建築物が長周期地震動を受けた場合に，免震部材の繰り返し特性に関する知見が、必ずしも十分蓄積されているとは言えないのが現状である。

このような背景の下、長周期地震動に対する免震建築物の安全性検証法確立に向けた基礎的知見を蓄積することを目的として、既往文献による免震部材の繰り返し特性の調査、免震部材の多数回繰り返し動的実験と免震建築物モデルの地震応答解析を行った。ここでは、以下の項目に着目し、検討を行った。

1) 免震部材の実状調査によるエネルギー吸収性能等の整理
2) 免震部材の縮小試験体を用いた多数回繰り返し動的実験による、繰り返し特性の整理とモデル化
3) 大型震動台を用いた免震部材の実大試験体の多数回繰り返し動的実験による、１方向加振・２方向加振特性および限界変形特性などの整理
4) 免震部材の多数回繰り返し依存性を考慮した、質点モデルの地震応答解析の実施と免震層の応答変形・応答せん断力および免震部材の吸収エネルギー・累積変形などの評価
5) 東京および大阪に建設されている免震建築物の各１棟の地震観測記録とシミュレーション解析結果の整理

---

1)北海道大学(元建築研究所)　2)大成建設　3)鹿島建設　4)清水建設　5)竹中工務店　6)建築研究所　7)国土交通省国土技術政策総合研究所

Research on Characteristics of Isolators and Dampers under Multi-cyclic Earthquake Motions and Effects on Response of Seismically Isolated Buildings

Masanori Iiba[1)], Ichiro Nagashima[2)], Hiroshi Hibino[2)], Yasuo Takenaka[3)], Akihiro Kondo[3)], Keiji Nakanishi[4)], Masaaki Saruta[4)], Masashi Yamamoto[5)], Shigeo Minewaki[5)], Tatsuya Azuhata[6)] and Namihiko Inoue[7)]

Abstract

A huge earthquake along the Nankai trough will highly probably occur in near future. At that time, there are earthquakes with long period and long duration in large-scale plains on the large sedimentation basin. Under the earthquake motions, seismically isolated buildings have a large displacement and a lot of repetitions at isolated layers.

Characteristics of isolators and dampers for seismically isolated buildings under large deformations and multi-cycle earthquake motions are not clear and experimental data are not accumulated.

Surveys for repeated characteristics of isolators etc. based on past research results, experimental researches of isolation devices under multi-cycle earthquake motions and earthquake simulations of isolated models are conducted, in order to accumulate the experimental data and clarify the safety evaluation of the seismically isolated buildings.

Following points are focused.

1) Performance of isolation devices for energy absorbing characteristics
2) Characteristics of isolation devices under multi-cycle repetitions based on dynamic experiments of scaled models and modelling of these characteristics
3) One dimensional and two dimensional characteristics of isolation devices under multi-cycle repetitions based on dynamic experiments of full-scale models through the large-scale facility
4) Response evaluation of displacement and shear force at isolated layers and energy absorbing amounts of the isolators and dampers, based on the earthquake response analysis of isolated models considering the effects of multi-cycle repetitions
5) Achievement for earthquake observation system of two seismically isolated buildings in Tokyo and Osaka, summary of the observed data and execution of earthquake response analysis

---

1) Hokkaido University (Formerly, Building Research Institute) 2) Taisei Corporation 3) Kajima Corporation 4) Shimizu Corporation 5) Takenaka Corporation 6) Building Research Institute 7) National Institute for Land and Infrastructure Management, MLIT

目　次

はしがき
概要 i
ABSTRACT ii

第Ⅰ部　はじめに

1　背景・調査項目と調査目的 Ⅰ-1
2　調査項目の内容 Ⅰ-1
3　調査体制 Ⅰ-2
4　本資料の概要 Ⅰ-9

第Ⅱ部　免震部材のエネルギー吸収性能に関する既往の知見

第1章　長周期地震動に対する免震部材の特性評価に関する検討 Ⅱ-1.1-1
1.1　長周期地震動の免震性能評価に関する実状調査 Ⅱ-1.1-1
1.1.1　長周期地震動に対する免震建築物の検討課題 Ⅱ-1.1-1
1.1.2　免震建築物に関する既往の研究 Ⅱ-1.1-2
1.1.3　免震部材に関する既往の研究 Ⅱ-1.1-3
1.1.4　地震応答解析に関する既往の研究 Ⅱ-1.1-3
1.1.5　応答評価に関する既往の研究 Ⅱ-1.1-4
1.2　免震部材のエネルギー吸収性能評価 Ⅱ-1.2-1
1.2.1　積層ゴム支承 Ⅱ-1.2-1
1.2.2　弾性すべり支承 Ⅱ-1.2-4
1.2.3　鋼材ダンパー Ⅱ-1.2-8
1.2.4　鉛ダンパー Ⅱ-1.2-13
1.2.5　オイルダンパー Ⅱ-1.2-16
1.2.6　エネルギー吸収性能の比較 Ⅱ-1.2-18
1.3　外力特性に関する情報収集・検討 Ⅱ-1.3-1
1.3.1　検討用入力地震動 Ⅱ-1.3-1
1.3.2　検討用建物 Ⅱ-1.3-6
1.3.3　応答解析結果 Ⅱ-1.3-8
1.3.4　免震部材のエネルギー吸収に対する検討 Ⅱ-1.3-12
1.4　免震部材のエネルギー吸収性能評価・試験方法の考え方 Ⅱ-1.4-1
1.4.1　エネルギー吸収性能評価 Ⅱ-1.4-1
1.4.2　エネルギー吸収性能評価のための試験方法の考え方 Ⅱ-1.4-68
1.4.3　既存の実験施設の実態調査 Ⅱ-1.4-75
1.5　まとめと課題 Ⅱ-1.5-1
1.5.1　まとめ Ⅱ-1.5-1
1.5.2　課題 Ⅱ-1.5-3

第Ⅲ部　免震部材の特性評価と応答評価

第１章　免震部材実験によるエネルギー吸収性能の評価 Ⅲ-1.1-1
1.1 目的 Ⅲ-1.1-1
1.2 全体方針 Ⅲ-1.2-1
1.3 実験内容 Ⅲ-1.3.1-1
1.3.1 天然ゴム系積層ゴム Ⅲ-1.3.1-1
1.3.2 鉛プラグ入り積層ゴム Ⅲ-1.3.2-1
1.3.3 高減衰ゴム系積層ゴム Ⅲ-1.3.3-1
1.3.4 弾性すべり支承（高摩擦） Ⅲ-1.3.4-1
1.3.5 弾性すべり支承（低摩擦） Ⅲ-1.3.5-1
1.3.6 鋼材ダンパー Ⅲ-1.3.6-1
1.3.7 鉛ダンパー Ⅲ-1.3.7-1
1.3.8 オイルダンパー Ⅲ-1.3.8-1
1.3.9 粘性ダンパー Ⅲ-1.3.9-1
1.4 まとめ Ⅲ-1.4-1
第２章　免震部材の繰り返し特性と長周期地震動に対する免震建築物の応答評価(1). Ⅲ-2.1-1
2.1 目的 Ⅲ-2.1-1
2.2 全体方針 Ⅲ-2.2-1
2.3 免震部材の繰り返し特性モデルと地震応答解析（その１） Ⅲ-2.3.1-1
2.3.1 鉛プラグ入り積層ゴム Ⅲ-2.3.1-1
2.3.2 高減衰ゴム系積層ゴム Ⅲ-2.3.2-1
2.3.3 天然ゴム系積層ゴム＋鋼材ダンパー Ⅲ-2.3.3-1
2.3.4 天然ゴム系積層ゴム＋鉛ダンパー Ⅲ-2.3.4-1
2.3.5 天然ゴム系積層ゴム＋オイルダンパー Ⅲ-2.3.5-1
2.3.6 天然ゴム系積層ゴム＋弾性すべり支承（高摩擦） Ⅲ-2.3.6-1
2.3.7 天然ゴム系積層ゴム＋弾性すべり支承（低摩擦）＋粘性ダンパー Ⅲ-2.3.7-1
2.4 まとめ Ⅲ-2.4-1
第３章　免震部材の繰り返し特性と長周期地震動に対する免震建築物の応答評価(2). Ⅲ-3.1-1
3.1 目的 Ⅲ-3.1-1
3.2 全体方針 Ⅲ-3.2-1
3.3 免震部材の繰り返し特性モデルと地震応答解析（その２） Ⅲ-3.3.1-1
3.3.1 鉛プラグ入り積層ゴム Ⅲ-3.3.1-1
3.3.2 高減衰ゴム系積層ゴム Ⅲ-3.3.2-1
3.3.3 天然ゴム系積層ゴム＋鋼材ダンパー Ⅲ-3.3.3-1
3.3.4 天然ゴム系積層ゴム＋鉛ダンパー Ⅲ-3.3.4-1
3.3.5 天然ゴム系積層ゴム＋弾性すべり支承（高摩擦） Ⅲ-3.3.5-1
3.3.6 天然ゴム系積層ゴム＋弾性すべり支承（低摩擦）＋粘性ダンパー Ⅲ-3.3.6-1
3.4 まとめ Ⅲ-3.4-1

第Ⅳ部　長周期地震動に対する実大免震部材の特性評価(1)

第１章　震動台を用いた実大免震部材の構造実験（その１） Ⅳ-1.1-1
1.1 目的 Ⅳ-1.1-1
1.2 実験手法の提案 Ⅳ-1.2-1
1.2.1　実験条件の設定 Ⅳ-1.2-1
1.2.2　実験手法の選定 Ⅳ-1.2-3
第２章　多数回繰り返し荷重を受ける実大免震部材の構造実験（その１） Ⅳ-2.1-1
2.1 実験計画 Ⅳ-2.1-1
2.1.1　試験体 Ⅳ-2.1-1
2.1.2　加力治具と試験体設置 Ⅳ-2.1-2
2.1.3　加力計画 Ⅳ-2.1-4
2.1.4　安全上の留意点整理 Ⅳ-2.1-7
2.1.5　計測計画 Ⅳ-2.1-9
2.1.6　防護計画 Ⅳ-2.1-9
2.1.7　実験方法 Ⅳ-2.1-10
2.1.8　実験スケジュール Ⅳ-2.1-13
2.2 実験手法の検証 Ⅳ-2.2-1
2.2.1　免震部材への鉛直軸力導入 Ⅳ-2.2-1
2.2.2　加力波形と加力精度 Ⅳ-2.2-4
2.2.3　加力治具の性能 Ⅳ-2.2-7
2.3 実験結果 Ⅳ-2.3.1-1
2.3.1 弾性すべり支承（高摩擦） Ⅳ-2.3.1-1
2.3.2 オイルダンパー Ⅳ-2.3.2-1
2.3.3 天然ゴム系積層ゴム（静加力試験） Ⅳ-2.3.3-1
2.4 まとめと課題 Ⅳ-2.4-1
2.4.1　まとめ Ⅳ-2.4-1
2.4.2　課題 Ⅳ-2.4-3
2.5 参考資料 Ⅳ-2.5.1-1
2.5.1 Ｅ－ディフェンス震動台実験データに基づく変位制御の精度検討 Ⅳ-2.5.1-1
2.5.2 震動台の加振継続時間について Ⅳ-2.5.2-1
2.5.3 実大試験体・実験治具図面・実験治具計算書 Ⅳ-2.5.3-1
2.5.4 水平・鉛直２軸載荷時の分力計荷重分布に関する FEM 解析結果 Ⅳ-2.5.4-1
2.5.5 試験体図面 Ⅳ-2.5.5-1
2.5.6 試験架台図および試験体取付図 Ⅳ-2.5.6-1
2.5.7 計測計画詳細 Ⅳ-2.5.7-1
2.5.8 座標変換の基礎式 Ⅳ-2.5.8-1
2.5.9 加振波の例 Ⅳ-2.5.9-1
2.5.10 フレーム応力度 Ⅳ-2.5.10-1

第Ⅴ部　長周期地震動に対する実大免震部材の特性評価(2)

第１章　震動台を用いた実大免震部材の構造実験（その２） Ⅴ-1.1-1
1.1 目的 Ⅴ-1.1-1
1.2 実験条件の設定 Ⅴ-1.2-1
第２章 多数回繰り返し荷重を受ける免震部材の構造実験（その２） Ⅴ-2.1-1
2.1 全体実験計画 Ⅴ-2.1-1
2.1.1 加力計画、計測計画、加振計画および安全対策 Ⅴ-2.1-1
2.1.2 防護計画 Ⅴ-2.1-1
2.1.3 実験スケジュール Ⅴ-2.1-1
2.1.4 実験手法の検証 Ⅴ-2.1-3
2.2 実大部材実験の実施 Ⅴ-2.1-1
2.2.1 鉛プラグ入り積層ゴム Ⅴ-2.2.1-1
2.2.2 高減衰ゴム系積層ゴム Ⅴ-2.2.2-1
2.3 まとめと課題 Ⅴ-2.3-1
2.3.1 まとめ Ⅴ-2.3-1
2.3.2 課題 Ⅴ-2.3-4

第Ⅵ部　繰り返し依存性を簡易的に取り込むための手法の検討

第１章　免震部材特性のモデル化と簡易応答評価手法の検討 Ⅵ-1.1-1
1.1 目的 Ⅵ-1.1-1
1.2 全体方針 Ⅵ-1.2-1
1.3 解析結果 Ⅵ-1.3.1-1
1.3.1 鉛プラグ入り積層ゴム Ⅵ-1.3.1-1
1.3.2 高減衰ゴム系積層ゴム Ⅵ-1.3.2-1
1.3.3 天然ゴム系積層ゴム＋鉛ダンパー Ⅵ-1.3.3-1
1.3.4 天然ゴム系積層ゴム＋弾性すべり支承（高摩擦） Ⅵ-1.3.4-1
1.3.5 天然ゴム系積層ゴム＋弾性すべり支承（低摩擦）＋粘性ダンパー Ⅵ-1.3.5-1
1.4 まとめ Ⅵ-1.4-1

第Ⅶ部　免震建築物の地震観測と公表観測記録の整理・分析

第１章 免震建築物の地震観測 Ⅶ-1.1-1
1.1 目的 Ⅶ-1.1-1
1.2 免震建築物の地震観測体制 Ⅶ-1.2-1
1.3 観測免震建築物の地震観測記録の分析とシミュレーション解析
1.3.1 観測記録の整理 Ⅶ-1.3.1-1
1.3.2 観測免震建築物のシミュレーション解析 Ⅶ-1.3.2-1
1.4 南海トラフの巨大地震における観測免震建築物のシミュレーション解析 Ⅶ-1.4-1
1.5 まとめ Ⅶ-1.5-1

第 2 章　公表観測記録の整理・分析 Ⅶ-2.1-1
2.1 観測記録の収集 Ⅶ-2.1-1
2.2 観測記録の整理・分析 Ⅶ-2.2-1
2.3 まとめ Ⅶ-2.3-1
第 3 章 東日本大震災の本震・余震観測記録に基づく免震建築物の地震時挙動の分析. Ⅶ-3.1-1
3.1 検討方針 Ⅶ-3.1-1
3.2 本震・余震による免震層の累積変位等の整理 Ⅶ-3.2-1
3.3 まとめ Ⅶ-3.3-1

第Ⅷ部　まとめと課題 Ⅷ-1
1　まとめ Ⅷ-1
2　課題 Ⅷ-5

謝辞

第 I 部

はじめに

１　背景・調査項目と調査目的

近い将来の来襲が想定される東海・東南海・南海地震の三連動地震が発生すると、東京、大阪、名古屋などの大都市は、数秒から十秒の長周期のゆれが数分から十分間も続く長周期地震動に襲われ、2011 年東北地方太平洋沖地震によるゆれを上回る大振幅多数回繰返し振動が免震建築物に加わる恐れがある。

長周期地震動は、これまでの時刻歴応答解析に用いられてきた標準波・告示波に比べて、継続時間が長く、必要となるエネルギー吸収量が大きいことから、支承材やダンパーなどの免震部材についてはそれらに対する性能評価と建物応答への影響を評価し、その成果をもとに品質の基準値の追加と試験方法の整備を行う必要がある。

長周期地震動のように大振幅で多数回繰り返し加振される外力下での免震部材の繰り返し特性や限界性能についていまだ不明な点が多いことを背景に、長周期地震動に対する免震建築物の安全性照査に向けて必要となる各種免震部材の性能を、縮小または実大試験体による性能評価試験及び破壊実験により明らかにすることを目的とした。

２　調査項目の内容

建築基準整備促進事業「12 免震建築物の基準の整備に資する検討（平成 21 年度）」および「27-3 長周期地震動に対する免震建築物の安全性検証方法に関する検討（平成 22～24 年度）」との共同研究で得られた成果に基づいて、以下に掲げる課題についてまとめた。

（イ）免震部材のエネルギー吸収性能に関する既往の知見の整理（平成 21 年度）（第Ⅱ部）

既往の研究成果（本事業の関連調査事項を含む）を整理し、現時点でのエネルギー吸収性能を把握し、不足している実験データの洗い出しを行う。

（ロ）免震部材の多数回繰り返し加振実験による免震部材の特性評価（平成 22,23,24 年度）（第Ⅲ部・第１章、第Ⅳ部、第Ⅴ部）

（１）縮小試験体を用いたエネルギー吸収性能の把握（平成 22 年度）（第Ⅲ部第 1 章）

免震支承の試験体寸法は実大の 1/2～1/4 程度を想定し、既往の試験設備を用いて実験データを取得する。ダンパーについては、実大での実験を基本とする。実験の一般性が保たれるよう、試験条件設定や試験実施に関して十分配慮する。

実験の対象とする部材は、免震支承、免震ダンパーとして一般的に用いられる、天然ゴム系積層ゴム、鉛プラグ入り積層ゴム、高減衰ゴム系積層ゴム、弾性すべり支承（高摩擦）、弾性すべり支承（低摩擦）、鋼材ダンパー、鉛ダンパー、オイルダンパー、粘性ダンパーとする。各部材の試験条件として、振幅 400mm 以下の３水準（400、200、100mm）の変位振幅および累積変形量２水準（50m, 100m）の正弦波加振を設定する。上記水準を目標として各部材の試験を実施し、多数回繰り返しのもとでのエネルギー吸収性能の変化を確認する。

（２）実大試験体を用いたエネルギー吸収性能の把握（平成 22,23,24 年度）（第Ⅳ部, 第Ⅴ部）

免震支承については直径 1m 程度の免震支承を想定する。大型震動台（Eーディフェンス）を用いた実験計画、試験装置の設計・製作を行い、実験を実施する。

実験の対象とする実大免震部材は、弾性すべり支承（高摩擦）、鉛プラグ入り積層ゴム、高

減衰ゴム系積層ゴム、オイルダンパーとする。支承材については、1 方向および 2 方向多数回繰り返し実験および地震応答波加振実験を、ダンパーについては、多数回繰り返し実験、高速度加振実験および地震応答波加振実験を行う。

（ハ）免震部材のモデル化と長周期地震動に対する免震建築物の応答評価（平成 22,23,24 年度）（第Ⅲ部・第 2 章、 第 3 章、第Ⅵ部）

縮小、実大のエネルギー吸収性能の実験結果、既往の知見等を踏まえて、免震部材特性の評価（モデル化）と建物応答評価を行う。また、繰り返し依存性を考慮した場合としない場合の比較を行い、各免震部材の繰り返し依存性がどのように応答に影響するかを考察する。さらに、繰り返し依存性を考慮して長周期地震動に対する 1 質点モデルの応答解析を実施し、各免震部材の繰り返し依存性を既往の設計モデルに簡易的に取り込むための手法を検討する。

（ニ）免震建築物の地震観測と挙動調査（平成 22,23,24 年度）（第Ⅶ部）

公共建築物を中心に 2 棟の建物を選定して地震観測を実施し、観測記録を分析する。また観測地震動による免震建築物のシミュレーション解析を行い、長周期地震動が免震建築物の応答に及ぼす影響を評価する。

さらに、提供された免震建築物の観測結果や公表されている地震観測資料、被災調査報告等に基づき、免震建築物の地震時挙動について検討を行う。

３　調査体制

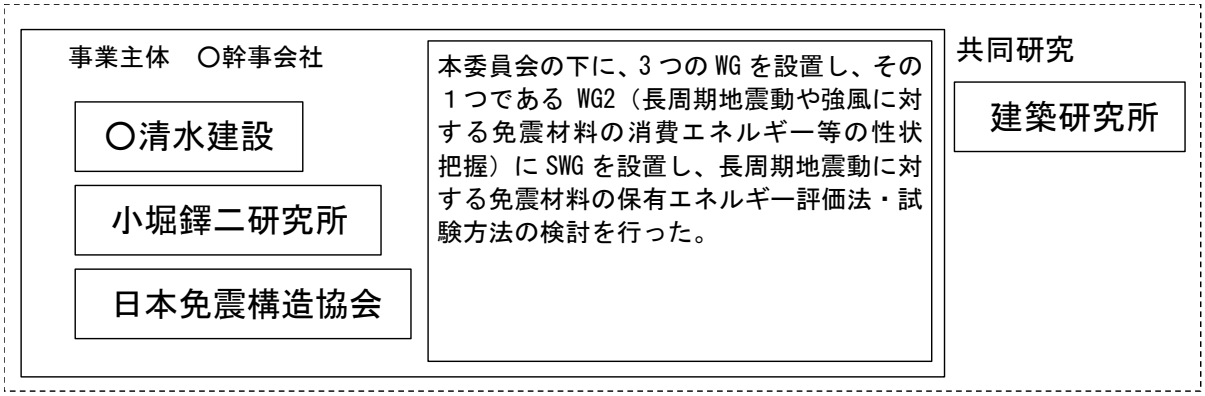
建築基準整備促進事業 12 では、清水建設、小堀鐸二研究所、日本免震構造協会が事業主体となり、建築研究所との共同研究により調査が実施された。また、建築基準整備促進事業 27-3 では、大成建設、鹿島建設、清水建設、竹中工務店が事業主体となり、建築研究所、防災科学技術研究所、日本免震構造協会との共同研究により調査が実施された。

図 1 に、建築基準整備促進事業 12 および建築基準整備促進事業 27-3 の調査実施体制を示す。

建築基準整備促進事業 27-3 では、表 1 のように、事業主体が免震部材のタイプ別に分担して実験および解析を実施した。また実大実験計画の作成にあたっては、防災科学技術研究所（兵庫耐震工学研究センター、E ディフェンス）と共同研究契約を結んで検討を進めた。地震観測の実施にあたっては、国土交通省国土技術政策総合研究所と調整の上、計画を作成した。

日本免震構造協会に委員会を設置し、本事業が円滑に進むよう配慮した。また、有識者による委員会が構成され、本計画及び調査結果・実験結果について客観的な評価が行われた。表 2 および表 3 に委員会・WG 構成を示す。

a) 建築基準整備促進事業「12 免震建築物の基準の整備に資する検討」



b) 建築基準整備促進事業「27-3 長周期地震動に対する免震建築物の安全性検証方法に関する検討」

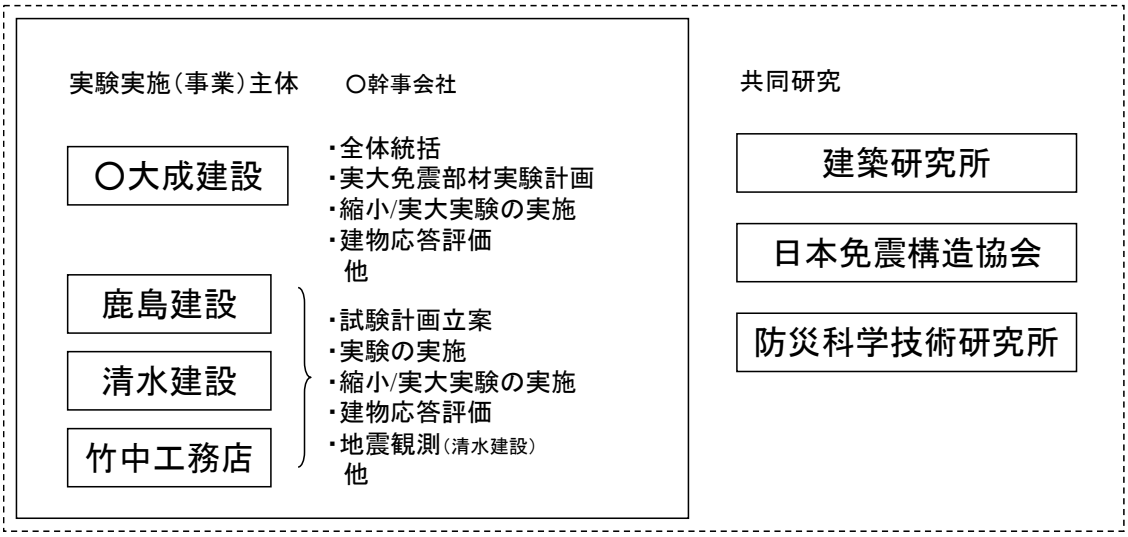


図 1　調査実施体制

表 1　実験・解析担当事業者

事業者	担当デバイス
大成建設 (幹事会社)	天然ゴム系積層ゴム、弾性すべり支承（高摩擦） オイルダンパー
鹿島建設	鉛プラグ入り積層ゴム、鋼材ダンパー
清水建設	高減衰ゴム系積層ゴム、鉛ダンパー
竹中工務店	弾性すべり支承（低摩擦)、粘性ダンパー

表 2 (1)　「免震建築物の基準の整備に資する検討」委員会・WG 構成

（建築基準整備促進事業 12：平成 21 年度）

本委員会　（平成 21 年度）

	氏名	所属（参加年度末時点）
主査	北村春幸	東京理科大学
委員	井上 範夫	東北大学
委員	大熊 武司	神奈川大学
委員	荻野 伸行	熊谷組
委員	可児 長英	日本免震構造協会
委員	菊地 優	北海道大学
委員	北村 佳久	清水建設
委員	小林 正人	明治大学
委員	猿田 正明	清水建設
委員	髙山 峯夫	福岡大学
委員	竹中 康雄	小堀鐸二研究所
委員	田村 和夫	清水建設
委員	中澤 昭伸	織本構造設計
委員	長谷川 豊	オイレス工業
委員	速水 浩	日本建築センター
委員	藤森 智	松田平田設計
委員	吉江 慶祐	日建設計
協力委員	小豆畑達哉	国土技術政策総合研究所
協力委員	井上波彦	国土技術政策総合研究所
協力委員	石原 直	国土技術政策総合研究所
共同研究委員	飯場正紀	建築研究所
共同研究委員	大川　出	建築研究所
共同研究委員	斉藤大樹	建築研究所

長周期地震動や強風に対する免震材料の消費エネルギー等の性状把握ＷＧ（ＷＧ２：平成 21 年度）

	氏名	所属（参加年度末時点）
主査	高山 峯夫	福岡大学
委員	大熊 武司	神奈川大学
委員	荻野 伸行	熊谷組
委員	北村 佳久	清水建設
委員	近藤 明洋	小堀鐸二研究所
委員	竹中 康雄	小堀鐸二研究所
委員	田村 和夫	清水建設
委員	中澤 昭伸	織本構造設計
委員	長谷川 豊	オイレス工業
委員	速水 浩	日本建築センター
委員	藤森 智	松田平田設計
委員	室田 伸夫	ブリヂストン
共同研究委員	飯場 正紀	建築研究所

表 2 (2)　「免震建築物の基準の整備に資する検討」委員会・WG 構成

（建築基準整備促進事業 12：平成 21 年度）

長周期地震動に対する免震材料の保有エネルギー評価法・試験方法の検討ＳＷＧ（平成 21 年度）

	氏名	所属（参加年度末時点）
主査	荻野 伸行	熊谷組
委員	飯田 正敏	織本構造設計
委員	亀井 俊明	カヤバシステムマシナリー
委員	北村 佳久	清水建設
委員	高坂 隆一	梓設計
委員	高岡 栄治	小堀鐸二研究所
委員	長田 修一	オイレス工業
委員	濱崎 宏典	ブリヂストン
委員	吉川 秀章	新日鉄エンジニアリング
委員	嶺脇 重雄	竹中工務店
共同研究委員	飯場 正紀	建築研究所

表 3 (1)　「長周期地震動に対する免震建築物の安全性検証方法に関する検討」委員会・WG 構成
（建築基準整備促進事業 27-3：平成 22～24 年度）

本委員会　（平成 22～24 年度）

	氏名	所属（参加年度末時点）	
主査	北村春幸	東京理科大学	
委員	高山峯夫	福岡大学	
委員	菊地　優	北海道大学	
委員	古橋　剛	日本大学	
幹事	長島一郎	大成建設	
委員	日比野浩	大成建設	
委員	竹中康雄	鹿島建設	
委員	中西啓二	清水建設	
委員	山本雅史	竹中工務店	
委員	白井和貴	大林組	（平成 22 年度）
委員	津田和明	大林組	（平成 23 年度）
委員	山本　裕	日建設計	
委員	木林長仁	日本建築センター	
共同研究委員	梶原浩一	防災科学技術研究所	
協力委員	小豆畑達哉	国土技術政策総合研究所	
協力委員	井上波彦	国土技術政策総合研究所	
共同研究委員	飯場正紀	建築研究所	
共同研究委員	大川　出	建築研究所	
共同研究委員	斉藤大樹	建築研究所	
共同研究委員	可児長英	日本免震構造協会	

免震部材実験ＷＧ（ＷＧ１：平成 22～24 年度）

	氏名	所属（参加年度末時点）	
主査	高山峯夫	福岡大学	
委員	北村春幸	東京理科大学	（平成 24 年度）
委員	菊地　優	北海道大学	
幹事	長島一郎	大成建設	（平成 24 年度）
幹事*・委員**	日比野浩	大成建設	(*平成 22･23, ** 24 年度)
委員	出雲洋治	大成建設	（平成 22・23 年度）
委員	高岡栄治	鹿島建設	（平成 22・23 年度）
委員	田上　淳	鹿島建設	（平成 24 年度）
委員	猿田正明	清水建設	（平成 22・23 年度）
委員	中西啓二	清水建設	（平成 24 年度）
委員	嶺脇重雄	竹中工務店	（平成 22・23 年度）
委員	山本雅史	竹中工務店	（平成 24 年度）
委員	室田伸夫	ブリヂストン	（平成 22・23 年度）
委員	芳澤利和	ブリヂストン	（平成 24 年度）
委員	河内山修	オイレス工業	
委員	熊谷洋一	東京ファブリック工業	
委員	吉川秀章	新日鉄エンジニアリング	（平成 22・23 年度）
委員	福田滋夫	昭和電線デバイステクノロジー	（平成 24 年度）
委員	讃井洋一	日立オートモティブシステムズ	
委員	齊木健司	免制振ディバイス	（平成 22・23 年度）
委員	樫本信隆	日建設計	（平成 24 年度）
協力委員	井上波彦	国土技術政策総合研究所	
共同研究委員	田原健一	防災科学技術研究所	（平成 24 年度）
共同研究委員	飯場正紀	建築研究所	
共同研究委員	森田高市	建築研究所	（平成 24 年度）
共同研究委員	可児長英	日本免震構造協会	

表 3 (2)　「長周期地震動に対する免震建築物の安全性検証方法に関する検討」委員会・WG 構成
（建築基準整備促進事業 27-3：平成 22～24 年度）

実大実験計画ＷＧ（ＷＧ２：平成 22・23 年度）

	氏名	所属（参加年度末時点）	
主査	長島一郎	大成建設	
委員	北村春幸	東京理科大学	
委員	高山峯夫	福岡大学	
幹事	日比野浩	大成建設	
委員	成原弘之	大成建設	
委員	竹中康雄	鹿島建設	
委員	西村拓也	清水建設	
委員	山本雅史	竹中工務店	
委員	芳澤利和	ブリヂストン	
委員	長田修一	オイレス工業	（平成 22 年度）
委員	河内山修	オイレス工業	（平成 23 年度）
委員	讃井洋一	日立オートモティブシステムズ	
委員	露木保男	カヤバシステムマシナリー	
委員	福田滋夫	昭和電線デバイステクノロジー	（平成 23 年度）
委員	樫本信隆	日建設計	
協力委員	井上波彦	国土技術政策総合研究所	
共同研究委員	佐藤栄児	防災科学技術研究所	
共同研究委員	飯場正紀	建築研究所	
共同研究委員	可児長英	日本免震構造協会	

免震部材の繰り返し特性評価ＳＷＧ（平成 24 年度）

	氏名	所属（参加年度末時点）
主査	飯場正紀	建築研究所
委員	高山峯夫	福岡大学
委員	古橋　剛	日本大学
幹事	日比野浩	大成建設
委員	竹中康雄	鹿島建設
委員	西村拓也	清水建設
委員	嶺脇重雄	竹中工務店
委員	鮫島祐介	ブリヂストン
委員	河内山修	オイレス工業
委員	安永　亮	住友金属鉱山シポレックス
委員	西本晃治	新日鉄住金エンジニアリング
委員	露木保男	カヤバシステムマシナリー
委員	吉江慶祐	日建設計
委員	青木　雅	日本建築センター
協力委員	井上波彦	国土技術政策総合研究所
共同研究委員	可児長英	日本免震構造協会

表 3 (3)　「長周期地震動に対する免震建築物の安全性検証方法に関する検討」委員会・WG 構成
（建築基準整備促進事業 27-3：平成 22～24 年度）

建物応答評価ＷＧ（ＷＧ３：平成 22・23 年度、ＷＧ２：平成 24 年度）

	氏名	所属（参加年度末時点）	
主査	古橋　剛	日本大学	
委員	菊地　優	北海道大学	
幹事	木村雄一	大成建設	
幹事	中島　徹	大成建設	（平成 24 年度）
委員	近藤明洋	鹿島建設	
委員	小槻祥江	清水建設	
委員	北村佳久	清水建設	
委員	中村尚弘	竹中工務店	
委員	鈴木琢也	竹中工務店	（平成 24 年度）
委員	菊地岳史	松田平田設計	
委員	依田博基	久米設計	
委員	三瓶文彦	織本構造設計	
委員	荻野伸行	熊谷組	
協力委員	小豆畑達哉	国土技術政策総合研究所	
共同研究委員	飯場正紀	建築研究所	
共同研究委員	斉藤大樹	建築研究所	（平成 22・23 年度）
共同研究委員	森田高市	建築研究所	（平成 24 年度）
共同研究委員	永井　潔	日本免震構造協会	（平成 22・23 年度）
共同研究委員	小林哲之	日本免震構造協会	（平成 24 年度）

建物地震観測ＷＧ（ＷＧ４：平成 22・23 年度、ＷＧ３：平成 24 年度）

	氏名	所属（参加年度末時点）	
主査	飯場正紀	建築研究所	
委員	欄木龍大	大成建設	
委員	高岡栄治	鹿島建設	
委員	森川和彦	清水建設	（平成 22・23 年度）
委員	猿田正明	清水建設	（平成 24 年度）
委員	米田春美	竹中工務店	
協力委員	小豆畑達哉	国土技術政策総合研究所	
協力委員	井上波彦	国土技術政策総合研究所	
共同研究委員	斉藤大樹	建築研究所	（平成 22・23 年度）
共同研究委員	森田高市	建築研究所	（平成 24 年度）
共同研究委員	小林哲之	日本免震構造協会	（平成 22・23 年度）
共同研究委員	可児長英	日本免震構造協会	（平成 24 年度）

４　本資料の概要

研究項目ごとの成果概要を、以下に示す。本資料の内容は、次の４つの研究項目に分類される。括弧内に、本資料の掲載箇所を示す。

（イ）免震部材のエネルギー吸収性能に関する既往の知見の整理（第Ⅱ部）
（ロ）免震部材の多数回繰り返し加振実験による免震部材の特性評価（第Ⅲ部・第１章、第Ⅳ部、第Ⅴ部）
（ハ）免震部材のモデル化と長周期地震動に対する免震建築物の応答評価（第Ⅲ部・第２章、 第３章、第Ⅵ部）
（ニ）免震建築物の地震観測と挙動調査（第Ⅶ部）

（イ）免震部材のエネルギー吸収性能に関する既往の知見の整理

既存の文献による「長周期地震動の免震性能評価の実状調査」を行い、免震建築物の免震層・上部構造の応答性状および免震部材のエネルギー吸収性能などをまとめた。また 10 棟の代表的な免震建築物における時刻歴応答解析を実施し、代表的な免震部材として支承材 3 種類（鉛プラグ入り積層ゴム・高減衰ゴム系積層ゴム・弾性すべり支承）、ダンパー3 種類（鋼材ダンパー・鉛ダンパー・オイルダンパー）についてエネルギー吸収性能評価を行った。

免震建築物の地震時応答を正しく評価するためには、免震部材の履歴特性（剛性、降伏荷重、摩擦係数など）を適切にモデル化することは不可欠であり、想定する応答変形や繰り返し数（累積変形）に対する適切な復元力特性のモデル化が非常に重要である。

（ロ）免震部材の多数回繰り返し加振実験による免震部材の特性評価

長時間にわたる長周期の外力下での免震部材の繰り返し特性や限界性能については、いまだ不明な点が多い。そこで、長周期地震動に対する免震建築物の安全性を検討するために必要となる免震部材の多数回繰り返し特性について、動的実験により明らかにした。

実験で対象とした部材は、支承材（天然ゴム系積層ゴム、高減衰ゴム系積層ゴム、鉛プラグ入り積層ゴム、弾性すべり支承（高摩擦）、弾性すべり支承（低摩擦））、減衰材（ダンパー）（鉛ダンパー、鋼材ダンパー、オイルダンパー、粘性ダンパー）である。

１）縮小試験体（支承材）・実大試験体（減衰材）の多数回繰り返し動的実験

支承材の試験体寸法は、実大の 1/2～1/4 程度を想定し、既往の試験設備を用いて実験データを取得した。減衰材については、実大での実験を基本とした。

免震部材の試験条件として、表３に示す条件を設定し、変位振幅 400mm 以下の３水準（400、200、100mm）および累積変形量２水準（50m, 100ｍ）の正弦波加振を設定する。

実験結果を要約すると、以下のようになる。

a) 天然ゴム系積層ゴム

荷重−変位関係では、せん断歪γ=50%およびγ=100%では長周期・限界の両試験とも繰り返しに伴う履歴形状の変化は極めて小さく、全ケースにおいても長周期・限界の試験条件に対して安定した特性を示すことが確認された。

表 3　多数回繰り返し試験の加振条件（基本ケース）

ケース	試験条件	加振周期	変位・ひずみ		換算速度	ｻｲｸﾙ数	時間	累積変形
		s	±mm	ひずみ(%)	cm/s		s	m
1A	長周期	4	100	50	15.7	125	500	50
1B	限界	4	100	50	15.7	250 *	1000	100
2A	長周期	4	200	100	31.4	60	240	48
2B	限界	4	200	100	31.4	120 *	480	96
3A	長周期	4	400	200	62.8	30	120	48
3B	限界	4	400	200	62.8	60 *	240	96

注）* 減衰材の限界試験における限界状態は、破断または油温 80℃とする。

b) 鉛プラグ入り積層ゴム

荷重変形関係における履歴面積は加振に伴い徐々に小さくなるが、長周期加振で荷重変形関係が安定し、それ以上の加振を与えても荷重変形関係はほとんど変化しないことが確認された。また、加振に伴い降伏荷重は低下するが、せん断ひずみ 100%以上の加振ケースにおいては、降伏後剛性はほとんど変化せず一定の値に漸近した。降伏荷重の低下傾向には鉛プラグの温度上昇と負の相関が見られる。 鉛プラグの温度が上昇すると、降伏荷重が低下し、鉛プラグの温度上昇が緩やかになると降伏荷重の低下も小さくなっていた。また、累積履歴吸収エネルギーの大きい限界加振時においても、降伏荷重は際限なく低下せず、ある一定の値に収束した。

c) 高減衰ゴム系積層ゴム

多数回繰り返し加振による水平復元力特性値の低下の下限値は、3 サイクル目の値に対して等価剛性は 0.7 倍程度、等価粘性減衰定数は 0.6～0.7 倍程度とみられる。累積変形量、累積エネルギー量、試験体温度と水平復元力特性値の関係を見ると、等価剛性は累積エネルギー量に対して加振振幅に関わらずほぼ一致した傾向を示した。

d) 弾性すべり支承（高摩擦）

面圧 20MPa の長周期、限界試験における摩擦係数は回数を繰り返すことで減少した。繰り返しに伴う摩擦係数の減少傾向はインターバル時間中には一旦止まり、摩擦係数が回復する傾向を示した。基準面圧、振幅±100mm、インターバルありのすべり板温度は、長周期試験で 236～238℃、限界試験で 258℃まで上昇した。すべり板の温度と摩擦係数には比較的良い負の相関が確認された。

e) 弾性すべり支承（低摩擦）

面圧 20MPa 試験体では全 10 セットにわたり、面圧 30MPa 試験体では当初の 4~5 セットにわたり、各セットの摩擦係数の下限値にほとんど変化は見られず、エネルギー吸収量の変動もほとんどなかった。インターバル時間を 3 分としたセットでは、摩擦係数の回復は小さかったが、下限値に大きな変化はなかった。繰り返し依存性が小さい部材であることが明らかとなった。

f) 鋼材ダンパー

いずれのケースについても、0 度方向に設置された 2 本のダンパーロッドが相次いで破断し、その後、90 度方向のダンパーロッド 1 本が破断し、実験を終了した。ダンパーの降伏荷重は繰り

返しに伴い次第に小さくなり、ダンパーロッドが破断するたびに大きく低下した。1 サイクルの吸収エネルギー量は、一定振幅繰り返し載荷において破断に至る数回前のサイクルで 2 サイクル目に対して 85%程度になった。

g) 鉛ダンパー

一定振幅時では繰り返しにより降伏荷重は低下する傾向を示した。繰り返しによる水平荷重は、発熱のための温度変化および鉛の形状変化により変化する。また、荷重は振幅依存性があり、変位が大きくなるに応じて荷重値も増大する現象が確認された。また、破断に影響を及ぼすパラメータとして、加振の連続性ならびに加力方向がある。

h) オイルダンパー

多数回繰り返し加振直後の高温状態における基本特性（出荷試験の各速度における最大減衰力）の変化は小さく、初期状態（常温）に比べて最大でも 6%程度の低下であった。油温が常温状態に戻ると、基本特性は、ほぼ初期状態に復元した。

i) 粘性ダンパー

基本的に安定した形状の履歴ループが確認され、減衰材料としての機能が失われることはなかった。大局的には、減衰力（0 変位切片荷重）は各セット内およびセット間を通じて連続的に低下し、粘性体温度、外筒表面温度は連続的に上昇する傾向を示した。

２） 実大試験体の多数回繰り返し動的実験（第Ⅳ部、第Ⅴ部）

実験の対象とする実大免震部材は、弾性すべり支承（高摩擦）、鉛プラグ入り積層ゴム、高減衰ゴム系積層ゴム、オイルダンパーである。支承材については直径 1m 程度の実大免震部材を用い、大型震動台（E－ディフェンス）を利用した動的加振実験を実施した。支承材では、1 方向および 2 方向多数回繰り返し実験および地震応答波加振実験を、オイルダンパーでは、多数回繰り返し実験、高速度加振実験および地震応答波加振実験を行った。以下に、実験条件および実験結果を示す。

a) 実験条件

積層ゴム支承は φ1000、弾性すべり支承は φ800 の大きさの部材を用いた。弾性すべり支承は、積層ゴム支承よりも基準面圧が大きく、せん断力（摩擦力）が軸力に依存して変動するため、一定以上のせん断力を確保するため直径を小さめに設定した。

実験条件として、以下の項目を設定した。

1）長時間・大振幅動的繰り返し加力
2）鉛直載荷
3）水平 2 方向加力
4）破断実験

表 4 に、実験条件をまとめた。長時間・大振幅繰り返し加力については、加振振幅は、φ1000 の積層ゴム支承で、±40cm（せん断歪 200%）程度とし、加振時間は、4 秒周期で 30 回～60 回（累積変形で 50m～100m）程度とした。

また、震動台を加振機として利用したために、通常の加振実験と異なる点がいくつか見られた。我が国において、φ1000 程度の支承材の加振実験（実大試験体を用いた、軸力を作用させた状態での大振幅・大速度加振）については、E-ディフェンス震動台（(独）防災科学技術研究所）での

み実施可能であった。

表 4　実験条件の設定

実験条件	目標値	留意点
試験体寸法	・積層ゴム：φ1000 ・弾性すべり支承：φ800	・弾性すべり支承は、積層ゴムよりも基準面圧が大きいため、直径を小さく設定。
長時間・大振幅動的繰り返し加力	正弦波加振： ・±40cm ・4 秒周期で 30 回～60 回（累積変形で 50m～100m） 地震波加振： ・長周期地震動模擬波に対する免震建築物応答波を使用する。	・φ1000 積層ゴムでせん断歪 200%相当。 ・主梁方向を基本とする。 ・必要に応じて高次振動数成分をフィルター処理する。
鉛直載荷	・最大 5000kN*	・面圧変動の許容値は±20%程度を目標とするが、震動台の制御精度により決定する。
水平 2 方向加力	・各方向とも±40cm（せん断歪 200%）以下程度	・正弦波は、円軌道及び楕円軌道とする。 ・地震波は、2 方向応答波を使用する。
破断実験	・±90cm（せん断歪 450%）まで漸増加振（破断時の荷重は 6000kN、衝撃力 9000kN 程度）	・受け梁方向に加振する。 ・破断に至らない場合、それ以上振幅を増加させない。

*ロードセルの許容荷重を考慮して設定する。予備解析として鉛直加力時及び鉛直加力＋水平加力時のロードセルにかかる荷重分布を 3 次元 FEM 解析で検討し、載荷可能な鉛直軸力を設定し、実際の加振時に検証を行った。

震動台稼動時には、震動台周辺に人が近づくことが出来ないため、震動台から離れた位置から加力実験を行う必要がある。遠隔操作の油圧ジャッキにより試験体と反力フレームを固定し、コッター―でせん断力を伝達する機構を開発した。開発した機構は設計通りに機能し、震動台に人が近づかずに加力実験を実施することが出来た。

加力波形の作成にあたっては、無負荷時に試加振を行い、目標加力波形に対する震動台応答波形の誤差を評価して、誤差波形の逆位相波を用いて補償波を作成する方法が有効であった。水平方向の加振波形については、目標加力波形と震動台応答波形に殆ど誤差が見られなかったので、上下方向加力波形についてのみ逆位相波による補償を行った。

5000kN の導入軸力に対して水平方向加力初期に 500kN 程度の変動が見られるが、それ以後は 200kN 程度以内の軸力変動に収まっており、精度の高い加振が実現出来ている。

b) 弾性すべり支承

累積変形 50m の長周期試験を経験する前後で繰り返しによる影響を見ると、摩擦係数が初期の値から 42%程度まで低下した。各セット毎に繰り返しに伴って摩擦係数が低下する傾向が見られ、セット間のインターバルでは摩擦係数が回復（上昇）する傾向を確認した。

長周期試験終了後のすべり板温度は、長周期試験（1 方向）で 204℃、長周期試験（2 方向）で 220℃、それぞれ上昇した。PTFE 裏のバック鋼板部の温度上昇はすべり板に比べて上昇速度は緩やかであるものの、インターバルの影響もなく上昇が続き、加振後も温度上昇が続く傾向が確認された。

長周期および限界試験を経験したすべり支承試験体は、すべり面の PTFE に損傷は見られず健全な状態を保っていた。今回の試験では面圧が 10Mpa と低いことも有り、すべり面の温度上昇に伴う PTFE の軟化現象などは確認されなかった。

c) 鉛プラグ入り積層ゴム

各加振の前後に実施した基本特性試験より、加振による試験体温度の上昇とともに履歴ループが小さくなるが、温度低下に伴い、履歴ループも回復することが確認された。しかし、真円加振後に実施した基本特性試験の特性値は、他のケースに比べ低く、何らかの損傷が生じていた可能性が高いと考えられる。

正弦波 1 方向加振では、繰返し回数が増すごとに降伏荷重が低下し履歴ループが小さくなっているものの、安定したループを描いていることが確認された。降伏荷重は初期サイクルで大きく低下する傾向が見られたが、それ以降の低下は緩やかである。正弦波 1 方向繰返し加振（せん断ひずみ 200%、累積変形約 55m）では、降伏荷重は 55%まで低下した。2 次剛性の変化は小さく、変化量は最大で－4%程度であった。

正弦波 2 方向加振の楕円加振における主梁方向の荷重-変形関係は、受梁方向の振幅の影響により降伏荷重は小さくなっているものの、安定した履歴曲線を描いていた。楕円加振では、正弦波 1 方向加振の約 2 倍となる 100m の累積変形を与えたところ、降伏荷重は累積変形 50m 程度で 40%程度まで低下した。しかし、それ以降も降伏荷重は大きく低下することはなく、ある一定の値に収束することが明らかとなった。

正弦波 2 方向加振の楕円加振の受梁方向加振、真円加振においては、主梁・受梁方向加振ともに履歴ループ面積の殆どない履歴曲線が得られた。試験終了後に鉛プラグが 3 層に分断されていたことが確認され、真円加振あるいは楕円加振の過酷な加振によって分断が生じたものと推察される。

正弦波 1 方向多数回繰返し加振では、鉛中央温度は加振開始と同時に急上昇し、加振が終了すると直ちに温度が低下し始めていた。これに対し、鉛上部やフランジ中央の温度上昇は緩やかで、加振終了後も温度が上昇し続けていた。これは、鉛中央で発生した熱が、徐々に鉛内部を通ってフランジに熱伝導されているためである。フランジ端部や被覆ゴム内部の温度はほとんど上昇しなかった。

地震応答波 1 方向と 2 方向では、温度上昇に明確な差は現れなかった。2 方向加振開始時の試験体温度が高かったことや、受梁方向のせん断ひずみが 70%程度と小さく温度上昇に寄与しなかったことが原因と推察される。

d) 高減衰ゴム系積層ゴム

各加振ケースの間に実施した、基本特性試験の履歴ループを比較すると、加振による温度上昇とともに最大荷重の低下とループ面積の減少が見られた。また上昇した温度が低下することで、特性の回復が見られた。

水平 1 方向繰返し加振、水平 2 方向繰返し加振とも、加振により履歴ループが細くなった。1 方向繰返し加振時には、最大変位時の荷重の低下が顕著であるが、2 方向加振時では最大変位時の荷重はあまり低下せず、荷重切片の低下が見られた。2 方向繰返し加振時の水平荷重の推移においては、弾性成分は全加振にわたりほぼ一定であったが、減衰成分は加振が進むにつれて減少する傾向が見られた。

地震応答波の 1 方向入力によるゴム温度(試験体ゴム部中心温度)の上昇は、NS 入力時で 1.3℃、EW 入力時で 2.7℃、2 方向同時入力時で 3.6℃であった。また、地震応答波 2 方向の 4 回連続入力によるゴム温度の上昇は 13℃であり、最高ゴム温度は 37℃であった。楕円加振によるゴム温度の上昇は、インターバルをはさまない 5 サイクル加振で 10℃弱であり、5 サイクル×12 回の加振でゴム温度は 74℃まで上昇した。真円加振によるゴム温度の上昇は、インターバルをはさまない 3 サイクル加振で 10℃強であり、3 サイクル×7 回の加振でゴム温度は 86℃まで上昇した。

地震応答波加振における試験体の温度上昇は、正弦波加振に比べると小さかった。楕円加振、真円加振においては、直交方向の加振の影響から、1 方向加振時と比較して履歴ループ形状の顕著な変化が見られた。一方、地震応答波加振においては、1 方向入力時と 2 方向同時入力時の履歴ループ形状の違いはわずかであり、2 方向加振の影響は非常に小さかった。

楕円加振、真円加振においては、ねじれひずみの発生が確認され、画像解析による最大ねじれひずみは楕円加振時で約 80%、真円加振時で約 100%であった。また、加振終了後の試験体においてもねじれひずみの残留が見られた。

本実験においては、真円加振の 3 サイクル×3 回目の加振で上フランジ直下に内部剥離の兆候が見られ、その後の加振により内部剥離の拡大と被覆ゴムの破れが生じた。真円加振による局所的な引張せん断状態が損傷の要因と考えられる。ただし、本実験は試験体が 1 体のみであり、また試験体の冷却に十分な時間を確保できなかったことから、本実験における試験体の損傷は、高温状態で厳しい加振ケースを繰り返したことによる試験体の疲労の影響が大きいと推測される。

e) オイルダンパー

限界加振（累積変形量約 100m）による油温上昇量は 93.6℃（油温 14.6℃→108.2℃）であった。本体（ベースシェル）表面温度も、ロッド側の測点で 102.1℃となったが、履歴性状の変化は小さく、また、シール部から作動油の滲みだしは見られなかった。

多数繰り返し加振による油温の上昇に伴い、最大減衰力と吸収エネルギー量は僅かに低下する傾向が見られた。常温（20℃）に対する最大減衰力の低下率は、油温（108℃）においても伸び側・縮み側共に約 4%であった。また、エネルギー吸収量の低下率は、油温（108℃）において約 5%の低下であった。

大変形・大速度試験では、各加振の 1 波目では正常な減衰力-変位特性が得られたが、2 波目では圧縮側の減衰力に立ち上がり遅れ（無効ストローク）が発生した。

f) 実験手法等に関する課題

本実験では、試験体が 1 体であったことや、時間の制約があり試験体の冷却時間が十分に取れなかったことから、高温状態において、想定される長周期地震動を大きく超える変位履歴を与え

るという、非常に厳しい実験条件となった。さらには、楕円加振や円加振など、かなり厳しい条件が設定されたため、2 方向加振時の繰返しによる特性変動と限界性能、および疲労の蓄積による特性変動と限界性能を分離して評価できるよう、複数の試験体を用いた検討が必要である。

また実験結果のシミュレーション解析結果では 1 方向加振結果（正弦波加振、地震応答波加振）や 2 方向加振結果のうち地震応答波加振については積層ゴムの内部温度や荷重変形関係、降伏荷重の変化について実験結果と解析結果とでよく一致した。しかし、2 方向加振結果のうち楕円加振、真円加振については実験結果と解析結果とで乖離が見られた。実験時に見られた荷重変形関係の履歴面積が小さくなる現象のシミュレーション解析やその特性変化が地震応答に与える影響評価については課題として残る。

（ハ）免震部材のモデル化と長周期地震動に対する免震建築物の応答評価

長周期地震動に対する免震建築物の安全性照査のクライテリア設定に向けて、多数回繰り返し時の免震部材のモデル化および免震部材の特性を考慮した応答評価を実施した。さらに、免震部材の繰り返し依存性を考慮した場合としない場合の比較を通して、各免震部材の繰り返し依存性の影響について検討した。時刻歴解析における繰り返し依存性を考慮する方法については、詳細に考慮する方法および簡易的に取り込む手法などを設定した。

１）免震部材の繰り返し特性のモデル化

縮小、実大のエネルギー吸収性能の実験結果、既往の知見等を踏まえて、免震部材特性の評価に基づいたモデル化を行った。また免震部材の動的実験を踏まえ、繰り返し依存性モデルについては、適宜修正を加えている。

２）詳細モデルを用いた免震建築物の応答評価

検討用長周期地震動に対する応答解析結果を整理した。長周期地震動として、想定地震動に対して入力倍率を 1.0 倍、1.25 倍、1.5 倍と大きく設定し、繰り返し依存性の応答への影響を確認した。

解析モデルは上部構造を剛体モデルとした 1 質点モデルとし、免震層の設定は積層ゴムによる免震周期 4.0 秒程度、ダンパーの負担せん断力係数 3.0～3.5%を標準とし、支承材毎に設定を行なった。

a) 鉛プラグ入り積層ゴム

鉛プラグ入り積層ゴムを用いた免震建築物の地震応答解析では、熱伝導方程式と運動方程式を並行して解く、時刻歴応答解析法を用いた。地震入力エネルギーは、すべて鉛プラグ部での発熱となると仮定し、鉛プラグから積層ゴム部、フランジ、上下基礎への熱エネルギーの拡散を考慮する。また、鉛プラグの温度−降伏荷重関係は、既往の提案式に基づいて設定した。

鉛プラグ入り積層ゴムを用いた免震建築物の場合、地震動の 1 方向入力（入力倍率が 1.0 倍）の場合、繰り返しによる変位増大率は 0.94～1.18 倍である。入力倍率が 1.5 倍の場合に、変位増大率が 1.38 倍となるケースがあるものの、積層ゴムのせん断ひずみはγ=100%（水平変位 20cm）以内となった。

地震動の 2 方向入力時には免震層の応答最大水平変位は入力エネルギーが大きい地震動の場合、繰り返し非考慮に対し、考慮時には X 方向で 1.65 倍、Y 方向で 1.94 倍と大きくなった。

b) 高減衰ゴム系積層ゴム

高減衰ゴム系積層ゴムの等価剛性および等価粘性減衰定数は、温度によって値が変化するため、多数回繰返し時の積層ゴムの特性値を変化させる必要がある。高減衰ゴム系積層ゴムの繰返しによる特性変化について、等価剛性等を累積履歴エネルギー吸収量の関数として評価する既往の実験式を用いた。

免震部材の繰り返し依存性を考慮しない場合と考慮する場合の免震層の最大応答値を比較すると、ほとんどのケースで考慮する場合の方が、考慮しない場合に対し 10～20%程度免震層変位が大きくなる結果が得られた。

３）多数回繰り返し特性を簡易的に取り扱う場合の免震建築物の応答評価

免震部材の多数回繰り返し依存性を簡易的に取り扱う場合の免震建築物の応答評価を行った。検討用長周期地震動は、南海トラフにおける三連動地震で設定される地震動の振幅を 1.0 倍、1.25 倍、1.5 倍としたものと、新たに作成された四連動地震で設定される地震動を用いた。

地震応答解析は１質点系モデルにより実施し、繰り返しによる特性変化の方法をいくつか設定した。時々刻々変化する免震部材の特性を考慮する詳細解析手法（詳細法、手法１）、エネルギーの釣合を基にした包絡解析法による簡易応答評価法を用いる手法（簡易法、手法２）、免震部材の累積吸収エネルギーを算定し、繰り返しの影響を一定とした値を用いて時刻歴応答計算を行う方法である。地震終了時の累積吸収エネルギーを用いる場合（簡易法、手法３）および免震層の水平変形が最大となった時刻までの累積吸収エネルギーを用いる場合（簡易法、手法３’）である。

a) 鉛プラグ入り積層ゴム

簡易法（手法２、手法３および手法３’）による応答結果は、詳細法による応答結果と良い対応を示すケースもあるが、地震動の特性によっては過大、過小評価するケースも見られ、簡易法の適用については解析対象の免震システムと入力地震動の関係によっては応答評価精度が異なる可能性があるため注意が必要である。

b) 高減衰ゴム系積層ゴム

繰り返し依存性による高減衰ゴム系積層ゴムの特性変動を簡易的に評価する手法として、累積吸収エネルギーの値(解析終了時の 95%値)を基に、高減衰ゴム系積層ゴムの等価剛性および等価減衰定数の低下率を設定した。

簡易法（手法３’）による解析結果は、繰り返し依存性を考慮しない解析結果に比べて、免震層の最大変位と累積変形量を増大させ、繰り返し依存性を時々刻々と考慮する詳細法の結果に近い応答値を与えることを確認した。

c) 鉛ダンパー

ダンパー1 台あたりの累積吸収エネルギーは、簡易法（手法３と手法３‘とも）では、詳細法に比べて、1 割以内の差であったが、条件によっては、簡略法の結果が過小評価となる場合があるため、ダンパーの累積吸収エネルギー能力に対する評価において、簡略法による解析に基づく場合には、安全率等を考慮するなどの配慮が必要である。

d) 弾性すべり支承（高摩擦）

既往の設計モデル(基準摩擦係数μo)に対して、累積すべり変位依存性モデルでは、繰り返し挙動に伴う摩擦係数の低下により応答変形が増幅する傾向にある。簡易法では、累積すべり変位と摩擦係数の関係式を用いて、最大変形時の累積すべり変位に基づく摩擦係数を用いた。その結果、

詳細法における応答最大変形と摩擦係数を一定値とした簡易法のそれが概ね一致し、簡易法の妥当性が確認された。

（ニ）免震建築物の地震観測と挙動調査

１）免震建築物の地震観測とデータ解析

長周期地震動の発生が予想される地点（東京・大阪）に建設されている免震建築物をそれぞれ１棟選定し、建物及びその周辺地盤に地震計等を設置して、長周期地震動が免震建築物の応答に及ぼす影響を把握することを目的とし、1棟ずつの免震建築物の地震観測を継続し、記録の整理・分析を行った。

東京の建物では、2010 年度 85 件、2011 年度 87 件、2012 年度 29 件、計 201 件の観測記録が得られ、免震構造としての効果が確認された。また、2011 年 3 月 11 日東北地方太平洋沖地震時の建物応答の再現（シミュレーション）を試みた。シミュレーション解析では、設計値通りに設定したケースに加え、免震部材の製造時のばらつき、温度変化、経年変化を考慮したケースと、地震発生当日の環境温度や建屋の状態を考慮した解析ケースを設定して解析を行った。解析結果は、X 方向についてはまだ検討の余地を残した結果となったが、Y 方向については地震発生当日の状態を考慮した解析結果は、観測記録と良い対応を示した。

東京の建物の解析モデルを用いて、南海トラフでの巨大地震時の応答を確認した。東北地方太平洋沖地震本震時の応答と比較すると、3 連動地震（平均）時には免震層の最大変位は 2 割程度大きく、免震層より上層の加速度は 0.5～1.0 倍程度となった。また、3 連動地震（平均＋標準偏差）や 4 連動地震発生時の最大変位は 3 倍程度であるものの、免震層より上層の加速度は 1.0 倍～2.0 倍程度であった。

２）免震建築物の挙動調査

a) 公表地震記録の収集・分析

東北地方太平洋沖地震による免震建築物の地震観測結果を収集し、分析した。データの総数は 65 であり、建物用途は事務所が最も多く、続いて共同住宅であった。竣工年では 2000 年以降の建築物が最も多い。しかし 1988 年以前の割合も比較的多く、固有周期は 2 秒以下の建築物も含まれる。収集したデータの分析結果から以下の知見が得られた。

免震層下の水平加速度は 6～756 cm/s^2 の範囲であり、震央距離 350km を境界に 250cm/s^2 を超えるデータとそれ以下とに大きく分けることが出来る。免震層下の水平加速度が大きくなっても、免震層直上階と最上階の水平加速度は概ね 250 cm/s^2 で頭打ちとなった。

入力加速度が大きい程、免震層の変位は大きくなる傾向が見られた。免震層の変位は震央距離 350km 以内の地域では 5～24cm、震央距離 350km 以上の地域では 5cm 前後の場合が多い

累積変位は最大変位の約 100 倍であった。変位履歴は、変位計の記録または加速度記録の積分により免震層の変位履歴を得たが、罫書き変位計でも同様の情報を得る事が出来た。

b) 免震建築物の観測記録に基づく本震・余震時の応答性状

東北地方太平洋沖地震の後に発生した余震を対象とし、これらの地震が免震建築物に与えた影響を把握するため、観測記録に基づく建物挙動を分析した。検討の対象とした建物は、事業者から提供された免震建築物 6 棟とし、観測結果から得られた加速度、免震層変位あるいは計測震度が一定の水準以上となる余震に対して、加速度、免震層変位、免震層累積変位ならびに建物の固

有周期と減衰定数について整理した。本検討から得られた主な知見は以下の通りである。

地震の全継続時間ならびに主要動継続時間（地震動による総エネルギー入力の 5%～95%に相当する時間）における免震層の累積変位を算定した。主要動継続時間における免震層の累積変位は全継続時間の値と比較して概ね 60～85%程度となっていた。また、余震の主要動継続時間における免震層の累積変位の総和（総累積変位）を、本震の累積変位と比較すると、余震の総累積変位は本震の累積変位に対して、50～114%の範囲であり、免震建築物が複数の余震による揺れを受けることで、本震に匹敵するあるいはそれを上回る累積変位が免震層に生じる可能性があることが明らかとなった。

建物の固有周期と減衰定数を ARX 法などを用いて同定した。固有周期については、いずれの建物についても、本震における値が最大（1.0～2.5 秒）となる。また、基礎（ピット）における入力加速度が大きくなるほど固有周期が大きくなる傾向があるが、余震による固有周期の変化は小さい。減衰定数についても、固有周期と同様の入力加速度に対する傾向が認められるが、地震動に対するばらつきが大きかった。

（参考）

図 2 に免震構造の概要を示す。免震建築物は、大きく分けると上部構造、免震層、下部構造（基礎構造）で構成される。上部構造の最下階と基礎構造の間に、免震層を設置する場合は、基礎免震構造と呼ばれる。

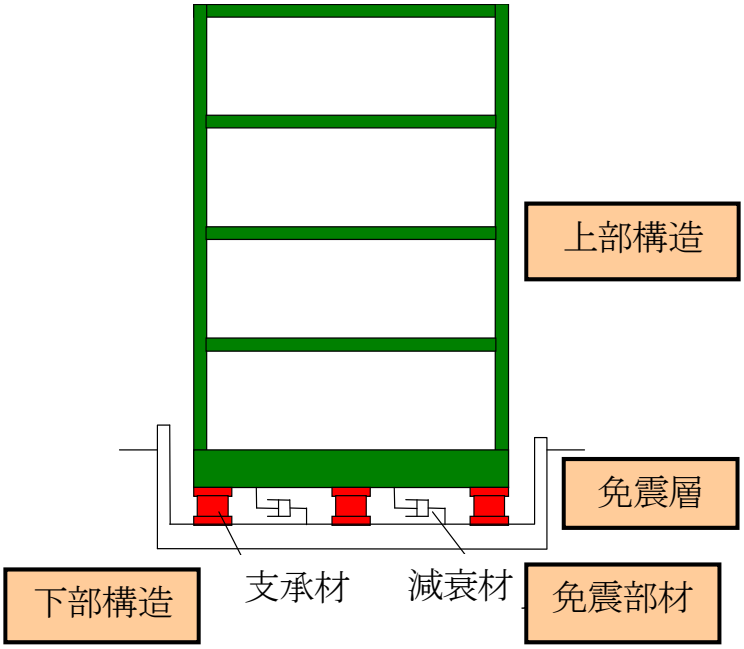


図 2　免震構造の概要

免震層には、免震部材（建築基準法令では、免震材料）が設置され、主に、支承材（アイソレータ）と減衰材（ダンパー）が用いられる。支承材は、水平方向に大きく変形（または移動）するとともに、減衰効果を有する部材もある。また上部構造の重量や積載荷重を支持する役割を持つ。支承材には、積層ゴム（天然ゴム系積層ゴム、鉛プラグ入り積層ゴム、高減衰ゴム系積層ゴムなど)、すべり支承および転がり支承などがある。

減衰材は、水平方向に大きく変形し、減衰効果を有する部材である。減衰材には、鋼材、鉛材などを用いた非線形な荷重・変位関係を有する履歴型減衰材とオイル・粘性体などの流体・粘性抵抗を用いた速度型減衰材などがある。

（備考）

本資料では、市場に供給された支承材及び減衰材を試験体として使用した場合には、製品名を表記している場合がある。特定の製品に利する意図はなく、試験体の具体的仕様を明らかにする上で効果的と考え、これらをそのまま掲載することとした。

第Ⅱ部

免震部材のエネルギー吸収性能に関する既往の知見

第１章　長周期地震動に対する免震部材の特性評価に関する検討

長周期地震動への対応として、地震動の長周期成分が免震建築の応答に与える影響及び長時間継続する波形に対する免震部材のエネルギー吸収性能の評価方法を明確にすることを目的として、ここでは、図 1-1 に示す項目について調査を行いまとめた。

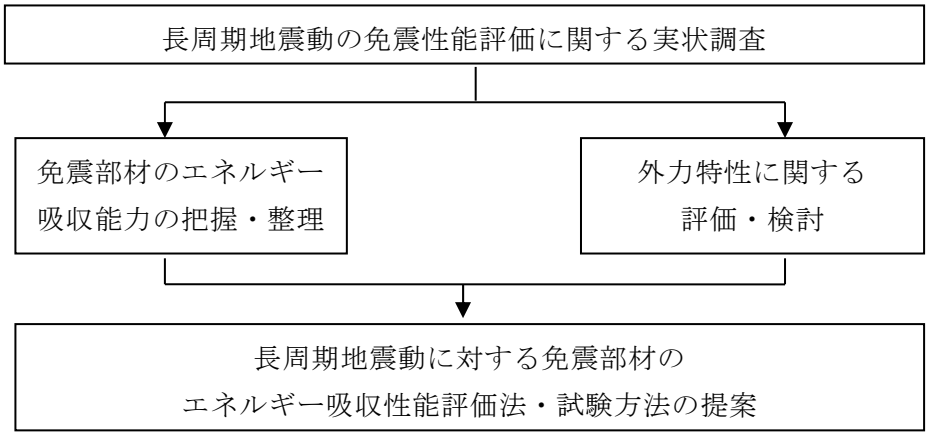


図 1-1 調査概要

1.1　長周期地震動の免震性能評価に関する実状調査

近年の巨大地震の発生に伴い発生すると予想される長周期地震動に対して、免震層が従来の地震動応答に比較して多くの繰り返し変形を受けた場合に、免震部材のエネルギー吸収性能における懸念が提起されている。

長周期地震動の免震性能評価に関する実状調査として、主に文献 1.1-1)を参考に概要を整理した。

1.1.1　長周期地震動に対する免震建築物の検討課題

文献 1.1-1)では、長周期地震動として表 1.1-1 に示す 13 波を取り上げ、これらを用いて長周期地震動の特性と免震建築物の安全性に関する検討課題を整理している。

選択された 13 波の特徴として、最大加速度は 500cm/s^2 以下、最大速度は 70cm/s 以下であるが、継続時間が長く、東海・東南海地震の名古屋や南海地震の大阪では大きな揺れが数分間継続することが挙げられている。速度応答スペクトルで見ると、名古屋三の丸波では 3 秒、大阪では 5 秒にピークがあり、そのピーク値は従来設計で採用されてきた地震波より大きいことから、免震建築物では、免震層に大きな変形が生じる可能性があるとされる。また、エネルギースペクトルにも長周期域で高いピークが見られ、同程度の最大速度振幅であっても長周期成分の方がエネルギースペクトルは大きくなる傾向があることが明らかにされている。即ち、長周期成分の波が長時間継続することで、免震層の減衰が小さい場合には、大振幅が多数繰り返えされ、免震部材に何らかの影響を及ぼす可能性が有るとしている。

以上から、巨大地震時の免震建築物の検討課題としては以下の項目が挙げられている。

① 巨大地震に対する免震建築物の応答評価

② 過大変形や大振幅多数繰り返しによる極限挙動に対する安全性評価
③ 性能向上方策の提案

表 1.1-1　検討用長周期地震波一覧 [1.1-1)]

地震	地点	地震波名	最大加速度 (cm/s^2)	最大速度 (cm/s)	計測震度	継続時間 (s)
関東	東京・気象庁	TS-TOK-NS	244.5	34.2	5.0	77.1
	横浜 MM	TS-YKL-NS	499.2	69.7	5.7	24.0
東海	新宿	KH-SNJ-NS	143.5	38.8	4.8	72.5
	新豊洲	KH-STY-NS	89.9	31.6	4.4	76.8
	横浜	KH-YKH-NS	127.2	40.8	4.8	75.9
東海・東南海	名古屋三の丸	C-SAN-EW	185.9	50.5	5.2	119.9
	名古屋駅	A-NST-EW	116.8	30.3	5.0	80.6
	水上出張所	A-SJB-EW	187.4	54.0	5.3	85.6
南海	大阪管区気象台	KK-OSA-NS	68.3	28.3	4.5	214.1
	西大阪	KK-WOS-EW	69.3	24.8	4.6	179.4
	大阪・福島	HS6-FKS-NS	120.6	50.6	4.6	160.9
	K-NET 大阪	HS6-OSK005-EW	75.0	30.9	4.2	161.4
	K-NET 此花	HS6-OSKH02-NS	86.6	46.4	4.5	150.6

1.1.2　免震建築物に関する既往の研究

文献 1.1-1)では、巨大地震の際の免震建築物の地震時挙動として、以下の①～③に示す３つの事象を想定しそれぞれについての知見と技術の現況を整理している。

① 免震建築物の擁壁への衝突と積層ゴムの損傷

免震層に過大な変形が生じ擁壁に衝突する場合、衝突時の衝撃により、上部構造が塑性化する可能性がある。衝突時の応答は擁壁の剛性と耐力に大きく影響される。これまでにも背後の地盤の影響を含めた擁壁の抵抗特性に応じた衝突の影響について解析的な検討がなされているが､擁壁の抵抗特性に関するモデル化の妥当性が必ずしも明確にされていない現状にあっては、これらの検討結果の信頼性も低くなることは否めない。

② 積層ゴムの引張破断・座屈と上部構造の浮き上り

塔状比が大きくなると転倒モーメントの増大により､引張側では､積層ゴムに引張力が生じ、圧縮側では、圧縮軸力によって座屈する可能性が高くなる。

また、引張力が生じて浮き上った場合に、再び着地する際には上下方向に大きな加速度が生じることが報告されている。

積層ゴムが座屈破断に至る場合は、水平荷重が大きく低下し、水平変位の増大とともに沈み込みが増大する。一方、引張破断に至る場合では、引張側の変形が増大するに伴い、積層ゴムにハードニングが生じる。

上記のように積層ゴムの引張力の発生は、転倒モーメントによる変動軸力が支配的な要因であるが、引張力発生を回避する方法として、積層ゴムの取り付けディテールに関する研究、あるいは引張力が作用しても損傷が少ない積層ゴムの開発が行われている。

③ 上部構造の損傷

過大な応答による擁壁の衝突、積層ゴムの損傷、衝突に至らない領域でのハードニングは、いずれも免震効果を低減させるものである。これらの状態では、上部構造への地震力は増大し、弾性限耐力を超えれば上部構造は損傷を受ける。また、想定以上の地震入力に対して、上部構造が塑性化した場合には、変形が急激に増大するという振動特性を有していることに関する議論は数例の考察のみであり、今後詳細な検討を要する。

1.1.3 免震部材に関する既往の研究

巨大地震の際には免震部材に大変形が強いられ、更に地震動の性質のうち、長周期成分と継続時間の長さが、免震部材に大振幅の多数回繰り返し変形という過酷な状況を与えることになる。

積層ゴムの疲労特性については、減衰機能内包型の積層ゴム（鉛プラグ入り積層ゴム、高減衰ゴム系積層ゴムなど）において留意する必要があり、積層ゴム内部の温度上昇による復元力特性の劣化の可能性が指摘されている。また、ダンパーにおいても同様に、破断までの繰り返し回数や、エネルギー吸収性能評価が行われている。

これらの詳細については、後述の 1.2 章にて記述する。

1.1.4 地震応答解析に関する既往の研究

免震建築物がわが国に実現してから 20 年以上経過するが、その間にも免震技術の発展や、法改正、審査基準における変遷があった。このような状況を踏まえ、文献 1.1-1)では、免震建築物の建設年代を、以下の 4 期に区分している。

第 1 期　草創期：　～1988 年
第 2 期　阪神・淡路大震災前：　1989～1994 年
第 3 期　阪神・淡路大震災後：　1995～1999 年
第 4 期　建築基準法改正後：　2000 年～

文献 1.1-1)では、各年代の免震建築物について表 1.1-1 に示す長周期地震動を用いた地震応答解析が行われ、年代ごとの応答特性がまとめられている。ただし、第 1 期については絶対数が少ないため検討の適用対象外としている。

これによると、第 2 期の免震建築物では、上部構造において、名古屋三の丸波による地震応答が設計用せん断力及び層間変形角(1/200)を上回る場合があること、この結果は免震建築物の周期と地震動の約 3 秒の卓越周期が近接し共振状態に陥ったためであること、免震層（40cm のクリアランス）も衝突が避けられないこと等の結果が示されている。なお、免震層に衝突が生じた場合でも、積層ゴムの変形能力に着目すると、取り上げた免震建築物では採用している積層ゴムはφ800、φ1100 で、積層ゴムのせん断ひずみが 250%以下であり問題は少ないとしてい

る。

ダンパーについては、いずれの年代の免震建築物でも最大変形は問題無いとしている。ただし、ダンパーの吸収エネルギーに着目した場合、第 2 期免震建築物では名古屋三の丸波と告示波（八戸位相）に対する応答を比較すると、等価速度 V_E 比で 2.5 倍、エネルギー量で 6 倍強となり、鋼材ダンパーや鉛ダンパーが破断には至らないものの余裕が少ないと見なされている。第 3 期免震建築物においては、鉛プラグ入り積層ゴムの鉛プラグが吸収したエネルギー量は、名古屋三の丸波は告示波の約 5 倍で温度上昇に伴う影響が懸念されるとしている。第 4 期免震建築物では、等価速度 V_E が第 2 期、第 3 期のものに比べてかなり小さく、免震層の応答変位も水平クリアランスを十分下回る結果が示されている。

以上に示す文献 1.1-1)の解析的検討では、積層ゴムの変形、引張、擁壁の衝突、上部構造の過大な層間変位などの応答が見られたのは、ごく一部に限られていた、との結果が得られている。ただし、同文献中において、これらは年代別の平均的な免震建築物モデルに対しての応答結果であり、全ての可能性を網羅したものではないことに注意が必要であるとも言及されている。

1.1.5　応答評価に関する既往の研究

長周期地震動に対する免震建築物の地震応答特性と免震部材に求められるエネルギー吸収能力を評価するには、免震建築物への地震入力エネルギーと免震層で吸収されるエネルギーの釣合いから検討を加えることが一つの有力な手段となる。本報告書においても随所においてエネルギーの釣合いに基づく検討を行っていることから、ここで、エネルギーの釣り合いに基づく方法を概観しておくこととする。

(1)　長周期地震動に対する応答予測式 1.1-1)

免震建築物では免震層で全ての地震エネルギーを吸収すると仮定し、免震層の復元力特性を、線形弾性性状を示す支承材と完全弾塑性復元力特性を示すダンパーにモデル化すると式(1.1-1)のような釣合い式になる。

$$ {}_{D}W_e + {}_{D}W_p = E_D \tag{1.1-1}$$

ここで、${}_{D}W_e$ は支承材の弾性振動エネルギー

${}_{D}W_p$ はダンパーによる履歴減衰エネルギー

E_D は免震建築物への総エネルギー入力

ダンパーが消費するエネルギーが、最大変形 δ_{max} の定振幅で消費するエネルギーの何ループ分に相当するかを示した値 n_1 を用いて、累積塑性変形量 ${}_{s}\delta_{p}$ と最大変形 δ_{max} は式(1.1-2)のように表される。

$$ {}_{s}\delta_{p} = 4n_1 \cdot \delta_{max} \tag{1.1-2}$$

${}_{D}W_p$ は、ダンパーの降伏荷重を ${}_{s}Q_y$ とすれば式(1.1-3)が得られる。

$$ {}_{D}W_p = {}_{s}Q_y \cdot {}_{s}\delta_{p} = 4n_1 \cdot {}_{s}Q_y \cdot \delta_{max} = 4n_1 \frac{{}_{s}Q_y \cdot {}_{f}Q_{max}}{k_f} \tag{1.1-3}$$

ここで、${}_{f}Q_{max}$ は支承材が負担するせん断力、k_f は線形バネである。

${}_{D}W_e$ は、支承材により吸収されるエネルギーとして式(1.1-4)で求められる。

$$ {}_{D}W_{e}=\frac{{}_{f}Q_{max}\cdot\ \delta_{max}}{2}=\frac{{}_{f}Q_{max}^{2}}{2k_{f}} \tag{1.1-4} $$

免震構造のエネルギー釣合い式の式(1.1-1)に式(1.1-3)、(1.1-4)を代入する。

$$ \frac{{}_{f}Q_{max}^{2}+8n_{1}\cdot{}_{s}Q_{y}\cdot{}_{f}Q_{max}}{2k_{f}}=E_{D} \tag{1.1-5} $$

式(1.1-5)を解くことで、免震層における最大変形δ_{max}は式(1.1-6)になる。

$$ \delta_{max}=\frac{{}_{f}Q_{max}}{k_{f}}=-4n_{1}\cdot\frac{{}_{s}Q_{y}}{k_{f}}+\sqrt{\left(4n_{1}\cdot\frac{{}_{s}Q_{y}}{k_{f}}\right)^{2}+2\frac{E_{D}}{k_{f}}} \tag{1.1-6} $$

同様に、免震層における全せん断力Qが式(1.1-7)のように求まる。

$$ Q={}_{f}Q_{max}+{}_{s}Q_{y}=-(4n_{1}-1){}_{s}Q_{y}+\sqrt{(4n_{1}\cdot{}_{s}Q_{y})^{2}+2k_{f}\cdot E_{D}} \tag{1.1-7} $$

式(1.1-6)及び(1.1-7)を適用するにあたっては、長周期地震動における等価繰り返し数n_1を設定する必要がある。n_1は数値解析より${}_{D}W_{p}$、δ_{max}が与えられれば式(1.1-8)で得られる。

$$ n_{1}=\frac{{}_{D}W_{p}}{4{}_{s}Q_{y}\delta_{max}} \tag{1.1-8} $$

文献 1.1-1)では、長周期地震動として 2003Tomakomai NS 波、大阪管区気象台波、西大阪波、名古屋三の丸波、東京・気象庁波、横浜 MM 波、Art Toma 波の 7 波を選び、標準波として 1940El Centro NS 波、1968Hachinohe EW は、1995JMA Kobe NS 波、Art Hachi 波を採用した上で、最下層に天然ゴム系積層ゴム（以下 NRB）、又は、鉛プラグ入り積層ゴム（以下 LRB）を設置した 5 層免震モデルに対する地震応答解析からn_1を求めている。その結果、n_1の下限値として、標準波の場合、n_1=2.0、長周期地震動のうち名古屋三の丸波、大阪管区気象台波、西大阪波、Art Toma 波ではn_1=4.5 となるとしている。また、n_1を変えることで、標準波と同様に最大応答値が予測できることが示されている。

(2) ダンパーの累積塑性変形量

地震エネルギーは、最終的にはダンパーで全て吸収される。そのため${}_{D}W_{p}=E_{D}$となり、ダンパーの累積塑性変形量は式(1.1-9)のようになる。

$$ \delta_{p}=\frac{V_{E}^{2}}{2g\alpha_{s}} \tag{1.1-9} $$

上式は、ダンパー量が少ない場合には、地震エネルギーを吸収するために必要となる累積塑性変形量は非常に大きくなることを意味する。

レベル２程度の地震動に対する V_E は 150cm/s 程度であり、ダンパーの降伏せん断力係数α_sが 0.03 以上あれば、同式によると、ダンパーに必要な累積塑性変形量としては 5m くらいとなる。さらに V_E=400cm/s のレベルであっても、必要な累積塑性変形量δ_pは 30m 以下となる。しかし、α_sが 0.03 よりも小さい場合には、累積塑性変形量が数十 m に達するため注意が必要となる。

累積塑性変形量は、加振変位と加振回数の積の 4 倍となる。加振変位±20cm で 40 サイクルも繰返せば累積変位量は約 30m に達する。

免震部材によっては加振振幅の大きさによってエネルギー吸収特性に違いが出る材料もあるので、いくつかの加振振幅レベルでのエネルギー吸収特性の検証も必要と考えられる。

文献 1.1-1)の長周期地震動のエネルギースペクトルによれば、V_E の最大値は 300～400cm/s と推定され、V_E＝300～400cm/s に対する最大変形量は 50～60cm、累積変形量は 20～30m 程度となり、エネルギー吸収能力を確認する際には、この程度の繰り返し試験を少なくとも行う必要があると言える。なお、継続時間の長い地震動を想定する場合は、エネルギー吸収に伴う発熱が性能に与える影響についても検証が必要と考えられる。

参考文献

1.1-1） 日本建築学会：長周期地震動と建築物の耐震性、pp221～264、2007.12

1.2　免震部材のエネルギー吸収性能評価

各種免震部材のエネルギー吸収性能における現状の知見については、文献 1.2-1）において紹介されている。これらを当文献から引用して以下の 1.2.1～1.2.5 までに示す。

1.2.1　積層ゴム支承

対象とする積層ゴムは、鉛プラグ入り積層ゴム（以下 LRB）と高減衰ゴム系積層ゴム（以下 HDR）である。減衰機能が付加された積層ゴム支承の共通点としては、繰り返し履歴を受けることによって、封かんされた鉛プラグまたはゴム自体に発熱が生じる。発熱量に応じて積層ゴムの履歴特性に変化を与えるものと考えられる。

(1)　試験体

試験装置の能力の都合上、表 1.2-1 と図 1.2-1 に示す縮小モデルを使用した。HDR 試験体は図 1.2-1 において中心の鉛プラグがない形状である。また、試験体の内部温度を測定するために熱電対を設置した。

表 1.2-1　試験体の概要 [1.2-1)]

	LRB	HDR
外径／鉛径	φ225mm／φ45mm	
ゴム材料	天然ゴム G0.4 (G＝0.39N/mm^2)	高減衰ゴム E0.6 (G＝0.62N/mm^2)
内部ゴム	t2.0mm×22 層＝44.0mm	
内部鋼板	t1.2mm×21 層	
形状係数	S_1=28.1／S_2=5.11	

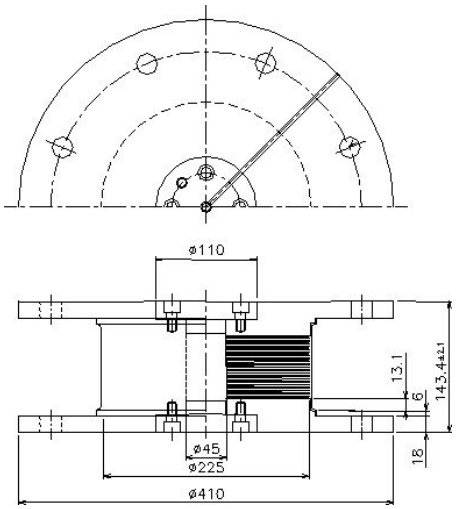


図 1.2-1　LRB 試験体の図面

(2)　試験内容

試験は、面圧 8N/mm^2 下での圧縮せん断試験とし、せん断変形率 200%（88mm 変形）で 200 サイクルの加振を基本とした。累積変形量は約 70m となる。加振振動数は 0.33Hz とした。写真 1.2-1 に積層ゴムの設置状況を示す。試験体の上下には日本ディー・エム・イー社製 D-M-E 標準高温用断熱板（厚さ 10mm)を挿入した。積層ゴムのフランジと試験装置面盤との間にある青い板が断熱板である。

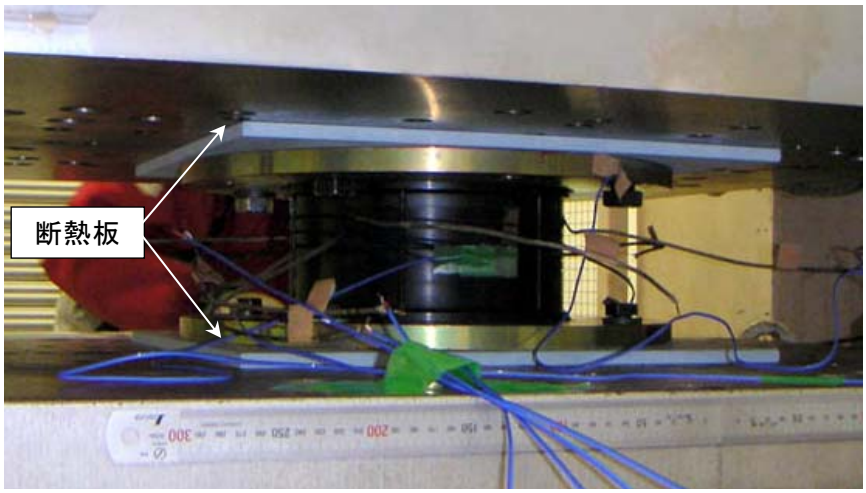


写真 1.2-1　積層ゴムの試験状況 [1.2-1)]

(3)　試験結果

図 1.2-2 と図 1.2-3 に、せん断歪み 200%で 200 サイクルの加振を行ったときの荷重変形関係を示す。LRB 試験体は、繰り返し変形に伴い、降伏荷重（または切片荷重（変位零点の水平荷重））が低下するものの、降伏後剛性はあまり変化しないことがわかる。一方、HDR 試験体は、繰り返し変形に伴い、降伏荷重が低下し、降伏後剛性も低下することがわかる。

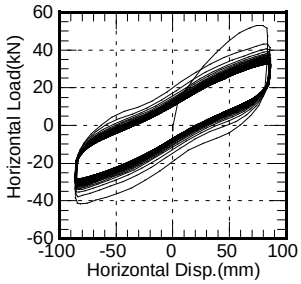


図 1.2-2　LRB 試験体の荷重変形関係 [1.2-1)]

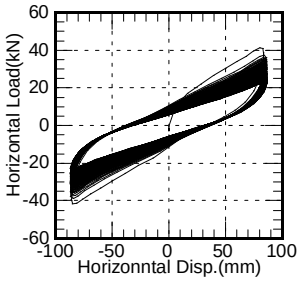


図 1.2-3　HDR 試験体の荷重変形関係 [1.2-1)]

図 1.2-4 には累積変形量と降伏荷重の関係を、図 1.2-5 には累積変形量と降伏後剛性 K_d の関係を示す。LRB の降伏荷重は累積変形量が数 m の間で、急速に低下しているものの、降伏後剛性はほぼ一定の値を保っている。一方、HDR では、降伏荷重と降伏後剛性は繰り返し変形に伴い、共に緩やかに低下している。

図 1.2-6 には温度と降伏荷重の関係を、図 1.2-7 には累積変形量と温度の関係を示す。なお、温度は LRB では鉛プラグの上部での、HDR では積層ゴムの中心部付近の熱電対による計測値である。LRB の降伏荷重は鉛プラグの温度の上昇に伴い緩やかに低下し、初期値の半分以下まで低下する。温度も試験の初期段階で急激に上昇し、最終的には 100℃に達している。鉛プラグの発熱により鉛の耐力が低下した結果、荷重変形関係において降伏荷重が減少することにつながっていることがわかる。

HDR の降伏荷重はゴムの温度の上昇にともない緩やかに低下し、初期値の半分以下まで低下する。温度は累積変形量（繰り返し数）にほぼ比例して上昇していることがわかる。なお、HDR

の等価減衰定数は水平剛性も低下するためほとんど変化しないが、履歴面積そのものが小さくなっていることには注意が必要である。

なお、本試験では、最終的に 200 サイクル×4set、合計 800 サイクルの加力を行っているが、少なくとも 600 サイクルまでの水平荷重－変位特性及び繰り返しによる特性値の変動には、顕著な変化は認められなかった。このことより、繰り返し変形を与えると積層ゴムの特性は変化するが 1 日以上放置後に再度繰り返し変形を与えると、積層ゴムの特性は前と同様の性状を示しており、特性が元に戻ると考えられる。

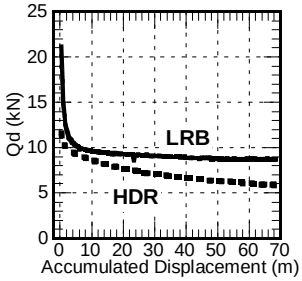


図 1.2-4　累積変形量と降伏荷重の関係 [1.2-1)]

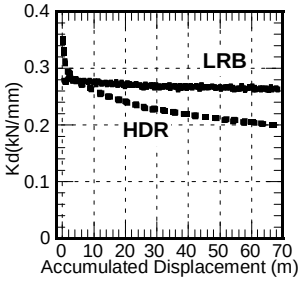


図 1.2-5　累積変形量と降伏後剛性の関係 [1.2-1)]

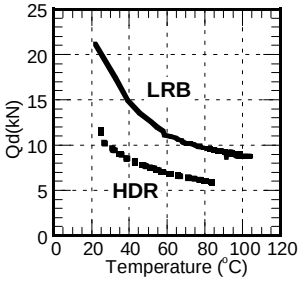


図 1.2-6　温度と降伏荷重の関係 [1.2-1)]

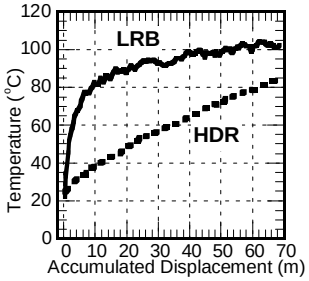


図 1.2-7　累積変形量と温度の関係 [1.2-1)]

(4)　積層ゴム試験のまとめ

鉛プラグ入り積層ゴム（LRB)、高減衰ゴム系積層ゴム（HDR）について、縮小試験体による断熱状態の試験を実施した。各部位の温度変化について、断熱材の有無による比較をしたところ、若干ではあるが断熱材による効果と思われる温度変化が確認できた。ただし、積層ゴム支承の基本性状については、断熱材の有無による影響はほとんど無いものと判断できる結果となっている。

HDR の剛性変化に関しては、これまでの実験データと大きな差はない。等価減衰定数の変化は、既往の実験データでもバラツキが大きいが、今回の試験結果が大きく外れているという結果にはなっていない。温度上昇に関しては、既往の実験が表面温度の計測であるため内部温度の計測結果と直接比較できないものの、表面温度に比べて内部温度の上昇は高いことがわかった。

LRB に関しては、剛性や降伏荷重の変化は既往の実験データの範囲内にある。鉛プラグの温

度上昇については、断熱していない直径 506mm でせん断ひずみ 200%×200 サイクルの実験結果[1.2-2)]（試験体の形状係数は違う）とほぼ同様な結果となった。

ただ、長周期地震動として想定される地震波あるいは応答として、どれくらいの振幅と継続時間を想定すべきかが曖昧な現状では、今後もできるだけ実験データを蓄積していくことが不可欠である。文献[1.2-3)]では直径 255mm、510mm、1000mm の鉛プラグ入り積層ゴムを用いた試験を実施している。同じ試験条件での載荷では、試験体のサイズが大きいほど鉛プラグ近傍での温度上昇が高くなり、降伏荷重の低下も大きくなることが示されている。同文献では相似則を考慮すれば、縮小試験体でも降伏荷重の低下を予測できることも示されているものの、エネルギー吸収能力を評価する場合には実大に近い試験体を用いることが望ましいといえる。

また、文献[1.2-4)]では、角型鉛プラグ入り積層ゴム（LRB）の長周期地震動（三の丸波）における実大試験が実施されており、鉛プラグを複数本（通常４本）配置した形状（主に外観形状：四角形）では、鉛プラグ１本タイプに比べ、繰り返しによる降伏荷重の低下が少ない傾向を示している。これは、鉛プラグが分散しているため、温度上昇が抑えられるためであると考えられる。したがって、鉛プラグ１本タイプで吸収エネルギー低下を考慮しておけば、４本タイプは安全側と考えられる。

1.2.2 弾性すべり支承

対象とする弾性すべり支承は、高摩擦タイプ（摩擦係数μ=0.13）と低摩擦タイプ（μ=0.015）の 2 種類である。すべりによる発熱が摩擦係数に及ぼす影響を繰り返し試験により明らかにする。

(1) 試験体

試験装置の能力の都合上、表 1.2-2 と図 1.2-8 に示す縮小モデルを使用した。また、試験体のすべり板およびすべり材には図 1.2-8 に示す位置にて温度を計測した。3ch が支承のすべり材(四フッ化エチレン樹脂：PTFE(polytetrafluoroethylene）)裏側の温度で、4ch と 5ch がすべり板（ステンレス鋼）裏側の温度計測点である。

表 1.2-2 すべり支承試験体の概要[1.2-1)]

		高摩擦タイプ	低摩擦タイプ
積層ゴム部	ゴム直径	φ225	φ225
	ゴム種	G1.2	G0.4
	PTFE 直径	φ160	φ202
	基準面圧	10MPa (20.5tonf)	18MPa (58.8tonf)
すべり板部	サイズ	500×300	←
	材質	SUS304	SUS304 (PTFE コーティング)

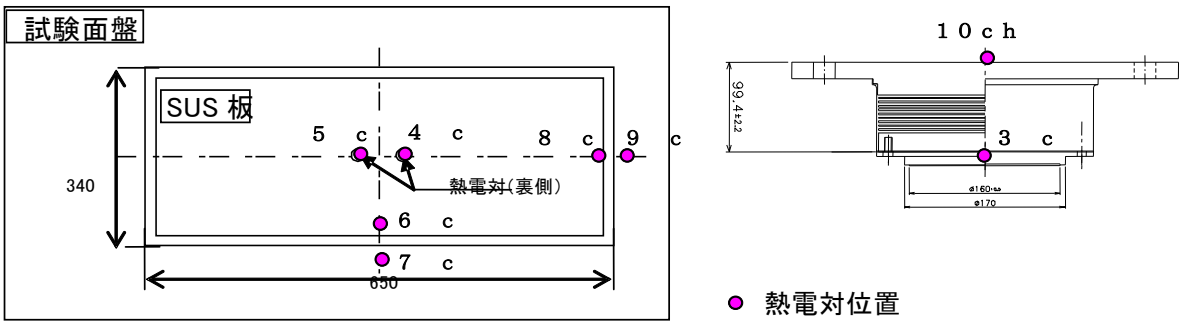


図 1.2-8　弾性すべり支承試験体と熱電対位置 [1.2-1)]

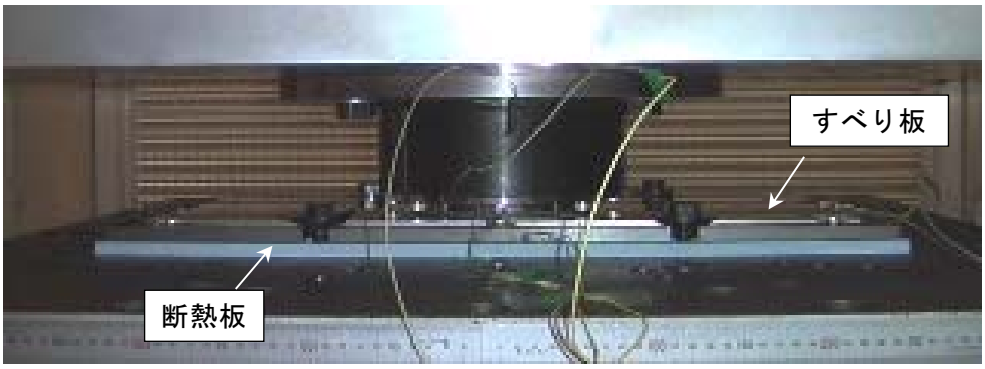


写真 1.2-2　弾性すべり支承の試験状況 [1.2-1)]

(2)　試験条件

試験では正弦波による加振を行う。写真 1.2-2 に試験の状況を示す。長周期地震動に対する弾性すべり支承の性能評価として、累積変位 300m の試験を実施した。試験は、基準面圧下で、加振振動数 0.4Hz（最大速度 35cm/s）で±140mm の加力を 540 サイクル実施した。なお、この試験の前後には、特性変化を確認するための基本特性試験を実施した。

(3)　試験結果

図 1.2-9 に高摩擦タイプの荷重変形関係を示す。540 サイクルの繰り返し試験の結果である。繰り返しに伴い、摩擦力（摩擦係数）が低下していくことがわかる。一方、低摩擦タイプの荷重変形関係では初期の 100 サイクルまでは摩擦力（摩擦係数）がわずかに低下するが、それ以降は増加した。ただし、高摩擦に比べて変化量は小さい。

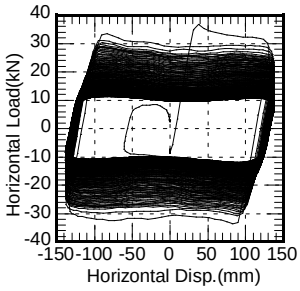


図 1.2-9　高摩擦タイプの荷重変形関係 [1.2-1)]

図 1.2-10 に累積すべり変位と摩擦係数の関係を示す。高摩擦タイプは累積すべり変位が 40m まで、急激に摩擦係数が低下するが、40m を越えると低下が著しく減少し、減少の度合いは直線的である。低摩擦タイプは 40m 程度までは一定であるが、それ以降は波打ったなだらかな増加傾向を示している。

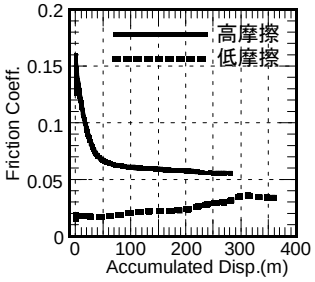


図 1.2-10 累積すべり変位と摩擦係数の関係 [1.2-1)]

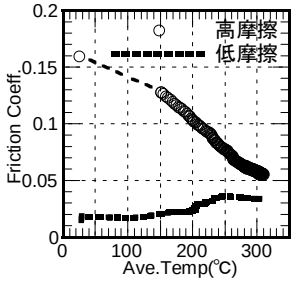


図 1.2-11 すべり板の温度と摩擦係数の関係 [1.2-1)]

図 1.2-11 にすべり板の温度と摩擦係数の関係を示す。すべり材表面の温度が直接計測できないことから、すべり板 2 箇所で計測している温度をすべり材の表面温度（4ch と 5ch の平均値）とした。高摩擦タイプは最初の累積すべり変位 7m までの温度が欠測（図の点線部分）し、すべり板の温度が 150℃に上昇した後の記録しかないが、その後は 260℃まで急激に上昇し、増加傾向が鈍る。低摩擦タイプでは繰り返しに伴い温度も上昇するが、摩擦係数の変化は少ない。

図 1.2-12 に累積すべり変位とすべり板の温度の関係を示す。高摩擦タイプではすべり変位 50m で温度 250℃を超えているが、その後の温度上昇は緩やかである。低摩擦タイプの温度の増加は高摩擦タイプと比較して増加は少ないが、累積すべり変位が 350m 程度では四フッ化エチレン樹脂（PTFE）の融点 327℃に近い温度まで上昇した。

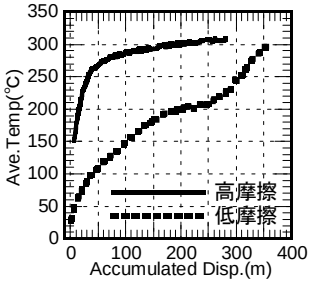


図 1.2-12　累積すべり変位とすべり板の温度の関係 [1.2-1)]

(4)　弾性すべり支承試験のまとめ

高摩擦タイプの試験において、摩擦係数の累積すべり変位の影響は、すべり板で計測したすべり材表面の温度に線形に低下することが確認できた。すべり材の温度上昇は累積すべり変位が約 40m まで急激に増加し、その後の温度上昇の増分が著しく低下することから、非線形的な特性を示す。しかし、長周期地震動で想定される累積すべり変位を大幅に越え、すべり材の融点に近い負荷を与えた後も、試験体が冷却後行った実験によると、摩擦係数は元の特性に復元する。この結果から、高摩擦タイプの弾性すべり支承は、大きな累積すべり変形に対して、十分な耐久性能を保有していると言える。

一方、低摩擦タイプの試験では、累積すべり変位が約 50m までは摩擦係数が低いが、それ以降は増加傾向を示す。摩擦熱の発生も高摩擦タイプと大きく異なる特徴を有し、100 サイクル以降温度の上昇が急激に増加した。初期のサイクルでは摩耗粉が少ないが、温度が上昇してからは多量の摩耗粉が発生した。すべり材のコーティングの摩耗による影響を受けてか、試験体冷却後の当日の基本実験、また、翌日の実験でも摩擦係数は増加した状態のままであった。しかし、連続的に載荷条件であること、また、長周期地震動で想定する累積すべり変位を十分に越えていることから、一般的な設計では問題になることは少ないものと考えられる。

実大の試験体を用いた弾性すべり支承のエネルギー吸収能力の評価をした文献はそれほど多くはない。2002 年には直径 600mm と 800mm のすべり支承を用いた繰り返し試験の結果[1.2-5)]が報告されている。すべり面の温度が上昇するにともない、摩擦係数が低下していく。すべり板の温度が 200℃くらいになったときに、摩擦係数は初期の半分程度まで低下する点は、縮小試験体の結果と同じである。

また、免震構造設計指針（2001 年日本建築学会、pp210～211）には、弾性すべり支承（高摩擦タイプ）の繰り返し耐久性に関する記述がある。面圧（N/mm^2）と最大速度（cm/s）を乗じた PV 値を用いてすべり支承の限界（最終破損時）を規定している。

1.2.3 鋼材ダンパー

鋼材ダンパーは、鋼材の曲げ変形時の弾塑性履歴に伴うエネルギー吸収を利用したものである。ループ状またはU型に加工した鋼材を複数本まとめたもの等があり、形状、材質、機構等に工夫をして、変形能力、耐久性、方向性等に優れた各種のタイプが開発されている。

以下にU型ダンパーにおけるエネルギー吸収性能評価について記述する。

(1) エネルギー吸収性能試験

試験は各メーカ又は大学が保有する試験機を用いて、基本的には実大静的加力で行っており、動的評価は主に縮小モデルにより実施している。

1) 試験結果（提供データ）

エネルギー吸収性能試験の結果としては、実大試験データ（静的）により評価した①「破断に到る回数－振幅」、②「破断に到る吸収エネルギー量－振幅」の 2 種類のグラフがサイズ毎に提供される。「破断に到る回数－振幅」及び「破断に到る吸収エネルギー量－振幅」の一例を図 1.2-13、図 1.2-14 に示す。

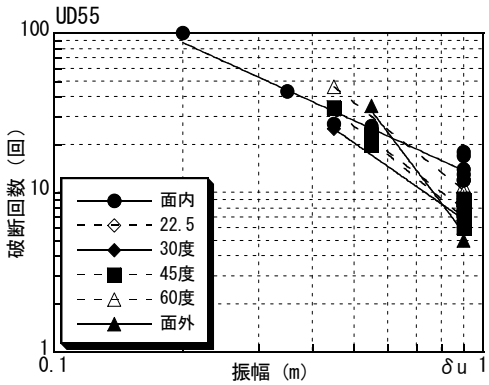


図 1.2-13 加振振幅と破断回数の関係 [1.2-1)]
（U 型ダンパー）

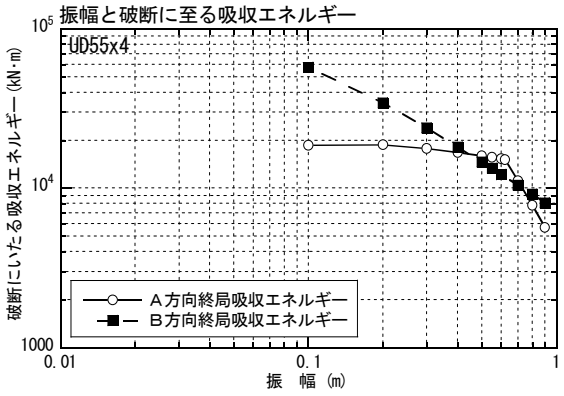


図 1.2-14 加振振幅と破断に到る吸収エネルギーの関係(U 型ダンパー) [1.2-1)]

また、最新の知見では、実大動的載荷試験の実施及び米国カリフォルニア大学サンディエゴ校の振動台を用いて大振幅（最大振幅±750mm）を考慮した実大試験が実施され、以下の結果が示されている。

●実大動的載荷試験（振幅±400、±750mm、周期 4 秒　応答波）

NSUD50 の単体試験体の定振幅（最大±400、±750mm）の動的試験及び 4 本組の応答波（鷹取・El Centro 1940 NS）による動的試験を実施した結果、以下の事項が確認されている。

- 履歴挙動は静的実験の結果とほぼ一致する。
- 大変形を動的に与えても疲労性能は既往の実験と対応する。
- 既往の静的実験による破断に至るまでの総エネルギー量は動的載荷により低下することは無い。

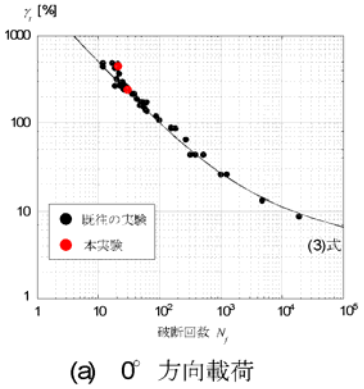


図 1.2-15 定変位振幅下における疲労特性 [1.2-1)]

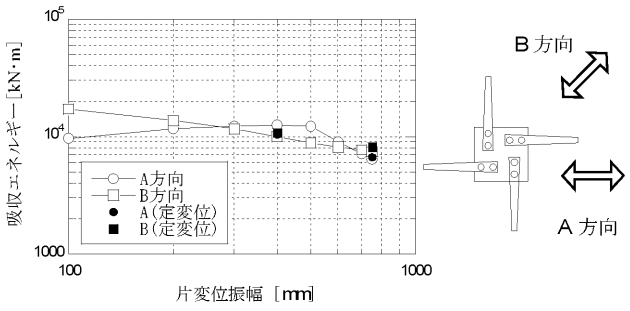


図 1.2-16 破断に至るまでのエネルギー吸収量 [1.2-1)]

2)　繰り返し耐久性における各種依存性

①　速度依存性：

- U 型ダンパーの静的試験での破断回数に対する動的試験での破断回数の比は、0 度方向で－19%、45 度方向で－31%、90 度方向で－4%となっており、動的試験は静的試験に比較して

破断回数が下がる傾向がある。

- 静的と動的における 1 サイクルの吸収エネルギー量を比較すると、動的の方が 5%程度大きい。
- 実大と縮小モデルによる破断回数を比較すると、実大試験体を用いた試験では縮小試験体を用いた試験に比較して破断回数が少なくなる（12%程度）傾向がある。

表 1.2-3 実大と縮小試験体との比較（縮小試験体は換算値）[1.2-1)]

試験体 NO	加力方向	振幅 (cm)	降伏せん断力 (KN)	1 次剛性 (KN/cm)	1 ｻｲｸﾙ吸収 ｴﾈﾙｷﾞｰ (KN・cm)	繰り返し回数依存性 W1(50)/W1(3)	破断回数
1	面内 0 度	20	30.3	20.4	2236	0.80	62
実大			29.4	20.1	2113	0.78	55
5	45 度		28.2	16.3	2015	0.83	111
実大			27.9	16.5	1875	0.82	99
7	面外 90 度		28.2	11.3	1752	0.92	181
実大			27.5	11.6	1688	－	－

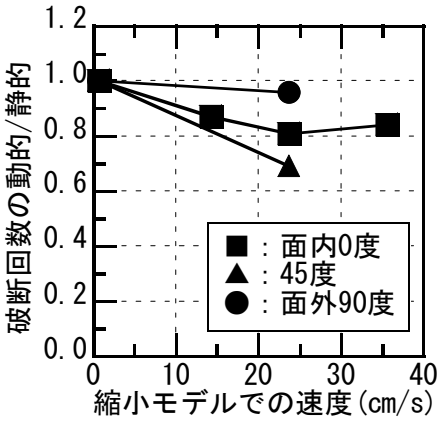


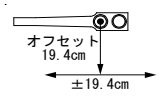
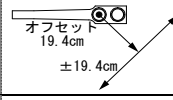
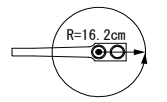
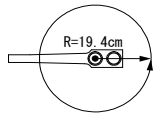
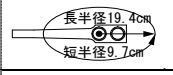
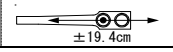
図 1.2-17 破断回数と最大速度(U 型ダンパー) [1.2-1)]

②方向性依存：

加力試験は 1 方向定変位での試験のため、応力が集中しやすい状況で行っている。これに対して、地震は 1 方向 1 変位でないことから応力が分散する形となり、より安全側の結果となるものと考えている。しかし、2 方向載荷試験のデータは少ない。

U 型ダンパーにおける 2 方向載荷試験の一例を表 1.2-4 に示す。

表 1.2-4　方向性試験の一例（U 型ﾀﾞﾝﾊﾟｰ）[1.2-1)]

試験体No.	加力方式	加力図	試験結果
1	OFFSET面外 19.4cm ↓ 面内 ±19.4cm		33ｻｲｸﾙ目で破断
2	OFFSET45度 19.4cm ↓ 45度 ±19.4cm		48ｻｲｸﾙ目で破断
3	正円 R=16.2cm		正円5ｻｲｸﾙ目で 中断、面内方向 ±16.2cm加力で 35ｻｲｸﾙ目で破断
4	正円 R=19.4cm		正円4ｻｲｸﾙ目で 中断、面内方向 ±19.4cm加力で 17ｻｲｸﾙ目で破断
5	楕円 長半径19.4cm 短半径 9.7cm		楕円6ｻｲｸﾙ目で 中断、面内方向 ±19.4cm加力で 11ｻｲｸﾙ目で破断
6	面内方向 ±19.4cm		29ｻｲｸﾙ目で破断

③繰り返し回数依存性：

破断までの履歴特性の変化として、U 型ダンパーの単体及び複数本における試験結果を図 1.2-18～図 1.2-21 に示す。

破断直前まで履歴特性は安定しており、減衰性能が破断に到る過程で大きく減少することは無い。累積変位量と降伏荷重 Q_y の変化率の関係では、累積変位量が増加するに従い降伏荷重 Q_y の変化率は徐々に減少し、破断前には 0.7～0.8 となる。

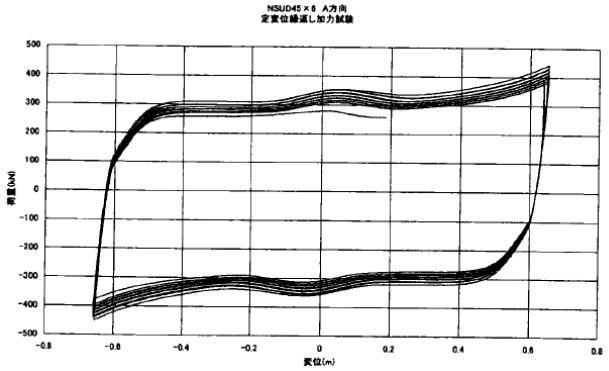


図 1.2-18 破断に到るまでの荷重変形関係
(U 型ダンパー) [1.2-1)]

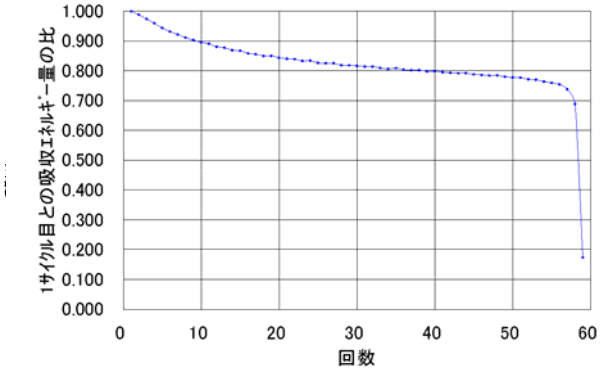


図 1.2-19 繰り返し回数と 1 サイクルのエネルギーの比
(U 型ダンパー　NSUD45　単体 0 度　振幅 200mm) [1.2-1)]

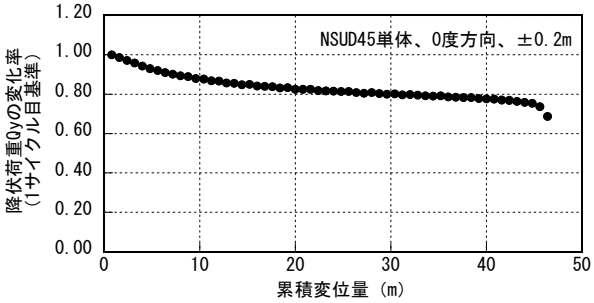


図 1.2-20 累積変位量と降伏荷重の変化率 [1.2-1)]
(U 型ダンパーNSUD45　単体 0 度　振幅 200mm)

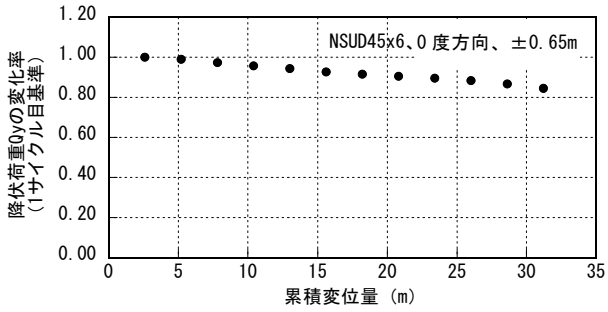


図 1.2-21 累積変位量と降伏荷重の変化率 [1.2-1)]
(U 型ダンパーNSUD45×6　0 度　振幅 650mm)

（2） 限界性能に関する考え方

鉄の融点は 1537℃程度であり、他の免震部材に使用される、鉛の融点 327℃程度などと比べて非常に高い。このため、温度による溶解は起こらず、低サイクル疲労の回数にて限界性能を決定している。

（3） エネルギー吸収性能評価

1） 破断回数による評価

変動振幅加振を受ける鋼材の低サイクル疲労の破断限界評価法として一般的に用いられる Miner 則を適用して検討する。

2） エネルギーによる評価

疲労寿命を繰り返し回数ではなく、振幅レベル毎に破断に至るまでの吸収エネルギーで評価する場合、評価式は累積損傷度をエネルギーで表現した式となる。実際に地震を受けたダンパーの評価をオービット記録より行う場合、入力エネルギーは X，Y 2 方向の和をとる（2 方向入力の場合ダンパーの損傷箇所が集中しないため、安全側の評価になると考えられる）。

1.2.4　鉛ダンパー

鉛ダンパーは、円柱状などに加工した鉛の変形時の弾塑性履歴に伴うエネルギー吸収を利用したものである。荷重変形関係が完全弾塑性に近い形状となるため、大きなエネルギー吸収能力が期待できる。鉛は塑性変形により生じた結晶格子の欠損が、常温での再結晶により解消されるという性質を持ち、きわめて延性に富んだ特性を示す。また、鋼材に比べて早期に降伏を促すことができ、比較的小変形時から減衰性能を発揮することが期待できる。また、過大な塑性変形が局部的に繰り返し集中しないように形状を工夫している。

以下に、主に U2426 型ダンパーにおけるエネルギー吸収性能評価について記述する。

(1)　エネルギー吸収性能試験

試験は大学が保有する試験機を用いて実施しており、基本的には動的加力（0.33Hz）で行っている。なお、試験機の制約上、振幅が大きい領域では 1/4～1/8 サイズの試験体を用いている。

定振幅加振において、破断･溶断または 1 サイクル吸収エネルギーが、試験開始時の値の半分以下となる時点までの総吸収エネルギー量としている。

1)　試験結果（提供データ）

エネルギー吸収性能試験の結果としては、上記試験データにより評価した下図に示す「総吸収エネルギー量－振幅」、「繰り返し回数－振幅」のグラフが提供される。

加振振幅とエネルギー吸収量の関係及び加振振幅と繰り返し回数の関係を図 1.2-22、1.2-23 に示す。P 方向は、鉛ダンパーの形状が湾曲している方向で、O 方向はその直交方向である。

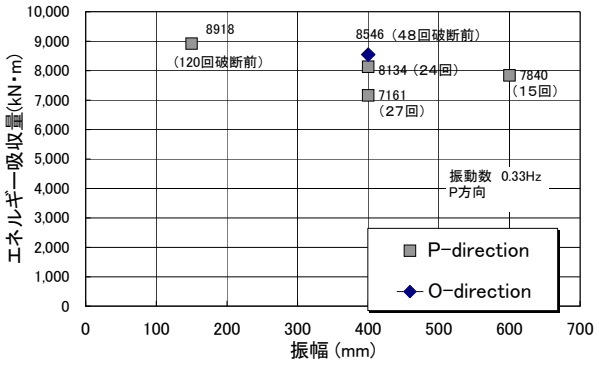


図 1.2-22 加振振幅とエネルギー吸収量の関係（U2426 型）[1.2-1)]

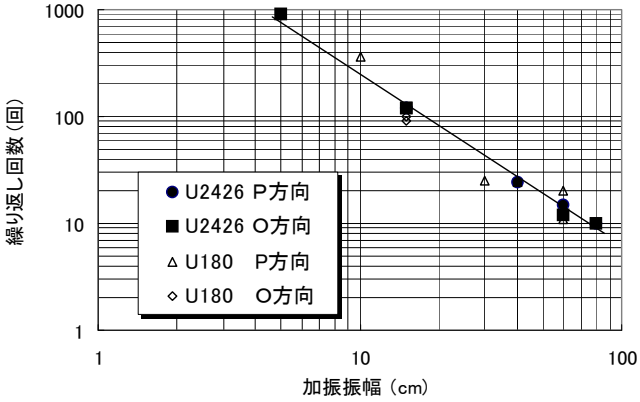


図 1.2-23 加振振幅と繰り返し回数の関係 [1.2-1)]

2)　繰り返し耐久性における各種依存性

1 サイクルエネルギー吸収量は繰り返し回数の増加に伴い低下する傾向にある。振幅±5mm（0.5Hz）、±20mm（0.5Hz）、±400mm（0.33Hz）の破断までの試験が実施されている。その結果を図 1.2-24、1.2-25 に示す。また、繰り返し回数とエネルギー吸収量との関係を図 1.2-26 に、累積変位量と降伏荷重の変化率の関係を図 1.2-27 に示す。

これによると、振幅±5mm では繰り返し回数 9000 回までにおいて、エネルギー吸収量にほとんど変化は見られない。振幅±20mm では 6780 回目においては、初期の約 20%まで低下した。振幅±400mm では 20 回目で約 70%まで低下し、25 回を超えてから破断した。

また、降伏荷重は、累積変形量の増加に伴い低下する傾向にある。振幅±5mm では累積変形

量 170m までにおいて、降伏荷重にほとんど変化は見られない。振幅±20mm では累積変形量が増加するのに伴い降伏荷重は低下し、550m では初期の約 20%まで低下した。振幅±400mm では累積変形量 25m で約 80%まで低下し、40m で約 50%まで低下後に破断した。

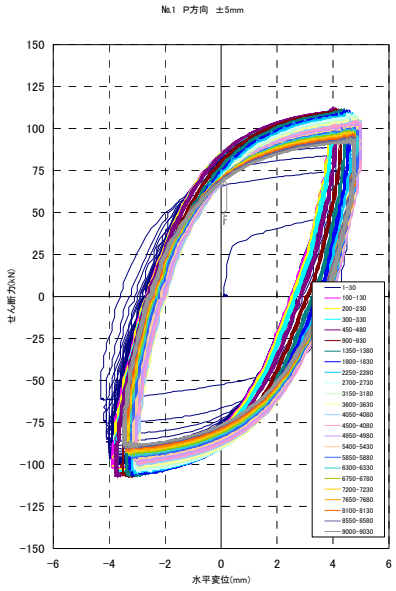


図 1.2-24 繰り返し加力試験結果
（P 方向　0.5Hz、振幅±5mm）
（U2426 型実大）[1.2-1)]

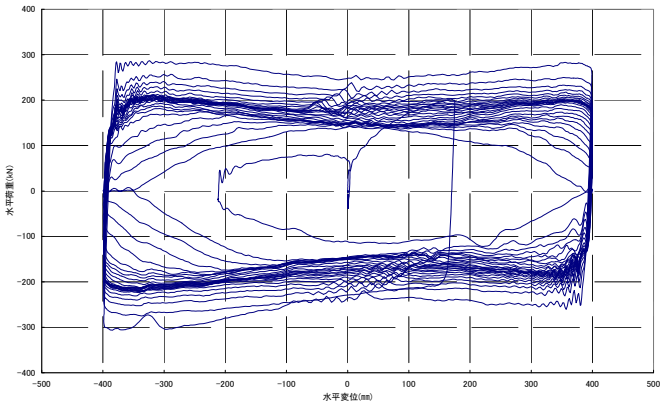


図 1.2-25　繰り返し加力試験結果
（P 方向　0.33Hz、振幅±400mm）
（U2426 型実大）[1.2-1)]

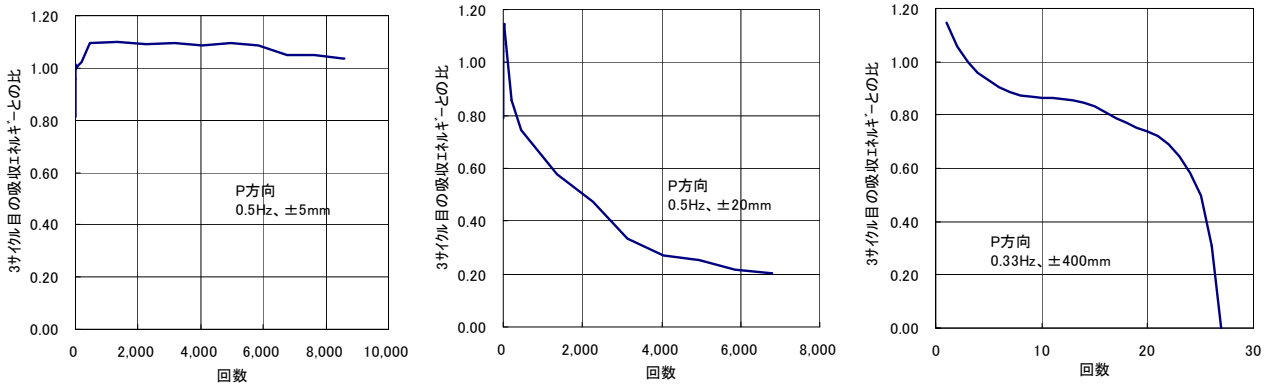


図 1.2-26 繰り返し回数とエネルギー吸収量の関係（U2426 型）[1.2-1)]

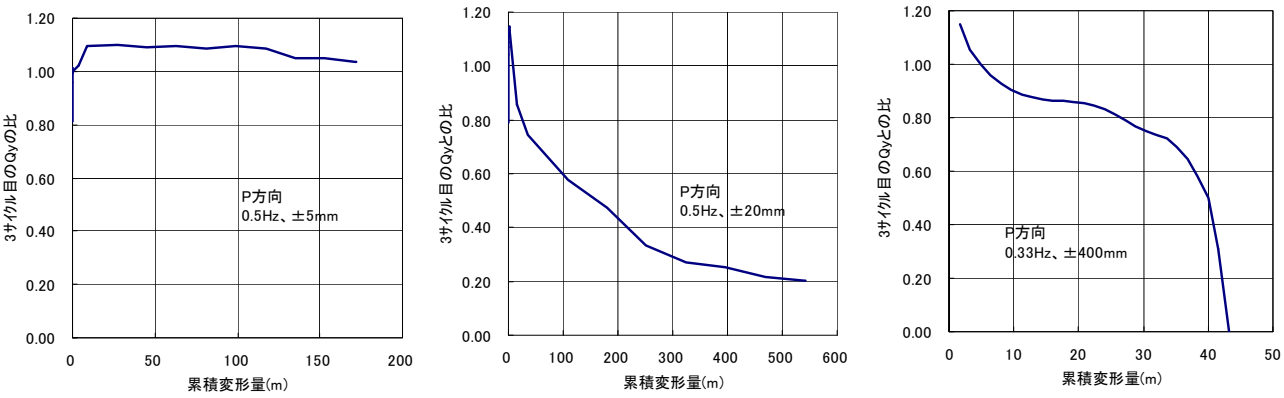


図 1.2-27 累積変位量と降伏荷重の変化率の関係（U2426 型）[1.2-1)]

(2)　限界性能に関する考え方

鉛の融点は 327℃程度であることから、エネルギー吸収性能の限界は、主に温度上昇による鉛鋳造体の軟化、溶解、破断により決定する。

(3)　エネルギー吸収性能評価

前述のエネルギー吸収性能評価の各グラフによる。

1.2.5　オイルダンパー

(1)　限界状態

1)　地震応答による大きな（または長時間の）エネルギー投入により想定される限界状態

限界状態として温度上昇による油漏れが想定される。単位時間当たり入力熱量がオイルダンパーの熱容量を超え、外壁温度が 100℃以上になると作動油の滲み出しが生じるという知見がある。これはシールの材料特性による。但し、タンク室の油量は余裕があるので直ちに減衰低下は生じない。余裕を見て外壁温度 80℃を許容値としている。

2)　限界状態の発現に対して免震部材の実験などによって確かめられている知見

- 制震用ダンパーについては、0.25Hz，±20mm の連続加振で 600 秒弱で温度 80℃に上昇するが、ダンパー性状にほとんど変化は見られない。
- 風揺れ想定の長時間（24 時間）試験の実施データあり。（飽和温度まで試験）
- 出荷検査時は、上昇温度は外壁 60℃を超えることは無い。

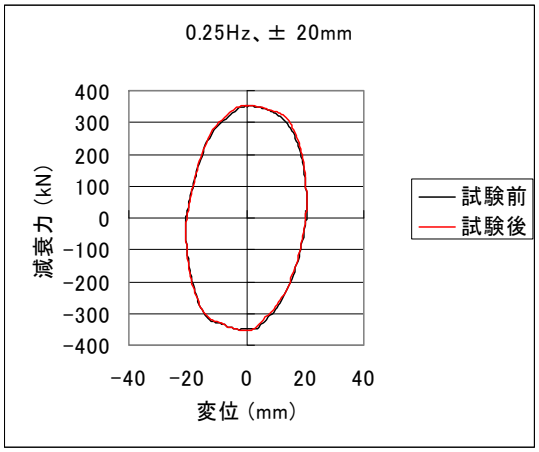


図 1.2-28　履歴形状 [1.2-1)]

（0.25Hz、振幅±20mm、加振回数：150 ｻｲｸﾙ）

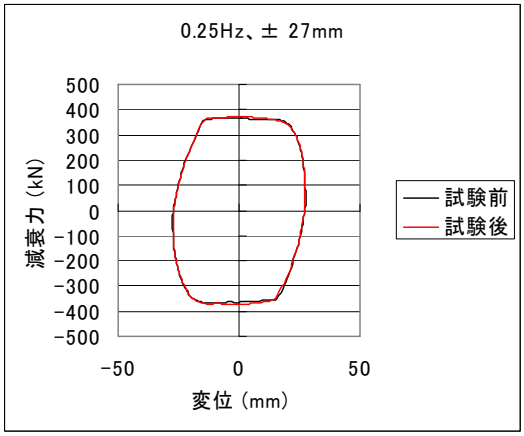


図 1.2-29　履歴形状 [1.2-1)]

（0.25Hz、振幅±27mm、加振回数：75 ｻｲｸﾙ）

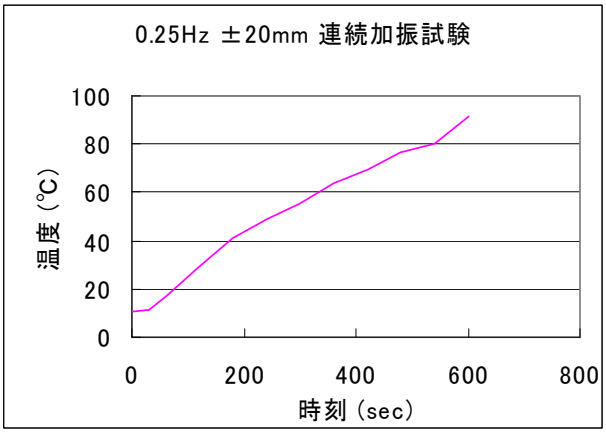


図 1.2-30 加振時間と上昇温度 [1.2-1)]
（ｼﾘﾝﾀﾞｰ中央の外壁温度）
（0.25Hz、振幅±20mm、加振時間：600s）

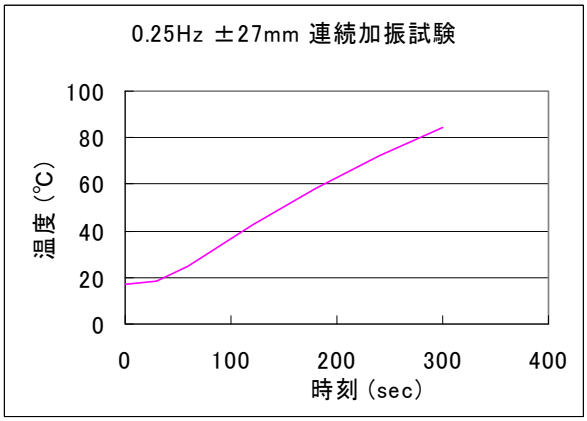


図 1.2-31 加振時間と上昇温度 [1.2-1)]
（ｼﾘﾝﾀﾞｰ中央の外壁温度）
（0.25Hz、振幅±27mm、加振時間：300s）

3) 構成材料の特性から得られている知見

・ 車両用のオイルダンパーで、外壁温度とシール性の試験は実施しており、シール材質は、ほぼ同一であるので耐熱性は同一と考える。

・シールメーカの推奨限界温度（カタログ値）は下表のとおり。

会社記号	パッキン材質	シール機能を保持できる高温限界（℃）
A	フッ素ゴム	160
B	ニトリルゴム	120
C	ニトリルゴム	125

4) 限界状態発現の有無を定量的に推定する手法

・ ダンパー各部における熱の収支を評価した理論式により温度上昇は比較的明確に予測できる。

ユーザーより提供されたダンパー部の変位時刻歴によって温度上昇を予測することで限界状態発現の有無を評価した例を以下に示す。（評価例においては、ダンパー外壁からの放熱量の比率は小さく、入力エネルギーの殆んどがダンパー部温度上昇に反映されている。）

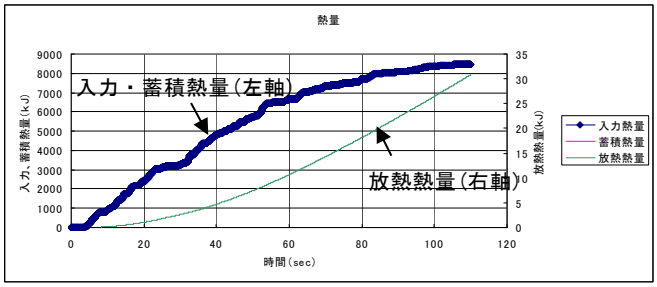


図 1.2-32 入力熱量、蓄積熱量、放熱熱量 [1.2-1)]

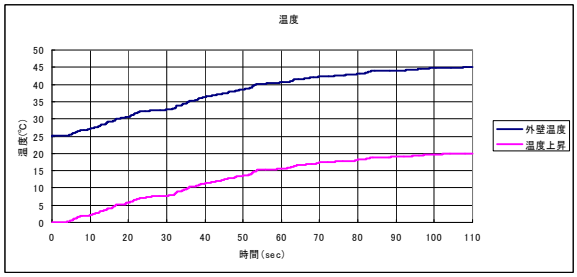


図 1.2-33 外壁温度(周囲温度 25℃)、温度上昇 [1.2-1)]

1.2.6　エネルギー吸収性能の比較

現在、長周期地震動による多数回の繰り返しに伴い弾性すべり支承やダンパー機能をもつ積層ゴムの発熱とエネルギー吸収性能の低下が懸念されている。このような懸念に対して、鉛プラグ入り積層ゴム・高減衰ゴム系積層ゴムおよび弾性すべり支承（高摩擦・低摩擦タイプ）を用いて断熱状態での試験を実施した。繰り返し試験による累積すべり量は弾性すべり支承が300m であり、積層ゴムの累積変位量は 70m である。これは長周期地震動による応答変形量に比べても十分な安全余裕度をもった繰り返し変形量といえる。

今回の調査結果から、断熱の有無による影響はそれほど大きくないことがわかり、既往の実験データと同様の傾向を示した。発熱により試験体そのものには何も不具合などは発生しておらず、十分なエネルギー吸収能力を有することがわかり、LRB と HDR の発熱（温度）の状況を多少なりとも明らかにすることができた。LRB と HDR では発熱の機構が異なるため、温度の上昇傾向が異なること、繰り返しにともなう荷重変形関係における履歴面積の変化の仕方も傾向が異なることが明らかとなった。

高摩擦タイプ（摩擦係数μ=0.13）の弾性すべり支承の実験では、すべり板の裏側での温度が300℃を超えるところまで試験を実施したが､摩耗粉が多量に発生するもののすべり材の損傷は見られなかった。しかし、摩擦係数は温度の上昇にともないほぼ逆比例して低下していく。摩擦係数は累積すべり量が 50m 程度までは急激に減少し、μ=0.06 まで半減するものの、それ以降の摩擦係数の変化は小さい。高摩擦タイプが繰り返し変形を受ける場合には摩擦係数が繰り返しに伴い低下することを考慮した設計や解析が必要になる。また、試験体が十分冷却した後に実施した試験では摩擦特性は元の状態に戻ることも確認できた。

低摩擦タイプ（μ=0.015）の試験では、累積すべり量が 50m 程度までは摩擦係数に変化はないものの、繰り返し回数 100 サイクル（累積すべり量で 100m 位）以降から摩擦係数が上昇してくる。しかし、累積すべり量で 200m 位までは摩擦係数に顕著な変動もみられず、すべり板の温度が 200℃までは摩擦係数の変化もほとんど見られない。摩擦係数の上昇はすべり材の損傷によるものと思われ、すべり材が損傷した原因については解明が必要であるものの、低摩擦タイプのすべり支承は繰り返しにともなう発熱の影響も受けず摩擦係数の変化は小さいことが判明した。

弾性すべり支承の実験では、断熱材の有無による発熱温度の差が確認された。最大温度で約50℃の差がみられ、断熱板がある試験では加振終了後の温度低下（冷却）もゆっくりである。そのため、今後、実施する試験では適当な断熱条件で試験を行うことが望まれる。また、実験の妥当性を確認できる温度計測が行われるべきである。

断熱状態での多数回の繰り返し変形を与える動的試験はこれまでそれほど実施されてきていない。加えてスケール効果の問題、すべり材の物性の影響、試験装置や免震部材の鉄部からの放熱の効果、さらには試験方法（繰り返し回数、振幅、速度）の検討が必要である。様々な素材やサイズの免震部材に対して終局状態までの加振データを蓄積し、エネルギー吸収性能を適切に評価するための特性値の変化を考慮した免震部材の復元力特性のモデル化や今後の取り替えのための判断データに役立てることが求められる。

免震建築物の地震時応答を正しく評価するためにも、使用する免震部材の履歴特性（剛性、降伏荷重、摩擦係数など）を適切にモデル化することは不可欠である。多数回の繰り返しにより、荷重変形関係（履歴面積）は 2 サイクル目から変化するということが明らかとなった。想

定する応答変形や繰り返し数（累積変形）に応じて適切に復元力特性をモデル化することが非常に重要である。

各種ダンパーにおけるエネルギー吸収性能評価については、金属材料、粘性材料、機構等によって、各々異なる限界状態を示す。表 1.2-4 にエネルギー吸収性能評価に関する知見の一覧表を示す。

参考文献

1.2-1）(社)日本免震構造協会　MENSHIN　NO.67　2010.2　「積層ゴムと弾性すべり支承のエネルギー吸収性能」、pp33～38、「各種ダンパーのエネルギー吸収性能評価の現状と課題」、pp39～47

1.2-2）(社)日本ゴム協会編：設計者のための免震用積層ゴムハンドブック、理工図書、pp131～132

1.2-3）近藤ほか：大振幅繰り返し変形を受ける積層ゴム支承の熱・力学的連成挙動に関する研究（その 6)、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造Ⅱ、21439、2007.8

1.2-4）Behavior or real scale Lead Rubber Bearing shaking test under the real scale earthquake response : Osamu KOUCHIYAMA Takahito NAKAMURA and Masayoshi IKENAGA）

1.2-5）日比野ほか：大口径弾性すべり支承の摩擦特性試験（その 3)、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造Ⅱ、21252、2002.8

表 1.2-4　各種ダンパーのエネルギー吸収性能評価 [1.2-1)]

分類	種類	エネルギー吸収性能評価
履歴系ダンパー	鋼材ダンパー	限界状態：鉄の融点は 1537℃と高いため、低サイクル疲労により限界性能（破断）に到る。 提供ﾃﾞｰﾀ：各ｻｲｽﾞ毎の破断までの繰り返し実験による①振幅－破断回数②振幅-破断に到る吸収ｴﾈﾙｷﾞｰ量 速度依存：縮小ﾓﾃﾞﾙによる破断回数は、動的試験/静的試験で-4～-31% 方向性依存：各加力方式による破断回数　ｵﾌｾｯﾄ＞楕円＞正円 繰り返し回数依存：破断直前まで履歴曲線は安定 課題：実大動的加力試験、2 方向加力試験、台風時の挙動
	鉛ダンパー	限界状態:鉛の融点は 327℃であることから､主に温度上昇による鉛鋳造体の軟化、溶解、破断により限界性能に到る。 提供ﾃﾞｰﾀ：2 ﾀｲﾌﾟ（U180 型・U2426 型）の破断・溶断までの繰り返し実験による①振幅－破断回数②振幅-破断に到る吸収ｴﾈﾙｷﾞｰ量 繰り返し回数依存：3 種類の振幅による実大動的加力実験を実施。振幅±5mm 繰り返し回数 9000 回まで 1 ｻｲｸﾙのｴﾈﾙｷﾞｰ吸収性能の変化無し、振幅±20mm では、6780 回目でｴﾈﾙｷﾞｰ吸収性能及び降伏荷重が 20%程度低下、振幅±400mm では、25 回を超えて破断。 課題：　2 方向加力試験、台風時の挙動
	摩擦ダンパー（ﾃﾞｨｽｸﾀﾞﾝﾊﾟｰ)	限界状態：摩擦材（超高分子ﾎﾟﾘｴﾁﾚﾝ）の融点は 135℃であることから、摩擦熱によりｽﾃﾝﾚｽのすべり板の接触界面で溶融現象が起き、繰り返し加力により、摩擦係数が低下するが、ｴﾈﾙｷﾞｰ吸収は継続的に保持される。 提供ﾃﾞｰﾀ：繰り返し実験による吸収ｴﾈﾙｷﾞｰ量-経過時間 速度依存：早い速度では継続時間が長い場合には、依存性（摩擦係数の低下）が見られる。 方向性依存：方向性依存は無い 繰り返し回数依存：繰り返しの増加に伴い、摩擦係数は低下する傾向にあるが、通常の地震では十分性能を発揮。 課題：長時間の実大動的加力試験
流体系ダンパー	オイルダンパー	限界状態：温度上昇による油漏れで限界性能に到る。ｼｰﾙの材料特性から外壁温度 80℃を許容値と設定。 提供ﾃﾞｰﾀ及び知見：制震用ﾀﾞﾝﾊﾟｰの繰り返し加力実験による、履歴性状及び温度上昇-加振時間。ダンパー性状にほとんど変化は見られない。 限界状態の推定方法：熱の収支を評価した理論式により温度上昇の推定が可能。継続時間 110 秒の地震応答解析結果例では、温度上昇は 20℃（ｼﾘﾝﾀﾞｰ外周温度 45℃）であり、通常の地震動では十分熱容量がある。 課題：免震用ダンパーの実大動的加力試験

	壁型粘性ダンパー	限界状態：温度上昇（200℃以上で粘性体の沸点）による粘性抵抗力及びｴﾈﾙｷﾞｰ吸収能力の低下が生じ、機構上の限界変形で限界性能に到る。 提供ﾃﾞｰﾀ及び知見：制震用ﾀﾞﾝﾊﾟｰの繰り返し加力実験による、履歴性状及び温度上昇-加振時間。粘性体は繰り返し応力を受けても特性変化はない。 限界状態の推定方法：実験による温度上昇と減衰力特性式により求まるｴﾈﾙｷﾞｰ吸収量から計算した温度上昇との比較から、温度シフト量を提示できる。 課題：免震用ダンパーの実大動的加力試験、熱収支を考慮した評価方法
	フルード粘性ダンパー	限界状態:温度上昇による設計上の限界値を設定。想定入力に対する最高温度 70℃を許容値と設定。限界状態は想定していない。 提供ﾃﾞｰﾀ及び知見：繰り返し加力実験による、履歴性状。ループ最大荷重及び形状にほとんど変化は見られない。 限界状態の推定方法：限界温度は経験的に設定。 課題：免震用ダンパーの実大動的加力試験、限界状態の明確化
	増幅機構付き減衰装置	限界状態：粘性体の特性変化及び温度安定性、金属疲労について検討。限界状態は想定していない。 提供ﾃﾞｰﾀ及び知見：繰り返し加力実験により、減衰抵抗力の変動が把握されている。 限界状態の推定方法 : 減衰抵抗力の低下を表す係数が設計式に組み込まれている。 課題 : 実大動的加力試験及びその結果に基づく現状の知見による推定手法の検証。
粘弾性ダンパー		限界状態：繰り返し変形により、粘弾性体に部分的な剥離又は皺が生じる。限界状態は、皺が亀裂に進展し、破断に到る破壊モードが推定できる。 提供ﾃﾞｰﾀ及び知見：繰り返し加力実験により、最大荷重の低下は見られるが、部分的な剥離・皺を除き、ﾀﾞﾝﾊﾟｰの目視上の損傷は無い。通常の地震により破壊到ることは無いという見解。 限界状態の推定方法：繰り返しによる最大荷重の低下については、実験結果を含め統一的評価が可能、詳細検討用復元力モデルに組み込まれている。 課題：実大動的加力試験、投入ｴﾈﾙｷﾞｰとﾀﾞﾝﾊﾟｰの温度上昇及び放熱量評価、温度上昇とﾀﾞﾝﾊﾟｰ特性の相関についての評価手法の拡張。

1.3　外力特性に関する情報収集・検討

平成 21 年度国土交通省建築基準整備補助金事業「1 超高層建築物等の安全対策に関する検討」の長周期地震動に関する検討委員会において、建物ＷＧ免震ＳＷＧ（日本免震構造協会）により、長周期地震動による免震建築物の応答性状に関する検討が行われた。そこでは、作成した長周期地震動を用いて様々な免震建築物の応答解析が実施され、免震建築物の安全性が検討された。

本節では、免震ＳＷＧで行われたモデル建物の解析的検討内容と、特に免震部材のエネルギー吸収に着目した場合の免震部材の健全性に関する検討結果について概要を示す。

1.3.1　検討用入力地震動

検討に用いた地震動は、長周期地震動に関する検討委員会地震動 WG により作成された長周期地震動のうち、大阪平野の地震動として南海地震に対する大阪・此花の地震動（平均、平均+標準偏差）を、濃尾平野の地震動として東海-東南海地震に対する愛知県津島市の地震動（平均、平均+標準偏差)、東海-東南海地震に対する愛知県名古屋市の地震動（平均、平均+標準偏差）を、関東平野については、東海-東南海地震に対する新宿の地震動（平均、平均+標準偏差）を用いた。表 1.3-1 に検討用入力地震動の一覧を示す。図 1.3-1 に地震動の加速度波形を、図 1.3-2 にこれらの地震動の擬似速度応答スペクトル(h=0.05)及びエネルギースペクトル(h=0.10)を示す。

表 1.3-1 検討用入力地震動一覧

分類	略称	対象地震・評価地点など	加速度 cm/s^2	速度 cm/s	継続時間 s
大阪平野の長周期地震動	N-OSKH02-AV	南海地震 此花　平均	70.9	34.2	600.0
	N-OSKH02-SD	南海地震 此花　平均+標準偏差	105.2	47.2	600.0
濃尾平野の長周期地震動	T-TN-AIC003-AV	東海・東南海地震 津島　平均	221.1	31.0	600.0
	T-TN-AIC003-SD	東海・東南海地震 津島　平均+標準偏差	322.2	50.0	600.0
	T-TN-AIC004-AV	東海・東南海地震 名古屋　平均	323.0	22.3	600.0
	T-TN-AIC004-SD	東海・東南海地震 名古屋　平均+標準偏差	682.3	39.2	600.0
関東平野の長周期地震動	T-TN-KGIN1F-AV	東海・東南海地震 新宿　平均	89.59	21.5	620.0
	T-TN-KGIN1F-SD	東海・東南海地震 新宿　平均+標準偏差	120..68	27.7	620.0

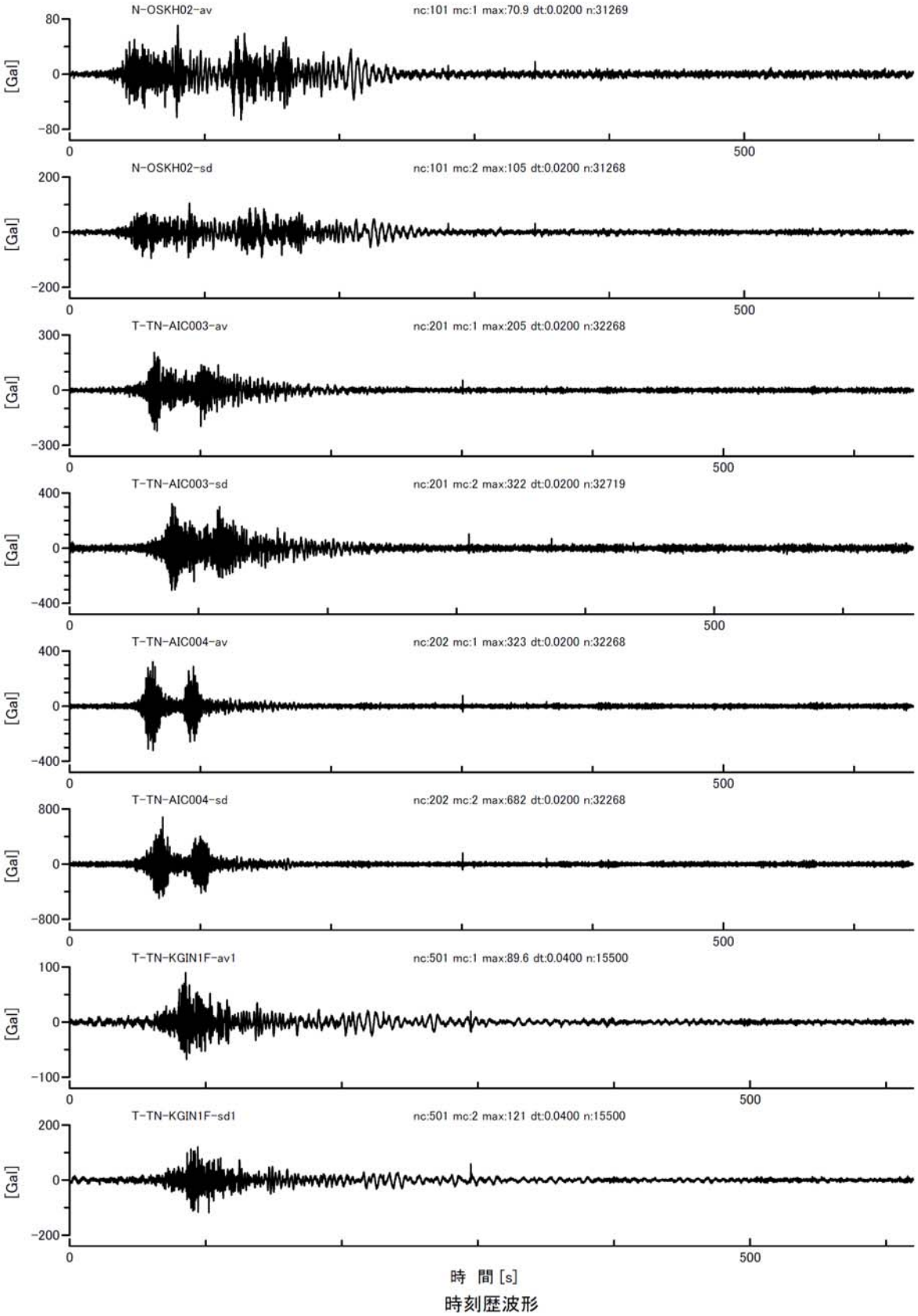


図 1.3-1 検討用入力地震動の時刻歴波形

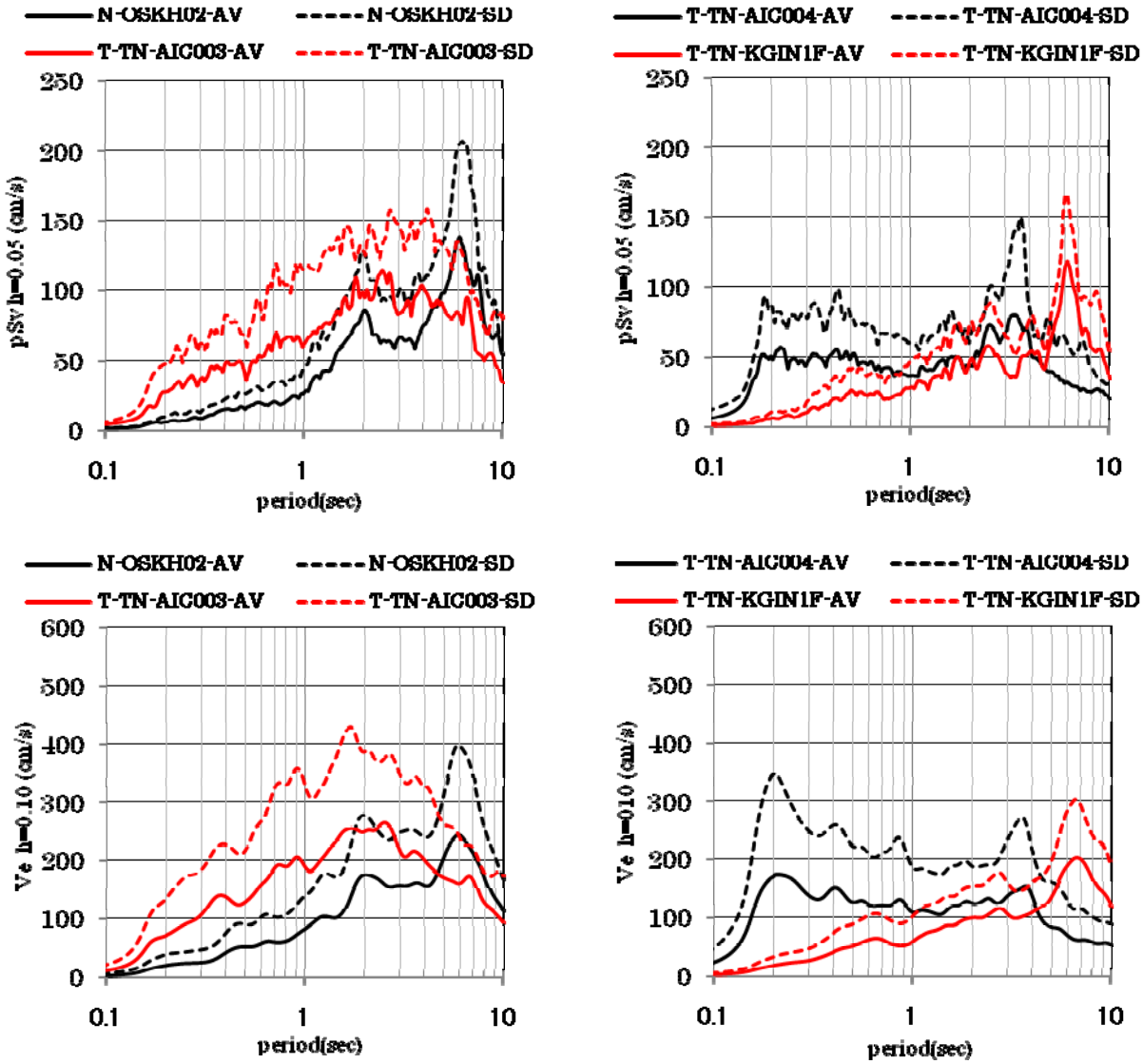


図 1.3-2　長周期地震動の擬似速度応答スペクトルとエネルギースペクトル

大阪平野の地震動(N-OSKH02)では最大加速度は 100cm/s^2 程度と小さいが、最大速度は平均+標準偏差(SD)では 50cm/s 程度ある。濃尾平野の地震動(T-TN-AIC003,T-TN-AIC004)では最大加速度は 200～700cm/s^2 程度とやや大きいが、最大速度は平均+標準偏差(SD)で 50cm/s 程度と大阪平野とほぼ同じレベルである。関東平野の地震動(T-TN-KGIN1F)では最大加速度は 100cm/s^2 程度と小さいく、最大速度も平均+標準偏差(SD)で 30cm/s 程度である。

擬似速度応答スペクトルを見ると、N-OSKH02 では 2 秒と 6 秒付近にピークがあり、6 秒では平均(AV)で 130cm/s 程度、SD で 200cm/s 程度となっている。また、T-TN-AIC003 では 2～4 秒程度が大きくなっており、AV で 100cm/s 程度、SD で 150cm/s 程度である。T-TN-AIC004 は 4 秒付近にピークがあり、SD では 150cm/s 程度となっている。T-TN-KGIN1F では 6 秒付近にピークがあり、SD では 150cm/s 程度となっている。

エネルギースペクトルを見ると、ピークとなる周期は擬似速度応答スペクトルと同様であるが、N-OSKH02 では AV で 250cm/s 程度、SD で 400cm/s 程度となっている。T-TN-AIC003 も

N-OSKH02 とほぼ同じ程度の大きさである。T-TN-AIC004 は AV で 150cm/s 程度、SD で 300cm/s 程度とやや小さい。T-TN-KGIN1F は表層の影響で短周期が大きくなっているが、長周期領域では AV で 50cm/s 程度、SD で 300cm/s 程度と T-TN-AIC004 と同程度となっている。

長周期地震動に関して、これまで様々な機関で作成し公開されてきている。表 1.3-2 にこれまで公開されてきた長周期地震動の代表的なものの一覧を示す。また、図 1.3-3, 図 1.3-4 にそれらの地震動の擬似速度応答スペクトル及びエネルギースペクトルを示す。

大阪平野で比較すると、関口波、釜江波ともに周期 6 秒付近にピークがあり、擬似速度応答スペクトル、エネルギースペクトルともに、N-OSKH02-SD とほぼ同程度である。鶴来波は 2 秒付近にピークがあり、N-OSKH02-SD をやや上回っている。全体的には N-OSKH02-SD と関口波、釜江波、鶴来波はほぼ同程度だが、関口波、釜江波は 3～4 秒付近にもピークがあり、その周期では N-OSKH02-SD よりも大きい。

濃尾平野では、三の丸波は 3 秒付近に大きなピークがあり、その付近では T-TN-AIC003 や T-TN-AIC004 の SD よりも、擬似速度応答スペクトル及びエネルギースペクトルともかなり大きいが、それ以外の周期帯では T-TN-AIC003-SD よりは小さいが、T-TN-AIC003-AV や T-TN-AIC004-SD よりも大きい。

表　1.3-2　これまで公開されてきた長周期地震動一覧

分類	略称	対象地震・評価地点など	加速度 cm/s^2	速度 cm/s	継続時間 s
大阪平野の長周期地震動（学会提供波）	釜江波	南海地震 此花　NS 方向	81.8	60.8	270.0
	関口波	南海地震 此花　NS 方向	96.5	40.4	300.0
	鶴来波	南海地震 此花　NS 方向	175.1	37.9	327.7
濃尾平野の長周期地震動（愛知県設計用入力地震動検討協議会）	AIC003-Suihon	新東海地震 名古屋三の丸　EW 方向	185.9	51.0	200.0

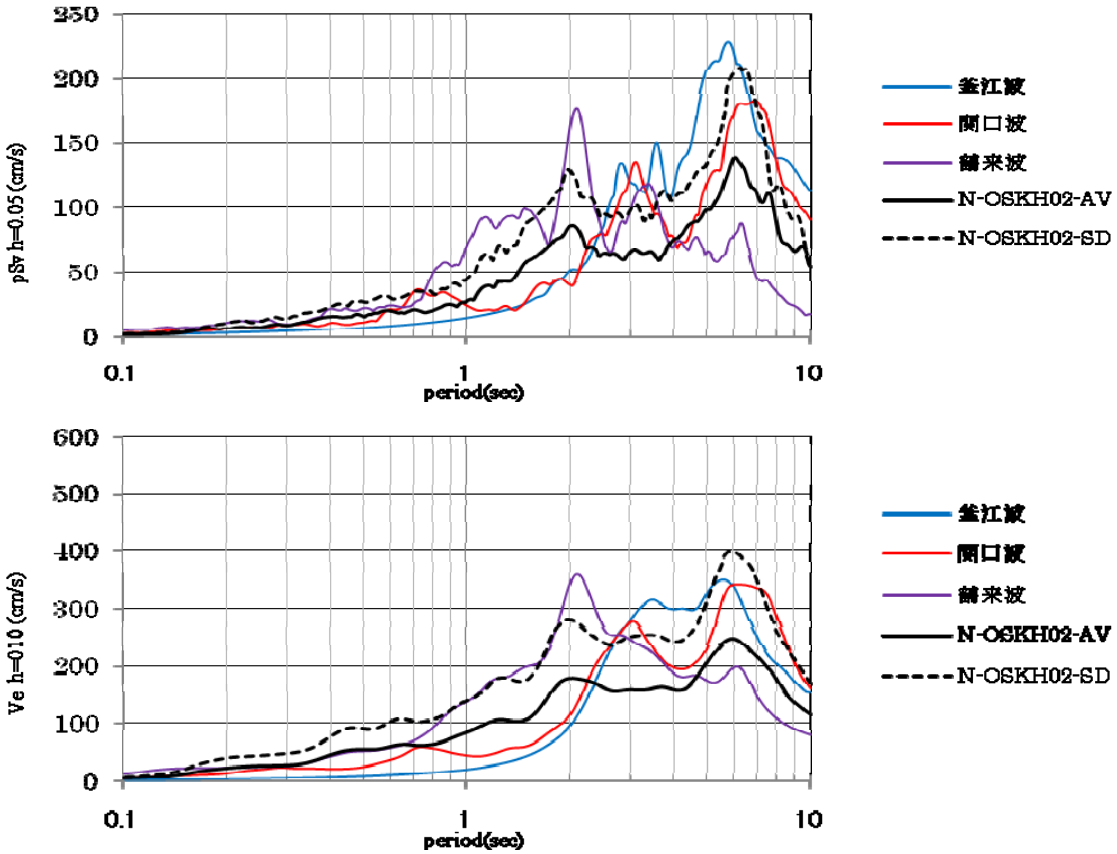


図 1.3-3　大阪平野長周期地震動の擬似速度応答スペクトル及びエネルギースペクトル

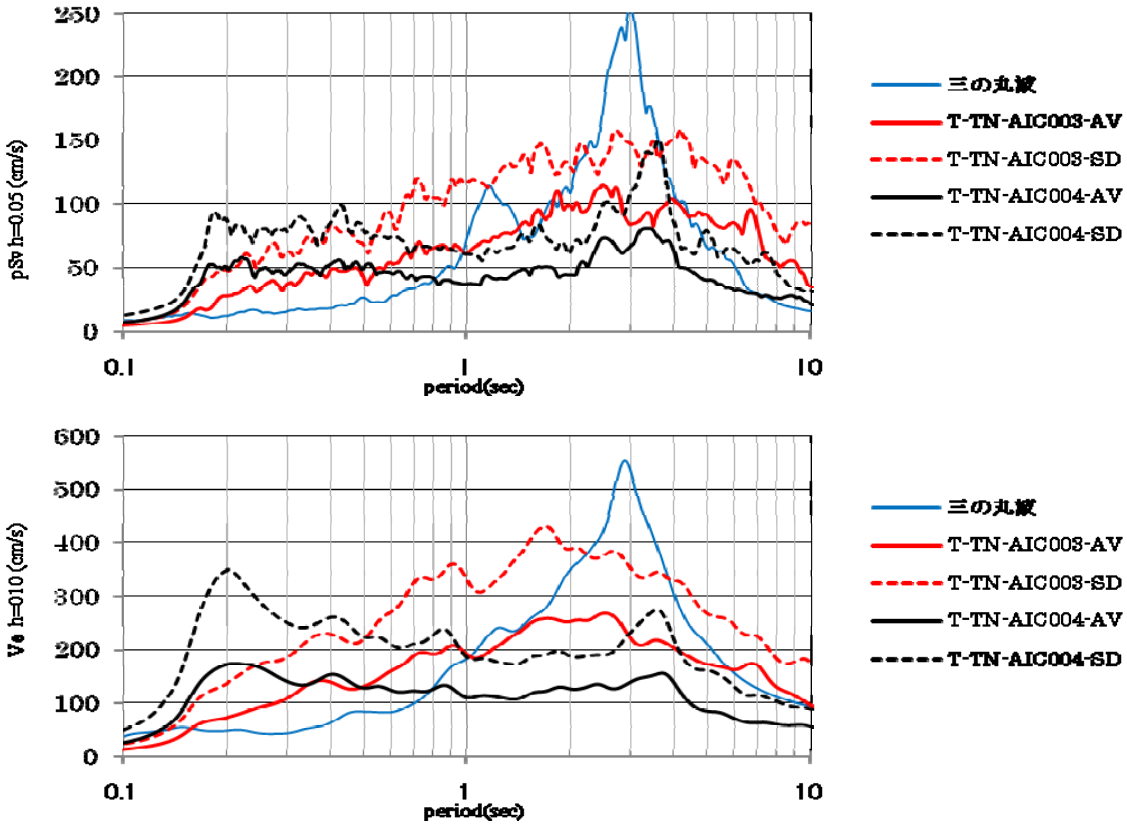


図 1.3-4　濃尾平野長周期地震動の擬似速度応答スペクトル及びエネルギースペクトル

1.3.2　検討用建物

検討に用いた建物は設計時期・建物高さ・免震システムなどがバランスよく網羅されるように選定した。

設計時期は第一期（1994 年以前)、第二期（1995 年～1999 年)、第三期（2000 年以降）の 3 期に分類した。第一期は免震構造の黎明期であり、建設会社などがダンパーを独自に開発するなど、研究開発を行いながら設計していた時代である。積層ゴムの剛性も高く、弾性すべり支承や転がり支承なども普及していなかったため、免震建築物の固有周期は比較的短いものが多く、上部建物のベースシア係数は 0.15 以上で設計されていた。また、積層ゴムの変形能力小さく、ピットクリアランスも小さいものが多い。棟数は少なく、80 棟程度である。

第二期は阪神淡路大震災から 2000 年の建築基準法改正以前の建物で、免震建築物が急激に普及した時代である。様々な支承やダンパーが開発・市販され、研究者ではない一般の設計者による設計が可能となった。せん断弾性率の小さい積層ゴムや弾性すべり支承も開発されるとともに、積層ゴムの使用面圧も高くなり、免震建築物の固有周期を 3 秒以上に長くすることが可能になり、上部建物のせん断力係数も 0.15 以下で設計されるものも増えてきた。設計用入力地震動はレベル２で標準波の 50cm/s として設計されているが、余裕度検討レベルとして標準波 75cm/s の検討もされている。また、サイト波や建築センター波を用いた解析も多くの建物で行われており、第一期に比べると格段に性能が向上していると思われる。この時期に設計されている建物は約 650 棟あると思われる。

第三期は 2000 年以降で、超高層建物や鉄骨造の高層建物など、周期の長い建物にも免震構造が採用され適用範囲が拡大してきている。従来の標準波に加え建告第 1461 号に定められた告示波により設計が行われてきている。入力の増大に伴い、免震部材の限界変形やピットクリアランスも大きくとった建物も増えている。

建物高さは低層（20m未満)、中高層（20m～60m未満)、超高層（60m以上）の 3 つに分類した。一般に、低層のものほど固有周期を長くすることが困難で、高層になるほど固有周期は長くなっていると考えられる。低層から超高層までの建物をバランスよく選定することにより、幅広い固有周期の免震建築物を選定できると考えている。

免震システムは大きく、天然ゴム系積層ゴム+ダンパー、鉛プラグ入り積層ゴム、高減衰ゴム系積層ゴムの 3 つに分類し、天然ゴム系積層ゴム+ダンパーは履歴ダンパー、粘性ダンパー、すべり支承の 3 つに細分している。

表 1.3-3 にモデル建物分類を、表 1.3-4 に分類表に記入された建物の概要を示す。ここにおいて、黄色に着色されたモデルについて、エネルギー吸収に関する検討を行っている。

表 1.3-3　モデル建物分類表

		低層(20m未満)			中高層(20m～60m未満)			超高層(60m以上)		
		第一世代（1994まで）	第二世代（1995～1999）	第三世代（2000以降）	第一世代（1994まで）	第二世代（1995～1999）	第三世代（2000以降）	第一世代（1994まで）	第二世代（1995～1999）	第三世代（2000以降）
天然ゴム+ダンパー（NR+D）	天然ゴム+履歴ダンパー	H-1		H-3	H-2	E-2 J-1	C-1 D-3 I-2		B-2	H-4
	天然ゴム+粘性ダンパー	B-1		B-3		G-3	G-4			B-4
	天然ゴム+すべり支承			D-1		F-2	F-3			F-4
鉛プラグ入り積層ゴム（LRB）		A-1	I-3		C-2	E-1 G-2 C-3 J-3	D-2 E-4 J-4		J-2	C-4 E-3 D-4
高減衰積層ゴム（HDR）			I-4	A-4	A-2 G-1	I-1	A-3			F-1

総計　40件

表 1.3-4　モデル建物リスト

記号	分類	軒高（m）	設計年	構造種別	免震システム　※	固有周期	
						基礎固定（s）	200%ひずみ時（s）
A-1	低層第1世代	13.4	1987	RC	LRB+NR	0.41	1.77
A-2	中高層第1世代	29.4	1991	SRC	HDR	0.61	2.66
A-3	中高層第3世代	34.6	2003	RC	HDR+NR	0.73	3.25
A-4	低層第3世代	9.1	2008	RC	HDR	0.16	3.5
B-1	低層第1世代	11.0	1985	RC	NR＋粘性D	0.42	2.089
B-2	超高層第2世代	84.7	1997	RC	NR＋鉛D	2.192	3.895
B-3	低層第3世代	13.1	2000	RC	NR＋SL＋OD	0.217	3.36
B-4	超高層第3世代	120.9	2006	RC	NR＋SL＋OD	3.16	6.19
C-1	中高層第3世代	52.4	2005	SRC	NR+LRB+鋼D+OD	1.28	4.17(300%)
C-2	中高層第1世代	36.1	1994	SRC、S	LRB	0.82	2.99(100%)
C-3	中高層第2世代	30.5	1998	SRC、S	LRB+HDR	0.44	4.05
C-4	超高層第3世代	88.5	2008	RC	LRB+NR	2.27	4.93
D-1	低層第3世代	9.0	2003	S	NR+LRB+SL	0.577	2.83
D-2	中高層第3世代	29.9	2007	RC	LRB+NR	0.863	3.45
D-3	中高層第3世代	30.9	2007	RC	NR+鉛D+鋼D	0.74	3.4
D-4	超高層第3世代	144.0	2006	RC	LRB+転がり+OD	3.45	6.43
E-1	中高層第2世代	30.6	1996	RC	LRB+NR	0.79	3.4
E-2	中高層第2世代	26.1	1996	RC	NR+鉛D+鋼D	0.68	2.56
E-3	超高層第3世代	67.4	2004	RC	LRB+転がり	1.78	5.24
E-4	中高層第3世代	34.0	2004	RC	LRB	0.87	3.87
F-1	超高層第3世代	64.0	2002	S	HDR＋OD	2.55	4.58
F-2	中高層第2世代	19.0	1996	RC	NR+SL	0.166	3.435
F-3	中高層第3世代	31.0	2006	S	NR+SL	1.81	4.3
F-4	超高層第3世代	140.0	2006	RC	NR+SL	3.49	5.55
G-1	中高層第1世代	39.8	1994	SRC+S	HDR	1.09	2.986
G-2	中高層第2世代	30.9	1996	SRC+S	LRB+NR	1.07	3.611
G-3	中高層第2世代	28.7	1997	CFT+S	NR＋OD	1.32	4.027
G-4	中高層第3世代	24.2	2001	S	NR＋OD	1.039	3.573
H-1	低層第1世代	11.9	1990	RC	NR+鉛D	0.27	2.23
H-2	中高層第1世代	20.8	1989	RC	NR+鉛D+摩擦D	0.61	2.78
H-3	低層第3世代	10.2	2000	S	NR+鉛D	0.48	2.77
H-4	超高層第3世代	60.4	2002	S	NR+鉛D+鋼D	1.82	4.02
I-1	中高層第2世代	31.3	1996	RC	HDR	1.1	4.27
I-2	中高層第3世代	41.2	2000	RC	NR＋SL＋鉛D+鋼D	1.57	5.09
I-3	低層第2世代	9.6	1996	RC	LRB	0.59	3.9
I-4	低層第2世代	15.9	1997	RC	HDR+SL	0.91	4.1
J-1	中高層第2世代	44.3	1999	RC	NR+転がり+鋼D+OD	0.5	3.04
J-2	超高層第2世代	75.3	1999	RC	LRB+転がり+OD	0.98	3.53
J-3	中高層第2世代	29.2	1998	RC	LRB	0.095	2.75
J-4	中高層第3世代	24.2	2003	SRC	LRB+転がり+OD	0.151	3.24

エネルギー検討

※注　NR: 天然ゴム系積層ゴム、LRB: 高減衰ゴム系積層ゴム、HDR: 鉛プラグ入り積層ゴム、
SL:すべり支承、OD:オイルダンパー、粘性 D:粘性ダンパー、鋼 D:鋼材ダンパー、鉛 D:鉛ダンパー

1.3.3　応答解析結果

ここにおいて、検討用入力地震動のうち大阪平野の長周期地震動(N-OSKH02-AV,SD)および濃尾平野の長周期地震動(T-TN-AIC003-AV,SD T-TN-AIC004-AV,SD)の応答結果の概略を示す。

図 1.3-5 にエネルギーの速度換算値 V_E をエネルギースペクトル(h=0.1)とともに示す。図 1.3-6 に応答ベースシア係数を加速度応答スペクトル(h=0.2)/g とともに示す。図 1.3-7 に免震層の応答変位を変位応答スペクトル(h=0.2、0.3)とともに示す。

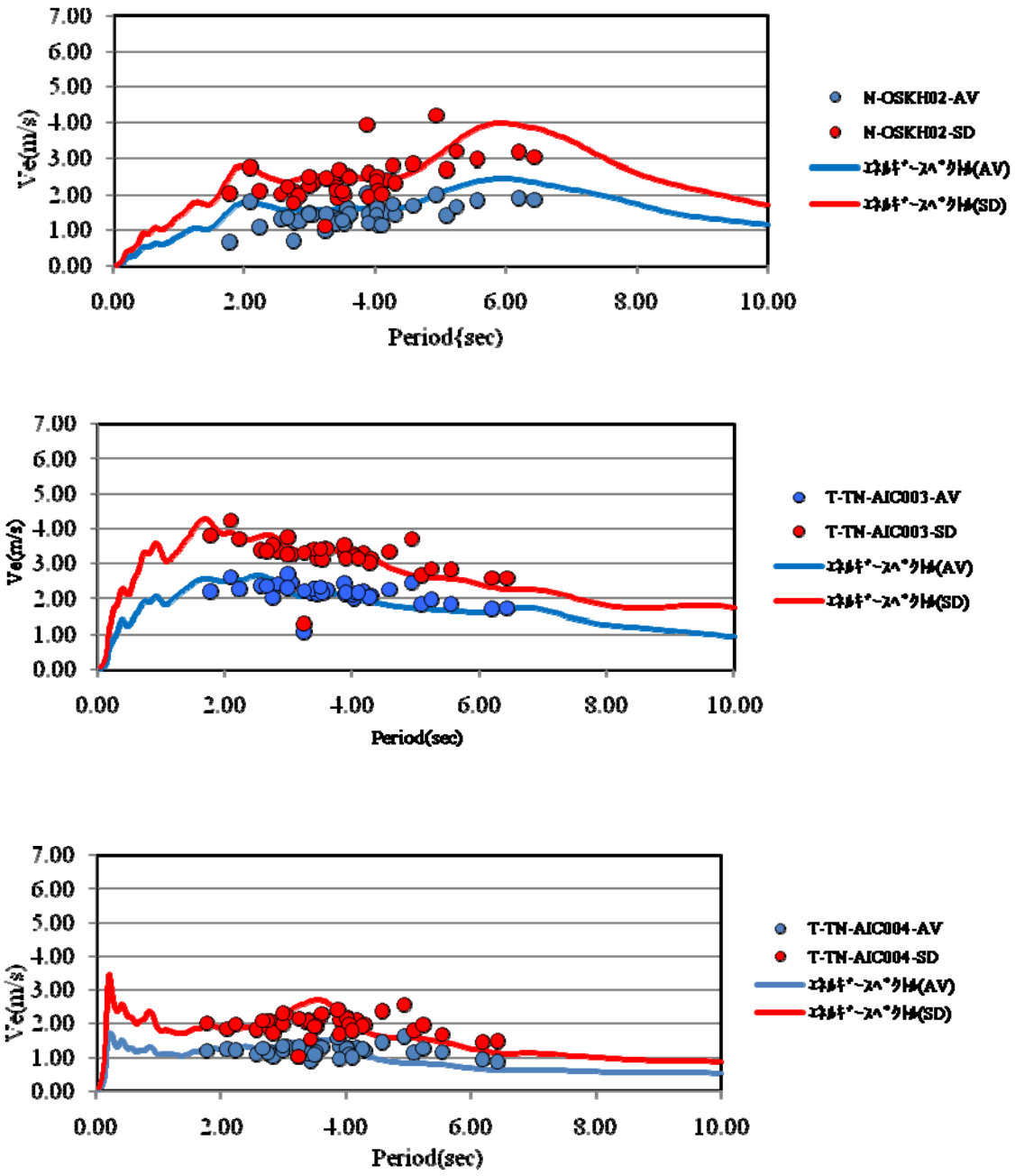


図 1.3-5　エネルギーの速度換算値とエネルギースペクトル

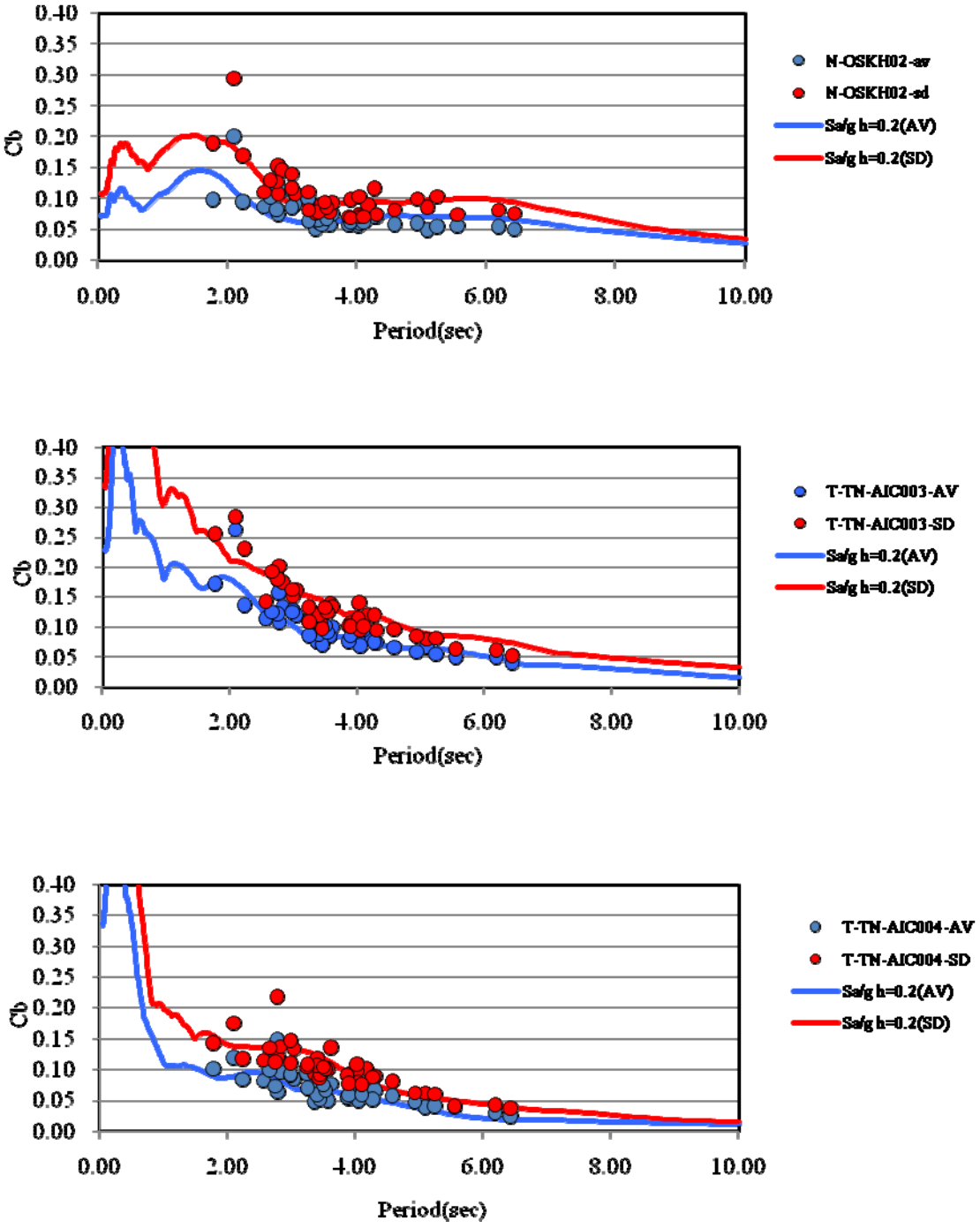
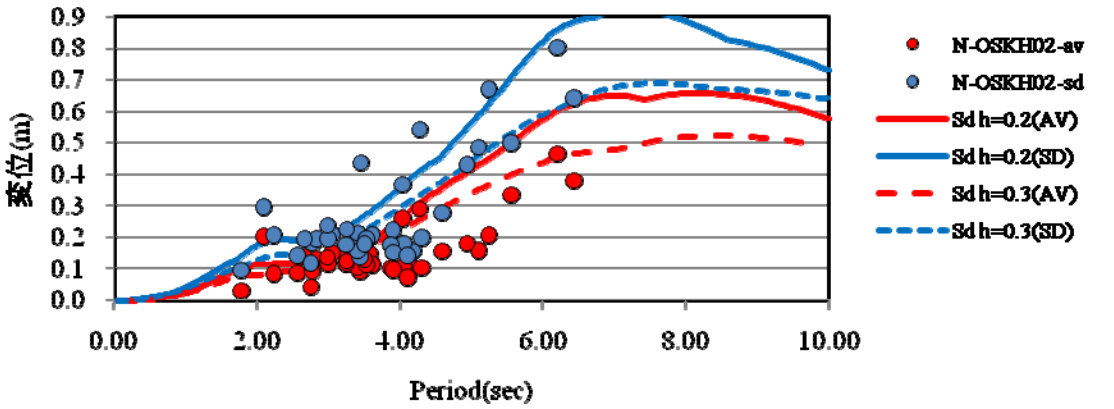
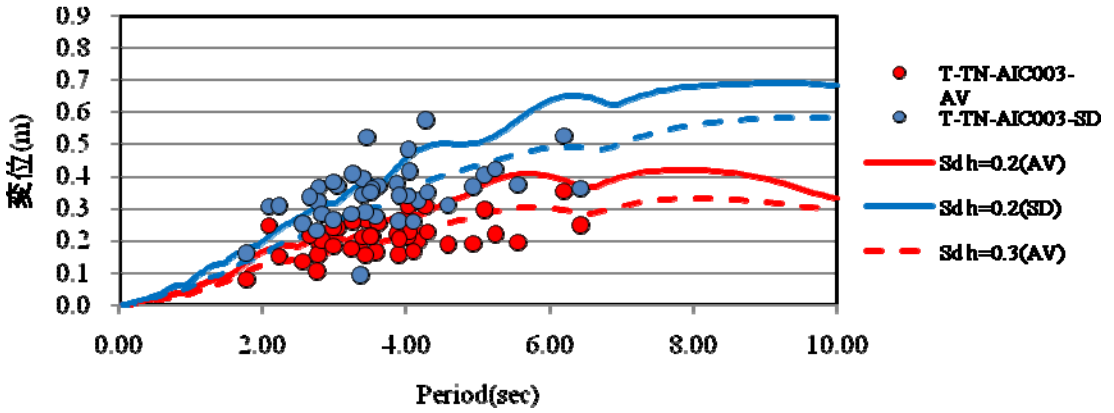


図 1.3-6　応答ベースシア係数





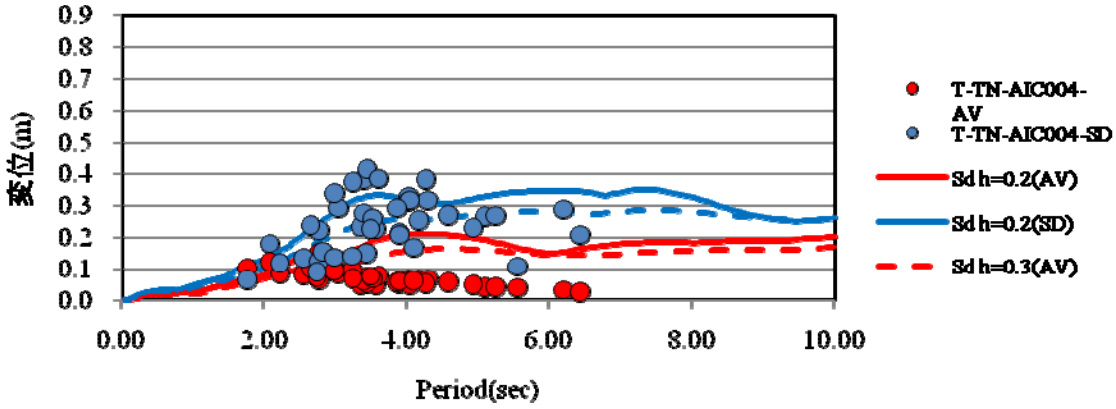


図 1.3-7　免震層の応答変位

解析結果に対する考察を以下に示す。ここにおいて、N-OSKH02 波は OSK、T-TN-AIC003 は AIC003、T-TN-AIC004 は AIC004 とする。また、平均の地震動を AV、平均+標準偏差の地震動を SD と呼ぶ。

1) 入力エネルギーについて

・エネルギーの速度換算値 V_E はエネルギースペクトルと非常によく一致している。

・OSK では AV で V_E=2m/s 程度、SD では V_E=2～4m/s となっている。固有周期 2 秒と 6 秒付近にピークがあり、6 秒付近では、SD で V_E=4m/s 程度と非常に大きい。

・AIC003 では AV で V_E=2m/s 程度、SD では V_E=3～4m/s となっている。固有周期 2 秒付近にピークがあるが 2～4 秒にかけて全体的に大きくなっている。

・AIC004 は AV で V_E=1m/s 程度、SD で V_E=2m/s 程度であり、他の波に比べるとやや小さい。

・今回解析に用いた長周期地震動は AV では告示波とほぼ同程度だが、SD では告示波の 1.5～2 倍程度と非常に大きい。それぞれ、ピークとなる周期があり、ピークでは V_E=4m/s 程度となっている。

2) 応答ベースシア係数について

・OSK の AV では固有周期 2 秒付近で Cb=0.2 のものがあるが、それ以外は Cb=0.05～0.1 であり従来の地震動と同程度である。SD では固有周期 3 秒以上では Cb=0.1 程度で、固有周期 3 秒以下では Cb=0.15～0.2 程度で Cb=0.3 となっているものもある。従来の地震動に比べると固有周期 4 秒以上では 2 倍程度になっている。固有周期 4 秒以下では従来の地震動と同程度である。

・AIC003 の AV では固有周期 4 秒以上では Cb=0.05 程度であり、固有周期 4 秒以下では概ね Cb=0.10～0.15 程度だが、固有周期 2 秒付近で急に大きくなり Cb=0.25 程度のものもある。概ね従来の地震動と同程度。SD では固有周期 4 秒以上で Cb=0.05～0.10 程度。固有周期 3 秒以下で急に大きくなり Cb=0.15 を越え、2 秒では Cb=0.3 程度になる。

・AIC004 の AV では Cb=0.15 以下で、従来の地震動とほとんど同程度。SD では固有周期 3 秒付近で Cb=0.15～0.20 と大きくなる。

・応答ベースシア係数は h=0.2 の加速度応答スペクトル Sa を重力加速度で除した Sa/g とほとんど一致している。

・総体的には AV は従来の地震動と同程度、SD は地震動ピークとなる周期では従来の地震動よりもやや大きい。

3) 免震層の応答変位について

・OSK の AV では固有周期 4 秒以下では 0.3 m 以下だが、6 秒付近で急に大きくなり 0.5 m 程度となっている。SD では固有周期 4 秒を超えると急激に大きくなり 0.5 m を越えるものも多く最大で 0.8 m となっている。

・AIC003 の AV ではほとんど 0.3 m 以下だが、SD では 0.3 m を越えるものがほとんどで 0.5m～0.6m のものも多い。

・AIC004 の AV はほとんどが 0.1m 以下と小さく、SD でも最大で 0.4m 程度である。

・応答変位は h=0.2 の変位応答スペクトルと AV では概ね一致するが、SD では応答スペクトルよりも応答値の方が大きいものも多い。これは変位が大きくなると等価減衰定数が低下することによると考えられる。

・総体的には AV は従来の地震動よりも OSK の固有周期 6 秒付近でやや大きくなるが、概ね

同程度。SD になると AV に比べかなり大きくなり 0.4m を越えるものの多く、0.6～0.8m になる場合もある。応答ベースシア係数に比べ、AV と SD の差は大きい。

1.3.4　免震部材のエネルギー吸収に対する検討

（1）　免震部材の想定吸収エネルギー量

今回検討を行っている長周期地震動により、免震部材にどの程度のエネルギーが入力されるかを、簡易的な方法で予測する。また、それによる鉛プラグ入り積層ゴム、高減衰ゴム系積層ゴム、オイルダンパーの温度上昇についても検討する。

建物に入力されるエネルギーは 10%減衰のエネルギースペクトルによる等価速度 V_E をもとに精度よく推定される。そこで、ここではエネルギースペクトルより、各固有周期で建物に入力される総入力エネルギーを算定し、それをすべて免震部材で吸収するものとして、免震部材のエネルギーを推定することを試みた。今回解析を行った建物全 40 棟に関して、免震部材でどの程度エネルギーを吸収しているかを調査しており、図 1.3-8 に基礎固定の場合の固有周期と免震部材のエネルギー吸収比率の関係を示すが、免震部材のエネルギー吸収比率は固有周期が短いほど大きい傾向にあり、基礎固定時で 2 秒以下では概ね 0.8～1.0 であり、1.0 に近いものが多い。基礎固定の固有周期が 2 秒以上となる超高層建物では比率に大きなばらつきがあり 0.2 程度のものも多い。本項で行う、エネルギーの推定はすべて免震部材で吸収するものとしているので、周期の長い建物にとってはかなり安全側の評価である。

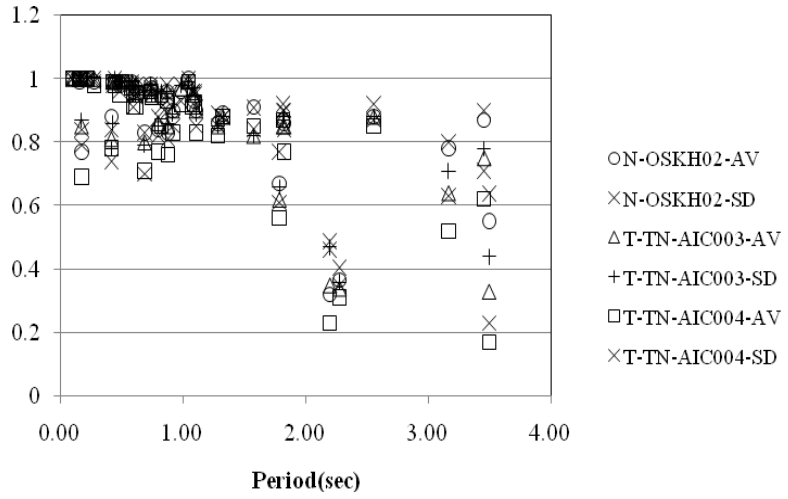


図 1.3-8　基礎固定時固有周期と免震部材のエネルギー吸収比率

推定においては、ダンパーの量を仮定する必要があるが、ダンパーの降伏せん断力を建物総重量で除した α は 0.03～0.04 程度のものが多いので、α=0.03 と 0.04 の 2 ケースについて示す。但し、高減衰ゴム系積層ゴムは、すべての支承を高減衰ゴム系積層ゴムとした場合は、周期を定めれば積層ゴムの面積は確定されるので α に関係なく求めている。

図 1.3-9 に免震層の総変位距離の推定を示す。これは、総入力エネルギーを降伏荷重で除して求めたもので、降伏変位が 0 とした時のダンパーの累積塑性変形量およびすべり支承の総すべり量となる。これによると、総変位量は OSKH02-SD と AIC003-SD が大きく、α=0.03 で約 30

m、α＝0.04 で約 20mとなっている。OSKH02-AV、AIC003-AV は約 10m程度である。AIC004 や KGIN は SD でも 10～15m程度である。

図 1.3-10 に鉛プラグ入り積層ゴムのエネルギーE／鉛プラグ体積 Vp の推定を示す。ここにおいて、鉛プラグの高さは 400mm と仮定した。また、図 1.3-11 に E/Vp を鉛の体積熱容量（比熱×比重=1.65 J/cm^3℃）で除して求めた温度上昇の推定を示す。これは完全断熱状態でエネルギーがすべて熱になるとした温度上昇なのでやや安全側の評価であると思われるが、OSKH02-SD と AIC003-SD では最大 400℃程度まで上昇する。

図 1.3-12 に高減衰ゴム系積層ゴムのエネルギーE／ゴム体積 Vr の推定を示す。ここにおいて、高減衰ゴム系積層ゴムは G=0.59N/mm^2（E0.6 タイプ）とし、ゴム総厚は 200mm と仮定した。固有周期は 200%ひずみの等価剛性を用いて算定している。また、図 1.3-13 に E/Vr をゴムの体積熱容量（1.43 J/cm^3℃）で除して求めた温度上昇の推定を示す。OSKH02-SD が最も温度上昇は大きいが最大 50℃程度であり、それ以外は 20℃程度と鉛プラグ入り積層ゴムの鉛の温度上昇に比べかなり小さい。

図 1.3-14 に鋼材ダンパー（U型ダンパー　t=36mm× 8 本）の 1 台あたりの吸収エネルギー推定を示す。OSKH02-SD と AIC003-SD が大きく 10000kNm 程度となっている。

図 1.3-15 に鉛ダンパー（U2426）の 1 台あたりの吸収エネルギー推定を示す。OSKH02-SD と AIC003-SD が大きく 6000kNm 程度となっている。

図 1.3-16 にオイルダンパー（リリーフ荷重 1000ｋN タイプ）を用いた場合の吸収エネルギー推定を示す。OSKH02-SD と AIC003-SD が大きく 25000~30000kNm 程度となっている。図 1.3-17 にオイルダンパーが吸収するエネルギーがすべて熱に変換されると考えた場合のダンパー温度を示す。ここにおいて、ダンパーの温度上昇は放熱を無視して、ダンパーの吸収エネルギーを鉄部とオイルの体積熱容量で除して算定した。ここにおいて、算定した温度は外気温を 20℃としてダンパーの温度がどの程度になるかを求めたものである。これによると、OSKH02-SD と AIC003-SD において、ダンパー温度は 80℃近くまで上昇している。

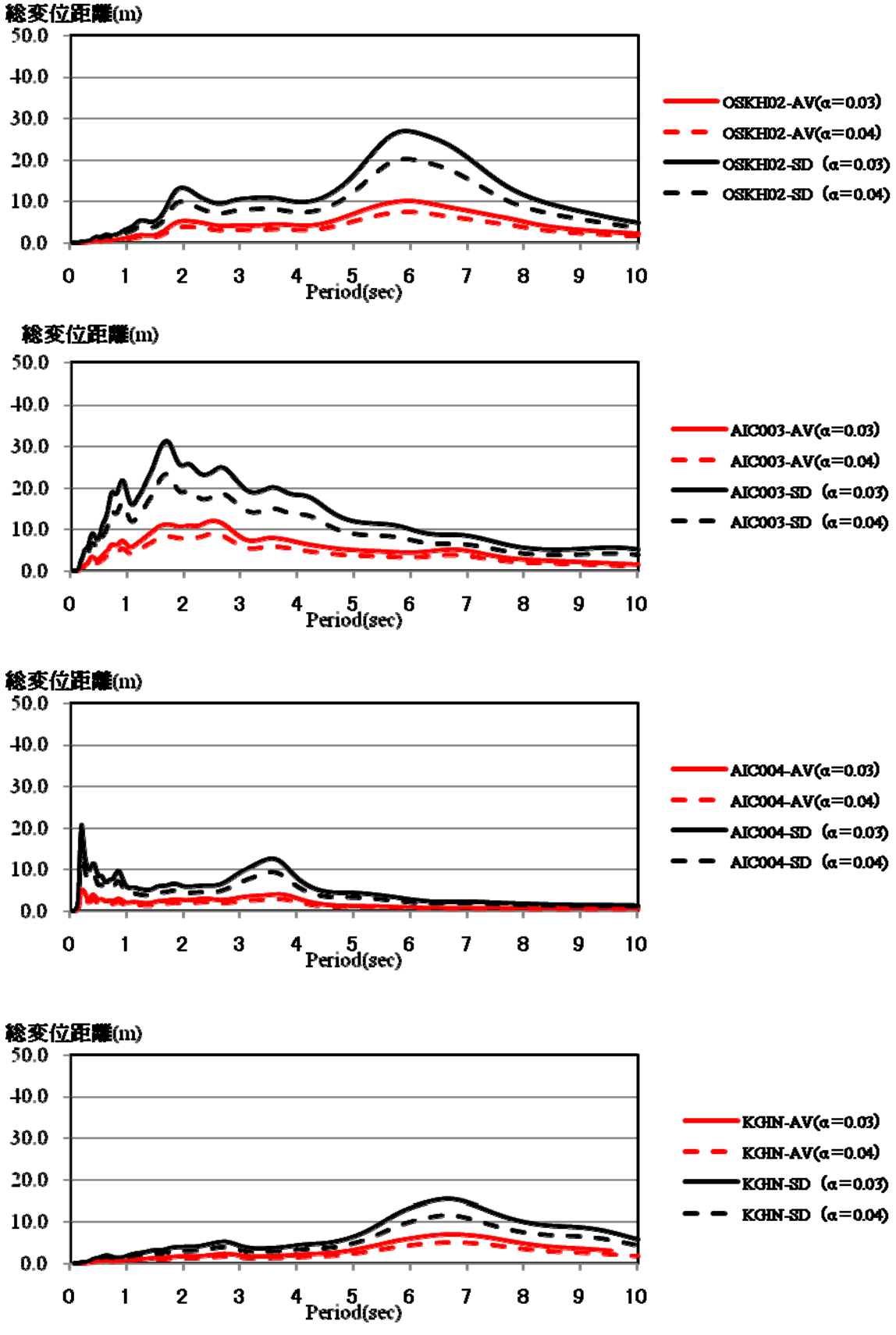


図 1.3-9　総変位距離の推定

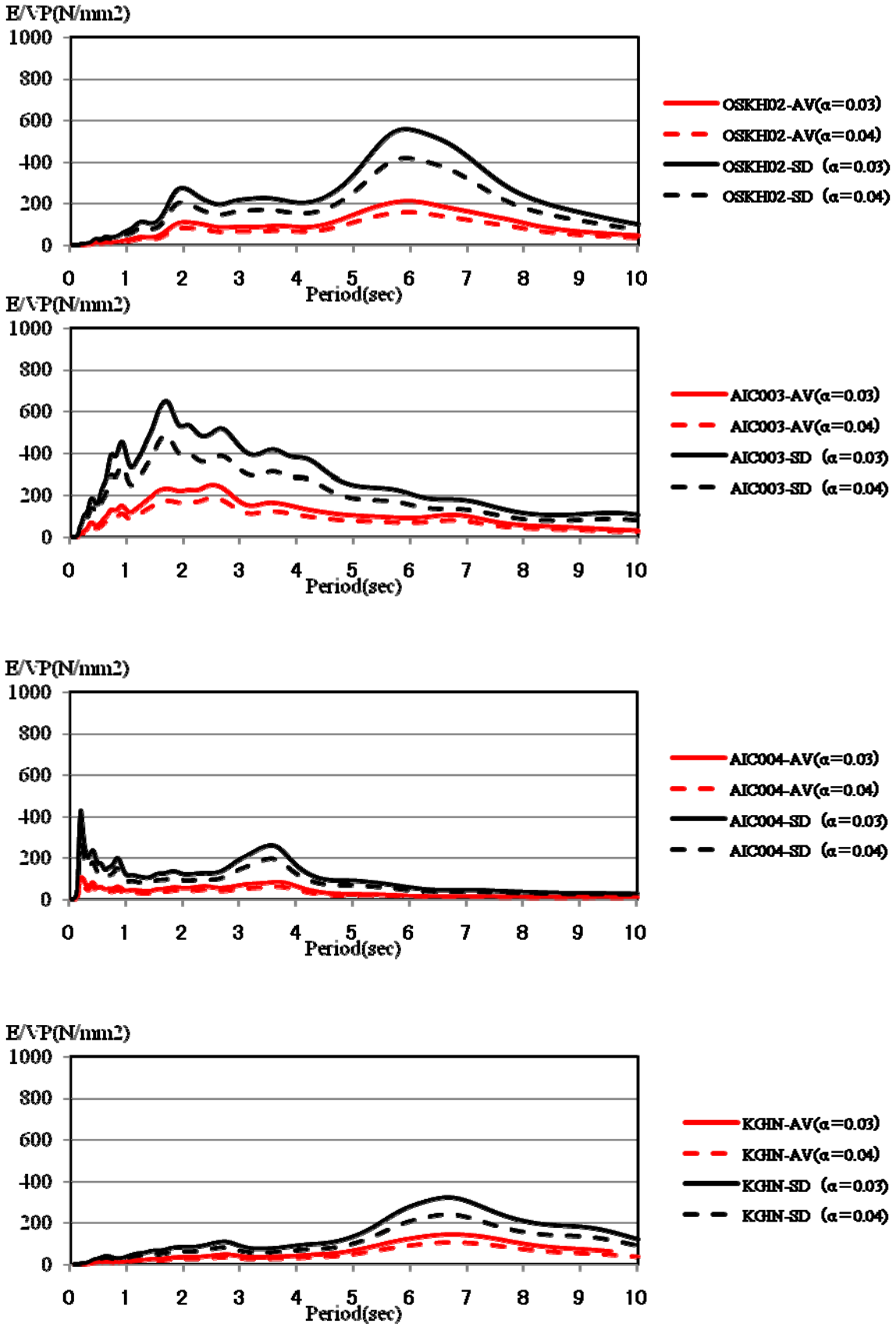


図 1.3-10　鉛プラグ入り積層ゴムのエネルギー/鉛プラグ体積の推定

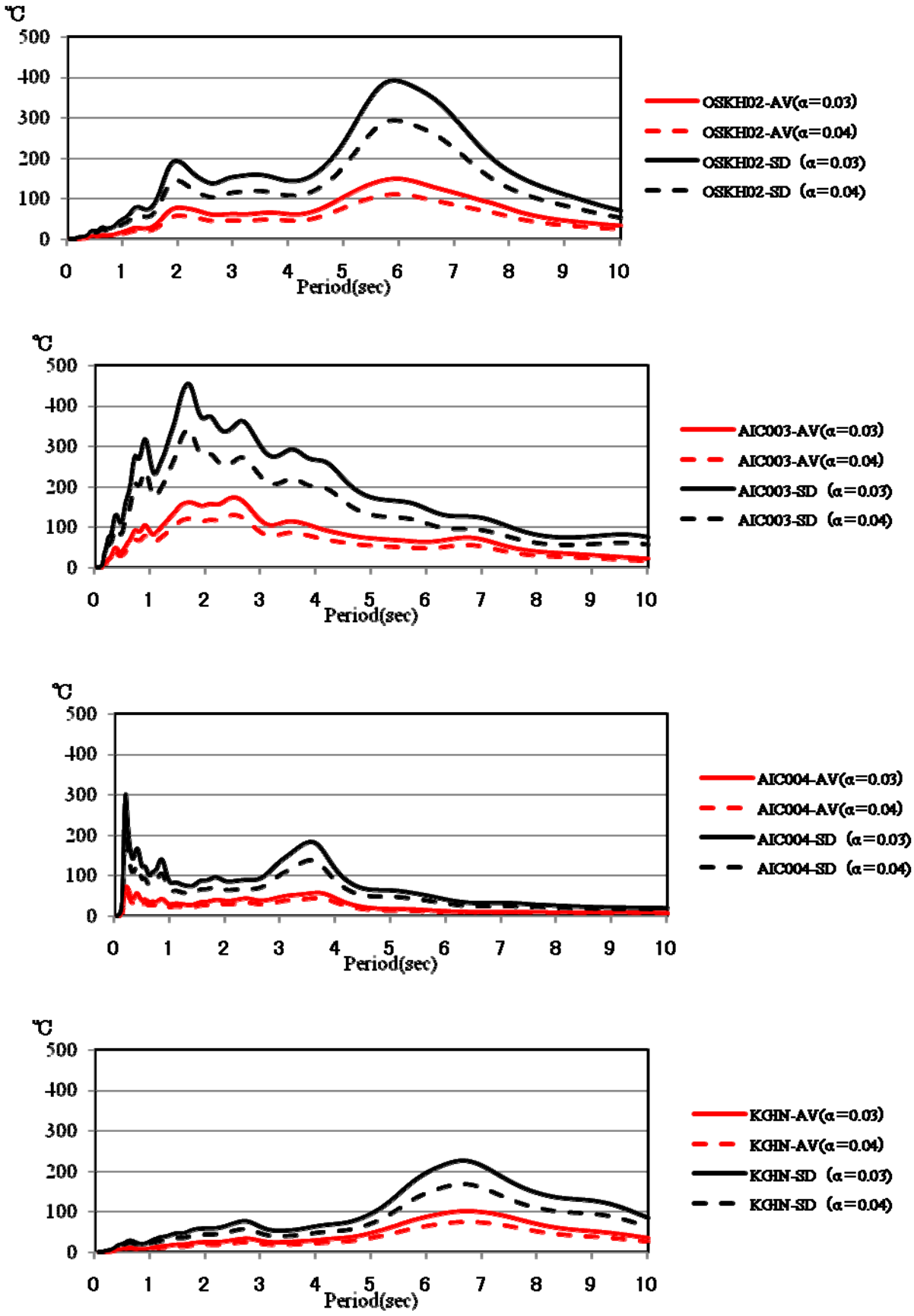


図 1.3-11　鉛プラグ入り積層ゴムの温度上昇の推定

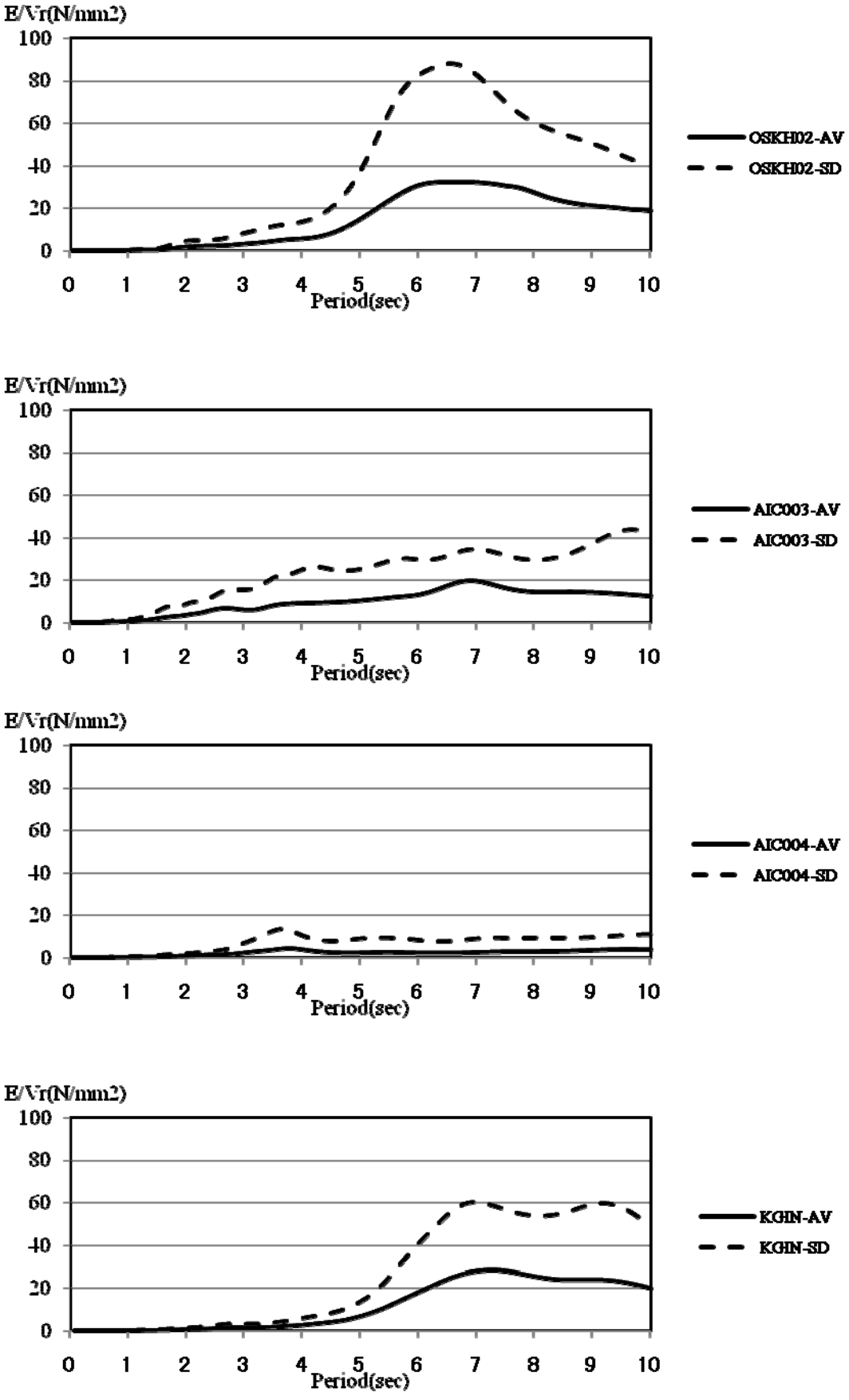


図 1.3-12　高減衰ゴム系積層ゴムのエネルギー/ゴム体積の推定

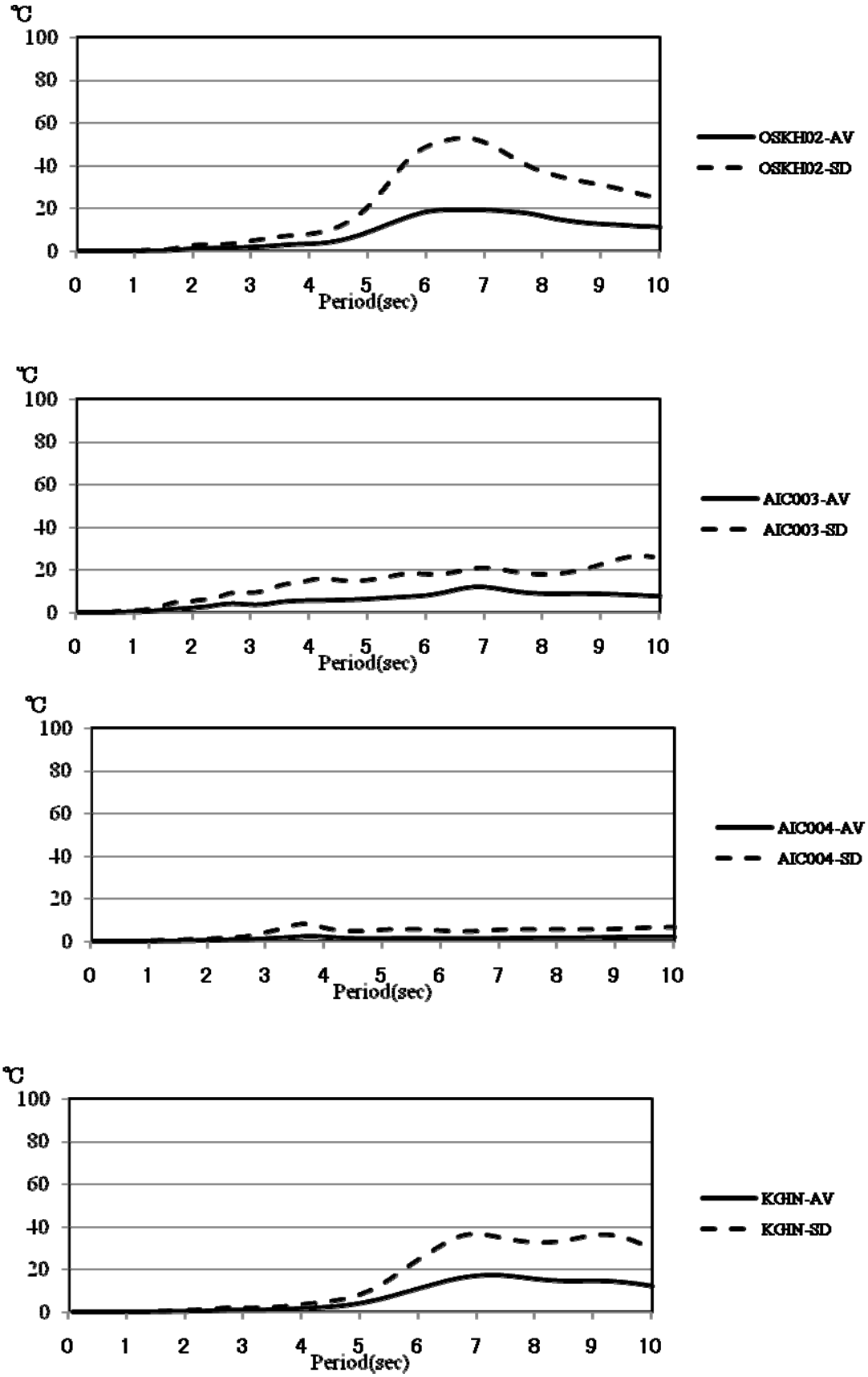
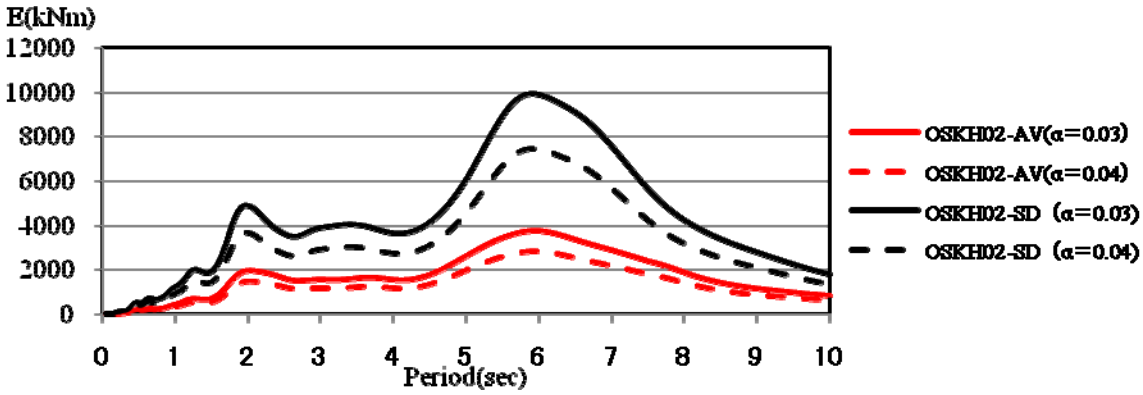
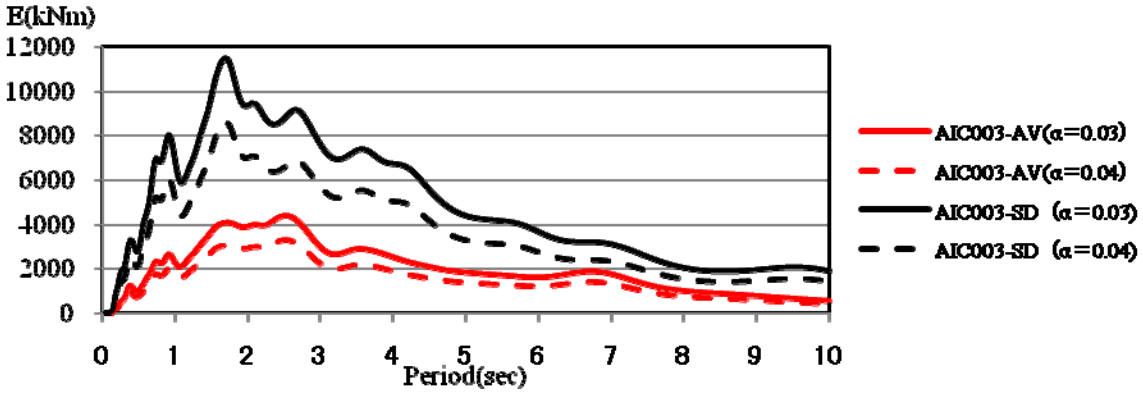
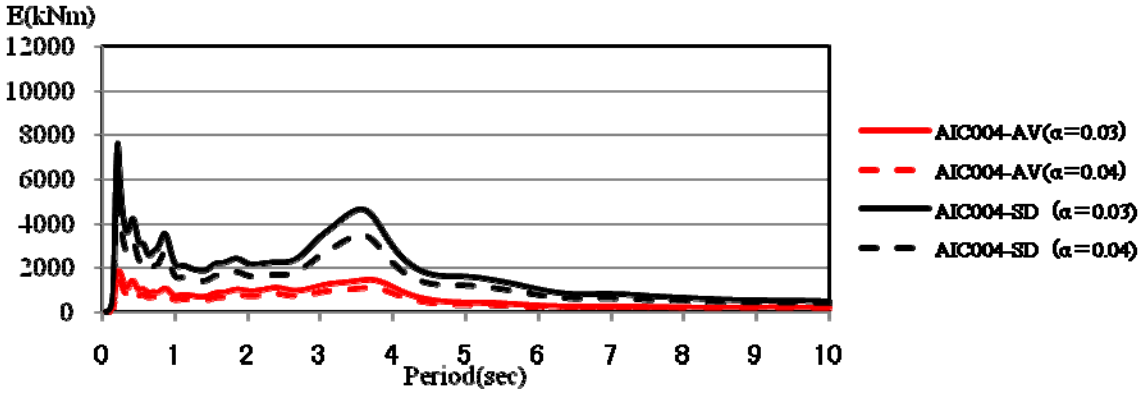


図 1.3-13　高減衰ゴム系積層ゴムの温度上昇の推定







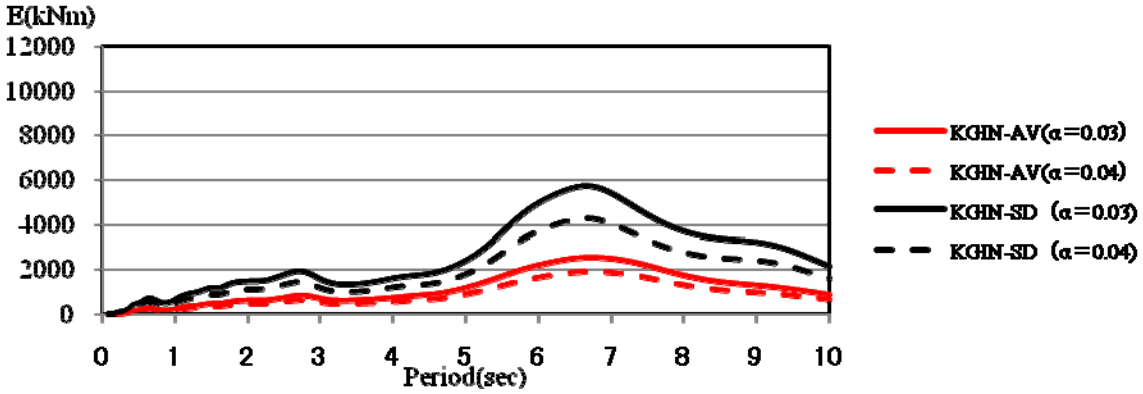


図 1.3-14　鋼材ダンパーの 1 台あたりのエネルギーの推定

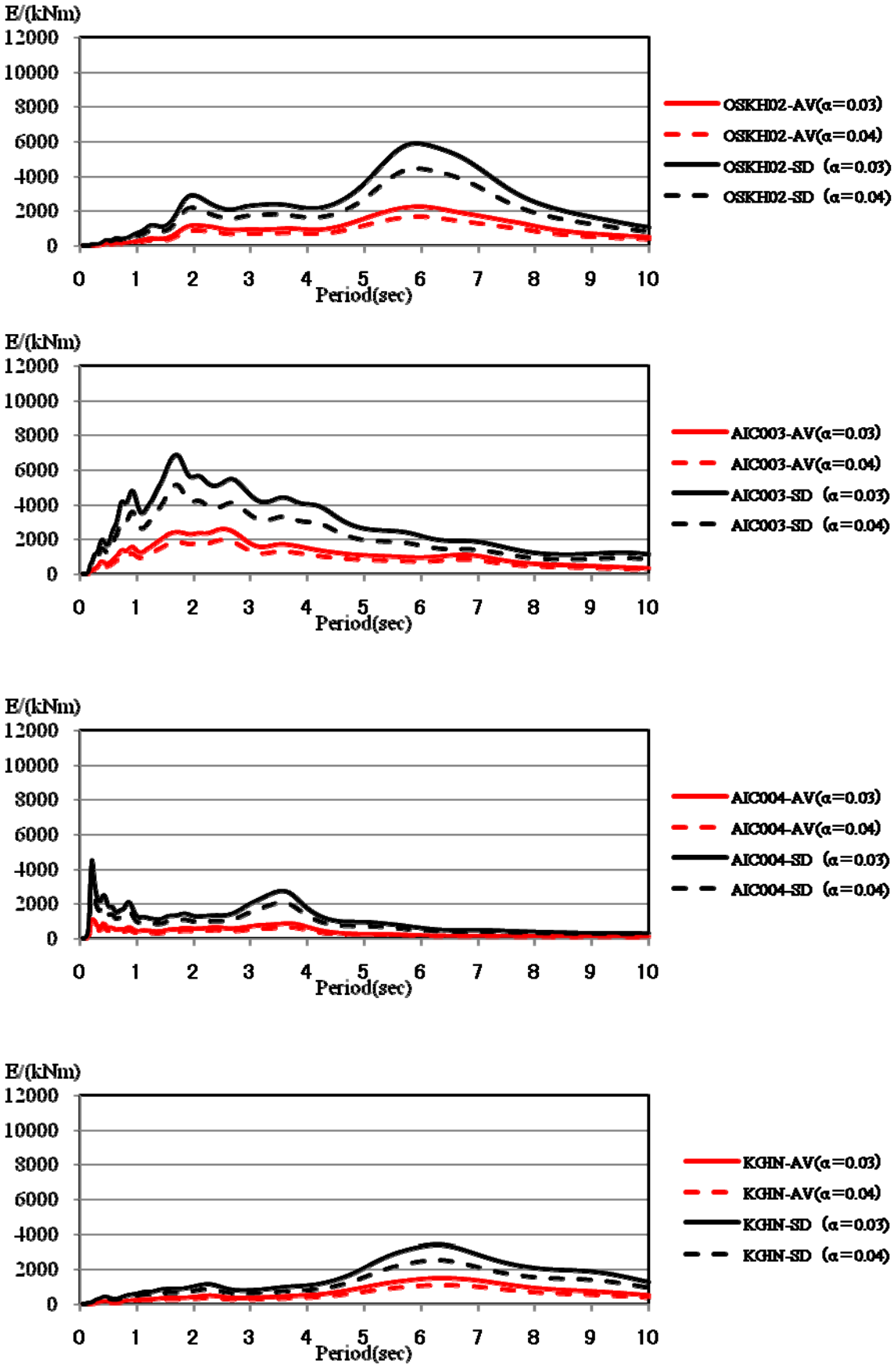


図 1.3-15　鉛ダンパーの 1 台あたりのエネルギーの推定

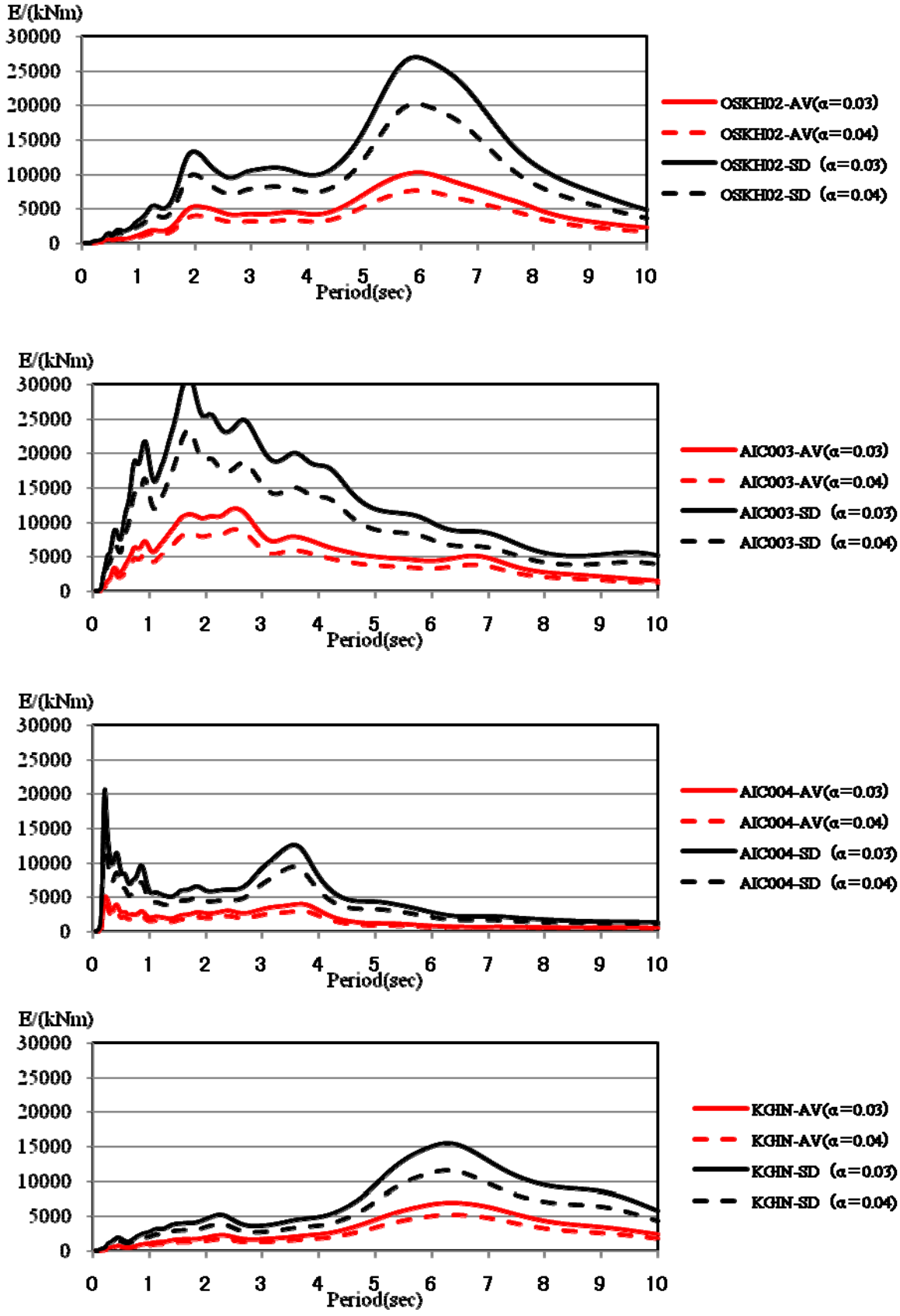


図 1.3-16　オイルダンパーの 1 台あたりのエネルギーの推定

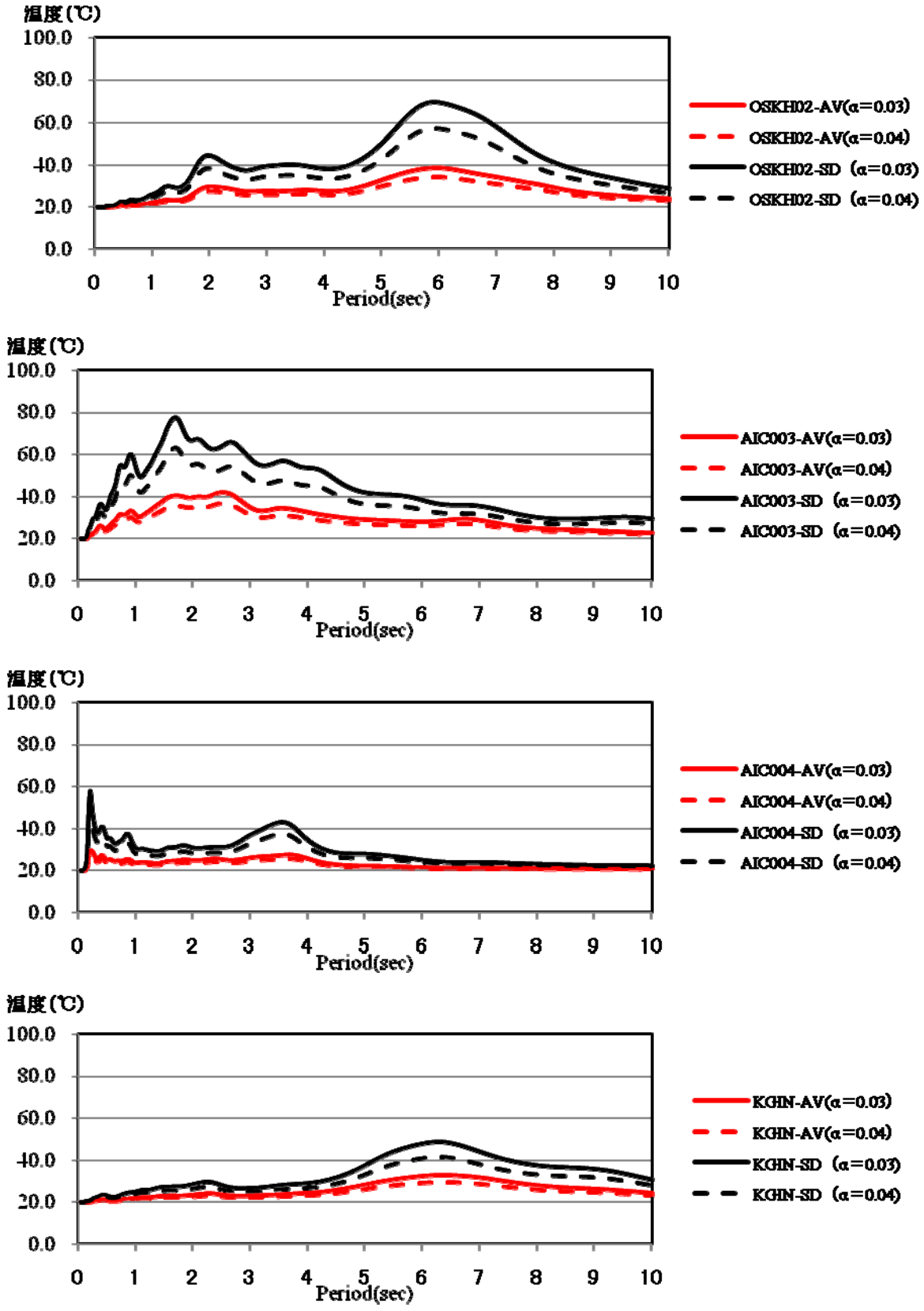


図 1.3-17　オイルダンパーの温度の推定

(2)　モデル建物の免震部材の吸収エネルギー量

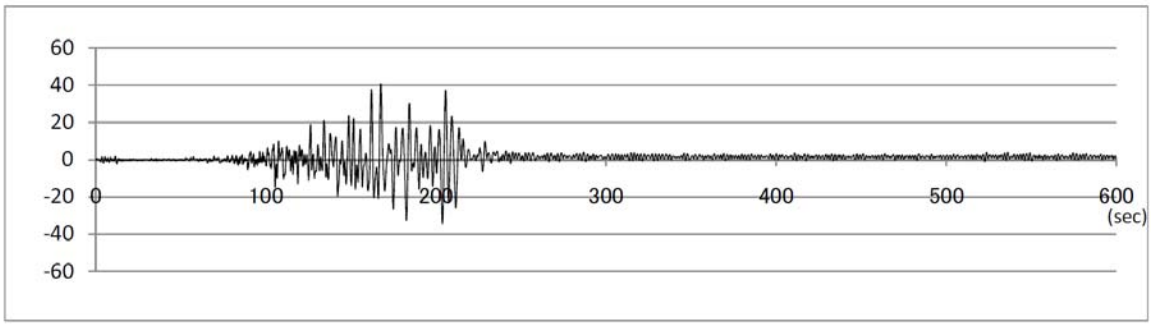
検討にあたっては、建物モデル 40 棟の中から、すべての種類の免震部材を網羅できるように 10 棟を選択し、検討を行う。これらの建物について、表 1.3-5 に示すように各免震部材ごとに吸収エネルギーや累積塑性変形などのエネルギー吸収に係わると思われる値を求めた。エネルギー吸収に係わる指標として、鉛プラグ入り積層ゴムでは、吸収エネルギーＥを鉛プラグの体積Ｖｐで除したＥ/Ｖｐとした。高減衰ゴム系積層ゴムはＥをゴム体積Ｖｒで除したＥ/Ｖrとした。また、すべり支承では総滑動距離、鋼材ダンパーや鉛ダンパーでは 1 台あたりの吸収エネルギーＥの他に、累積塑性変形を求めた。オイルダンパーに関しては吸収エネルギーＥとダンパーの鉄部の重量を示した。

なお、検討用地震動は 1.3.4(1)の結果を踏まえ、エネルギーの大きい N-OSKH02-AV,SD 及び T-TN-AIC003-AV,SD の 4 波とした。

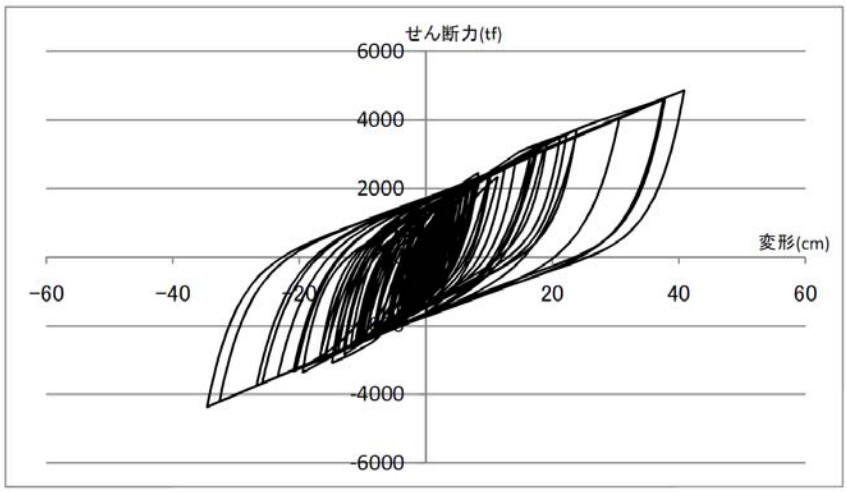
図 1.3-18、図 1.3-19 に免震部材の変位時刻歴、荷重-変形関係、エネルギーの時刻歴の一例を示す。免震部材の吸収エネルギーは T-TN-AIC003-SD 、N-OSKH02-SD とも 100 秒付近から急激に増加し約 200 秒以降はほとんどエネルギーの増加はないことがわかる。表 1.3-6 に免震部材のエネルギー吸収量が総量の 5%に達した時刻 T(5%)と 95%に達した時刻 T(95%)、および変位の最大値とその発生時刻を示す。T(95%)-T(5%)は AIC003 で概ね 100 秒程度、OSKH02 で 140 秒程度となっている。また、変位最大値の発生時刻は AIC003 のほとんどが 167 秒付近、OSKH02 が 230 秒付近となっている。

表 1.3-5　エネルギー検討結果の一覧

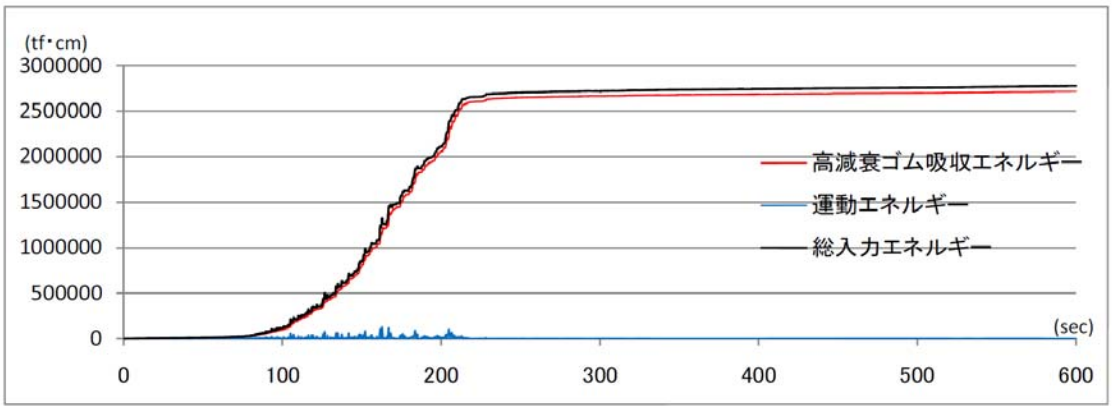
記号	分類	軒高 (m)	免震システム	固有周期 基礎固定 (s)	固有周期 200%ひずみ (s)	α	地震動	免震層の総吸収E (kNm)	エネルギーの速度換算値 Ve(m/s)	最大変位 (m)	総変位距離 (m)	LRB E/Vp (N/mm2)	HDR E/Vr (N/mm2)	滑り支承 総すべり距離	鋼材D E/台 (kNm)	鉛D E/台 (kNm)	オイルD E/台 (kNm)
A-3	中高層 第3世代	34.6	HDR	0.73	3.25	0.028	N-OSKH02-AV	5.12.E+04	1.45	0.12	11.4		4.8				
							N-OSKH02-SD	1.46.E+05	2.44	0.22	20.4		13.8				
							T-TN-AIC003-AV	1.19.E+05	2.22	0.26	19.2		11.2				
							T-TN-AIC003-SD	2.66.E+05	3.31	0.41	34.4		25.2				
B-3	低層 第3世代	13.1	NR+SL +オイルD	0.22	3.36	0.039	N-OSKH02-AV	1.82.E+03	1.37	0.11	4.2			4.2			310
							N-OSKH02-SD	5.44.E+03	2.37	0.20	11.0			11.0			1137
							T-TN-AIC003-AV	4.60.E+03	2.17	0.17	8.6			8.6			1063
							T-TN-AIC003-SD	1.12.E+04	3.39	0.27	17.9			17.9			3017
C-4	超高層 第3世代	88.5	NR+LRB	2.27	4.93	0.028	N-OSKH02-AV	2.61.E+04	2.01	0.18	7.8	47.0					
							N-OSKH02-SD	1.27.E+05	4.18	0.43	19.4	227.0					
							T-TN-AIC003-AV	3.61.E+04	2.45	0.19	11.2	65.0					
							T-TN-AIC003-SD	8.84.E+04	3.71	0.37	19.9	159.0					
D-2	中高層 第3世代	29.9	LRB	0.86	3.45	0.032	N-OSKH02-AV	2.64.E+04	1.30	0.12	11.1	76.6					
							N-OSKH02-SD	1.13.E+05	2.65	0.44	26.1	327.1					
							T-TN-AIC003-AV	7.11.E+04	2.14	0.25	22.8	206.5					
							T-TN-AIC003-SD	1.56.E+05	3.15	0.49	34.7	452.6					
E-2	中高層 第2世代	26.1	NR +鉛D+鋼材D	0.68	2.56	0.068	N-OSKH02-AV	2.37.E+03	1.32	0.09	7.1				136.5	221.3	
							N-OSKH02-SD	5.52.E+03	2.01	0.14	10.9				381.3	461.2	
							T-TN-AIC003-AV	7.37.E+03	2.37	0.13	12.6				556.8	575.0	
							T-TN-AIC003-SD	1.50.E+04	3.40	0.25	20.7				1285.2	1038.9	
F-3	中高層 第3世代	31.0	NR+SL	1.81	4.30	0.040	N-OSKH02-AV	9.67.E+03	1.44	0.11	12.8			2.38			
							N-OSKH02-SD	2.56.E+04	2.32	0.22	18.8			6.32			
							T-TN-AIC003-AV	1.90.E+04	2.07	0.23	17.2			4.67			
							T-TN-AIC003-SD	4.40.E+04	3.13	0.35	30.6			10.94			
G-4	中高層 第3世代	24.2	NR+オイルD	1.04	3.57	0.094	N-OSKH02-AV	3.94.E+04	1.61	0.15	13.0						1231
							N-OSKH02-SD	9.59.E+04	2.51	0.20	21.0						2997
							T-TN-AIC003-AV	7.36.E+04	2.20	0.16	17.1						2300
							T-TN-AIC003-SD	1.79.E+05	3.44	0.28	27.8						5601
H-4	超高層 第3世代	60.4	NR +鉛D+鋼材D	1.82	4.02	0.035	N-OSKH02-AV	1.45.E+04	1.42	0.09	6.9				433.5	672.1	
							N-OSKH02-SD	4.07.E+04	2.37	0.18	14.0				1919.3	1811.1	
							T-TN-AIC003-AV	2.74.E+04	2.11	0.21	12.4				1416.8	1359.6	
							T-TN-AIC003-SD	6.88.E+04	3.28	0.34	23.7				4016.0	3296.9	
I-1	中高層 第2世代	31.3	HDR+SL	0.50	3.04	0.030	N-OSKH02-AV	8.99.E+03	1.44	0.15	24.5		3.9				
							N-OSKH02-SD	2.26.E+04	2.29	0.21	39.2		9.8				
							T-TN-AIC003-AV	2.59.E+04	2.45	0.24	43.4		11.2				
							T-TN-AIC003-SD	4.60.E+04	3.27	0.37	45.8		20.0				
J-1	中高層 第2世代	44.3	NR+転がり +オイルD +鋼材D	1.10	4.27	0.020	N-OSKH02-AV	1.29E+05	1.56	0.17	12.4			12.4	420.2		13594
							N-OSKH02-SD	3.83E+05	2.69	0.42	24.3			24.3	1368.8		34907
							T-TN-AIC003-AV	2.34E+05	2.1	0.26	18.4			18.4	788.0		23344
							T-TN-AIC003-SD	5.21E+05	3.13	0.49	33.8			33.8	1812.9		49654



高減衰積層ゴムの変位波形

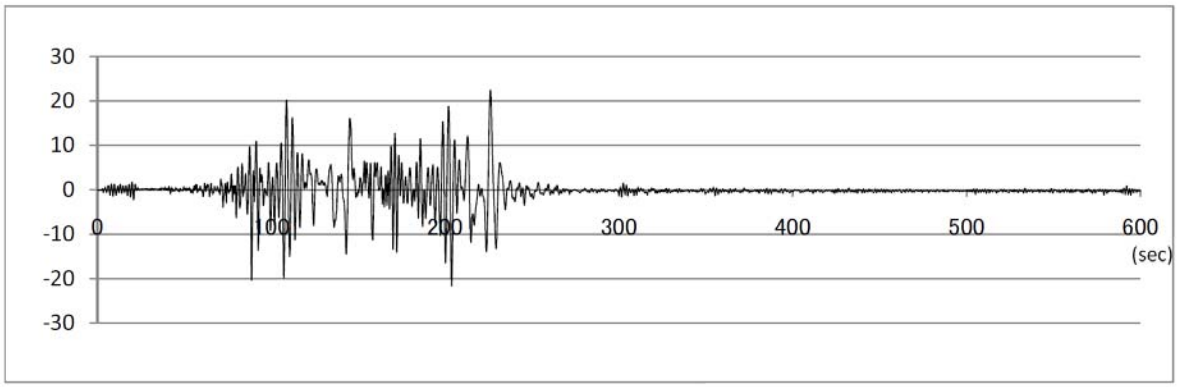


高減衰積層ゴムの荷重変形関係（積層ゴム全体の合計）

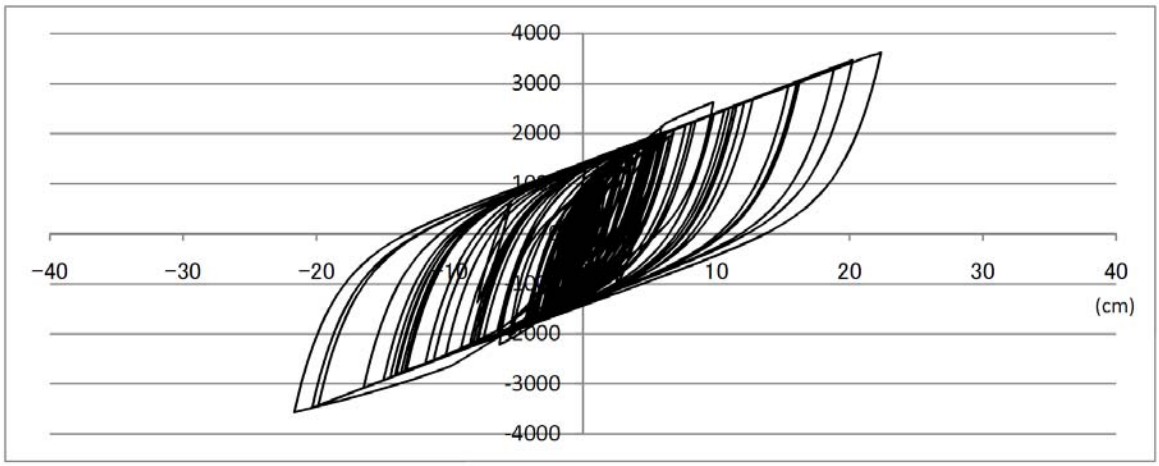


エネルギーの時刻歴

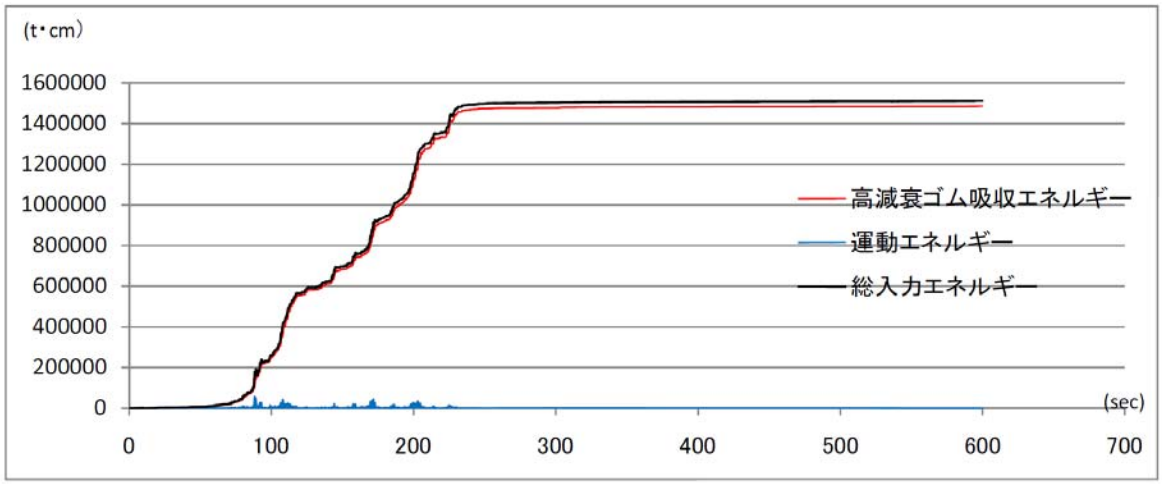
図 1.3-18　免震部材の変位時刻歴、荷重-変形関係、エネルギーの時刻歴
（T-TN-AIC003-SD）



高減衰積層ゴムの変位波形



高減衰積層ゴムの荷重変形関係（積層ゴム全体の合計）



エネルギーの時刻歴

図 1.3-19　免震部材の変位時刻歴、荷重-変形関係、エネルギーの時刻歴
（N-OSKH02-SD）

表 1.3-6 免震部材のエネルギー吸収量時刻、変位最大値発生時刻

記号	A-3		E-2		H-4	
免震システム	HDR		NR+鉛 D+鋼棒 D		NR+履歴 D	
対象部材	HDR		鋼棒 D	鉛 D	鋼棒 D	鉛 D
地震動	OSKH02-SD	AIC003-SD	AIC003-SD		AIC003-SD	
T（5%）(s)	85.20	105.22	107.24	94.18	119.68	93.52
T（95%）(s)	227.42	215.60	187.82	200.50	211.66	213.52
T（95%）-T（5%）(s)	142.22	110.38	80.58	106.32	91.98	120.00
最大変位(mm) （発生時刻）(s)	220 (226.16)	410 (167.7)	250 (167.34)	250 (167.34)	339 (167.674)	339 (167.674)

記号	I-1		J-1			
免震システム	HDR+SL		NR+転がり+オイル D+鋼棒 D			
対象部材	HDR		鋼材 D	オイル D	鋼材 D	オイル D
地震動	OSKH02-SD	AIC003-SD	OSKH02-SD		AIC003-SD	
T（5%）(s)	80.56	103.30	89.18	80.20	110.18	86.34
T（95%）(s)	224.78	224.14	236.14	239.86	213.52	348.48
T（95%）-T（5%）(s)	144.22	120.84	146.96	159.66	103.34	262.14
最大変位(mm) （発生時刻）(s)	209.00	372 (167.48)	418 (229.38)	418 (229.38)	491 (182.88)	491 (182.88)

記号	C-4		D-2		F-2	
免震システム	NR+LRB		LRB		NR+SL	
対象部材	LRB		LRB		SL	
地震動	OSKH02-SD	AIC003-SD	OSKH02-SD	AIC003-SD	OSKH02-SD	AIC003-SD
T（5%）(s)	109.03	94.95	98.16	104.56	87.56	110.08
T（95%）(s)	243.24	214.03	184.36	328.00	227.56	212.86
T（95%）-T（5%）(s)	134.21	119.08	86.20	223.44	140.00	102.78
最大変位(mm) （発生時刻）(s)	427 (232.6)	370.00	408.8 (229.6)	496 (183.00)	220.00	351 (167.68)

1.4　免震部材のエネルギー吸収性能評価・試験方法の考え方

1.4.1　エネルギー吸収性能評価

1.4.1-1　積層ゴム支承

(1)　はじめに

鉛プラグ入り積層ゴム（LRB）と高減衰ゴム系積層ゴム（HDR）では、繰り返し加力による温度上昇に伴い、降伏荷重、降伏後剛性、等価剛性等の特性値が低下する特性を有する。よって、これらの積層ゴムを用いた免震建築物が長周期地震動による多数回の繰り返し変形を受けた際の応答評価を行なう場合、温度上昇の影響を考慮することによって、より精度の高い結果が得られると考えられる。以下では、温度上昇の影響を考慮した評価法の一つとして、免震建築物のエネルギーの釣り合いに着目した手法を紹介する。

(2)　LRB

温度上昇に伴う LRB の降伏荷重の低下を考慮しない解析結果を用いて、温度上昇の影響を考慮した場合の降伏荷重の低下や免震層最大変形を予測する手法を示す。

a.　降伏荷重の低下[1.4.1-1)]

ここでは、免震層が LRB のみで構成されている場合を想定し、温度上昇を考慮しない解析によって、LRB による履歴吸収エネルギー ${}_{LRB}W_p$ 及び免震層最大変形 $\delta_{\max}$ が得られているものとする。LRB の温度上昇に伴う降伏荷重の低下と履歴吸収エネルギーの関係を求める。LRB の降伏荷重の低下を表す代表値として、地震動継続時間中における最小値を選定し、これを設計値で除した低下率 ${}_{LRB}k_{\min}$ で評価する。図 1.4.1-1 に示すように、 ${}_{LRB}k_{\min}$ は次式で定義される。

$$ {}_{LRB}k_{\min} = \frac{{}_{LRB}Q_y(\text{最小値})}{{}_{LRB}Q_y(\text{設計値})} \tag{1.4.1-1} $$

ここで、 ${}_{LRB}Q_y$ は LRB の降伏荷重である。

一方、履歴吸収エネルギーを表す代表値として、温度上昇を考慮しない解析から得られた履歴吸収エネルギー ${}_{LRB}W_p$ を選定し、これを鉛プラグ体積 V_p で除したもので評価する。文献[1.4.1-2)]に示した、LRB の温度上昇を考慮した地震応答解析結果に基づき、 ${}_{LRB}k_{\min}$ と ${}_{LRB}W_p$ の関係をプロットしたものが図 1.4.1-2 である。両者の関係式は、解析結果の下限値をとるように設定し式(1.4.1-2)を得た。

$$ {}_{LRB}k_{\min} = -0.06 + 1.25 \times \exp\left(-\frac{{}_{LRB}W_p}{V_p} \times \frac{1}{360} \right) \tag{1.4.1-2} $$

式(1.4.1-2)に ${}_{LRB}W_p$ を代入すれば低下率 ${}_{LRB}k_{\min}$ を求めることができる。

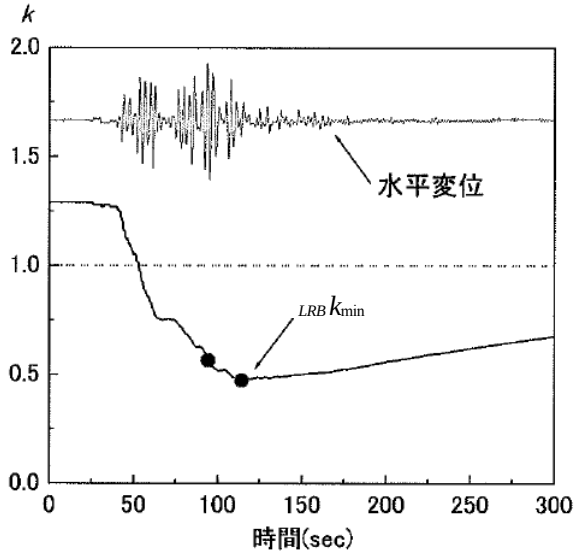


図 1.4.1-1　$_{LRB}k_{\min}$ の定義 1.4.1-12)に加筆

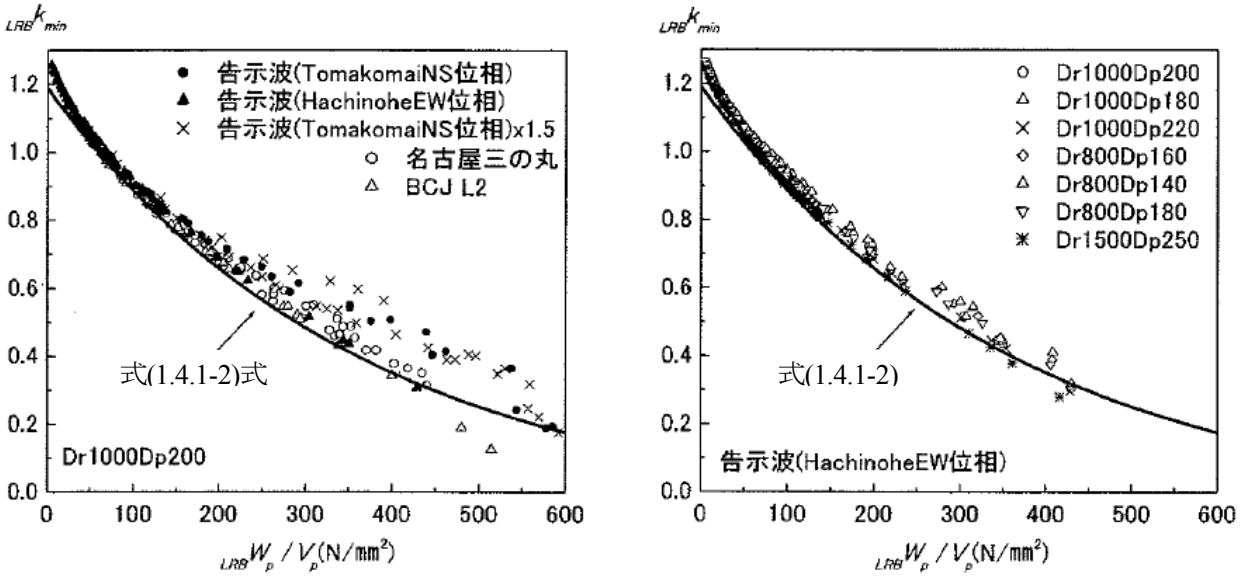


図 1.4.1-2　$_{LRB}k_{\min}$ と $_{LRB}W_p$ の関係 1.4.1-1)に加筆

b. 免震層最大変形 1. 4. 1−3)

エネルギーの釣り合いに基づき、温度上昇を考慮しない解析結果から、温度上昇を考慮した応答値を予測する手法を示す。等価繰り返し数 n_1 は次式で与えられる。

$$n_1 = \frac{{}_{LRB}W_p}{4 \cdot {}_{LRB}Q_y \cdot \delta_{\max}} \tag{1.4.1-3}$$

LRB の温度上昇を考慮した場合の等価繰り返し数 n_1' を次式で定義する。

$$n_1' = \frac{{}_{s}W_p'}{4 \cdot {}_{LRB}k_{\min} \cdot {}_{s}Q_y \cdot \delta_{\max}'} \tag{1.4.1-4}$$

ここで、温度上昇を考慮した場合の値は（’）は付して表記する。
解析結果より、n_1' と n_1 の関係として次式が提案されている。

$$\frac{n_1'}{n_1}=\frac{1}{2}\left(\frac{1}{{}_{LRB}k_{\min}}+1\right) \tag{1.4.1-5}$$

式(1.4.1-5)に式(1.4.1-3)と式(1.4.1-4)を代入すれば、次式が得られる。

$${}_{LRB}W_p'=\frac{{}_{LRB}k_{\min}+1}{2}\cdot\frac{\delta_{\max}'}{\delta_{\max}}\times{}_{LRB}W_p \tag{1.4.1-6}$$

LRB の温度上昇を考慮した場合の入力エネルギーと考慮しない場合の入力エネルギーを同量とすれば、エネルギーの釣り合いより次式が得られる。

$${}_fW_e+{}_{LRB}W_p={}_fW_e'+{}_{LRB}W_p' \tag{1.4.1-7}$$

ここで、${}_fW_e$ 及び ${}_fW_e'$ は免震層柔要素の弾性振動エネルギーである。

柔要素の水平剛性を k_f として、式(1.4.1-7)に式(1.4.1-6)を代入して整理すると、

$$\frac{1}{2}k_f\cdot\delta_{\max}'^2+\frac{\left(1+{}_{LRB}k_{\min}\right){}_{LRB}W_p}{2\delta_{\max}}\cdot\delta_{\max}'-\frac{1}{2}k_f\cdot\delta_{\max}^2-{}_{LRB}W_p=0 \tag{1.4.1-8}$$

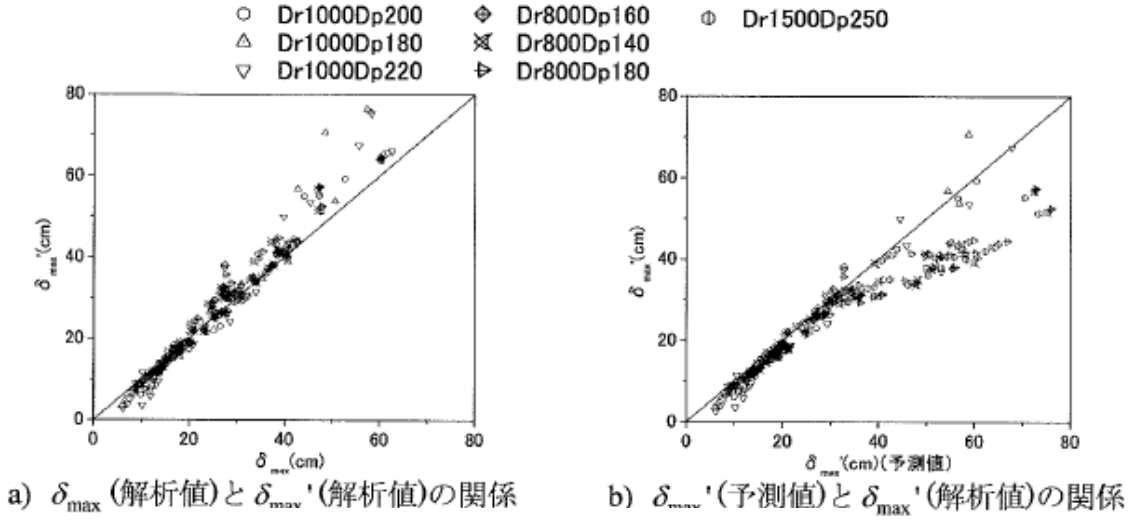
が得られ、これを $\delta_{\max}'$ について解けば次式が得られる。

$$\delta_{\max}'=\frac{1}{k_f}\left\{-\frac{\left(1+{}_{LRB}k_{\min}\right){}_{LRB}W_p}{2\delta_{\max}}+\sqrt{\left(\frac{\left(1+{}_{LRB}k_{\min}\right){}_{LRB}W_p}{2\delta_{\max}}\right)^2+k_f^2\cdot\delta_{\max}^2+2k_f\cdot{}_{LRB}W_p}\right\} \tag{1.4.1-9}$$

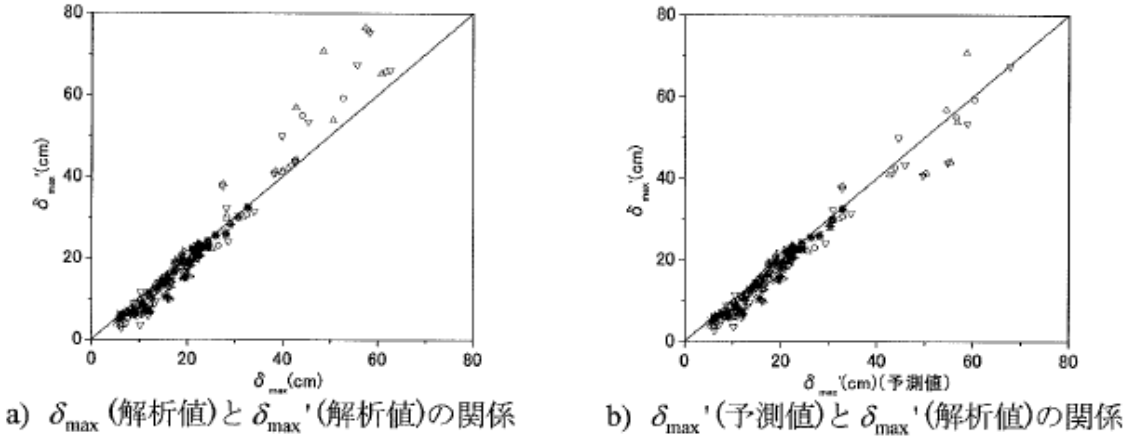
式(1.4.1-9)に $\delta_{\max}$、${}_{LRB}W_p$ 及び ${}_{LRB}k_{\min}$ を代入すると、温度上昇を考慮した場合の免震層最大変形 $\delta_{\max}'$ が得られる。式(1.4.1-9)の精度を検証した結果を示す。図 1.4.1-3 に、温度上昇考慮の解析結果と非考慮の解析結果の関係を（(a)）、温度上昇を考慮した解析結果と式(1.4.1-9)に基づき評価された予測値の関係を（(b)）示す。入力地震動は、三の丸 EW 波及び JMA KOBE NS 波である。(a)より、温度上昇を考慮した解析により、考慮しない場合と比較して免震層最大変形が大きく評価される傾向が認められる。一方、(b)より、式(1.4.1-9)による予測値は温度上昇を考慮した解析結果を概ね包絡しており、安全側の評価ができていることがわかる。

c. 計算例 1

免震建築物の地震応答解析の結果を用いて、本項で示した評価法に基づき、LRB の温度上昇を考慮した場合の降伏荷重の低下と免震層最大変形を予測した。対象とする建物は D-2 である。本建物の柔要素の水平剛性 k_f は 6.138×10^4 kN/m である。解析結果から LRB による履歴吸収エネルギー ${}_{LRB}W_p$ と免震層最大変形 $\delta_{\max}$ が得られる。 ${}_{LRB}W_p$ を鉛プラグ体積 V_p で除した ${}_{LRB}W_p/V_p$ を求め、これを式(1.4.1-2)に代入すると ${}_{LRB}k_{\min}$ が得られる。次に、${}_{LRB}W_p$、$\delta_{\max}$、k_f 及び ${}_{LRB}k_{\min}$ を式(1.4.1-9)に代入すると、温度上昇を考慮した場合の免震層最大変形 $\delta'_{\max}$ が得られる。計算結果を表 1.4.1-1 に示す。



C-SAN-EW



JMA KOBE NS

図 1.4.1-3　温度上昇考慮の解析結果と非考慮の解析結果の関係

表 1.4.1-1　温度上昇を考慮した場合の予測値

入力地震動	${}_{LRB}W_p$ (kNm)	$\delta_{\max}$ (m)	${}_{LRB}W_p/V_p$ (N/mm^2)	${}_{LRB}k_{\min}$	$\delta'_{\max}$ (m)
N-OSKH02-AV	2.64×10^4	0.12	76.6	0.950	0.12
N-OSKH02-SD	1.13×10^5	0.44	327.1	0.444	0.58
T-TN-AIC003-AV	7.11×10^4	0.25	206.3	0.644	0.30
T-TN-AIC003-SD	1.56×10^5	0.49	452.6	0.296	0.76

d. 計算例 2

1 質点モデルを対称とし、LRB の温度上昇の影響を考慮しない通常の地震応答解析（非考慮解析）、並びに温度上昇に伴う降伏荷重の低下を考慮した地震応答解析（考慮解析）を実施し、本項で示した評価法との比較を行なった。解析の詳細については e.に示すが、ここでは結果のみを簡単に述べる。

表 1.4.1-2 に非考慮解析と考慮解析の結果を比較して示す。これより、考慮解析の免震層水平変形は、非考慮と比較して 0.99～2.34 倍、免震層における吸収エネルギーは 0.98～1.51 倍となった。特に N-OSKH02-SD の場合、入力地震動の周期特性として 4 秒以降 6 秒程度にかけて大きなピークを持つことから、温度上昇による降伏荷重の低下とそれに伴う周期変化における入力の増大の相乗効果により応答値の増大率が大きくなったものと考えられる。

表 1.4.1-3 に、考慮解析の結果と式(1.4.1-2)及び式(1.4.1-9)による予測値を比較して示す。これより、N-OSKH02-SD を除き、$\delta'_{\max}/\delta_{\max}$ の値は 0.98～1.02 となっており、本評価法による予測値と温度上昇を考慮した解析結果は概ね一致している。

表 1.4.1-2　温度上昇を考慮・非考慮の比較

入力地震動	免震層水平変形(cm)			免震層吸収エネルギー(kNm)		
	非考慮	考慮	考慮／非考慮	非考慮	考慮	考慮／非考慮
N-OSKH02-AV	10.3	10.1	0.99	2.459×10^4	2.605×10^4	1.06
N-OSKH02-SD	17.7	41.4	2.34	7.290×10^4	1.101×10^5	1.51
T-TN-AIC003-AV	21.7	27.4	1.26	8.130×10^4	8.561×10^4	1.05
T-TN-AIC003-SD	40.8	62.4	1.53	1.771×10^5	1.731×10^5	0.98

表 1.4.1-3　温度上昇を考慮した解析と予測値の比較

入力地震動	${}_{LRB}W_p/V_p$ (N/mm^2)	${}_{LRB}k_{\min}$	免震層水平変形(cm)		
			考慮解析 $\delta_{\max}$	予測値 $\delta'_{\max}$	$\delta'_{\max}/\delta_{\max}$
N-OSKH02-AV	63.3	0.989	10.1	10.3	1.02
N-OSKH02-SD	187.6	0.682	41.4	21.0	0.51
T-TN-AIC003-AV	209.2	0.639	27.4	26.3	0.96
T-TN-AIC003-SD	455.8	0.292	62.4	61.1	0.98

e.　LRB の温度上昇を考慮した地震応答解析

1）はじめに

免震装置として鉛プラグ入り積層ゴム(LRB)を適用した免震建築物を対象として、繰り返し加力による温度上昇に伴い、降伏荷重が低下する特性を考慮した地震応答解析を実施し、その影響評価を行った。地震応答解析には LRB の温度について熱伝導解析を行いながら、鉛プラグ部の温度によって LRB の降伏荷重 Q_d を変化させながら行う手法を用いている [1.4.1-4)]。

2）対象建物モデル

応答評価を行った建物モデル諸元を表 1.4.1-4 に示す。応答解析は上部建物を 1 質点としてモデル化し実施した。鉛プラグ入り積層ゴムはゴム種 G4、外径φ800mm とし、積層ゴムの平均面圧が 13.6N/mm^2 となるよう設定した。

表 1.4.1-4(a)　対象建物諸元

上部構造 重量 (kN)	LRB 平均面圧 (N/mm^2)	LRB φ800 基数	Tf (sec)	αs
320600	13.6	49.4	4.84	0.033

Tf:ゴム剛性による免震周期

αs:鉛プラグ降伏せん断力係数

表 1.4.1-4(b)　積層ゴム諸元（1 基当たり）

ゴム種類	外径 (mm)	鉛径 (mm)	ゴム総厚 (mm)
G4	800	180	168

3）入力地震動

入力地震動は南海地震に対する大阪・此花の地震動（平均、平均＋標準偏差)、東海-東南海地震に対する愛知県津島市の地震動（平均、平均＋標準偏差）の計 4 波を用いた。表 1.4.1-5 に検討用入力地震動一覧を、図 1.4.1-4 に加速度時刻歴波形を、図 1.4.1-5 に V_E スペクトル、変位応答スペクトルを示す。

表 1.4.1-5　検討用入力地震動一覧

略称	対象地震・ 評価地点	加速度 (cm/s^2)	速度 (cm/s)
N-OSKH02_AV	南海地震 此花　平均	70.9	34.2
N-OSKH02_SD	南海地震 此花　平均+標準偏差	105.2	47.2
T-TN-AIC003_AV	東海・東南海地震 津島　平均	221.1	31.0
T-TN-AIC003_SD	東海・東南海地震津島 平均+標準偏差	322.2	50.0

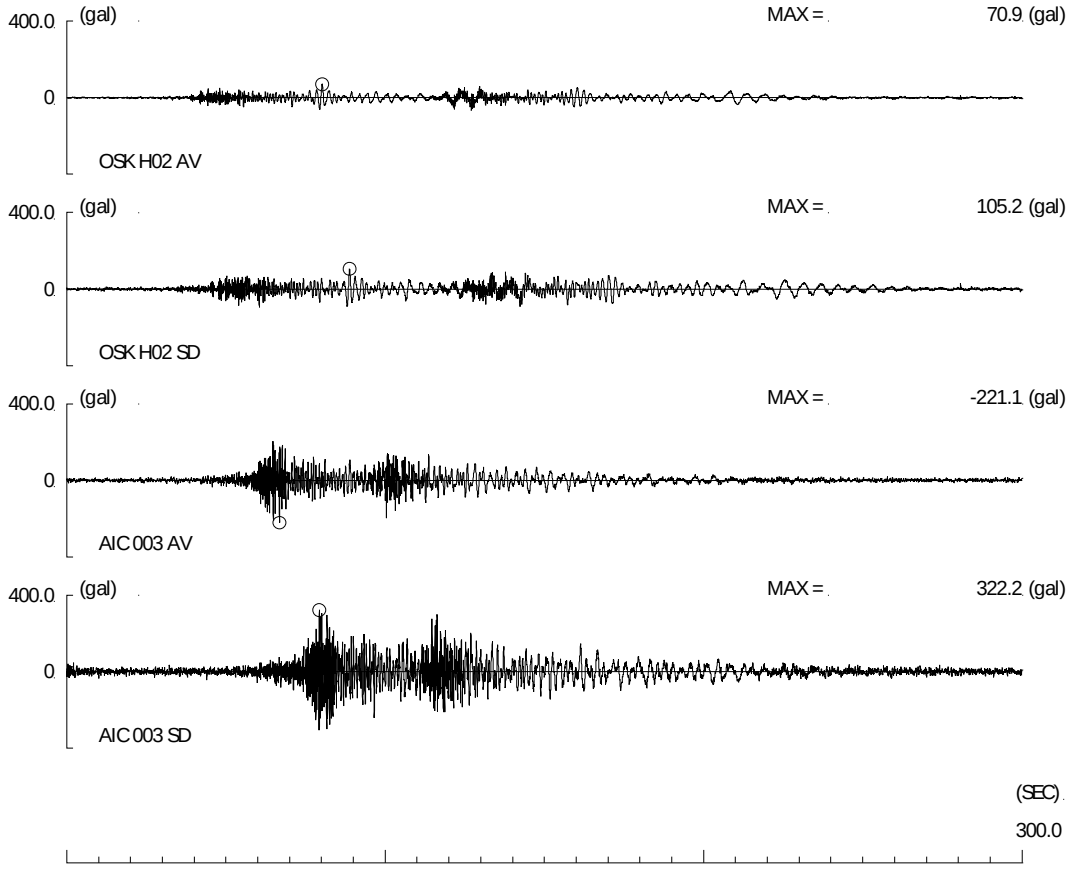


図 1.4.1-4　入力地震動加速度時刻歴波形

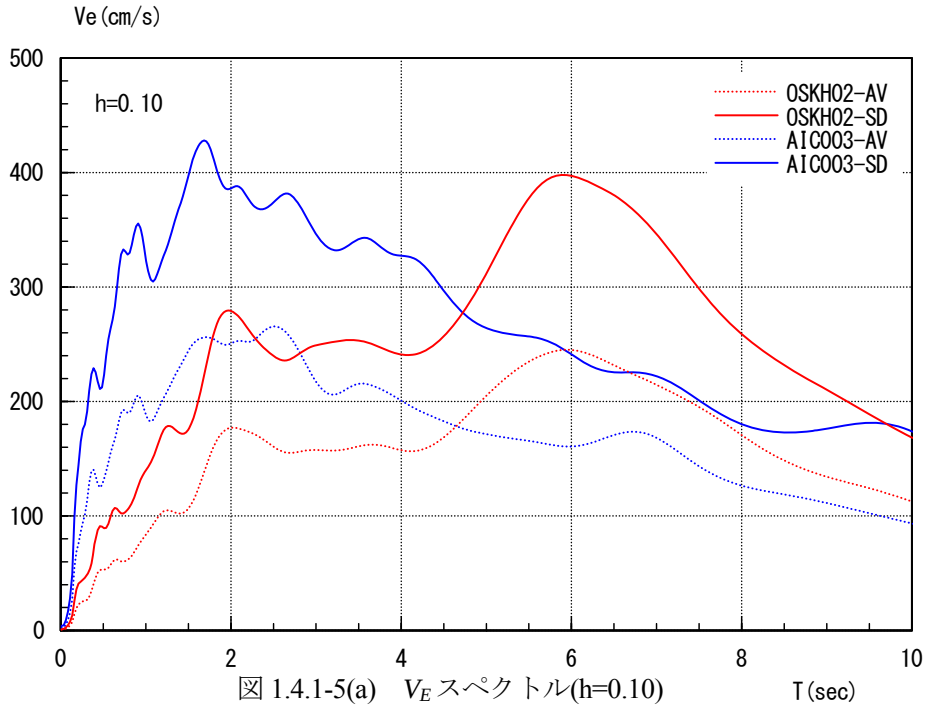


図 1.4.1-5(a)　V_E スペクトル(h=0.10)

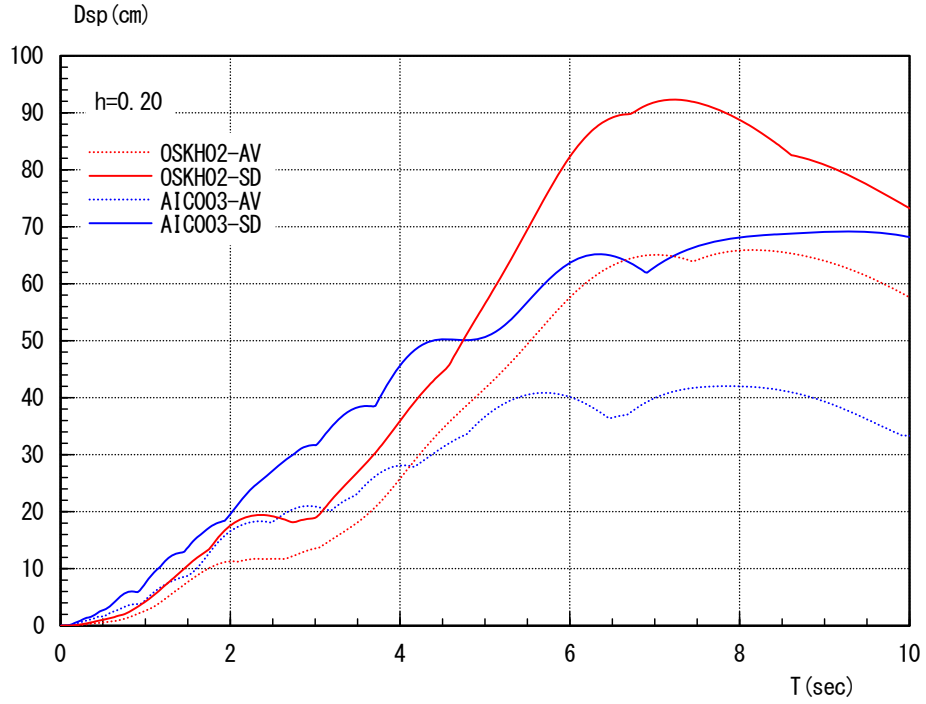


図 1.4.1-5(b)　変位応答スペクトル(h=0.20)

4）地震応答解析結果

表 1.4.1-6、図 1.4.1-6 に鉛の温度上昇による特性変化について非考慮とした場合、考慮した場合についての結果を示す。これより、鉛プラグの温度上昇による降伏荷重の低下を考慮した場合の免震層水平変形は、考慮しない場合と比較して 0.99～2.34 倍、免震層における吸収エネルギーは 0.98～1.51 倍となった。特に N-OSKH02_SD の場合、入力地震動の周期特性として 4 秒以降 6 秒程度にかけて大きなピークを持つことから、温度上昇による降伏荷重の低下とそれに伴う周期変化における入力の増大の相乗効果により応答値の増大率が大きくなったものと考えられる。

表 1.4.1-6(a)　地震応答解析結果（免震層水平変形）

入力 地震動	免震層水平変形(cm)		
	非考慮時	考慮時	考慮/非考慮
N-OSKH02_AV	10.3	10.1	0.99
N-OSKH02_SD	17.7	41.4	2.34
T-TN-AIC003_AV	21.7	27.4	1.26
T-TN-AIC003_SD	40.8	62.4	1.53

表 1.4.1-6(b)　地震応答解析結果（免震層吸収エネルギー）

入力 地震動	免震層吸収エネルギー(kN.m)		
	非考慮時	考慮時	考慮/非考慮
N-OSKH02_AV	2.459×10^4	2.605×10^4	1.06
N-OSKH02_SD	7.290×10^4	1.101×10^5	1.51
T-TN-AIC003_AV	8.130×10^4	8.561×10^4	1.05
T-TN-AIC003_SD	1.771×10^5	1.731×10^5	0.98

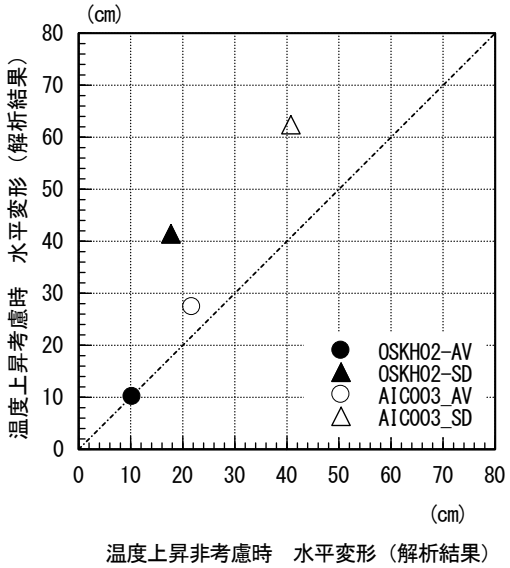


図 1.4.1-6　免震層水平変形解析結果

図 1.4.1-7(a)～図 1.4.1-7(d)に各入力地震動における解析結果を示す。

図 1.4.1-7(a)　地震応答解析結果(N-OSKH02_AV)
図 1.4.1-7(b)　地震応答解析結果(N-OSKH02_SD)
図 1.4.1-7(c)　地震応答解析結果(T-TN-AIC003_AV)
図 1.4.1-7(d)　地震応答解析結果(T-TN-AIC003_SD)

図中、(i) 免震層水平変位、(ii)免震層荷重変形関係、(iii)Q_d 時刻歴、(iv)鉛プラグ平均温度時刻歴を示す。

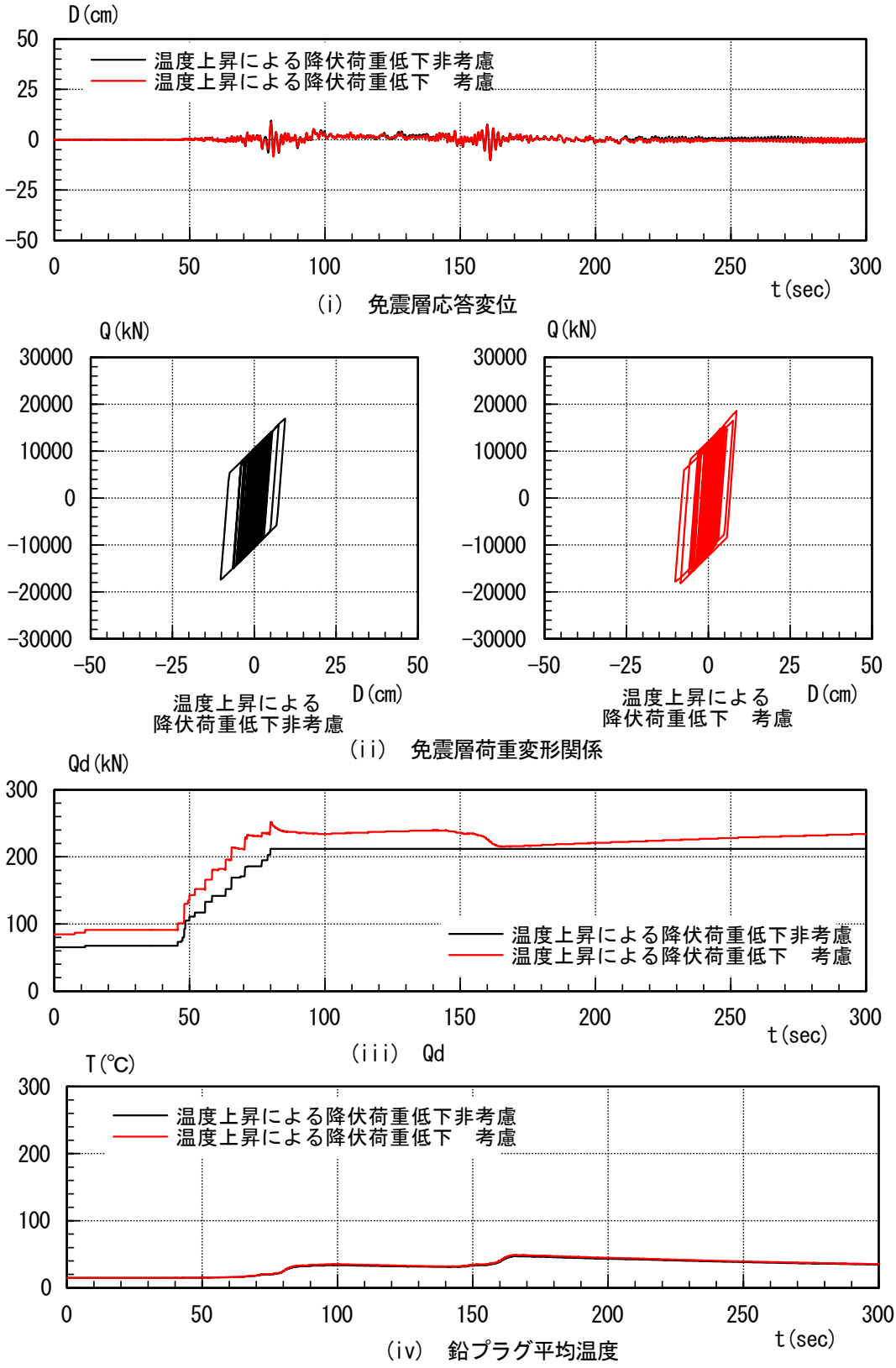


図 1.4.1-7(a)　地震応答解析結果(N-OSKH02_AV)

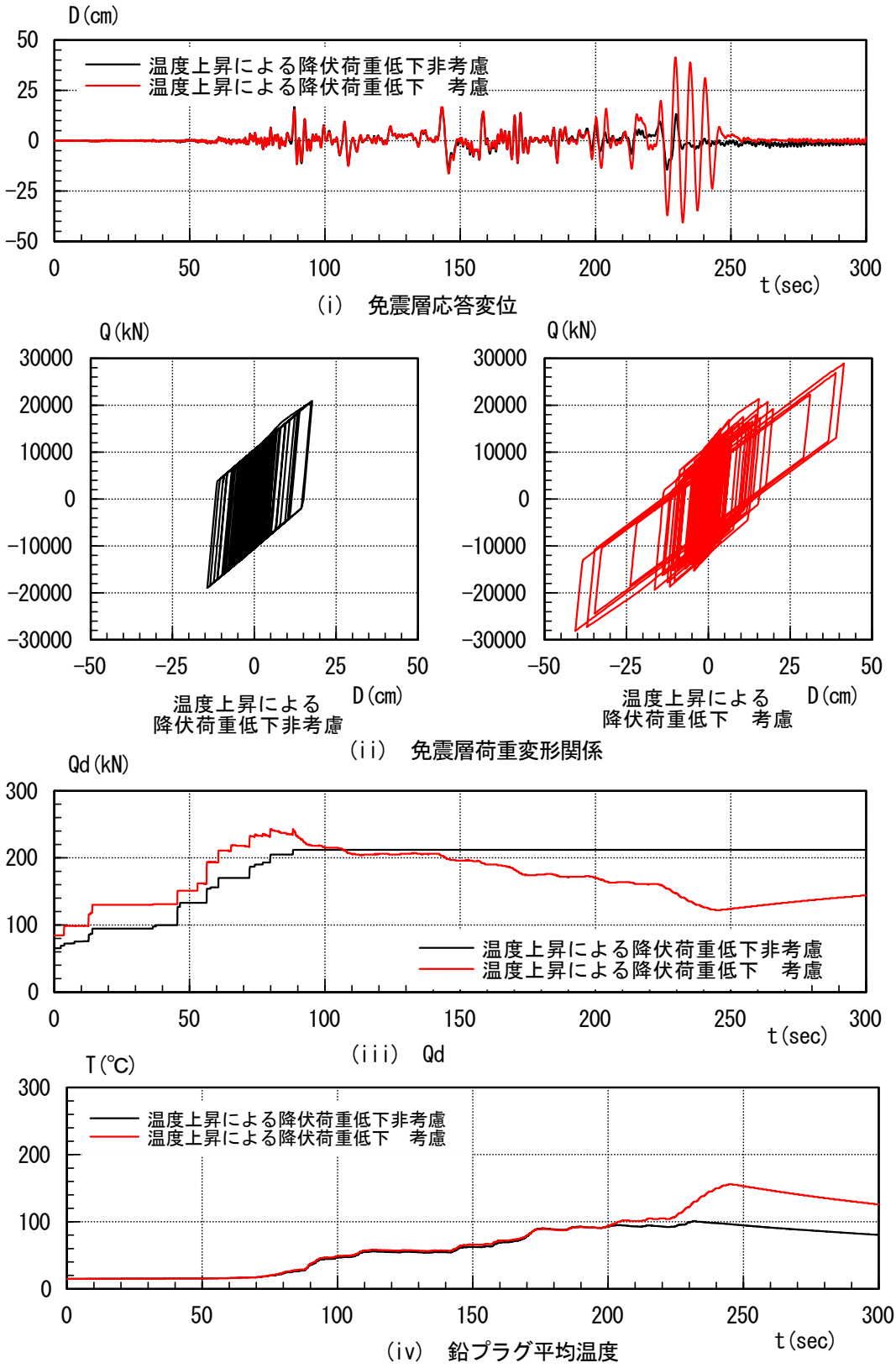


図 1.4.1-7(b)　地震応答解析結果(N-OSKH02_SD)

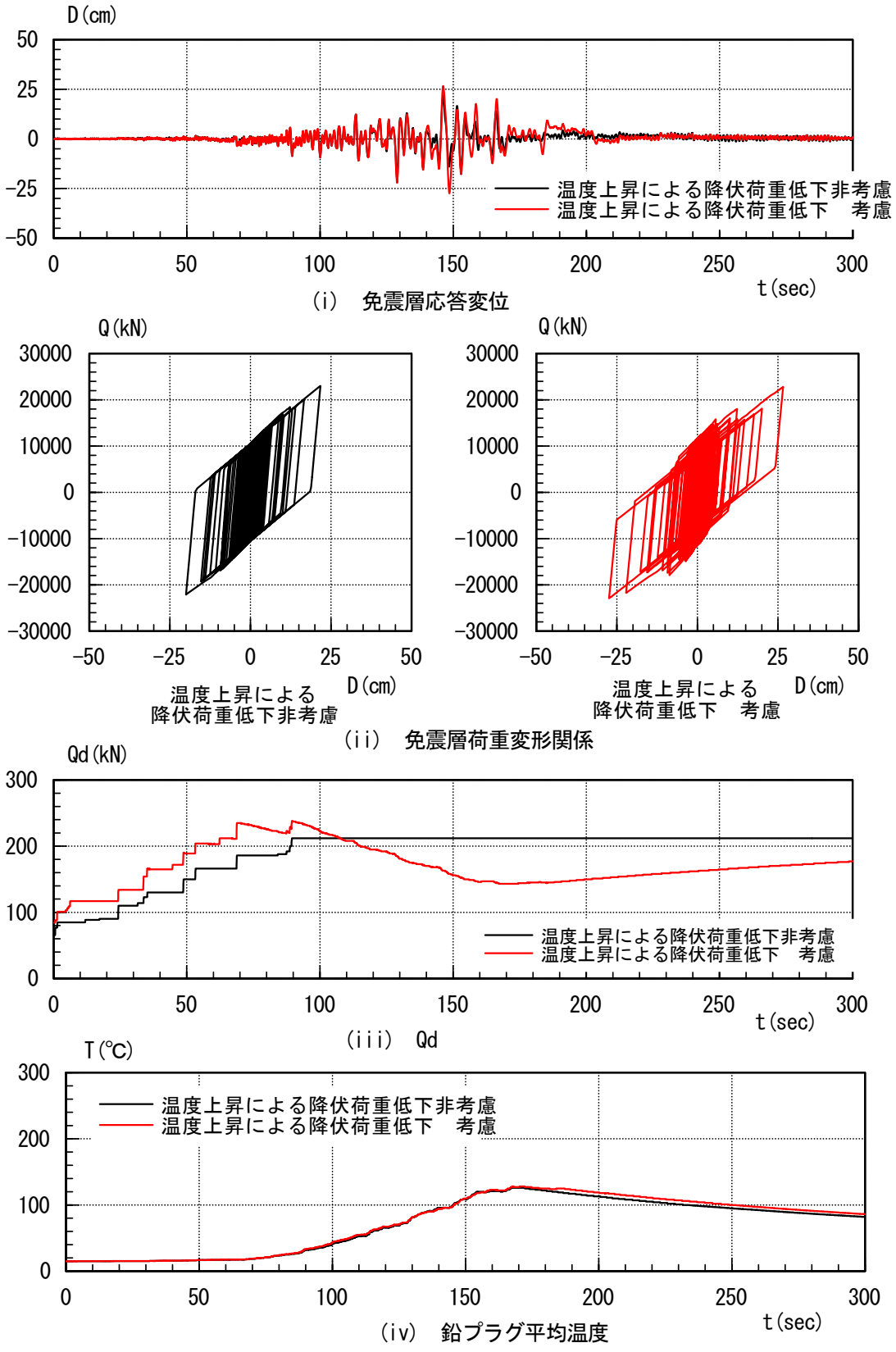


図 1.4.1-7(c)　地震応答解析結果(T-TN-AIC003_AV)

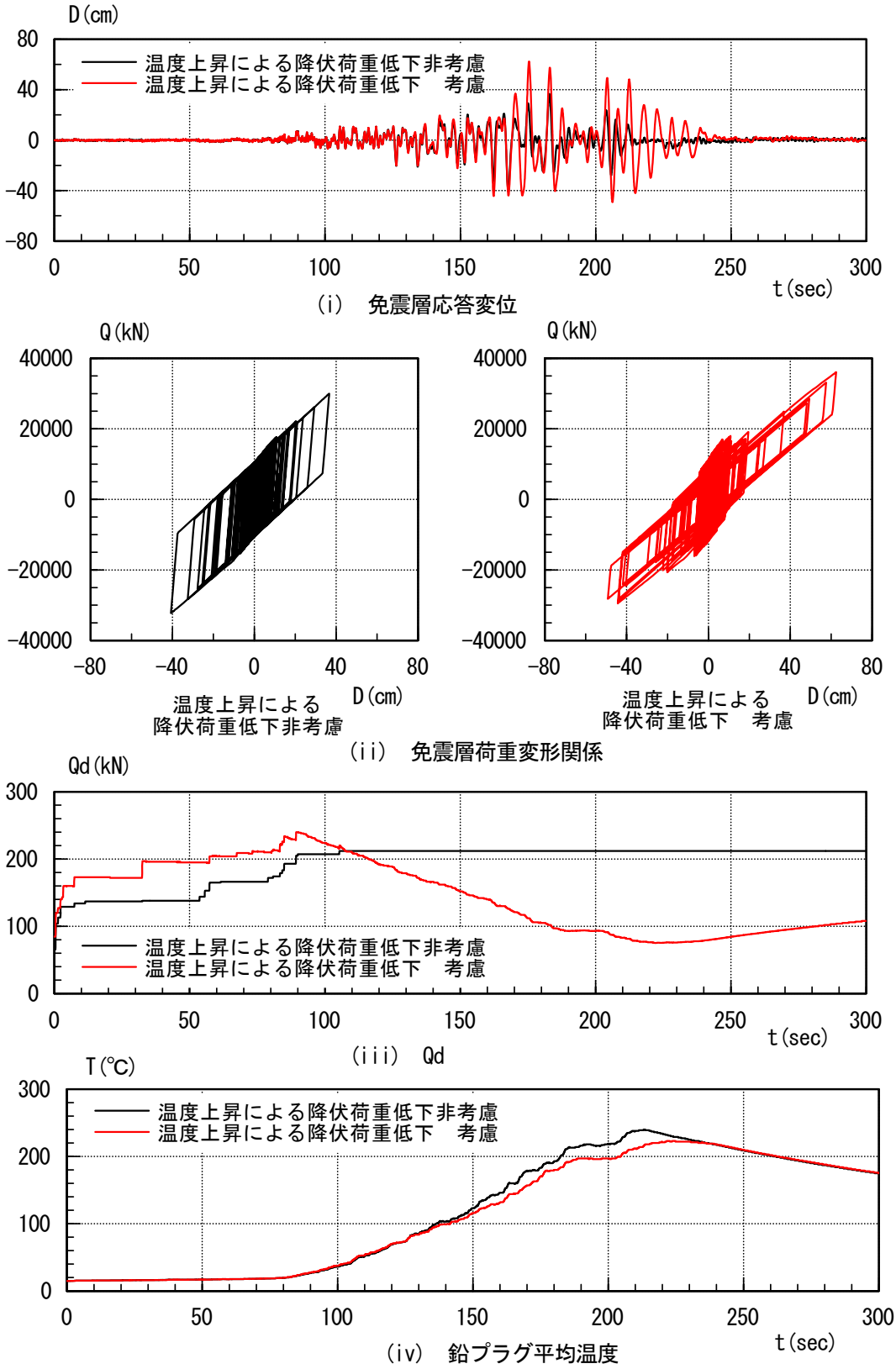


図 1.4.1-7(d)　地震応答解析結果(T-TN-AIC003_SD)

5）応答予測式との比較

表 1.4.1-7、図 1.4.1-8 に、式(1.4.1-2)（再掲）より得られる単位体積当たりのエネルギー吸収量（$_{LRB}W_p/V_p$）と LRB 降伏荷重低下率（$_{LRB}k_{min}$）の値を示す。

$$ {}_{LRB}k_{\min} = -0.06 + 1.25 \times \exp\left(-\frac{{}_{LRB}W_p}{V_p} \times \frac{1}{360} \right) \tag{1.4.1-2} $$

表 1.4.1-7　解析結果と予測式との比較（免震層水平変形）

	$_{LRB}W_p/V_p$ (N/mm^2)	$_{LRB}k_{min}$
N-OSKH02_AV	63.3	0.989
N-OSKH02_SD	187.6	0.682
T-TN-AIC003_AV	209.2	0.639
T-TN-AIC003_SD	455.8	0.292

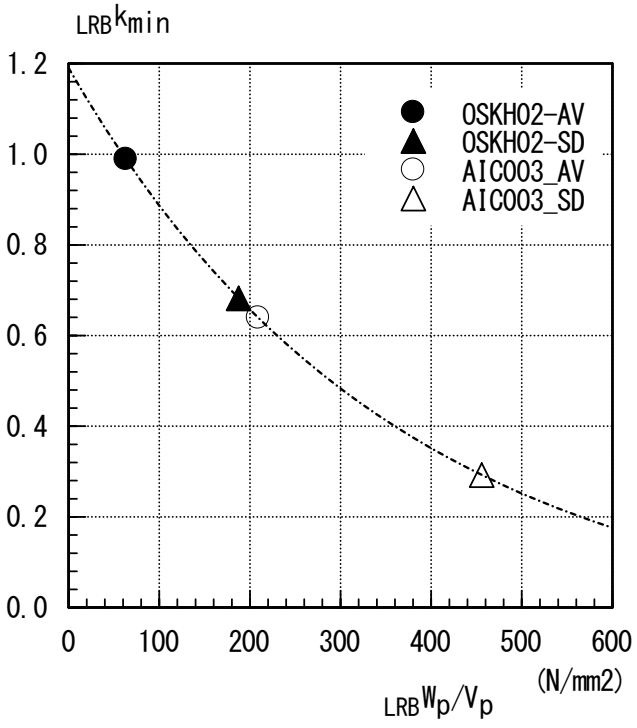


図 1.4.1-8　単位体積当たりエネルギー吸収量と降伏荷重低下率

表 1.4.1-8、図 1.4.1-9 に温度上昇考慮時の免震層の水平変形について、地震応答解析結果と応答予測式による評価結果とを比較して示す。

表 1.4.1-8　解析結果と予測式との比較（免震層水平変形）

	免震層水平変形(cm)		
	地震応答 解析結果	予測式による 評価	予測式 解析結果
N-OSKH02_AV	10.1	10.3	1.02
N-OSKH02_SD	41.4	21.0	0.51
T-TN-AIC003_AV	27.4	26.3	0.96
T-TN-AIC003_SD	62.4	61.1	0.98

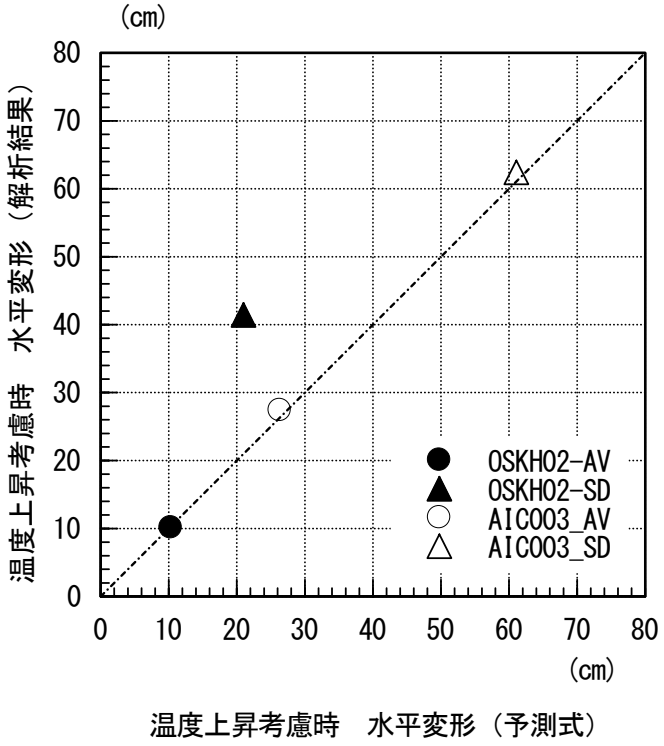


図 1.4.1-9　免震層水平変形比較

6）結果のまとめ

免震部材として鉛プラグ入り積層ゴム(LRB)を適用した免震建築物を対象として、鉛プラグの温度上昇による降伏荷重の低下を考慮した地震応答解析を実施し、その影響評価を行った。対象とした入力地震動において、降伏荷重の低下を評価した場合には評価しない場合と比較して、免震層の水平変形が 0.99～2.34 倍程度となった。水平変形の増大率が大きい大阪・此花の地震動（平均＋標準偏差）については入力地震動の周期特性の影響が大きいと考えられる。また、降伏荷重の低下を考慮した場合の免震層水平変形の予測式による評価と地震応答解析による評価は大阪・此花の地震動（平均＋標準偏差）を除いてほぼ一致している。

f.　降伏荷重を低減させた場合の検討

LRB の降伏荷重の低下を考慮しない解析結果における地震終了時の $_{LRB}W_p/V_p$ に基づき、降伏荷重を最初から低下させた解析を実施し、温度上昇による降伏荷重の低下を考慮した解析の結果と比較した。設定した降伏荷重の低下率については表 1.4.1-7 の $_{LRB}k_{min}$ の値とした。表 1.4.1-9、図 1.4.1-10 に解析結果を示す。

表 1.4.1-9(a)　解析結果の比較（免震層水平変形）

		免震層水平変形(cm)		②／①
	降伏荷重 低減率	① 地震応答 解析結果	② 降伏荷重 低減解析結果	
N-OSKH02_AV	0.989	10.1	10.3	1.02
N-OSKH02_SD	0.682	41.4	48.7	1.18
T-TN-AIC003_AV	0.639	27.4	30.3	1.11
T-TN-AIC003_SD	0.292	62.4	105.2	1.69

表 1.4.1-9 (b)　解析結果の比較（免震層吸収エネルギー）

	免震層吸収エネルギー(kN.m)		②／①
	① 地震応答 解析結果	② 降伏荷重 低減解析結果	
N-OSKH02_AV	2.605×10^4	2.447×10^4	1.02
N-OSKH02_SD	1.101×10^5	1.230×10^5	1.18
T-TN-AIC003_AV	8.561×10^4	7.213×10^4	1.11
T-TN-AIC003_SD	1.731×10^5	1.163×10^5	1.69

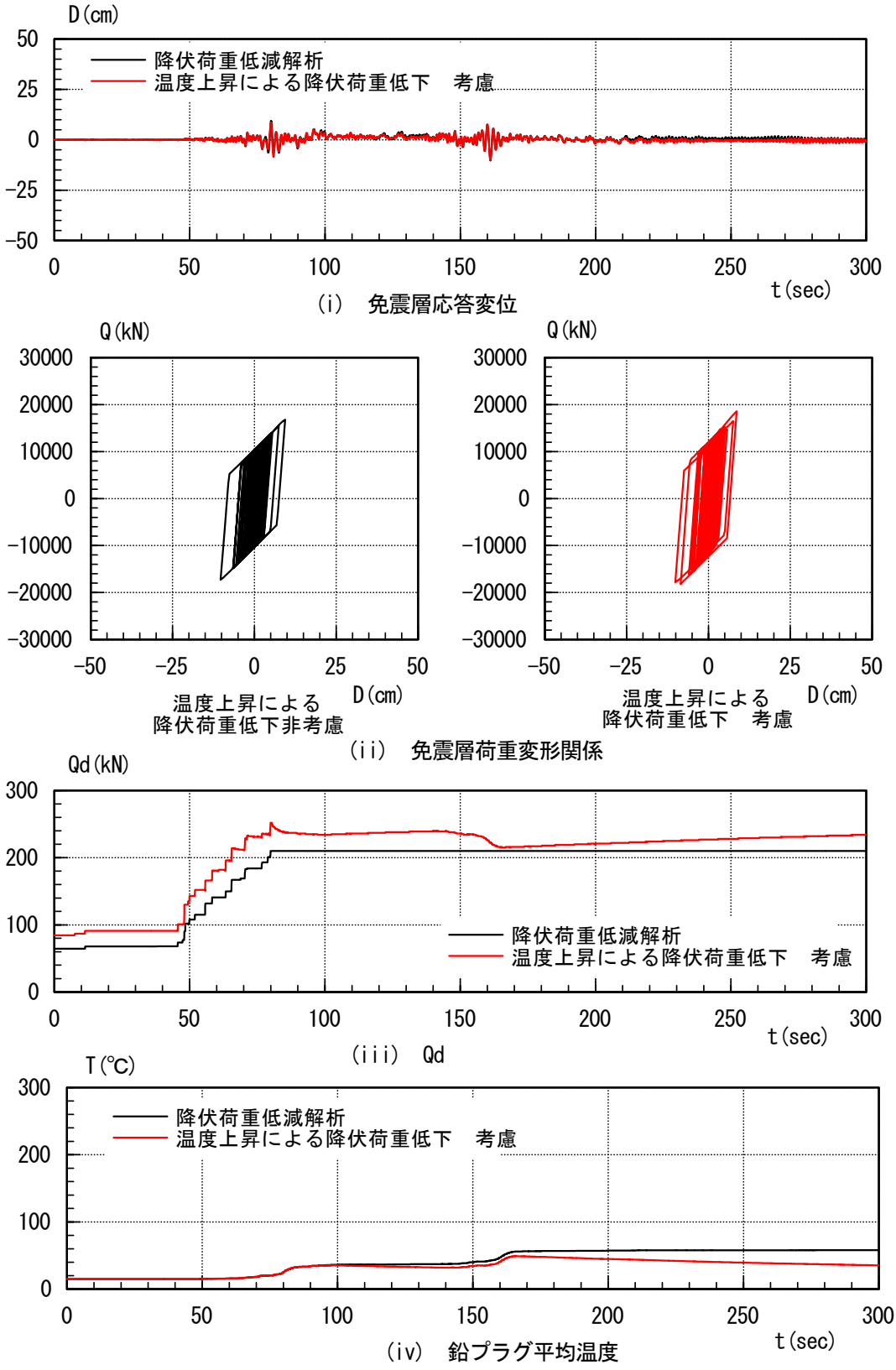


図 1.4.1-10(a)　地震応答解析結果(N-OSKH02_AV)

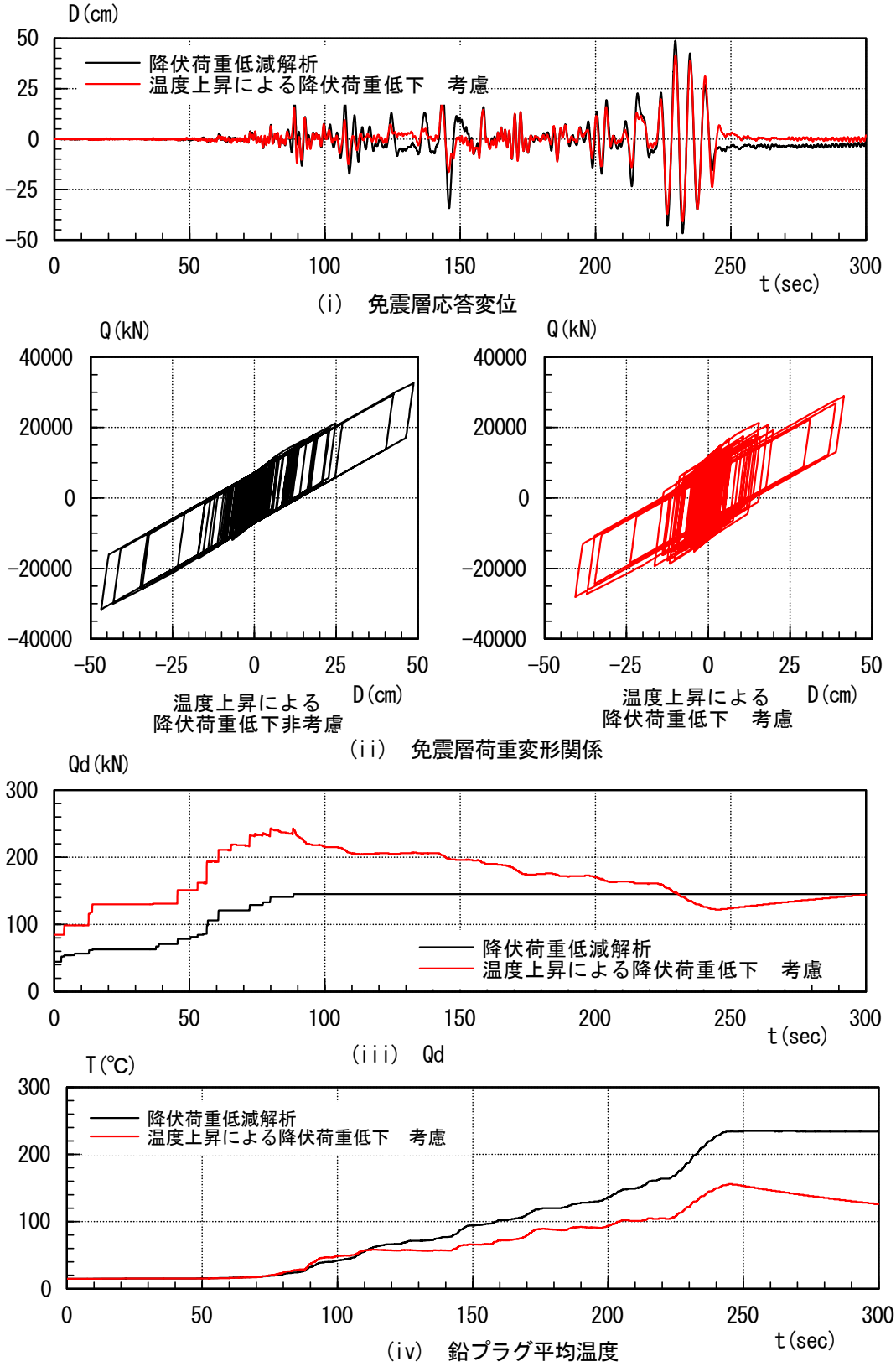


図 1.4.1-10(b)　地震応答解析結果(N-OSKH02_SD)

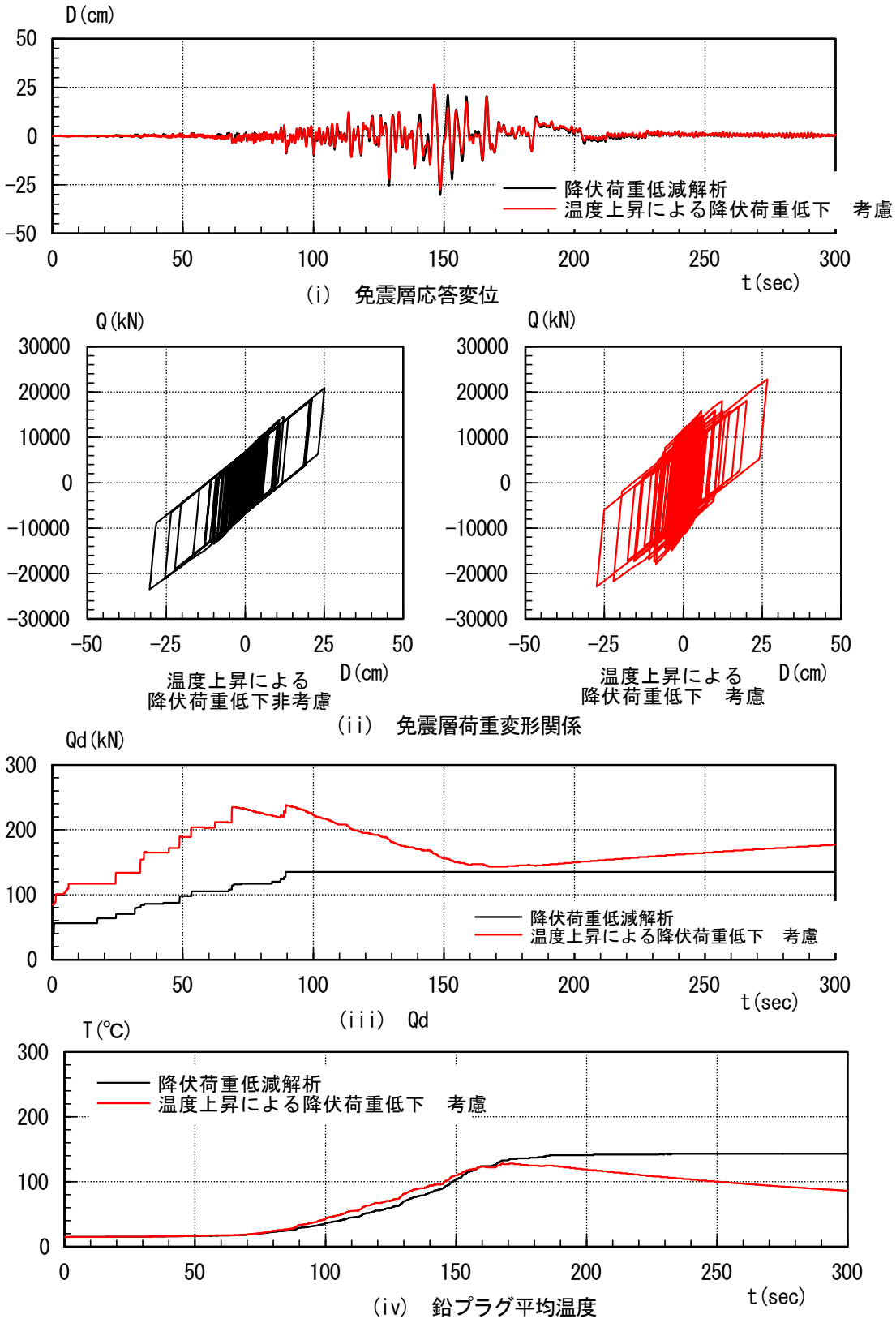


図 1.4.1-10(c)　地震応答解析結果(T-TN-AIC003_AV)

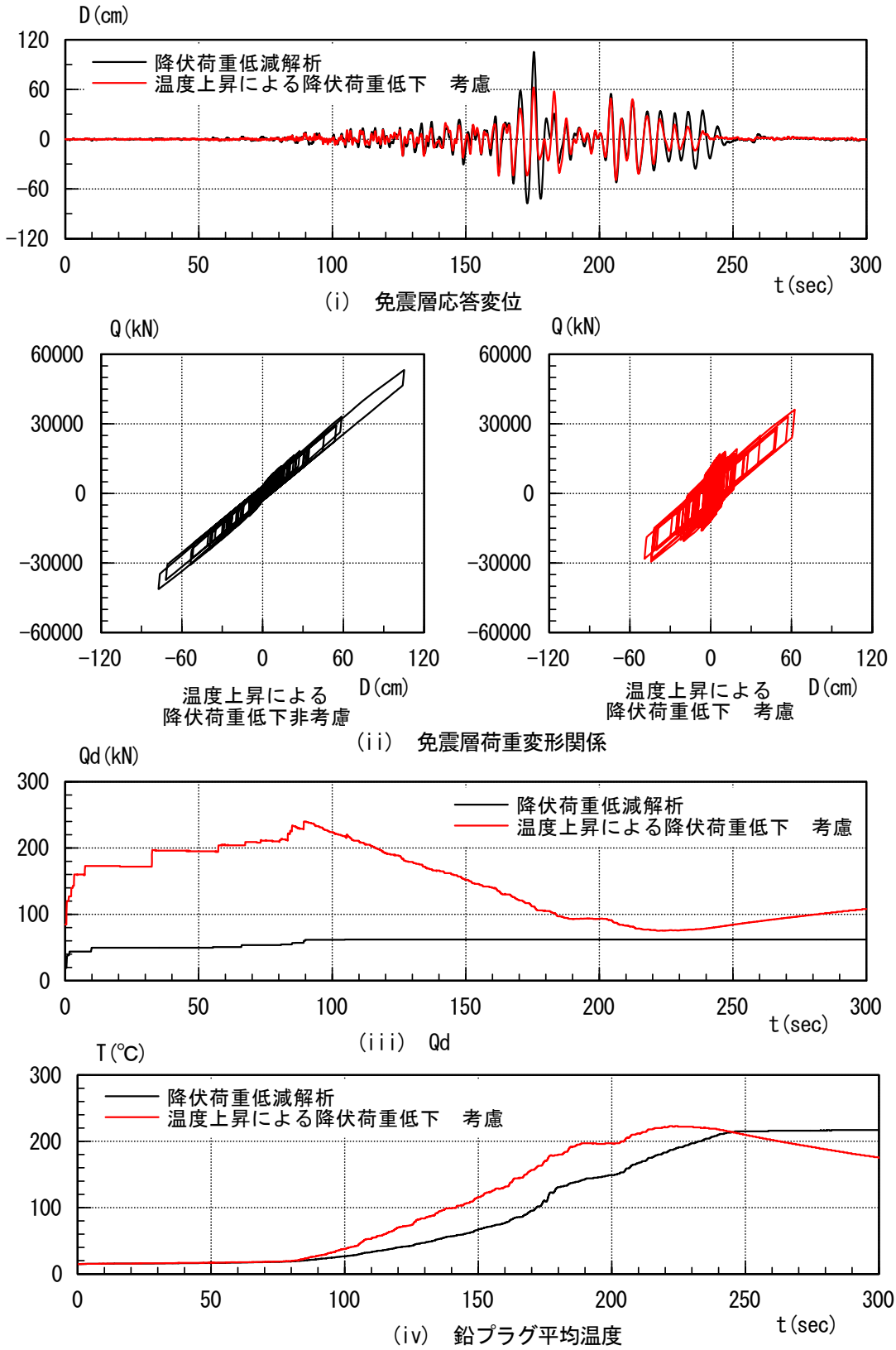


図 1.4.1-10(d)　地震応答解析結果(T-TN-AIC003_SD)

(3) HDR

高減衰ゴム系積層ゴム（HDR）についても、LRB と同様にエネルギーの釣り合いに基づく評価法が提案されており、式（1.4.1-2）に対応するものとして等価剛性K_{eq}と履歴吸収エネルギーの関係Eとして次式が提示されている[1.4.1-5)]。

$$\frac{K_{eq}}{{}_0K_{eq}} = -2.56 + 0.18 \times \exp\left(-\frac{E}{2V_r}\right) + 3.36\exp\left(-\frac{E}{3000V_r}\right) \qquad (1.4.1\text{-}10)$$

ここで、${}_0K_{eq}$は等価剛性の設計値、V_rはゴム体積である。図 1.4.1-11 に式(1.4.1-10)の関係を示す。この式に、免震建築物の地震応答解析の結果を用いて、等価剛性の低下率$K_{eq}/{}_0K_{eq}$を求めた。対象とする建物は A-3 である。解析結果より HDR による履歴吸収エネルギーEが得られる。Eをゴム体積V_rで除したE/V_rを求め、これを式(1.4.1-10)に代入すると、$K_{eq}/{}_0K_{eq}$が得られる。計算結果を表 1.4.1-10 に示す。建物の条件が異なるので単純に比較することはできないが、$K_{eq}/{}_0K_{eq}$の値は、入力が大きくなっても LRB の${}_{LRB}k_{\min}$と比較して大きな値となっている。図 1.4.1-2 と図 1.4.1-11 の比較からも分かるように、HDR では LRB よりも履歴吸収エネルギーの増加に伴う特性の低下が小さく、繰り返し変形が応答特性に及ぼす影響も小さいと推察される。

HDR は繰り返し変形だけでなく様々の依存性を有していることから、これらの影響についても適切に評価する必要があり、LRB と比較して評価手法が複雑となっている。その精度についての検証は不十分であり、今後の研究が待たれるところである。

表 1.4.1-10　等価剛性の低下率

入力地震動	E (kNm)	$\delta_{\max}$ (m)	E/V_r (N/mm^2)	$K_{eq}/{}_0K_{eq}$
N-OSKH02-AV	5.12×10^4	0.12	4.8	0.811
N-OSKH02-SD	1.46×10^5	0.22	13.8	0.784
T-TN-AIC003-AV	1.19×10^5	0.26	11.2	0.788
T-TN-AIC003-SD	2.66×10^5	0.41	25.2	0.772

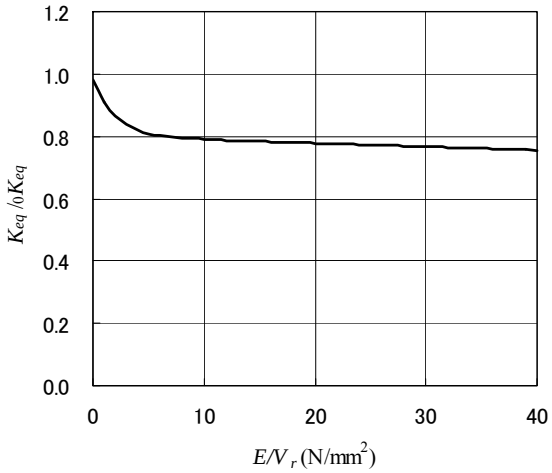


図 1.4.1-11　$k_{eq}/{}_0k_{eq}$ と E/V_r の関係

(4) まとめ

長周期地震動による多数回の繰り返し変形を受ける鉛プラグ入り積層ゴム（LRB）と高減衰ゴム系積層ゴム（HDR）について、温度上昇を考慮した応答評価法の一つとして、免震建築物のエネルギーの釣り合いに着目した手法を紹介した。LRB については、温度上昇を考慮しない解析結果を用いて、温度上昇の影響を考慮した場合の降伏荷重の低下や免震層最大変形を予測する手法を示した。本手法によって予測された免震層最大変形は、温度上昇を考慮した詳細な解析結果を概ね包絡しており、安全側の評価を与えるものである。また、高減衰ゴム系積層ゴム（HDR）についても同様の評価法が提案されているが、LRB と比較して履歴吸収エネルギーの増加に伴う特性の低下が小さいことから、繰り返し変形による温度上昇が応答特性に及ぼす影響は小さいと推察される。ただし、繰り返し変形以外にも様々の依存性を有しているため評価法が複雑となっており、今後も検討の余地がある。

1.4.1-2　弾性すべり支承

(1)　はじめに

弾性すべり支承は図 1.4.1-12 に示すように、積層ゴム支承に PTFE 材（四フッ化エチレン樹脂)、超高分子量ポリエチレン樹脂、ポリアミド等の低摩擦材を鉄板（バックプレート）に接着、ないしはバックプレートを切削した穴に嵌め込み、接着する方法で取り付けられたすべり材と、ステンレス板(SUS304 または SUS316)、または、ステンレス板にフッ素等をコーテイングしたすべり板で構成されている装置である。

建物を支える支承としての役割と、積層ゴムの変形が摩擦力を越えるとすべることで、建物の振動エネルギーを吸収するダンパーの２つの役割を果たす装置である。摩擦係数が 10%程度の装置と、１%程度の低摩擦のタイプ、その中間の 3 種類の装置が現在製造されている。

図 1.4.1-13 に摩擦係数の特性の異なる 3 種類の装置の繰り返し依存性の特徴を示す復元力曲線と、繰り返し回数に対する摩擦係数の変化を示す。摩擦係数が 1%程度の低摩擦型の装置は摩擦係数の変化が見られないが、摩擦係数が 7.5%、9.5%と呼ばれている装置の摩擦係数は、すべり材の累積すべり変位の増加に伴い、摩擦係数が低下する現象を示す。この現象はすべり材とすべり板間で発生する摩擦熱の影響[1.4.1-6)]による摩擦係数の低下と考えられている。

本報告書では、摩擦係数の累積すべり変位依存性の影響を検討するために、建設されている建物を想定したモデルを作成し、長周期地震動を入力した応答解析を行い応答結果の検討を行っている。また、既往の耐久性能試験を行った結果を紹介し、弾性すべり支承の繰り返し載荷に対する耐久性を考察している。

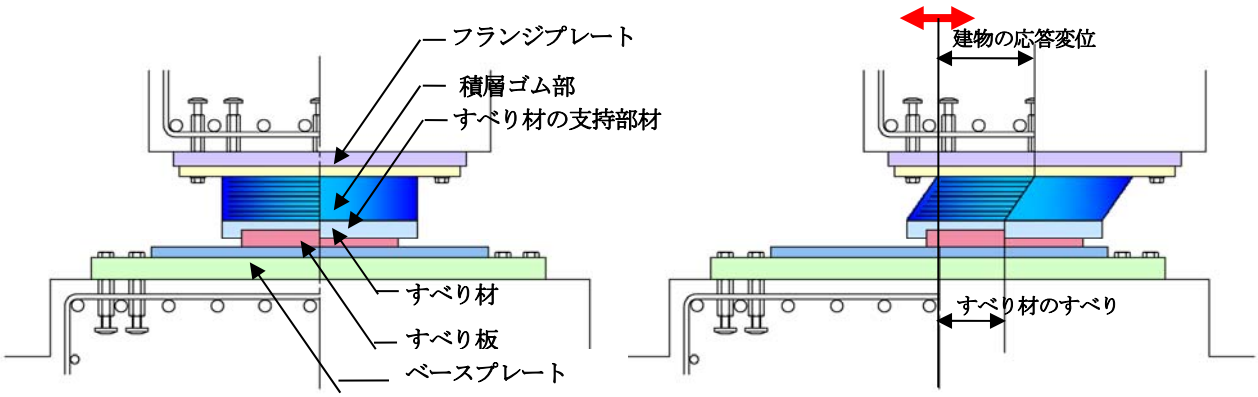
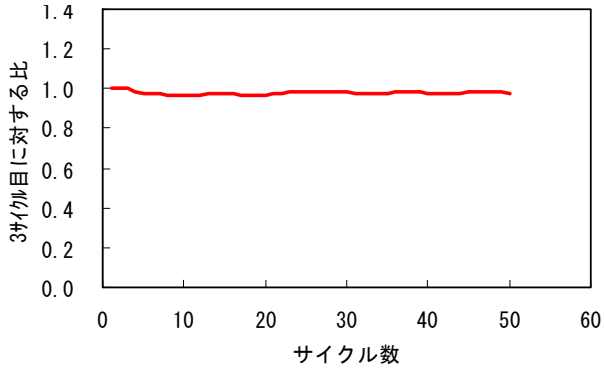
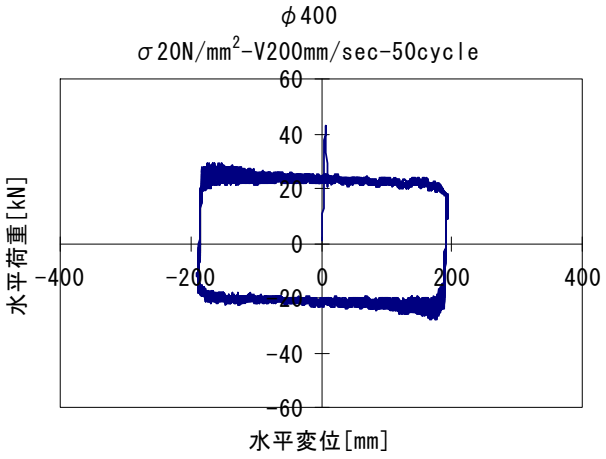


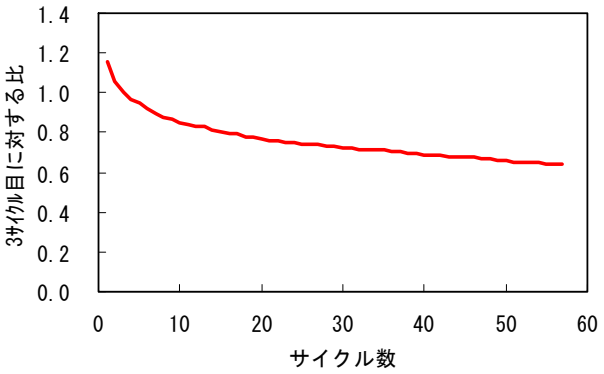
図1.4.1-12　　弾性すべり支承の構造

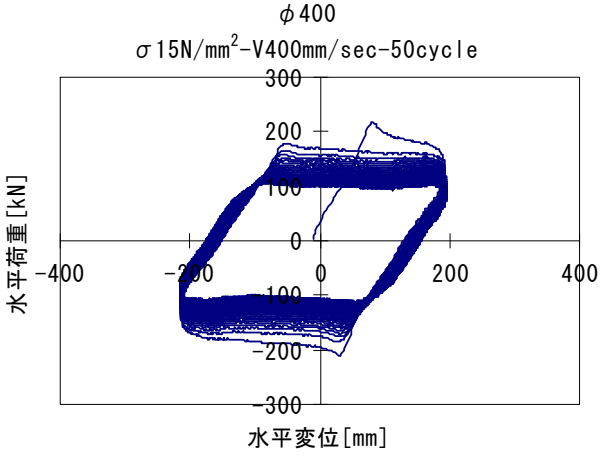
【μ=0.011】



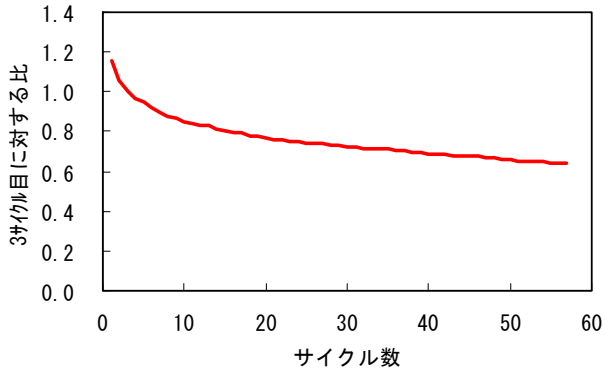


【μ=0.075】





【μ=0.094】



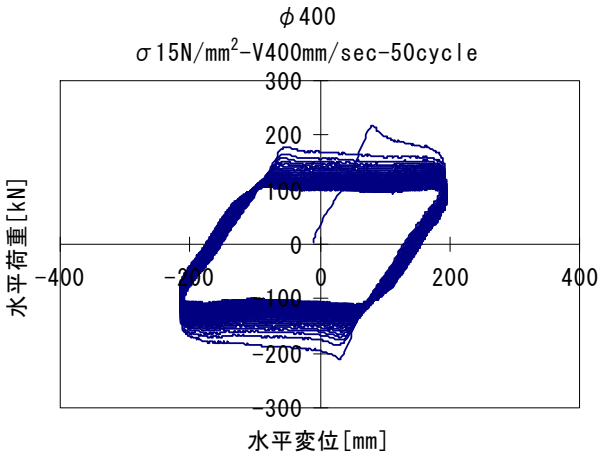


図 1.4.1-13　繰り返し試験結果による摩擦係数と弾性すべり支承の荷重変形関係

(2)　入力地震動と建物モデル

1)　入力地震動

入力地震動は、長周期地震動の発生の可能性の高い敷地として、大阪平野の此花で南海地震を想したものと、濃尾平野の津島で東海-東南海地震を想定し、平均、平均+標準偏差（SD）の２段階のレベルで作成したものを用いている。

2)　建物モデル

地震応答解析による検討対象の建物で弾性すべり支承を用いた建物は２棟ある。

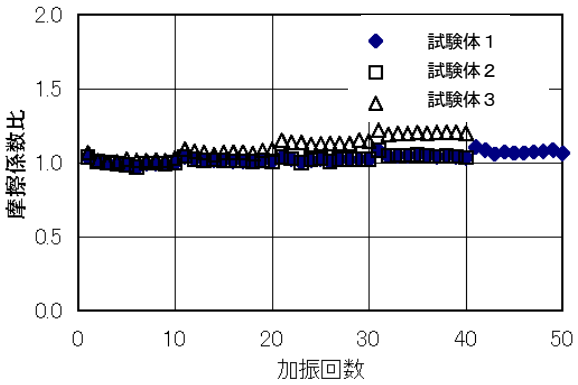
Ｂ-3 は、天然ゴム系積層ゴム支承と低摩擦型の弾性すべり支承、オイルダンパーを組み合わせたＲＣ造の建物である。使用した弾性すべり支承の摩擦係数の繰り返し依存性を図 1.4.1-14 に示す。摩擦係数の繰り返し依存性が低いことから、本項では依存性を考慮した応答計算は行わない。

①　すべり支承の繰り返し依存性

Ｂ－３のＲＣ低層建物に使用している装置は、摩擦係数μ＝0.022 の低摩擦型に分類される装置である。試験条件、結果を表 1.4.1-11、図 1.4.1-14 に示す。

表 1.4.1-11　低摩擦型のすべり支承の摩擦係数の累積すべり変位依存性試験条件

試験体名称	μ＝0.022
試験面圧　　σ（N/mm^2）	20
積載荷速度　　（mm/s）	314
試験振幅　　（mm）	100
加振回数	50



回数	摩擦係数比 φ82		
3	1.00	1.00	1.00
10	1.00	1.00	1.03
15	1.02	1.02	1.06
20	1.01	1.01	1.07
25	1.03	1.03	1.06
30	1.02	1.02	1.08
35	1.05	1.01	1.07
40	1.03	0.99	1.08
45	1.07		
50	1.07		

基準値	±10%以内

図 1.4.1-14　低摩擦型（μ=0.022）の摩擦係数の累積すべり変位依存性実験結果

もう一つのＦ-３の建物は、天然ゴム系積層ゴム支承と中摩擦型の弾性すべり支承を使ったＳ造（ＣＦＴ構造）の軒高 31.0ｍの中層建物である。中摩擦型の弾性すべり支承の摩擦係数は累積すべり変位の増加に伴い低下することから、依存性を考慮した応答解析を行い、応答に与える影響の検討を行っている。

使用している装置は、摩擦係数 μ ＝0.075 の高摩擦型と低摩擦型の中間の特性を持つ中摩擦型に分類される装置である。すべり材は純 PTFE 材を使用し、すべり板はコーテイングを施すことなく摩擦係数を抑えた製品である。

本項で検討を行った摩擦係数の累積すべり変位依存のデータは、２つの実験結果を参照している。

その一つは、面圧を 15N/mm^2 で行った実験で、20 回を三回繰り返し、20 回毎にアキュムレータへの油圧補充を行った（2～5 分程度の間隔をあけ）合計 60 回の繰り返し載荷の結果である。

実験は「免震材料の性能評価　申請図書作成要領」（建築基準法 37 条第 2 号の認定に関わる性能評価）（財）日本建築センターに準拠するものが多い。「摩擦係数の繰り返し回数による変化率」は、「摩擦係数毎に 3 履歴目と 40 履歴以上との比率を基準とする。それに加えて 3 履歴目と 1 履歴目、10 履歴目との比率を記載する。」とされていることから、サイクル数と摩擦係数の変化、試験機の振幅の情報はあるが、積層ゴムの変形の影響を差し引いた実際のすべり量の計測を行っていない。そこで、本報告書では実験で求められているグラフから、すべり量を読み込み、累積すべり量と摩擦係数の変化を評価した。

まず、20 サイクル×3 回＝合計 60 サイクルの 1 回目の試験の履歴ループから±200ｍｍの振幅に対して、すべり材のすべり量を±179.5ｍｍと評価し、摩擦係数は水平変位 0 をクロスする際の水平荷重から求めていることから、各サイクルの累積すべり変位量を下式とした。

実験の累積すべり変位　　$\Sigma \delta s=0.359+0.359\times2\times(n-1)$　　（ｍ）

3 サイクル目の累積すべり変位　$\Sigma \delta s$（3 サイクル）$=0.359+0.359\times2\times(3-1)=1.795$ｍ

累積すべり変位と摩擦係数の変化と、回帰解析を行って求めた式をプロットしたものを図 1.4.1-18 に示す。

$$\mu\ \left(\sum\delta\ s\right)=0.077248\times\left(\sum\delta\ s\right)^{-0.19062}$$

但し　μ ：摩擦係数

$\Sigma \delta$ ｓ：累積すべり変位（ｍ）

表 1.4.1-12　中摩擦型のすべり支承の繰り返し回数依存性試験条件

試験体名称	μ ＝0.075
すべり材外径 D(mm)	300
試験面圧　　σ (N/mm^2)	29.4 (300kg/cm^2)
積載荷速度　　(mm/s)	415
試験振幅　　(mm)	±200mm (sin 波加振)
加振回数	20 サイクル×3 回=合計 60 サイクル

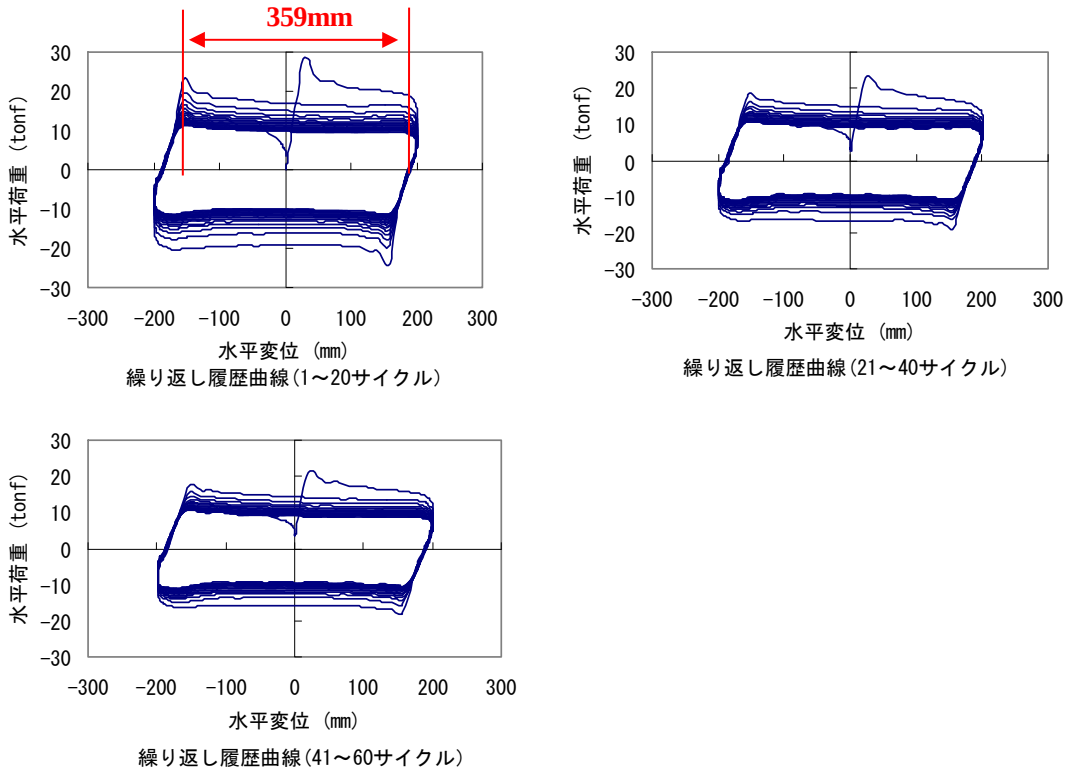


図 1.4.1-15　中摩擦型（μ=0.075）の摩擦係数の繰り返し依存性実験結果（1）

図 1.4-16 に累積すべり変位と摩擦係数、すべり板背面、すべり材背面の温度履歴を示す。実験を数分間中断した後の 2 回目、3 回目の実験でも、1 回目の 1 サイクル目の摩擦係数に復元する傾向を示している。1 回目の載荷と比較すると 2 回目、3 回目の繰り返し回数の伴う摩擦係数の低下率は大きいが、低下のカーブは類似した特性を示している。また、すべり材の背面の温度は 1 回目から 2 回、3 回目に対してすべり材の摩擦熱が蓄積された状態で、2 回目、3 回目の試験では 1 回目と比較してすべり材の温度が上昇しているにも関わらず摩擦係数は復元する結果となっている。

なお、本実験ではすべり板背面の温度計測は計測温度のレンジを越えている。

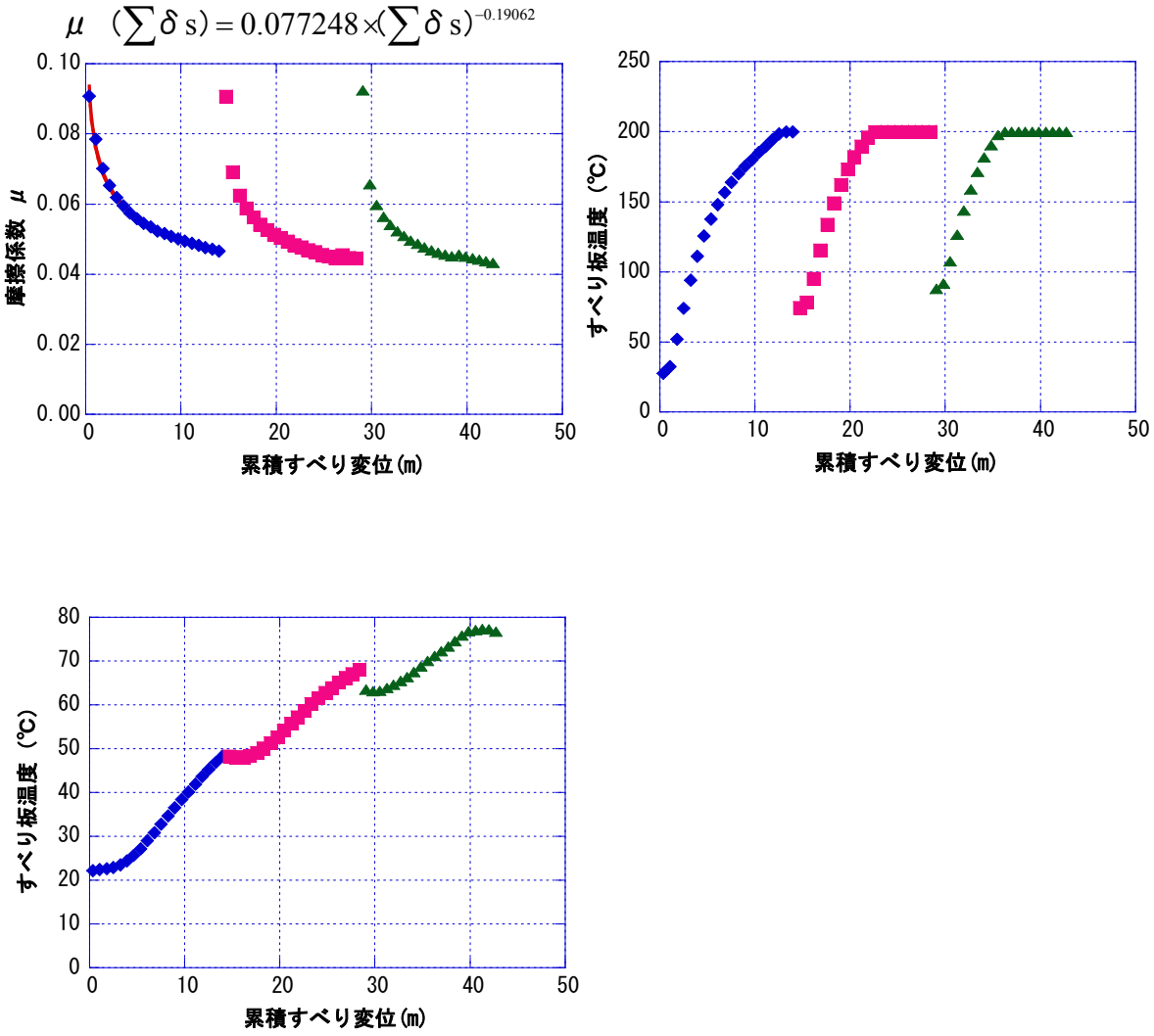
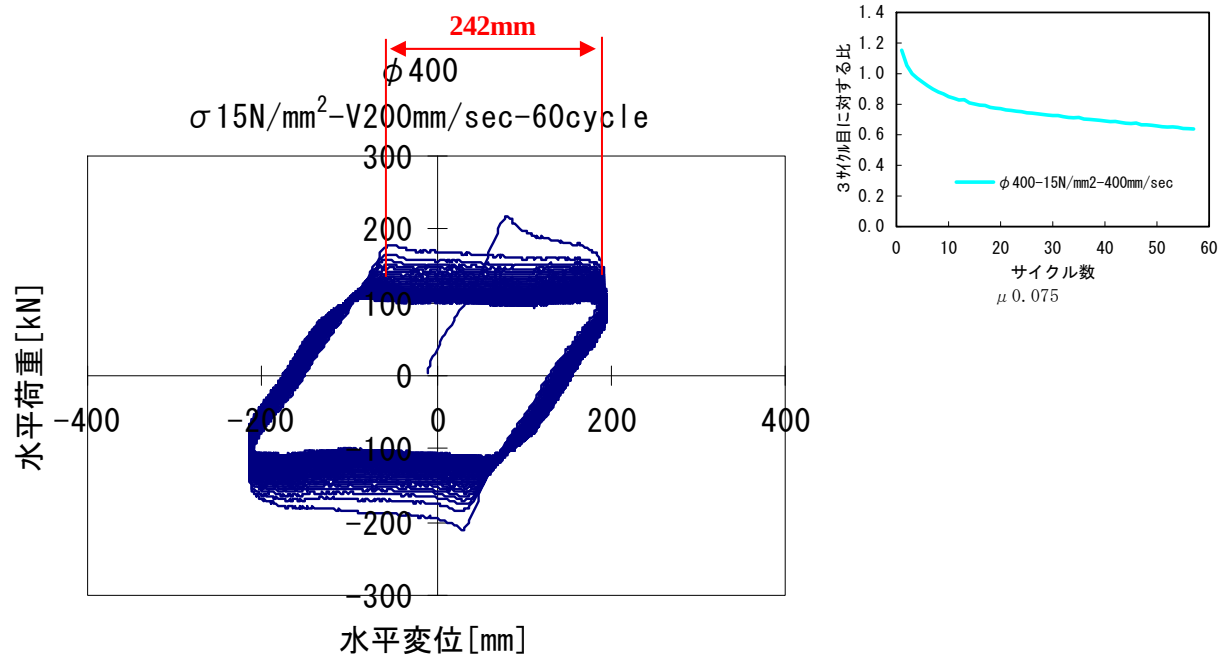


図 1.4.1-16　中摩擦型（μ=0.075）の摩擦係数の繰り返し依存性実験結果（２）

検討を行った２つめの実験結果は、材料認定に提出されている実験で、すべり材外径φ300mm, φ400mm、面圧 20N/mm^2、速度 400mm/sec(振動数 0.3Hz)の正弦波加振における試験結果である。実験結果を図 1.4.1-17 に示す。これらの試験に基づいて摩擦係数の繰り返し回数による変化率の基準値を定めている。

表 1.4.1-13　摩擦係数の繰り返し回数による変化率の基準値

繰り返し回数基準	μ 0.075			
	φ300	φ400	平均値	**基準値**
1（ｻｲｸﾙ）／3（ｻｲｸﾙ）	1.18	1.15	1.17	**1.20**
10（ｻｲｸﾙ）／3（ｻｲｸﾙ）	0.81	0.85	0.83	**0.80**
40（ｻｲｸﾙ）／3（ｻｲｸﾙ）	0.69	0.69	0.69	**0.65**



実験の累積すべり変位　　$\Sigma\delta s = 0.242 + 0.242 \times 4 \times (n-1)$　　(m)

図 1.4.1-17　繰り返し回数依存性実験

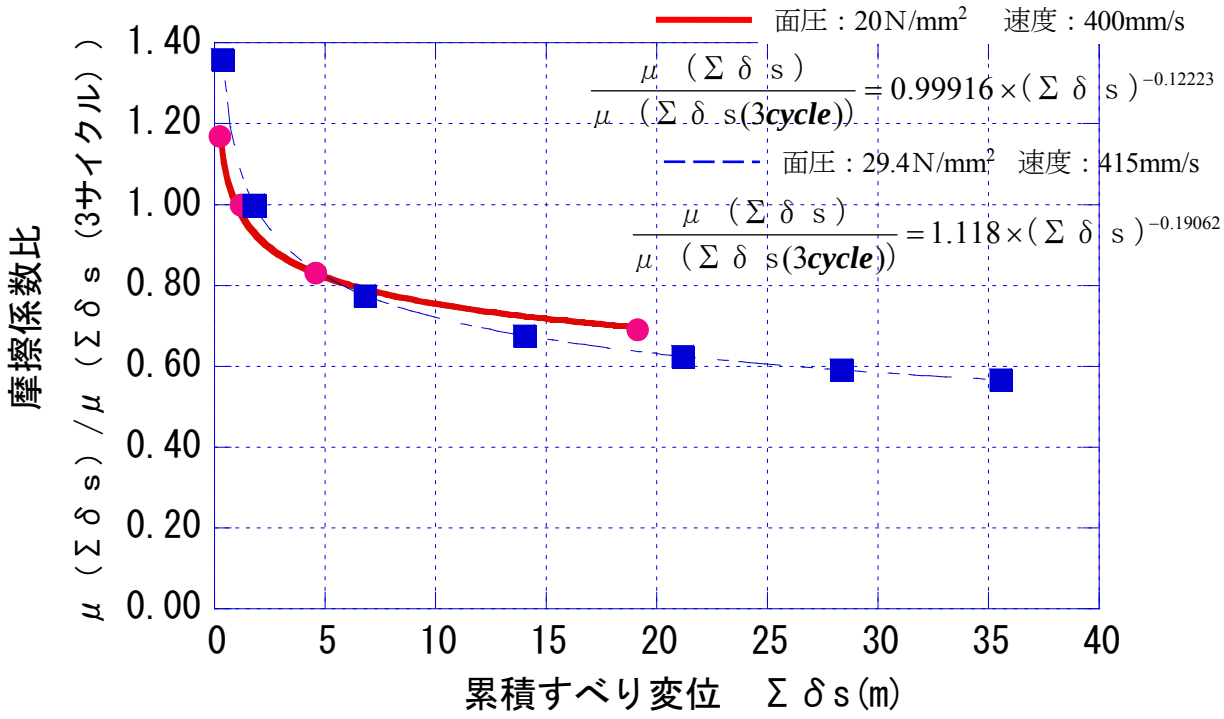


図 1.4.1-18　累積すべり変位と摩擦係数

図 1.4.1-18 に２つの実験結果から求めた累積すべり変位と摩擦係数の関係をプロットした。２つの実験結果は類似していることを確認し、本検討で応答評価する累積すべり変位と摩擦係数のモデルは、3 サイクルの摩擦係数を基準として以下のモデルを採用して応答計算を行うこととした。

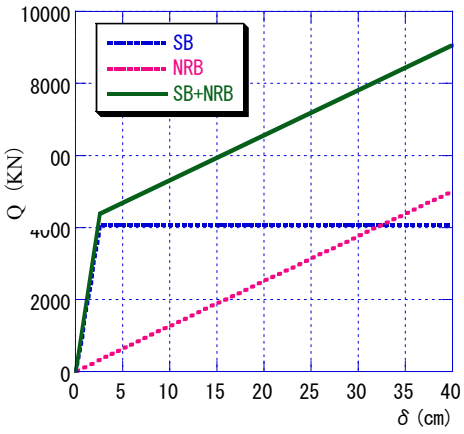
$\Sigma\delta s \leqq 0.359\mathrm{m}$ $\quad \dfrac{\mu\ (\Sigma\delta s)}{\mu\ (\Sigma\delta s(3\mathrm{cycle}))} = 1.118\times(0.359)^{-0.19062} = 1.36$

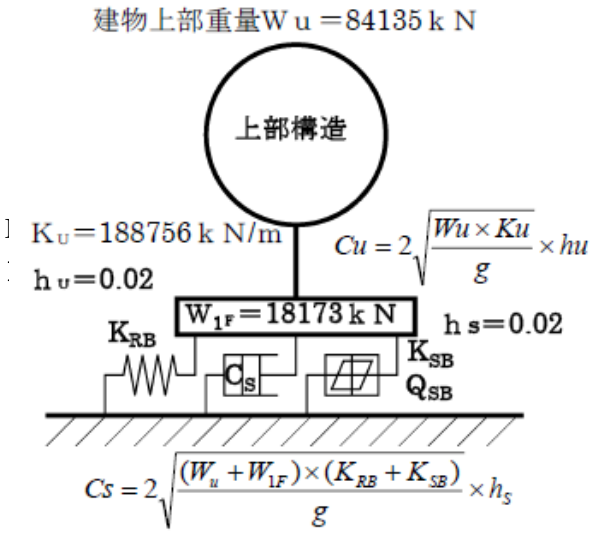
$\Sigma\delta s > 0.359\mathrm{m}$ $\quad \dfrac{\mu\ (\Sigma\delta s)}{\mu\ (\Sigma\delta s(3\mathrm{cycle}))} = 1.118\times(\Sigma\delta s)^{-0.19062}$

②振動解析モデル

Ｆ-3：中高層第 3 世代　軒高 31m　設計年 2006 年

建物モデルは図 1.4.1-19 に示すように 1 階の床と上部床の 2 自由度の質点で、基礎固定の 1 次固有周期 T=1.34 秒となるように上部架構のせん断剛性K_Uを設定し、減衰は減衰係数ｈ＝2%としてモデル化を行った。弾性すべり支承の摩擦係数は累積すべり変位依存性を考慮しない場合と考慮した場合の２つのモデルの解析を行っている。





天然ゴム系積層ゴム支承 RB の剛性	K_{RB}＝12.5×10³kN/m
弾性すべり支承 SB の剛性	K_{SB}=156.8×10³kN/m
摩擦係数	μ =0.075
支持荷重	N=54,147kN
	Q_{SB}=4061kN
軒高さ	H=31m
基礎固定の上部構造の 1 次周期	T1=1.34　sec

図 1.4.1-19　振動解析モデル

図 1.4.1-20 に高摩擦型の弾性すべり支承の耐久性能試験結果を、図 1.4.1.-21 に低摩擦型の弾性すべり支承の耐久性能試験結果を示す。

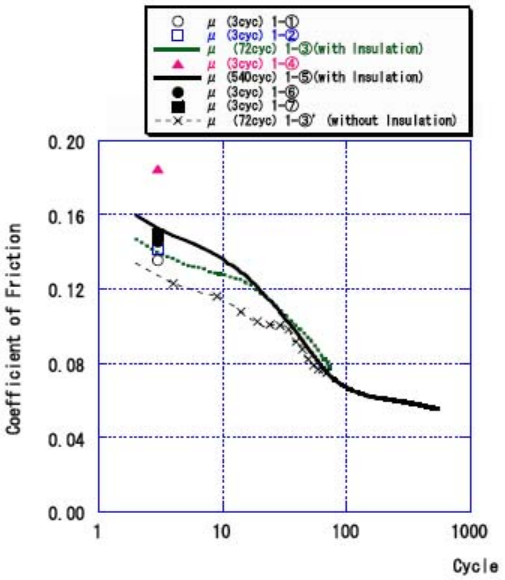


図 1.4.1-20　高摩擦型の弾性すべり支承の耐久性能試験

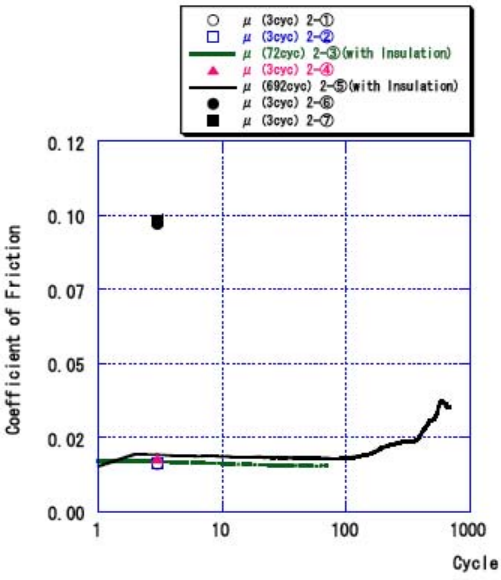


図 1.4.1-21　低摩擦型の弾性すべり支承の耐久性能試験

(3) 応答解析結果

解析結果の一覧を表 1.4.1-14 に、復元力特性及び応答時刻歴波形を図 1.4.1-22～1.4.1-30 に示す。４つの入力地震波の応答では、累積すべり変位依存性を考慮した摩擦係数の変化が、累積すべり変位が基準となる 3 サイクルのすべり量に達しないため、3 サイクルの摩擦係数との比が 1 を若干越えるものから、30%程度低下する結果もある。また、累積すべり変位は最大でも約 10m 程度である。

各応答値の特徴を示す。

・最大応答変位　δ max

免震層の最大応答変位は、最大でも 10%程度しか依存性を考慮したものが大きくならない。免震層のクリアランス寸法に余裕を持った計画であれば問題ないと判断できる。

・建物の層せん断力係数　C_I

すべり材の累積すべり変位が 3 サイクルに達するまでに地震動の加速度振幅が大きくなり、上部建物が最大応答に達することから、基準となる 3 サイクルの摩擦係数より上部建物の最大応答を示す時の弾性すべり支承の摩擦係数が大きくなり、建物の層せん断力係数は依存性を考慮したほうが依存性を考慮しない場合より増加する応答を示した。この現象は設計で考慮されていないことから、弾性すべり支承を使用する建物を設計する場合、上部建物に作用する地震力に余裕を持つことが必要となる可能性を指摘できる。

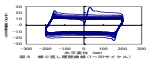
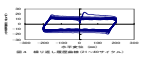
・累積すべり変位　Σ δs

累積すべり変位量は最も大きなすべり量を示した結果でも約 10m程度で、後述の耐久性能試験結果の性能と比較しても十分に余裕がある結果になっている。

今回、検討を行った地震動、建物モデルでは、上部建物の地震力以外は弾性すべり支承の摩擦係数の累積すべり変位量依存性の考慮の影響が少ない結果になっている。しかし、摩擦係数

の非線形性が与える影響は、入力地震動、建物の振動特性により影響を受ける可能性は否定できないことから、一般の設計でも摩擦係数の低下の影響を解析できるプログラムの普及、モデル化に必要な弾性すべり支承の実験データ、研究の充実が必要と考えられる。

表 1.4.1-14　建物の応答結果　F-3（摩擦係数の繰り返し依存性の考慮の有無の比較）

入力地震名称	繰り返し依存性の考慮	δmax (m)	C_1	Σδs (m)	摩擦係数比 $\frac{\mu(final)}{\mu(3cycle)}$	免震層の最大応答変位比 	建物の層せん断力比 
N-OSKH02-AV	未考慮	0.091	0.079	1.79	1.00	1.10	1.19
	考　慮	0.100	0.094	1.56	1.03		
N-SKH02-SD	未考慮	0.164	0.090	4.63	1.00	1.09	1.20
	考　慮	0.178	0.109	5.23	0.82		
T-TN-AIC0003-AV	未考慮	0.187	0.092	4.26	1.00	0.99	1.18
	考　慮	0.186	0.109	4.20	0.85		
T-TN-AIC0003-SD	未考慮	0.289	0.105	8.92	1.00	1.01	1.11
	考　慮	0.291	0.117	9.89	0.72		

(4) 弾性すべり支承の累積すべり変位に対する耐久性能

材料認定で要求される繰り返し載荷の実験では、40 回の繰り返し載荷を求められているため、累積すべり変位が 10mを越える実験が行われている。そのほとんどの実験が非断熱状態で行ったものである問題は残るが、長周期地震を想定した耐久性能を検討するために不十分な累積すべり変位の実験とは言えない。その累積すべり変位を大きく越える耐久性能の限界状態を調べるための実験[1.4.1.6~8)]が行われている。その結果によると、

1) 高摩擦型の弾性すべり支承 $\mu = 0.13$

累積すべり変位が約 40mの繰り返し実験を経験後、約 300m の累積すべりの負荷を加えた実験を行った後も、摩擦係数、積層ゴム部の剛性の変化はなく、装置として健全性を実験的に確認している。

2) 低摩擦型の弾性すべり支承 $\mu = 0.015$

累積すべり変位が約 40mの繰り返し実験、その後に行った基本実験では摩擦係数の変化はなかったが、すべり板が環境温度に復元後に行った約 300m の実験では、累積すべり変位が約 56mを越えた 100 サイクル以降に摩擦係数が徐々に増加し、その後に行った基本実験でも摩擦係数が増加したままで復元しない状態になった。すべり板のコーテイング材、すべり材の摩擦熱による劣化の影響と推察できる。しかし、長周期地震を想定しても、約 56mの累積すべり量は十分な耐久性能と判断できる。

表 1.4.1-15 に弾性すべり支承の繰り返し載荷に対する耐久性能試験結果を示す。

表 1.4.1-15　弾性すべり支承の繰り返し載荷に対する耐久性能試験

試験体	試験 No.	σ (MPa)	V (mm/s)	freq(Hz)	波形	± δ (mm)	サイクル数	累積変位 (m)
HF-Type (μ=0.13)	1-①*	10 (201 kN)	100	0.16	正弦波	100	3	1.20
	1-②*		200	0.32		100	3	1.20
	1-③*		350	0.40		140	72	40.32
	1-④*		100	0.16		100	3	1.20
	1-⑤*		350	0.40		140	540	302.40
	1-⑥**		100	0.16		100	3	1.20
	1-⑦**		100	0.16		100	3	1.20
LF-Type (μ=0.015)	2-①*	18 (576 kN)	100	0.16	正弦波	100	3	1.20
	2-②*		200	0.32		100	3	1.20
	2-③*		350	0.40		140	72	40.32
	2-④*		100	0.16		100	3	1.20
	2-⑤*		350	0.40		140	692	387.52
	2-⑥**		100	0.16		100	3	1.20
	2-⑦**		100	0.16		100	3	1.20

*　　①～⑤は各試験後に冷却のインターバルを置く

**　　前試験の翌日以降に実施

(5)　まとめ

本項における検討は、２つのサイトで作成した特定の地震波を入力地震とし、特定の振動特性を持った建物モデルの応答結果であり、今後、研究の蓄積を行うことが必要であるが、1)弾性すべり支承の摩擦係数の累積すべり変位の依存性を考慮しても、免震層の最大応答変位の増加は少ない結果を得た。

2)依存性を考慮した場合の上部建物の地震力の増加

弾性すべり支承の設計では、一般的に 3 サイクル目の摩擦係数を基本として設計を行っている。しかし、上部建物の最大応答を示す時刻に弾性すべり支承の累積すべり変位が 3 サイクルのすべり量に達しないため、一般的に行っている依存性を考慮しないモデルと比較すると、累積すべり変位の摩擦係数の低下を考慮したモデルが上部建物に作用する地震力が増加する傾向を確認した。

3)弾性すべり支承のすべり材の累積すべり変位の増加は少ない

地震動の加速度の大きさがすべりの発生に影響することから、今回検討を行った地震動では累積すべり変位の量が 10m以下となり、累積すべり変位量の増加は依存性を考慮しても大きくならないことを確認した。逆に、N-OSKH02-AV では小さくなる結果になった。

(6)　今後の課題

1)　摩擦係数の累積すべり変位依存性

摩擦係数は累積すべり変位の影響で 3 サイクル目の摩擦係数に対して 20～30%高い値から30%程度低下する可能性を示した。この摩擦係数の変化に対する応答特性の変化は評価する地震力に無視しえるものでない。構造設計者が摩擦係数の累積すべり変位の依存性を考慮できるプログラムを使用して、装置の特徴を十分に反映できる設計環境の充実が早急に必要である。

2)　設計で使用できる情報の充実

累積すべり変位依存性の実験は、同一位置のすべり板の上で、繰り返し振幅で実験した摩擦係数である。実際の地震時の装置の状態とは異なった条件の結果である。実際の状態を再現した実験をどのように行うか。また、現在行っている実験方法から、より実際に近い設計に適用できる情報を求める研究が必要となる。

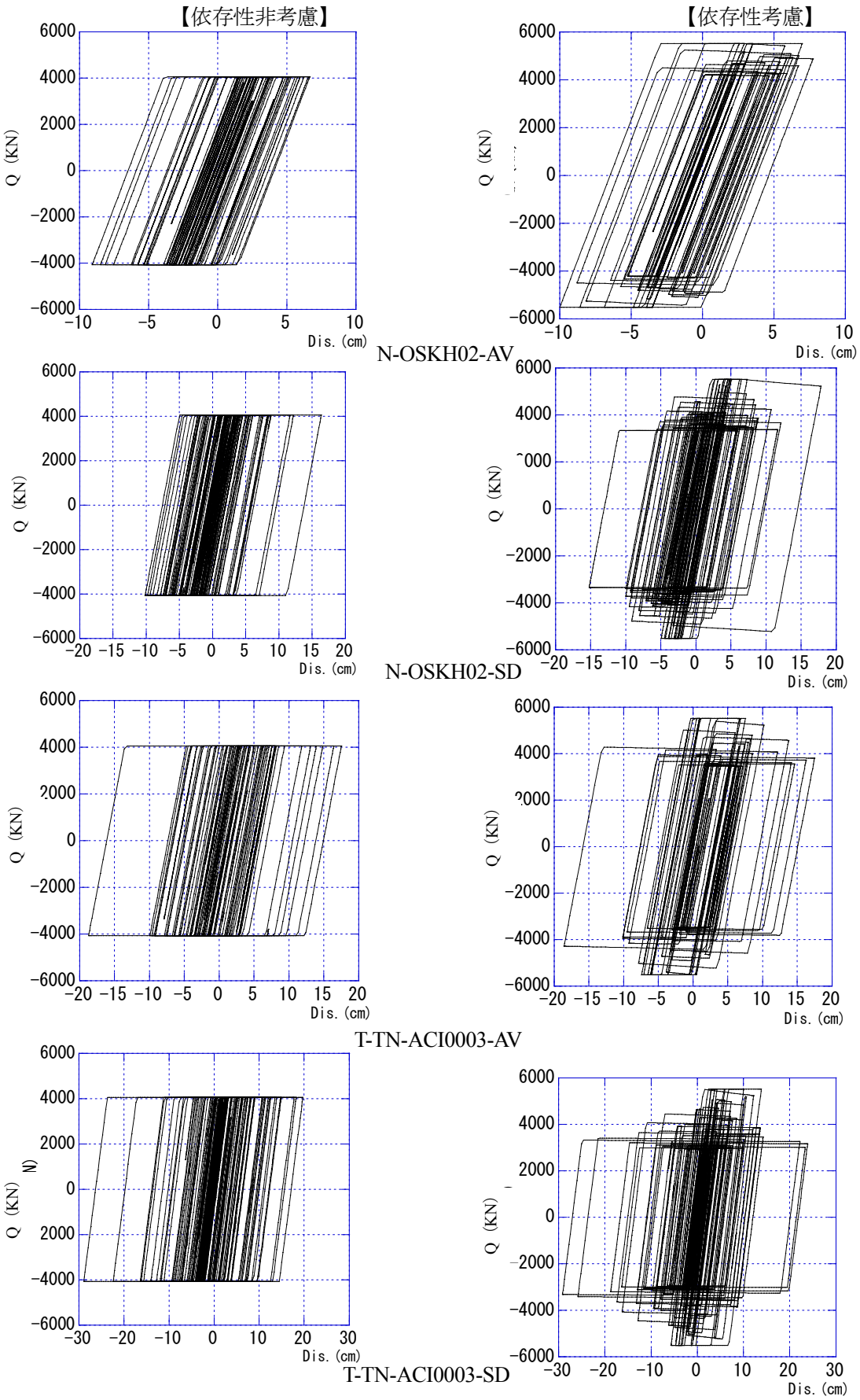


図 1.4.1-22　免震層の荷重変形関係

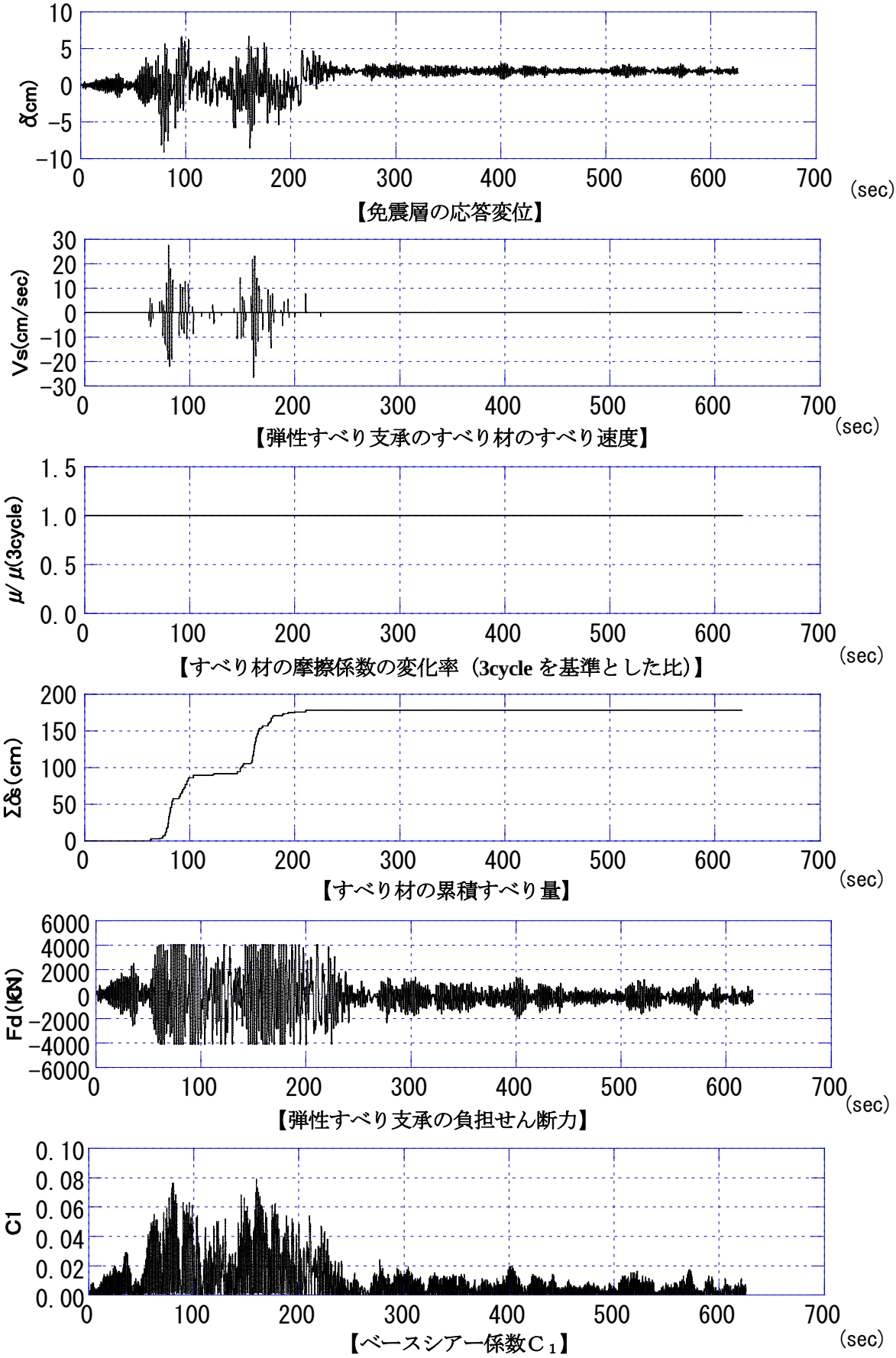


図 1.4.1-23　応答解析結果（N-OSAKA-AV　依存性非考慮）

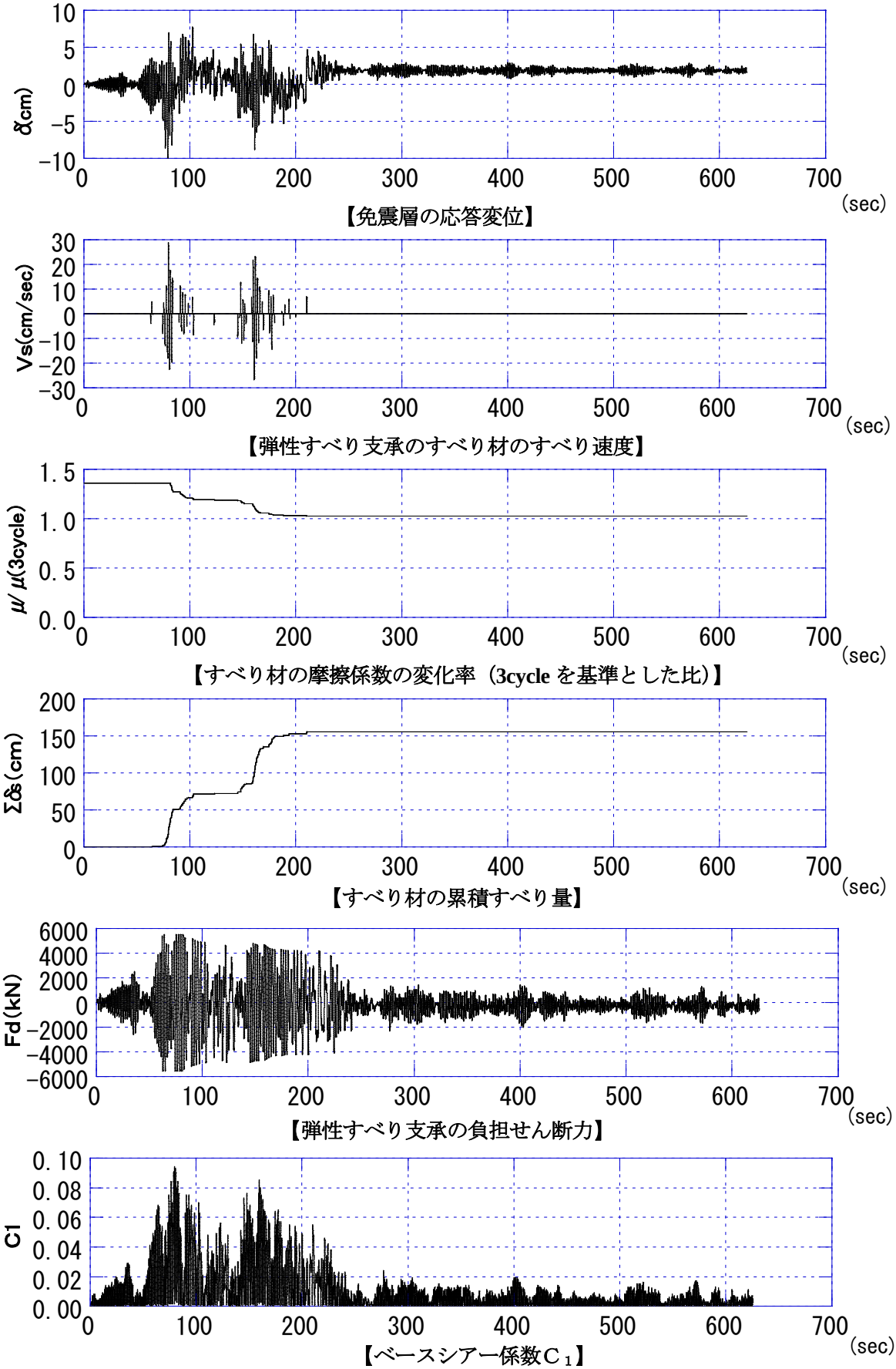
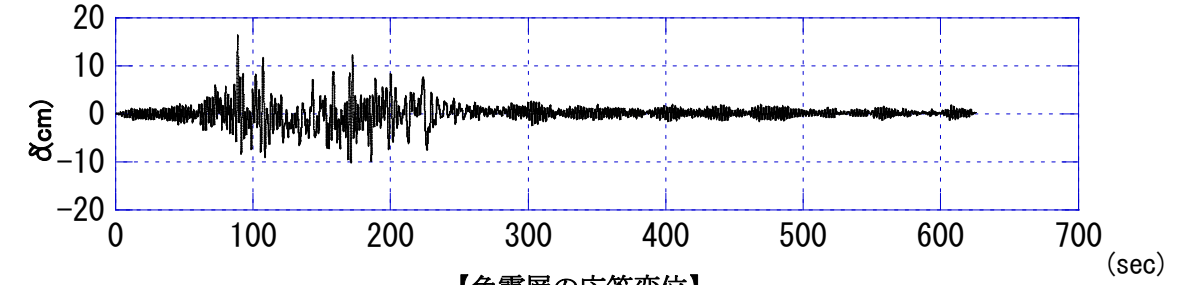
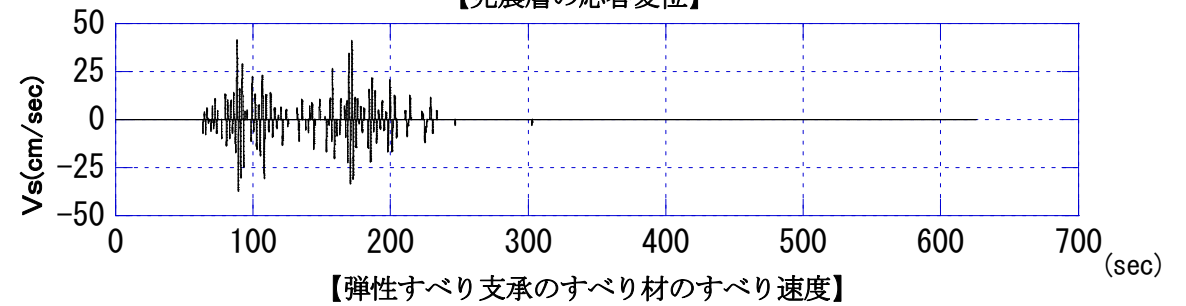


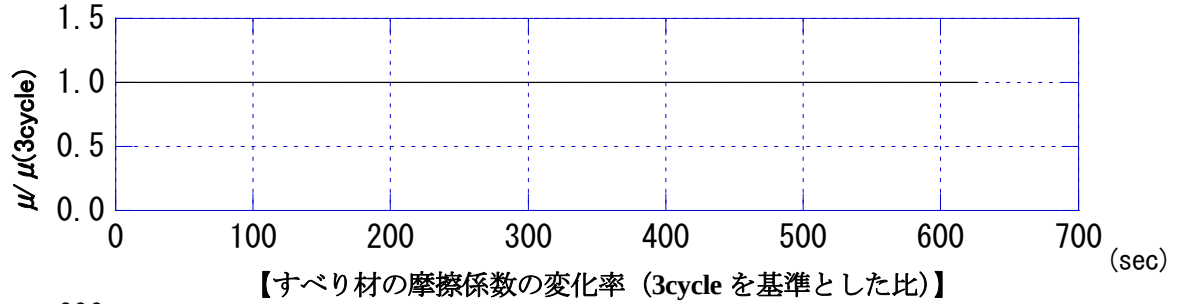
図 1.4.1-24　応答解析結果（N-OSAKA-AV　依存性考慮）



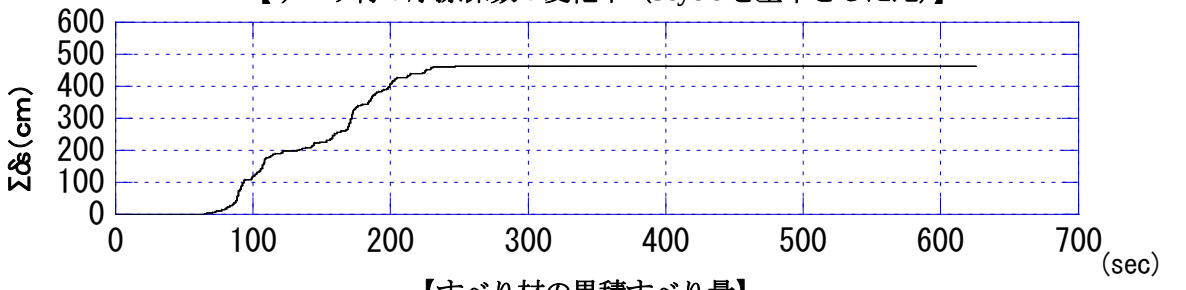
【免震層の応答変位】



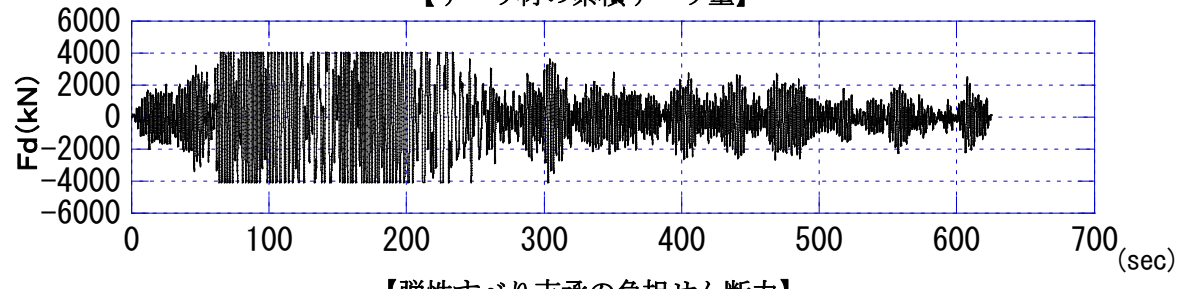
【弾性すべり支承のすべり材のすべり速度】



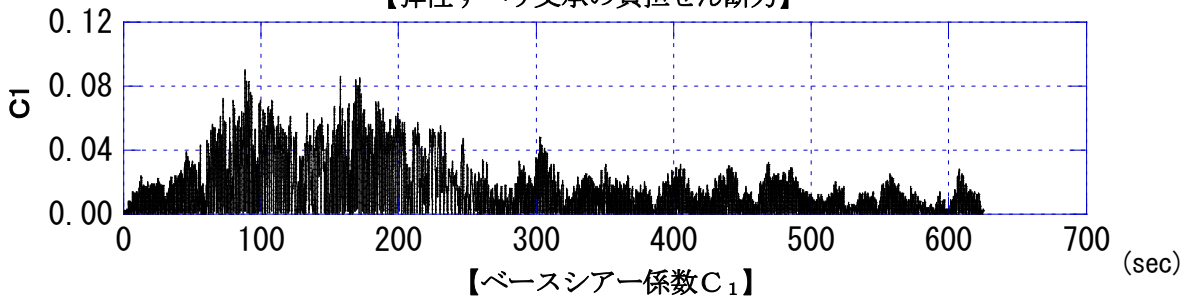
【すべり材の摩擦係数の変化率（3cycle を基準とした比）】



【すべり材の累積すべり量】



【弾性すべり支承の負担せん断力】



【ベースシアー係数Ｃ１】

図 1.4.1-25　応答解析結果（N-OSAKA-SD　依存性非考慮）

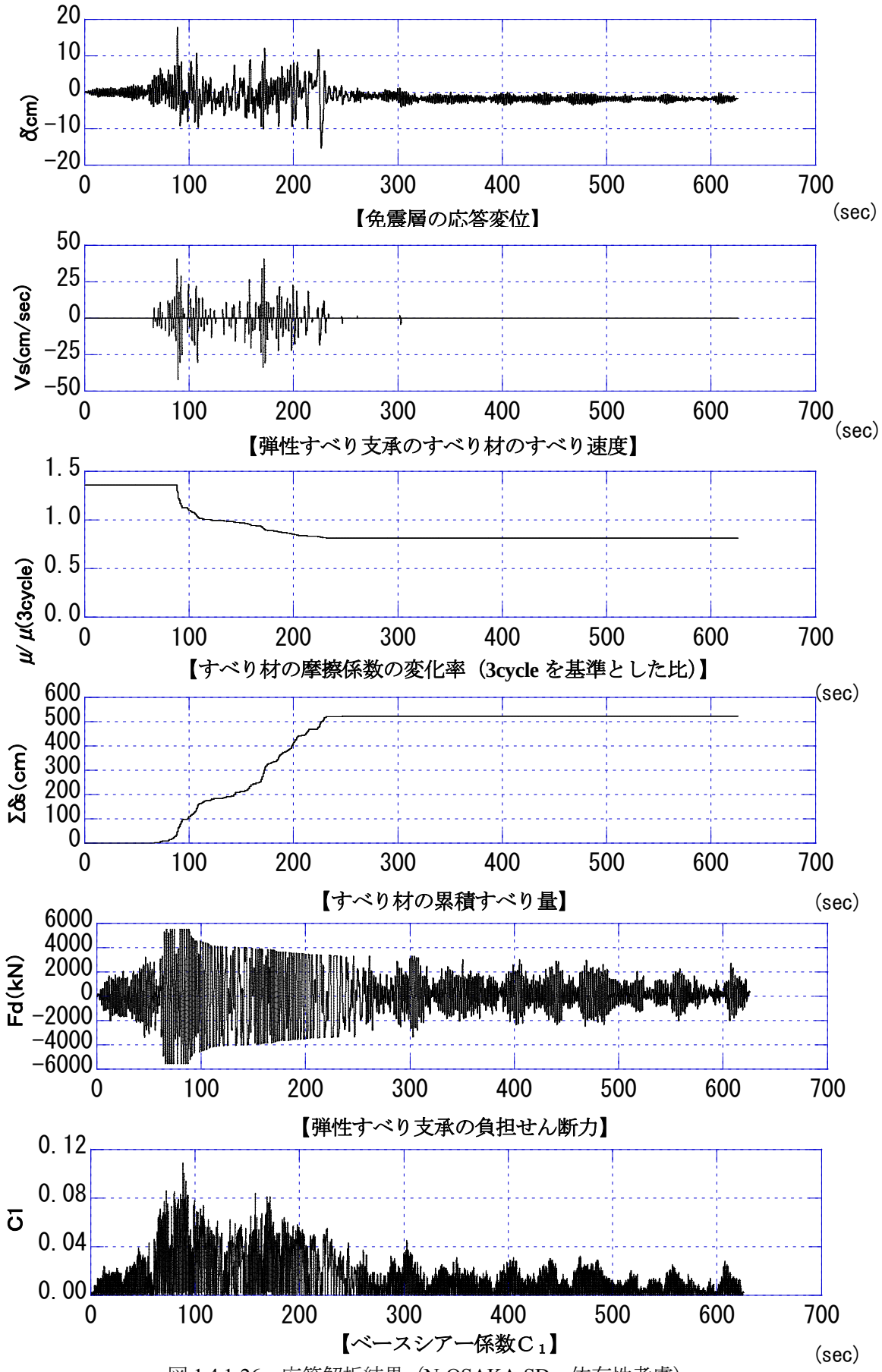


図 1.4.1-26　応答解析結果（N-OSAKA-SD　依存性考慮）

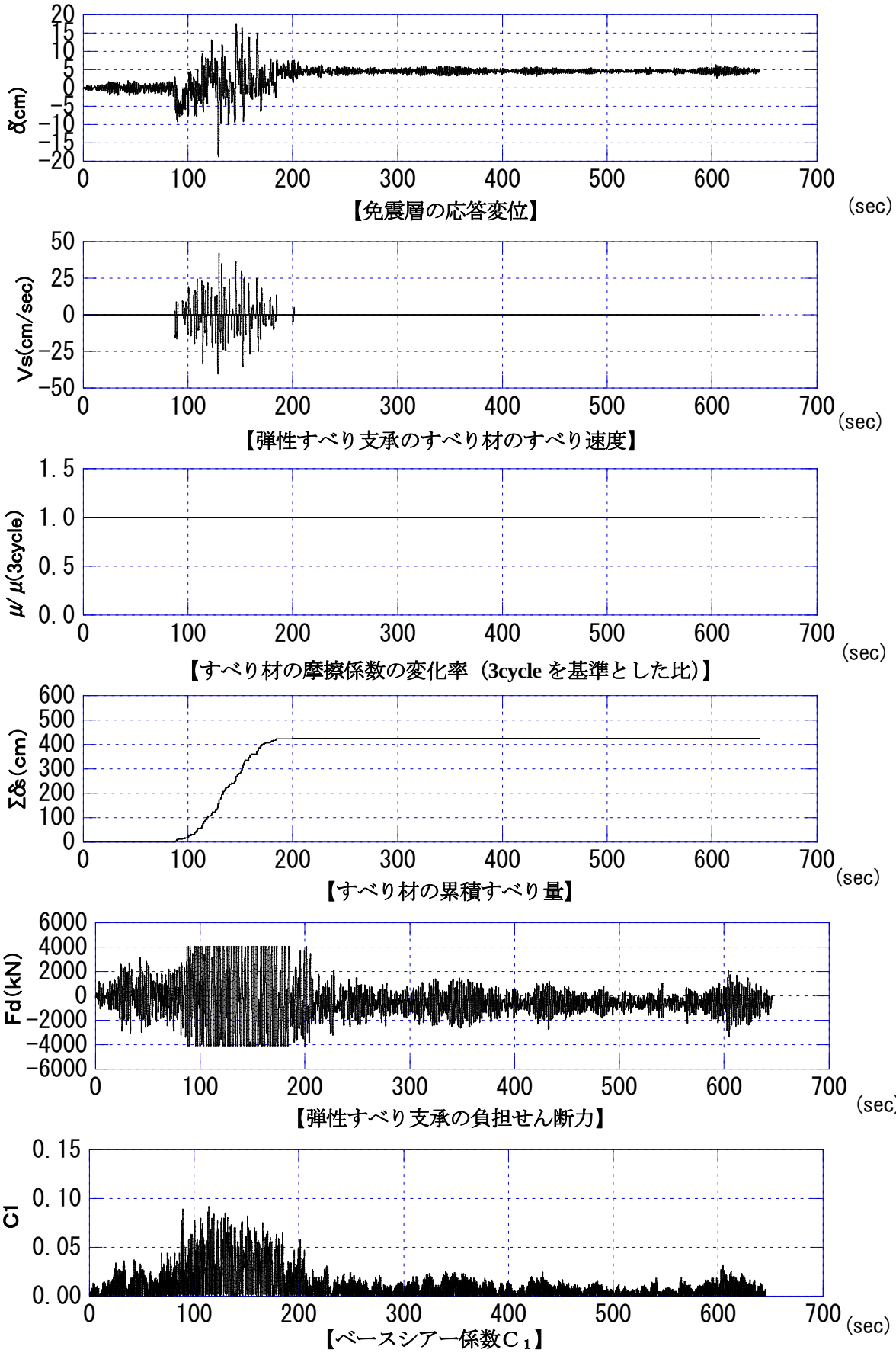


図 1.4.1-27　応答解析結果（T-TN-AIC0003-AV　依存性非考慮）

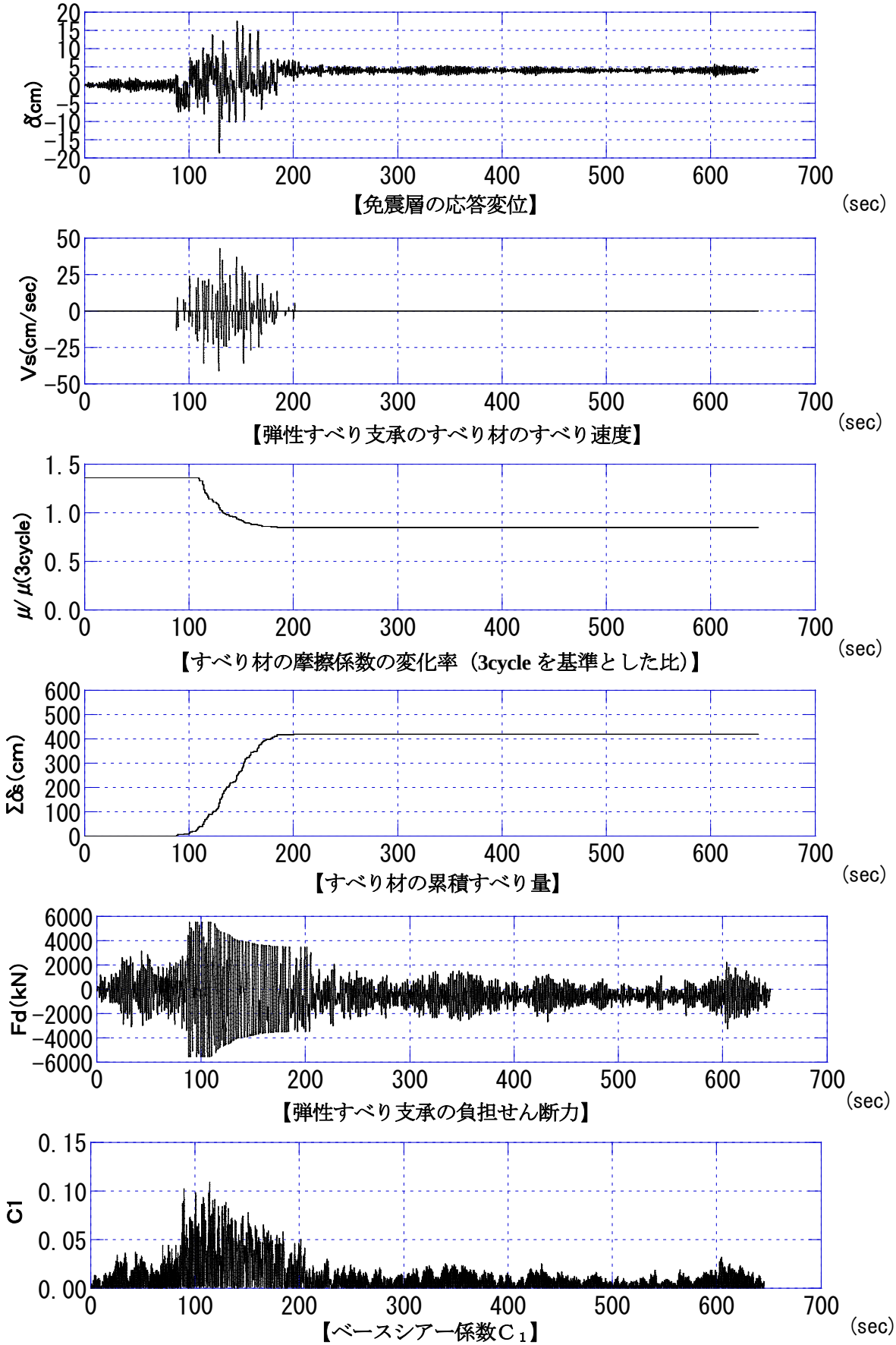


図 1.4.1-28　応答解析結果（T-TN-AIC0003-AV 依存性考慮）

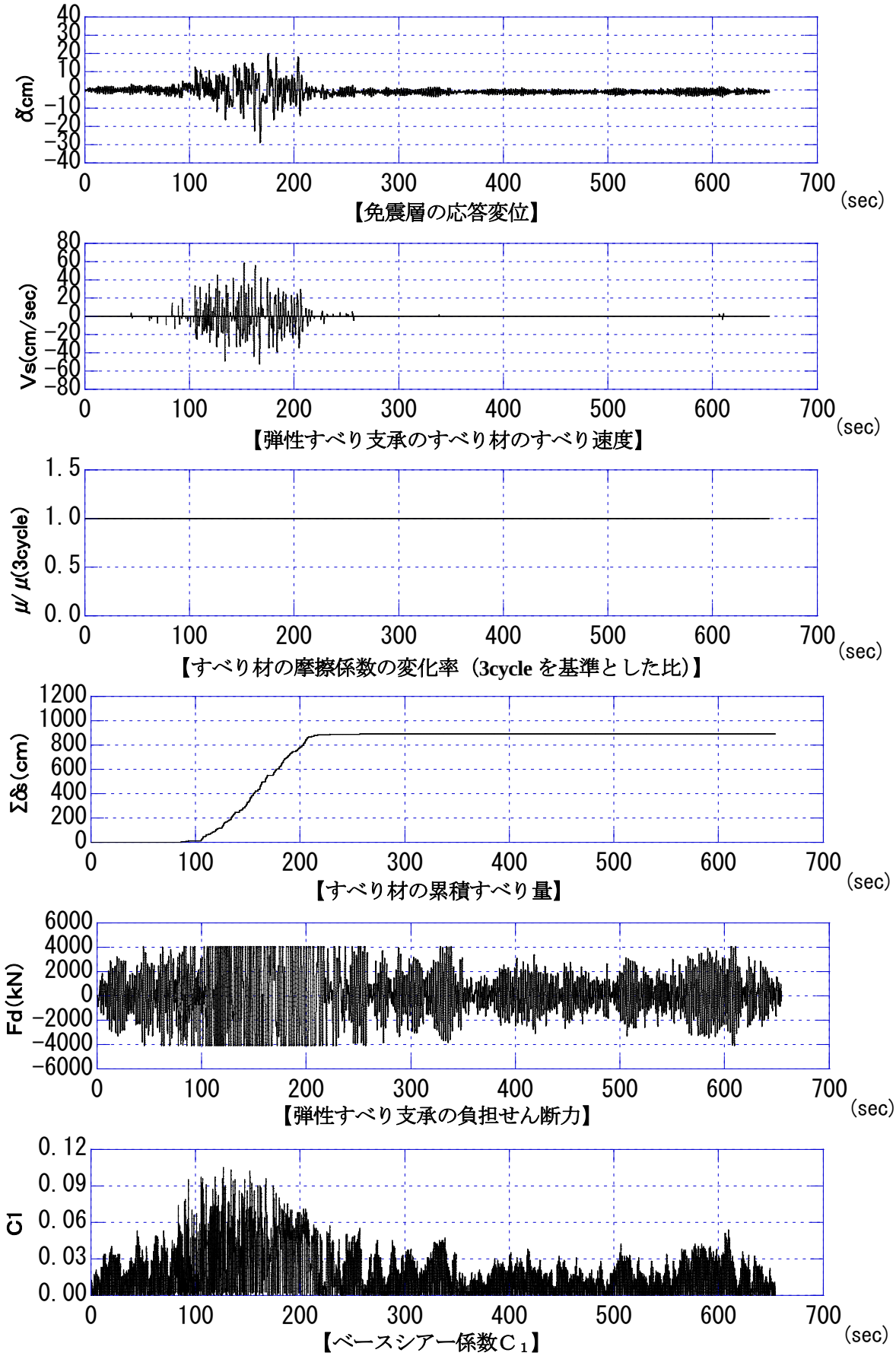


図 1.4.1-29　応答解析結果（T-TN-AIC0003-SD 依存性非考慮）

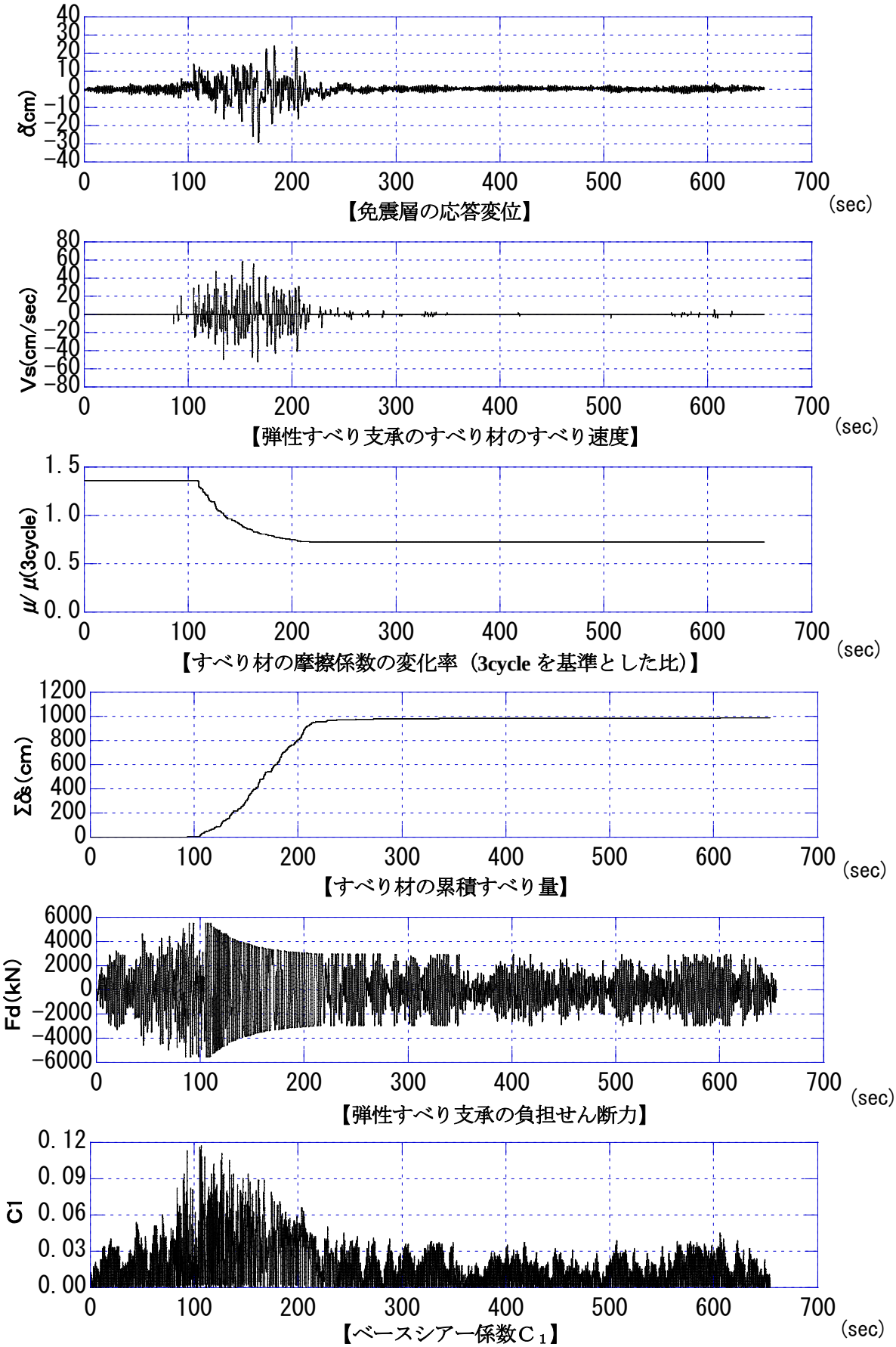


図 1.4.1-30　応答解析結果（T-TN-AIC0003-SD 依存性考慮）

1.4.1-3 鋼材ダンパー

長周期地震動において免震建築物に設置された鋼材ダンパーがエネルギーを吸収することによる疲労蓄積に関して、建物の時刻歴応答変位をもとにマイナー則を用いて疲労予測を行う。また、鋼材ダンパーの累積吸収エネルギーからの疲労予測との比較も行う。

今回検討対象の建物に使用している鋼材ダンパーは、免震U型ダンパーと免震鋼棒ダンパーであり、疲労特性については、既存の定振幅繰り返し載荷試験結果をもとに、中（弾性限以上）～大振幅の破断回数から設定した疲労曲線と、小（弾性限以下）～大振幅での破断回数から設定した疲労曲線（免震U型ダンパーのみ）の２種類を用いて、比較を行う。

(1)　疲労曲線の設定

1)　免震U型ダンパー

免震U型ダンパーは相似形で5種類のサイズがあり、ここでは真ん中のサイズであるNSUD50 シリーズを例に説明する。NSUD50 シリーズの弾性限変位は 27.9mm であり、ダンパーロッド形状を図 1.4.1-31 に示す。定振幅繰り返し載荷試験における加力方向については、ダンパーロッドの軸線方向を 0 度方向加力､軸線に直交する方向を 90 度方向としている。

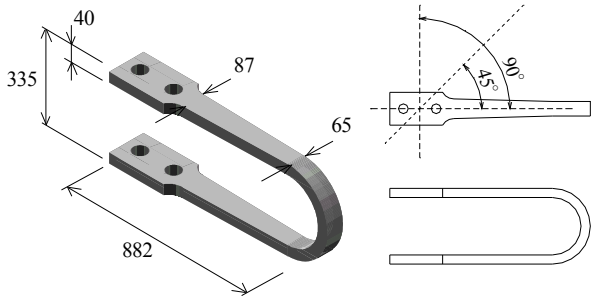


図 1.4.1-31　U 型ダンパーの形状と寸法
（NSUD50 シリーズ）

①　中～大振幅での破断回数から設定した疲労曲線

NSUD50 シリーズの中～大振幅での定振幅繰り返し試験結果を図 1.4.1-32 に示す。免震U型ダンパーは疲労特性に方向性があるため、加力方向毎に疲労曲線を設定している。400mm 以下の振幅では 0 度方向が破断回数が最も小さくなる加力方向であり、下式で対数近似される。

$Nd=10.5\times\delta^{-1.363}$ …　(1.4.1-11)

Nd：破断までの繰り返し回数

δ：片振幅（m）

疲労検討は 0 度方向の疲労曲線でおこなう。

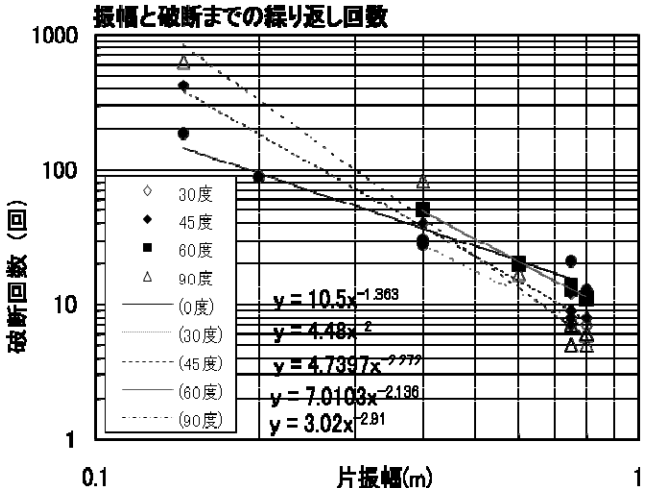


図 1.4.1-32　中～大振幅の疲労特性
(NSUD50 シリーズ)
（角度は、図 1.4.1-31 を参照

②小～大振幅での破断回数から設定した疲労曲線

免震U型ダンパーの繰り返し変形性能は吉敷らの論文（参考文献 1.4.1-9）によると、下記の式で表す事が出来る。

$\gamma_e = 35 \times Nf^{0.15}$ … (1.4.1-12)

$\gamma_p = 3620 \times Nf^{0.80}$ … (1.4.1-13)

$\gamma_t = 35 \times Nf^{0.15} + 3620 \times Nf^{0.80}$ … (1.4.1-14)

γ_e、γ_p、γ_t：変位振幅をダンパーロッド高さで除した平均せん断変形角(%)、添字はそれぞれ弾性変位振幅 δ_e、塑性変位振幅 δ_p、全変位振幅 δ_t に対応している。

N_f：破断までの繰り返し回数

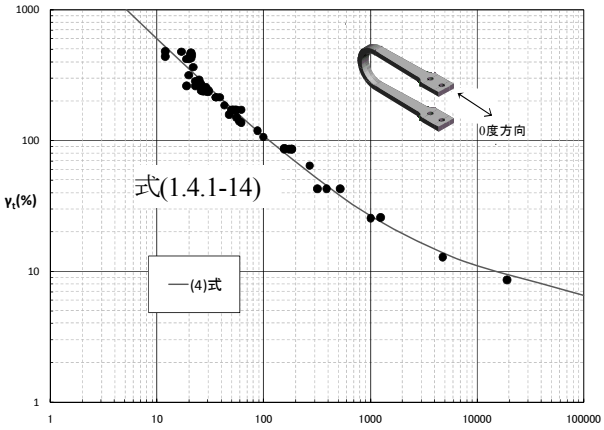


図 1.4.1-33　小～大振幅の疲労特性
（全サイズ、0 度方向加力）

図 1.4.1-33 は全 5 種類のサイズシリーズの実験結果をプロットしており式(1.4.1-14)が良い対応を示している事が判る。

また、図 1.4.1-34 に NSUD50 シリーズの定変位繰り返し試験の結果に式(1.4.1-11)と式(1.4.1-14)を比較した結果を示す。中～大振幅の試験結果より設定した式(1.4.1-11)が小振幅域で疲労性能を過小評価していることが判る。

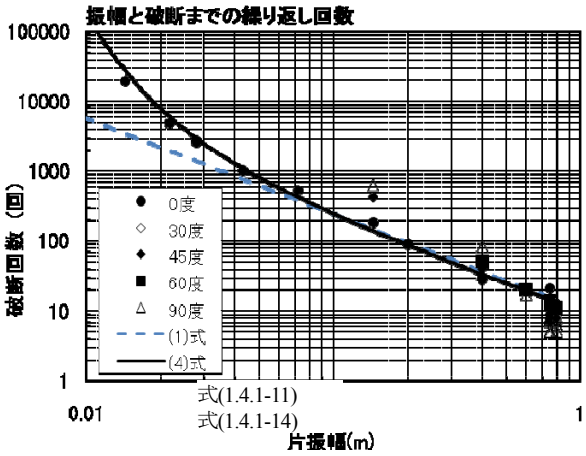


図 1.4.1-34　小～大振幅の疲労特性
（NSUD50 シリーズ）

同様に NSUD45 シリーズの疲労特性を図 1.4.1-35、図 1.4.1-36 に示す。式(1.4.1-15)は中～大振幅の疲労特性における 0 度方向の疲労曲線である。

$$Nd=6.913\times \delta^{-1.314} \quad \cdots \quad (1.4.1\text{-}15)$$

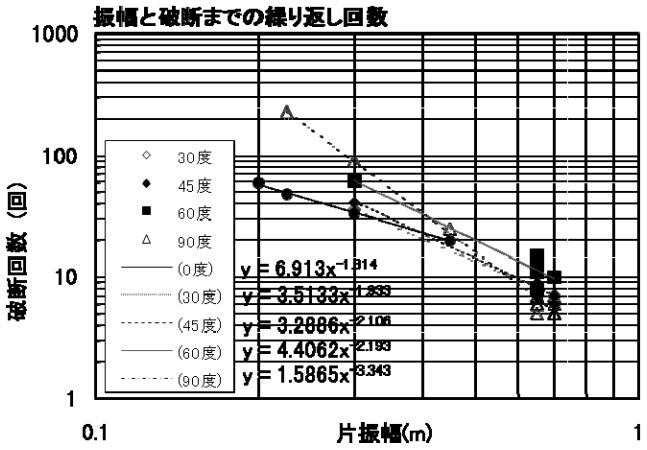


図 1.4.1-35　中～大振幅の疲労特性
(NSUD45 シリーズ)

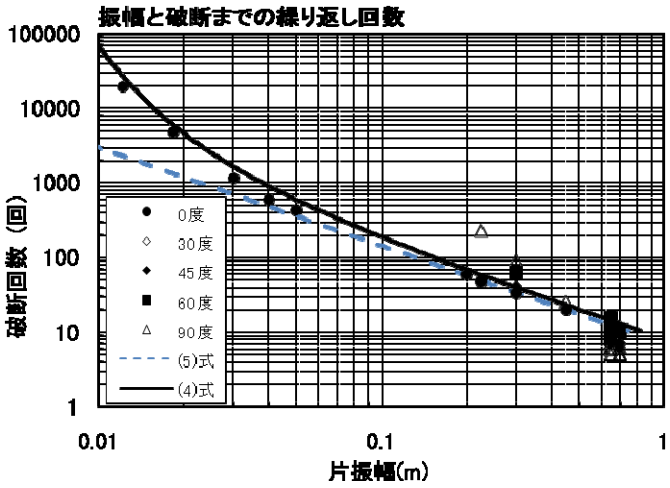


図 1.4.1-36　小～大振幅の疲労特性
(NSUD45 シリーズ)

2)　免震鋼棒ダンパー

免震鋼棒ダンパーについては、弾性域での疲労試験を行っていないため、中～大振幅での破断回数から求めた疲労曲線のみで推定を行う。図 1.4.1-37 に疲労特性を示す。

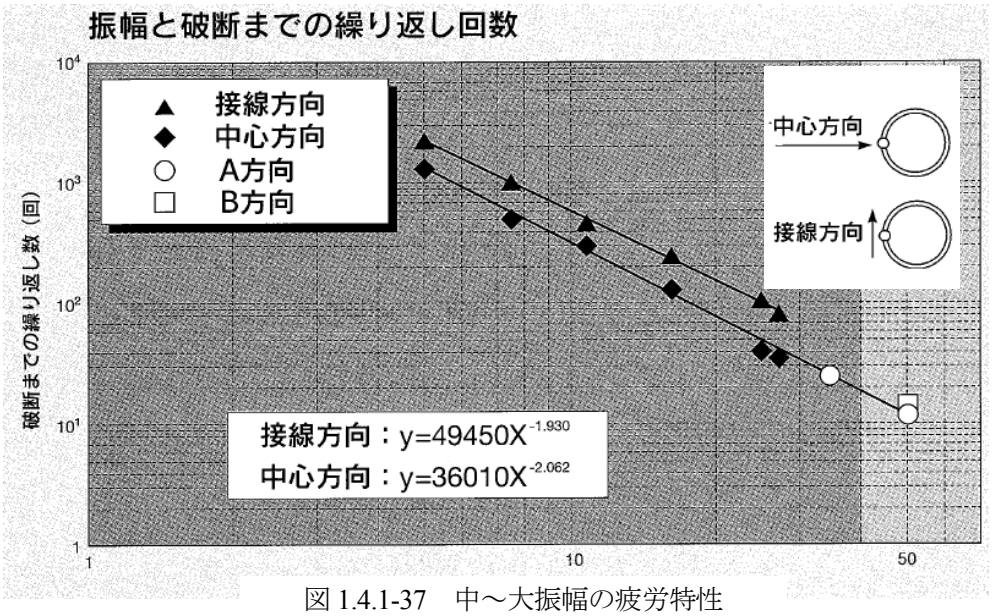


図 1.4.1-37　中～大振幅の疲労特性
(NSSD70 ϕ R285(L))

(2)　疲労予測法

1)　マイナー則による検討

ダンパーの時刻歴応答変位をレインフロー法により振幅毎のサイクル数を計数し、振幅毎の疲労損傷度 Di を下式により算定する。その後、全振幅に渡り Di を累積しダンパーの疲労損傷度を求める。

$Di=ni/Ni$

Di：振幅 δi における疲労損傷度

ni：時刻歴応答変位に含まれる振幅 δi のサイクル数

Ni：振幅 δi における破断までの繰り返し回数（疲労曲線の各式より算定）

2)　累積吸収エネルギーを用いた検討

振幅毎の破断に至る吸収エネルギー量を下式により算定する。その後、地震応答によりダンパーが吸収した累積吸収エネルギー量とその地震での最大応答変位における破断に至る吸収エネルギー量との比を求め、疲労損傷度とする。

$Wi={}_1Wi\times Ni$

Wi：振幅 δi における破断に至る吸収エネルギー

${}_1Wi$：バイリニアモデルでの振幅 δi における 1 サイクル吸収エネルギー

Ni：振幅 δi における破断までの繰り返し回数

（中～大振幅の破断回数から求めた疲労曲線により算定）

図 1.4.1-38 に NSUD50×4 の振幅と破断に至る吸収エネルギーを示す。

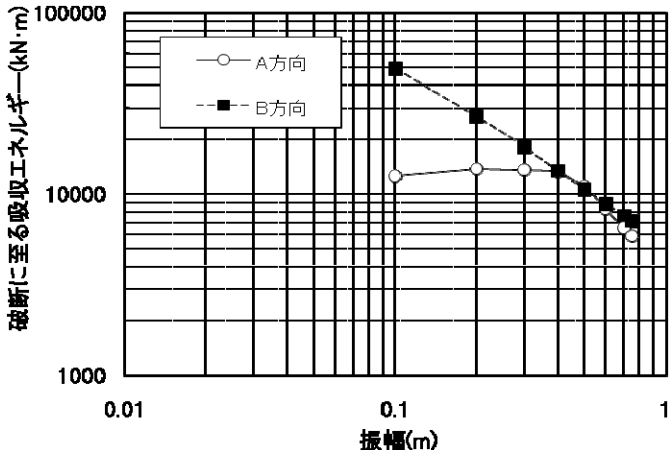


図 1.4.1-38　振幅と破断に至る吸収エネルギー
(NSUD50×4)

(3)　結果及び考察

地震応答解析結果に対する鋼材ダンパーの疲労検討結果一覧を表 1.4.1-16 に示す。また、累積疲労損傷度の計算例の抜粋を表 1.4.1-17、表 1.4.1-18 に示す。

各検討方法のうち(1)　疲労曲線の設定で①の中～大振幅振幅の疲労曲線からマイナー則で検討したものが、大きめの予測値となる傾向がある。

表 1.4.1-16　疲労検討結果一覧

建物	J-1				H-4		E-2	
地震動	AIC003-SD		AIC003-AV		AIC003-SD	AIC003-AV	AIC003-SD	AIC003-AV
ダンパー	UD50×4	UD45×4	UD50×4	UD45×4	UD45×4		70φR285(L)	
最大変位(cm)	49.1		26.3		33.9	21.2	25.3	13.3
累積吸収エネルギー量(kNm/台)	4414	3262	1788	1418	4016	1416	1285	558
疲労検討								
a.マイナー則(4.1.4.1-3.4)式	0.314	0.403	0.119	0.136	0.227	0.079	-	-
b.マイナー則(4.1.4.1-3.1)or（5）式	0.354	0.596	0.154	0.268	0.383	0.18	0.389	0.219
c.累積吸収エネルギー評価	0.377	0.536	0.133	0.207	0.304	0.098	0.171	0.051

建物	J-1				H-4		E-2	
地震動	OSHK02-SD		OSHK02-AV		OSKH02-SD	OSKH02-AV	OSKH02-SD	OSKH02-AV
ダンパー	UD50×4	UD45×4	UD50×4	UD45×4	UD45×4		70φR285(L)	
最大変位(cm)	41.8		17.4		17.8	9.4	14.0	8.7
累積吸収エネルギー量(kNm/台)	3106	2463	953	756	1919	433	381	136
疲労検討								
a.マイナー則(4)式	0.219	0.281	0.056	0.281	0.098	0.025	-	-
b.マイナー則(1)or（5）式	0.244	0.413	0.089	0.158	0.191	0.091	0.389	0.219
c.累積吸収エネルギー評価	0.249	0.412	0.065	0.101	0.13	0.028	0.035	0.011

また、地震終了後のダンパーの疲労による 1 サイクルのエネルギー吸収性能の低下を検討する。図 1.4.1-39 に NSUD50×4 に対して振幅±30cm、A 方向の繰り返し加力を行った実験におけるエネルギー吸収性能の変化を示す。建物 J-1 の地震動 AIC003-sd に対する NSUD50×4 のダンパー1 台の累積エネルギー吸収量は 4414kN･m であり、図 1.4.1-39 からこの累積吸収エネルギーに相当する 17 サイクル目で 1 サイクルのエネルギー吸収量を比較するとバイリニアモデルの 248kN･m に対して実験値は 232kN･m で 94%に低下している。

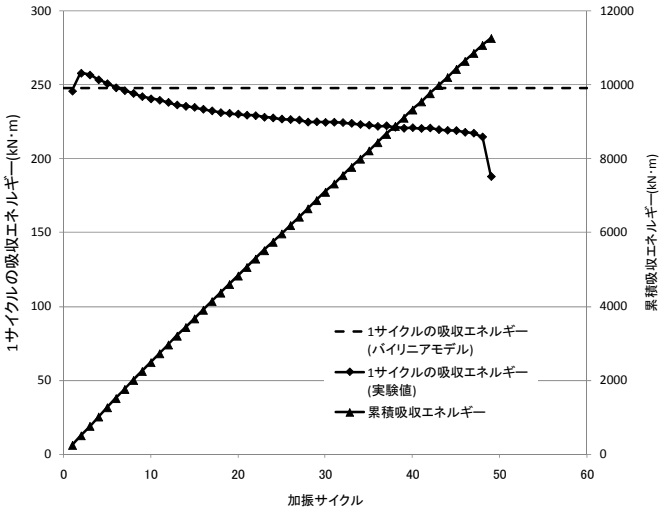


図 1.4.1-39　サイクル毎の吸収エネルギー
(NSUD50×4、振幅±30cm、A 方向加力)

表 1.4.1-17　累積疲労損傷度の計算例(1)

建物記号　J-1　　地震動　AIC003-sd　　ダンパー　UD50×4

全振幅区間中央値(cm)	頻度(回)	(4)式 破断回数(回)	(4)式 D値	(1)式 破断回数(回)	(1)式 D値
0.5	213	1.36 E+09	1.56176E-07	36966	0.0058
1.5	76	982172	7.73795E-05	8270	0.0092
2.5	56	52566	0.0011	4122	0.0136
3.5	42	12354	0.0034	2606	0.0161
4.5	20	5340	0.0037	1850	0.0108
5.5	12	3051	0.0039	1407	0.0085
6.5	2	2017	0.0010	1121	0.0018
7.5	3	1459	0.0021	922	0.0033
8.5	5	1122	0.0045	777	0.0064
9.5	3	898	0.0033	668	0.0045
10.5	1	740	0.0014	583	0.0017
11.5	1	625	0.0016	515	0.0019
12.5	2	538	0.0037	460	0.0044
13.5		470	0.0000	414	0.0000
14.5	2	416	0.0048	375	0.0053
15.5		372	0.0000	343	0.0000
16.5	1	335	0.0030	315	0.0032
17.5	1	304	0.0033	291	0.0034
18.5	1	278	0.0036	269	0.0037
19.5		255	0.0000	251	0.0000
20.5	2	236	0.0085	234	0.0085
21.5		219	0.0000	219	0.0000
22.5		204	0.0000	206	0.0000
23.5	1	191	0.0052	194	0.0051
24.5	2	179	0.0111	184	0.0109
25.5	2	169	0.0118	174	0.0115
26.5		159	0.0000	165	0.0000
27.5		151	0.0000	157	0.0000
28.5	1	143	0.0070	149	0.0067
29.5		136	0.0000	143	0.0000
30.5		129	0.0000	136	0.0000
31.5	1	123	0.0081	130	0.0077
32.5	1	118	0.0085	125	0.0080
33.5		113	0.0000	120	0.0000
34.5	1	108	0.0093	115	0.0087
35.5		103	0.0000	111	0.0000
36.5		100	0.0000	107	0.0000
37.5		96	0.0000	103	0.0000
38.5	1	92	0.0108	99	0.0101
39.5		89	0.0000	96	0.0000
40.5		86	0.0000	93	0.0000
41.5		83	0.0000	90	0.0000
42.5		80	0.0000	87	0.0000
43.5		78	0.0000	84	0.0000
44.5		75	0.0000	81	0.0000
45.5		73	0.0000	79	0.0000
46.5		71	0.0000	77	0.0000
47.5		69	0.0000	75	0.0000
48.5	1	67	0.0150	72	0.0138
49.5		65	0.0000	70	0.0000
50.5		63	0.0000	69	0.0000
51.5		61	0.0000	67	0.0000
52.5	1	60	0.0168	65	0.0154
53.5		58	0.0000	63	0.0000
54.5		57	0.0000	62	0.0000
55.5		55	0.0000	60	0.0000
56.5	1	54	0.0186	59	0.0170
57.5		53	0.0000	57	0.0000
58.5		51	0.0000	56	0.0000
59.5	1	50	0.0199	55	0.0182
60.5		49	0.0000	54	0.0000
61.5		48	0.0000	52	0.0000
62.5		47	0.0000	51	0.0000
63.5		46	0.0000	50	0.0000
64.5		45	0.0000	49	0.0000
65.5		44	0.0000	48	0.0000
66.5	1	43	0.0232	47	0.0212
67.5		42	0.0000	46	0.0000
68.5		41	0.0000	45	0.0000
69.5		41	0.0000	44	0.0000
70.5		40	0.0000	43	0.0000
71.5		39	0.0000	43	0.0000
72.5		38	0.0000	42	0.0000
73.5		38	0.0000	41	0.0000
74.5		37	0.0000	40	0.0000
75.5		36	0.0000	40	0.0000
76.5		36	0.0000	39	0.0000
77.5	1	35	0.0286	38	0.0262
78.5		34	0.0000	38	0.0000
79.5		34	0.0000	37	0.0000
80.5		33	0.0000	36	0.0000
81.5		33	0.0000	36	0.0000
82.5		32	0.0000	35	0.0000
83.5	1	32	0.0316	35	0.0290
84.5		31	0.0000	34	0.0000
85.5		31	0.0000	33	0.0000
86.5		30	0.0000	33	0.0000
87.5		30	0.0000	32	0.0000
88.5		29	0.0000	32	0.0000
89.5		29	0.0000	31	0.0000
90.5		28	0.0000	31	0.0000
91.5	1	28	0.0357	30	0.0328
92.5		28	0.0000	30	0.0000
		D値合計	0.3143	D値合計	0.3544

応答変位
最大値　49.1cm
最小値　−42.9cm

マイナー則によるD値　(4)式　0.3143
(1)式　0.3544

ダンパー吸収エネルギー (A)　4414 kNm/台
最大変位での破断に至るエネルギー (B)　11816 kNm/台
(A)/(B)　0.3736

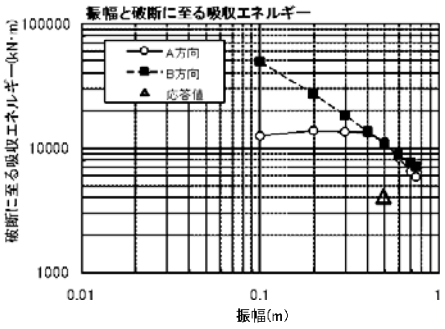


表 1.4.1-18　累積疲労損傷度の計算例(2)

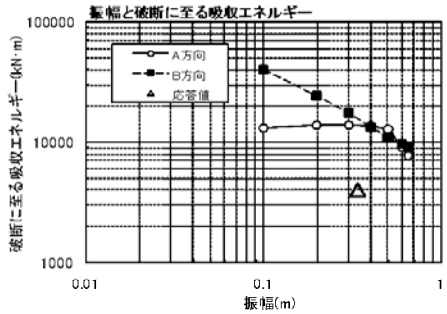
建物記号　H-4　　地震動　AIC003-sd　　ダンパー　UD45×4

全振幅 区間中央値 (cm)	頻度 (回)	(4)式 破断回数 (回)	(4)式 D値	(5)式 破断回数 (回)	(5)式 D値
0.5	613	4.54 E+08	1.35E-06	18146	0.0338
1.5	158	353857	0.000447	4284	0.0369
2.5	24	24527	0.0010	2189	0.0110
3.5	11	6994	0.0016	1407	0.0078
4.5	9	3353	0.0027	1011	0.0089
5.5	1	2026	0.0005	777	0.0013
6.5	5	1392	0.0036	624	0.0080
7.5	1	1034	0.0010	517	0.0019
8.5	3	808	0.0037	438	0.0068
9.5	2	655	0.0031	379	0.0053
10.5	1	547	0.0018	332	0.0030
11.5	1	467	0.0021	295	0.0034
12.5	1	404	0.0025	264	0.0038
13.5		355	0.0000	239	0.0000
14.5	2	316	0.0063	217	0.0092
15.5	2	283	0.0071	199	0.0100
16.5		257	0.0000	183	0.0000
17.5		233	0.0000	170	0.0000
18.5		214	0.0000	158	0.0000
19.5	1	197	0.0051	147	0.0068
20.5	2	183	0.0109	138	0.0145
21.5	2	170	0.0118	130	0.0154
22.5	1	159	0.0063	122	0.0082
23.5		149	0.0000	115	0.0000
24.5		140	0.0000	109	0.0000
25.5		132	0.0000	104	0.0000
26.5		125	0.0000	98	0.0000
27.5	2	118	0.0169	94	0.0213
28.5		112	0.0000	89	0.0000
29.5	1	106	0.0094	85	0.0117
30.5		102	0.0000	82	0.0000
31.5		97	0.0000	78	0.0000
32.5	1	93	0.0108	75	0.0133
33.5		89	0.0000	72	0.0000
34.5		85	0.0000	70	0.0000
35.5		82	0.0000	67	0.0000
36.5	1	79	0.0127	65	0.0155
37.5		76	0.0000	62	0.0000
38.5		73	0.0000	60	0.0000
39.5		70	0.0000	58	0.0000
40.5		68	0.0000	56	0.0000
41.5		66	0.0000	55	0.0000
42.5	1	63	0.0157	53	0.0189
43.5		62	0.0000	51	0.0000
44.5		60	0.0000	50	0.0000
45.5		58	0.0000	48	0.0000
46.5	1	56	0.0178	47	0.0213
47.5		54	0.0000	46	0.0000
48.5		53	0.0000	44	0.0000
49.5		51	0.0000	43	0.0000
50.5	1	50	0.0200	42	0.0237
51.5		49	0.0000	41	0.0000
52.5		47	0.0000	40	0.0000
53.5		46	0.0000	39	0.0000
54.5		45	0.0000	38	0.0000
55.5	1	44	0.0227	37	0.0268
56.5		43	0.0000	36	0.0000
57.5		42	0.0000	36	0.0000
58.5		41	0.0000	35	0.0000
59.5		40	0.0000	34	0.0000
60.5		39	0.0000	33	0.0000
61.5		38	0.0000	33	0.0000
62.5		37	0.0000	32	0.0000
63.5		37	0.0000	31	0.0000
64.5		36	0.0000	31	0.0000
65.5		35	0.0000	30	0.0000
66.5		34	0.0000	29	0.0000
67.5	1	34	0.0296	29	0.0347
68.5		33	0.0000	28	0.0000
		D値合計	0.2272	D値合計	0.3833

応答変位
最大値　33.3cm
最小値　-33.9cm

マイナー則によるD値　(4)式　0.2272
(5)式　0.3833

ダンパー吸収エネルギー(A)　4016　kNm/台
最大変位での破断に至るエネルギー(B)　13224　kNm/台
(A)/(B)　0.3037



1.4.1-4　鉛ダンパー

(1)　目的

免震用鉛ダンパーの長周期地震時の健全性を検討する。

(2)　地震動及び建物モデル

E-2（T-TN-AIC003-AV、T-TN-AIC003-SD）

H-4（T-TN-AIC003-AV、T-TN-AIC003-SD）

(3)　全振幅頻度分布

上記地震動の変位応答波形に対して、東京測器研究所製 FET 解析ソフトウェア DFA-7610 によるレインフロー法でカウントした全振幅頻度分布を図 1.4.1-40 に示す。解析条件はフルスケールを 800mm、スライス数を 200（4mm 刻み）とした。また、全振幅 1μm 未満は無効振幅として取り扱った。図 1.4.1-41 に全振幅の累積頻度分布を示す。これによるといずれのケースも全振幅区間 50mm 程度までの頻度が多い。

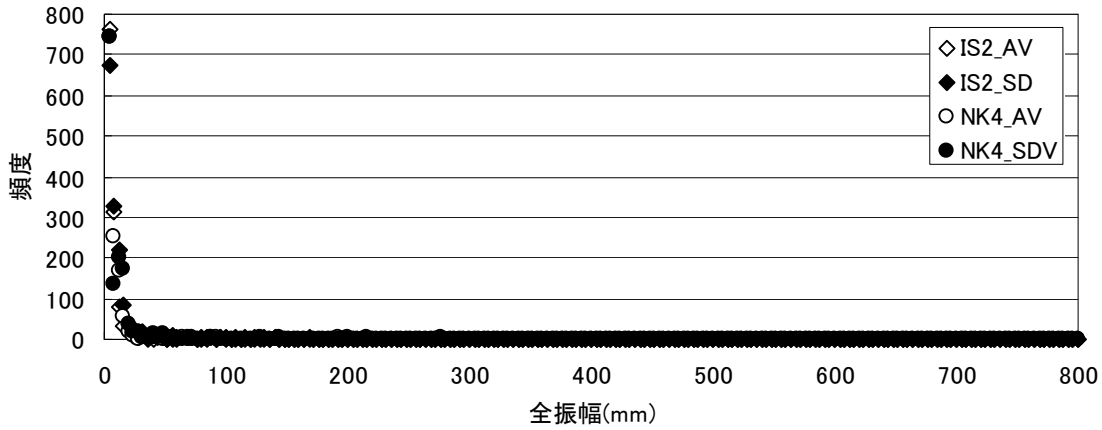


図 1.4.1-40　全振幅頻度分布

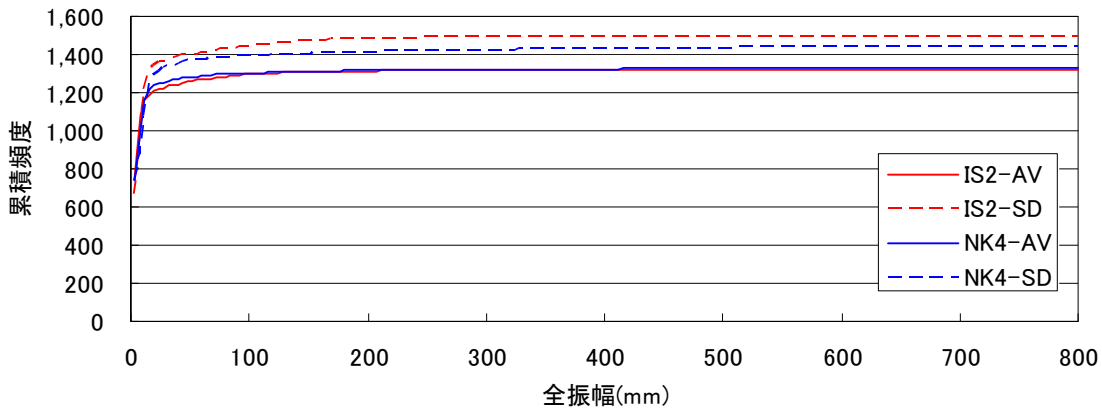


図 1.4.1-41　全振幅の累積頻度分布

(4)　鉛ダンパーの破断時繰り返し回数

鉛ダンパーの一定振幅連続加振時の振幅（片振幅）と破断時繰り返し回数の関係を図 1.4.1-42 に示す。これによると、鉛ダンパーの破断時繰り返し回数はダンパー種類に関わらず以下の式で表現できる。

$$Nd=8.84\times10^{5}\,\delta^{-1.74}=8.84\times10^{5}(\Delta/2)^{-1.74} \qquad (1.4.1\text{-}16)$$

ここに、

Nd：破断時繰り返し回数、 δ ：片振幅(mm)、 Δ ：全振幅(mm)

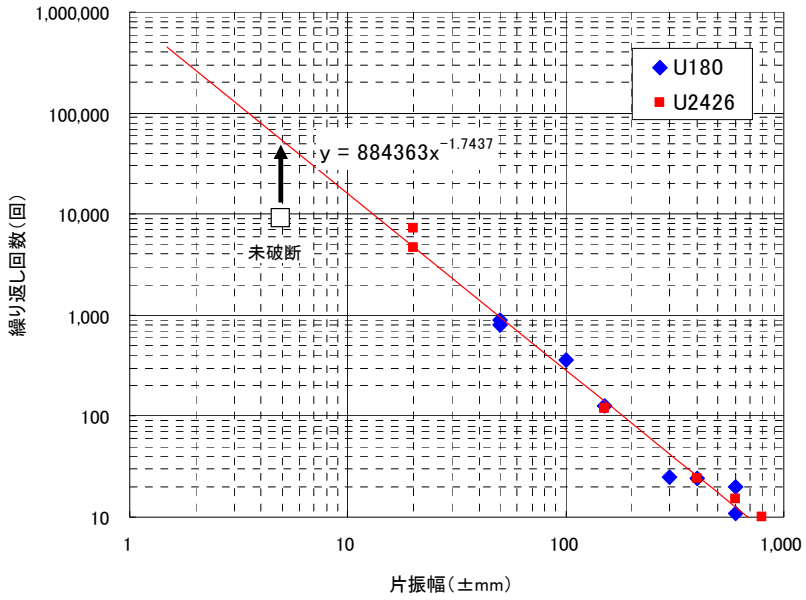


図 1.4.1-42　鉛ダンパーの振幅と破断時繰り返し回数の関係

本疲労曲線は±20～800mm（全振幅 40～1600mm）での実験結果より求めたものであるので、±20mm 未満（全振幅 40mm 未満）での破断に到る回数は本疲労曲線を外挿することにより求めることとする。

(5)　累積疲労損傷度の検討

各振幅における頻度、式(1.4.1-16)から求められる破断時繰り返し回数、および疲労損傷度を表 1.4.1-19 に示す。なお、レインフロー法では半周期で 1 回とカウントしているため、各振幅における疲労損傷度 Di は次のように求めた。

$$Di = ni / 2Ni$$

Di：各振幅における疲労損傷度

ni：頻度データから求めた繰り返し回数

Ni：疲労曲線から求めた破断までの繰り返し回数

表 1.4.1-19 によると、各ケースにおける累積疲労損傷度 ΣDi は 0.046～0.183 となった。

表 1.1.4-19　累積疲労損傷度

全振幅	破断に	E-2				H-4				全振幅	破断に	E-2				H-4			
区間中央値	到る回数	頻度		疲労損傷度Di		頻度		疲労損傷度Di		区間中央値	到る回数	頻度		疲労損傷度Di		頻度		疲労損傷度Di	
Δ	Nd	AV	SD	AV	SD	AV	SD	AV	SD	Δ	Nd	AV	SD	AV	SD	AV	SD	AV	SD
(mm)	(回)	(回)	(回)			(回)	(回)			(mm)	(回)	(回)	(回)			(回)	(回)		
2	884,000	761	675	0.0004	0.0004	743	744	0.0004	0.0004	402	87	0	0	0	0	1	0	0.0058	0
6	130,696	315	327	0.0012	0.0013	254	134	0.001	0.0005	406	85	0	0	0	0	0	0	0	0
10	53,733	81	221	0.0008	0.0021	167	200	0.0016	0.0019	410	84	0	0	0	0	0	1	0	0.006
14	29,921	34	86	0.0006	0.0014	58	173	0.001	0.0029	414	83	0	0	0	0	1	0	0.0061	0
18	19,323	20	36	0.0005	0.0009	20	37	0.0005	0.001	418	81	0	0	0	0	0	0	0	0
22	13,628	10	13	0.0004	0.0005	11	21	0.0004	0.0008	422	80	0	0	0	0	0	0	0	0
26	10,190	4	4	0.0002	0.0002	2	20	1E−04	0.001	426	79	0	0	0	0	0	2	0	0.0127
30	7,944	18	12	0.0011	0.0008	7	7	0.0004	0.0004	430	77	0	0	0	0	0	0	0	0
34	6,390	0	6	0	0.0005	5	4	0.0004	0.0003	434	76	0	0	0	0	0	0	0	0
38	5,265	2	8	0.0002	0.0008	5	15	0.0005	0.0014	438	75	0	0	0	0	0	1	0	0.0067
42	4,424	7	8	0.0008	0.0009	6	4	0.0007	0.0005	442	74	0	0	0	0	0	0	0	0
46	3,776	5	7	0.0007	0.0009	2	12	0.0003	0.0016	446	73	0	1	0	0.0069	0	0	0	0
50	3,266	0	0	0	0	2	0	0.0003	0	450	71	0	0	0	0	0	0	0	0
54	2,857	9	2	0.0016	0.0004	3	3	0.0005	0.0005	454	70	0	0	0	0	0	0	0	0
58	2,523	2	5	0.0004	0.001	2	1	0.0004	0.0002	458	69	0	0	0	0	0	0	0	0
62	2,246	3	3	0.0007	0.0007	4	0	0.0009	0	462	68	0	1	0	0.0073	0	1	0	0.0073
66	2,015	4	4	0.001	0.001	0	6	0	0.0015	466	67	0	0	0	0	0	0	0	0
70	1,819	3	7	0.0008	0.0019	5	2	0.0014	0.0005	470	66	0	0	0	0	0	0	0	0
74	1,651	0	2	0	0.0006	0	1	0	0.0003	474	65	0	0	0	0	0	0	0	0
78	1,507	2	4	0.0007	0.0013	0	0	0	0	478	64	0	0	0	0	0	0	0	0
82	1,381	6	2	0.0022	0.0007	0	0	0	0	482	63	0	0	0	0	0	0	0	0
86	1,271	5	3	0.002	0.0012	4	6	0.0016	0.0024	486	62	0	0	0	0	0	0	0	0
90	1,175	0	2	0	0.0009	4	2	0.0017	0.0009	490	62	0	0	0	0	0	0	0	0
94	1,089	5	4	0.0023	0.0018	0	1	0	0.0005	494	61	0	0	0	0	0	0	0	0
98	1,013	1	4	0.0005	0.002	0	0	0	0	498	60	0	0	0	0	0	0	0	0
102	945	0	0	0	0	1	2	0.0005	0.0011	502	59	0	0	0	0	0	1	0	0.0085
106	884	2	4	0.0011	0.0023	0	0	0	0	506	58	0	0	0	0	0	0	0	0
110	828	0	0	0	0	0	0	0	0	510	57	0	0	0	0	0	2	0	0.0174
114	778	4	2	0.0026	0.0013	2	0	0.0013	0	514	57	0	0	0	0	0	0	0	0
118	733	0	2	0	0.0014	0	2	0	0.0014	518	56	0	0	0	0	0	0	0	0
122	692	2	3	0.0014	0.0022	0	0	0	0	522	55	0	0	0	0	0	0	0	0
126	654	2	6	0.0015	0.0046	1	3	0.0008	0.0023	526	54	0	0	0	0	0	0	0	0
130	619	3	0	0.0024	0	1	0	0.0008	0	530	54	0	0	0	0	0	0	0	0
134	588	0	2	0	0.0017	2	0	0.0017	0	534	53	0	0	0	0	0	0	0	0
138	558	3	5	0.0027	0.0045	0	0	0	0	538	52	0	0	0	0	0	0	0	0
142	531	0	1	0	0.0009	0	4	0	0.0038	542	52	0	0	0	0	0	0	0	0
146	506	0	2	0	0.002	0	0	0	0	546	51	0	0	0	0	0	0	0	0
150	483	1	0	0.001	0	0	0	0	0	550	50	0	0	0	0	0	0	0	0
154	461	0	0	0	0	0	2	0	0.0022	554	50	0	0	0	0	0	0	0	0
158	441	0	0	0	0	2	2	0.0023	0.0023	558	49	0	0	0	0	0	1	0	0.0102
162	422	0	0	0	0	0	0	0	0	562	48	0	0	0	0	0	0	0	0
166	405	0	5	0	0.0062	0	0	0	0	566	48	0	0	0	0	0	0	0	0
170	388	0	0	0	0	0	0	0	0	570	47	0	0	0	0	0	0	0	0
174	373	0	0	0	0	1	0	0.0013	0	574	47	0	0	0	0	0	0	0	0
178	359	0	0	0	0	2	0	0.0028	0	578	46	0	0	0	0	0	0	0	0
182	345	0	2	0	0.0029	0	0	0	0	582	46	0	0	0	0	0	0	0	0
186	332	0	0	0	0	0	0	0	0	586	45	0	0	0	0	0	0	0	0
190	320	0	0	0	0	4	0	0.0062	0	590	45	0	0	0	0	0	0	0	0
194	309	0	0	0	0	0	0	0	0	594	44	0	0	0	0	0	0	0	0
198	298	1	2	0.0017	0.0034	0	3	0	0.005	598	44	0	0	0	0	0	0	0	0
202	288	0	1	0	0.0017	0	0	0	0	602	43	0	0	0	0	0	0	0	0
206	278	0	0	0	0	0	2	0	0.0036	606	43	0	0	0	0	0	0	0	0
210	269	1	0	0.0019	0	0	2	0	0.0037	610	42	0	0	0	0	0	0	0	0
214	260	1	0	0.0019	0	0	4	0	0.0077	614	42	0	0	0	0	0	0	0	0
218	252	0	2	0	0.004	0	0	0	0	618	41	0	0	0	0	0	0	0	0
222	244	1	0	0.002	0	0	1	0	0.002	622	41	0	0	0	0	0	0	0	0
226	237	2	0	0.0042	0	0	0	0	0	626	40	0	0	0	0	0	0	0	0
230	230	0	0	0	0	0	0	0	0	630	40	0	0	0	0	0	0	0	0
234	223	0	1	0	0.0022	0	0	0	0	634	39	0	0	0	0	0	0	0	0
238	216	0	0	0	0	0	0	0	0	638	39	0	0	0	0	0	1	0	0.0129
242	210	0	0	0	0	0	0	0	0	642	38	0	0	0	0	0	0	0	0
246	204	0	1	0	0.0024	0	0	0	0	646	38	0	0	0	0	0	0	0	0
250	199	0	0	0	0	0	0	0	0	650	38	0	0	0	0	0	0	0	0
254	193	0	0	0	0	0	0	0	0	654	37	0	0	0	0	0	0	0	0
258	188	0	0	0	0	0	0	0	0	658	37	0	0	0	0	0	0	0	0
262	183	1	0	0.0027	0	0	0	0	0	662	36	0	0	0	0	0	0	0	0
266	178	0	0	0	0	0	0	0	0	666	36	0	0	0	0	0	0	0	0
270	174	0	0	0	0	2	0	0.0058	0	670	36	0	0	0	0	0	0	0	0
274	169	0	1	0	0.003	0	3	0	0.0089	674	35	0	0	0	0	0	1	0	0.0141
278	165	0	0	0	0	0	2	0	0.0061	678	35	0	0	0	0	0	0	0	0
282	161	0	0	0	0	0	0	0	0	682	35	0	0	0	0	0	0	0	0
286	157	0	0	0	0	0	0	0	0	686	34	0	0	0	0	0	0	0	0
290	153	0	0	0	0	0	0	0	0	690	34	0	0	0	0	0	0	0	0
294	150	0	0	0	0	0	0	0	0	694	34	0	0	0	0	0	0	0	0
298	146	0	0	0	0	0	0	0	0	698	33	0	0	0	0	0	0	0	0
302	143	0	0	0	0	1	0	0.0035	0	702	33	0	0	0	0	0	0	0	0
306	140	0	0	0	0	0	0	0	0	706	33	0	0	0	0	0	0	0	0
310	137	0	0	0	0	0	0	0	0	710	32	0	0	0	0	0	0	0	0
314	134	0	1	0	0.0037	0	0	0	0	714	32	0	0	0	0	0	0	0	0
318	131	0	0	0	0	0	0	0	0	718	32	0	0	0	0	0	0	0	0
322	128	0	0	0	0	0	0	0	0	722	31	0	0	0	0	0	0	0	0
326	125	0	0	0	0	0	2	0	0.008	726	31	0	0	0	0	0	0	0	0
330	122	0	0	0	0	0	0	0	0	730	31	0	0	0	0	0	0	0	0
334	120	0	0	0	0	1	0	0.0042	0	734	30	0	0	0	0	0	0	0	0
338	117	0	0	0	0	0	0	0	0	738	30	0	0	0	0	0	0	0	0
342	115	0	0	0	0	0	0	0	0	742	30	0	0	0	0	0	0	0	0
346	113	0	2	0	0.0089	0	0	0	0	746	30	0	0	0	0	0	0	0	0
350	111	0	0	0	0	0	0	0	0	750	29	0	0	0	0	0	0	0	0
354	108	0	0	0	0	0	0	0	0	754	29	0	0	0	0	0	0	0	0
358	106	0	0	0	0	0	0	0	0	758	29	0	0	0	0	0	0	0	0
362	104	0	0	0	0	0	0	0	0	762	29	0	0	0	0	0	0	0	0
366	102	0	0	0	0	0	2	0	0.0098	766	28	0	0	0	0	0	0	0	0
370	100	0	1	0	0.005	0	0	0	0	770	28	0	0	0	0	0	0	0	0
374	99	0	0	0	0	0	0	0	0	774	28	0	0	0	0	0	0	0	0
378	97	0	0	0	0	0	0	0	0	778	28	0	0	0	0	0	0	0	0
382	95	0	0	0	0	0	0	0	0	782	27	0	0	0	0	0	0	0	0
386	93	0	0	0	0	0	0	0	0	786	27	0	0	0	0	0	0	0	0
390	92	0	0	0	0	0	0	0	0	790	27	0	0	0	0	0	0	0	0
394	90	0	0	0	0	0	0	0	0	794	27	0	0	0	0	0	0	0	0
398	88	0	0	0	0	0	0	0	0	798	26	0	0	0	0	0	0	0	0
累積疲労損傷度Σ Di														0.046	0.102			0.057	0.183

(6)　温度上昇検討

各ケースにおける累積変形量、吸収エネルギー量、上昇温度を表 1.4.1-20 に示す。
尚、上昇温度は以下のように算出した。

⊿T＝ｑ／ｍｃ＝Qd×δｔ／ｍｃ

ここに、

δｔ：累積塑性変形量、⊿T：上昇温度、ｑ：吸収エネルギー量、

Qd：鉛ダンパーの降伏荷重

ｍ：鉛鋳造体重量（U180:410kg、U2426:740kg）、ｃ：鉛の比熱（129J/(kg･K)）

吸収エネルギーが全て熱に変換された場合でも、最大約 35℃温度上昇する程度である。外気温を 30℃に仮定しても鉛の融点 327℃に比べて遥かに低い温度に収まり、鉛が融解することはない。実際には本体からの放熱等により上昇温度はさらに小さい値になると思われる。

表 1.4.1-20　温度上昇検討結果

項目	E-2		H-4	
	AV	SD	AV	SD
累積塑性変形量　δt（m）	11.8	20.41	6.18	14.99
降伏荷重　Qd（kN）	90	90	220	220
吸収エネルギー　q（kN･m）	1,062	1,837	1,360	3,298
鉛重量　m（kg）	410	410	740	740
上昇温度　⊿T（℃）	20.1	34.7	14.2	34.5

(7)　繰り返し回数による減衰性能の変化

図 1.4.1-43 に周期 0.33Hz、変位±150mm 正弦波繰り返し加振を行った時の各サイクルのエネルギー吸収量の変化を示す。

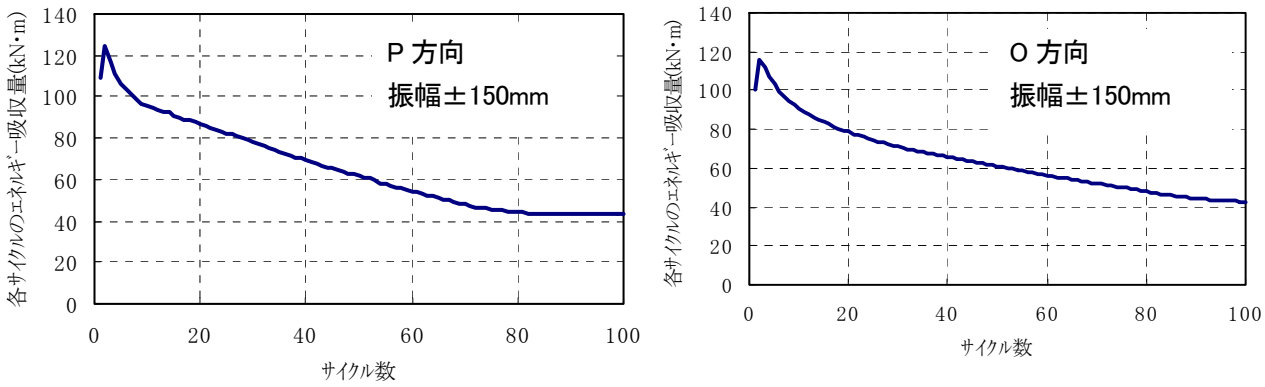


図 1.4.1-43 エネルギー吸収量の繰り返し回数依存性(U2426 型、振幅±150mm)

建物 H-4 の地震波 SD では累積塑性変形量が 14.99m であり、±150mm の振幅では 25 サイクルに相当する。鉛ダンパーの繰り返し回数に対する減衰性能の変化を 3 サイクル目に対する 25 サイクル目のエネルギー吸収量で推定すると下表のようになる。

表 1.4.1-21　繰り返し回数によるエネルギー吸収性能の比較

方向	1サイクルエネルギー吸収量(kN･m)		比率
	3サイクル目$W_1(3)$	25サイクル目$W_1(25)$	$W_1(25)/W1(3)$
P方向	117.1	82.5	0.70
O方向	111.6	74.4	0.67
平均	114.4	78.5	0.69

(8)　まとめ

地震応答解析結果に対する鉛ダンパーの疲労検討結果一覧を表 1.4.1-22 に示す。

長周期地震時の鉛ダンパーの累積損傷度および温度上昇を検討した。累積疲労損傷度は 0.046～0.183、鉛鋳造体温度は 14～35℃程度の上昇であり、健全性には問題ないといえる。

なお､鉛ダンパーの耐力低下を考慮すると免震層の変形は大きくなる可能性がある。例えば、鋼材ダンパーと鉛ダンパーを併用した場合、鉛ダンパーの耐力低下は 30%程度なので鋼材ダンパーと併用されると、低下率は 15%程度となる。性能変動解析では、ばらつき考慮の検討でこの程度の耐力低下の検討をしているが、10～20%程度応答変位が大きくなると予想される。

表 1.4.1-22　疲労検討結果一覧

建物	E-2				H-4			
ダンパー	U180				U2426			
ダンパーの降伏荷重Qd（kN)	90				220			
鉛重量(kg)	410				740			
地震動	OSKH02-AV	OSKH02-SD	AIC003-AV	AIC003-SD	OSKH02-SD	OSKH02-AV	AIC003-SD	AIC003-AV
最大変位(m)	0.09	0.14	0.13	0.25	0.09	0.18	0.21	0.34
累積塑性変形量δt（m）	2.51	5.2	6.46	11.65	3.06	8.23	6.18	14.99
累積吸収エネルギー量(kNm/台)	221.3	461.2	575	1038.9	672.1	1811.1	1359.6	3296.9
疲労検討 マイナー則			0.046	0.102			0.057	0.183
上昇温度	4.2	8.7	10.9	19.6	7.1	19.2	14.2	34.5

1.4.1-5　オイルダンパー

オイルダンパーは、温度上昇や繰り返し回数によって、エネルギー吸収性能は変化しないことは知られている。しかし、単位時間当たりの入力熱量がオイルダンパーの熱容量を超え、外壁温度が上昇していくと作動油の滲み出しが生じるという知見があるので、時刻歴応答で入力エネルギーを算出し温度上昇予測式を用いて外壁温度が許容値以下に入ることを確認している[1.4.1-13)]。

設計限界温度は、タンク室の油量には余裕があるので直ちに減衰低下は生じないため、現状は余裕を見て外壁温度 80℃（ﾒｰｶの一例）を許容値としている。また、パッキンについては熱劣化試験を行い温度と寿命の関係データから安全を確認している[1.4.1-14)]。

(1)　温度上昇の一般式

温度測定を対象とするオイルダンパーの温度は表面温度とし，その温度分布は常に一様とする．温度上昇の一般式に用いる代表的な記号を次のように定める。

t	:	温度	[℃]
t_a	:	周囲温度	[℃]
t_i	:	初期温度	[℃]
V	:	体積	[m^3]
F	:	表面積	[m^2]
ρ	:	密度	[kg/m^3]
C_P	:	比熱	[kJ / (kg・℃)]
C	:	熱容量 $=V\rho C_p$	[kJ / ℃]
U	:	熱伝達係数	[kJ / (m^2・h・℃)]
K	:	放熱係数 $=UF$	[kJ / (h・℃)]
Q	:	発熱量	[kJ /h]
τ	:	経過時間	[h]

微小時間 $d\tau$ に対象物の温度が dt だけ上がったとすると，この時間内の発熱量 $Q\cdot d\tau$ から放熱量 $U\ (t\ -\ t_a)\cdot F\cdot d\tau$ を差引いた残りが、dt なる温度上昇に預かった発熱量と考えられることから、次式が成り立つ。

$$Cdt = Qd\tau - U\left(t - t_a\right)Fd\tau \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (1.4.1\text{-}17)$$

オイルダンパーの減衰力を F_d[kN]、入力速度を $\dot{x}$ [m/s]とすると、微小時間 $d\tau$ に生じる減衰エネルギーE_d[kN・m](= [kJ]) は

$$E_d = \int F_d \dot{x}\cdot d\tau \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (1.4.1\text{-}18)$$

となる。減衰エネルギーE_dがすべて熱エネルギーに変換されるものとすると、発熱量 Q は次式となる。

$$Q = E_d \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \text{(1.4.1-19)}$$

すなわちオイルダンパーの温度 t は、式(1.4.1-18)、(1.4.1-19)を用いて式(1.4.1-16)の微分方程式を逐次数値積分することで温度上昇の時刻歴が得られる。あるいは、式(1.4.1-16)を初期条件 $d\tau=0$、$t=ti$ として微分方程式を解くと、温度 t は次式が得られる。（定常振幅における温度上昇）

$$t = \frac{Q}{K} + t_a - \left\{\frac{Q}{K} - \left(t_i - t_a\right)\right\}\exp\left(-\frac{K}{C}\tau\right) \quad \cdots\cdots\cdots \text{(1.4.1-20)}$$

最終的に到達する温度t_∞は、式(1.4.1-20)に$\tau = \infty$とすると次式となる。

$$t_\infty = Q/K + t_a \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \text{(1.4.1-21)}$$

所定の温度 t になるまでの時間は式(1.4.1-20)を変形して、

$$\tau = \frac{C}{K}\ln\left(\frac{Q/K - t_i + t_a}{Q/K - t + t_a}\right) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \text{(1.4.1-22)}$$

ここで熱容量 C は $C = V\rho C_p$ として与えられ、体積 V を鉄鋼部品と作動油に分類し、鉄鋼部品の体積を Vs、オイル体積を Vo とする。密度 ρ、比熱比 C_P も上述と同様にして鉄鋼部品の密度を ρ_S、比熱比を Cs とし、またオイル密度を ρ_O、比熱比を Co とする。したがって、熱容量 C は式(1.4.1-23)となる。

$$C = V_S\ \rho_S C_S + V_O\ \rho_O C_O \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \text{(1.4.1-23)}$$

放熱係数は熱伝達係数 U と表面積 F の積 $K = U \cdot F$ で、熱伝達係数 U は式(1.4.1-24)で与えられる。

$$U = \frac{\lambda_{(tm)}}{L} Nu_{m(tm)} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \text{(1.4.1-24)}$$

ここに，λ は熱伝導率，L 代表長さ，Nu_m はヌセルト数である。ヌセルト数 Nu_m を管外面の熱伝達として Hilpert の方法を用いて算出すると平均ヌセルト数 $Nu_{m(tm)}$は代表温度 tm の関数として次式で与えられる。

$$Nu_{m\,(tm)} = k \cdot Re_{(tm)}^{\ n} \cdot Pr_{(tm)}^{\ 1/3} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \text{(1.4.1-25)}$$

$$Pr_{(tm)} = \frac{\nu_{(tm)} \cdot \rho_{(tm)} \cdot C_{p_{(tm)}}}{\lambda_{(tm)}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \text{(1.4.1-26)}$$

$$Re_{(tm)} = \frac{u \cdot d}{\nu_{(tm)}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \text{(1.4.1-27)}$$

$$tm = \left(t + t_a\right)/2 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \text{(1.4.1-28)}$$

ここで Re はレイノルズ数、Pr はプラントル数、 k, n は Hilpert の係数で表 1.4.1-22 を用い

る。 ν は動粘度、Cp は比熱、u は風速、d は管直径(d = 0.31 m)、tm は代表温度である。

表 1.4.1-22　Hilpert の係数

Re	k	n
0.4～4	0.989	0.330
4～40	0.911	0.385
40～4 000	0.683	0.466
4 000～40 000	0.193	0.618
40 000～400 000	0.0266	0.805

(2)　簡略式

地震動は単位時当たりの入力エネルギーに比べ、放熱エネルギーが無視できるほど小さいので、安全側に考えこれを無視すると、式（1.4.1-17）より；

$$T_m = \frac{Q_m}{V_s \rho_s C_s + V_o \rho o Co} + t_a \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (1.4.1\text{-}29)$$

ここで、Ｑｍ：オイルダンパーへの総入力熱量、Ｔｍ：表面温度

式（1.4.1-20）の放熱を考慮した温度上昇と無視した上式の比較の事例として、地震応答解析を実施した建物記号 B-3、地震波 T-TN-AIC003 計算事例の変位応答波を用い、オイルダンパーは下記の標準品とした場合で計算した。

［オイルダンパー（1000ｋＮタイプ　ＢＤＳ1201300)］

表 1.4.1-23 入力パラメータ

鉄鋼部品	体積	V_s	0.0843	[m^3]
	密度	ρ_s	7850	[kg/m^3]
	比熱	C_s	0.465	[kJ/kg・℃]
	表面積	F	2.380	[m^2]
作動油	体積	V_o	0.145	[m^3]
	密度	ρ_o	892	[kg/m^3]
	比熱	C_o	1.821	[kJ/kg・℃]
温度	初期温度	t_i	20	[℃]
	周囲温度	t_a	20	[℃]
風速		u	0	[m/s]

［簡略式計算との比較］

入力熱量：3.107×10^3　ｋＪ

放熱熱量：40ｋ Ｊ
蓄積熱量：2.977×10^{3} ｋ Ｊ
温度上昇比較：放熱考慮の場合（一般式）→25.482℃（外気温度　20℃）
　　無視の場合（簡略式）→25.555℃（同　　）

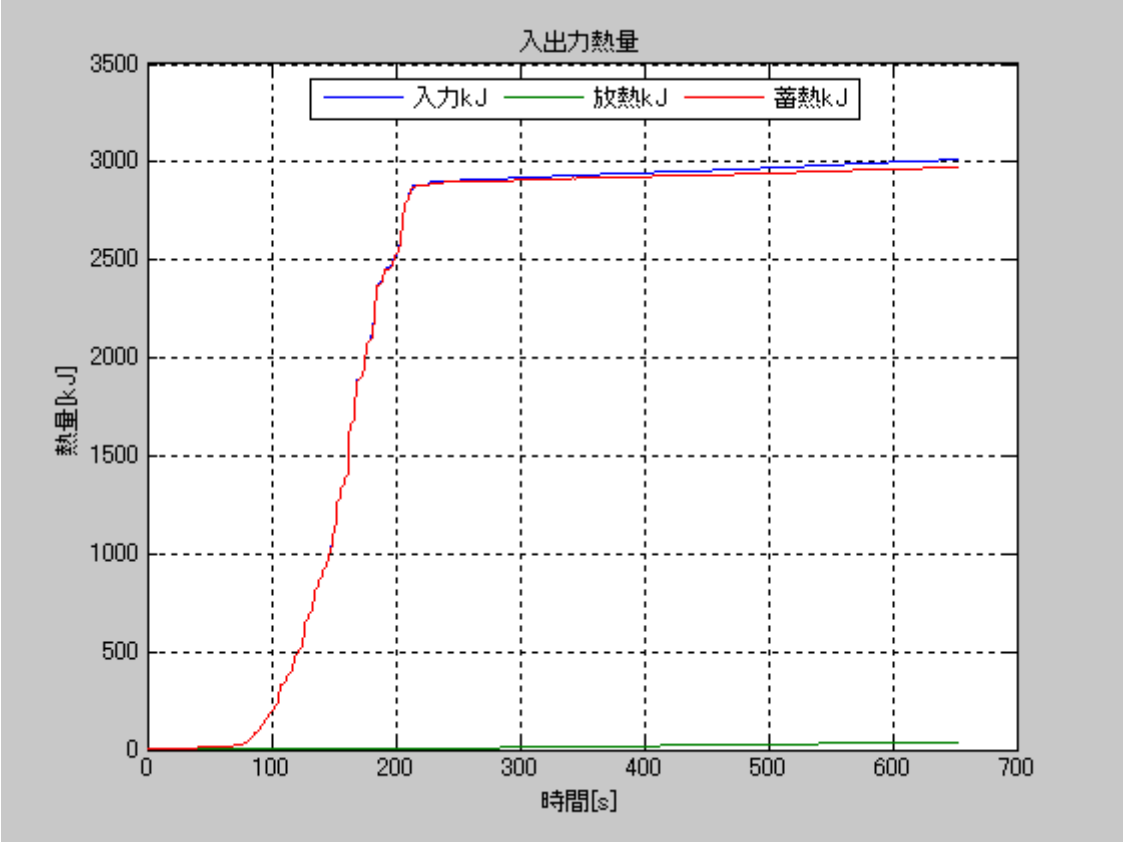


図 1.4.1-44　エネルギー吸収線図

上記のように、エネルギー入力勾配の大きく、継続時間の短い地震動の場合は、放熱が追い付かない。

これが風応答の場合は、エネルギー勾配は小さいが、作用時間の長い場合は、放熱エネルギーが大きくなってくる。しかし、7200 時間で 35530ｋJ の入力の事例では、放熱は 3226ｋJ で 9%弱であるので、あまり期待は出来ない。

特殊の事例で、斜長橋の動吸振器用のオイルダンパーは放熱フィンを持ったものもあり、使用状態に適した製品を選択すべきである。

現状の地震応答のオイルダンパーでは、簡易式で評価しても安全側の考えであり問題ないと考える。

(3)　免震ダンパーパッキンの寿命予測試験データ [1.4.1-14)]

パッキン材の熱劣化試験を行い、温度上昇によるパッキンの寿命低下を推測した計算例を以下に示す。

１．目的

免振ダンパーのパッキンに使用されているＫＵＴ９０１材の使用可能寿命の予測を熱劣化試験の結果を基に行う。予測には「１０℃半減則」を適用する。

「１０℃半減則（温度が 10℃上昇すると寿命時間が半分になる）」は、温度と寿命の関係として経験的に知られており、ゴムの短時間の熱劣化試験から長期間の寿命を推定するのに用いられている。

２．パッキンの使用条件

使用平均温度：３０℃

要求寿命：６０年間

３．使用可能寿命の予測

使用平均温度 30℃×要求寿命 60 年間は、「１０℃半減則」を適用すると、熱劣化試験 150℃×128Hr に相当する（表１）。ＫＵＴ９０１材の熱劣化試験結果（表２）から、150℃×128Hr より長時間の 150℃×168，336Hr で劣化の基準を満足しており、30℃×60 年間の使用可能と推定される。

４．結論

ＫＵＴ９０１材のパッキンの耐熱使用可能寿命（使用平均温度 30℃）は、60 年以上と推定される。

表１　10℃半減則による温度と寿命の関係

温度	寿命
30℃	60 年
60℃	7.5 年
100℃	171 日
120℃	42.8 日（1027 時間）
130℃	513 時間
140℃	257 時間
150℃	128 時間

表２　熱劣化試験結果

熱劣化試験 試験温度 150℃		KUT901			参考　6042（ふっ素ゴム）		
		72Hr	168Hr	336Hr	72Hr	168Hr	336Hr
硬さ変化	ﾎﾟｲﾝﾄ	+2	+3	+4	−1	−1	−1
引張強さ変化率	%	+9	+14	+19	+3	+7	+14
伸び変化率	%	−26	−35	−48	+1.0	+1.0	+1.1

劣化の基準：硬さ変化±15ﾎﾟｲﾝﾄ，引張強さ変化率±30%，伸び変化率−50%（JIS K 6403 より）

(4)　エネルギー吸収性能評価

長周期地震を対象としたオイルダンパーの選定は、入力エネルギーに対応できるオイルダンパーの熱容量を考慮して本数を求めなければならない。

事例として；下記の標準品の場合では

対象ダンパー

形式	：	BDS1201300-B-1
最大減衰力	：	1000 [kN]
最大速度	：	150 [cm/s]
リリーフ速度	：	32 [cm/s]
リリーフ荷重	：	800 [kN]
減衰係数	：	C_1 = 25 [kN / cm/s] , C_2 = 1.695 [kN / cm/s]

このオイルダンパーの熱容量は、表の値を用いて式(1.4.1-23)から計算できる。

本形式のオイルダンパーの設計許容外壁温度80℃とした場合（外気温度20℃、温度上昇60℃）、許容入力エネルギーは約 3.5×10^4 kJ である。

地震応答解析結果に対するオイルダンパーの吸収エネルギーと温度上昇の検討結果一覧を表1.4.1-24 に示す。

検討事例における入力エネルギーの範囲の場合では、外気温度 20℃の時外壁温度は発熱量を考慮しない簡略式で計算しても最大事例（J-1　N-OSHK02-SD 波）で 52℃であった。

よって、温度上昇の計算は不要のように思えるが、従来の標準地震波の場合と比較すると、吸収エネルギーは増加する傾向にある。さらに、他の温度依存及び繰り返し回数依存のあるダンパーと組合せる場合は、オイルダンパーの負担が大きくなることに留意が必要である。

表 1.4.1-24　検討結果一覧

モデル	J-1		B-3	
ダンパー種類	最大減衰力2000kN		最大減衰力1000kN	
	吸収エネルギー (kNm/台)	T (℃)	吸収エネルギー (kNm/台)	T (℃)
N-OSKH02-AV	13,590	26.3	309	20.6
N-OSKH02-SD	34,910	52.1	1,137	22.1
T-TN-AIC003-AV	23,340	30.7	1,063	22.0
T-TN-AIC003-SD	49,650	42.9	3,017	25.6

参考文献

1.4.1-1）本間友規他：大振幅繰返し変形を受ける積層ゴム支承の熱・力学的連成挙動に関する研究（その 13　エネルギーの釣合に基づく応答予測式の導出)、日本建築学会大会学術講演梗概集、2009

1.4.1-2）近藤明洋他：大振幅繰返し変形を受ける積層ゴム支承の熱・力学的連成挙動に関する

研究（その 12　LRB の温度上昇を考慮した免震建物の地震応答性状）、日本建築学会大会学術講演梗概集、2009
1.4.1-3）本間友規：鉛入り積層ゴムの大地震時における熱・力学的連成挙動の解明～エネルギーの釣合に基づく応答予測法～、東京理科大学大学院修士論文 2009
1.4.1-4）竹中康雄他：大振幅繰返し変形を受ける積層ゴム支承の熱・力学的連成挙動に関する研究（その 9　熱伝導解析による実験結果のシミュレーション、その 10　鉛入り積層ゴムにおける鉛温度～降伏応力関係の提案、その 11　LRB の温度上昇を考慮した地震応答解析）、日本建築学会大会学術講演梗概集、2008
1.4.1-5）早川修平他：大振幅繰返し変形を受ける積層ゴム支承の熱・力学的連成挙動に関する研究（その 14　高減衰積層ゴムの各種依存性を考慮した Keq と履歴エネルギーの関係式の提案）、日本建築学会大会学術講演梗概集、2009
1.4.1-6) Ryuichi KOUSAKA, Hironori HAMAZAKI, Nobuo MUROTA and Mineo TAKAYAMA, Experimental Study on Durability of Sliding Bearings under Long Duration Dynamic Loading, The 14th World Conference on Earthquake Engineering, October 12-17, 2008, China
1.4.1-7）高坂隆一、濱崎宏典、高山峯夫、室田伸夫：弾性すべり支承の耐久性能に感ずる実験的研究 その１ 高摩擦タイプの弾性すべり支承の実験結果、日本建築学会大会学術講演梗概集、2007
1.4.1-8）濱崎宏典、高坂隆一、高山峯夫、室田伸夫：弾性すべり支承の耐久性能に感ずる実験的研究 その２ 低摩擦タイプと高摩擦タイプの弾性すべり支承の実験結果、日本建築学会大会学術講演梗概集、2007
1.4.1-9) 吉敷、大河原、山田、和田：免震構造用 U 字形鋼材ダンパーの繰り返し変形性能に関する研究、日本建築学会構造系論文集、第 73 巻、第 624 号、pp.333-340、2008.2
1.4.1-10) 多田秀之、酒井章、ほか 2 名：免震構造に関する実物実験　-その 4　弾塑性バネ型減衰装置についてⅠ- 、日本建築学会大会学術講演梗概集、1984、pp.1493-1494
1.4.1-11) 千輝淳二：伝熱計算法　工学図書、1981
1.4.1-12) T. Honma, A. Kondo, Y. Takenaka and H.Kitamura, Seismic Response Prediction Method Considering Heat-Mechanics Interaction Behavior of Lead Rubber Bearing, Proceeding of Fifth World Conference on Structural Control and Monitoring, July 12-14, 2010, Japan
1.4.1-13) 免震ダンパ温度上昇実験報告、カヤバシステムマシナリー技術資料、1160-21-006、2011
1.4.1-14)　KUT901 材の寿命予測（熱劣化）、カヤバ工業技術資料、R20-67D-E073、2005

1.4.2　エネルギー吸収性能評価のための試験方法の考え方

(1) 試験条件の設定

文献 1.4.2-1)に示されるように、長周期地震動の入力エネルギーの等価速度は 3.0m/s～4.0m/s、累積変形量は 20～30m 程度、最大変形量は 500～600mm 程度と推定されている。

一方、地震応答解析検討結果では、採用している地震動のエネルギースペクトルは、ピーク値が異なる波形もあるが、文献 1.4.2-1)と概ね同程度であり、最大応答変位も 500mm 以下となっている。

また、累積変形量については、最大 46m（I-1　T-TN-AIC003　SD）であり、文献[1.1-1)]より大きい例も見られる。

長周期地震動における試験条件に必要な、変形と繰り返し回数は、免震周期、等価減衰定数を仮定して、地震動のエネルギー時刻歴（入力エネルギーの等価速度）が与えられれば、変位に応じた要求繰り返し回数を算定することが可能である。

地震動の継続時間中における主要なエネルギー吸収の時間を 5%～95%と仮定すると、地震応答解析結果より 80～260 秒の継続時間となる。また、規定変位（免震材料試験を行う際に定められる変位振幅）については、以下に示す長周期地震動のエネルギー時刻歴から評価する方法をここでは提案する。

エネルギーの釣り合いから規定変位に相当する値を求める方法として、履歴系では式(1.4.2-1)が粘性系では式(1.4.2-2)が成り立つ。

$$1/2MV_E^2=4\cdot Qd\cdot(d-dy)\cdot N \qquad (1.4.2\text{-}1)$$

$$1/2MV_E^2=\pi Q_0\cdot d\cdot N \qquad (1.4.2\text{-}2)$$

ここで、

V_E：エネルギースペクトル
Qd：降伏荷重
Q_0：減衰力
d：定常変位に相当する変位量
dy：降伏変位
N：回数（エネルギー投入時間/周期）

主要なエネルギーの時間を 90%としているので、0.9 が両辺にかかり、
定常変位に相当する変位量 d は、式(1.4.2-3)、(1.4.2-4)に展開できる。
履歴系では

$$d=V_E^2\cdot 0.9/t_{90}/8\cdot T/\alpha_s/g+dy \qquad (1.4.2\text{-}3)$$

粘性系では

$$d=V_E/2\omega\cdot\sqrt{\ }(0.9\cdot T/\pi/h/t_{90}) \qquad (1.4.2\text{-}4)$$

ここで、

t_{90}：90%のエネルギーが入る時間
T　：周期
h　：減衰定数
α_s：降伏せん断力係数

地震応答解析結果の継続時間及び免震層の総吸収エネルギー最大における J-1 のケースを式(1.4.2-3)で計算すると 261mm（V_E＝3.13m/s）となり、式(1.4.2-4)では h=20%程度に相当する。
また、累積変形最大における I-1 では 100mm 程度となる。

以上から、長周期地震動を想定したエネルギー吸収性能評価のための試験方法は、ここでは、上記の定常変位を包絡する 400mm 以下（暫定値）の３水準（400、200、100mm）の変位振幅における正弦波加振を設定し、累積変形量（50m）が同一となる繰り返し試験を実施することを提案する。なお、３水準の変位は、積層ゴム支承でゴム総厚さ 200mm、限界歪を 400%とすれば、限界変位に対する係数は概ね 1/8、1/4、1/2 程度に相当している。
また、破断・溶解・油漏れなどの限界状態が明確である免震部材については、同試験の振幅と周期の条件で、限界状態を把握するための限界性能試験を実施し、特性値に変動はあるものの限界性能が明確でない免震部材については、累積変形量に余裕度（係数α=2.0 以上）を考慮した限界性能試験を実施する。

1) 積層ゴム支承（鉛プラグ入り積層ゴム、高減衰ゴム系積層ゴムなど）

・変位制御による加振試験とする

・加振波形は正弦波とする

・エネルギー時刻歴から評価した 3 水準の加振振幅を設定する

・加振サイクル数は、累積変形量が同一となるようなサイクル数を加振振幅ごとに設定する

・累積変形量は、地震応答解析結果を参考に算定する（ex.50m）

・鉛プラグ入り積層ゴム及び高減衰ゴム系積層ゴムは、限界性能が明確でないため、上記の累積変形量に余裕度（ex.α=2.0 以上）を考慮した限界性能試験を実施する

・断熱条件での試験とする

・試験体は原則として実大とする

・それぞれの試験終了後、常温下での性能試験を実施し、基本特性を確認する

表 1.4.2-1(a)　長周期地震動を対象とした試験条件

変位振幅	約 100mm （γ=50 程度） 例：限界変形×1/8	約 200mm （γ=100 程度） 例：限界変形×1/4	約 400mm （γ=200 程度） 例：限界変形×1/2
加振周期	地震時応答の等価周期（3 秒～5 秒程度）		
サイクル数	125 回程度	60 回程度	30 回程度
	主要なｴﾈﾙｷﾞｰ吸収の時間：400～600 秒	主要なｴﾈﾙｷﾞｰ吸収の時間：200～300 秒	主要なｴﾈﾙｷﾞｰ吸収の時間：100～150 秒
	累積変形量ΣD（50m）相当		
面圧	基準面圧		

表 1.4.2-1(b)　限界性能を把握するための試験条件

変位振幅	約 100mm （γ=50 程度） 例：限界変形×1/8	約 200mm （γ=100 程度） 例：限界変形×1/4	約 400mm （γ=200 程度） 例：限界変形×1/2
加振周期	地震時応答の等価周期（3 秒～5 秒程度）		
サイクル数	250 回程度	120 回程度	60 回程度
	主要なｴﾈﾙｷﾞｰ吸収の時間：800～1200 秒	主要なｴﾈﾙｷﾞｰ吸収の時間：400～600 秒	主要なｴﾈﾙｷﾞｰ吸収の時間：200～300 秒
	累積変形量ΣD＊α（ex.50m×2.0=100m）相当		
面圧	基準面圧		

2) 弾性すべり支承

・変位制御による加振試験とする

・加振波形は正弦波とする

・エネルギー時刻歴から評価した 3 水準の加振振幅を設定する

・加振サイクル数は、累積変形量が同一となるようなサイクル数を加振振幅ごとに設定する

・累積変形量は、地震応答解析結果を参考に算定する（ex.50m）

・累積変形に余裕度（ex. α=2.0 以上）を考慮した限界性能試験を実施する

・断熱条件での試験とする

・試験体は原則として実大とする

・それぞれの試験終了後、常温下での性能試験を実施し、基本特性を確認する

表 1.4.2-2(a) 長周期地震動を対象とした試験条件（例）

変位振幅	約 100mm	約 200mm	約 400mm
加振周期	地震時応答の等価周期（3 秒～5 秒程度）		
サイクル数	125 回程度	60 回程度	30 回程度
	主要なｴﾈﾙｷﾞｰ吸収の時間：400～600 秒	主要なｴﾈﾙｷﾞｰ吸収の時間：200～300 秒	主要なｴﾈﾙｷﾞｰ吸収の時間：100～150 秒
	累積変形量ΣD（50m）相当[*1]		
面圧	基準面圧		

*1：弾性すべり支承の累積変形量はすべり変位とする。

表 1.4.2-2(b) 限界性能を把握するための試験条件（例）

変位振幅	約 100mm	約 200mm	約 400mm
加振周期	地震時応答の等価周期（3 秒～5 秒程度）		
サイクル数	250 回程度	120 回程度	60 回程度
	主要なｴﾈﾙｷﾞｰ吸収の時間：800～1200 秒	主要なｴﾈﾙｷﾞｰ吸収の時間：400～600 秒	主要なｴﾈﾙｷﾞｰ吸収の時間：200～300 秒
	累積変形量ΣD＊α（ex.50m×2.0=100m）相当[*1]		
面圧	0.75σ_0、1.0σ_0、2.0σ_0[*2]		

*2：弾性すべり支承は面圧の変動を考慮して、3 水準とする。

3）鋼材ダンパー、鉛ダンパーなど

・変位制御による加振試験とする

・原則として加振波形は正弦波とするが、鋼材ダンパーは速度依存性がないことを確認した場合は、静的試験でも可とする

・エネルギー時刻歴から評価した 3 水準の加振振幅を設定する

・加振サイクル数は、累積変形量が同一となるようなサイクル数を加振振幅ごとに設定する

・累積変形量は、地震応答解析結果を参考に算定する（ex.50m）

・限界性能を把握するための試験は破断までの繰り返し回数とする

・断熱条件での試験とする

・試験体は原則として実大とする

・それぞれの試験終了後、常温下での性能試験を実施し、基本特性を確認する

表 1.4.2-3(a)　長周期地震動を対象とした試験条件（例）

変位振幅	約 100mm 例：限界変形×1/8	約 200mm 例：限界変形×1/4	約 400mm 例：限界変形×1/2
加振周期	地震時応答の等価周期（3 秒～5 秒程度）		
サイクル数	125 回程度	60 回程度	30 回程度
	主要なｴﾈﾙｷﾞｰ吸収の時間：400～600 秒	主要なｴﾈﾙｷﾞｰ吸収の時間：200～300 秒	主要なｴﾈﾙｷﾞｰ吸収の時間：100～150 秒
	累積変形量ΣD（50m）相当		

表 1.4.2-3(b)　限界性能を把握するための試験条件（例）

変位振幅	約 100mm 例：限界変形×1/8	約 200mm 例：限界変形×1/4	約 400mm 例：限界変形×1/2
加振周期	地震時応答の等価周期（3 秒～5 秒程度）		
サイクル数	破断まで		

4）オイルダンパーなど

・変位制御による加振試験とする

・加振波形は正弦波とする

・エネルギー時刻歴から評価した 3 水準の加振振幅を設定する

・加振サイクル数は、累積変形量が同一となるようなサイクル数を加振振幅ごとに設定する

・累積変形量は、地震応答解析結果を参考に算定（ex.50m）

・限界性能を把握するための試験は、限界状態となる温度上昇による油漏れを想定し、シールの温度許容値までのサイクル数とする

・試験体は原則として実大とする

・それぞれの試験終了後、常温下での性能試験を実施し、基本特性を確認する

表 1.4.2-4(a)　長周期地震動を対象とした試験条件（例）

変位振幅	変位：約 100mm 速度：10～20cm/s	変位：約 200mm 速度:25～40cm/s	変位：約 400mm 速度:50～80cm/s
加振周期	地震時応答の等価周期（3 秒～5 秒程度）		
サイクル数	125 回程度	60 回程度	30 回程度
	主要なｴﾈﾙｷﾞｰ吸収の時間：400～600 秒	主要なｴﾈﾙｷﾞｰ吸収の時間：200～300 秒	主要なｴﾈﾙｷﾞｰ吸収の時間：100～150 秒
	累積変形量ΣD（50m）相当		

表 1.4.2-4(b)　限界性能を把握するための試験条件（例）

変位振幅	変位：約 100mm 速度：10～20cm/s	変位：約 200mm 速度:25～40cm/s	変位：約 400mm 速度:50～80cm/s
加振周期	地震時応答の等価周期（3 秒～5 秒程度）		
サイクル数	シール材の温度許容値（80℃）まで		

(2)　今後の課題

長周期地震動の試験条件は、入力地震動のエネルギー時刻歴と免震層の特性によって変動する。提案では、400mm 以下の３水準を設定しているが、免震部材が複数存在する場合の評価方法等今後より多くのデータの蓄積が必要である。

また、各試験は、原則として実大品・実変位・実速度・長時間を試験条件としているが、国内試験機では、これらの実験を実現する設備はほとんど無い。

従って、免震部材メーカや受託試験が可能な会社で実施する場合は、試験機の能力の範囲内で限界状態を確認するため、縮小モデルによる試験、一部の試験条件を変更（周期・振幅）することも考えられる。特に温度上昇が特性値に影響を与える免震部材については、実大品と縮小モデルの関係について十分検討すべきである。

また、上記試験案は加振条件を正弦波としているが、ランダム応答波との関係も検証する必要がある。

損傷評価については、免震部材毎の応答結果と試験結果の評価（例）を示しているが、一部の免震部材については、評価手法が確立されていないことも今後の課題である。

参考文献

1.4.2-1）日本建築学会：長周期地震動と建築物の耐震性、pp221～264、2007.12

1.4.3　既存の実験施設の実態調査

免震部材製作会社及び受託試験が可能な会社に免震部材の試験機におけるアンケート調査を実施した。

アンケートでは、各試験機（2 軸、1 軸）の最大加振能力、性能曲線、長周期地震を想定した連続加振能力などについて実施している。

その結果を図 1.4.3-1～図 1.4.3-4 に示す。また、連続加振能力における一覧表を表 1.4.3-1 に示す。

静的な実験装置では、2 軸試験機（鉛直・水平）において、鉛直荷重 30000～40000kN、水平荷重 13000kN 程度まで可能であり、実大免震部材の静的実験は概ね可能である。一方、動的試験では、最大速度及び振幅が実大免震構造と同様の応答レベル（0.5～1.0m/s、0.5m程度）になると、鉛直方向・水平方向とも載荷能力は低下する。

従って、2 軸試験の場合、制約条件下（例えば、基準面圧を小さくし、積層ゴムサイズを試験機の能力範囲内のサイズにする）であれば一部の動的試験は可能であるが、大型の積層ゴム支承の動的試験は、既存の国内試験機では困難と考えられる。

なお、既に、一部の免震部材（積層ゴム支承、鋼材ダンパーなど）では、海外の大型試験機を用いた実大動的試験が実施されている。

一方、オイルダンパーのように 1 軸試験（水平）で評価可能なものについては、2000KN クラス、0.5m/s で加振可能な設備も国内には存在する。

長周期地震を想定した、連続した長時間の加振が必要な場合には、更に制限され、表 1.4.3-1 に示すように、0.33Hz、0.5m・1.0m の条件では 15 秒程度しか実施できないのが現状である。

また、水平２方向試験についても、動的載荷試験では、縮小モデルによる実験に限定される。

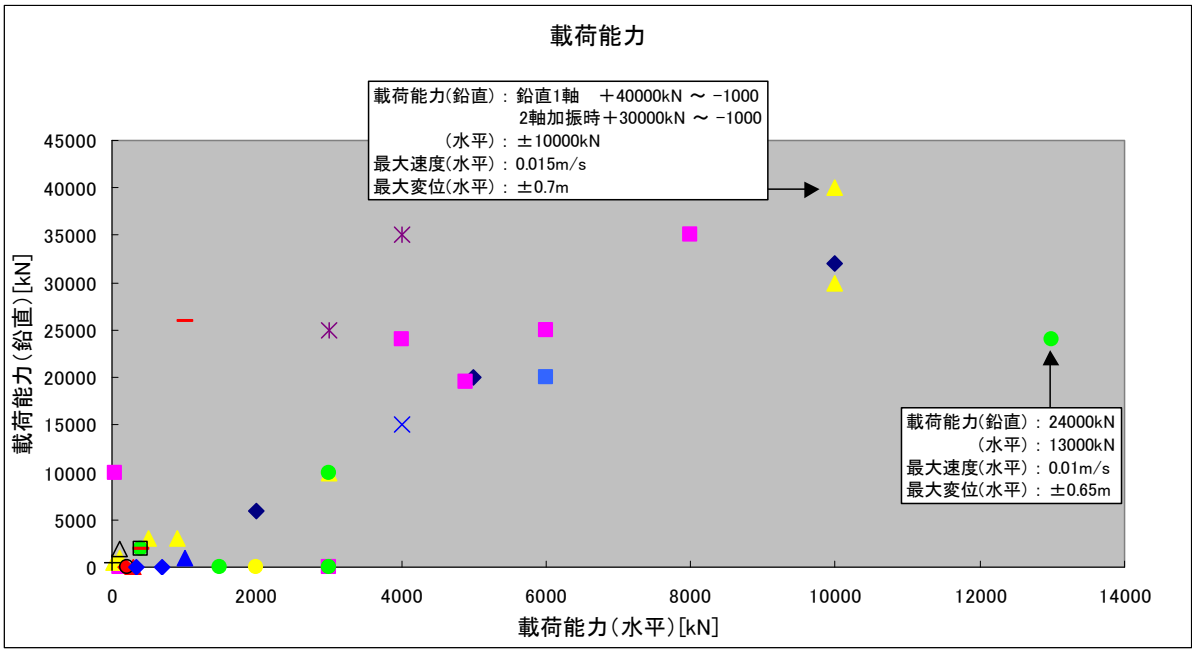


図 1.4.3-1　載荷能力（鉛直）－載荷能力（水平）の関係

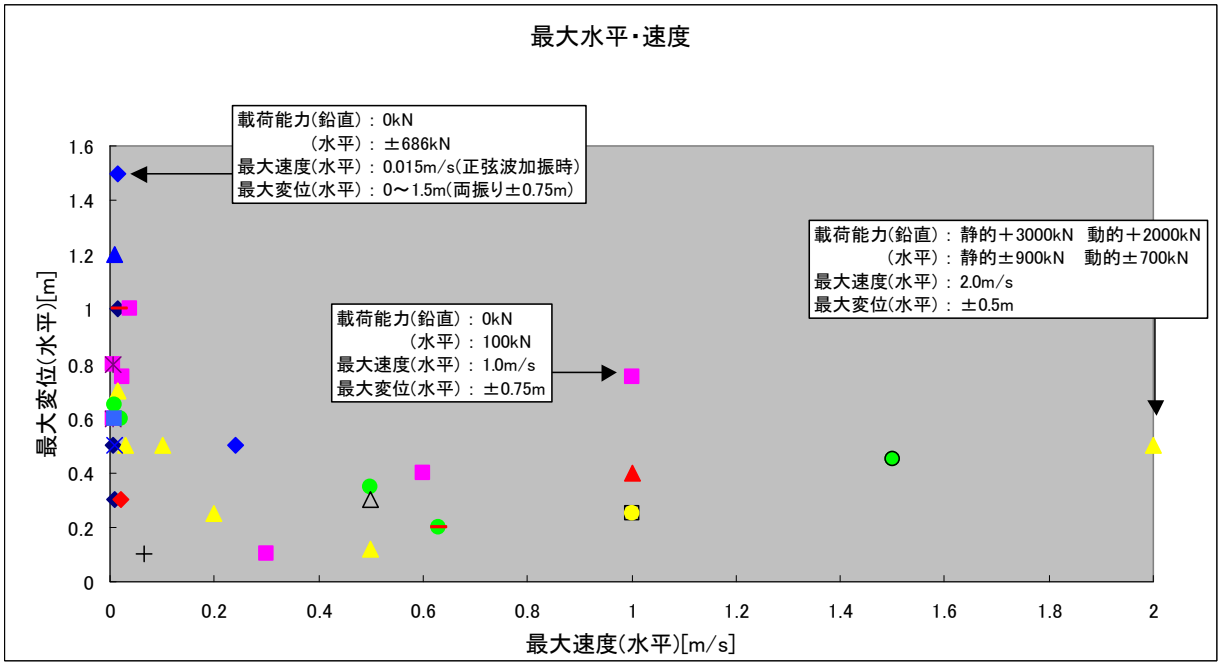


図 1.4.3-2　最大速度－最大変位（水平）の関係

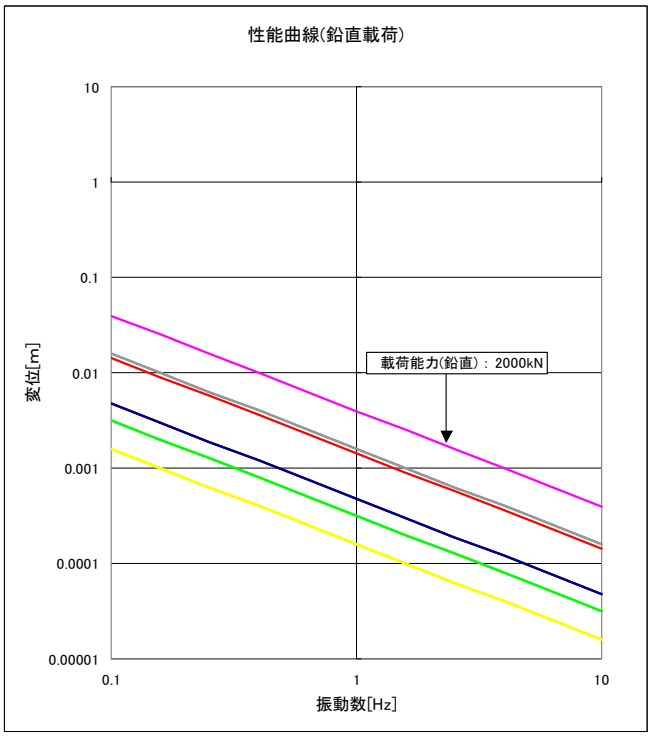


図 1.4.3-3　性能曲線（鉛直）

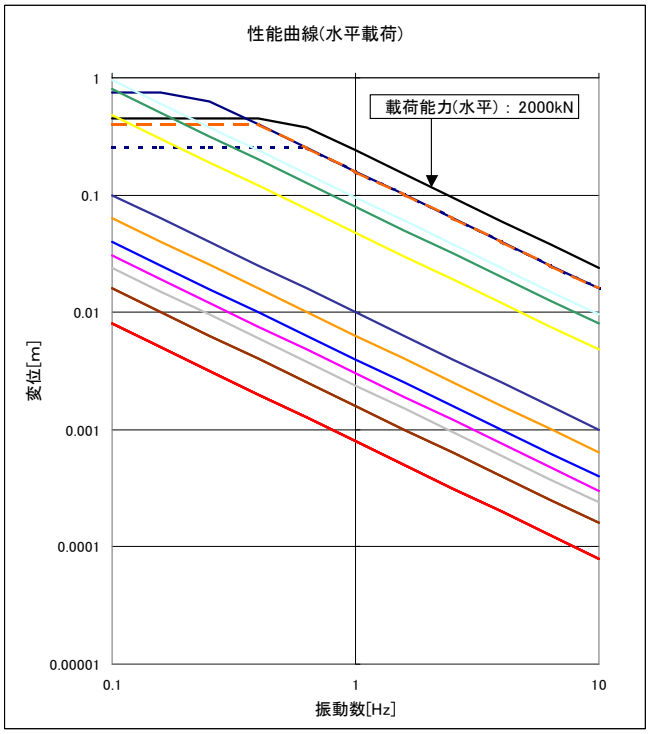


図 1.4.3-4　性能曲線（水平）

表 1.4.3-1　各試験機における連続加振可能時間

	A社					B社			C社		
試験機仕様	4900kN	50kN	3000kN	4000kN	100kN	3MN	500KN	100t	2MN	3MN	1.5MN
載荷能力(鉛直)[kN]	19600(σ=±600)	10000		24000		静的+3000 動的+2000	490	1000	2000		
(水平)[kN]	4900	50	3000	4000	100	静的±900 動的±700	±29	±100	400	静的3000	静的1500
正弦波0.33Hz 振幅±0.1mの 連続加振可能時間	最大速度が25mm/sec なので、100mmを0.33Hzは 不可能。8時間	15秒	無制限	無制限	サンプリング100Hzの場合 721.92分 (データ数で時間が変わります)	無制限	無制限	無制限	無制限	10サイクル程度	10サイクル程度
正弦波0.33Hz 振幅±0.3mの 連続加振可能時間		15秒	15秒	無制限	サンプリング100Hzの場合 721.92分 (データ数で時間が変わります)	33秒			無制限		10サイクル程度
正弦波0.33Hz 振幅±0.5mの 連続加振可能時間			15秒	15秒	サンプリング100Hzの場合 721.92分 (データ数で時間が変わります)	21秒					
正弦波0.33Hz 振幅±1.0mの 連続加振可能時間				15秒							

	D社	E社	F社	G社	H社	I社	J社
試験機仕様							
載荷能力(鉛直)[kN]		−400～+2000	2000			2000	
(水平)[kN]	196	±400	100	2000	±343	400	2000
正弦波0.33Hz 振幅±0.1mの 連続加振可能時間	180秒	無制限	無制限	無制限	無制限 (最大荷重200kN程度。 油圧弁・油圧ホース等の寿命の 制限を受ける。)	100秒	9秒
正弦波0.33Hz 振幅±0.3mの 連続加振可能時間	180秒			30秒	無制限 (最大荷重5kN程度。 油圧弁・油圧ホース等の寿命の 制限を受ける。)		
正弦波0.33Hz 振幅±0.5mの 連続加振可能時間							
正弦波0.33Hz 振幅±1.0mの 連続加振可能時間							

1.5　まとめと課題

1.5.1　まとめ

1.1 章では、既存の文献による「長周期地震動の免震性能評価の実状調査」を行い、現状の知見についてとりまとめている。その内、免震部材が保有しているエネルギー吸収性能については、詳細な内容について試験データを踏まえて 1.2 章で紹介している。

1.3 章では、10 棟の代表的な免震建築物における時刻歴応答解析を実施し、エネルギー吸収性能に着目した検討を行い、1.4 章では、これらの応答時刻歴データを用いて、代表的な免震部材として支承材 3 種類（鉛プラグ入り積層ゴム・高減衰ゴム系積層ゴム・弾性すべり支承)、ダンパー3 種類（鋼材ダンパー・鉛ダンパー・オイルダンパー）についてエネルギー吸収性能評価を行い、試験方法の考え方を示している。

以下に主な検討結果を示す。

(1)　免震部材におけるエネルギー吸収性能

a.　支承材

鉛プラグ入り積層ゴム・高減衰ゴム系積層ゴムおよび弾性すべり支承（高摩擦・低摩擦タイプ）を用いて断熱状態での縮小モデルによる試験を実施している。

鉛プラグ入り積層ゴムと高減衰ゴム系積層ゴムでは発熱の機構が異なるため、温度の上昇傾向が異なること、繰り返しにともなう履歴面積の変化の仕方も傾向が異なることが明らかとなった。また、高摩擦タイプの弾性すべり支承では、すべり板の裏側での温度が 300℃を超えるところまで試験を実施したが、摩耗粉が多量に発生するもののすべり材の損傷は見られなかった。しかし、摩擦係数は温度の上昇にともないほぼ逆比例して低下する傾向にある。低摩擦タイプの試験では、累積すべり量が 50m 程度までは摩擦係数に変化はないものの、繰り返し回数 100 サイクル以降から、すべり材の損傷により摩擦係数が上昇する傾向にあるが、変化率は小さいことが判明した。

b.　ダンパー

鋼材ダンパーは、実大試験において各振幅における破断に至る繰り返し回数や吸収エネルギー量が提供でき、低サイクル疲労の回数によって限界性能が決定される。また、破断直前までの履歴特性も安定している。鉛ダンパーは、鋼材ダンパー同様のデータが提供でき、限界性能は、主に温度上昇による鉛鋳造体の軟化・溶解・破断により決定する。また、振幅±20mm、±400mm の繰り返し加力実験では、累積変形量の増加に伴い、降伏荷重とエネルギー吸収性能が低下する傾向がみられた。オイルダンパーは、制震用オイルダンパーにおける繰り返し加力実験における加振時間と温度上昇の関係が提供でき、限界性能は温度上昇による油漏れを想定している。また、温度 80℃までの加振においても履歴性状はほとんど変化がみられない事が確認されている。

(2)　外力特性に関する情報収集・検討

10 棟の代表的な免震建築物モデルにおいて時刻歴応答解析を実施し、1.4 章のエネルギー吸収性能評価に必要なデータを作成している。

解析の結果、各免震部材が吸収するエネルギー量は、4.60×10^{3}～5.21×10^{5} kN･m 程度であり、免震層の最大応答変位及び累積変形量は、各々0.49m、46m程度となっている。また、免

震部材のエネルギー吸収量が総量の 5%に達した時刻 T(5%)と 95%に達した時刻 T(95%)は、概ね 100～140 秒程度となっている。

(3)　免震部材のエネルギー吸収性能評価・試験方法の提案

a.　鉛プラグ入り積層ゴム及び高減衰ゴム系積層ゴム

長周期地震動による多数回の繰り返し変形を受ける鉛プラグ入り積層ゴム（LRB）について、温度上昇を考慮した応答評価法の一つとして、免震建築物のエネルギーの釣り合いに着目した手法を提案した。LRB については、本手法によって予測された免震層最大変形は、温度上昇を考慮した詳細な解析結果を概ね包絡しており、安全側の評価を与えるものである。また、高減衰ゴム系積層ゴム（HDR）についても同様の評価法が提案されているが、LRB と比較して履歴吸収エネルギーの増加に伴う特性の低下が小さいことから、繰り返し変形による温度上昇が応答特性に及ぼす影響は小さいと推察される。ただし、繰り返し変形以外にも様々の依存性を有しているため評価法が複雑となっており、今後も検討の余地がある。

b.　弾性すべり支承

弾性すべり支承は、繰り返し依存性を考慮した場合と考慮しない場合の評価を行っており、最大応答変位及びすべり材の累積すべり変位の増加は少ないが、依存性を考慮した場合では、建物に作用する地震力は増加する。

c.　鋼材ダンパー

鋼材ダンパーは、建物の時刻歴応答変位をもとにマイナー則を用いて疲労予測と鋼材ダンパーの累積吸収エネルギーからの疲労予測における評価を行っており、疲労損傷度は、最大で 60%程度となった。また、検討方法のうち中～大振幅振幅の疲労曲線からマイナー則で検討したものが、大きめの予測値となる傾向がある。また、地震終了後のダンパーは疲労により 1 サイクルのエネルギー吸収性能は 94%程度に低下する。

d.　鉛ダンパー

鉛ダンパーも鋼材ダンパー同様、建物の時刻歴応答変位をもとにマイナー則を用いて疲労予測の評価を行っており、疲労損傷度は、最大で 18%程度となった。鉛鋳造体温度は 14～35℃程度の上昇であり、健全性には問題ないといえる。また、地震終了後のダンパーは疲労により 1 サイクルのエネルギー吸収性能は 70%程度に低下する。

e.　オイルダンパー

オイルダンパーは、熱容量を超え、外壁温度が上昇し、設計許容外壁温度（ex. 80℃）以上となると作動油の滲み出しが生じるという知見があるので、時刻歴応答で入力エネルギーを算出し温度上昇予測式を用いて外壁温度が許容値以下に入ることを確認している。外気温度 20℃の時外壁温度は発熱量を考慮しない簡略式で計算しても最大事例(J-1　N-OSHK02-SD 波）で 52℃であった。

f.　試験方法の提案

長周期地震動における試験条件に必要な、変形と繰り返し回数は免震周期、等価減衰定数を仮定して、地震動のエネルギー時刻歴（入力エネルギーの等価速度）が与えられれば、規定変位に応じた要求繰り返し回数を算定することが可能である。従って、試験方法は、長周期地震動のエネルギー時刻歴から評価する方法をここでは提案した。規定変位は 3 水準の振幅における正弦波加振を設定し、累積変形量が同一となる繰り返し試験を実施することを提案している。

1.5.2 課題

長周期地震動における免震部材のエネルギー吸収性能評価に着目した場合、今後以下のような課題が残されている。

(1) 免震部材におけるエネルギー吸収性能試験データの充実

各免震部材の多数回の繰り返し変形を与える実験がなされているが、スケール効果の問題、静的試験と動的試験の関係、試験装置や免震部材の鉄部からの放熱の効果、さらには試験方法（繰り返し回数、振幅、速度）の検討が必要である。特に、実大試験体を用いた実速度・実変位の多数回繰り返し試験の実施や方向性のある免震部材については２方向におけるエネルギー吸収性能の把握も今後必要と考えられる。

(2) 免震部材のエネルギー吸収性能評価法の確立

1.4 節では、代表的な免震部材において、時刻歴応答解析による免震部材の吸収エネルギーや、累積変形量から疲労損傷度や特性値変化を評価しているが、特性値の変動を考慮する場合、解析プログラムに取り入れるのか、応答推定式によるのか、試験結果からの降伏荷重の低下率で規定するのか等、評価手法は未だ充分確立できていない。また、今回の検討対象外とした各免震部材における評価法も今後の検討課題である。更には、免震建築物の地震時観測などを積極的に推進し、実際の応答挙動を検証することも重要と考えられる。

(3) 試験方法の確立

各試験は、原則として実大品・実変位・実速度・長時間を試験条件としているが、国内試験機では、これらの実験を実現する設備はほとんど無い。従って、現状では、免震部材メーカや受託試験が可能な会社で実施する場合は、試験機の能力の範囲内で限界状態を確認するため、縮小モデルによる試験、一部の試験条件（周期・振幅）を変更することも考えられる。これらの場合、縮小モデルのスケール効果の確認や試験条件が与える影響について十分把握すべきである。

(4) 公的な大型試験機の必要性

本来、実大試験体による性能確認試験は、長周期地震動評価のためには不可欠であり、免震建築築の先端をリードしている我が国として、公的な大型試験装置がないのは免震建築物の安全性の検証、免震技術の進歩にとってマイナスである。そのため海外試験機（米国 USCD の SRMD）に匹敵する大型の試験装置を第三者機関として設置することが望まれる。

第Ⅲ部

免震部材の特性評価と応答評価

第１章　免震部材実験によるエネルギー吸収性能の評価

1.1 目的

長時間にわたる長周期の外力下での免震部材の繰り返し特性や限界性能については、いまだ不明な点が多い。そこで、長周期地震動に対する免震建築物の安全性を検討するために必要となる各種免震材料の性能を、部材の要素実験（縮小または実大実験）により明らかとする。

1.2 全体方針

(1) 対象部材

実験の対象とする部材は、免震支承、免震ダンパーとして一般的に用いられている以下の種類のものを対象とする。

○支承：天然ゴム系積層ゴム、高減衰ゴム系積層ゴム、鉛プラグ入り積層ゴム、弾性すべり支承（高摩擦）、弾性すべり支承（低摩擦）

○ダンパー：鉛ダンパー、鋼材ダンパー、オイルダンパー、粘性ダンパー

各部材の試験条件の選定に当たっては、第Ⅱ部第 1 章の検討内容や既往の研究成果を参考に共通方針を定め、詳細な試験体仕様や試験パラメーターなどの条件は部材としての一般性に配慮し、また、試験機の性能に合わせて部材毎に決定するものとする。各部材についての多数回繰り返し性能に関する既往の主な研究成果を表 1.1-1 に示す。

以下に、それぞれの部材について考慮すべき点を挙げる。

1) 支承

a) 既往の知見

第Ⅱ部第 1 章に記載した免震部材実験による、多数回繰り返し試験に関する主な指摘事項は以下のとおりである。

○ 鉛プラグ入り積層ゴム：鉛プラグの温度の上昇にともない降伏荷重が低下する。

○ 高減衰ゴム系積層ゴム：ゴムの温度の上昇にともない降伏荷重、降伏剛性が低下する。

○ 弾性すべり支承：すべり材・すべり板の温度上昇にともない摩擦係数が低下する。

これらの知見から、繰り返しに伴う温度上昇などの要因による履歴特性の変化および限界性能の把握が主な課題であることが判った。部材実験では累積変形量（または累積ひずみ）の目標を定めて繰り返し動的載荷を行い、併せて試験体の温度計測を行うこととする。

b) 試験体の仕様

試験体の仕様に関する基本方針は以下の通りとする。

○ 試験体は試験装置の性能範囲内で縮小試験体を設定する。

例：((1/2)Φ500, (1/4)Φ250 等）

○ 積層ゴム部の体積あたり熱容量を整合させるため、実大試験体（φ1000）の標準モデルを基準として、可能な限り積層のゴム層厚や鉄板厚を同スケールで縮小する。弾性すべり支承については径方向のみ縮小とし、厚さ方向は実スケールとする。

○ 試験体は、ゴム内部温度、鉛プラグ温度の計測を考慮して製作する。

c) 実験方法

実験方法に関する基本方針は以下の通りとする。

○ 静的に圧縮力を載荷した状態下の水平 1 方向動的せん断試験を基本とする。

○ 積層ゴム支承は限界性能が明確でないため、累積変形量に余裕度（ex. α=2.0 以上）を考慮した限界性能試験を実施する。

○ 載荷面圧については基準面圧を定めるが、面圧に関する依存性が大きいと考えられる支承については基準面圧に加えて別水準の試験も実施する。

2) ダンパー

a) 既往の知見

第Ⅱ部第 1 章に記載した免震部材実験による、多数回繰り返し試験に関する主な指摘事項は以下のとおりである。

○ オイルダンパー：

単位時間当たりの入力熱量がオイルダンパーの熱容量を超え、外壁温度が上昇すると作動油の滲み出しが発生する。

○ 鋼材ダンパー：

破断直前までの履歴特性は安定している。限界性能は低サイクル疲労の回数によって決定される。

○ 鉛ダンパー：

累積変形量の増加に伴い、降伏荷重とエネルギー吸収性能が低下する。限界性能は主に温度上昇による鉛鋳造体の軟化・溶解・破断によって決定される。

これらの知見から、支承と同様に繰り返しに伴う温度上昇などの要因による履歴特性の変化および限界性能の把握が主な課題であることが判った。部材実験では累積変形量（または累積ひずみ）の目標を定めて繰り返し動的載荷を行い、併せて試験体の温度計測を行うこととする。

b) 試験体の仕様

試験体の仕様に関する基本方針は以下の通りとする。

○ 試験体は原則として実大とする。

○ 試験体は温度計測を考慮して製作する（動的試験の場合）。

c) 実験方法

実験方法に関する基本方針は以下の通りとする。

○ 水平 1 方向動的せん断試験を基本とする。速度依存性の少ない部材は静的条件による実施も可とする。

○ 鋼材ダンパー、鉛ダンパーの限界性能試験では、破断までの回数の繰り返し試験を行う。

○ オイルダンパーの限界性能試験では、限界状態となる温度上昇による油漏れを想定し、シールの温度許容値（80℃）までの回数の繰り返し試験を行う。

表 1.2-1　多数回繰り返し性能に関する既往の主な研究成果

番号	論文名	著者	掲載誌	種別	サイズ	試験条件※
①	免震構造用鉛ダンパーの実験的研究 -別置型鉛ダンパーの復元力モデルと繰返し特性の評価について-	森田慶子 高山峯夫	AIJ構造系論文集，2003.8.	鉛ﾀﾞﾝﾊﾟｰ	実大	T=3s d=5cm,10cm,15cm n=150回
②	実大弾性すべり支承の載荷実験に基づく摩擦特性のモデル化	日比野浩他	AIJ構造系論文集，2003.12.	SB(高摩擦)	φ800,600	T=3s d=10cm n=50回
③	減衰特性および各種依存性を考慮した建築用オイルダンパーの開発と解析モデルに関する研究	高橋治他	AIJ構造系論文集，2005.8.	制震OIL	実大	T=0.2s d=0.02cm n=250万回
④	免震構造用U字形鋼材ダンパーの繰り返し変形性能に関する研究	吉敷祥一他	AIJ構造系論文集，2008.2.	鋼材 ﾀﾞﾝﾊﾟｰ	実大	T=3s,4s,5s d=10cm,25cm n=破断まで
⑤	積層ゴムの熱・力学的連成挙動に関する実験的研究	竹中康雄他	AIJ構造系論文集，2009.12.	LRB，HDB	LRB： φ1000,510,255 HDB：φ500，300	T=3s,5s γ=50,100,200% n=100回
⑥	風外力を受ける超高層免震構造における滑り支承の耐久性に関する研究	東野雅彦他	AIJ構造系論文集，2010.2.	SBの NRゴム	φ800，400	T=3s,2.5s,2s,1s γ=100,200,300% n=1000～60000回
⑦	高減衰積層ゴムの熱・力学的連成挙動の免震建物応答への影響評価	北村春幸 早川修平他	AIJ構造系論文集，2010.9. （掲載予定）	HDB	φ500,300,225	T=3s,5s γ=50,100,200% n=100回

※ T：加振周期、d:加振振幅、γ：最大せん断ひずみ、n：繰り返し回数

(2) 試験共通条件の設定

第Ⅱ部第 2 章では、文献調査結果および解析検討の結果から、地震動条件および免震の応答量を

長周期地震動の入力エネルギーの等価速度：3.0m/s～4.0m/s

累積変形量：20～30m 程度

最大変形量は 500～600mm 程度

としており、長周期地震動を想定したエネルギー吸収性能評価のための試験方法として 3 水準（400、200、100mm）の変位振幅における正弦波加振を設定し、累積変形量（50m）が同一となるようなサイクル数を加振振幅ごとに設定する繰り返し試験を提案している。本試験では、この検討結果をもとに表 1.2-2 に示す 6 ケースの基本条件を定め、部材毎に試験装置の性能と優先条件を勘案して、以下のとおり実施試験条件を決定するものとする。

① 試験装置の性能の範囲内で実施可能なケースはそのまま実施する。

② ①が不可能なケースでは、累積変形量の目標値および単位時間あたりの累積変形量（または累積ひずみ量）を最大限に確保しながら、変位・加振周期・速度を変更して実施する。

③ 全ケースとも、破壊等の終局状態に達した場合は試験を中止する。また、予備試験体数等の状況に応じて、限界性能試験の範囲を超えた累積変形量の試験を実施しても良いこととする。

なお、試験計画においては以下を考慮するものとする。

○ 変位制御による加振試験とする。

○ 加振波形は周期 4 秒のサイン波を標準とする。

○ 断熱条件での試験とする。

○ それぞれの試験終了後、常温下での性能試験を実施し、基本特性を確認する。

表 1.2-2　多数回繰り返し試験の基本ケース

ケース	試験条件	加振周期	変位		換算速度	ｻｲｸﾙ数	時間	累積変形
		s	±mm	(γ)	cm/s		s	m
1A	長周期	4	100	50%	15.7	125	500	50
1B	限界	4	100	50%	15.7	250 *2	1000	100
2A	長周期	4	200	100%	31.4	60	240	48
2B	限界	4	200	100%	31.4	120 *2	480	96
3A	長周期	4	400	200%	62.8	30	120	48
3B	限界	4	400	200%	62.8	60 *2	240	96
備考		*1	*1 (ﾀﾞﾝﾊﾟｰ)	(実大支承)		*1		*1

注　*1 第Ⅱ部第 2 章の検討結果に準拠

*2 ダンパーの限界試験では破断または油温 80℃とする。

1.3 実験内容

1.3.1 天然ゴム系積層ゴム

1.3.1.1 実験計画

(1) 実験目的と背景

(a) 目的

天然ゴム系積層ゴム支承の大振幅高速繰り返し試験を縮小試験体により実施し、多数回繰り返しに対する性能を把握する事を目的とする。

試験で確認する項目は以下の通りである。

㈠ 多数回繰り返しに対する水平荷重―変位特性の変化

② 多数回繰り返しに対する試験体の温度変化

③ 動的軸力変動の影響による上記性状の変化

(b) 背景

天然ゴムは、その弾性的な性質がゴム材料の中で最も優れており、免震建築用積層ゴムの主要な材料として用いられている[1.3.1-1)]。

天然ゴムは加硫によってゴム状弾性という長所を与えることができ、天然ゴム系積層ゴムはカーボンブラック等の補強材や石油系オイル等の軟化材、加硫材を添加して調整されたものである。天然ゴム系積層ゴムでは弾性と相反する減衰性能を付与する必要がないので、優れた弾性的性質を存分に発揮する免震部材といえる。

天然ゴム系積層ゴムに繰り返し変形を与えた際の変化は、最初の数回の変形で数%程度の水平ばね定数の低下が見られる。こうした現象は、カーボンブラック等の補強材を添加したゴム材料で予備伸長にみられる軟化現象（Mullins 効果）と説明されている。ただし、繰り返し 3 サイクル程度以降で荷重変形関係は安定し、せん断ひずみが 200%程度までは繰り返しによる水平ばね定数の低下は小さいものとされている[1.3.1-2)]。

以上の背景から、天然ゴム系積層ゴム支承の繰り返し特性について着目した既往の研究成果は少ないが、同支承は免震支承として多用されていること、その特性は減衰付与タイプの支承に対するリファレンスとなることを考慮し、天然ゴム系積層ゴム支承の多数回繰り返し試験を実施することとした。

(2) 実験日時および場所

日　時：　平成２３年１月１３日～１７日

場　所：　（株）ブリヂストン　横浜工場（下郷地区）

(3) 試験体

支承は実大サイズの 1/4 縮小試験体として、外径Φ250（ゴム種 G4、ブリヂストン製）を４体製作した。ゴム層厚は 1.7mm、ゴム層数は 30 層、内部鋼板厚は 1.2mm、S1=35.3、S2=4.9、基準面圧は 15N/mm^2 である。

試験体の外観図を図 1.3.1-1 に示す。

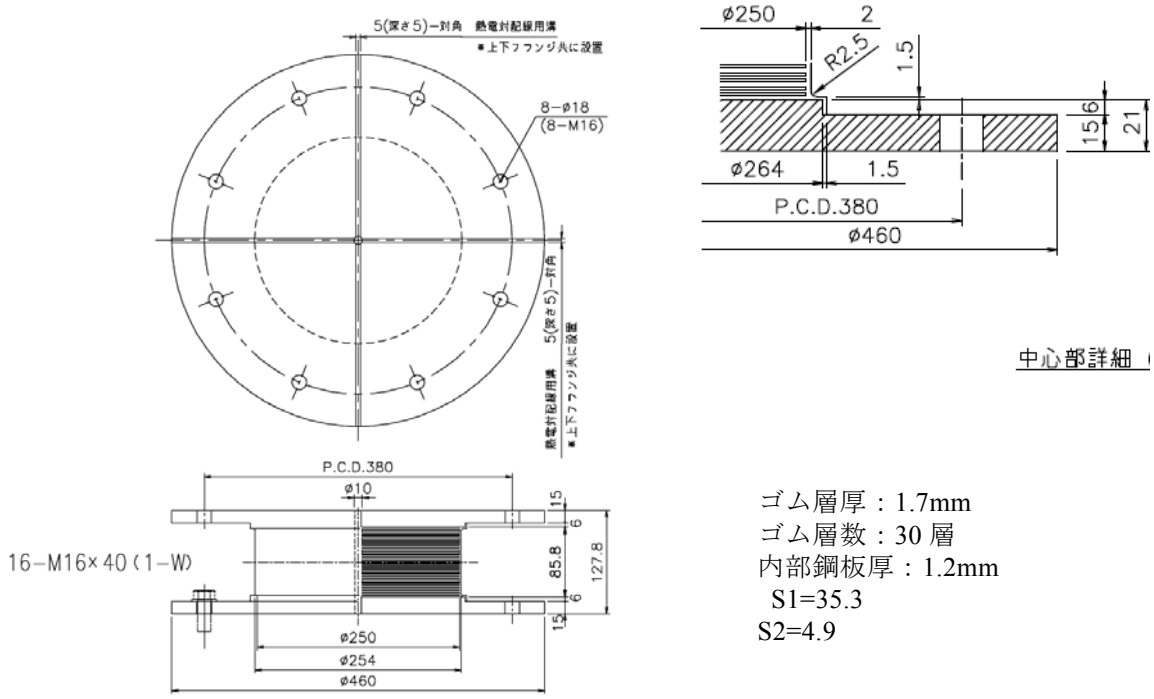


図 1.3.1-1 試験体外観（天然ゴム系積層ゴム支承）

(4) 試験装置

試験装置として、ブリヂストン横浜工場（下郷地区）の 1000kN 動的試験機を用いる。試験機仕様を表 1.3.1-1 に、試験機外観を図 1.3.1-2 に示す。

表 1.3.1-1　試験機仕様（1000kN 動的試験機）

鉛直方向	最大荷重	圧縮：1000kN 引張： 300kN
	最大ストローク	±100mm
	最大速度	0.0314m/s
水平方向	最大荷重	±300kN
	最大ストローク	±300mm
	最大速度	0.628m/s
入力波形	正弦波、三角波	

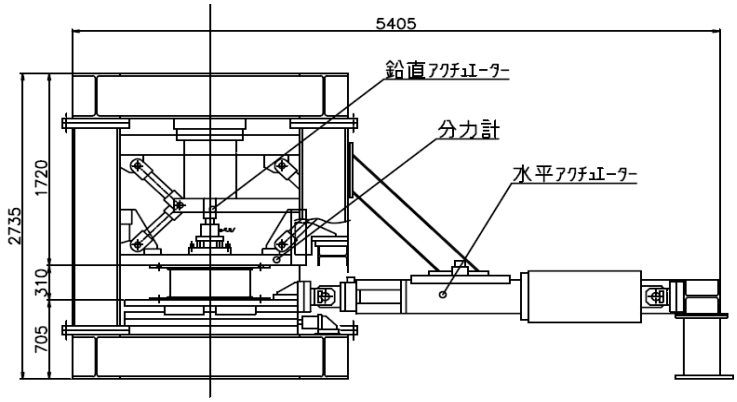


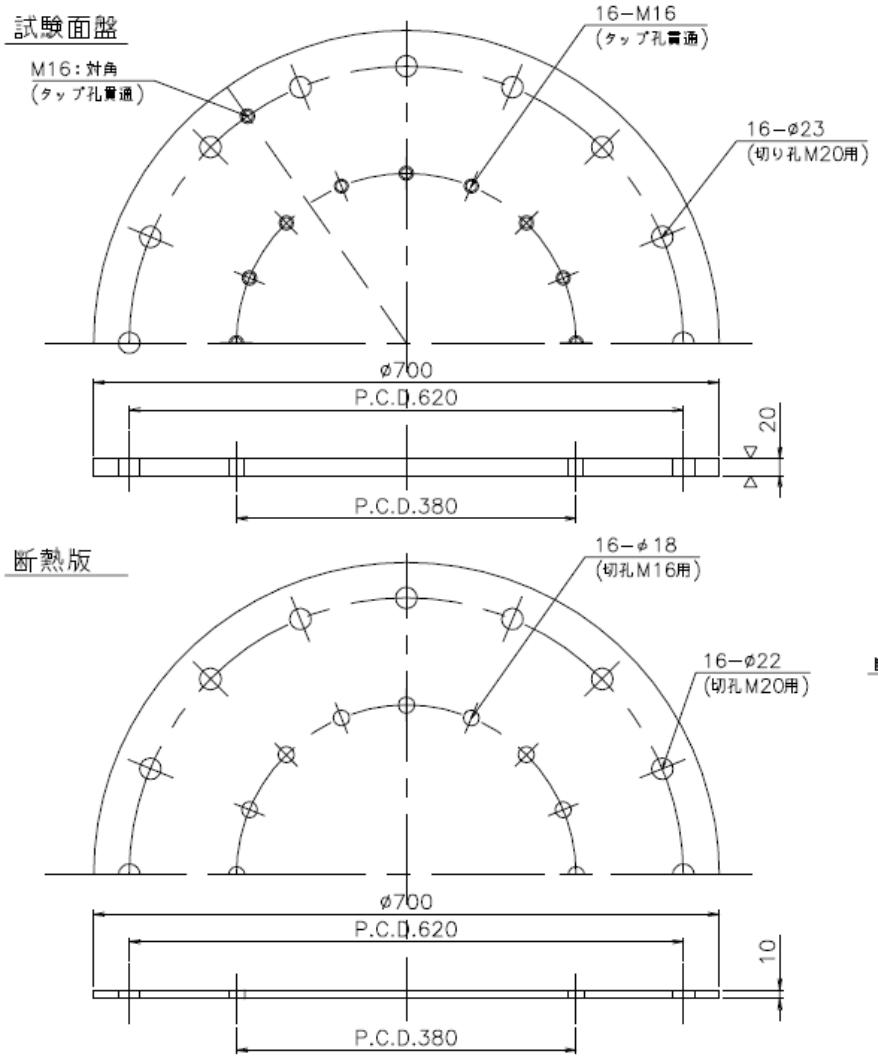
図 1.3.1-2 試験機外観（1000kN 動的試験機）

断熱材として標準高温用断熱板（D-M-E 双葉、10mm 厚）を用い、試験機側面盤と試験体フランジの間に挿入し固定した。

断熱板の仕様を表 1.3.1-2 に、試験体設置要領を図 1.3.1-3 に示す。

表 1.3.1-2 断熱板の仕様

圧縮強度	338(N/mm^2)　（24℃の場合） 103(N/mm^2)　（285℃の場合）
吸水性	0.06%
熱伝導率	0.274W/(m・k)　（24℃の場合） 0.303W/(m・k)　（220℃の場合）
難燃性	94V－0(自己消化性)
最高使用温度	285℃
材質	アルミニュームカーボネート＋グラスファイバー＋不飽和ポリエステル



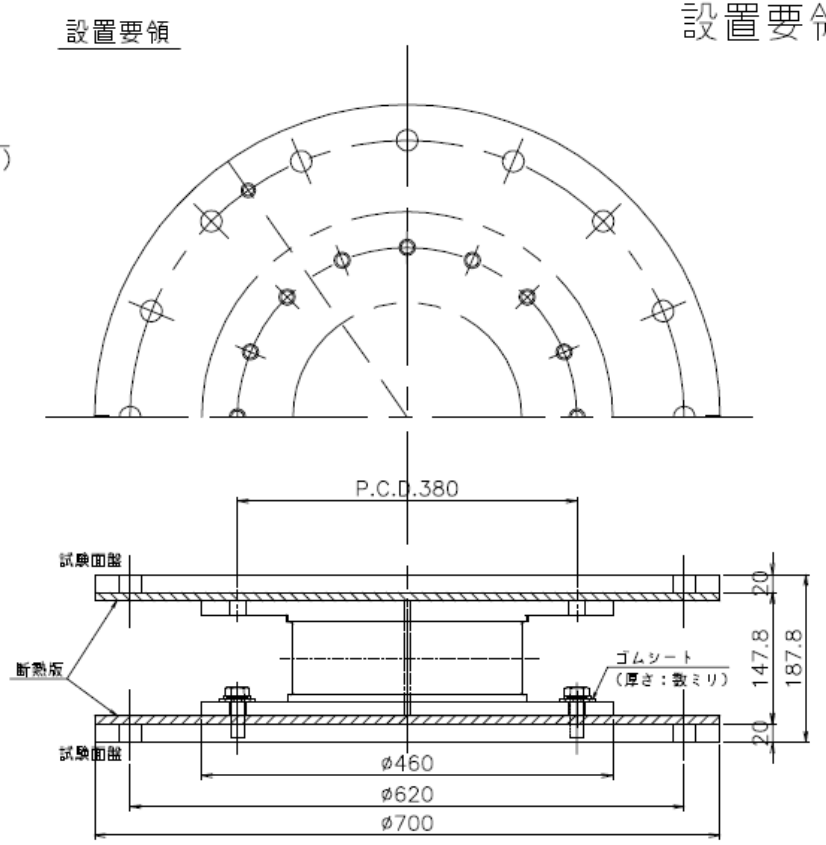


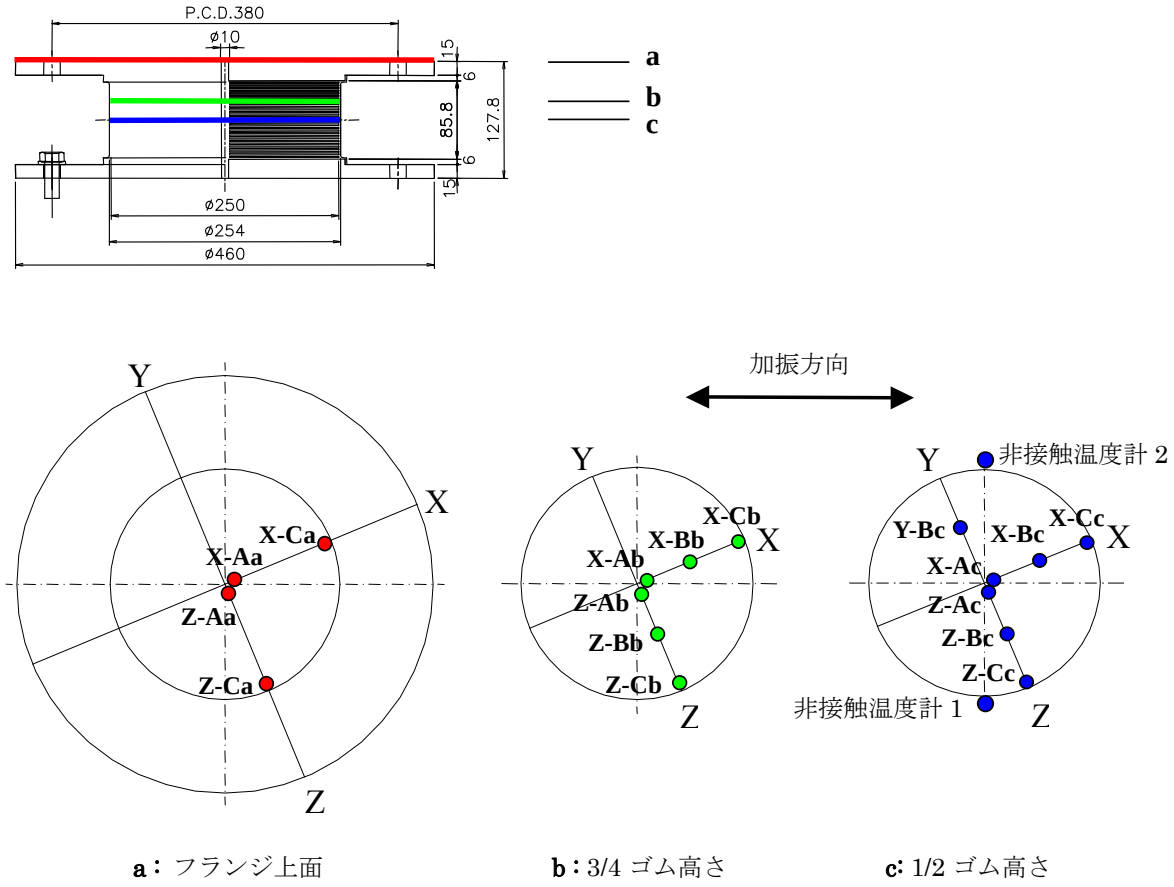
図 1.3.1-3 試験体設置要領

(5) 計測項目と計測方法

計測項目は、水平変位、水平荷重、鉛直荷重、鉛直変位に加え、温度（試験体内部および室温）の計測を行った。

水平変位は試験機内蔵の変位計により、鉛直変位は 2 箇所の対角に配置した外部変位計により計測した。また水平荷重および鉛直荷重は、試験機の分力計により測定した。温度計測は、ゴム内部およびフランジ上面の溝部に計 17 点の熱電対と、ゴム表面部で非接触型の放射温度計 2 点の計 19 点を設置した。

温度計測点を図 1.3.1-4 に示す。



a：フランジ上面　　**b**：3/4 ゴム高さ　　**c**: 1/2 ゴム高さ

図 1.3.1-4 温度計測点

(6) 実験方法および実験ケース

動的載荷は正弦波による加振を基本とし、地震応答波載荷（最大振幅を 200mm 程度に調整）も併せて実施した。鉛直一定、水平動的の２軸載荷を基本とし、上下動的－水平動的の２軸載荷のケースも併せて実施した。各試験の初期温度は、常温（20±5℃）を基本とした。

目標とする実験ケース（参考）を表 1.3.1-3 に、実施実験ケースを表 1.3.1-4 に示す。事前加振の結果、本試験条件ではインターバル無しの連続加振が可能であることが確認されたので、長周期試験、限界試験ともに連続加振を行った。

試験では、基本となる長周期、限界の試験ケースに加えて、試験体を恒温層で 24 時間以上保存して初期温度を 0℃または 30℃として載荷を開始するケース（#3－1、#3－2）、標準軸力 15N/mm^2

に水平方向載荷と同位相で±5N/mm^{2}の軸力変動または倍調波で5N/mm^{2}の軸力低減を与えるケース（#4－1～#4－4)、目標載荷振幅を 0.5mm、1mm、3 mm、5 mm とする微小振幅のケース（#2－1)、免震建築物の地震応答波を載荷波とするランダム波加振ケース（#2－4）を実施した。このうち地震応答波載荷では、免震周期 4 秒、降伏せん断力係数を 0.03、上部構造を剛体とした 1 質点モデルに、T-TN-AIC003-AV および T-TN-AIC003-SD を入力して得られた応答変位波形を用いた。試験では応答変位波形のうち主要動部付近の 300 秒分を用いた。図 1.3.1-5 に載荷に用いた応答変位波形を示す。

表 1.3.1-3 実験目標ケース（参考）

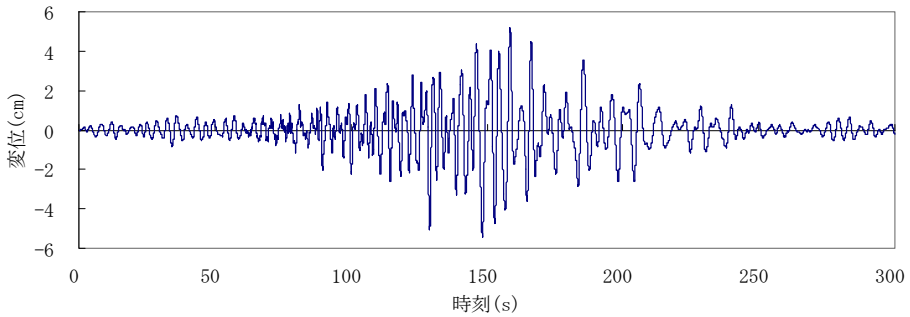
ケース	試験条件	加振周期 s	変位 ±mm	換算速度 cm/s	ｻｲｸﾙ数	時間 s	累積変形 m
1A*	長周期	4	100	15.7	125	500	50
1B*	限界	4	100	15.7	250	1000	100
2A*	長周期	4	200	31.4	60	240	48
2B*	限界	4	200	31.4	120	480	96
3A*	長周期	4	400	62.8	30	120	48
3B*	限界	4	400	62.8	60	240	96

表 1.3.1-4(1) 実験ケース一覧

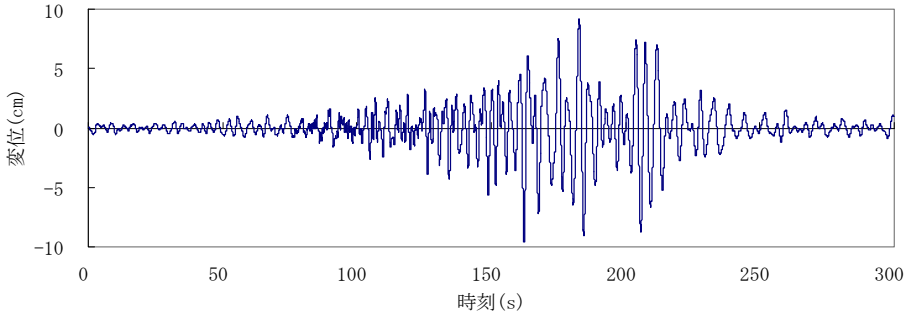
ser. No.	試験 No.	ケース	試験条件	加振周期 s	面圧 N/mm^2	ひずみ（変位) %(±mm)	換算速度 cm/s	ｻｲｸﾙ数	時間 s	累積変形 m	初期温度 ℃	備考
1	#1-1		基本特性	4	15	100 (51)	7.9	4	16	0.8	20	
2		1A相当	長周期	4	15	50 (25.5)	3.9	125	500	12.5	20	
3			(直後)基本特性	4	15	100 (51)	7.9	4	16	0.8	終了時	
4	#1-2		基本特性	4	15	100 (51)	7.9	4	16	0.8	20	
5		1B相当	限界	4	15	50 (25.5)	3.9	1000	4000	100	20	
6			(直後)基本特性	4	15	100 (51)	7.9	4	16	0.8	終了時	
7	#1-3		基本特性	4	15	100 (51)	7.9	4	16	0.8	20	
8		2A相当	長周期	4	15	100 (51)	7.9	60	240	12.5	20	
9			(直後)基本特性	4	15	100 (51)	7.9	4	16	0.8	終了時	
10	#1-4		基本特性	4	15	100 (51)	7.9	4	16	0.8	20	
11		2B相当	限界	4	15	100 (51)	7.9	500	2000	96	20	
12			(直後)基本特性	4	15	100 (51)	7.9	4	16	0.8	終了時	
13			(後)基本特性	4	15	100 (51)	7.9	4	16	0.8	20	
14			(出荷)基本特性	20	15	100 (51)	0.26	3	60	0.6	20	三角波
15-18	#2-1		微小振幅	3	15	10 (5.1)	1.1	3	9	0.8	20	
19	#2-2		基本特性	4	15	100 (51)	7.9	4	16	0.8	20	
20		3A相当	長周期	4	15	200 (102)	15.7	30	120	12	20	
21			(直後)基本特性	4	15	100 (51)	7.9	4	16	0.8	終了時	
22	#2-3		基本特性	4	15	100 (51)	7.9	4	16	0.8	20	
41		3B相当	限界	4	15	200 (102)	15.7	250	1000	96	20	
42			(直後)基本特性	4	15	100 (51)	7.9	4	16	0.8	終了時	
43			(後)基本特性	4	15	100 (51)	7.9	4	16	0.8	20	
44	#2-4		基本特性	4	15	100 (51)	7.9	4	16	0.8	20	
45			地震応答波(1)	-	15	54.3	11.1		300		20	AIC003_av
46			地震応答波(2)	-	15	95.9	19.2		300		20	AIC003_sd
47			(直後)基本特性	4	15	100 (51)	7.9	4	16	0.8	終了時	
48			(出荷)基本特性	20	15	100 (51)	0.26	3	60	0.6	20	三角波

表 1.3.1-4(2) 実験ケース一覧

ser. No.	試験 No.	ケース	試験条件	加振周期 s	面圧 N/mm^2	ひずみ (変位) %(±mm)	換算速度 cm/s	サイクル数	時間 s	累積変形 m	初期温度 ℃	備考
23	#3-1		基本特性	4	15	100 (51)	7.9	4	16	0.8	0	
24		3B相当	限界	4	15	200 (102)	15.7	250	1000	96	0	
25			(直後)基本特性	4	15	100 (51)	7.9	4	16	0.8	終了時	
26			(後)基本特性	4	15	100 (51)	7.9	4	16	0.8	20	
49	#3-2		基本特性	4	15	100 (51)	7.9	4	16	0.8	30	
50		3B相当	限界	4	15	200 (102)	15.7	250	1000	96	30	
51			(直後)基本特性	4	15	100 (51)	7.9	4	16	0.8	終了時	
52			(後)基本特性	4	15	100 (51)	7.9	4	16	0.8	20	
53			(出荷)基本特性	20	15	100 (51)	0.26	3	60	0.6	20	三角波
27	#4-1		基本特性	4	15	100 (51)	7.9	4	16	0.8	20	水平-上下同位相
28		3A相当	長周期	4	15±5	200 (102)	15.7	30	120	12	20	
29			(直後)基本特性	4	15	100 (51)	7.9	4	16	0.8	終了時	
30	#4-2		基本特性	4	15	100 (51)	7.9	4	16	0.8	20	水平-上下倍調波
31		3A相当	長周期	4	15－5	200 (102)	15.7	30	120	12	20	
32			(直後)基本特性	4	15	100 (51)	7.9	4	16	0.8	終了時	
33	#4-3		基本特性	4	15	100 (51)	7.9	4	16	0.8	20	水平-上下同位相
34		3B相当	限界	4	15±5	200 (102)	15.7	250	1000	96	20	
35			(直後)基本特性	4	15	100 (51)	7.9	4	16	0.8	終了時	
36	#4-4		基本特性	4	15	100 (51)	7.9	4	16	0.8	20	水平-上下倍調波
37		3B相当	限界	4	15－5	200 (102)	15.7	250	1000	96	20	
38			(直後)基本特性	4	15	100 (51)	7.9	4	16	0.8	終了時	
39			(後)基本特性	4	15	100 (51)	7.9	4	16	0.8	20	
40			(出荷)基本特性	20	15	100 (51)	0.26	3	60	0.6	20	三角波



(a) T-TN-AIC003-AV 入力



(b) T-TN-AIC003-SD 入力

図 1.3.1-5 地震応答波入力用波形

1.3.1.2 実験結果

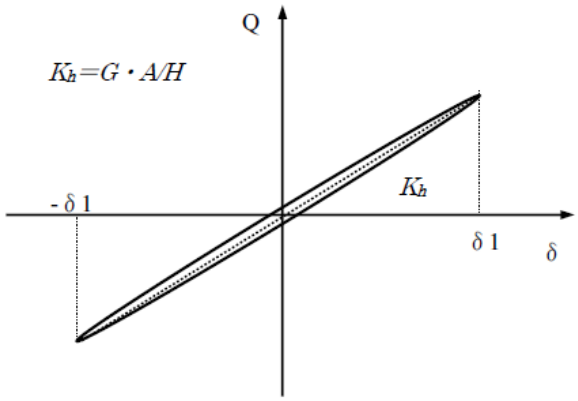
(1) 特性値の評価方法

免震部材の水平剛性、等価粘性減衰定数は以下の方法により求める。評価方法は、文献 [1.3.1-2)] をもとに定義する。

特性値の評価対象は原則として載荷３サイクルめの荷重－変形関係とする。長周期、限界試験では繰り返し特性を評価するため、各載荷ケースでサイクル毎の荷重－変形関係特性値を読み取ることとする。

a) 水平剛性

荷重－変形関係において、原点と最大荷重点を結ぶ直線の勾配の正負平均値を水平剛性 *Kh* とする（図 1.3.1-6a, 式(1.3.1-1)）。



$$K_h = G \cdot A / H \qquad (1.3.1\text{-}1)$$

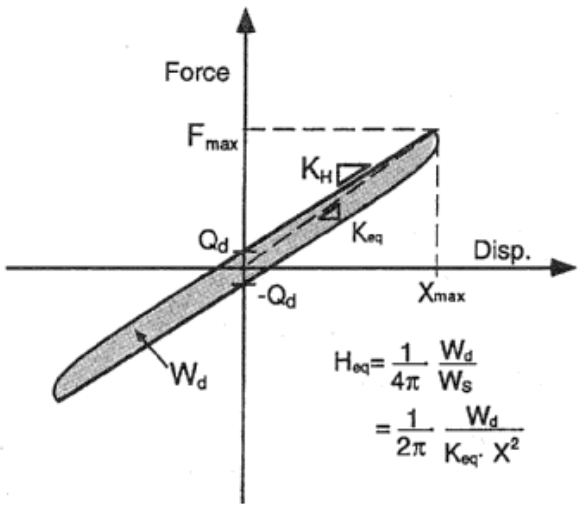
ここで、
G:ゴムのせん断弾性係数
A:積層ゴムの有効断面積(mm²)
H:ゴム層総厚さ(mm)

G=0.392N/mm²
（G4, 規定ひずみγ=100%時）

図 1.3.1-6a 水平剛性 *Kh* の算出方法

b) 減衰特性値

荷重変形関係の面積と前述の水平剛性 *Kh* から等価粘性減衰定数 *heq* を求める（図 1.3.1-6b）。



$$H_{eq} = \frac{1}{4\pi}\frac{W_d}{W_s} = \frac{1}{2\pi}\frac{W_d}{K_{eq} \cdot X^2} \qquad (1.3.1\text{-}2)$$

図 1.3.1-6b 等価粘性減衰 *heq* の算出方法

(2) 荷重-変位関係

各実験の荷重−変位関係を図 1.3.1-7～20（図番号に記号 a を付す）に示す。

荷重−変位関係では、γ=50%およびγ=100%では長周期・限界の両試験とも繰り返しに伴う荷重変形関係の変化はきわめて小さく、各サイクルのループはほぼ重なっている（図 1.3.1-7a～10a）。γ=200%では若干のハードニング傾向が見られ、また初期サイクルで剛性がやや高めとなっているが、2 サイクルめ以降の荷重変形関係はほぼ安定している（図 1.3.1-11a、12a）。初期温度 30℃のケース（図 1.3.1-16a）、基準面圧 15N/mm^2 に対して 5N/mm^2 の軸力変動を与えたケース（図 1.3.1-17a～20a）もほぼ同じ傾向を示すが、積層ゴムの初期温度を 0℃とした限界試験（図 1.3.1-15a）では荷重変形関係の変化はやや大きい。その理由は、後述のように、繰り返しの影響ならびに試験体温度が常温に戻る際の温度変化の影響が複合して現れているものと見られる。

(3) 温度変化

長周期・限界試験の温度変化を図 1.3.1-7～20（図番号に記号 b を付す）に示す。

限界試験の温度変化（図 1.3.1-8b、10b、12b）を比較すると、加振振幅が大きいケースほど同じ累積変形を短時間に載荷するためにゴム内部の温度上昇量が大きくなっており、3B 相当ケース（図 1.3.1-12b）では加振終了後には 35℃程度となり、初期に比べて最大で 15℃程度上昇している。初期温度を 0℃（図 1.3.1-15b）、30℃（図 1.3.1-16b）とした場合のゴム内部の温度上昇はそれぞれ 23℃、12℃程度であり、載荷条件が同じでも初期温度と雰囲気温度との関係で温度上昇量が異なることが分かる。いずれのケースも室温を 20℃程度に管理して行っているため、特に初期温度を 0℃としたケースでは載荷による温度上昇と試験体温度が室温に戻る両方の影響を示している。なお、図-1.3.1-#b（#=8～20）の各図で計測データが短時間で変動する暴れがみられる成分がみられる。この現象は載荷に伴う熱電対の断線等によるものとみられるが、図中には収録されたデータをそのまま掲載している。

(4) 試験前後の荷重-変位関係の変化

長周期または限界試験の前後に行った基本特性試験で得られた荷重−変位関係の比較を図 1.3.1-21 に示す。γ=200%の限界試験を経験した試験体#2, #3, #4 ではγ=100%までの加振とした試験体#1 に比べて試験後の剛性が低くなっているが、試験前後の荷重変形関係の変化はごく僅かである。

(5) *Kh*、*Heq* の変化

長周期・限界試験の *Kh* および *Heq* の変化を図 1.3.1-22～24 に示す。初期のサイクルで *Kh*、*Heq* の値が急に減少し、その後は緩やかに減少する傾向にある。初期温度 0℃（図 1.3.1-23 の#3-1）は初期温度 30℃（同図の#3-2）に比べて *Kh* および *Heq* の減少傾向が顕著であり、常温の限界試験（図 1.3.1-22 の#2-3）はこれらのケースの中で中間の傾向を示す。

各ケースの 3 サイクルめで評価された *Kh*、*Heq* の一覧を表 1.3.1-5 に示す。比率欄は各試験体において、最初に実施する基本特性試験の値に対する比率を表している。長周期・限界試験の前後に行った基本特性試験と(直後)基本特性試験の比較によれば、繰り返しにより *Kh* が減少する傾向が確認できる。その程度はγ=100%（#1）に比べてγ=200%（#2）のほうが顕著である。*Kh* の変化量はγ=200%（#2）で−10%～−8%であった。*Heq* は増減の傾向が安定していないが変化量はγ=200%（#2）で−2%～＋8%であった。これらの変化傾向は初期温度を 0℃としたケース（#3-1）では常温のケース（#2）に比べて顕著に現れているが、軸力変動を与えたケース（#4）は（#2）と同程度の変化となっている。

(直後)基本特性試験と試験体温度を常温に戻した後の(後)基本特性試験の *Kh*、*Heq* の比較によれば、時間経過後にやや回復する傾向は見られるが、若干の残留変化量が見られる。*Kh*、*Heq* の残留変化量はγ=200%の長周期試験(#2-2)で－6%、＋5%であった。

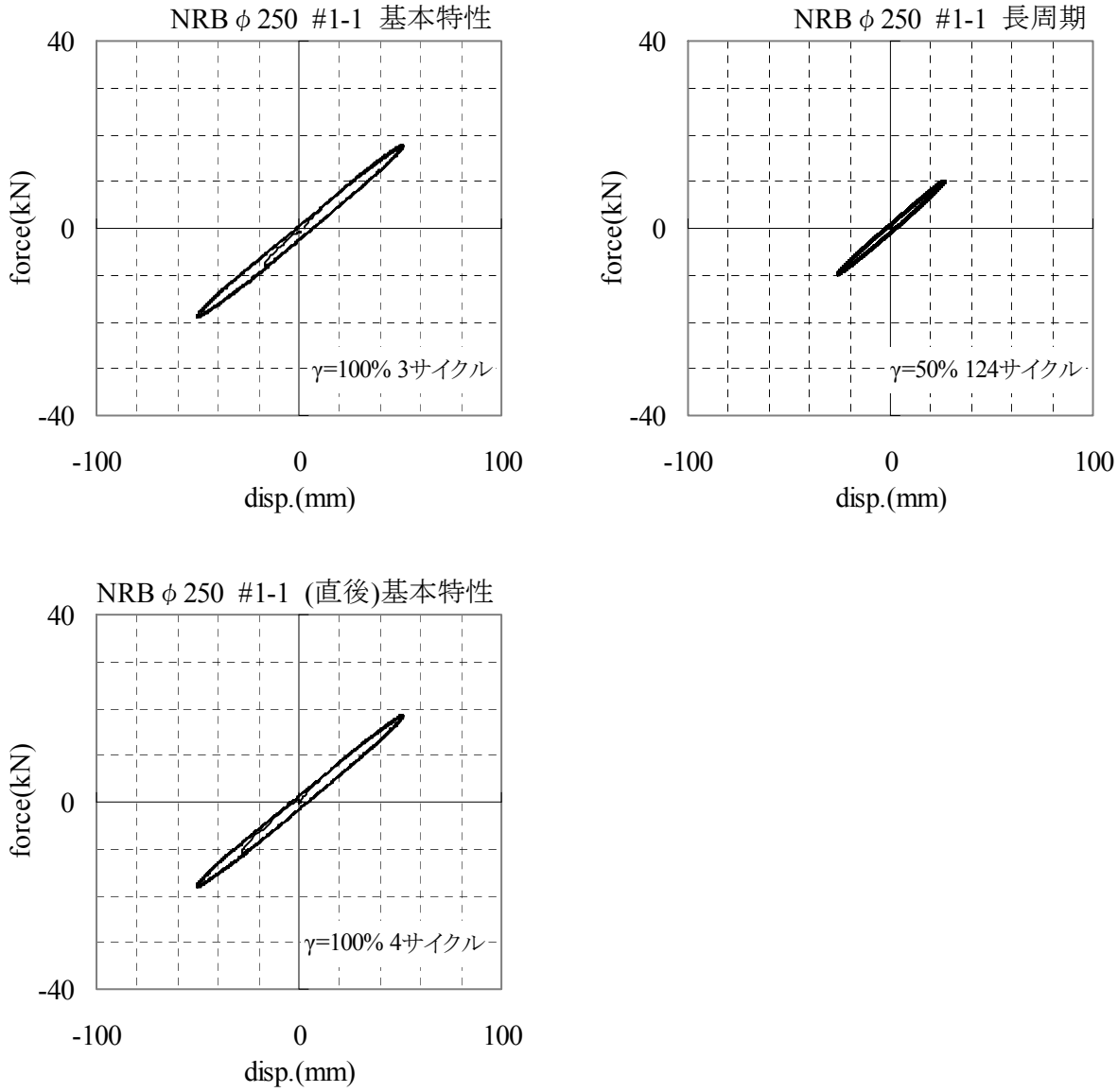
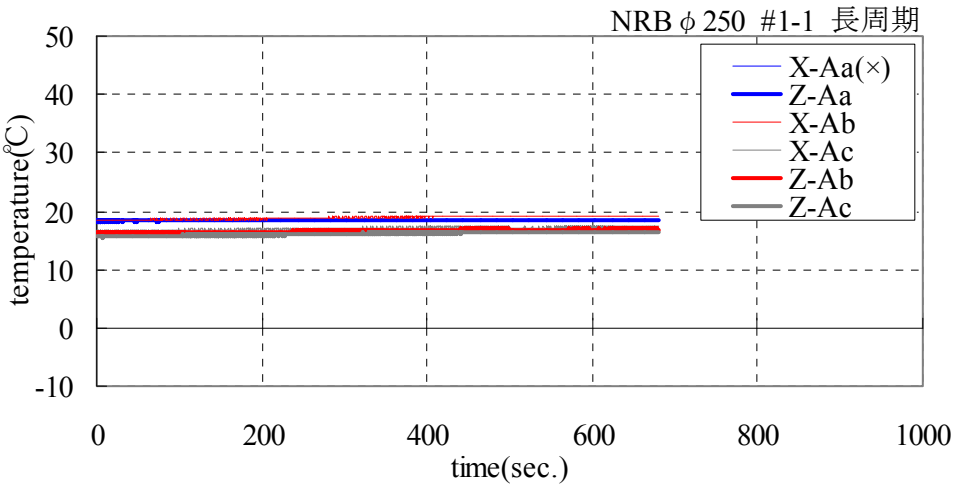
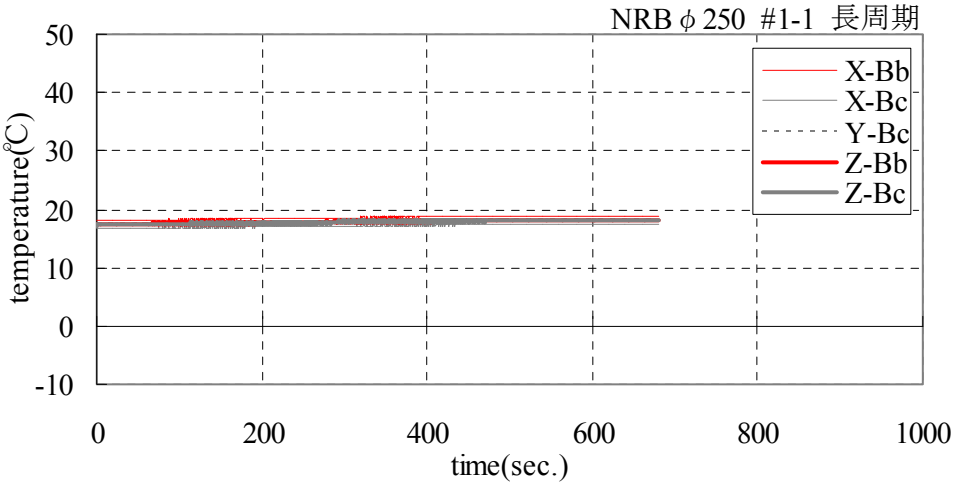


図 1.3.1-7a 荷重-変位関係（1A 相当：長周期）　γ=50%（±25.5mm）





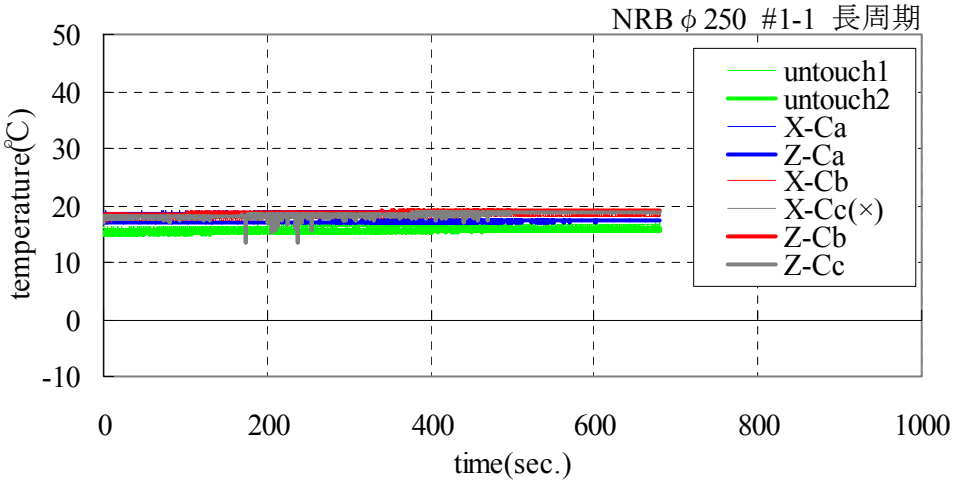


図 1.3.1-7b 温度変化（1A 相当：長周期）　γ=50%（±25.5mm）

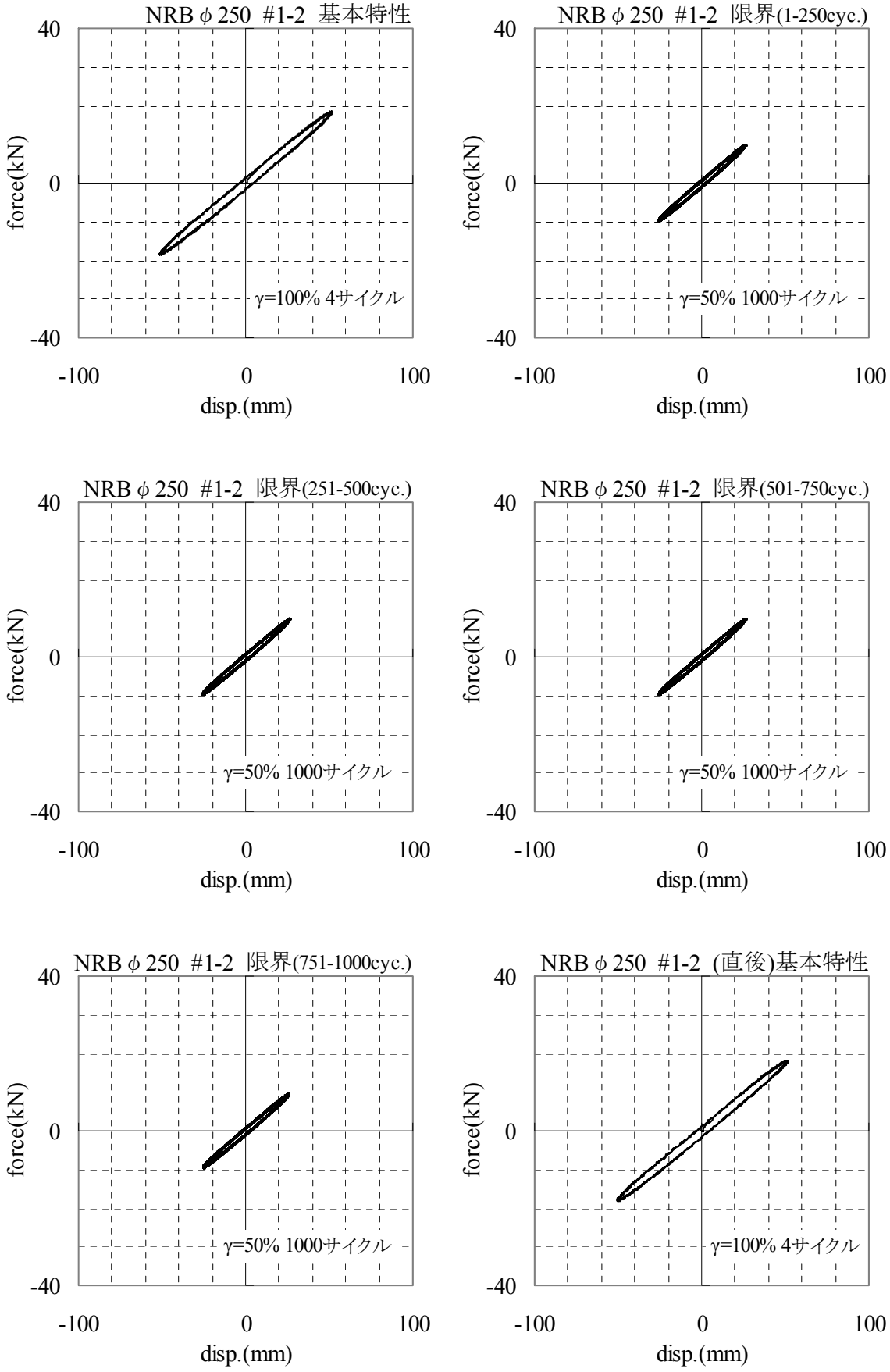
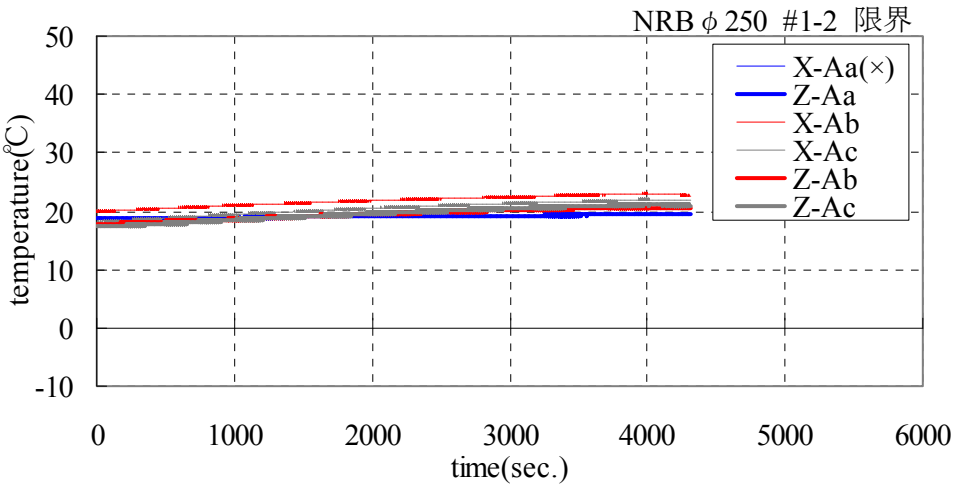
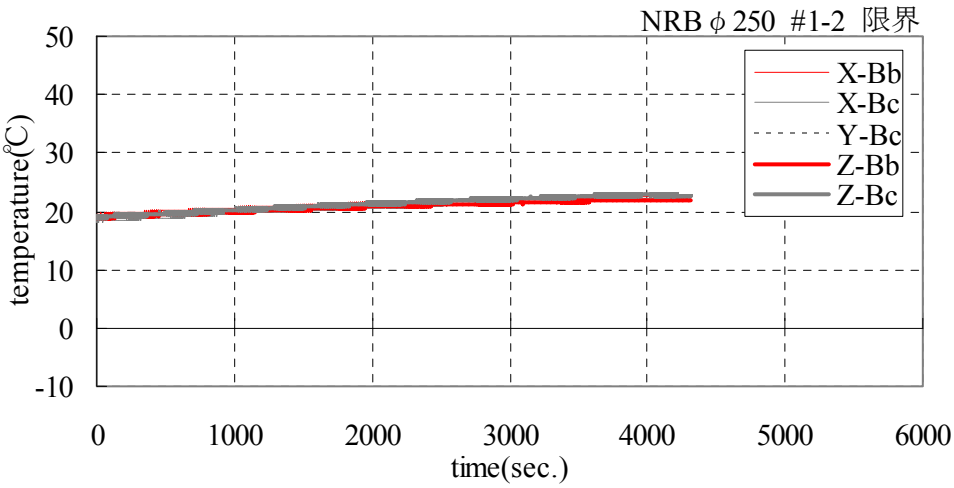


図 1.3.1-8a 荷重-変位関係（1B 相当：限界）　γ=50%（±25.5mm）





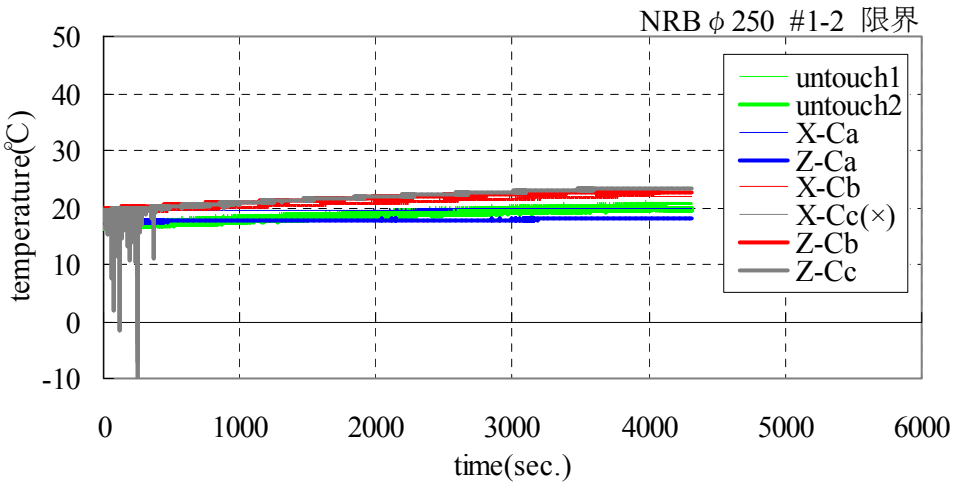


図 1.3.1-8b 温度変化（1B 相当：限界） γ=50%（±25.5mm）

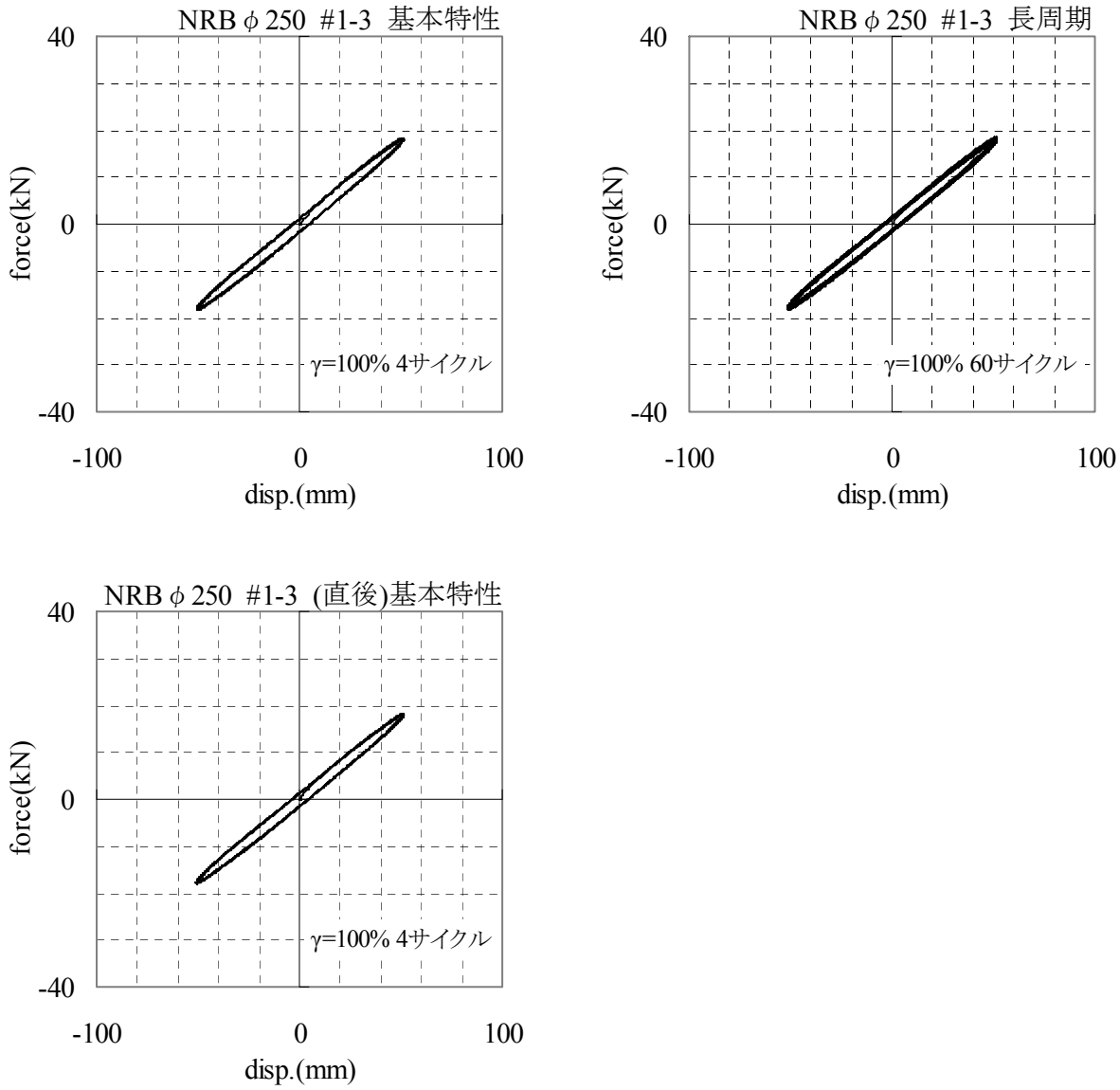
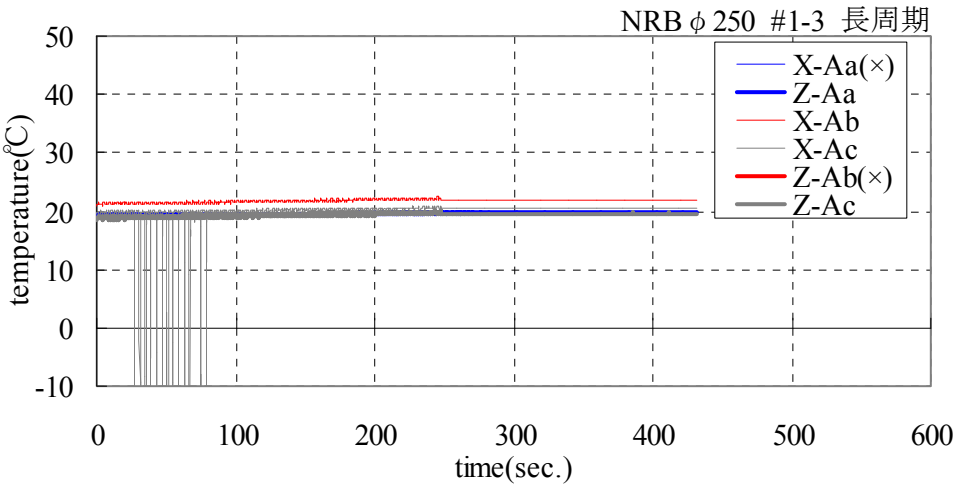
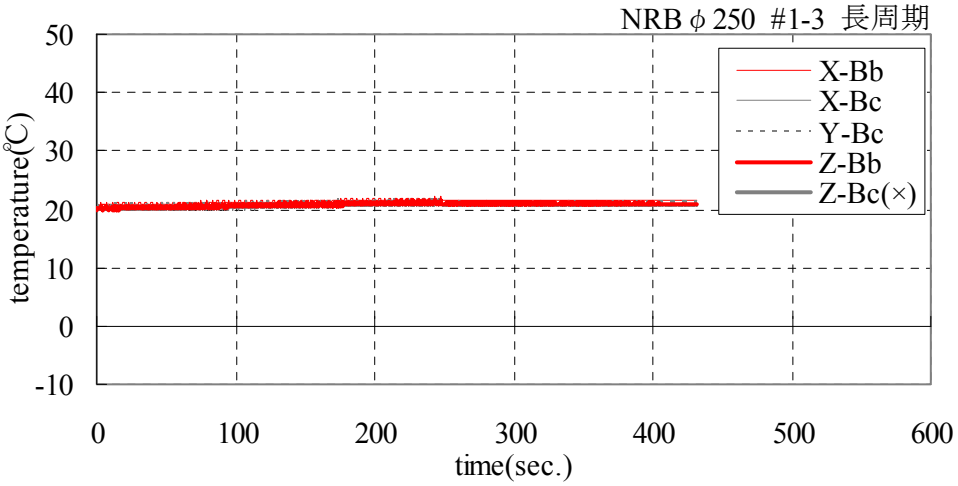


図 1.3.1-9a 荷重-変位関係（2A 相当：長周期）　γ=100%（±51mm）





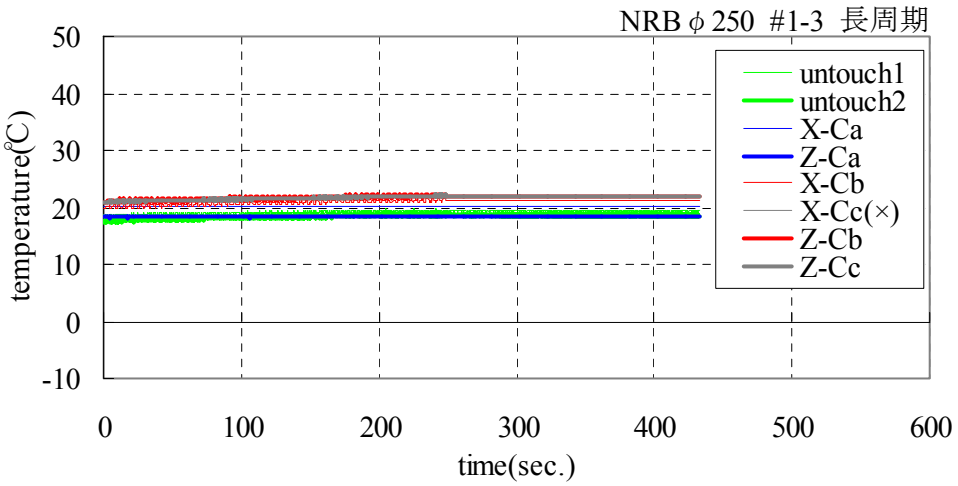


図 1.3.1-9b 温度変化（2A 相当：長周期） γ=100%（±51mm）

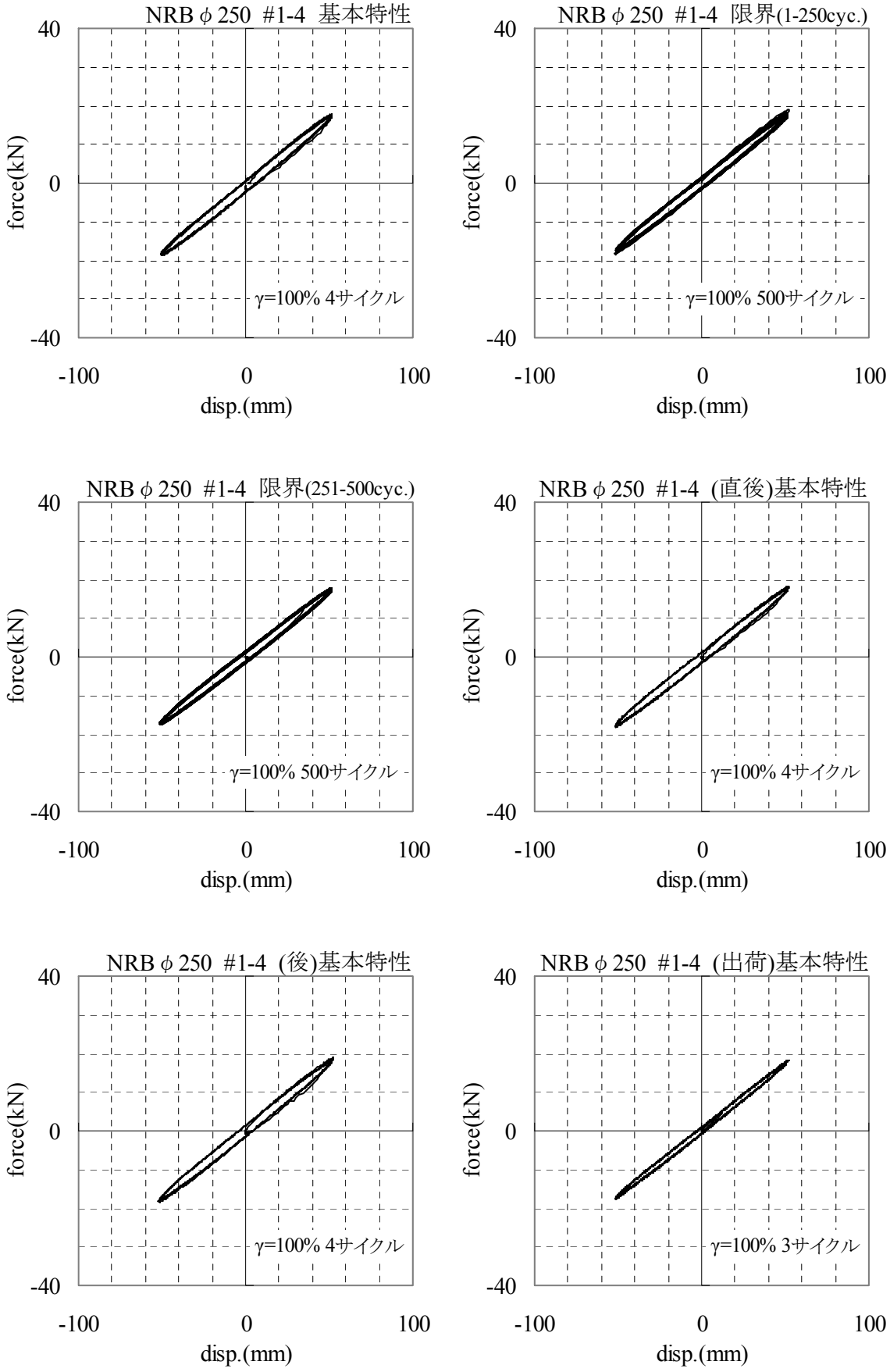
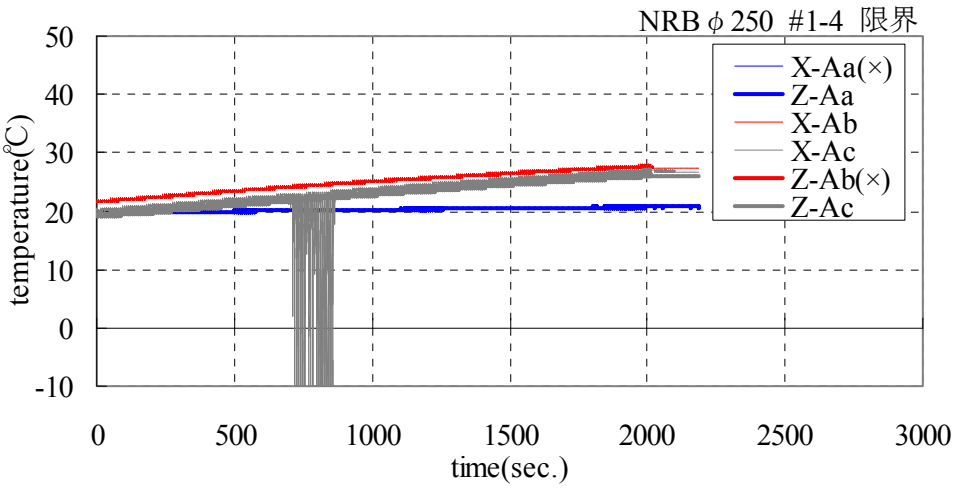
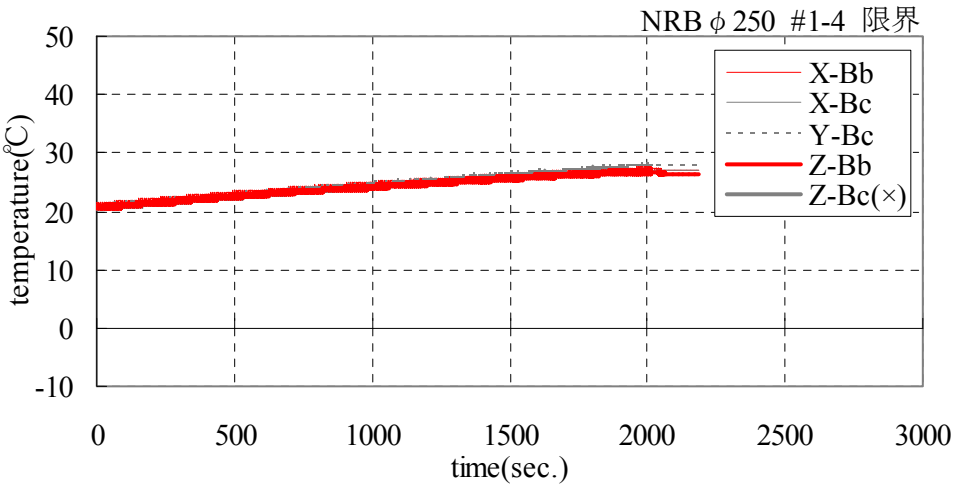


図 1.3.1-10a 荷重-変位関係（2B 相当：限界）　γ=100%（±51mm）





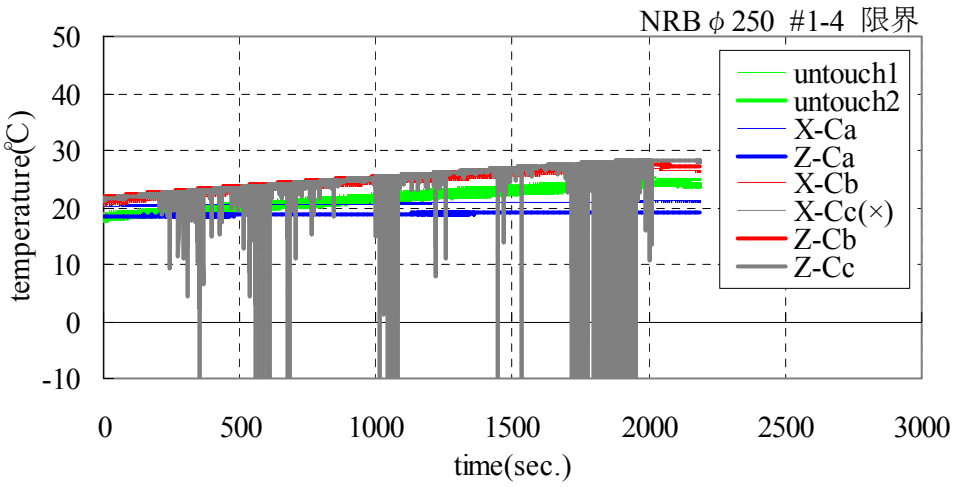


図 1.3.1-10b 温度変化（2B 相当：限界）　γ=100%（±51mm）

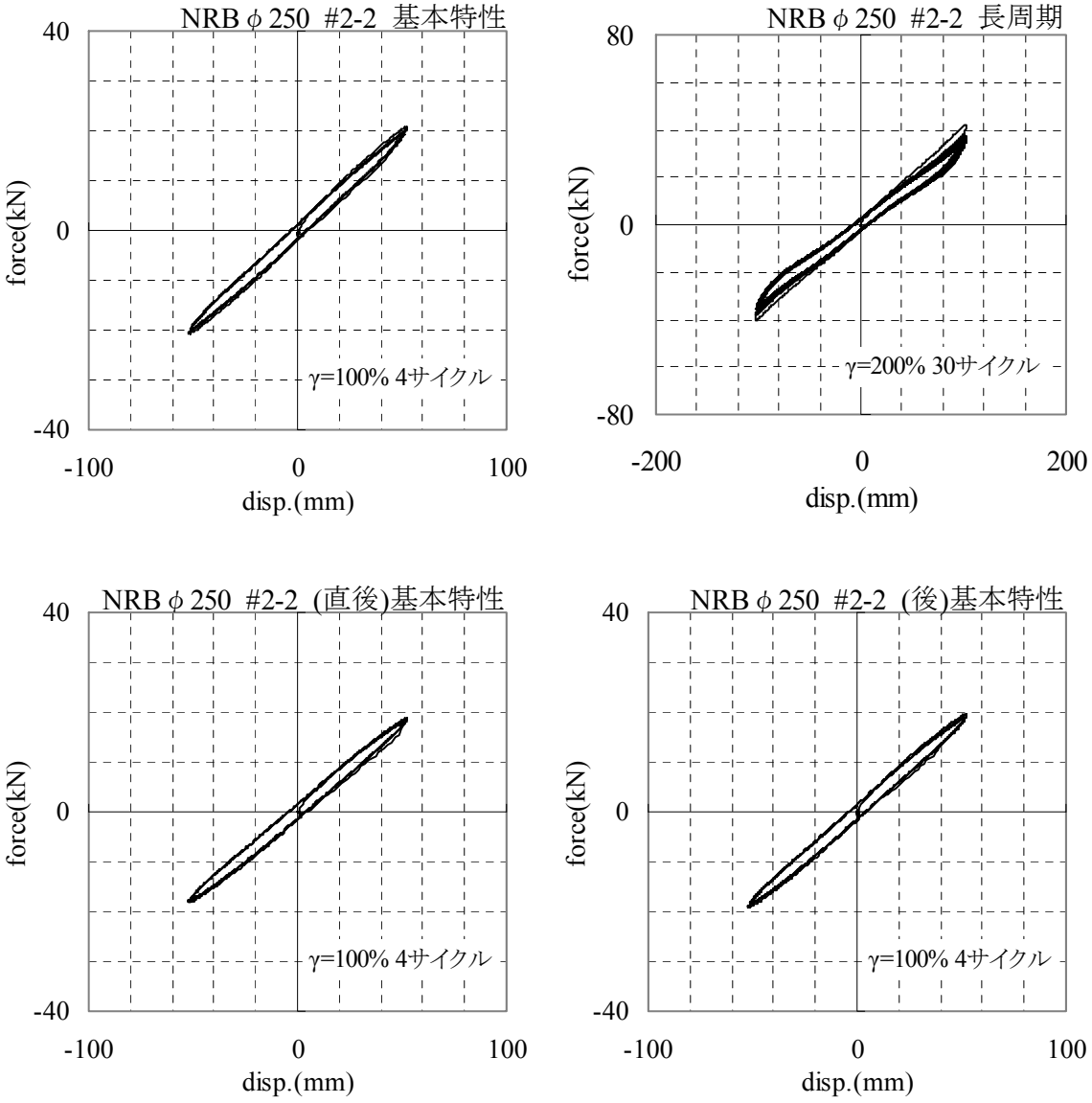
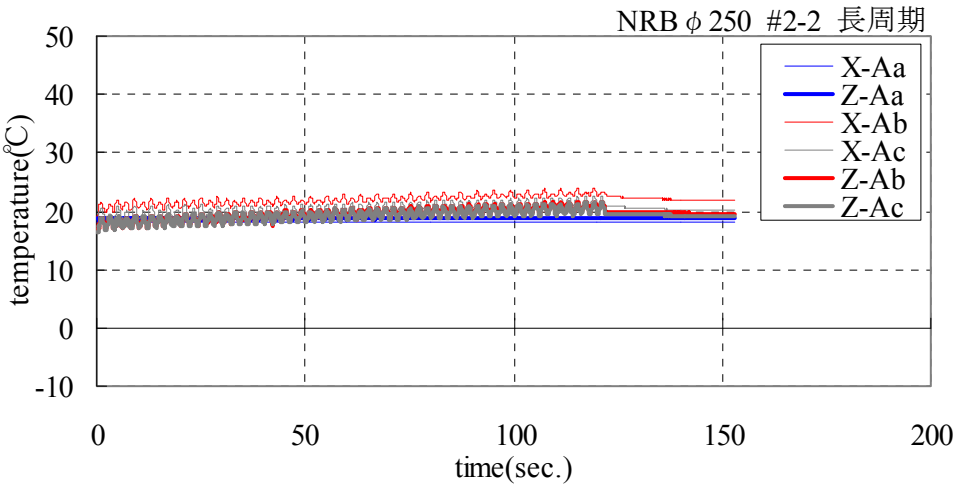
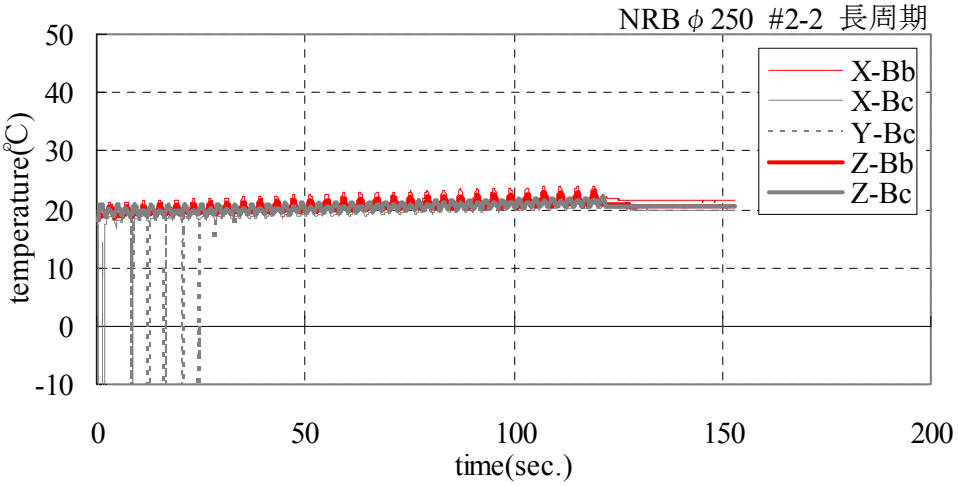


図 1.3.1-11a 荷重-変位関係（3A 相当：長周期）　γ=200%（±102mm）





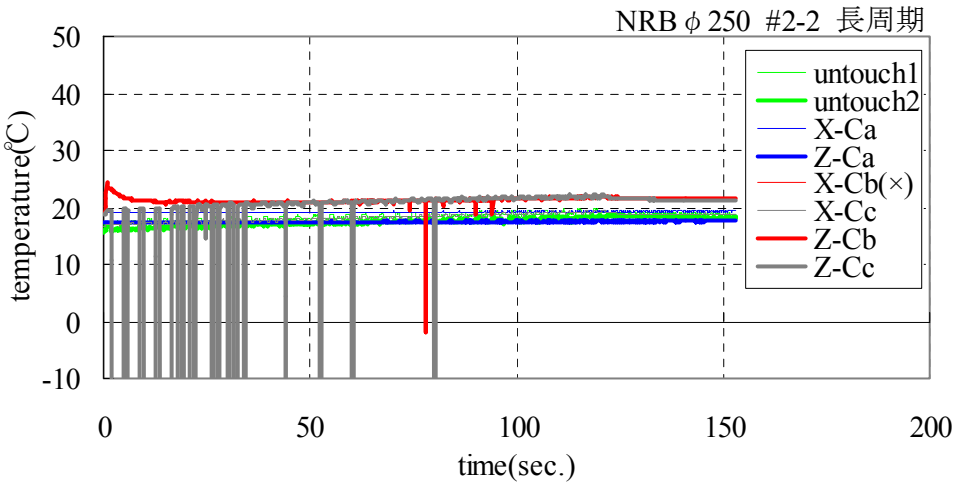
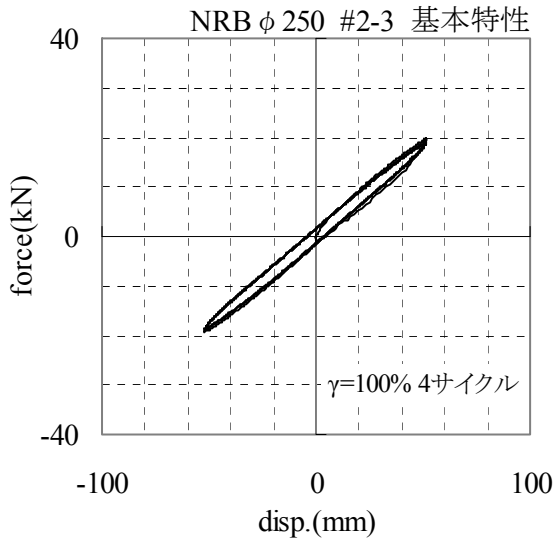
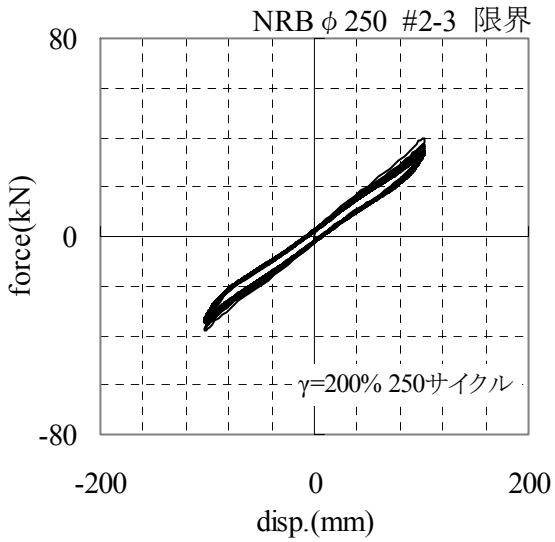


図 1.3.1-11b 温度変化（3A 相当：長周期） γ=200%（±102mm）





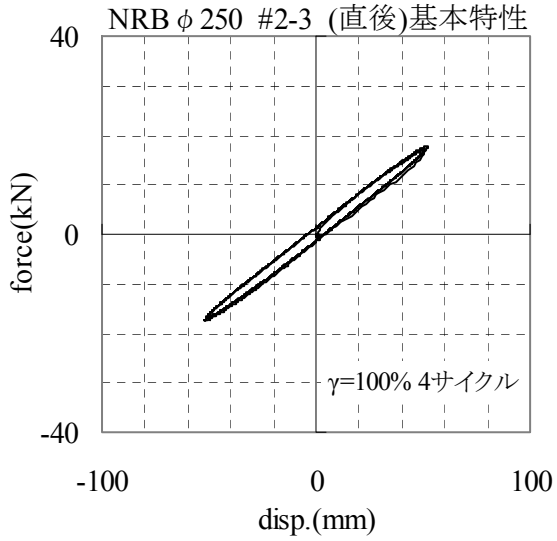
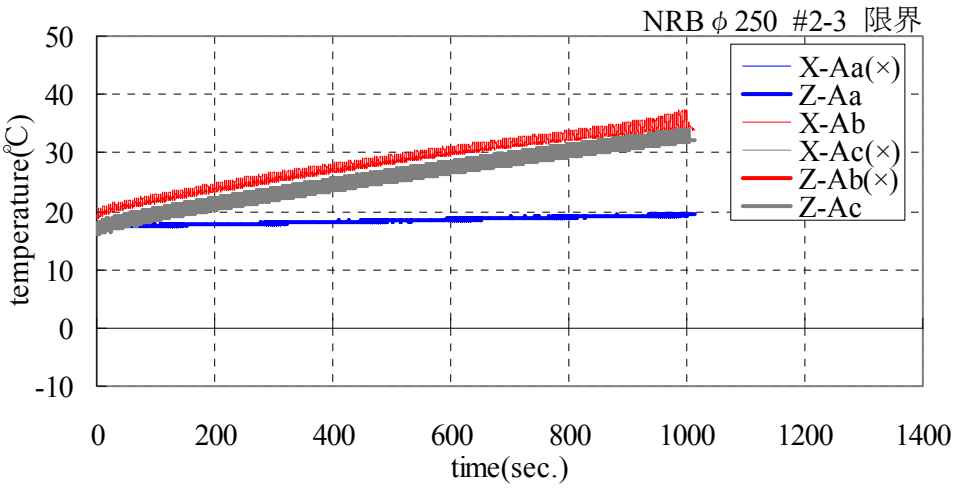
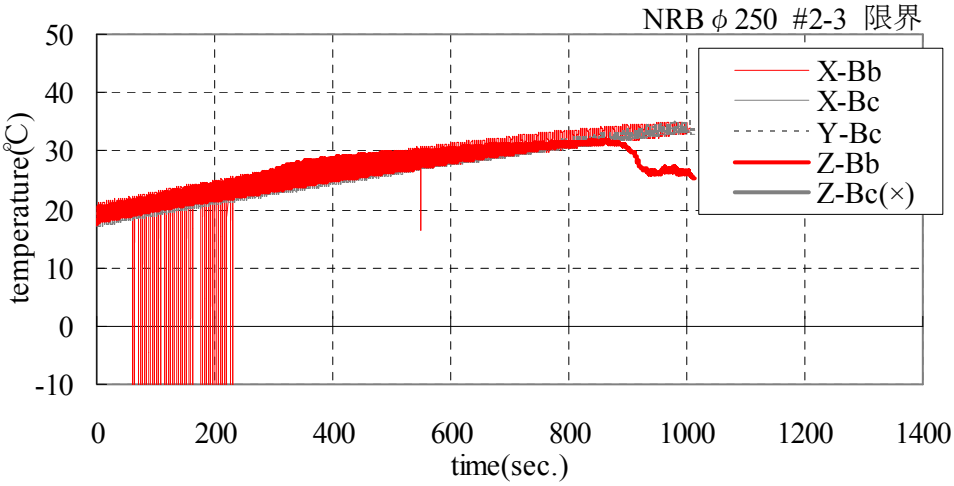


図 1.3.1-12a 荷重-変位関係（3B 相当：限界） γ=200%（±102mm）





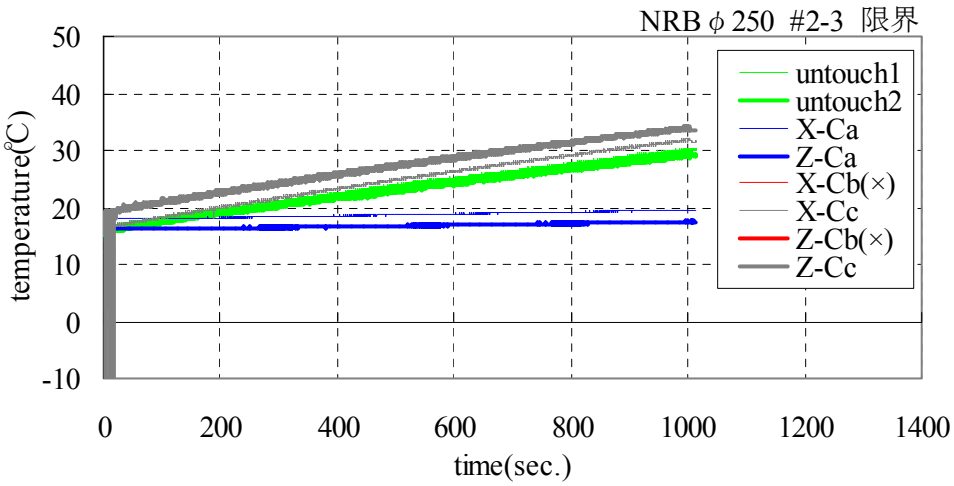


図 1.3.1-12b 温度変化（3B 相当：限界） γ=200%（±102mm）

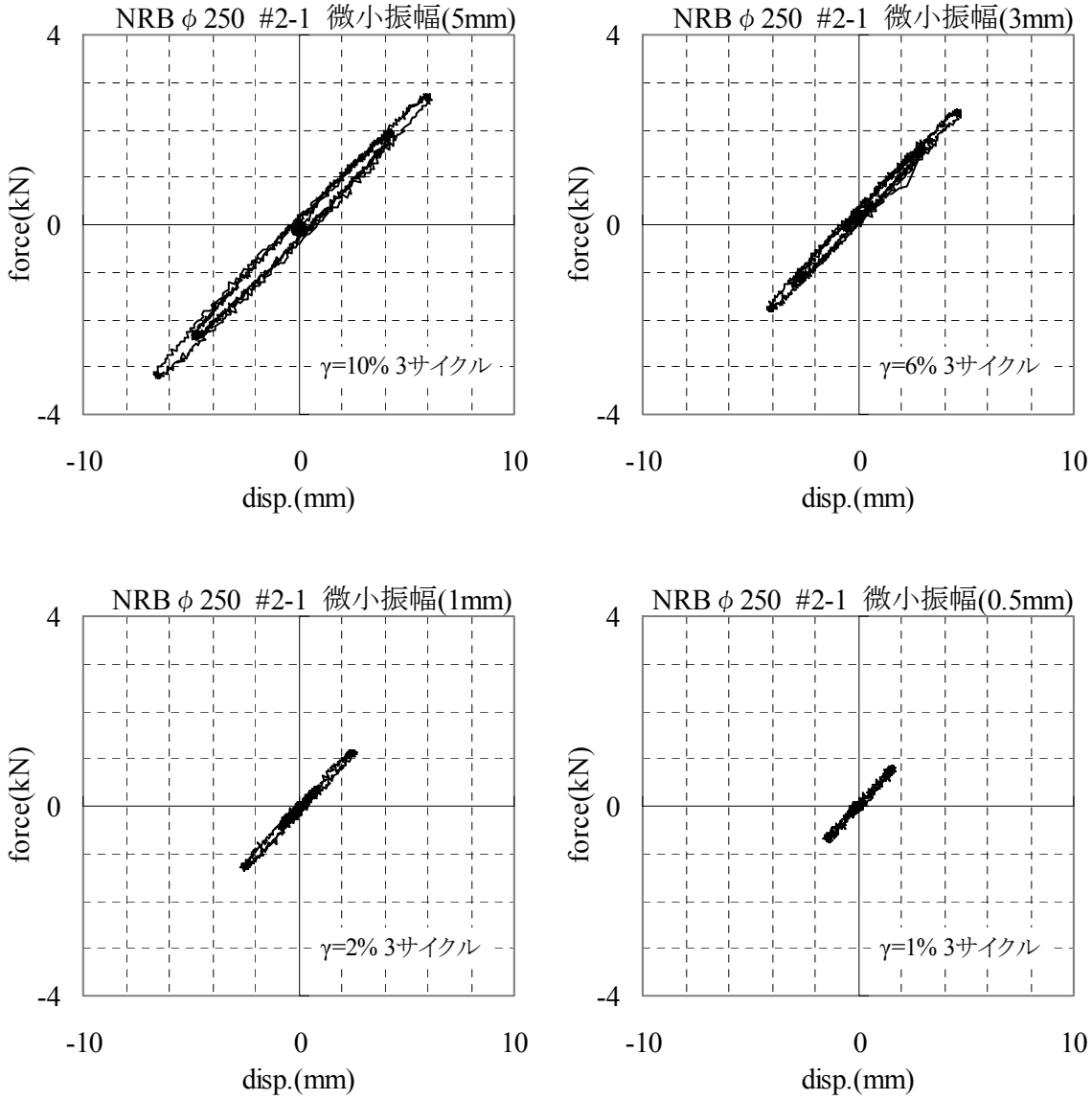
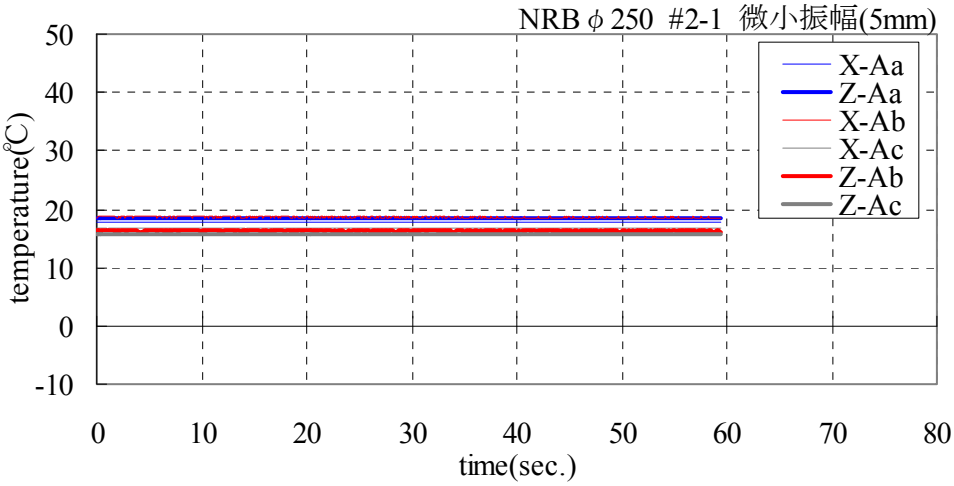
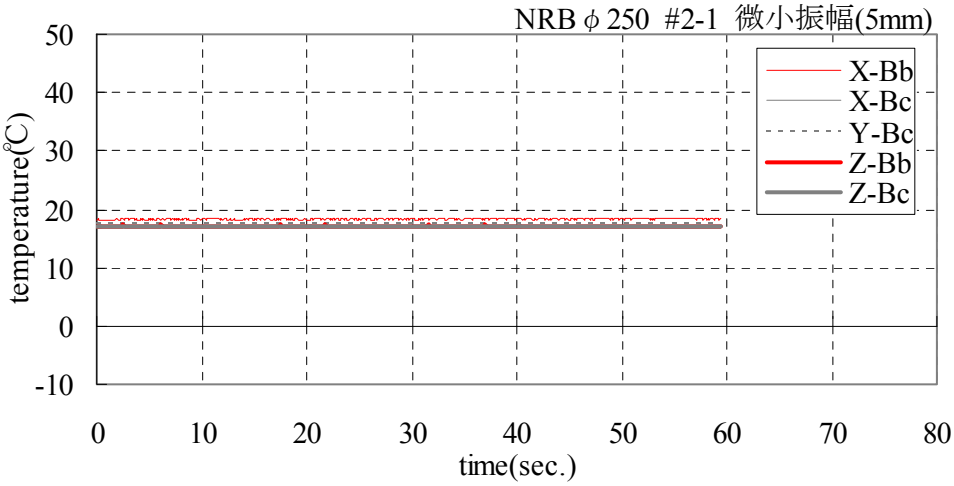


図 1.3.1-13a 荷重-変位関係（微小振幅）





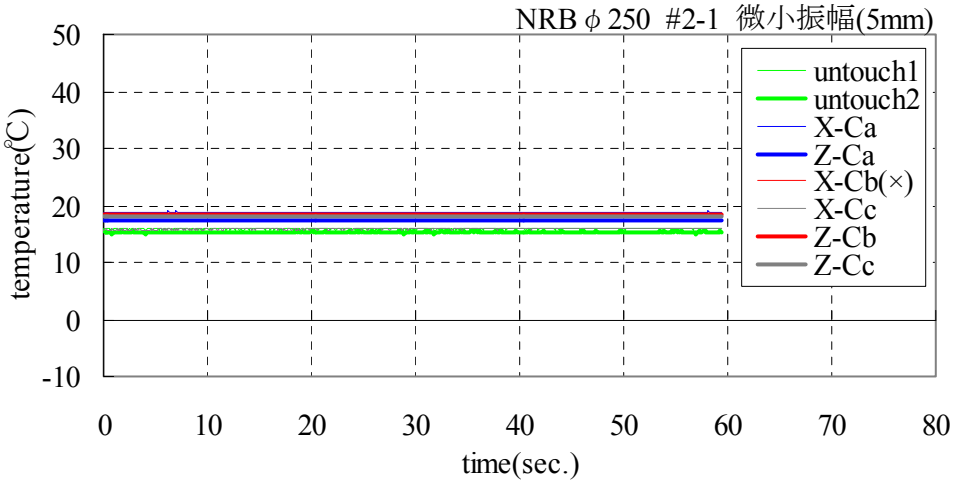
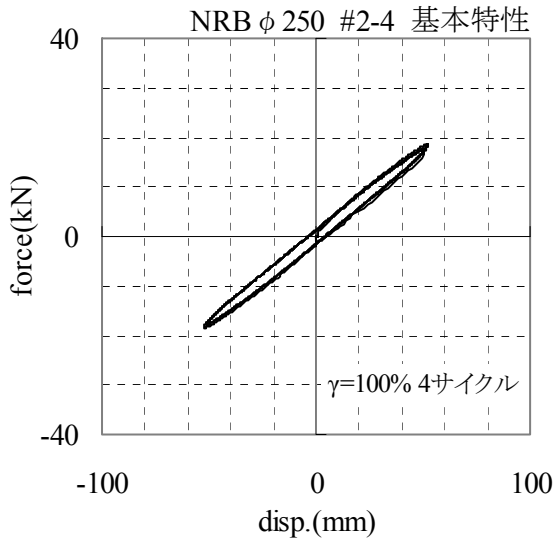
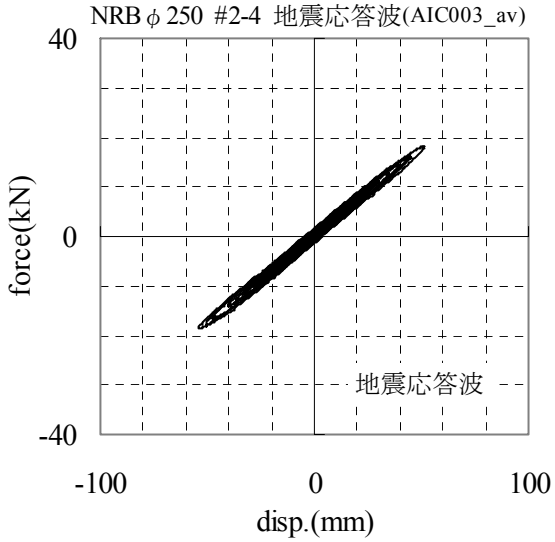
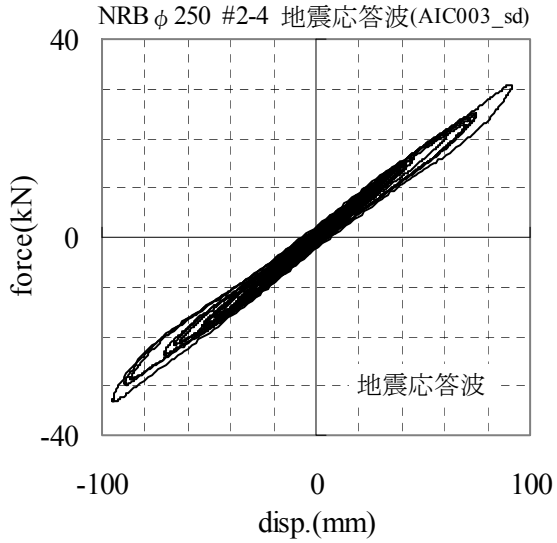
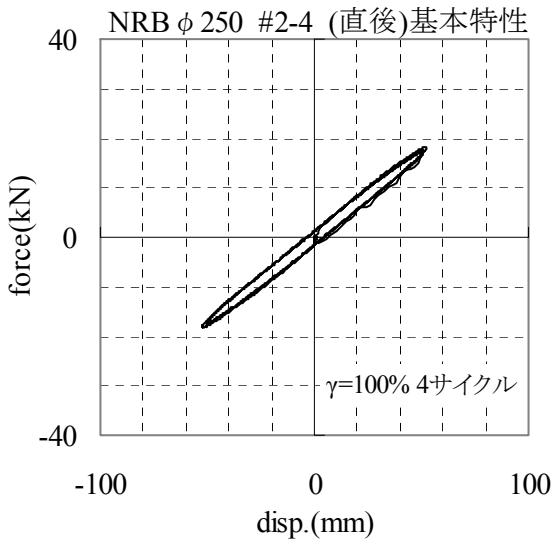


図 1.3.1-13b 温度変化（微小振幅 5mm）









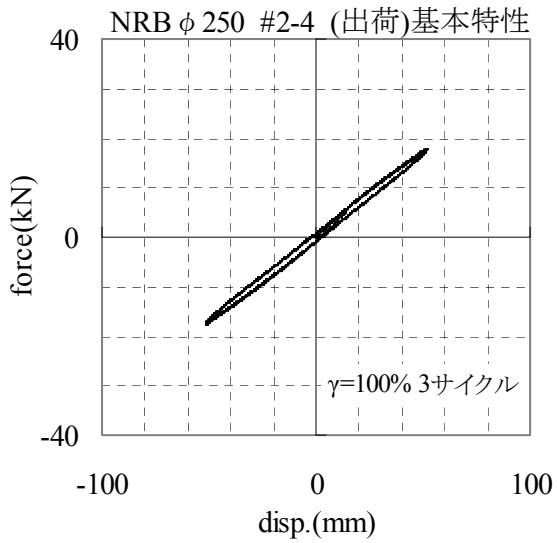
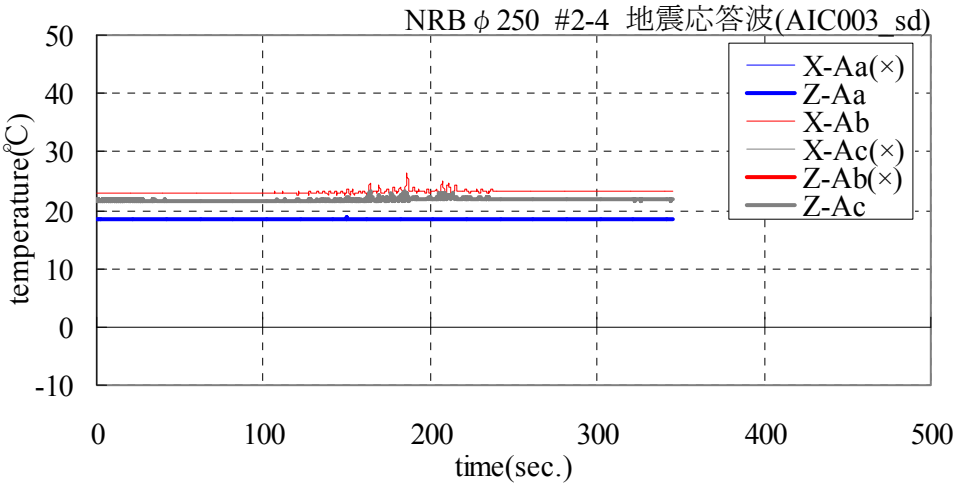
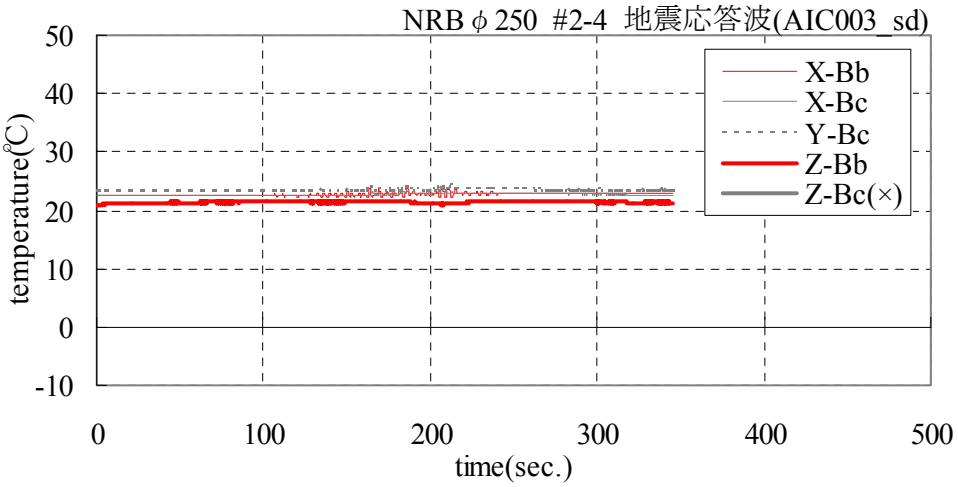


図 1.3.1-14a 荷重-変位関係（地震応答波）





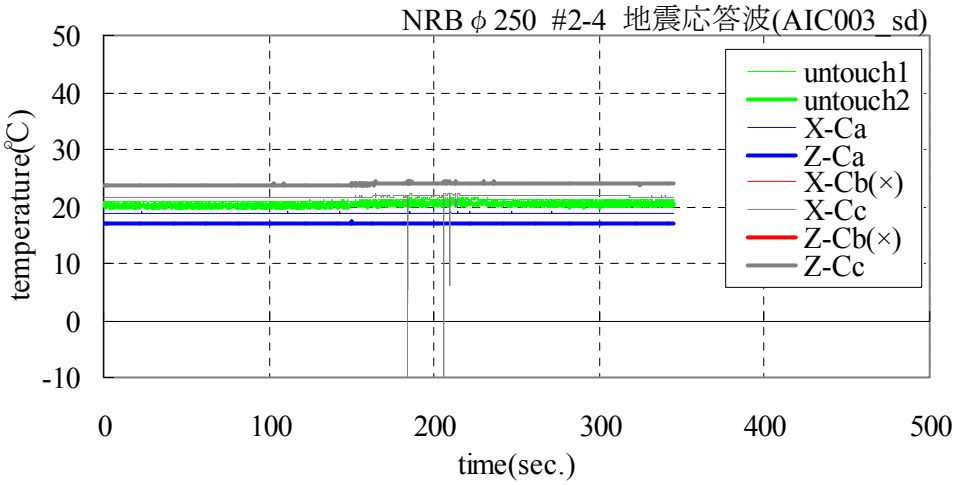


図 1.3.1-14b 温度変化（地震応答波）

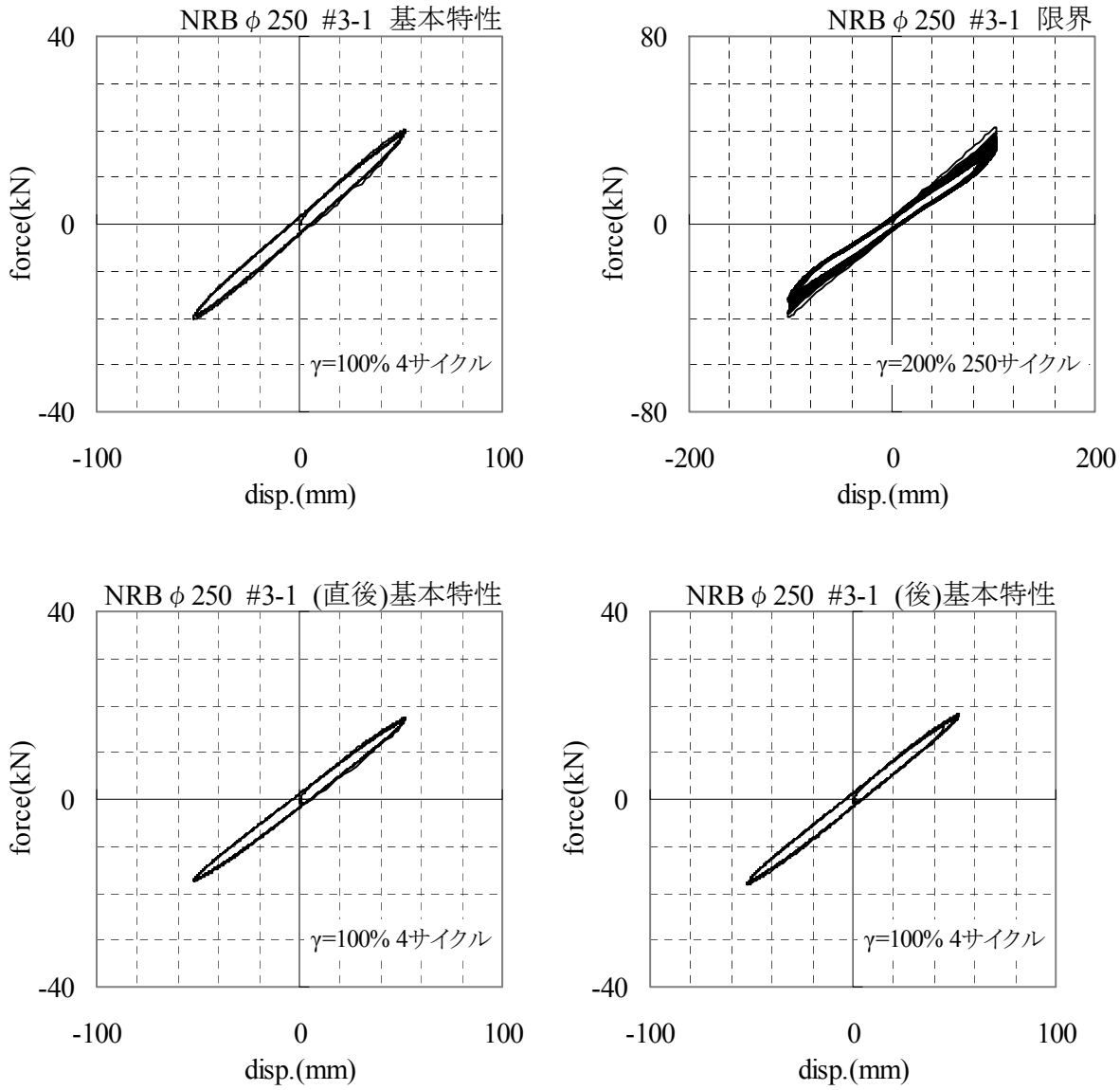
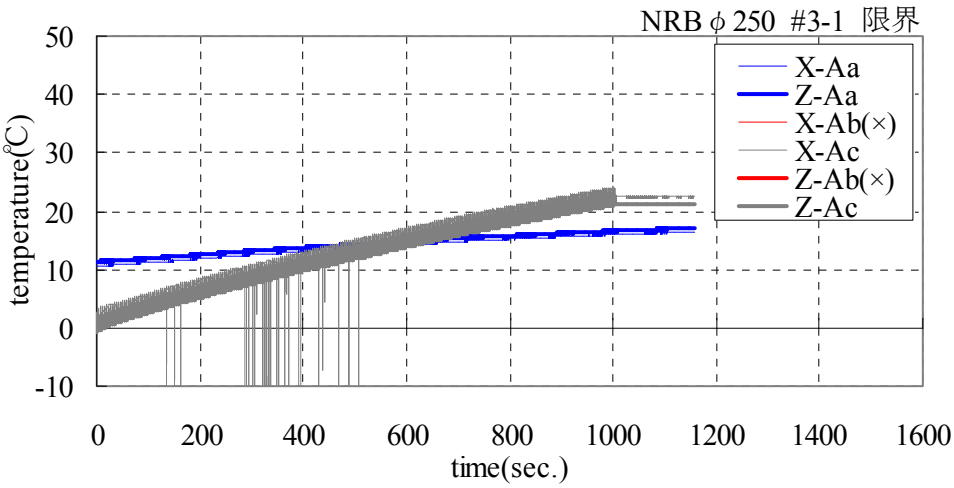
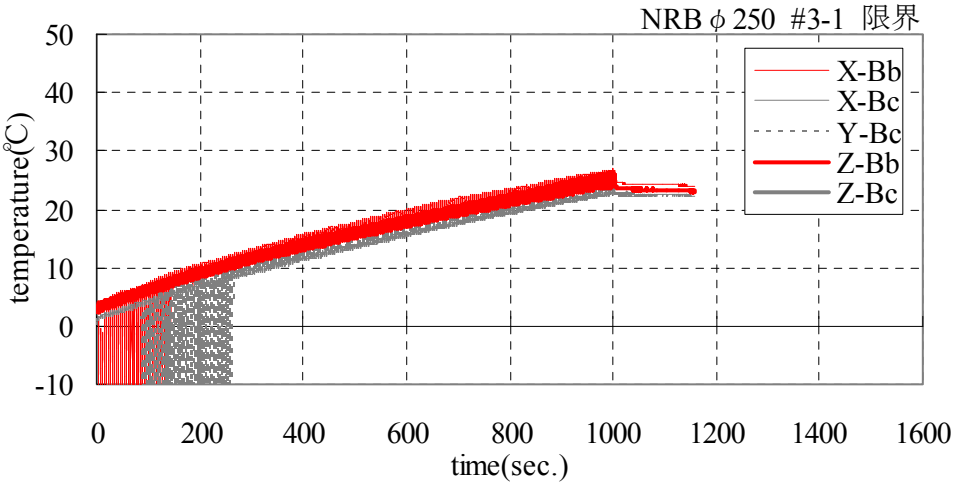


図 1.3.1-15a 荷重-変位関係（3B 相当：限界【初期温度 0℃】）　γ=200%（±102mm）





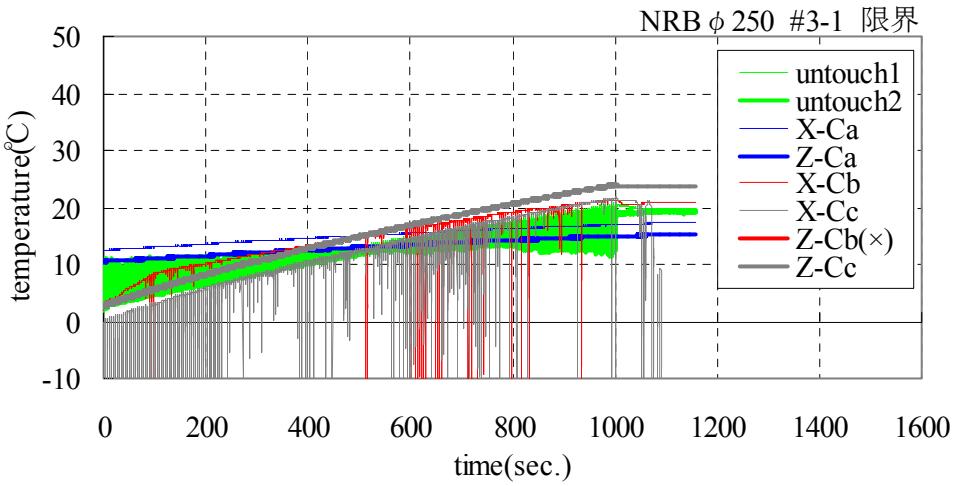
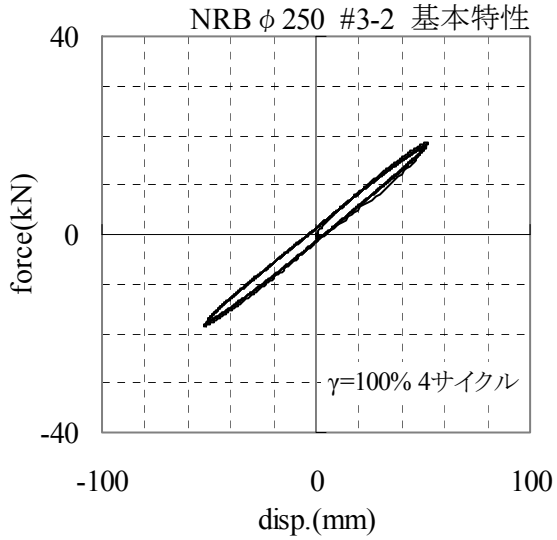
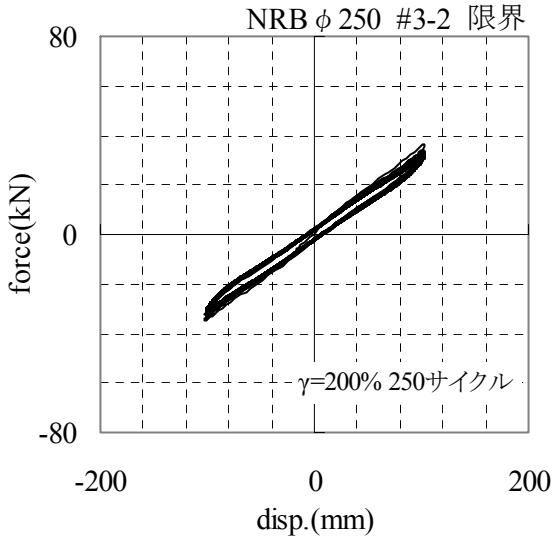
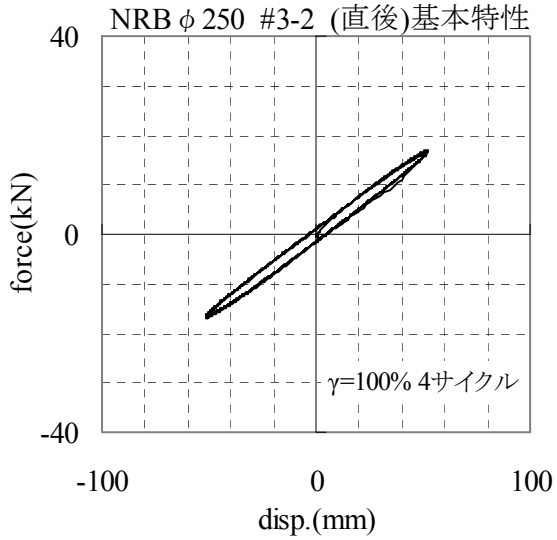
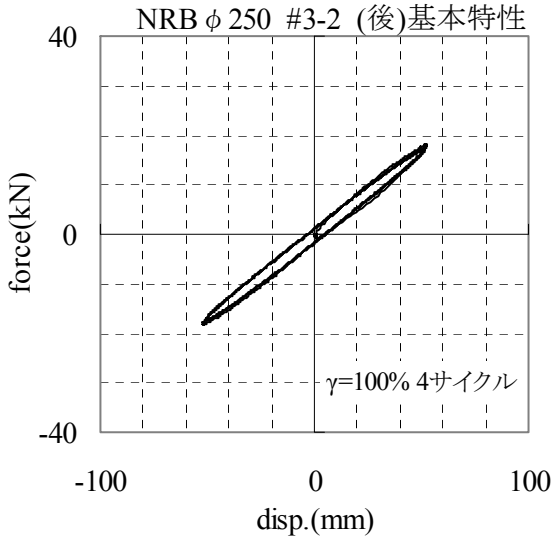


図 1.3.1-15b 温度変化（3B 相当：限界【初期温度 0℃】） γ=200%（±102mm）









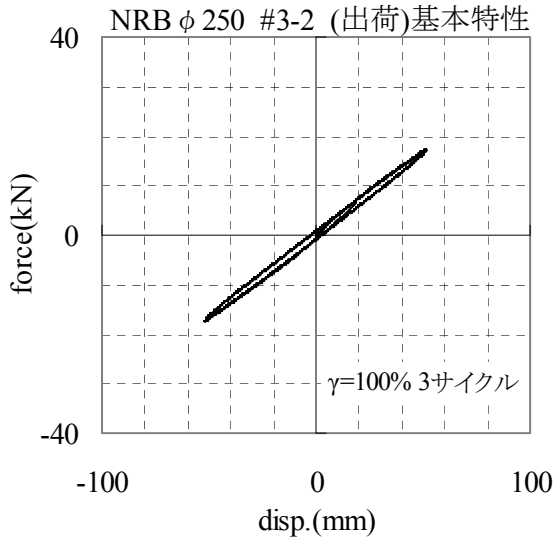
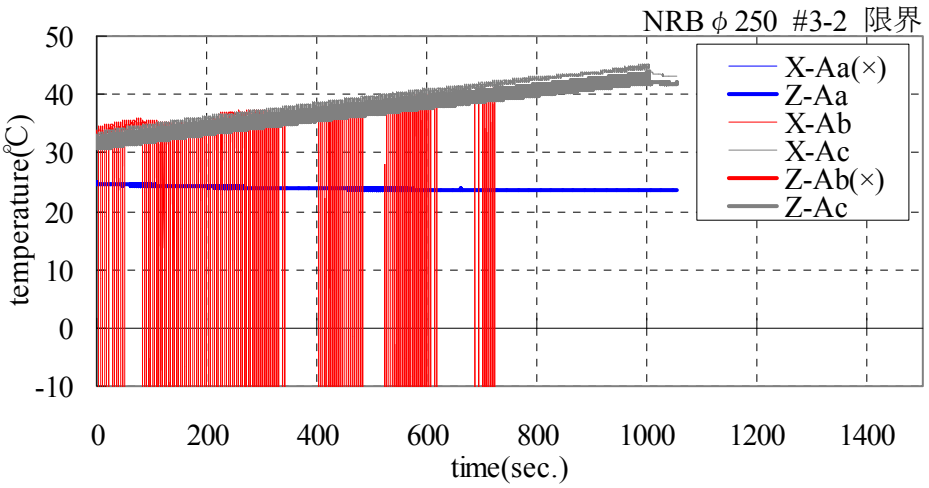
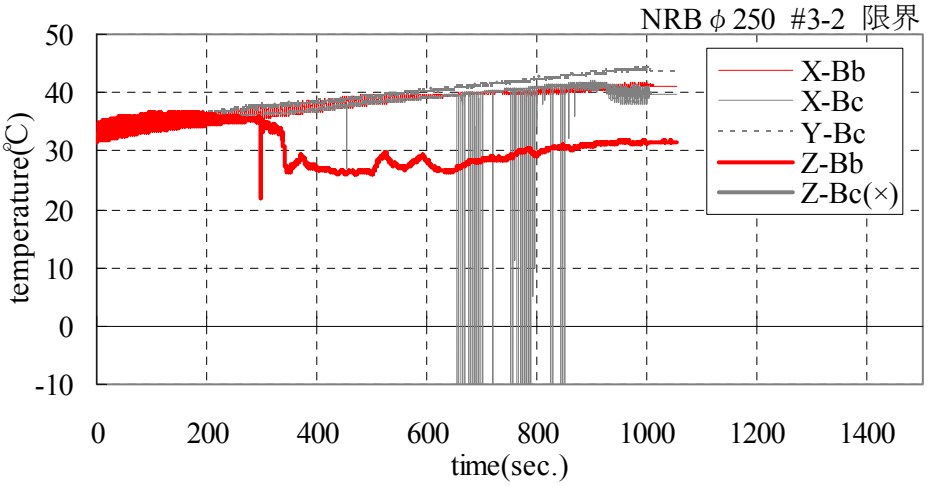


図 1.3.1-16a 荷重-変位関係（3B 相当：限界【初期温度 30℃】） γ=200%（±102mm）





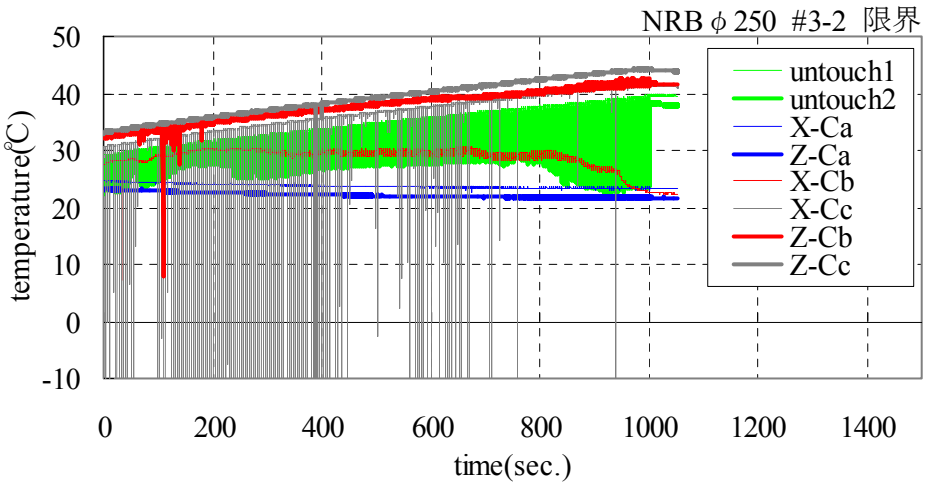
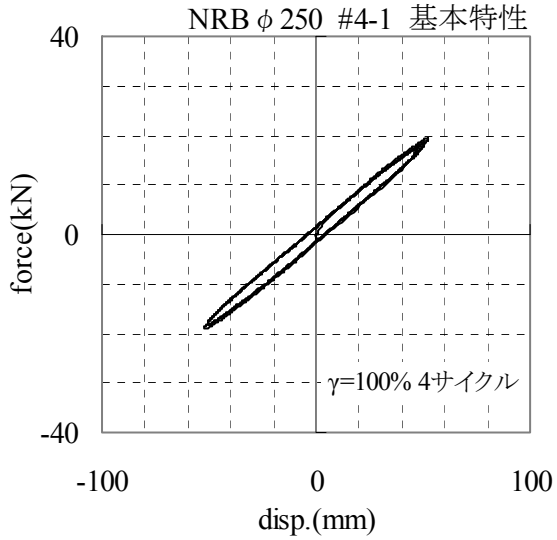
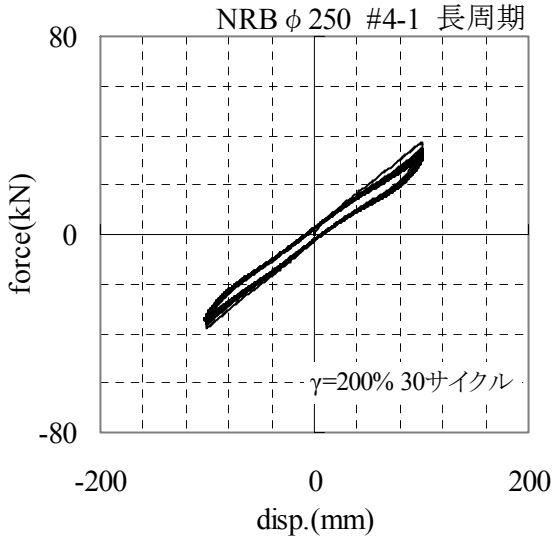


図 1.3.1-16b 温度変化（3B 相当：限界【初期温度 30℃】） γ=200%（±102mm）





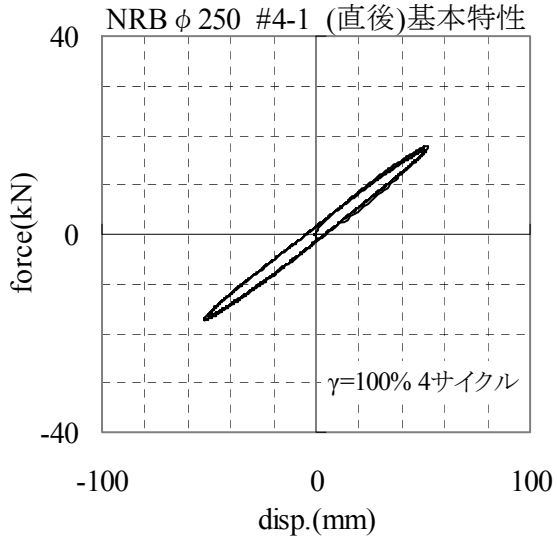
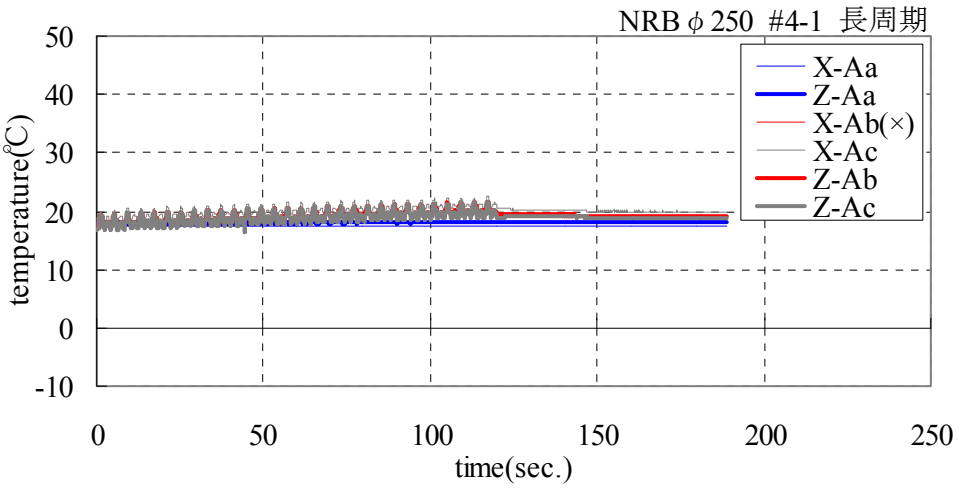
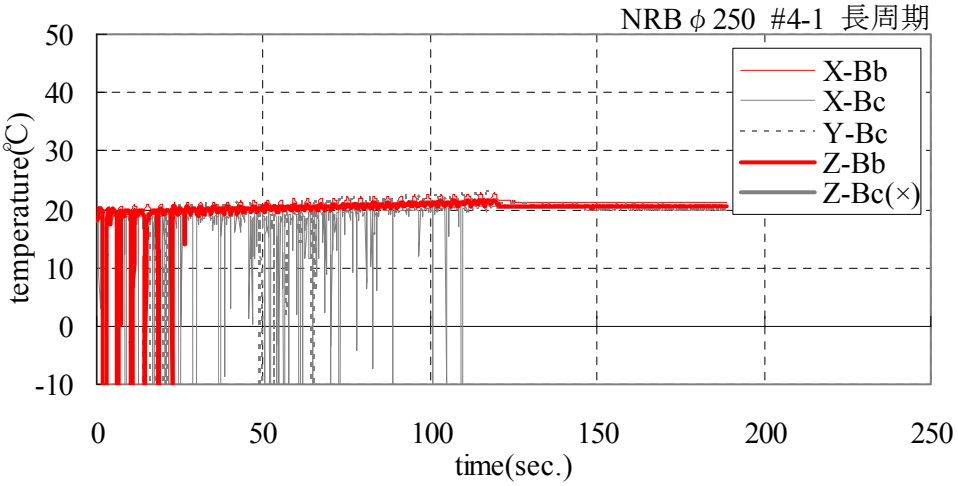


図 1.3.1-17a 荷重-変位関係（3A 相当：長周期）　γ=200%（±102mm）





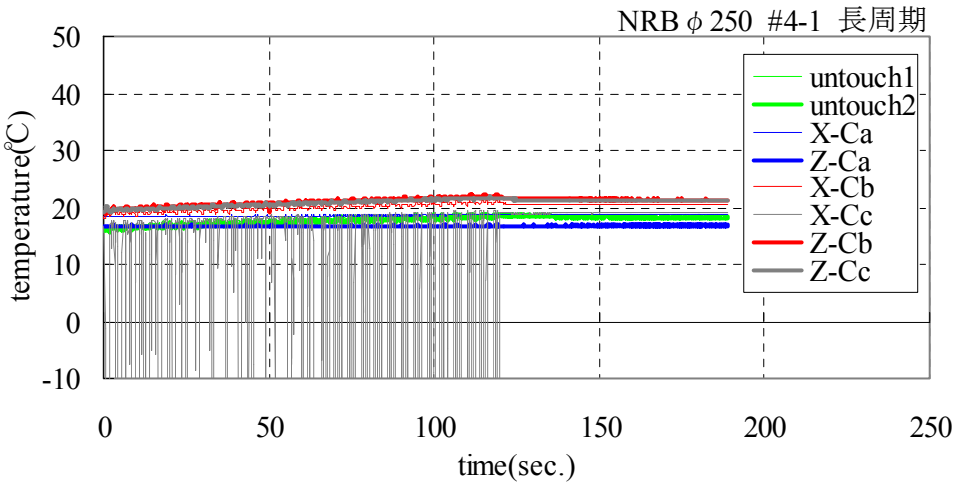
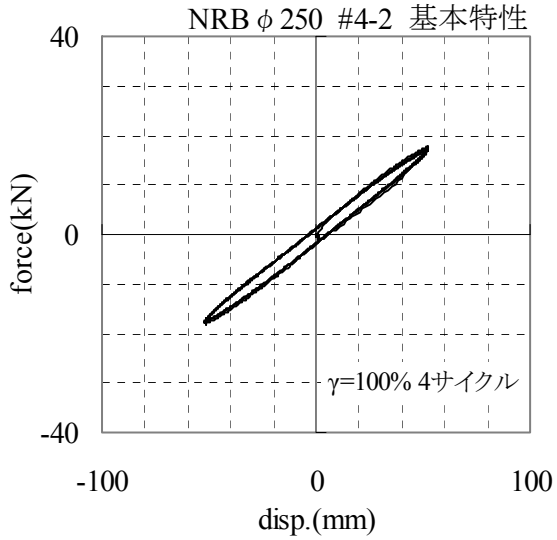
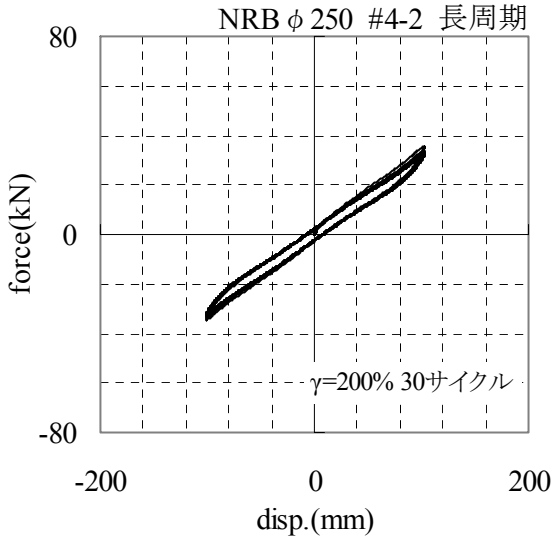


図 1.3.1-17b 温度変化（3A 相当：長周期） γ=200%（±102mm）





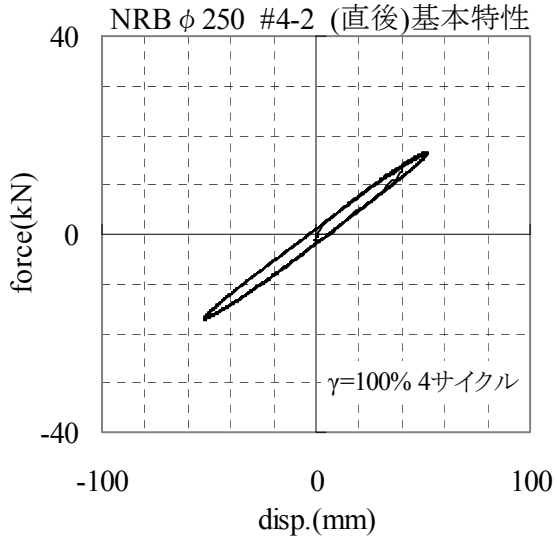
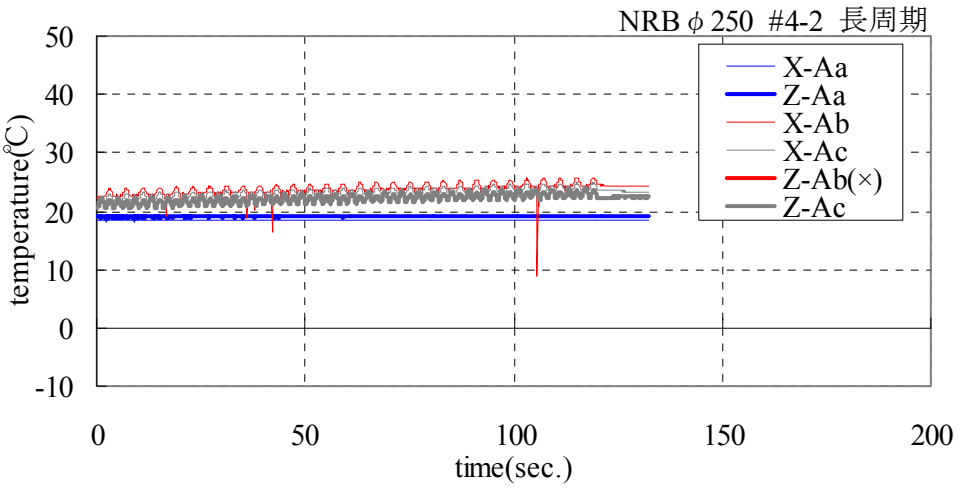
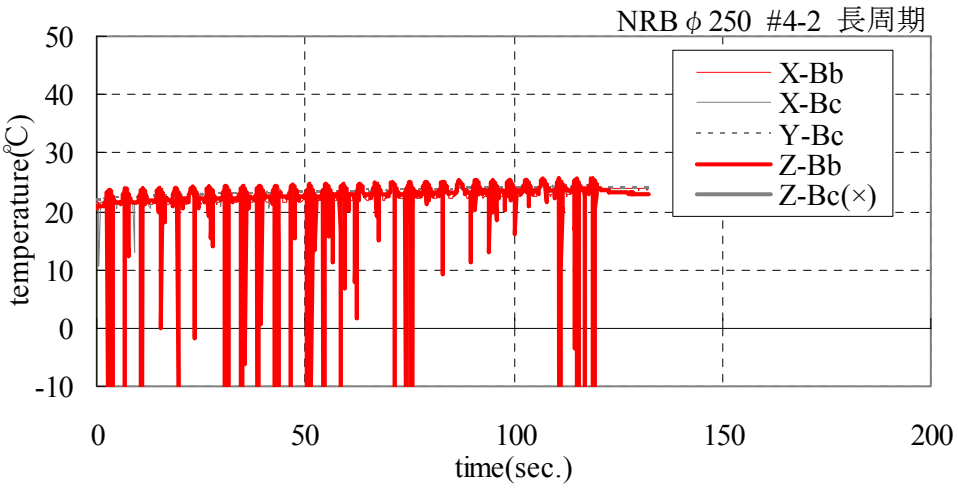


図 1.3.1-18a 荷重-変位関係（3A 相当：長周期）　γ=200%（±102mm）





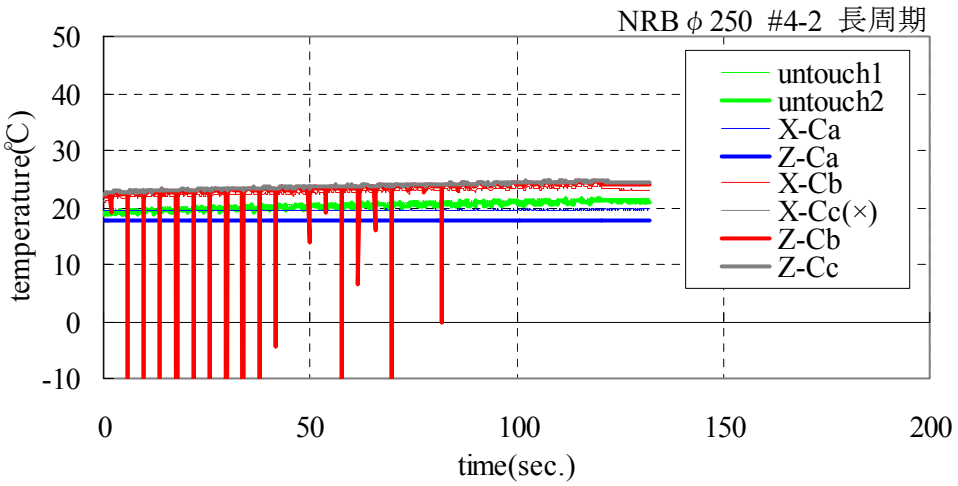
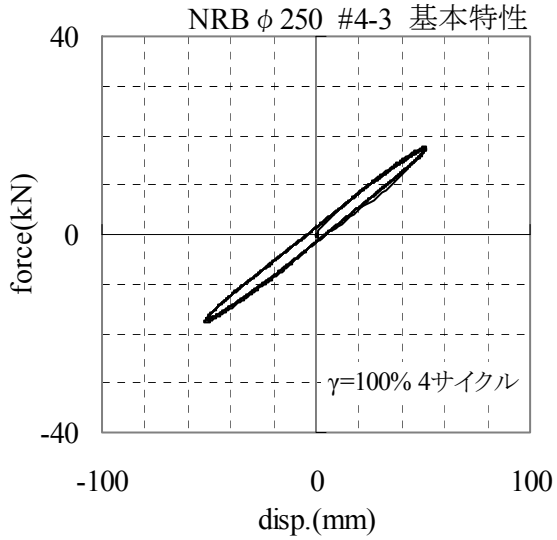
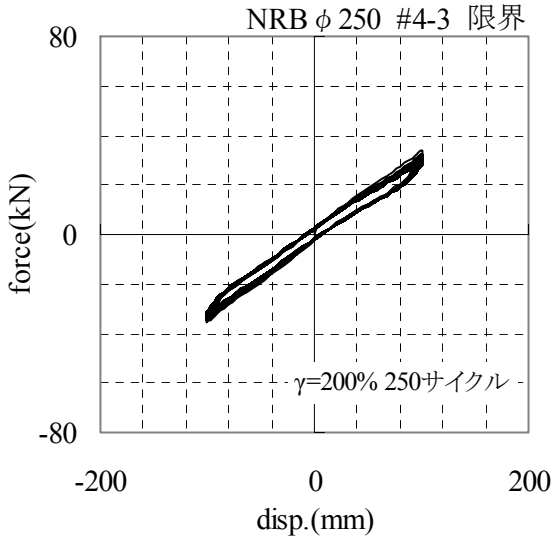


図 1.3.1-18b 温度変化（3A 相当：長周期） γ=200%（±102mm）





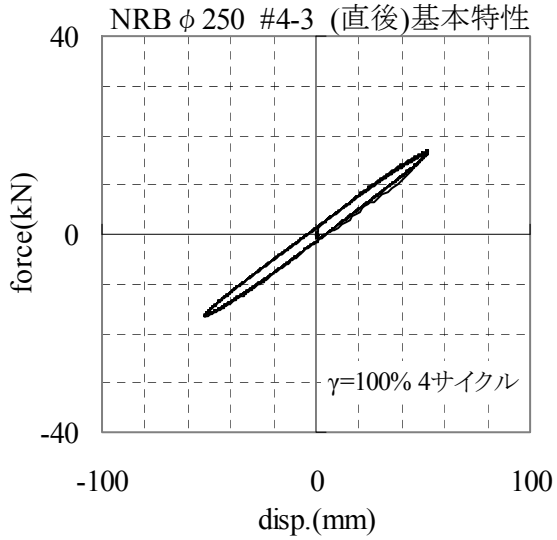
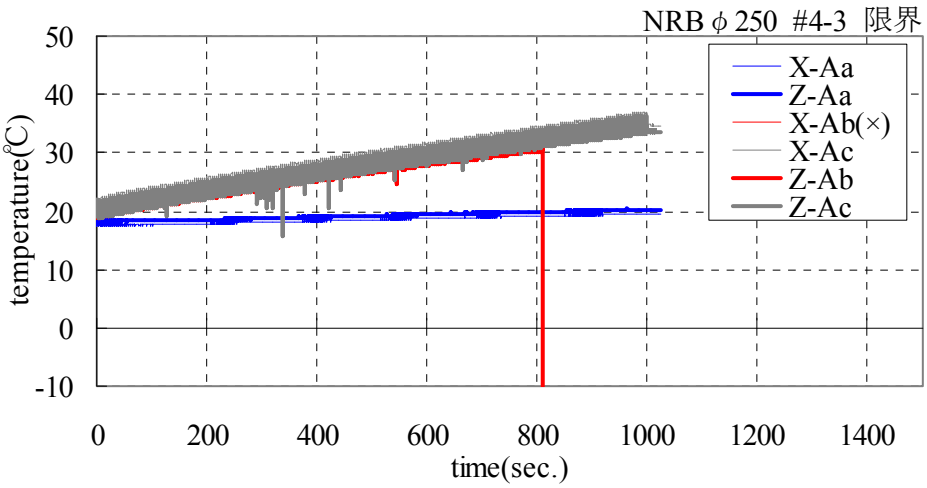
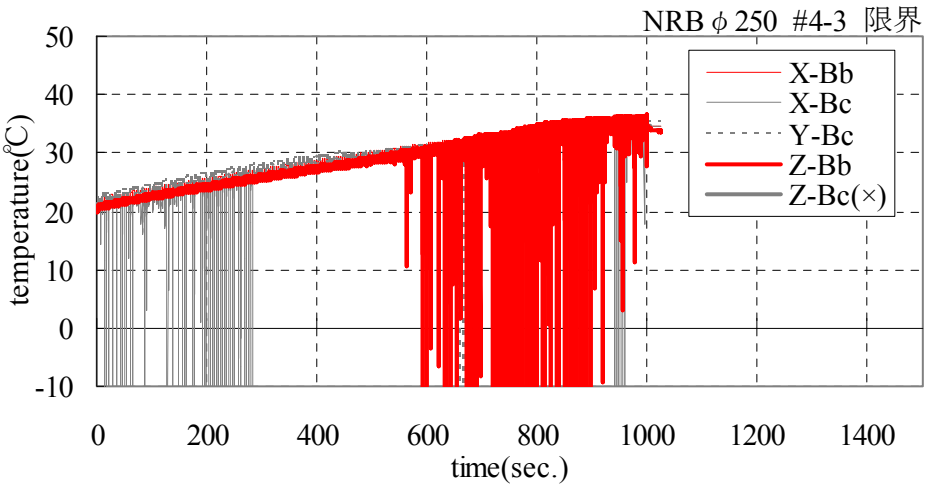


図 1.3.1-19a 荷重-変位関係（3B 相当：限界）　γ=200%（±102mm）





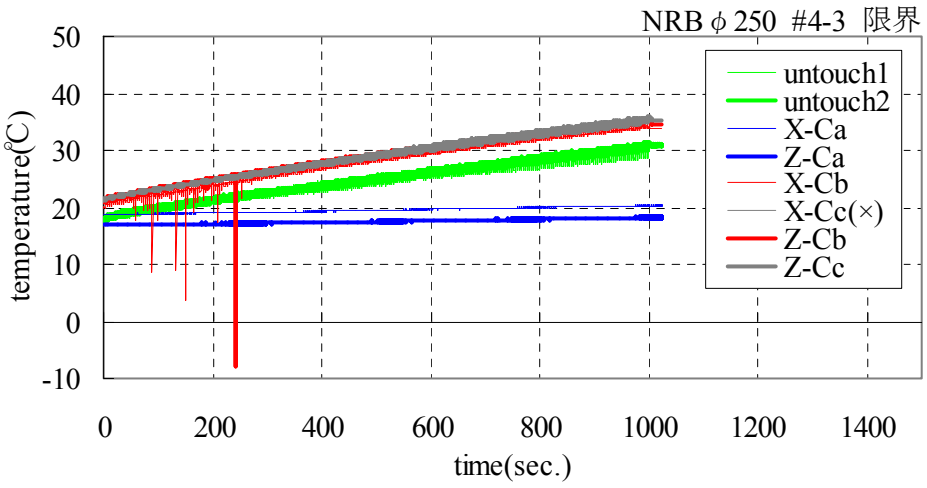
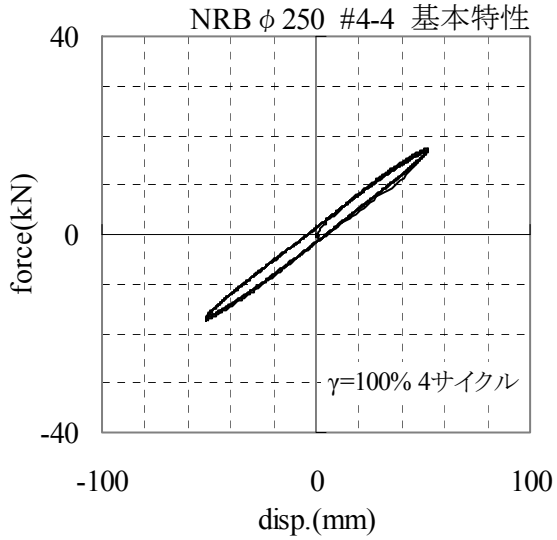
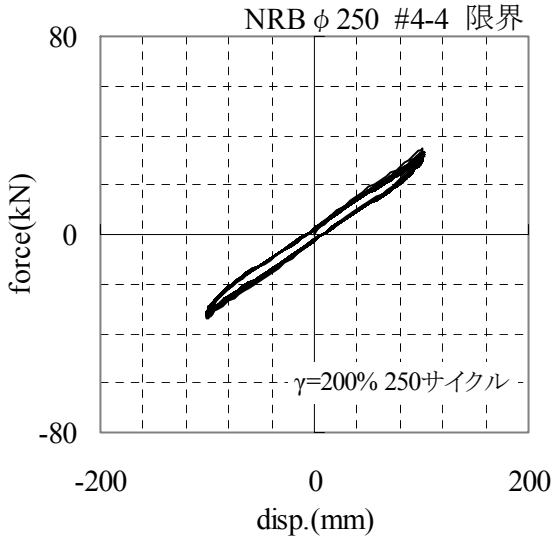
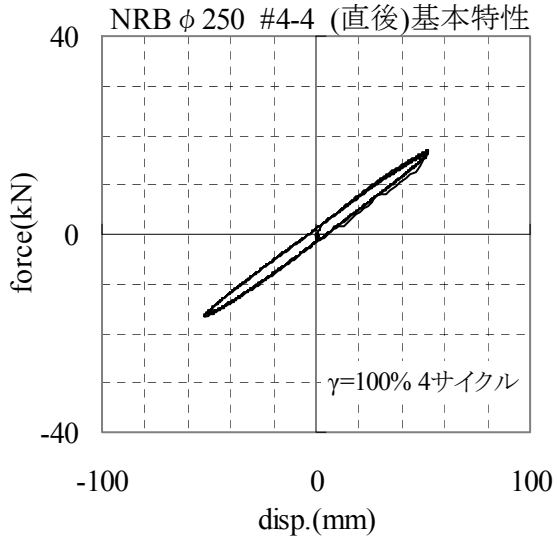
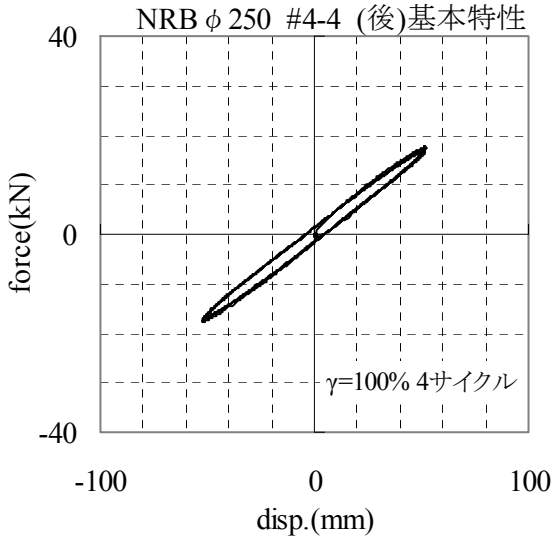


図 1.3.1-19b 温度変化（3B 相当：限界） γ=200%（±102mm）









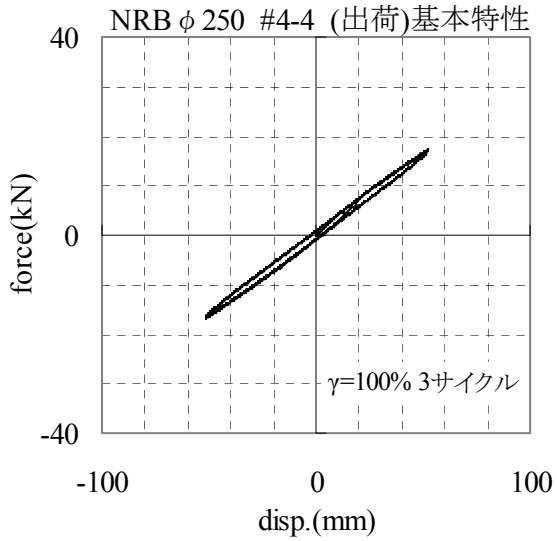
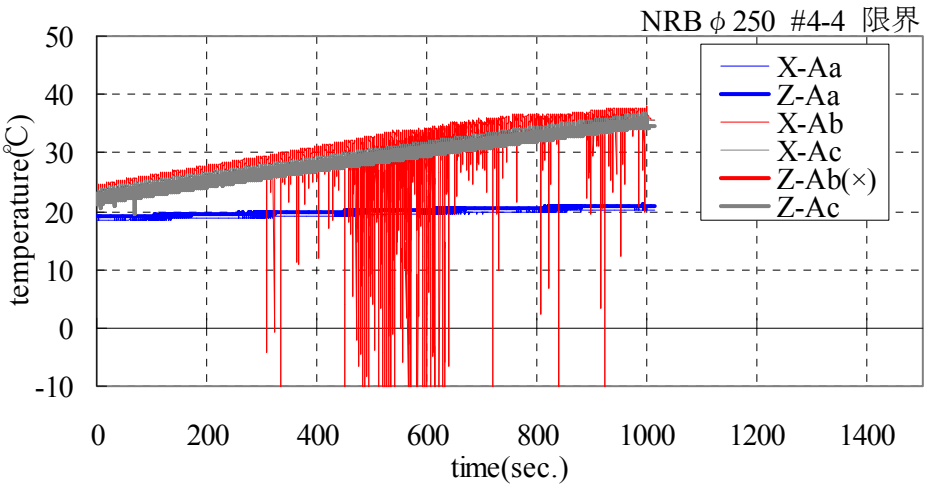
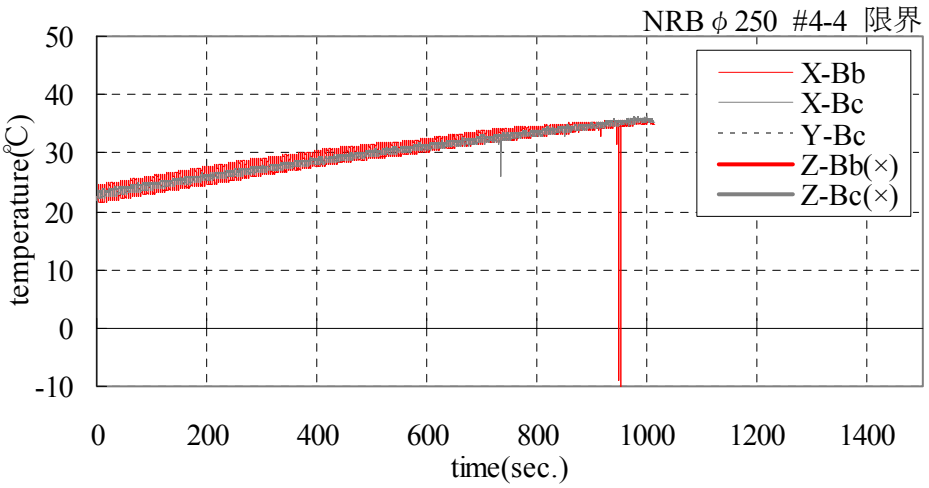


図 1.3.1-20a 荷重-変位関係（3B 相当：限界）　γ=200%（±102mm）





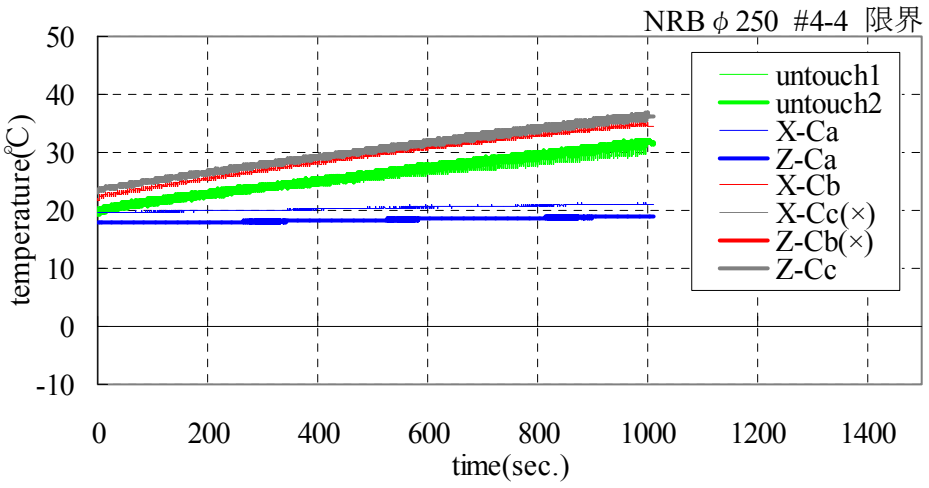


図 1.3.1-20b 温度変化（3B 相当：限界） γ=200%（±102mm）

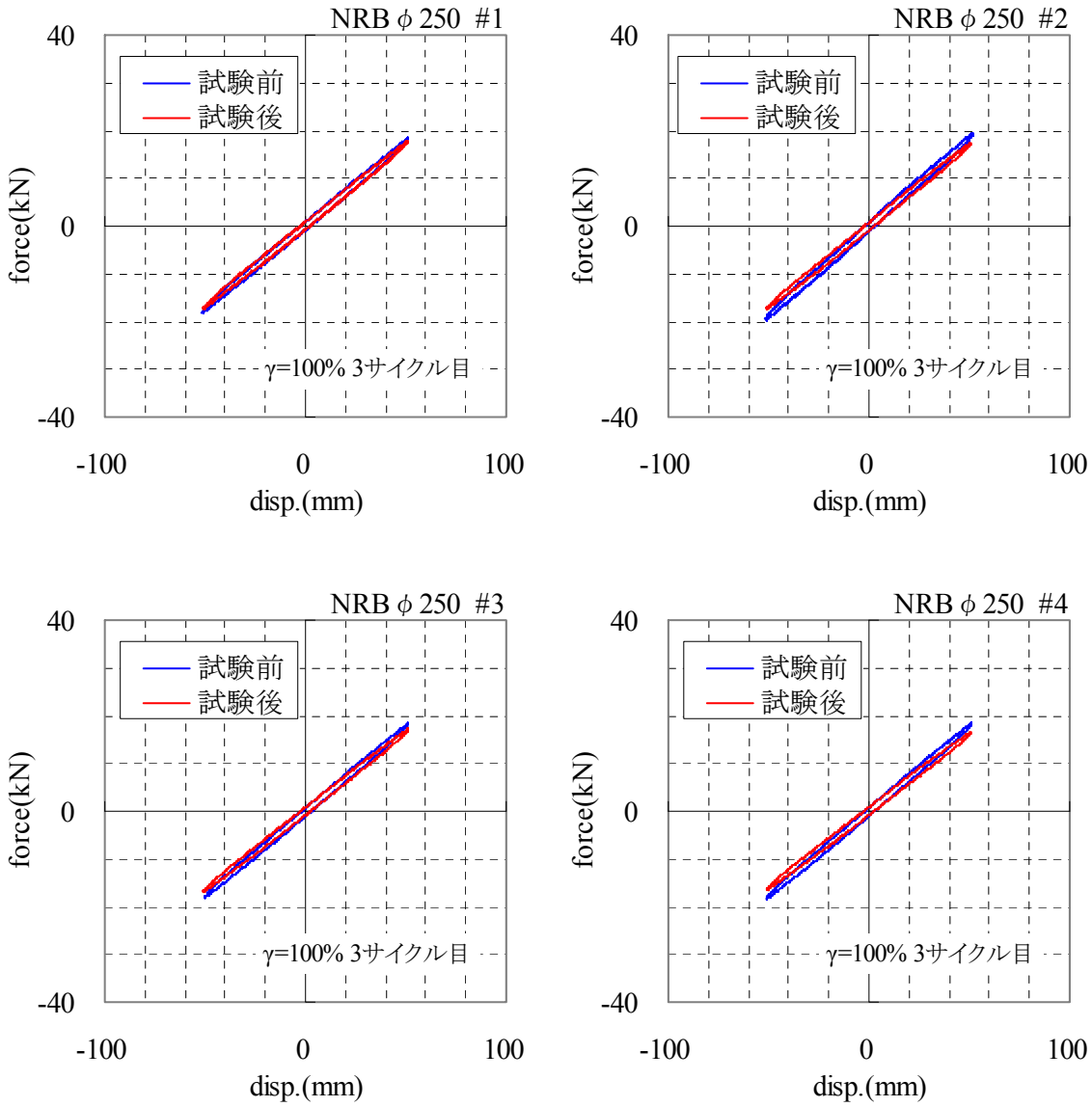


図 1.3.1-21 試験体毎の荷重-変位関係（基本特性） γ=100%

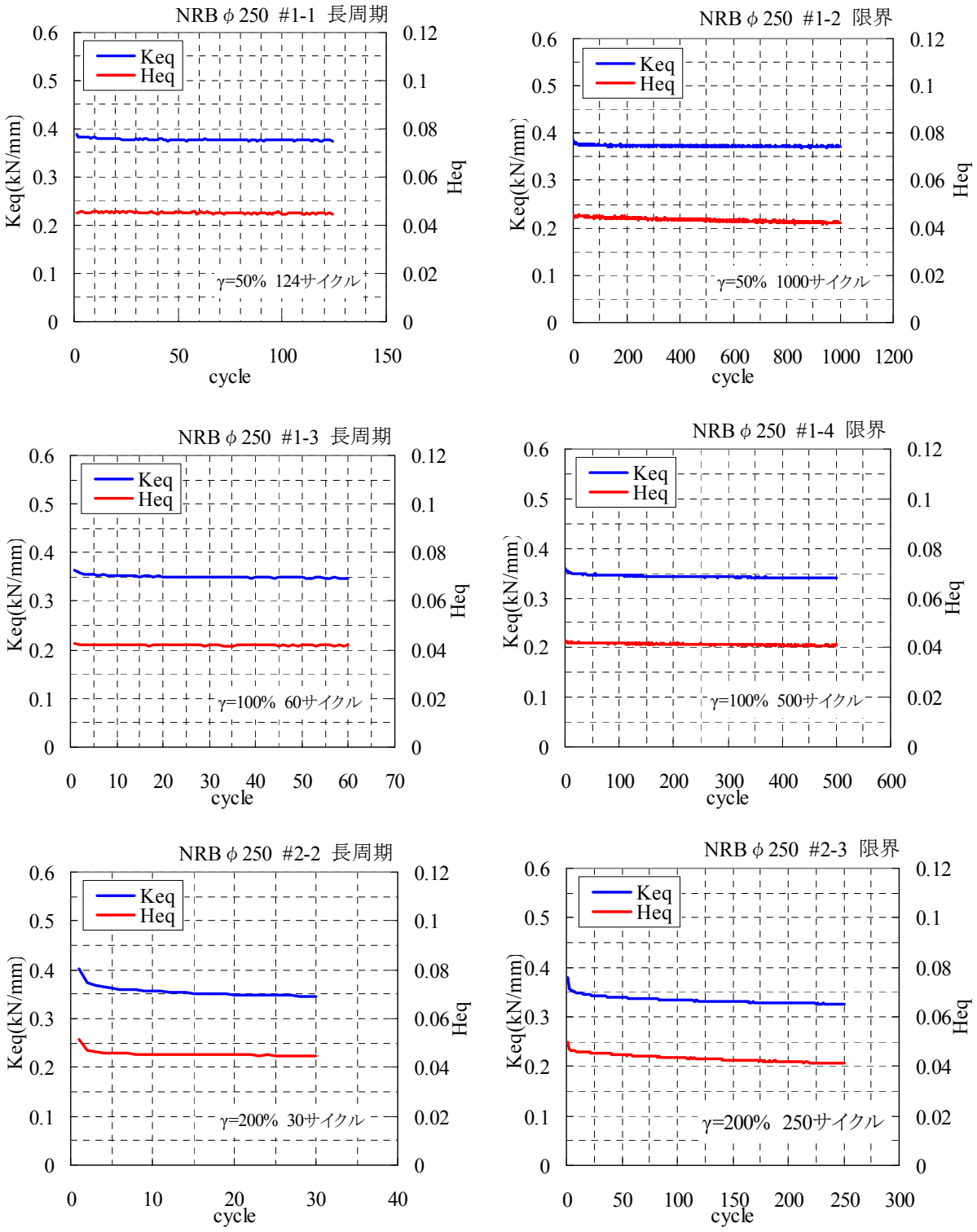


図 1.3.1-22　*Kh*、*Heq* の変化　γ=50%,100%,200%

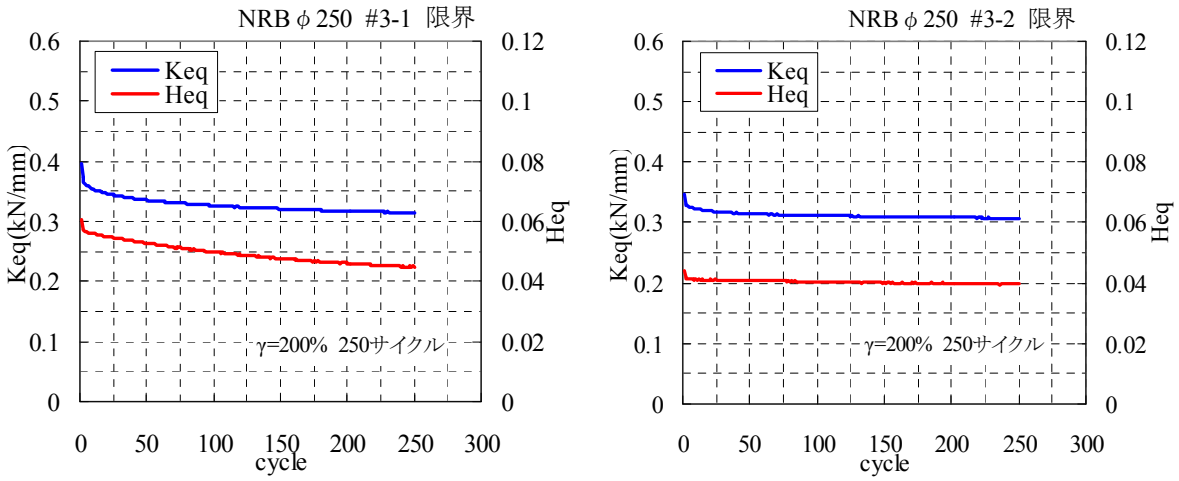


図 1.3.1-23 *Kh*、*Heq* の変化【初期温度 0℃、30℃】 γ=200%

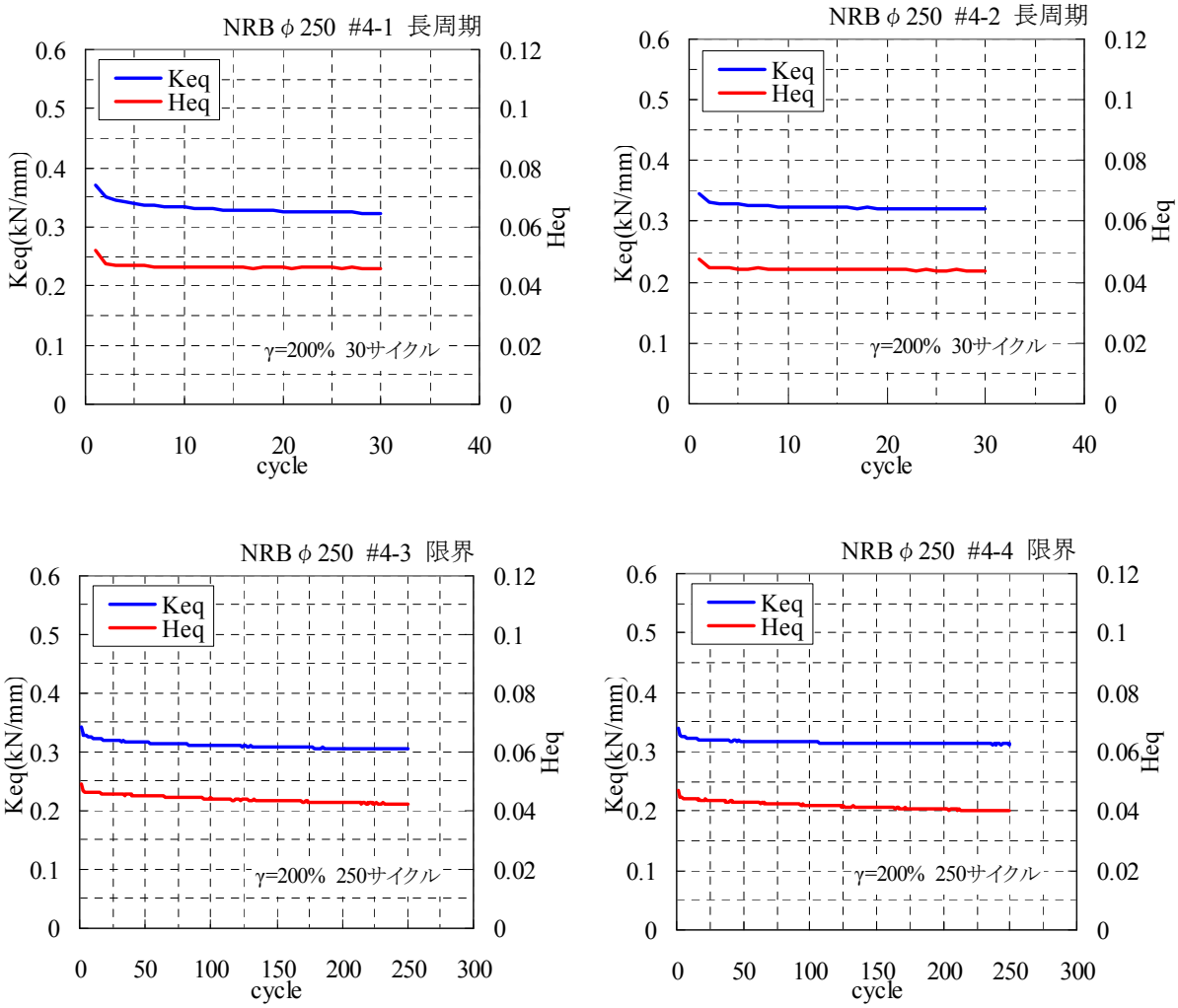


図 1.3.1-24 *Kh*、*Heq* の変化【軸力変動】 γ=200%

表 1.3.1-5　*Kh*、*Heq* 一覧

試験体	試験No.	試験条件	*Kh* (kN/mm)		*Heq*	
			3サイクルめ	比率	3サイクルめ	比率
#1		(前)出荷基本特性	0.361		0.0262	
	#1-1	基本特性	0.360	1.000	0.0437	1.000
		長周期	0.383	1.065	0.0456	1.044
		(直後)基本特性	0.359	0.997	0.0424	0.970
	#1-2	基本特性	0.357	0.993	0.0431	0.987
		限界	0.382	1.061	0.0450	1.030
		(直後)基本特性	0.356	0.991	0.0411	0.941
	#1-3	基本特性	0.357	0.992	0.0421	0.964
		長周期	0.357	0.991	0.0422	0.965
		(直後)基本特性	0.351	0.976	0.0421	0.964
	#1-4	基本特性	0.354	0.984	0.0424	0.970
		限界	0.355	0.986	0.0423	0.967
		(直後)基本特性	0.345	0.959	0.0411	0.941
		(後)基本特性	0.350	0.972	0.0424	0.969
		(後)出荷基本特性	0.345		0.0247	
#2		(前)出荷基本特性	0.379		0.0273	
	#2-1	微小振幅5mm	0.470		0.0456	
		微小振幅3mm	0.473		0.0473	
		微小振幅1mm	0.453		0.0581	
		微小振幅0.5mm	-		-	
	#2-2	基本特性	0.387	1.000	0.0409	1.000
		長周期	0.369	0.953	0.0463	1.132
		(直後)基本特性	0.349	0.903	0.0440	1.076
		(後)基本特性	0.365	0.943	0.0428	1.049
	#2-3	基本特性	0.365	0.945	0.0430	1.053
		限界	0.356	0.922	0.0467	1.144
		(直後)基本特性	0.335	0.867	0.0420	1.028
	#2-4	基本特性	0.349	0.901	0.0431	1.055
		地震応答波(AIC003_av)	-		-	
		地震応答波(AIC003_sd)	-		-	
		(直後)基本特性	0.343	0.888	0.0433	1.060
		(後)出荷基本特性	0.342		0.0260	
#3		(前)出荷基本特性	0.361		0.0255	
	#3-1	基本特性	0.378	1.000	0.0502	1.000
		限界	0.366	0.970	0.0570	1.134
		(直後)基本特性	0.328	0.869	0.0457	0.910
		(後)基本特性	0.341	0.904	0.0449	0.894
	#3-2	基本特性	0.349	0.925	0.0403	0.803
		限界	0.329	0.872	0.0415	0.825
		(直後)基本特性	0.322	0.854	0.0416	0.828
		(後)基本特性	0.340	0.901	0.0441	0.877
		(後)出荷特性	0.333		0.0261	
#4		(前)出荷基本特性	0.361		0.0262	
	#4-1	基本特性	0.363	1.000	0.0441	1.000
		長周期	0.345	0.949	0.0470	1.066
		(直後)基本特性	0.332	0.915	0.0467	1.059
	#4-2	基本特性	0.334	0.920	0.0466	1.056
		長周期	0.330	0.909	0.0446	1.012
		(直後)基本特性	0.320	0.882	0.0482	1.092
	#4-3	基本特性	0.338	0.931	0.0464	1.053
		限界	0.329	0.907	0.0467	1.060
		(直後)基本特性	0.316	0.871	0.0447	1.014
	#4-4	基本特性	0.329	0.904	0.0472	1.071
		限界	0.327	0.900	0.0445	1.009
		(直後)基本特性	0.315	0.868	0.0446	1.011
		(後)基本特性	0.331	0.911	0.0463	1.050
		(後)出荷基本特性	0.325		0.0275	

1.3.1.3 まとめと課題

天然ゴム系積層ゴム支承の多数回繰り返しに対する性能を把握する事を目的として、実大の 1/4 縮小試験体（Φ250）により大振幅高速繰り返し試験を実施した。以下に、本実験から得られた知見をまとめて示す。

(1) 多数回繰り返しに対する水平荷重―変位特性の変化

荷重-変位関係では、γ=50%およびγ=100%では長周期・限界の両試験とも繰り返しに伴う荷重変形関係の変化はきわめて小さかった。γ=200%では若干のハードニング傾向が見られ、また初期サイクルで剛性がやや高めとなっているが、2 サイクルめ以降の荷重変形関係はほぼ安定していた。初期温度 30℃、基準面圧 15N/mm^2 に対して 5N/mm^2 の軸力変動を与えたケースもほぼ同じ傾向を示すが、積層ゴムの初期温度を 0℃とした限界試験では繰り返しの影響ならびに試験体温度が常温に戻る際の温度変化の影響が複合し、荷重変形関係の変化はやや大きい。

長周期・限界試験を経験する前後で常温の同一条件で行った基本特性試験の比較により、*Kh* が減少する傾向が確認された。*Kh* の変化はγ=100%（#1）に比べてγ=200%（#2）のほうが顕著であり、変化量はγ=200%（#2）で－10%～-8%であった。*Kh*、*Heq* の残留変化量はγ=200%の長周期試験(#2-2)で－6%、＋5%であった。

(2) 多数回繰り返しに対する試験体の温度変化

限界試験の温度変化では、加振振幅が大きいケースほど同じ累積変形を短時間に載荷するためにゴム内部の温度上昇量が大きくなっており、3B 相当ケースでは加振終了後には 35℃程度となり、初期に比べて 15℃程度上昇している。

初期温度を 0℃、30℃とした場合のゴム内部の温度上昇はそれぞれ 23℃、12℃程度であり、載荷条件が同じでも初期温度と雰囲気温度との関係で温度上昇量が異なる。いずれのケースも室温を 20℃程度に管理して行っているため、特に初期温度を 0℃としたケースでは載荷による温度上昇と試験体温度が室温に戻る両方の影響を示している。

(3) 動的軸力変動の影響による上記性状の変化

基準面圧 15N/mm^2 に対して 5N/mm^2 の軸力変動を与えたケースにおいて、多数回繰り返しによる水平荷重―変位特性および *Kh*、*Heq* の変化性状は、軸力一定のケースと同様の傾向となった。

以上、天然ゴム系積層ゴムの 1/4 縮小試験体による多数回繰り返し試験を通じて、長周期・限界の試験条件に対して安定した特性を示すことが確認された。今後の課題として、多数回繰り返しによる特性値評価式の検討および地震応答解析への反映、実大試験体による温度上昇や特性値変動に対するスケール効果の確認などが挙げられる。

参考文献

1.3.1-1) 社団法人日本ゴム協会：免震用積層ゴム委員会技術報告、2006
1.3.1-2) 電力中央研究所：電力中央研究所報告、U34、1998
1.3.1-3) 株式会社ブリヂストン：天然ゴム系積層ゴム支承技術資料

1.3.2　鉛プラグ入り積層ゴム

1.3.2.1　実験計画

(1) 実験目的と背景

表 1.3.2-1 に鉛プラグ入り積層ゴム（LRB）の繰り返し加振時の温度上昇に伴う特性変化に関する主要文献を示す。以下、主要文献について内容をまとめる。文中の文献番号は表 1.3.2-1 による。

LRB の繰り返し加振時における特性変化については文献 1 により、LRBφ500 に対してせん断ひずみγ=150%で 30 回繰り返し加振時に降伏荷重特性値 Q_d は初期値の約 55%に低下していることが示されている。文献 2 においても LRBφ300 に対してγ=300%で 30 回繰り返し加振時に 3 サイクル目と比較して 27 サイクル目には 85%、90%に低下したことが示されている。本文献中では鉛吸収エネルギーと比較して鉛温度上昇が小さく熱伝導解析による検討が必要と指摘されている。文献 3 では LRBφ250 に対してγ=250%で 50 回繰り返し加振時に降伏後剛性 K_d はほとんど変化せず、降伏荷重特性値 Q_d は 65%に低下していることが示されている。以上についてはそれぞれが正弦波加振下での特性変化について示されているが、文献 4 では地震応答波加振を実施しており、正弦波加振下での実験結果と同様の結果が得られている。文献 5 では LRB と高減衰ゴム系積層ゴムを対象とした正弦波加振試験、地震応答波加振試験の結果及び実験結果のシミュレーション解析手法が示されており、LRB については鉛プラグの温度上昇を考慮した地震応答解析手法が提案されている。また実験結果については文献 7 にまとめられている。文献 6 では LRBφ410 に対してγ=200%で 200 回繰り返し加振時に Q_d は 3 サイクル目に対し約 42%に低下したことが示されており、実験結果よりエネルギー吸収量と Q_d 低下率の関係を用い、Q_d の低下を考慮した地震応答解析を実施している。

以上のように、LRB では、長時間繰り返し加力に伴い鉛プラグの温度上昇が上昇し、降伏荷重が低下することが明らかになっている。ここでは、第Ⅱ部の報告書で提案された長周期地震動を想定したエネルギー吸収性能評価のための試験方法に基づき、縮小試験体を用いた長時間繰り返し加振実験を実施し、LRB の特性変化や限界性能を明らかにする。

(2) 実験日時および場所

日時：　2010 年 11 月 18 日～12 月 3 日

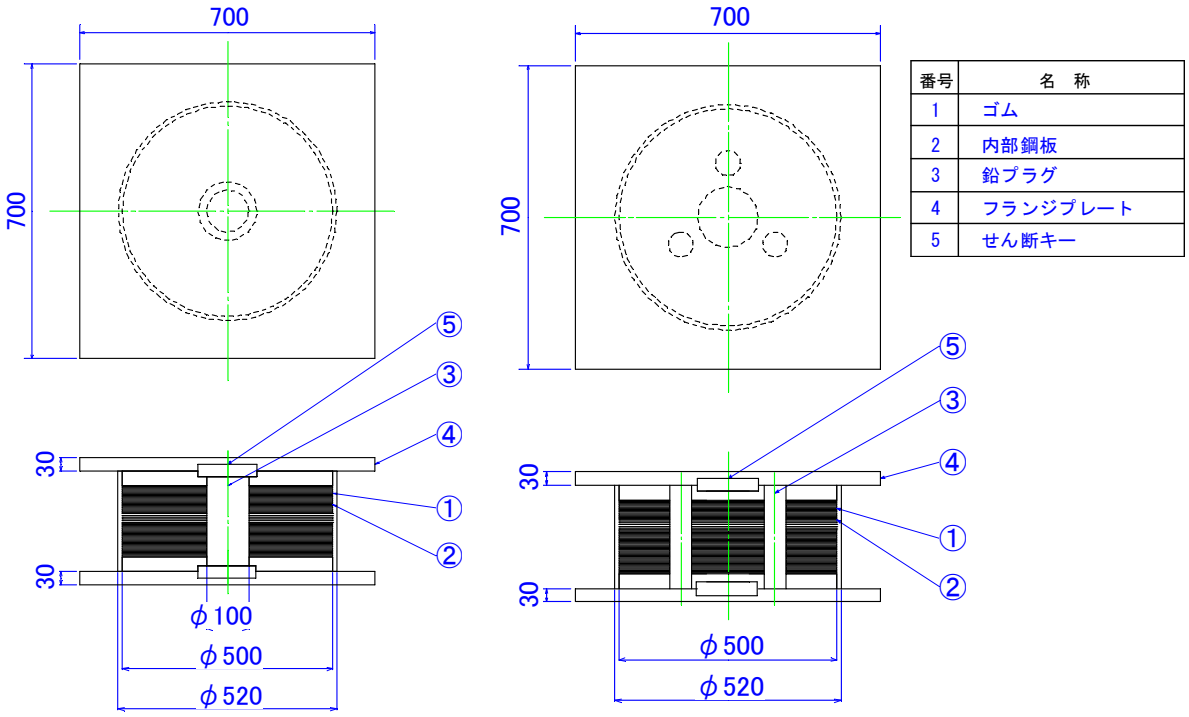
場所：　オイレス工業株式会社　足利事業所

(3) 試験体

本試験は、鉛プラグ入り積層ゴムの縮小体を用いて行う。想定実機を、LRB1000（鉛プラグ入り外径：φ1000、鉛プラグ径：φ200）、基準面圧を 15 N/mm^2 とし、その 1/2 スケール縮小サイズの試験体を用いる。また、1 本プラグタイプに関しては、過去の実験によりある程度の知見を得ている。今回は、鉛プラグ 1 本と複数本とでの違いを検証するため、3 本プラグタイプを設定した。これらの概略図を図 1.3.2-1 に、またその試験体一覧を表 1.3.2-2 に示す。

表 1.3.2-1　鉛プラグ入り積層ゴムの温度上昇に伴う特性変化に関する主要文献

番号	論文名	著者名	掲載誌
1	鉛プラグ入り積層ゴムの速度依存性と繰り返し依存性 [1.3.2-3)]	人見泰義他	AIJ 大会、1998.9
2	鉛プラグ型積層ゴムの圧縮面圧下における限界変形能力 [1.3.2-4)]	高山峯夫他	AIJ 技術報告集 No.16,2002.12
3	鉛プラグ入り積層ゴムの繰り返し加振実験報告 [1.3.2-5)]	西澤崇雄他	AIJ 大会、2004.8
4	長周期地震動を想定した LRB1000 の内部温度特性確認実験　～地震応答波の 1/1 加振実験～ [1.3.2-6)]	河内山修他	AIJ 大会、2006.9
5	大振幅繰返し変形を受ける積層ゴム支承の熱・力学的連成挙動に関する研究(その 1～14) [1.3.2-7)]	竹中康雄他	AIJ 大会、2007～2010
6	Durability of Rubber Isolators by Long-Duration Ground Motion due to Large Earthquakes [1.3.2-8)]	Mineo Takayama et.el	14WCEE,2008.10
7	積層ゴムの熱・力学的連成挙動に関する実験的研究 [1.3.2-9)]	竹中康雄他	AIJ 構造系論文集,No.646,2009.12



(a) 1 本プラグタイプ　　(b) 3 本プラグタイプ

図 1.3.2-1 試験体形状

表 1.3.2-2 試験体一覧

項目	想定実機　1／1	縮小体　1／2	
		1 本プラグ	3 本プラグ
ゴム材料	NR　G4		
外径（mm）	1000	500	500
鉛プラグ本数	1	1	3
鉛プラグ径(mm)	200	100	57.7
ゴム層厚(mm)×層数	6.0×33	3.0×33	3.0×33
内部鋼板厚(mm)	4.4	2.2	2.2
受圧面積(mm^2)	753982	188459	188459
1 次形状係数：S1	41.7	41.7	41.7
2 次形状係数：S2	5.1	5.1	5.1

(4) 試験装置

本試験に用いる試験機の概要を図 1.3.2-2 および表 1.3.2-3 に示す。

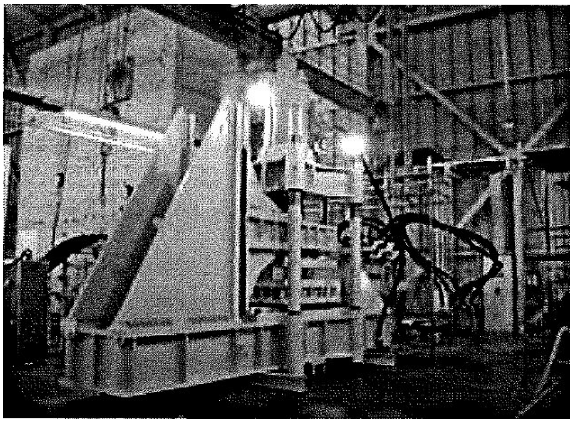


図 1.3.2-2 試験機

表 1.3.2-3 試験機加振能力

最大鉛直荷重	3 MN
最大水平荷重(動的)	±700 kN
水平ストローク	±500 mm
最大水平速度	2000 mm/s

連続加振可能な最大速度は約 300mm/s

※ただし、加振条件により最大速度が変動する。

(5) 計測項目と計測方法

1) 計測項目

計測項目は鉛直荷重、水平力、水平変位および温度とする。水平力は、試験体上部に設置したロードセルにより計測し、水平変位は試験機の上盤と加振テーブル間を計測する。温度計測は、LRB 内部（鉛プラグ、積層ゴム、フランジ）の温度を加振中および加振後について計測する。表 1.3.2-4 に 1 本プラグタイプの計測項目一覧を示し、表 1.3.2-5 に 3 本プラグタイプの計測項目一覧を示す。

表 1.3.2-4 計測項目一覧（1 本プラグ）

センサー名	計測項目
Fv	鉛直荷重
Fh	水平力
Dh	水平変位
P-1	鉛プラグ頂部
P-2	鉛プラグ1/4高さ
P-3	鉛プラグ1/2高さ
RQ-1	ゴム層1/4高さ
RQ-2	ゴム層1/4高さ被覆部
RC-1	ゴム層1/2高さ
RC-2	ゴム層1/2高さ被覆部
MT-1	フランジ（中央）
MT-2	フランジ（R60）
MT-3	フランジ（R250）
Air	雰囲気

表 1.3.2-5 計測項目一覧（3 本プラグ）

センサー名	計測項目
Fv	鉛直荷重
Fh	水平力
Dh	水平変位
P-1	鉛プラグ頂部
P-2	鉛プラグ1/4高さ
P-3	鉛プラグ1/2高さ
RQ-1	ゴム層1/4高さ①
RQ-2	ゴム層1/4高さ被覆部
RQ-3	ゴム層1/4高さ②
RC-1	ゴム層1/2高さ①
RC-2	ゴム層1/2高さ被覆部
RC-3	ゴム層1/2高さ②
MT-1	フランジ（中央）
MT-2	フランジ（R125）
MT-3	フランジ（R250）
Air	雰囲気

2) 温度計測位置

積層ゴム体内部の温度計測位置を図 1.3.2-3（1 本プラグタイプ）、図 1.3.2-4（3 本プラグタイプ）に示す。なお、試験体の上下フランジプレートと試験機取付け盤との間に断熱板を設置する。断熱板は、アルミニウムカーボネート系断熱板（熱伝導率 0.3W/m/K 程度）、厚さは 10mm 程度のものを使用し、上下フランジと試験機との間に設置した（図 1.3.2-5）。

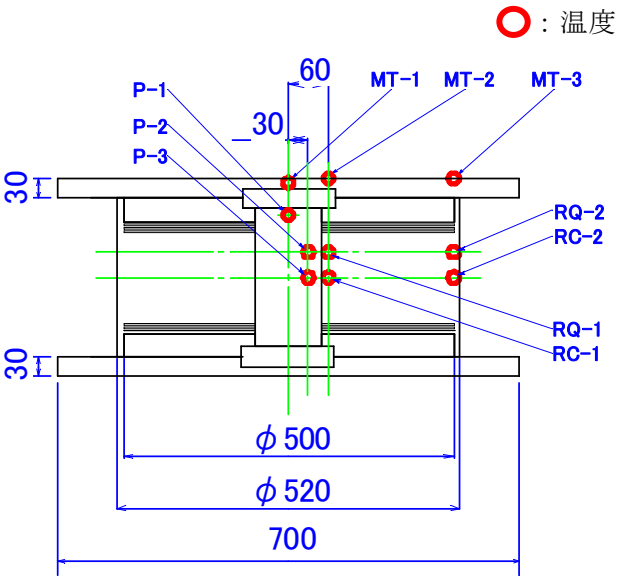


図 1.3.2-3 温度計測位置
（1 本プラグタイプ）

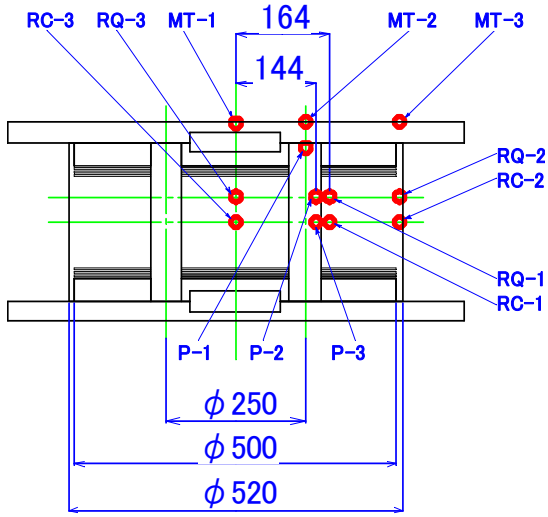


図 1.3.2-4 温度計測位置
（3 本プラグタイプ）

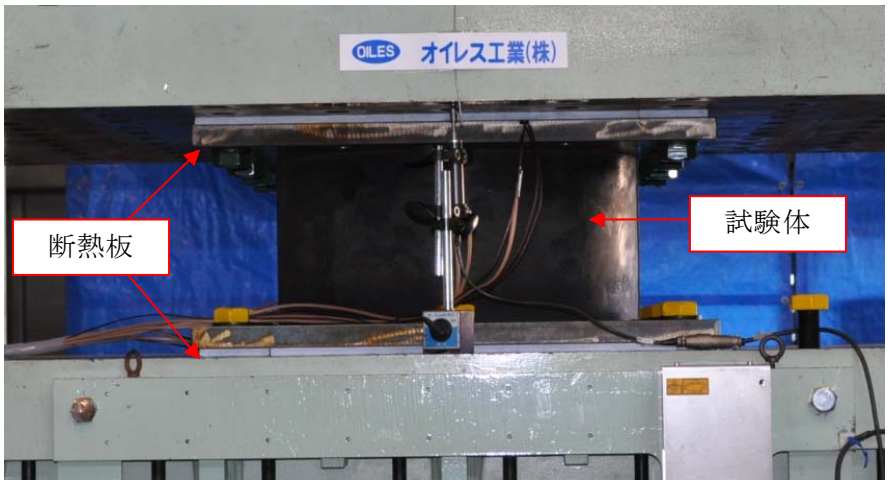


図 1.3.2-5 試験体設置状況

(6) 実験方法と実験ケース

表 1.3.2-6 に試験体番号を、表 1.3.2-7 に加振ケースの一覧を、表 1.3.2-8 に加振条件の一覧を示す。試験体は 1 本プラグタイプが 3 体、3 本プラグタイプが 1 体である。試験は正弦波加振試験（長周期加振ケース : 1A、2A、3A、限界加振ケース : 1B、2B、3B）と地震応答波加振（Eq.1、Eq.2）からなり、各試験の前後に基本特性試験（せん断ひずみ 100%、4 サイクル）を実施した。面圧はいずれも 15N/mm^2 とした。地震応答波は、参照する表 1.3.2-9、図 1.3.2-6、図 1.3.2-7 に示す東海−東南海地震に対する愛知県津島市の地震動（平均）およびこれを 1.5 倍に拡幅した地震動を用いて免震建築物を想定した 1 質点系地震応答解析を行い、解析結果として得られた変位応答波形とした。免震建築物条件は、想定実機（ゴム種 G4、外径 φ1000mm、鉛径 φ200mm、ゴム総厚 200mm）が面圧 15N/mm^2 で用いられているものとし、免震周期を 5.6sec、免震層降伏せん断力係数を 0.023 とした。図 1.3.2-8 に解析結果の荷重変形関係を、図 1.3.2-9 に変位応答波形を示す。試験体の温度計測のため、加振終了後も引き続き計測を実施した。各試験のインターバルは表 1.3.2-8 に示した値を基本とするが、試験体の温度が 25℃よりも高い場合には、試験体の温度が 25℃以下になるのを待って加振を開始した。

表 1.3.2-6 試験体番号

試験体番号	内部構成
#1	1本プラグタイプ
#2	
#3	
#4	3本プラグタイプ

表 1.3.2-7 加振ケース

試験種類		加振周期［s］	せん断ひずみ［%］	最大速度［cm/s］	サイクル数［cycle］	時間［s］	累積変形［m］
基本特性	−	40	100	1.5	4	41.5	1.58
長周期	1A	4	50	8.0	125	500	24.75
	2A	4	100	15.9	60	240	23.76
	3A	4	200	31.9	30	120	23.76
限界	1B	4	50	8.0	250	1000	49.5
	2B	4	100	15.9	120	480	47.52
	3B	4	200	31.9	60	240	47.52
地震応答波	Eq.1	−	136	−	−	300	−
	Eq.2	−	287	−	−	300	−

表 1.3.2-8 加振条件

試験体番号	加振順	試験種類		せん断ひずみ［%］	サイクル数［cycle］	加振後インターバル［min.］ 以上
#1	1	－	基本特性	100	4	10
	2	1A	長周期	50	125	30
	3	－	基本特性	100	4	10
	4	Eq.1	地震応答波	136	－	30
	5	－	基本特性	100	4	10
	6	1B	限界	50	250	30
	7’	－	基本特性	100	4	2 days
	7	－	基本特性	100	4	－
#2	1	－	基本特性	100	4	10
	2	2A	長周期	100	60	30
	3	－	基本特性	100	4	10
	4	Eq.2	地震応答波	287	－	30
	5	－	基本特性	100	4	10
	6	2B	限界	100	120	30
	7’	－	基本特性	100	4	2 days
	7	－	基本特性	100	4	－
#3	1	－	基本特性	100	4	10
	2	3A	長周期	200	30	30
	3	－	基本特性	100	4	10
	4	3B	限界	200	60	30
	5’	－	基本特性	100	4	2 days
	5	－	基本特性	100	4	－
#4	1	－	基本特性	100	4	10
	2	1B	限界	50	250	30
	3	－	基本特性	100	4	10
	4	Eq.2	地震応答波	287	－	30
	5	－	基本特性	100	4	10
	6	3B	限界	200	60	30
	7’	－	基本特性	100	4	2 days
	7	－	基本特性	100	4	－

表 1.3.2-9 加振応答波作成における入力地震動

呼称	対象地震・ 評価地点	加速度 (cm/s^2)	速度 (cm/s)
Eq1:T-TN-AIC003_AV	東海・東南海地震　津島　平均	221.1	31.0
Eq2： T-TN-AIC003_AVx1.5	同上 x 1.5	331.7	46.5

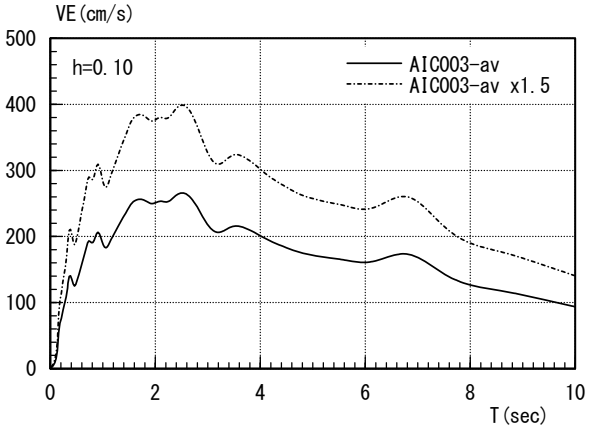


図 1.3.2-6 入力地震動 VE スペクトル

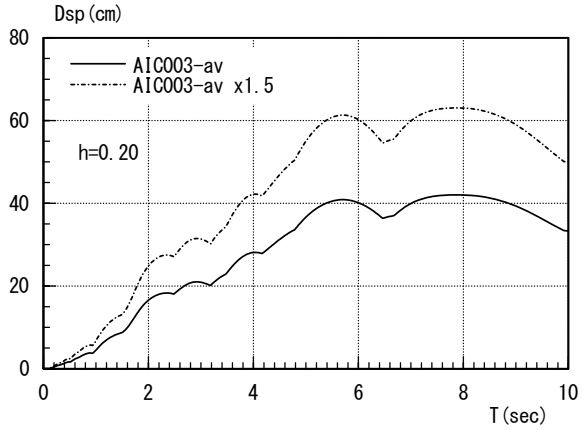


図 1.3.2-7 入力地震動変位応答スペクトル (h=0.20)

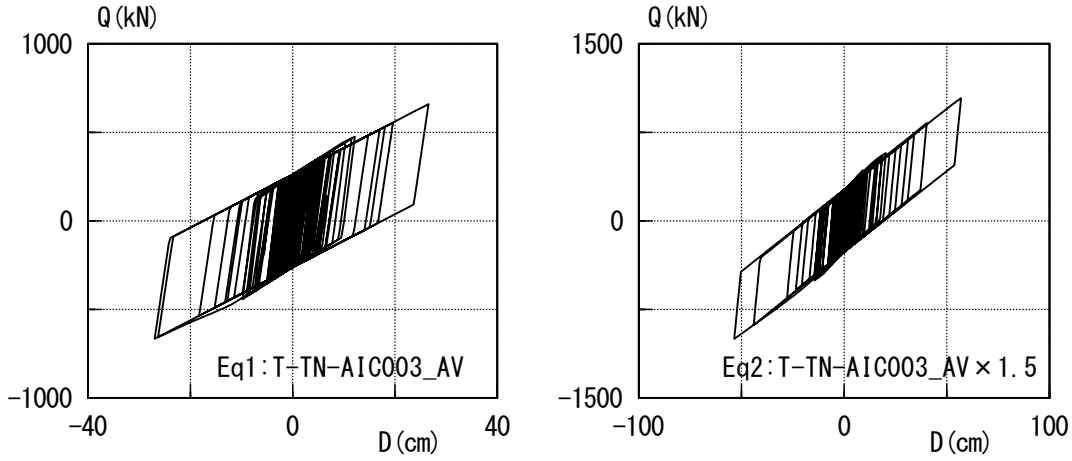


図 1.3.2-8 応答解析結果荷重変形関係

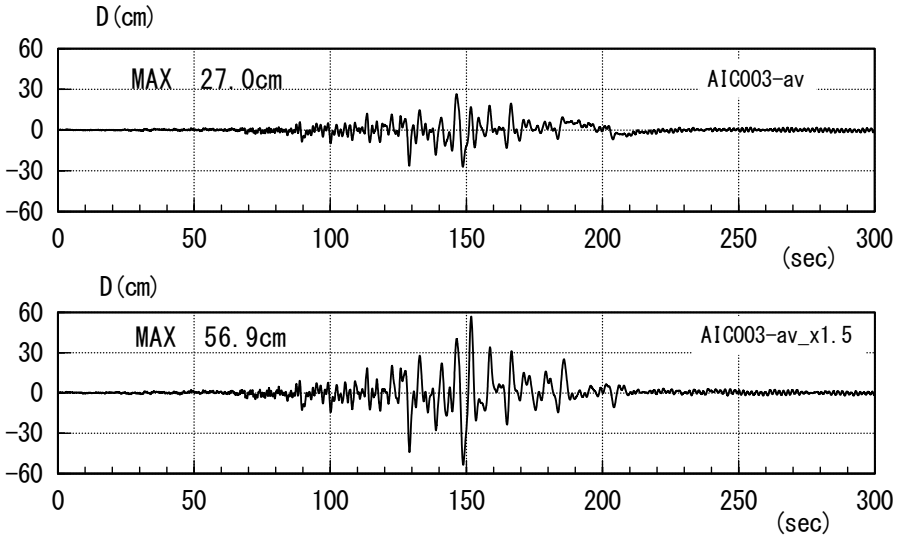


図 1.3.2-9 地震応答変位波形(これを縮小率 1/2 を乗じて実験用変位加振波形とする)

1.3.2.2　実験結果

(1) 特性値（Qd、Kd）の評価法

荷重変形関係において、正負の切片荷重の絶対値平均を、その荷重変形関係における切片荷重 Qd とする。

$$Qd = \frac{|Qd_u| + |Qd_d|}{2} \tag{1.3.2-1}$$

また、荷重変形関係において、各加力試験における変位が、せん断ひずみ振幅±γmax の 1/2 ひずみ時の点を結ぶ直線の傾きをその荷重変形関係における降伏後剛性とし、荷重変形関係の上側と下側の降伏後剛性 Kd_u、Kd_d の平均を、その荷重変形関係における降伏後剛性 Kd とする（図 1.3.2-10）。また、Qd、Kd の繰り返しに伴う変化は、3 サイクル目の値で除した変化率で評価する。

$$Kd = \frac{Kd_u + Kd_d}{2} \tag{1.3.2-2}$$

また、各サイクルの荷重変形関係の描く面積を履歴吸収エネルギーΔW とし、各加振ケースの履歴面積の累積値を累積履歴吸収エネルギーΣΔW とする。

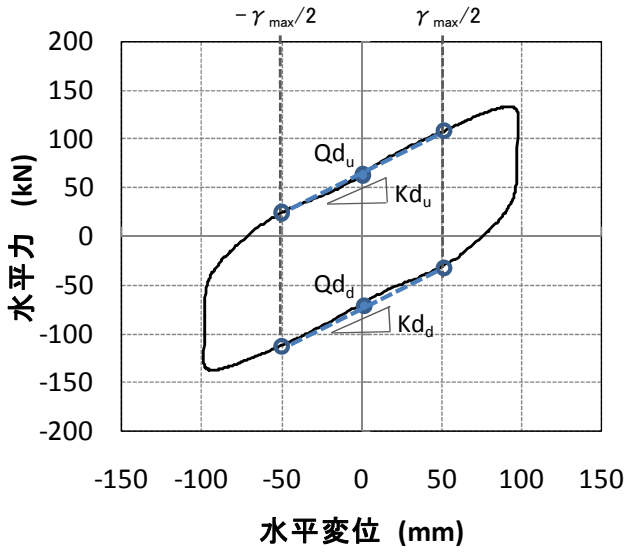


図 1.3.2-10 Qd、Kd の定義

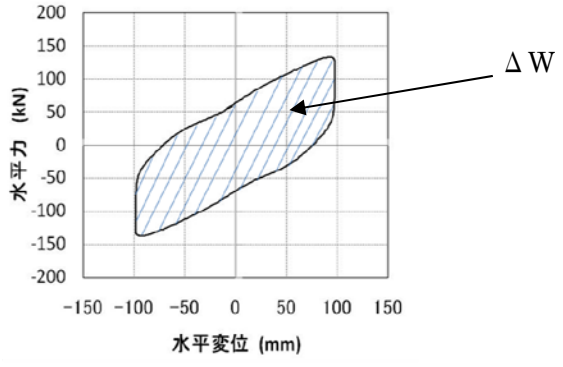


図 1.3.2-11 履歴吸収エネルギー

(2) 基本特性試験

図 1.3.2-12 に、試験体#1～#4 について、初めに行なった基本特性試験の荷重変形関係を重ねて示す。すべての荷重変形関係は重なっており、ほとんど同一であることが分かる。また、3 サイクル目の Qd は 66.8～67.4 kN で設計値に対して+2～+3%、 Kd は 0.78～0.89 N/mm で設計値に対して-1.6～+12%であり、試験体#1～#4 すべてについて検収条件を満たしている。

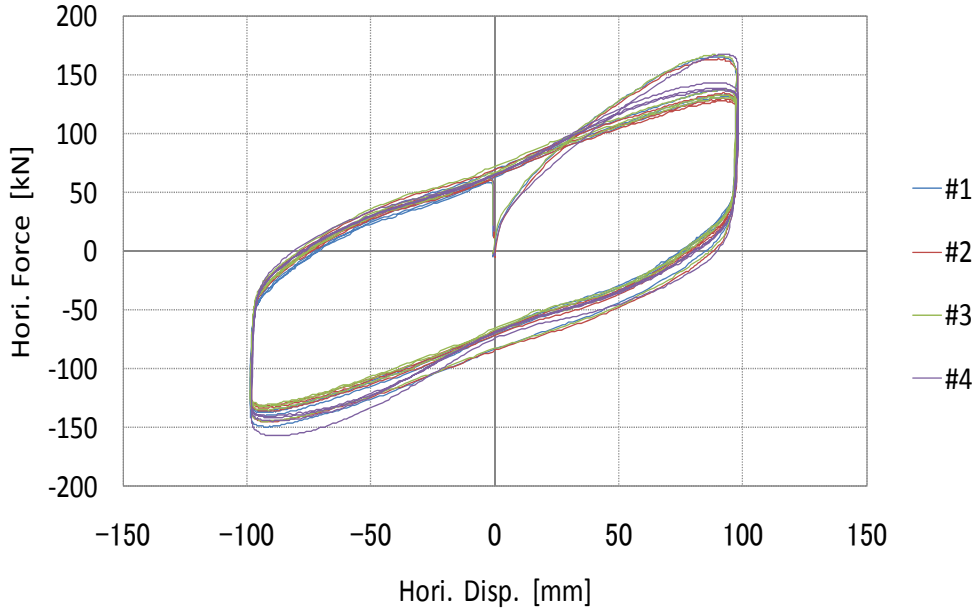


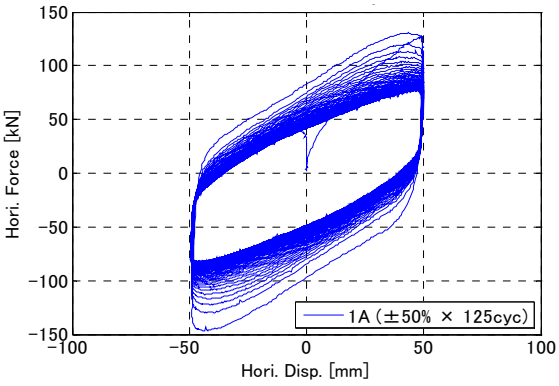
図 1.3.2-12 基本特性試験（#1、#2、#3、#4）

(3) 正弦波加振試験

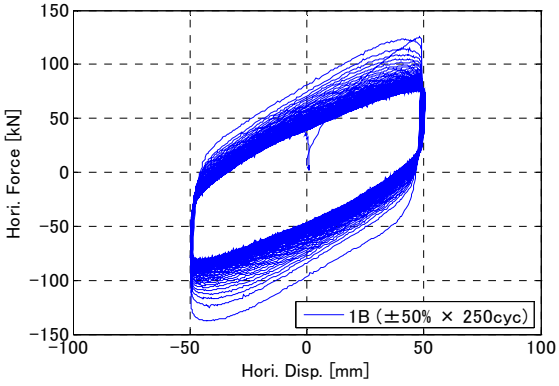
1) 荷重変形関係

1 本プラグタイプ試験体の正弦波加振試験の結果について、図 1.3.2-13 (a-1)～(c-1)に長周期加振ケースの荷重変形関係を、図 1.3.2-13 (a-2)～(c-2)に限界加振ケースの荷重変形関係を示す。

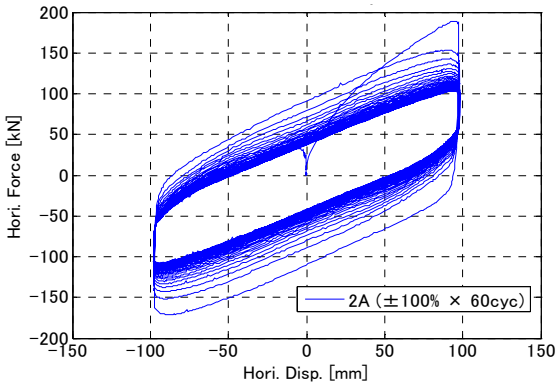
いずれの振幅条件についても荷重変形関係は安定しており、荷重変形関係の面積は徐々に小さくなっている。限界加振ケースの加振回数は、長周期加振ケースの 2 倍であるが、両者の荷重変形関係は概ね同様であり、加振終了直前の荷重変形関係もほぼ同程度になっている。つまり、長周期の加振回数で履歴ループは安定し、それ以上の繰返し加振に対して荷重変形関係の変化は小さいことが分かる。



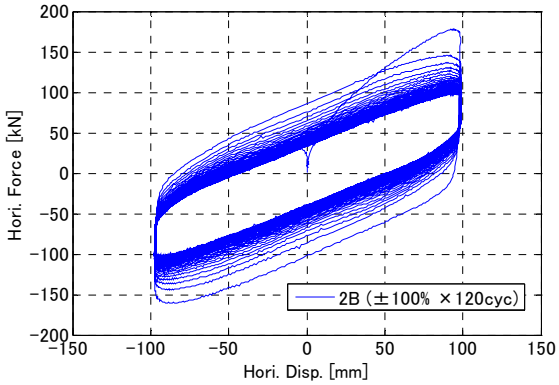
(a-1) 1A (±50%×125cyc)



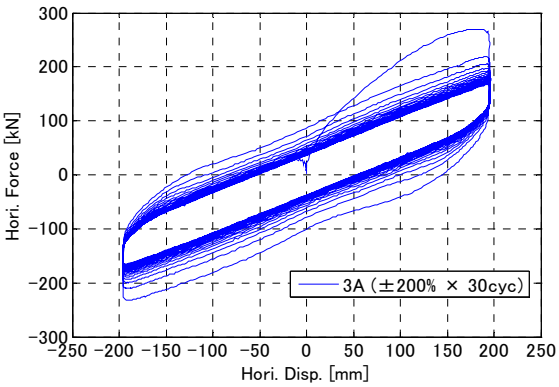
(a-2) 1B (±50%×250cyc)



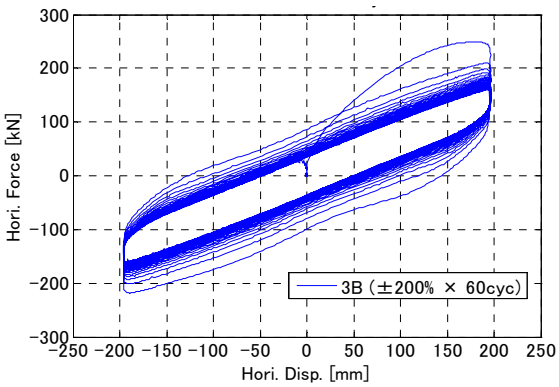
(b-1) 2A (±100%×60cyc)



(b-2) 2B (±100%×120cyc)



(c-1) 3A (±200%×30cyc)

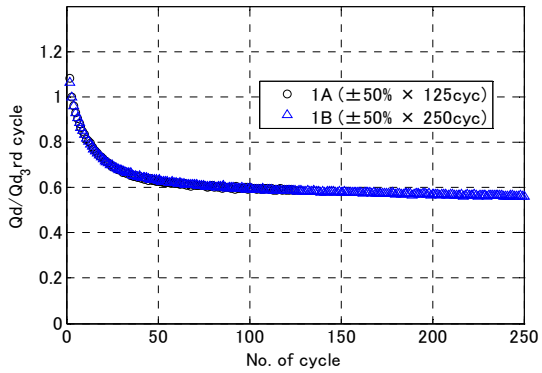


(c-2) 3B (±200%×60cyc)

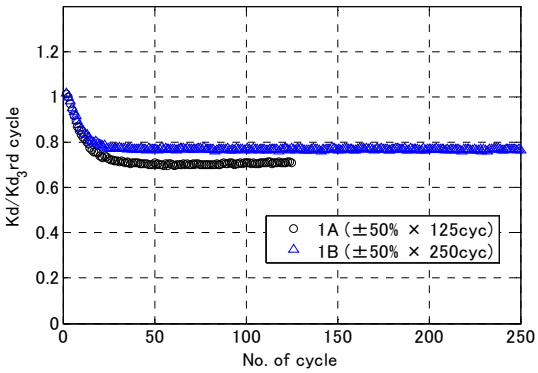
図 1.3.2-13 正弦波加振試験の荷重変形関係

2) Qd、Kd の変化率

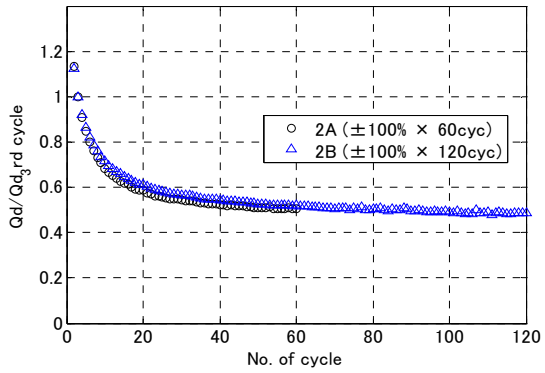
1 本プラグタイプ試験体の正弦波加振試験の結果について、図 1.3.2-14 に降伏荷重 Qd および降伏後剛性 Kd の 3 サイクル目の値を基準にした変化率を示す。これより、Qd は、加振開始後 20 サイクル目程度まで急激に低下するが、それ以降の低下は緩やかになっている。この傾向はいずれのせん断ひずみについても同様である。また、Qd の変化率は、せん断ひずみが大きいほど大きくなる傾向にあり、せん断ひずみ 100%と 200%では、3 サイクル目の値に対して 50%程度まで低下している。一方、Kd は、せん断ひずみ 50%については、加振開始後 20 サイクル目程度まで急激に低下し、その後一定値となっているが、せん断ひずみ 100%以上については、加振初期から低下は見られずほとんど変化はない。



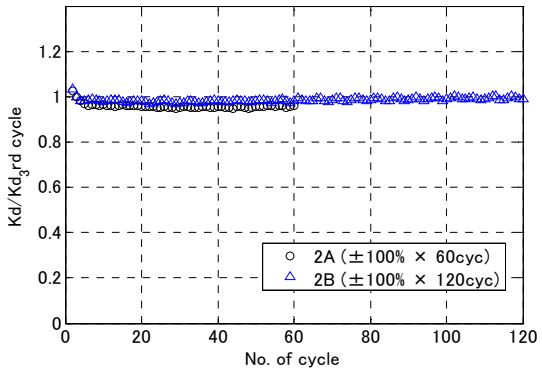
(a-1) Qd 変化率（#1 試験体）



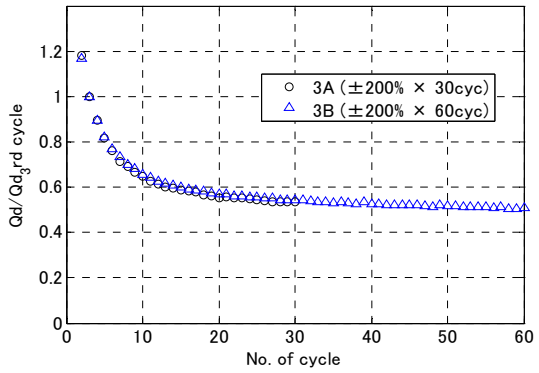
(a-2) Kd 変化率（#1 試験体）



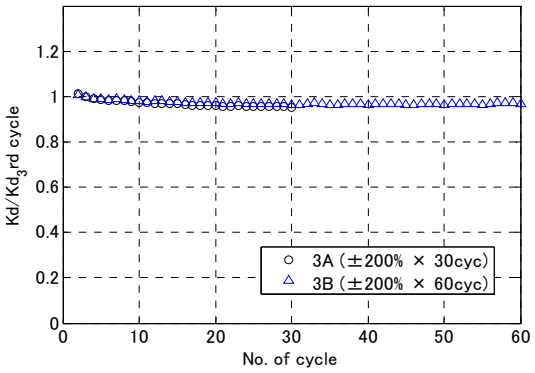
(b-1) Qd 変化率（#2 試験体）



(b-2) Kd 変化率（#2 試験体）



(c-1) Qd 変化率（#3 試験体）



(c-2) Kd 変化率（#3 試験体）

図 1.3.2-14 Qd、Kd の変化率

3) 試験体の温度履歴

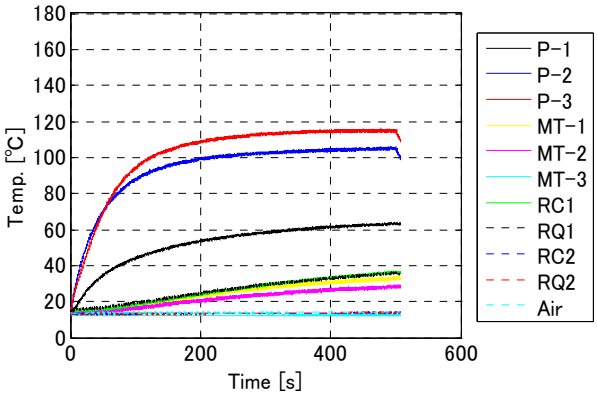
図 1.3.2-15 に、1 本プラグタイプ試験体の正弦波加振中の温度計測結果を示す。加振中に熱電対センサーの断線、およびセンサーの位置ズレ・抜けが生じたものについては、グラフ中に注記した。

鉛プラグ温度 P-3、P-2 は加振直後に急上昇し、その後上昇が緩やかになり一定温度に収束している。表 1.3.2-10 に鉛プラグの最大温度を示す。　鉛プラグの温度は、 P-3＞P-2＞P-1 の順であり、P-3 の温度が最も高い。鉛プラグの発熱はプラグ中央が最も高く、鉛プラグの上下に熱が伝達していることが分かる。2A (長周期ケース)と 2B (限界ケース)の鉛プラグ温度 P-3 を比較すると、共に約 160℃に収束している。これより、鉛プラグの温度は、加振回数が多くなっても収束傾向にあると考えられる。

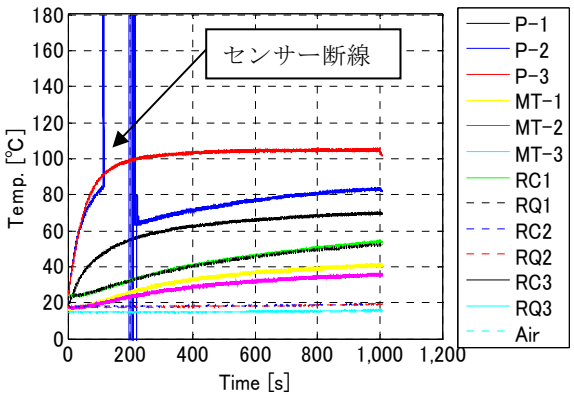
ゴム層の温度については、鉛プラグに近い RC-1 と RQ-1 の温度は緩やかに上昇するが、試験体外周部に位置する RC-2 と RQ-2 では温度上昇は見られず、鉛プラグの熱は、外周部へはほとんど伝達していない。

図 1.3.2-16 に加振後に試験体の温度が 25℃以下になるまでの温度計測結果を示す。加振中に熱電対センサーの断線、およびセンサーの位置ズレ・抜けが生じたものについては、グラフ中に注記した。加振後の鉛プラグの温度は、すべての加力ケースにおいて、加振停止直後より急激に低下し、10 分程度で約 40℃まで低下する。そして、加振停止後 2 時間前後で加振初期温度にまで低下する。ゴム内部 RC、RQ、およびフランジ部 MT の温度は、鉛プラグより遅れて上昇し始めており、鉛プラグで発生した熱がゴム部やフランジに伝導していると考えられる。

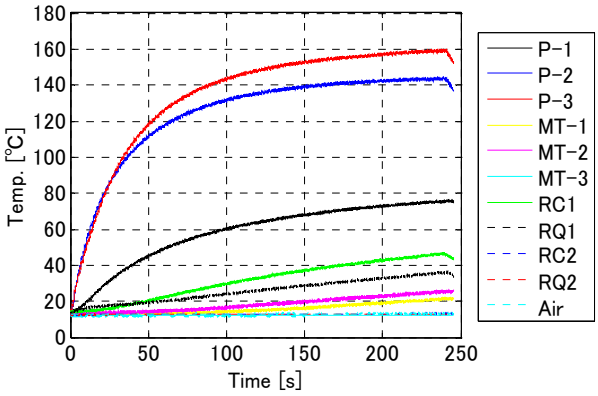
表 1.3.2-10 に、各試験ケースの累積履歴吸収エネルギーΣΔW、試験体の最大温度（P-3）と加振停止から 25℃到達までの所要時間を示す。これより、長周期加振ケースでは 30 分～43 分、限界ケースでは 144 分～167 分の時間を要している。2A（長周期加振ケース）と 2B（限界加振ケース）の最大温度は同程度であるが、試験体温度の 25℃到達所要時間は 2B の方は 2A よりも約 5.5 倍長くなっている。これは 2B の方が 2A よりもΣΔW が約 1.8 倍と大きいため、鉛プラグの発熱時間が長く、ゴム層や上下フランジ部に熱伝導が進み、ゴム体が全体的に温度上昇しており、その分温度低下に時間を要したと考えられる。



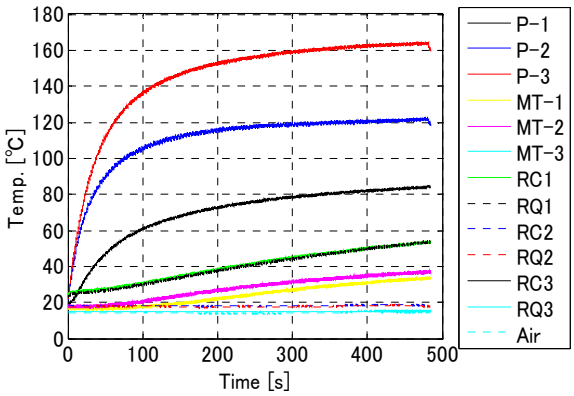
(a-1) 1A (±50%×125cyc)



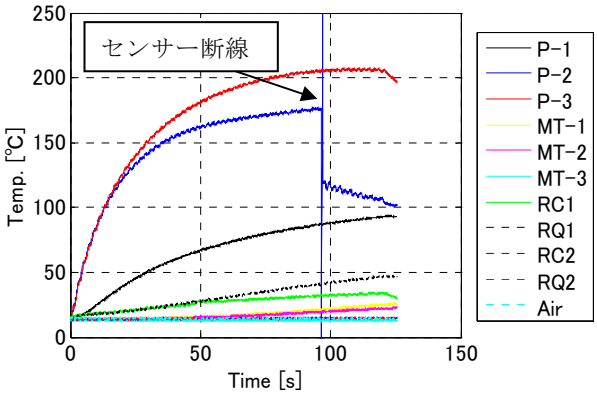
(a-2) 1B (±50%×250cyc)



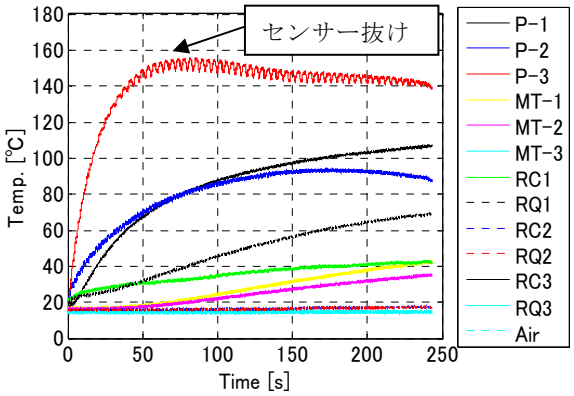
(b-1) 2A (±100%×60cyc)



(b-2) 2B (±100%×120cyc)



(c-1) 3A (±200%×30cyc)



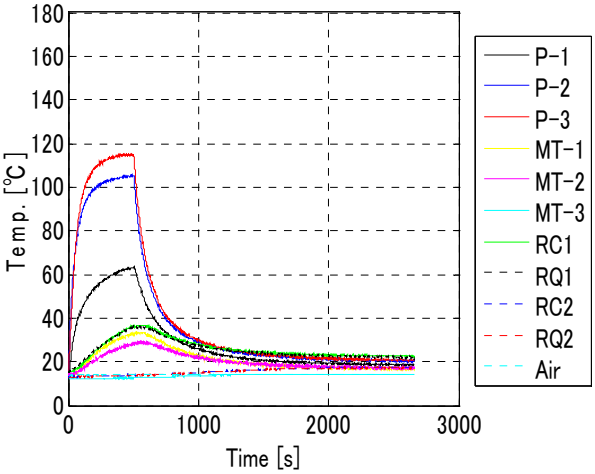
(c-2) 3B (±200%×60cyc)

図 1.3.2-15 加振中の温度履歴

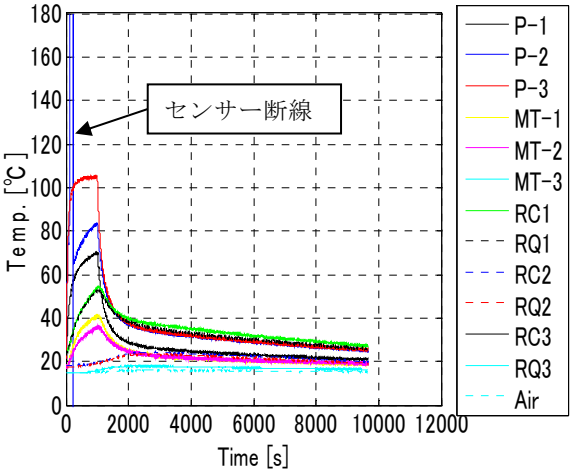
表 1.3.2-10　最大温度と温度低下所要時間

加振ケース	累積履歴吸収エネルギー：ΣΔW（kN･mm）	最大温度（P-3）（℃）	加振停止から 25℃到達までの所要時間（s）
1A	1.1216×10^6	115	2610　(43 min.)
1B	2.1162×10^6	105	8661　(144 min.)
2A	1.0642×10^6	160	1807　(30 min.)
2B	1.9033×10^6	164	9997　(167 min.)
3A	1.0841×10^6	206	1871　(31 min.)
3B	1.9097×10^6	（155）*	9208　(153 min.)

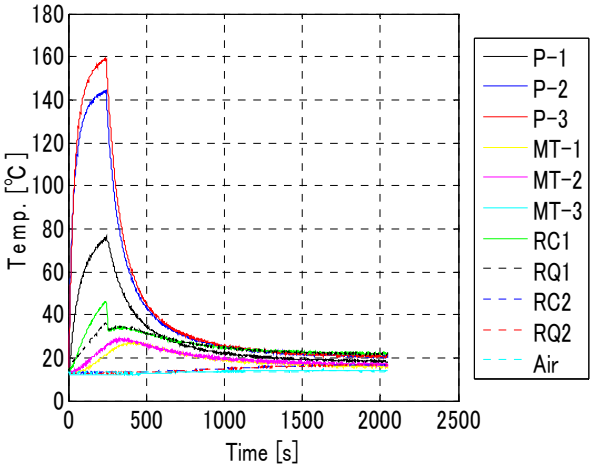
*：センサー抜けのため、参考値とする。



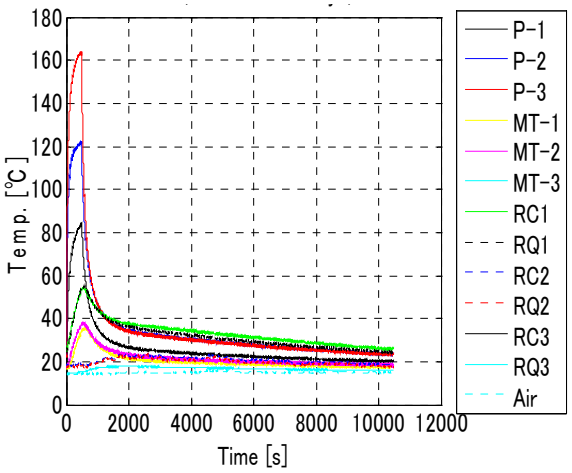
(a-1) 1A (±50%×125cyc)



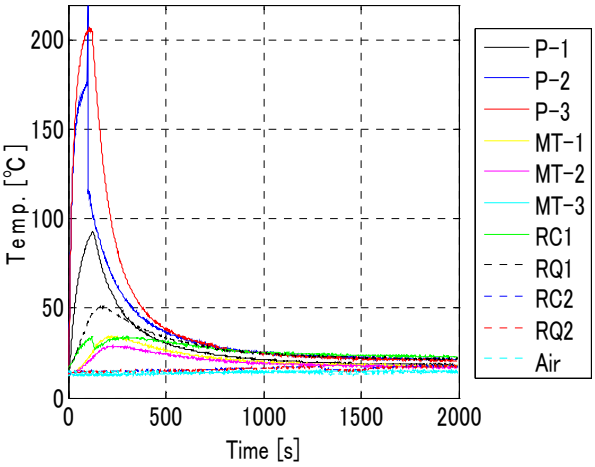
(a-2) 1B (±50%×250cyc)



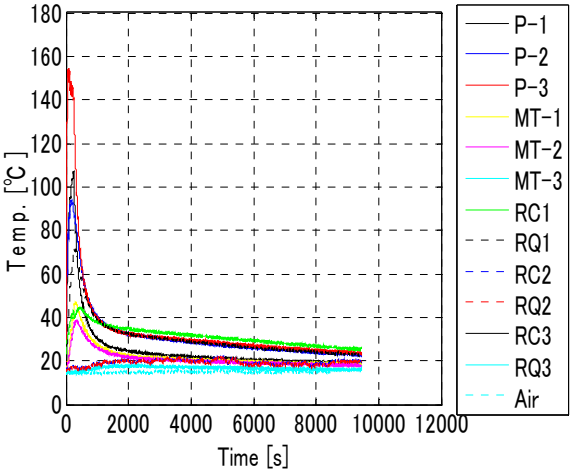
(b-1) 2A (±100%×60cyc)



(b-2) 2B (±100%×120cyc)



(c-1) 3A (±200%×30cyc)



(c-2) 3B (±200%×60cyc)

図 1.3.2-16 加振中と加振後の温度履歴

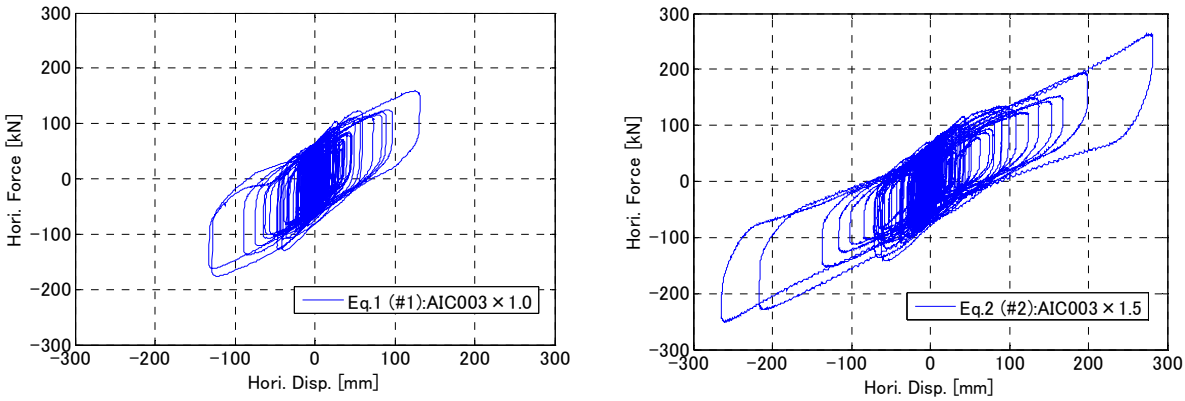
(4) 地震応答波加振試験

1) 荷重変形関係

図 1.3.2-17 に 1 本プラグタイプ試験体の荷重変形関係を示す。いずれも安定した荷重変形関係を描いている。

2) 累積吸収エネルギー

図 1.3.2-18 に 1 本プラグタイプ試験体の累積履歴吸収エネルギーを示す。最大の累積履歴吸収エネルギーは、Eq.1 が 3.6703×10^5 kN･mm、Eq.2 が 5.6962×10^5 kN･mm であった。



(a) Eq.1　　(b) Eq.2

図 1.3.2-17 荷重変形関係（地震応答波加振）

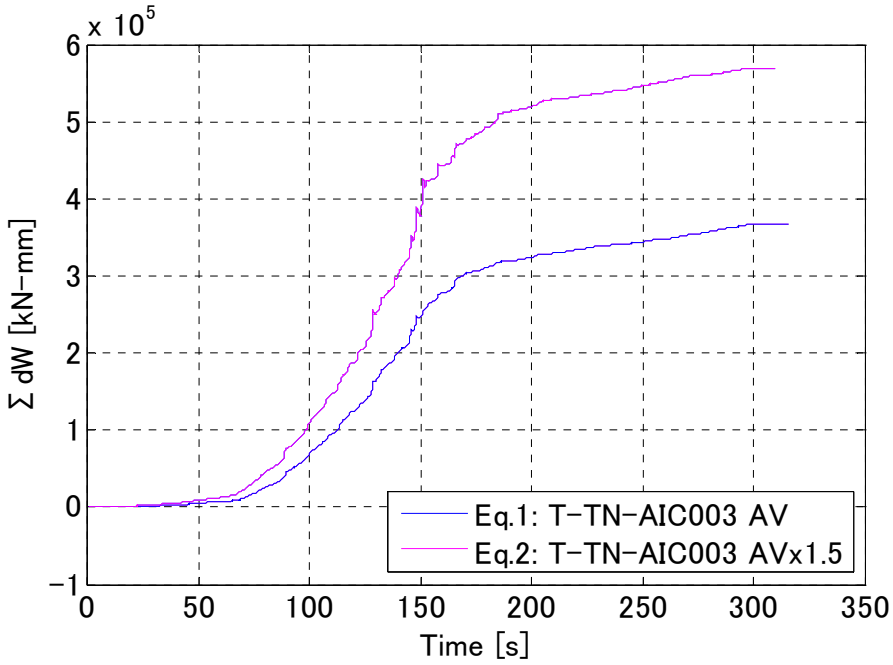


図 1.3.2-18 累積履歴吸収エネルギー

3) 試験体の温度履歴

図 1.3.2-19 に 1 本プラグタイプ試験体の試験体温度履歴を示す。加振開始から 80 秒付近から加振変位の増加に伴い鉛プラグの温度が上昇し、150 秒付近の最大加振変位時に鉛プラグの温度が最大となる。その後も加振は続くが、鉛プラグの温度は減少し、加振終了時には約 55℃（Eq.1 加振時）まで低下する。この温度の増加と減少の傾向は Eq.1 と Eq.2 とも同じである。

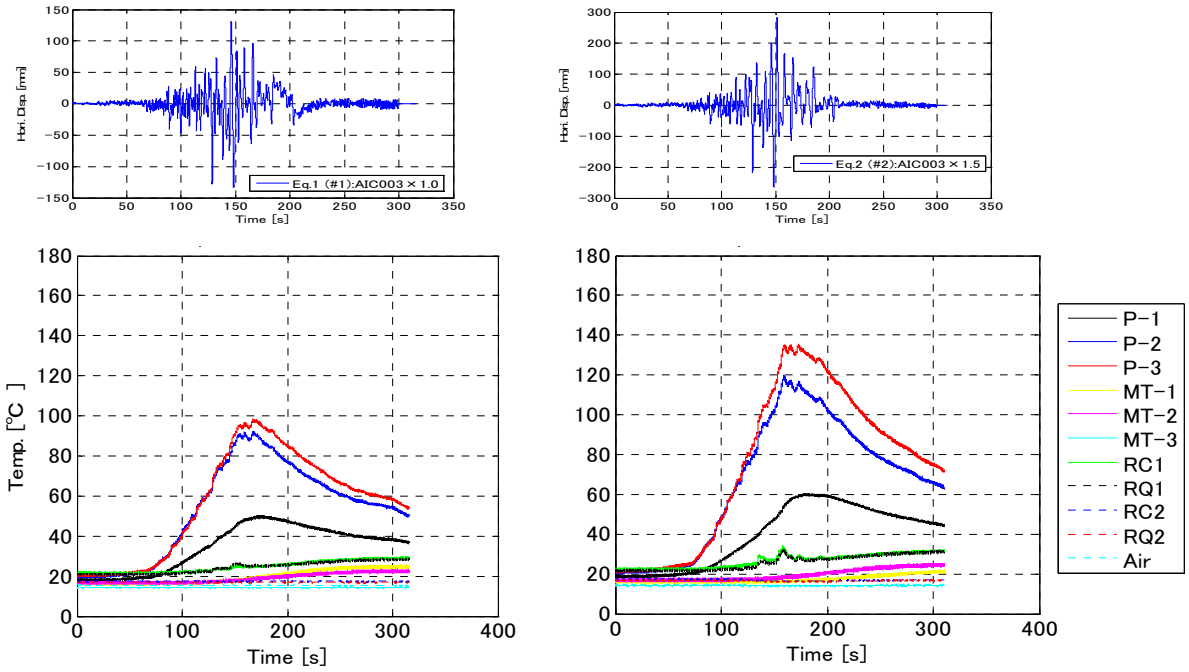
図 1.3.2-20 に 1 本プラグタイプ試験体の加振中と加振後の試験体温度履歴を示す。Eq.2 の方が加振による鉛プラグとゴム部の温度が高いため、加振停止後の試験体温度 25℃到達までの所要時間が長くなっている。

表 1.3.2-11 に、各ケースの累積履歴吸収エネルギー、最大温度（P-3）及び加振停止から 25℃到達までの所要時間を示す。Eq.2 の Σ ΔW は Eq.1 の約 1.55 倍であり、Eq.2 の上昇温度は Eq.1 の約 1.47 倍であった。また、25℃到達までの所要時間の差は 10 分程度である。

表 1.3.2-11　最大温度と加振停止から 25℃到達までの所要時間

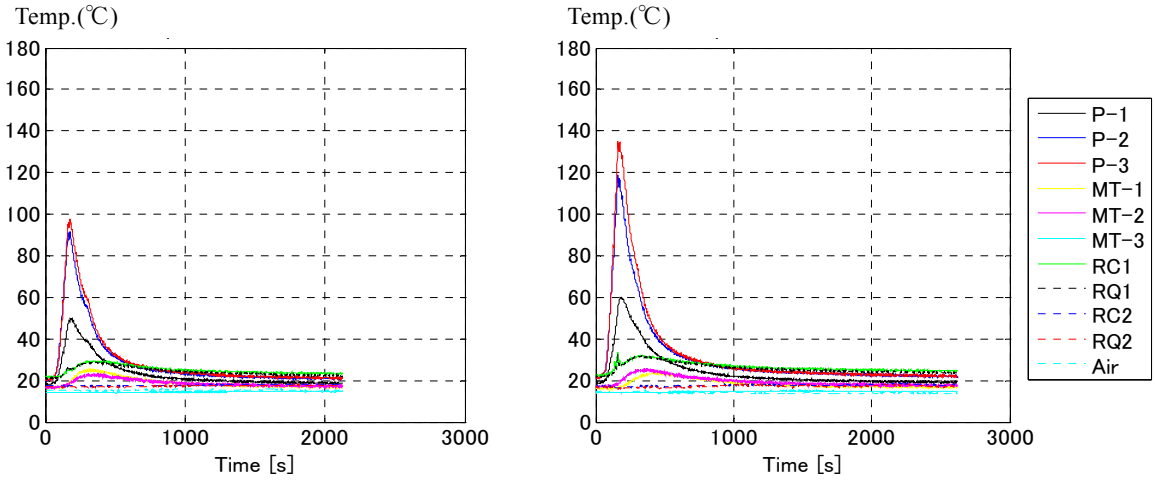
加振ケース	累積履歴吸収エネルギー ：　Σ ΔW（kN･mm）	最大温度 （P-3） （℃）	上昇温度* ΔT （℃）	加振停止から 25℃到達までの 所要時間　（s）
Eq.1	3.6703×10^5	99	約 79	1949 (32 min.)
Eq.2	5.6962×10^5	136	約 116	2446 (41 min.)

*：上昇温度：ΔT＝（最大温度）-（加振開始時の温度）



(a) Eq.1　　(b) Eq.2

図 1.3.2-19 加振中の温度履歴

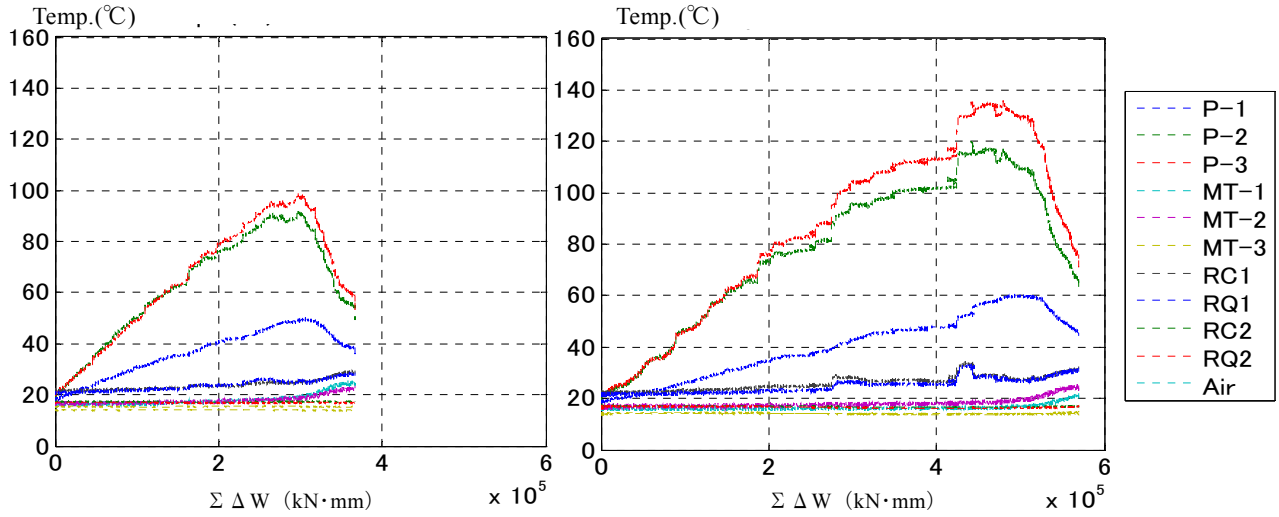


(a) Eq.1　　(b) Eq.2

図 1.3.2-20 加振中と加振後の温度履歴

4) 累積履歴吸収エネルギーと温度

図 1.3.2-21 に累積履歴吸収エネルギーと温度の関係を示す。Eq.1 と Eq.2 の温度増加と減少の傾向は概ね同一である。また、Eq.1 と Eq.2 の Σ ΔW に対する鉛プラグ温度（P-3、P-2）の傾きは、Σ ΔW が 200000 kN･mm 以下の範囲において、ほぼ同じである。



(a) Eq.1　　(b) Eq.2

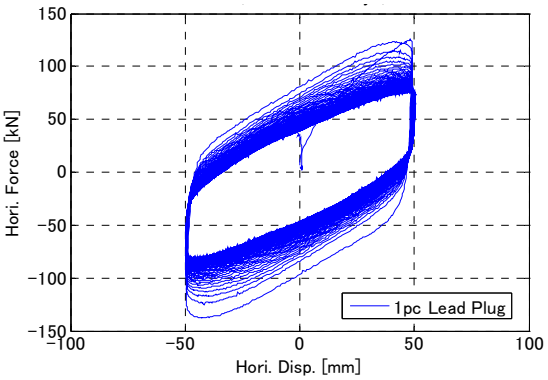
図 1.3.2-21 累積履歴エネルギーと温度：Eq.1（#1）と Eq.2（#2）

(5) 1 本プラグと 3 本プラグの比較

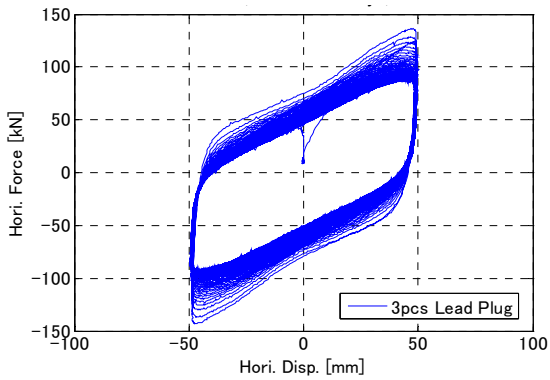
1) 正弦波加振試験

a) 荷重変形関係

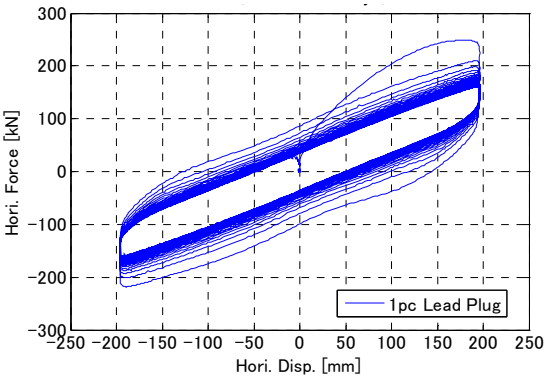
図 1.3.2-22 に正弦波加振（1B：±50%×250cycle、3B：200%×60cycle）における 1 本プラグタイプ試験体(#1、#3)と 3 本プラグタイプ試験体（#4）の荷重変形関係を示す。いずれの加振ケースについても安定した荷重変形関係を描いている。せん断ひずみ 200%については、1 本プラグタイプおよび 3 本プラグタイプ共に同様な荷重変形関係となっている。一方、せん断ひずみ 50%加振の荷重変形関係については、1 本プラグタイプはやや丸みのある矩形であるが、3 本プラグタイプは 1 本タイプに比べ角張った矩形である。



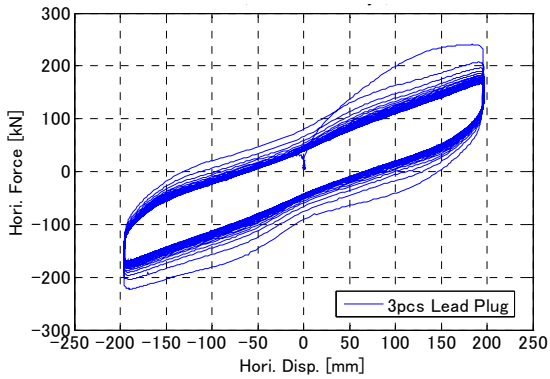
(a-1) 1 本プラグ(±50%×250cyc),#1



(a-2) 3 本プラグ(±50%×250cyc) ,#4



(b-1) 1 本プラグ(±200%×60cyc) ,#3



(b-2) 3 本プラグ (±200%×60cyc) ,#4

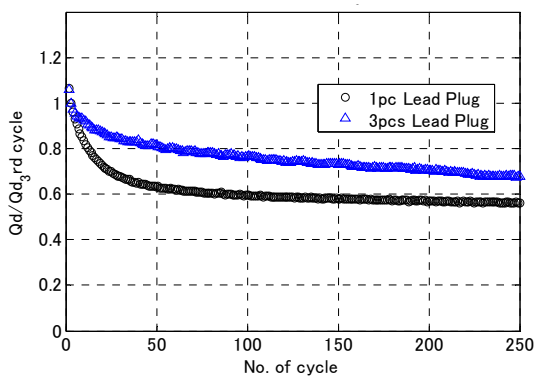
図 1.3.2-22 荷重変形関係

b) Qd、Kd の変化率

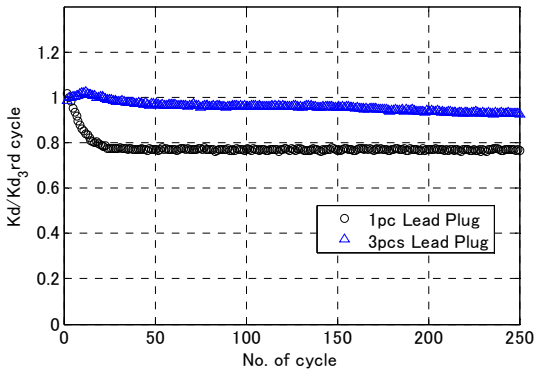
図 1.3.2-23 に、1 本プラグタイプ試験体（#1、#3）と 3 本プラグタイプ試験体（#4）の正弦波加振（1B：±50%×250cyc、3B：200%×60cycle）について、3 サイクル目の値を基準にした降伏荷重 Qd および降伏後剛性 Kd の変化率を示す。

せん断ひずみ 50% の Qd 変化率については（a-1)、1 本プラグタイプでは 50 サイクル目まで急激に低下し、それ以降は 0.6 に収束しているのに対し、3 本プラグタイプでは加振開始から緩やかに低下し､加振終了時には 0.7 となった｡せん断ひずみ 200%の Qd 変化率については(b-1)、10 サイクル目までは両者は一致しているが､1 本プラグタイプはそれ以降も緩やかに減少し､3 本プラグはそれ以降、繰り返し加振してもほとんど低下しない。すなわち､3 本プラグの方が 1 本プラグよりも Qd の低下が小さいことが分かる。

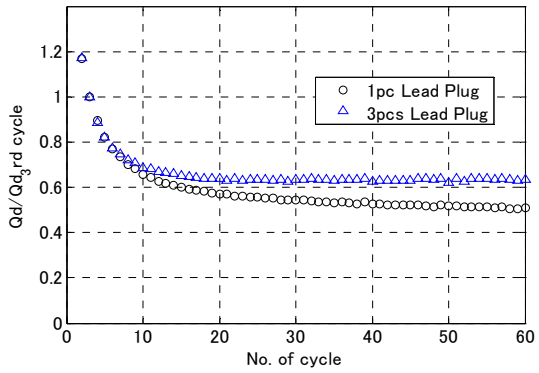
せん断ひずみ 50%の Kd 変化率について（a-2)、1 本プラグタイプでは 25 サイクル目まで急激に減少し､それ以降は約 0.75 で一定となるが､3 本プラグタイプでは急激な低下は見られず、繰り返しに伴う低下は緩やかであり、加振終了時には約 0.95 となった。これについては、鉛プラグの配置位置に因るところが大きいと考えられる。3 本プラグタイプ積層ゴムの場合、積層ゴム中心部に鉛プラグが配置されていないため、比較的小さいせん断変形時にも安定した復元力を得られるのではないかと思われる。また、前章で見られた荷重変形関係の相違は、この現象のためであると考えられる。一方、せん断ひずみ 200%の Kd 変化率（b-2）の傾向は、プラグタイプによらずほぼ同一であり、加振開始より非常に緩やかに減少しているが、その変化率は小さく、ほとんど変化しない。



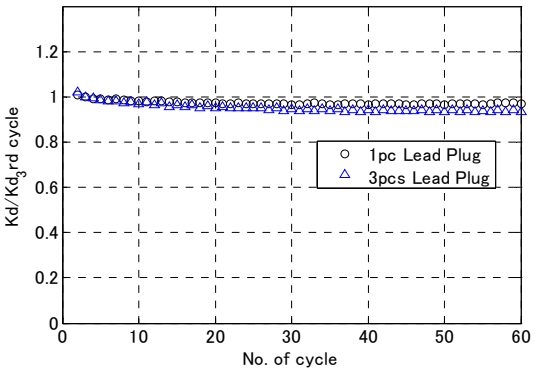
(a-1) Qd 変化率 (±50%×250cyc)



(a-2) Kd 変化率(±50%×250cyc)



(b-1) Qd 変化率(±200%×60cyc)



(b-2) Kd 変化率(±200%×60cyc)

図 1.3.2-23 Qd、Kd の変化率と加振回数の関係

c) 累積履歴吸収エネルギー

図 1.3.2-24、図 1.3.2-25 に正弦波加振における累積履歴吸収エネルギーΣΔW と Qd 変化率および Kd 変化率の関係を示す。Qd 変化率は、3 本プラグタイプ試験体（試験体#4）の 1B（せん断ひずみ 50%）を除き、累積エネルギーが 500000 kN･mm 以降で減少傾向に差があるものの、概ね一つの曲線で代表することができる。また、Kd の変化率については、1 本プラグタイプ試験体（試験体#1）の 1B（せん断ひずみ 50%）を除けば、いずれの加振ケースもほぼ一つの直線となっている。

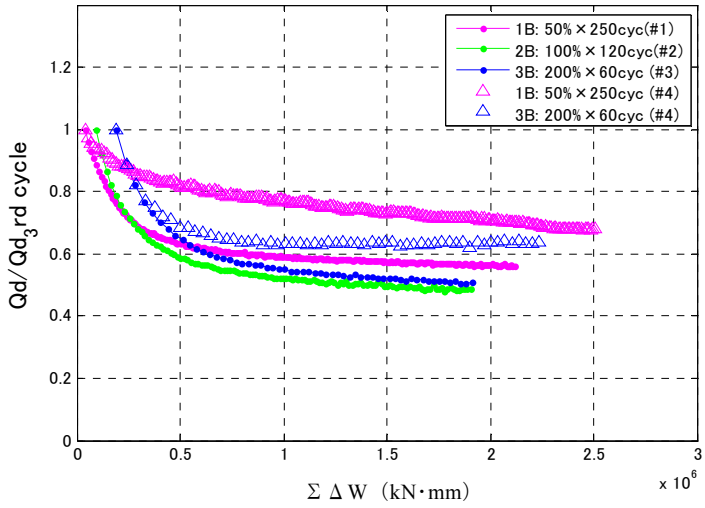


図 1.3.2-24 累積履歴吸収エネルギーと Qd 変化率

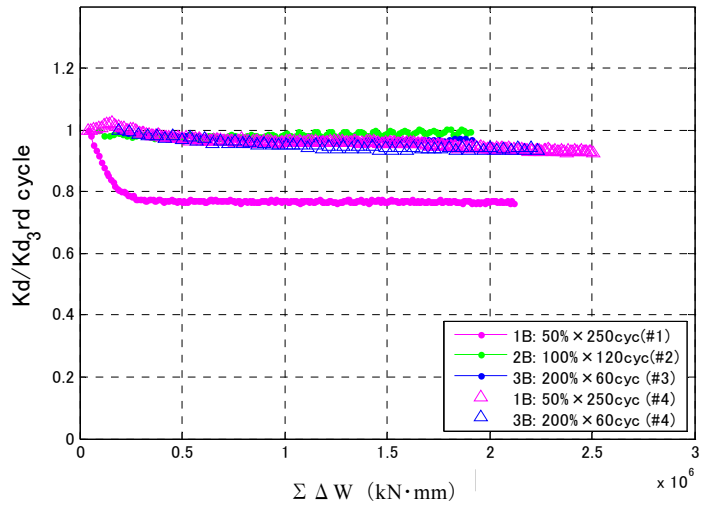
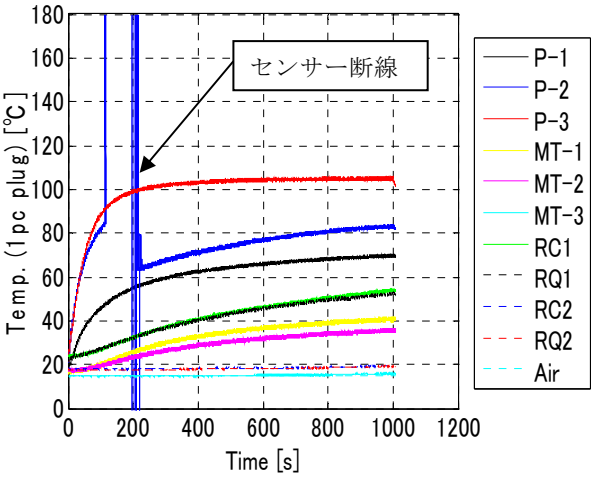


図 1.3.2-25 累積履歴吸収エネルギーと Kd 変化率

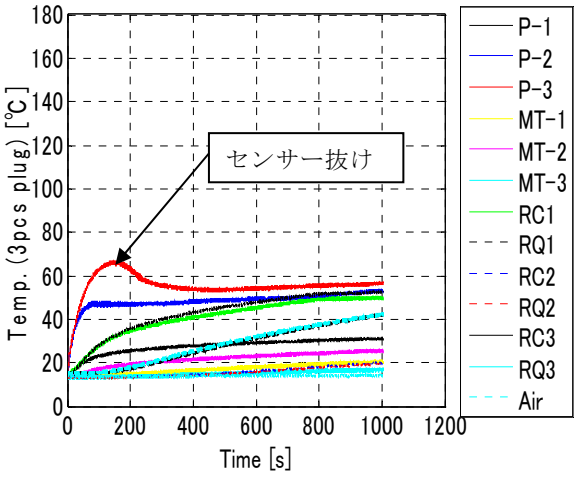
d) 試験体の温度履歴

図 1.3.2-26 に、1 本プラグタイプ試験体(#3)と 3 本プラグタイプ試験体(#4)の正弦波加振中の温度計測結果を示す。加振中に熱電対センサーの断線、およびセンサーの位置ズレ・抜けが生じたものについいては､グラフ中に注記した｡鉛プラグ部のセンサーの抜けが多いため定性的、定量的な評価が難しいが、位置ズレが小さく安定した計測点の P-1 についてみると、3 本プラグの方が 1 本プラグよりも温度が低く、その温度上昇傾向も緩やかである。また、3 本プラグの方が、積層ゴム部全体の温度が同時に上昇する傾向がある。

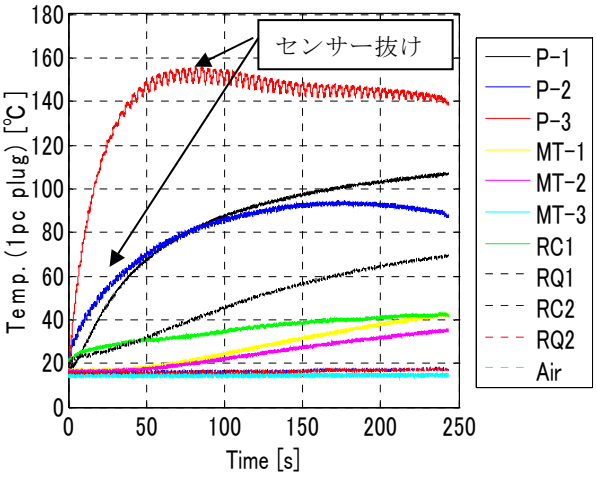
図 1.3.2-27 に、1 本プラグタイプ試験体(#1、#3)と 3 本プラグタイプ試験体(#4)の正弦波加振中と加振後の温度計測結果を示す。表 1.3.2-12 に、累積履歴吸収エネルギーΣΔW、鉛プラグの温度（P-3）及び加振停止から 25℃到達までの所要時間を示す。1B（せん断ひずみ 50%）については、3 本プラグタイプのΣΔW は 1 本プラグタイプの約 1.2 倍であるが、25℃到達までの所要時間は 3 本プラグタイプの方が 1 本プラグタイプよりも約 20 分早い。また、3B（せん断ひずみ 200%）についても同様に、3 本プラグタイプのΣΔW は 1 本プラグタイプの約 1.2 倍であるが、25℃到達までの所要時間は 3 本プラグタイプの方が 1 本プラグタイプよりも約 40 分早い。3 本プラグタイプの方が 1 本プラグタイプよりも温度上昇が小さく、降伏荷重の低下も小さいと推察される。



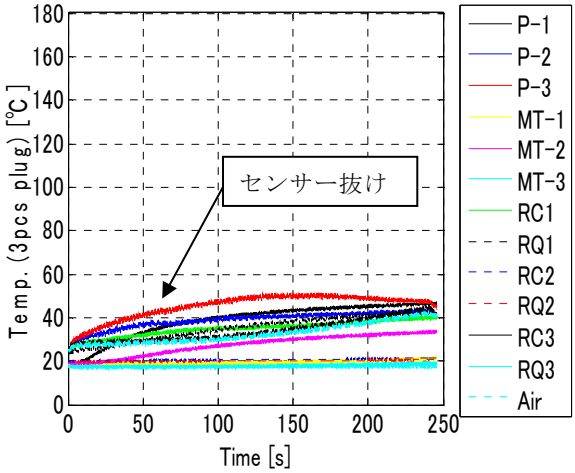
(a-1) 1 本プラグ(1B:±50%×250cyc)



(a-2) 3 本プラグ (1B:±50%×250cyc)

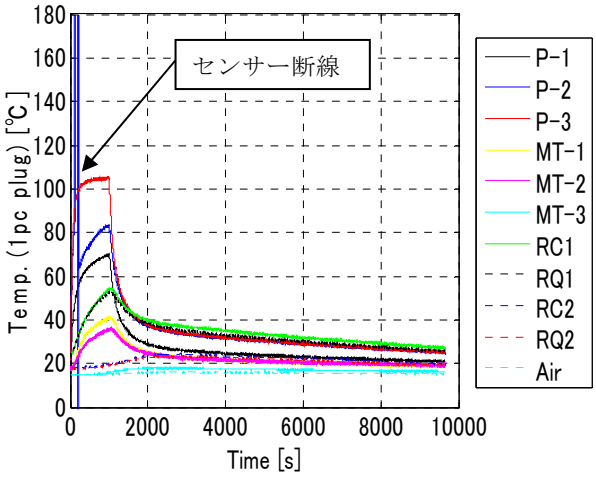


(b-1) 1 本プラグ (3B:±200%×60cyc)

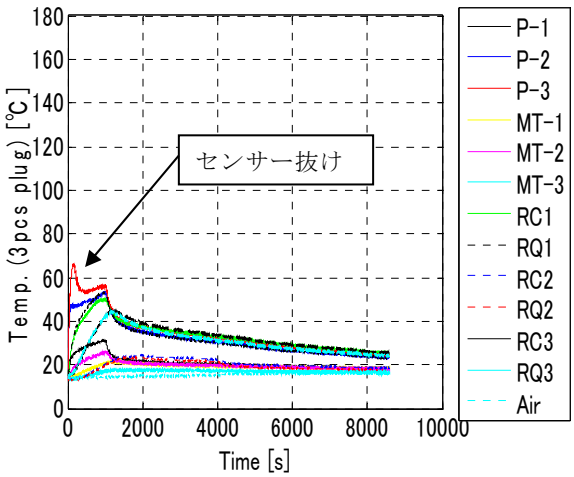


(b-2) 3 本プラグ (3B:±200%×60cyc)

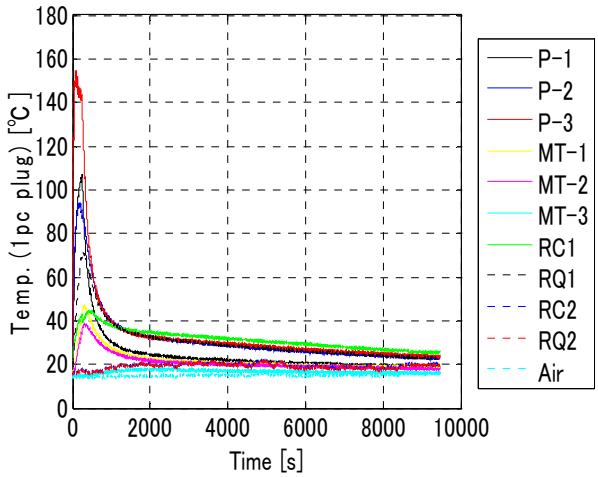
図 1.3.2-26 正弦波加振中の温度履歴



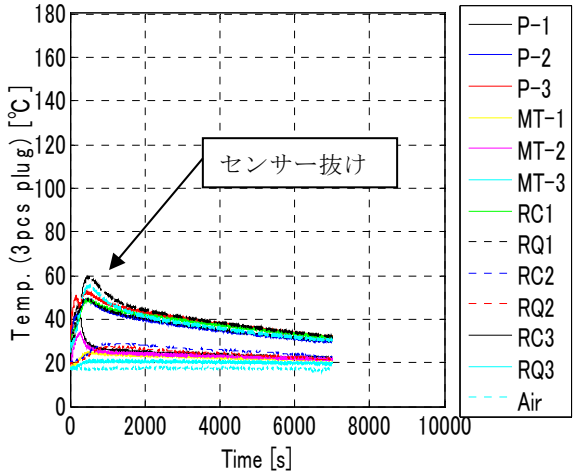
(a-1) 1 本プラグ(1B:±50%×250cyc)



(a-2) 3 本プラグ(1B:±50%×250cyc)



(b-1) 1 本プラグ (3B:±200%×60cyc)



(b-2) 3 本プラグ (3B:±200%×60cyc)

図 1.3.2-27 正弦波加振中+加振後の温度履歴

表 1.3.2-12　最大温度と加振停止から 25℃到達までの所要時間

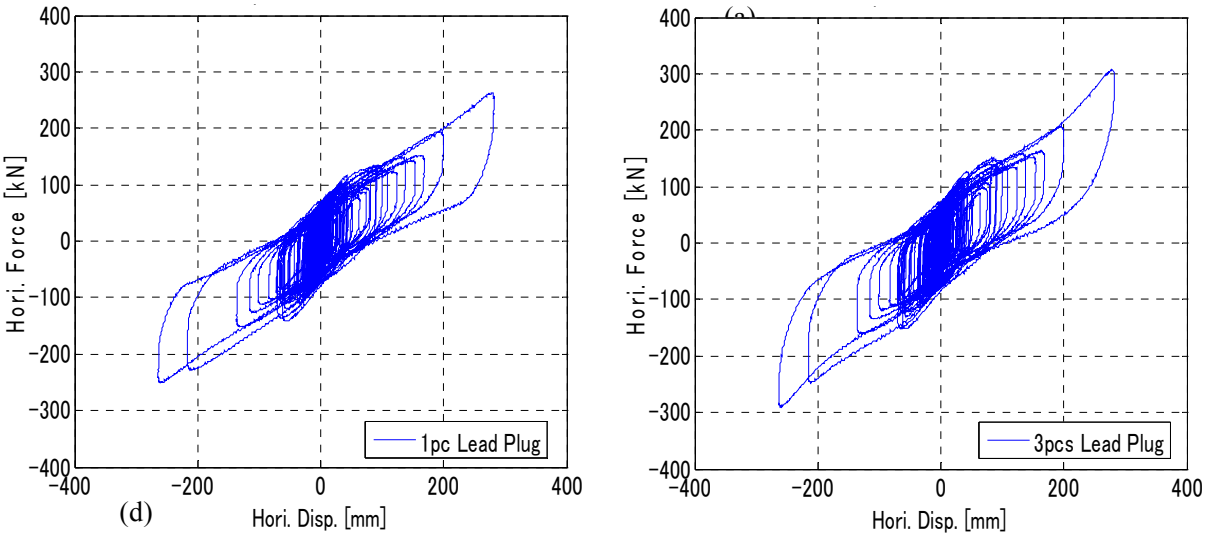
試験体	加振ケース	累積履歴吸収エネルギー：　Σ ΔW　(kN･mm)	最大温度 (P-3) (℃)	加振停止から 25℃到達までの所要時間 (s)
#1	1B	2.1162×10^6	106	8661 (144 min.)
#4		2.5040×10^6	(66)*	7582 (126 min.)
#3	3B	1.9097×10^6	(155)*	9208 (153 min.)
#4		2.2385×10^6	(53)*	6749 (112 min.)

＊：センサー抜けのため、参考値とする。

2) 地震応答波加振試験

a) 荷重変形関係

図 1.3.2-28 に 1 本プラグタイプ試験体（#3）と 3 本プラグタイプ試験体（#4）の地震応答波加振（Eq.2）の荷重変形関係を示す。どちらも安定した荷重変形関係を示している。変位が 200mm 以上の荷重変形関係については、3 本プラグタイプでは、1 本プラグタイプよりもハードニング傾向がみられる。この相違は、前述の正弦波加振試験結果と同様に、鉛プラグの配置位置に因るところが大きいと推察される。



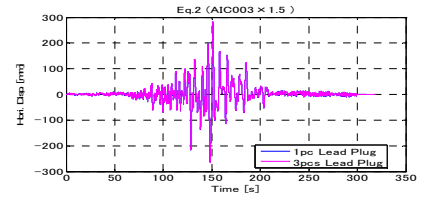
(a) 1 本プラグタイプ（#3）　　(b) 3 本プラグタイプ（#4）

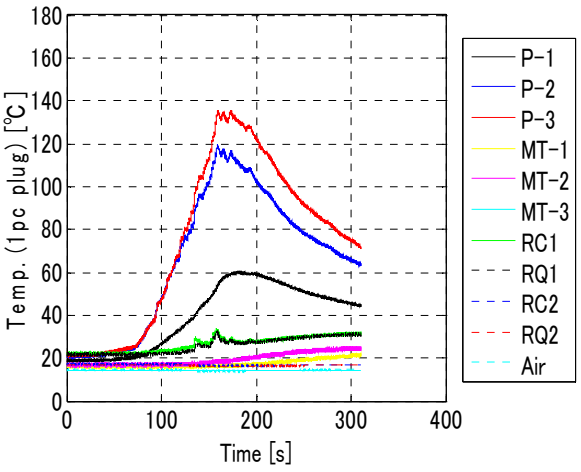
図 1.3.2-28 荷重変形関係（Eq.2）

b) 試験体の温度履歴

図 1.3.2-29 に 1 本プラグタイプ試験体（#3）と 3 本プラグタイプ試験体（#4）の地震応答波加振（Eq.2）における試験体温度履歴を示す。また、図 1.3.2-30 に同じく加振中と加振後の試験体温度履歴を示す。

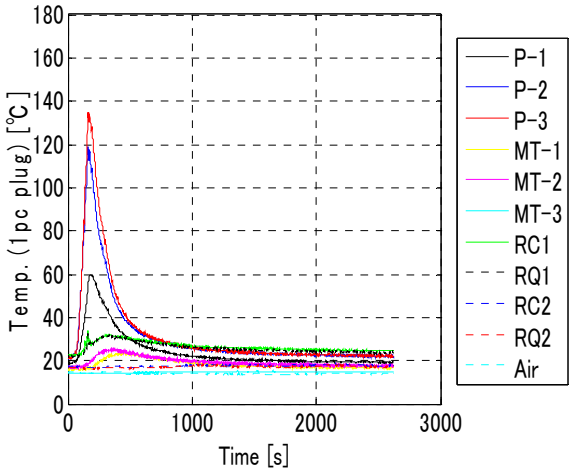
1 本プラグタイプの鉛プラグ温度（P-3）は 136℃まで上昇し、最大加振振幅を過ぎると温度が減少している。なお、3 本プラグタイプについては、加振中に熱電対センサーの計測位置ズレが顕著に見られたため、内部温度特性についての評価は難しい。





Eq.2：T-TN-AIC003_AVx1.5

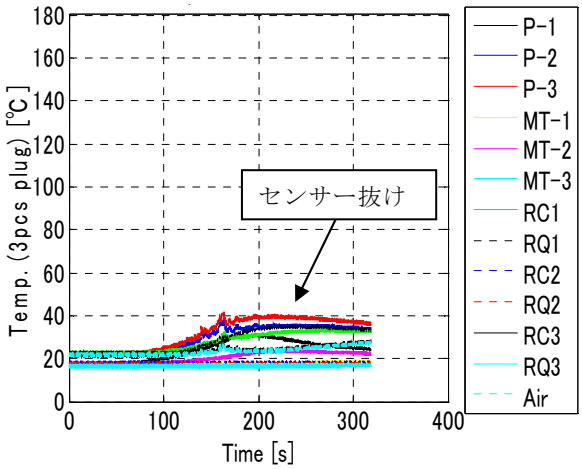
(a) 加振中の温度



Eq.2：T-TN-AIC003_AVx1.5

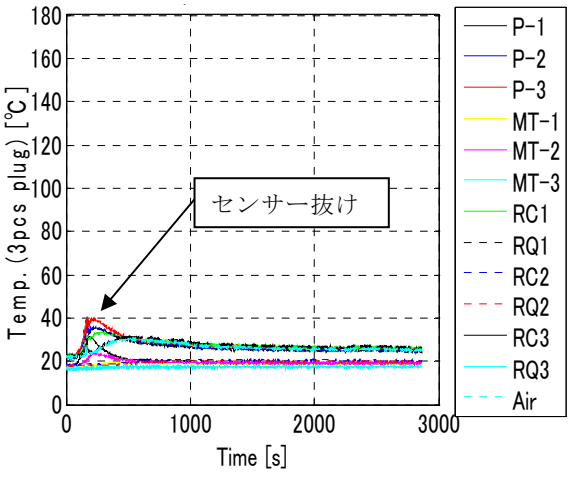
(b) 加振中と加振後の温度

図 1.3.2-29　1 本プラグタイプ（#3）



Eq.2：T-TN-AIC003_AVx1.5

(a) 加振中の温度



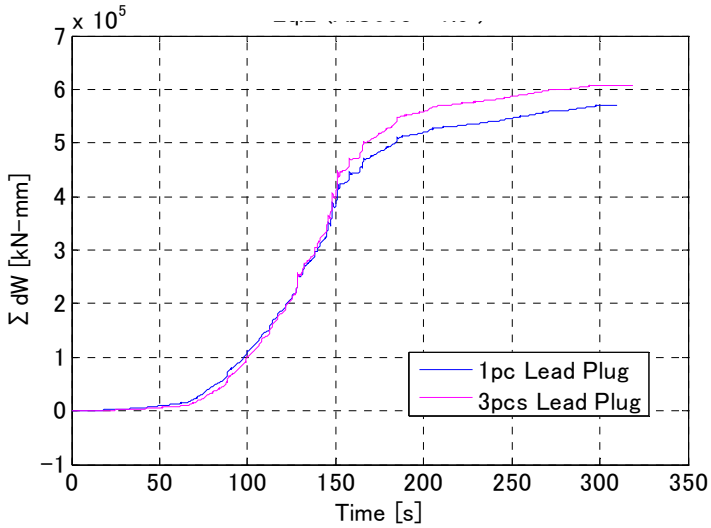
Eq.2：T-TN-AIC003_AVx1.5

(b) 加振中と加振後の温度

図 1.3.2-30　3 本プラグタイプ（#4）

c) 入力エネルギー

図 1.3.2-31 に、1 本プラグタイプ試験体（#3）と 3 本プラグタイプ試験体（#4）の地震応答波加振（Eq.2）における累積履歴吸収エネルギーΣΔW を重ねて示す。また、表 1.3.2-13 に、ΣΔW、鉛プラグ温度（P-3）及び加振停止から 25℃到達までの所要時間を示す。ΣΔW の最大値は 1 本プラグタイプが 5.6962×10^5 kN･mm、3 本プラグタイプが 6.0776×10^5 kN･mm であった。3 本プラグタイプのΣΔW は 1 本プラグの約 1.07 倍であり、25℃到達までの所要時間は両ケースともほぼ同じ約 45 分であった。



Eq.2：T-TN-AIC003_AVx1.5

図 1.3.2-31 累積履歴吸収エネルギー

表 1.3.2-13　最大温度と加振停止から 25℃到達までの所要時間

試験体	累積履歴エネルギー：　ΣΔW [kN･mm]	最大温度（P-3）[℃]	加振停止から 25℃到達までの所要時間 [s]
#1：1 本プラグ	5.6962×10^5	136	2446 (41 min.)
#4：3 本プラグ	6.0776×10^5	(42)*	2696 (45 min.)

*：センサー抜けのため、参考値とする。

(6) 実験前後の特性変化

各加力ケースの初期に実施した基本特性試験、加振の間に実施した基本特性試験および一連の加力試験後に実施した基本特性試験の荷重変形関係の比較結果を図 1.3.2-32～図 1.3.2-35 に示す。どの加力条件においても荷重変形関係の変化はほとんどなく、健全な状態を保っている。

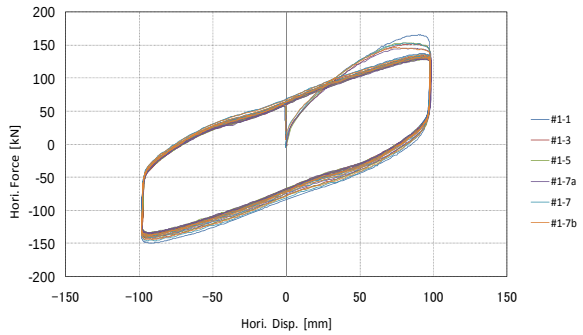


図 1.3.2-32 試験体#1

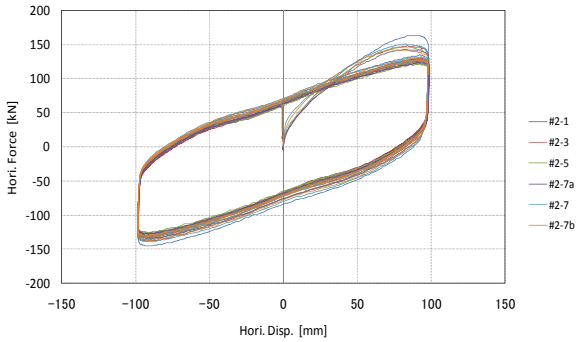


図 1.3.2-33 試験体#2

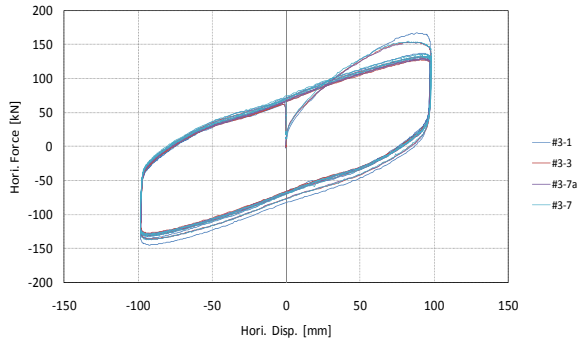


図 1.3.2-34 試験体#3

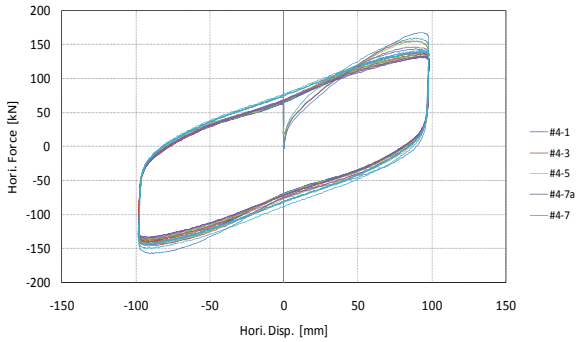


図 1.3.2-35 試験体#4

3.3.2.3 まとめ

いずれの加振ケースについても、荷重変形関係における履歴面積は加振に伴い徐々に小さくなったが、長周期加振と限界加振の荷重変形関係はほとんど同じであることから、長周期加振で荷重変形関係が安定し、それ以上の加振を与えても荷重変形関係はほとんど変化しないことが確認された。また、加振に伴い降伏荷重 Qd が低下し、鉛プラグの温度が上昇した。一方、せん断ひずみ 100%以上の加振ケースにおいては、降伏後剛性 Kd はほとんど変化せず一定であった。

この Qd の低下傾向には鉛プラグの温度上昇と負の相関が見られる。 鉛プラグの温度が上昇すると、Qd が低下し、鉛プラグの温度上昇が緩やかになると Qd の低下も小さくなっている。また、累積履歴吸収エネルギーの大きい限界加振時においても、Qd は際限なく低下せず、ある一定のところに収束する。これらの一連の試験を経験した試験体の荷重変形関係は試験初期とほぼ同一であり、長周期地震動を想定した正弦波限界加振による入力エネルギーを経験しても LRB の性能は健全に保たれることが確認された。

地震応答波加振における累積履歴吸収エネルギーは、Eq.1 が 0.367×10^6 kN･mm、 Eq.2 が 0.570×10^6 kN･mm であり、正弦波加振の累積履歴吸収エネルギー（$2.0\sim2.5\times10^6$ kN･mm）よりも小さく、繰り返しに伴う Qd の低下が収束する前の状態であった。すなわち、長周期地震動に対しても LRB は安定した荷重変形関係を示すことが確認されたことになる。

3 本プラグタイプと 1 本プラグタイプの荷重変形関係を比較した。これより、3 本プラグの方が 1 本プラグよりも Qd の低下が小さいことが確認された。3 本プラグでは温度計測が正確に行なわれなかったため定量的な評価は難しいが、鉛プラグを分散配置させたことにより温度上昇が小さくなり、それに伴う Qd の低下も小さくなったと考えられる。また、荷重変形関係の形状については、せん断ひずみ 50%加振時に差が見られ、1 本プラグのやや丸みのある矩形に対して 3 本プラグは角張った矩形を示した。Kd の変化率については 1 本プラグでは減少したのに対して 3 本プラグではほとんど減少しなかった。この相違は、鉛プラグの配置に因るところが大きいと考えられる。3 本プラグの場合、積層ゴム中心部に鉛プラグが配置されていないため、比較的小さいせん断変形においても復元力を安定して得られるのではないかと推察される。この 3 本タイプの LRB についても、一連の試験を経験した後の荷重変形関係は試験初期とほとんど同じであり、健全であることが確認された。

以上の長周期地震動を想定した実験により、LRB の健全性が確認されたことから、鉛プラグの温度上昇に伴う力学特性の変化を設計に反映するための評価法が今後の課題となる。また、3 本プラグタイプでは 1 本プラグタイプと比較して繰り返しによる降伏荷重の低下が小さいことが確認され、解析的検討などさらなる検討が期待される。

参考文献

1.3.2-1) 平成 21 年度　建築基準整備促進補助金事業「1 超高層建築物等の安全対策に関する検討」長周期地震動に関する検討-免震建築物の応答性状, 2009 【地震波の参考文献】

1.3.2-2) 鹿島建設(株), 東京理科大学, オイレス工業(株), (株)ブリヂストン, 免震装置の熱･力学連成挙動解明と免震建物応答評価法の開発, 2008.4

1.3.2-3) 人見、加治木、荒井：鉛プラグ入り積層ゴムの速度依存性と繰り返し依存性, 日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.543-544、1998 年 9 月

1.3.2-4) 高山、森田：鉛プラグ型積層ゴムの圧縮面圧下における限界変形能力, 日本建築学会技術報告集、No.16、pp.57-62、2002 年 12 月

1.3.2-5) 西澤、山本、川口、金子：鉛プラグ入り積層ゴムの繰り返し加振実験報告, 日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.445-446、2004 年 8 月

1.3.2-6) 河内山、竹中、仲村、山本、宮崎：長周期地震動を想定した LRB1000 の内部温度特性確認実験～地震応答波の 1/1 スケール加振実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.603-604、2006 年 9 月

1.3.2-7) 竹中他：大振幅繰返し変形を受ける積層ゴム支承の熱・力学的連成挙動に関する研究(その 1～14)、日本建築学会大会学術講演梗概集、2007 年～2010 年

1.3.2-8) Mineo Takayama et.el ：Durability of Rubber Isolators by Long-Duration Ground Motion due to Large Earthquakes、The 14th World Conference on Earthquake Engineering、Oct. 2008

1.3.2-9) 竹中、近藤、高岡、引田、北村、仲村：積層ゴムの熱・力学的連成挙動に関する実験的研究、日本建築学会構造系論文集、第 74 巻、第 646 号、pp.2245-2253、2009 年 12 月

1.3.3 高減衰ゴム系積層ゴム

1.3.3.1 実験計画

(1) 実験目的と背景

本実験は、高減衰ゴム系積層ゴム支承の長振幅高速繰返し試験を縮小試験体により実施し、多数回繰返しに対する性能の把握を目的とする。

表 1.3.3-1 に、既往の研究における高減衰ゴム系積層ゴムの多数回繰返し実験の内容をまとめて示す。縮小試験体による実験がほとんどであるが、文献[1.3.3-2)]においては実大サイズの試験体による実験も実施されている。加力プログラムとしては、正弦波による一定振幅加振、正弦波の組み合わせによるランダム波加振、および地震応答波加振が実施されている。加振周期は 3～5 秒の動的加振であり、累積変形量は大きなもので 70～80m となっている。図 1.3.3-1 に、文献[1.3.3-4)]で実施された直径 500mm の試験体の正弦波加力の実験結果を例示する。全ての加振振幅の結果とも、繰返し加力に伴い履歴ループ面積が除々に小さくなっている様子が確認できる。特性値の変化および温度上昇については、変形量が大きいほど、加力周期が短いほど増大する傾向が見られる。また文献[1.3.3-4)]中には、直径 300mm の試験体についても、特性変化、温度上昇について直径 500mm の試験体と同様の傾向であったと示されている。

メーカーの技術資料[1.3.3-5)]においては、高減衰ゴム系積層ゴムは動的な水平変形を連続して与えると、積層ゴムの等価水平剛性 K_{eq}、等価減衰定数 H_{eq}、および吸収エネルギーΔW は低下するとされ、表 1.3.3-2 および図 1.3.3-2 のような実験結果が示されている。

以上のように、既往の実験においては、主に正弦波による一定振幅多数回繰返し加振が実施され、繰返しの影響による試験体温度の上昇と水平復元力特性値の低下が確認されている。高減衰ゴム系積層ゴムは、繰返し依存性だけではなくその他にも様々な依存性を有しており、温度依存性、振動数依存性、荷重履歴依存性については、繰返し加力時の特性変化に影響を与えると考えられる。長周期地震動を想定したランダムな入力に対する履歴特性変化を評価しようとする場合、これらの各種依存性が多数回繰返し加力時にどのように影響してくるのかを検討する必要がある。また、より大きな累積変形量、累積エネルギー量を受けた場合の性能を確認し、繰返し加振による限界状態の把握も必要と考えられる。

表 1.3.3-1 既往の研究における高減衰ゴム系積層ゴムの多数回繰返し実験一覧

参考文献	試験体	面圧	加力プログラム	周期	累積変形量
文献 1.3.3-1)	φ225mm(E0.6), S1=28.1, S2=5.11	8N/mm^2	正弦波, γ=200%で 200 サイクル	3.0 秒	70.4m
文献 1.3.3-2)	φ700mm(X0.6), S1=36.4, S2=4.96	14N/mm^2	正弦波の組合わせによる変位パターン		35.0m
	φ1300mm(X0.6), S1=36.5, S2=4.98	14N/mm^2			35.0m
文献 1.3.3-3)	φ225mm(X0.6), S1=35, S2=5.0	?	正弦波, γ=200%で 200 サイクル	3.0 秒	72.0m
文献 1.3.3-4)	φ500mm(X0.6), S1=35.7, S2=4.9	3～5 N/mm^2	正弦波, γ=50%で 100 サイクル	3.0 秒	20.4m(12.0m)
			正弦波, γ=100%で 50 サイクル	3.0 秒	20.4m(12.0m)
			正弦波, γ=100%で 50 サイクル	5.0 秒	20.4m(12.0m)
			正弦波, γ=200%で 100 サイクル	3.0 秒	81.6m(48.0m)
	φ300mm(X0.6), S1=37.5mm, S2=5.0		正弦波, γ=200%で 100 サイクル	5.0 秒	81.6m(48.0m)
			地震波, JMA KOBE NS		－
			地震波, K-NET TOMAKOMAI NS×1.5		－
			地震波, MEXICO SCT1 EW		－
			地震波, BCJ-L2		－
			地震波, JSCA 告示波		－
			地震波, 三の丸波 EW		－

※文献 1.3.3-4)の累積変形量の表記は、φ500mm (φ300mm)

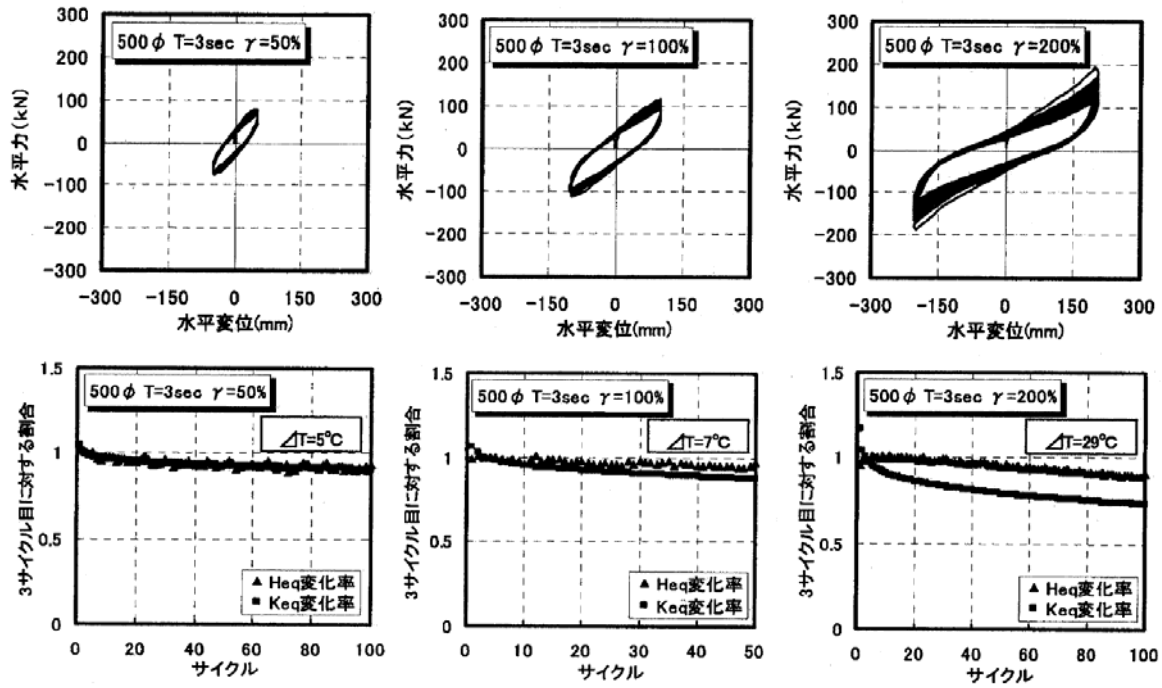
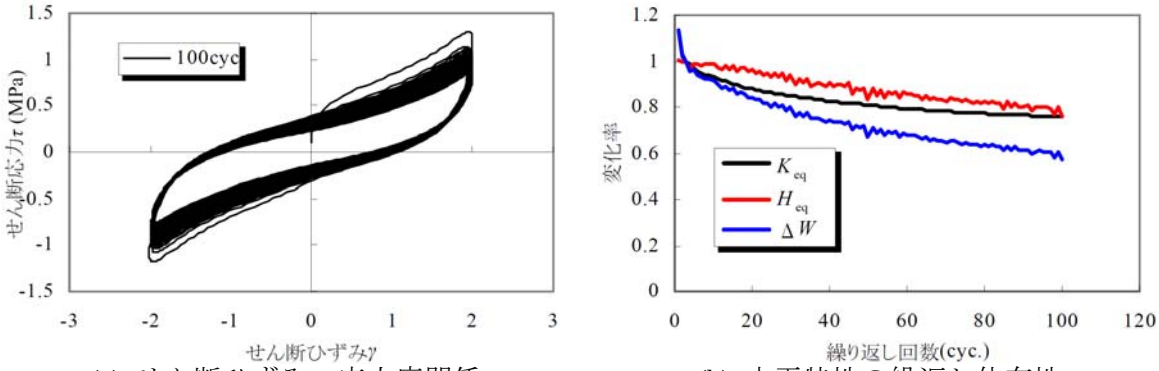


図 1.3.3-1 文献 [1.3.3-4)]における実験結果(φ500 正弦波加力時の履歴ループと特性変化)

表 1.3.3-2 ϕ225(S1=35.1, S2=5.0, G=0.62)試験体
繰返しによる水平特性値の変化 (せん断ひずみ 200%×100 サイクル(加振周期 3.0 秒))

サイクル数	K_{eq} 変化率	H_{eq} 変化率	ΔW 変化率
1	1.136	1.001	1.138
3	1.000	1.000	1.000
10	0.928	0.986	0.915
20	0.879	0.961	0.844
50	0.809	0.832	0.673
100	0.757	0.757	0.573

※変化率は 3 サイクル目の特性値に対する各サイクルの特性値の割合



(a) せん断ひずみ－応力度関係　　(b) 水平特性の繰返し依存性
(変化率は 3 サイクル目に対する割合)

図 1.3.3-2 ϕ225(S1=35.1, S2=5.0, G=0.62)試験体
せん断ひずみ 200%×100 サイクル(加振周期 3.0 秒)繰返し加力試験結果

(2) 実験日時および場所

実施日時：2010 年 12 月 13 日～12 月 16 日

実施場所：ブリヂストン横浜工場(下郷地区)

(3) 試験体

試験体は、実大サイズ(直径 1000mm)の 1/4 サイズの直径 250mm の高減衰ゴム系積層ゴム(X0.6R)×4 体。表 1.3.3-3 に、実大サイズの積層ゴムと試験体の諸元を合わせて示す。図 1.3.3-3 に、試験体の形状を示す。試験体の上下フランジには、試験体温度計測のための熱電対の配線用に幅・深さとも 5mm の溝が設けられている。

表 1.3.3-3 高減衰ゴム系積層ゴム試験体諸元

	外径 (mm)	内径 (mm)	ゴム層厚	内部鋼板厚(mm)	S1	S2
実大サイズ	1000	25	6.7mm×30 層=201mm	4.4	36.4	4.98
試験体	250	10.0	1.7mm×30 層=51mm	1.2	35.3	4.9

G_{eq} (γ=100%時) = 0.620N/mm^2

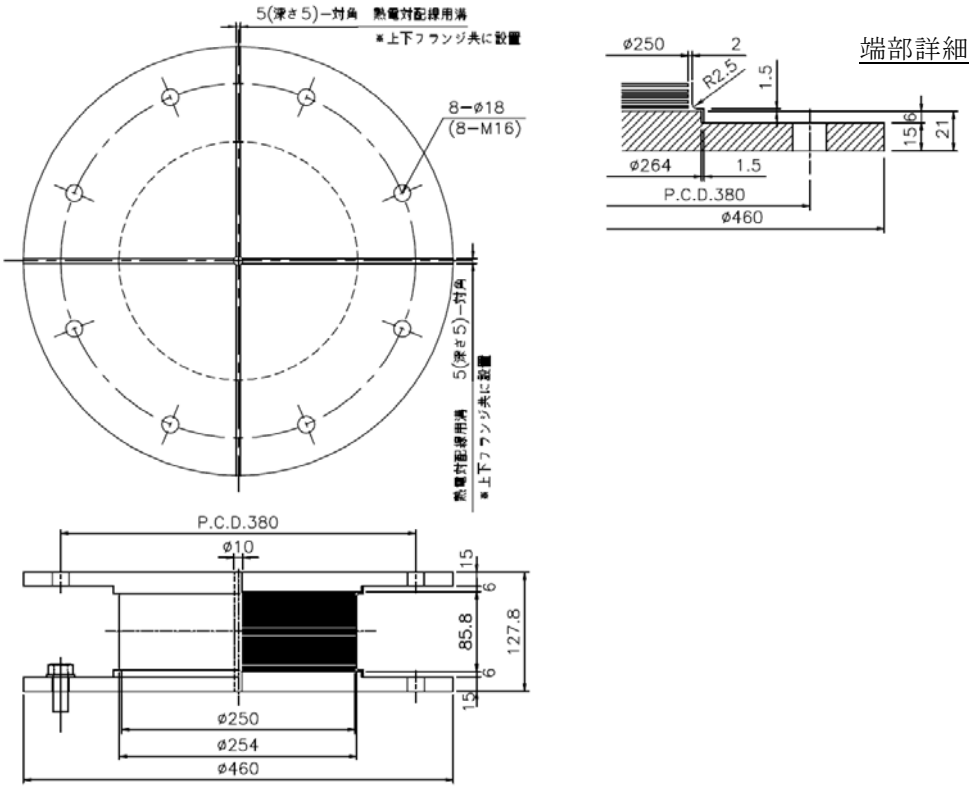
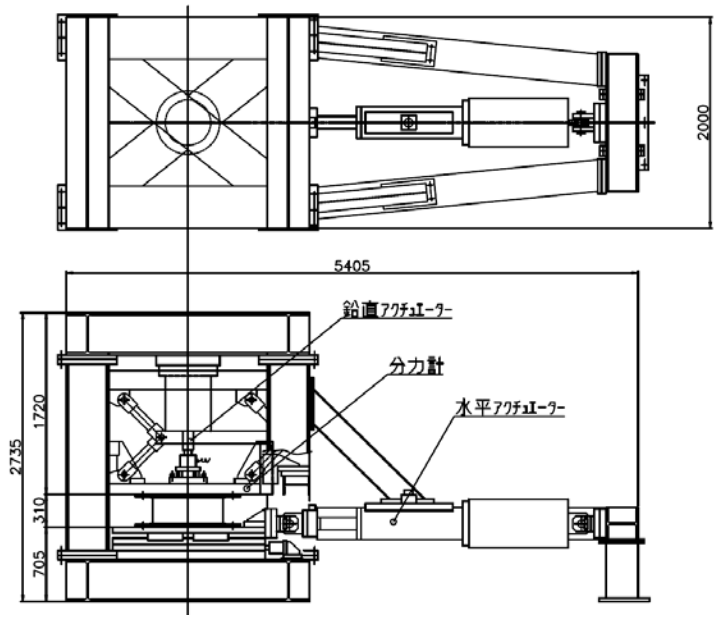


図 1.3.3-3 高減衰ゴム系積層ゴム試験体形状

(4) 試験装置

試験機はブリヂストンの 1000kN 動的試験機(電気油圧サーボ方式動的 2 軸試験機)を使用した。図 1.3.3-4 に試験機外観と試験機性能を示す。加力により試験体に発生する熱が試験機に伝達しないよう、試験体の上下に断熱板を設置する。断熱板は、D-M-E 高温用断熱板(厚さ 10mm)を使用した。図 1.3.3-5 に断熱板の設置要領を示す。写真 1.3.3-1 に試験体の設置状況を示す。



○鉛直載荷機能(アクチュエーター)
- 動的出力：圧縮 1000kN
  引張 300kN
- 稼働ストローク：±100mm
- 最大速度：0.5Hz/10mm
  (3.14cm/sec)
- 周波数範囲：0.01～5Hz

○水平載荷機能(アクチュエーター)
- 動的出力：±200kN
- 稼働ストローク：±300mm
- 最大速度：0.5Hz/±200mm
  (6.28cm/sec)
- 周波数範囲：0.01～5Hz

図 1.3.3-4 試験機外観および試験機性能

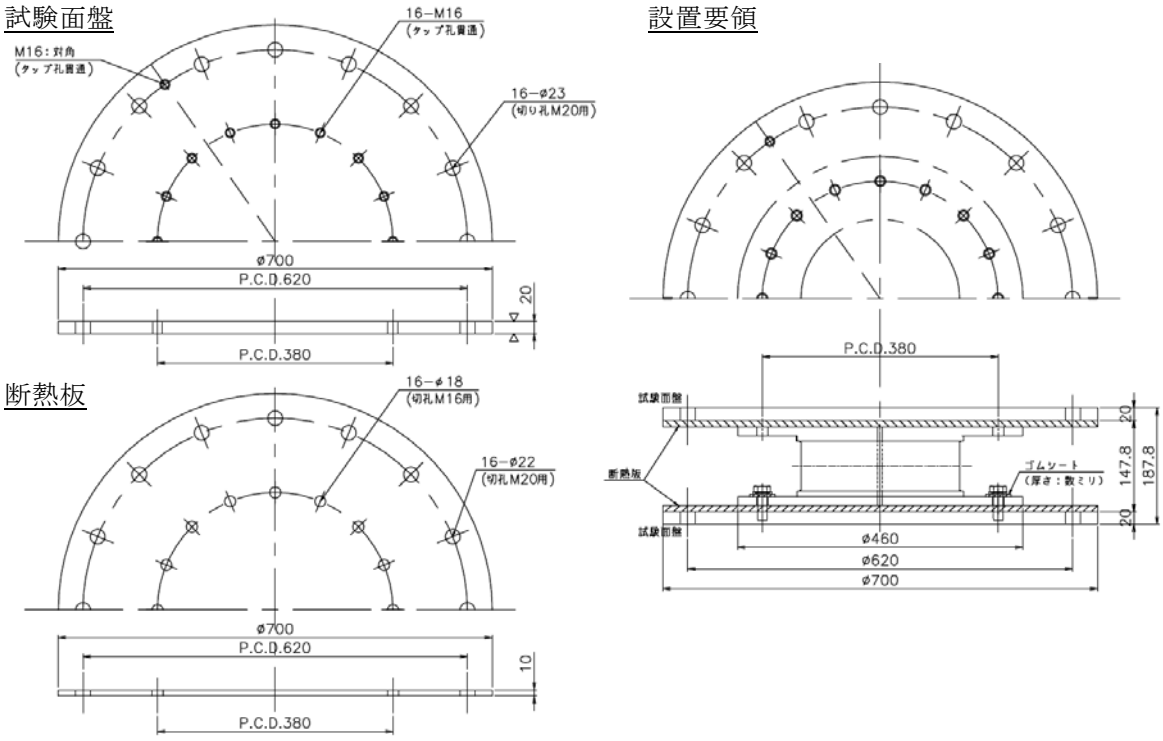
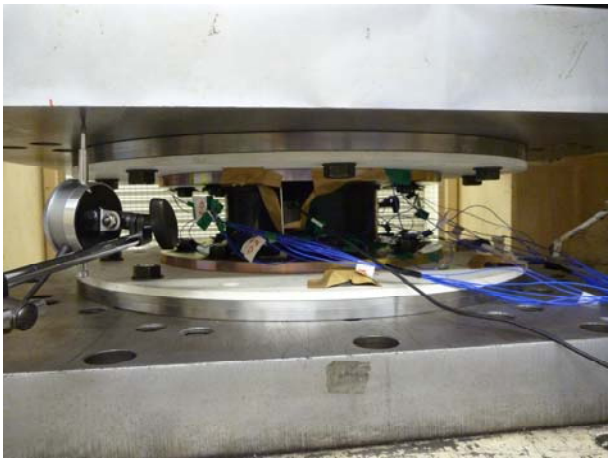


図 1.3.3-5 断熱板設置要領

(a) 熱電対配線用のフランジ溝

(b) 試験体の設置



(c) 試験体の設置状況

写真 1.3.3-1 試験体の設置状況

(5) 計測項目と計測方法

高減衰ゴム系積層ゴムの多数回繰返し加振時の、水平復元力特性値の変化、試験体の温度変化の確認を目的として、計測項目は以下の通りとする。

- ・水平荷重、水平変位
- ・鉛直荷重、鉛直変位
- ・試験体各部の温度
- ・雰囲気温度

試験体各部の温度は、熱電対および非接触型温度計にて計測する。図 1.3.3-6 に試験体の温度計測点を示す。サンプリング周波数は、温度は 10Hz、荷重および変位は 100Hz とする。温度計測については加振終了後も一定時間継続し、加振による発熱後の試験体温度の低下傾向を確認する。

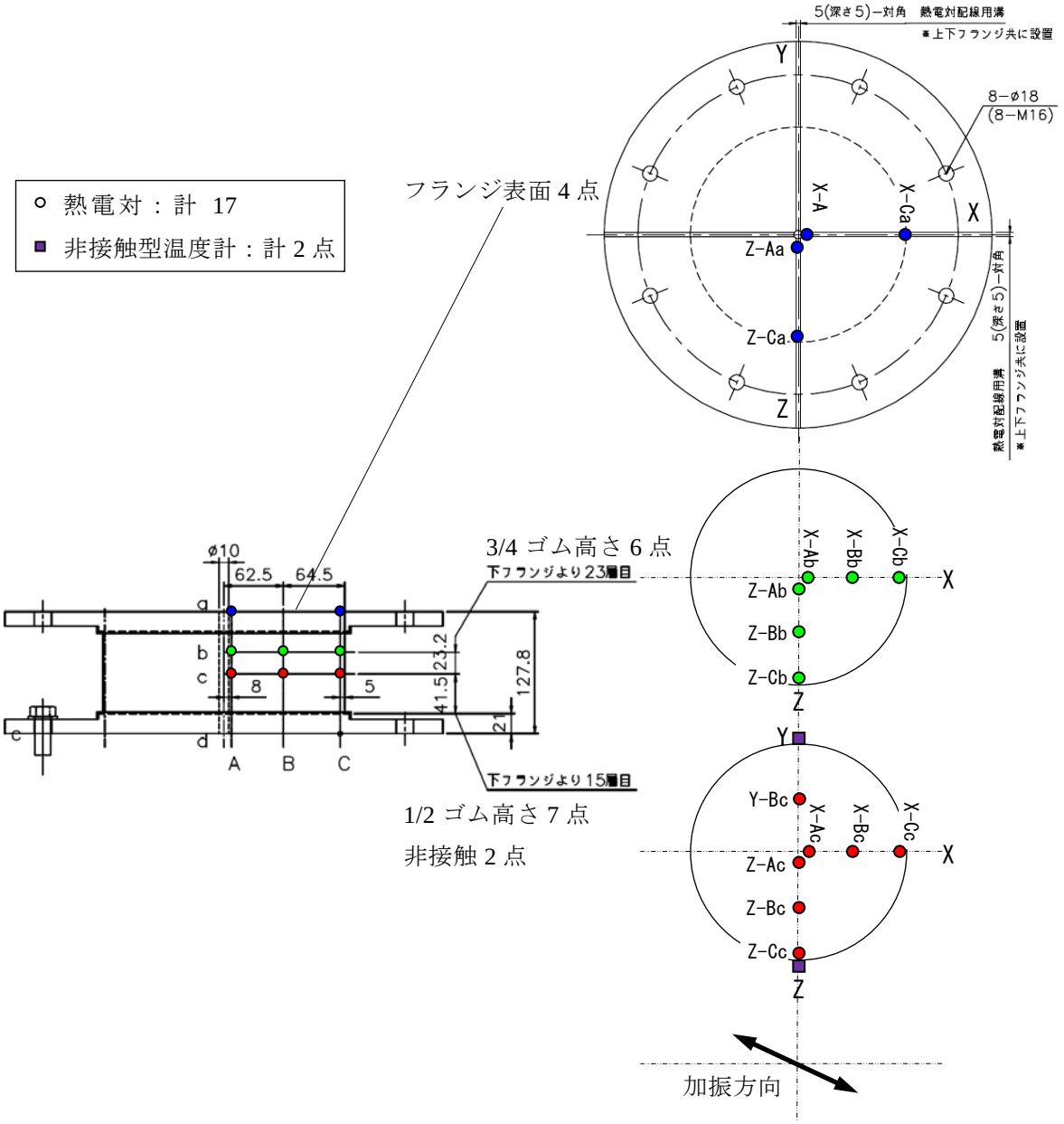


図 1.3.3-6 試験体温度計測点

(6) 試験方法および試験ケース

表 1.3.3-4 に、実大積層ゴムに対するエネルギー吸収性能評価のための目標試験ケースを示す。3 水準の加振振幅において、累積変形量が 50m となるよう繰返しサイクル数を設定した長周期地震動を対象とする試験ケース、およびそれに 2.0 倍の余裕度を考慮した限界性能を対象とする試験ケースである。この目標試験ケースを基準に、縮小試験体の試験ケースを設定した。

表 1.3.3-5 に、4 体の縮小試験体の試験ケースを示す。試験は、15.0N/mm^2 の一定面圧下における加振周期 4.0 秒の正弦波による多数回繰返し加振である。試験体 1 においては、表 1.3.3-4 に示す目標試験ケースの限界性能試験ケース(1B、2B、3B)に相当する試験を実施した。ただし、累積変形量は縮小試験体に対して 100m としており、目標試験ケースよりも厳しい条件となっている。また、高減衰ゴム系積層ゴムは様々な依存性を持つことから、試験体 2 においては初期温度、試験体 3、4 においては荷重履歴を変化させた試験ケースを実施した。初期温度 0℃および 30℃の試験ケースについては、設定温度の恒温槽に 24 時間以上入れることによって試験体の初期温度を調整した。この時、試験体を恒温槽から取出した後の試験準備中における試験体の温度変化を考慮して、恒温槽の温度設定を初期温度 0℃の試験ケースにおいては–4℃、初期温度 30℃の試験ケースにおいては 33℃とした。実際の加振時温度は、試験準備および「基本特性」の加振により図 1.3.3-6 の温度計測点の X-Bc 点において、初期温度 0℃の試験ケース開始時には約 4℃、初期温度 30℃の試験ケース開始時には約 33℃であった。加えて、ランダム波に対する応答を確認するため、試験体 4 において地震応答波による加力を実施した。地震応答波としては、高減衰ゴム系積層ゴムのみで構成される免震層を有する等価周期 4.0 秒(γ=200%時)の 1 質点剛体モデルに、T-TN-AIC003-AV を入力した応答変位波形を用いた。図 1.3.3-7 に、T-TN-AIC003-AV の加速度時刻歴波形を示す。試験には、継続時間 600 秒以上の入力による応答変位波形のうち、主要動部分を含む 60～120 秒の 150 秒間の応答変位波形を用いた。図 1.3.3-8 に、試験に用いた応答変位波形を示す。地震波による累積変形量が、実大サイズに換算して約 50m となるよう、図 1.3.3-8 に示す 150 秒間の応答変位波形の 4 回連続入力を実施した。また、各試験ケースにおける試験体の水平復元力特性の変化を確認するため、各試験ケースの前後において 4 種類の基本特性試験を実施した。表 1.3.3-6 に、4 種類の基本特性試験の概要を示す。写真 1.3.3-2 に、試験体の加振状況を示す。

表 1.3.3-4 実大積層ゴム(ϕ1000)に対する目標試験ケース

ケース	試験条件	加振周期 (sec)	ひずみ (%)	変位 (mm)	換算速度 (cm/s)	サイクル数	時間 (sec)	累積変形 (m)
1A	長周期	4.0	50	100	15.7	125	500	50
1B	限界	4.0	50	100	15.7	250	1000	100
2A	長周期	4.0	100	200	31.4	60	240	48
2B	限界	4.0	100	200	31.4	120	480	96
3A	長周期	4.0	200	400	62.8	30	120	48
3B	限界	4.0	200	400	62.8	60	240	96

※加振波は正弦波とする。

表 1.3.3-5 HDRϕ250 縮小試験体試験ケース一覧(その 1)

試験体	加振順	ケース	試験条件	加振周期 (sec)	ひずみ (%)	変位 (mm)	換算速度 (cm/s)	サイクル数	累積変形 (m)	試験体初期温度 (℃)
1	5		基本特性	4.0	100	51	8.0	4	0.8	20.0
	6	1B 相当	**限界**	**4.0**	**50**	**26**	**4.0**	**1000**	**104**	**20.0**
	7		（直後）基本特性	4.0	100	51	8.0	4	0.8	終了時温度
	8		（後）基本特性	4.0	100	51	8.0	4	0.8	20.0
	9		基本特性	4.0	100	51	8.0	4	0.8	20.0
	10	2B 相当	**限界**	**4.0**	**100**	**51**	**8.0**	**500**	**102**	**20.0**
	11		（直後）基本特性	4.0	100	51	8.0	4	0.8	終了時温度
	12		（後）基本特性	4.0	100	51	8.0	4	0.8	20.0
	13		基本特性	4.0	100	51	8.0	4	0.8	20.0
	14	3B 相当	**限界**	**4.0**	**200**	**102**	**16.0**	**250**	**102**	**20.0**
	15		（直後）基本特性	4.0	100	51	8.0	4	0.8	終了時温度
	16		（後）基本特性	4.0	100	51	8.0	4	0.8	20.0
	17		(出荷)基本特性	20.0	100	51	1.02	3	0.6	20.0
2	1		基本特性	4.0	100	51	8.0	4	0.8	0.0
	2	初期 0℃	**初期 0℃**	**4.0**	**200**	**102**	**16.0**	**250**	**102**	**0.0**
	3		（直後）基本特性	4.0	100	51	8.0	4	0.8	終了時温度
	4		（後）基本特性	4.0	100	51	8.0	4	0.8	20.0
	28		基本特性	4.0	100	51	8.0	4	0.8	30.0
	29	初期 30℃	**初期 30℃**	**4.0**	**200**	**102**	**16.0**	**250**	**102**	**30.0**
	30		（直後）基本特性	4.0	100	51	8.0	4	0.8	終了時温度
	31		（後）基本特性	4.0	100	51	8.0	4	0.8	20.0
	32		(出荷)基本特性	20.0	100	51	1.02	3	0.6	20.0

・面圧 15.0N/mm^2

・地震応答波、(出荷)基本特性以外は正弦波加振

・(出荷)基本特性は三角波加振

・試験体初期温度 20℃の試験については、試験体温度 20℃±5℃を許容値とする

表 1.3.3-5 HDRϕ250 縮小試験体試験ケース一覧(その 2)

試験体	加振順	ケース	試験条件	加振周期 (sec)	ひずみ (%)	変位 (mm)	換算速度 (cm/s)	サイクル数	累積変形 (m)	試験体初期温度 (℃)
3	18	風応答	微小振幅 1	3.0	6	3	0.6	3	―	―
	19		微小振幅 2	3.0	10	5	1.0	3	―	―
	20		基本特性	4.0	100	51	8.0	4	0.8	20.0
	21	荷重履歴	**漸増**	**4.0**	**50**	**26**	**4.0**	**245**	**25.0**	**20.0**
	22			**4.0**	**100**	**51**	**8.0**	**122**	**24.9**	
	23			**4.0**	**200**	**102**	**16.0**	**61**	**24.9**	
	24			**4.0**	**250**	**128**	**20.0**	**49**	**25.1**	
								計 477	**計 100**	
	25		（直後）基本特性	4.0	100	51	8.0	4	0.8	終了時温度
	26		（後）基本特性	4.0	100	51	8.0	4	0.8	20.0
	27		(出荷)基本特性	20.0	100	51	1.02	3	0.6	20.0
4	33	風応答	微小振幅 1	3.0	6	3	0.6	3	―	―
	34		微小振幅 2	3.0	10	5	1.0	3	―	―
	39		基本特性	4.0	100	51	8.0	4	0.8	20.0
	40	荷重履歴	**漸減**	**4.0**	**250**	**128**	**20.0**	**49**	**25.1**	**20.0**
	41			**4.0**	**200**	**102**	**16.0**	**61**	**24.9**	
	42			**4.0**	**100**	**51**	**8.0**	**122**	**24.9**	
	43			**4.0**	**50**	**26**	**4.0**	**245**	**25.0**	
								計 477	**計 100**	
	44		（直後）基本特性	4.0	100	51	8.0	4	0.8	終了時温度
	45		（後）基本特性	4.0	100	51	8.0	4	0.8	20.0
	35		基本特性	4.0	100	51	8.0	4	0.8	20.0
	36	地震応答	**地震応答波**		**max 約 130**	**max 約 70**			**約 3.4 ×4 回**	**20.0**
	37		（直後）基本特性	4.0	100	51	8.0	4	0.8	終了時温度
	38		（後）基本特性	4.0	100	51	8.0	4	0.8	20.0
	46		(出荷)基本特性	20.0	100	51	1.02	3	0.6	20.0

・面圧 15.0N/mm^2

・地震応答波、(出荷)基本特性以外は正弦波加振

・(出荷)基本特性は三角波加振

・試験体初期温度 20℃の試験については、試験体温度 20℃±5℃を許容値とする

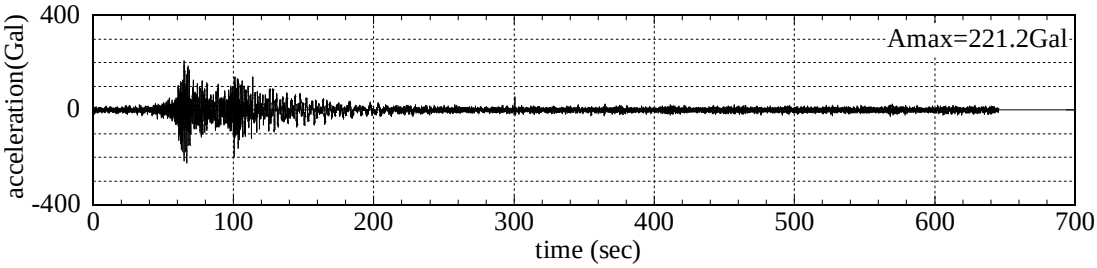


図 1.3.3-7 T-TN-AIC003-AV の加速度時刻歴波形

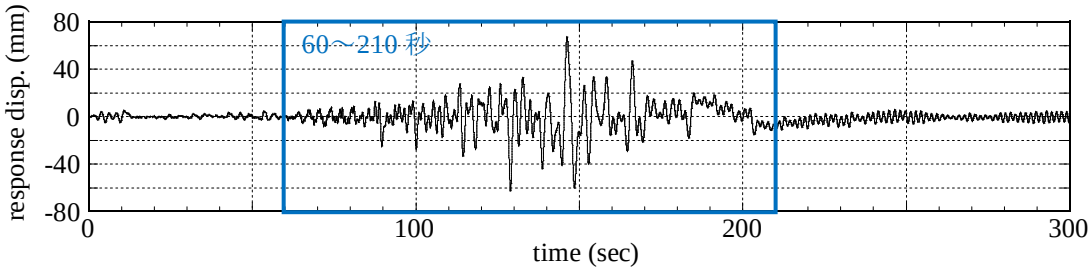


図 1.3.3-8 T-TN-AIC003-AV 入力時の応答変位波形(HDRϕ250 試験体相当)

表 1.3.3-6 基本特性試験概要

基本特性試験	各試験ケース実施前に、試験体温度 20℃にて実施。初期温度 0℃、30℃のケースについては、各初期温度にて実施。
(直後)基本特性試験	各試験ケース実施直後にインターバルをとらずに、試験終了時温度にて実施。
(後)基本特性試験	各試験ケース実施後にインターバルをとって、試験体温度が 20(±5)℃に復帰した状態で実施。
(出荷)基本特性試験	各試験体の最初と最後に、製品検査と同様の試験を実施。尚、最初の試験については製品検査に振替える(実施試験機は同じ)。

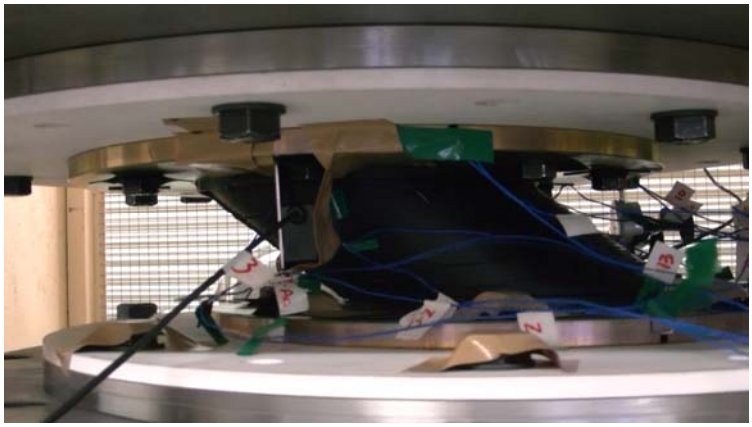


写真 1.3.3-2 加振状況

1.3.3.2 実験結果

(1) 水平荷重変位関係および試験体温度の推移

実験結果の水平荷重変位関係からの水平復元力特性値の算出は、以下の通りとする(図1.3.3-9)[1.3.3-5)]。

【等価剛性 K_{eq}】

水平荷重変位関係の正側最大変位$+\delta_0$、負側最大変位$-\delta_0$、正側最大荷重$+Q$、負側最大荷重$-Q$としたとき、K_{eq}は以下の式で算出する。

$$K_{eq} = \frac{+Q-(-Q)}{+\delta_0-(-\delta_0)} \tag{1.3.3-1}$$

実験結果の履歴ループにおいては、最大荷重点と最大変位点が一致しないため、K_{eq}は履歴ループ上には乗らない仮想点としての正側と負側の最大点を結ぶ割線剛性とする。

【等価減衰定数 H_{eq}】

履歴ループの 1 サイクル分の履歴吸収エネルギー(1 サイクルが囲む面積)ΔW、正側と負側の最大変位の平均値δ_0として、以下の式により算出する。

$$H_{eq} = \frac{\Delta W}{2\pi \cdot K_{eq} \cdot \delta_0^{\,2}} \tag{1.3.3-2}$$

【降伏荷重特性係数 u】

正側の降伏荷重$+Q_d$と負側の降伏荷重$-Q_d$の平均値を Q_d として、以下の式により算出する。なお、1 サイクル目は荷重の立ち上がり部分があるため Q_d の値が不安定となるので、1 サイクル目の値は使用しない。

$$u = \frac{Q_d}{K_{eq} \cdot \delta_0} \tag{1.3.3-3}$$

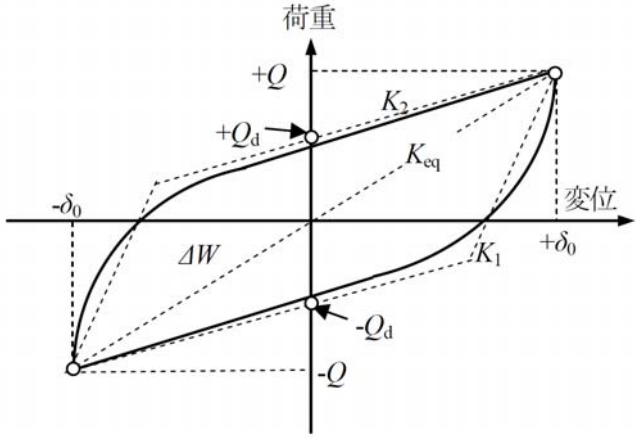


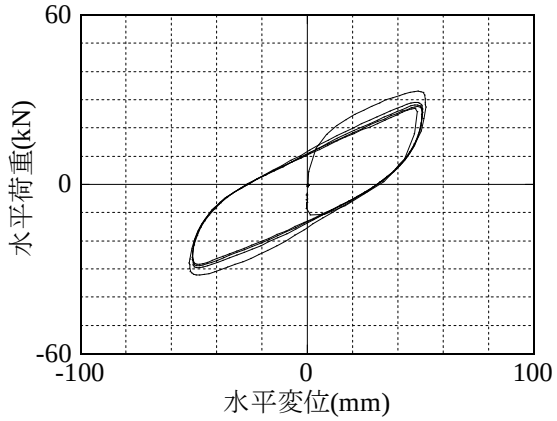
図 1.3.3-9 高減衰ゴム系積層ゴムの水平復元力特性 [1.3.3-5)]

図 1.3.3-10～32 に、各試験ケースの実験結果の水平荷重変位関係、水平復元力特性値 K_{eq}、H_{eq}、 u の加振サイクル数による推移、および試験体各部温度の推移を示す。水平荷重変位関係については、各試験ケースの履歴ループと、各試験ケースの前後で実施した「基本特性」、「(直後)基本特性」、「(後)基本特性」の履歴ループを並べて示す。荷重履歴漸増、漸減のケースについては、各加振振幅による履歴ループ全てを合わせて描いた履歴ループに加え、各加振振幅ごとに分けて描いた履歴ループを示す。水平復元力特性値の加振サイクルによる推移においては、各試験ケースの任意のサイクルの履歴ループを取り出した図を並べて示す。水平復元力特性値の 3 サイクル目の値に対する比とは、各試験ケースの 3 サイクル目の履歴ループから抽出した値で各サイクルの値を除した値とする。荷重履歴漸増、漸減のケースについては、各振幅による加振の 3 サイクル目の値で除した値とする。また、試験体各部の温度については平面方向の位置が同一である計測点ごと(A:中心孔、B:ゴム部中心、C:ゴム表面)にまとめて示す。凡例において灰色で示されている計測点は、熱電対の断線等により計測不能となった計測点である。

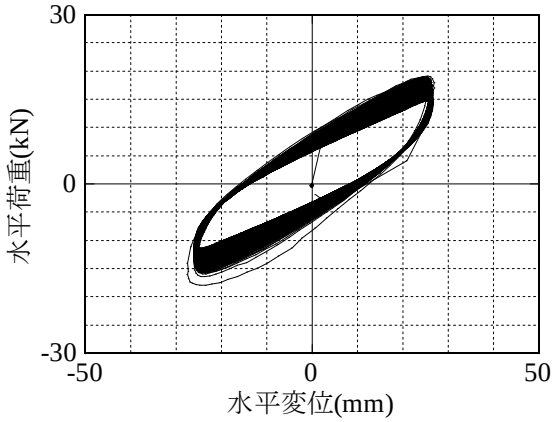
各試験ケースの履歴ループにおいては、多数回の繰返し加振に伴い最大荷重と履歴ループ面積が除々に低下している様子が確認できる。また、「基本特性」、「(直後)基本特性」、「(後)基本特性」の履歴ループを比較すると、加振終了直後で試験体温度が高い状態の「(直後)基本特性」の履歴ループは最大荷重と履歴ループ面積が「基本特性」のループよりも小さくなっている。インターバルをおいて試験体温度が 25℃程度に復帰した後の「(後)基本特性」のループは、「基本特性」のループに近い形状に回復している。

図 1.3.3-11(b)、14(b)、17(b)に示す 1B 相当、2B 相当、3B 相当の試験ケースの水平復元力特性値の推移において、K_{eq} は最初急激な低下を示すが、その後低下が緩やかになり、ある一定の値に収束する傾向が見られる。H_{eq} と u は、全加振サイクルにわたって緩やかに低下する傾向を示している。図 1.3.3-20(b)および 23(b)に示す、初期温度 0℃、30℃の水平復元力特性値の推移を比較すると、初期温度 0℃のケースが 30℃のケースに比べて大きな低下を示しているが、これは初期温度 0℃の 3 サイクル目の特性値が大きいためである。図 1.3.3-20(a), 23(a)に示す、両ケースの 250 サイクル目の履歴ループを比較すると、おおよそ一致した形状を示している。図 1.3.3-21、24 に示す試験体温度についても、初期温度 0℃、30℃の両ケースとも加振終了時の温度は、試験体高さ 1/2 において約 90℃となっており、図 1.3.3-18 に示す 3B 相当の加振終了時温度ともほぼ一致する。以上より、3B 相当、初期温度 0℃、初期温度 30℃のケースは、初期温度が異なっても同じ繰返し加振を受けることによりほぼ同様の履歴特性に至ったと考えられる。図 1.3.3-26、29 に示す、荷重履歴漸増、漸減のケースの水平復元力特性値の推移を比較すると、漸増のケースにおいては各加振振幅で K_{eq}、H_{eq}、u とも値の低下を示しているが、漸減のケースにおいては、せん断ひずみ 250%での加振において特性値が大きく低下し、その後の 200%、100%、50%での加振においては、H_{eq} と u は緩やかに低下し続けているが、K_{eq} は緩やかに上昇している。このことから、経験した荷重履歴が繰返し加振時の復元力特性の変化に影響を与えることが確認できる。

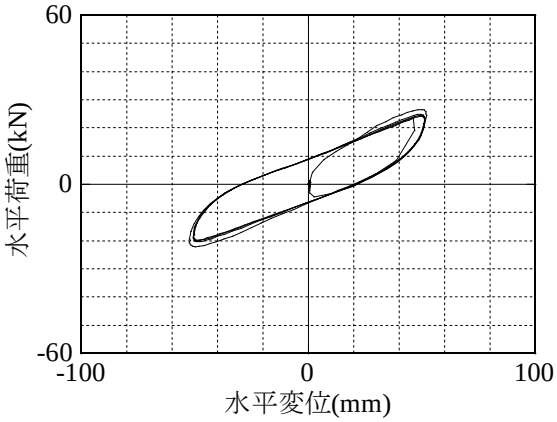
試験体各部の温度については、フランジ部の温度上昇は小さく、大きい場合でも 10℃強であり、加振後の温度低下は非常に緩やかである。ゴム部については、中心孔の 1/2 高さが最も高い温度を示している。加振後の温度の低下は 3/4 高さの方が 1/2 高さよりも下がり始めがやや早い。一方、中心孔とゴム表面の温度低下の傾向はほぼ一致している。また、地震応答波による試験体の温度上昇は、4 回連続加振によって、1/2 高さで 8℃程度であった。



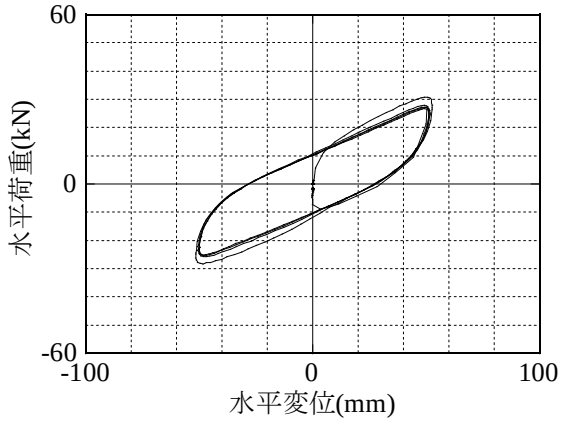
(a) 基本特性 [γ=100%, 4 サイクル]



(b) 1B 相当 限界 [γ=50%, 1000 サイクル]

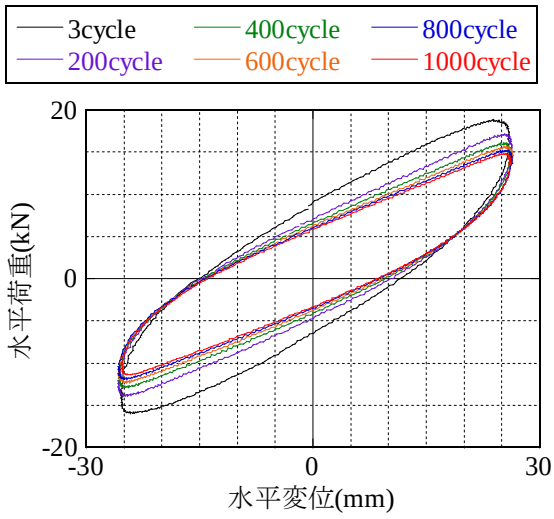


(c) (直後)基本特性 [γ=100%, 4 サイクル]

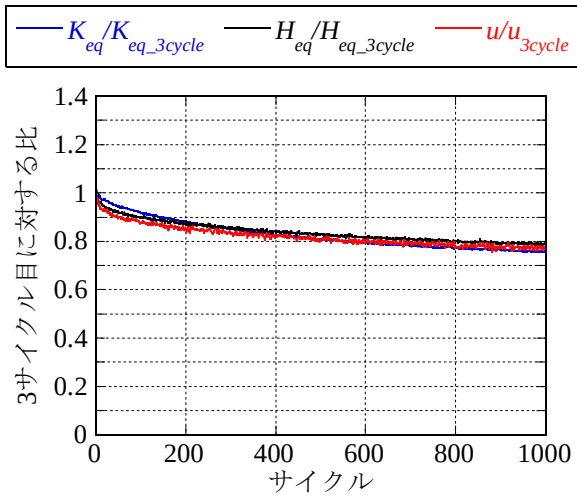


(d) (後)基本特性 [γ=100%, 4 サイクル]

図 1.3.3-10 試験体 1、1B 相当(γ=50%, 1000 サイクル, 加振周期 4.0 秒, 正弦波)
水平荷重変位関係



(a)各サイクルの水平荷重変位関係



(b) K_{eq}, H_{eq}, u の 3 サイクル目に対する比

図 1.3.3-11 試験体 1、1B 相当(γ=50%, 1000 サイクル, 加振周期 4.0 秒, 正弦波)
水平復元力特性値の加振サイクル数による推移

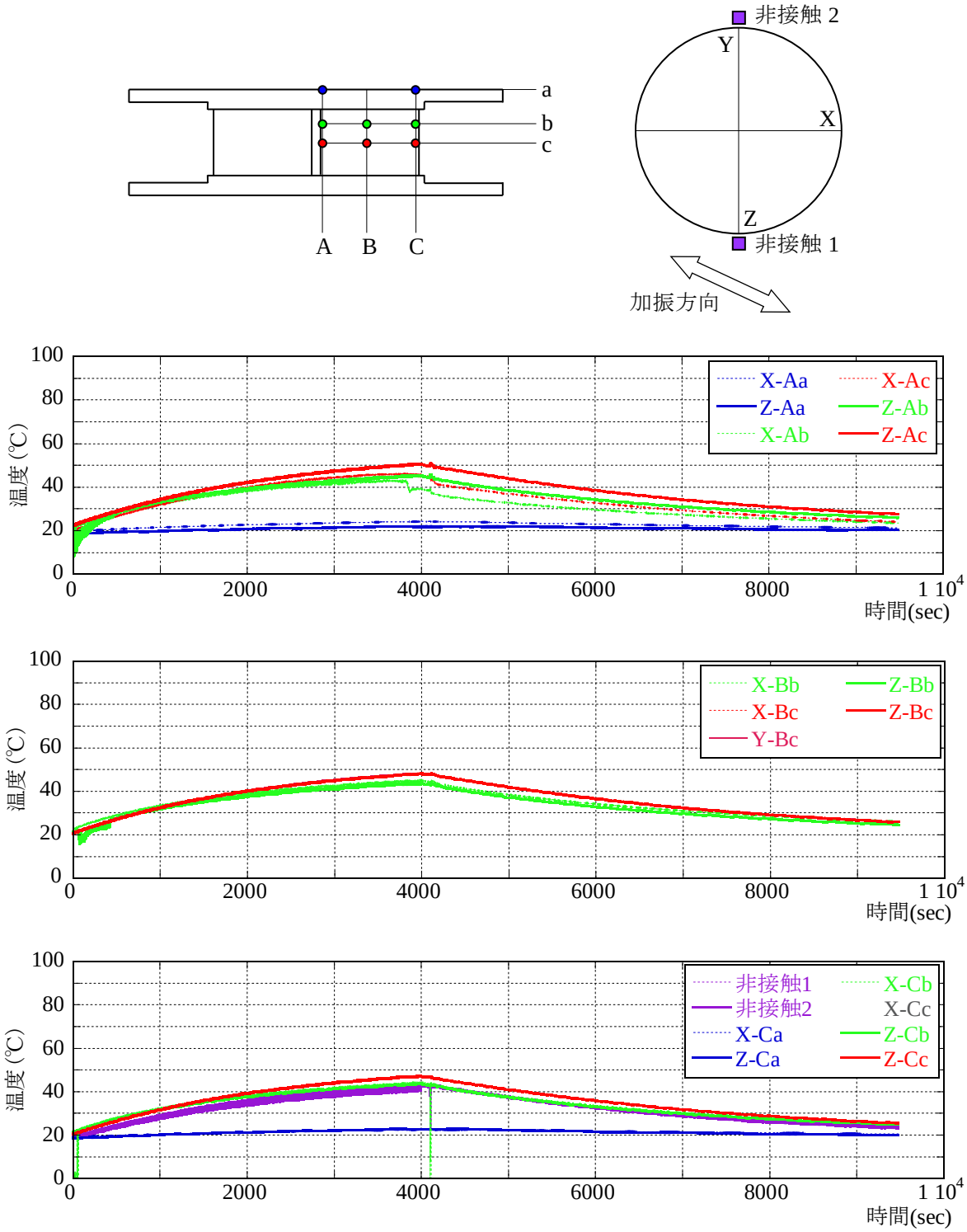
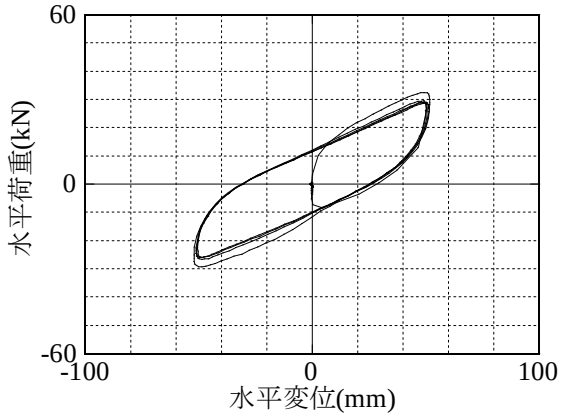
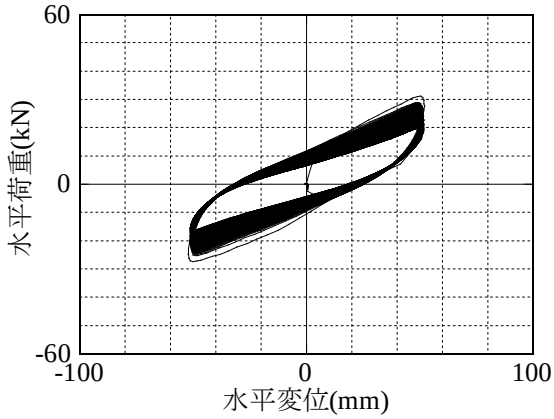


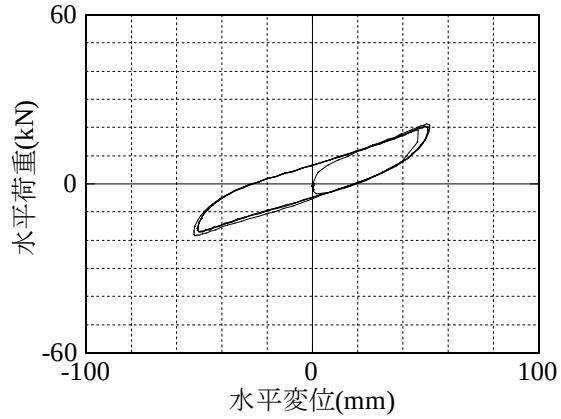
図 1.3.3-12 試験体 1、1B 相当(γ=50%, 1000 サイクル, 加振周期 4.0 秒, 正弦波)
試験体各部温度の推移(加振時間 4000 秒)



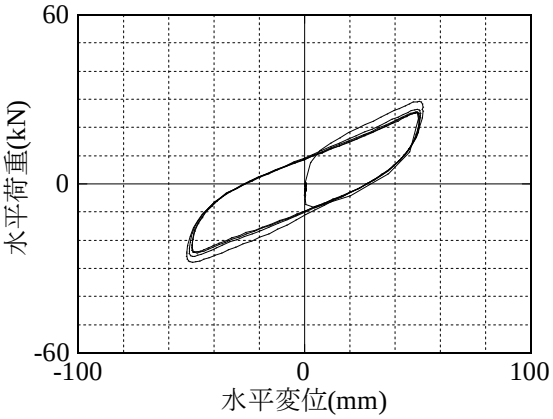
(a) 基本特性 [γ=100%, 4 サイクル]



(b) 2B 相当 限界 [γ=100%, 500 サイクル]

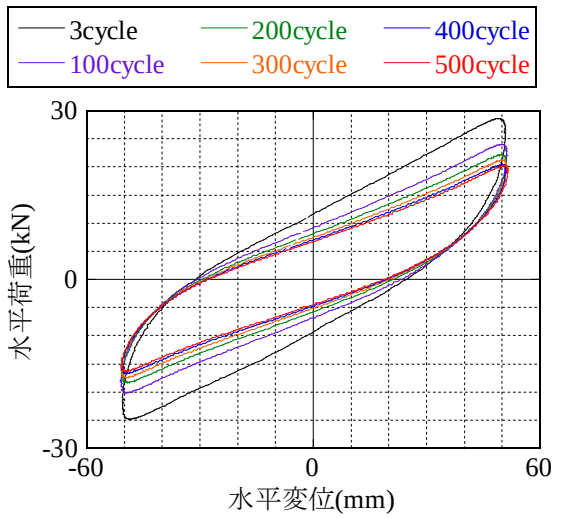


(c) (直後)基本特性 [γ=100%, 4 サイクル]

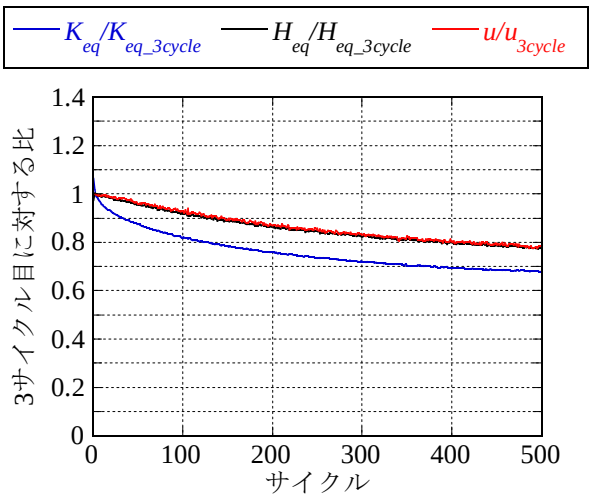


(d) (後)基本特性 [γ=100%, 4 サイクル]

図 1.3.3-13 試験体 1、2B 相当(γ=100%, 500 サイクル, 加振周期 4.0 秒, 正弦波)
水平荷重変位関係



(a)各サイクルの水平荷重変位関係



(b) K_{eq}, H_{eq}, u の 3 サイクル目に対する比

図 1.3.3-14 試験体 1、2B 相当(γ=100%, 500 サイクル, 加振周期 4.0 秒, 正弦波)
水平復元力特性値の加振サイクル数による推移

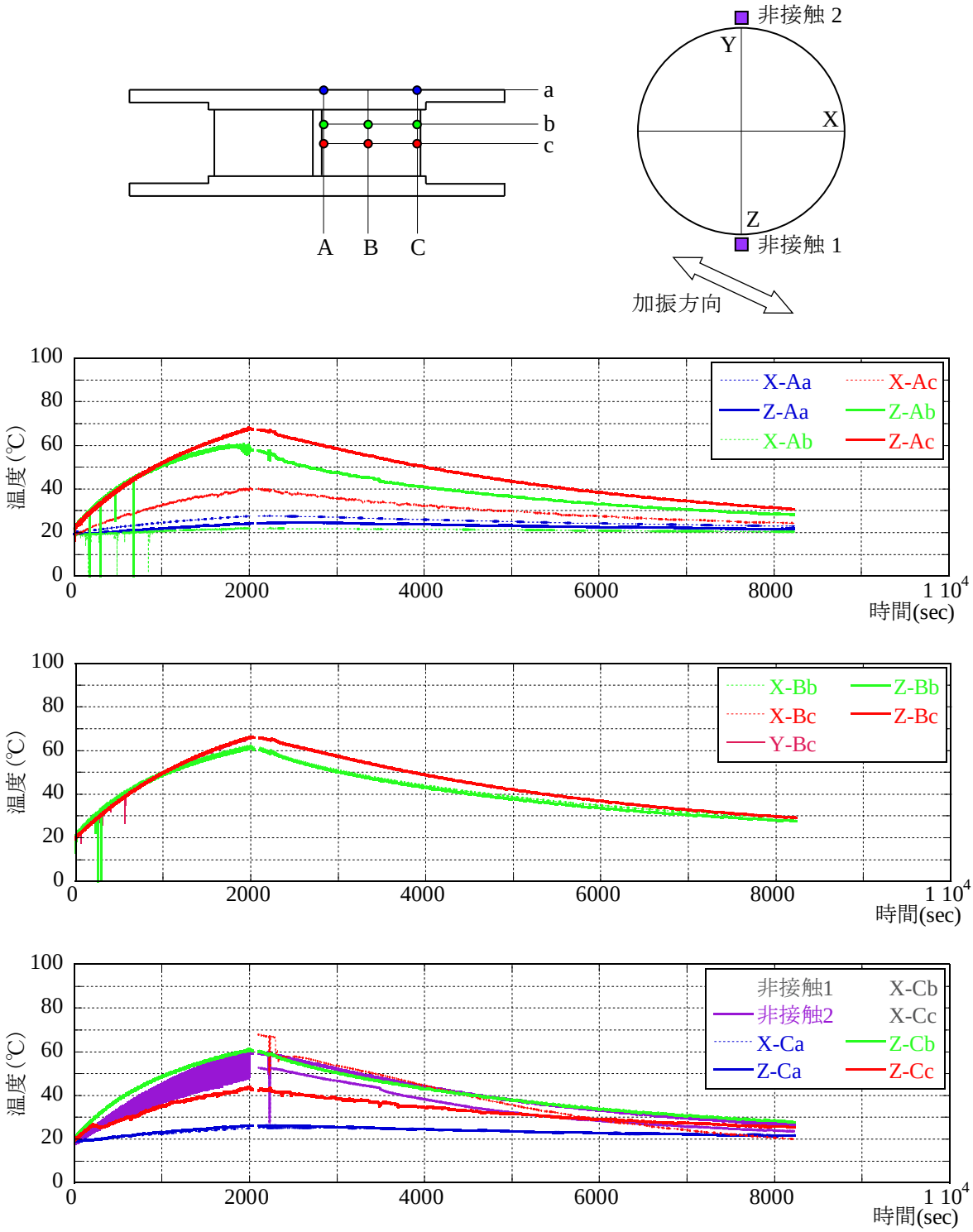
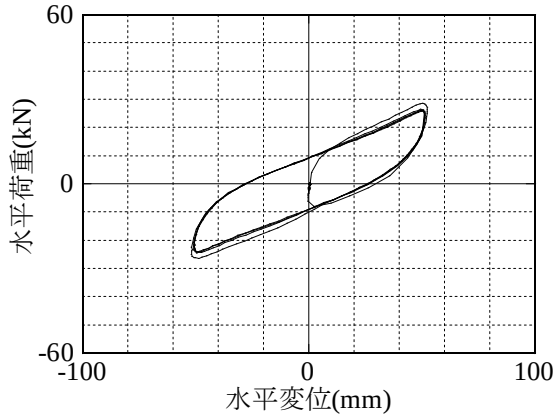
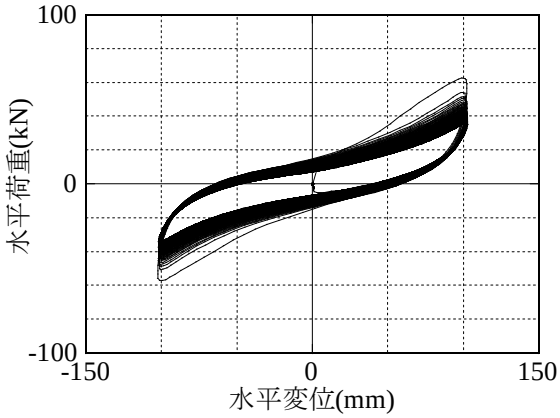


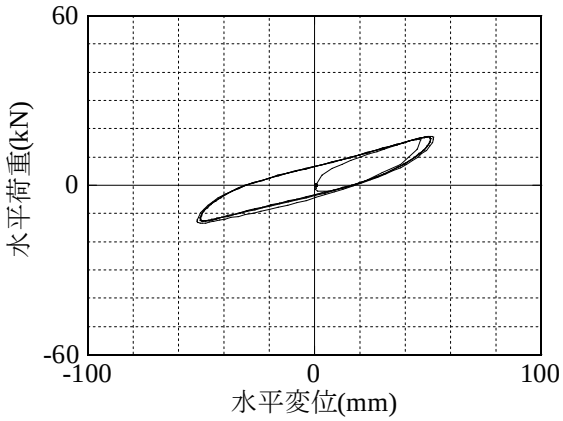
図 1.3.3-15 試験体 1、2B 相当(γ=100%, 500 サイクル, 加振周期 4.0 秒, 正弦波)
試験体各部温度の推移(加振時間 2000 秒)



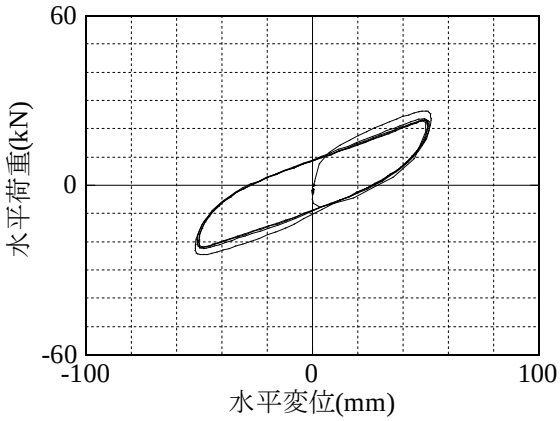
(a) 基本特性 [γ=100%, 4 サイクル]



(b) 3B 相当 限界 [γ=200%, 250 サイクル]

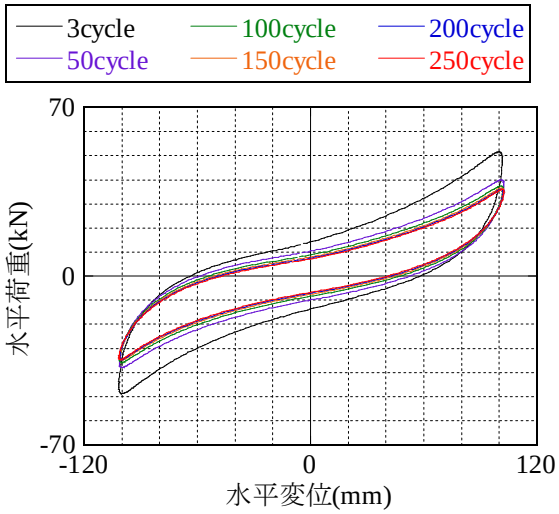


(c) (直後)基本特性 [γ=100%, 4 サイクル]

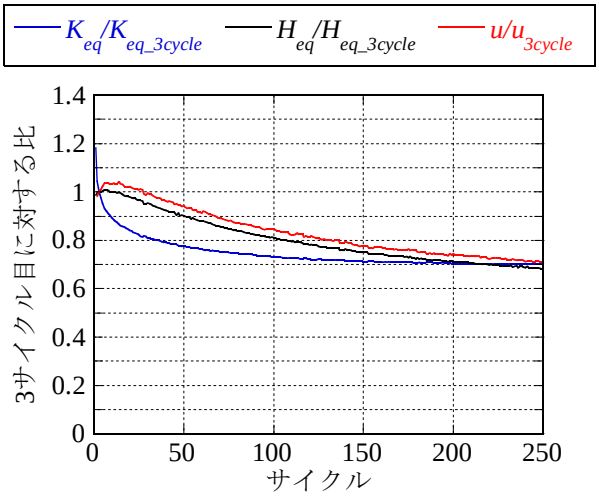


(d) (後)基本特性 [γ=100%, 4 サイクル]

図 1.3.3-16 試験体 1、3B 相当(γ=200%, 250 サイクル, 加振周期 4.0 秒, 正弦波)
水平荷重変位関係



(a)各サイクルの水平荷重変位関係



(b) K_{eq}, H_{eq}, u の 3 サイクル目に対する比

図 1.3.3-17 試験体 1、3B 相当(γ=200%, 250 サイクル, 加振周期 4.0 秒, 正弦波)
水平復元力特性値の加振サイクル数による推移

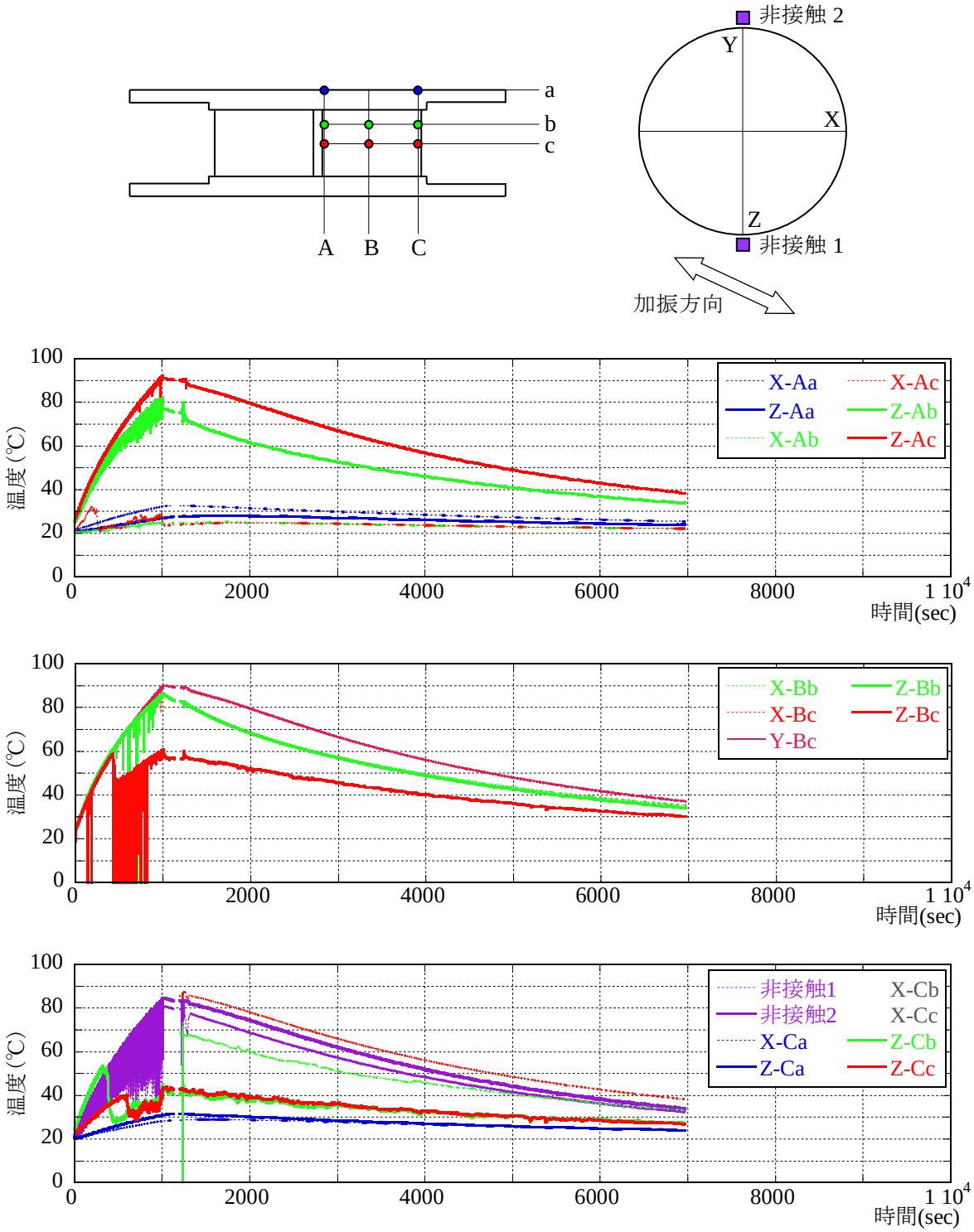
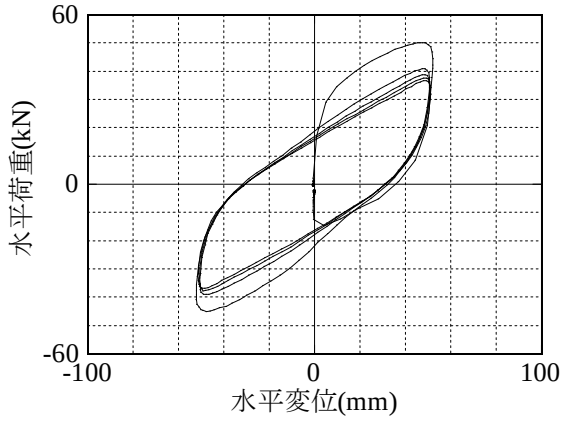
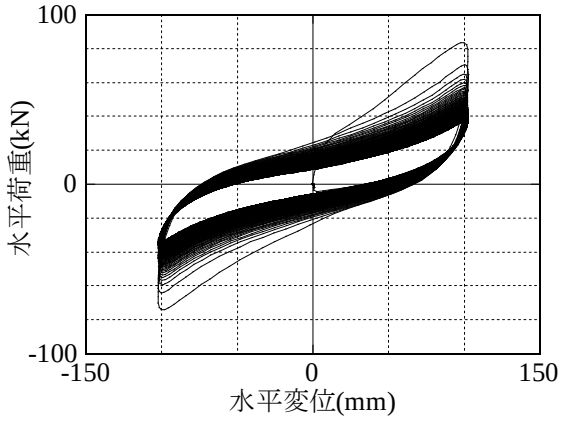


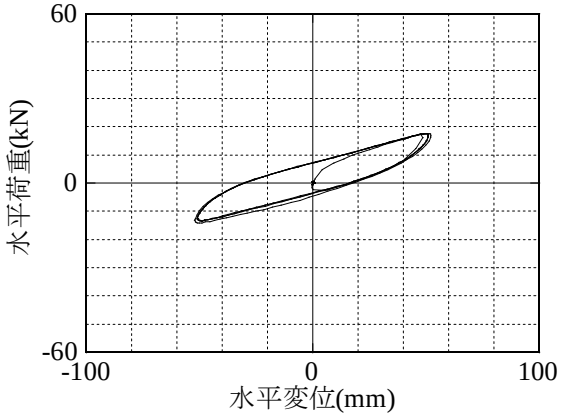
図 1.3.3-18 試験体 1、3B 相当(γ=200%, 250 サイクル, 加振周期 4.0 秒, 正弦波)
試験体各部温度の推移(加振時間 1000 秒)



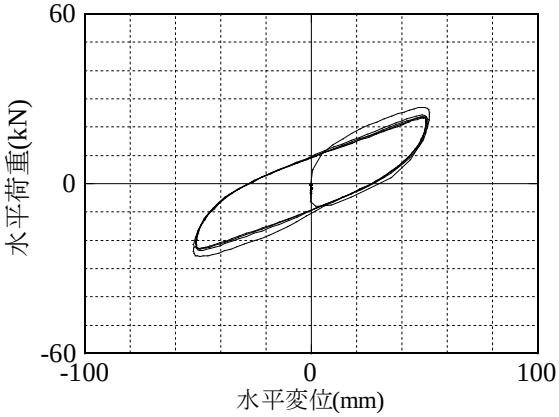
(a) 基本特性 [γ=100%, 4 サイクル]



(b) 初期温度 0℃ [γ=200%, 250 サイクル]

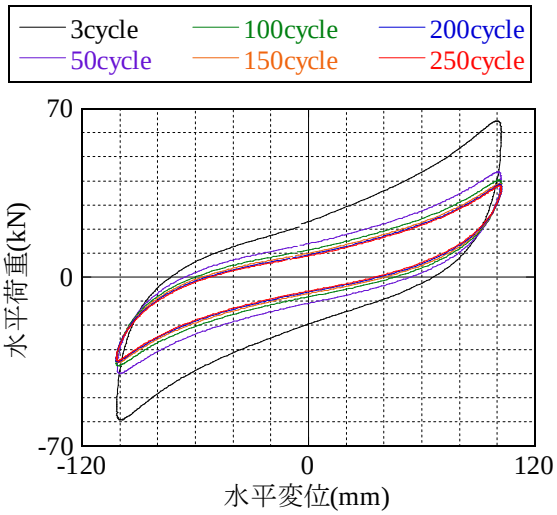


(c) (直後)基本特性 [γ=100%, 4 サイクル]

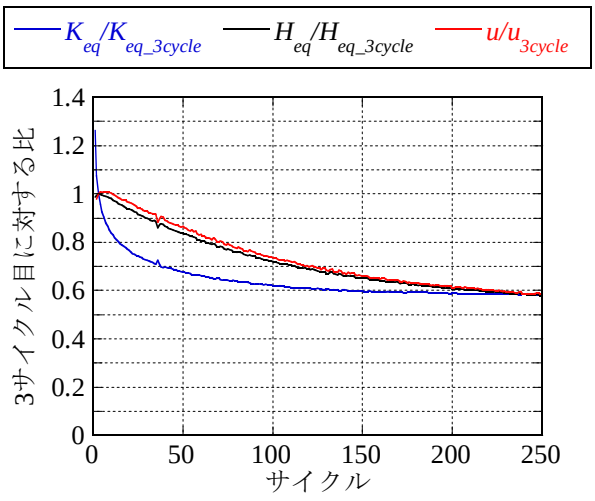


(d) (後)基本特性 [γ=100%, 4 サイクル]

図 1.3.3-19 試験体 2、初期 0℃(γ=200%, 250 サイクル, 加振周期 4.0 秒, 正弦波)
水平荷重変位関係



(a)各サイクルの水平荷重変位関係



(b) K_{eq}, H_{eq}, u の 3 サイクル目に対する比

図 1.3.3-20 試験体 2、初期 0℃(γ=200%, 250 サイクル, 加振周期 4.0 秒, 正弦波)
水平復元力特性値の加振サイクル数による推移

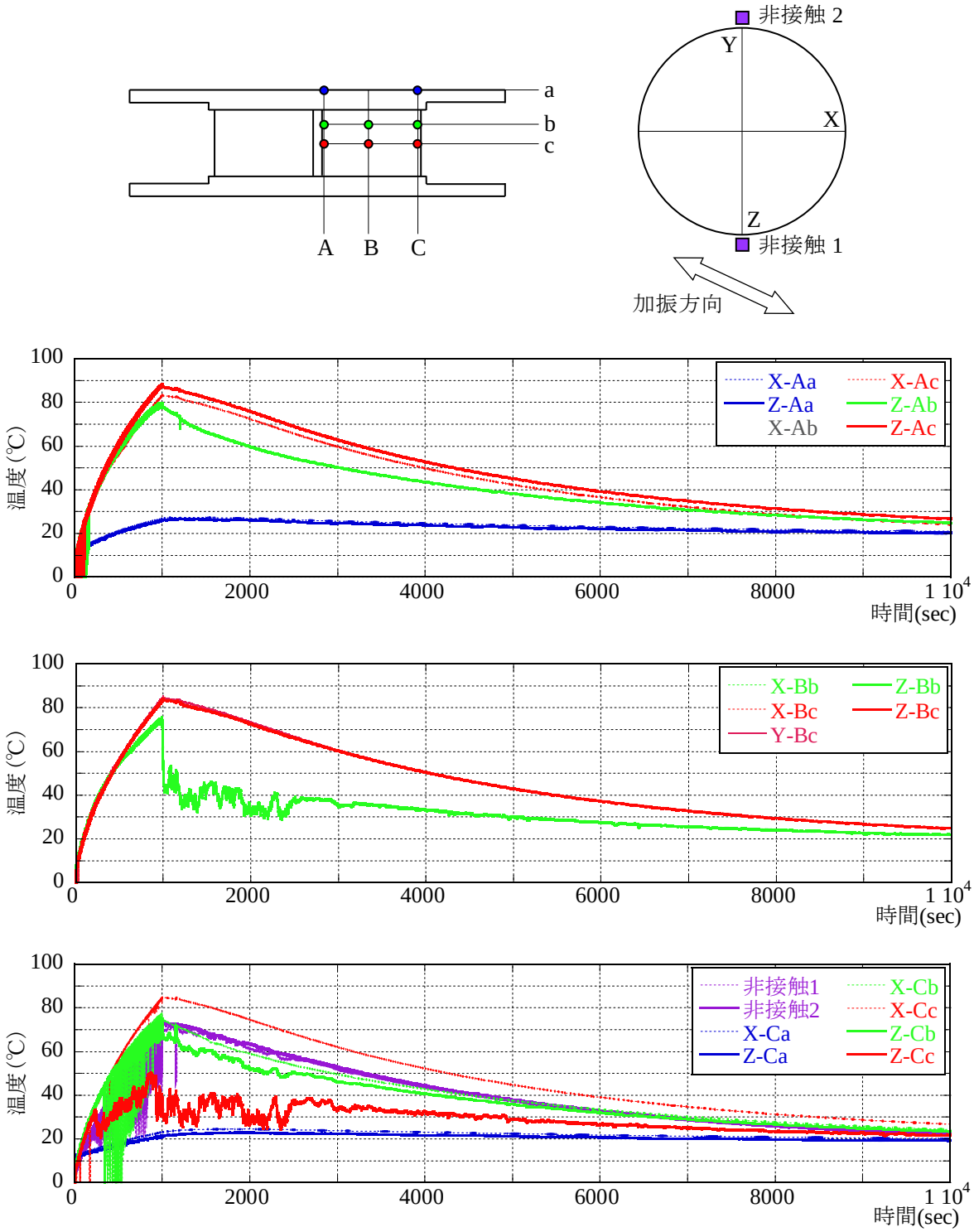
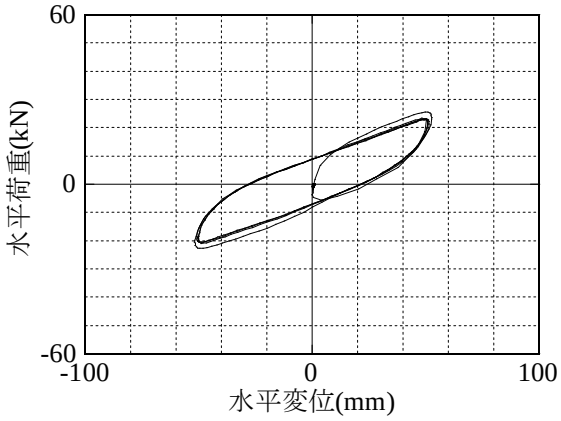
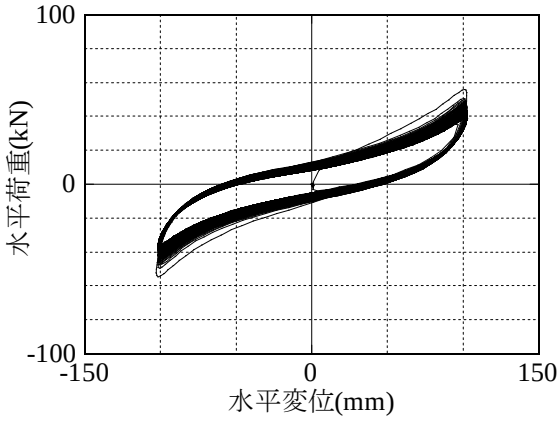


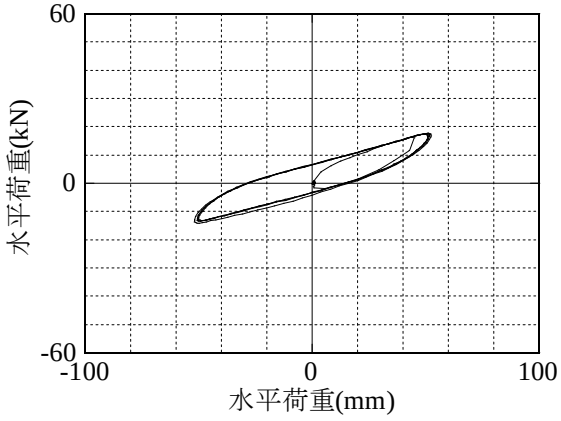
図 1.3.3-21 試験体 2、初期 0℃(γ=200%, 250 サイクル, 加振周期 4.0 秒, 正弦波)
試験体各部温度の推移(加振時間 1000 秒)



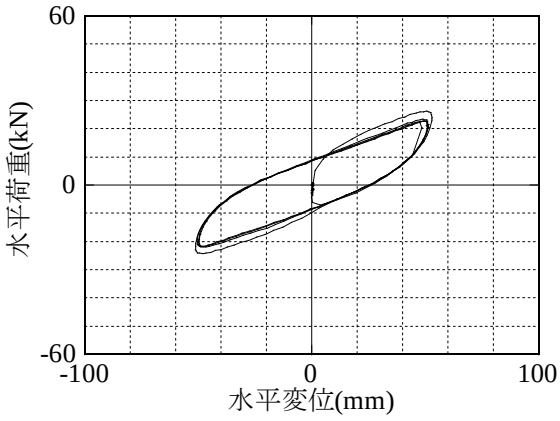
(a) 基本特性 [γ=100%, 4 サイクル]



(b) 初期温度 30℃ [γ=200%, 250 サイクル]

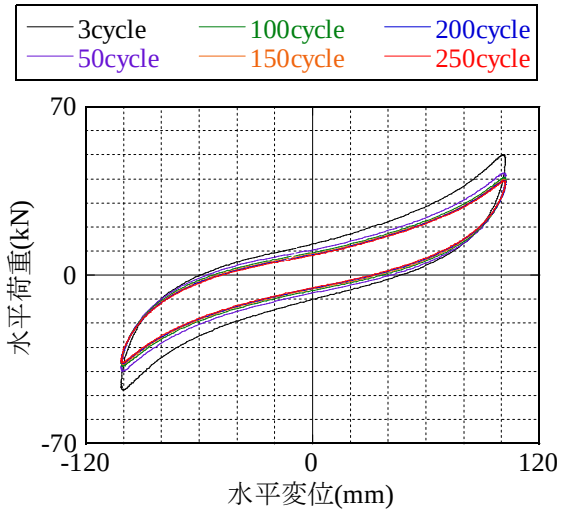


(c) (直後)基本特性 [γ=100%, 4 サイクル]

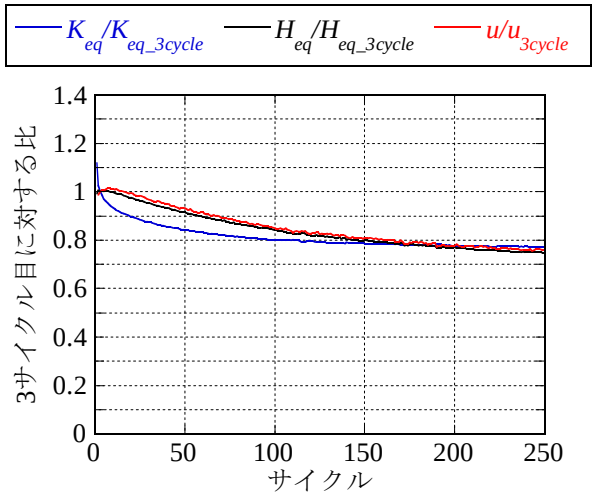


(d) (後)基本特性 [γ=100%, 4 サイクル]

図 1.3.3-22 試験体 2、初期 30℃(γ=200%, 250 サイクル, 加振周期 4.0 秒, 正弦波)
水平荷重変位関係



(a)各サイクルの水平荷重変位関係



(b) K_{eq}, H_{eq}, u の 3 サイクル目に対する比

図 1.3.3-23 試験体 2、初期 30℃(γ=200%, 250 サイクル, 加振周期 4.0 秒, 正弦波)
水平復元力特性値の加振サイクル数による推移

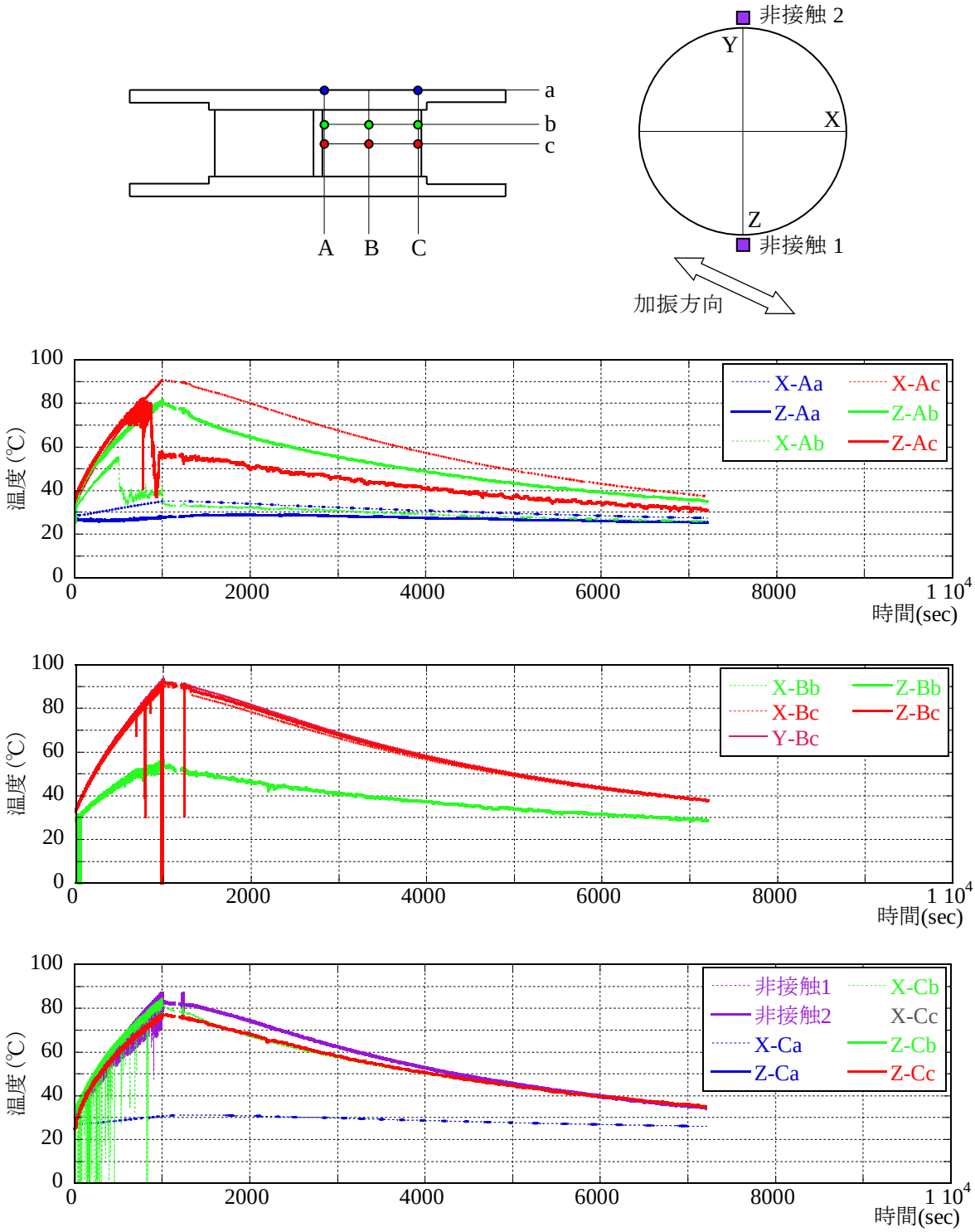
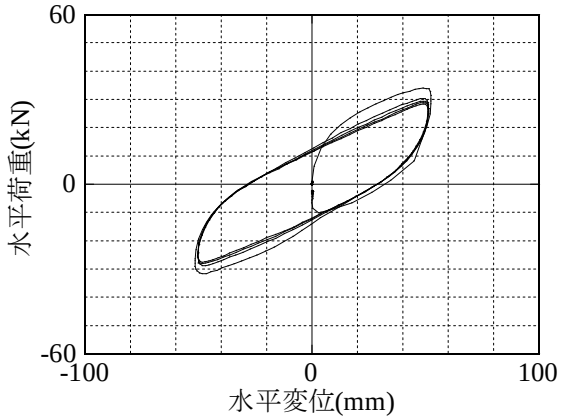
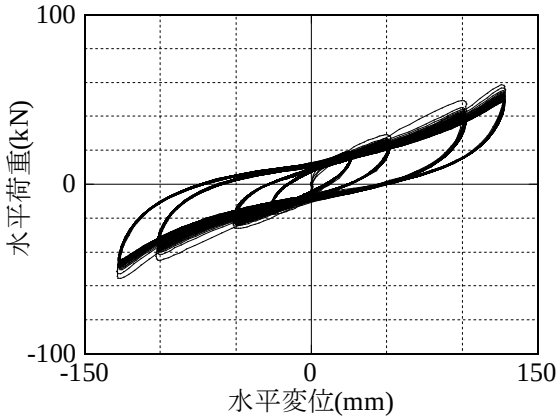


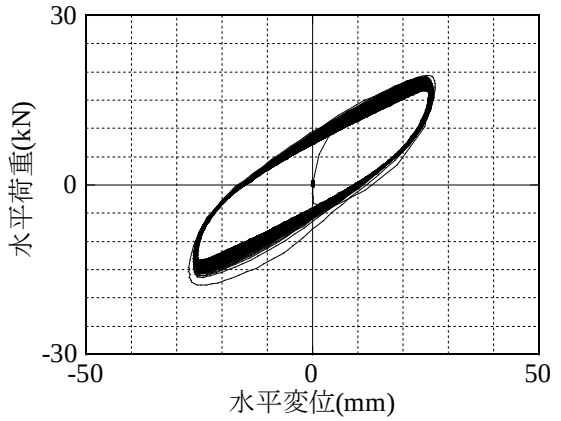
図 1.3.3-24 試験体 2、初期 30℃(γ=200%, 250 サイクル, 加振周期 4.0 秒, 正弦波)
試験体各部温度の推移(加振時間 1000 秒)



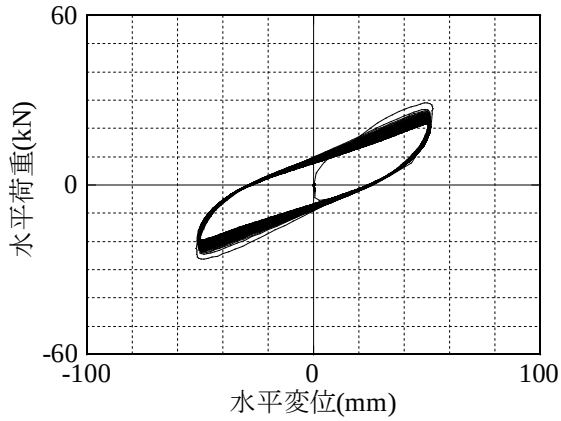
(a) 基本特性 [γ=100%, 4 サイクル]



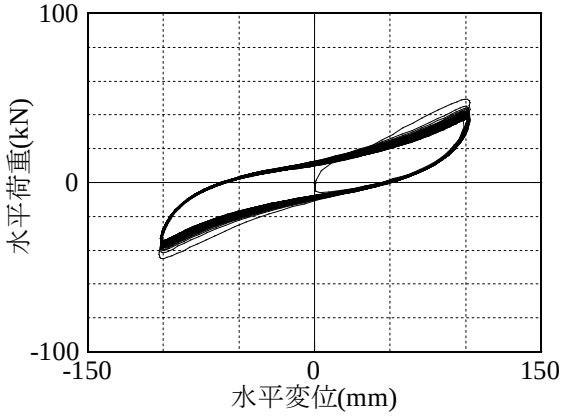
(b) 荷重履歴漸増
[γ=50,100,200,250%, 計 477 サイクル]



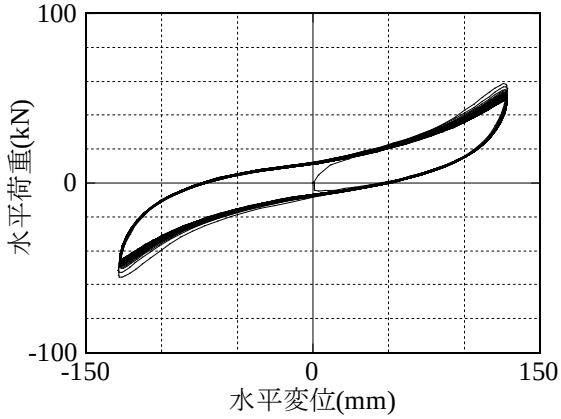
(c) 荷重履歴漸増 γ=50%
[γ=50%, 245 サイクル]



(d) 荷重履歴漸増 γ=100%
[γ=100%, 122 サイクル]

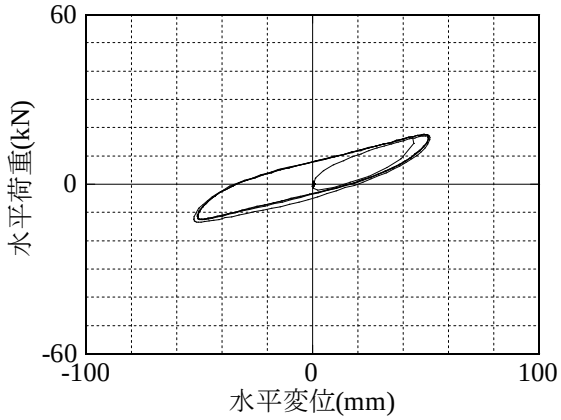


(e) 荷重履歴漸増 γ=200%
[γ=200%, 61 サイクル]

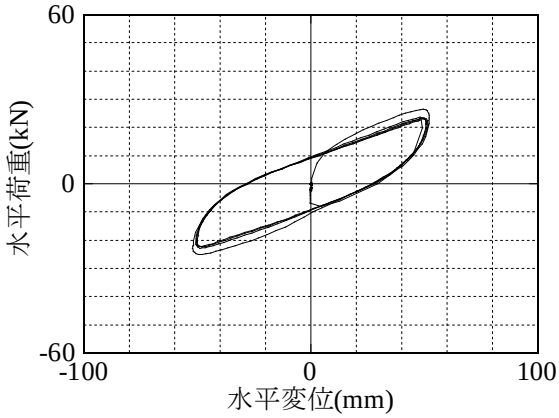


(f) 荷重履歴漸増 γ=250%
[γ=250%, 49 サイクル]

図 1.3.3-25 試験体 3、荷重履歴漸増(γ=50,100,200,250%, 計 477 サイクル, 加振周期 4.0 秒, 正弦波)
水平荷重変位関係

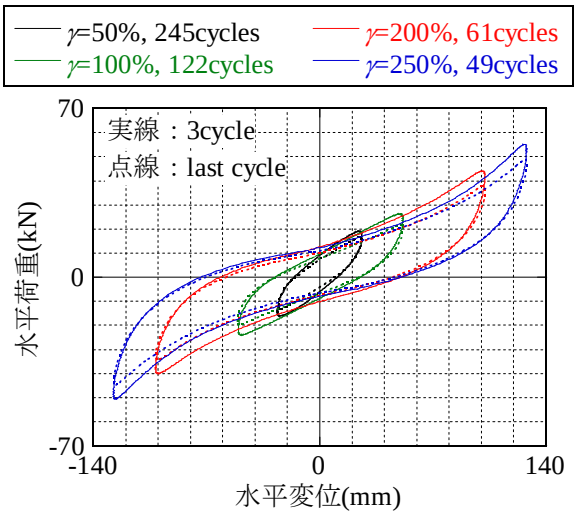


(g) (直後)基本特性 [γ=100%, 4 サイクル]

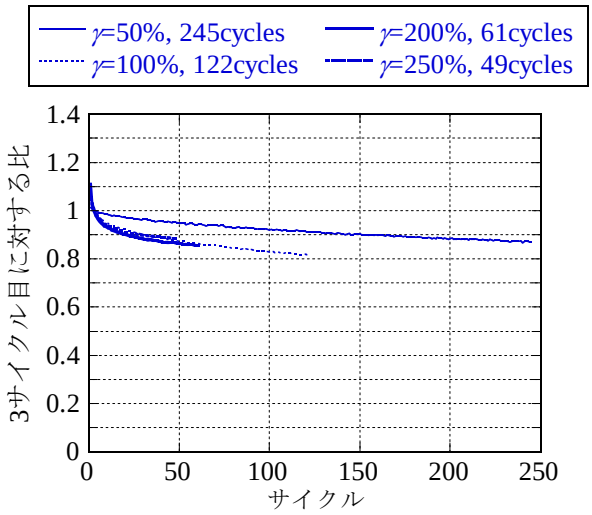


(h) (後)基本特性 [γ=100%, 4 サイクル]

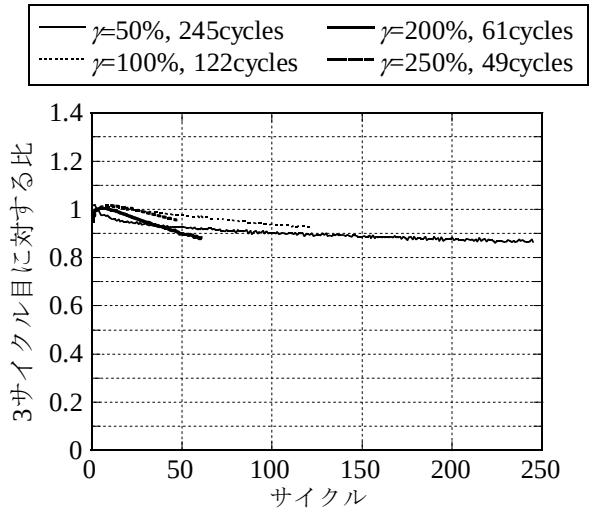
図 1.3.3-25 試験体 3、荷重履歴漸増(γ=50,100,200,250%, 計 477 サイクル, 加振周期 4.0 秒, 正弦波)
水平荷重変位関係



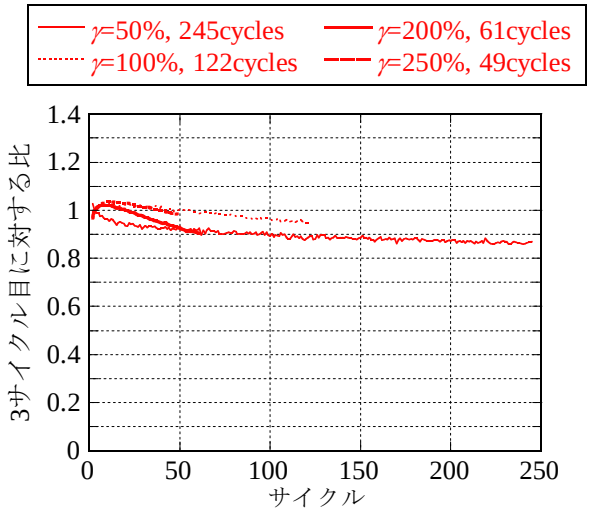
(a)3 サイクルと最終サイクルの水平荷重変位関係



(b) K_{eq} の各振幅 3 サイクル目に対する比



(c) H_{eq} の各振幅 3 サイクル目に対する比



(d) u の各振幅 3 サイクル目に対する比

図 1.3.3-26 試験体 3、荷重履歴漸増(γ=50,100,200,250%, 計 477 サイクル, 加振周期 4.0 秒, 正弦波)
K_{eq}、H_{eq}、u の加振サイクル数による推移

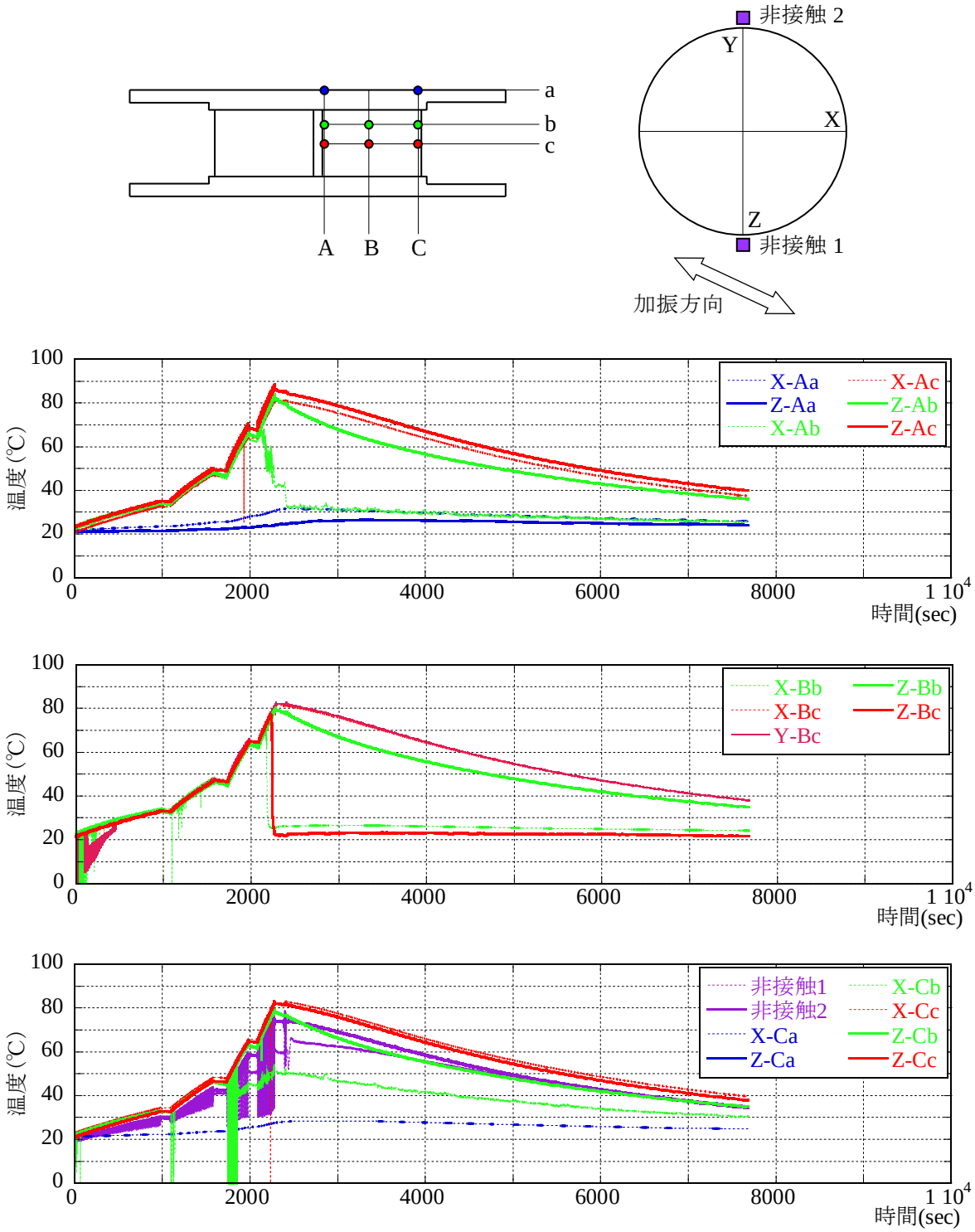
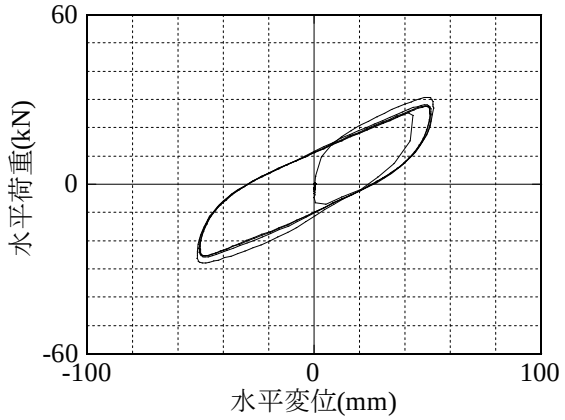
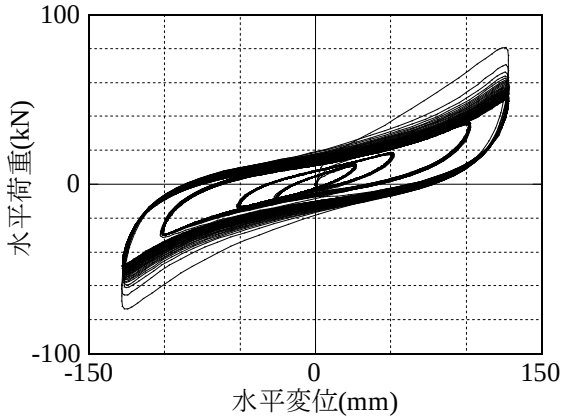


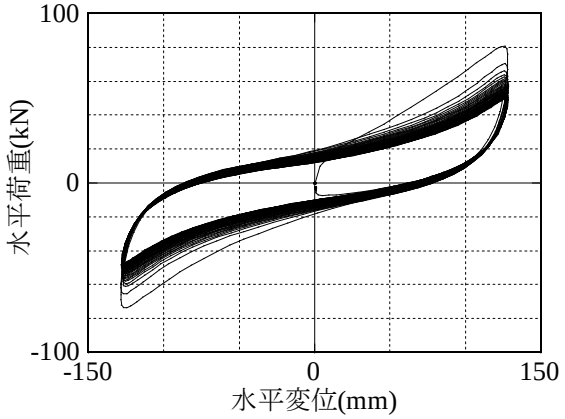
図 1.3.3-27 試験体 3、荷重履歴漸増(γ=50,100,200,250%, 計 477 サイクル, 加振周期 4.0 秒, 正弦波)
試験体各部温度の推移(加振時間計 1908 秒)



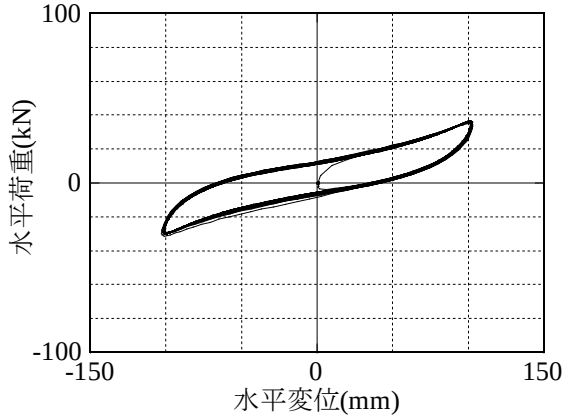
(a) 基本特性 [γ=100%, 4 サイクル]



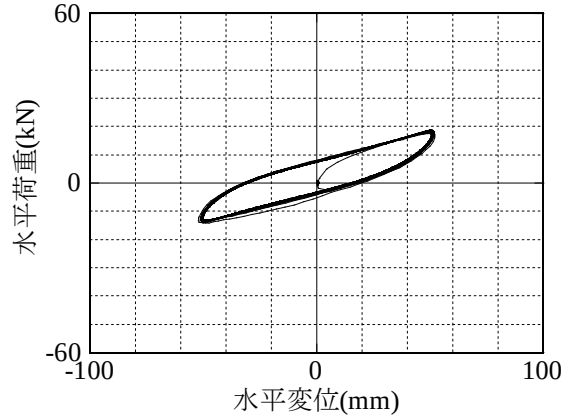
(b) 荷重履歴漸減
[γ=250,200,100,50%, 計 477 サイクル]



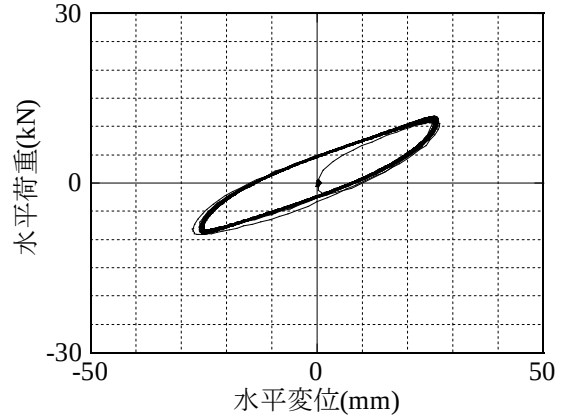
(c) 荷重履歴漸減 γ=250%
[γ=250%, 49 サイクル]



(d) 荷重履歴漸減 γ=200%
[γ=200%, 61 サイクル]

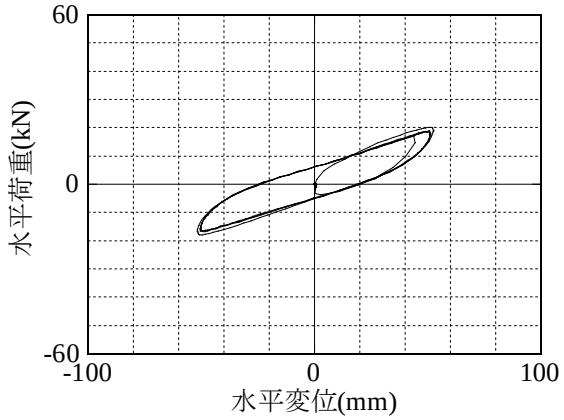


(e) 荷重履歴漸減 γ=100%
[γ=100%, 122 サイクル]

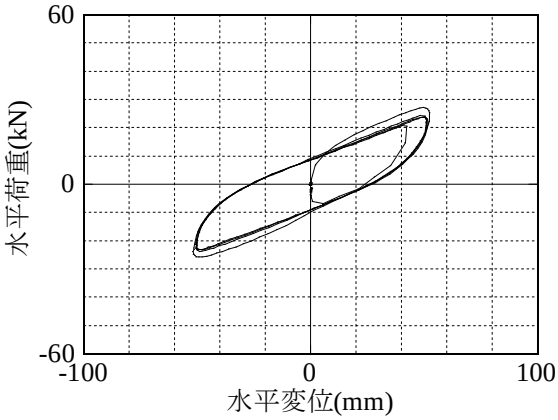


(f) 荷重履歴漸減 γ=50%
[γ=50%, 245 サイクル]

図 1.3.3-28 試験体 4、荷重履歴漸減(γ=250,200,100,50%, 計 477 サイクル, 加振周期 4.0 秒, 正弦波)
水平荷重変位関係

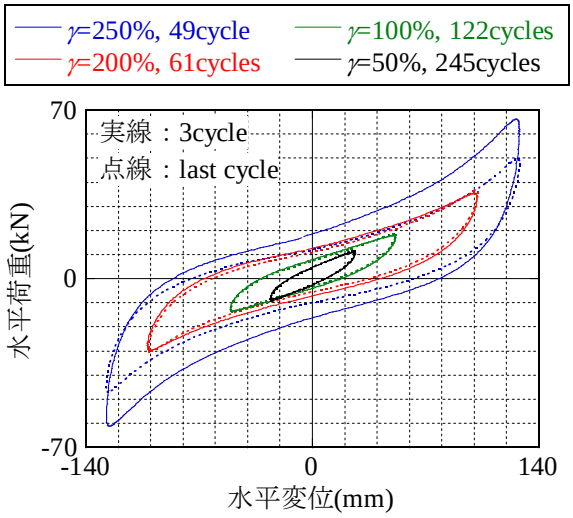


(g) (直後)基本特性 [γ=100%, 4 サイクル]

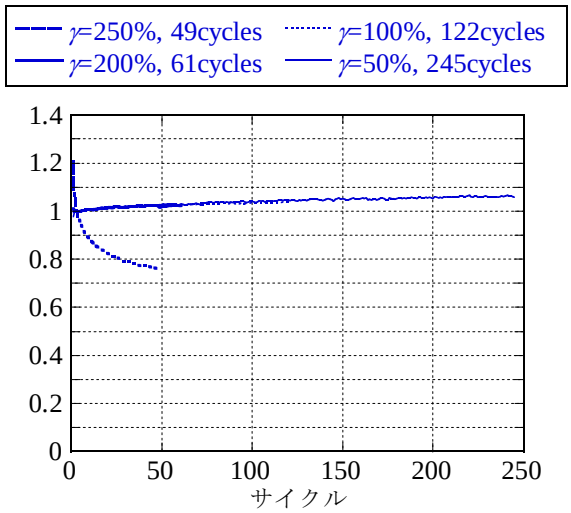


(h) (後)基本特性 [γ=100%, 4 サイクル]

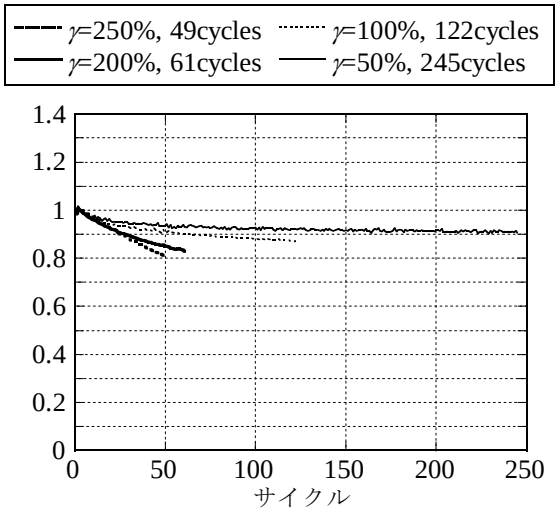
図 1.3.3-28 試験体 4、荷重履歴漸減(γ=250,200,100,50%, 計 477 サイクル, 加振周期 4.0 秒, 正弦波)
水平荷重変位関係



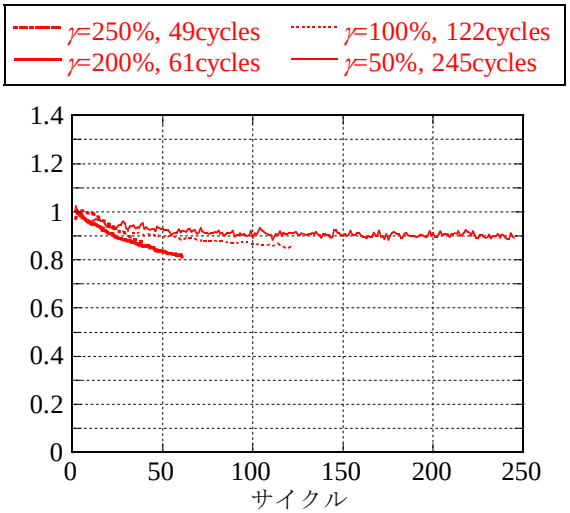
(a)3 サイクルと最終サイクルの水平荷重変位関係



(b) K_{eq} の各振幅 3 サイクル目に対する比



(c) H_{eq} の各振幅 3 サイクル目に対する比



(d) u の各振幅 3 サイクル目に対する比

図 1.3.3-29 試験体 4、荷重履歴漸減(γ=250,200,100,50%, 計 477 サイクル, 加振周期 4.0 秒, 正弦波)
水平復元力特性値の加振サイクル数による推移

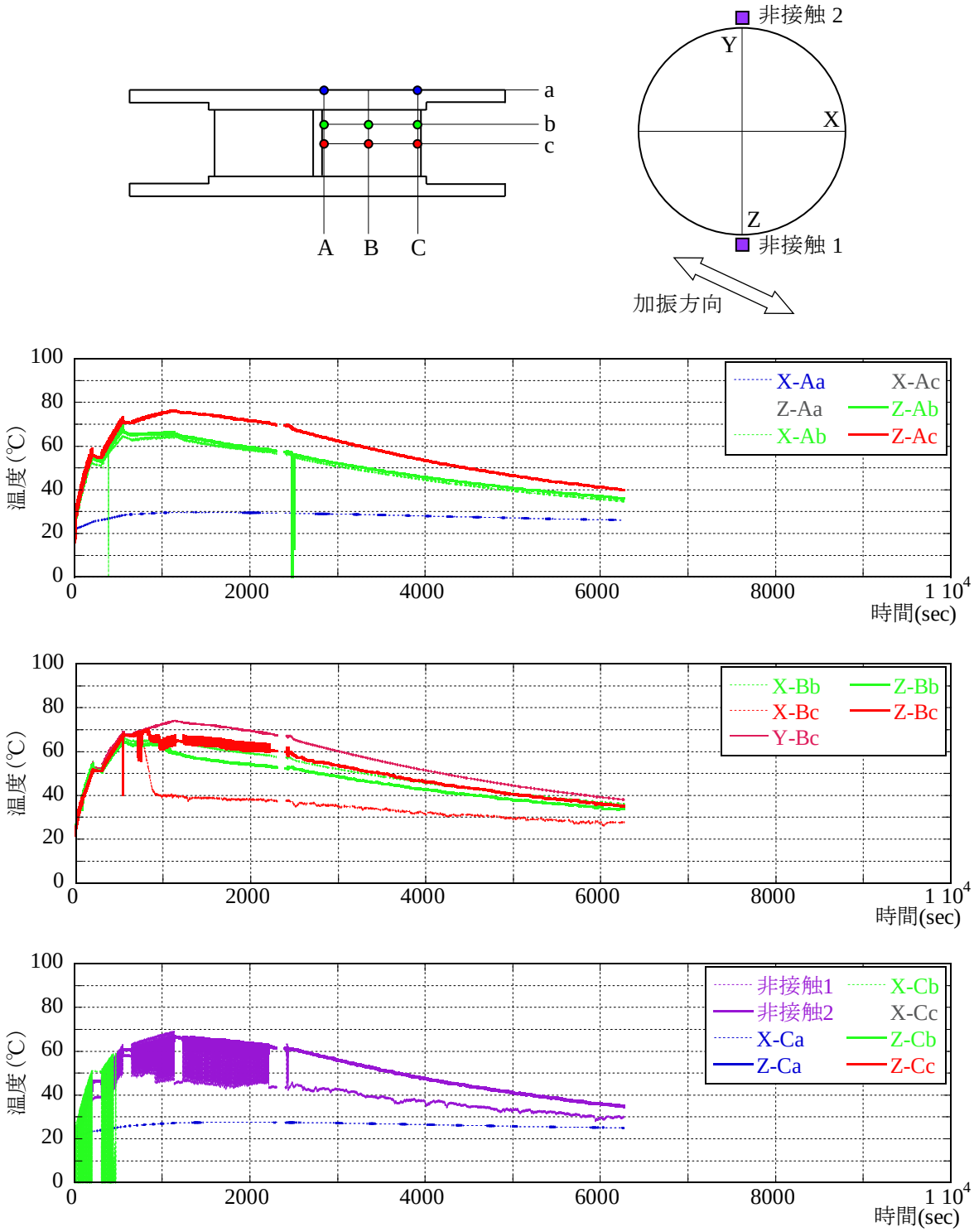
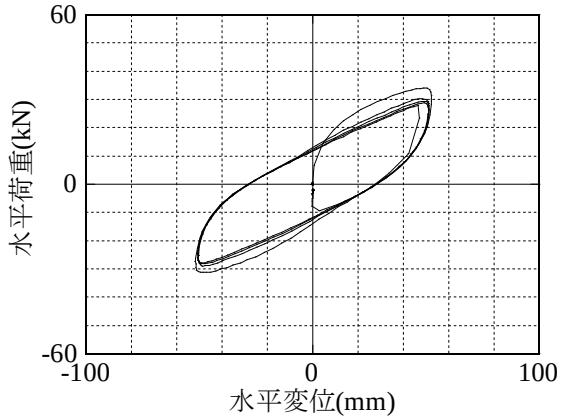
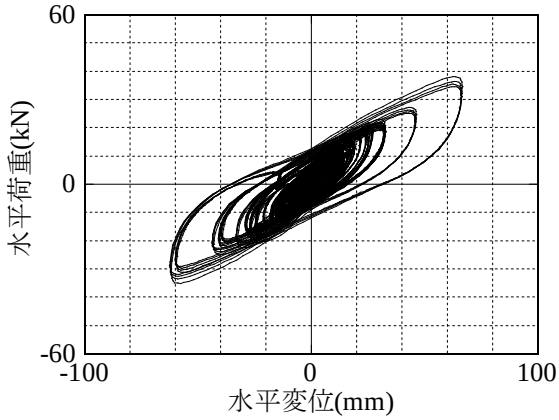


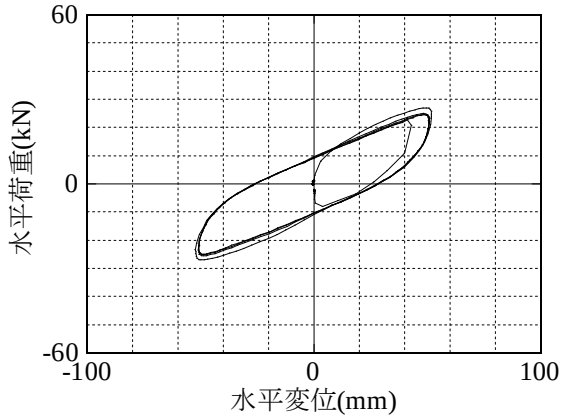
図 1.3.3-30 試験体 4、荷重履歴漸減(γ=250,200,100,50%, 計 477 サイクル, 加振周期 4.0 秒, 正弦波)
試験体各部温度の推移(加振時間計 1908 秒)



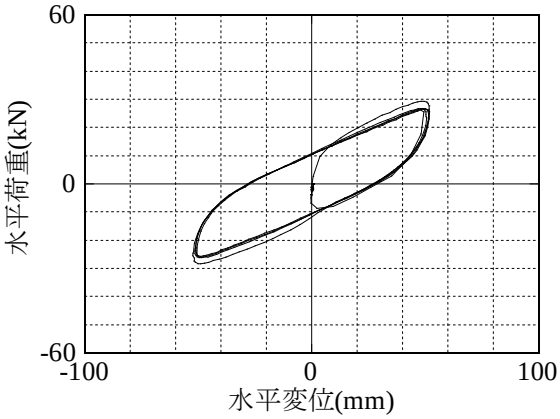
(a) 基本特性 [γ=100%, 4 サイクル]



(b) 地震応答波 [150sec×4 回連続]



(c) (直後)基本特性 [γ=100%, 4 サイクル]



(d) (後)基本特性 [γ=100%, 4 サイクル]

図 1.3.3-31 試験体 4、地震応答波(愛知・津島(南海・東南海地震)・平均 150sec×4 回連続)
水平荷重変位関係

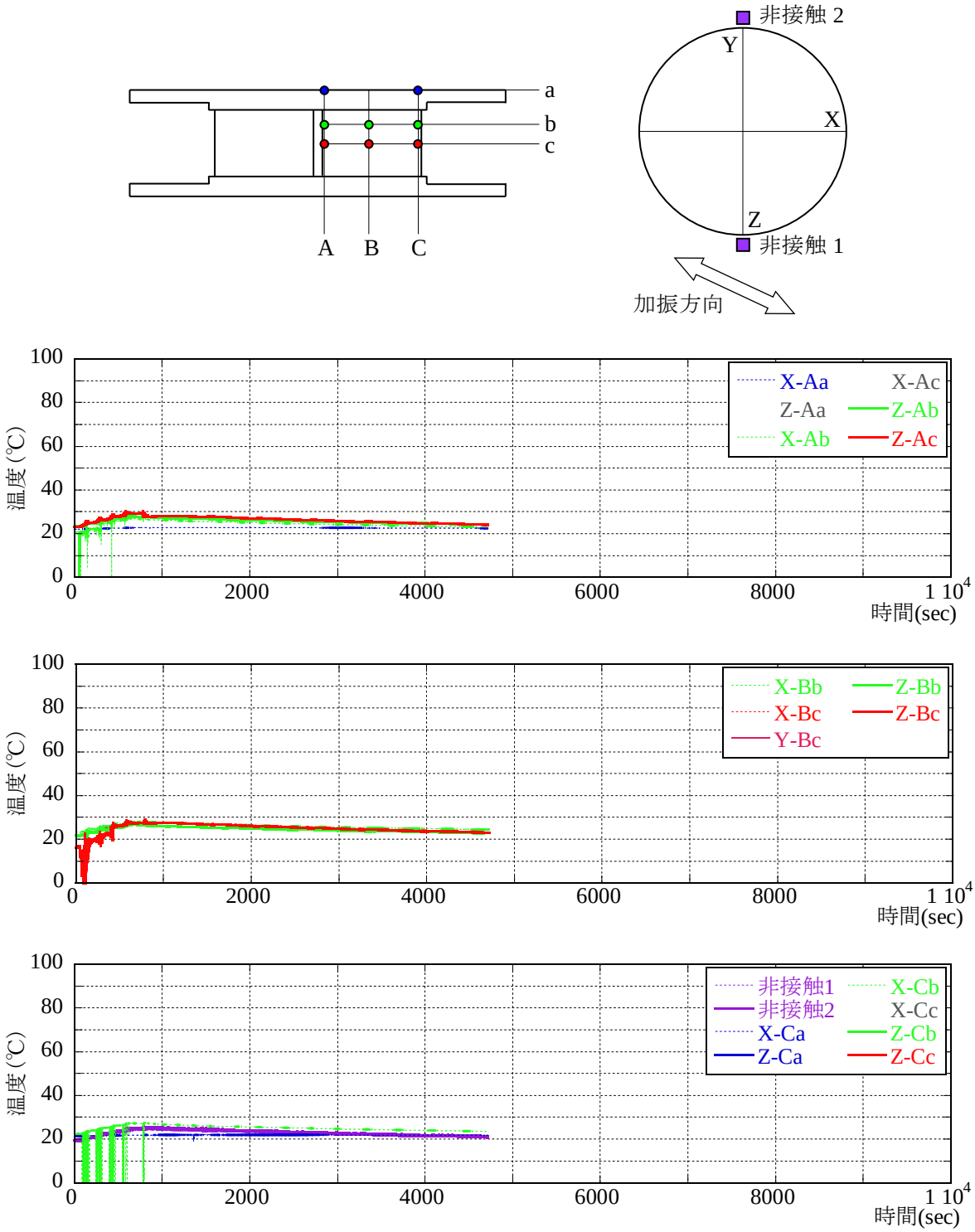


図 1.3.3-32 試験体 4、地震応答波(愛知・津島(南海・東南海地震)・平均 150sec×4 回連続)
試験体各部温度の推移

(2) 基本特性試験による特性値

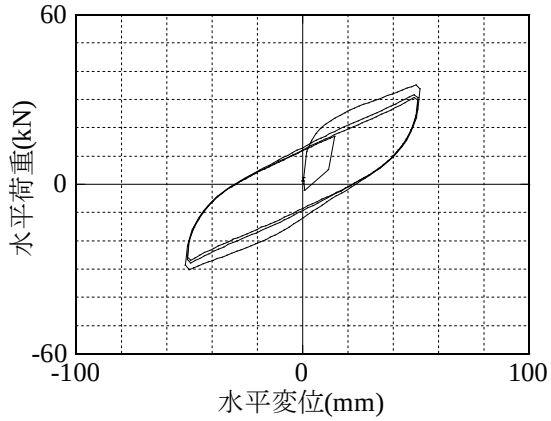
図 1.3.3-33～36 に、各試験体の製品検査および「(出荷)基本特性」の水平荷重変位関係を示す。製品検査および「(出荷)基本特性」は、加振周期 20 秒の三角波による静的水平加振試験である。各試験体の、加振周期 4.0 秒の正弦波による「基本特性」試験結果の履歴ループに比較すると、最大荷重点がとがった紡錘形のループ形状となっており、ループ面積が若干小さくなっている。

表 1.3.3-7 に、各試験ケースの前後で実施した 4 種類の基本特性試験(表 1.3.3-6)の水平荷重変位関係の 3 サイクル目の履歴ループから抽出した水平復元力特性値の一覧を示す。せん断弾性率 G_{eq} については、実験結果の履歴ループから抽出した K_{eq} から以下の式を用いて算出した。

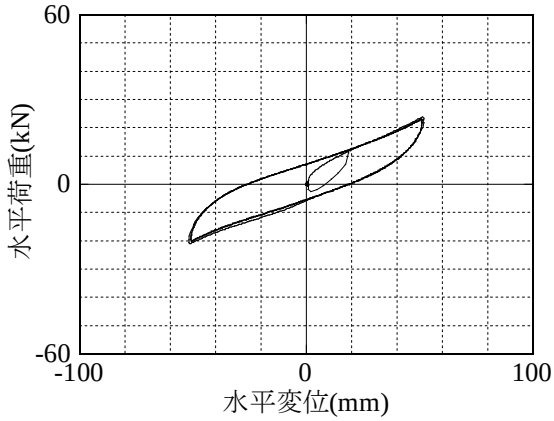
$$G_{eq} = \frac{K_{eq} \cdot h_r}{A} \tag{1.3.3-4}$$

ここで、h_r はゴム層総厚、A はゴムの断面積である。技術資料[1.3.3-5)]による各復元力特性値の設計値はγ=100%、試験体温度 20℃、加振振動数 0.33Hz の基準状態において、G_{eq}=0.620N/mm^2、H_{eq}=0.240、u=0.408 である。4 体の試験体の製品検査による水平荷重変位関係の 3 ループ目から抽出した特性値の平均値は、G_e=0.602N/mm^2、H_{eq}=0.198、u=0.355 となっている。また、各試験体における最初の「基本特性」試験による水平荷重変位関係の 3 ループ目の水平復元力特性の平均値は、G_{eq}=0.587N/mm^2、H_{eq}=0.237、u=0.421 となっている。ただし、試験体 2 については最初の「基本特性」試験時の初期温度が約 0℃であるため、試験体 2 を除く 3 体の平均値である。一般に、高減衰ゴム系積層ゴムは振動数が高くなるに従い G_{eq} および H_{eq} が増加する傾向を示すが、G_{eq} については、加振振動数 0.05Hz の製品検査の試験結果と加振振動数 0.25Hz の「基本特性」試験結果の値は、製品検査の値がわずかに大きな値を示しているがほぼ同じ値となっている。H_{eq} および u については、製品検査の値がやや小さな値を示しており、振動数依存性によるものと考えられる。

図 1.3.3-37～40 に、各試験体における 4 種類の基本特性試験(表 1.3.3-6)結果の 3 サイクル目の履歴ループから抽出した水平復元力特性値の推移を示す。水平復元力特性値は、各試験体の製品検査の値に対する比として示している。製品検査と各試験体の最初の「基本特性」試験の特性値を比較すると、K_{eq} はほぼ同じ値を示しており、H_{eq} および u は「基本特性」の値が製品検査の 1.2 倍程度の値を示している。ただし、試験体 2 については最初の「基本特性」試験時の試験体温度が約 0℃であることから、K_{eq}、H_{eq}、u とも製品検査の値の 1.2 倍以上となっている。各試験ケースの「基本特性」、「(直後)基本特性」、「(後)基本特性」の K_{eq} の推移を見ると、各試験ケースの加振により「(直後)基本特性」の値は「基本特性」の値から大きく低下するが、「(後)基本特性」の値は「基本特性」の値の 90%程度まで回復している。「(後)基本特性」は、試験体温度が 20(±5)℃に復帰した時点で加振を実施しており、「(直後)基本特性」と「(後)基本特性」の間のインターバルは、どの試験ケースにおいても 3 時間程度である。また、図 1.3.3-37 に示す試験体 1 の結果において、1B 相当の「(後)基本特性」試験と 2B 相当の「基本特性」試験の間はほぼ丸 1 日のインターバルがあり、2B 相当の「基本特性」の特性値は、1B 相当の「基本特性」の特性値の 94～97%の値となっており、水平復元力特性がほぼ回復していることが確認できる。各試験体の「(出荷)基本特性」の特性値は、製品検査の特性値の 80%程度の値となっており、各試験ケースの加振を受けたことによる復元力特性の低下が生じている。



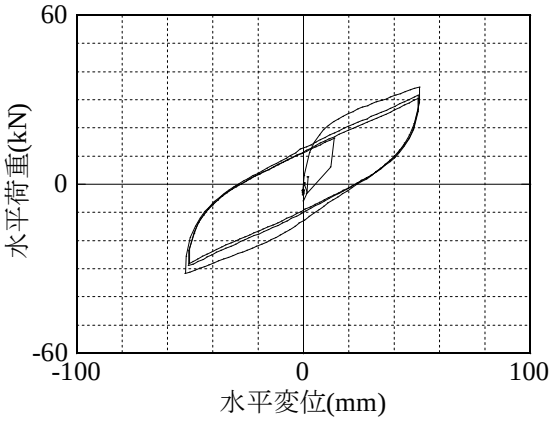
(a) 製品検査



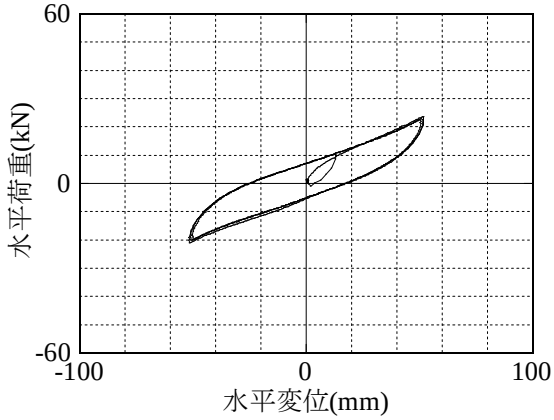
(b) (出荷)基本特性

図 1.3.3-33 試験体 1　製品検査および(出荷)基本特性試験の水平荷重変位関係

(γ=100%, 3 サイクル, 加振周期 20.0 秒, 三角波)



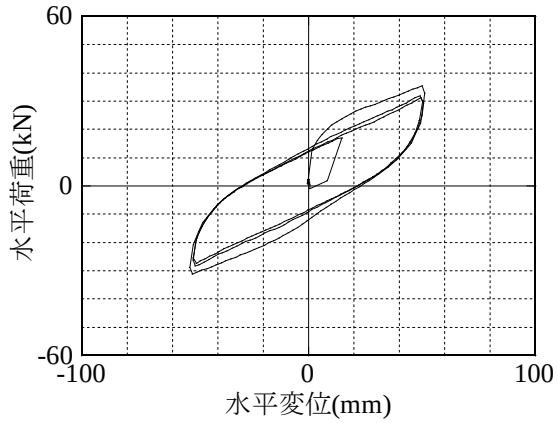
(a) 製品検査



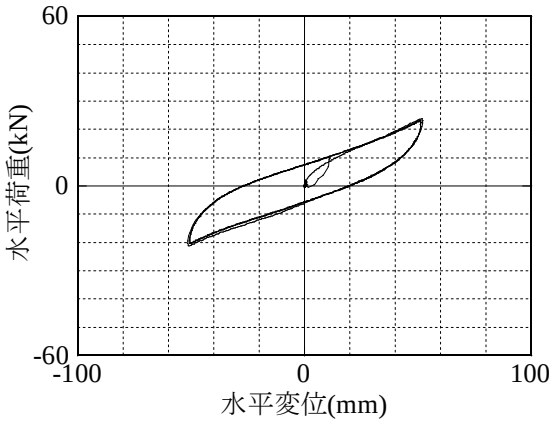
(b) (出荷)基本特性

図 1.3.3-34 試験体 2　製品検査および(出荷)基本特性試験の水平荷重変位関係

(γ=100%, 3 サイクル, 加振周期 20.0 秒, 三角波)



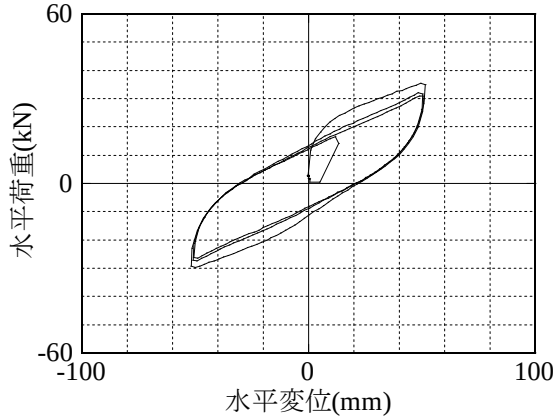
(a) 製品検査



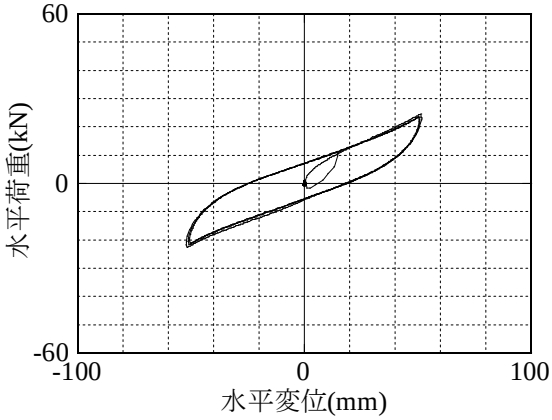
(b) (出荷)基本特性

図 1.3.3-35 試験体 3　製品検査および(出荷)基本特性試験の水平荷重変位関係

(γ=100%, 3 サイクル, 加振周期 20.0 秒, 三角波)



(a) 製品検査



(b) (出荷)基本特性

図 1.3.3-36 試験体 4　製品検査および(出荷)基本特性試験の水平荷重変位関係

(γ=100%, 3 サイクル, 加振周期 20.0 秒, 三角波)

表 1.3.3-7 基本特性試験 3 サイクル目の特性値一覧

試験体	加振順	加振日	ケース	試験条件	K_{eq} (kN/mm)	G_{eq} (N/mm^2)	H_{eq}	u
1		12/6		製品検査	0.574	0.597	0.199	0.354
	5	12/13		基本特性	0.562	0.585	0.238	0.423
	7	12/13	1B 相当	(直後)基本特性	0.437	0.455	0.200	0.343
	8	12/13		(後)基本特性	0.520	0.542	0.225	0.392
	9	12/14		基本特性	0.543	0.565	0.227	0.399
	11	12/14	2B 相当	(直後)基本特性	0.367	0.382	0.174	0.304
	12	12/14		(後)基本特性	0.498	0.519	0.212	0.373
	13	12/14		基本特性	0.493	0.514	0.207	0.365
	15	12/14	3B 相当	(直後)基本特性	0.294	0.306	0.184	0.337
	16	12/14		(後)基本特性	0.445	0.463	0.219	0.397
	17	12/14		(出荷)基本特性	0.422	0.440	0.164	0.289
2		12/6		製品検査	0.578	0.601	0.198	0.354
	1	12/13		基本特性	0.752	0.783	0.250	0.437
	3	12/13	初期 0℃	(直後)基本特性	0.304	0.316	0.187	0.348
	4	12/13		(後)基本特性	0.459	0.477	0.222	0.400
	28	12/15		基本特性	0.432	0.449	0.202	0.364
	30	12/15	初期 30℃	(直後)基本特性	0.304	0.316	0.174	0.323
	31	12/15		(後)基本特性	0.444	0.462	0.212	0.380
	32	12/15		(出荷)基本特性	0.420	0.438	0.158	0.280
3		12/6		製品検査	0.584	0.608	0.197	0.355
	20	12/15		基本特性	0.565	0.588	0.235	0.419
	25	12/15	漸増	(直後)基本特性	0.296	0.308	0.204	0.373
	26	12/15		(後)基本特性	0.449	0.468	0.226	0.406
	27	12/15		(出荷)基本特性	0.426	0.443	0.171	0.304
4		12/6		製品検査	0.578	0.602	0.198	0.358
	39	12/16		基本特性	0.524	0.545	0.226	0.399
	44	12/16	漸減	(直後)基本特性	0.348	0.363	0.176	0.310
	45	12/16		(後)基本特性	0.464	0.483	0.212	0.376
	35	12/16		基本特性	0.566	0.589	0.237	0.422
	37	12/16	地震応答	(直後)基本特性	0.491	0.511	0.225	0.392
	38	12/16		(後)基本特性	0.515	0.535	0.226	0.396
	46	12/16		(出荷)基本特性	0.441	0.459	0.160	0.282

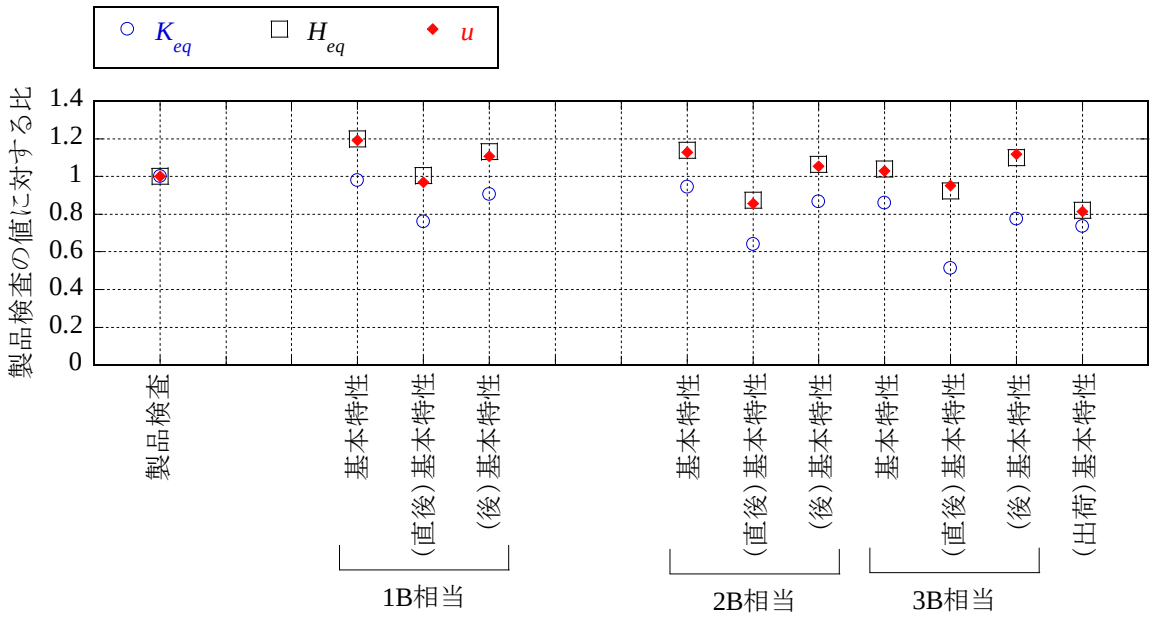


図 1.3.3-37 試験体 1 基本特性試験による特性値の推移

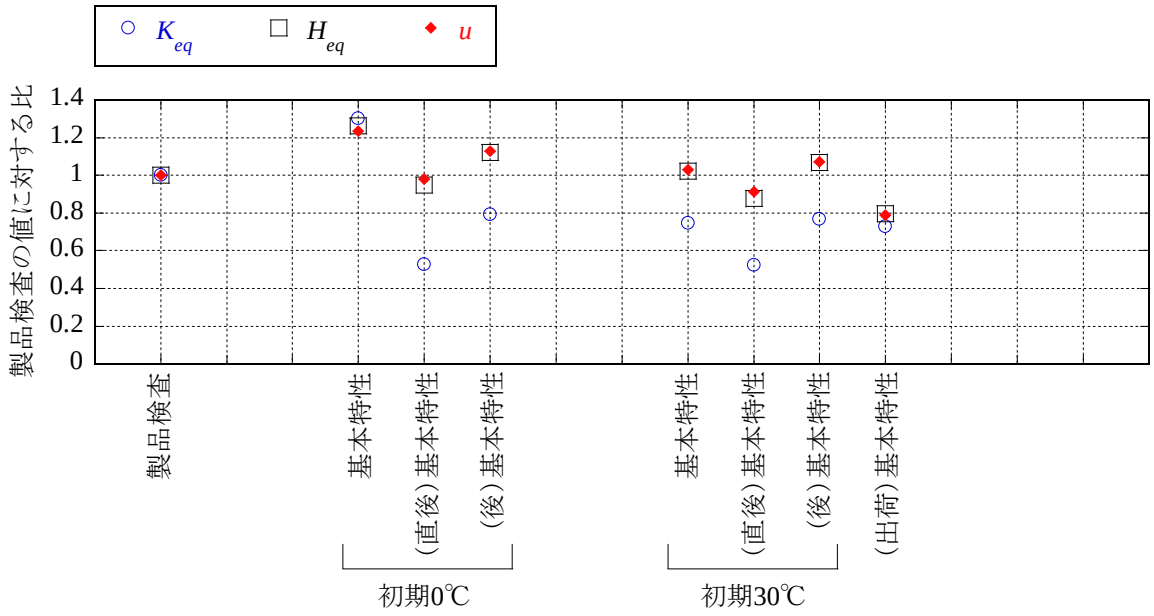


図 1.3.3-38 試験体 2 基本特性試験による特性値の推移

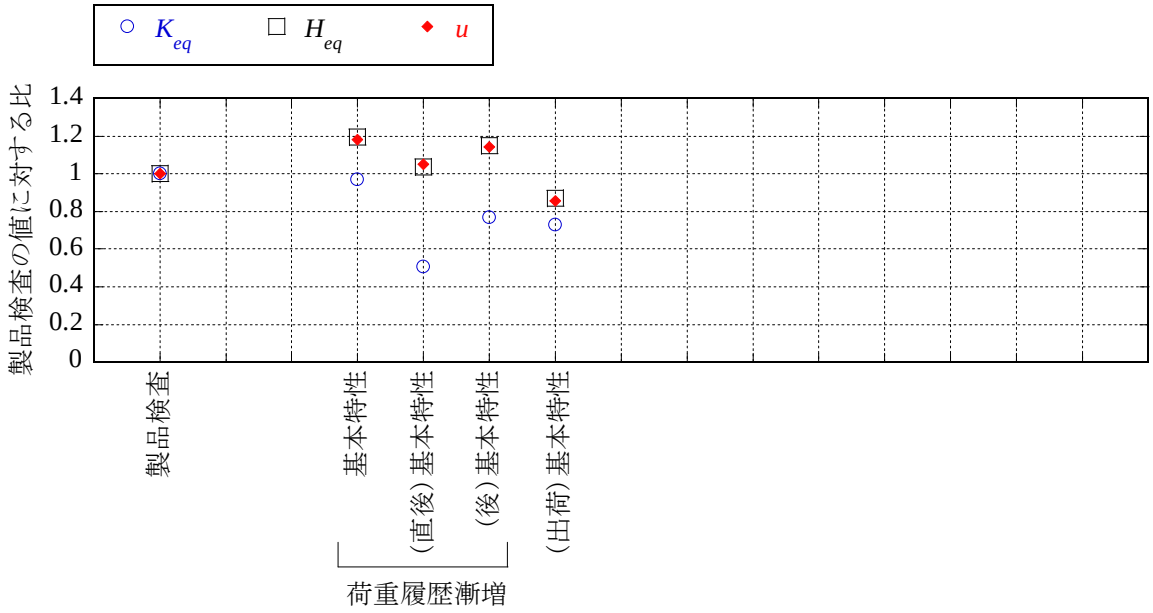


図 1.3.3-39 試験体 3 基本特性試験による特性値の推移

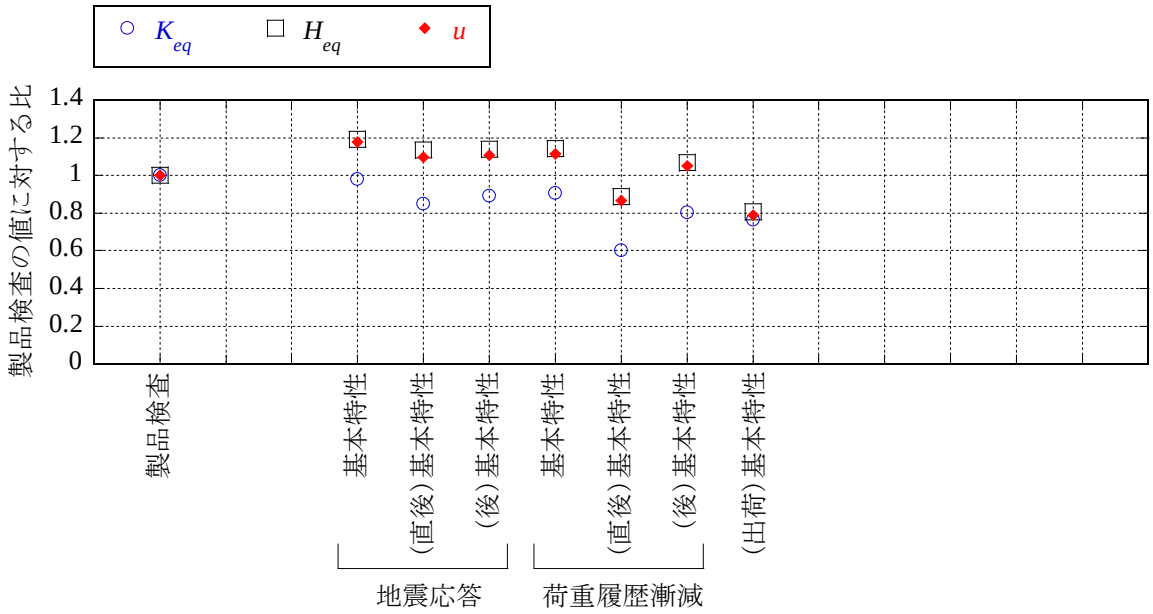


図 1.3.3-40 試験体 4 基本特性試験による特性値の推移

(3) 各指標による特性値推移の比較

各試験ケースにおける水平復元力特性値の変化を累積変形量、累積履歴吸収エネルギー量、および 1/2 高さの試験体温度の 3 つの指標によってまとめ、水平復元力特性値の変化率と 3 つの指標との相関性を検討する。1/2 高さの試験体温度については、図 1.3.3-6 に示す試験体温度計測点のうち、1/2 高さのゴム部中心である X-Bc 点の温度を用いる。ただし、試験体 4 の荷重履歴漸減の試験ケースにおいては、X-Bc 点の熱電対が計測不能となったので、Y-Bc 点の温度を用いる。また、累積履歴吸収エネルギー量については、履歴吸収エネルギーE を、ゴム体積 V で除した単位ゴム体積当たりの履歴吸収エネルギー量 E/V の累積値で表す。水平復元力特性値は、1B 相当、2B 相当、3B 相当の試験ケースの 3 サイクル目の値を、各々せん断ひずみ 50%、100%、200%の基準値として、加振振幅が一致する基準値で除した値で表している。漸増および漸減の試験ケースのせん断ひずみ 250%については、3B 相当(せん断ひずみ 200%)の値を基準値として用いる。

図 1.3.3-41 に、各試験ケースにおける累積変形量、累積 E/V、1/2 高さの試験体温度の加振時間中の推移を示す。図 1.3.3-41(a)に示す累積変形量は、加振時間に比例して増加し加振終了時の累積変形量が 100m となる(地震応答波を除く)。図 1.3.3-41(b)に示す累積 E/V の推移において、1B 相当、2B 相当、3B 相当の試験ケースを比較すると、最終的な累積変形量が同一であっても加振振幅が大きいほどエネルギー吸収量が大きくなっている。加振プログラムが同一である 1B 相当、初期温度 0℃、初期温度 30℃は、類似した増加傾向を示しているが、初期温度 0℃のケースが最もエネルギー吸収量が大きく、初期温度 30℃のケースが最も小さい。これは、試験体温度が低い方が、履歴ループ面積が大きいことによる。荷重履歴の漸増と漸減のケースは、上昇経路が異なるが加振終了時には、漸増のケースの方がやや大きいがおおよそ同じ値となっている。図 1.3.3-41(c)に示す試験体温度の推移は、累積 E/V の推移と類似した傾向を示しているが、荷重履歴漸減のケースにおいて、せん断ひずみ 50%での加振時において E/V が増加しているのに対し、試験体温度は緩やかに低下している。また、地震応答波の各指標の推移は、せん断ひずみ 50%での繰返し加振である 1B 相当の推移にほぼ重なっている。

図 1.3.3-42 に、各試験ケースの K_{eq} の変化率を 3 つの指標によりまとめたグラフを示す。図 1.3.3-42(a-1)、(b-1)、(c-1)に示す各試験ケースの K_{eq} の低下傾向を見ると、荷重履歴漸減のケースによる加振時を除けば、K_{eq} はおおよそ基準値の 0.7 倍程度まで低下した後はほぼ一定の値となっている。図 1.3.3-42(a-2)、(b-2)、(c-2)は、各々(a-1)、(b-1)、(c-1)のグラフの一部を拡大したグラフである。図 1.3.3-42(b-2)に示す累積 E/V による推移は、最初の数サイクルを除いて 1B 相当、2B 相当、3B 相当ともおおよそ一致した低下傾向を示しているが、初期温度 0℃はその上方を推移している。図 1.3.3-42(c-2)に示す試験体温度による推移は、初期温度の異なるケースも含め最初の数サイクルによる急激な低下部分を除く緩やかな低下部分はおおよそ一致した傾向を示している。

図 1.3.3-43 に、各試験ケースの H_{eq} の変化率を 3 つの指標によりまとめたグラフを示す。図 1.3.3-43(a-1)、(b-1)、(c-1)に示す各試験ケースの H_{eq} は、緩やかに低下し続け K_{eq} のような比較的はっきりとした収束傾向を持たないが、基準値に対して 0.6～0.7 程度が下限値と推察できる。図 1.3.3-43(c-2)に示すグラフにおいて、H_{eq} は試験体温度に対して最初の数サイクルを除いて直線的な低下傾向を示していることから、H_{eq} は温度の依存性が強いと考えられる。また、図 1.3.3-44 に示す各試験ケースの u の推移については、H_{eq} とほぼ同様の傾向が見られる。

図 1.3.3-42(c-1)、(c-2)および図 1.3.3-43(c-1)、(c-2)中に橙色の実線で表される温度補正式は、技術資料[1.3.3-5)]に示される以下の式である。

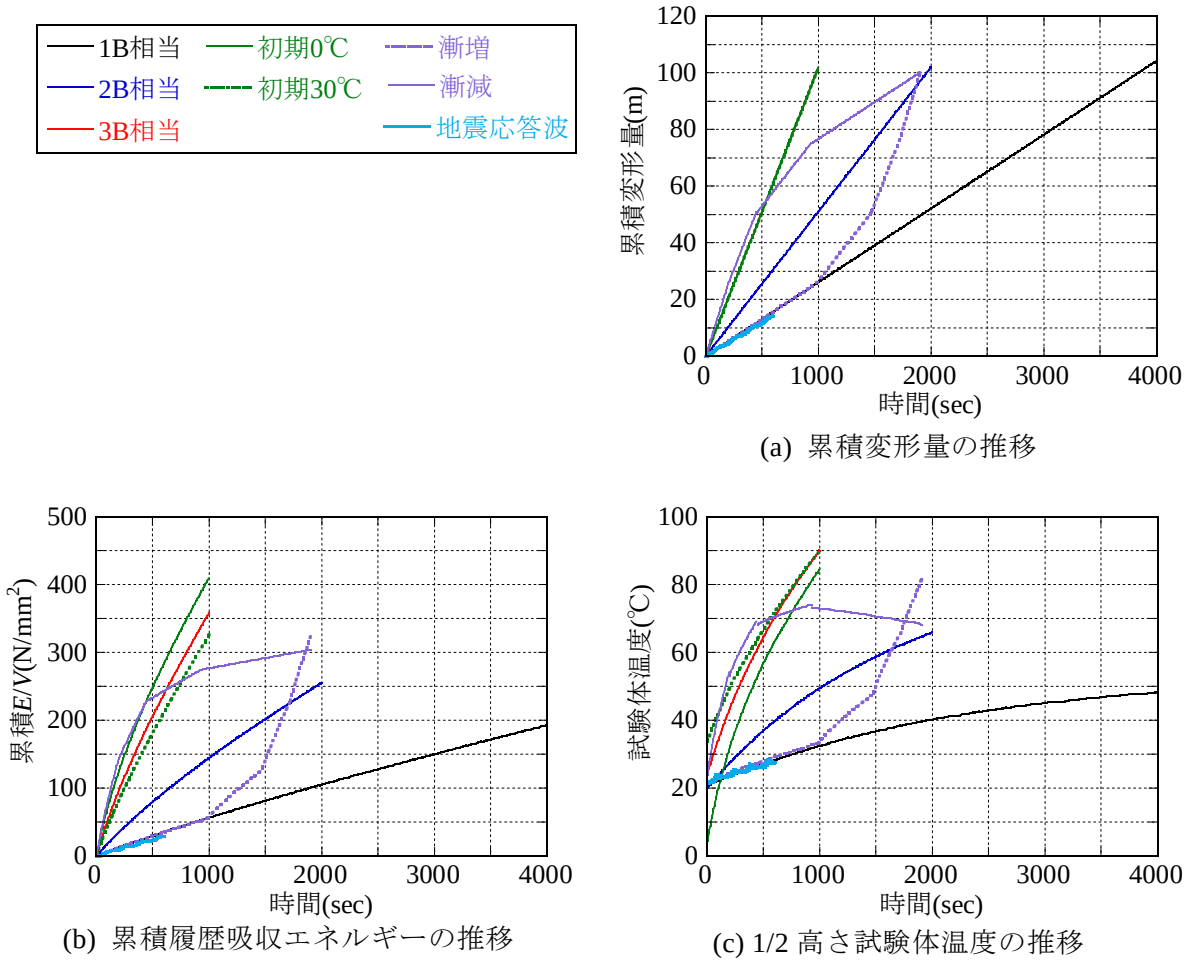
$$\beta_k = \frac{1}{a + bT + cT^2 + dT^3} \tag{1.3.3-5}$$

$$\beta_h = \frac{1}{e + fT + gT^2 + hT^3} \tag{1.3.3-6}$$

T: 試験時温度

ゴム材料	a	b	c	d	e	f	g	h
X0.6R	1.21	-1.86×10^{-2}	5.99×10^{-4}	-8.99×10^{-6}	1.06	-4.13×10^{-3}	1.10×10^{-4}	-3.10×10^{-6}

図 1.3.3-42(c-1)、(c-2)中の温度補正式は、式(1.3.3-5)で算出される等価剛性の補正係数β_kの逆数であり、図 1.3.3-43(c-1)、(c-2)中の温度補正式は式(1.3.3-6)で算出される等価減衰定数の補正係数β_hの逆数である。この温度補正式の適用範囲は-10℃～40℃であり、グラフ中には 0℃～40℃のグラフが示されており、加振による試験体温度変化とK_{eq}、H_{eq}の推移の関係と温度補正式はおおよそ一致した推移を示している。

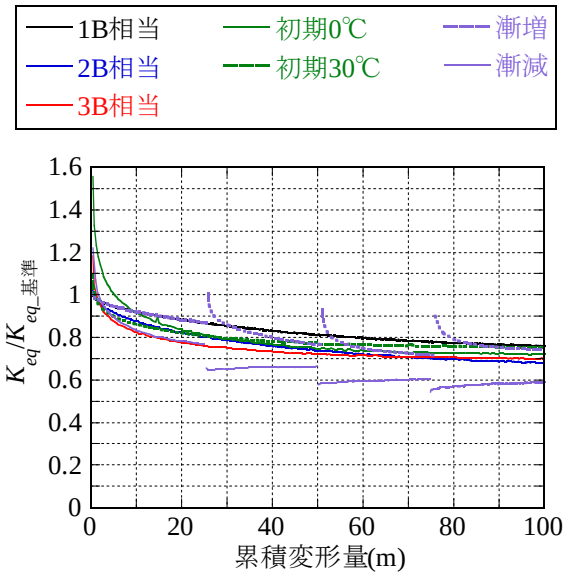


(a) 累積変形量の推移

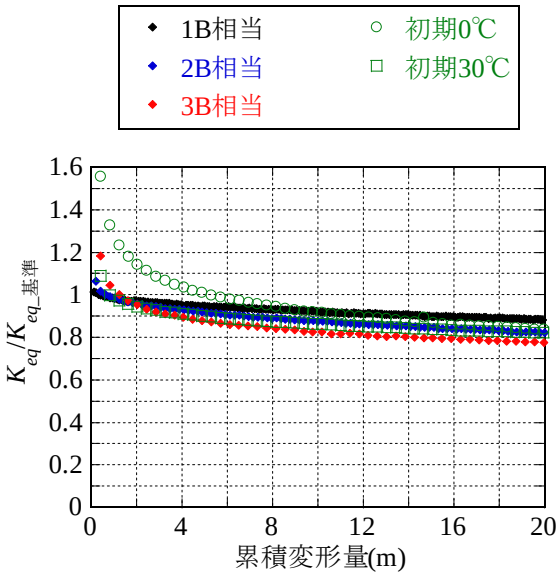
(b) 累積履歴吸収エネルギーの推移

(c) 1/2 高さ試験体温度の推移

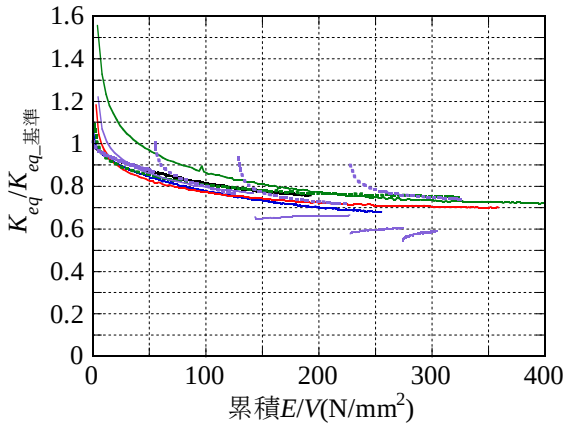
図 1.3.3-41 累積値および試験体温度の推移



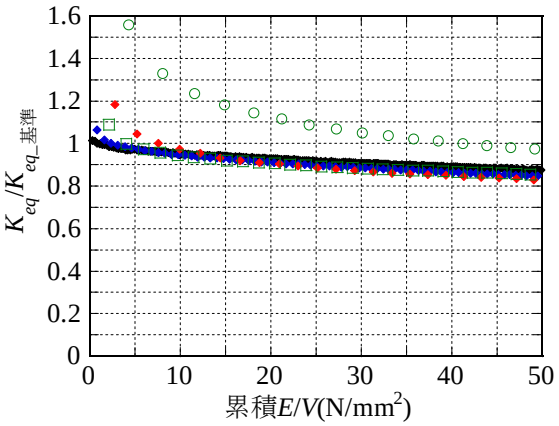
(a-1) 累積変形量による推移



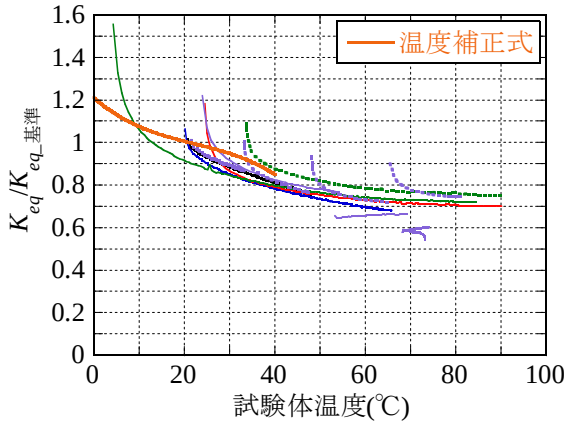
(a-2) 累積変形量による推移(0～20m)



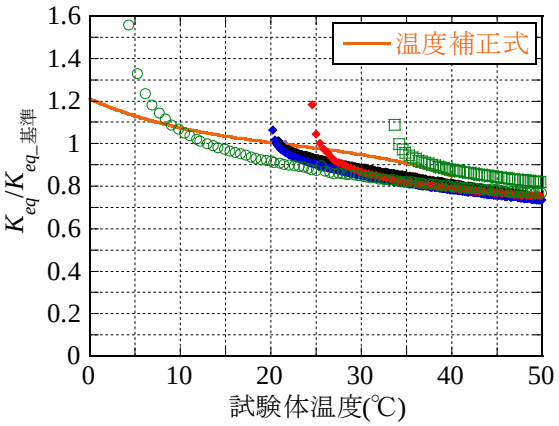
(b-1) 累積 E/V による推移



(b-2) 累積 E/V による推移(0～50N/mm^2)

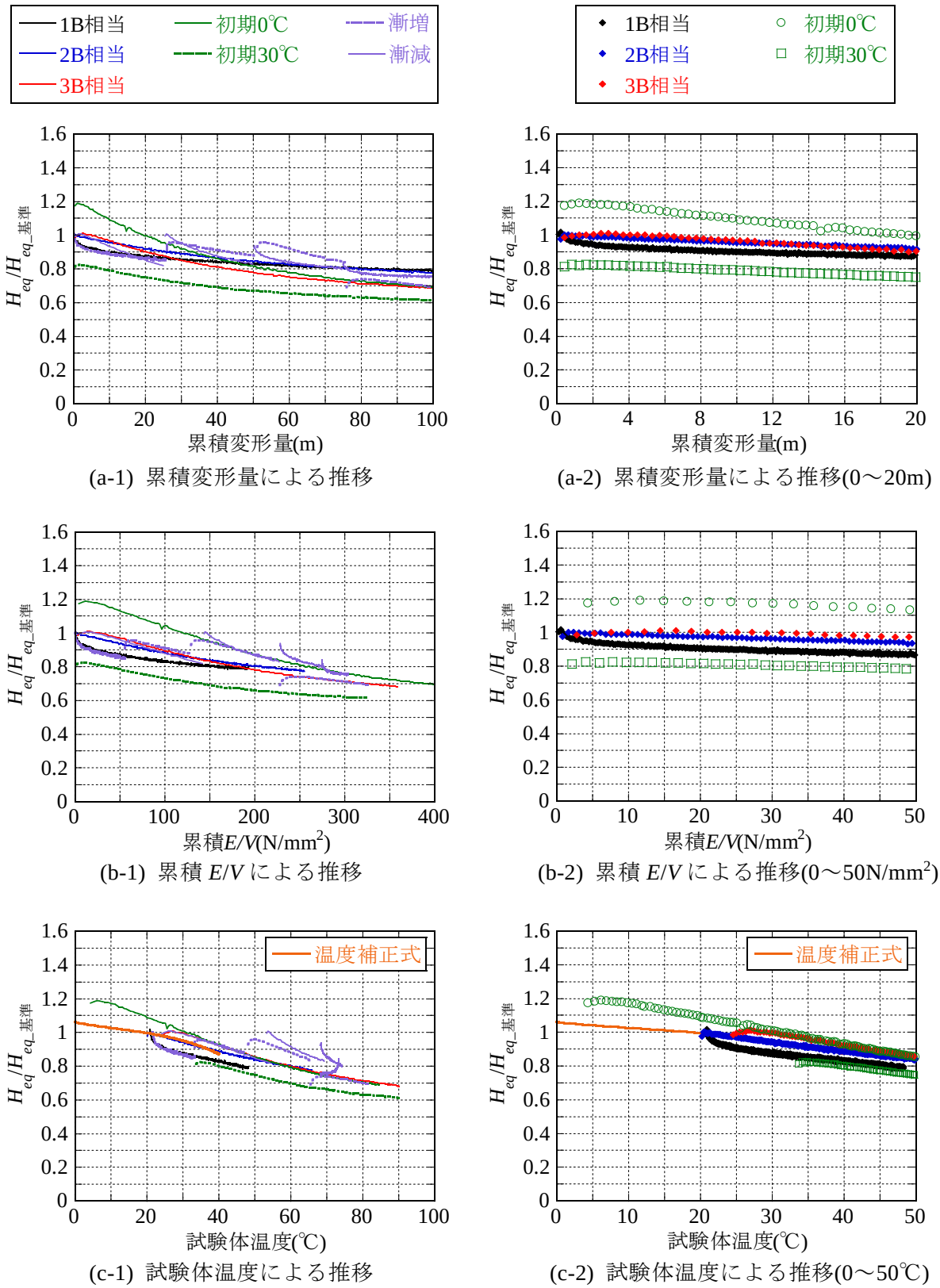


(c-1) 試験体温度による推移



(c-2) 試験体温度による推移(0～50℃)

図 1.3.3-42 各試験ケースの K_{eq} の推移



(a-1) 累積変形量による推移

(a-2) 累積変形量による推移(0～20m)

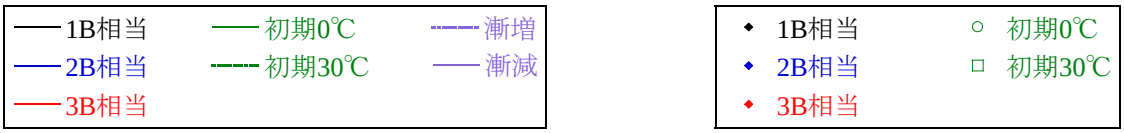
(b-1) 累積 E/V による推移

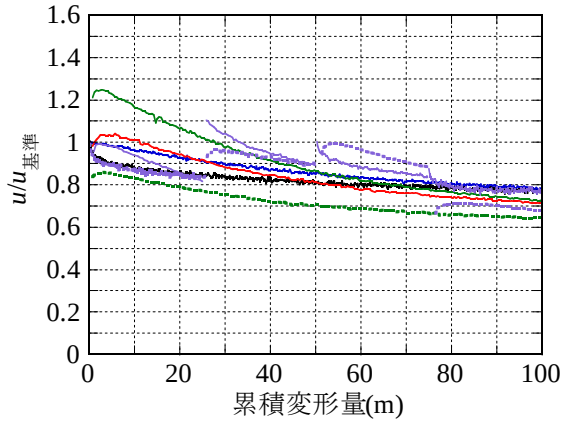
(b-2) 累積 E/V による推移(0～50N/mm^2)

(c-1) 試験体温度による推移

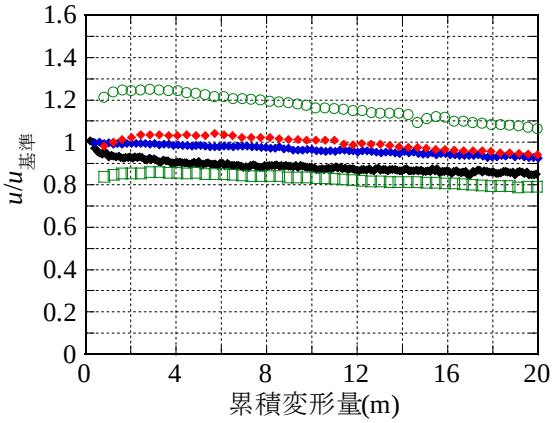
(c-2) 試験体温度による推移(0～50℃)

図 1.3.3-43 各試験ケースの H_{eq} の推移

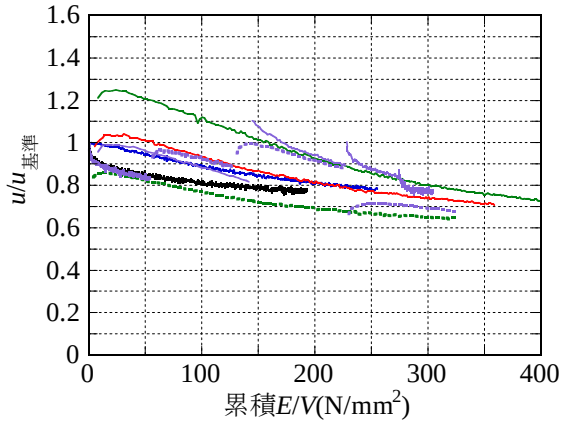




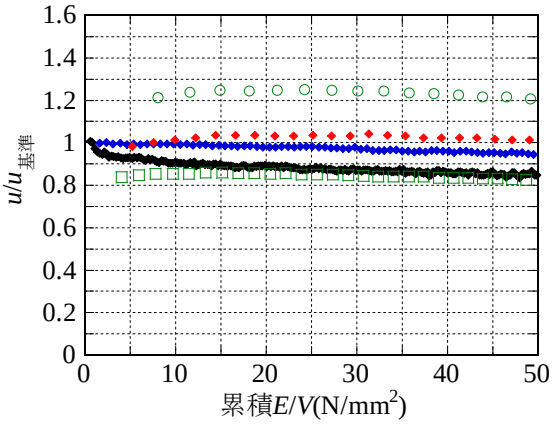
(a-1) 累積変形量による推移



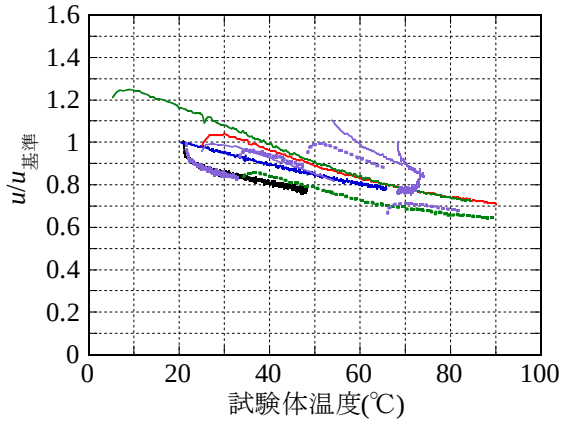
(a-2) 累積変形量による推移(0～20m)



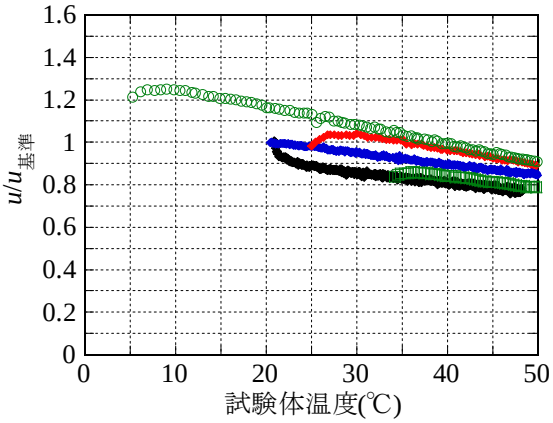
(b-1) 累積 *E*/*V* による推移



(b-2) 累積 *E*/*V* による推移(0～50N/mm^2)



(c-1) 試験体温度による推移



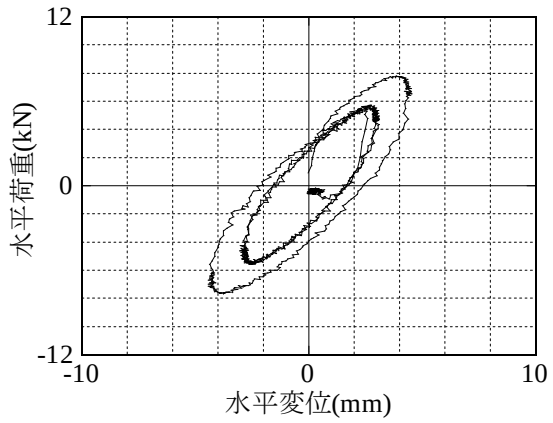
(c-2) 試験体温度による推移(0～50℃)

図 1.3.3-44 各試験ケースの *u* の推移

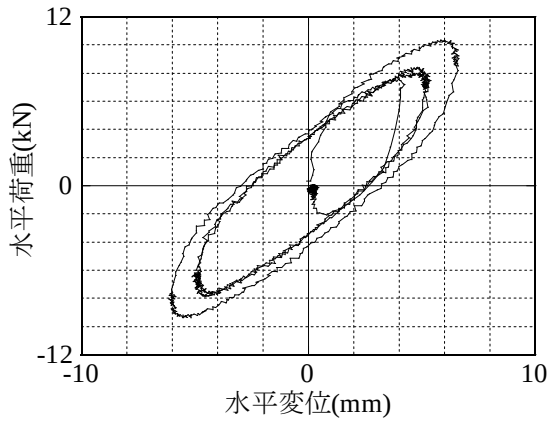
(4) 微小振幅試験結果

図 1.3.3-45 に風応答を対象とした微小振幅試験結果の水平荷重変位関係を示す。微小振幅試験は、せん断変位 3mm(γ=6%)、5mm(γ=10%)で、加振周期 3.0 秒の正弦波加振である。加振は 3 サイクル実施しているが、試験機の制御上の都合により 1 サイクル目の振幅が目標変位よりも大きくなっている。図 1.3.3-45 の水平荷重変位関係においては、せん断ひずみ 10%以下の微小振幅時にも履歴がループを描いていることが確認できる。

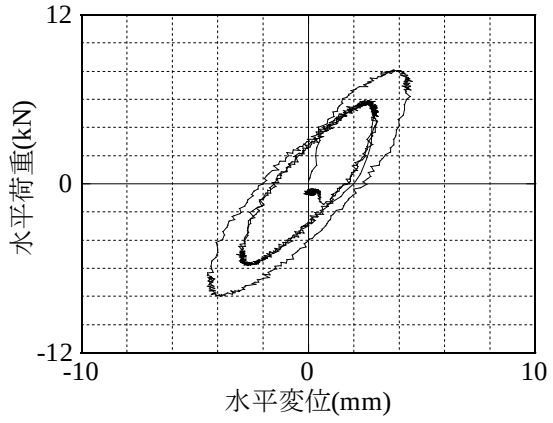
表 1.3.3-8 に、図 1.3.3-45 に示す微小振幅試験の水平荷重変位関係から抽出した K_{eq}, G_{eq}, H_{eq} の値の一覧を示す。G_{eq} の値は、実験結果の K_{eq} から式(1.3.3-4)を用いて算出する。試験体 3 および 4 の微小振幅試験の 3 サイクル目の値の平均値は、γ=6%時で G_{eq}=1.900N/mm^2、H_{eq}=0.239 であり、γ=10%時で G_{eq}=1.639N/mm^2、H_{eq}=0.228 である。表 1.3.3-9 に、技術資料 [1.3.3-5)]に示される水平復元力特性値の設計式を示す。この設計式の適用範囲はγ=10～270%であるが、これを外挿して用いるとγ=6%で G_{eq}=1.632N/mm^2、H_{eq}=0.223、γ=10%で G_{eq}=1.547N/mm^2、H_{eq}=0.225 となる。微小試験結果の特性値の平均値は、設計式を外挿した値よりやや大きいが、その差は 16%程度以下である。



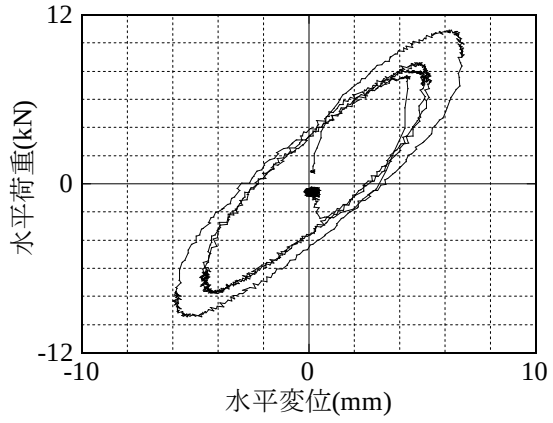
(a) 試験体 3 微小振幅 1[γ=6%]



(b) 試験体 3 微小振幅 2[γ=10%]



(c) 試験体 4 微小振幅 1[γ=6%]



(d) 試験体 4 微小振幅 2[γ=10%]

図 1.3.3-45 微小振幅試験(γ=6%, 10%, 3 サイクル, 加振周期 3.0 秒, 正弦波)
水平荷重変位関係

表 1.3.3-8 微小振幅試験結果の水平復元力特性値

試験体	サイクル	微小振幅1 (γ=6%)			微小振幅2 (γ=10%)		
		K_{eq} (kN/mm)	G_{eq} (N/mm^2)	H_{eq}	K_{eq} (kN/mm)	G_{eq} (N/mm^2)	H_{eq}
3	1	1.723	1.793	0.242	1.542	1.605	0.226
	2	1.856	1.931	0.245	1.555	1.618	0.233
	3	1.830	1.904	0.242	1.539	1.602	0.227
4	1	1.782	1.782	0.237	1.590	1.655	0.223
	2	1.885	1.885	0.236	1.611	1.677	0.228
	3	1.895	1.895	0.235	1.609	1.675	0.228

表 1.3.3-9 高減衰ゴム系積層ゴム(X0.6R)設計式

ゴム材料呼称	代表特性値 (γ＝100%)	各関数 (10%≦γ≦270%)
X0.6R	G_{eq}=0.620N/mm^2 H_{eq}=0.240	$G(\gamma)=G_0\times(2.855-3.878\gamma+2.903\gamma^2-1.016\gamma^3+0.1364\gamma^4)$ G_0=0.620、γ=1.0 におけるせん断弾性係数
		$H_{eq}(\gamma)=H_{eq\,0}\times(0.9150+0.2364\gamma-0.1804\gamma^2+0.02902\gamma^3)$ $H_{eq\,0}$=0.240、γ=1.0 における等価減衰定数
		$u(\gamma)=u_0\times(0.9028+0.2711\gamma-0.2083\gamma^2+0.03421\gamma^3)$ u_0=0.408、γ=1.0 における降伏荷重特性比

1.3.3.3 まとめと課題

高減衰ゴム系積層ゴム支承の多数回繰返しに対する性能を確認するため、4 体の縮小試験体により長振幅高速繰返し試験を実施した。試験は、一定面圧下(15N/mm^2)における周期 4.0 秒の正弦波による繰返し加振で、累積変形量が約 100m となる加力プログラムを実施した。高減衰ゴム系積層ゴムの各種依存性の影響を確認するため、3 水準の加振振幅(50%、100%、200%)、2 水準の初期温度(0℃、30℃)、2 種類の荷重履歴(漸増、漸減)を設定した。また、ランダム波加振による応答性能を確認するため地震応答波による加振も実施した。実験結果より、以下の事項が確かめられた。

(1) 加振振幅の影響

累積変形量が同じでも、加振振幅が大きい方が水平復元力特性値は大きく低下した。せん断ひずみ 50%による加振では K_{eq}、H_{eq}、u とも類似した緩やかな低下傾向を示すが、せん断ひずみ 100%、200%の加振においては、K_{eq} は急激な低下を示した後、ある一定の値に収束する傾向が見られた。H_{eq} および u は、全加振サイクルに渡って緩やかに低下し続けた。加振終了時の試験体温度(加振開始時約 20℃)は、ゴムの 1/2 高さにおいて、γ=50%の 1000 サイクルで約 50℃、γ=100%の 500 サイクルで約 70℃、γ=200%の 250 サイクルで約 90℃と、加振振幅が大きくなるほど高い温度を示した。

(2) 初期温度の影響

初期温度の違いにより加振開始時の復元力特性が異なり、初期温度が低いほど履歴ループの面積が大きく、累積履歴吸収エネルギーも大きかった。また、初期温度が低いほど繰返し加振による水平復元力特性値の低下率が大きかった。ただし、せん断ひずみ 200%の 250 サイクルという同一の加力プログラム加振後の履歴ループ形状および試験体温度は、初期温度 0℃、20℃、30℃のケースともほぼ同様であった。初期温度が異なっても、同様の加振を受けることで履歴特性はおおよそ同じ状態に至った。

(3) 荷重履歴の影響

加振振幅が 50%、100%、200%、250%と大きくなっていく漸増の荷重履歴においては、各加振振幅で水平復元力特性値の低下が生じた。一方、加振振幅が 250%、200%、100%、50%と小さくなっていく漸減の荷重履歴においては、せん断ひずみ 250%の 49 サイクルという大変形による繰返し加振により水平復元力特性値が大きく低下した後は、続くせん断ひずみ 200%、100%、50%の繰返し加振では等価剛性がやや回復する傾向が見られた。また、試験体温度も漸減の荷重履歴においては、せん断ひずみ 50%での加振時には加振中に緩やかな低下を生じた。以上のように、累積変形量および累積履歴吸収エネルギー量がほぼ同じであっても、経験した荷重履歴によって水平復元力特性値の推移が異なることが確認された。

(4) 復元力特性値の回復特性

多数回繰返し加振により試験体温度が上昇し、水平復元力特性値が低下するが、加振終了後試験体温度が標準温度である 20℃程度まで低下すると、水平復元力特性値は加振前の値の 90%程度まで回復した。また、加振後丸 1 日程度経過すると水平復元力特性値はおおよそ加振前の

値に回復した。

(5) 水平復元力特性の評価指標

多数回繰返し加振による水平復元力特性値の低下の下限値は、3 サイクル目の値に対して K_{eq} は 0.7 倍程度、H_{eq} および u は 0.6～0.7 倍程度とみられる。累積変形量、累積エネルギー量、試験体温度と水平復元力特性値の関係を見ると、K_{eq} は累積エネルギー量に対して加振振幅に関わらずほぼ一致した傾向を示している。ただし、初期温度による初期状態の違いは別途考慮する必要がある。また、試験体温度に対しては初期温度の違うケースも含めて、各ケース類似した傾向を示している。ただし、最初の数サイクルにおける急激な低下を考慮する必要がある。また、加振中の振幅変化の影響も適切に考慮しなければならない。H_{eq} および u は、おおよそ一致した傾向を示しており、試験体温度に対する依存性が強いと考えられる。

今後の課題としては、実験結果をさらに詳細に分析することで繰返しの影響による特性変化を地震応答解析に反映させる際の評価指標を整理することが挙げられる。また、今回の試験体が縮小試験体であるため、実大サイズの高減衰ゴム系積層ゴムに対する実験結果との比較により、サイズの違いによる影響を確認する必要がある。

参考文献

1.3.3-1) 技術委員会 免震部材部会:積層ゴムと弾性すべり支承のエネルギー吸収性能、(社)日本免震構造協会、MENSHIN、 NO.67、P1.3.38、 2010.2

1.3.3-2) 嶺脇重雄他:超高層免震建物の地震応答を想定した実大免震支承部材の性能確認試験、構造工学論文集、 Vol.55B、P469-477、 2009.3

1.3.3-3) 室田伸夫他:荷重履歴依存性を改良した新高減衰積層ゴムの開発(その 1)～(その 2)、日本建築学会大会学術講演梗概集、P879-882、2007.8

1.3.3-4) 竹中康雄他:大振幅繰返し変形を受ける積層ゴム支承の熱・力学挙動に関する研究 (その 1)～(その 6)、日本建築学会学術講演梗概集、P867-878、2007.8

1.3.3-5) 株式会社ブリヂストン:高減衰ゴム系積層ゴム支承(X0.6R)技術資料

1.3.4　弾性すべり支承（高摩擦）

1.3.4.1 実験計画

(1) 実験目的と背景

(a) 目的

弾性すべり支承（高摩擦）の大振幅高速繰り返し試験を縮小試験体により実施し、多数回繰り返しに対する性能を把握する事を目的とする。

試験で確認する項目は以下の通りである。

① 多数回繰り返しに対する摩擦特性の変化

② 多数回繰り返しに対する試験体の温度変化

③ 多数回繰り返しに対する耐久性能

④ 静的軸力の違いによる上記性状の変化

(b) 背景

免震建築物に適用される弾性すべり支承の繰り返し特性については、小口径試験体を対象とした数々の実験的研究で、ＰＴＦＥ系のすべり支承について摩擦係数の面圧、速度、繰り返しなどに対する各依存性について検討が行われている[1.3.4-1)~1.3.4-10)]。これらの研究では、摩擦係数は面圧増加に伴い低減すること、速度増加に対して漸減または漸増傾向にあることが共通に指摘されている[1.3.4-1)、1.3.4-4)、1.3.4-6)、1.3.4-8)~1.3.4-10)]。また、摩擦係数は繰り返し載荷（またはすべり面の温度上昇）に対しては漸減するとの報告もある[1.3.4-4)、1.3.4-6)、1.3.4-9)、1.3.4-10)]。これらの結果からすべり面の面圧や速度の変動を考慮した依存型摩擦モデルを設定し地震応答解析に利用した検討例[1.3.4-2)、1.3.4- 11)~1.3.4-13)]が報告されている。

以下では、大口径の弾性すべり支承試験体による動的載荷実験により、摩擦係数の繰り返し依存性について評価した事例[1.3.4-9)]を示す。

標準条件（v =20 cm/s、σ=20N/mm^2）における繰り返し依存性確認試験で得られた繰り返し回数 n および累積すべり変位 S=Σd に対する動摩擦係数 $\overline{\mu}$ およびすべり板温度 T の変化を図 1.3.4-1 に示す。載荷開始直後は T が載荷前の管理温度（30℃）から急激に上昇、$\overline{\mu}$ は初期の値から急激に下降する。その後、T の上昇および $\overline{\mu}$ の下降傾向は次第に直線的になる。これを T-$\overline{\mu}$ 関係（図 1.3.4-2）で表すと、$\overline{\mu}$ は T の上昇に伴いほぼ直線的に低下する傾向が確認できる。

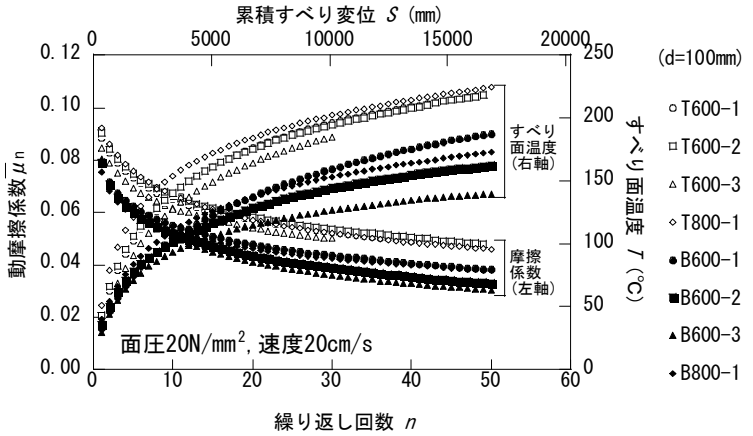


図 1.3.4-1 摩擦係数の繰り返し依存性（Type T&B, σ =20N/mm2, v =20cm/s）[1.3.4-9)]

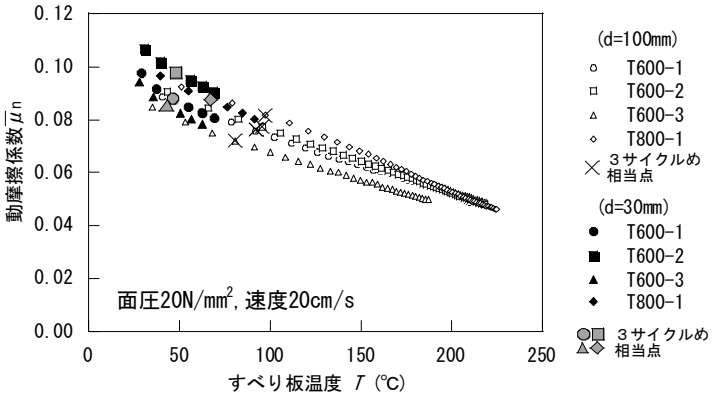
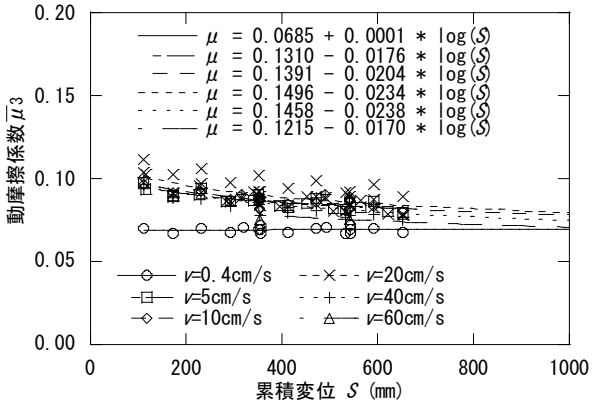


図 1.3.4-2 摩擦係数のすべり板温度依存性（Type T, σ =20N/mm^2, v =20cm/s）[1.3.4-9)]

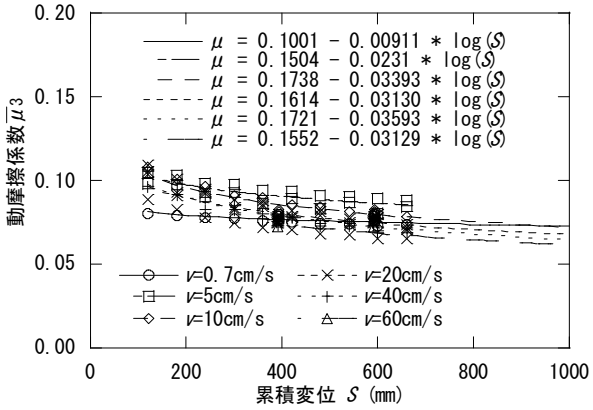
図 1.3.4-3 には正弦波載荷試験（d=100mm、30mm）による動摩擦係数の累積すべり変位依存性を示す。$\overline{\mu}$ は S が小さいうちは最大速度が大きいほど大きな値を示すが、S が大きくなると次第に減少し、v <1cm/s の準静的なケースの $\overline{\mu}$ にほぼ漸近する。

$$\mu = a + b \cdot \log S \qquad (40 \leqq S \leqq 2196\ [\mathrm{mm}]) \qquad (1.3.4\text{-}1)$$

ここに a 、b は回帰係数である。



(a) Type T（d=100mm,30mm）



(b) Type B（d=100mm,30mm）

図 1.3.4-3 正弦波載荷による動摩擦係数の累積すべり変位依存性（σ =20N/mm^2）[1.3.4-9)]

(2) 実験日時および場所

日　時：　平成２２年１１月１５日～１８日

場　所：　（株）コベルコ科研　尼崎事業所

(3) 試験体

支承は実大サイズの約 1/3 縮小試験体として、外径Φ300（CR ゴム、東京ﾌｧﾌﾞﾘｯｸ製）の支承を 5 体（予備 1 体を含む)、すべり板を 2 枚製作した。ゴム層厚は 2.5mm、ゴム層数は 3 層、基準面圧は 20N/mm^2 である。

試験体の外観図を図 1.3.4-4 に、試験体諸元を表 1.3.4-1 に示す。

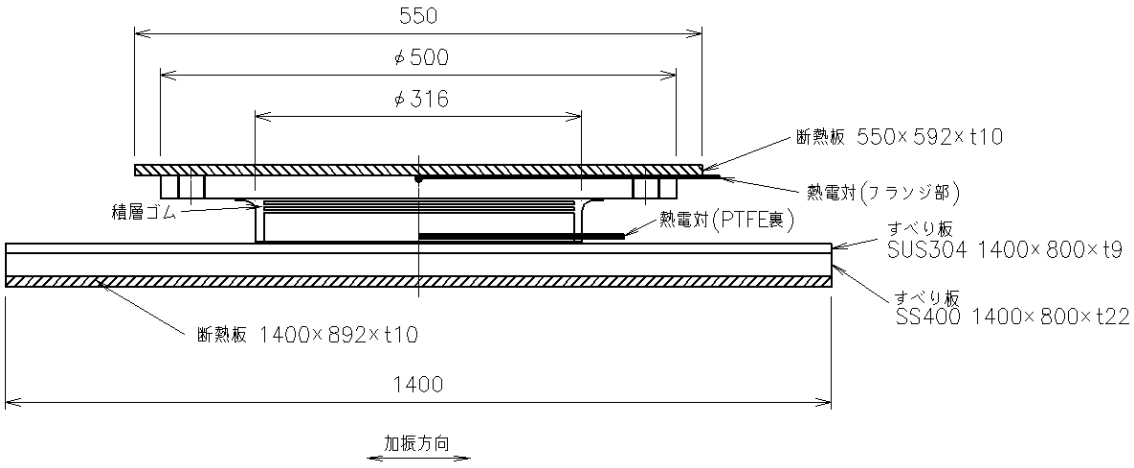


図 1.3.4-4 試験体外観（弾性すべり支承（高摩擦))

表 1.3.4-1　試験体緒元

項目	単位	試験体寸法
支承径	mm	φ300
ゴム一層厚	mm	2.5
積層数	層	3
PTFE	mm	2
試験体数	－	CR　4 体
一次形状係数	－	30
二次形状係数	－	40
摩擦係数	－	0.100

(4) 試験装置

試験装置として、コベルコ科研尼崎事業所の高速二軸試験機を用いた。

試験機仕様を表 1.3.4-2 に、試験機外観を図 1.3.4-5 に示す。

表 1.3.4-2　試験機仕様（高速二軸試験機）

鉛直最大荷重	10MN（5MN×2 基：静的油圧ジャッキ）
水平最大荷重	400kN（±400kN 動的油圧サーボアクチュエータ）
水平最大変位	±250mm
水平最大速度	水平最大速度 100cm/s

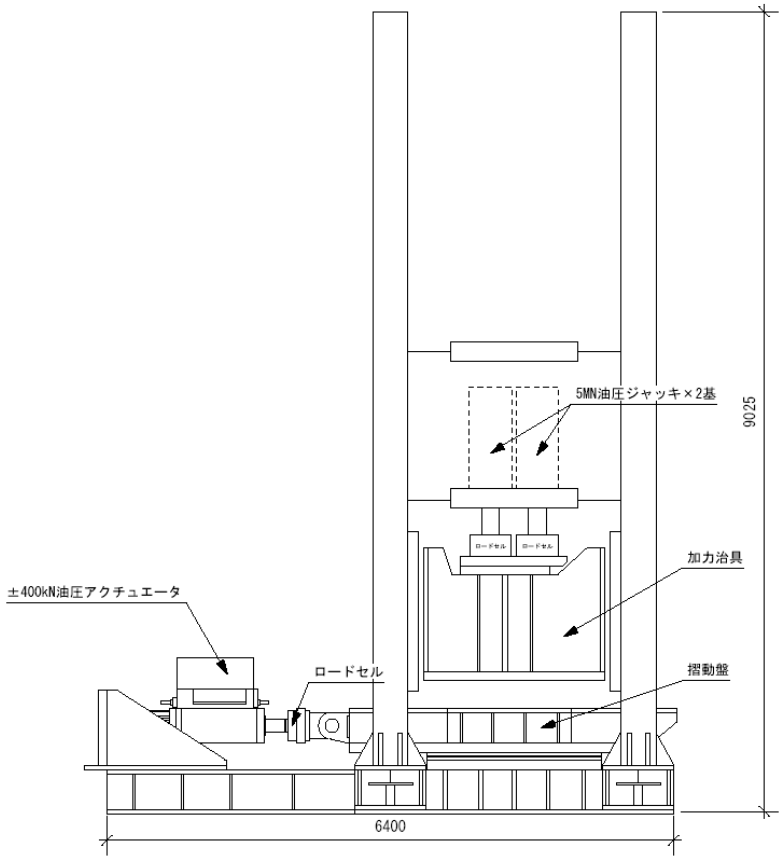


図 1.3.4-5 試験機外観（3000kN 高速二軸試験機）

断熱材として標準高温用断熱板（D-M-E 双葉、10mm 厚）を用い、試験機側面盤と支承フランジの間、すべり板と摺動盤の間に断熱板を設置した。

断熱板の仕様を表 1.3.4-3 に示す。

表 1.3.4-3 断熱板の仕様

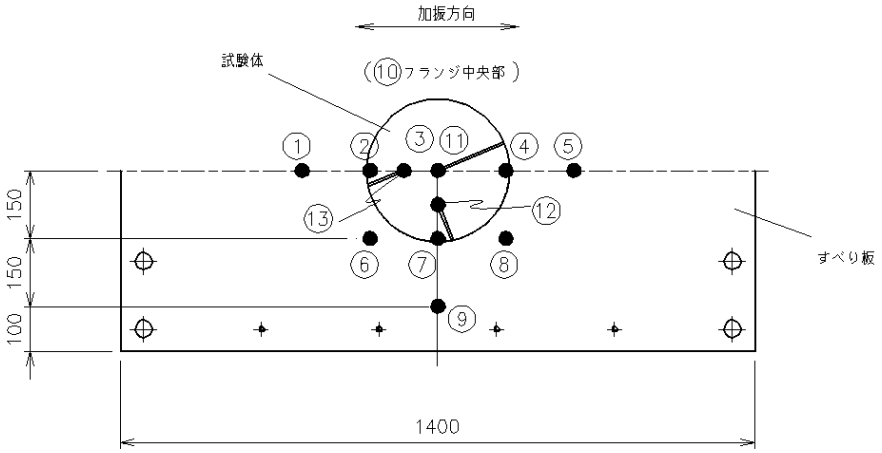
圧縮強度	338(N/mm^2)　(24℃の場合) 103(N/mm^2)　(285℃の場合)
吸水性	0.06%
熱伝導率	0.274W/(m・k)　(24℃の場合) 0.303W/(m・k)　(220℃の場合)
難燃性	94V－0(自己消化性)
最高使用温度	285℃
材質	アルミニュームカーボネート＋グラスファイバー＋ 不飽和ポリエステル

(5) 計測項目と計測方法

計測項目は、水平変位（すべり板、積層ゴム部)、水平荷重、鉛直変位（摺動盤)、鉛直荷重、温度（試験体内部・表面、室温)、PTFE 摩耗量とした。

すべり板水平変位は試験機内蔵の変位計により、積層ゴム部変位は外部リール型変位計により、摺動盤の鉛直変位はひずみゲージ式摺動型変位計により計測した。また、水平荷重および鉛直荷重はアクチュエータおよびジャッキ先端のロードセルにより測定し、水平荷重は慣性力補正により求めた。温度計測は、すべり板（SUS 裏面）9 点、ゴム表面 4 点、PTFE 裏 3 点、フランジ上面 1 点の計 17 点を設置した。温度計測は、ゴム表面部の 2 点では非接触型の放射温度計を用い、他の計測点は熱電対を使用した。

すべり板の温度計測位置を図 1.3.4-6 に、弾性すべり支承の温度計測位置を図 1.3.4-7、図 1.3.4-8 に示す。また、摺動盤の鉛直変位計測位置を図 1.3.4-9 に、加力治具・摺動盤の温度計測位置を図 1.3.4-10 に、膜厚計による PTFE 摩耗量の計測位置を図 1.3.4-11 に示す。



①～⑨：すべり板温度、⑩：フランジ中央温度、
⑪～⑬：PTFE 裏温度（図 1.3.4-7）

図 1.3.4-6 温度計測位置（すべり板）

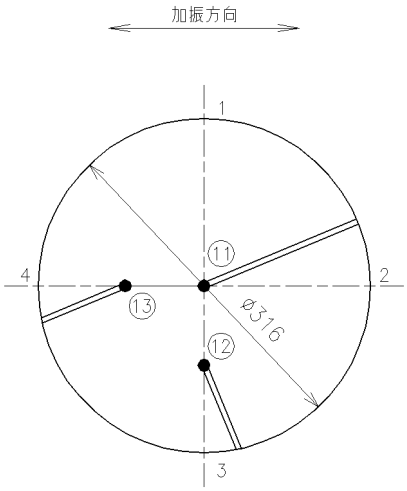


図 1.3.4-7 弾性すべり支承の温度計測位置（PTFE 裏）⑪～⑬

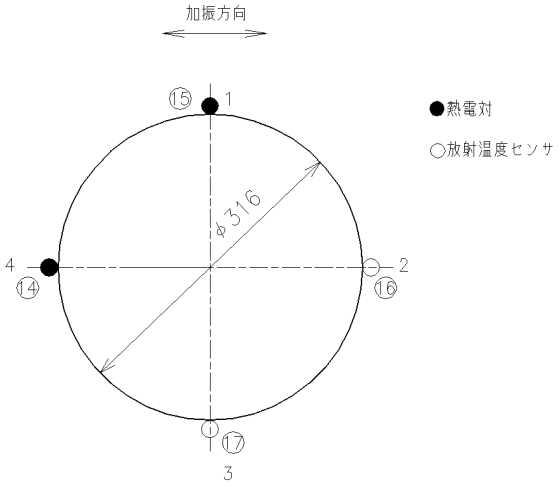


図 1.3.4-8 弾性すべり支承の温度計測位置（ゴム表面）⑭～⑰

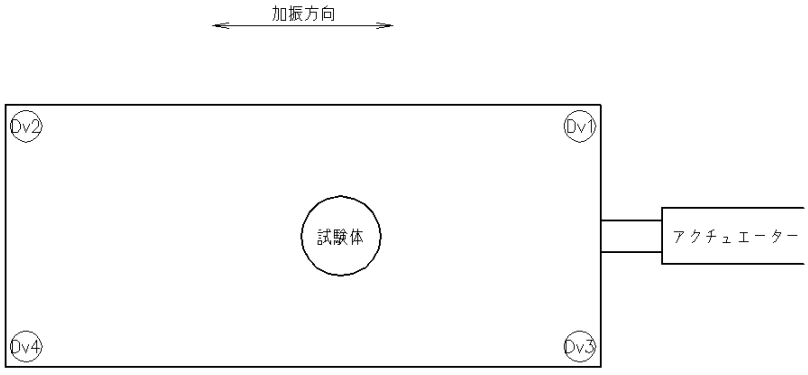


図 1.3.4-9 摺動盤の鉛直変位(Dv1～Dv4)

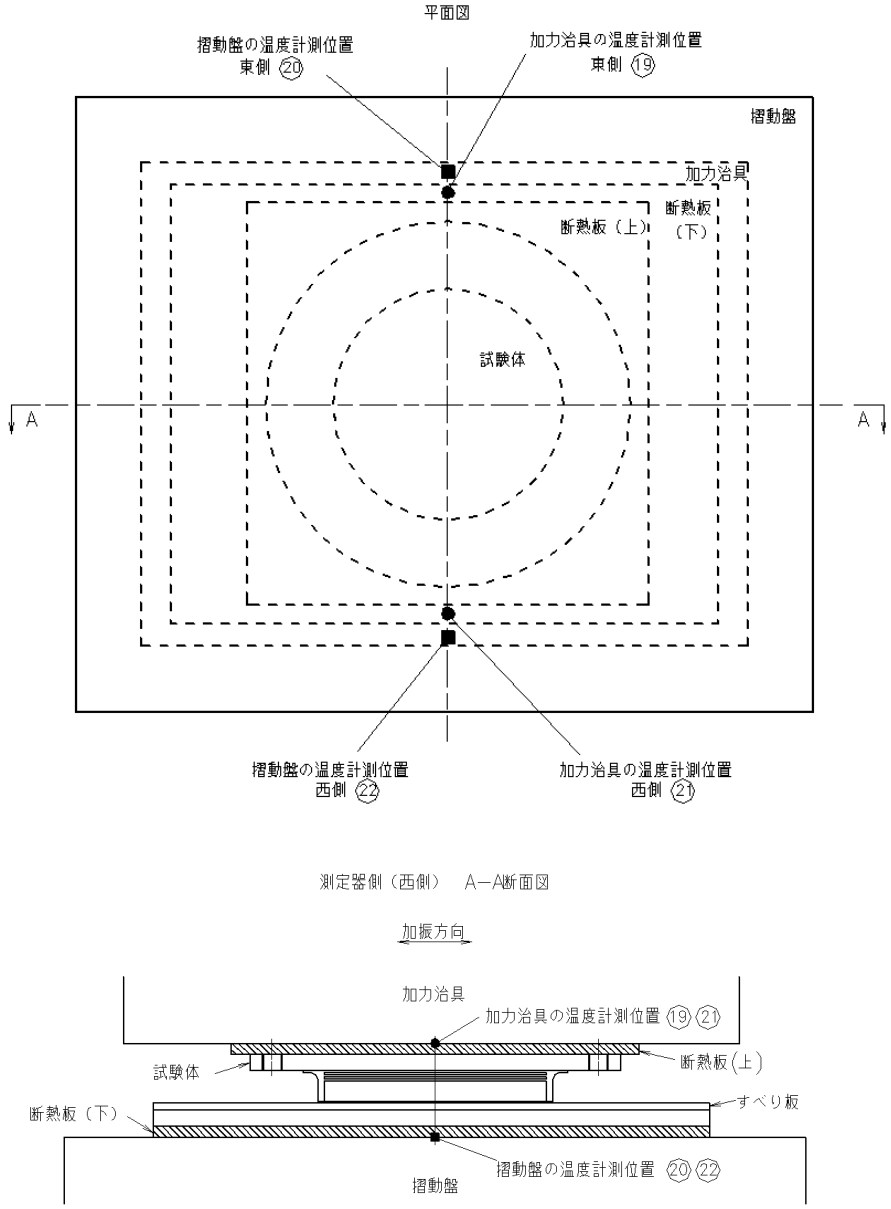


図 1.3.4-10 加力治具・摺動盤温度計測位置

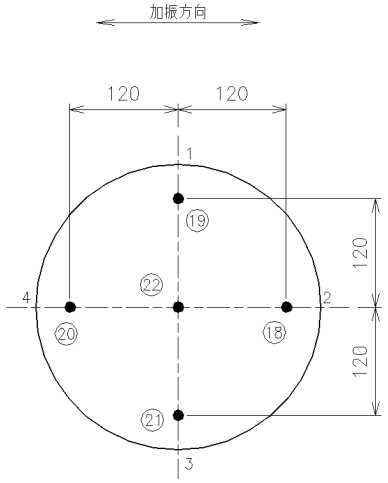


図 1.3.4-11 PTFE 摩耗量の計測位置 ⑱～㉒

(6) 実験方法および実験ケース

基準面圧(20N/mm^2)を載荷した状態で正弦波により水平加振するすべり試験を行なった。各試験は初期温度を常温（20℃程度）として実施した。試験は正弦波による多数繰り返し試験（長周期：1A－1、1A－2、限界 1B、2B、3B）からなり、各試験の前後に基本特性試験（4 サイクル）を実施した。基本特性試験は常温で行うため、長周期、限界試験後は試験体の冷却を行った。表 1.3.4-4 に共通実験条件を、表 1.3.4-5 に実験ケース一覧を示す。

長周期および限界試験では、試験機のアキュムレータ蓄圧のため、15～40 サイクル毎に 1～3 分のインターバル時間をとったが、#1、#5 試験体による一部のケースでは連続加振を実施した。

試験では、基本となる基準面圧の長周期、限界の試験ケースに加えて、基準面圧の 2 倍(40N/mm^2)相当の軸力を載荷するケース（#4－1、#5－3）、目標載荷振幅を 1mm、2mm、3 mm、5 mm とする微小振幅のケース（#4－1）、免震建築物の地震応答波を載荷波とするランダム波加振ケース（#2－1、#5－1）を実施した。このうち地震応答波載荷では、免震周期 4 秒、降伏せん断力係数を 0.03、上部構造を剛体とした 1 質点モデルに、T-TN-OSKH02-AV および T-TN-AIC003-AV を入力して得られた応答変位波形を用いた。試験では応答変位波形のうち主要動部付近を抜き出して用いた。図 1.3.4-12 に載荷に用いた応答変位波形を示す。

表 1.3.4-4 共通実験条件

面圧	20 N/mm^2（基準面圧）
鉛直荷重	1414kN
入力波形	正弦波
加振周期	4sec

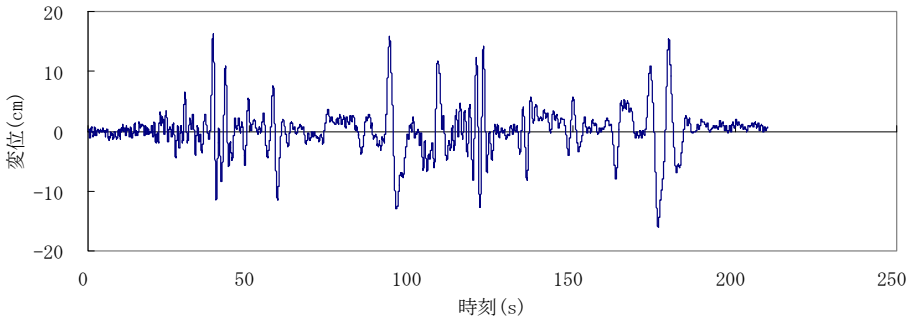
表 1.3.4-5 (1) 実験ケース一覧

試験体 No.	試験 No.	ｹｰｽ	試験条件	面圧 (N/mm^2)	変位 ± mm	ｻｲｸﾙ数	時間 sec	累積変形 m
#1	#1－1		基本特性	20	100	4	16	1.6
		1A－1	長周期		100	125(40×3＋5)	500	50
			(後)基本特性		100	4	16	1.6
	#1－2		基本特性		100	4	16	1.6
		1A－2	長周期		100	125(40×3＋5)	500	50
			(後)基本特性		100	4	16	1.6
	#1－3		基本特性		100	4	16	1.6
	#1－4	1B	限界		100	250【連続】	1000	100
#2	#2－1		地震波(osk)	20	101		210	
			基本特性		100	4	16	1.6
		1B	限界		100	250 (40×6＋5＋5)	1000	100
			(後)基本特性		100	4	16	1.6
#3 (大変位)	#3－1		基本特性	20	100	4	16	1.6
		2B	限界		200	125 (30×4＋5)	480	100
			(後)基本特性		200*	4	16	1.6
	#3－3		基本特性		100	4	16	1.6

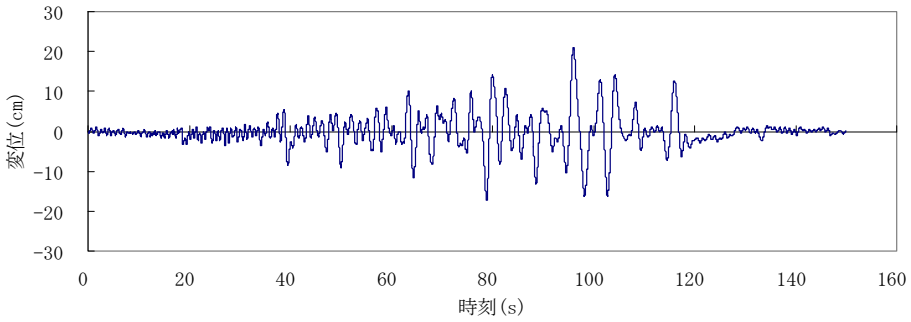
表 1.3.4-5 (2) 実験ケース一覧

試験体 No.	試験 No.	ｹｰｽ	試験条件	面圧 (N/mm^2)	変位 ± mm	ｻｲｸﾙ数	時間 sec	累積変形 m
#4 (大面圧)	#4－1		微小振幅	20	振幅：1、2、3、5mm、4 ｻｲｸﾙ、周期：3 秒			
			基本特性	40	100	4	16	1.6
		1A－1	長周期		100	125 (40×3＋5)	500	50
			(後)基本特性		100	4	16	1.6
	#4－2		基本特性		100	4	16	1.6
		1A－2	長周期		100	125 (40×3＋5)	500	50
			(後)基本特性		100	4	16	1.6
#5 (大変位)	#5－1		地震波(aic)	20	210		210	
			基本特性		100	4	16	1.6
		3B	限界		230	100 (15×6＋5＋5)	480	92
			(後)基本特性		230*	4	16	1.6
#5(大面圧)	#5－2		基本特性	20	100	4	16	1.6
	#5－3	1B	限界	40	100	250【連続】	1000	100

「(後) 基本特性」は温度上昇状態で基本特性試験と同条件の試験を実施。(*長周期・限界の最終 5 ｻｲｸﾙで代用)



(a) T-TN-OSKH02-AV 入力 (δ max=10.1cm、 Σ δ s= 234cm)



(b) T-TN-AIC003-AV 入力 (δ max=21.0cm、 Σ δ s= 824cm)

図 1.3.4-12 地震応答波入力用波形

1.3.4.2 実験結果

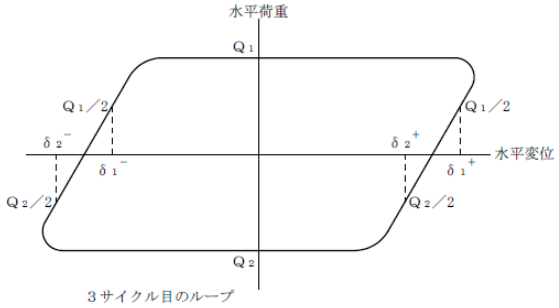
(1) 特性値の評価方法

免震部材の水平剛性、摩擦係数は以下の方法により求める。評価方法は、文献 [1.3.4-15)]をもとに定義する。

特性値の評価対象は原則として載荷３サイクルめの荷重－変形関係とする。長周期、限界試験では繰り返し特性を評価するため、各載荷ケースでサイクル毎の荷重－変形関係特性値を読み取ることとする。

a) 水平剛性

荷重－変形関係において、正負の切片荷重の 1/2 の点を結ぶ直線の勾配を読み取り、水平変位の正側と負側で剛性 *Kh1*, *Kh2* を求め、その平均値を水平剛性 *Kh* とする（図 1.3.4-13a, 式(1.3.4-2)～(1.3.4-4)）。



$$Kh_1 = \left(\frac{Q_1}{2} - \frac{Q_2}{2}\right) \Big/ \left(\delta_1^{+} - \delta_2^{+}\right) \quad (1.3.4\text{-}2)$$

$$Kh_2 = \left(\frac{Q_1}{2} - \frac{Q_2}{2}\right) \Big/ \left(\delta_1^{-} - \delta_2^{-}\right) \quad (1.3.4\text{-}3)$$

$$Kh = \frac{Kh_1 + Kh_2}{2} \quad (1.3.4\text{-}4)$$

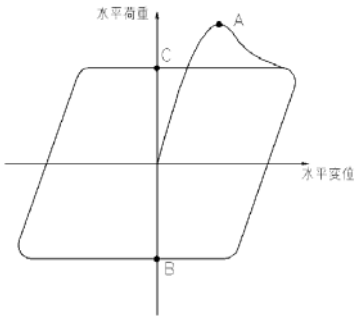
Q_1：＋側の切片荷重の絶対値

Q_2：－側の切片荷重の絶対値

図 1.3.4-13a 水平剛性 *Kh* の算出方法

b) 摩擦係数

荷重－変形関係において、１波目については最大値 A 点(＋側)と B 点(－側)の水平荷重を、２波目以降は水平変位が 0 のときの水平荷重(B 点、C 点) を読み取り、正側と負側で摩擦係数 $\mu 1$, $\mu 2$ を求め、その平均値を摩擦係数 μ とする（図 1.3.4-13b, 式(1.3.4-5)～(1.3.4-7)）。



$\mu 1 = Q1/N1$ (1.3.4-5)

$\mu 2 = Q2/N2$ (1.3.4-6)

Q1：＋側の切片荷重の絶対値

N1：Q1 時の鉛直荷重

Q2：－側の切片荷重の絶対値

$$\mu = \frac{\mu 1 + \mu 2}{2} \quad (1.3.4\text{-}7)$$

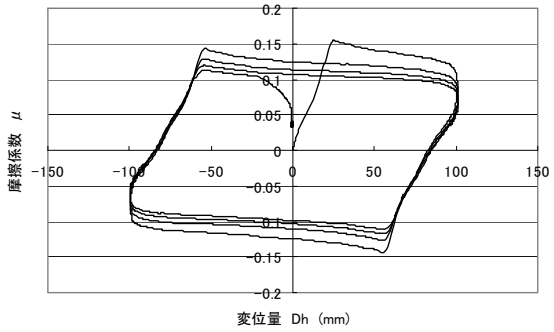
N2：Q2 時の鉛直荷重

図 1.3.4-13b 摩擦係数 μ の算出方法

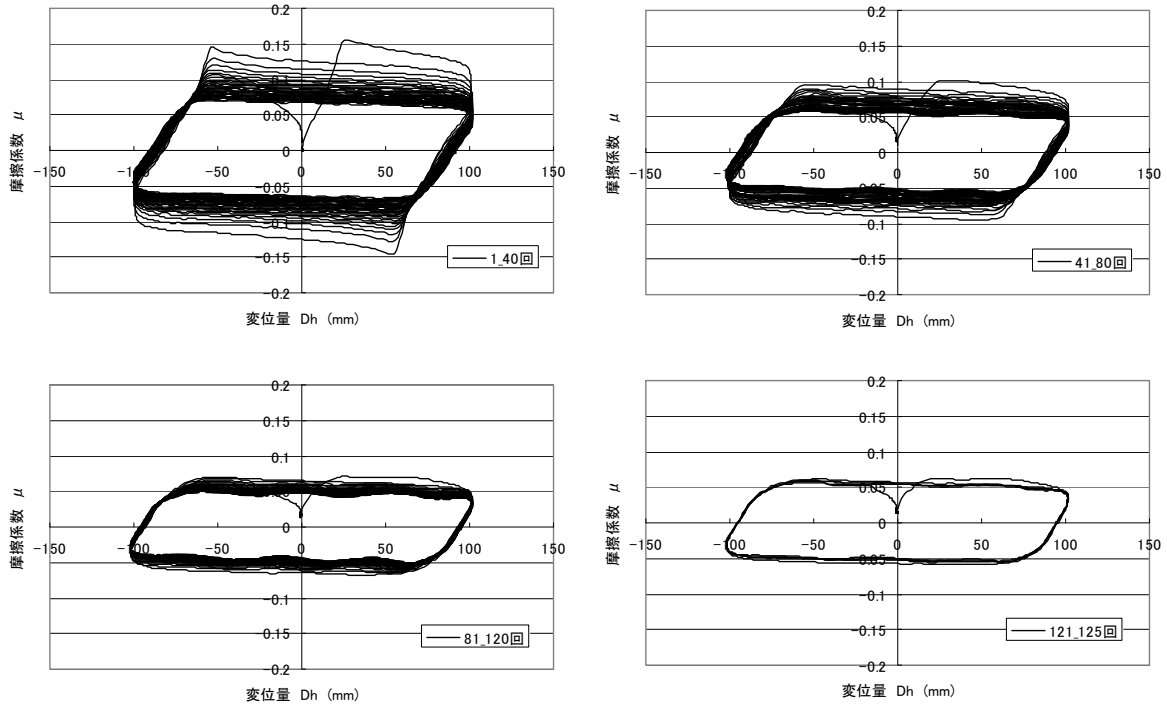
(2) 荷重－変位関係

各ケースの荷重－変位関係を、長周期限界試験について図 1.3.4-14～図 1.3.4-23 に、地震波加振について図 1.3.4-24～図 1.3.4-25 に、微小振幅試験について図 1.3.4-26 にそれぞれ示す。これらのうち長周期限界試験については荷重軸を軸力目標値で除した水平荷重（摩擦係数相当）で表示している。

摩擦係数－変位関係において、基本特性試験および繰り返しの初期段階では摩擦係数の低下傾向が大きいためにすべり部分で右下がりの勾配を示すが、繰り返しに伴い次第に弾塑性型の荷重変位関係を示すようになる。例えば 20N/mm^2、±100mm の限界試験（#2-1、図 1.3.4-17）で見ると、繰り返し 40 回で摩擦係数の変化は緩やかになり弾塑性型の荷重変位関係を示すようになる。変位振幅が大きいケース（#2-1、図 1.3.4-22）では 15～30 回程度で荷重変位関係が安定するようになり、一定の累積すべり量に達すると摩擦係数が安定する傾向が確認できる。

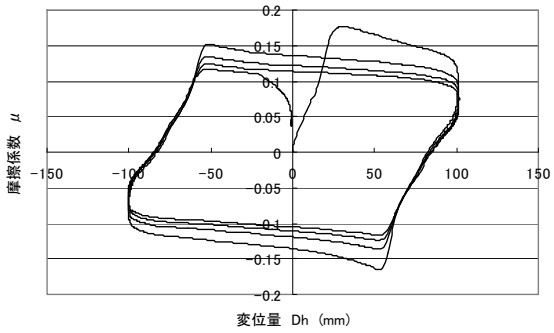


(a)基本特性

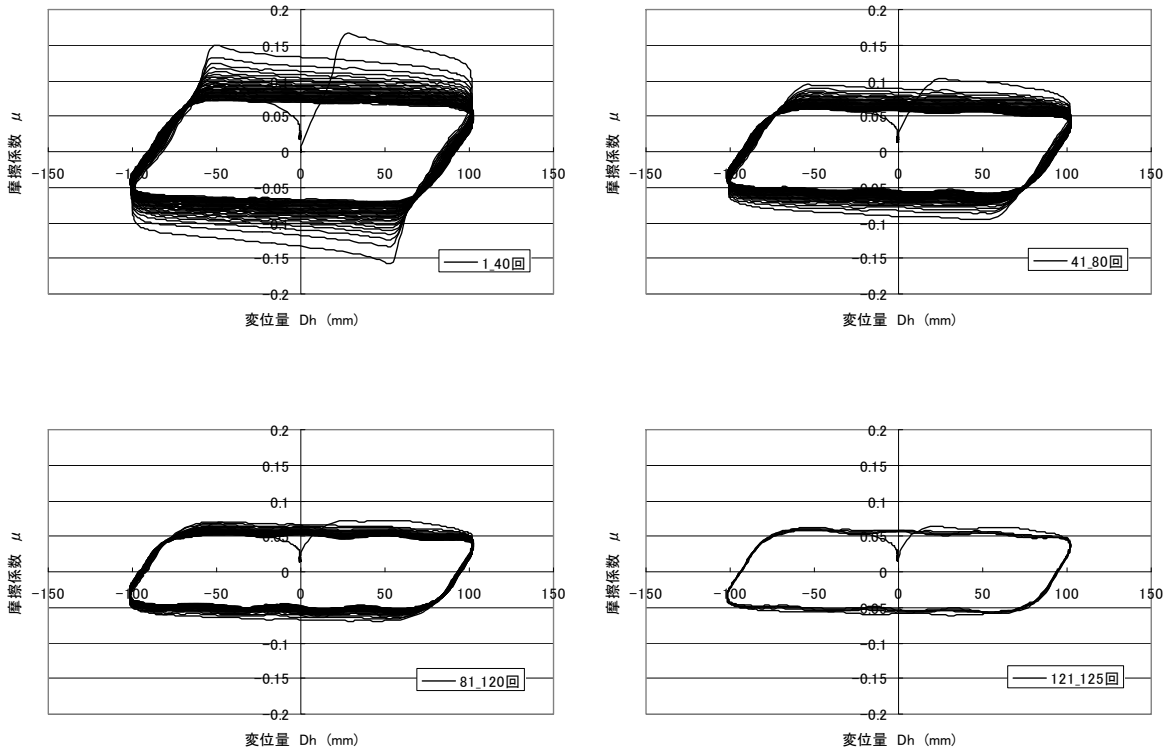


(b)長周期および(後)基本特性

図 1.3.4-14 荷重-変位関係　（(#1-1) 1A-1 長周期、20N/mm^2、±100mm、40 回×3 セット）

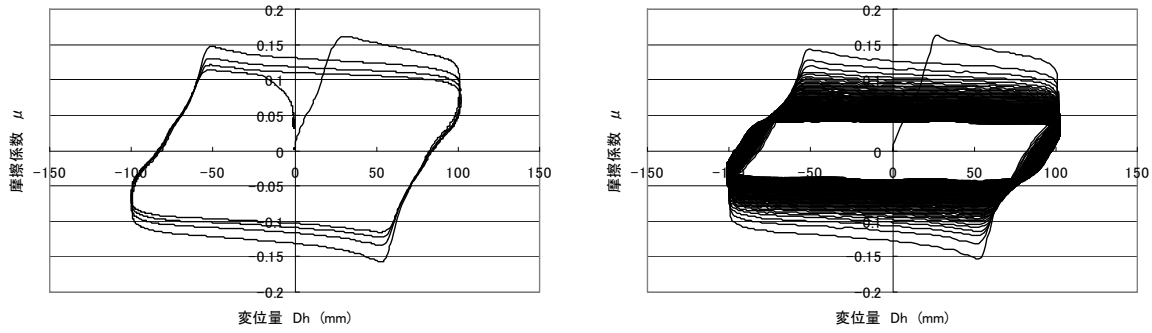


(a) 基本特性



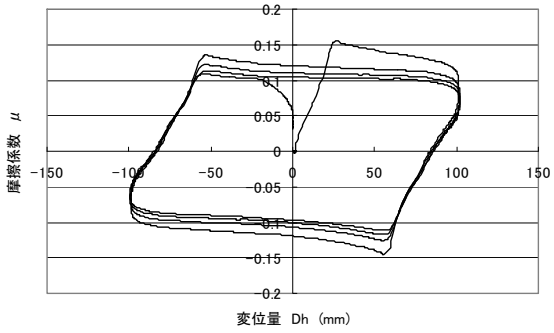
(b)長周期および(後)基本特性

図 1.3.4-15 荷重-変位関係　（(#1-2) 1A-2 長周期、20N/mm^2、±100mm、40 回×3 セット）

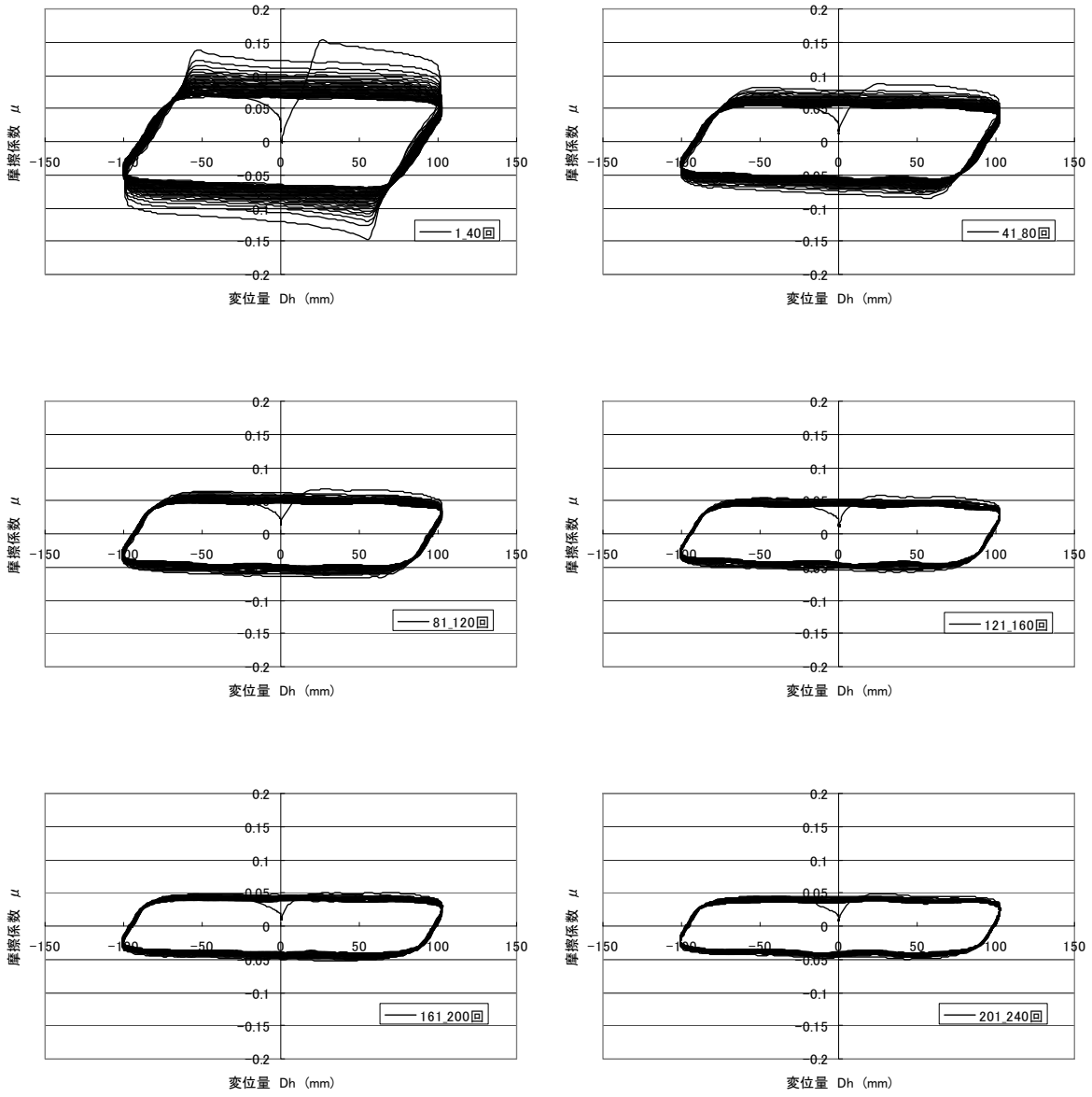


(a) 基本特性　　(b) 限界および(後)基本特性

図 1.3.4-16 荷重-変位関係　（(#1-3, #1-4) 1B 限界、20N/mm^2、±100mm、250 回【連続】）

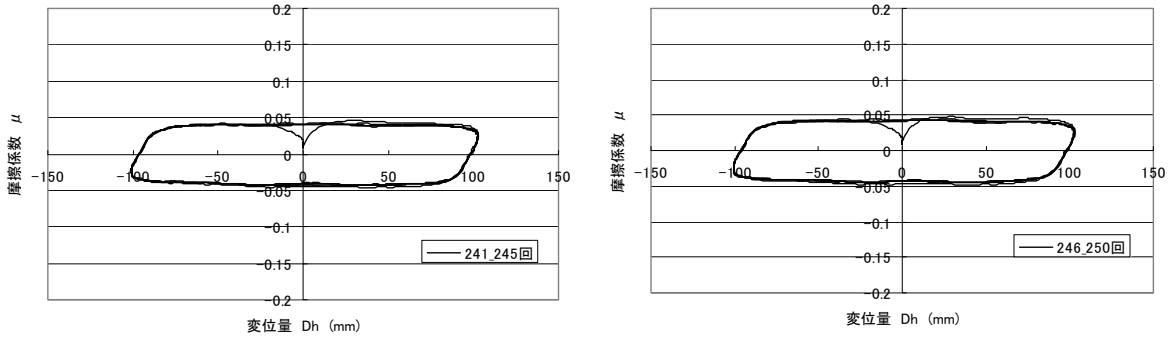


(a) 基本特性



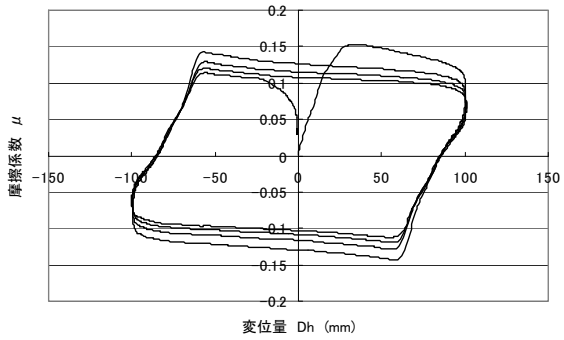
(b) 限界および(後)基本特性

図 1.3.4-17 (1) 荷重-変位関係　（(#2-1) 1B 限界、20N/mm^2、±100mm、40 回×6 セット）

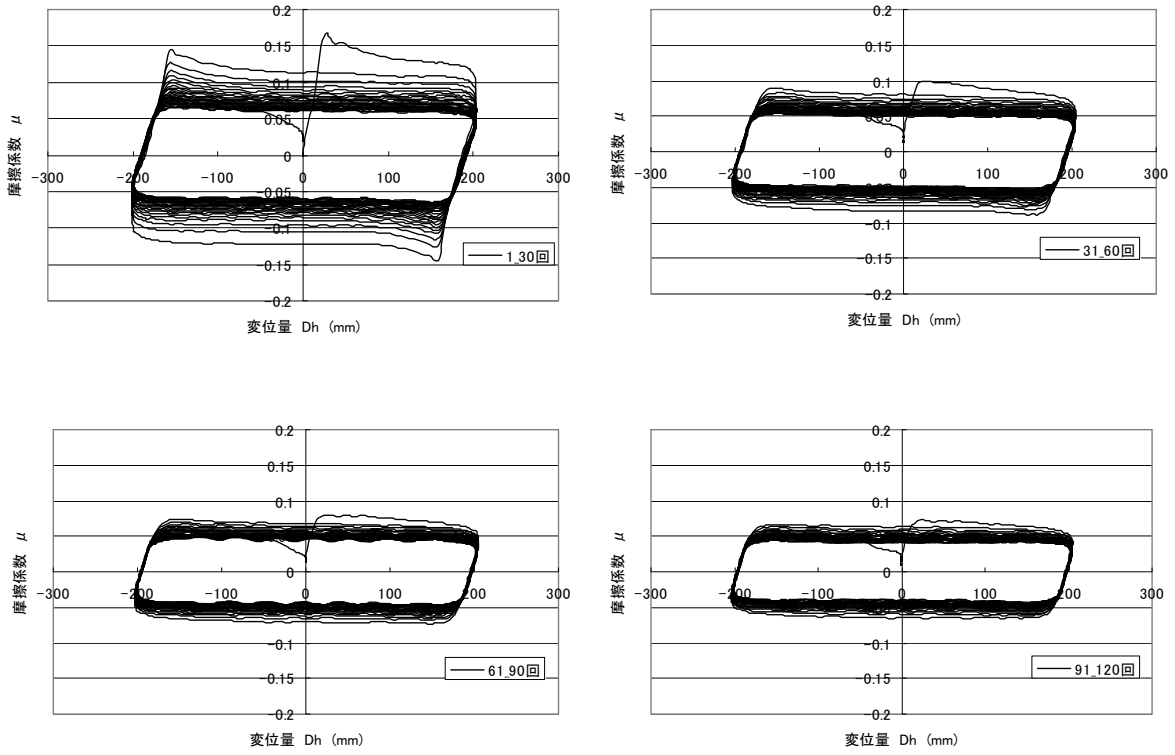


(c) (後)基本特性

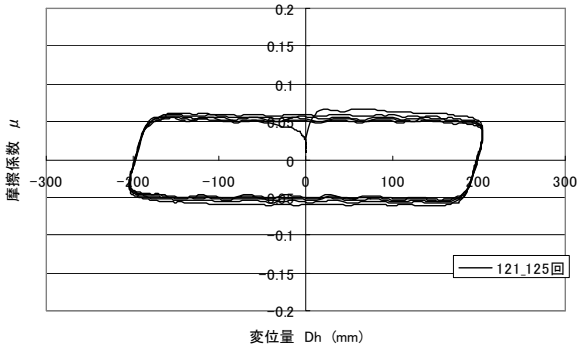
図 1.3.4-17 (2) 荷重-変位関係　（(#2-1) 1B 限界、20N/mm^2、±100mm、40 回×6 セット）



(a)基本特性

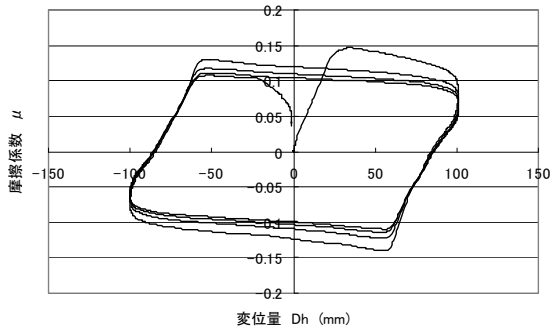


(b) 限界特性



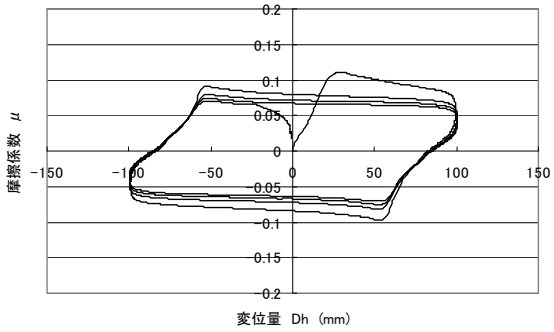
(c) (後)基本特性

図 1.3.4-18 荷重-変位関係　（(#3-1) 2B 限界、20N/mm^2、±200mm、30 回×4 セット）

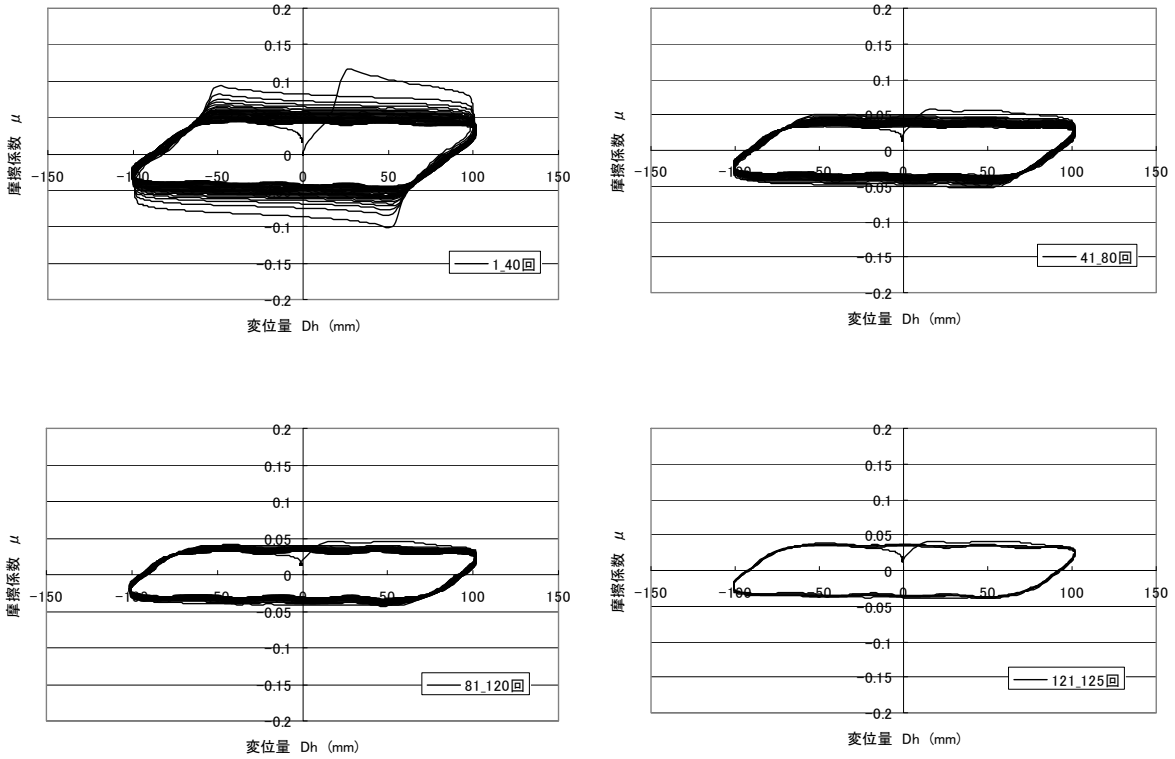


(a) 基本特性

図 1.3.4-19 荷重-変位関係　（(#3-3)、20N/mm^2、±100mm）

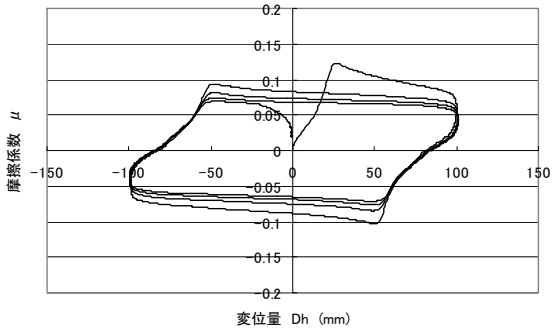


(a) 基本特性

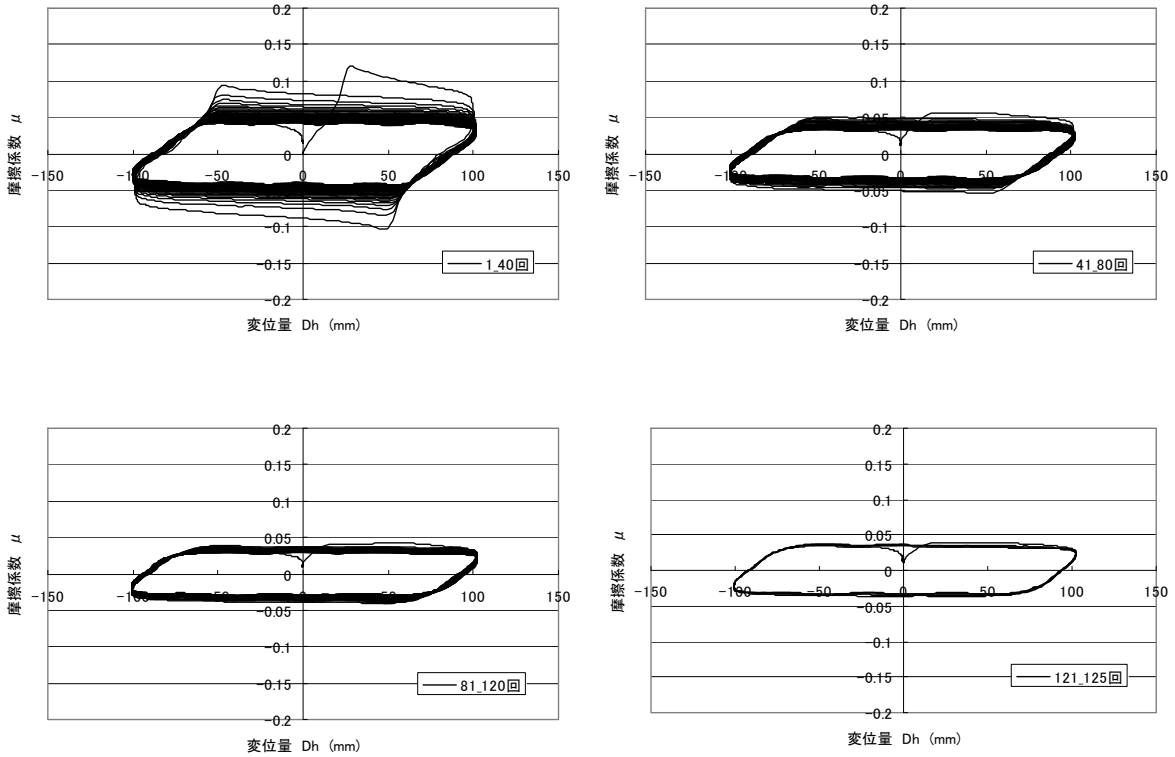


(b) 長周期および(後)基本特性

図 1.3.4-20 荷重-変位関係　（(#4-1) 1A-1 長周期、40N/mm^2、±100mm、40 回×3 セット）

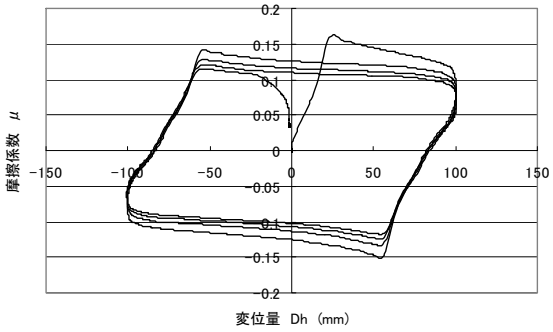


(a) 基本特性

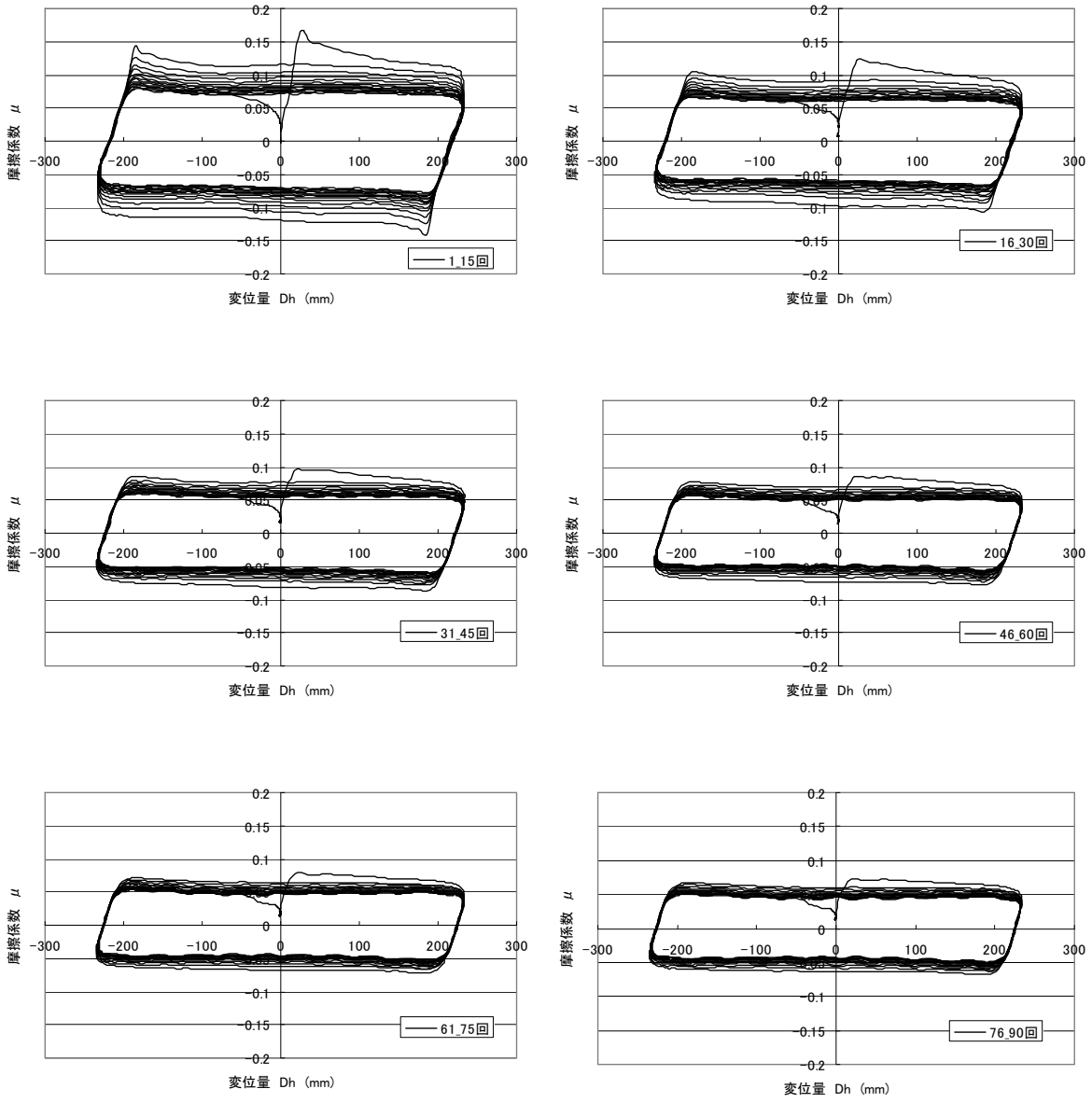


(b) 長周期および(後)基本特性

図 1.3.4-21 荷重-変位関係　（(#4-2) 1A-2 長周期、40N/mm^2、±100mm、40 回×3 セット）

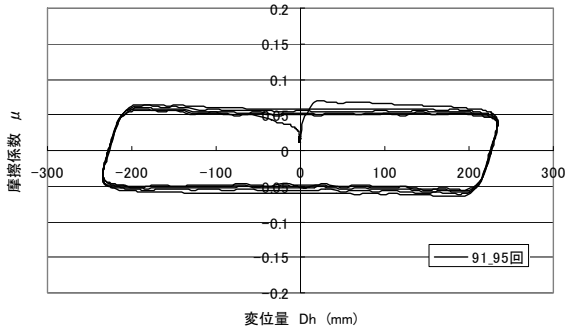


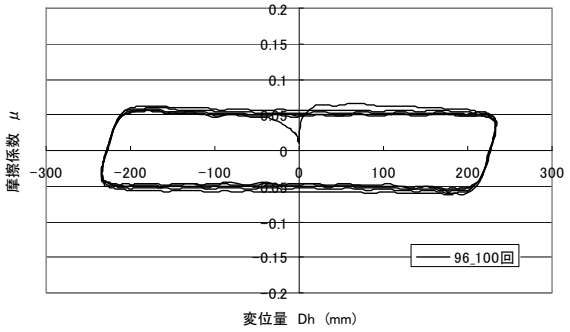
(a) 基本特性



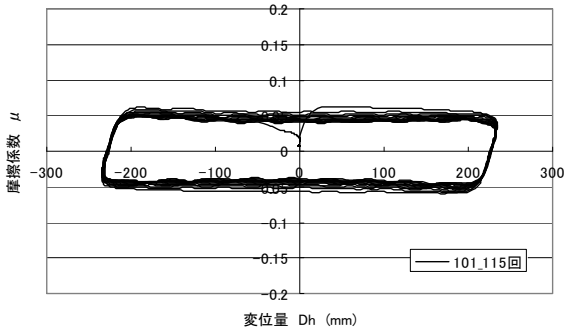
(b) 限界特性

図 1.3.4-22 (1) 荷重-変位関係　（(#5-1) 3B 限界、20N/mm^2、±230mm、15 回×6 セット）



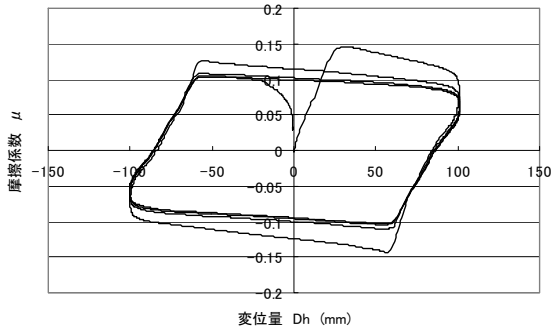


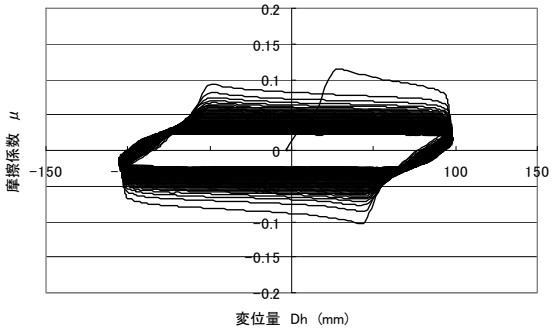
(c) 限界特性



(d) (後)基本特性

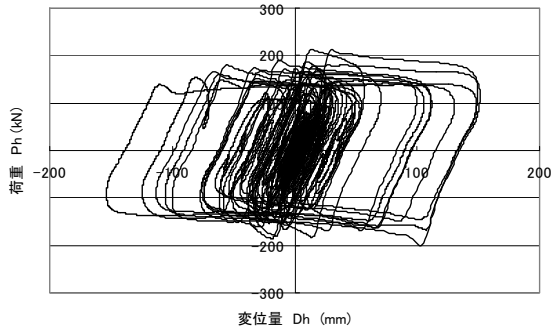
図 1.3.4-22 (2) 荷重-変位関係 （(#5-1) 3B 限界、20N/mm^2、±230mm、15 回×6 セット）

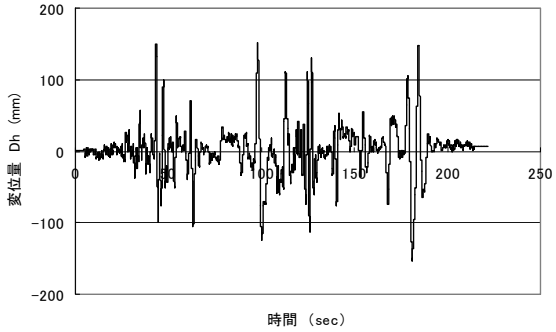




(a) 基本特性（20N/mm^2）　　(b) 限界および(後)基本特性

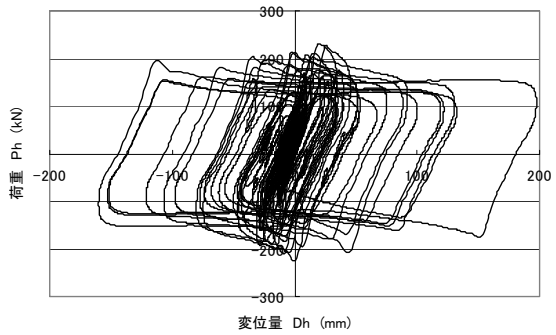
図 1.3.4-23 荷重-変位関係 （(#5-2, #5-3) 1B 限界、40N/mm^2、±100mm、250 回【連続】）

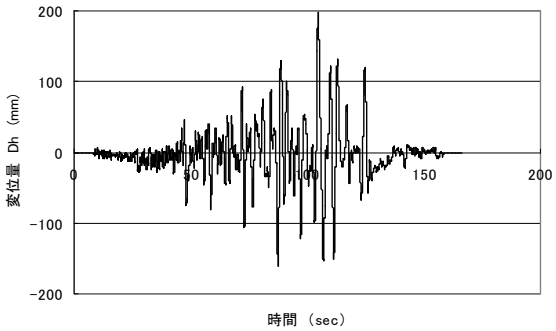




(a) 荷重-変位関係　　(b) 変位波形

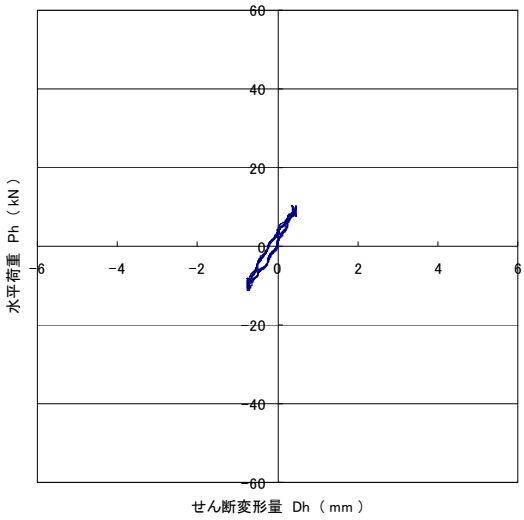
図 1.3.4-24 荷重-変位関係　（(#2-1) 地震応答波 oskh02_sd、20N/mm^2）



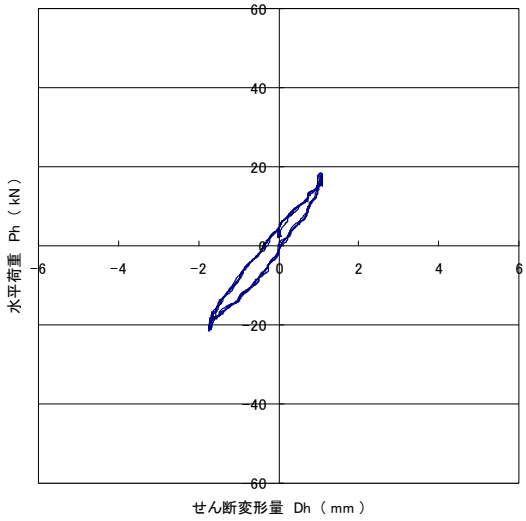


(a) 荷重-変位関係　　(b) 変位波形

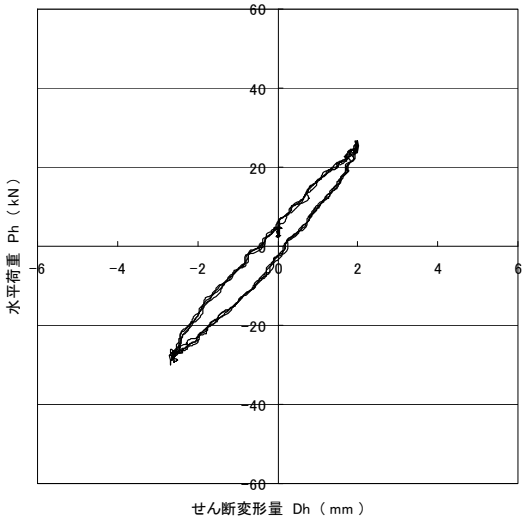
図 1.3.4-25 荷重-変位関係　（(#5-1) 地震応答波 aic003_av、20N/mm^2）



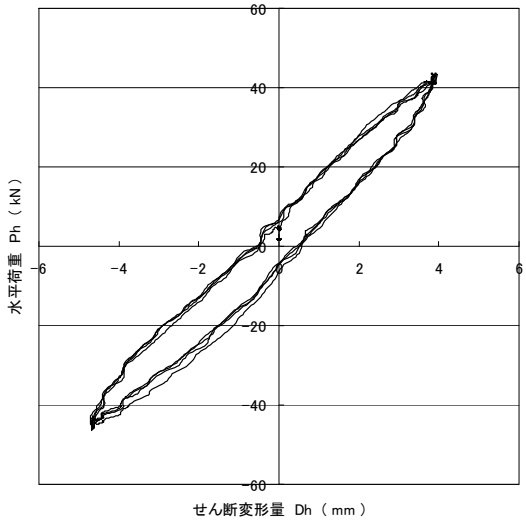
(a) 1mm



(b) 2mm



(c) 3mm



(d) 5mm

図 1.3.4-26 荷重-変位関係 （(#4-1) 微小振幅、20N/mm^2）

(3) 摩擦係数

1) 基本特性試験

基本特性試験の摩擦係数の結果を表 1.3.4-6 に示す。基本特性試験の摩擦係数μ_0は 3 サイクル目を評価した。摩擦係数の最大ばらつきは設計値 0.100 に比べて 13%程度となっている。

表 1.3.4-6 より、基準面圧 20N/mm^2（#1－1、#1－2）での摩擦係数μ_3は 0.106、0.113、大面圧 40N/mm^2（#4－1、#4－2）での摩擦係数μ_3は 0.068、0.069 であり、大面圧による摩擦係数の低下率は 0.64、0.61 であった。

表 1.3.4-6 摩擦係数結果（基本特性試験）

試験体 No.	試験 No.	基本特性試験の摩擦係数μ_0
#1	#1－1	0.106
	#1－2	0.113
	#1－3	0.110
#2	#2－1	0.103
#3	#3－1	0.109
	#3－3	0.103
#4	#4－1	0.068
	#4－2	0.069
#5	#5－1	0.109
	#5－2	0.096

2) 長周期試験および限界試験

長周期、限界試験の摩擦係数の結果を表 1.3.4-7 に、摩擦係数の繰り返しに伴う変化を図 1.3.4-27 に示す。3 サイクル目の摩擦係数μ_3、最終サイクルの摩擦係数をμ_eとした。摩擦係数の変化率はμ_3を基準とした。

これらの結果より、以下の傾向を確認した。

a) 繰り返しの影響

回数を繰返すことで摩擦係数は減少する。摩擦係数の変化率は#1－1(120 ｻｲｸﾙ)で－59%、#1－4(250 ｻｲｸﾙ連続)で－67%であった。繰り返しに伴う摩擦係数の減少はインターバル時間中には一旦留まり、摩擦係数が復帰する（大きくなる）傾向にある。

b) 面圧の影響

表 1.3.4-7 より、面圧 20N/mm^2（#1－1、#1－2）での摩擦係数μ_3は 0.106、0.111 であり、面圧 40N/mm^2（#4－1、#4－2）での摩擦係数μ_3は両ケースとも 0.069 となり、基本特性試験と同等であった。両方の面圧で摩擦係数の変化を比較すると、面圧が増えると面圧依存性により初期の摩擦係数は小さくなるが、初期状態からの摩擦係数の変化率は、いずれの面圧とも繰り返し 120 回の場合で－59%～－57%であり、両面圧で減少の程度はほぼ同様と言える。

c) PTFE 軟化の影響

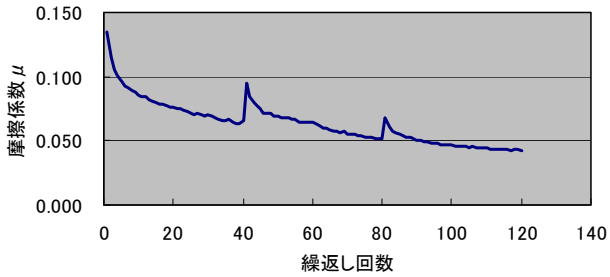
面圧 40N/mm^2 で連続加振を行った限界試験のケース（#5-3）については、125 サイクルめ頃か

ら温度上昇により PTFE が軟化し始め､載荷の継続により支承周辺部に PTFE の流動化(はみ出し)が確認されたので、目標の 250 サイクルに至る前の 179 サイクルめで載荷を中止した。

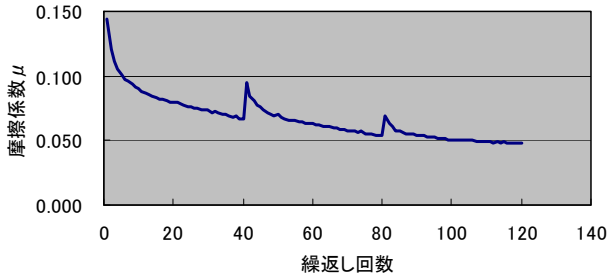
こうした軟化傾向は、限界（基準面圧）の#2-1、長周期（大面圧）の#4-2 でも見られたが、載荷の停止を判断するほどの流動は見られなかった。#5-3 では限界試験と大面圧の両条件により流動化が進行したものと見られる。(4)で後述するように、#5-3 実施後の支承高さは 0.2mm 程度小さくなっているが、鉛直支持性能に大きな変化は見られなかった。

表 1.3.4-7　摩擦係数結果（長周期試験および限界試験）

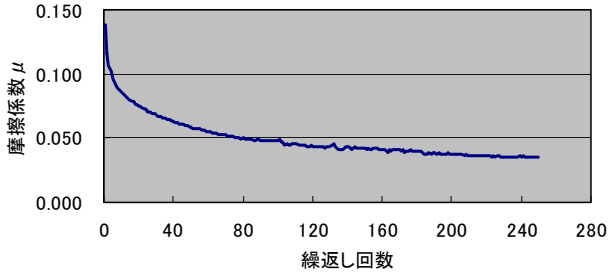
試験体 No.	試験 No.	試験 条件	3 ｻｲｸﾙ目の 摩擦係数 μ_3	最終ｻｲｸﾙの 摩擦係数 μ_e	変化率 (%)	最終 ｻｲｸﾙ	備考
#1	#1－1	長周期	0.106	0.043	−59	120	―
	#1－2		0.111	0.048	−57	120	
	#1－4	限界【連続】	0.107	0.035	−67	250	
#2	#2－1	限界	0.103	0.037	−64	240	―
#3	#3－1	限界	0.095	0.041	−57	120	大変位(200mm)
#4	#4－1	長周期	0.069	0.029	−58	120	大面圧(40N/mm^2)
	#4－2		0.069	0.028	−59	120	
#5	#5－1	限界	0.100	0.044	−56	90	大変位(230mm)
	#5－3	限界【連続】	0.068	0.026	−62	179	大面圧(40N/mm^2)



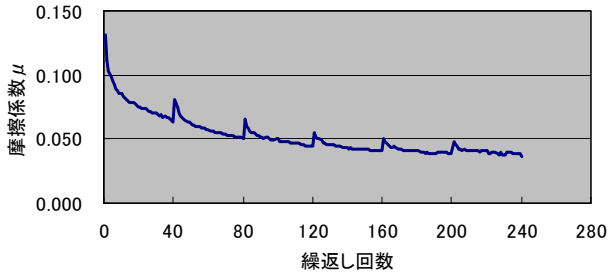
(a) #1-1　（40 回×3 セット）



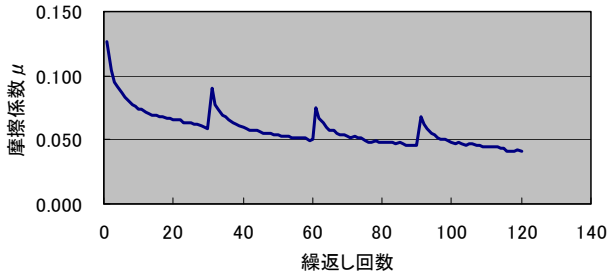
(b) #1-2　（40 回×3 セット）



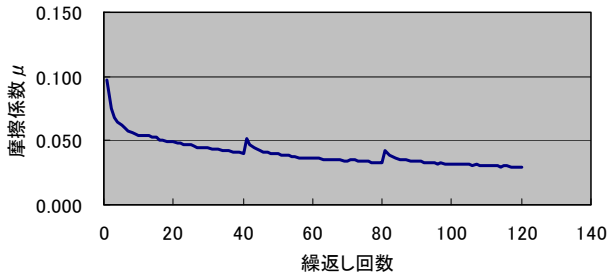
(c) #1-4　（250 回【連続】）



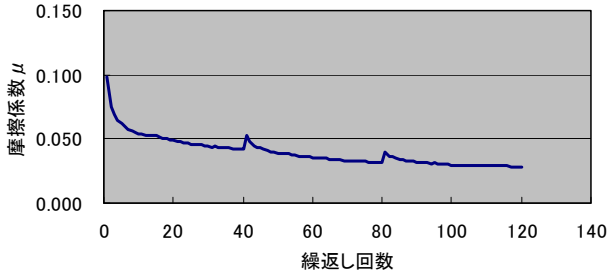
(d) #2-1　（40 回×6 セット）



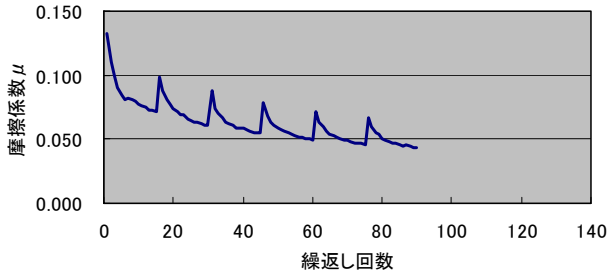
(e) #3-1　（30 回×4 セット）



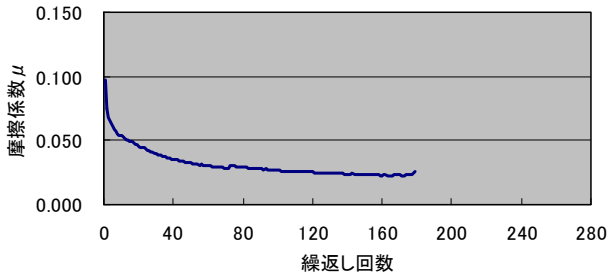
(f) #4-1　（40 回×3 セット）



(g) #4-2　（40 回×3 セット）



(h) #5-1　（15 回×6 セット）



(i) #5-3　（目標 250 回【連続】→179 回で停止）

図 1.3.4-27 摩擦係数の変化

(4) 温度特性

1) 最大温度

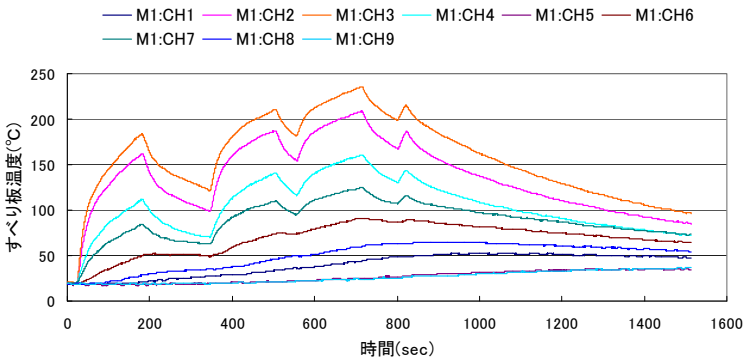
各測定点における最大温度を表 1.3.4-8 に、試験体温度の時間変化を図 1.3.4-28～図 1.3.4-38 に示す。

表 1.3.4-8 より、インターバルあり、基準面圧(20N/mm^2)、振幅±100mm のすべり板温度は、長周期（#1－1、#1－2）で 236～238℃、限界（#2－1）で 258℃まで上昇した。限界（#3－1)、限界（#5－1）のすべり板はそれぞれ 286℃、265℃まで上昇したが、両ケースが他に比べて温度が高いのはすべり速度が大きく、時間当たりの発熱量が異なるためと考えられる。また、インターバルなし、振幅±100mm の連続条件では、基準面圧、大面圧(40N/mm^2)の限界（#1－4、#5－3）が 255～270℃まで上昇した。本実験の試験体に用いている PTFE 材料の材料特性表によれば、使用温度範囲は－240℃～260℃とされている。同材料の融点は 320℃以上とさらに高いものの、材料の分解が始まる 260℃を高温側の使用限界と定めている。本実験では PTFE 材料の温度を直接測定していないが、PTFE と常時接触しているすべり板中央部の温度は限界（#1－4、#3－1、#5－2）および大面圧（#4－1、#4－2）のケースで 260℃に達しており、実験で確認された軟化現象を説明するものとなっている。一方、地震応答波入力では、すべり板温度 100℃前後まで上昇するがゴム表面は常温に近い状態であった。

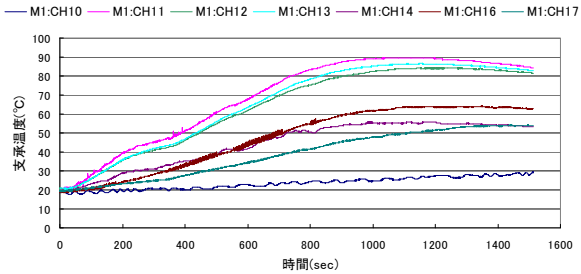
加力治具の温度はすべてのケースにおいて 17～22℃で推移しており、断熱板により熱の伝達が遮断されていたことが確認できる。

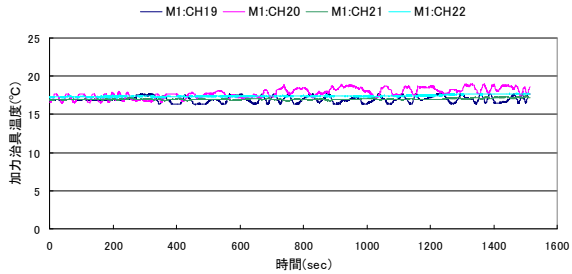
表 1.3.4-8 温度計測結果（最大温度、単位℃）

試験体 No.	試験 No.	すべり板（中央部）	PTFE 裏	ゴム表面	加力治具
#1	#1－1	236	90	64	19
	#1－2	238	89	63	17
	#1－4	270	118	74	18
#2	地震波（oskh02_sd)	97	33	24	20
	#2－1	258	135	77	20
#3	#3－1	286	126	84	20
#4	#4－1	260	105	65	19
	#4－2	262	102	62	19
#5	地震波（aic003_av)	114	29	21	17
	#5－1	265	127	80	19
	#5－3	255	114	72	22



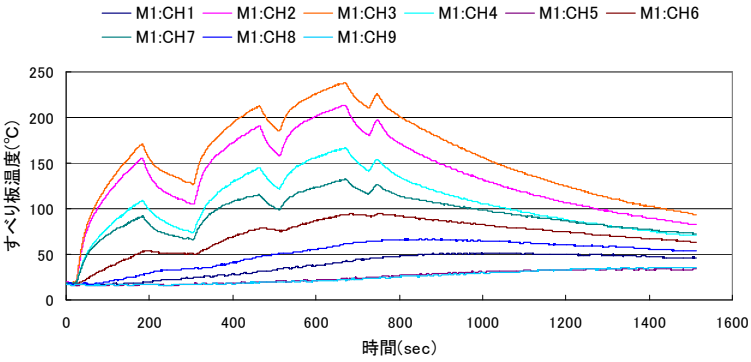
(a) すべり板



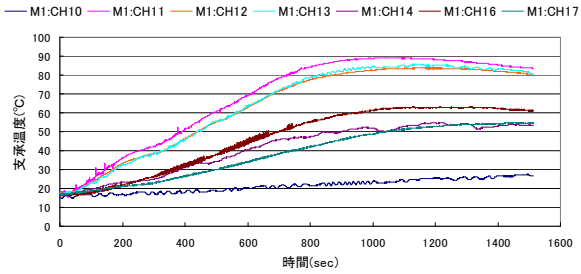


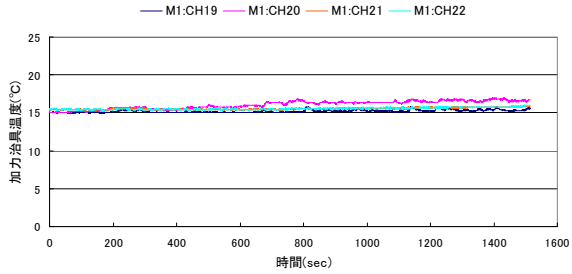
(b) 支承　　(c) ゴム表面

図 1.3.4-28 試験体の温度変化（(#1-1) 1A-1 長周期、20N/mm^2、±100mm、40 回×3 セット）



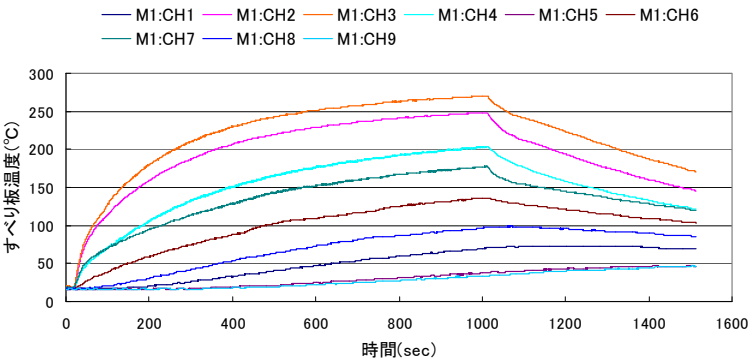
(a) すべり板



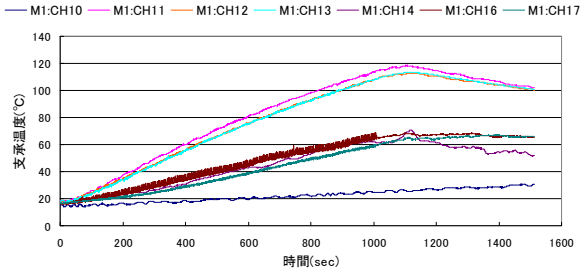


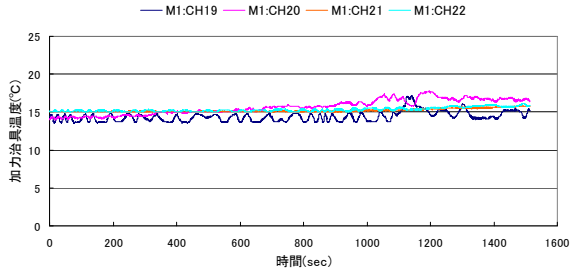
(b) 支承　　(c) ゴム表面

図 1.3.4-29 試験体の温度変化（(#1-2) 1A-2 長周期、20N/mm^2、±100mm、40 回×3 セット）



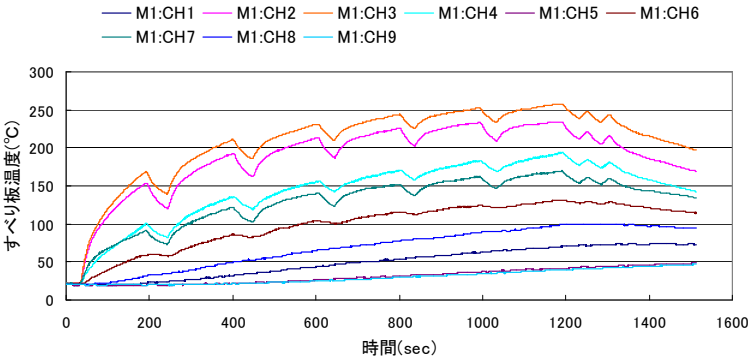
(a) すべり板



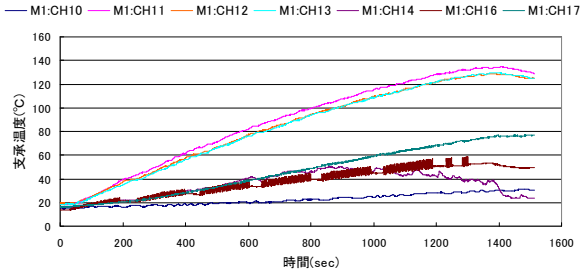


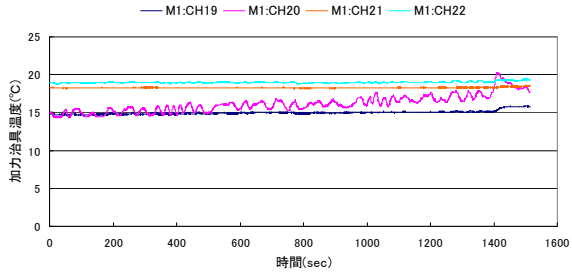
(b) 支承　　(c) ゴム表面

図 1.3.4-30 試験体の温度変化（(#1-4) 1B 限界、20N/mm^2、±100mm、250 回【連続】）



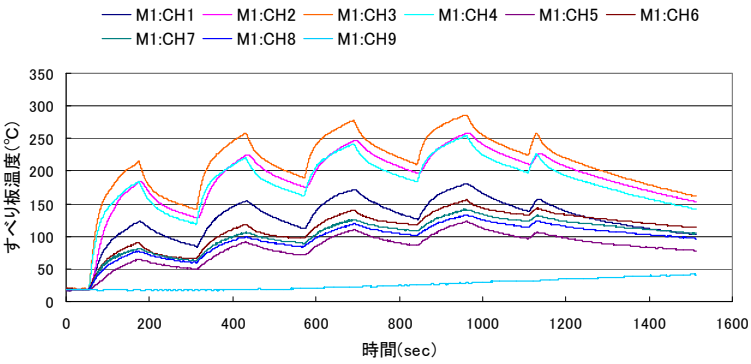
(a) すべり板



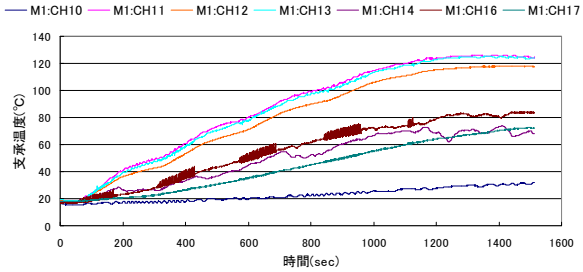


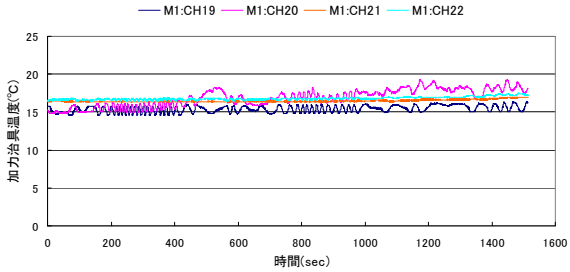
(b) 支承　　(c) ゴム表面

図 1.3.4-31 試験体の温度変化（(#2-1) 1B 限界、20N/mm^2、±100mm、40 回×6 セット）



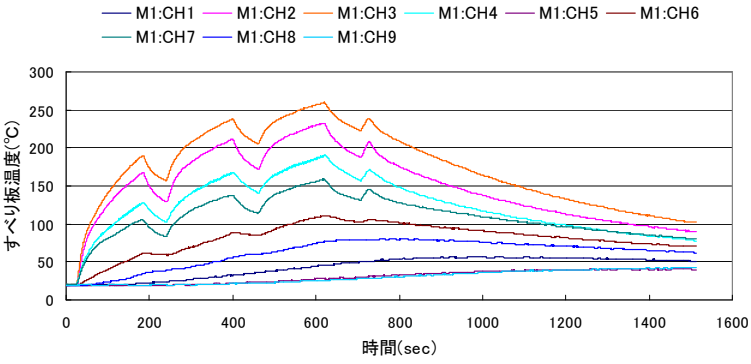
(a) すべり板



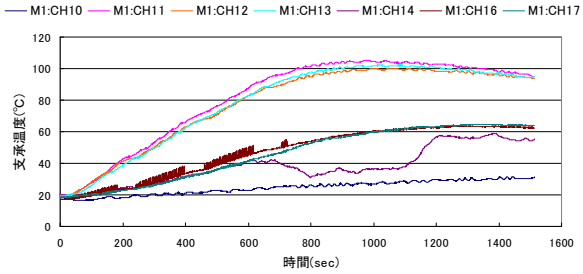


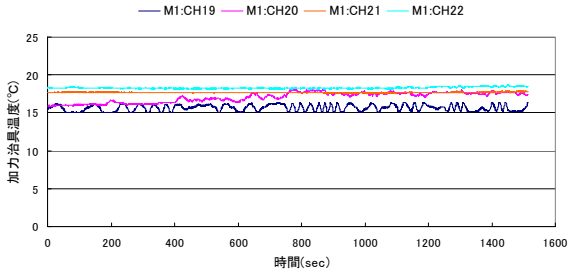
(b) 支承　　(c) ゴム表面

図 1.3.4-32 試験体の温度変化（(#3-1) 2B 限界、20N/mm^2、±200mm、30 回×4 セット）



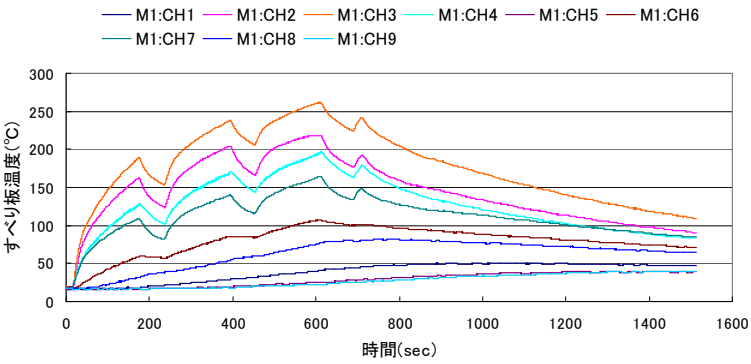
(a) すべり板



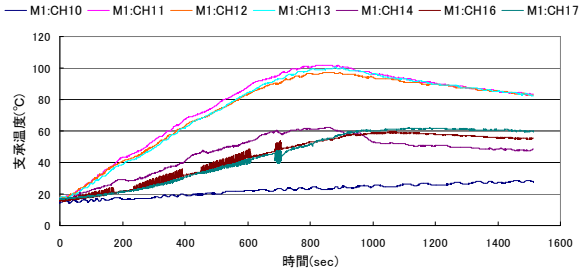


(b) 支承　　(c) ゴム表面

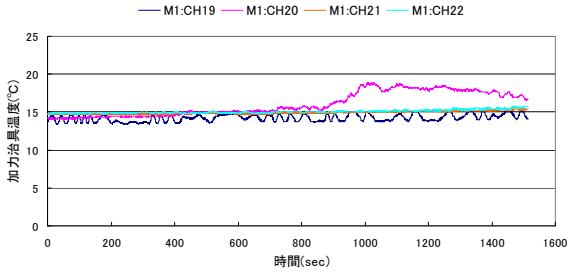
図 1.3.4-33 試験体の温度変化（(#4-1) 1A-1 長周期、40N/mm^2、±100mm、40 回×3 セット）



(a) すべり板

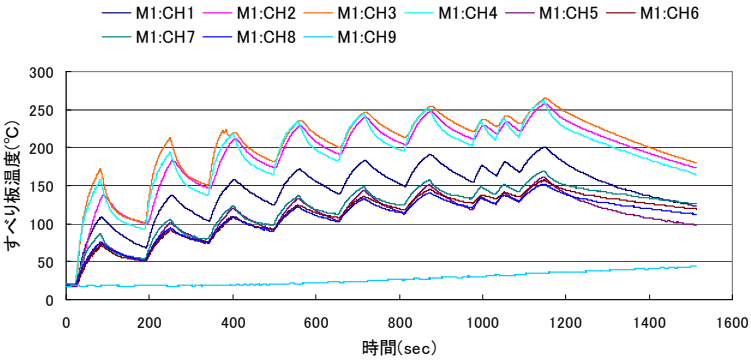


(b) 支承

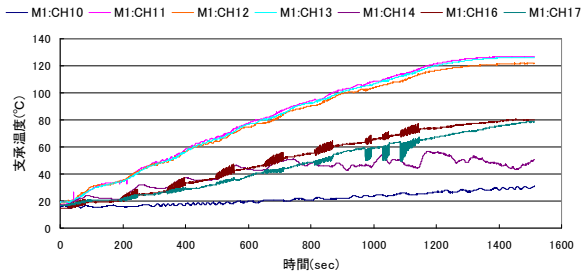


(c) ゴム表面

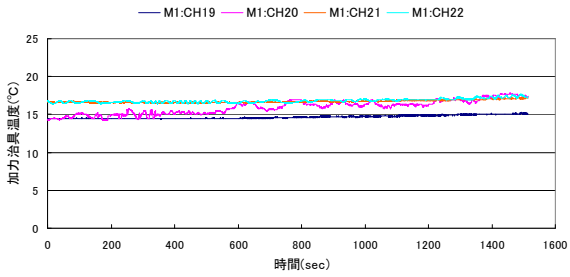
図 1.3.4-34 試験体の温度変化（(#4-2) 1A-2 長周期、40N/mm^2、±100mm、40 回×3 セット）



(a) すべり板

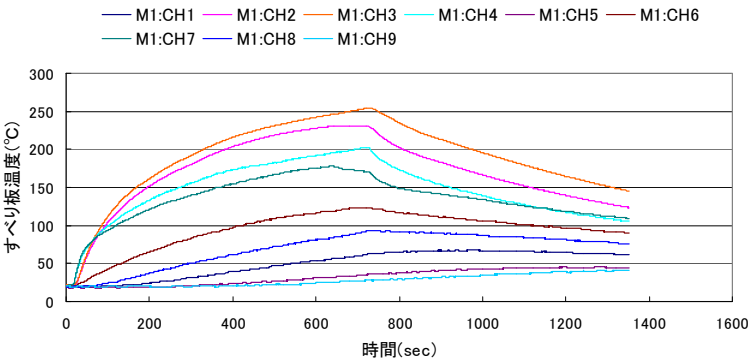


(b) 支承

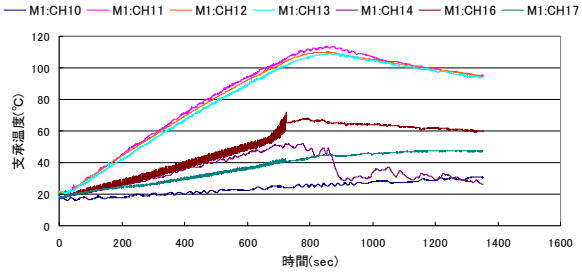


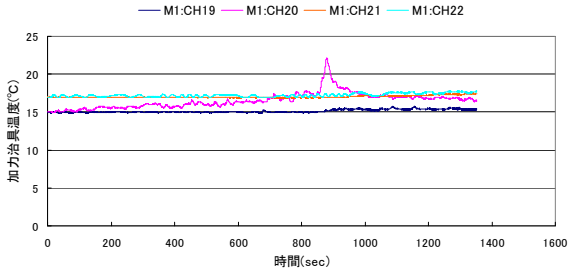
(c) ゴム表面

図 1.3.4-35 試験体の温度変化（(#5-1) 3B 限界、20N/mm^2、±230mm、15 回×6 セット）



(a) すべり板

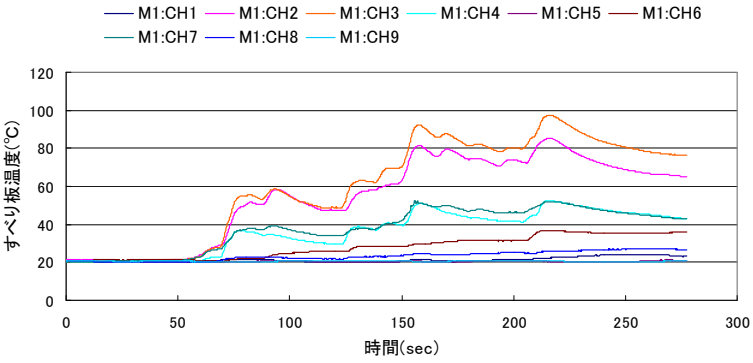




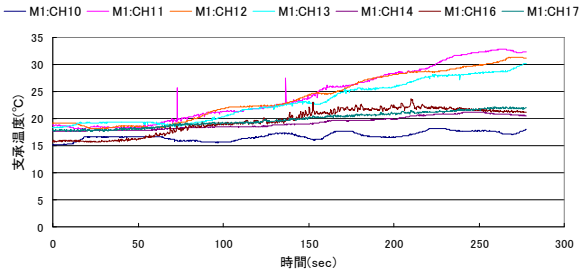
(b) 支承　　(c) ゴム表面

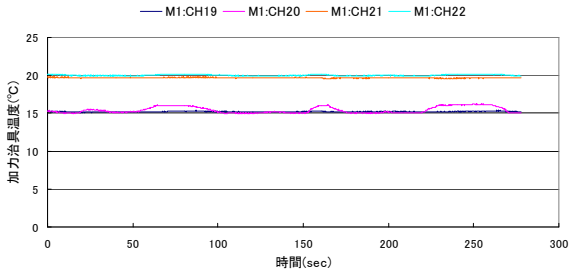
図 1.3.4-36 試験体の温度変化

（(#5-3) 1B 限界、40N/mm^2、±100mm、目標 250 回→179 で停止【連続】）



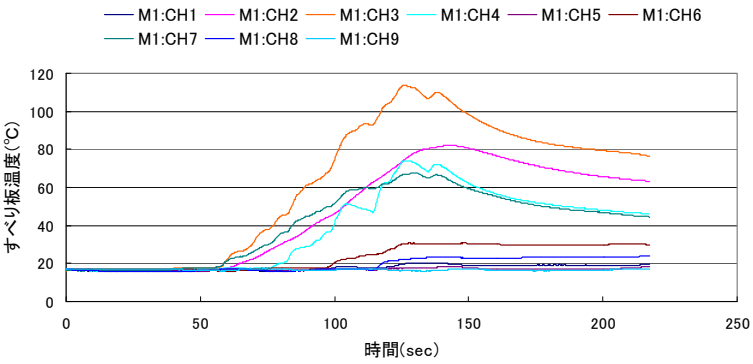
(a) すべり板



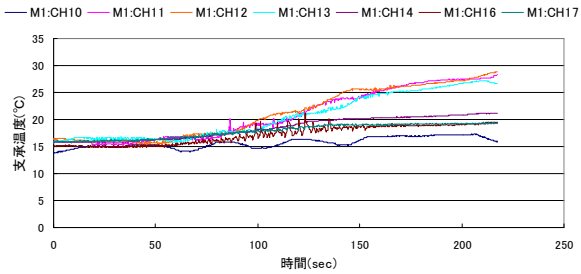


(b) 支承　　(c) ゴム表面

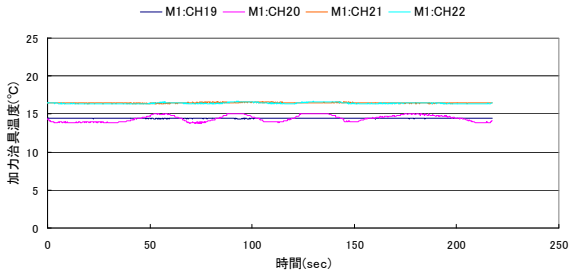
図 1.3.4-37 試験体の温度変化（(#2-1) 地震応答波 oskh02_sd、20N/mm^2）



(a) すべり板



(b) 支承



(c) ゴム表面

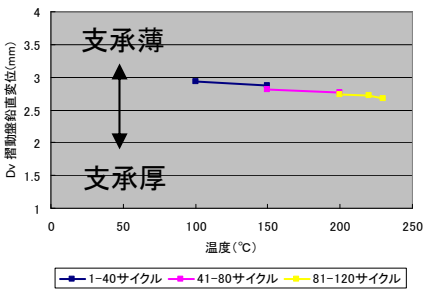
図 1.3.4-38 試験体の温度変化（(#5-1) 地震応答波 aic003_av、20N/mm^2）

2) 摺動盤の鉛直変位とすべり板温度の関係

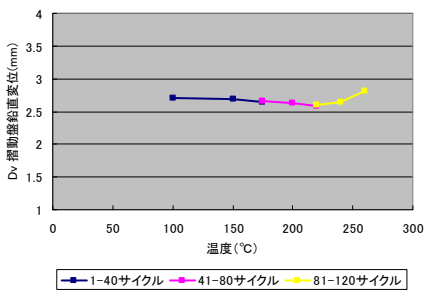
すべり板温度と摺動盤の鉛直変位の関係を図 1.3.4-39 に示す。摺動盤の鉛直変位は支承高さを表す。方向はプラスを圧縮（支承が薄くなる）、マイナスを引張（支承が厚くなる）とした。

#1－1 では、すべり板温度が上昇するとともに摺動盤の鉛直変位が 0.3mm 減少、即ち支承厚が 0.3mm 増加していることが分かった。すべり板の熱が試験体に伝達して、バック鋼板の温度が上昇し、鋼板が熱膨張した影響であると考えられる。

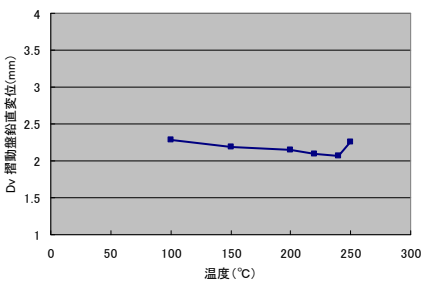
#4－2 では 240℃付近から摺動盤の鉛直変位が 0.2mm 上昇、即ち支承厚が 0.2mm 減少している。これは PTFE が溶け始め、試験体高さが薄くなったためと考えられる。#5－3 についても同様のことが考えられる。



#1－1（面圧：20N/mm^2）



#4－2（面圧：40N/mm^2）



#5－3（面圧：40N/mm^2）

図 1.3.4-39 すべり板温度と摺動盤の鉛直変位の関係（その 2）

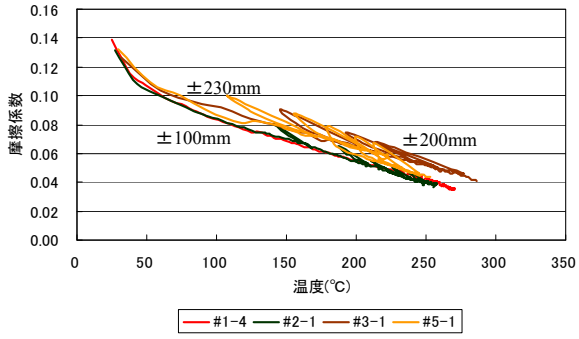
(5) 摩擦係数と諸量との関係

1) 摩擦係数－すべり板温度関係

すべり板中心温度と摩擦係数の関係を図 1.3.4-40 に示す。

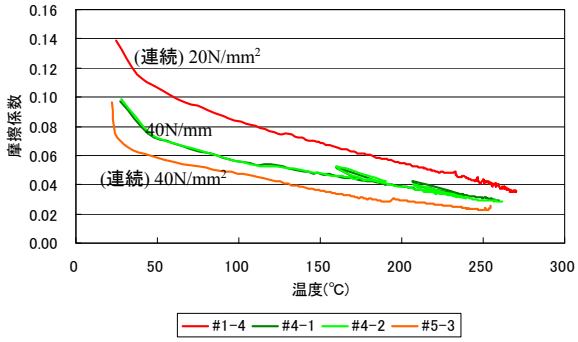
同図(a)によれば、繰り返しによる温度上昇に伴い摩擦係数が低下する傾向が確認できる。初期温度から 50℃程度まで上昇する過程では、摩擦係数は急激に低下するが、その後は繰り返しに伴って摩擦係数は直線的に低下するようになる。特に連続加振のケースでは摩擦係数はすべり板温度の上昇に伴って単調に減少する。インターバルがあるケースは、載荷の休止時間中に温度が低下し摩擦係数も上昇する傾向にあり連続加振の曲線よりも上方で軌跡を描きながら推移するが、次のセットの加振を再開すると次第に連続加振の曲線上に載るようになる。インターバルの影響を無視すれば、載荷振幅による摩擦係数への影響は少ないものと考えられる。

同図(b)に示す大面圧のケースにおいても、摩擦係数が繰り返しに伴い直線的に低下する傾向が同様に確認できる。



面圧	試験No.	ケース	試験条件	備考
20N/mm^2	#1-4	1A	限界	連続
	#2-1	1B	限界	±100mm
	#3-1	2B	限界	±200mm
	#5-1	3B	限界	±230mm

(a) 載荷振幅比較



面圧	試験No.	ケース	試験条件	備考
20N/mm^2	#1-4	1A	限界	連続
40N/mm^2	#4-1	1A-1	長周期	
	#4-2	1A-2	長周期	
	#5-3	1A	限界	連続

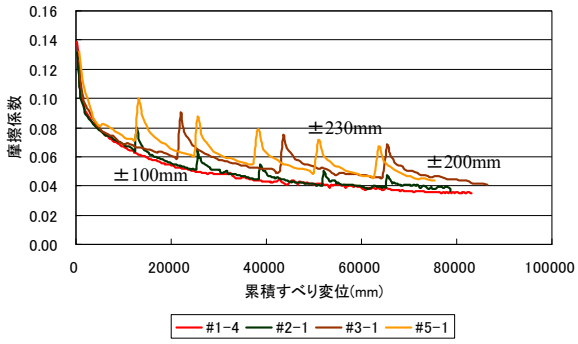
(b) 面圧、インターバルの影響

図 1.3.4-40 摩擦係数－すべり板温度関係

2) 摩擦係数－累積すべり変位関係

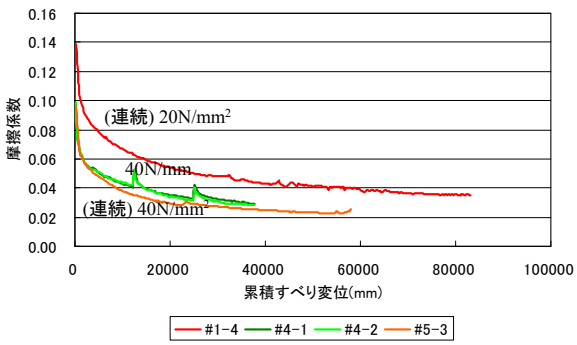
累積すべり変位（支承の累積変形から弾性変形分を除いた分）と摩擦係数の関係を図 1.3.4-41 に示す。

同図(a)より、累積すべり変位の増加に伴って摩擦係数が低下する傾向が確認できる。その変化傾向は累積すべりが大きくなるほど緩やかになる。また、同じ累積すべり量で比較すると、振幅が小さいほど摩擦係数の低下が強く出る傾向が見られる。その理由として、振幅が小さい場合に考えられることとして、すべり板上で摺動部面積が小さくなるため支承部に熱が溜まり易いこと、載荷時間に対してインターバル時間が相対的に短かったために放熱しにくい状況にあったことなどが考えられる。



面圧	試験No.	ケース	試験条件	備考
20N/mm^2	#1-4	1A	限界	連続
	#2-1	1B	限界	±100mm
	#3-1	2B	限界	±200mm
	#5-1	3B	限界	±230mm

(a) 載荷振幅比較



面圧	試験No.	ケース	試験条件	備考
20N/mm^2	#1-4	1A	限界	連続
40N/mm^2	#4-1	1A-1	長周期	
	#4-2	1A-2	長周期	
	#5-3	1A	限界	連続

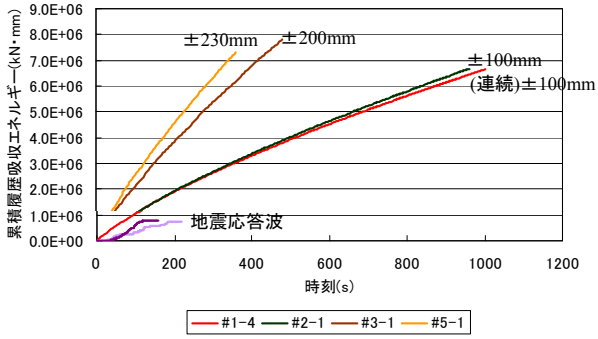
(b) 面圧、インターバルの影響

図 1.3.4-41 摩擦係数－累積すべり変位関係

3) 累積吸収エネルギー

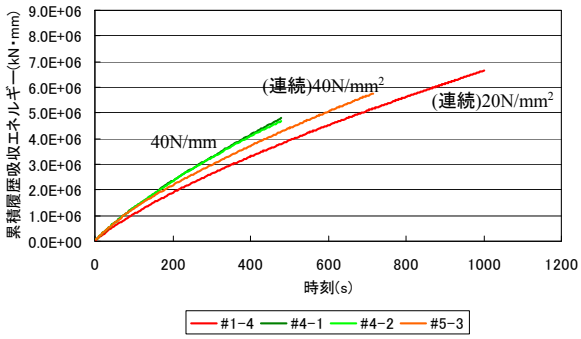
累積吸収エネルギーの時間変化を図 1.3.4-42 に示す（時刻データはインターバル時間を除いた載荷時間で表している）。図中には、参考に地震応答波加振のデータも記載している。

摩擦係数と累積吸収エネルギーの関係を図 1.3.4-43 に示す。累積吸収エネルギーは累積すべり変位の増加に伴いほぼ直線的に変化する（図 1.3.4-44）ので、摩擦係数－累積すべり変位関係（図 1.3.4-41）と同様の傾向を示している。



面圧	試験No.	ケース	試験条件	備考
20N/mm^2	#1-4	1A	限界	連続
	#2-1	1B	限界	±100mm
	#3-1	2B	限界	±200mm
	#5-1	3B	限界	±230mm

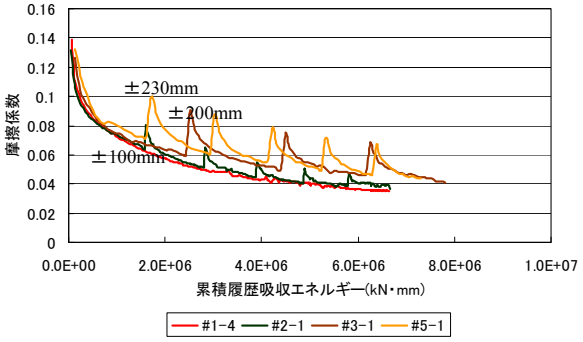
(a) 載荷振幅比較



面圧	試験No.	ケース	試験条件	備考
20N/mm^2	#1-4	1A	限界	連続
40N/mm^2	#4-1	1A-1	長周期	
	#4-2	1A-2	長周期	
	#5-3	1A	限界	連続

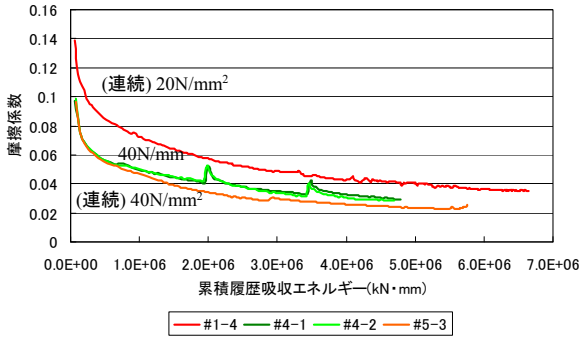
(b) 面圧、インターバルの影響

図 1.3.4-42 累積吸収エネルギーと載荷時間の関係



面圧	試験No.	ケース	試験条件	備考
20N/mm^2	#1-4	1A	限界	連続
	#2-1	1B	限界	±100mm
	#3-1	2B	限界	±200mm
	#5-1	3B	限界	±230mm

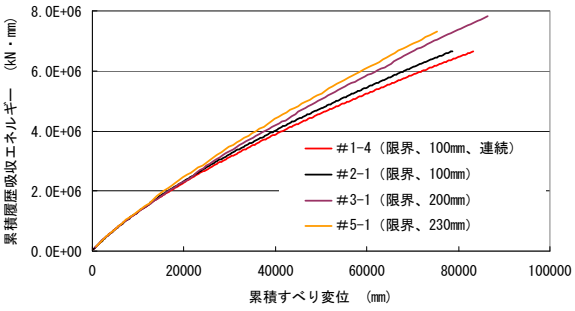
(a) 載荷振幅比較



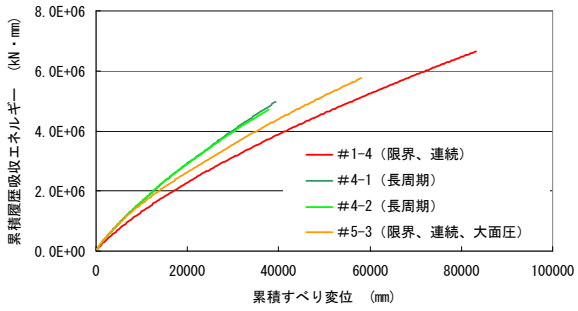
面圧	試験No.	ケース	試験条件	備考
20N/mm^2	#1-4	1A	限界	連続
40N/mm^2	#4-1	1A-1	長周期	
	#4-2	1A-2	長周期	
	#5-3	1A	限界	連続

(b) 面圧、インターバルの影響

図 1.3.4-43 摩擦係数－累積吸収エネルギー関係



(a) 載荷振幅比較



(b) 面圧、インターバルの影響

図 1.3.4-44 累積吸収エネルギー－累積すべり変位関係

(6) その他の特性

1) 試験体の外観変化

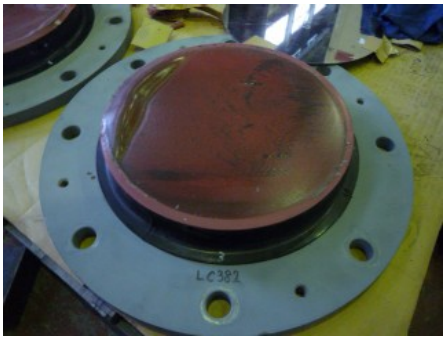
試験後の供試体及び試験状況を写真 1.3.4-1 に示す。

基準面圧（20N/mm^2）の長周期試験を実施した試験体#1 では、PTFE が加振前後方向部にずれて支承端部でやや盛り上がっていたが大きな損傷は見られなかった。同じ面圧条件で大変位の限界試験を実施した試験体#3 においては外観に異常は見られず、試験後に試験体を切断して確認した結果においても PTFE の接着部に異常は見られなかった。以上から、基準面圧（20N/mm^2）、累積変形が 50m 以内の条件下で、すべり支承の健全性を確保できることを確認した。限界試験を実施した試験体#2 では、一部に PTFE の膨れが見られ、接着層での剥離が考えられる。

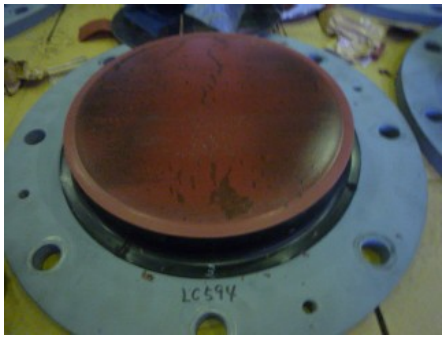
大面圧（40N/mm^2）の長周期試験を実施した試験体#4、試験体#5 では、すべり板の温度が 250℃に達する付近から PTFE が軟化し始め、支承外周部にはみ出した（写真 1.3.4-1 (f)）。試験後に加力治具を上げた際には PTFE 面に皺を生じ、温度低下とともにそのまま固化した（同 (d), (e)）。試験後に試験体を切断して確認した結果、PTFE と接着層の間に空隙が確認された（同 (h)）。皺の原因は、支承の軸力を開放した際に PTFE 裏面の接着部に加熱により分解したガスなどが部分的に溜まり、軟化した PTFE を膨張させたことが理由と考えられる。載荷後も支承の軸力を開放せずに放置し温度が低下するのを待てば、PTFE の皺は生じなかったものと考えられる。

前掲の表 1.3.4-8 に示したとおり、基準面圧、大面圧の試験ともすべり板や PTFE 裏の最大温度はさほど変わらない。表 1.3.4-7 に示したように大面圧の場合は摩擦係数が減少し、摩擦係数と軸力の積で表される摩擦力および摩擦熱は基準面圧の場合とさほど変わらないと考えられる。こうした状況下で大面圧の試験体#4、試験体#5 で PTFE のはみ出しが確認された理由としては、温度上昇により軟化した PTFE に大面圧が作用することで流動が促進されたためと考えられる。

(a) #1



(b) #2

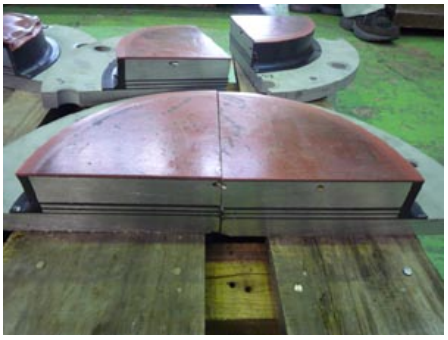


(c) #3

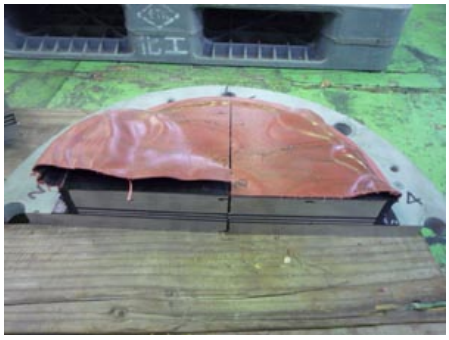
(d) #4

(e) #5

(f) #5－3 試験状況



(g) #3 試験後切断状況



(h) #5 試験後切断状況

写真 1.3.4-1 試験実施後の試験体の状況

2) 試験体の弾性変形量

試験体の弾性変形量と繰り返しによる変化傾向を表 1.3.4-9 及び図 1.3.4-45 に示す。

図 1.3.4-13 より繰り返し回数が増加すると、摩擦係数の低下に伴って試験体の弾性変形量は減少する傾向を確認できる。弾性変形量の最大値は 20.6mm(#4－2)であった。

表 1.3.4-9 試験体の弾性変形量

試験体 No.	試験 No.	サイクル数	弾性変形量(mm)
#1	#1－1	1～40	18.7
		81～120	14.8
	#1－2	1～40	19.1
		81～120	15.4
#2	#2－1	1～40	18.8
		201～240	11.1
#3	#3－1	1～30	18.4
		91～120	14.6
#4	#4－1	1～40	19.8
		81～120	16.2
	#4－2	1～40	20.6
		81～120	15.4
#5	#5－1	1～15	17.7
		76～90	13.4

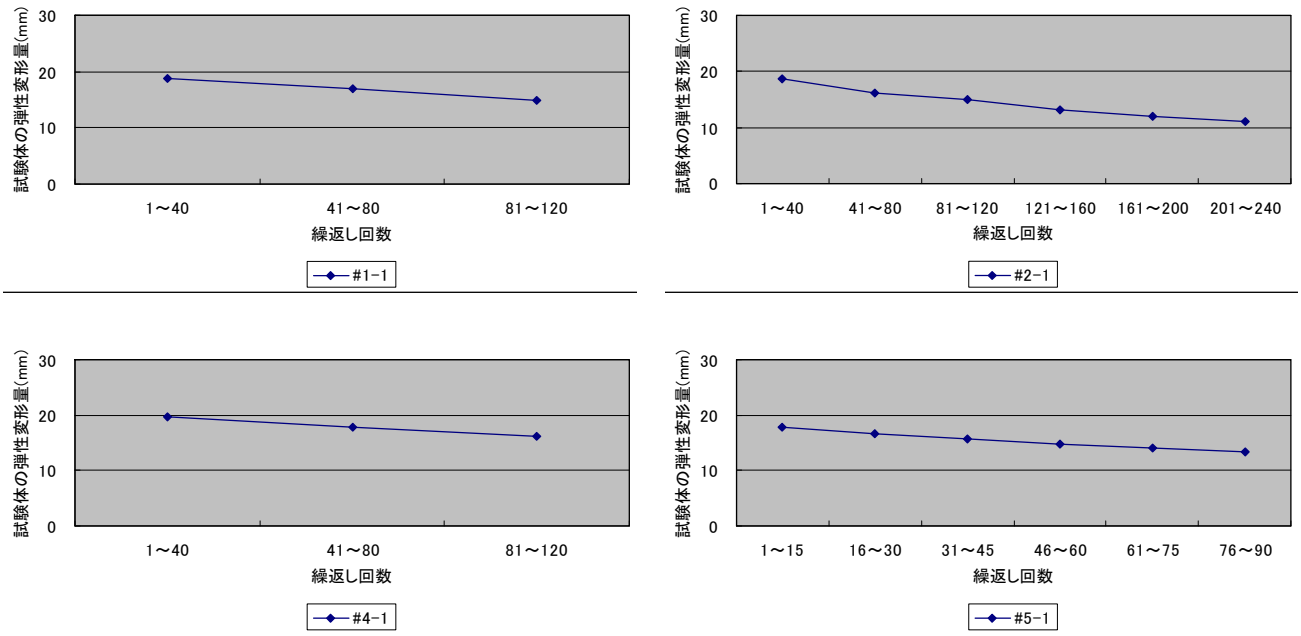


図 1.3.4-45 弾性変形と繰り返し回数の関係

3) PTFE の膜厚変化

表 1.3.4-10 に膜厚測定結果、図 1.3.4-46 に PTFE の摩耗量と累積変形量の関係を示す。

図 1.3.4-46 より PTFE の摩耗量は累積変形量に比例する傾向が見られる。また、#4－1(面圧 40N/mm^2、累積変形量 50m)のケースでは PTFE の摩耗量が 0.2mm であり、摩耗量は面圧に依存する傾向が見られる。

表 1.3.4-10 PTFE の膜厚測定結果

試験 No.	膜厚(mm)						
		A	B	C	D	E	平均
#1-1	試験前	3.41	3.34	3.34	3.45	3.38	3.39
	試験後	3.27	3.25	3.31	3.32	3.32	3.29
	差	0.14	0.09	0.03	0.13	0.06	0.10
#1-2	試験前	3.27	3.25	3.31	3.32	3.32	3.29
	試験後	3.21	3.22	3.25	3.22	3.28	3.23
	差	0.06	0.03	0.06	0.10	0.04	0.06
#1-3	試験前	3.21	3.22	3.25	3.22	3.28	3.23
	試験後	3.17	3.24	3.28	3.22	3.19	3.23
	差	0.04	-0.02	-0.03	0.00	0.09	0.00
#2-1	試験前	3.15	3.25	3.25	3.11	3.25	3.19
	試験後	-	3.20	3.21	3.02	3.19	-
	差	-	0.05	0.04	0.09	0.06	-
#3-1	試験前	3.35	3.50	3.25	3.45	3.40	3.39
	試験後	3.21	3.38	3.15	3.25	3.28	3.25
	差	0.14	0.12	0.10	0.20	0.12	0.14
#4-1	試験前	3.22	3.30	3.22	3.13	3.23	3.22
	試験後	2.99	3.12	3.05	2.90	3.18	3.02
	差	0.23	0.18	0.17	0.23	0.05	0.20
#4-2	試験前	2.99	3.12	3.05	2.90	3.18	3.02
	試験後	-	2.88	3.00	-	2.74	-
	差	-	0.24	0.05	-	0.44	-
#5-1	試験前	3.20	3.09	3.20	3.25	3.19	3.19
	試験後	3.06	2.92	3.09	3.12	3.06	3.05
	差	0.14	0.17	0.11	0.13	0.13	0.14
#5-2	試験前	3.06	2.92	3.09	3.12	3.06	3.05
	試験後	3.07	2.89	3.08	3.10	3.06	3.04
	差	-0.01	0.03	0.01	0.02	0.00	0.01

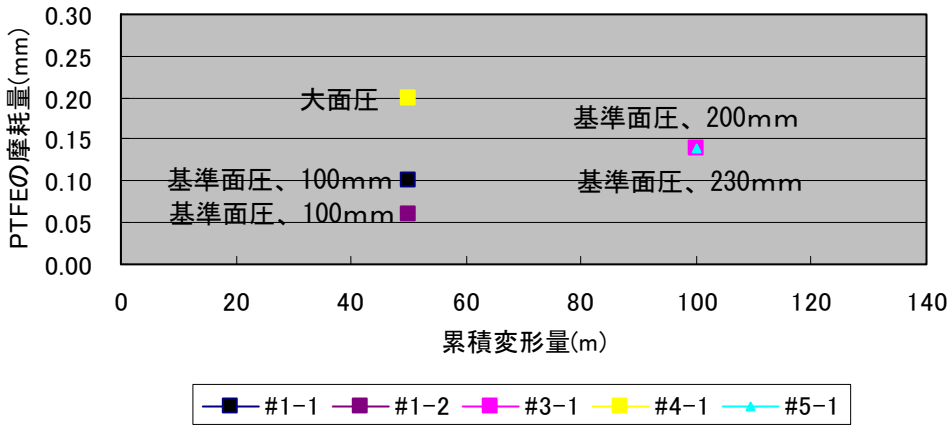


図 1.3.4-46 PTFE の摩耗量

1.3.4.3 まとめと課題

弾性すべり支承（高摩擦）の多数回繰り返しに対する性能を把握する事を目的として、実大の1/3 縮小試験体（Φ300）により大振幅高速繰り返し試験を実施した。以下に、本実験から得られた知見をまとめて示す。

(1) 多数回繰り返しに対する摩擦特性の変化

基準面圧（20N/mm^2）の長周期、限界試験における摩擦係数は回数を繰返すことで減少し、摩擦係数の変化率は#1－1（120 ｻｲｸﾙ）で－59%、#1－4（250 ｻｲｸﾙ連続）で－67%であった。繰り返しに伴う摩擦係数の減少傾向はインターバル時間中には一旦止まり、摩擦係数が復帰する（大きくなる）傾向にあった。

(2) 多数回繰り返しに対する試験体の温度変化

基準面圧（20N/mm^2）、振幅±100mm、インターバルありのすべり板温度は、長周期で 236～238℃、限界で 258℃まで上昇した。すべり速度が大きい限界（#3－1、#5－1）のすべり板温度はそれぞれ 286℃、265℃まで上昇した。また、インターバルなし、振幅±100mm の連続条件では、基準面圧の限界（#1－4）のすべり板温度が 270℃まで上昇した。地震波試験でのすべり板温度は 100℃前後まで上昇するが、ゴム表面は常温に近い状態であった。

加力治具の温度は 17～22℃で推移しており、断熱板により熱の伝達が遮断されていたと考えられる。

(3) 多数回繰り返しに対する耐久性能

基準面圧（20N/mm^2）の長周期試験を実施した試験体#1 では、PTFE が片側によっていたが大きな損傷は見られなかった。限界試験を実施した試験体#2 では、一部に PTFE の膨れが見られ、接着層での剥離が考えられる。同じ面圧条件で大変位の限界試験を実施した試験体#3 においては外観に異常は見られなかった。以上から、基準面圧（20N/mm^2）、累積変形が 50m 以内の条件下で、すべり支承の健全性を確保できることを確認した。

(4) 静的軸力の違いによる上記性状の変化

インターバルなし、振幅±100mm の連続条件では、大面圧（40N/mm^2）の限界（#5－3）が 255℃まで上昇したが、最大温度は基準面圧の場合と比べて同程度かやや低い程度であった。大面圧では摩擦係数が低くなるためと考えられる。

大面圧（40N/mm^2）の長周期試験を実施した試験体#4、試験体#5 では、すべり板の温度が 240℃付近から PTFE が溶け始め横にはみ出した。この理由としては、温度上昇により軟化した PTFE に大面圧が作用することで流動が促進されたためと考えられる。この場合も試験体高さの変化はごくわずかであり、荷重支持性能は確保されることを確認した。

以上、弾性すべり支承（高摩擦）の縮小試験体による多数回繰り返し試験を通じて、摩擦特性の変化、温度変化ならびに限界性能を確認した。今後の課題として、多数回繰り返しによる特性値評価式の検討および地震応答解析への反映、実大試験体による温度上昇や特性値変動に対するスケール効果の確認などが挙げられる。

参考文献

1.3.4-1) Mokha, A., Constantinou, M. and Reinhorn, A., Teflon Bearings in Base Isolation, I: Testing, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.116, No.2, pp.438-454, 1990.2

1.3.4-2) 富島誠司，大橋智樹，佐藤啓治：すべり支承方式の免震に用いるすべり材の動摩擦係数に関する研究，日本建築学会技術報告集，第 1 号，pp.140-145，1995.12

1.3.4-3) 岡本晋，藤井俊二，尾崎大輔，Constantinou, M.C.，Tsopelas, P.C.：すべり方式免震システムを有する橋梁の動特性に関する実験的研究，土木学会論文集，No. 507/I-30 号，pp.167-177，1995.1

1.3.4-4) 江森純一，山中久幸，谷垣政治，平田裕一，山岸邦彰：弾性すべり支承の基本性能に関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-2，pp.487-488，1998.9

1.3.4-5) 林章二，北村佳久，猿田正明：積層ゴムとすべり支承による複合免震システムに関する研究，日本地震工学シンポジウム論文集，Vol.10-3，pp.2807-2812，1998

1.3.4-6) 松崎浩，森利弘，渡辺則雄，滝沢賢一：すべり支承とせん断型コイルばねによる免震構法（その２）すべり支承加力試験，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-2，pp.495-496，1998.9

1.3.4-7) 浜口弘樹，東野雅彦，遠山幸太郎，安部裕，沖芳郎：低摩擦特性のすべり支承に関する研究（その３）実大装置の性能確認試験，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-2，pp.701-702，1999.9

1.3.4-8) 増田圭司，三山剛史：低摩擦滑り支承を用いた免震構法の開発　その１．低摩擦支承の開発，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-2，pp.737-738，2000.9

1.3.4-9) 日比野浩，高木政美，勝田庄二：実大弾性すべり支承の載荷実験に基づく摩擦特性のモデル化，日本建築学会構造系論文集，第 574 号，pp.45-52，2003.12

1.3.4-10) 松本喜代隆，高澤恒男，加藤直樹，岡本守，市村敦史：弾性すべり支承の開発（その 4：摩擦係数の動特性），日本建築学会大会学術講演梗概集，B-2，pp.505-506，2002.8

1.3.4-11) 南輝弥，加藤朝郎，大場政章，村角保行：FBR 免震設計に関する研究　その 30　複合免震装置の原子炉施設への適用（弾性すべり支承を用いた複合免震構法の検討　その２），日本建築学会大会学術講演梗概集，B-2，pp.1219-1220，1999.9

1.3.4-12) 高坂隆一，木本幸一郎，竹内貞光，伊藤嘉朗，降旗大助，芳沢利和，和田章：弾性すべり支承免震の実験的研究，その３：振動実験と弾性すべり支承の面圧，速度依存性を考慮したシミュレーションの比較，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-2，pp.727-728，2000.9

1.3.4-13) 田中寛人，高橋良和，家村浩和：滑り支承の速度・荷重依存性のモデル化と免震効果に関する研究，土木学会年次学術講演会講演概要集，第 1 部，Vol.57，pp.905-906，2002.9

1.3.4-14) 社団法人日本建築学会：免震構造設計指針、pp.210～211、2001

1.3.4-15) 社団法人日本免震構造協会：免震部材 JSSI 規格、2000

1.3.5 弾性すべり支承（低摩擦）

本節では、弾性すべり支承（低摩擦）の多数回繰り返し変形に対する特性の変動について、免震建築物の安全性検証方法に関する国土交通省基準整備に資する知見を取得するための調査について述べる。本調査においては弾性すべり支承（低摩擦）に関する調査を代表できる免震材料として、オイレス工業 SSR（μ=0.01）を調査対象とした。

1.3.5.1 実験計画

(1) 実験目的と背景

1) 実験目的

弾性すべり支承（低摩擦）を代表できる免震材料として、オイレス工業 SSR（μ=0.01）の多数回繰返し変形に対する特性の変動について調査を行い、免震建築物の安全性検証方法に関する国土交通省基準整備に資する知見を取得する。

2) 調査対象部材の構成

図 1.3.5-1 に調査対象部材の製品概念図を示す。すべり材と積層ゴムが連結鋼板を介して直列に積層されすべり子が構成される。すべり子はフランジプレートを介して建物構造体に接合される。すべり板はステンレス板にフッ素樹脂系コーティングを施したものである。取付鋼板を介して建物構造体に取り付けられる。

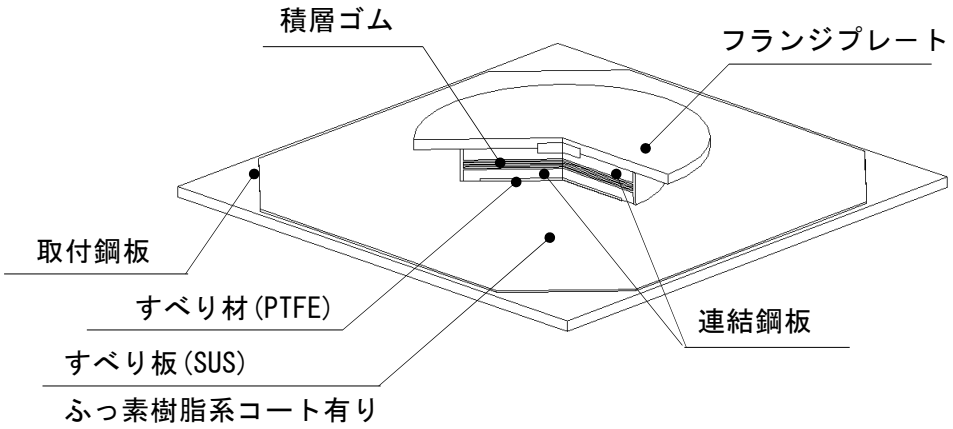


図 1.3.5-1　調査対象部材の製品概念図

図 1.3.5-2 にすべり材下面（すべり面）の構成を示す。ガラスエポキシ樹脂に PTFE（四ふっ化エチレン樹脂）シートが貼付されているほか、表面に穿たれた孔部に固体潤滑剤が充填されている。すべり面における PTFE シートと固体潤滑剤の面積比率はおよそ 0.75：0.25 である。当初取付時には、PTFE シート表面も固体潤滑剤で被われている。

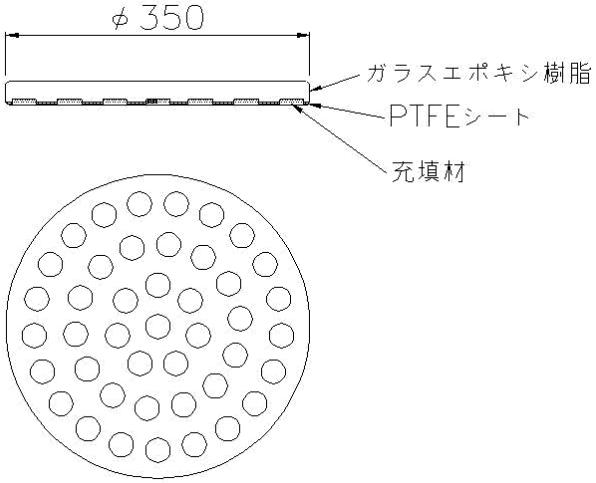


図 1.3.5-2　すべり材下面の構成

3) 既往の知見

a) 繰り返し依存性

小径のすべり材供試体（外形φ100、μ0.01 仕様）を用いた調査結果を基に、免震材料認定における繰り返し回数（波数）に対する摩擦係数変動の基準値が定められている[1.3.5-1)]。同調査の試験条件は、面圧 20MPa、相対速度 10mm/s の正弦波（変位振幅±100mm）による加振であり、本調査において、長周期地震動による応答 1 回分に相当する累積変形量として考えている 50m を超える領域までのデータが得られている。これによると、摩擦係数変動の範囲は 0.0085～0.0120 とされている。

b) 温度依存性

温度に対する摩擦係数変動については、基準値が定められていない。また、繰り返しによる影響についても示されていない。

c) 面圧依存性

動摩擦係数 μ は面圧依存性を持ち、相対速度 100mm/s の時、式(1.3.5-1)のように定められている。速度が異なる場合は式(1.3.5-2)による。

$$\mu(\sigma_S)=0.0355\cdot\sigma_S^{-0.44} \qquad (1.3.5\text{-}1)$$

$$\mu(\sigma_S,v)=(0.0355-0.0093\cdot e^{-0.1\cdot v})\cdot\sigma_S^{-0.44} \qquad (1.3.5\text{-}2)$$

ここで、σ_S：すべり材面圧(MPa)、v：相対速度(mm/s)

φ250（3 体）、□250×250（3 体）のすべり材を用いた試験結果により、得られた摩擦係数の各面圧における値が上記の面圧依存式で得られる基準値に対してばらつきの範囲内（±30%以内）であることが確認されている。試験条件は試験面圧 10～40N/mm^2、加振速度 15～600mm/s、正弦波 4 波による加振であり、3 波目の降伏荷重 Q から摩擦係数 μ が計算されている。ただし、加振波数は 4 波であり、繰り返し回数との関係は示されていない。

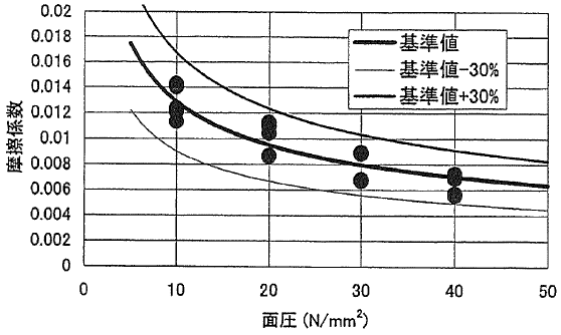


図 1.3.5-3　摩擦係数の面圧依存性（相対速度 200mm/s）

d) まとめ

調査対象部材の繰り返しに対する摩擦係数変動は、繰り返し回数（波数）に対する依存性として示されており、調査範囲は 400 波までである。累積変形量に換算すると 160m となる。変動の幅は 0.008～0.012 程度である。

温度に対する摩擦係数変動については、基準値が定められていない。繰り返しによるすべり面の温度上昇が摩擦係数の変動をもたらすかどうかについても論じられていない。

面圧依存性については 10～40MPa の範囲で摩擦係数変動の基準値が定められている。繰り返し特性と面圧の関係については論じられていない。

(2) 実験日時および場所

実験は、平成 22 年 12 月 14 日～12 月 24 日に、オイレス工業株式会社足利工場（栃木県足利市羽刈町 1000 番地）において実施した。実験実施スケジュールは表 1.3.5-1 に示すとおり（試験体名は後述のとおり）である。

表 1.3.5-1　実験実施スケジュール

試験体 No.	実験実施日	備考
#1	平成 22 年 12 月 14 日	
#2	平成 22 年 12 月 17 日	平成 22 年 12 月 20 日公開実験
#3	平成 22 年 12 月 21 日	
#4	平成 22 年 12 月 24 日	

(3) 試験体

試験体概略図を図 1.3.5-4 に、試験体仕様一覧を表 1.3.5-2 に示す。本調査では、使用可能な加力装置能力の制約から、想定実機（SSR φ800、積層ゴム外径：φ800、すべり材径：φ700）の 1/2 程度の試験体を対象とした。材料の厚さ方向は縮小の対象とはせず、実験対象の免震材料として免震材料認定品の小径製品（SSR φ400、積層ゴム外径：φ400、すべり材径：φ350）を用いた。すべり材基準面圧は 20MPa である。試験体数は 4 体とした。但し、免震材料を構成する要素のうち、積層ゴム部およびすべり板取付プレートは治具として扱い、それぞれ 1 体および 2 枚製作した。これらに、試験体としてのすべり材およびすべり板を順次取付け、交換することで実験対象材料を構成した。すべり材の交換を実施するために、積層ゴム下フランジプレートとすべり材ホルダが構造上分離されている。

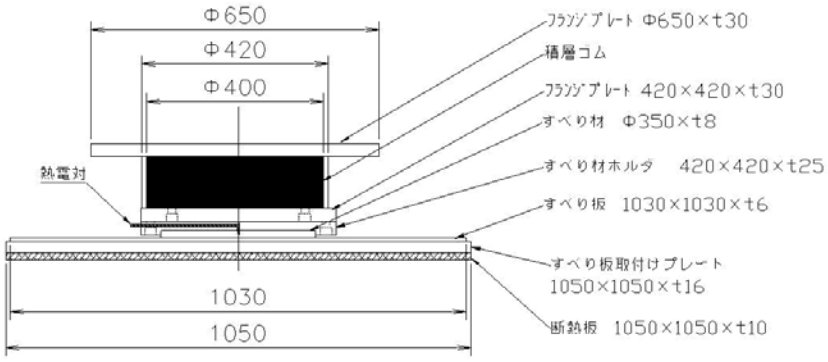


図 1.3.5-4　試験体の全体形状

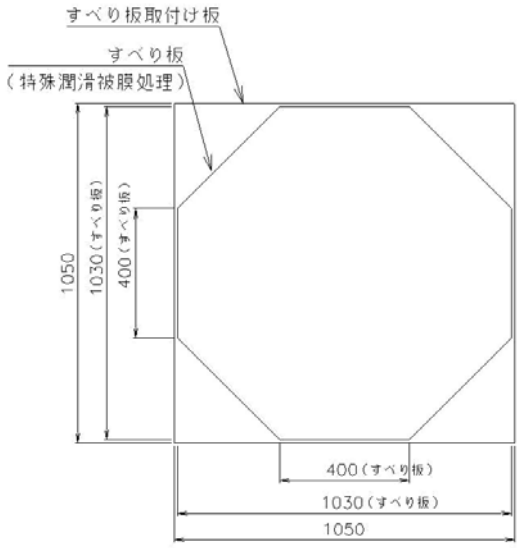


図 1.3.5-5　すべり板の形状

表 1.3.5-2　試験体諸元

項　目	想定実機１／１	縮小体１／２
ゴム材料	天然ゴム　G6	
積層ゴム外形（mm）	Φ800	Φ400
ゴム層厚（mm）×層数	7.5×6	4×9
内部鋼板厚（mm）×層数	3.1×5	2.5×8
1 次形状係数	25.8	24.1
2 次形状係数	17.8	11.1
すべり材（mm） （μ=0.01 タイプ）	Φ700×t8	Φ350×t8
すべり板（mm） （すべりコート有り）	□2000×t8	□1030×t6
すべり板取付け板（mm）	□2020×t22	□1050×t16

(4) 試験装置

本実験に用いた試験装置の概要を写真 1.3.5-1 および表 1.3.5-3 に示す。最大鉛直荷重 3MN の二軸せん断試験装置である。

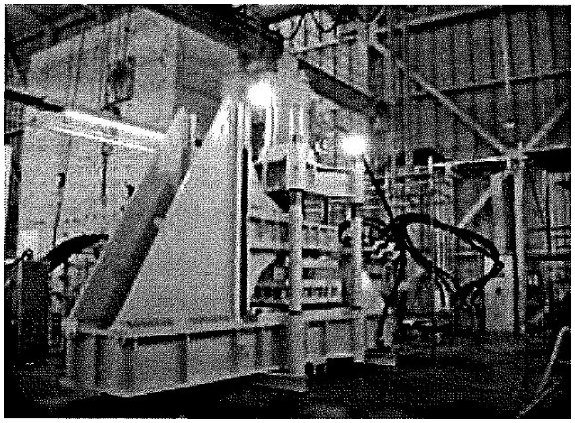


写真 1.3.5-1 試験装置

表 1.3.5-3 試験装置能力

最大鉛直荷重	3 MN
最大水平荷重(動的)	±700 kN
水平ストローク	±500 mm
最大水平速度	2000 mm/s

連続加振可能な最大速度は約 300mm/s

(5) 計測項目と計測方法

試験機による加力情報として鉛直荷重、水平荷重、水平変位を計測した。荷重は試験機に付属するロードセルを、変位は外部変位計（ストローク計およびレーザー変位計）を用いた。水平変位は全体変形および積層ゴム部変形を計測した。

すべり板、すべり子の温度を温度センサー（熱電対）をあらかじめ試験体内部に埋め込むことで計測した。すべり板取付板と試験機盤との間には断熱板を設置した。材料はアルミニウムカーボネート系断熱板（熱伝導率 0.3W/m/K 程度）とし、厚さは 10mm とした。

すべり板コーティング膜厚を計測した。後述する多数回繰り返し実験のセット間のインターバル時間において膜厚計を用いて手動にて計測した。計測項目一覧を表 1.3.5-4 に示す。

表1.3.5-4　計測項目一覧

センサー名	計測項目
Fv	鉛直荷重
Fh	水平荷重
Dh1	水平変位（全体変位）
Dh2	水平変位（積層ゴム変位）
Temp.1	すべり材中央部温度①
Temp.2	すべり板温度位置②
Temp.3	すべり板温度位置③
Temp.4	すべり板温度位置④
Temp.5	すべり板温度位置⑤
Temp.6	すべり板温度位置⑥
Temp.7	すべり板温度位置⑦
Temp.8	すべり板温度位置⑧
Temp.9	すべり板温度位置⑨
Temp.10	すべり板温度位置⑩
Temp.11	雰囲気温度
膜厚計	すべりコーティング面①～⑮

計測システムを図 1.3.5-6 に示す。多数回繰り返し実験時におけるサンプリングは 100Hz とした。温度に関しては、加振終了後 10 分間継続して計測した。

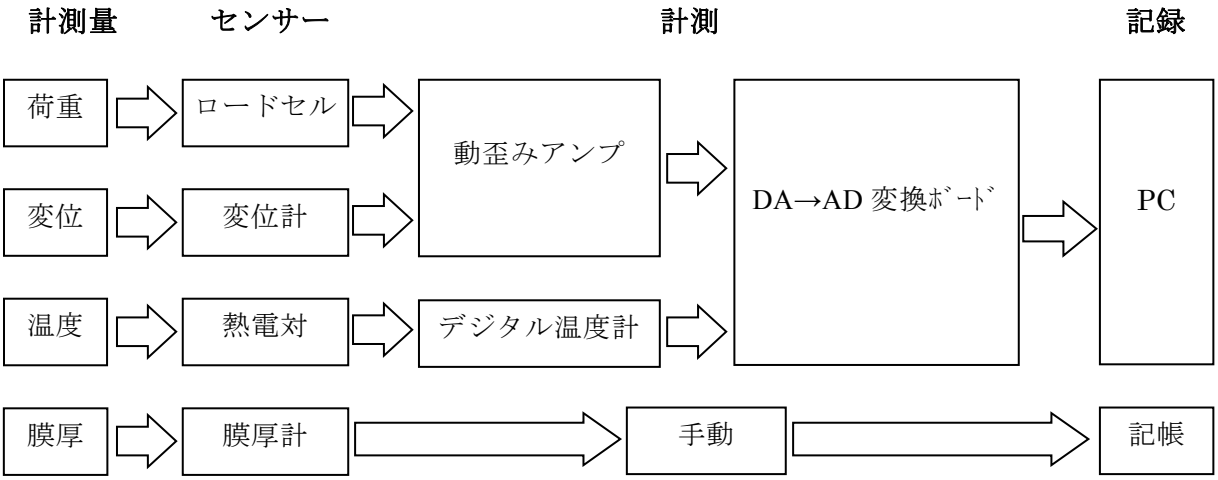


図 1.3.5-6　計測システム図

すべり子およびすべり板の温度計測要領を図 1.3.5-7～8 に、計測点配置を図 1.3.5-9 に示す。計測点はすべり子 1 点、すべり板 9 点である。このほか、雰囲気温度 1 点を計測した。

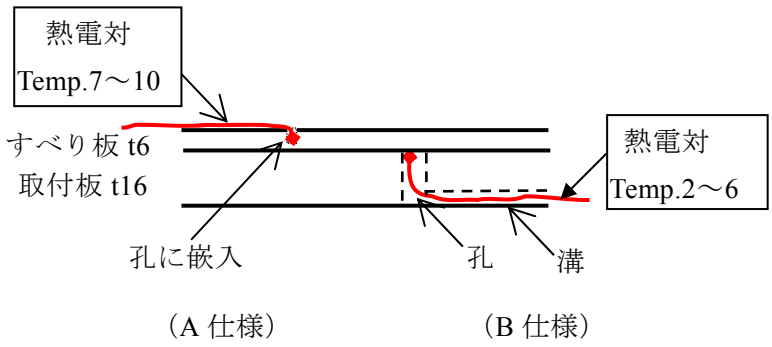


図 1.3.5-7 すべり板の熱電対取付け要領

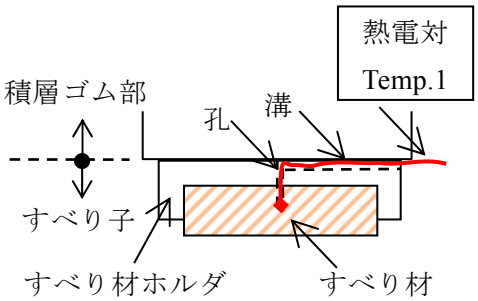


図 1.3.5-8 すべり子の熱電対取付け要領

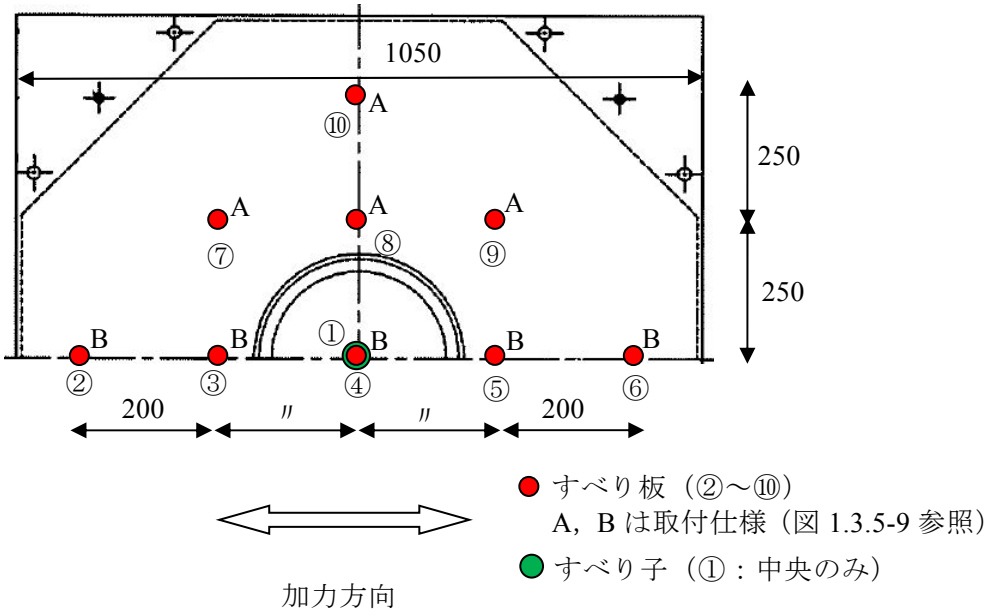


図 1.3.5-9 すべり板の温度計測位置

すべりコーティング膜厚計測位置を図 1.3.5-10 に示す。

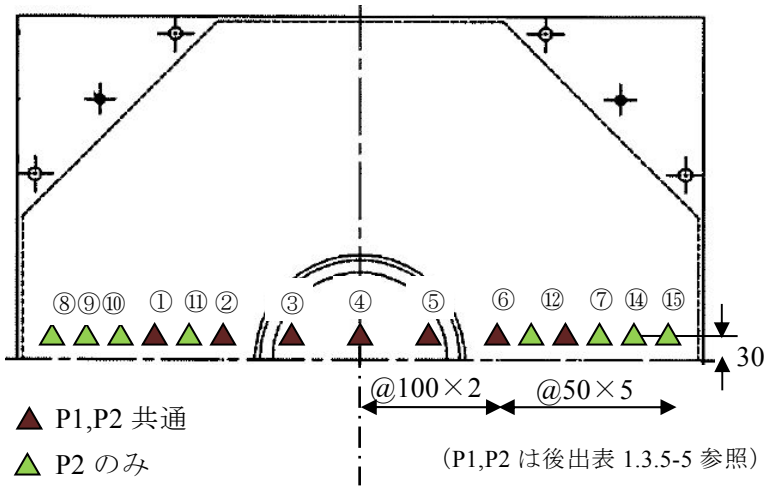


図 1.3.5-10　すべりコーティング膜厚計測位置

(6) 実験方法および実験ケース

長周期地震動による応答1回分に相当する実験条件として累積変形量50m以上となる繰り返し条件を想定し、これを 1 セットと称した。各試験体についてインターバル時間を挟んで 10 セット実施した。

実験パラメータは、加振波形（定振幅正弦波：150mm、変動振幅正弦波：50~300mm)、すべり材面圧（基準：20MPa、高面圧：30MPa)、インターバル時間（標準：30 分（原則)、短：3~11 分）とし、4 体の試験体に割りつけた。

加振波形は振幅および各部の通過回数の影響を把握することを目的としたパラメータである。定振幅±150mm 正弦波は試験装置能力の制約上、連続加振可能な最大振幅である。変動振幅波形においても連続加振可能であることを確認の上実施した。

すべり材面圧は従来知見のない繰り返し特性と面圧の関係について調査することを目的としたパラメータである。高面圧 30MPa は試験装置能力の限界を考慮して設定した。

標準インターバル時間を採った場合には、10 分間の温度低下を計測した後、膜厚計測およびすべり面の状況観察を実施した。水準値 30 分は計測および観察に掛かる必要時間により定めた。この際、すべり材とすべり板を離間させた。短インターバル時間は、すべり面温度が異常に上昇する状況を生起させるために設けたパラメータである。この場合には、状況に応じ上記計測および観察を省略した。

実験実施においては、前出二軸試験装置の鉛直アクチュエータによって所定面圧から計算される鉛直荷重を与えた後、水平アクチュエータによって所定変位振幅を強制的に与えた。

加力条件を表 1.3.5-5 に示す。

表 1.3.5-5 加力条件

試験体 No.	加振順 (ｾｯﾄ)	ｹｰｽ	実験 ﾀｲﾌﾟ	すべり材面圧 [N/mm2]	加振周期 [s]	水平変位 (全体変位) [mm]	最大加振速度 [cm/s]	波形	サイクル数 [cycle]	時間 [s]	累積変位 [m]	加振後の ｲﾝﾀｰﾊﾞﾙ [min.]
#1	1	P1	定常	20	4	±150	23.6	正弦波	84	336	50.4	10+20※
	2～10	同上										
#2	1	P2	変動	20	4	±50	7.9	正弦波	11	44	2.2	連続
						±100	15.7	正弦波	11	44	4.4	
						±150	23.6	正弦波	11	44	6.6	
						±200	31.4	正弦波	11	44	8.8	
						±250	39.3	正弦波	3	12	3	
						±300	47.1	正弦波	3	12	3.6	
						±200	31.4	正弦波	11	44	8.8	
						±150	23.6	正弦波	11	44	6.6	
						±100	15.7	正弦波	11	44	4.4	
						±50	7.9	正弦波	11	44	2.2	
						累積小計			94	376	50.6	10+20※
	2～10	同上										
#3	1	P1	定常	30	4	±150	23.6	正弦波	84	336	50.4	10+20※
	2～10	同上										
#4	1	P1	定常	20	4	±150	23.6	正弦波	84	336	50.4	10+1※
	2～6	同上										
	7～10	同上										2+1※

※ 加振後のインターバルとして、温度変化の計測時間 10 分と、すべり面観察及び膜厚測定のための時間（原則として 20 分）を取った。臨時の計測系チェック等のため、インターバルを拡大したセット間もある（詳細は付録：実験実施記録表参照）。#4 では、すべり面観察及び膜厚測定を省略し、7~9 セット目では加振後の温度変化の計測時間を 2 分とした。

1.3.5.2 実験結果

(1) 製品試験

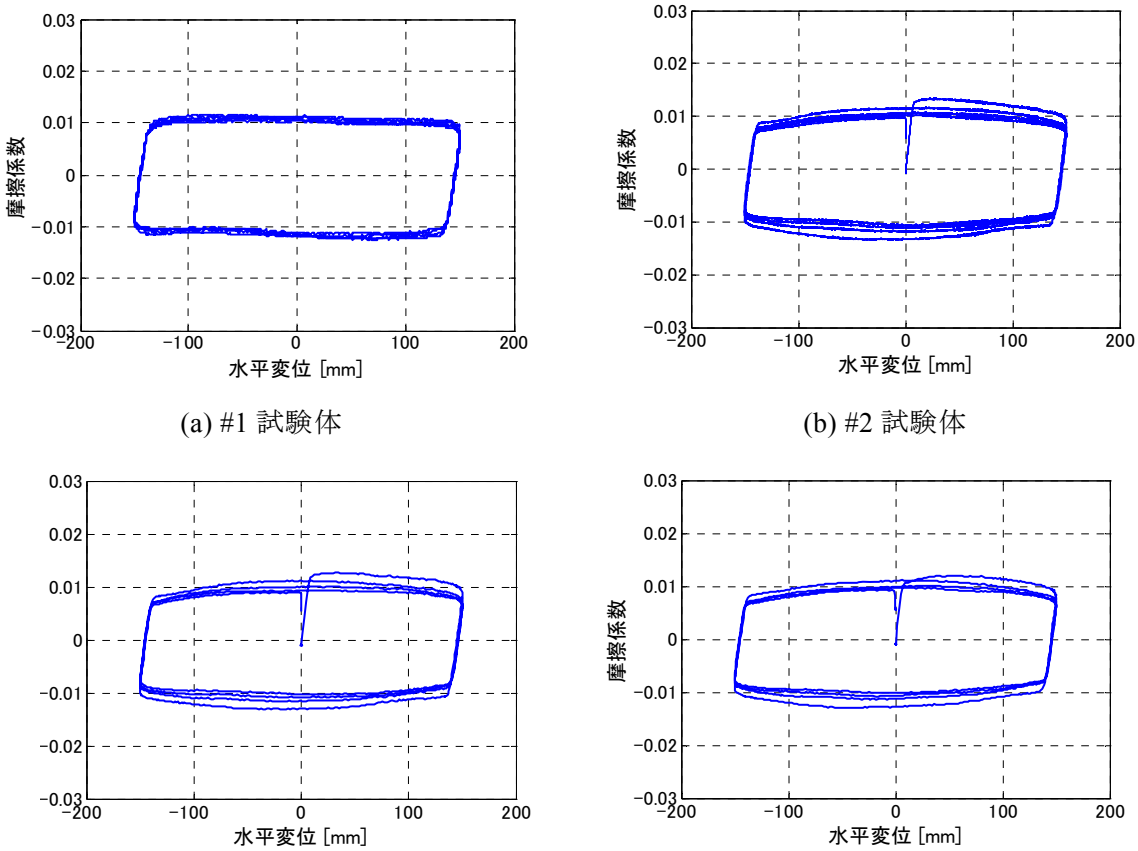
調査対象の試験体が、免震材料認定に適合するものであることを確認するために製品試験を実施した。製品試験における水平特性試験の条件は、すべり材面圧：20MPa、水平変位振幅：±150mm（定常）、加振周期：62.8 秒、加振波形：正弦波、最大速度：15mm/s、サイクル数：4 であり、試験前に同一条件で 4 サイクルのなじみ加振を行った後実施した。3 サイクル目の特性を試験値として抽出した。

なお、#1 試験体については、多数回繰り返し実験における 1 セット目の最初の 4 サイクルをなじみ加振とみなし、5～8 サイクルを製品試験における水平特性試験と見なした。試験条件は、すべり材面圧：20MPa、水平変位振幅：±150mm（定常）、加振周期：4 秒、加振波形：正弦波、最大速度：236mm/s であり、3 サイクル目の特性を試験値として抽出し、速度換算式により速度 15mm/s に換算した。

寸法試験結果を表 1.3.5-6 に、水平特性試験結果を図 1.3.5-11 および表 1.3.5-7 に示す。対象とする試験体 4 体は免震材料認定に適合するものであることが確認できた。

表 1.3.5-6　弾性すべり支承（低摩擦）試験体寸法試験結果

図面寸法	単体高さ(H2)　208.4㎜						平行度			外観	判定
許容差	単体高さの±2㎜(206.4　～　210.4㎜)						≦1.9㎜		≦1/500		
試験体 No.	測定位置				平均値	対計算値比率	①-③の絶対値 [mm]	②-④の絶対値 [mm]	フランジ辺長 650㎜	異常なきこと	
	①	②	③	④							
#1	208.1	208.2	208.2	207.6	208.2	0.999	0.1	0.6	0.46/500	良	合格
#2	207.4	207.5	208.1	207.5	207.7	0.996	0.7	0.0	0.54/500	良	合格
#3	208.6	208.2	207.6	208.6	208.1	0.999	1.0	0.4	0.77/500	良	合格
#4	208.5	208.0	208.0	208.2	208.2	0.999	0.5	0.2	0.38/500	良	合格



(a) #1 試験体　(b) #2 試験体

(c) #3 試験体　(d) #4 試験体

図 1.3.5-11　弾性すべり支承（低摩擦）水平特性試験結果

表 1.3.5-7　弾性すべり支承（低摩擦）水平特性試験結果

試験体 No	試験条件				計測値			摩擦係数 基準値 μ_0	μ/μ_0	μ/μ_0 許容値	判定
	すべり材 面圧 σ (MPa)	鉛直荷重 Fv (kN)	振動数 f (Hz)	振幅 δ (mm)	最大速度 V (mm/s)	水平荷重 Fh (kN)	摩擦係数 μ				
♯1	20	1923	0.25	±150	236	21.0*	0.011*	0.009	1.22	0.7~1.3	**合格**
♯2	20	1923	0.0159	±150	15	20.9	0.011		1.21		**合格**
♯3	20	1923	0.0159	±150	15	20.1	0.010		1.17		**合格**
♯4	20	1923	0.0159	±150	15	19.9	0.010		1.16		**合格**

*：速度 15mm/s に換算

(2) 多数回繰り返し実験

試験体取り付け状況を写真 1.3.5-2 に示す。

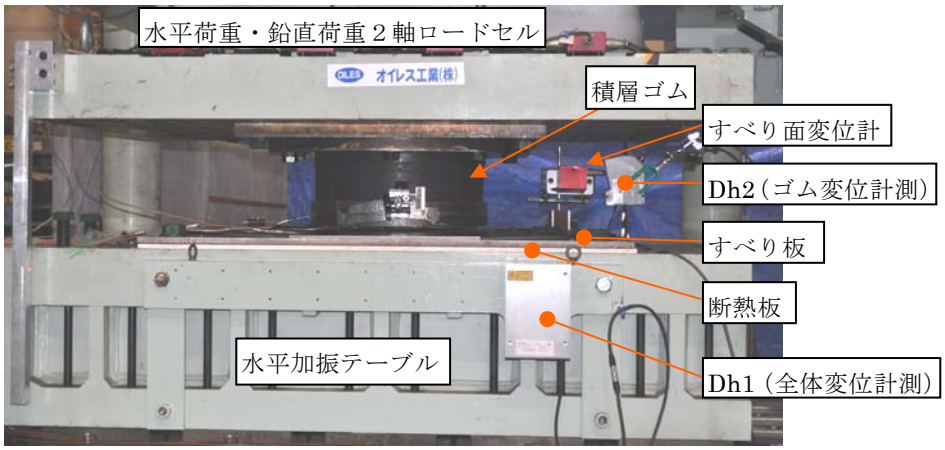


写真 1.3.5-2　試験体取り付け状況

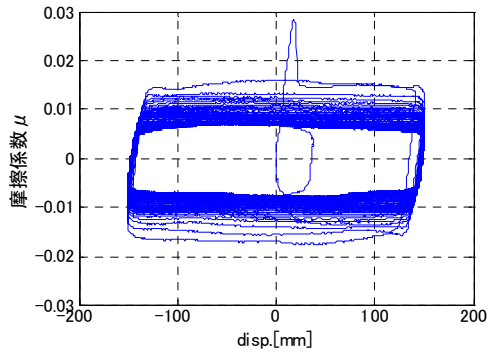
1) #1 試験体

#1 試験体の実験条件はすべり材面圧：20MPa、水平変位振幅：±150mm（定常）、加振周期：4 秒、加振波形：正弦波、最大速度：236mm/s、1 セットのサイクル数：84、1 セットの累積変位：50.4m、加振後のインターバル：原則 30 分、繰り返しセット数：10 である。

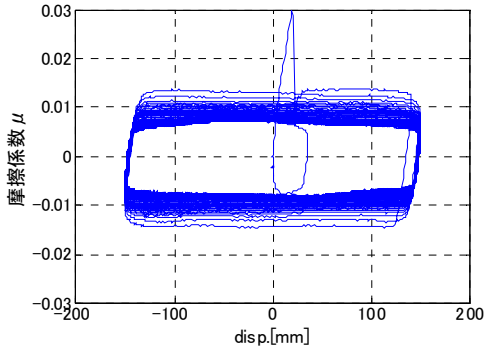
a) 摩擦係数特性

図 1.3.5-12 に 1､3､6､10 セット目の水平方向の摩擦係数－変形関係を示す。また、図 1.3.5-13 には 1､3､6､10 セット目の 0 変位切片における動摩擦係数の変化を示す。図 1.3.5-13 においては同一サイクルの正負平均値を示した。各セット開始時における摩擦係数は 1 セット目、3 セット目で大きいが 10 サイクルを超えると摩擦係数の変動はほぼ同等となる。6 セット目と 10 セット目の間にほとんど相違は見られない。また、各セットとも加振開始時に静摩擦力の立ち上がりが見られ、セット間に相違は見られない。

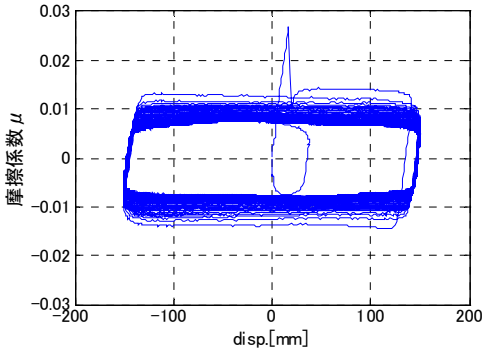
図 1.3.5-14 に各セットにおける最大、最小動摩擦係数の変動を示す。図中には各セットにおける吸収エネルギーが等価となる平均的な摩擦係数（以下、平均摩擦係数）を併せて示した。図中▼で示したのは定常振幅±150mm に対する基準値である。また、各セットにおける吸収エネルギーを図 1.3.5-15 に示す。上述のように、各セットの最大摩擦係数は 1 セット目で特に大きく､4 セット目以降はほぼ一定の値となる。最小摩擦係数はセット間の変動がほとんどない。平均摩擦係数のセット間の変動も小さく、実験条件（20MPa、236mm/s）による基準値よりも押し並べて 15%ほど小さい。各セットにおける吸収エネルギーも平均摩擦係数と同様、セット間の変動は小さい。



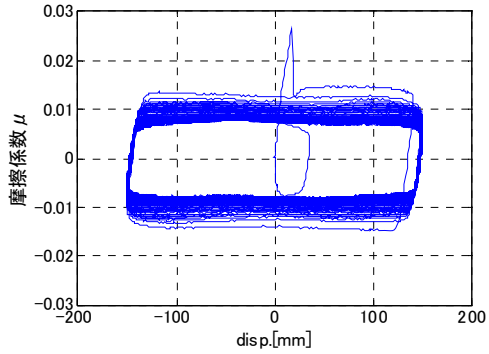
(a) 1 セット目



(b) 3 セット目

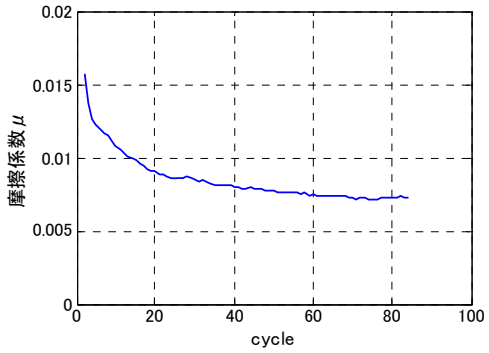


(c) 6 セット目

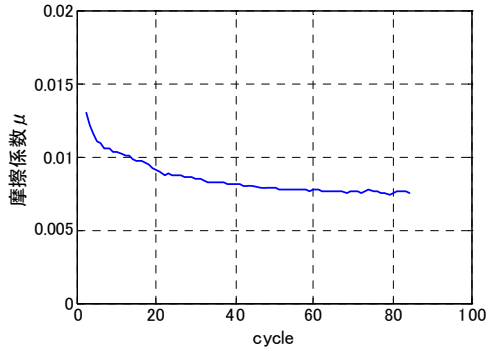


(d) 10 セット目

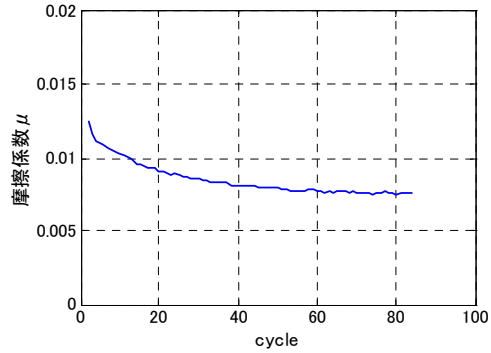
図 1.3.5-12　#1 試験体　水平方向摩擦係数－変形関係



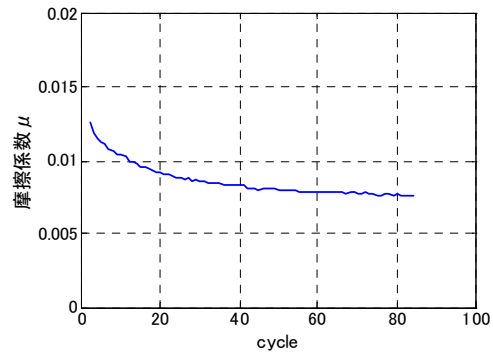
(a) 1 セット目



(b) 3 セット目



(c) 6 セット目



(d) 10 セット目

図 1.3.5-13　#1 試験体　0 変位切片における動摩擦係数の変化

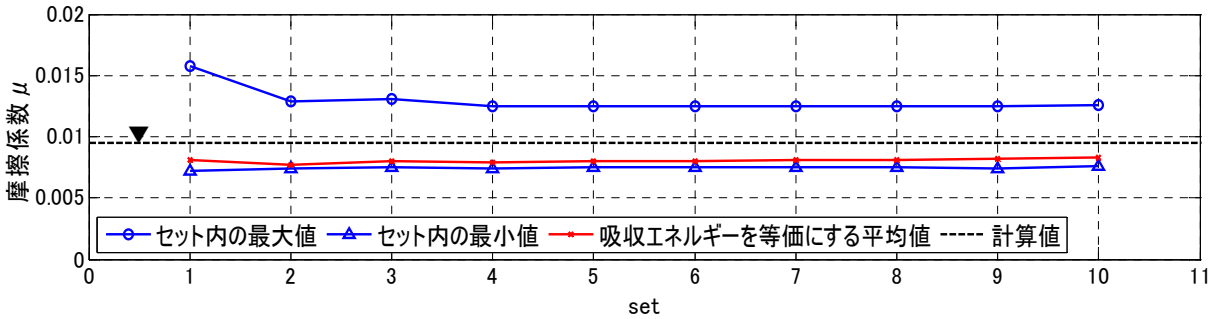


図 1.3.5-14　#1 試験体　各セットにおける最大、最小動摩擦係数

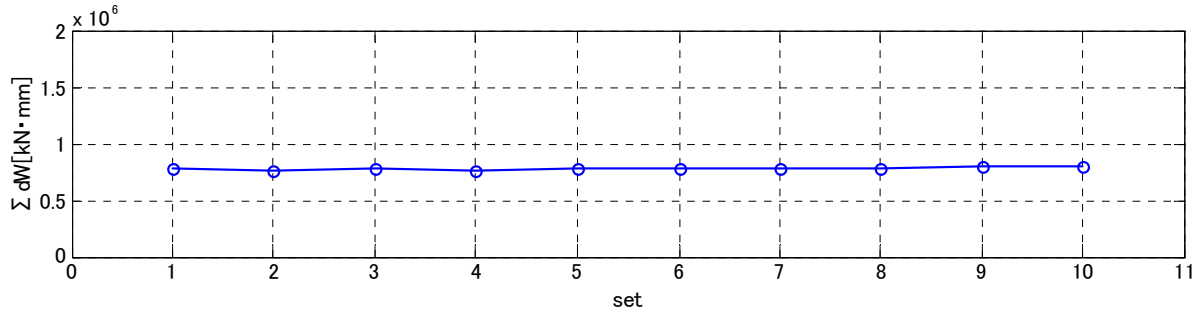
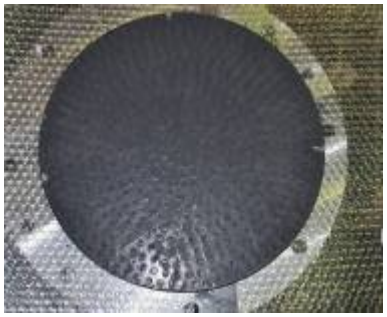


図 1.3.5-15　#1 試験体　各セットの吸収エネルギー

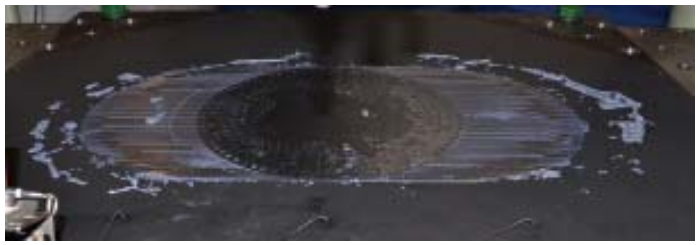
写真 1.3.5-3 に加振前および 1、3、6、10 セット目加振後のすべり材下面およびすべり板の状況を示す。初期の実験によりすべり材下面全体の固体潤滑剤がはがれ、セット繰り返しを追うごとに孔部に充填された固体潤滑剤の落下が進む。すべり板には滑動跡が見られ、すべり材より脱落した固体潤滑剤の付着、剥離が繰り返されているものと考えられる。6 セット目後からすべり面に線状の傷が発生し、セットを追うごとに本数は増加するが面的に広がることはなかった。なお、本調査ではセット終了ごとにすべり子を持ち上げてすべり材下部およびすべり板の観察と記録を行ったため、固体潤滑剤の落下が助長された可能性がある。



(a) すべり材下面　実験前

(b) すべり板表面　実験前

(c) すべり材下面　1 セット目後



(d) すべり板表面　1 セット目後

(e) すべり材下面　3 セット目後

(f) すべり板表面　3 セット目後

(g) すべり材下面　6 セット目後

(h) すべり板表面　6 セット目後

(j) すべり材下面　10 セット目後

(k) すべり板表面　10 セット目後

写真 1.3.5-3　#1 試験体　すべり材下面、すべり板表面状況写真

b) 温度特性

温度計測点の状況を写真 1.3.5-4 に示す。

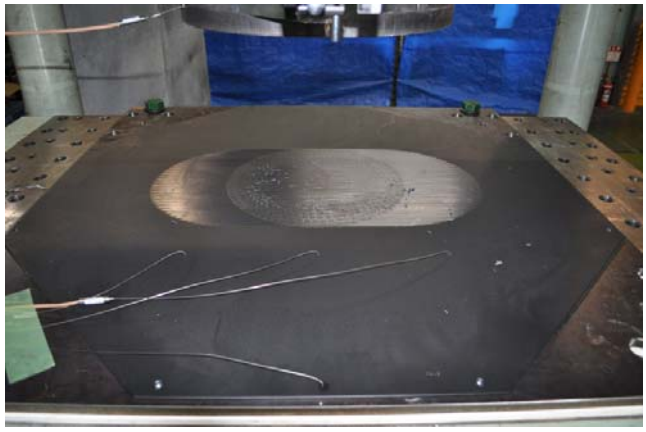
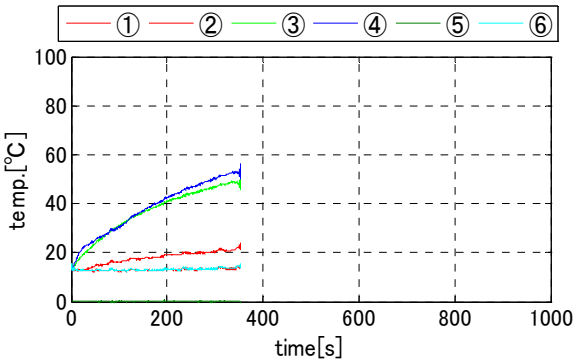


写真 1.3.5-4　温度計測点

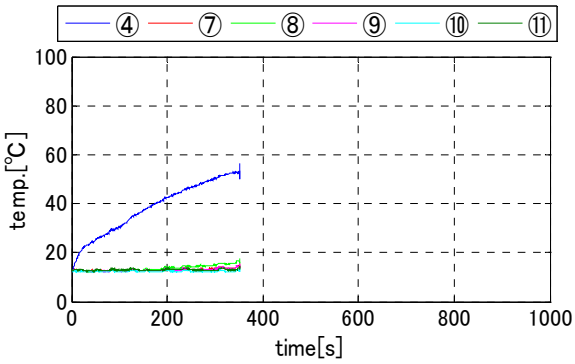
図 1.3.5-16 に 1､3､6､10 セット目の温度時刻歴を示す。3､6､10 セット目については加力終了後 600 秒間の温度低下についても示した。左図に計測点①~⑥、右図に計測点④、⑦~⑪を示した。なお、計測点⑤は 1 セット目開始前より、計測点⑥は 2 セット目途中より、いずれも断線のため 0℃と記録されている。左図からは、すべり材中央直下の計測点④に対し計測点③はやや低く計測点②はほとんど温度上昇が見られないなど、すべり板内に温度分布が生じていることや､すべり子の停止位置である計測点④の加振終了後の温度低下は計測点③に比べ鈍いこと、すべり材（PTFE：厚さ 8mm）中心に埋め込まれた計測点①の温度上昇は鈍く、加振終了後の温度低下も鈍いことなどがわかる。右図からは、加力中の計測点⑦~⑩の温度上昇は小さく、すべり材走行部分を外れたすべり板内への熱伝導は期待しにくいこと、加力終了後には若干ながら熱伝導による温度上昇が生じていることなどがわかる。

図 1.3.5-17 に計測点①および④について、各セットにおける最低温度、最高温度のセット間の変動を示す。セット間の最低温度、最高温度の変動はわずかであるが、繰り返しを追うごとにいずれも上昇する。セット内の温度上昇量（最低温度と最高温度の差）は計測点④がより大きいが、各セットの最低温度は計測点①および④でほぼ等しくなる。30 分程度のインターバルはすべり材とその接触位置のすべり板の温度差を解消するには充分大きかったことを示していると考えられる。

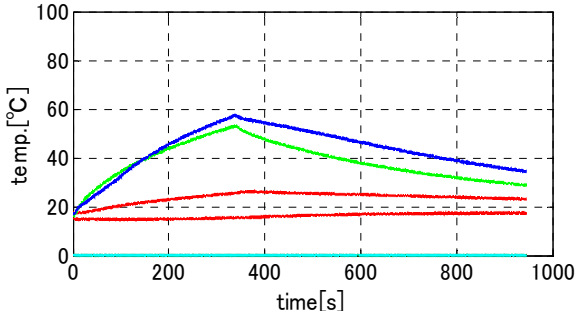
摩擦係数の変動がセット内で大きくセット間で小さいことと、温度変動がセット内で大きくセット間で小さいことには対応関係があると考えることができる。



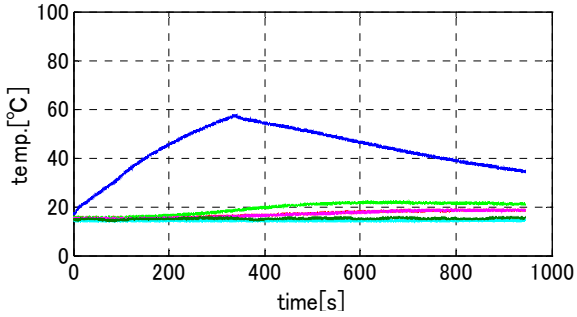
(a) 1 セット目①～⑥計測点



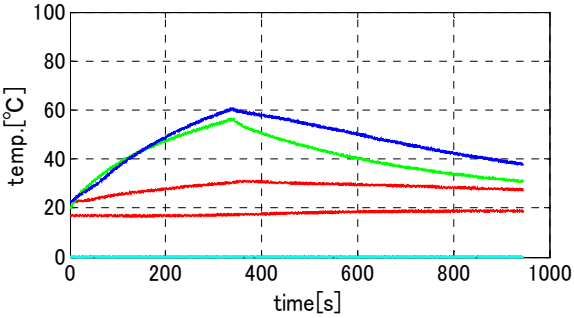
(b) 1 セット目④、⑦～⑪計測点



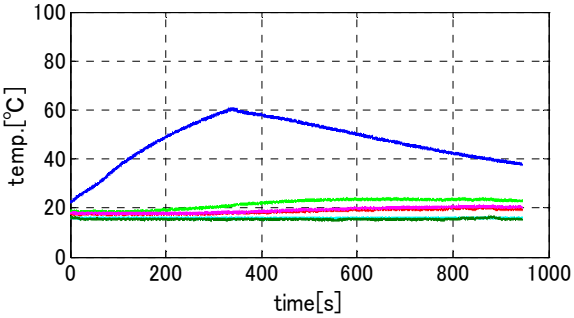
(c) 3 セット目①～⑥計測点



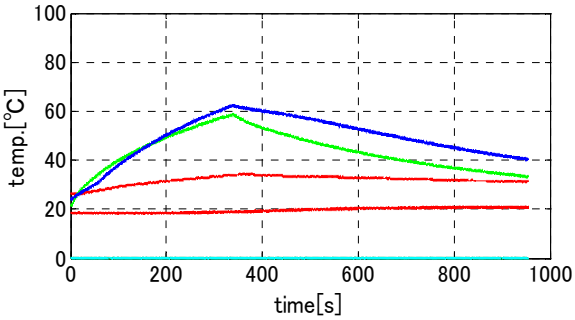
(d) 3 セット目④、⑦～⑪計測点



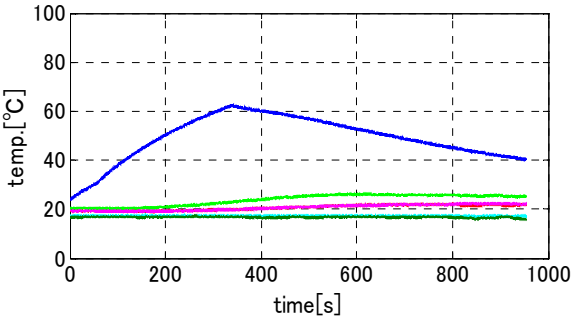
(e) 6 セット目①～⑥計測点



(f) 6 セット目④、⑦～⑪計測点



(g) 10 セット目①～⑥計測点



(h) 10 セット目④、⑦～⑪計測点

図 1.3.5-16　#1 試験体　各計測点の温度時刻歴

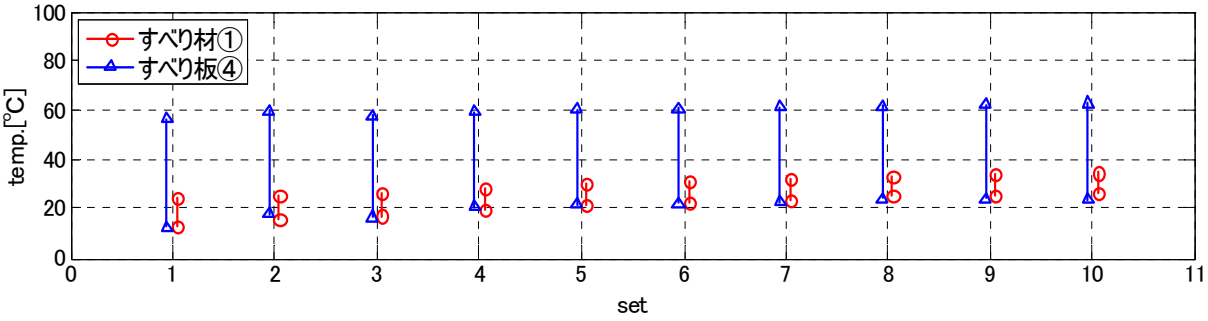


図 1.3.5-17　#1 試験体　①、④計測点における各セットの最低、最高温度

c) 膜厚

膜厚測定状況を写真 1.3.5-5 に示す。

写真 1.3.5-5　膜厚測定状況

図 1.3.5-18 に各測定点の膜厚測定結果を示す。測定点間の値にはばらつきが見られるが、各点で繰り返し試験による膜厚変化がほとんど生じておらず、管理値 20μm を下回ることもなかった。本試験体の加力条件では、すべり板コーティング面に異常を生じさせることはなかったと判断できる。

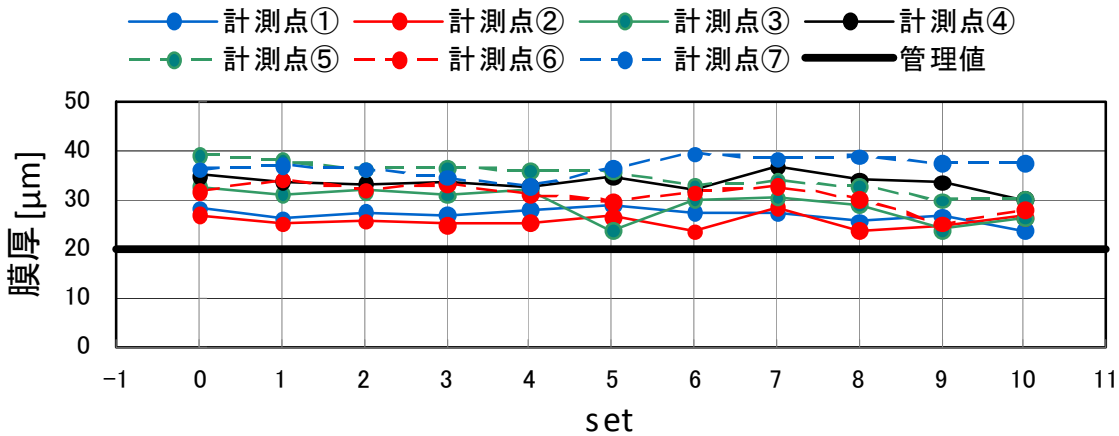


図 1.3.5-18　#1 試験体　膜厚測定結果

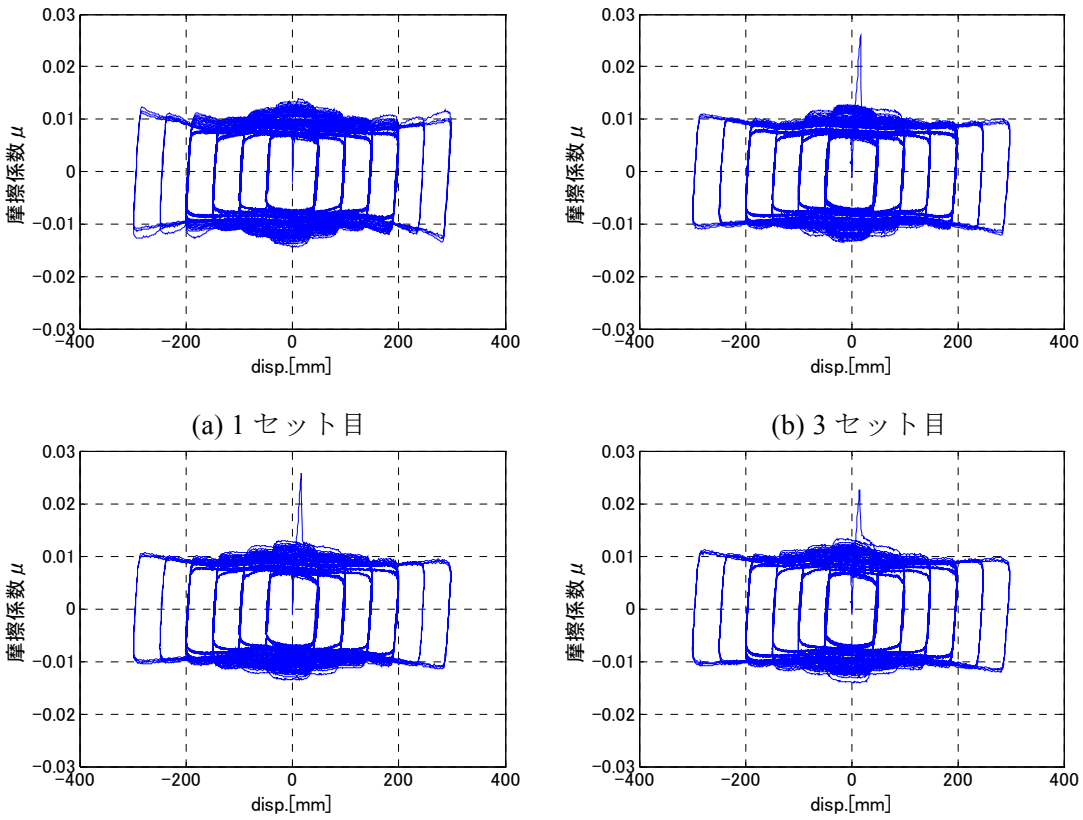
2) #2 試験体

#2 試験体の実験条件はすべり材面圧：20MPa、水平変位振幅：±50~±300mm（変動＝漸増漸減）、加振周期：4 秒、加振波形：正弦波、最大速度：471mm/s、1 セットのサイクル数：94、1 セットの累積変位：50.6m、加振後のインターバル：原則 30 分、繰り返しセット数：10 である。

a) 摩擦係数特性

図 1.3.5-19 に 1､3､6､10 セット目の水平方向の摩擦係数－変形関係を示す。また、図 1.3.5-20 には 1､3､6､10 セット目の 0 変位切片における動摩擦係数の変化（補正前）を示す。本実験条件においては振幅によって 0 変位通過時の速度が異なるため、速度補正式を用いて速度 v=236mm/s の条件に補正したものを図 1.3.5-21 に示す。図 1.3.5-20, 21 における値は同一サイクルの正負平均値である。各セット開始時を含め、セット間の摩擦係数にほとんど相違は見られない。セット内では摩擦係数は漸減する傾向にあるが、より大きな振幅に更新された際に直前よりも大きな摩擦係数が生じることがある。速度による補正の影響はほとんどない。

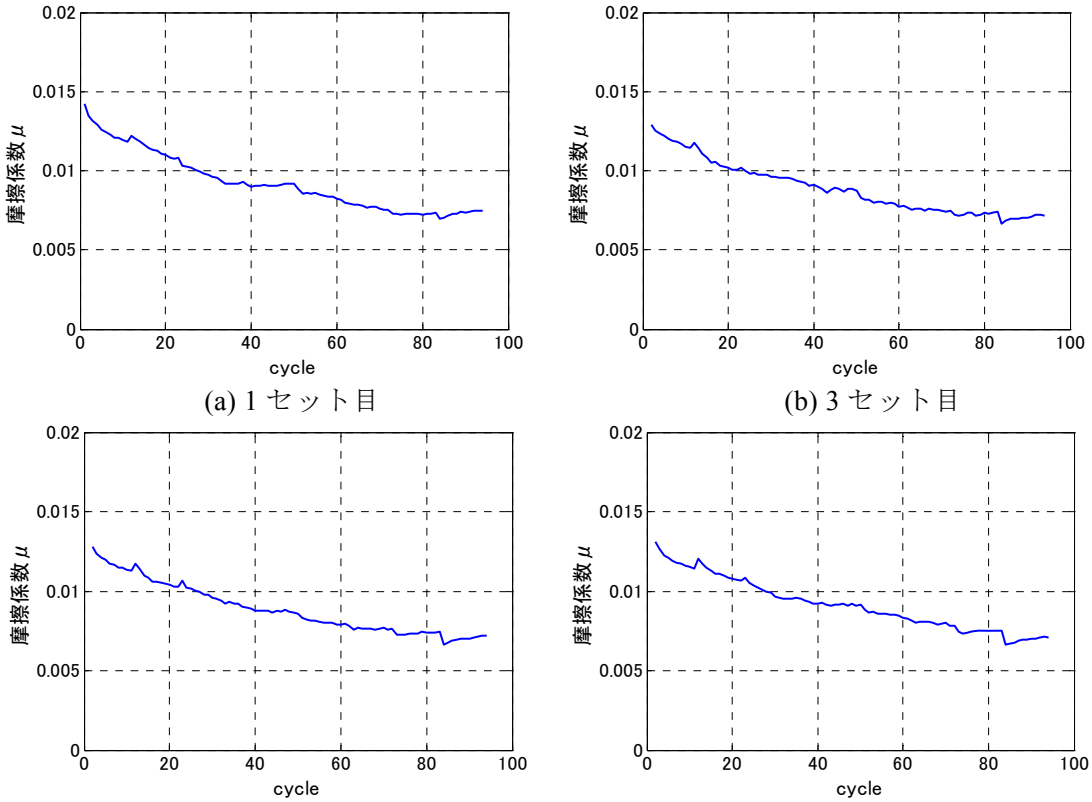
また、加振開始時の静摩擦力の立ち上がりが、1 セット目を除いて観察された。



(a) 1 セット目　(b) 3 セット目

(c) 6 セット目　(d) 10 セット目

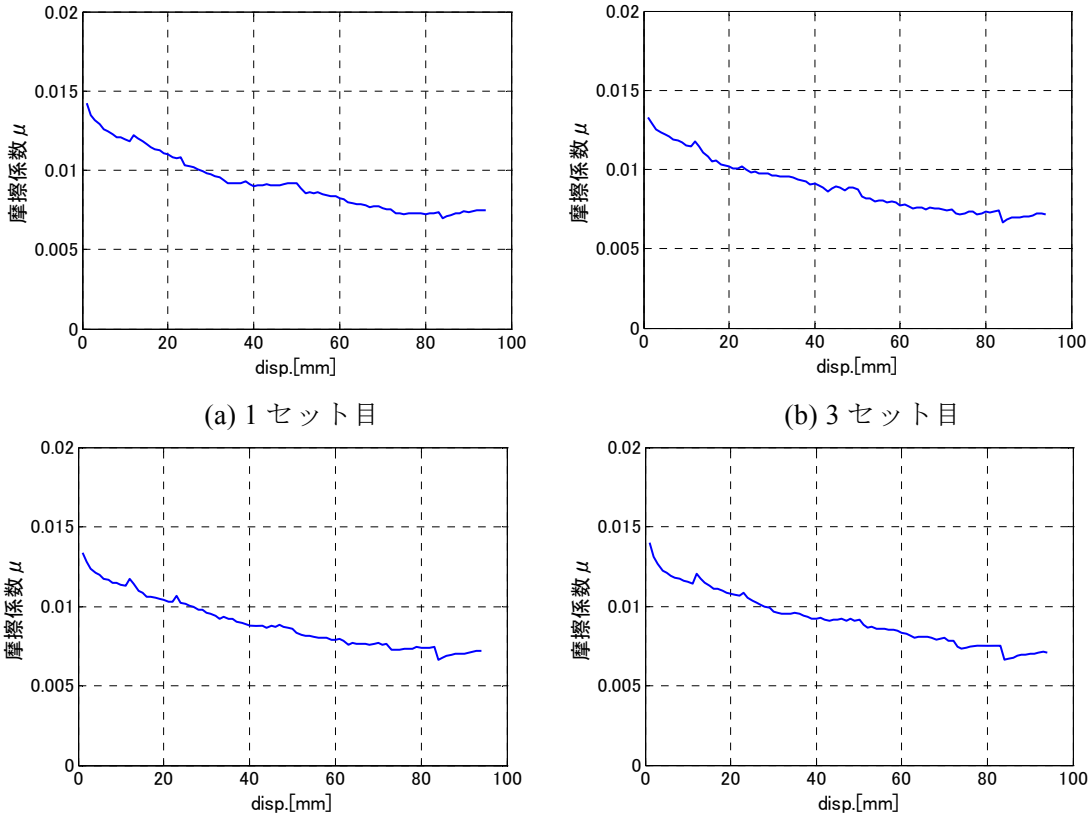
図 1.3.5-19　#2 試験体　水平方向摩擦係数－変形関係



(a) 1 セット目　(b) 3 セット目

(c) 6 セット目　(d) 10 セット目

図 1.3.5-20　#2 試験体　0 変位切片における動摩擦係数の変化（補正前）



(a) 1 セット目　(b) 3 セット目

(c) 6 セット目　(d) 10 セット目

図 1.3.5-21　#2 試験体　0 変位切片における動摩擦係数の変化（速度 236mm/s に補正）

図 1.3.5-22 に各セットにおける最大、最小動摩擦係数の変動を示す。図は速度補正後の値で描いた。図中には各セットにおける吸収エネルギーが±150mm の定常ループで等価となる平均摩擦係数を併せて示した。図中▼で示したのは定常振幅±150mm に対する基準値である。また、各セットにおける吸収エネルギーを図 1.3.5-23 に示す。1～2 セット目の最大摩擦係数がその後のセットに比べやや大きいほかは、最大、最小摩擦係数にセット間の変動はほとんど見られない。平均摩擦係数のセット間の変動も小さい。平均摩擦係数は定常振幅±150mm に対する基準値よりも 8%ほど小さい。

図 1.3.5-24 に各サイクルにおける振幅が最大振幅の 0.9 倍に至ったときの摩擦係数（正負往路の平均値）を各測定振幅毎に当該位置の通過回数に対して描いたものを 1、3、6、10 セット目について示す。値は速度 v=236mm/s の条件に補正した。振幅漸増時には、±50mm～±150mm のそれぞれの振幅において摩擦係数の低下が明瞭に見られる。図 1.3.5-20,21 に見られたとおり、より大きな振幅の当初には前振幅の最終値よりも大きな摩擦係数を示すが、前振幅の当初値に比べれば低下する。振幅漸減時の摩擦係数は各振幅による値をつなぐように滑らかに低下する。±100mm、±50mm では若干増加する傾向を示す。1 セット目の開始当初の摩擦係数は他のセットに比べやや大きいが、そのほかにはセット間の傾向の違いはほとんどない。

以上から、変動振幅加力における摩擦係数の傾向は、単純なサイクル数によっても、ローカルな摺動回数によっても、十分には説明できないことがわかる。

写真 1.3.5-6 に加振前および 1、3、6、10 セット目加振後のすべり材下面およびすべり板の状況を示す。概ね#1 試験体と同様の状況である。すべり板には振幅毎に滑動跡が見られる。すべり面の線状の傷は 7 セット目後（非表示）から発生しセットを追うごとに本数の増加が見られたが、面的に広がることはなかった。

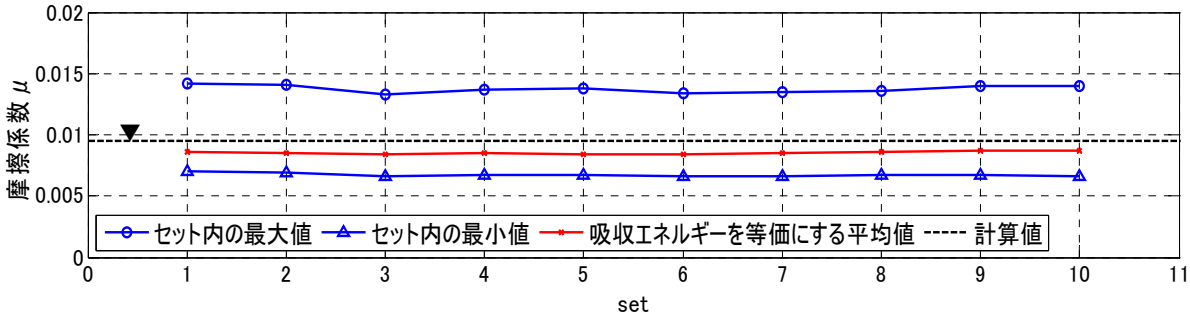


図 1.3.5-22　#2 試験体　各セットにおける最大、最小動摩擦係数

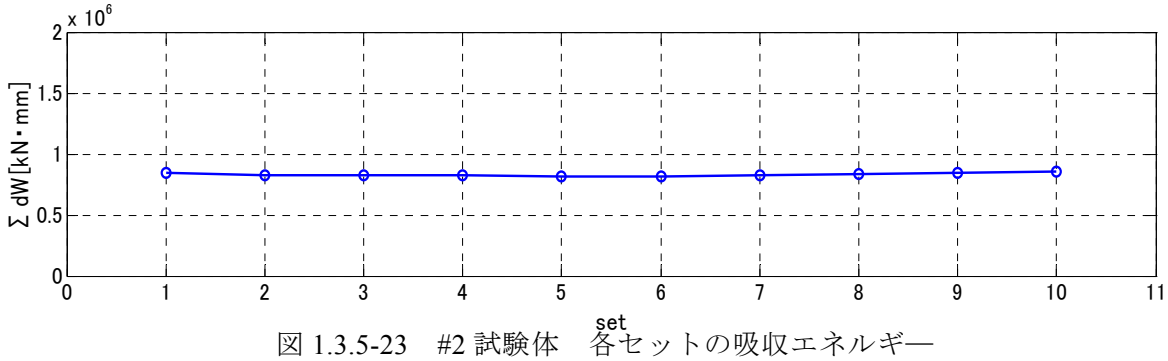
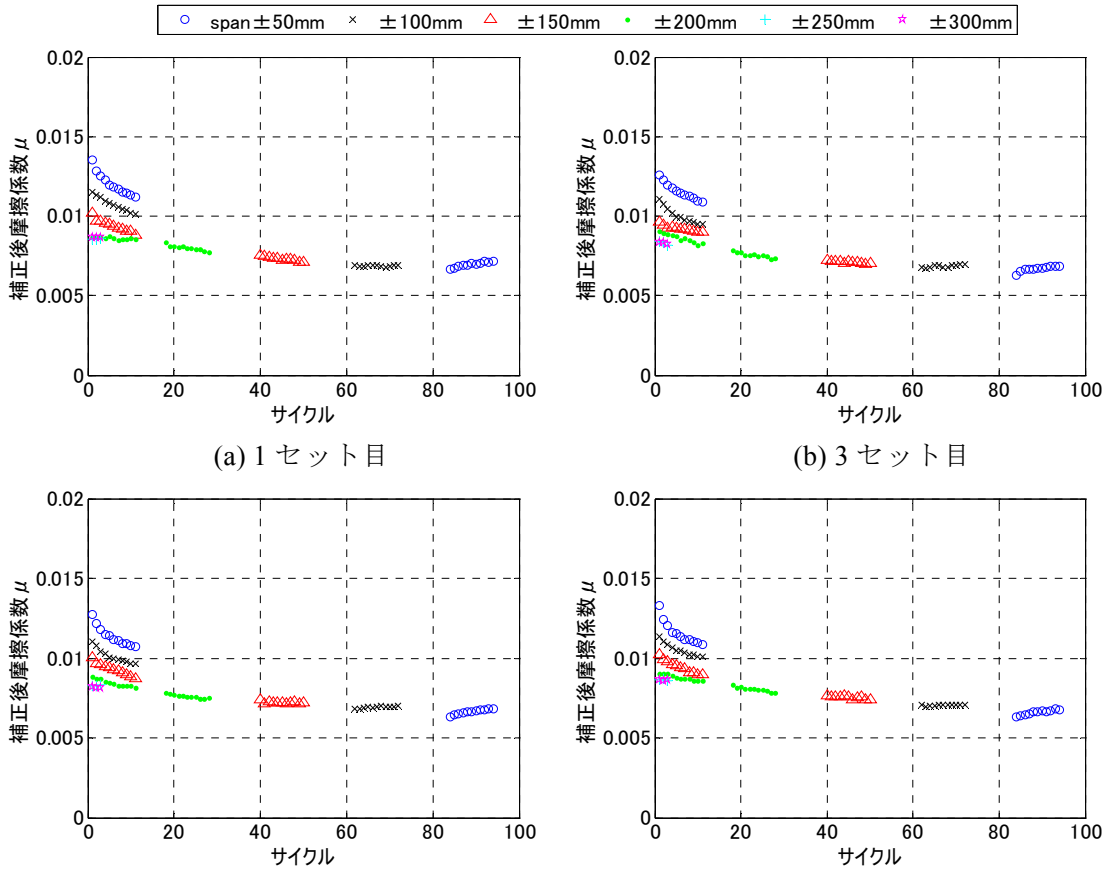


図 1.3.5-23　#2 試験体　各セットの吸収エネルギー

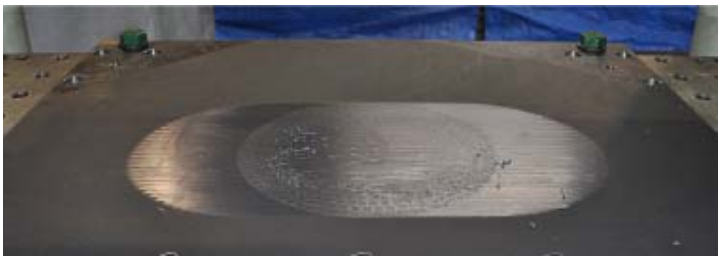


(a) 1 セット目　　(b) 3 セット目

(c) 6 セット目　　(d) 10 セット目

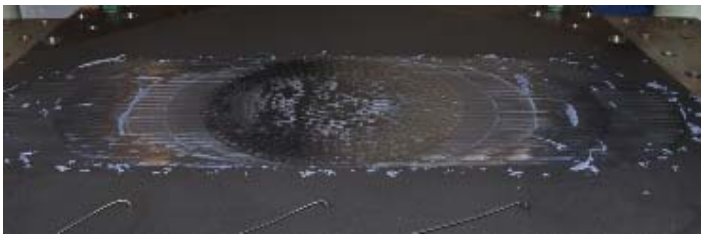
図 1.3.5-24　#2 試験体　変位振幅×0.9 における動摩擦係数の変化（速度 236mm/s に補正）

(a) すべり材下面　実験前



(b) すべり板表面　実験前

(c) すべり材下面　1 セット目後

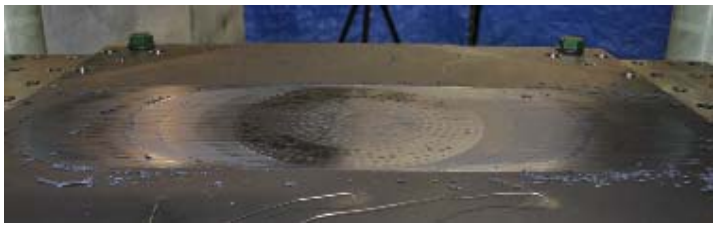


(d) すべり板表面　1 セット目後

(e) すべり材下面　3 セット目後

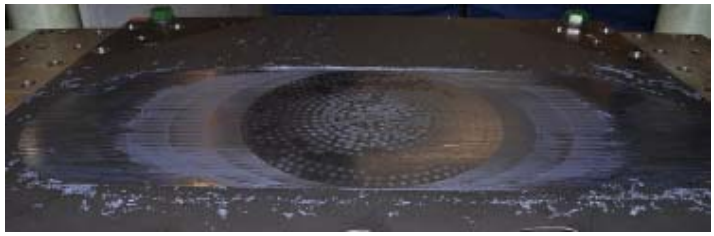
(f) すべり板表面　3 セット目後

(g) すべり材下面　6 セット目後



(h) すべり板表面　6 セット目後

(j) すべり材下面　10 セット目後



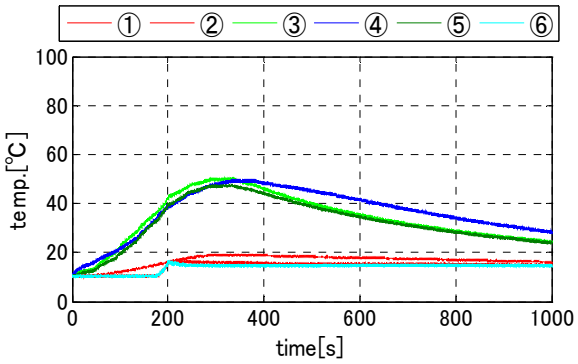
(k) すべり板表面　10 セット目後

写真 1.3.5-6　#2 試験体　すべり材下面、すべり板表面状況写真

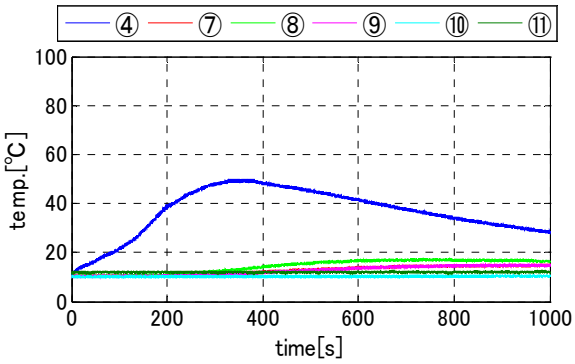
b) 温度特性

図 1.3.5-25 に 1、3、6、10 セット目の温度時刻歴を示す。左図に計測点①~⑥、右図に計測点④、⑦~⑪を示した。#1 試験体に比べ加振立ち上がり時の温度上昇勾配が小さく、加振時の温度上昇は 1 セット目を除き計測点③、⑤が計測点④に先行し最高温度は計測点③、④、⑤がほぼ同等となる。また、計測点②、⑥に時刻 180 秒～200 秒程度で温度の急激な上昇が見られる。この時刻は振幅±250mm、±300mm の加振時刻に相当する。計測点位置と加振振幅によるすべり子の移動とを考えると、高温となったすべり材との接触によりすべり板に熱が拡散するメカニズムが想定できる。加振終了後の温度低下の様子は#1 試験体と同様である。

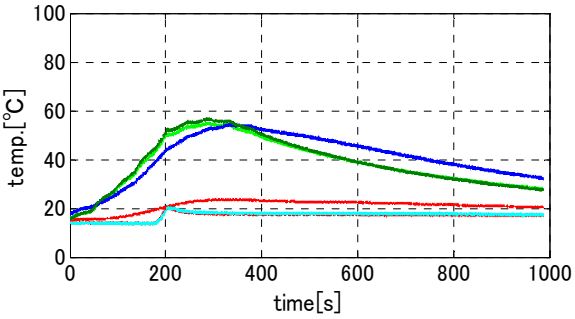
図 1.3.5-26 に計測点①および④について、各セットにおける最低温度、最高温度のセット間の変動を示す。両計測点とも最低温度、最高温度ともセットを追うごとに若干上昇する。#1 試験体と比較すると、計測点④における 1～3 セット目の温度上昇（最低温度と最高温度の差）がやや小さいが、その後のセットではほぼ同様の性状を示している。



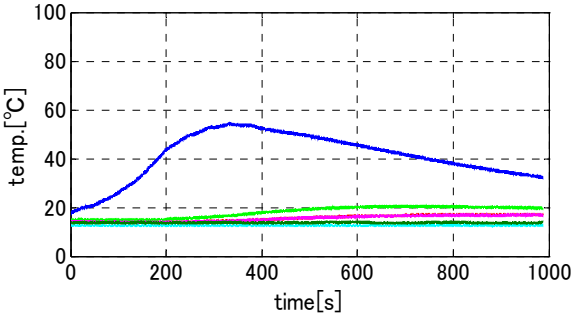
(a) 1 セット目①～⑥計測点



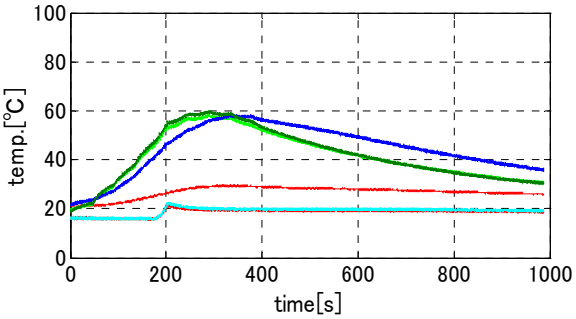
(b) 1 セット目④、⑦～⑪計測点



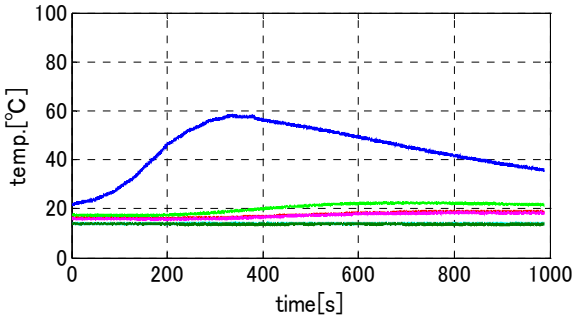
(c) 3 セット目①～⑥計測点



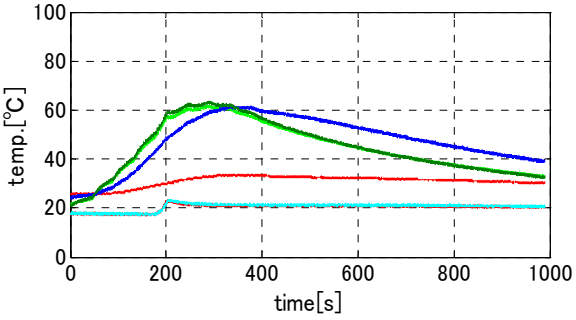
(d) 3 セット目④、⑦～⑪計測点



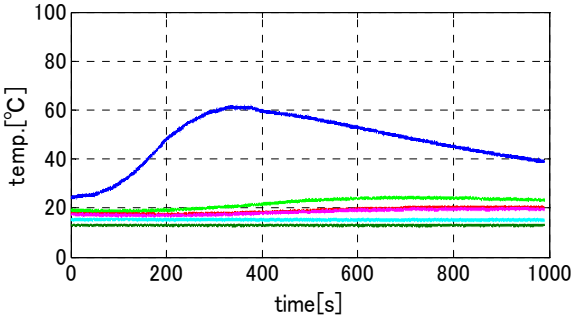
(e) 6 セット目①～⑥計測点



(f) 6 セット目④、⑦～⑪計測点



(g) 10 セット目①～⑥計測点



(h) 10 セット目④、⑦～⑪計測点

図 1.3.5-25　#2 試験体　各計測点の温度時刻歴

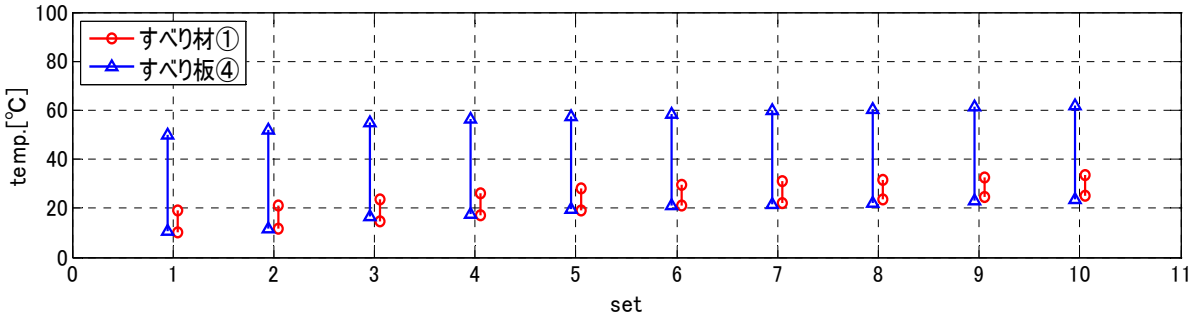


図 1.3.5-26　#2 試験体　①、④計測点における各セットの最低、最高温度

c) 膜厚

図 1.3.5-27 に各測定点の膜厚測定結果を示す。#1 試験体と同様、膜厚に有意な変化が生じているとは判断できず、管理値 20μm を下回ることもなかった。

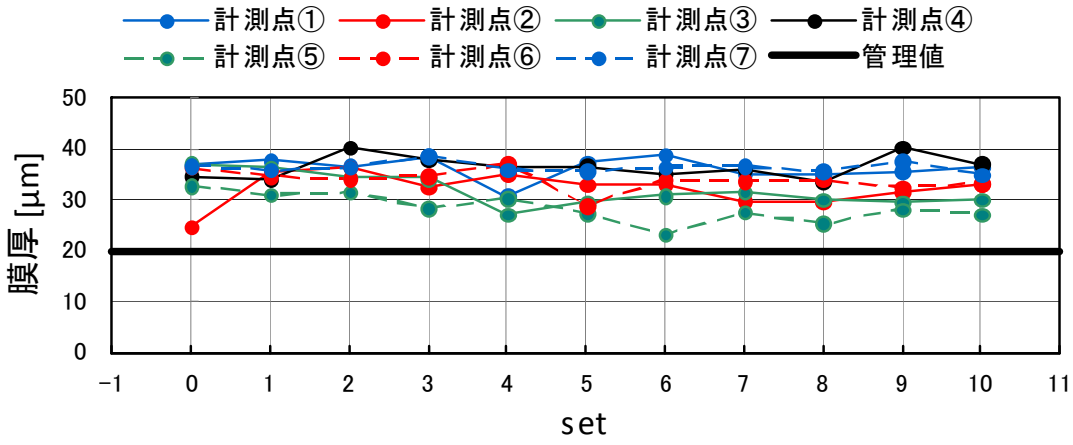


図 1.3.5-27　#2 試験体　膜厚測定結果

3) #3 試験体

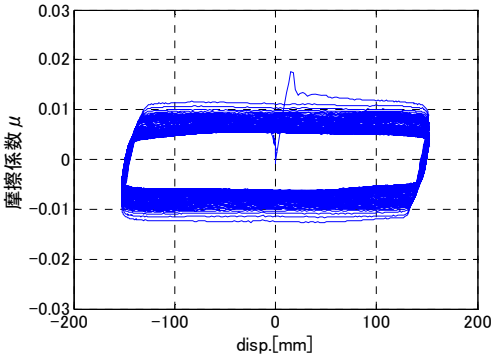
#3 試験体の実験条件はすべり材面圧：30MPa、水平変位振幅：±150mm（定常）、加振周期：4 秒、加振波形：正弦波、最大速度：236mm/s、1 セットのサイクル数：84、1 セットの累積変位：50.4m、加振後のインターバル：原則 30 分、繰り返しセット数：10 である。

a) 摩擦係数特性

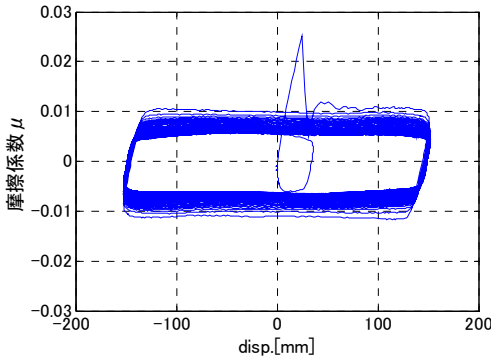
図 1.3.5-28 に 1､3､6､10 セット目の水平方向の摩擦係数－変形関係を示す。また、図 1.3.5-29 には 1､3､6､10 セット目の 0 変位切片における動摩擦係数の変化を示す。図 1.3.5-29 においては同一サイクルの正負平均値を示した。1 セット目と 3 セット目の比較では、セット中盤までの摩擦係数が 1 セット目で大きい。この時点では、面圧依存特性の影響で、#1 試験体に比べ摩擦係数はやや低い。6 セット目、10 セット目ではセット数が増すにつれ摩擦係数の増加が見られる。10 セット目では 1 セット目の 1.6 倍程度である。後述するように、この試験体では 6 セット目からすべり板コーティングの剥離が顕著となっており、摩擦係数の増加の増加はこれに対応するものであると考えられる。加振開始時における静摩擦力の立ち上がりは各セットで見られ、特に 3 セット目、6 セット目で顕著である。

図 1.3.5-30 各セットにおける最大、最小動摩擦係数の変動を示す。図中には平均摩擦係数を併せて示した。図中▼で示したのは定常振幅±150mm に対する基準値である。また、各セットにおける吸収エネルギーを図 1.3.5-31 に示す。上述のように、各セットの最大摩擦係数は最初の 1 セット目でやや大きく、2～4 セット目で一旦低下した後、5 セット目以降上昇に転じる。最小動摩擦係数も 5 セット目以降上昇する。平均摩擦係数は最小動摩擦係数をやや上回り、セット間の変動は最小動摩擦係数と同様である。実験条件（30MPa、236mm/s）による基準値に対し、4 セット目までは 12～15%ほど小さく、7 セット目以降は大きくなる。10 セット目の吸収エネルギーは初期のセットの 1.5 倍程度に増大した。

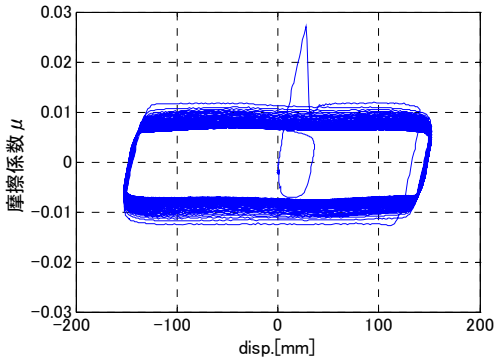
写真 1.3.5-7 に加振前および 1､3､6､10 セット目加振後のすべり材下面およびすべり板の状況を示す。6 セット目加振後のすべり板面にはコーティング剥離による光沢面が確認でき、10 セット目加振後にはその面積が拡大した。すべり材下面では、#1､#2 試験体に比べ固体潤滑剤の脱落が甚だしく、基盤となる PTFE 面が全面にわたり露出した。



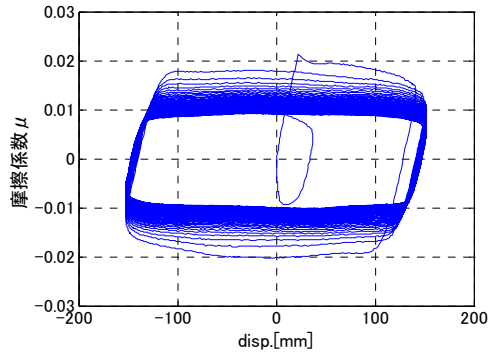
(a) 1 セット目



(b) 3 セット目

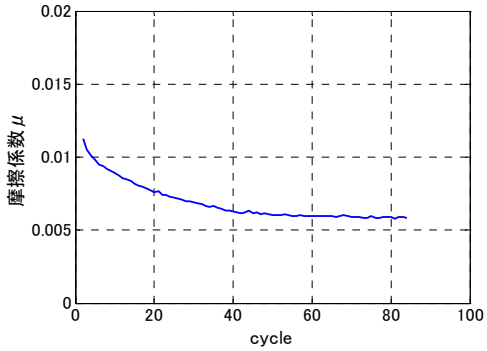


(c) 6 セット目

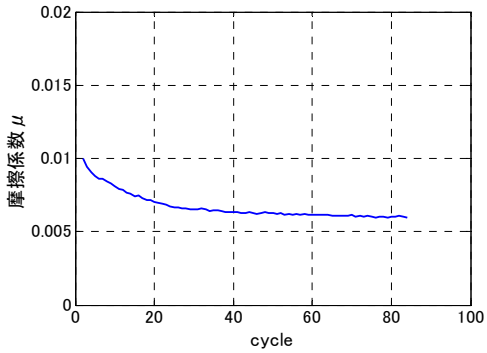


(d) 10 セット目

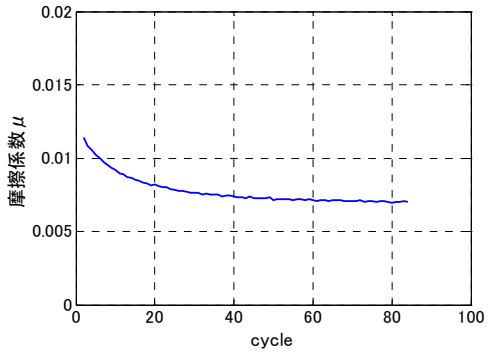
図 1.3.5-28　#3 試験体　水平方向摩擦係数－変形関係



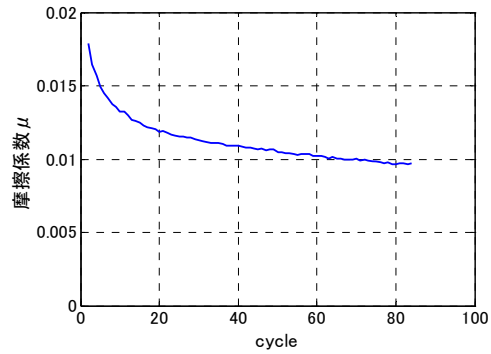
(a) 1 セット目



(b) 3 セット目



(c) 6 セット目



(d) 10 セット目

図 1.3.5-29　#3 試験体　0 変位切片における動摩擦係数の変化

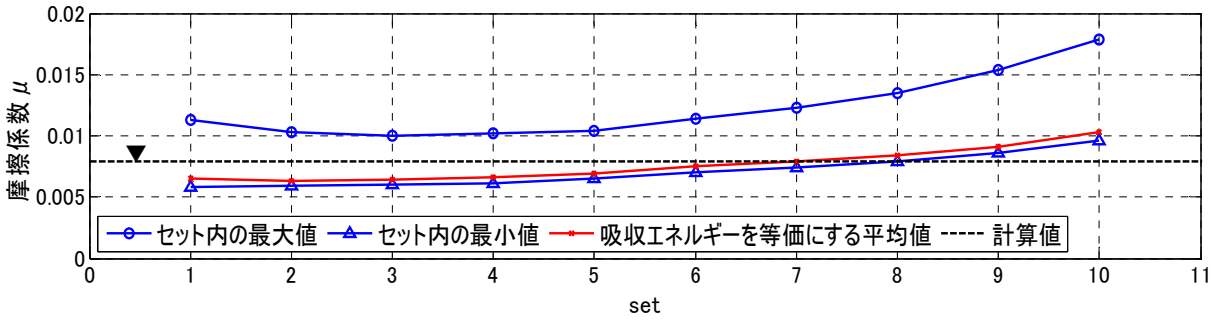


図 1.3.5-30　#3 試験体　各セットにおける最大、最小動摩擦係数

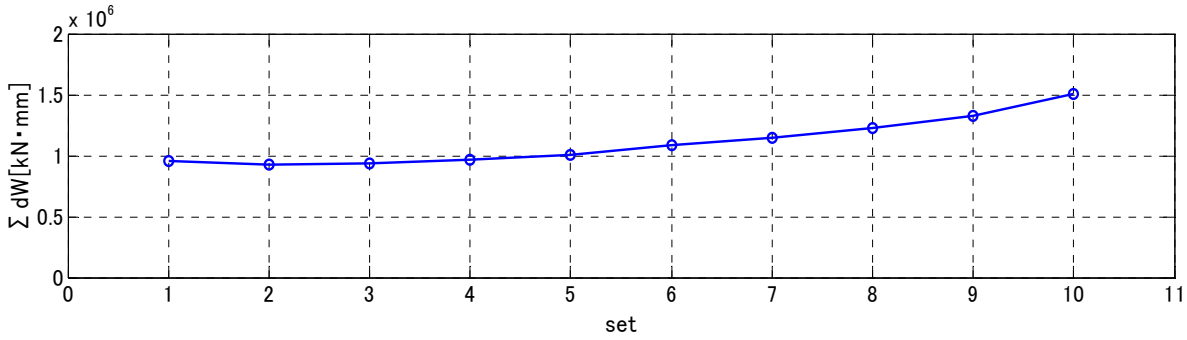


図 1.3.5-31　#3 試験体　各セットの吸収エネルギー

(a) すべり材下面　実験前

(b) すべり板表面　実験前

(c) すべり材下面　1 セット目後

(d) すべり板表面　1 セット目後

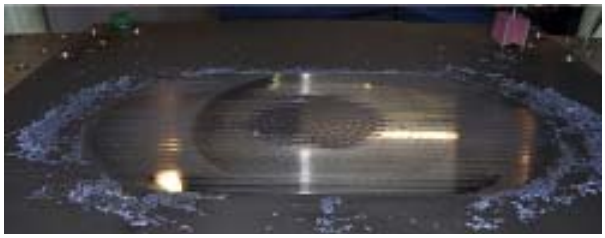
(e) すべり材下面　3 セット目後

(f) すべり板表面　3 セット目後

(g) すべり材下面　6 セット目後

(h) すべり板表面　6 セット目後

(j) すべり材下面　10 セット目後



(k) すべり板表面　10 セット目後

写真 1.3.5-7　#3 試験体　すべり材下面、すべり板表面状況写真

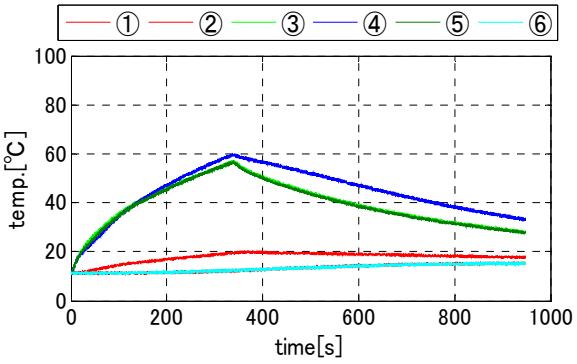
b) 温度特性

図 1.3.5-32 に 1、3、6、10 セット目の温度時刻歴を示す。左図に計測点①~⑥、右図に計測点④、⑦~⑪を示した。すべり板各点の相対的な温度上昇傾向は#1 試験体に相似し、計測点③～⑤に比べその他の点は温度上昇量が小さい。計測点⑦~⑨では加力の後半から若干の温度上昇が見られる。10 セット目では、計測点④で 100℃、計測点①で 40℃に至った。

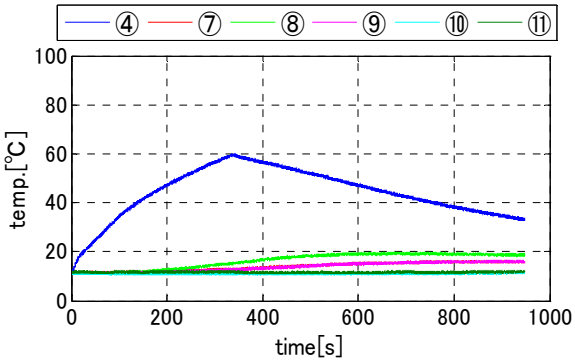
図 1.3.5-33 に計測点①および④について、各セットにおける最低温度、最高温度のセット間の変動を示す。摩擦係数の増加が確認される 5 セット目以降で、最低温度と最高温度の差が拡大する。

c) 膜厚

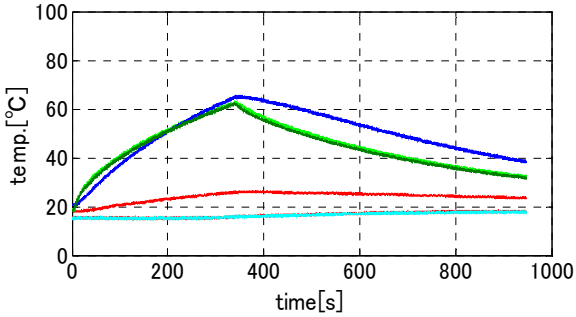
図 1.3.5-34 に各測定点の膜厚測定結果を示す。光沢面が確認できるようになった 6 セット目以降で、計測点③および⑤が管理値 20μm を下回る。コーティング剥離による膜厚減少およびその位置が数値的に確認できたことになる。図示していないが、各セット後に新たに生じた光沢面位置を測定すると 10μm を下回る数値となり、後続のセット後に再度同位置を測定すると 10μm 以上の値をしめすという傾向が見られた。



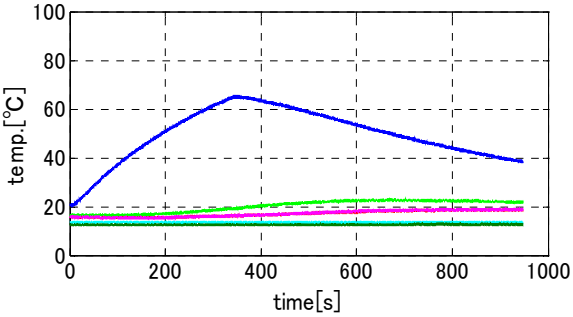
(a) 1 セット目①～⑥計測点



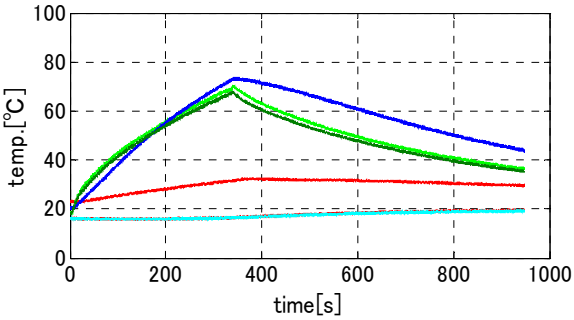
(b) 1 セット目④、⑦～⑪計測点



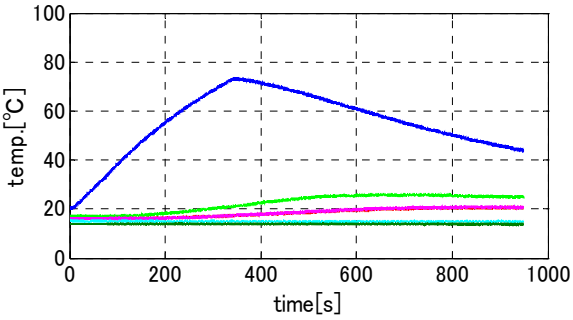
(c) 3 セット目①～⑥計測点



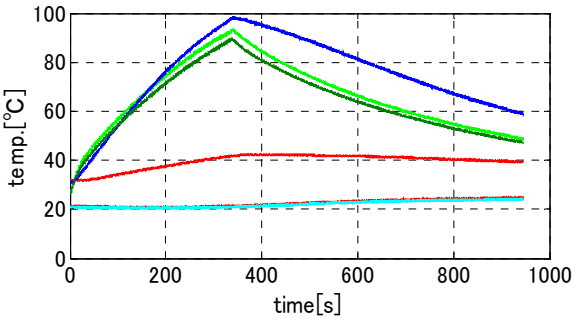
(d) 3 セット目④、⑦～⑪計測点



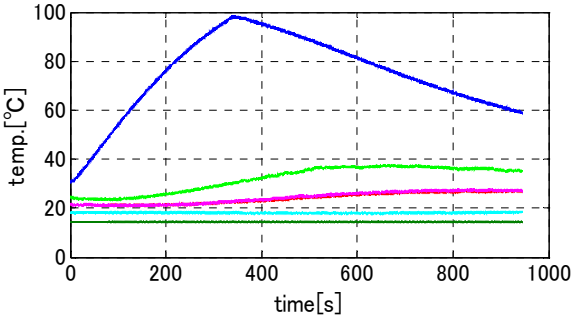
(e) 6 セット目①～⑥計測点



(f) 6 セット目④、⑦～⑪計測点



(g) 10 セット目①～⑥計測点



(h) 10 セット目④、⑦～⑪計測点

図 1.3.5-32　#3 試験体　各計測点の温度時刻歴

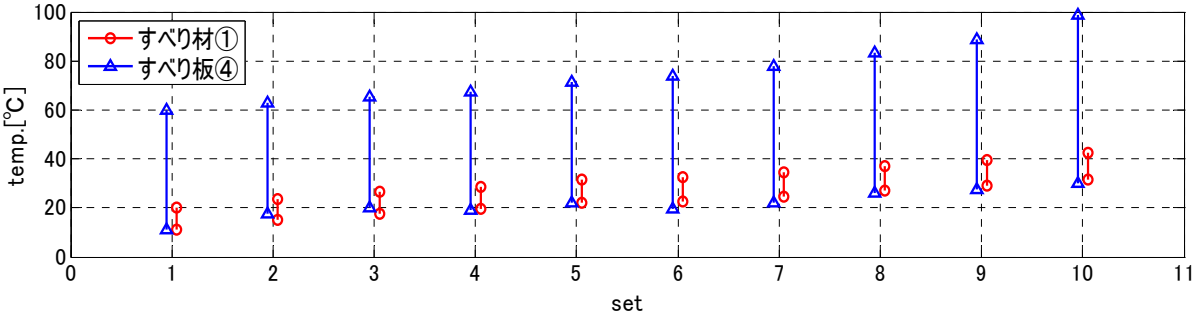


図 1.3.5-33　#3 試験体　①、④計測点における各セットの最低、最高温度

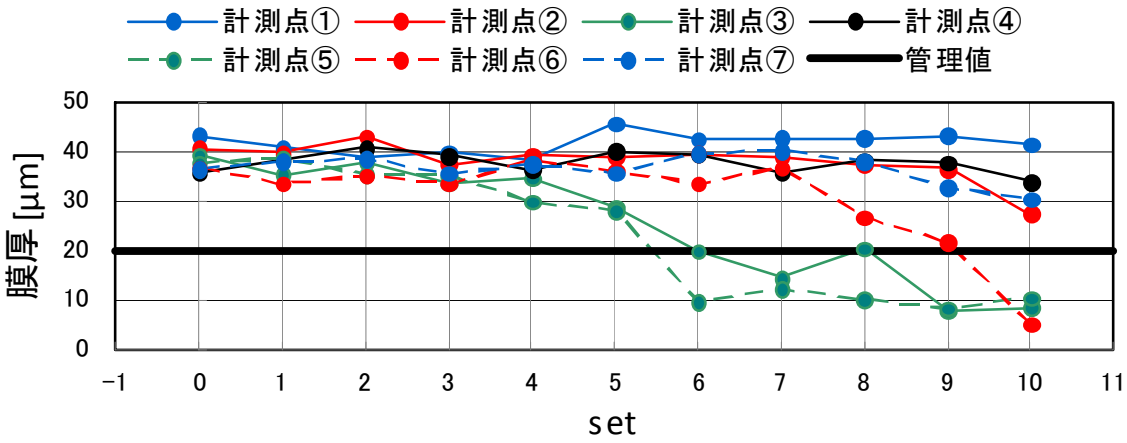


図 1.3.5-34　#3 試験体　膜厚測定結果

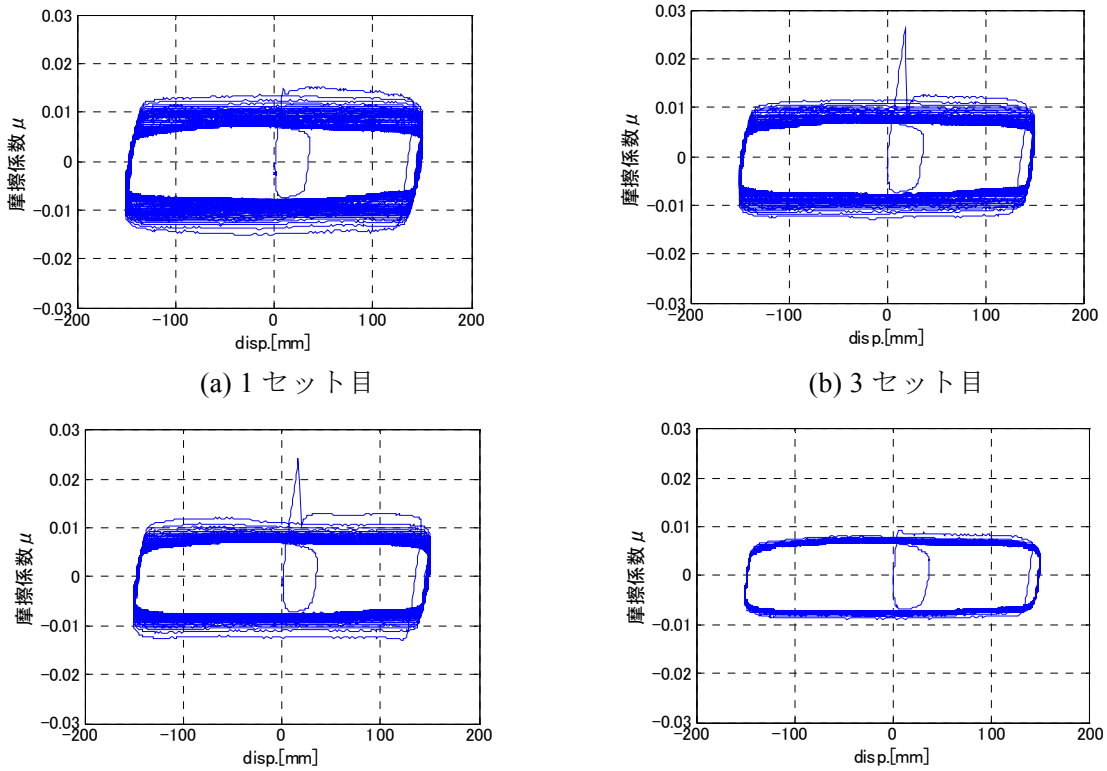
4) #4 試験体

#4 試験体の実験条件はすべり材面圧：20MPa、水平変位振幅：±150mm（定常）、加振周期：4 秒、加振波形：正弦波、最大速度：236mm/s、1 セットのサイクル数：84、1 セットの累積変位：50.4m、加振後のインターバル：（～7 セット目）11 分、（8 セット目～）3 分、繰り返しセット数：10 である。

a) 摩擦係数特性

図 1.3.5-35 に 1､3､6､10 セット目の水平方向の摩擦係数－変形関係を示す。また、図 1.3.5-36 には 1､3､6､10 セット目の 0 変位切片における動摩擦係数の変化を示す。1､3 セット目では、#1 試験体とほとんど相違は見られない。6､10 セット目では、加振開始後の数サイクルにおける摩擦係数の低下が緩和される。静摩擦力の立ち上がりはインターバルを 11 分とした 2～7 セット目で見られたが、1 セット目およびインターバルを 3 分とした 8 セット目～10 セット目では見られなかった。

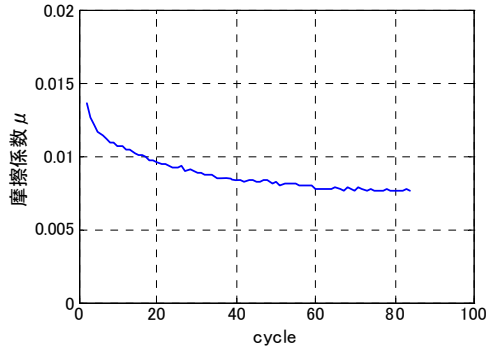
図 1.3.5-37 に各セットにおける最大、最小動摩擦係数の変動を示す。図中には平均摩擦係数を併せて示した。図中▼で示したのは定常振幅±150mm に対する基準値である。また、各セットにおける吸収エネルギーを図 1.3.5-40 に示す。1～7 セット目では、#1 試験体とほとんど相違は見られず、8～10 セット目では、最大動摩擦係数、吸収エネルギーが低下する。



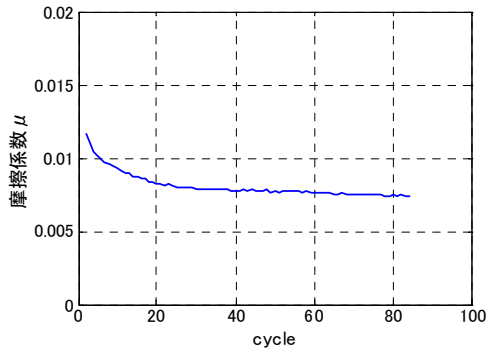
(a) 1 セット目　(b) 3 セット目

(c) 6 セット目　(d) 10 セット目

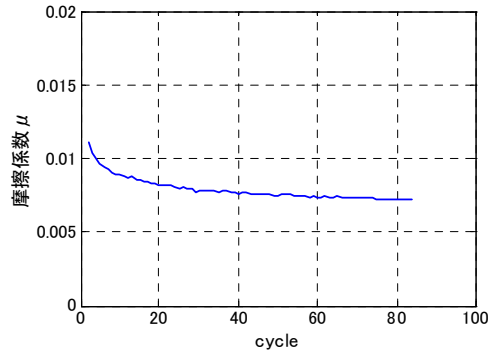
図 1.3.5-35　#4 試験体　水平方向摩擦係数－変形関係



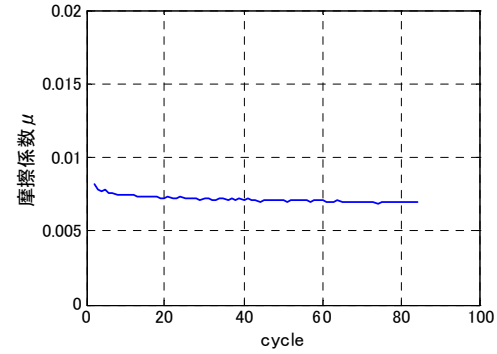
(a) 1 セット目



(b) 3 セット目



(c) 6 セット目



(d) 10 セット目

図 1.3.5-36　#4 試験体　0 変位切片における動摩擦係数の変化

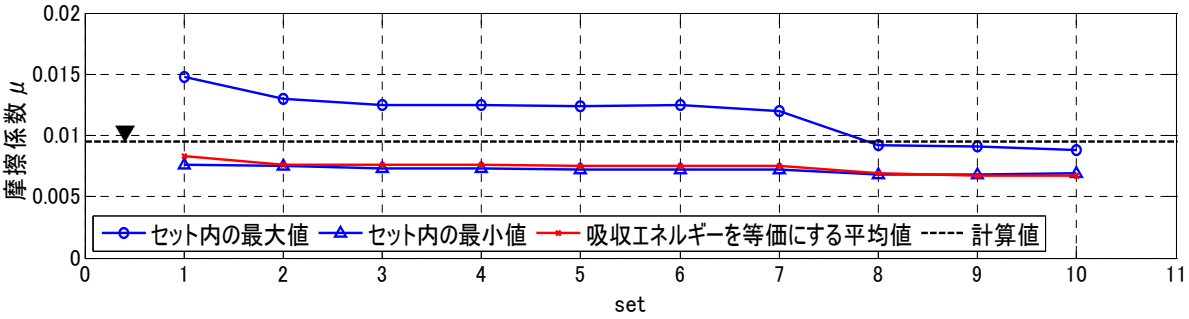


図 1.3.5-37　#4 試験体　各セットにおける最大、最小動摩擦係数

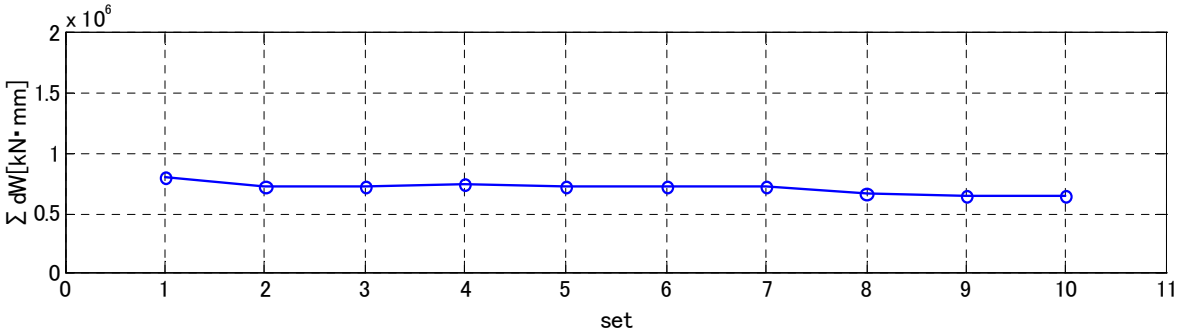


図 1.3.5-38　#4 試験体　各セットの吸収エネルギー

写真 1.3.5-8 に加振前および 10 セット目加振後のすべり材下面およびすべり板の状況を示す。10 セット目加振後においてもすべり板に異常は見られない。すべり材固体潤滑剤の脱落は、#1 試験体と明確な違いは観察されなかった。

(a) すべり材下面　実験前

(b) すべり板表面　実験前

(c) すべり材下面　10 セット目後

(d) すべり板表面　10 セット目後

写真 1.3.5-8　#4 試験体　すべり材下面、すべり板表面状況写真

b) 温度特性

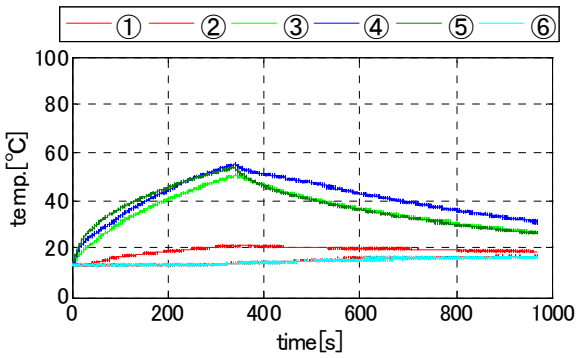
図 1.3.5-39 に 1､3､6､10 セット目の温度時刻歴を示す｡左図に計測点①~⑥､右図に計測点④､⑦~⑪を示した。すべり材とすべり面を離間させず、かつインターバル時間が短いため、各点とも#1 試験体の同一セットに比べ、開始時点の温度が上昇する。1､3 セット目では#1 試験体と同程度の温度上昇量を示すが、6､10 セット目では温度上昇量が小さく、特に、加振開始後の数サイクルにおける温度上昇に差が見られる。また、この試験体では、計測点⑤の温度が計測点③より相対的にやや高く、温度分布に偏りが生じていたと思われる。6 セット目までは、計測点⑦~⑨に温度上昇が見られるが、10 セット目では見られなくなった。

6､10 セット目におけるセット開始時の摩擦係数低下が緩和される傾向と､6､10 セット目において加振開始後の数サイクルにおける温度上昇が小さくなる傾向に対応関係が求められる可能性がある。

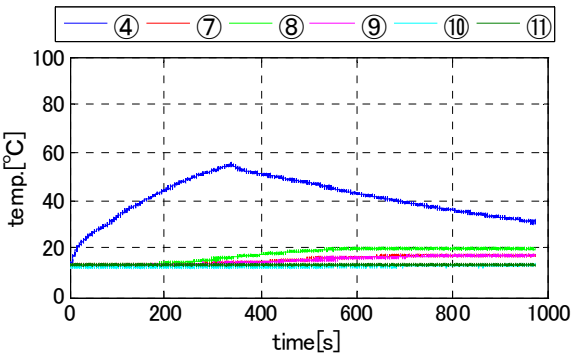
図 1.3.5-40 に計測点①および④について各セットにおける最低温度、最高温度のセット間の変動を示す。両計測点におけるセット間の温度上昇が、#1 試験体に比べ明瞭である。すべり板温度④については、4 セット目から 7 セット目間で温度上昇が頭打ちとなる傾向が見られる。8~10 セット目では、最低、最高温度の上昇とともに、セット内の温度上昇量（最低温度と最高温度の差）が小さくなる傾向が見られる。

c) 膜厚

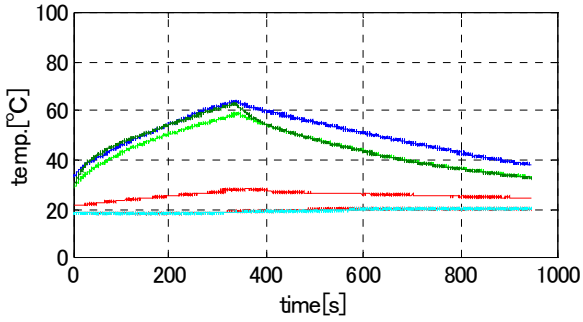
1 セット目開始前および 10 セット目終了時点の膜厚測定結果を図 1.3.5-41 に示す。各計測点の値にほとんど変動は見られない。また、いずれも管理値 20μm を下回ることはない。



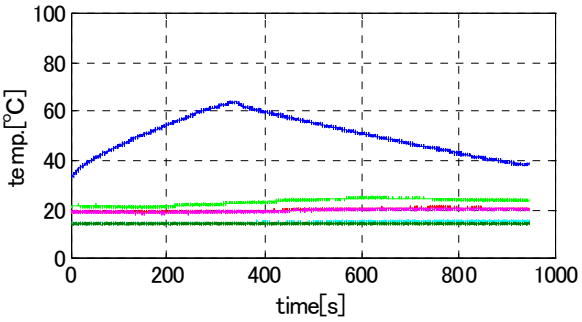
(a) 1 セット目①～⑥計測点



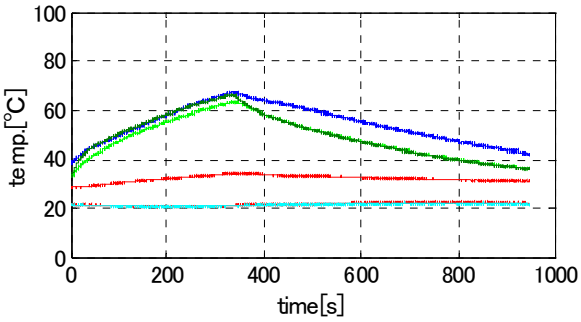
(b) 1 セット目④、⑦～⑪計測点



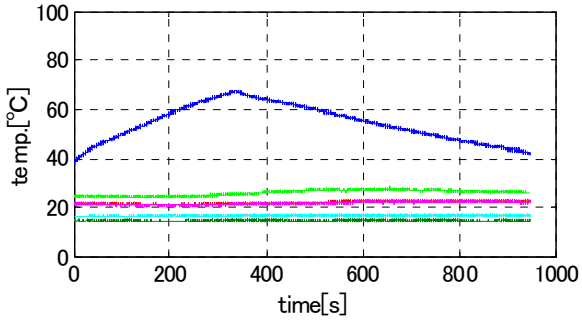
(c) 3 セット目①～⑥計測点



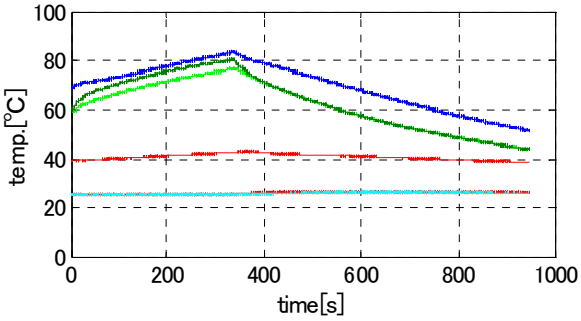
(d) 3 セット目④、⑦～⑪計測点



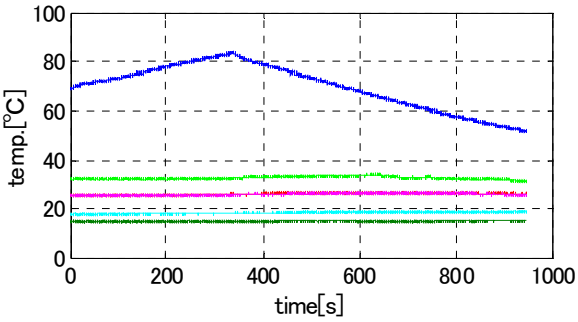
(e) 6 セット目①～⑥計測点



(f) 6 セット目④、⑦～⑪計測点



(g) 10 セット目①～⑥計測点



(h) 10 セット目④、⑦～⑪計測点

図 1.3.5-39　#4 試験体　各計測点の温度時刻歴

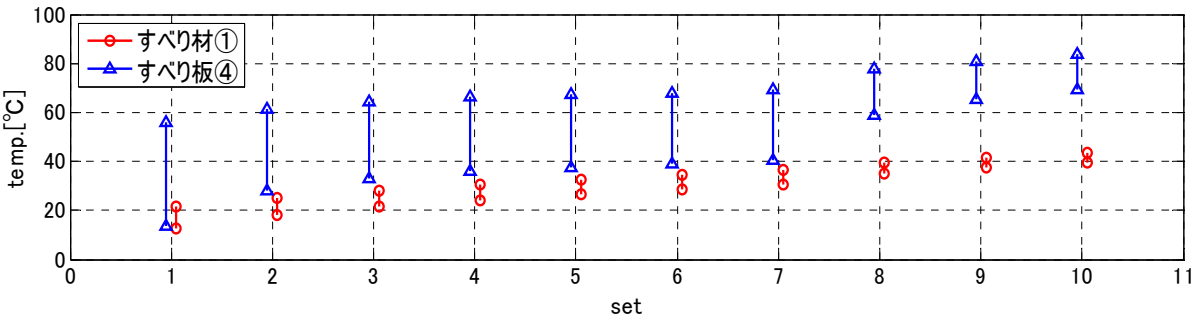


図 1.3.5-40　#4 試験体　①、④計測点における各セットの最低、最高温度

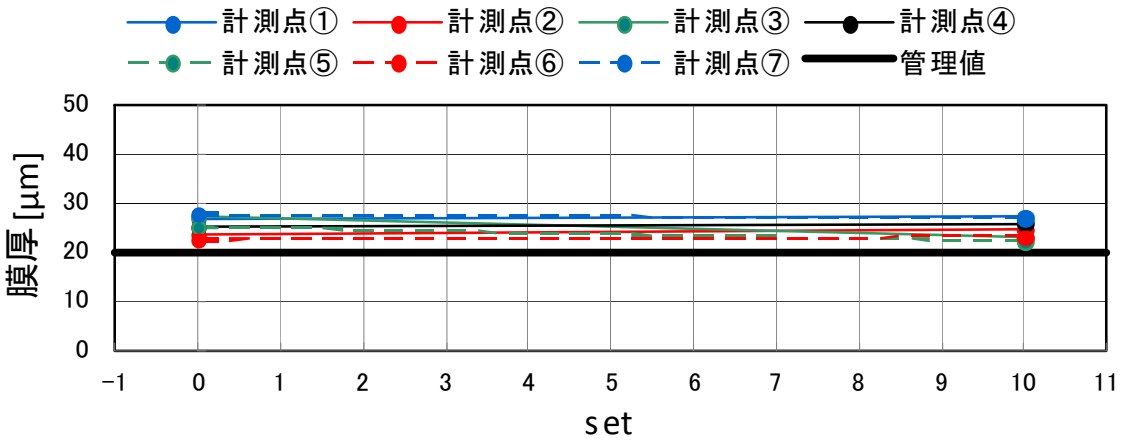


図 1.3.5-41　#3 試験体　膜厚測定結果

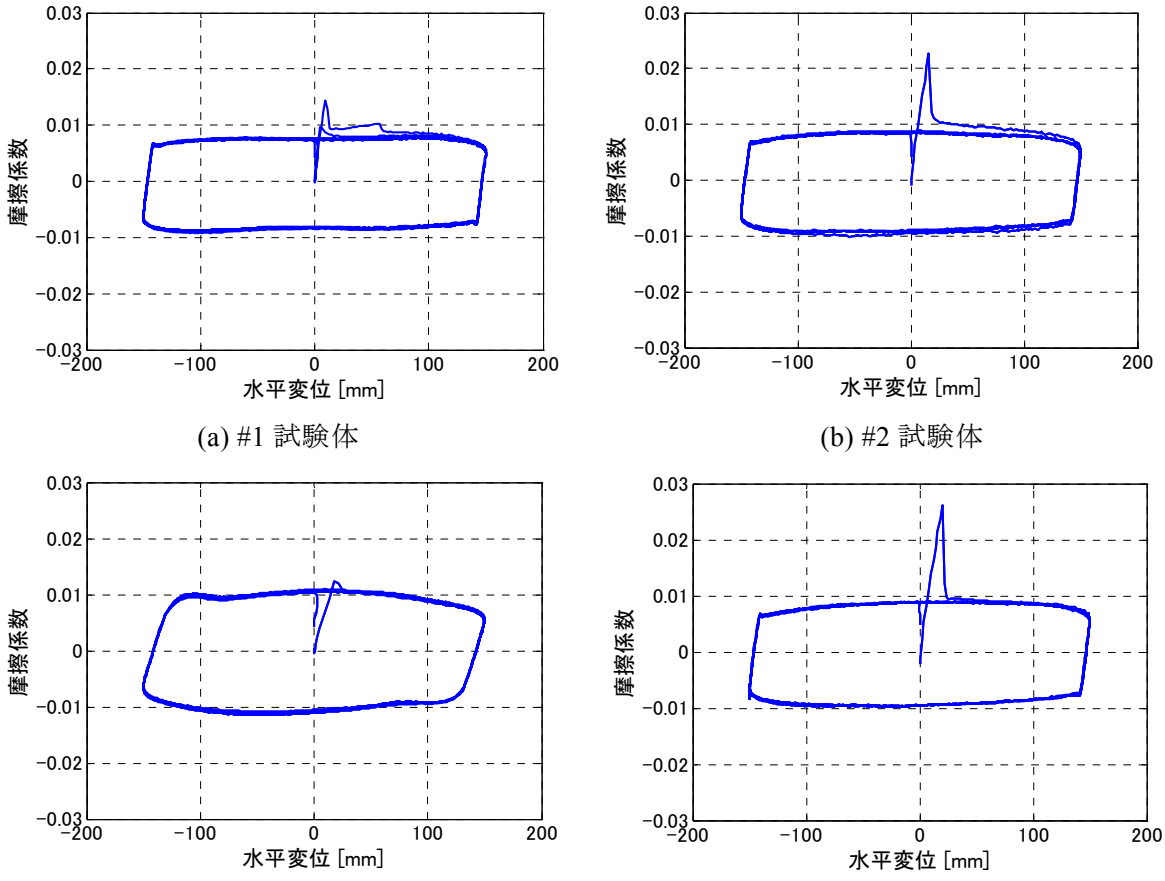
(3) 繰り返し実験後の基本特性試験

繰り返し実験後の試験体における特性変化の有無を製品試験における水平特性試験と同一条件で確認するために、基本特性試験を実施した。試験条件は 4 体とも、すべり材面圧：20MPa、水平変位振幅：±150mm（定常）、加振周期：62.8 秒、加振波形：正弦波、最大速度：15mm/s、サイクル数：4 である。3 サイクル目の特性を試験値として抽出した。

試験結果を図 1.3.5-42 および表 1.3.5-8 に示す。#3 試験体ではループ形状にやや歪みが生じているが、検査値にほとんど変化はない。#2、#4 試験体では検査値にもループ形状にもほとんど変化は見られない。#1 試験体では、#2、#4 試験体で見られる変位 0 付近の摩擦係数上昇が見られず、検査値の数値は相対的に小さいが、許容値として与えられている±30%を逸脱していない。

以上から、繰り返し実験においてすべり板摩擦面のコーティング剥離が見られた#3 試験体を含め、製品試験と同一条件の基本特性試験における検査値上は特性変化が生じたとは認められない結果となった。

なお、#1、#2、#4 試験体で静摩擦係数の立ち上がりが見られるのは、製品試験における水平特性試験で通常実施する試験前のなじみ運転を行わなかったためである。



(a) #1 試験体　(b) #2 試験体

(c) #3 試験体　(d) #4 試験体

図 1.3.5-42　繰り返し実験後の基本特性試験結果

表 1.3.5-8　繰り返し実験後の基本特性試験結果

試験体No	試験条件					計測値		摩擦係数基準値 μ_0	μ/μ_0	μ/μ_0 許容値	判定
	すべり材面圧 σ (MPa)	鉛直荷重 Fv (kN)	振動数 f (Hz)	振幅 δ (mm)	最大速度 V (mm/s)	水平荷重 Fh (kN)	摩擦係数 μ				
♯1	20	1923	0.0159	±150	15	15.0	0.008	0.009	1.13	0.7~1.3	異常なし
♯2	20	1923	0.0159	±150	15	16.9	0.009		1.00		異常なし
♯3	20	1923	0.0159	±150	15	20.6	0.011		0.82		異常なし
♯4	20	1923	0.0159	±150	15	17.7	0.009		1.00		異常なし

(4) 考察

繰り返し特性に影響を与える要因について考察する。

1) 累積変形量

図 1.3.5-43 に#1～#4 各試験体の累積変形量に対する摩擦係数の変動を示す。摩擦係数は面圧 20MPa、速度 15mm/s に補正して表示した。累積変形量は全体変形を積算して求めた。図中には比較のため、メーカー提供の既往評価データを示した。

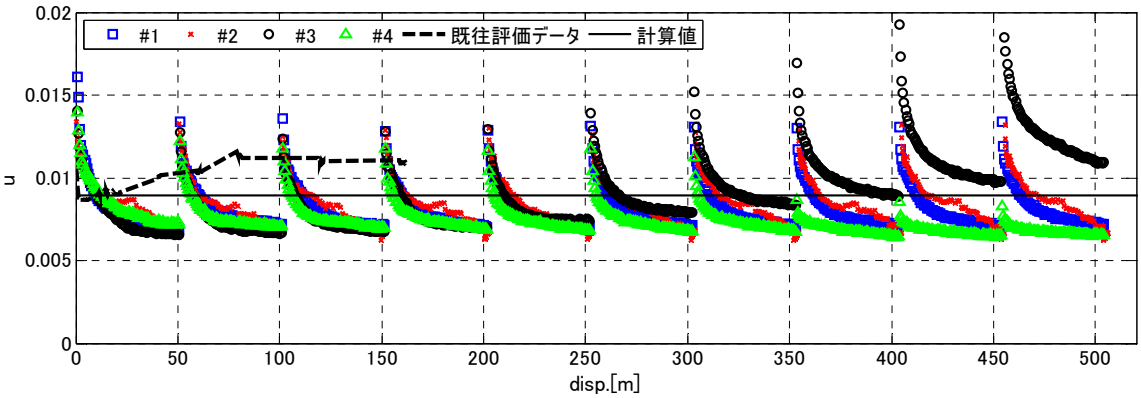


図 1.3.5-43　累積変形量と摩擦係数

繰り返し実験による累積変形量は、既往評価データの評価範囲(～160m)を大きく超えている。本調査においては、長周期地震動 1 波分の応答を想定したセット毎に摩擦係数の有意な低下が見られ、インターバル時間を挟んだ次セットの開始時には摩擦係数の復帰が見られるのが特徴であり、既往評価データを用いた評価では、その傾向を表現することはできない。また、本調査におけるセット間の相対的な変化は乏しく、累積変形量に対する既往評価データの変動トレンドは現れていない。

現状、繰り返しに対する摩擦係数の変動が、変動幅の上下限の値を用いたバラツキとして扱われていることを考慮し、既往評価データと実験データの上下限値を、実験条件が面圧 20MPa の試験体（#1、2、4）を対象に比較すると、各セットの開始時における摩擦係数の上限値は既往評価データの上限値をやや上回り、終盤における摩擦係数の下限値は既往評価データの下限値を下回る。

面圧 30MPa の#3 試験体では、累積変形量 200m（5 セット目）程度から摩擦係数の上昇傾向が観察される。350m（8 セット目）以降、上昇傾向は顕著となる。面圧が 20MPa を超える場合には、この累積変形量領域における摩擦係数変動を考慮する必要がある。

2) 摺動サイクル数

図 1.3.5-44 に摺動サイクル数に対する摩擦係数の変動を示す。前掲の累積変形量に対する図と同様に、既往評価データを用いた評価で、今般実験の傾向を表現することはできない。

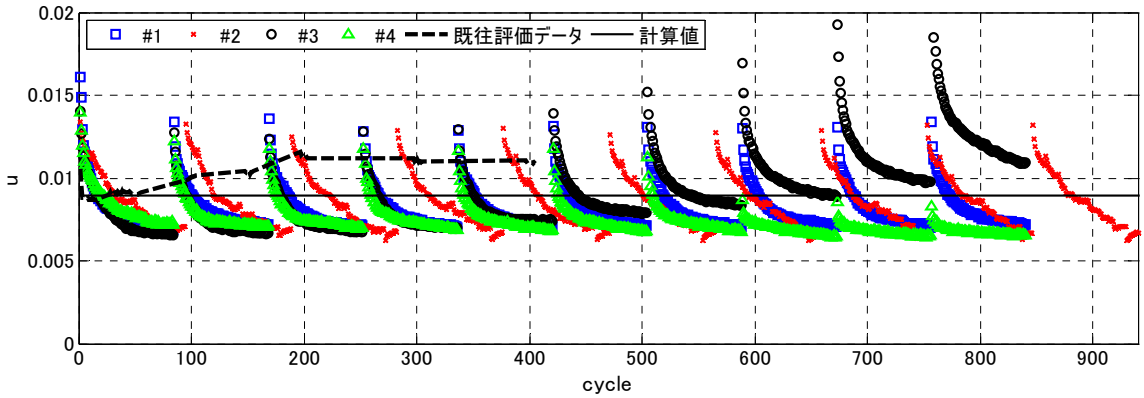


図 1.3.5-44　摺動サイクル数と摩擦係数

3) 温度

図 1.3.5-45～46 に温度に対する摩擦係数の変動を示す。図 1.3.5-45 は縦軸に摩擦係数を採り、横軸にはそれぞれ、すべり板中央（測点④）温度、すべり材中心（測点①）温度、すべり板のすべり子滑動領域（測点③～⑤）平均温度を採った。図 1.3.5-46 は縦軸に各セット開始時の摩擦係数に対する各サイクルの摩擦係数の低下分（以下、摩擦係数低下量）を採り、横軸にはそれぞれ、すべり板中央（測点④）温度の各セット開始時点からの上昇分（以下単に、温度上昇）、すべり材中心（測点①）の温度上昇、すべり板のすべり子滑動領域（測点③～⑤）の温度上昇を採った。図は、摩擦係数の顕著な上昇が見られた#3 試験体の 7 セット目以降と、インターバルが短く各セット開始時点の温度が高温状態となった#4 試験体の 8 セット目以降を除く、4 試験体の全セットについて重ね書きした。

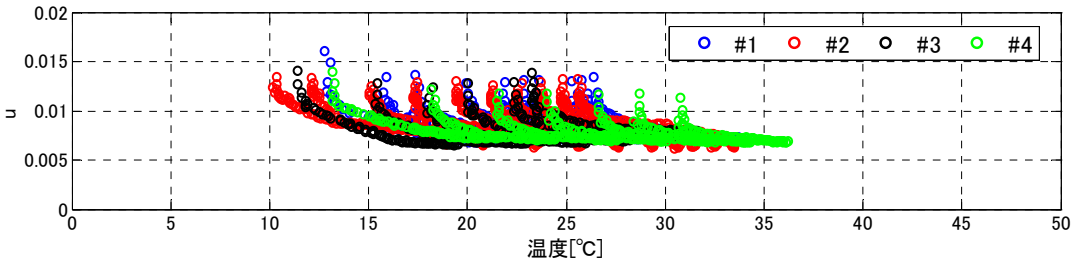
図 1.3.5-45 からは、本実験においては、セット開始直後の急激な低下を除けば、摩擦係数の変動とすべり板中央（計測点④）温度が比較的ばらつきの少ない関係を有していることがわかる。図 1.3.5-45 (b)から摩擦係数 μ と計測点④温度 T_4 の近似式を求めると、式(1.3.5-3)となる。一方、式(1.3.5-3)で無視したセット開始時（1 サイクル目）の摩擦係数 μ_0（各セットの最大動摩擦係数）と計測点④温度 T_4 の関係は式(1.3.5-4)で表現できる。

図 1.3.5-46 からは、#1 試験体の 1 セット目を除くと、本実験においては、摩擦係数低下量とすべり板温度上昇の間に一定の関係を見出すことができる。ここでは図 1.3.5-46 (a)より、摩擦係数低下量$\Delta\mu$ と計測点④の温度上昇ΔT_4 の関係を式(1.3.5-5)で近似できる。

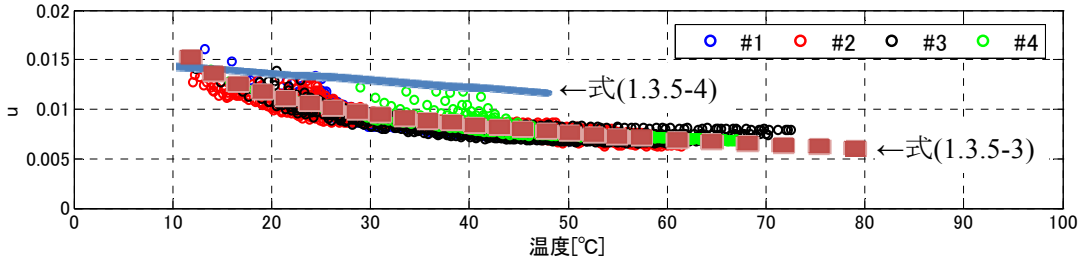
$$\mu = 0.07 \cdot (T_4 - 9)^{-0.045} - 0.0516 \tag{1.3.5-3}$$

$$\mu_0 = -7.5 \times 10^{-5} \cdot T_4 + 0.0145 \tag{1.3.5-4}$$

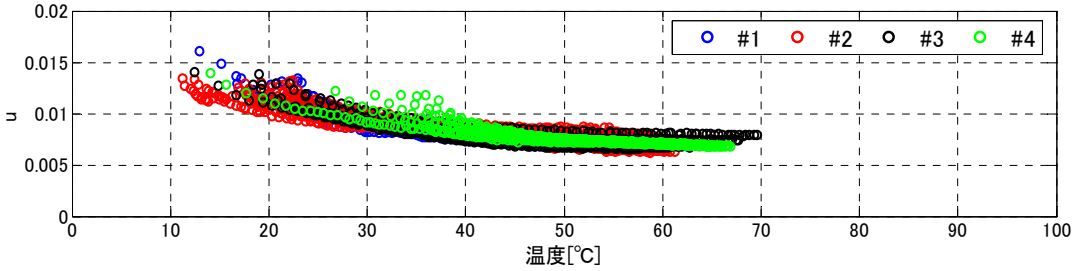
$$\Delta\mu = 0.03 \cdot (\Delta T_4 + 1)^{-0.06} - 0.03 \tag{1.3.5-5}$$



(a) すべり材温度（測定点①）と摩擦係数

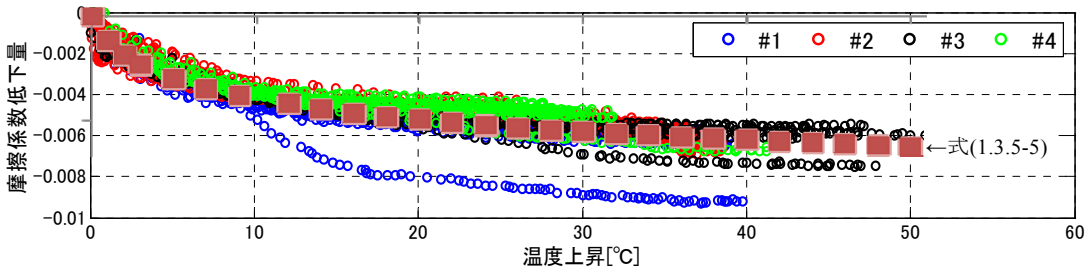


(b) すべり板温度（測定点④）と摩擦係数

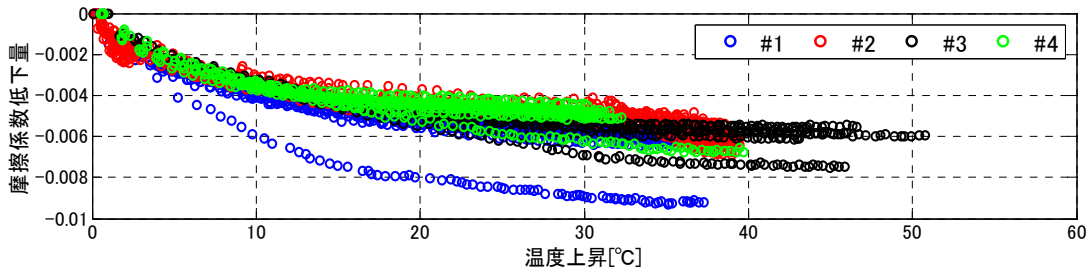


(c) すべり板温度（測定点③～⑤の平均）と摩擦係数

図 1.3.5-45　温度に対する摩擦係数の変動



(a) すべり板温度上昇（測定点④）と摩擦係数低下量

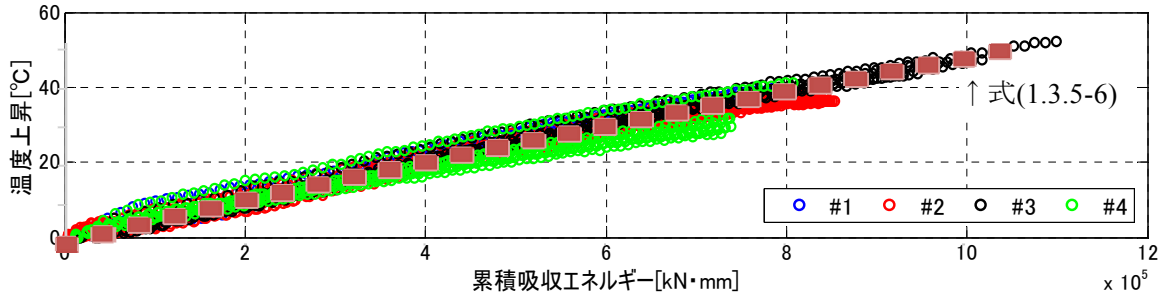


(b) すべり板温度上昇（測定点③～⑤の平均）と摩擦係数低下量

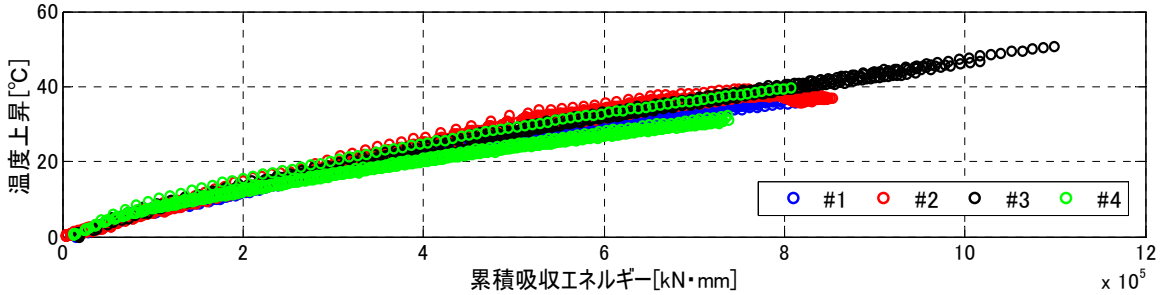
図 1.3.5-46　すべり板温度変動に対する摩擦係数の変動

4) 吸収エネルギーと温度上昇の相関

図 1.3.5-47 に各セットにおける吸収エネルギーと温度上昇の相関を示す。(a)図より各セットにおける吸収エネルギーE_dと計測点④の温度上昇ΔT_4の関係は式(1.3.5-6)で表すことができる。



(a) 累積吸収エネルギーとすべり板温度上昇（測定点④）



(b) 累積吸収エネルギーとすべり板温度上昇（測定点③～⑤の平均）

図 1.3.5-47　累積吸収エネルギーとすべり板温度上昇

$$\Delta T_4 = 0.00019 \cdot E_d^{\,0.9} \tag{1.3.5-6}$$

摩擦係数と温度の関係を式(1.3.5-4)、(1.3.5-5)の組合せで表現することにし、式(1.3.5-6) で加振中の温度上昇を累積吸収エネルギーに置き換えると、高面圧の繰り返しに伴う摩擦係数の顕著な上昇が生じたケース（#3 試験体の 7 セット目以降）と、すべり板温度が高温状態から加振が開始されたケース（#4 試験体の 8 セット目以降）を除く、本調査の実験結果を対象とした動摩擦係数 μ の繰り返し特性依存式が式(1.3.5-7)のように提示できる。式中 T は初期のすべり板温度であり、環境温度に代表される。

$$\left.\begin{aligned} \mu &= \mu_0 + \Delta\mu \\ \mu_0 &= -7.5\times10^{-5}\cdot T + 0.0145 \\ \Delta\mu &= 0.03\cdot(0.00019\cdot E_d^{\,0.9}+1)^{-0.06} - 0.03 \end{aligned}\right\} \tag{1.3.5-7}$$

式(1.3.5-6)における関係は、変位振幅、吸収エネルギーの時間勾配、すべり材サイズ等により変動することが考えられるが、式(1.3.5-4)、(1.3.5-5)の説明変数として選択した代表点温度が、実現象として動摩擦係数の変動を代表できるかどうかには考慮の余地が残ること、本調査に伴って予備的に実施した熱伝導解析ではすべり板各部の定量的な温度上昇について必ずしも充分な精度が得られない結果に終ったこと、設計ツールとして用いる地震応答解析には、温度評価を介在させるよりも吸収エネルギーを用いた方がなじみが良いこと、などを考慮して式(1.3.5-7)の形式を採った。評価式の一般化は今後の課題となる。

5) #3 試験体における摺動距離と摩擦係数の相関

図 1.3.5-48 に#3 試験体の各セット開始時の動摩擦係数と式(1.3.5-7)第 2 式との偏差（以下、初期値偏差）を累積摺動距離 *Ds* との関係で、図 1.3.5-49 に#3 試験体のセット毎の動摩擦係数の低下量を式(1.3.5-7)第 3 式に対する比（以下、低下量比）として累積摺動距離 *Ds* との関係で示す。初期値偏差、低下量比とも *Ds* が 200m を超えると式(1.3.5-7)に対し増加する傾向にある。ここでは、すべり材面圧 σ_p が 20MPa を超え、かつ累積摺動距離 *Ds* が 200m を上回る場合の初期動摩擦係数 μ_0 と繰り返しによる摩擦係数低下量 $\Delta\mu$ の補正項 μ_{0_col}、$\Delta\mu_{\_col}$ として両図より式(1.3.5-8)、式(1.3.5-9)を導く。式中 r_p は σ_p による補正係数で、本調査の範囲では σ_p=20MPa のとき 0、 σ_p=30MPa のとき 1 となる。

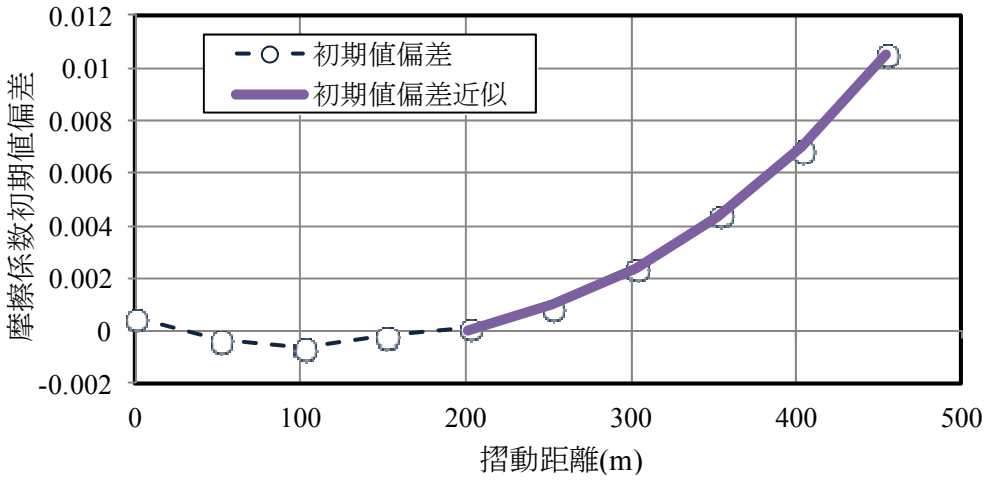


図 1.3.5-48　#3 試験体　動摩擦係数初期値偏差と摺動距離の関係

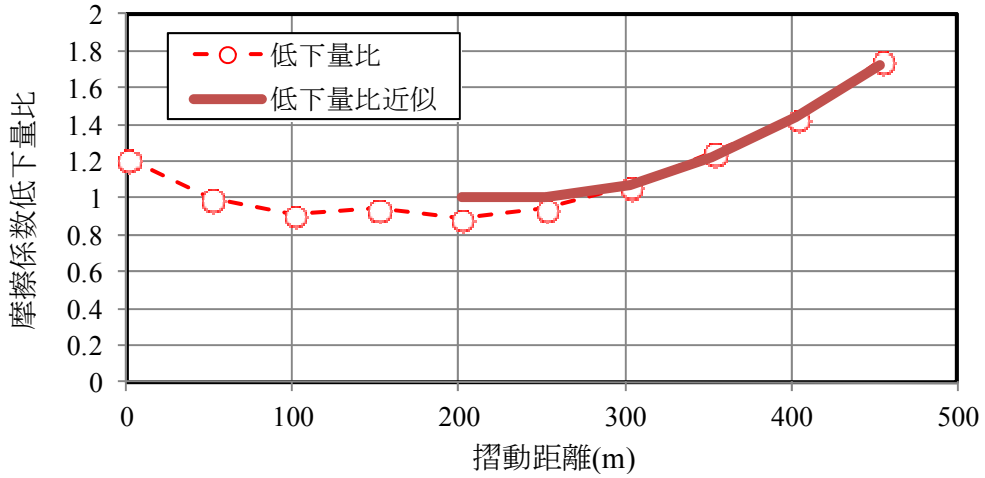


図 1.3.5-49　#3 試験体　動摩擦係数低下量比と摺動距離の関係

$$\left.\begin{aligned} \mu_{0\_col} &= r_p \cdot (1.8\times10^{-10}\cdot {D_{s2}}^3 + 5.5\times10^{-8}\cdot {D_{s2}}^2 + 1.6\times10^{-5}\cdot D_{s2}) \\ D_{s2} &= Ds - 200 \geq 0 \\ r_p &= \begin{cases} 0\,(\sigma_p = 20\mathrm{MPa}) \\ 1\,(\sigma_p = 30\mathrm{MPa}) \end{cases} \end{aligned}\right\} \quad (8)$$

$$\Delta\mu_{\_col} = r_p \cdot (-2.8\times10^{-9}\cdot {D_{s2}}^3 + 1.5\times10^{-5}\cdot {D_{s2}}^2 - 7.9\times10^{-4}\cdot D_{s2} + 1) \quad (9)$$

6) 繰り返し依存特性評価式の提示

上述の式(1.3.5-7)～(1.3.5-9)を組み合わせることにより、本調査の実験結果を対象とした動摩擦係数 μ の繰り返し特性依存式が式(1.3.5-10)のように提示できる。

$$\left.\begin{aligned} \mu &= \mu_0 + \mu_{0\_col} + \Delta\mu\cdot\Delta\mu_{\_col} \\ \mu_0 &= -7.5\times10^{-5}\cdot T + 0.0145 \\ \Delta\mu &= 0.03\cdot(0.00019\cdot {E_d}^{0.9} + 1)^{-0.06} - 0.03 \\ \mu_{0\_col} &= r_p \cdot (1.8\times10^{-10}\cdot {D_{s2}}^3 + 5.5\times10^{-8}\cdot {D_{s2}}^2 + 1.6\times10^{-5}\cdot D_{s2}) \\ \Delta\mu_{\_col} &= r_p \cdot (-2.8\times10^{-9}\cdot {D_{s2}}^3 + 1.5\times10^{-5}\cdot {D_{s2}}^2 - 7.9\times10^{-4}\cdot D_{s2} + 1) \\ D_{s2} &= Ds - 200 \geq 0 \\ r_p &= \begin{cases} 0\,(\sigma_p = 20\mathrm{MPa}) \\ 1\,(\sigma_p = 30\mathrm{MPa}) \end{cases} \end{aligned}\right\} \quad (10)$$

実験値と式(1.3.5-10)による評価値の相関を図 1.3.5-50 に示す。#4 試験体の 8 セット目以降を除く、4 試験体全セットの全サイクルについて評価した。サンプル数 n は 3208、寄与率 R^2 は 0.926 である。

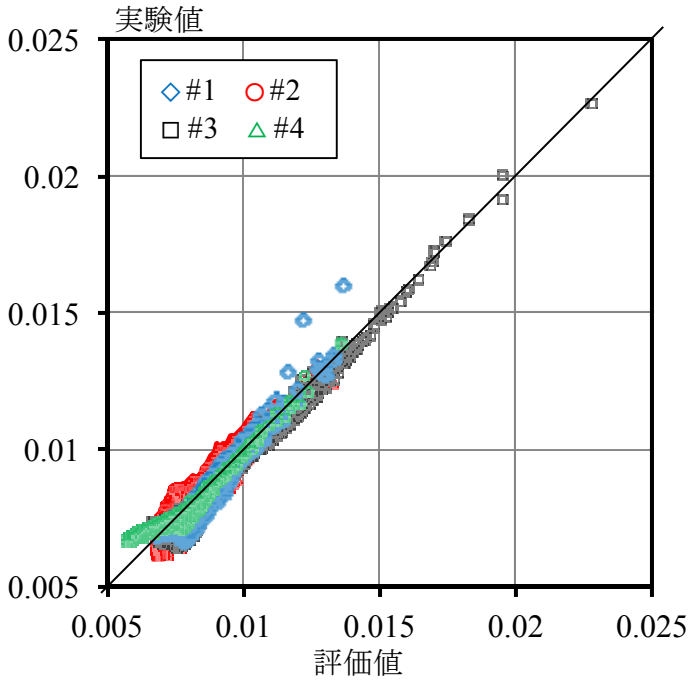


図 1.3.5-50　提示した摩擦係数評価式と実験値の相関

1.3.5.3 まとめと課題

(1) まとめ

低摩擦弾性すべり支承に関する調査を代表できる免震材料として、オイレス工業 SSR（μ=0.01）を調査対象とし、長周期地震動による免震建築物の応答を想定した多数回繰り返し実験を実施することにより特性の変動を調査した。

長周期地震動による応答1回分に相当する実験条件として累積変形量50m以上となる繰り返し条件を設定した。長周期地震動による応答1回分の実験を1セットと称し、インターバル時間を挟んで、各試験体について10セット実施した。実験パラメータは、加振波形（定振幅正弦波：150mm、変動振幅正弦波：50~300mm)、すべり材面圧（基準：20MPa、高面圧：30MPa)、インターバル時間（標準：30分（原則)、短：3~11分）である。

いずれの試験体についても、各セット開始時に相当程度の摩擦係数の低下が見られ、その後安定した。セット間にインターバル時間を設けることにより、前セットで低下した摩擦係数が相当程度復帰した。セット開始時の摩擦係数低下量は、1 セット目が最も大きく、その後のセットでは低下量は漸減した。面圧20MPa試験体では全10セットにわたり、面圧30MPa試験体では当初の4~5セットにわたり、各セットの摩擦係数下限値にほとんど変化は見られない。また、各セットのエネルギー吸収量の変動もほとんどない。インターバル時間を3分としたセットでは、摩擦係数の復帰が小さかったが、下限値に大きな変化はない。

以上の実験結果より、調査対象とした免震部材は、繰り返し特性に優れた部材であると評価できる。

調査対象とした免震部材の繰り返し特性は、免震材料認定資料別表に累積摺動回数に対する依存性として示されているが、本調査の多数回繰り返し実験で見られたセット毎に摩擦係数が復帰する変動傾向を説明できない。また、本調査の実験で得られた摩擦係数の変動幅は、上記既往知見で示される変動幅を上回る。

変動振幅加振を行った試験体について、局所的な摺動回数と摩擦係数の変動について整理すると、定振幅加振を行った試験体における摺動回数と摩擦係数の変動の傾向に類似するという知見が得られた。摩擦係数の変動評価に局所的な摺動回数が有意な要素となり得ることを示唆するが、インターバル時間を挟んだ摩擦係数の変動を説明する要素とはなり得ない。

摩擦係数の変動をすべり板温度で整理すると、高面圧試験体で摩擦係数の上昇が見られたセットと短インターバルでセット開始時のすべり板温度が 60℃以上となっていたセットを除けば、相当のばらつきを伴うものの、一定の依存性が認められる。

各セットにおける温度上昇は、吸収エネルギーの関数として表現できることから、各セットの初期温度を与条件とすれば、摩擦係数の変動を吸収エネルギーの関数として表現できる。

また、面圧30MPa試験体では6セット目（長周期地震動による応答6回分）以降ですべり板コーティング剥離による摩擦係数の上昇が見られた。各セットの上／下限摩擦係数の上昇傾向とセット数の関係は明瞭に見られることから、標準面圧を上回る条件に対する摩擦係数の変動を摺動距離の関数として与えることができる。

以上を組み合わせて、本調査の実験結果に基づく繰り返し特性評価式を提示した。寄与率 R^2 は0.926となった。

参考文献

1.3.5-1）国土交通省：オイレス式弾性すべり支承 建築材料認定書（MVBR-0377）別表、2008.6

1.3.5.4　実験実施記録表

各試験体の実験実施記録表を表 1.3.5-9～12 に示す。表には各セットの実施時刻、各セット間のインターバル時間を記載した。

表 1.3.5-9　#1 試験体実験実施記録表

実験日時		実験内容	セット数	すべり材面圧	加振周期	振幅	サイクル数	摺動距離	次加振までのインターバル
				MPa	秒	mm		m	
2010.12.14	11:08	多数回繰返し実験	1	20	4	定常±150	84	50.4	0:36
	11:48		2						0:49
	12:43		3						0:32
	13:21		4						0:28
	13:55		5						0:31
	14:32		6						0:32
	15:10		7						0:30
	15:46		8						0:31
	16:23		9						0:36
	17:05		10						0:26
	17:37	静摩擦力確認		20	4	定常±150	10	6.0	0:10
	17:48	基本性能試験（繰返し後）		20	62.5	定常±150	4	2.4	0:02
	17:54	同上		20	62.5	定常±150	4	2.4	－

表 1.3.5-10　#2 試験体実験実施記録表

実験日時		実験内容	セット数	すべり材面圧	加振周期	振幅	サイクル数	摺動距離	次加振までのインターバル
				MPa	秒	mm		m	
2010.12.17	10:03	基本性能試験（製品試験）		20	62.5	定常±150	4	2.4	1:04
	11:13	多数回繰り返し実験	1	20	4	変動±50～±300	94	50.6	3:29
	14:48		2						0:34
	15:28		3						0:37
	16:11		4						0:33
	16:50		5						0:31
	17:27		6						0:31
	18:04		7						0:31
	18:41		8						0:31
	19:18		9						0:31
	19:55		10						0:29
	20:30	基本性能試験（繰返し後）		20	62.5	定常±150	4	2.4	18:46
2010.12.20	13:40	基本性能試験（公開実験）		20	62.5	定常±150	4	2.4	0:28
	14:12	多数回繰り返し実験	11	20	4	変動±50～±300	84	50.6	0:33
	14:51		12						－

表 1.3.5-11　#3 試験体実験実施記録表

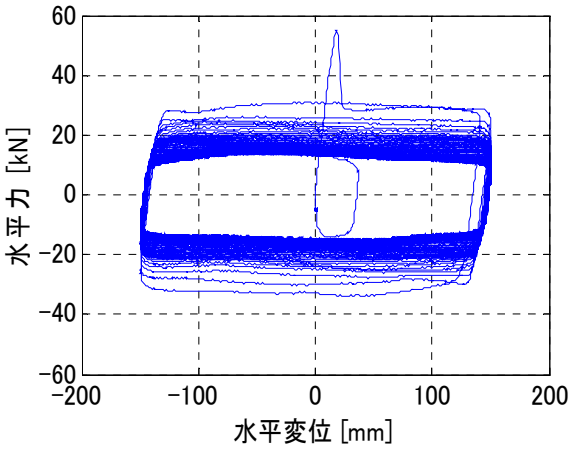
実験日時		実験内容	セット数	すべり材面圧	加振周期	振幅	サイクル数	摺動距離	次加振までのインターバル
				MPa	秒	mm		m	
2010.12.20	19:26	基本性能試験（製品試験）		20	62.5	定常±150	4	2.4	－
2010.12.21	10:47	多数回繰り返し実験	1	30	4	定常±150	84	50.4	0:32
	11:25		2						0:33
	12:04		3						0:40
	12:50		4						0:33
	13:29		5						0:51
	14:26		6						0:39
	15:11		7						0:32
	15:49		8						0:31
	16:26		9						0:30
	17:02		10						0:39
	17:47	基本性能試験（繰返し後）		20	62.5	定常±150	4	2.4	－

表 1.3.5-12　#4 試験体実験実施記録表

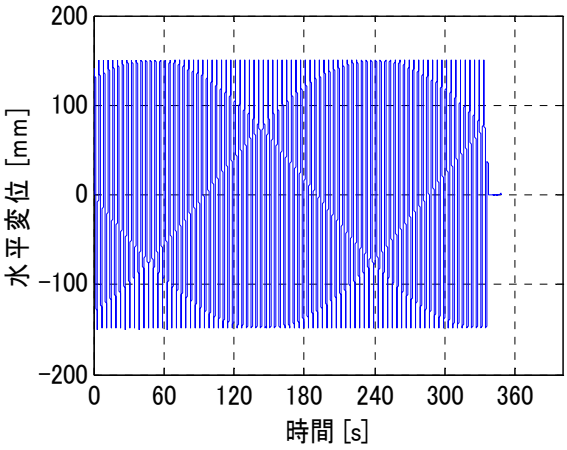
実験日時		実験内容	セット数	すべり材面圧	加振周期	振幅	サイクル数	摺動距離	次加振までのインターバル
				MPa	秒	mm		m	
2010.12.23	16:21	基本性能試験（製品試験）		20	62.5	定常±150	4	2.4	－－
2010.12.24	10:33	多数回繰り返し実験	1	20	4	定常±150	84	50.4	0:13
	10:52		2						0:11
	11:09		3						0:11
	11:26		4						0:11
	11:43		5						0:11
	12:00		6						0:11
	12:17		7						0:03
	12:26		8						0:03
	12:35		9						0:03
	12:44		10						0:13
	13:03	基本性能試験（繰返し後）		20	62.5	定常±150	4	2.4	－

1.3.5.5　各試験体各セットの結果概要

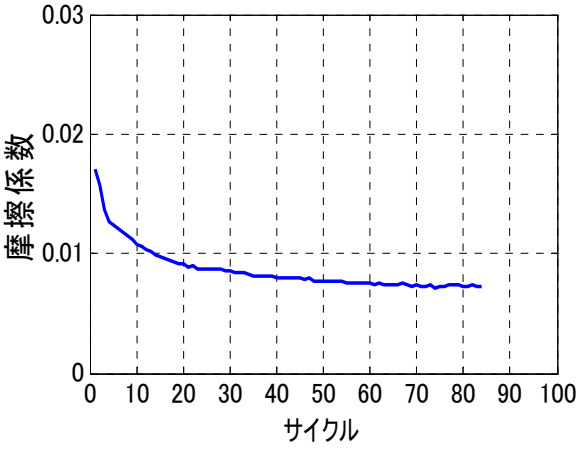
図 1.3.5-51～90 に各試験体各セットの結果概要を示す。それぞれ(a)図は水平荷重－水平変位関係、(b)図は水平変位時刻歴、(c)図は各サイクルごとの変位 0 切片における摩擦係数（正負平均）、(d)図は水平荷重時刻歴、(e)図は①～⑥測定点の温度時刻歴、(f) 図は⑦～⑪測定点の温度時刻歴である。



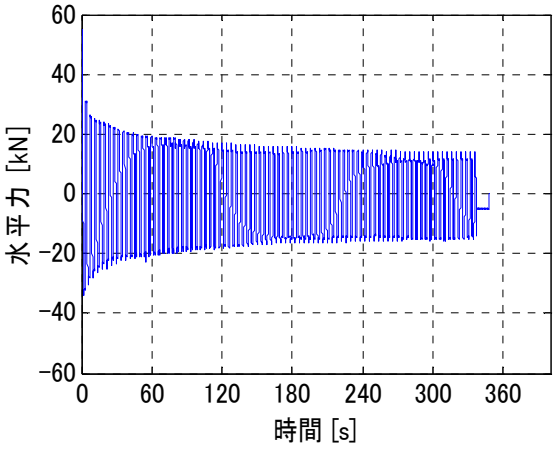
(a)　水平荷重－水平変位関係



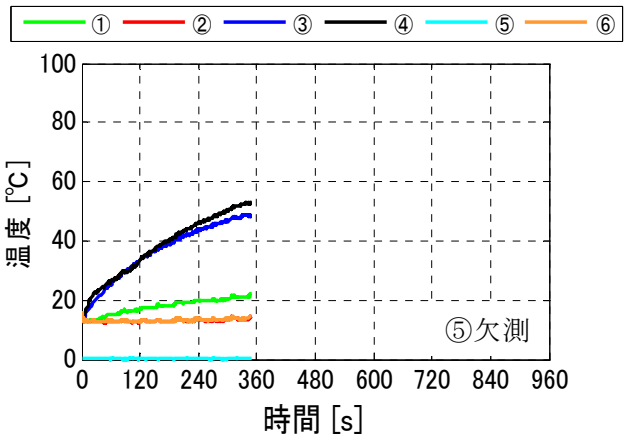
(b)　水平変位時刻歴



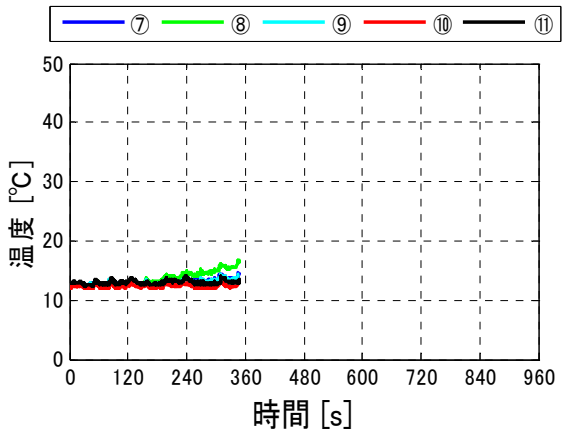
(c)　各サイクル摩擦係数



(d)　水平荷重時刻歴

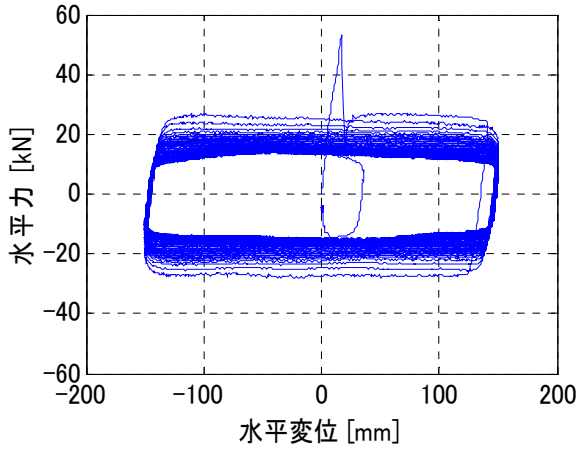


(e)　温度時刻歴（①～⑥測定点）

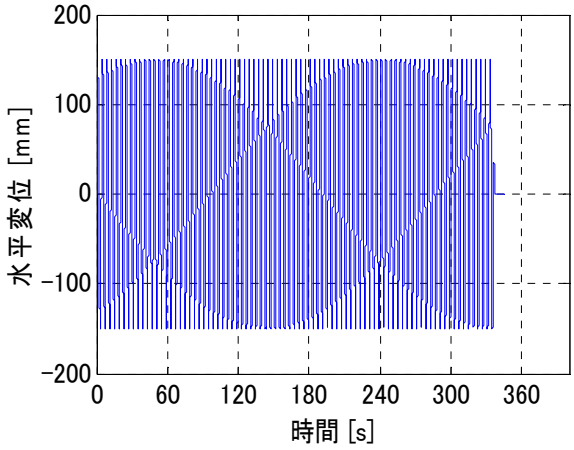


(f)　温度時刻歴（⑦～⑪測定点）

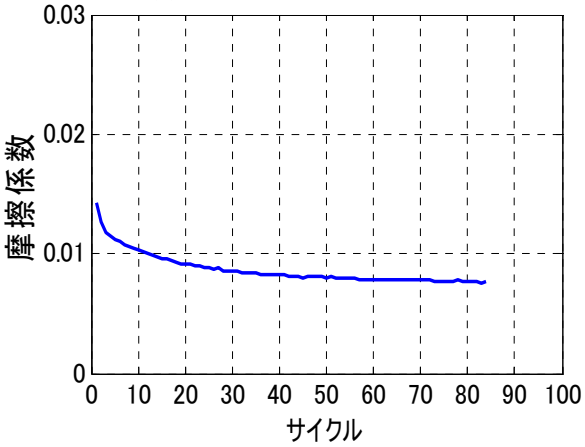
図 1.3.5-51　#1 試験体 1 セット目実験結果概要



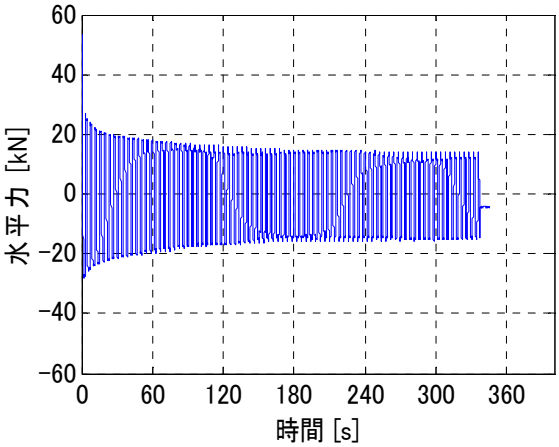
(a)　水平荷重－水平変位関係



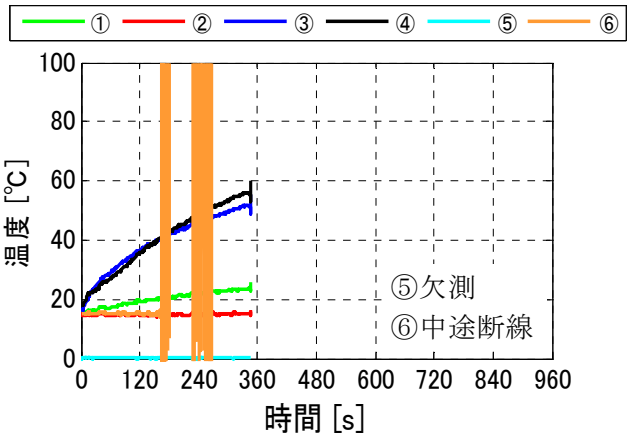
(b)　水平変位時刻歴



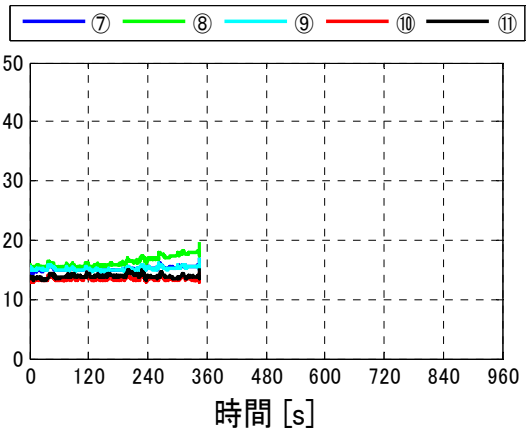
(c)　各サイクル摩擦係数



(d)　水平荷重時刻歴

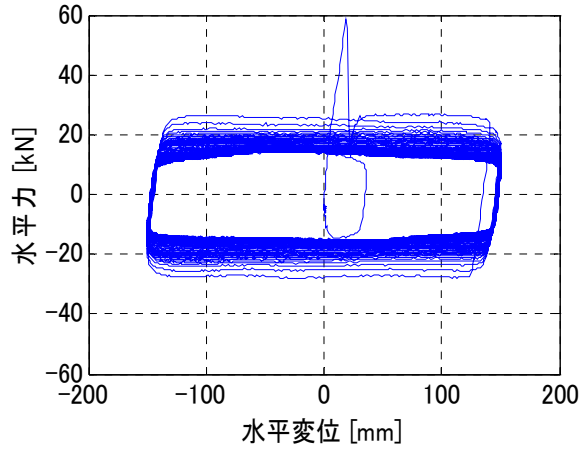


(e)　温度時刻歴（①～⑥測定点）

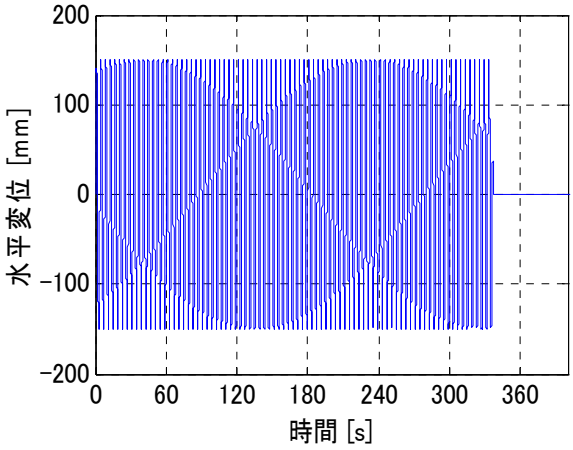


(f)　温度時刻歴（⑦～⑪測定点）

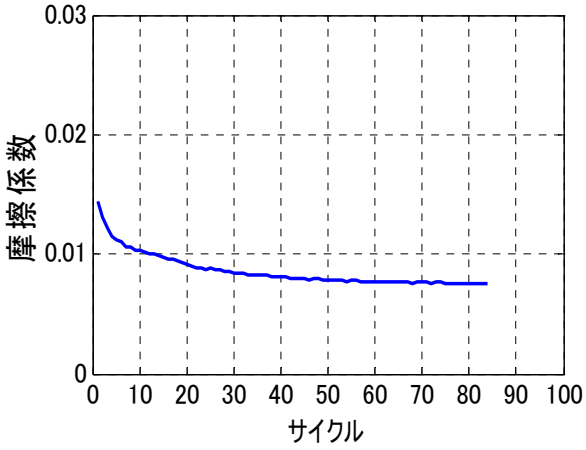
図 1.3.5-52　#1 試験体 2 セット目実験結果概要



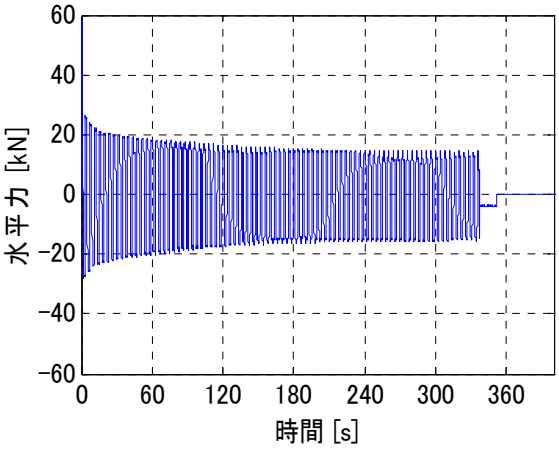
(a)　水平荷重－水平変位関係



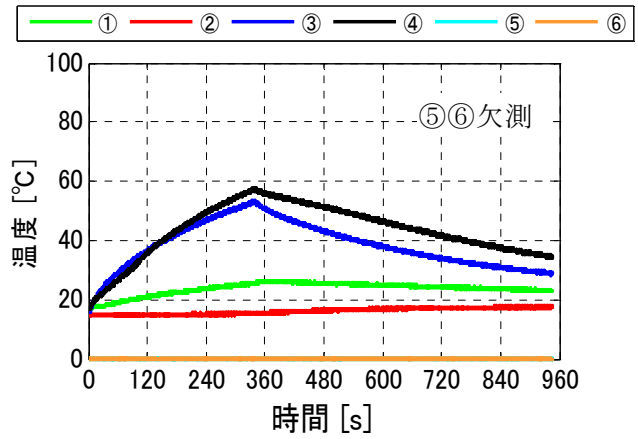
(b)　水平変位時刻歴



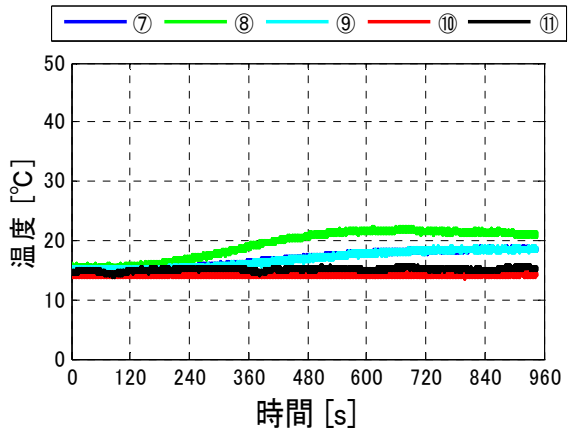
(c)　各サイクル摩擦係数



(d)　水平荷重時刻歴

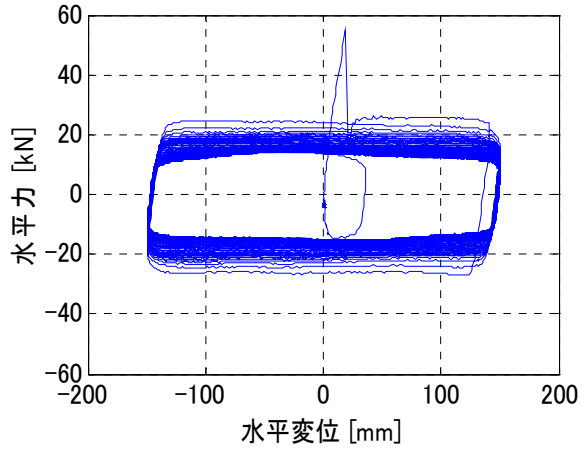


(e)　温度時刻歴（①～⑥測定点）

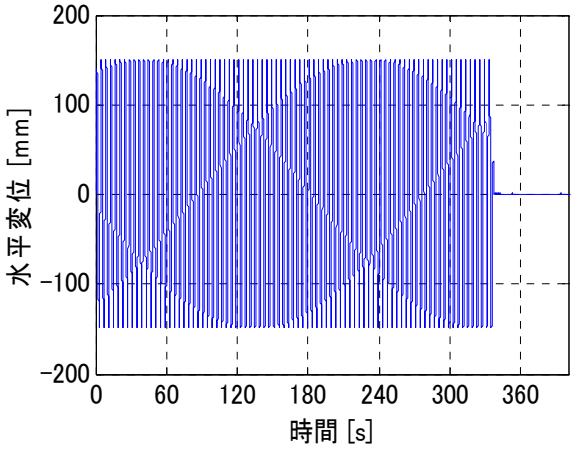


(f)　温度時刻歴（⑦～⑪測定点）

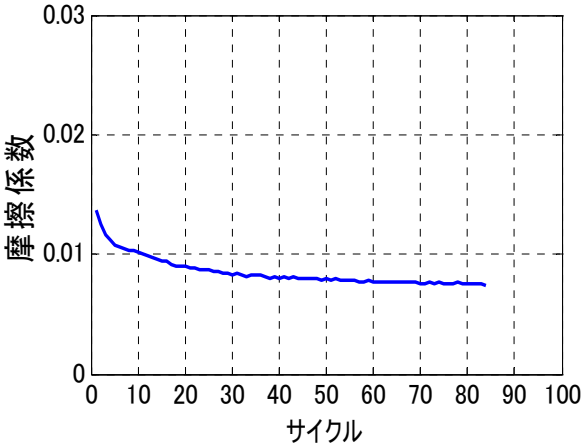
図 1.3.5-53　#1 試験体 3 セット目実験結果概要



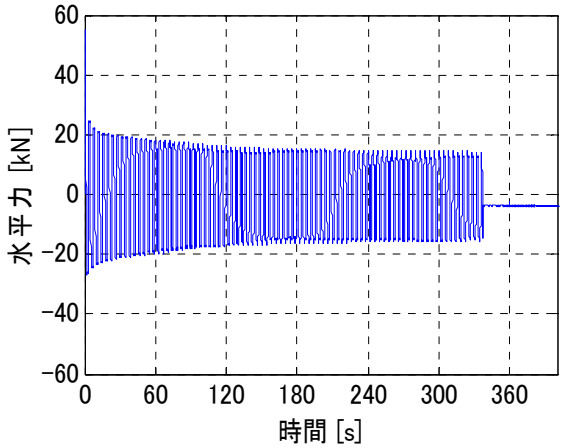
(a)　水平荷重－水平変位関係



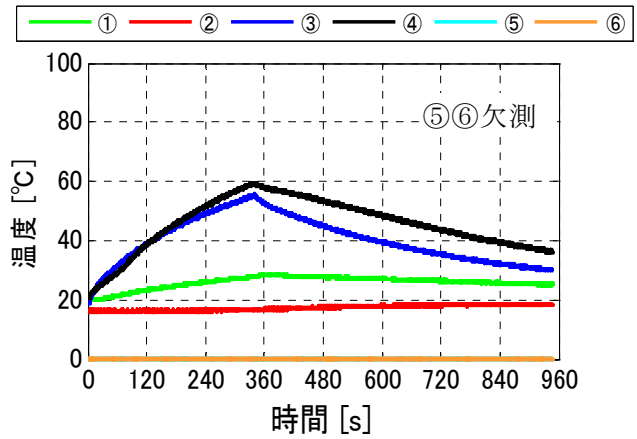
(b)　水平変位時刻歴



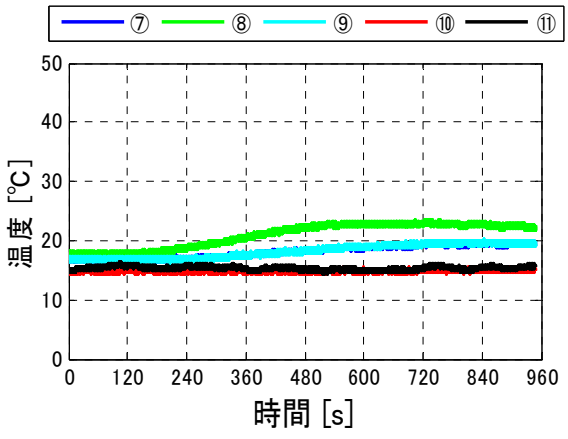
(c)　各サイクル摩擦係数



(d)　水平荷重時刻歴

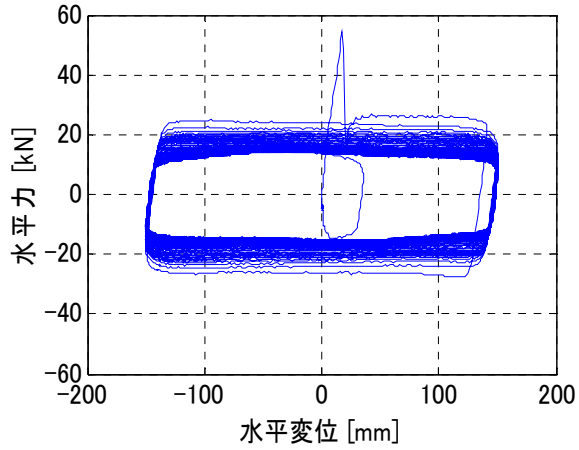


(e)　温度時刻歴（①～⑥測定点）

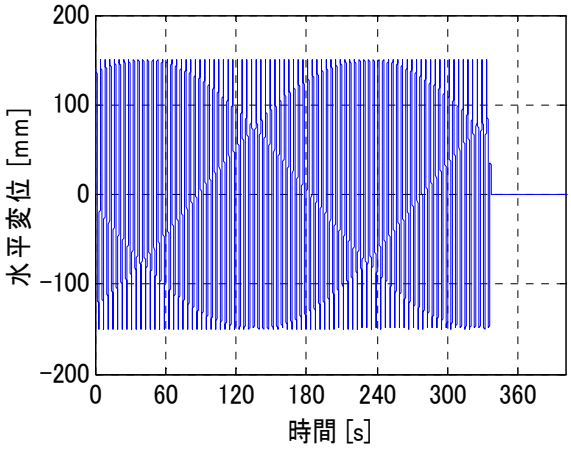


(f)　温度時刻歴（⑦～⑪測定点）

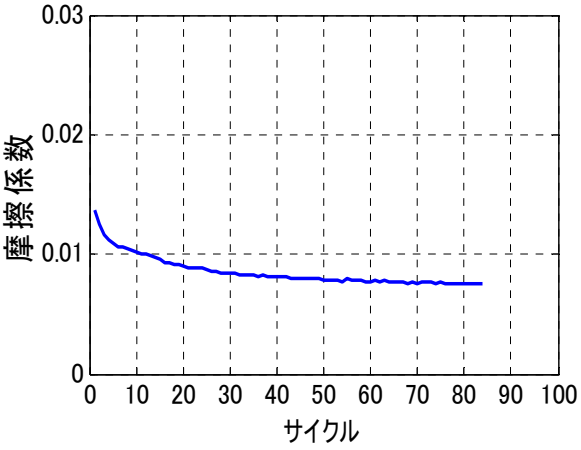
図 1.3.5-54　#1 試験体 4 セット目実験結果概要



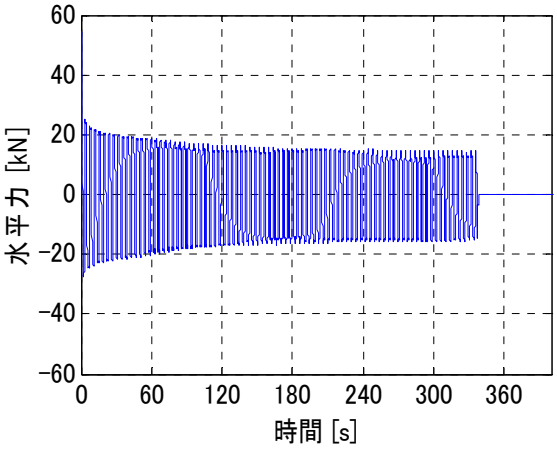
(a)　水平荷重－水平変位関係



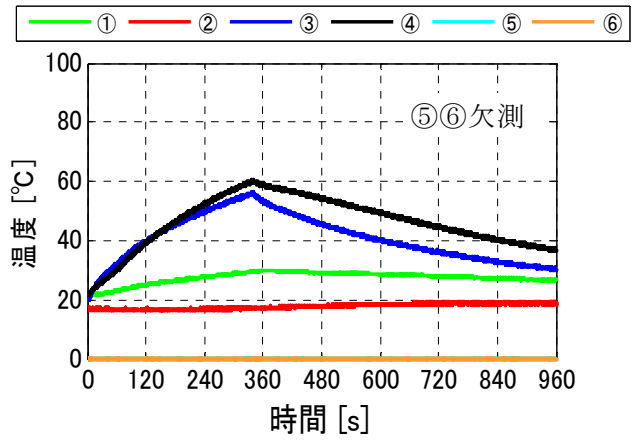
(b)　水平変位時刻歴



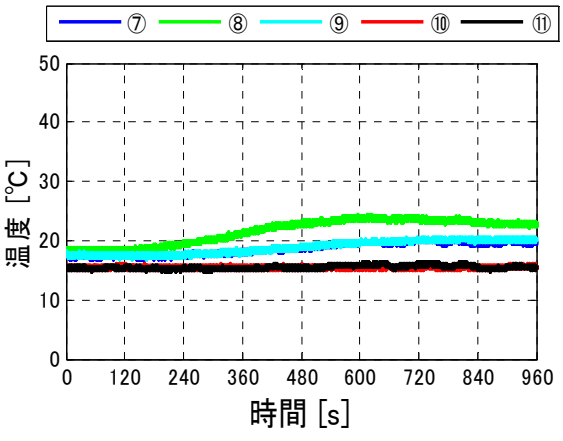
(c)　各サイクル摩擦係数



(d)　水平荷重時刻歴

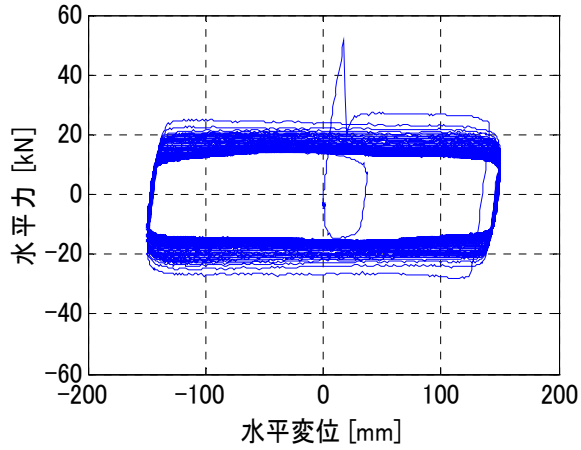


(e)　温度時刻歴（①～⑥測定点）

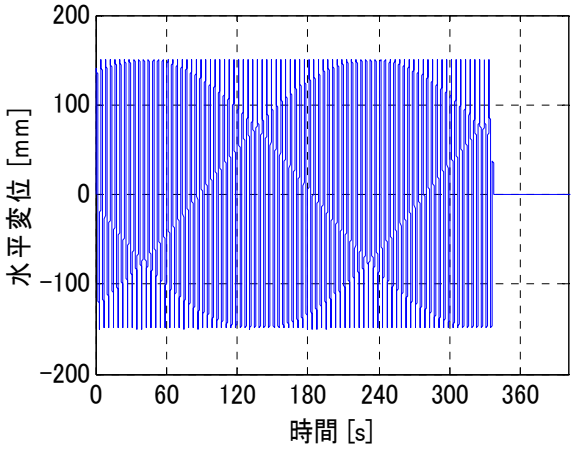


(f)　温度時刻歴（⑦～⑪測定点）

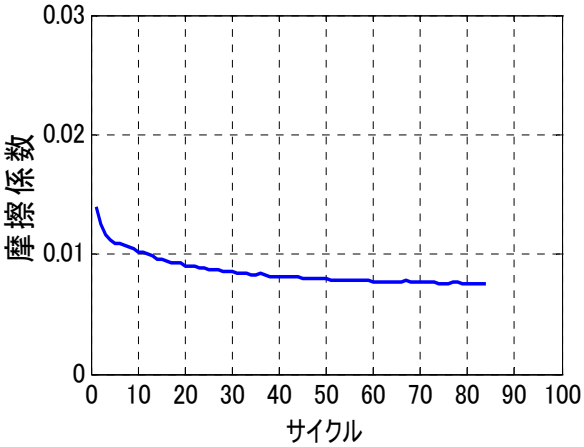
図 1.3.5-55　#1 試験体 5 セット目実験結果概要



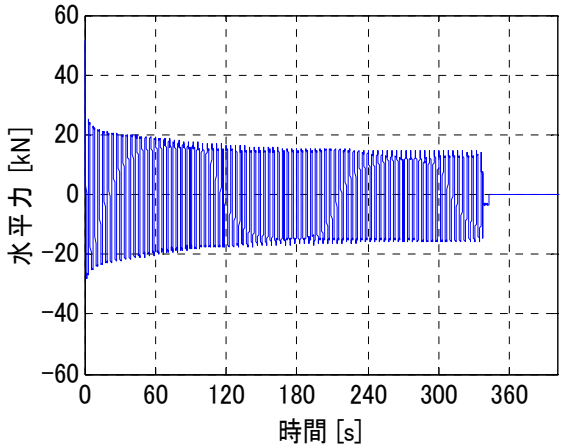
(a)　水平荷重－水平変位関係



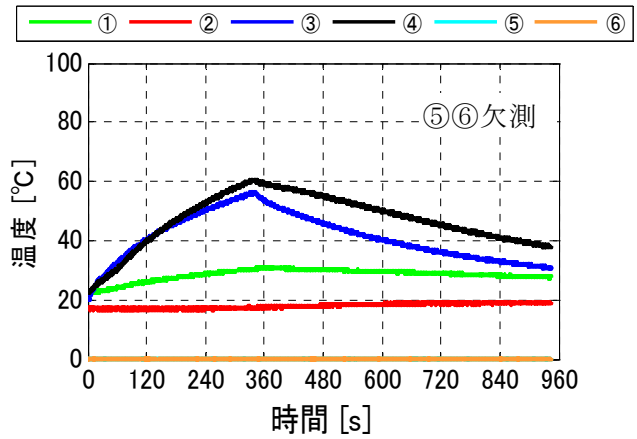
(b)　水平変位時刻歴



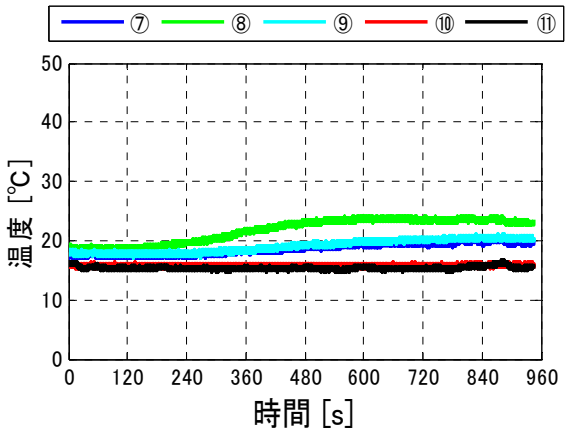
(c)　各サイクル摩擦係数



(d)　水平荷重時刻歴

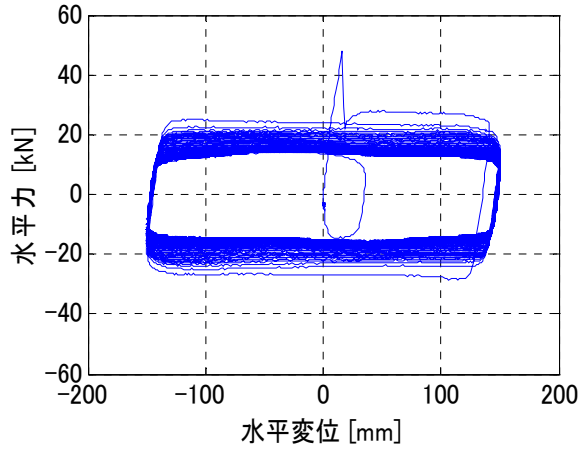


(e)　温度時刻歴（①～⑥測定点）

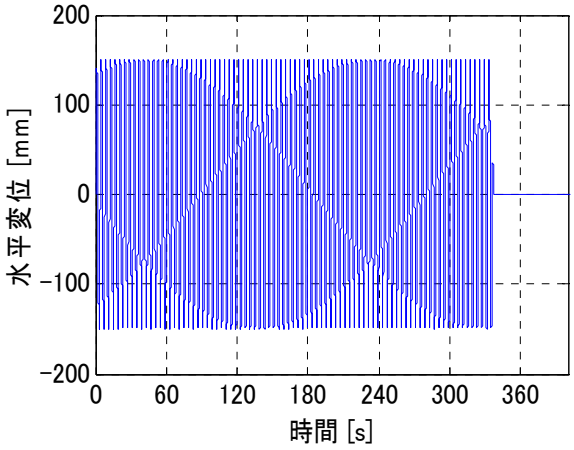


(f)　温度時刻歴（⑦～⑪測定点）

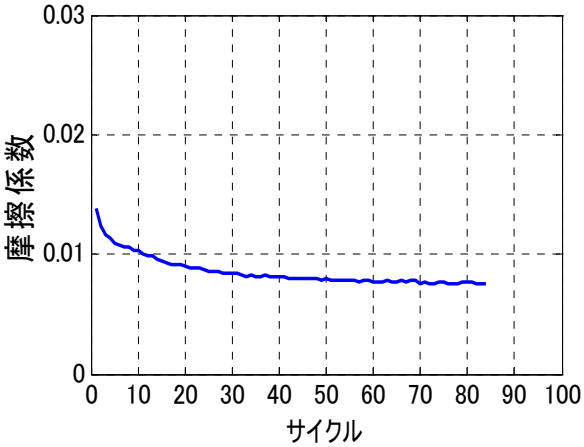
図 1.3.5-56　#1 試験体 6 セット目実験結果概要



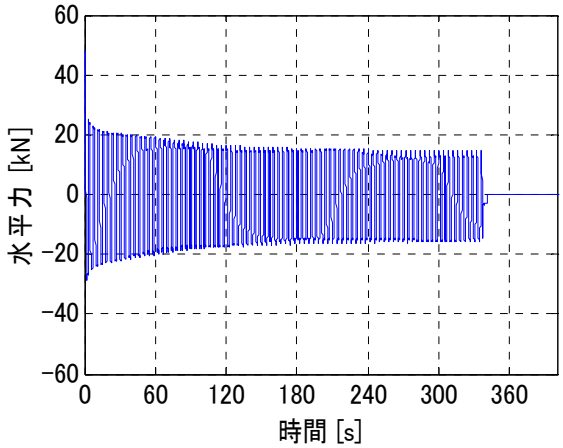
(a)　水平荷重－水平変位関係



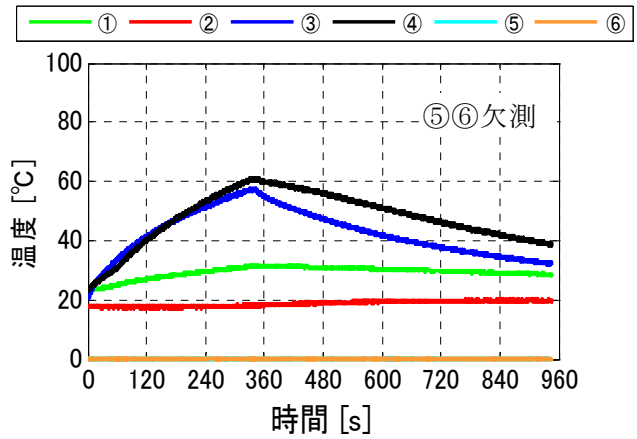
(b)　水平変位時刻歴



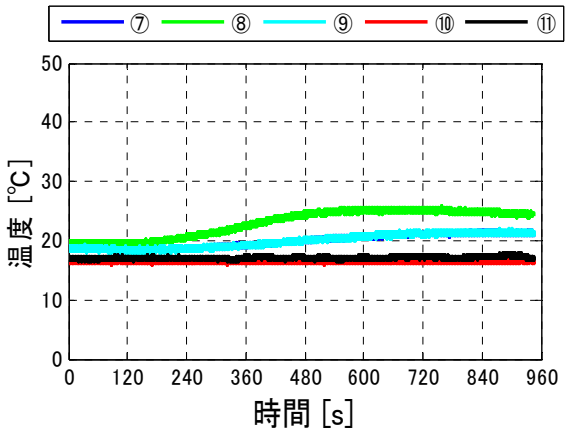
(c)　各サイクル摩擦係数



(d)　水平荷重時刻歴

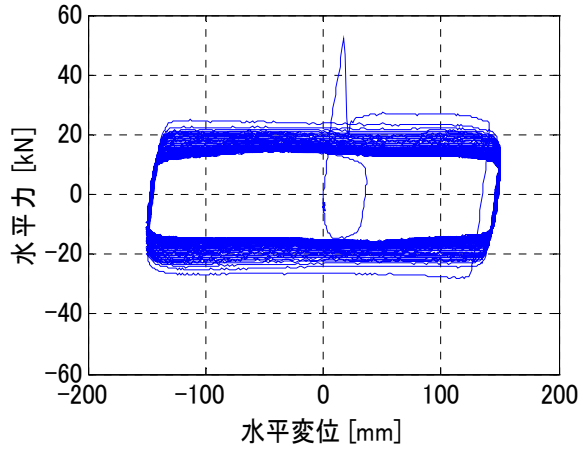


(e)　温度時刻歴（①～⑥測定点）

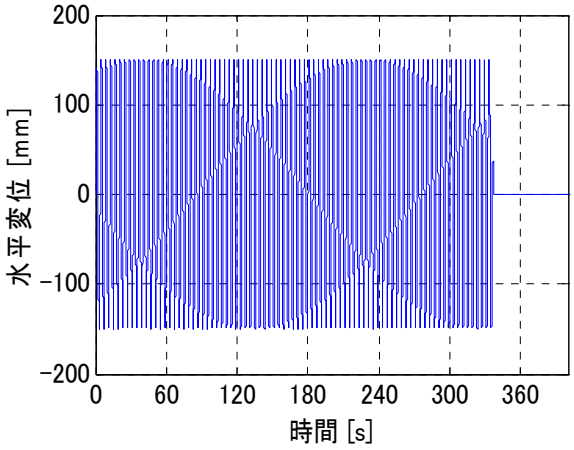


(f)　温度時刻歴（⑦～⑪測定点）

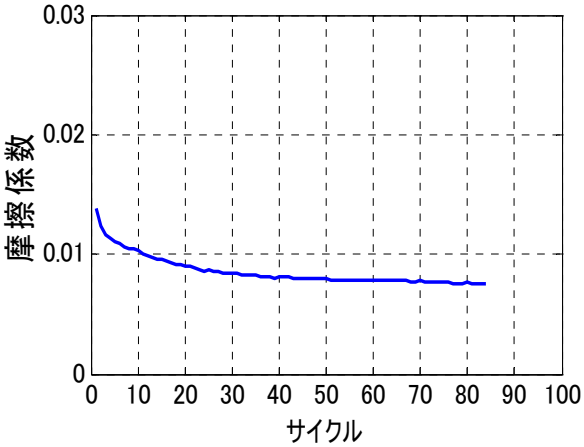
図 1.3.5-57　#1 試験体 7 セット目実験結果概要



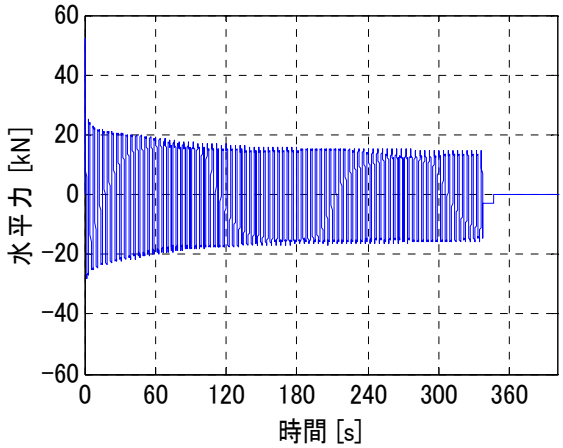
(a)　水平荷重－水平変位関係



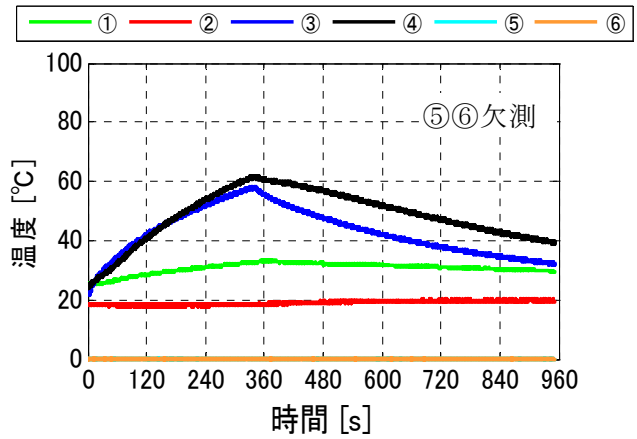
(b)　水平変位時刻歴



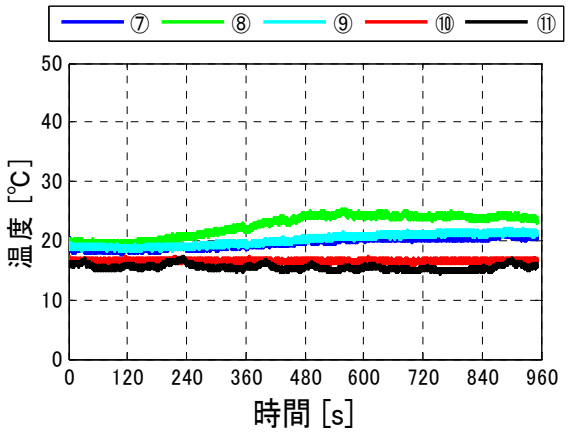
(c)　各サイクル摩擦係数



(d)　水平荷重時刻歴

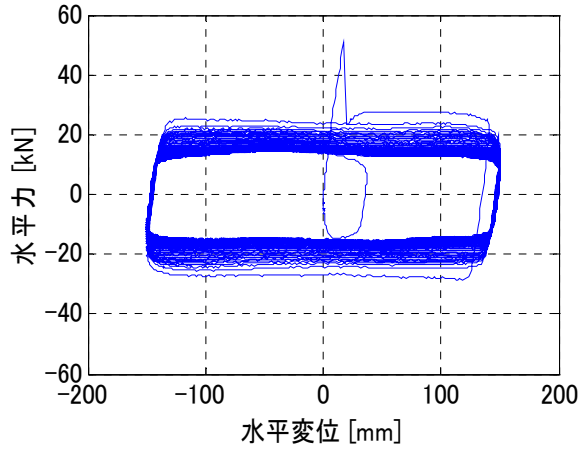


(e)　温度時刻歴（①～⑥測定点）

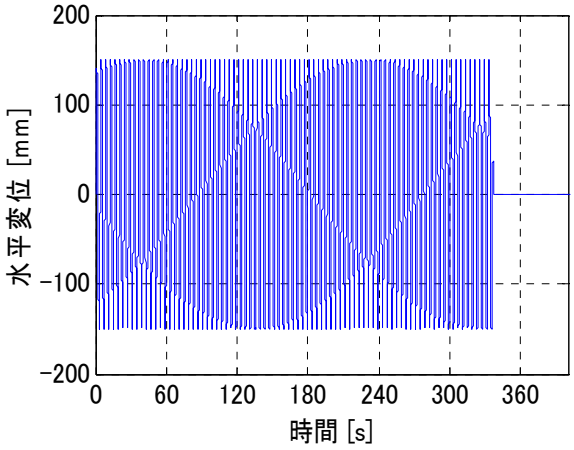


(f)　温度時刻歴（⑦～⑪測定点）

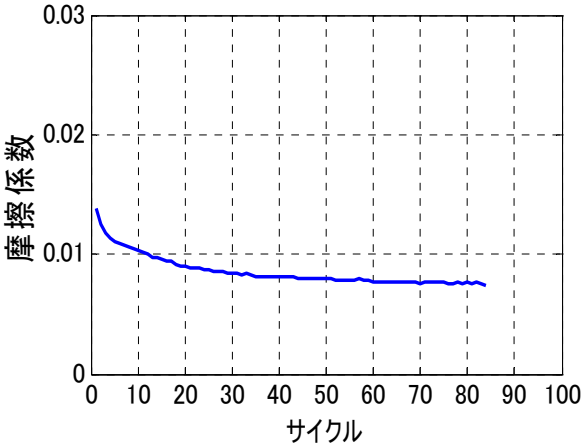
図 1.3.5-58　#1 試験体 8 セット目実験結果概要



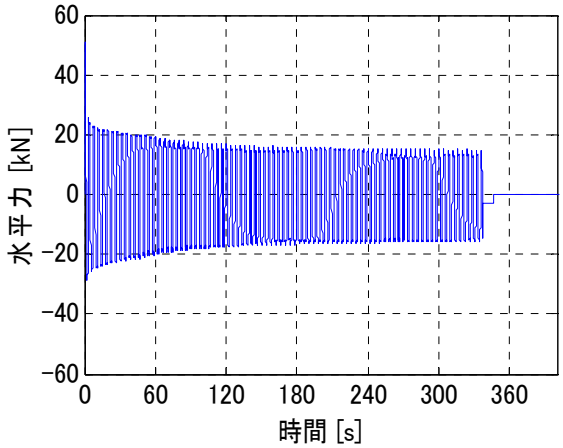
(a)　水平荷重－水平変位関係



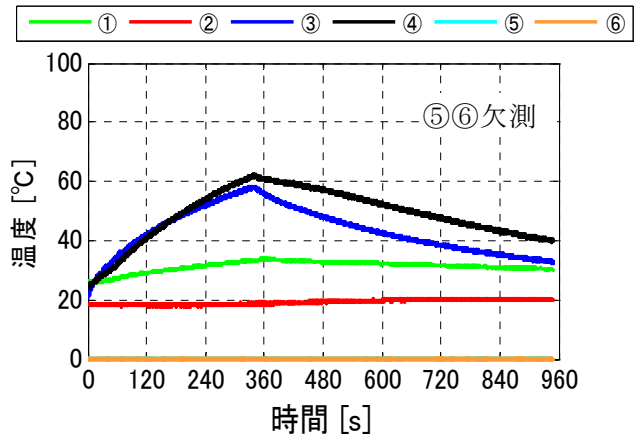
(b)　水平変位時刻歴



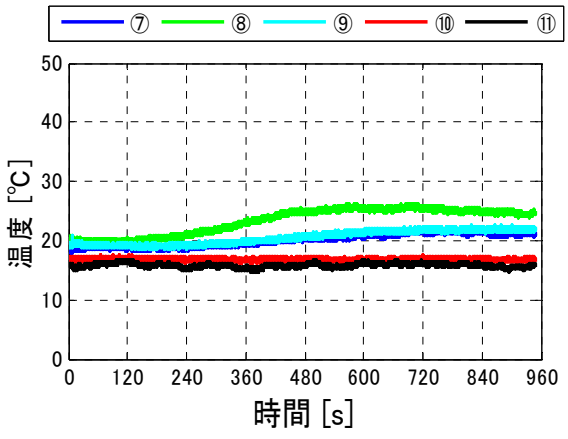
(c)　各サイクル摩擦係数



(d)　水平荷重時刻歴

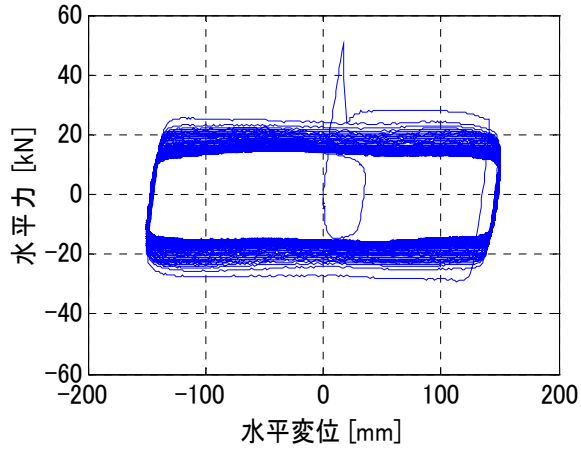


(e)　温度時刻歴（①～⑥測定点）

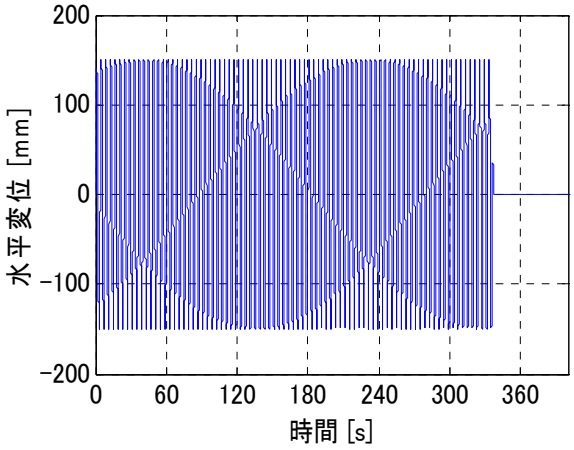


(f)　温度時刻歴（⑦～⑪測定点）

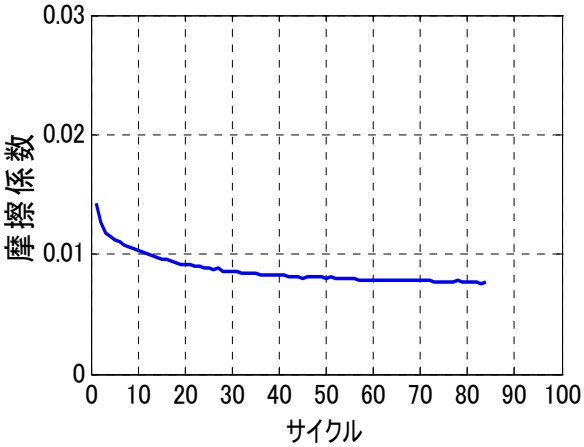
図 1.3.5-59　#1 試験体 9 セット目実験結果概要



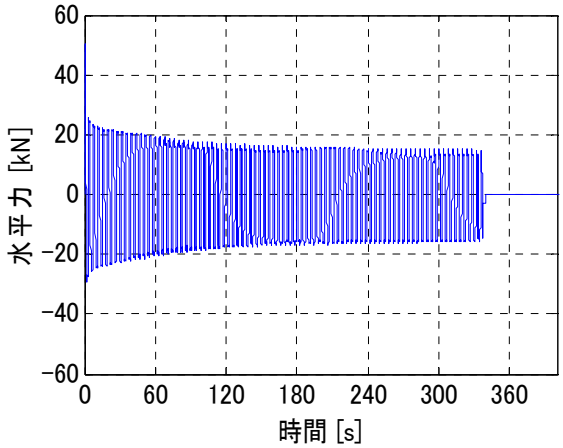
(a)　水平荷重－水平変位関係



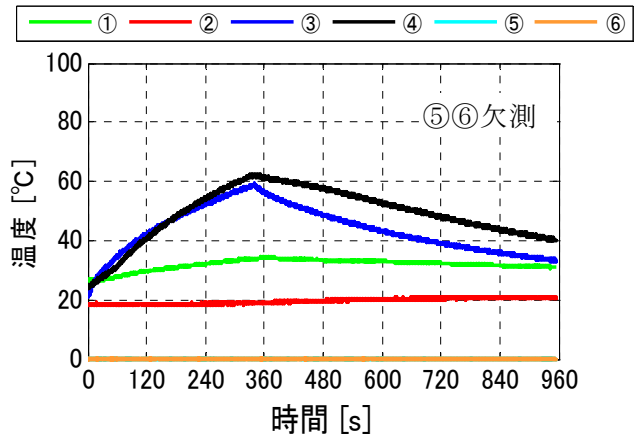
(b)　水平変位時刻歴



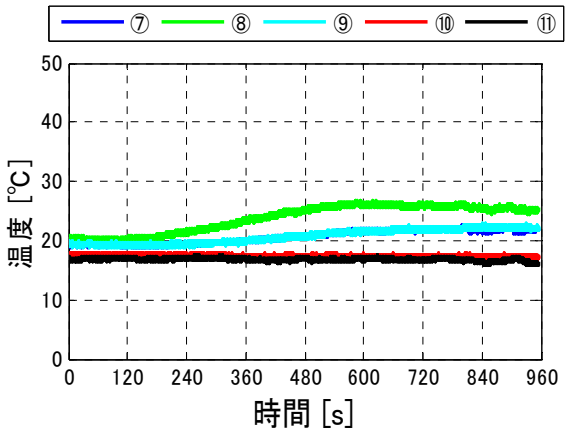
(c)　各サイクル摩擦係数



(d)　水平荷重時刻歴

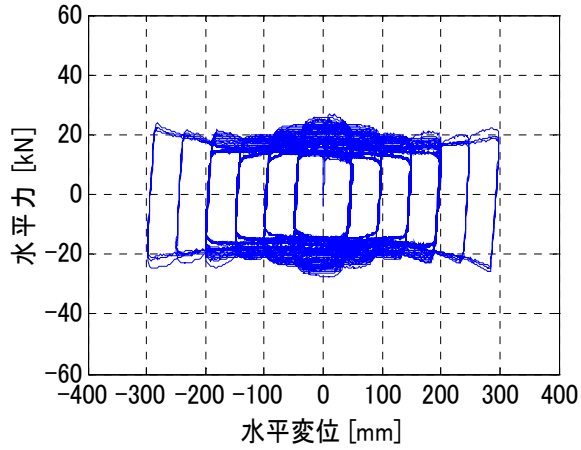


(e)　温度時刻歴（①～⑥測定点）

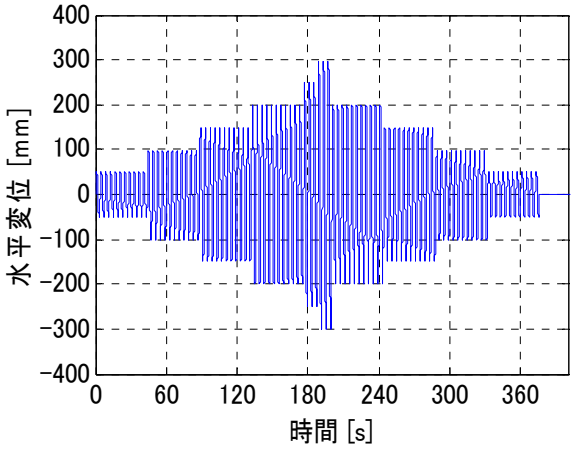


(f)　温度時刻歴（⑦～⑪測定点）

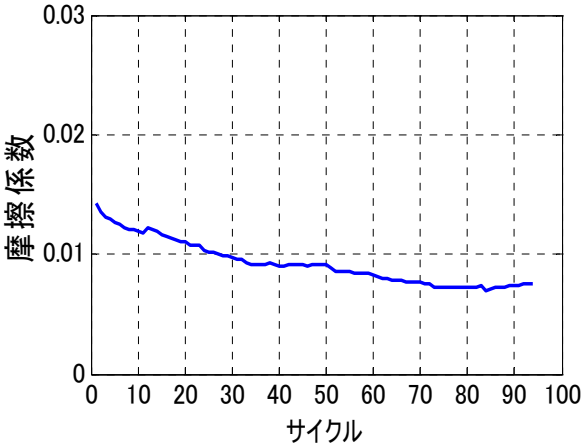
図 1.3.5-60　#1 試験体 10 セット目実験結果概要



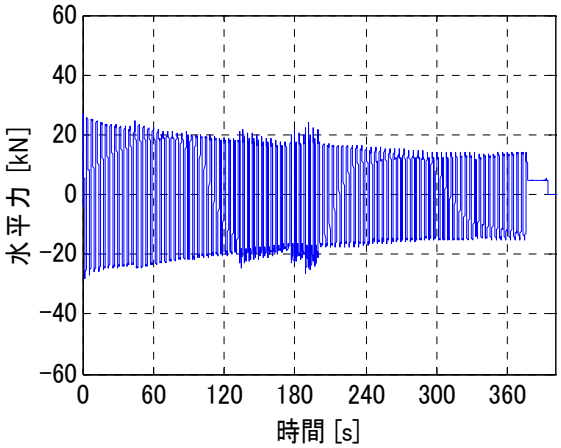
(a)　水平荷重－水平変位関係



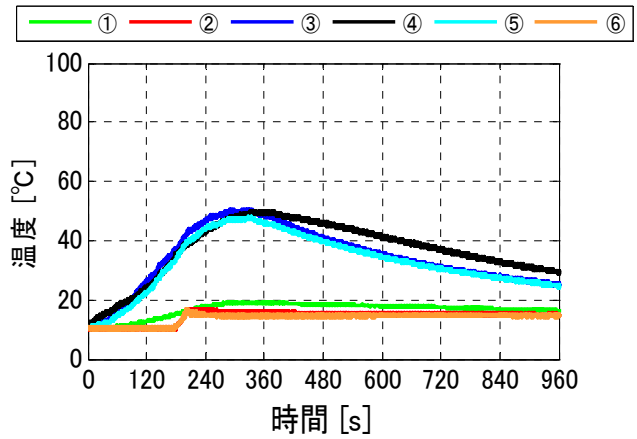
(b)　水平変位時刻歴



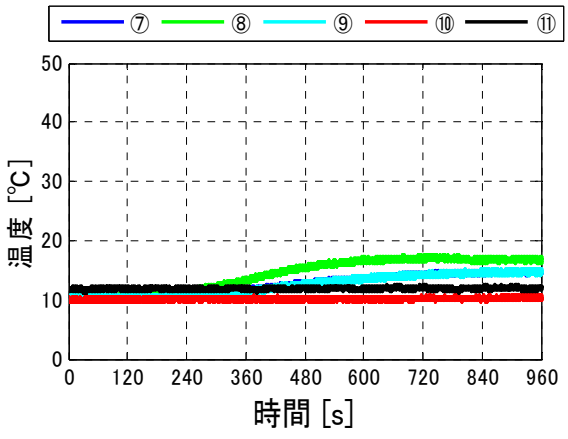
(c)　各サイクル摩擦係数



(d)　水平荷重時刻歴

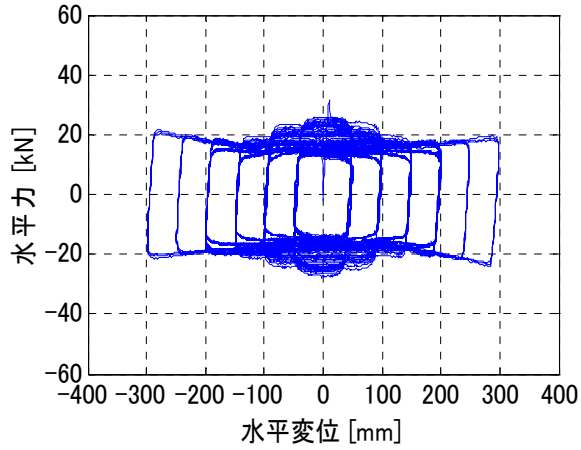


(e)　温度時刻歴（①～⑥測定点）

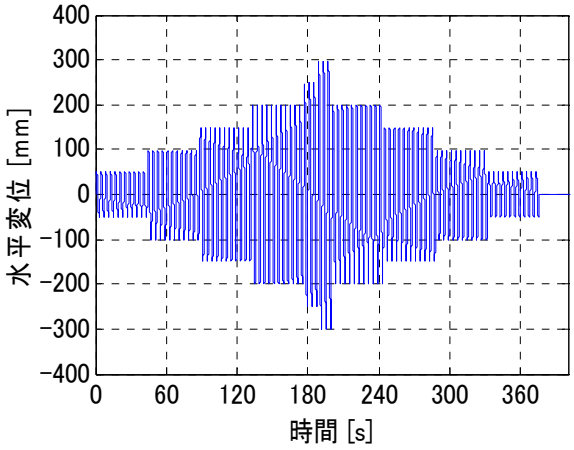


(f)　温度時刻歴（⑦～⑪測定点）

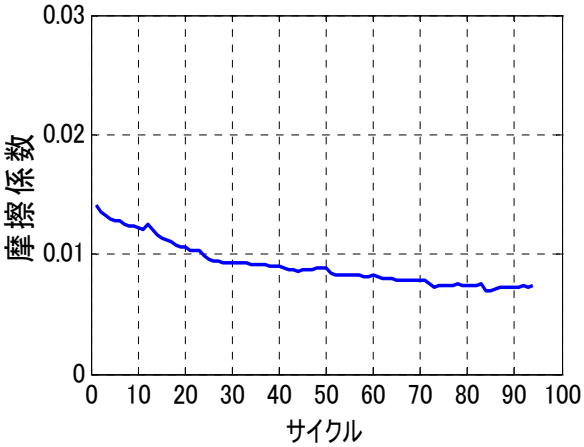
図 1.3.5-61　#2 試験体 1 セット目実験結果概要



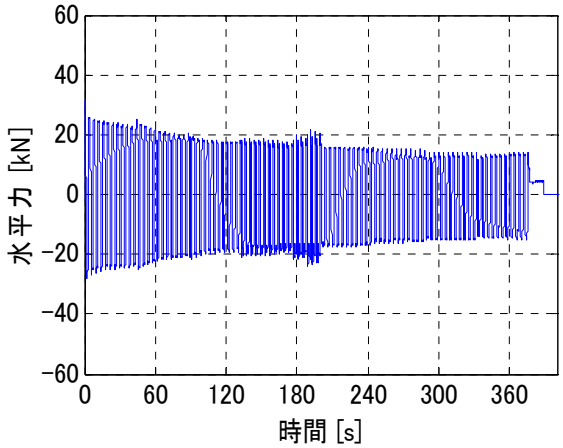
(a)　水平荷重－水平変位関係



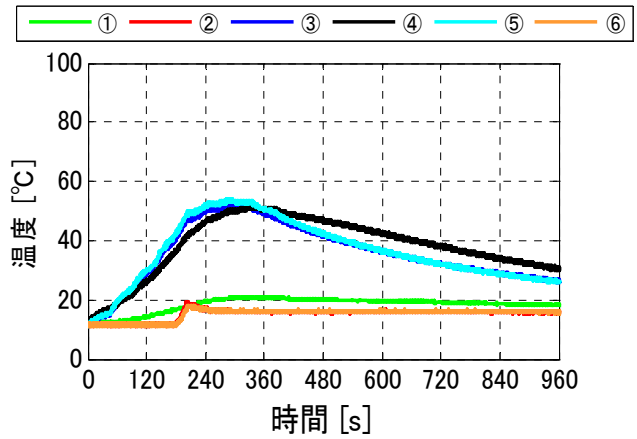
(b)　水平変位時刻歴



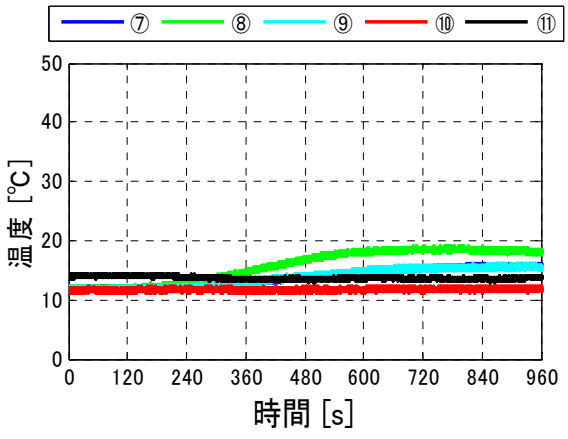
(c)　各サイクル摩擦係数



(d)　水平荷重時刻歴

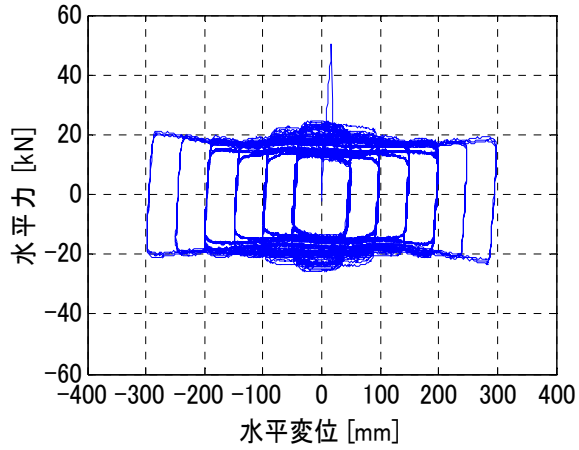


(e)　温度時刻歴（①～⑥測定点）

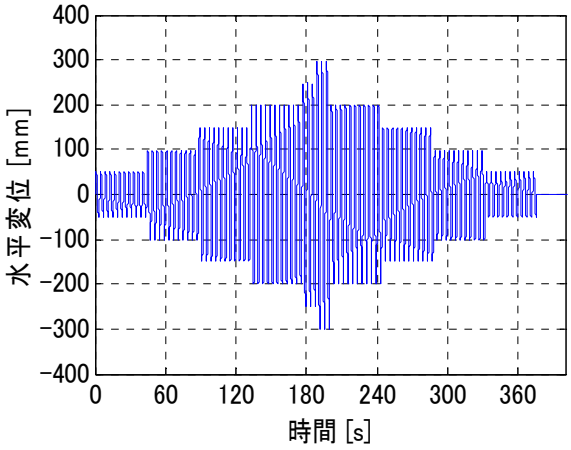


(f)　温度時刻歴（⑦～⑪測定点）

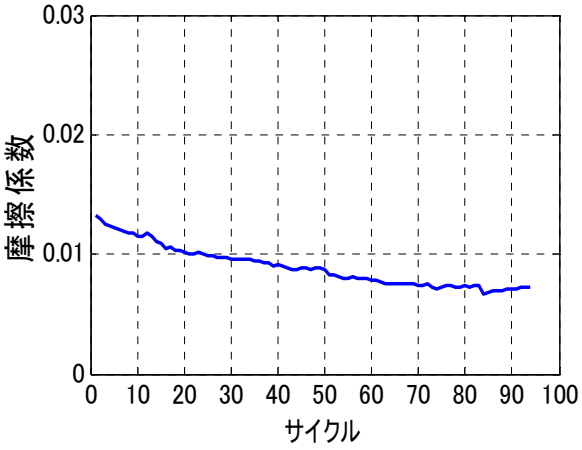
図 1.3.5-62　#2 試験体 2 セット目実験結果概要



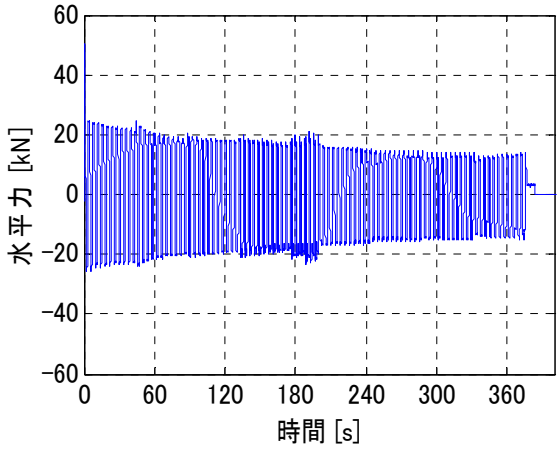
(a)　水平荷重－水平変位関係



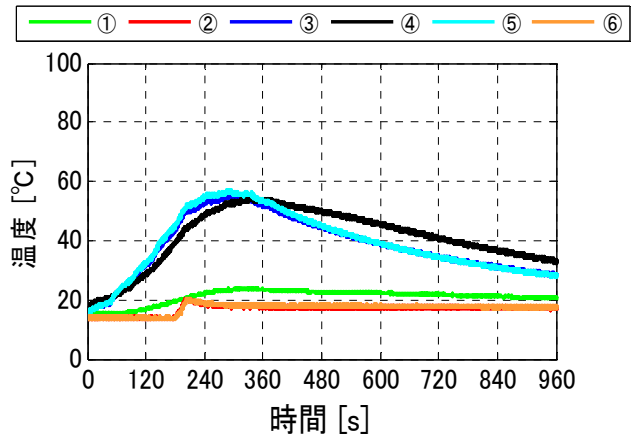
(b)　水平変位時刻歴



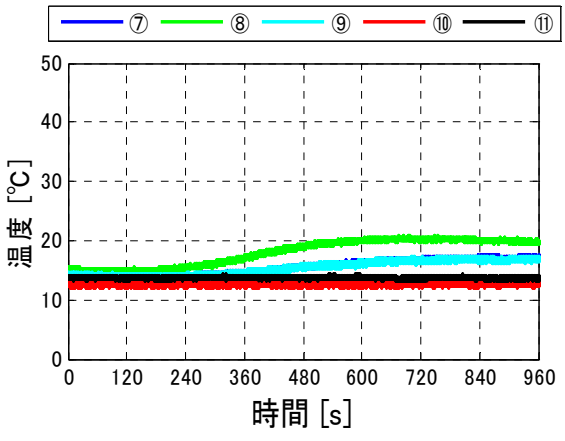
(c)　各サイクル摩擦係数



(d)　水平荷重時刻歴

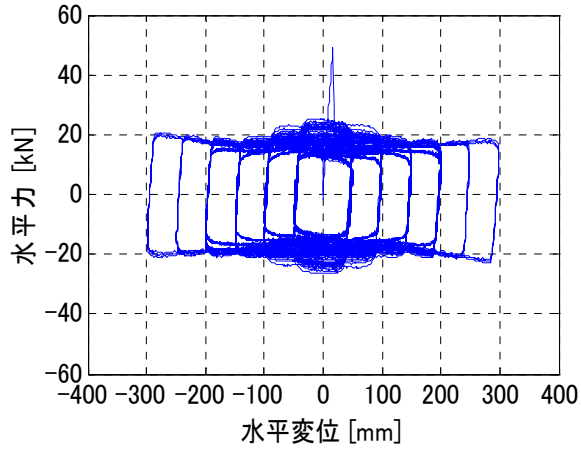


(e)　温度時刻歴（①～⑥測定点）

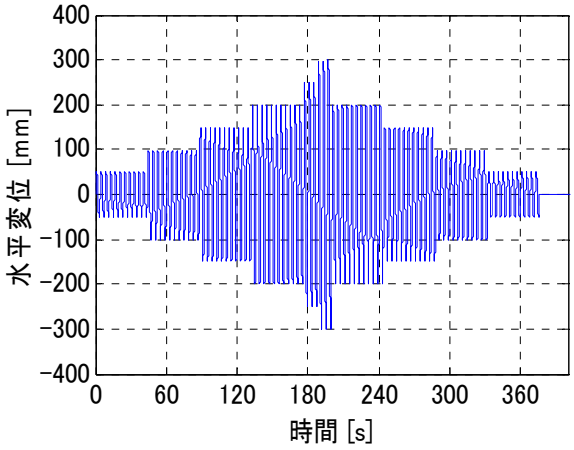


(f)　温度時刻歴（⑦～⑪測定点）

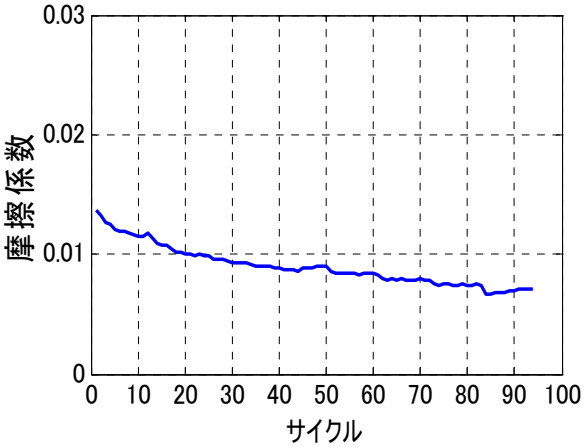
図 1.3.5-63　#2 試験体 3 セット目実験結果概要



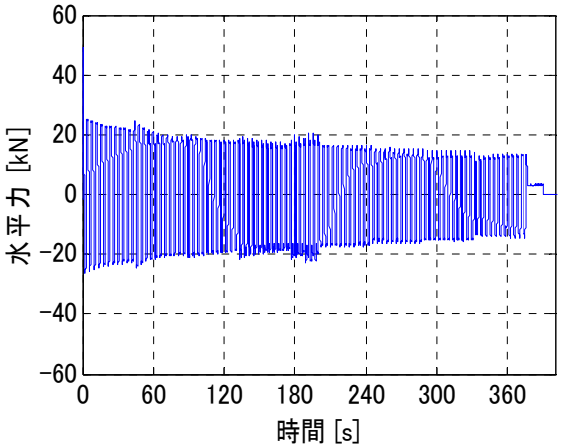
(a)　水平荷重－水平変位関係



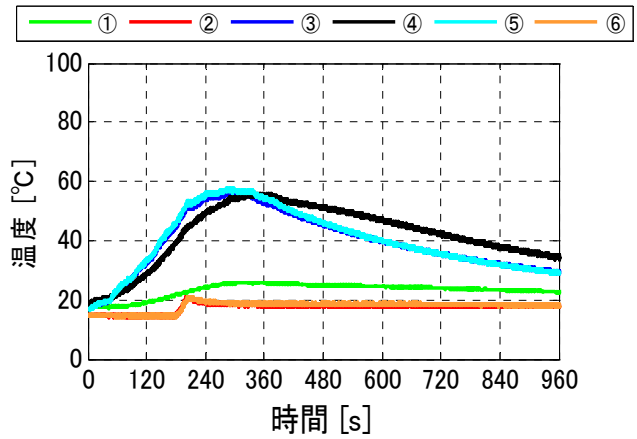
(b)　水平変位時刻歴



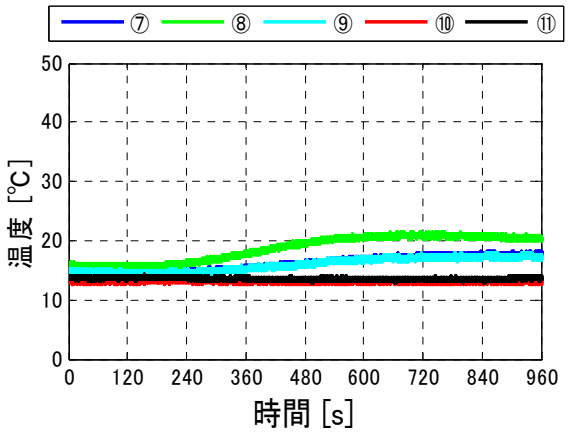
(c)　各サイクル摩擦係数



(d)　水平荷重時刻歴

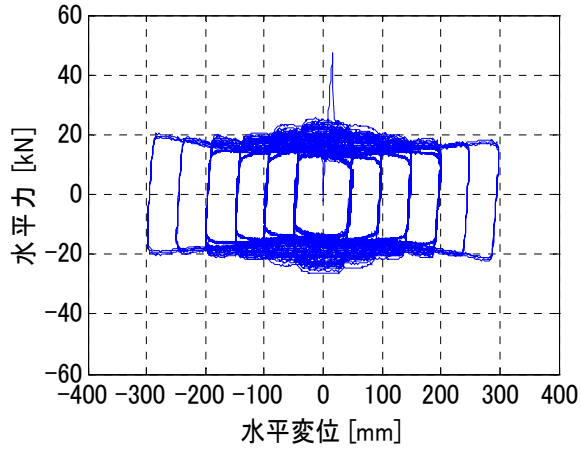


(e)　温度時刻歴（①～⑥測定点）

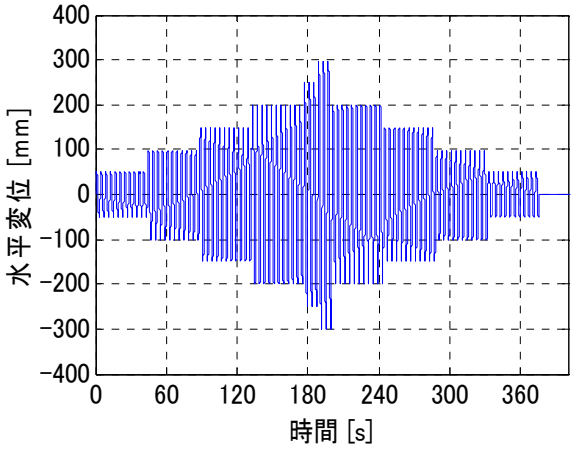


(f)　温度時刻歴（⑦～⑪測定点）

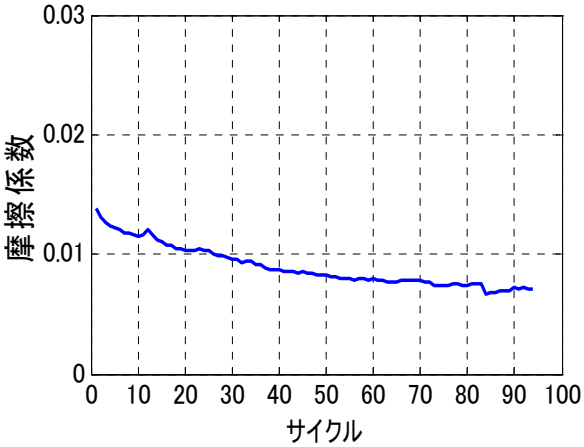
図 1.3.5-64　#2 試験体 4 セット目実験結果概要



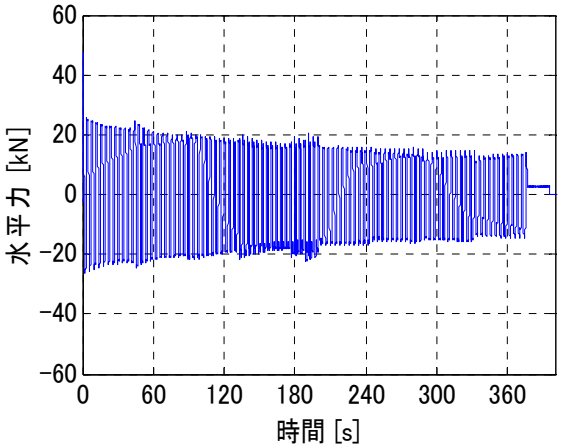
(a)　水平荷重－水平変位関係



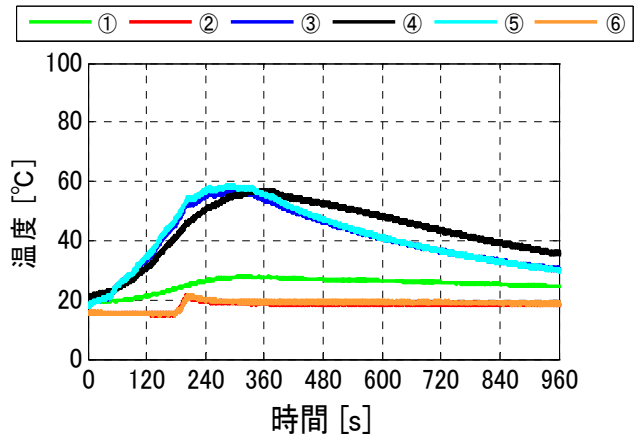
(b)　水平変位時刻歴



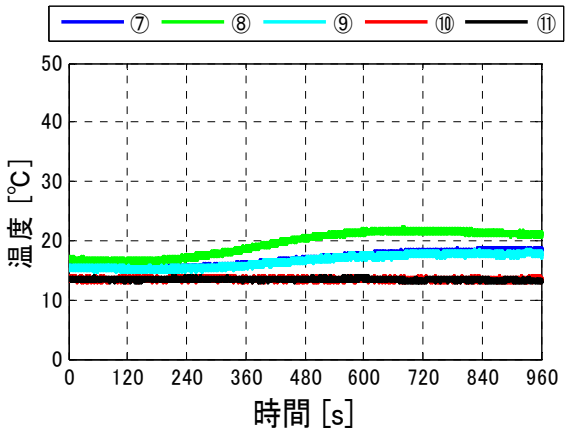
(c)　各サイクル摩擦係数



(d)　水平荷重時刻歴

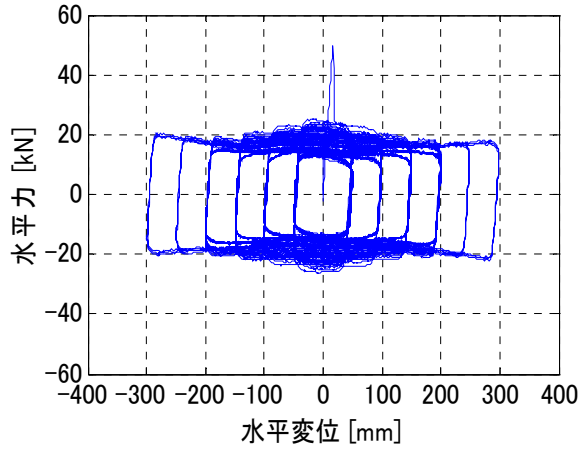


(e)　温度時刻歴（①～⑥測定点）

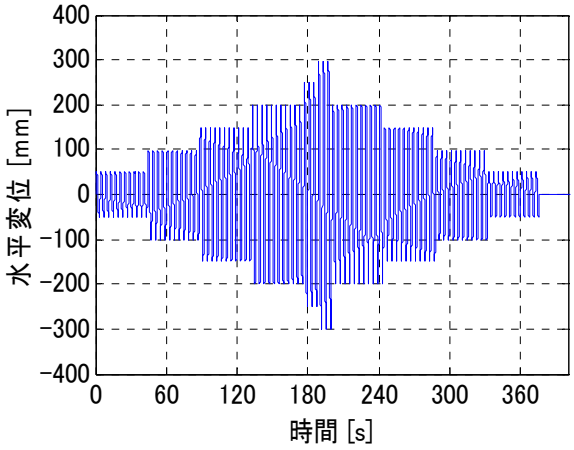


(f)　温度時刻歴（⑦～⑪測定点）

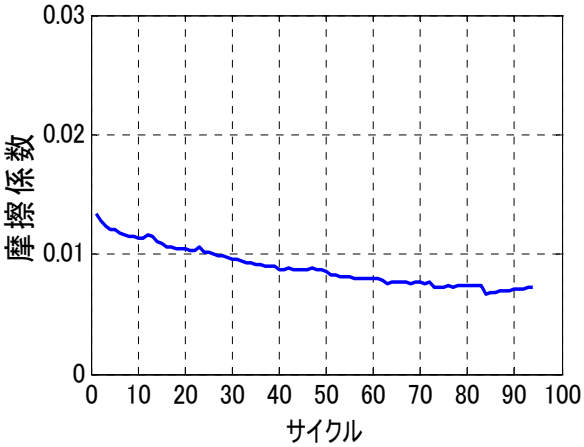
図 1.3.5-65　#2 試験体 5 セット目実験結果概要



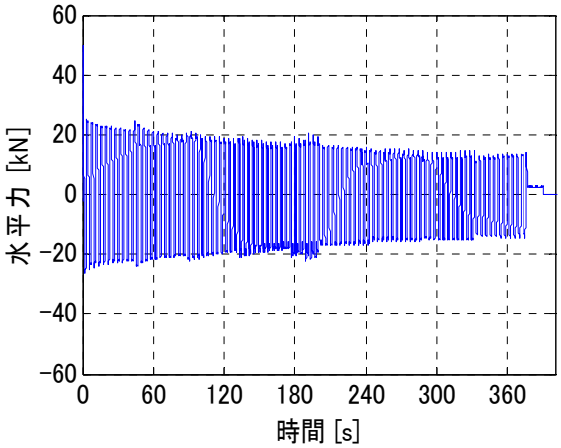
(a)　水平荷重－水平変位関係



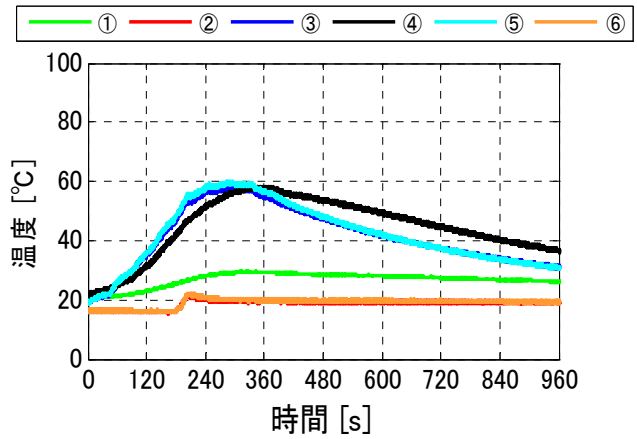
(b)　水平変位時刻歴



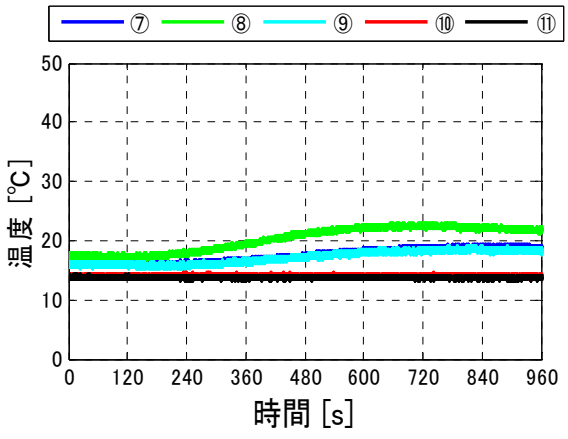
(c)　各サイクル摩擦係数



(d)　水平荷重時刻歴

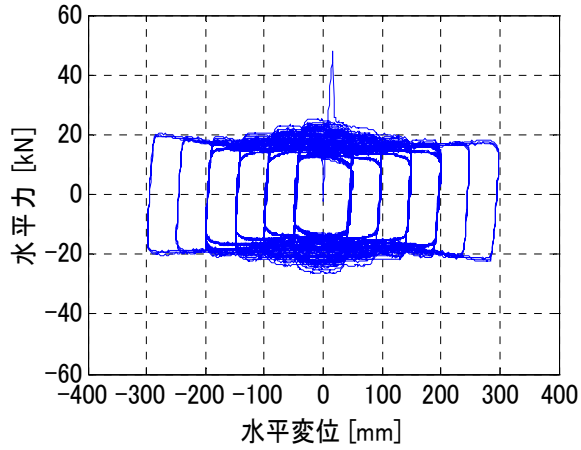


(e)　温度時刻歴（①～⑥測定点）

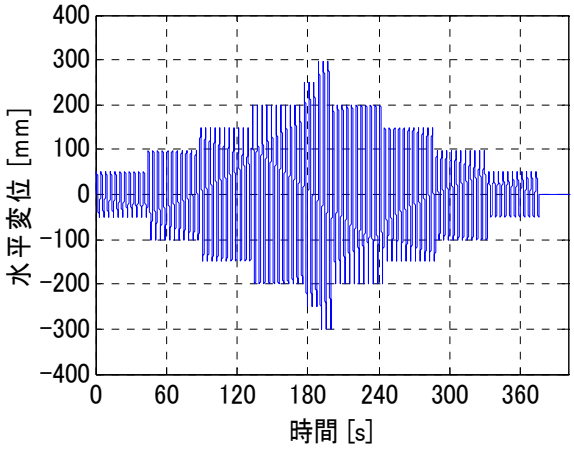


(f)　温度時刻歴（⑦～⑪測定点）

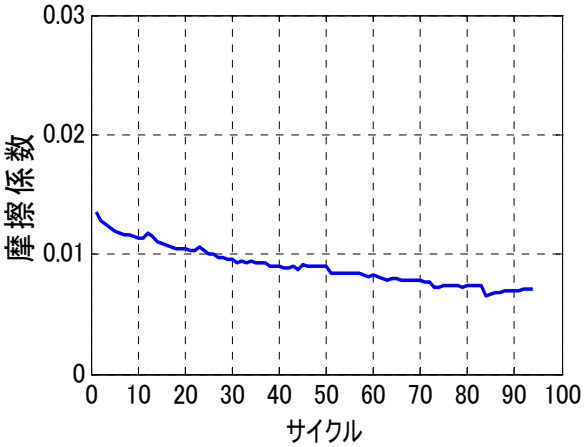
図 1.3.5-66　#2 試験体 6 セット目実験結果概要



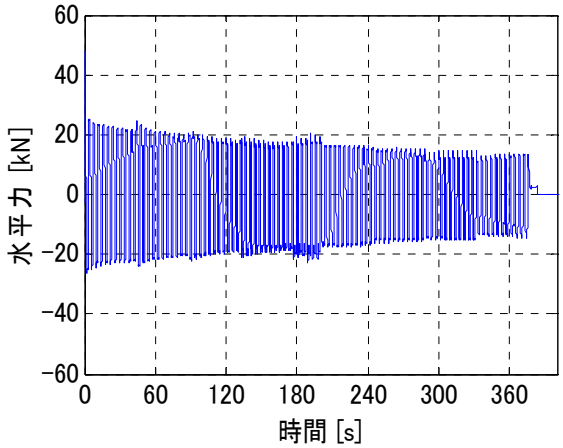
(a)　水平荷重－水平変位関係



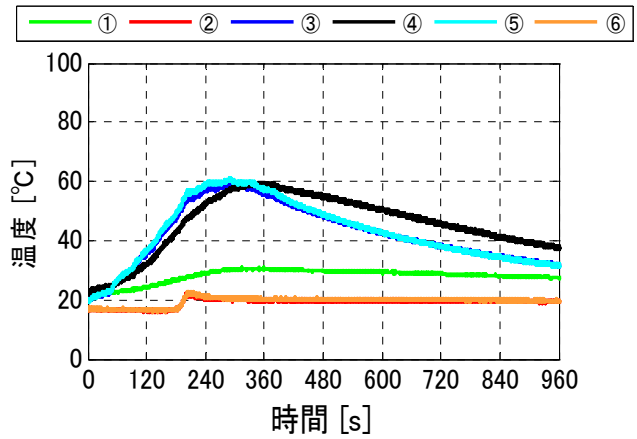
(b)　水平変位時刻歴



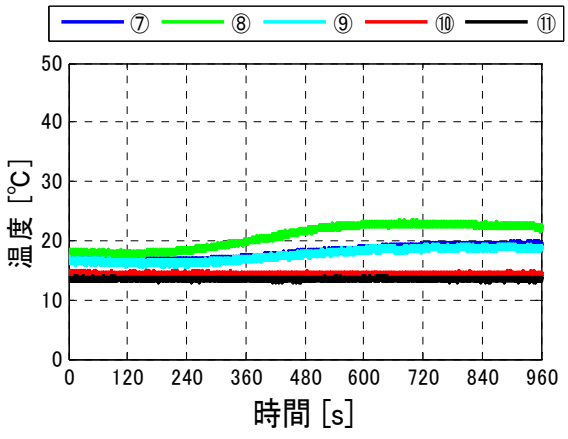
(c)　各サイクル摩擦係数



(d)　水平荷重時刻歴

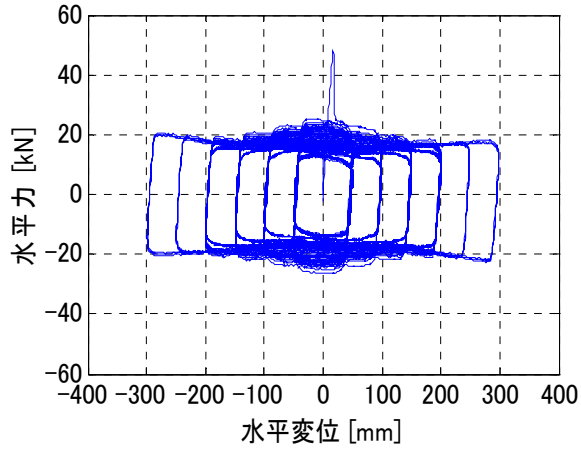


(e)　温度時刻歴（①～⑥測定点）

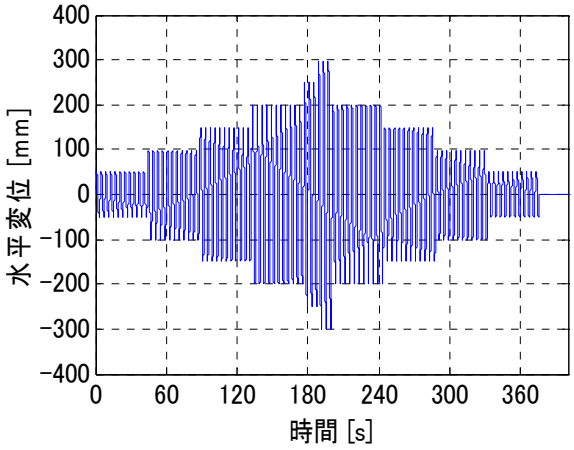


(f)　温度時刻歴（⑦～⑪測定点）

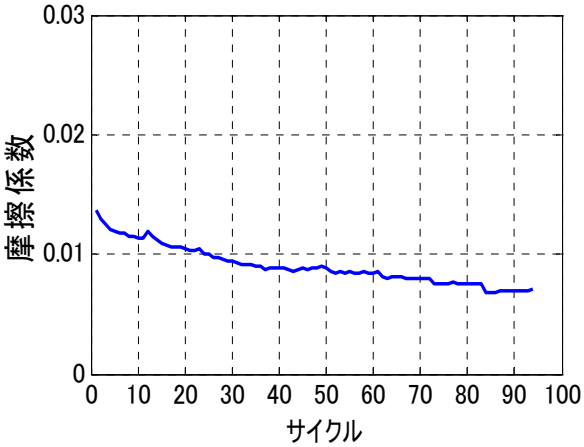
図 1.3.5-67　#2 試験体 7 セット目実験結果概要



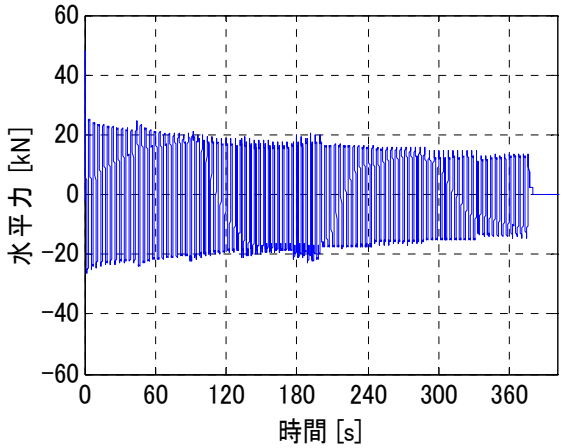
(a)　水平荷重－水平変位関係



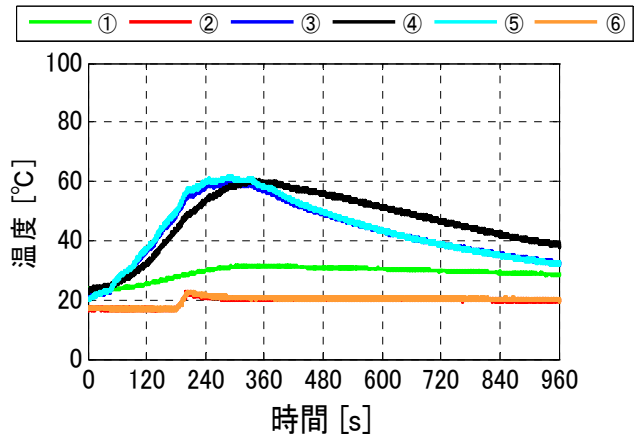
(b)　水平変位時刻歴



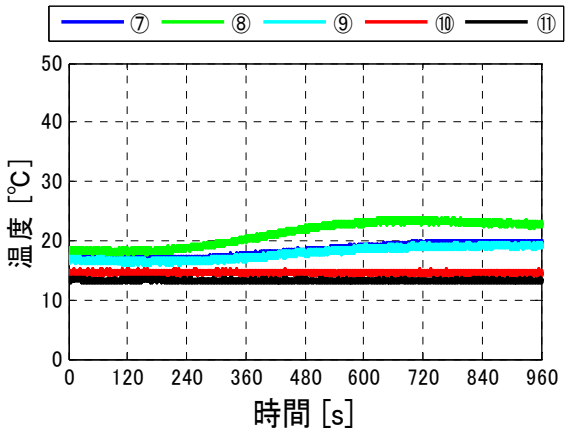
(c)　各サイクル摩擦係数



(d)　水平荷重時刻歴

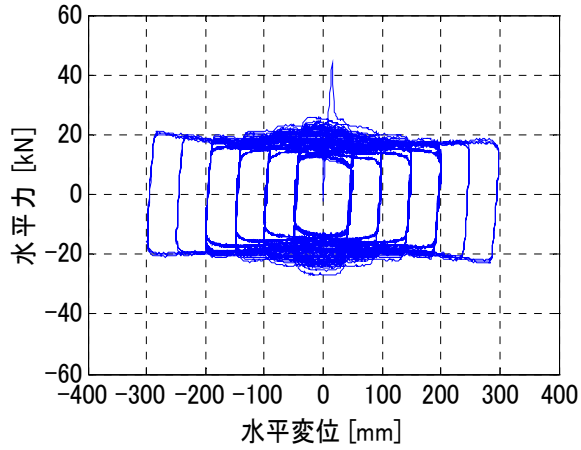


(e)　温度時刻歴（①～⑥測定点）

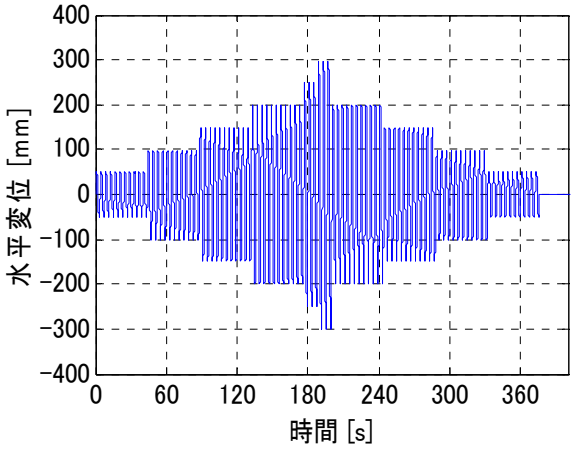


(f)　温度時刻歴（⑦～⑪測定点）

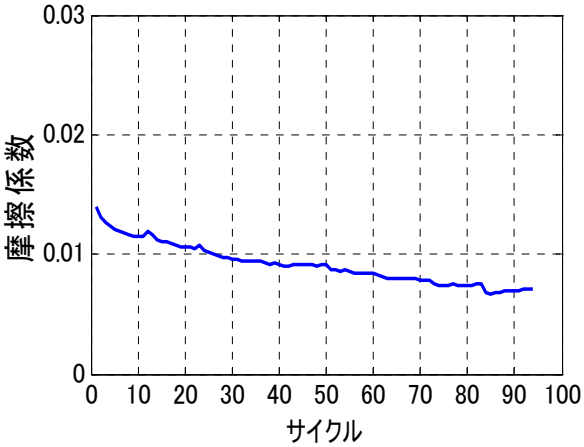
図 1.3.5-68　#2 試験体 8 セット目実験結果概要



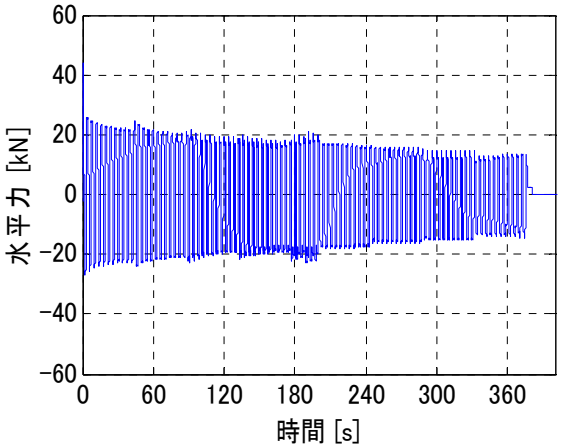
(a)　水平荷重－水平変位関係



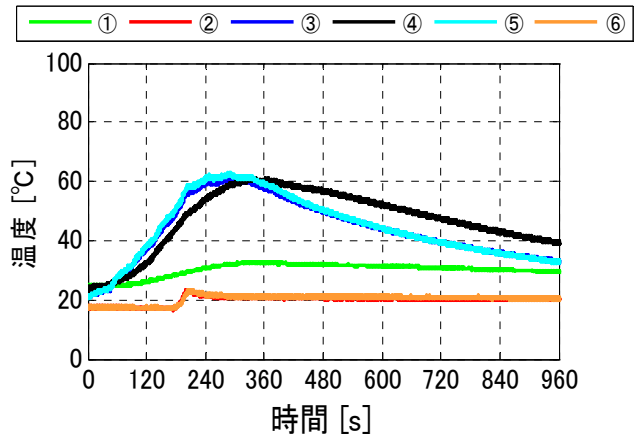
(b)　水平変位時刻歴



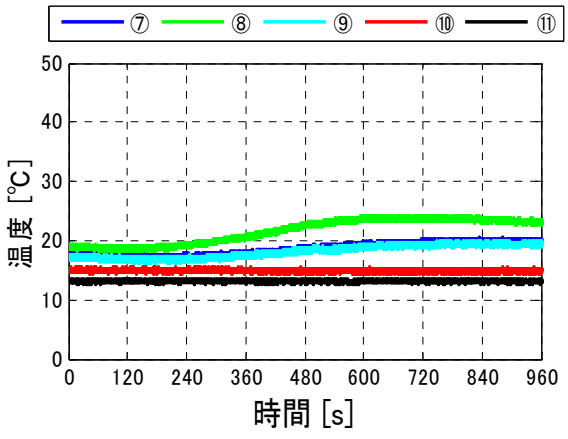
(c)　各サイクル摩擦係数



(d)　水平荷重時刻歴

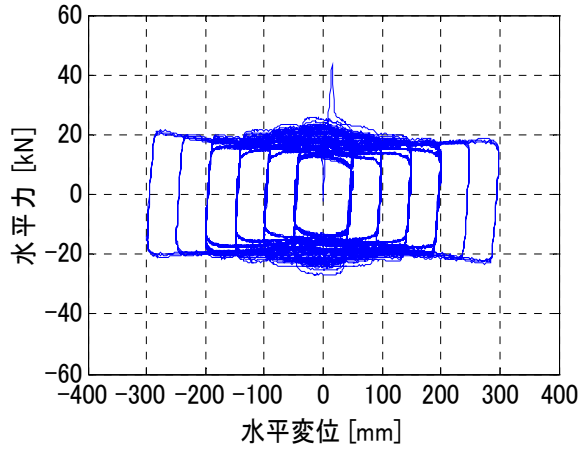


(e)　温度時刻歴（①～⑥測定点）

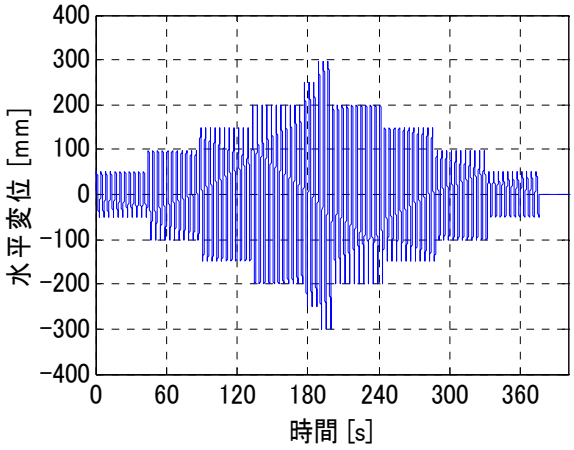


(f)　温度時刻歴（⑦～⑪測定点）

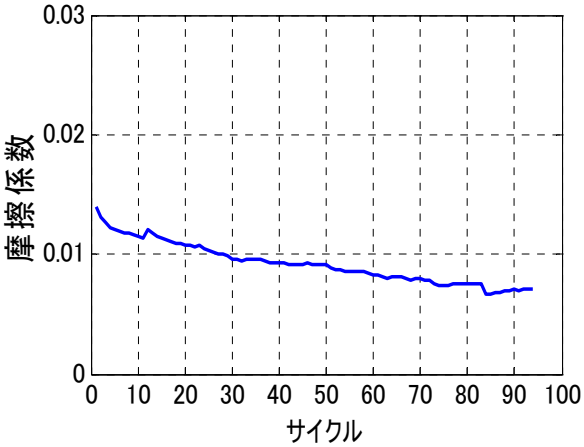
図 1.3.5-69　#2 試験体 9 セット目実験結果概要



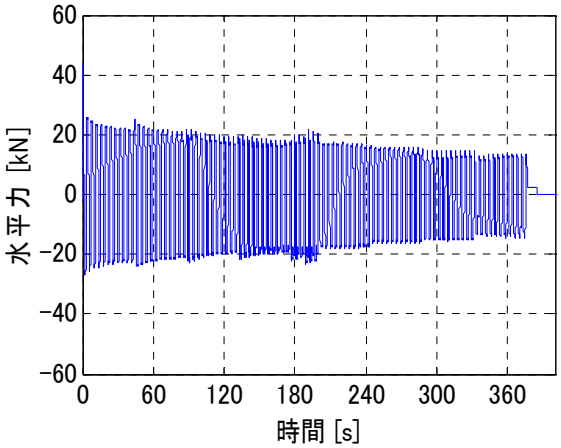
(a)　水平荷重－水平変位関係



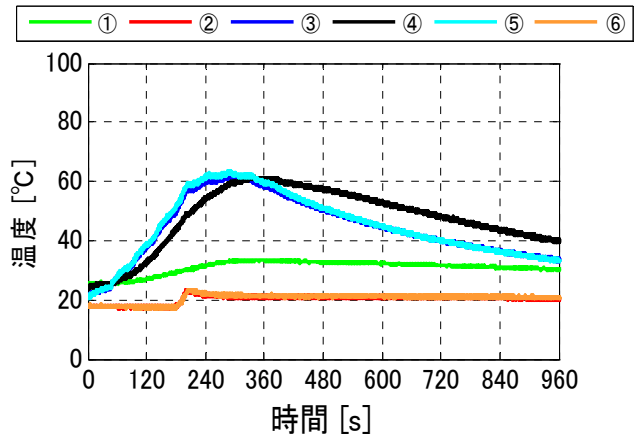
(b)　水平変位時刻歴



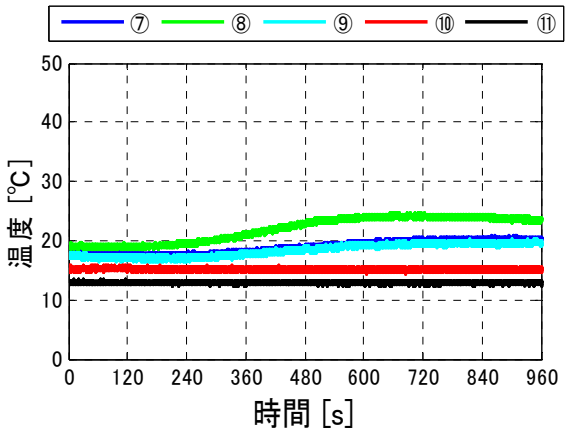
(c)　各サイクル摩擦係数



(d)　水平荷重時刻歴

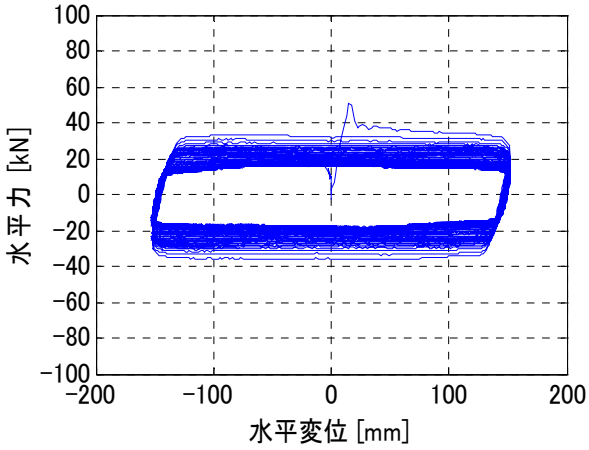


(e)　温度時刻歴（①～⑥測定点）

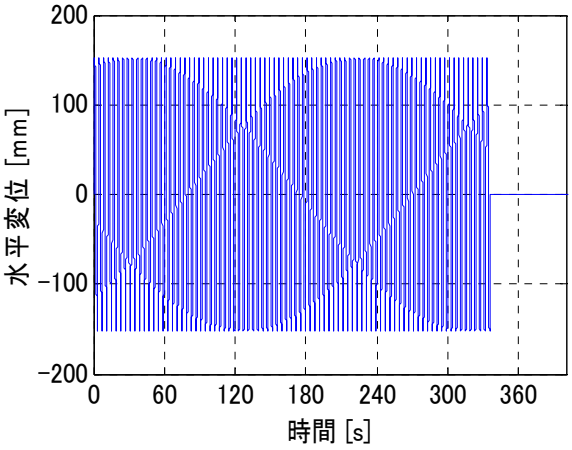


(f)　温度時刻歴（⑦～⑪測定点）

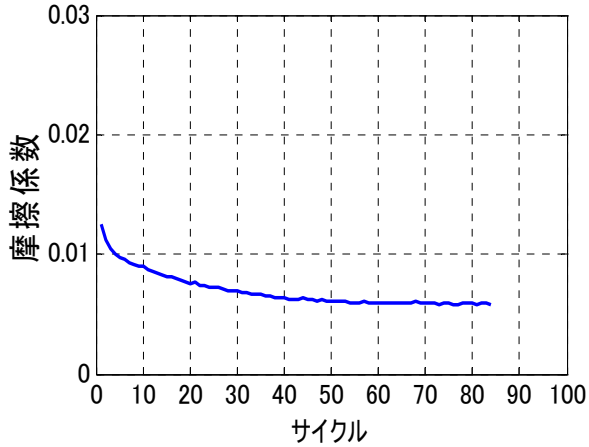
図 1.3.5-70　#2 試験体 10 セット目実験結果概要



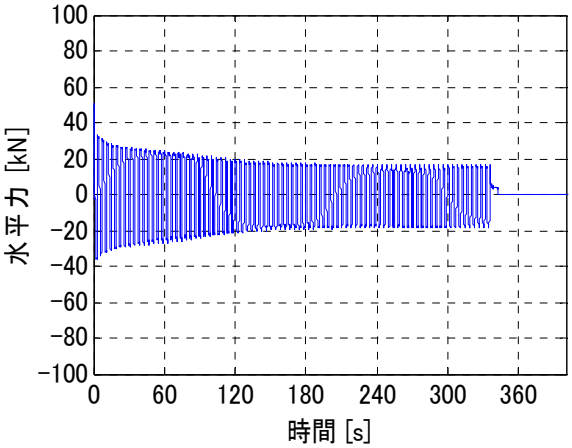
(a)　水平荷重－水平変位関係



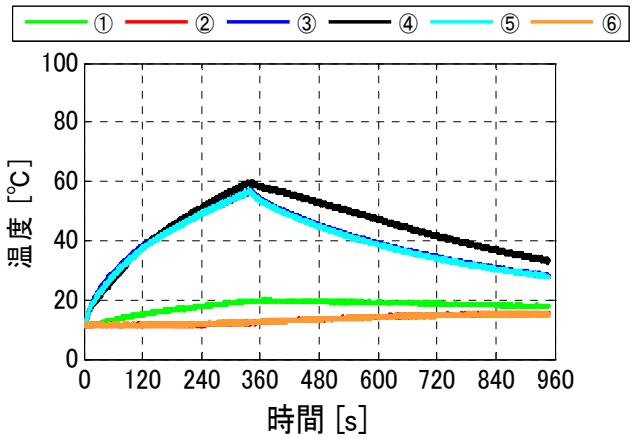
(b)　水平変位時刻歴



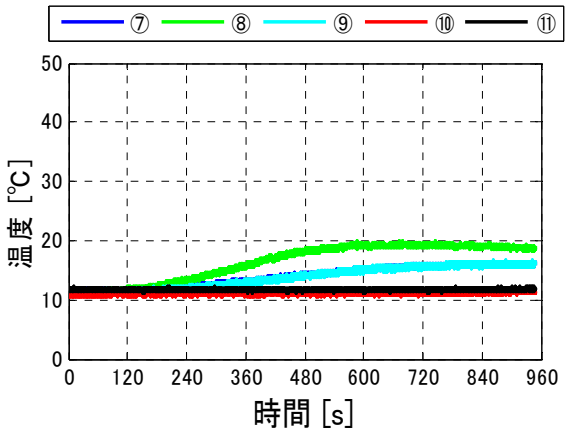
(c)　各サイクル摩擦係数



(d)　水平荷重時刻歴

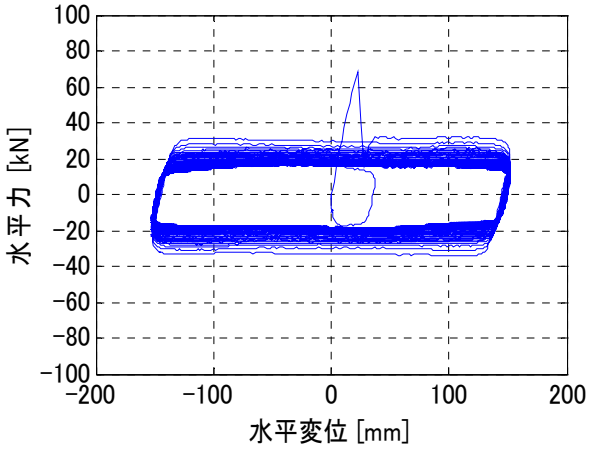


(e)　温度時刻歴（①～⑥測定点）

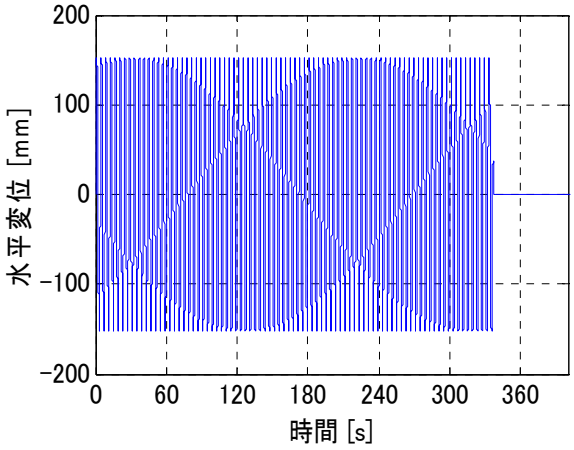


(f)　温度時刻歴（⑦～⑪測定点）

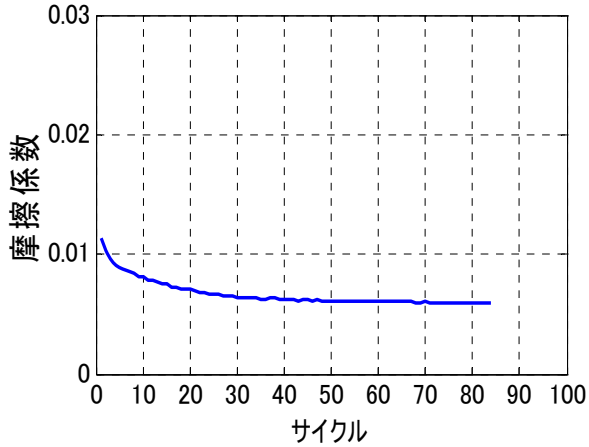
図 1.3.5-71　#3 試験体 1 セット目実験結果概要



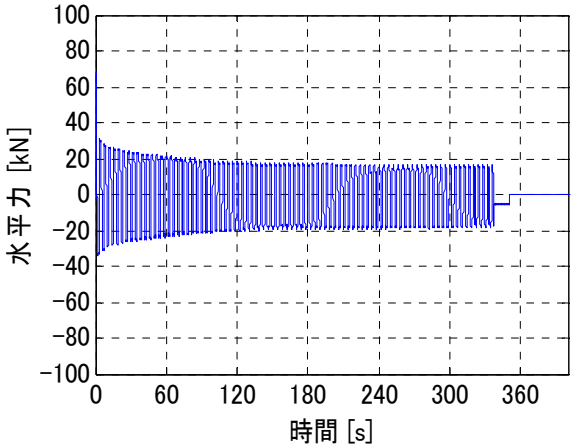
(a)　水平荷重－水平変位関係



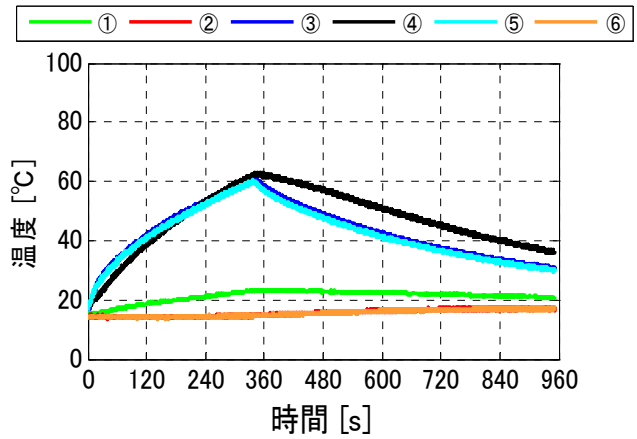
(b)　水平変位時刻歴



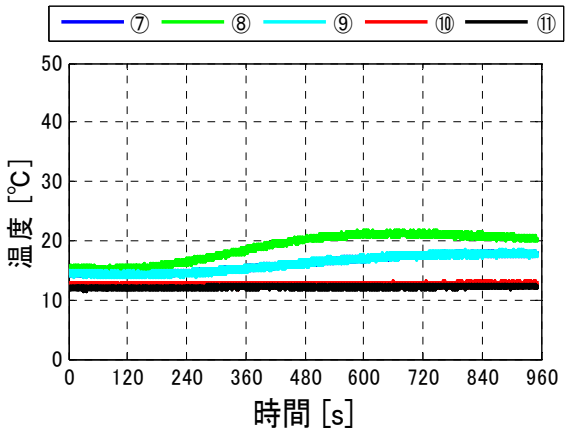
(c)　各サイクル摩擦係数



(d)　水平荷重時刻歴

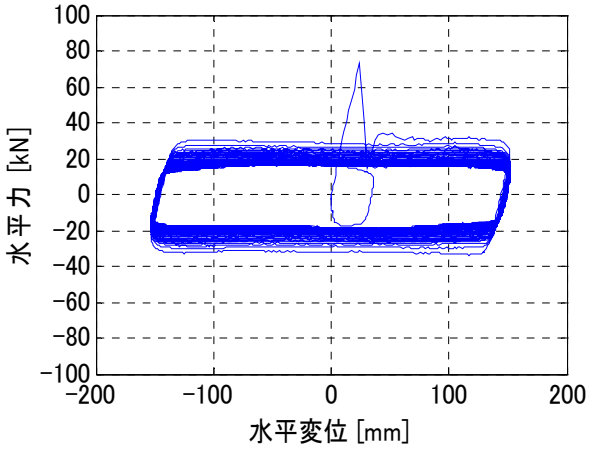


(e)　温度時刻歴（①～⑥測定点）

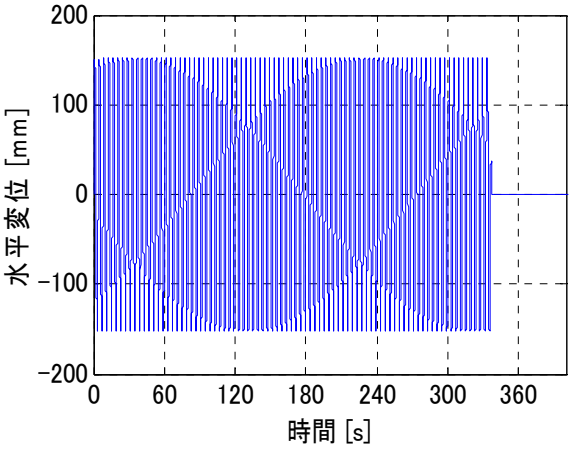


(f)　温度時刻歴（⑦～⑪測定点）

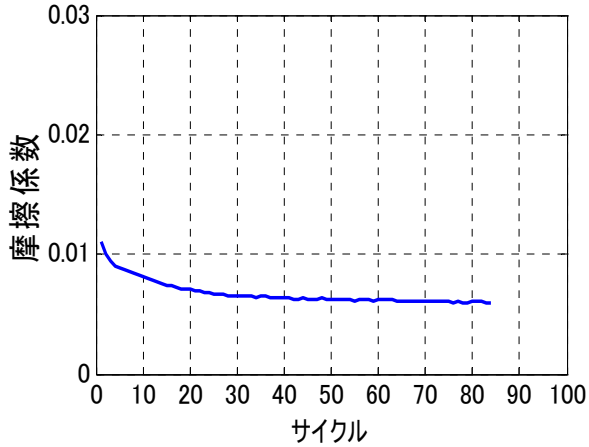
図 1.3.5-72　#3 試験体 2 セット目実験結果概要



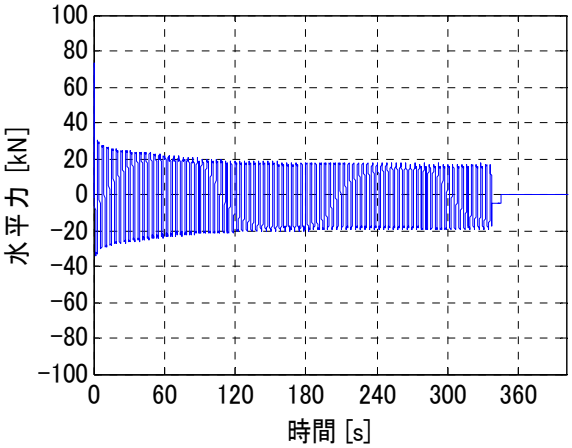
(a)　水平荷重－水平変位関係



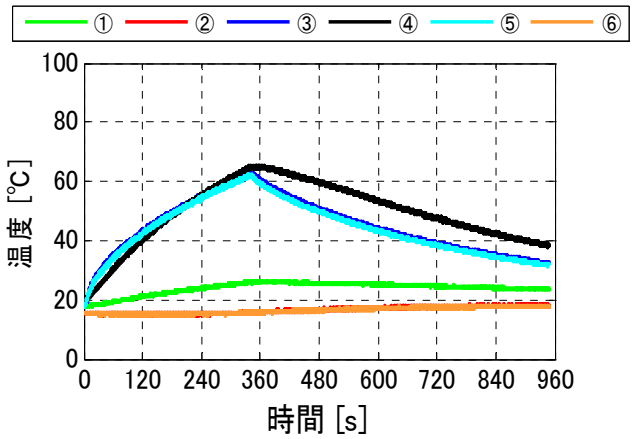
(b)　水平変位時刻歴



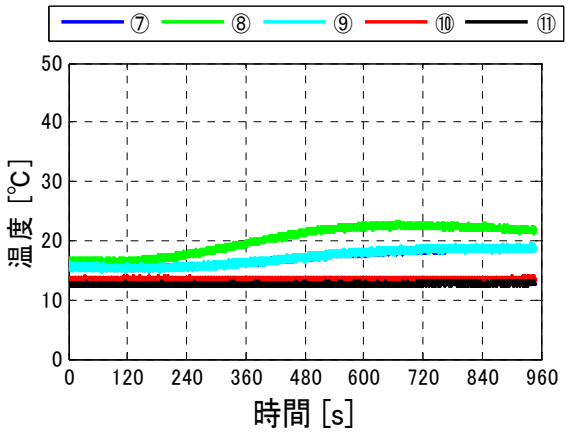
(c)　各サイクル摩擦係数



(d)　水平荷重時刻歴

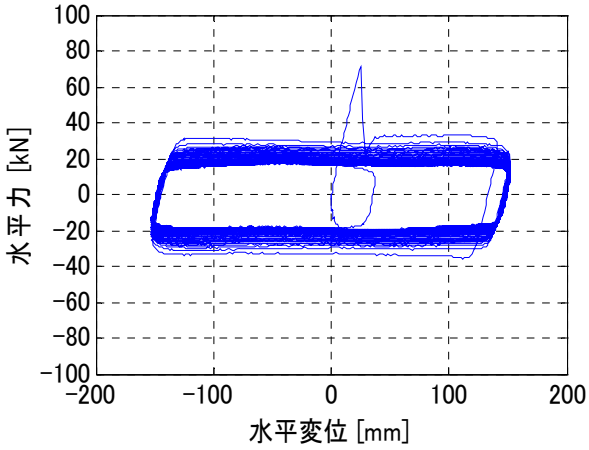


(e)　温度時刻歴（①～⑥測定点）

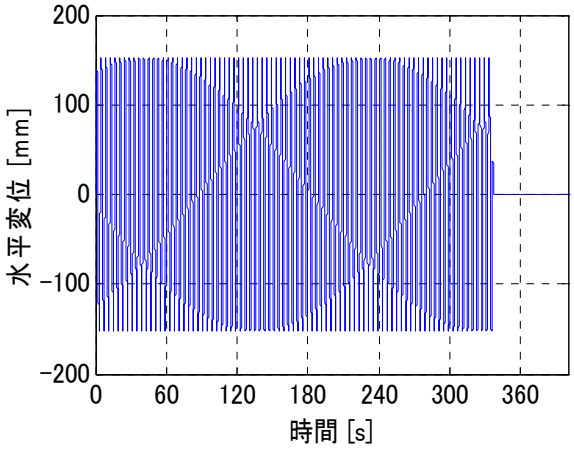


(f)　温度時刻歴（⑦～⑪測定点）

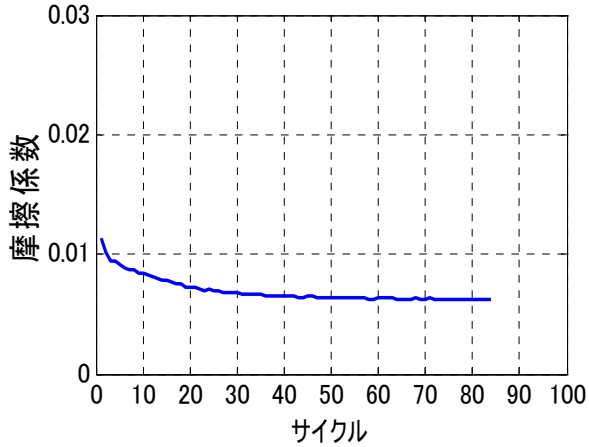
図 1.3.5-73　#3 試験体 3 セット目実験結果概要



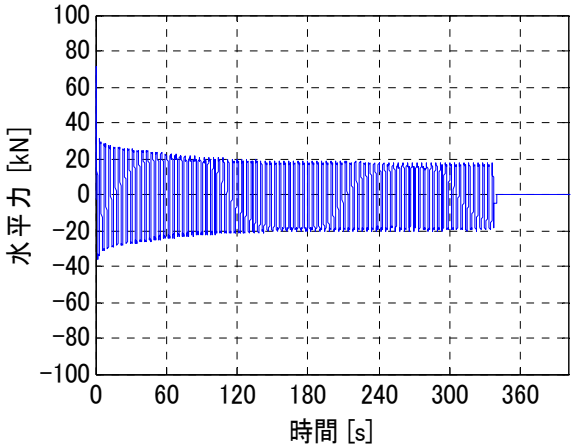
(a)　水平荷重－水平変位関係



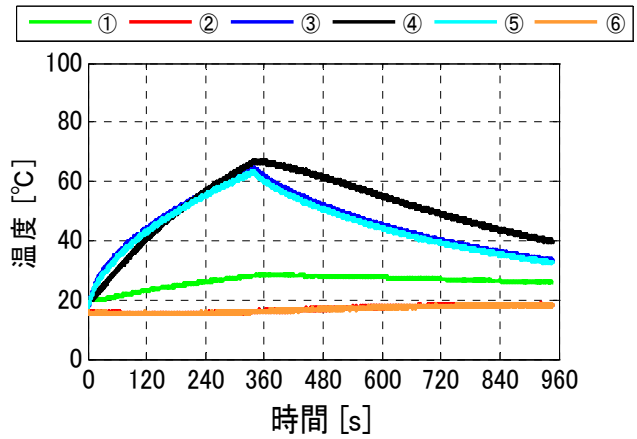
(b)　水平変位時刻歴



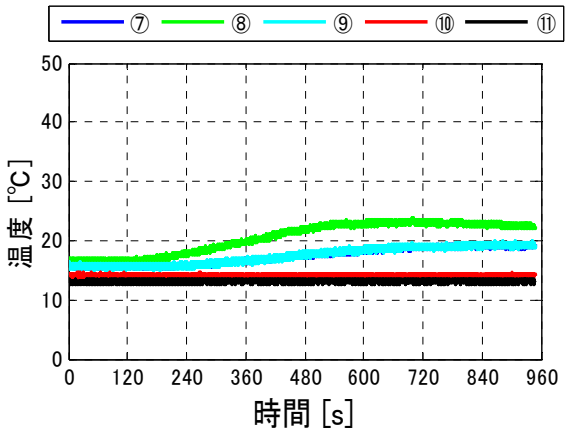
(c)　各サイクル摩擦係数



(d)　水平荷重時刻歴

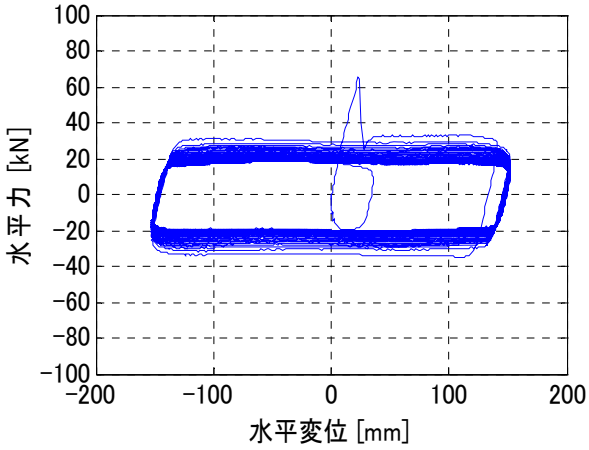


(e)　温度時刻歴（①～⑥測定点）

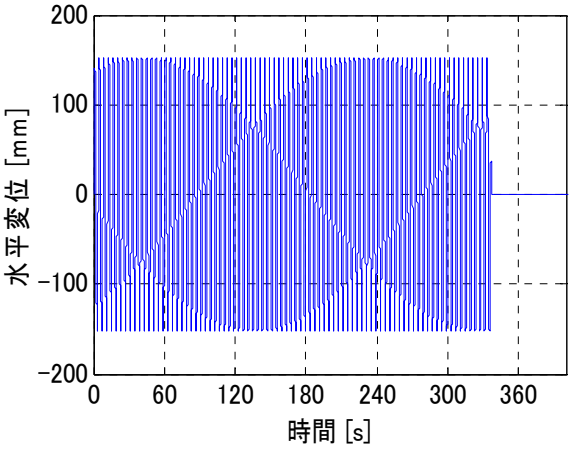


(f)　温度時刻歴（⑦～⑪測定点）

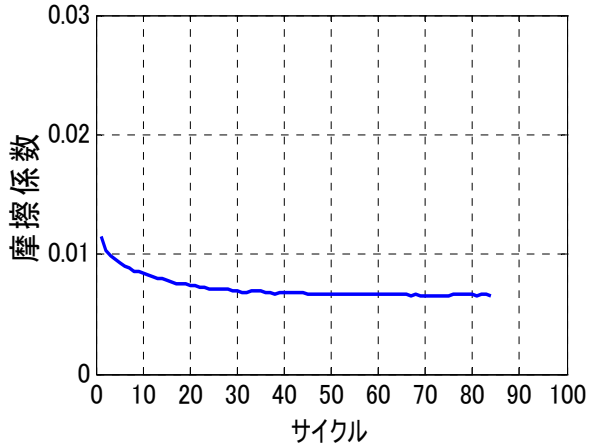
図 1.3.5-74　#3 試験体 4 セット目実験結果概要



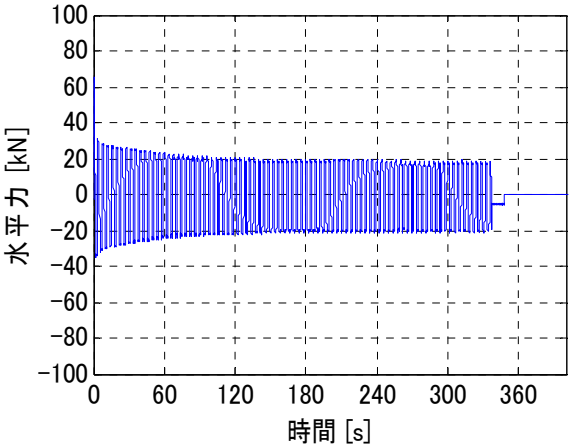
(a)　水平荷重－水平変位関係



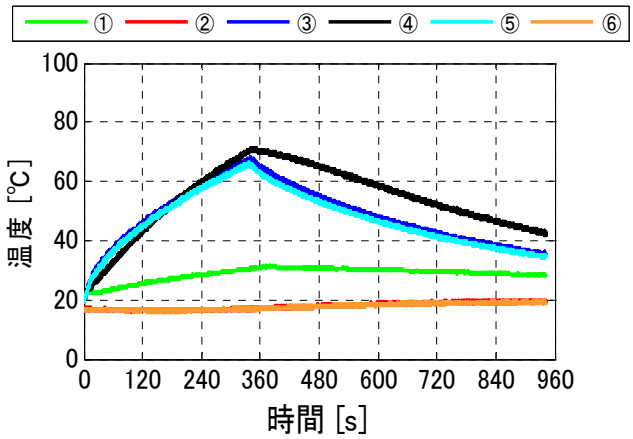
(b)　水平変位時刻歴



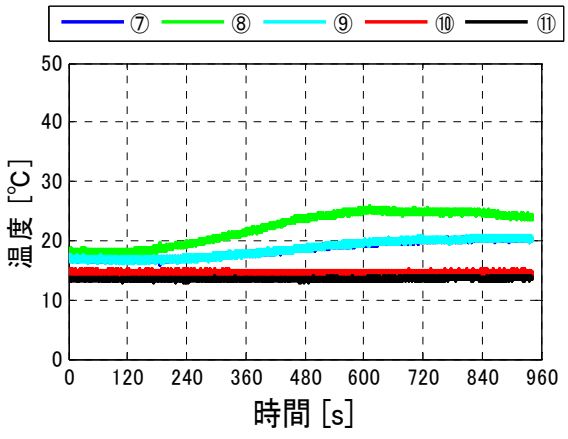
(c)　各サイクル摩擦係数



(d)　水平荷重時刻歴

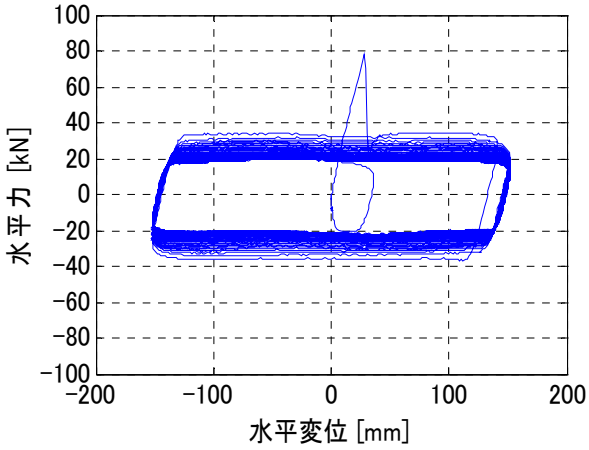


(e)　温度時刻歴（①～⑥測定点）

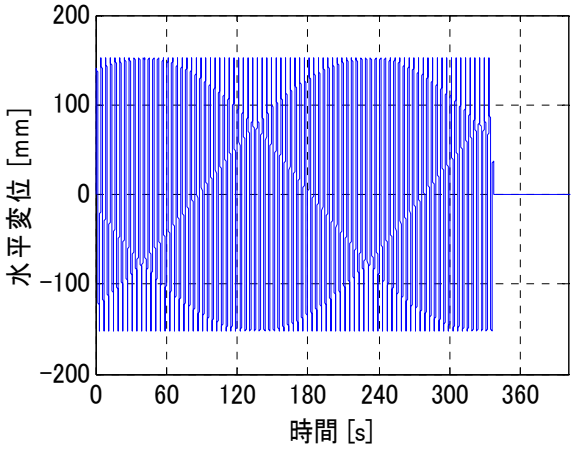


(f)　温度時刻歴（⑦～⑪測定点）

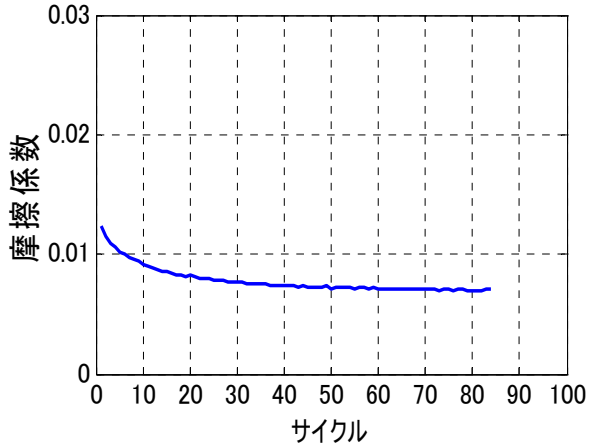
図 1.3.5-75　#3 試験体 5 セット目実験結果概要



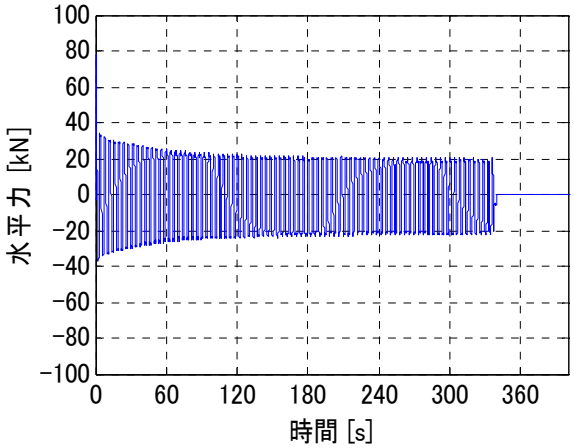
(a)　水平荷重－水平変位関係



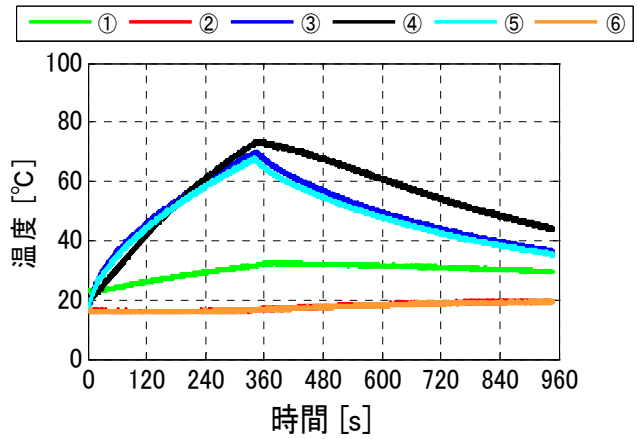
(b)　水平変位時刻歴



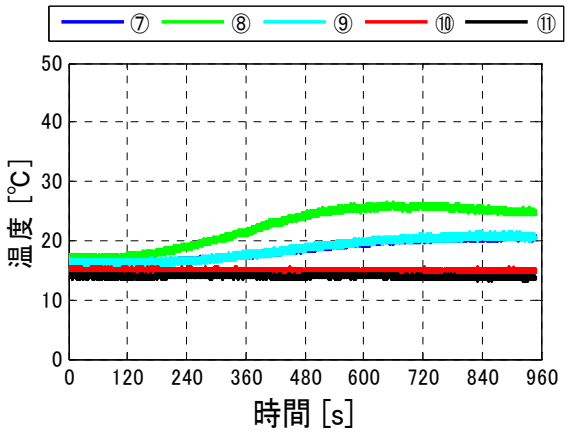
(c)　各サイクル摩擦係数



(d)　水平荷重時刻歴

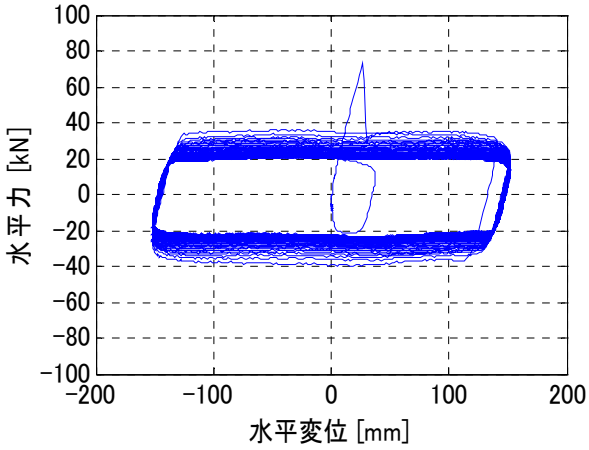


(e)　温度時刻歴（①～⑥測定点）

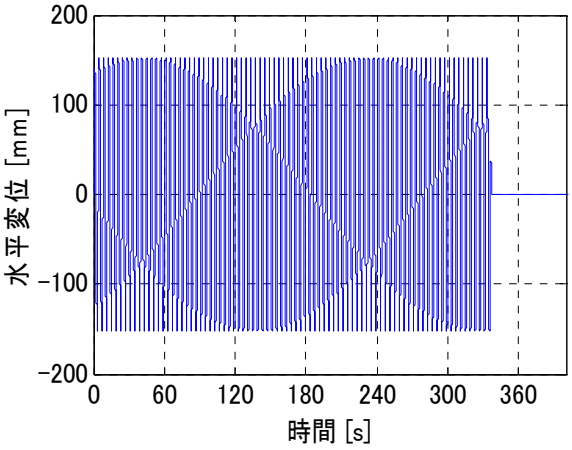


(f)　温度時刻歴（⑦～⑪測定点）

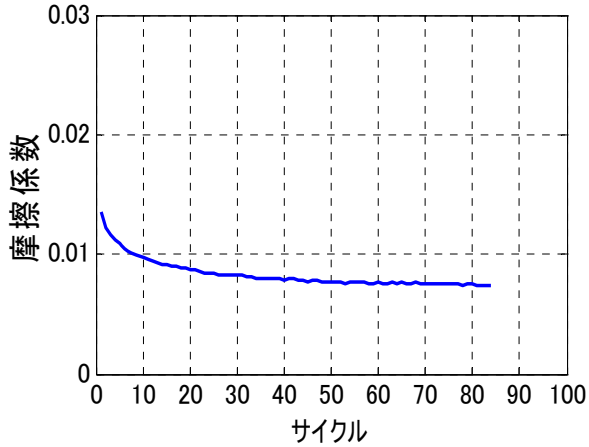
図 1.3.5-76　#3 試験体 6 セット目実験結果概要



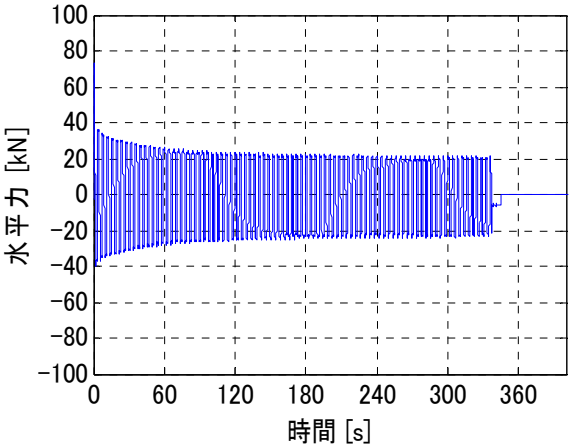
(a)　水平荷重－水平変位関係



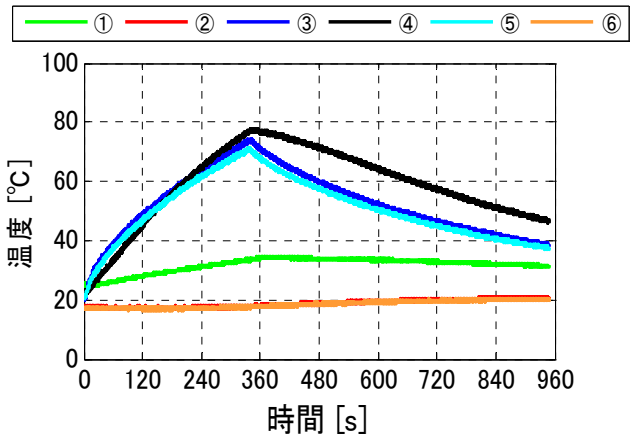
(b)　水平変位時刻歴



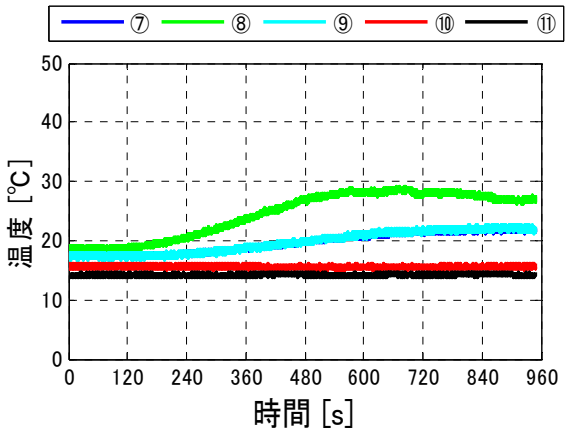
(c)　各サイクル摩擦係数



(d)　水平荷重時刻歴

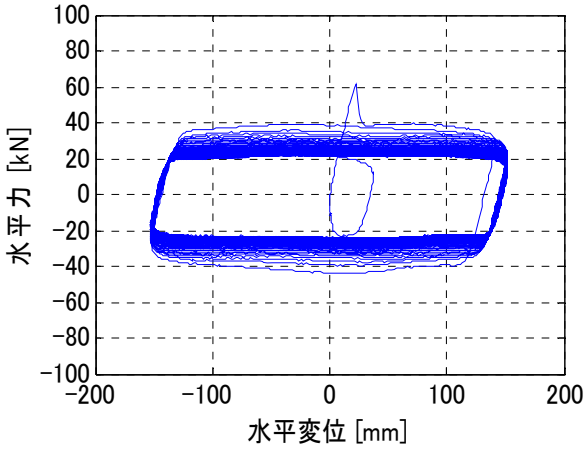


(e)　温度時刻歴（①～⑥測定点）

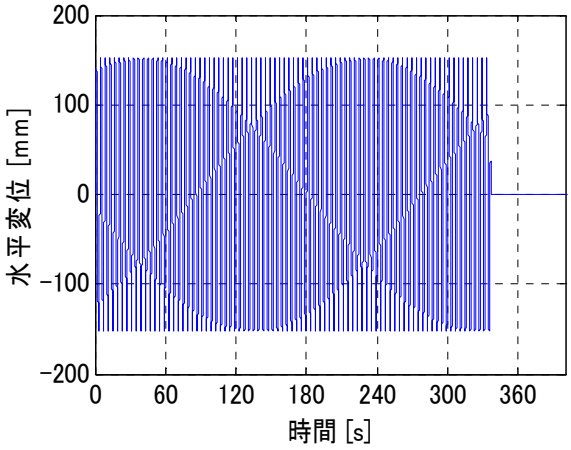


(f)　温度時刻歴（⑦～⑪測定点）

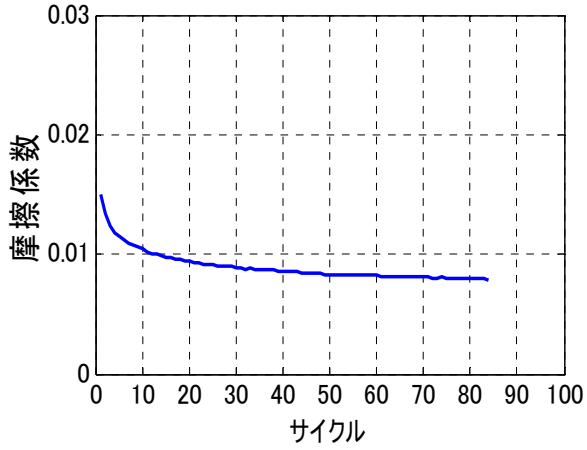
図 1.3.5-77　#3 試験体 7 セット目実験結果概要



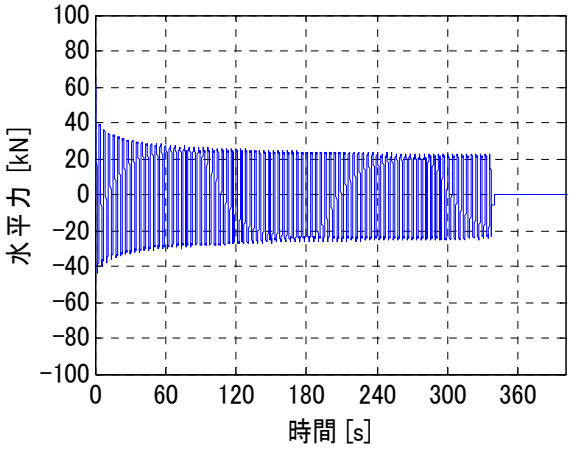
(a)　水平荷重－水平変位関係



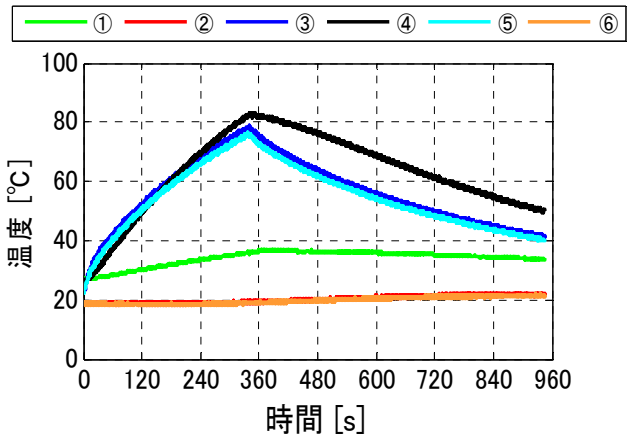
(b)　水平変位時刻歴



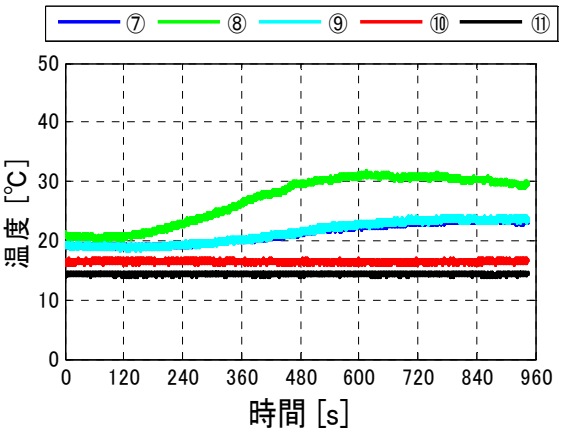
(c)　各サイクル摩擦係数



(d)　水平荷重時刻歴

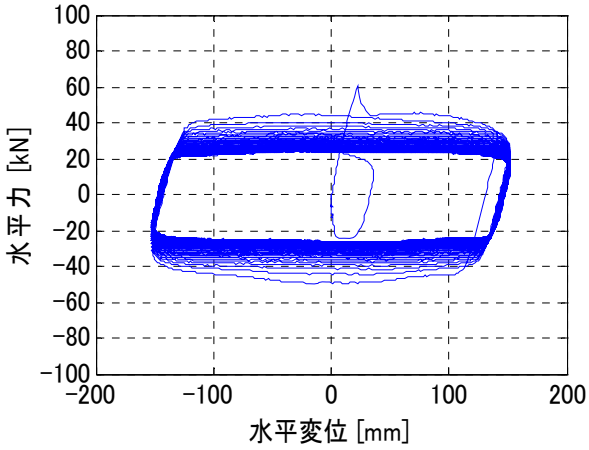


(e)　温度時刻歴（①～⑥測定点）

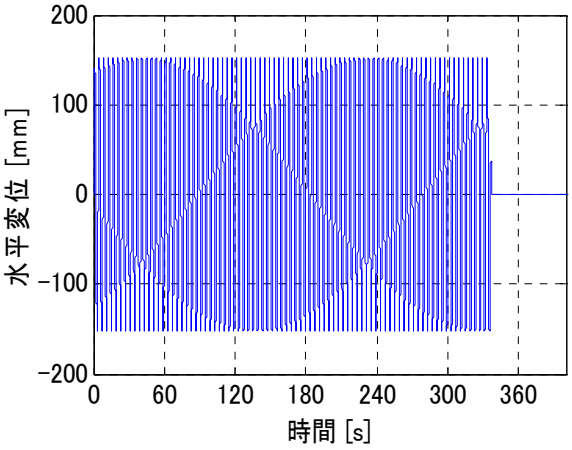


(f)　温度時刻歴（⑦～⑪測定点）

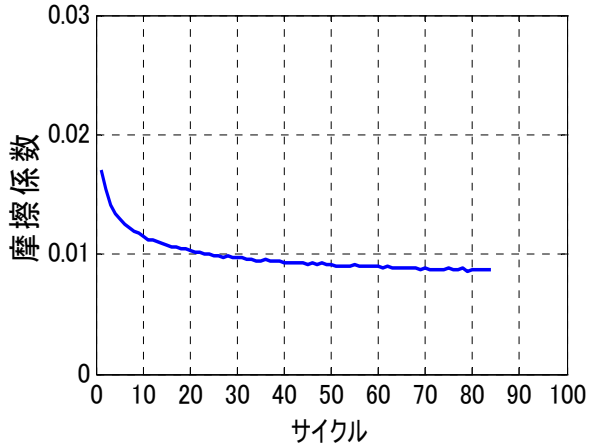
図 1.3.5-78　#3 試験体 8 セット目実験結果概要



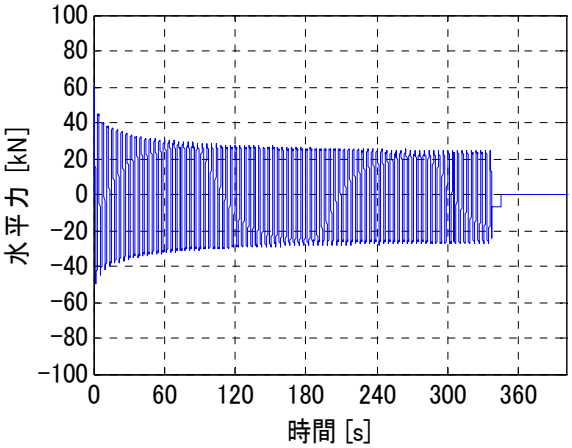
(a)　水平荷重－水平変位関係



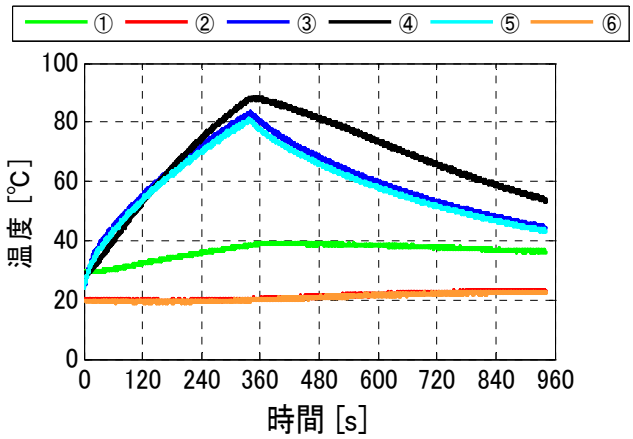
(b)　水平変位時刻歴



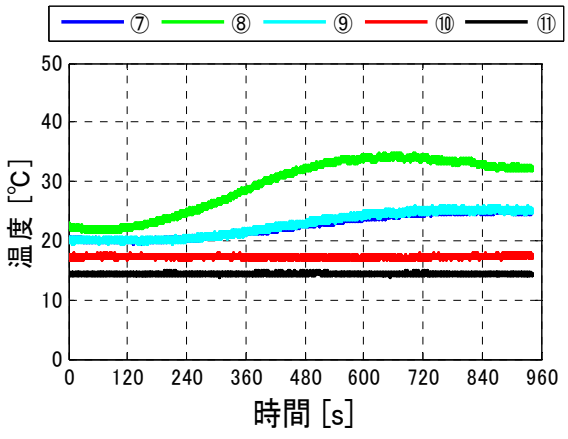
(c)　各サイクル摩擦係数



(d)　水平荷重時刻歴

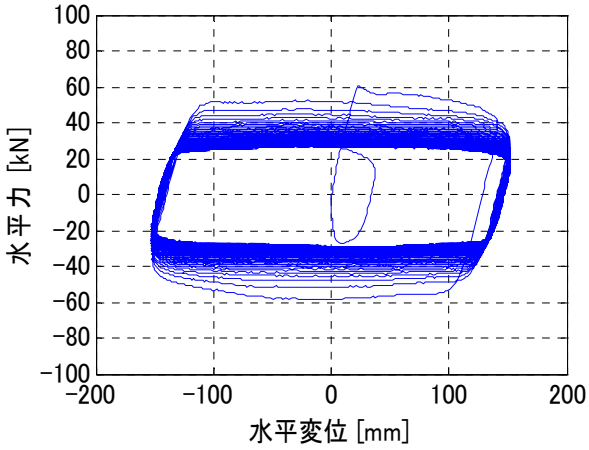


(e)　温度時刻歴（①～⑥測定点）

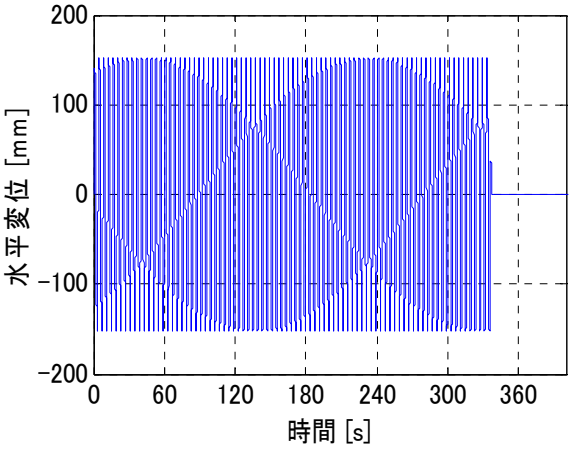


(f)　温度時刻歴（⑦～⑪測定点）

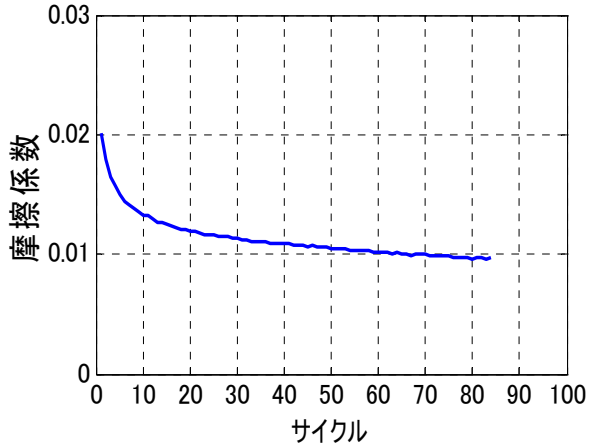
図 1.3.5-79　#3 試験体 9 セット目実験結果概要



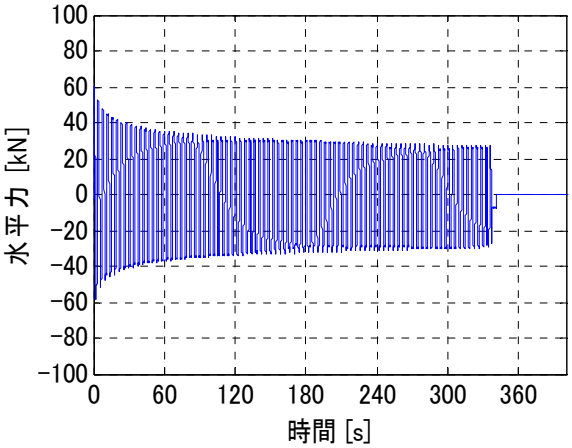
(a)　水平荷重－水平変位関係



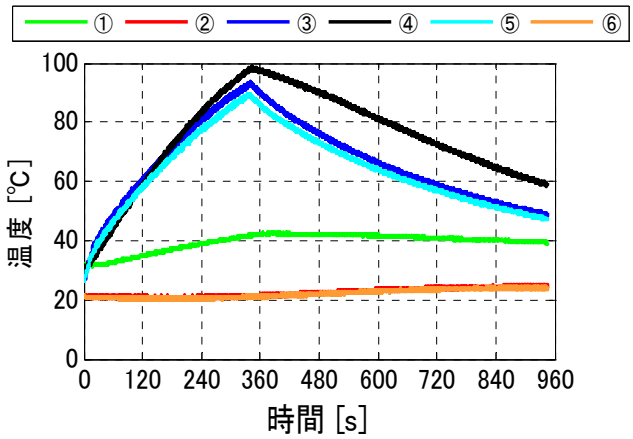
(b)　水平変位時刻歴



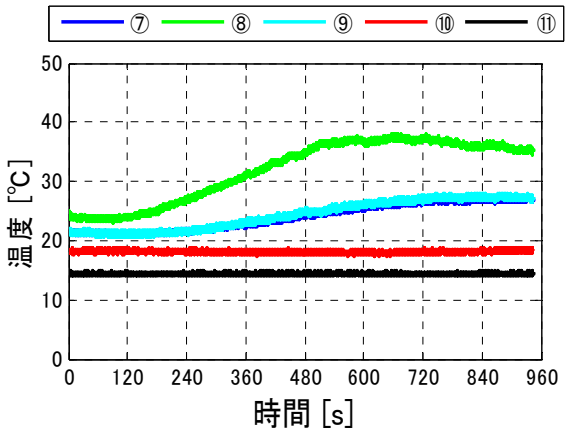
(c)　各サイクル摩擦係数



(d)　水平荷重時刻歴

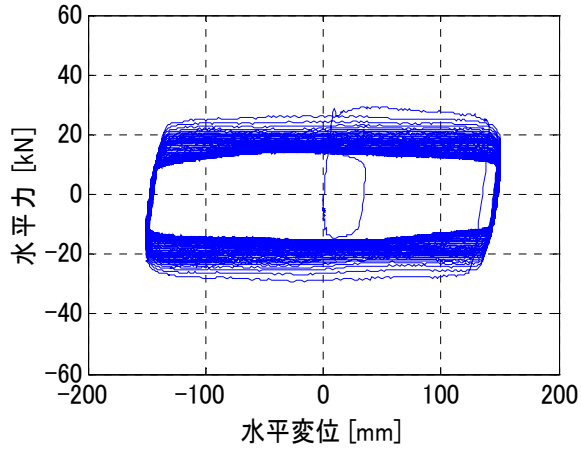


(e)　温度時刻歴（①～⑥測定点）

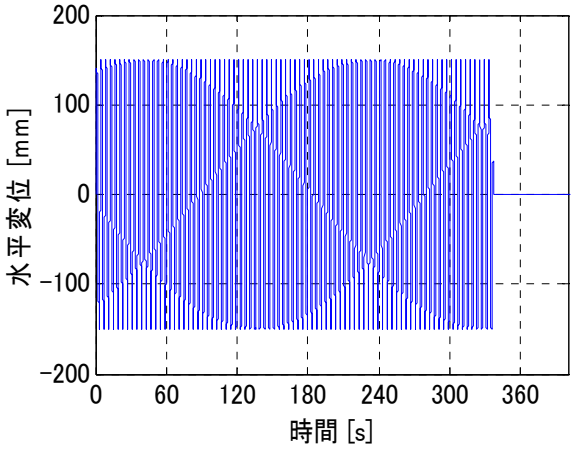


(f)　温度時刻歴（⑦～⑪測定点）

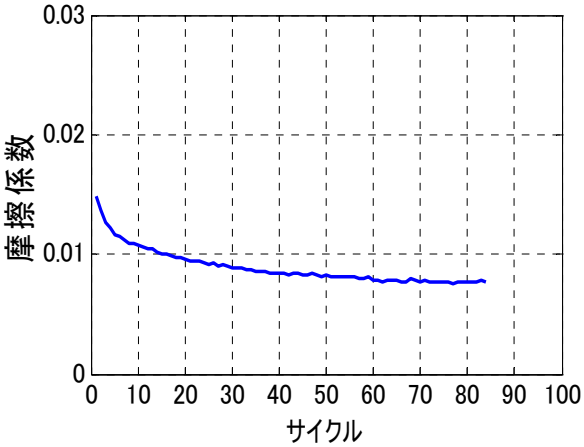
図 1.3.5-80　#3 試験体 10 セット目実験結果概要



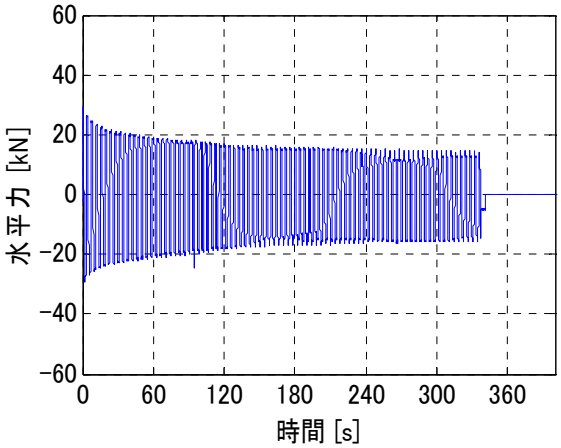
(a)　水平荷重－水平変位関係



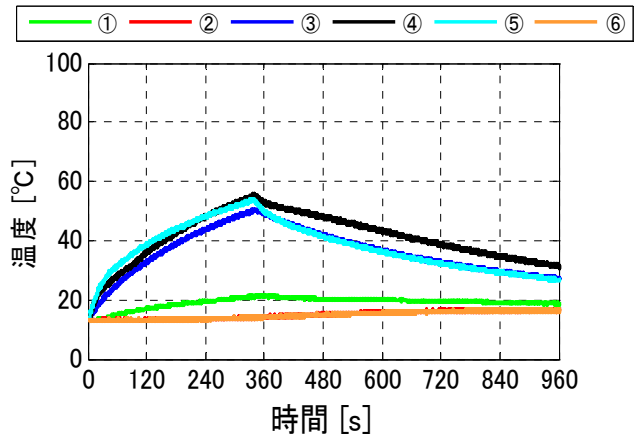
(b)　水平変位時刻歴



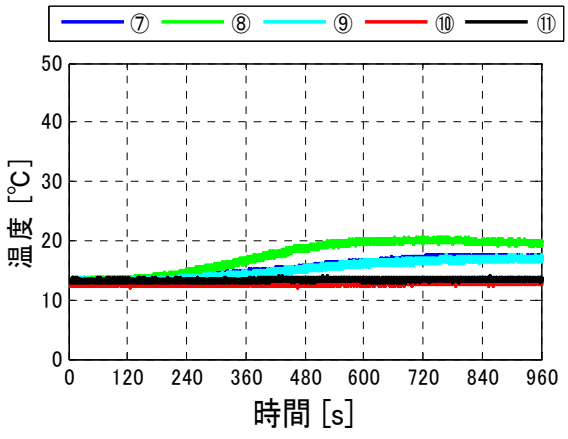
(c)　各サイクル摩擦係数



(d)　水平荷重時刻歴

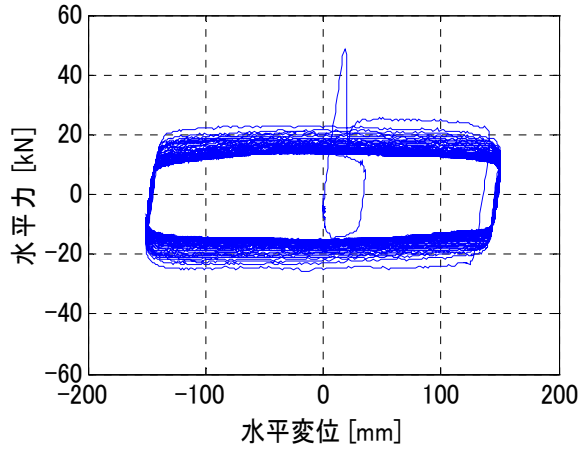


(e)　温度時刻歴（①～⑥測定点）

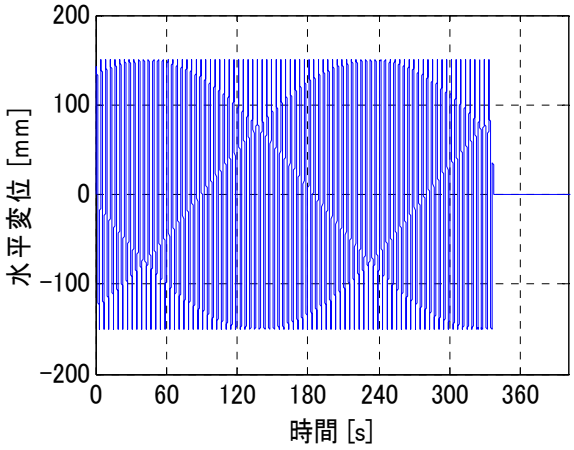


(f)　温度時刻歴（⑦～⑪測定点）

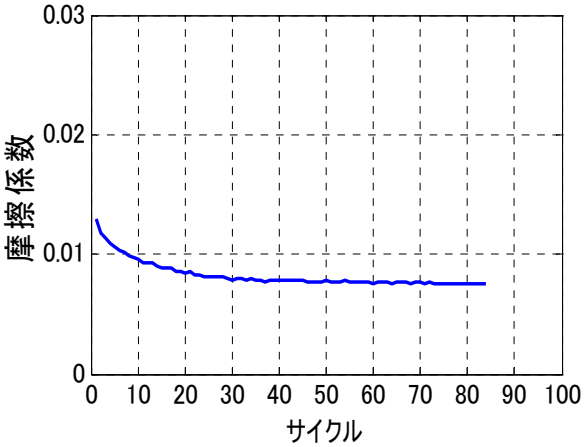
図 1.3.5-81　#4 試験体 1 セット目実験結果概要



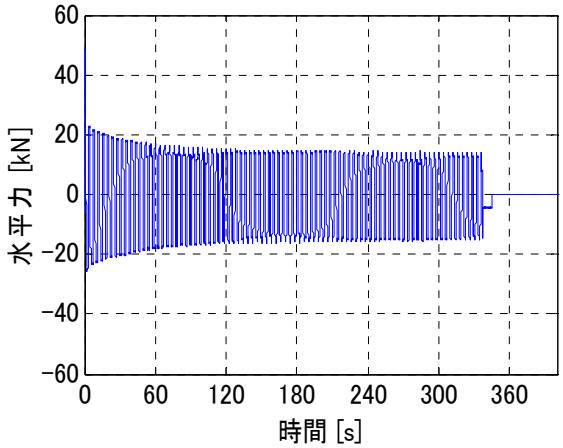
(a)　水平荷重－水平変位関係



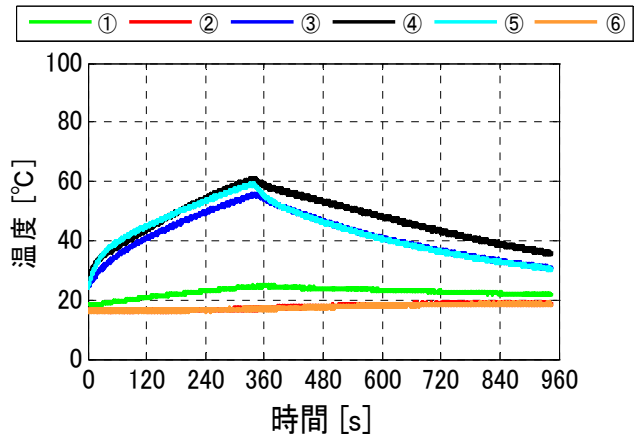
(b)　水平変位時刻歴



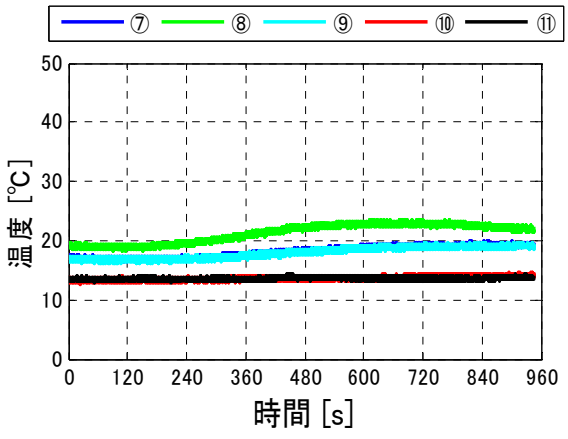
(c)　各サイクル摩擦係数



(d)　水平荷重時刻歴

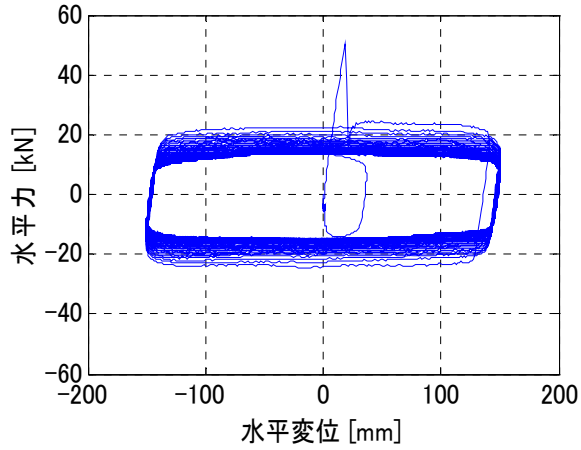


(e)　温度時刻歴（①～⑥測定点）

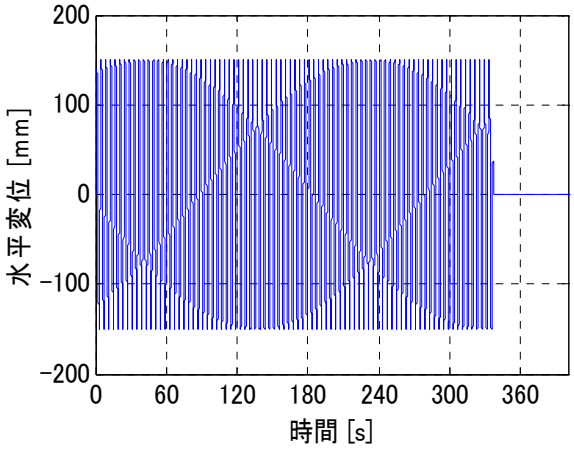


(f)　温度時刻歴（⑦～⑪測定点）

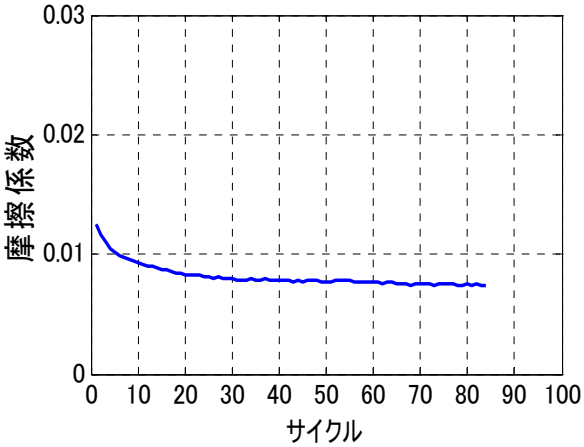
図 1.3.5-82　#4 試験体 2 セット目実験結果概要



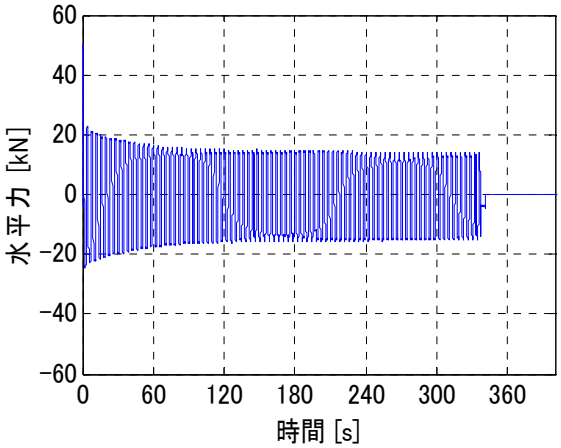
(a)　水平荷重－水平変位関係



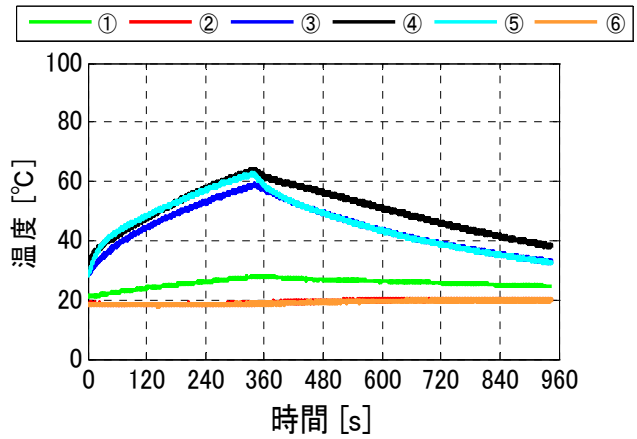
(b)　水平変位時刻歴



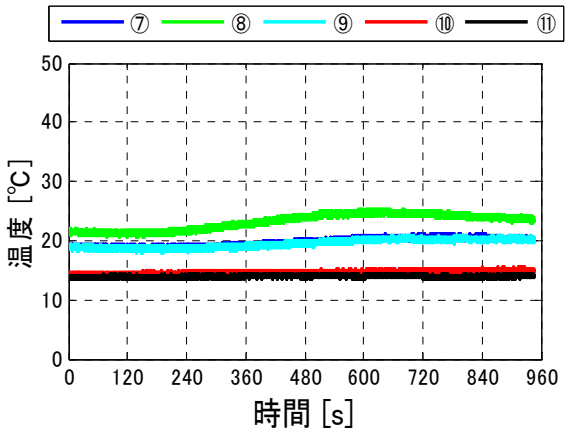
(c)　各サイクル摩擦係数



(d)　水平荷重時刻歴

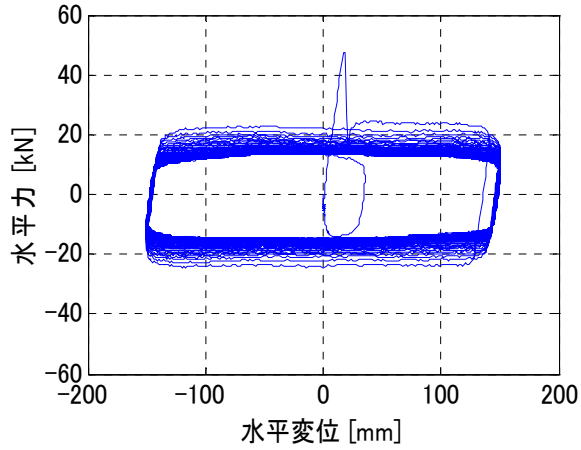


(e)　温度時刻歴（①～⑥測定点）

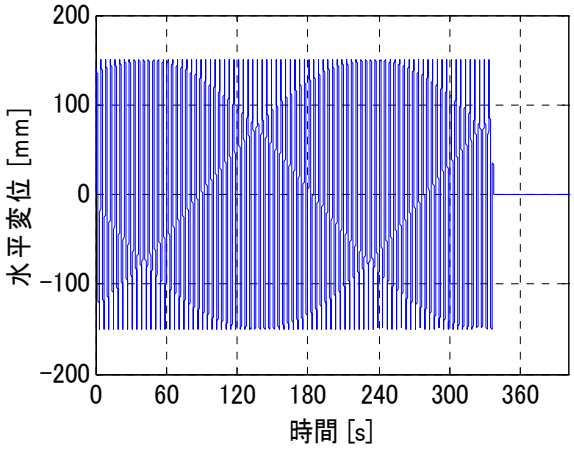


(f)　温度時刻歴（⑦～⑪測定点）

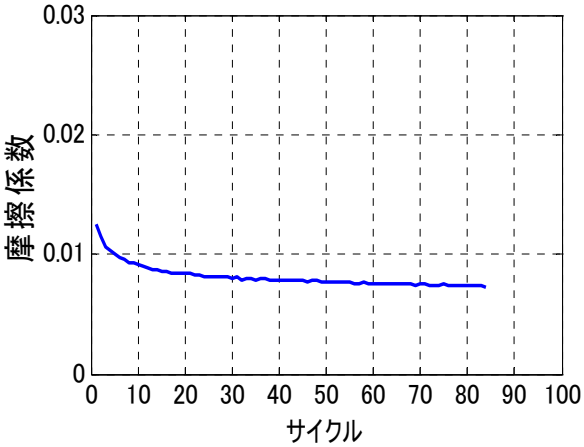
図 1.3.5-83　#4 試験体 3 セット目実験結果概要



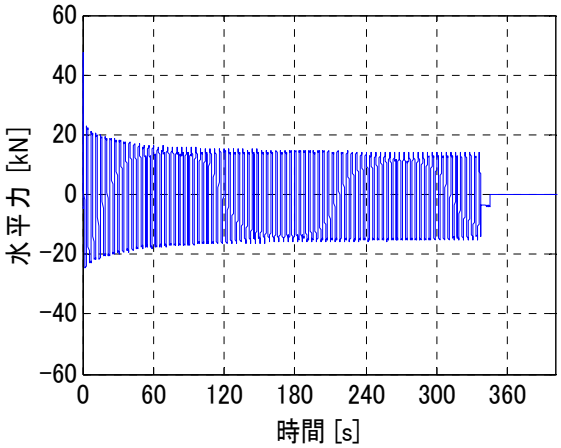
(a)　水平荷重－水平変位関係



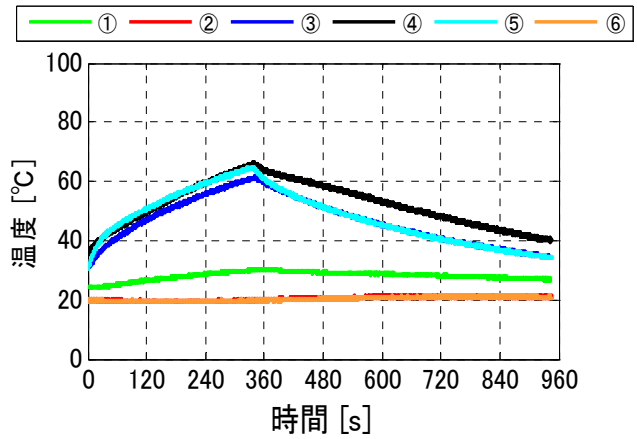
(b)　水平変位時刻歴



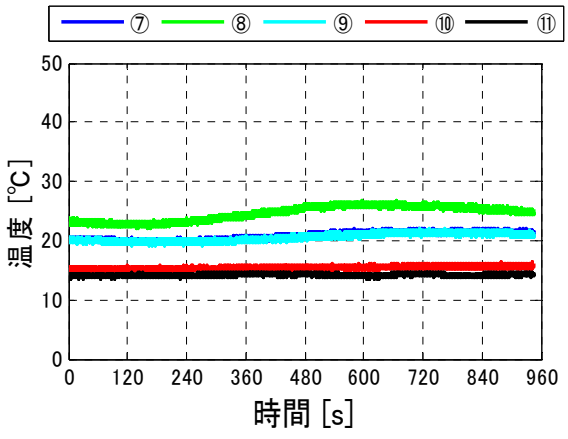
(c)　各サイクル摩擦係数



(d)　水平荷重時刻歴

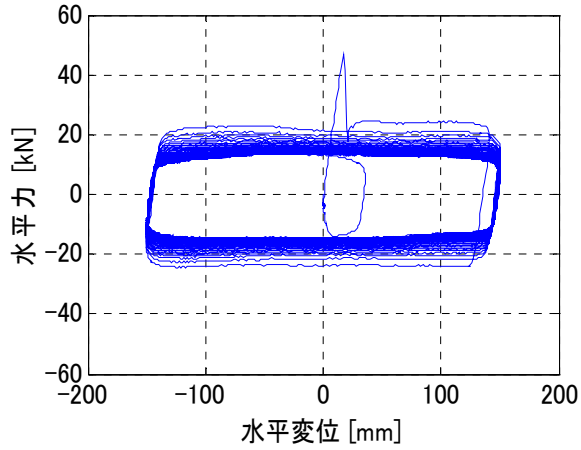


(e)　温度時刻歴（①～⑥測定点）

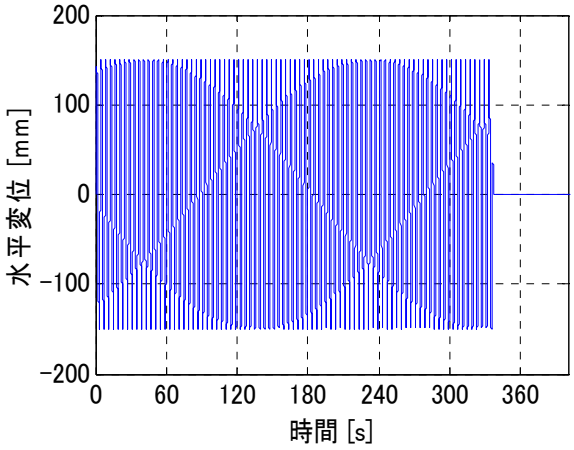


(f)　温度時刻歴（⑦～⑪測定点）

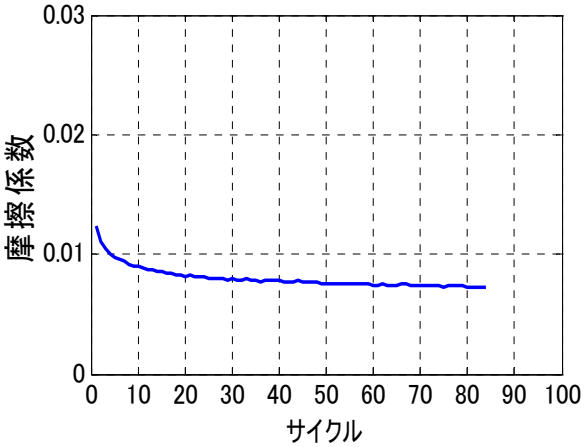
図 1.3.5-84　#4 試験体 4 セット目実験結果概要



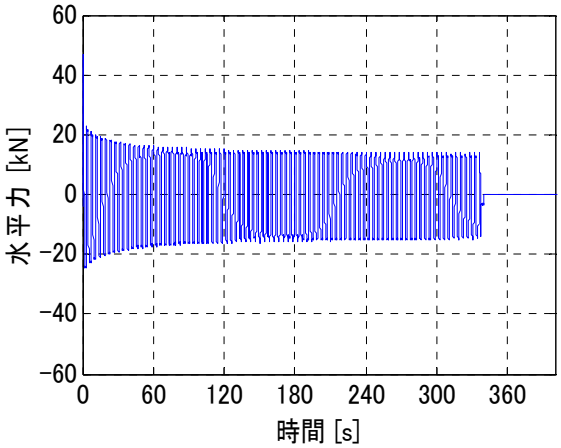
(a)　水平荷重－水平変位関係



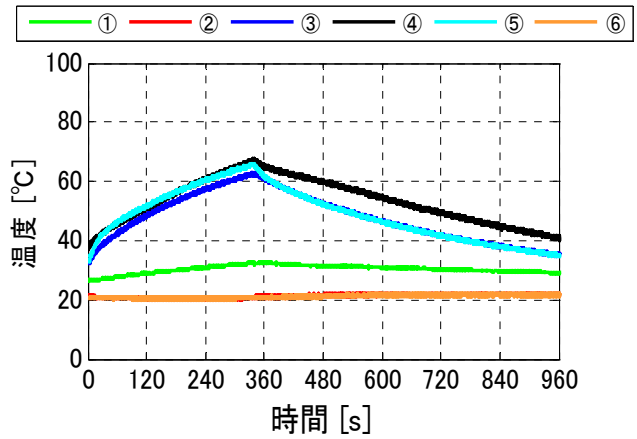
(b)　水平変位時刻歴



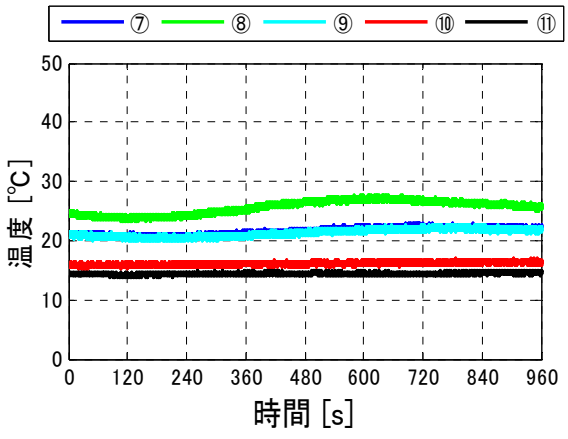
(c)　各サイクル摩擦係数



(d)　水平荷重時刻歴

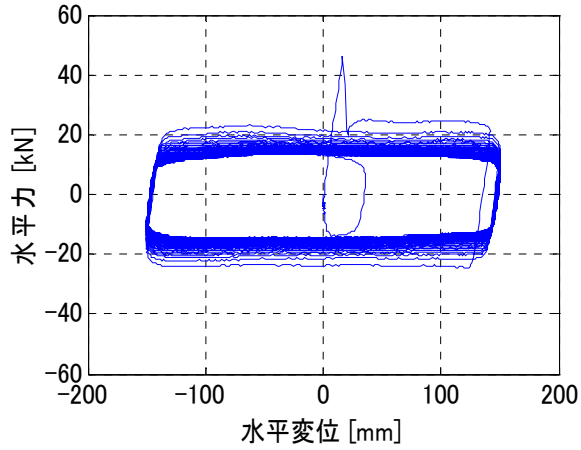


(e)　温度時刻歴（①～⑥測定点）

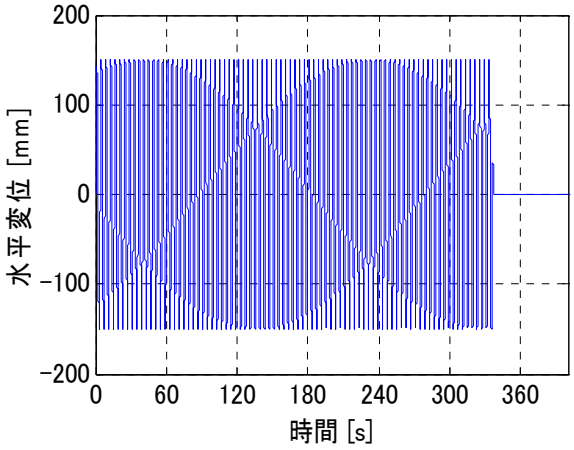


(f)　温度時刻歴（⑦～⑪測定点）

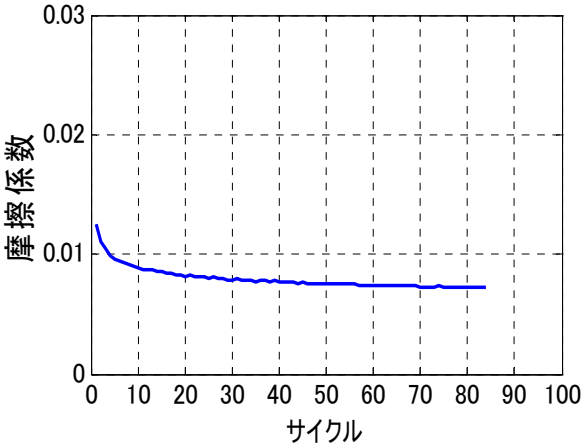
図 1.3.5-85　#4 試験体 5 セット目実験結果概要



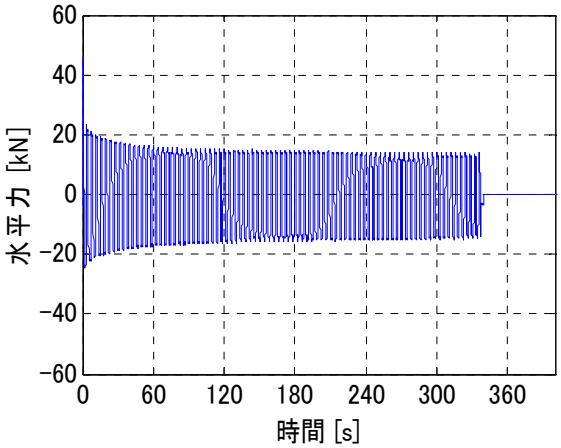
(a)　水平荷重－水平変位関係



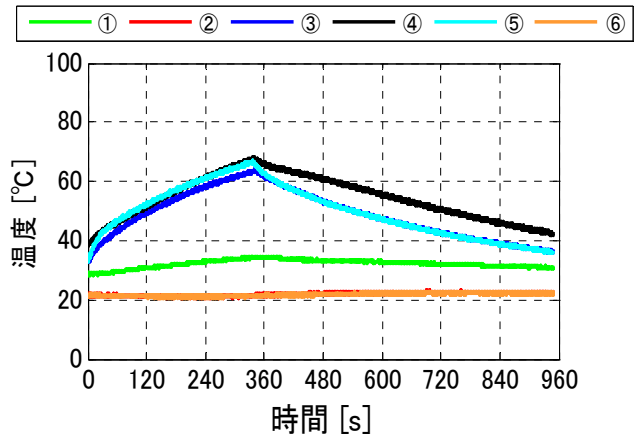
(b)　水平変位時刻歴



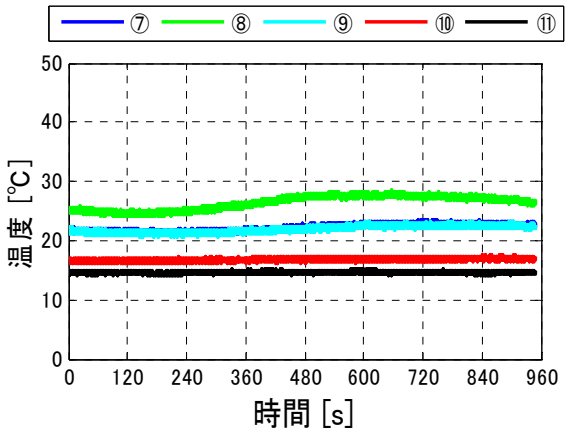
(c)　各サイクル摩擦係数



(d)　水平荷重時刻歴

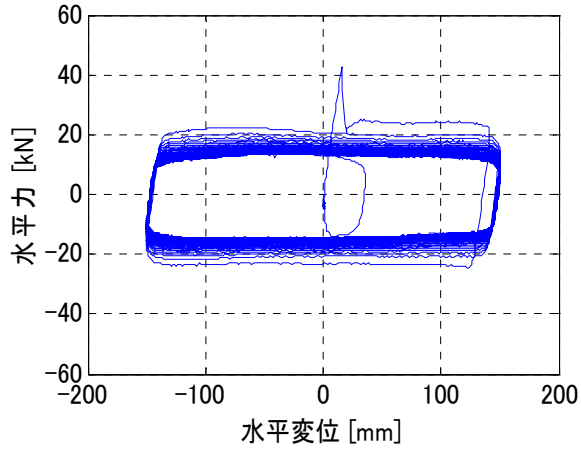


(e)　温度時刻歴（①～⑥測定点）

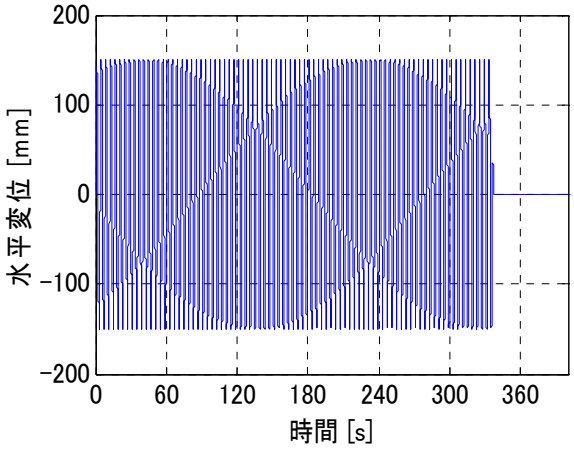


(f)　温度時刻歴（⑦～⑪測定点）

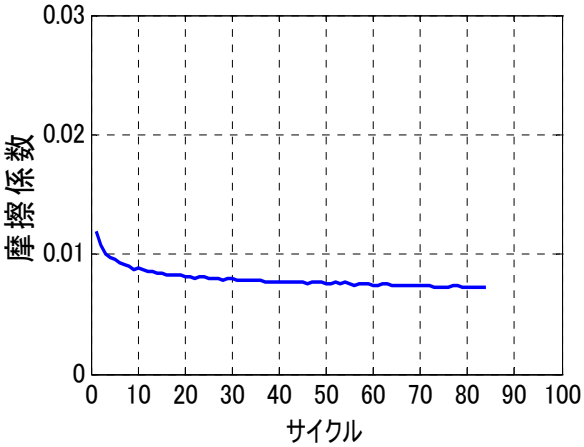
図 1.3.5-86　#4 試験体 6 セット目実験結果概要



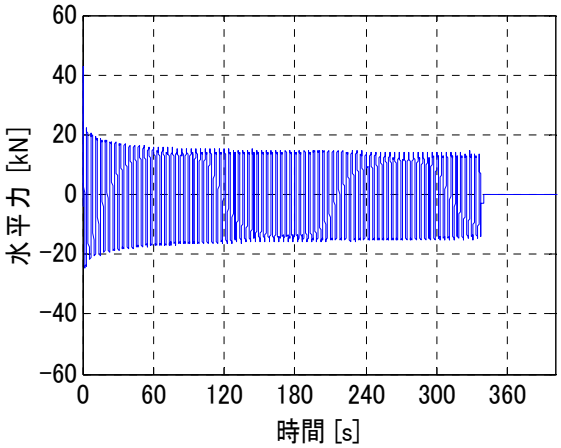
(a)　水平荷重－水平変位関係



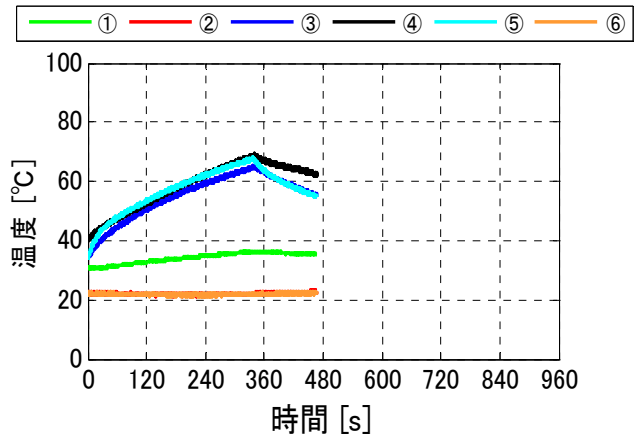
(b)　水平変位時刻歴



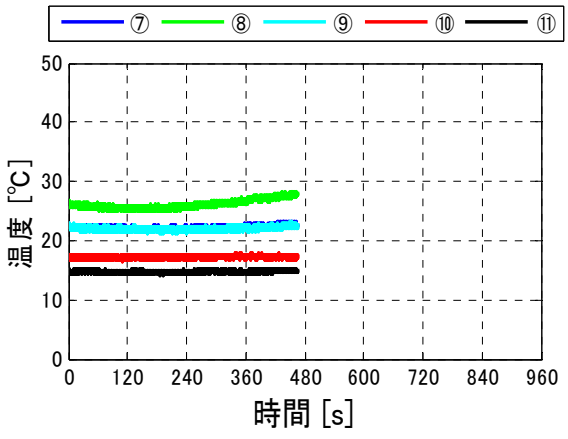
(c)　各サイクル摩擦係数



(d)　水平荷重時刻歴

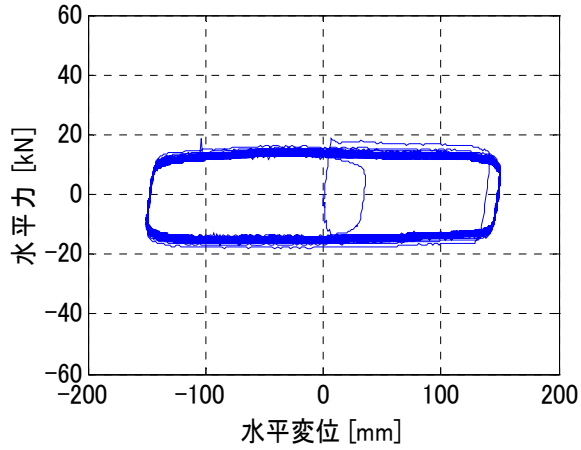


(e)　温度時刻歴（①～⑥測定点）

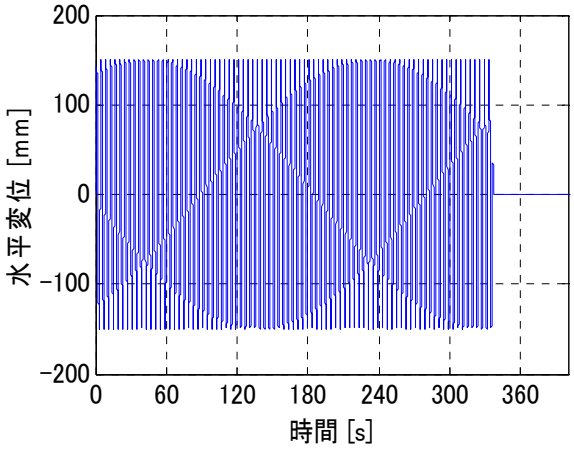


(f)　温度時刻歴（⑦～⑪測定点）

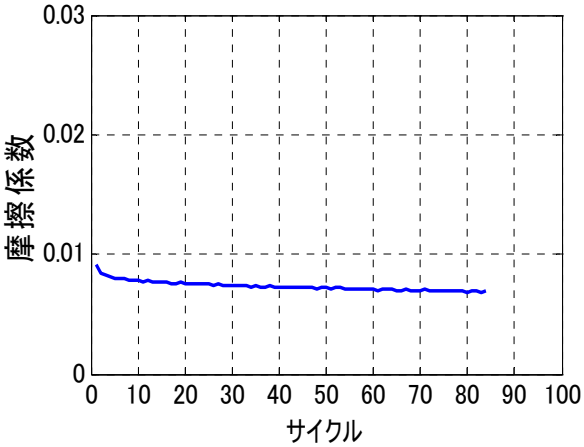
図 1.3.5-87　#4 試験体 7 セット目実験結果概要



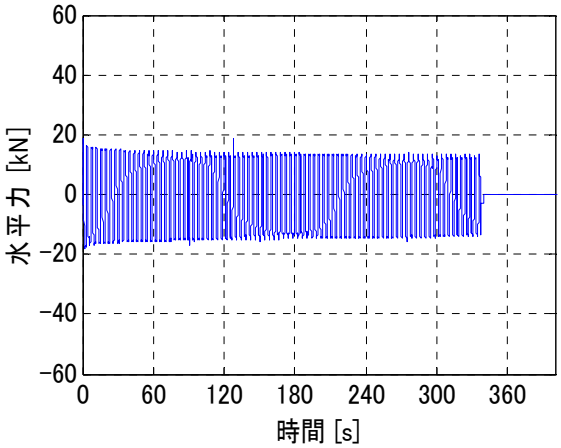
(a)　水平荷重－水平変位関係



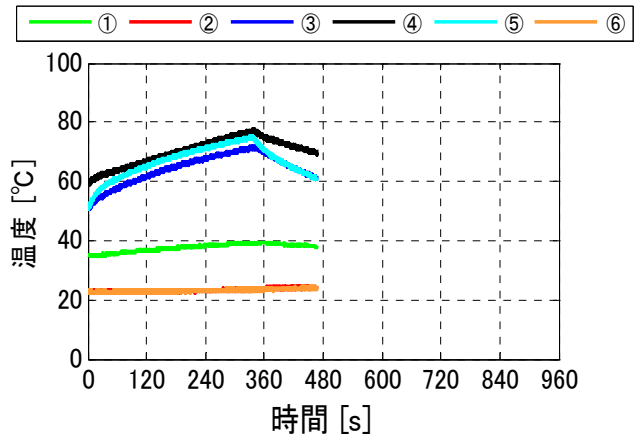
(b)　水平変位時刻歴



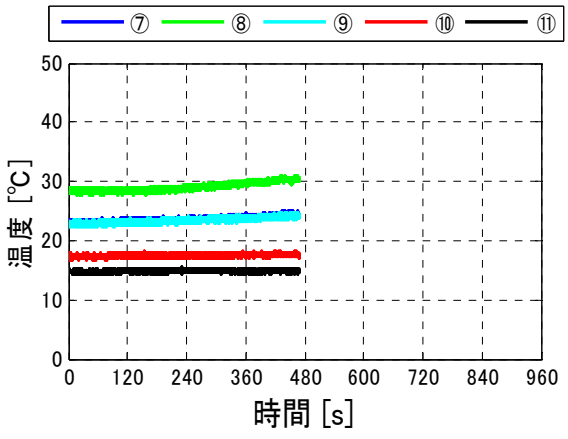
(c)　各サイクル摩擦係数



(d)　水平荷重時刻歴

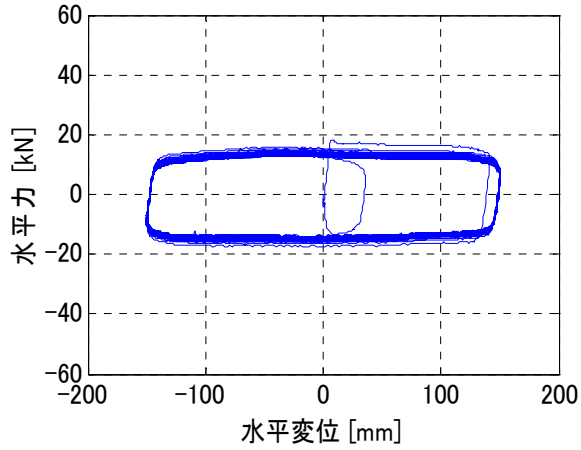


(e)　温度時刻歴（①～⑥測定点）

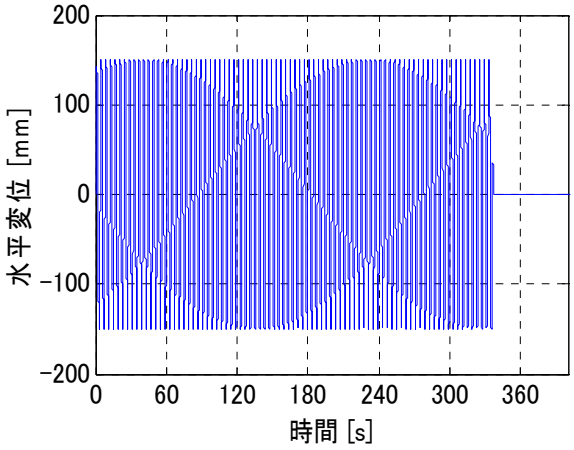


(f)　温度時刻歴（⑦～⑪測定点）

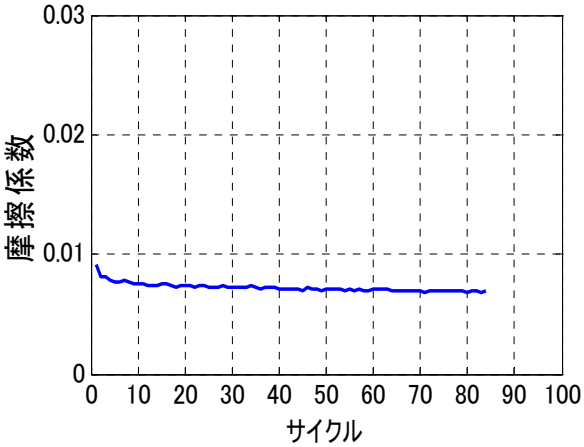
図 1.3.5-88　#4 試験体 8 セット目実験結果概要



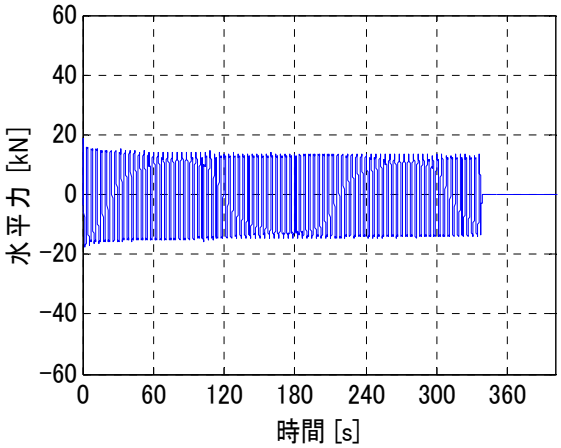
(a)　水平荷重－水平変位関係



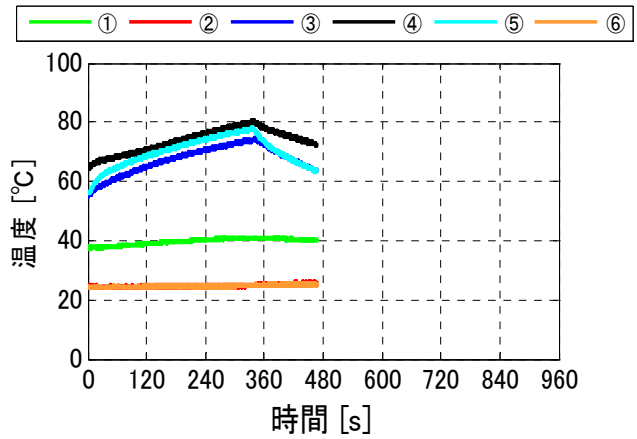
(b)　水平変位時刻歴



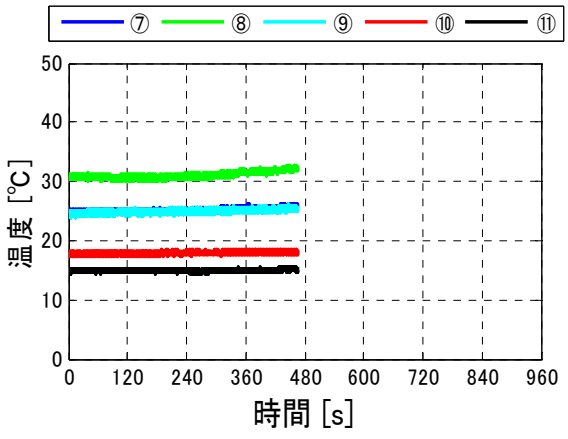
(c)　各サイクル摩擦係数



(d)　水平荷重時刻歴

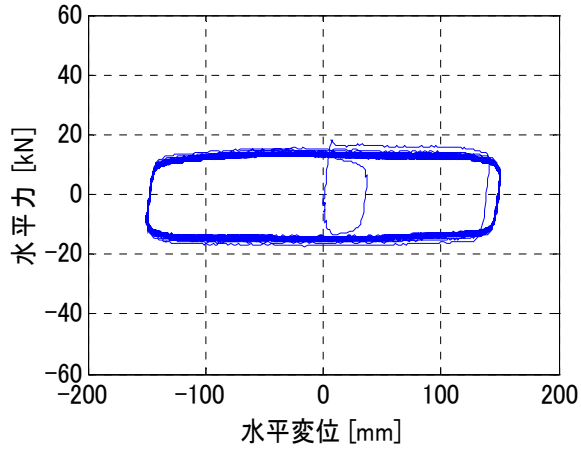


(e)　温度時刻歴（①～⑥測定点）

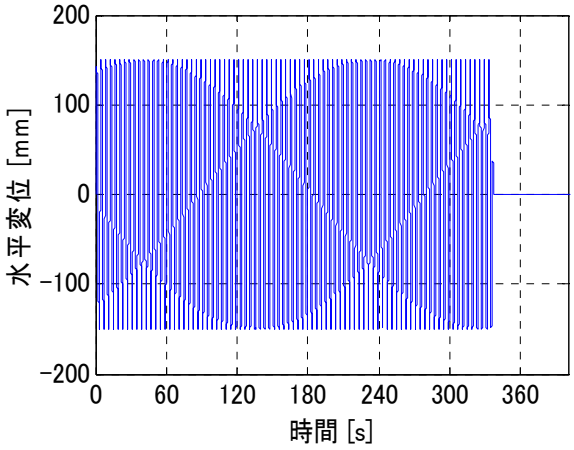


(f)　温度時刻歴（⑦～⑪測定点）

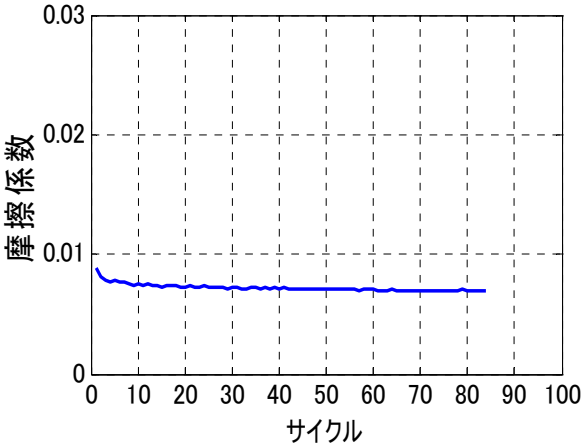
図 1.3.5-89　#4 試験体 9 セット目実験結果概要



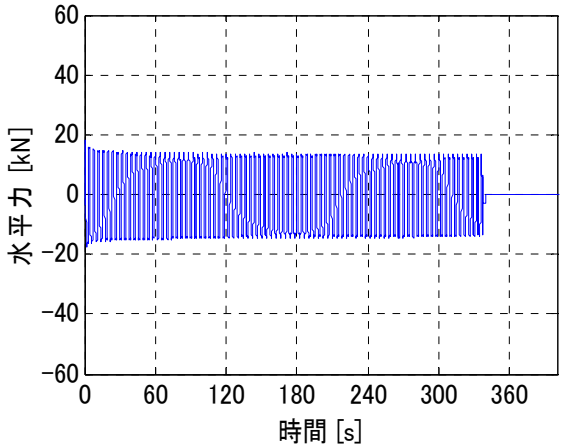
(a)　水平荷重－水平変位関係



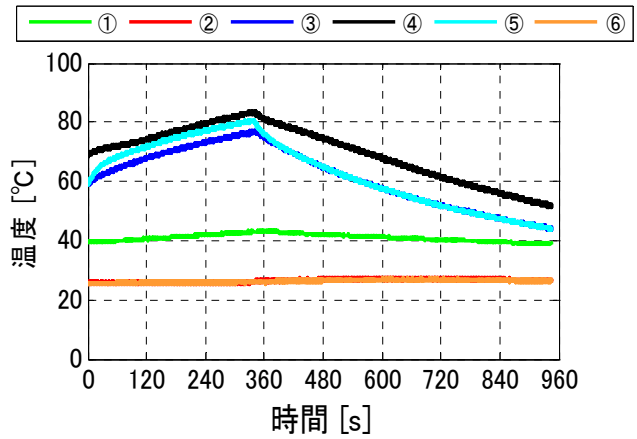
(b)　水平変位時刻歴



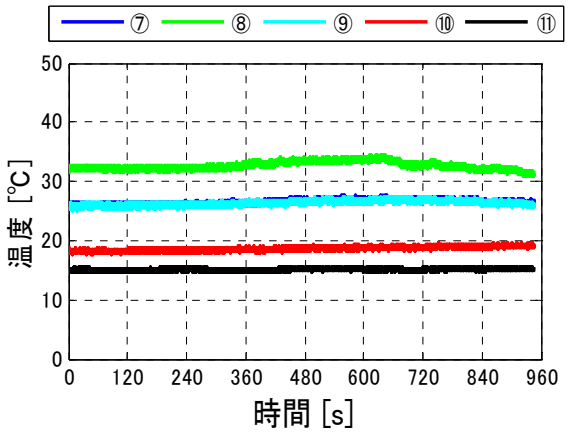
(c)　各サイクル摩擦係数



(d)　水平荷重時刻歴



(e)　温度時刻歴（①～⑥測定点）

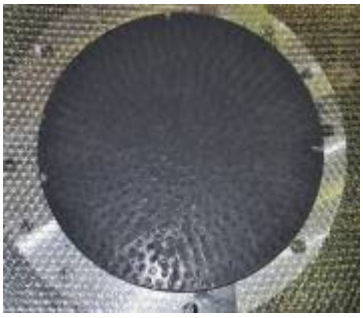


(f)　温度時刻歴（⑦～⑪測定点）

図 1.3.5-90　#4 試験体 10 セット目実験結果概要

1.3.5.6　各試験体各セット後のすべり面状況写真

写真 1.3.5-8～13 に各試験体各セット後のすべり材下面およびすべり板状況写真を示す。



(a) すべり材下面　実験前

(b) すべり板表面　実験前

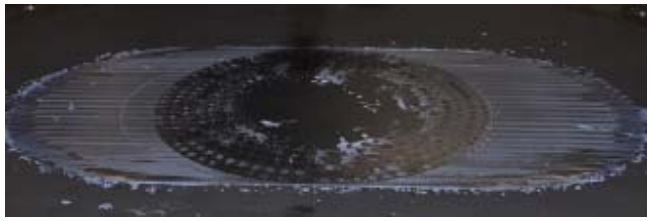
(c) すべり材下面　1 セット目後

(d) すべり板表面　1 セット目後

(e) すべり材下面　2 セット目後

(f) すべり板表面　2 セット目後

(g) すべり材下面　3 セット目後



(h) すべり板表面　3 セット目後

(j) すべり材下面　4 セット目後

(k) すべり板表面　4 セット目後

写真 1.3.5-8　#1 試験体　すべり材下面、すべり板表面状況写真(1)

(l) すべり材下面　5 セット目後

(m) すべり板表面　5 セット目後

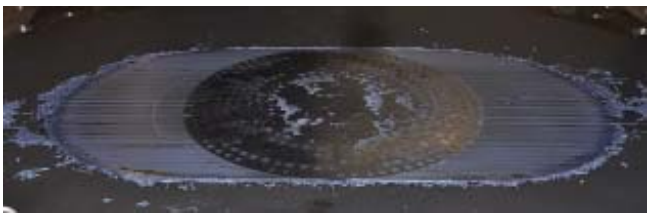
(n) すべり材下面　6 セット目後

(o) すべり板表面　6 セット目後

(p) すべり材下面　7 セット目後

(q) すべり板表面　7 セット目後

(r) すべり材下面　8 セット目後

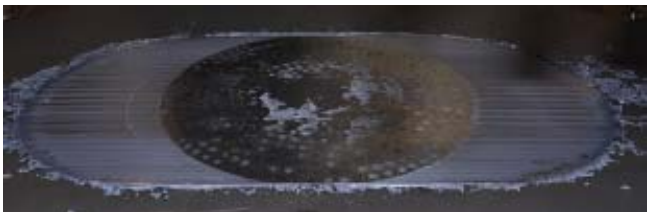


(s) すべり板表面　8 セット目後

(t) すべり材下面　9 セット目後

(u) すべり板表面　9 セット目後

(v) すべり材下面　10 セット目後



(w) すべり板表面　10 セット目後

写真 1.3.5-9　#1 試験体　すべり材下面、すべり板表面状況写真(2)

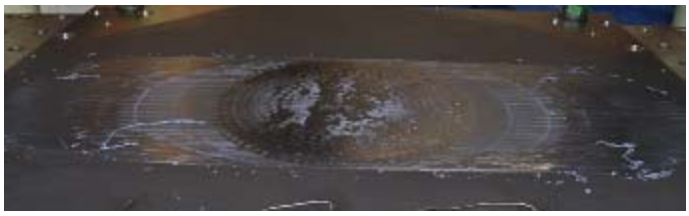
(a) すべり材下面　実験前

(b) すべり板表面　実験前

(c) すべり材下面　1 セット目後

(d) すべり板表面　1 セット目後

(e) すべり材下面　2 セット目後

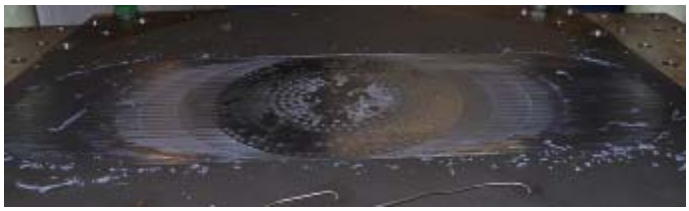


(f) すべり板表面　2 セット目後

(g) すべり材下面　3 セット目後

(h) すべり板表面　3 セット目後

(j) すべり材下面　4 セット目後



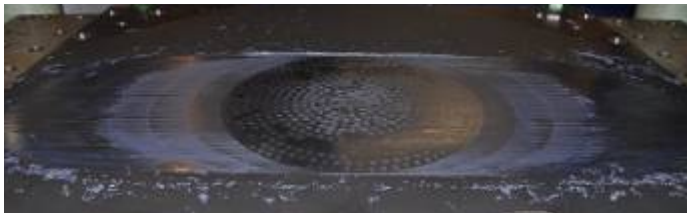
(k) すべり板表面　4 セット目後

(l) すべり材下面　5 セット目後

(m) すべり板表面　5 セット目後

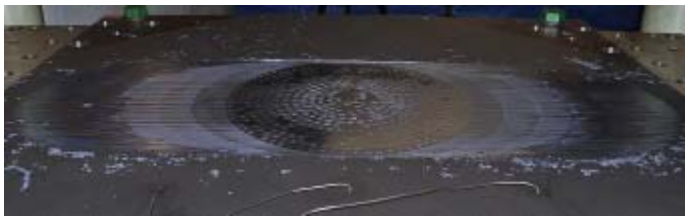
写真 1.3.5-10　#2 試験体　すべり材下面、すべり板表面状況写真(1)

(n) すべり材下面　6 セット目後



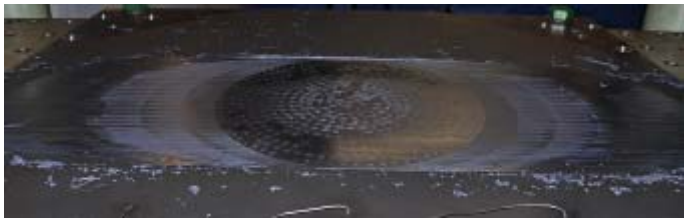
(o) すべり板表面　6 セット目後

(p) すべり材下面　7 セット目後



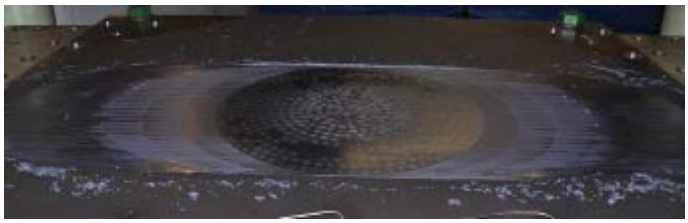
(q) すべり板表面　7 セット目後

(r) すべり材下面　8 セット目後



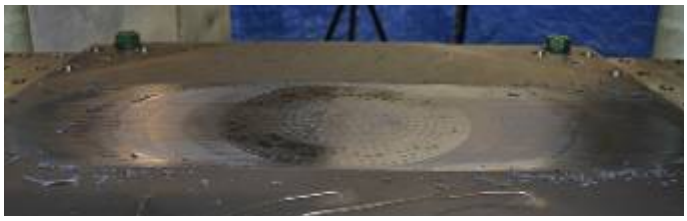
(s) すべり板表面　8 セット目後

(t) すべり材下面　9 セット目後



(u) すべり板表面　9 セット目後

(v) すべり材下面　10 セット目後



(w) すべり板表面　10 セット目後

写真 1.3.5-11　#2 試験体　すべり材下面、すべり板表面状況写真(2)

(a) すべり材下面　実験前

(b) すべり板表面　実験前

(c) すべり材下面　1 セット目後

(d) すべり板表面　1 セット目後

(e) すべり材下面　2 セット目後

(f) すべり板表面　2 セット目後

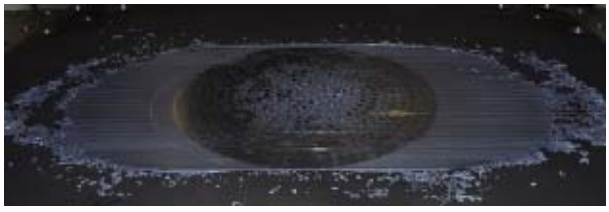
(g) すべり材下面　3 セット目後

(h) すべり板表面　3 セット目後

(j) すべり材下面　4 セット目後

(k) すべり板表面　4 セット目後

(l) すべり材下面　5 セット目後



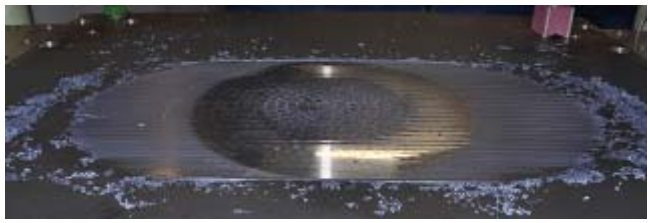
(m) すべり板表面　5 セット目後

写真 1.3.5-12　#3 試験体　すべり材下面、すべり板表面状況写真(1)

(n) すべり材下面　6 セット目後

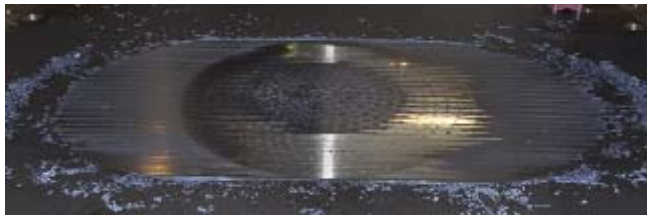
(o) すべり板表面　6 セット目後

(p) すべり材下面　7 セット目後



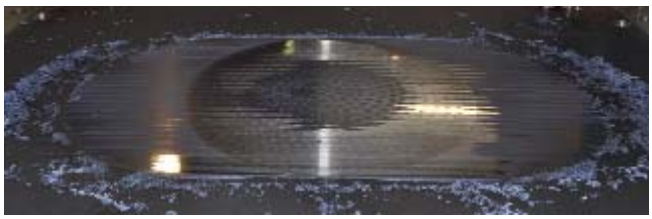
(q) すべり板表面　7 セット目後

(r) すべり材下面　8 セット目後



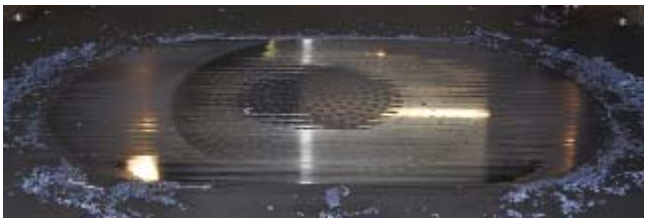
(s) すべり板表面　8 セット目後

(t) すべり材下面　9 セット目後



(u) すべり板表面　9 セット目後

(v) すべり材下面　10 セット目後



(w) すべり板表面　10 セット目後

写真 1.3.5-13　#3 試験体　すべり材下面、すべり板表面状況写真(2)

1.3.6 鋼材ダンパー

1.3.6.1 実験計画

(1) 実験目的と背景

表 1.3.6-1 に鋼材ダンパーの繰り返し加振実験に関する主要文献を示す。以下、主要文献について内容をまとめる。文中の文献番号は表 1.3.6-1 による。

鋼材ダンパーの繰り返し加振時における特性については表 1.3.6-1 中の文献 1 により、積層ゴムφ600 に対応する鋼材ダンパーで 0 度、45 度、90 度の静的漸増加振結果により疲労特性が、縮小試験体により速度依存性、温度依存性が求められている。また、実大 4 本組試験体により縮小試験体と同様の特性が得られ相似則が成立することが示されている。表 1.3.6-1 中の文献 2 では縮小試験体の定振幅載荷実験により疲労曲線を求め、ランダム振幅に対する破断回数の予測方法としてマイナー則による方法を提示している。表 1.3.6-1 中の文献 3、4 では実大試験体の動的載荷試験を行い鋼材ダンパーの履歴挙動と 0 度、45 度、90 度方向載荷時の疲労性能を評価している。また 2 方向の地震応答波加振も実施している。

表 1.3.6-1 の文献に示された鋼材ダンパーは全て免震 U 型ダンパーであり、近年このタイプが鋼材ダンパーの主流となっている。ここでは免震 U 型ダンパーを対象として、多数回繰り返し載荷に対する性能確認のための実験を行う。本実験における確認項目は以下の通りとする。

①定振幅繰り返し載荷により低サイクル疲労による限界性能を把握し、既往の疲労曲線との対応を確認する。

②これまで実施例の少ない複数の振幅による繰り返し載荷により変動振幅に対する低サイクル疲労性能を確認する。その際、マイナー則による疲労評価で疲労曲線との対応を確認する。

③破断直前までの履歴特性が安定していることを確認する。

表 1.3.6-1 鋼材ダンパーの繰り返し加振実験に関する主要文献

番号	論文名	著者名	掲載誌
1	免震 U 型ダンパーに関する実験的研究 (その 1～6)	鈴木一弁他	建築学会学術講演集、1999～2000
2	免震 U 型ダンパーの実大動的載荷試験 (その 1、2)	植草雅浩他	建築学会学術講演集、2007
3	免震構造用 U 字型ダンパーの繰り返し変形性能に関する研究	吉敷祥一他	構造系論文集、No.646、2009.12
4	免震 U 型ダンパーの実大試験体による動的載荷試験（その 1、2）	西本晃治他	建築学会学術講演集、2008

(2) 実験日時および場所

場所　：新日鐵総合技術センター内　新日鉄エンジニアリング技術開発研究所開発 A 棟

日時　：平成 22 年 11 月 1 日～11 日

(3) 試験体

試験体は免震 U 型ダンパーNSUD55×4（ダンパーロッド 4 本）の実大試験体 4 体とする。試験体の保有性能を表 1.3.6-2 に、疲労性能曲線を図 1.3.6-1 に、試験体形状図を図 1.3.6-2 に示す。

表 1.3.6-2 NSUD55×4 保有性能

初期剛性	9,600 kN/m	板厚	45mm
2 次剛性	160 kN/m	弾性限度範囲	31.7mm
降伏せん断力	304 kN	限界変形	850mm

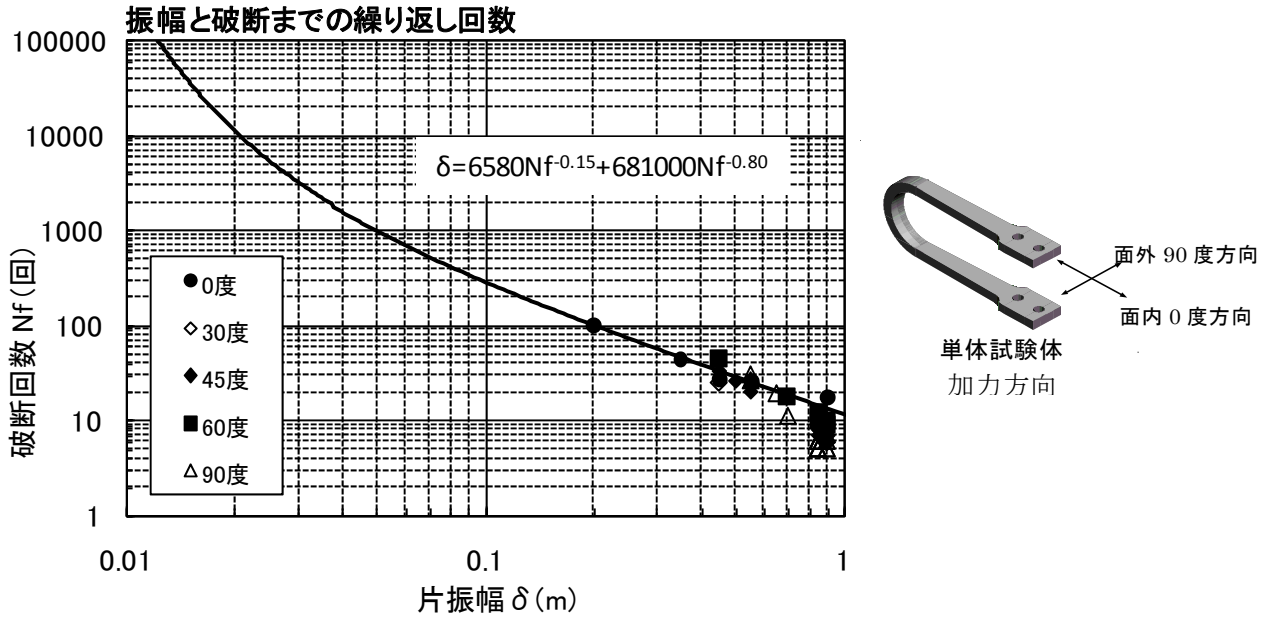
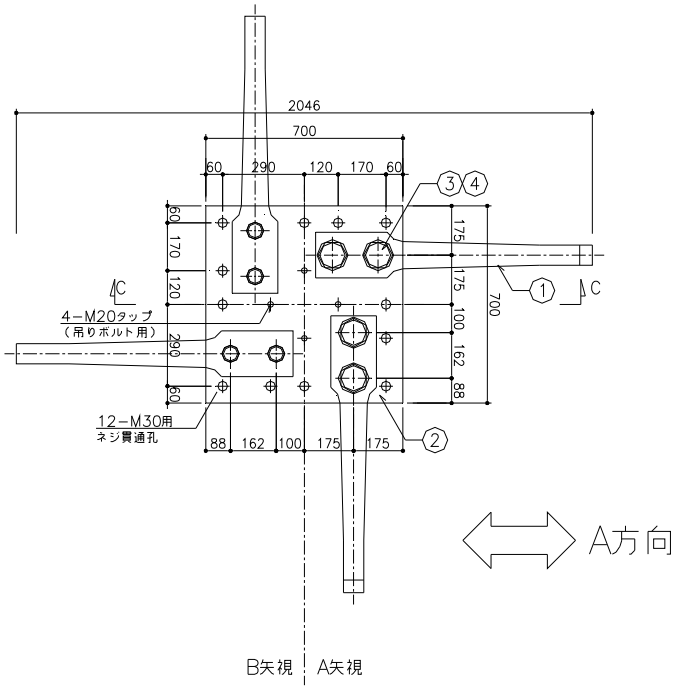


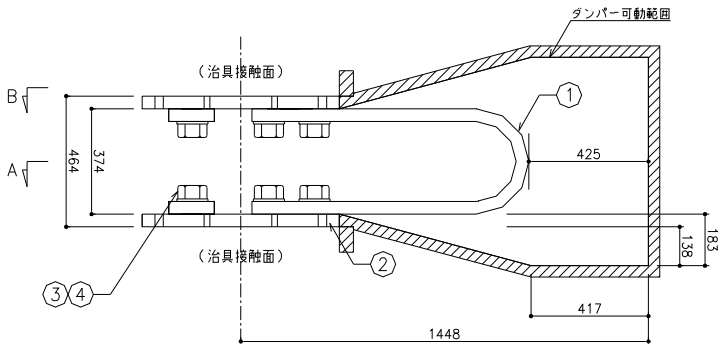
図 1.3.6-1 NSUD55 疲労性能曲線

製作図

平 面 図



断 面 図



断面 C−C

製品重量： 800 kg

	部 材	形 状	材 質	規 格	数量
①	ダンパー	t=45	SN490B−U	JIS G 3136	4
②	ベースプレート	t=45	SM490A	JIS G 3106	2
③	ダンパー取付用高力ボルト	M60	F10T相当	JIS B 1180	16
④	ダンパー取付用ワッシャー		SS400	JIS B 1256	16

標準塗装仕様

下地処理：ブラスト処理SSPC−SP−10（ISO Sa−2½ ）
下 塗：有機系ジンクリッチプライマー 75μm
中 塗：エポキシ樹脂系塗料 60μm
上 塗：エポキシ樹脂系塗料 35μm
塗装範囲：治具接触面および摩擦面は無塗装とする。
但し、ダンパーとベース接触面については下塗り塗装のみ。
上記以外の箇所は特記限り標準塗装仕様による。

NSUD55x4 別置型標準品
性能確認試験体

SCALE： 1/15

発行日：H18.8

新日鉄エンジニアリング（株）
建築・鋼構造事業部

図 1.3.6-2 試験体形状図

(4) 試験装置

載荷には、図 1.3.6-3 に示す新日鉄エンジニアリング(株)技術開発研究所の圧縮せん断試験機（最大荷重 : ±1,000kN（鉛直・水平とも）、最大ストローク : ±1,200mm、最大速度 : 10mm/sec.）を用いる。

試験体上下のフランジプレートと取付治具の間に日本ディー・エム・イー株式会社製「高温用断熱板」THIS-3636-2（914×914×6.35mm）をセットする。

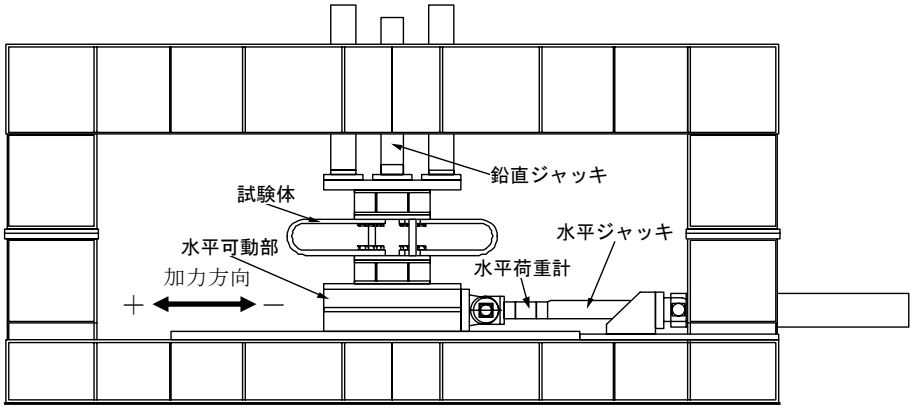


図 1.3.6-3 試験装置

(5) 計測項目と計測方法

計測項目は以下の通りとする。（ ）内は計測方法である。

①水平力、水平変位（荷重計と水平ジャッキ内蔵変位計）

②破断までの繰返し回数

③ダンパー3 か所及びベースプレート 1 か所の温度（温度ゲージ、試験体 2 のみ）

④定点連続撮影（デジタルビデオカメラ）

(6) 実験方法と実験ケース

載荷方法を表 1.3.6-3 に示す。載荷方向は図 1.3.6-2 に示す A 方向とし、載荷速度は 10mm/sec の三角波とする。載荷終了はダンパーロッド 4 本のうち 3 本目が破断に至ったとき、あるいは、1 本目が破断した回数の 2 倍を超えたときとする。試験体 1 及び 2 は、それぞれ定振幅 100mm 及び 400mm での繰り返し載荷、試験体 3 及び 4 は 100、200、300、400mm を組み合わせた変動振幅での繰り返し載荷である。変動振幅については、図 1.3.6-1 の疲労性能曲線より、各振幅での破断回数は、100mm が 294 回、200mm が 100 回、300mm が 58 回、400mm が 38 回となるので、マイナー則に従い破断までの回数が 5:2:2:1 と 1:2:2:5 となるようにそれぞれの振幅を組み合わせた（次式参照）。

変動振幅 A　$294\times\frac{5}{10}:100\times\frac{2}{10}:58\times\frac{2}{10}:38\times\frac{1}{10}=147:20:11.6:3.8\cong 38:5:3:1$

変動振幅 B　$294\times\frac{1}{10}:100\times\frac{2}{10}:58\times\frac{2}{10}:38\times\frac{5}{10}=29.4:20:11.6:19\cong 3:2:1:2$

表 1.3.6-4 に、図 1.3.6-1 の疲労曲線を用いた各試験体における破断回数の予測を示す。

なお、本ダンパーの動的実験から得られた履歴挙動やエネルギー吸収性能は、静的実験とほぼ同等であることが確認されており [1.3.6-1)]、本ダンパーの速度依存性は小さいと考えられる。よって、今回の繰り返し加力実験を載荷速度 10mm/s の準静的な加力で実施することについては、問題ないと考えられる。

表 1.3.6-3 載荷方法

試験体番号	載荷方向（図 1.3.6-2 参照）	載荷方法
1	A	定振幅(±100mm)で繰り返し
2	A	定振幅(±400mm)で繰り返し
3	A	変動振幅Ａ（±100mm×38 回＋±200mm×5 回＋±300mm×3 回＋±400mm×1 回）で繰り返し
4	A	変動振幅Ｂ（±100mm×3 回＋±200mm×2 回＋±300mm×1 回＋±400mm×2 回）で繰り返し

表 1.3.6-4 破断回数の予測

試験体番号	振幅毎の回数組合せ割合(%)				破断までの予測回数（回）*1				累積変形量（m）	載荷時間（分）
	振幅（mm）				振幅（mm）					
	±100	±200	±300	±400	±100	±200	±300	±400		
1	100				294	0	0	0	117.6	196
2				100	0	0	0	38	60.8	101
3	81	11	6	2	149	19	12	4	95.6	159
4	38	25	13	25	30	20	10	20	72	120

*1 ダンパーロッド 4 本のうち 1 本目の破断

1.3.6.2 実験結果

(1) 履歴特性

図 1.3.6-4～1.3.6-7 に各試験体の荷重-変位履歴図を示す。いずれのケースについても、0 度方向に設置された 2 本のダンパーロッドが相次いで破断し、その後、90 度方向のダンパーロッド 1 本が破断し、実験を終了した。図に示したように、ダンパーの荷重は繰り返し載荷に伴い次第に小さくなるが、ダンパーロッドが破断するたびに大きく低下していることが分かる。なお、試験体 4 では、0 度方向の 2 本のダンパーロッドが同時期に破断したため、ロッド 3 本分の荷重を明記していない。

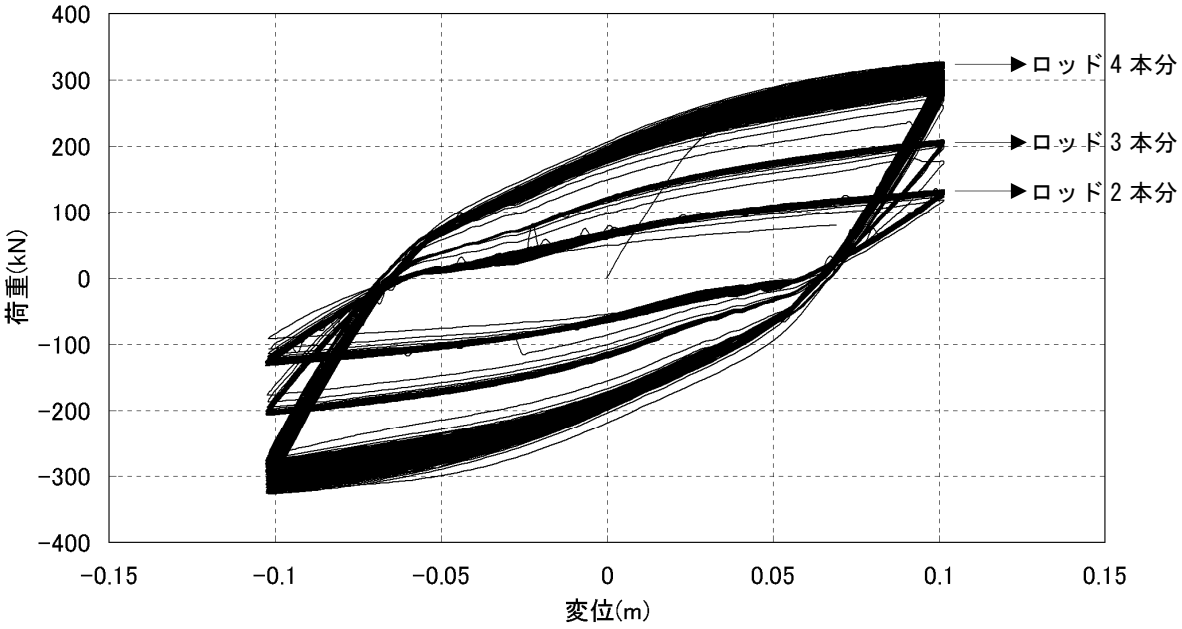


図 1.3.6-4 荷重変形関係（試験体 1：定振幅±100mm）

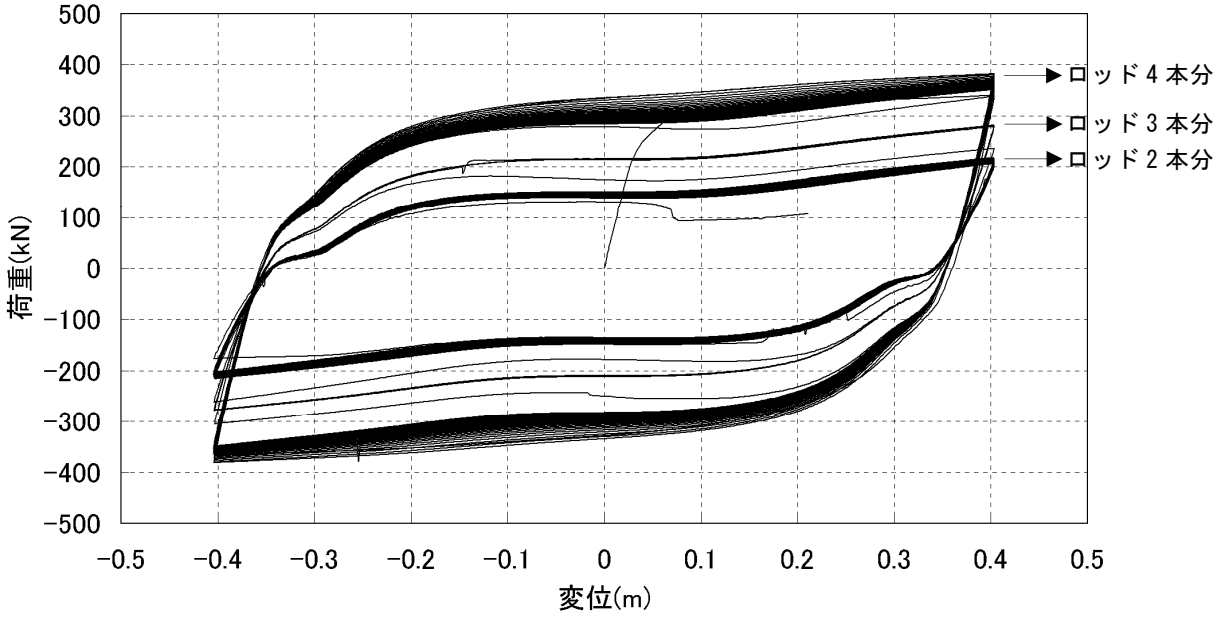


図 1.3.6-5 荷重変形関係（試験体 2：定振幅±400mm）

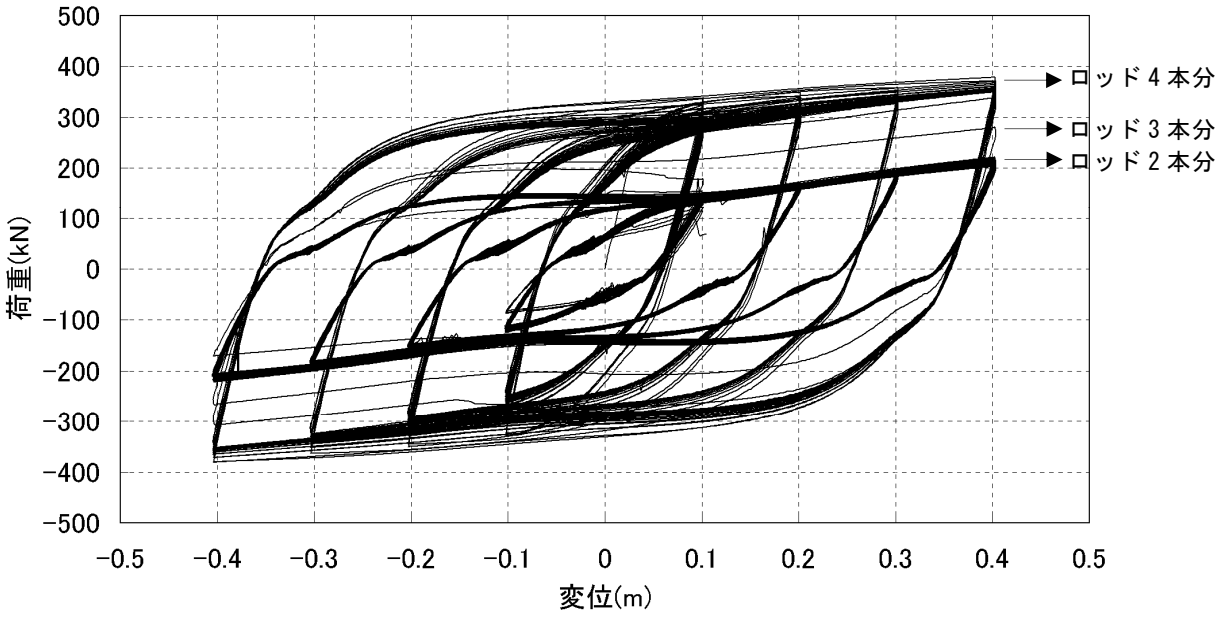


図 1.3.6-6 荷重変形関係（試験体 3：変動振幅 A）

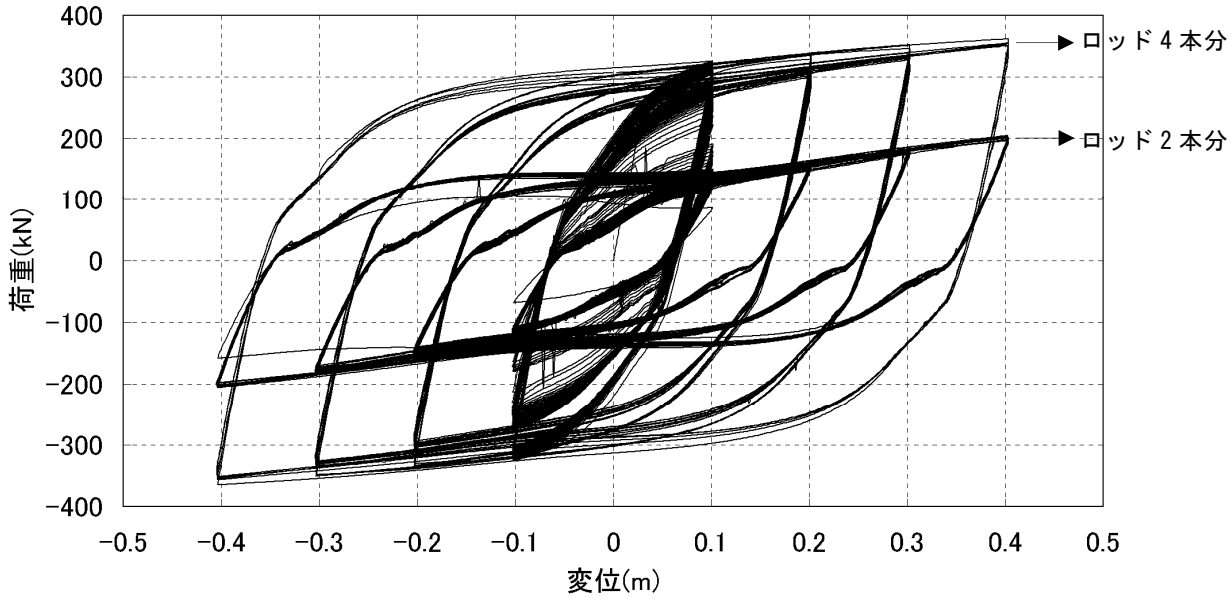


図 1.3.6-7 荷重変形関係（試験体 4：変動振幅 B）

(2) エネルギー吸収特性

図 1.3.6-8～1.3.6-15、表 1.3.6-5～1.3.6-8 に各試験体の 1 サイクル当りのエネルギー吸収と累積吸収エネルギーの変化を示す。定振幅の結果（試験体 1、2）より、1 サイクル当たりの吸収エネルギーは繰り返しに伴い小さくなり、1 本目と 2 本目のダンパーロッド（いずれも 0 度方向）の破断によって大きく低下していることが分かる。その後、ダンパーロッド 3 本目（90 度方向）の破断までは、吸収エネルギーの低下は小さい。また、1 サイクル当たりの吸収エネルギーは、ダンパーロッド 1 本目破断の数回前のサイクルで 2 サイクル目に対して 85%程度になる。いずれのケースについても、累積吸収エネルギーは繰り返しに伴い増加するが、ダンパーロッドが破断するたびにその増加率が低下している。

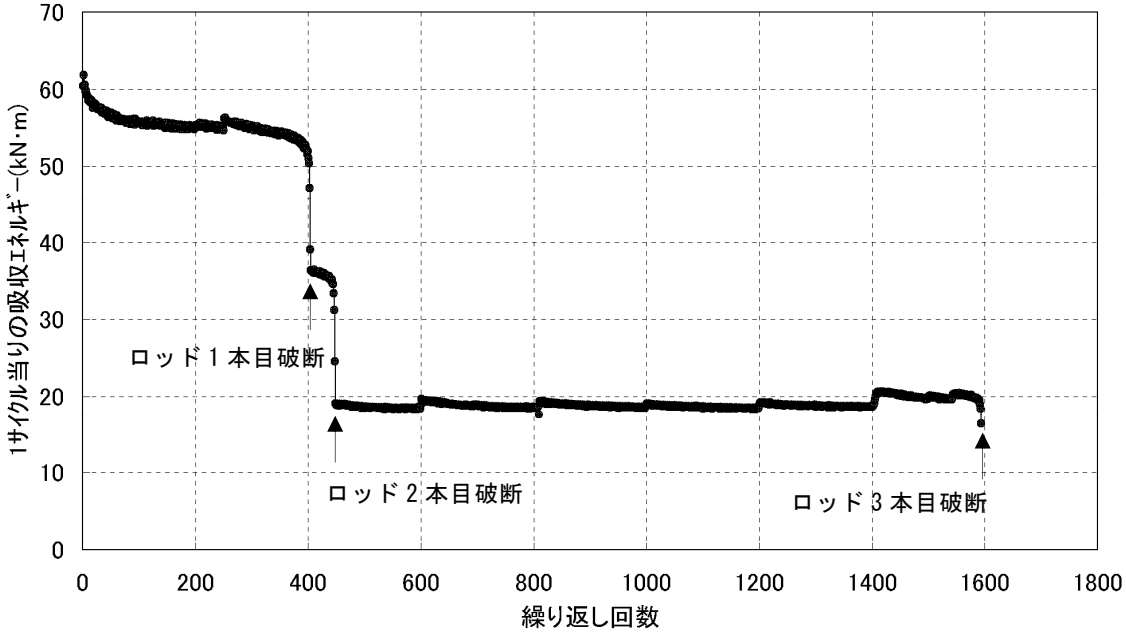


図 1.3.6-8 1 サイクル当りのエネルギー吸収量（試験体 1：定振幅±100mm）

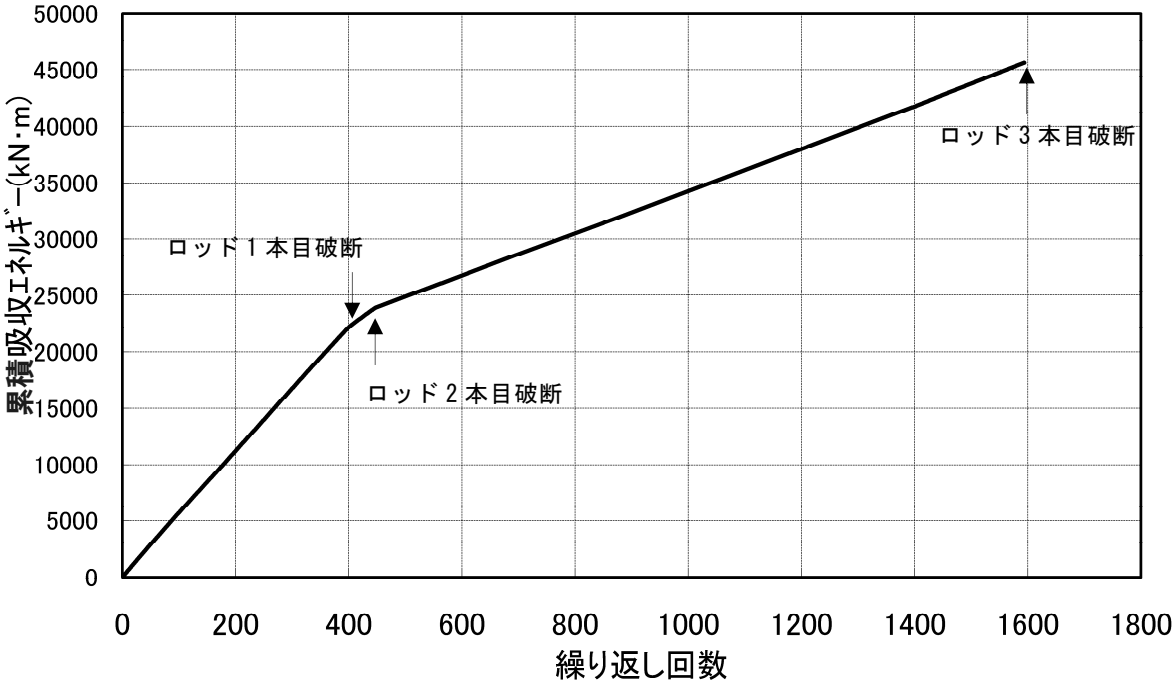


図 1.3.6-9 累積吸収エネルギーの変化（試験体 1：定振幅±100mm）

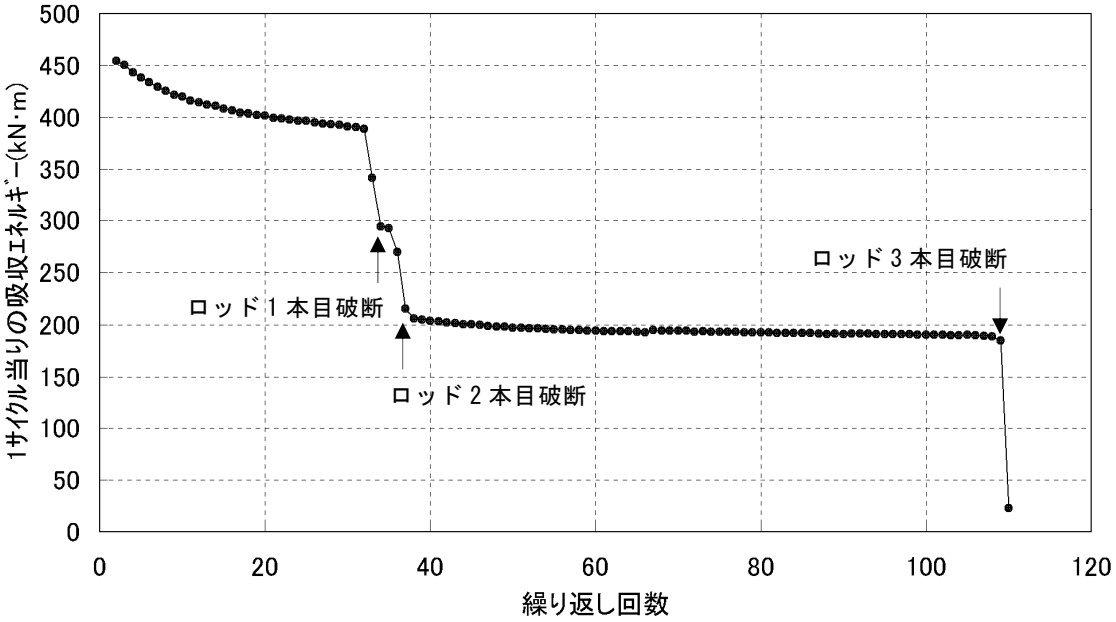


図 1.3.6-10 1 サイクル当りのエネルギー吸収量（試験体 2：定振幅±400mm）

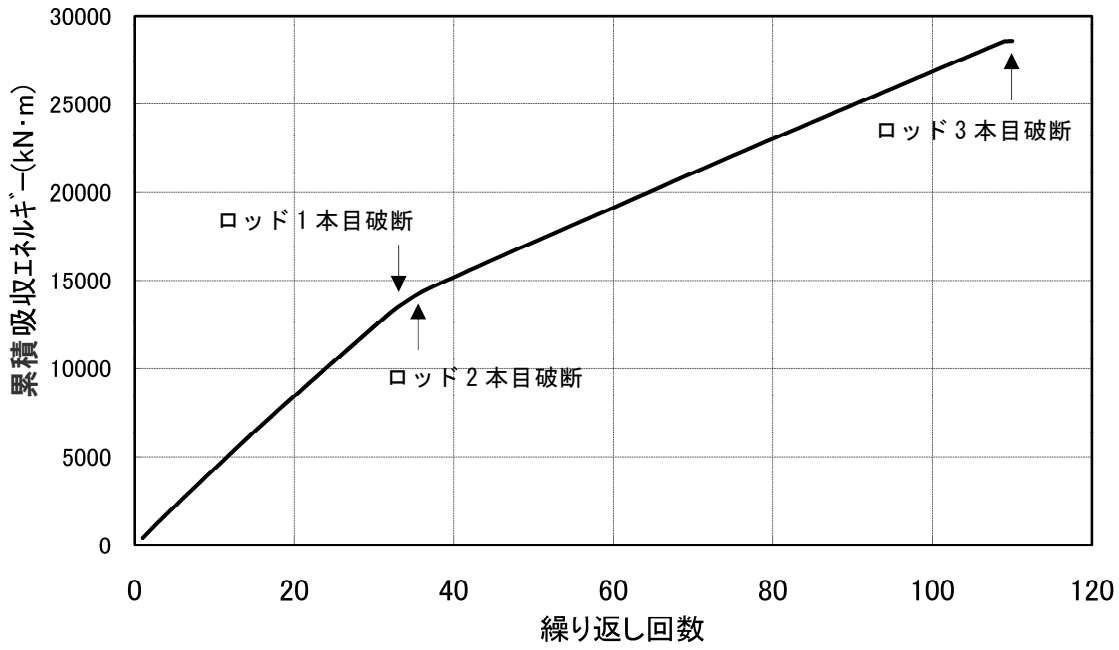


図 1.3.6-11 累積吸収エネルギーの変化（試験体 2：定振幅±400mm）

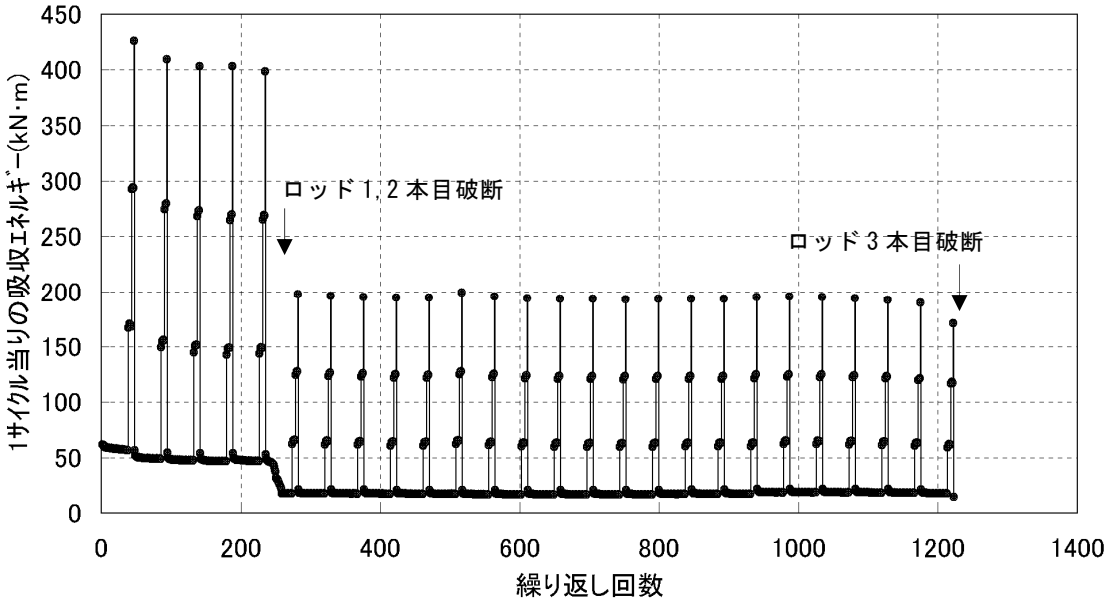


図 1.3.6-12 1 サイクル当りのエネルギー吸収量（試験体 3：変動振幅 A）

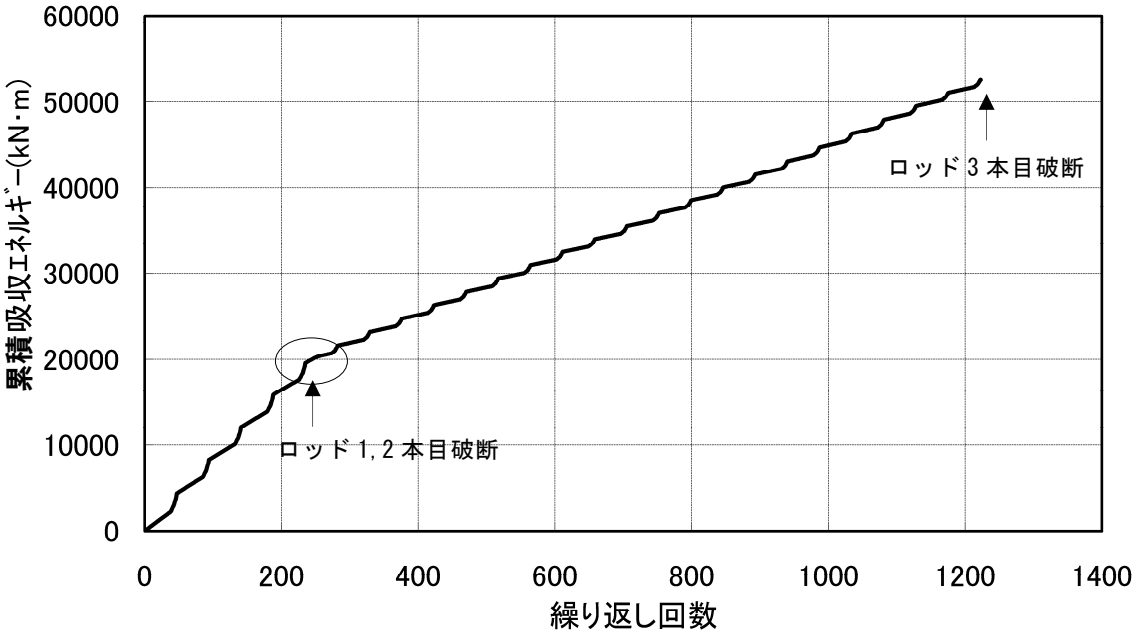


図 1.3.6-13 累積吸収エネルギーの変化（試験体 3：変動振幅 A）

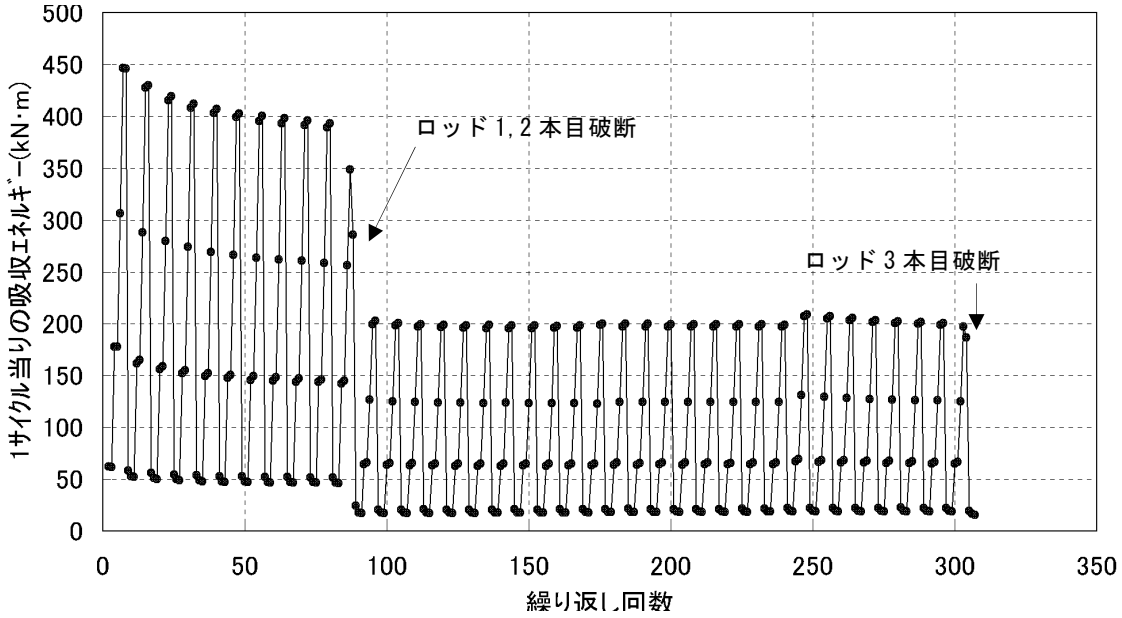


図 1.3.6-14 1 サイクル当りのエネルギー吸収量（試験体 4：変動振幅 B）

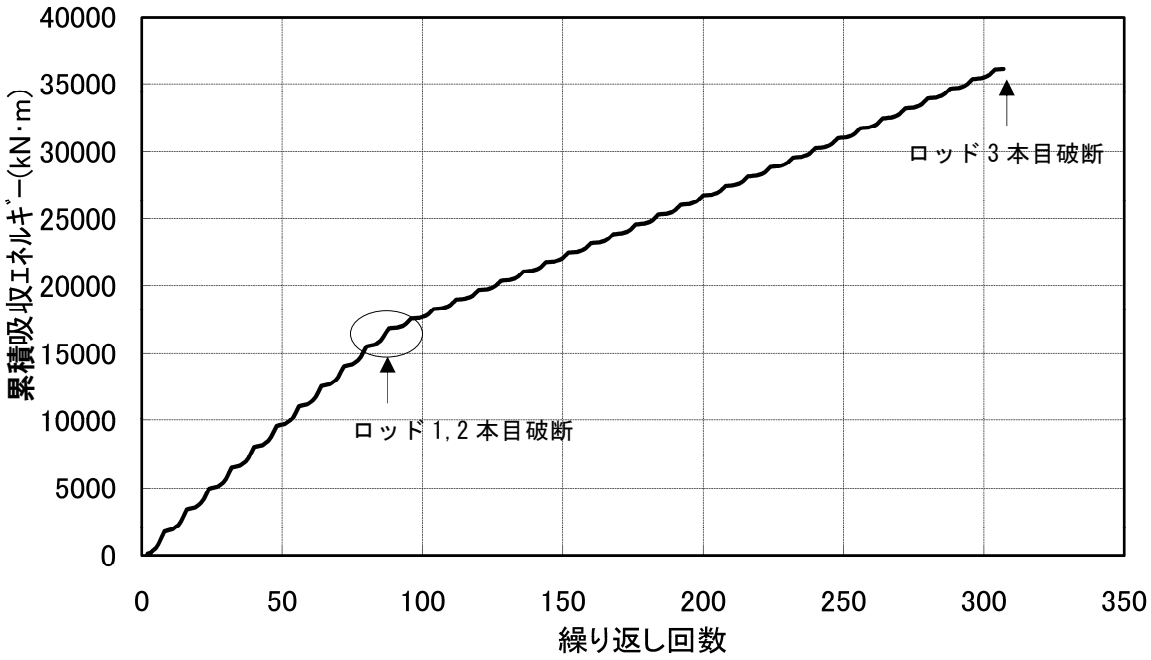


図 1.3.6-15 累積吸収エネルギーの変化（試験体 4：変動振幅 B）

表 1.3.6-5 1 サイクルエネルギー吸収量、最大荷重の変化（試験体 1：定振幅±100mm）

繰返し回数	振幅	累積ｴﾈﾙｷﾞｰ	吸収ｴﾈﾙｷﾞｰ	最大荷重			備 考
				正側	負側	平均	
	(m)	(kN･m)	(kN･m)	(kN)	(kN)	(kN)	
1	0.10	60	60	314.4	−319.1	316.7	
2		122	62	324.8	−326.0	325.4	
3		183	60	327.9	−327.1	327.5	
4		243	61	327.9	−326.8	327.3	
5		303	60	327.1	−325.6	326.3	
6		363	60	326.7	−324.4	325.5	
7		422	59	325.0	−323.5	324.3	
8		481	59	324.6	−322.4	323.5	
9		540	59	324.0	−321.6	322.8	
10		599	59	322.4	−320.4	321.4	
20		1183	58	315.4	−313.1	314.3	
30		1759	57	310.9	−308.2	309.6	
40		2331	57	307.4	−304.6	306.0	
50		2899	57	303.9	−302.1	303.0	
60		3463	56	301.3	−299.5	300.4	
70		4025	56	299.8	−297.7	298.7	
80		4584	56	298.5	−296.4	297.5	
90		5143	56	297.1	−295.2	296.2	
100		5700	56	296.2	−294.1	295.1	
150		8475	55	293.3	−290.6	291.9	
200		11231	55	291.5	−289.2	290.3	
250		13987	55	290.8	−289.1	290.0	
300		16759	55	293.7	−291.3	292.5	
350		19487	54	290.6	−287.3	289.0	
400		22163	52	280.6	−277.3	279.0	
401		22214	51	279.0	−275.7	277.3	
402		22264	50	273.3	−273.5	273.4	
403		22311	47	261.6	−266.6	264.1	
404		22350	39	206.6	−206.7	206.6	1本目破断
405		22387	36	209.1	−206.8	207.9	
406		22423	36	208.9	−206.7	207.8	
407		22459	36	208.9	−206.9	207.9	
408		22495	36	209.6	−206.7	208.1	
409		22532	36	209.3	−206.4	207.8	
410		22568	36	209.0	−206.1	207.6	
420		22928	36	208.1	−205.2	206.6	
430		23287	36	207.2	−204.0	205.6	
440		23642	35	204.9	−201.2	203.1	
441		23677	35	205.0	−200.9	202.9	
442		23712	35	204.2	−199.6	201.9	
443		23747	35	204.2	−198.2	201.2	
444		23782	35	203.2	−194.8	199.0	
445		23815	33	201.7	−187.5	194.6	
446		23846	31	200.0	−176.6	188.3	
447		23871	25	177.6	−126.4	152.0	2本目破断
448		23890	19	128.1	−126.2	127.2	
449		23909	19	128.4	−126.4	127.4	
450		23928	19	128.5	−126.2	127.4	
500		24869	19	127.5	−125.6	126.6	
600		26720	19	127.2	−125.1	126.2	
700		28628	19	129.7	−127.5	128.6	
800		30490	19	128.4	−126.1	127.3	
801		30509	19	128.4	−126.4	127.4	
802		30528	19	128.3	−126.2	127.2	
803		30546	18	128.4	−126.1	127.3	
804		30565	19	128.4	−126.3	127.4	
805		30583	19	128.3	−126.1	127.2	
806		30602	19	128.4	−126.4	127.4	
807		30620	19	128.3	−126.1	127.2	
808		30639	19	128.4	−126.3	127.4	1本目破断の2倍
809		30657	18	129.1	−126.5	127.8	
810		30676	19	129.2	−126.8	128.0	
900		32387	19	128.3	−126.2	127.2	
1000		34256	19	127.9	−125.9	126.9	
1100		36133	18	128.2	−126.1	127.1	
1200		37985	19	127.9	−125.7	126.8	
1300		39879	19	128.2	−126.2	127.2	
1400		41750	19	128.2	−126.0	127.1	
1500		43764	20	129.0	−126.7	127.9	
1550		44758	20	132.2	−129.4	130.8	
1590		45559	20	128.8	−121.4	125.1	
1591		45578	19	127.9	−119.0	123.4	
1592		45597	19	127.2	−114.5	120.8	
1593		45615	18	124.6	−107.2	115.9	
1594		45632	16	118.3	−91.6	105.0	3本目破断

表 1.3.6-6 1 サイクルエネルギー吸収量、最大荷重の変化（試験体 2：定振幅±400mm）

繰返し回数	振幅	累積ｴﾈﾙｷﾞｰ	吸収ｴﾈﾙｷﾞｰ	最大荷重			備 考
				正側	負側	平均	
	(m)	(kN･m)	(kN･m)	(kN)	(kN)	(kN)	
1	0.40	428	428	340.1	-367.8	353.9	
2	0.40	883	455	381.4	-381.0	381.2	
3	0.40	1333	450	382.6	-379.8	381.2	
4	0.40	1777	444	380.0	-376.9	378.5	
5	0.40	2215	438	377.3	-374.1	375.7	
6	0.40	2649	434	374.5	-371.6	373.0	
7	0.40	3078	429	372.1	-369.2	370.7	
8	0.40	3504	426	370.0	-367.1	368.6	
9	0.40	3926	422	368.1	-365.1	366.6	
10	0.40	4346	420	366.2	-363.4	364.8	
11	0.40	4762	416	365.0	-361.9	363.4	
12	0.40	5177	415	363.2	-360.7	361.9	
13	0.40	5589	412	362.0	-359.2	360.6	
14	0.40	6000	411	361.0	-358.2	359.6	
15	0.40	6409	409	359.9	-357.2	358.5	
16	0.40	6816	407	358.9	-356.3	357.6	
17	0.40	7220	405	358.0	-355.5	356.8	
18	0.40	7624	404	357.3	-354.7	356.0	
19	0.40	8027	402	356.9	-354.0	355.4	
20	0.40	8428	402	356.2	-353.4	354.8	
21	0.40	8828	400	355.6	-352.9	354.3	
22	0.40	9227	399	355.0	-352.3	353.6	
23	0.40	9625	398	354.5	-351.9	353.2	
24	0.40	10022	397	354.2	-351.6	352.9	
25	0.40	10418	397	353.8	-351.2	352.5	
26	0.40	10813	395	353.6	-350.7	352.2	
27	0.40	11207	394	353.2	-350.6	351.9	
28	0.40	11600	393	352.9	-350.1	351.5	
29	0.40	11993	393	352.4	-349.9	351.2	
30	0.40	12385	391	352.7	-349.6	351.1	
31	0.40	12775	390	351.9	-349.2	350.6	
32	0.40	13164	389	351.8	-348.7	350.3	
33	0.40	13506	342	338.1	-305.2	321.6	1本目破断
34	0.40	13801	294	281.7	-277.8	279.8	
35	0.40	14093	293	281.0	-276.6	278.8	
36	0.40	14363	270	279.3	-260.9	270.1	
37	0.40	14579	216	236.3	-214.7	225.5	2本目破断
38	0.40	14784	206	217.6	-214.8	216.2	
39	0.40	14989	205	217.2	-214.1	215.7	
40	0.40	15193	204	216.6	-213.6	215.1	
50	0.40	17192	197	211.6	-208.9	210.2	
60	0.40	19145	194	209.6	-207.1	208.3	
61	0.40	19339	194	209.7	-207.0	208.3	
62	0.40	19533	194	209.5	-207.0	208.2	
63	0.40	19726	193	209.5	-206.9	208.2	
64	0.40	19920	194	209.3	-206.8	208.0	
65	0.40	20113	193	209.2	-206.8	208.0	
66	0.40	20306	193	209.4	-206.4	207.9	1本目破断の2倍
67	0.40	20501	195	211.0	-208.4	209.7	
68	0.40	20695	194	210.8	-208.1	209.5	
69	0.40	20889	194	210.6	-208.1	209.4	
70	0.40	21083	194	210.4	-208.0	209.2	
80	0.40	23014	192	209.9	-207.2	208.5	
90	0.40	24932	191	209.7	-206.6	208.1	
100	0.40	26842	190	209.1	-205.8	207.4	
101	0.40	27032	190	209.0	-205.7	207.3	
102	0.40	27223	190	208.8	-205.5	207.2	
103	0.40	27413	190	208.7	-205.3	207.0	
104	0.40	27602	190	208.5	-205.1	206.8	
105	0.40	27792	190	208.3	-204.9	206.6	
106	0.40	27982	190	208.1	-204.5	206.3	
107	0.40	28171	189	207.7	-203.9	205.8	
108	0.40	28360	189	207.5	-202.6	205.1	
109	0.40	28545	185	206.7	-176.2	191.5	
110	0.40	28567	23	106.0	0.0	106.0	3本目破断

表 1.3.6-7 1 サイクルエネルギー吸収量、最大荷重の変化（試験体 3：変動振幅 A）

No.1

サイクル数	振幅	累積ｴﾈﾙｷﾞｰ	吸収ｴﾈﾙｷﾞｰ	最大荷重			備 考
				正側	負側	平均	
	(m)	(kN･m)	(kN･m)	(kN)	(kN)	(kN)	
1	0.10	60	60	311.9	−317.3	314.6	
2	0.10	122	62	322.3	−324.0	323.1	
3	0.10	183	61	325.3	−324.8	325.1	
4	0.10	243	60	325.8	−324.4	325.1	
5	0.10	303	60	324.9	−323.4	324.2	
6	0.10	362	59	323.7	−322.6	323.2	
7	0.10	422	59	323.3	−321.4	322.4	
8	0.10	480	59	321.9	−320.7	321.3	
9	0.10	540	59	321.2	−319.8	320.5	
10	0.10	599	59	320.6	−318.3	319.5	
11	0.10	657	59	319.3	−317.8	318.6	
12	0.10	716	59	318.6	−317.1	317.8	
13	0.10	775	59	318.1	−316.0	317.1	
14	0.10	833	58	317.5	−315.1	316.3	
15	0.10	892	58	316.0	−314.8	315.4	
16	0.10	950	58	315.4	−314.1	314.7	
17	0.10	1008	58	315.1	−313.2	314.2	
18	0.10	1067	58	314.1	−312.2	313.2	
19	0.10	1124	58	313.4	−311.8	312.6	
20	0.10	1182	58	312.8	−311.6	312.2	
21	0.10	1240	58	312.6	−311.0	311.8	
22	0.10	1298	58	312.2	−310.4	311.3	
23	0.10	1356	58	311.6	−310.0	310.8	
24	0.10	1414	58	311.2	−309.4	310.3	
25	0.10	1472	58	310.7	−308.9	309.8	
26	0.10	1529	58	310.3	−308.5	309.4	
27	0.10	1587	57	309.7	−308.0	308.9	
28	0.10	1644	57	308.9	−307.5	308.2	
29	0.10	1701	58	308.4	−306.8	307.6	
30	0.10	1759	57	307.7	−306.2	306.9	
31	0.10	1816	57	307.8	−306.2	307.0	
32	0.10	1873	57	307.4	−306.0	306.7	
33	0.10	1930	57	306.7	−305.4	306.0	
34	0.10	1987	57	306.3	−304.6	305.5	
35	0.10	2044	57	305.8	−304.3	305.0	
36	0.10	2101	57	305.4	−303.7	304.5	
37	0.10	2158	57	305.1	−303.5	304.3	
38	0.10	2214	57	305.3	−303.4	304.3	
39	0.20	2381	167	331.6	−330.5	331.1	
40	0.20	2552	171	335.4	−334.0	334.7	
41	0.20	2722	170	337.0	−334.7	335.8	
42	0.20	2891	170	336.9	−334.1	335.5	
43	0.20	3060	168	336.3	−333.2	334.7	
44	0.30	3353	293	346.1	−348.2	347.2	
45	0.30	3647	294	352.2	−350.1	351.1	
46	0.30	3940	294	352.4	−349.5	351.0	
47	0.40	4367	426	362.1	−364.8	363.5	
236	0.10	19607	53	297.7	−250.2	274.0	
237	0.10	19655	48	285.6	−251.6	268.6	
238	0.10	19703	47	278.7	−250.9	264.8	
239	0.10	19750	47	274.6	−249.9	262.2	
240	0.10	19796	47	271.3	−248.8	260.1	
241	0.10	19843	46	268.4	−247.9	258.2	
242	0.10	19889	46	265.8	−247.1	256.4	
243	0.10	19935	46	263.5	−245.6	254.6	
244	0.10	19981	46	260.7	−244.6	252.7	
245	0.10	20026	45	257.2	−243.3	250.3	
246	0.10	20070	45	254.1	−241.7	247.9	
247	0.10	20114	44	247.7	−239.5	243.6	
248	0.10	20156	42	237.9	−236.2	237.0	
249	0.10	20194	39	229.7	−230.2	230.0	
250	0.10	20232	37	222.7	−213.4	218.1	
251	0.10	20264	32	190.9	−179.8	185.3	1本目破断
252	0.10	20294	30	186.8	−178.3	182.6	
253	0.10	20324	30	183.9	−176.5	180.2	
254	0.10	20352	29	178.4	−174.2	176.3	
255	0.10	20380	27	173.0	−171.3	172.1	
256	0.10	20406	26	167.4	−163.5	165.4	
257	0.10	20430	24	162.3	−149.7	156.0	
258	0.10	20452	22	159.0	−140.9	150.0	2本目破断

表 1.3.6-7 1 サイクルエネルギー吸収量、最大荷重の変化（試験体 3：変動振幅 A）

（続き）

No.2

サイクル数	振幅	累積ｴﾈﾙｷﾞｰ	吸収ｴﾈﾙｷﾞｰ	最大荷重			備 考
				正側	負側	平均	
	(m)	(kN･m)	(kN･m)	(kN)	(kN)	(kN)	
259	0.10	20470	18	130.6	−118.6	124.6	
260	0.10	20488	18	130.3	−118.5	124.4	
261	0.10	20505	18	130.2	−118.7	124.4	
262	0.10	20523	18	130.1	−118.3	124.2	
263	0.10	20541	18	129.9	−118.4	124.2	
264	0.10	20558	18	129.8	−118.4	124.1	
265	0.10	20576	18	129.5	−118.3	123.9	
266	0.10	20594	18	129.5	−118.3	123.9	
267	0.10	20611	18	129.3	−118.2	123.8	
268	0.10	20629	18	129.3	−118.4	123.8	
269	0.10	20647	18	129.1	−118.2	123.7	
270	0.10	20664	18	129.1	−118.0	123.5	
271	0.10	20682	18	128.8	−118.2	123.5	
272	0.10	20700	18	128.8	−118.1	123.4	
273	0.10	20717	18	128.7	−118.2	123.4	
274	0.20	20780	62	154.9	−148.1	151.5	
275	0.20	20845	66	156.9	−150.5	153.7	
276	0.20	20911	66	157.5	−151.6	154.5	
277	0.20	20977	66	157.3	−152.0	154.7	
278	0.20	21043	66	157.1	−152.2	154.6	
279	0.30	21168	125	176.3	−175.8	176.0	
280	0.30	21295	128	179.4	−177.3	178.4	
281	0.30	21423	128	180.2	−177.6	178.9	
282	0.40	21621	198	197.1	−198.8	197.9	
500	0.10	28371	17	124.9	−114.6	119.7	
501	0.10	28388	17	124.7	−114.5	119.6	
502	0.10	28405	17	124.7	−114.5	119.6	1本目破断回数の2倍
503	0.10	28423	17	131.5	−119.6	125.6	
504	0.10	28440	17	130.4	−119.7	125.1	
505	0.10	28457	17	130.5	−119.6	125.0	
506	0.10	28474	17	130.5	−119.6	125.0	
507	0.10	28491	17	130.4	−120.0	125.2	
508	0.10	28508	17	130.3	−119.4	124.8	
509	0.20	28570	62	159.7	−151.8	155.7	
510	0.20	28635	65	161.3	−153.6	157.5	
511	0.20	28700	65	161.2	−154.8	158.0	
512	0.20	28766	66	161.3	−155.0	158.1	
513	0.20	28831	65	160.8	−155.5	158.1	
514	0.30	28956	125	183.0	−181.6	182.3	
515	0.30	29084	127	185.0	−182.9	184.0	
516	0.30	29212	128	185.8	−183.1	184.4	
517	0.40	29411	199	204.3	−205.6	205.0	
1213	0.10	51762	17	118.2	−109.5	113.8	
1214	0.20	51822	59	149.3	−140.6	145.0	
1215	0.20	51883	62	150.3	−142.1	146.2	
1216	0.20	51945	62	150.2	−142.7	146.5	
1217	0.20	52007	62	150.1	−143.1	146.6	
1218	0.20	52069	62	149.9	−143.1	146.5	
1219	0.30	52186	117	176.0	−173.6	174.8	
1220	0.30	52304	118	176.7	−173.2	174.9	
1221	0.30	52422	117	176.1	−171.0	173.5	
1222	0.40	52593	171	198.3	−158.2	178.2	
1223	0.10	52607	14	85.7	−68.2	77.0	3本目破断

表 1.3.6-8 1 サイクルエネルギー吸収量、最大荷重の変化（試験体 4：変動振幅 B）

繰返し回数	振幅	累積ｴﾈﾙｷﾞｰ	吸収ｴﾈﾙｷﾞｰ	最大荷重			備 考
				正側	負側	平均	
	(m)	(kN･m)	(kN･m)	(kN)	(kN)	(kN)	
1	0.10	61	61	317.9	−323.7	320.8	
2	0.10	123	62	327.2	−329.5	328.4	
3	0.10	185	61	330.0	−330.5	330.2	
4	0.20	363	178	341.0	−345.5	343.3	
5	0.20	540	178	349.1	−350.2	349.6	
6	0.30	848	307	358.2	−363.5	360.9	
7	0.40	1294	447	371.4	−380.0	375.7	
8	0.40	1740	446	378.9	−380.8	379.8	
25	0.10	5017	55	315.7	−265.4	290.5	
26	0.10	5067	50	301.8	−267.2	284.5	
27	0.10	5116	49	294.9	−266.6	280.8	
28	0.20	5267	152	321.0	−311.1	316.0	
29	0.20	5422	155	319.7	−311.6	315.7	
30	0.30	5697	274	338.4	−337.9	338.1	
31	0.40	6105	408	357.4	−360.4	358.9	
32	0.40	6517	412	360.8	−360.9	360.9	
49	0.10	9618	53	301.0	−254.0	277.5	
50	0.10	9665	48	287.6	−255.6	271.6	
51	0.10	9713	47	282.0	−255.5	268.7	
52	0.20	9858	146	310.3	−299.7	305.0	
53	0.20	10007	149	309.4	−300.8	305.1	
54	0.30	10272	264	331.0	−329.9	330.5	
55	0.40	10668	396	351.6	−354.1	352.8	
56	0.40	11068	401	354.7	−355.0	354.8	
73	0.10	14098	52	293.8	−249.1	271.4	
74	0.10	14145	47	281.5	−250.7	266.1	
75	0.10	14192	46	275.7	−250.5	263.1	
76	0.20	14335	143	305.1	−293.7	299.4	
77	0.20	14481	146	304.3	−295.2	299.7	
78	0.30	14741	259	328.1	−326.6	327.3	
79	0.40	15130	390	349.8	−352.2	351.0	
80	0.40	15524	394	352.9	−353.1	353.0	
81	0.10	15575	52	291.4	−246.6	269.0	
82	0.10	15622	47	279.2	−248.6	263.9	
83	0.10	15668	46	272.5	−248.5	260.5	
84	0.20	15810	142	302.9	−291.4	297.2	
85	0.20	15955	145	302.3	−292.6	297.5	
86	0.30	16212	257	326.6	−324.7	325.6	
87	0.40	16561	349	337.8	−308.0	322.9	1本目破断
88	0.40	16848	286	279.2	−265.4	272.3	
89	0.10	16872	25	178.1	−117.6	147.9	2本目破断
90	0.10	16890	18	144.8	−120.2	132.5	
91	0.10	16907	17	141.9	−120.5	131.2	
92	0.20	16971	64	166.3	−155.8	161.1	
93	0.20	17038	66	164.7	−156.9	160.8	
94	0.30	17164	127	186.1	−184.6	185.4	
95	0.40	17364	199	206.0	−208.3	207.2	
96	0.40	17566	202	208.6	−208.8	208.7	
121	0.10	19702	21	144.2	−113.1	128.7	
122	0.10	19719	18	139.0	−115.8	127.4	
123	0.10	19737	17	135.7	−116.6	126.1	
124	0.20	19800	63	161.0	−150.4	155.7	
125	0.20	19865	65	160.0	−151.9	156.0	
126	0.30	19989	124	183.6	−181.4	182.5	
127	0.40	20184	196	203.6	−205.8	204.7	
128	0.40	20383	198	206.2	−206.5	206.3	
145	0.10	21805	21	142.4	−112.1	127.3	
146	0.10	21823	18	137.3	−115.1	126.2	
147	0.10	21841	18	134.1	−115.5	124.8	
148	0.20	21904	63	159.7	−149.2	154.5	
149	0.20	21969	65	158.9	−150.4	154.7	
150	0.30	22092	123	183.7	−181.2	182.4	
151	0.40	22288	195	204.1	−206.2	205.2	
152	0.40	22486	198	206.7	−206.9	206.8	
169	0.10	23911	21	141.8	−112.2	127.0	
170	0.10	23929	18	136.7	−114.9	125.8	
171	0.10	23947	18	133.5	−115.6	124.5	
172	0.20	24010	63	159.3	−149.0	154.2	
173	0.20	24075	65	158.8	−150.4	154.6	
174	0.30	24198	123	184.2	−181.8	183.0	1本目破断の2倍
175	0.40	24397	199	206.9	−208.9	207.9	
176	0.40	24596	200	209.2	−209.3	209.3	
201	0.10	26743	21	141.9	−112.7	127.3	
202	0.10	26762	19	136.8	−115.7	126.3	
203	0.10	26780	18	133.5	−116.3	124.9	
204	0.20	26844	64	159.8	−149.3	154.6	
205	0.20	26910	66	159.2	−150.7	154.9	
206	0.30	27035	124	185.7	−183.0	184.3	
207	0.40	27231	197	207.3	−209.2	208.3	
208	0.40	27431	199	209.6	−209.7	209.6	
249	0.10	31034	22	150.7	−118.4	134.6	
250	0.10	31053	19	145.1	−121.7	133.4	
251	0.10	31072	19	141.7	−122.3	132.0	
252	0.20	31139	67	168.4	−158.3	163.3	
253	0.20	31207	69	167.4	−159.6	163.5	
254	0.30	31337	129	194.6	−192.0	193.3	
255	0.40	31542	205	217.6	−219.2	218.4	
256	0.40	31749	207	218.9	−219.2	219.1	
297	0.10	35388	22	142.6	−113.4	128.0	
298	0.10	35408	19	137.0	−116.1	126.5	
299	0.10	35427	19	133.8	−116.8	125.3	
300	0.20	35492	65	160.0	−150.4	155.2	
301	0.20	35558	66	159.2	−151.9	155.6	
302	0.30	35683	125	186.4	−183.7	185.0	
303	0.40	35880	197	210.4	−205.3	207.8	
304	0.40	36066	186	210.6	−170.7	190.7	
305	0.10	36086	19	129.4	−87.2	108.3	
306	0.10	36102	17	121.8	−85.1	103.5	
307	0.10	36118	15	113.0	−81.8	97.4	3本目破断

(3) 最大荷重の変化

図 1.3.6-16～1.3.6-19 に各試験体の最大荷重の変化を示す。基本的に 1 サイクル当りのエネルギー吸収の変化と同様の傾向を示す。定振幅の結果（試験体 1、2）より、最大荷重は、ダンパーロッド 1 本目破断の数回前のサイクルで 2 サイクル目に対して 85%程度になる。

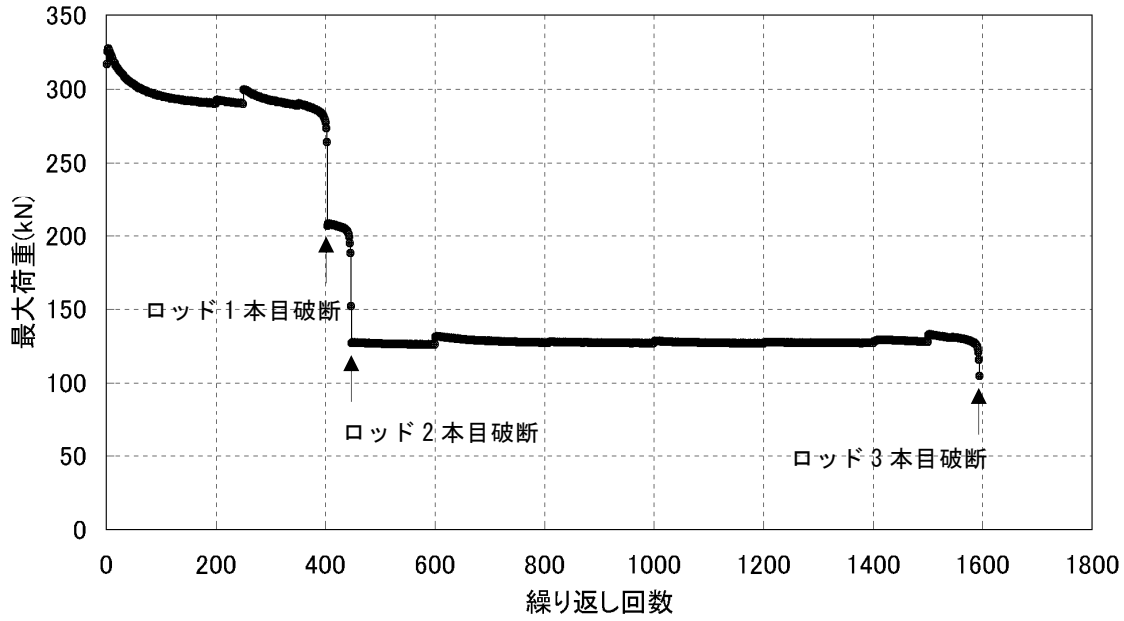


図 1.3.6-16 最大荷重の変化（試験体 1：定振幅±100mm）

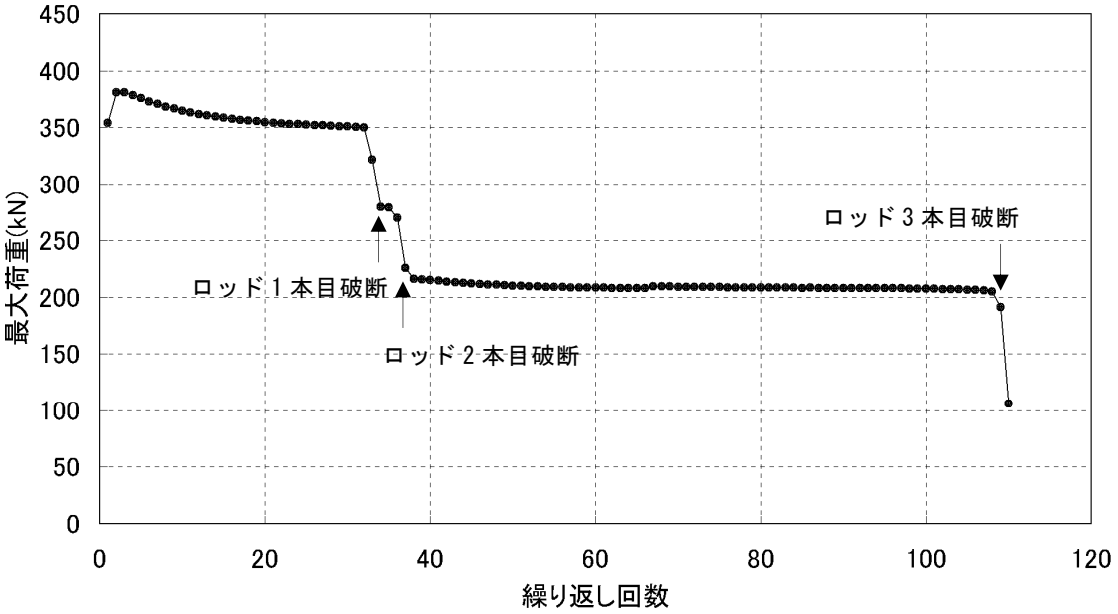


図 1.3.6-17 最大荷重の変化（試験体 2：定振幅±400mm）

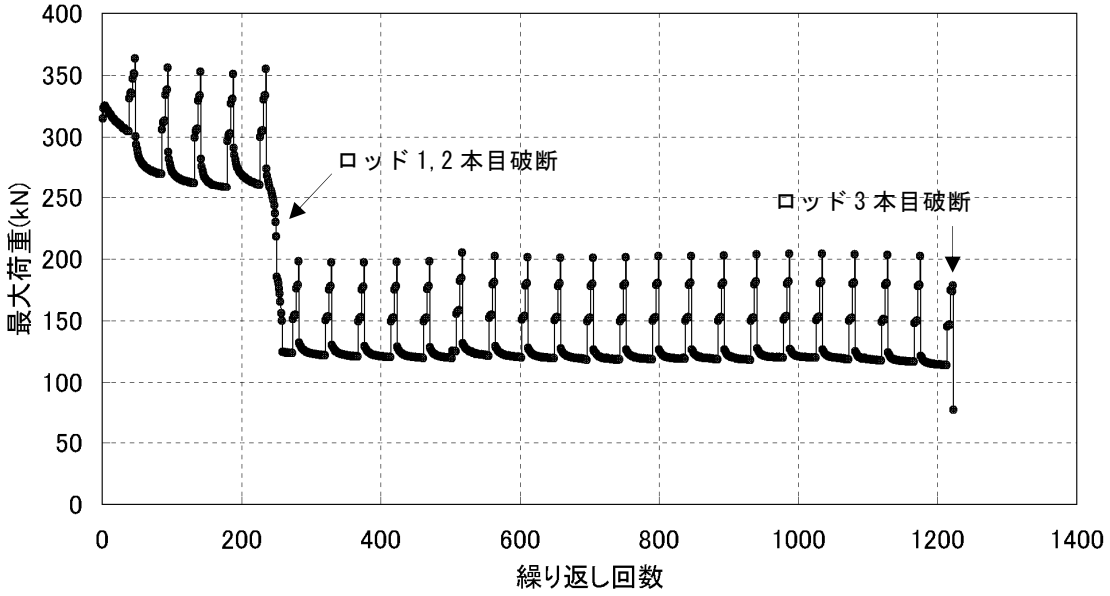


図 1.3.6-18 最大荷重の変化（試験体 3：変動振幅 A）

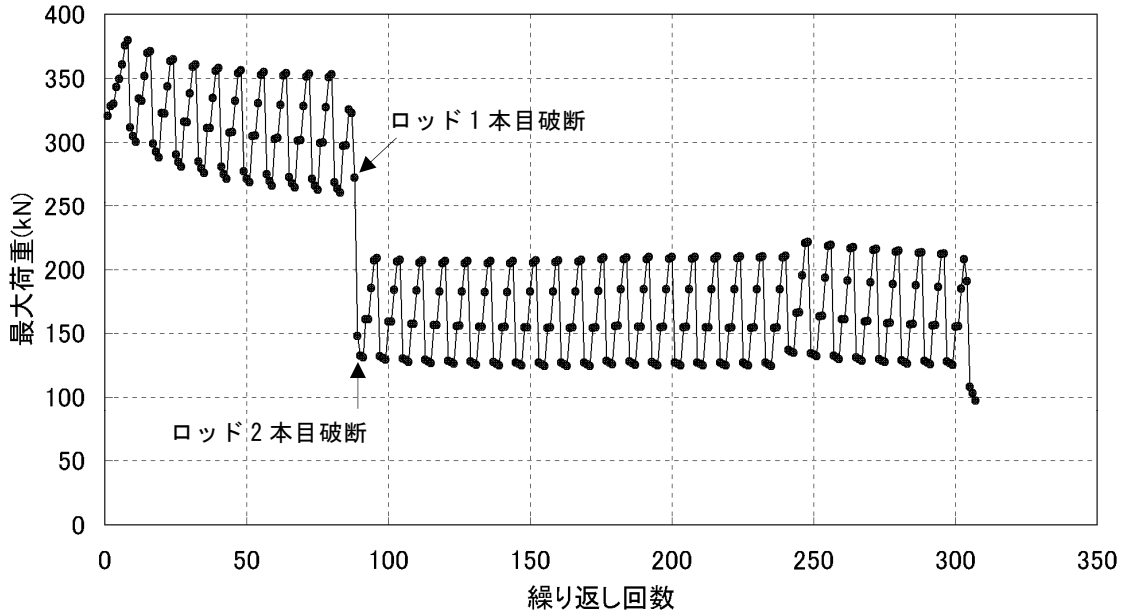


図 1.3.6-19 最大荷重の変化（試験体 4：変動振幅 B）

(4) 温度測定

試験体 2 については、温度測定用ゲージを図 1.3.6-20 の位置に設置し、加力時の温度を測定した。図 1.3.6-21 に測定結果を示す。これより、繰り返しの載荷に伴い温度が上昇している。ダンパーロッド 1 本目が破断するまでの繰り返しにおいて、0 度方向先端②と 90 度方向先端③は 80～90℃まで、0 度方向根元①は 50℃程度まで上昇した。また、3 本目破断時の温度は 105℃となった。

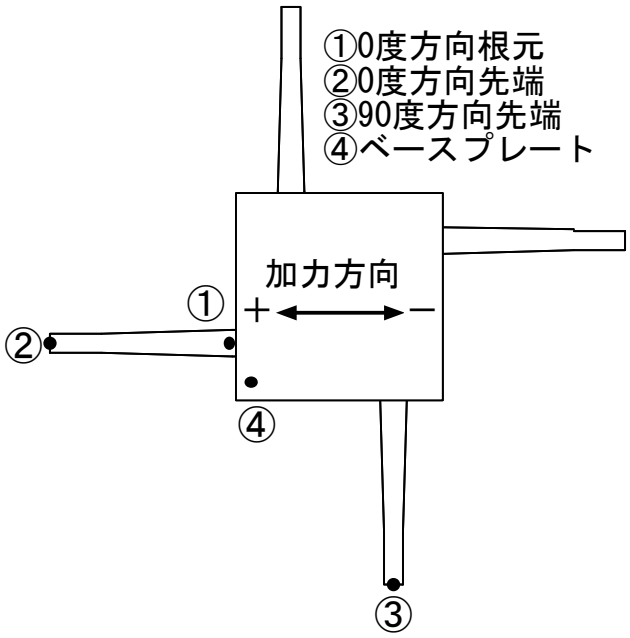


図 1.3.6-20 温度測定箇所（試験体 2）

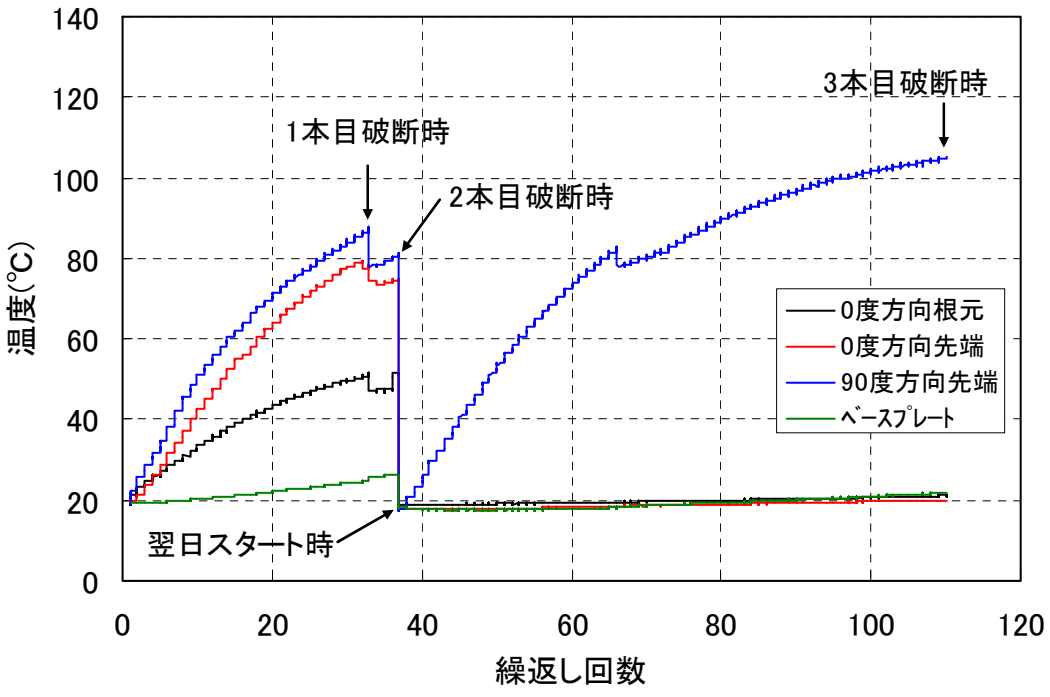


図 1.3.6-21 加力時の温度変化（試験体 2）

(5) 破断回数及び破断箇所

表 1.3.6-9、図 1.3.6-22 に破断回数と破断箇所を示す。また、図 1.3.6-23～図 1.3.6-26 に各試験体の 1 本目破断時の状況を示す。これより、いずれのケースについても、0 度方向に設置された 2 本のダンパーロッドが同程度の回数で破断した。また、破断状況の図から分かるように、根元 D 以外の変形が集中する箇所に破断が生じた。その後、90 度方向のダンパーロッド 1 本がいずれのケースもダンパーロッドの根元部分で破断した。破断回数は 0 度方向の回数の 3～5 倍程度であった。

表 1.3.6-9 破断回数と破断箇所

試験体番号		1	2	3	4
1 本目	破断回数	404	33	251	87
	破断ロッド	④	④	②	④
	破断箇所	B	B	A	C
2 本目	破断回数	447	37	258	89
	破断ロッド	②	②	④	②
	破断箇所	B	B	B	C
3 本目	破断回数	1594	110	1223	307
	破断ロッド	③	①	③	③
	破断箇所	D	D	D	D

破断ロッドと破断箇所は図 1.3.6-22 参照

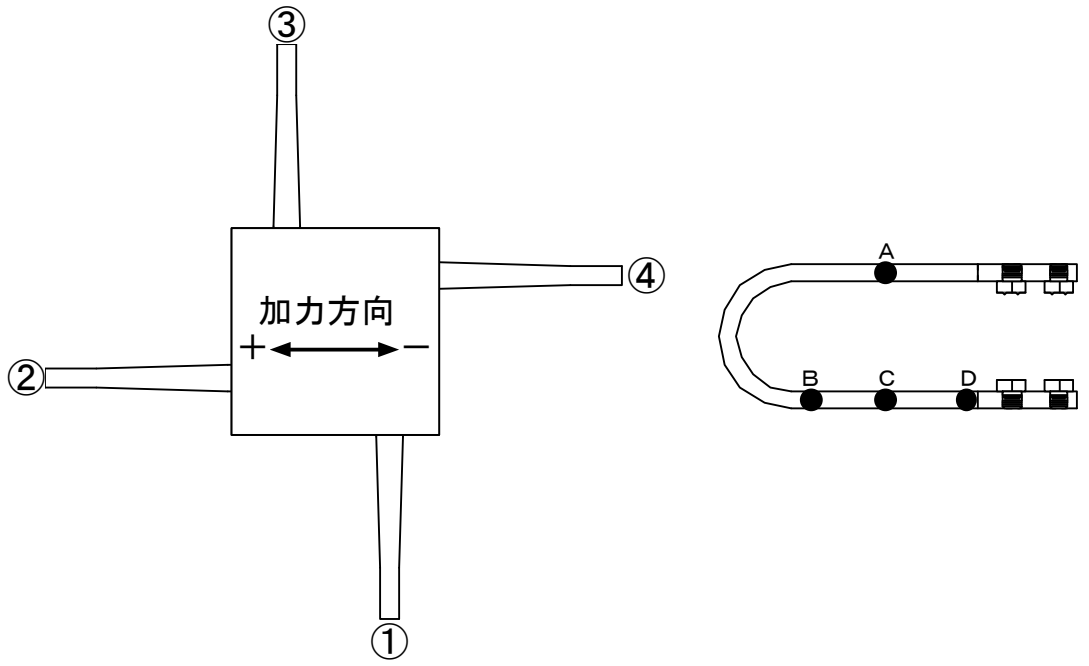


図 1.3.6-22　破断箇所

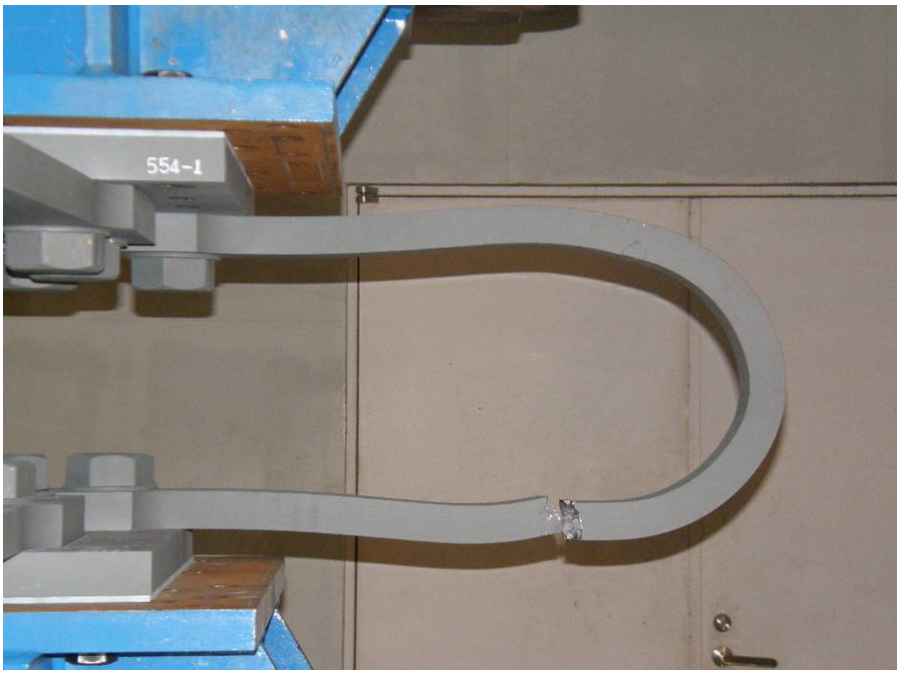


図 1.3.6-23 試験体 1 の 1 本目破断時の状況

図 1.3.6-24 試験体 2 の 1 本目破断時の状況

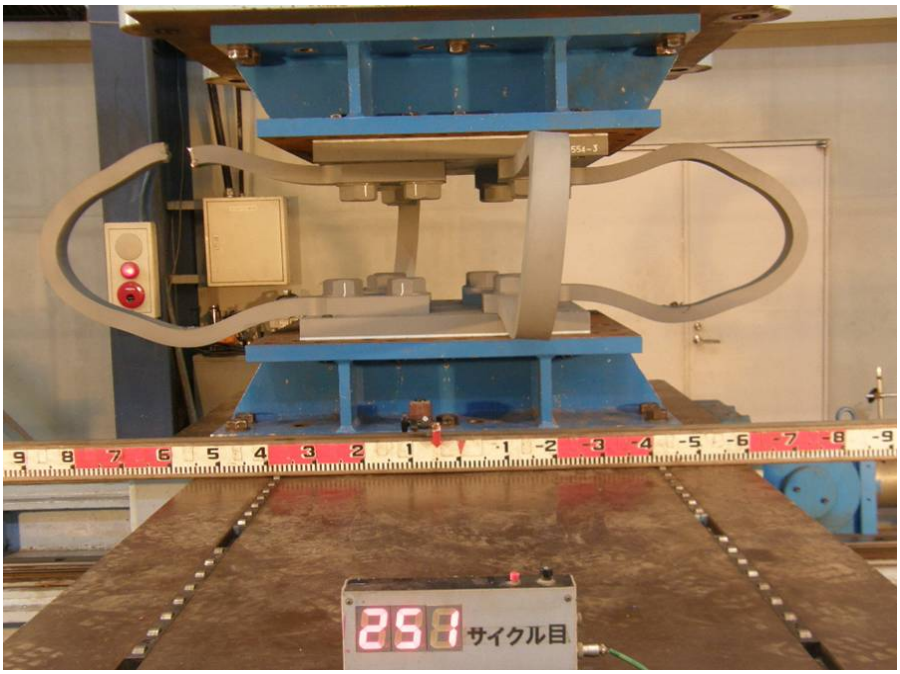


図 1.3.6-25 試験体 3 の 1 本目破断時の状況

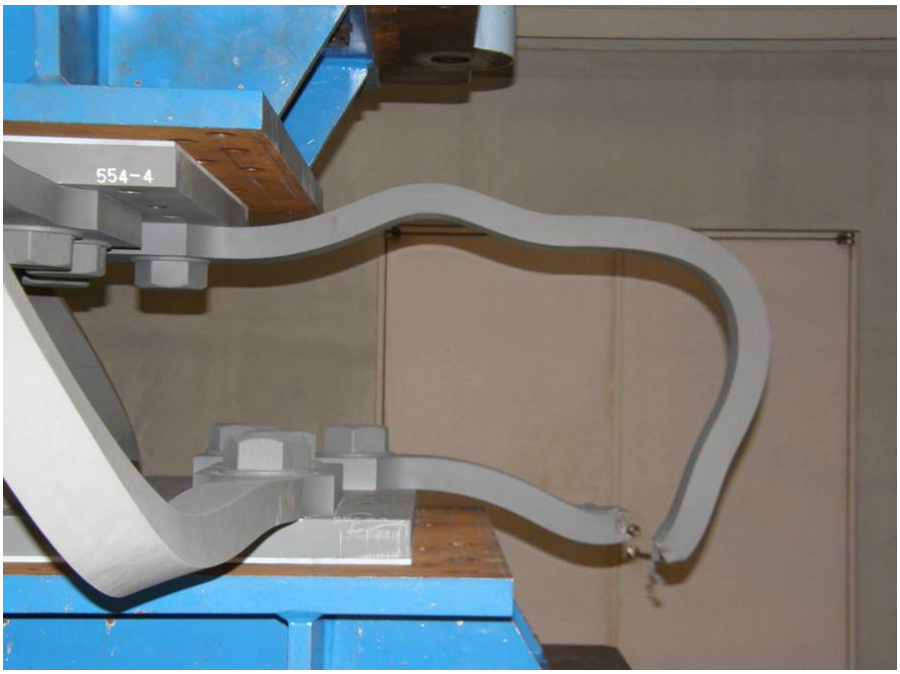


図 1.3.6-26 試験体 4 の 1 本目破断時の状況

(6) 疲労性能

表 1.3.6-10 に、振幅毎の破断までの繰返し回数を、図 1.3.6-27 にこれらの値を疲労性能曲線上にプロットして示す。変動振幅については、参考データとして、各振幅それぞれにおける繰り返し回数でプロットした。破断時におけるトータルの疲労蓄積度はマイナー則を用いて、後述する表 1.3.6-11 にまとめている。

0 度方向のダンパーロッドについて累積疲労損傷度（D 値）の評価を行なった。表 1.3.6-11 に評価結果を示す。D 値は、破断までの繰り返し回数 n_i を、図 1.3.6-1 の疲労性能曲線より求めた破断回数 N_{fi} で除して求めた。変動振幅については各振幅の D 値の和によって表した。これより、試験体 1（定振幅 100mm）では D 値が 1.37 と 1.52 であったが、試験体 2（定振幅 400mm）では 0.87 と 0.97 で 1 を下回った。これについては、振幅が大きく繰り返し回数の少ない領域では、疲労曲線に対して実験結果のばらつきが大きくなる傾向にあり、試験体 2 の結果は疲労曲線に対して 90%程度で、安定した結果が得られたと考えられる。一方、試験体 3、4（変動振幅 A、B）の D 値は 1.07～1.36 で、1 を上回る結果となった。

表 1.3.6-10 振幅と破断までの繰返し回数

試験体番号	振幅（mm）		破断までの繰り返し回数		
			1 本目	2 本目	3 本目
			0 度		90 度
1	定振幅	100	404	447	1594
2	定振幅	400	33	37	110
3	変動振幅 A	100	206	213	989
		200	25	25	130
		300	15	15	78
		400	5	5	26
			251	258	1223
4	変動振幅 B	100	33	34	117
		200	22	22	76
		300	11	11	38
		400	21	22	76
			87	89	307

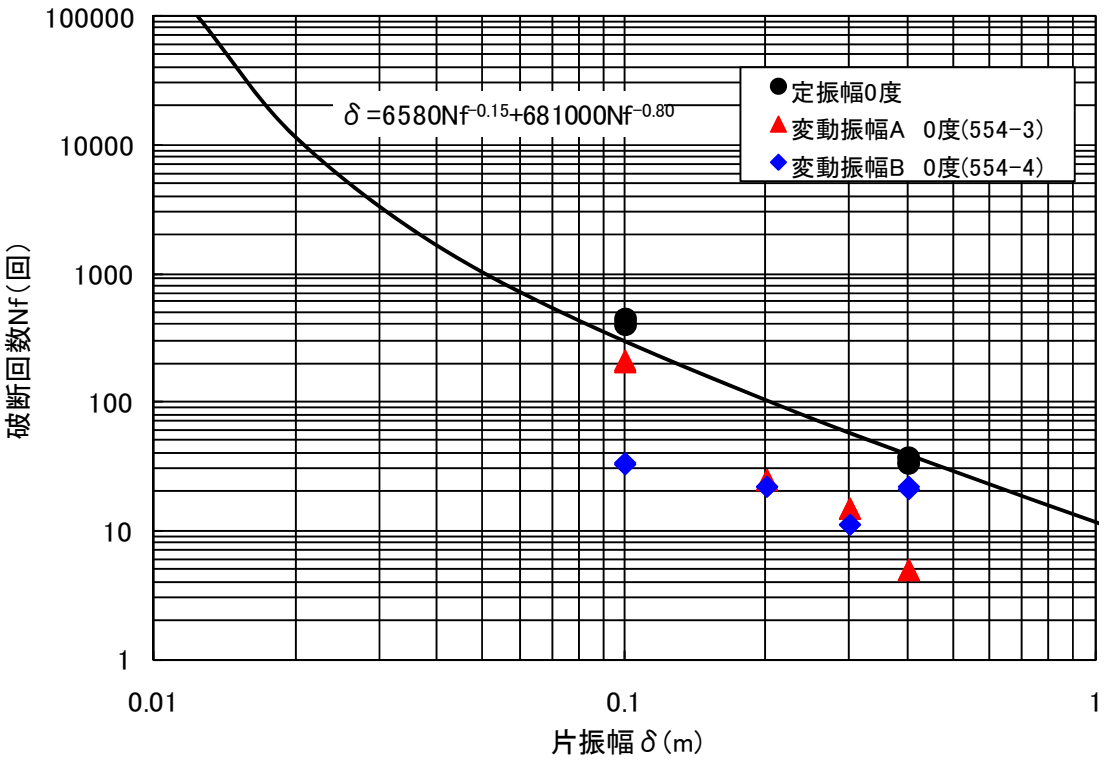


図 1.3.6-27 振幅と破断までの繰返し回数（0 度方向加力）

表 1.3.6-11　既往の疲労曲線との比較

試験体番号	振幅（mm）		疲労曲線による破断回数 N_{fi}	破断までの繰り返し回数			
				1 本目		2 本目	
				回数 n_i	D 値 n_i / N_{fi}	回数 n_i	D 値 n_i / N_{fi}
1	定振幅	100	294	404	1.37	447	1.52
2	定振幅	400	38	33	0.87	37	0.97
3	変動振幅 A	100	294	206	0.70	213	0.72
		200	100	25	0.25	25	0.25
		300	59	15	0.25	15	0.25
		400	38	5	0.13	5	0.13
				251	1.34	258	1.36
4	変動振幅 B	100	294	33	0.11	34	0.12
		200	100	22	0.22	22	0.22
		300	59	11	0.19	11	0.19
		400	38	21	0.55	22	0.58
				87	1.07	89	1.10

(7) 小振幅繰り返し特性

1) はじめに

継続時間の長い風荷重に対する免震U型ダンパーの小振幅での疲労性能について以下の2点の検討を行う。

・小振幅領域での疲労曲線

・風荷重の平均成分に対するオフセット変位が疲労性能に与える影響

2) 小振幅領域での疲労特性

免震U型ダンパー（NSUD50）のU型ロッド単体を対象とした定振幅繰り返し試験において方向別の疲労特性を図1.3.6-28に示す。これより、振幅400mm以下の領域では0度方向の方が繰り返し性能が低いことがわかる。そこで、U型ダンパーの弾性限付近の小振幅領域を対象とした試験では、0度方向のみに着目した実験が行われている。表1.3.6-12に小振幅領域での定変位繰り返し試験結果を示す。また、表1.3.6-13にダンパー種類毎の各部寸法を示す。

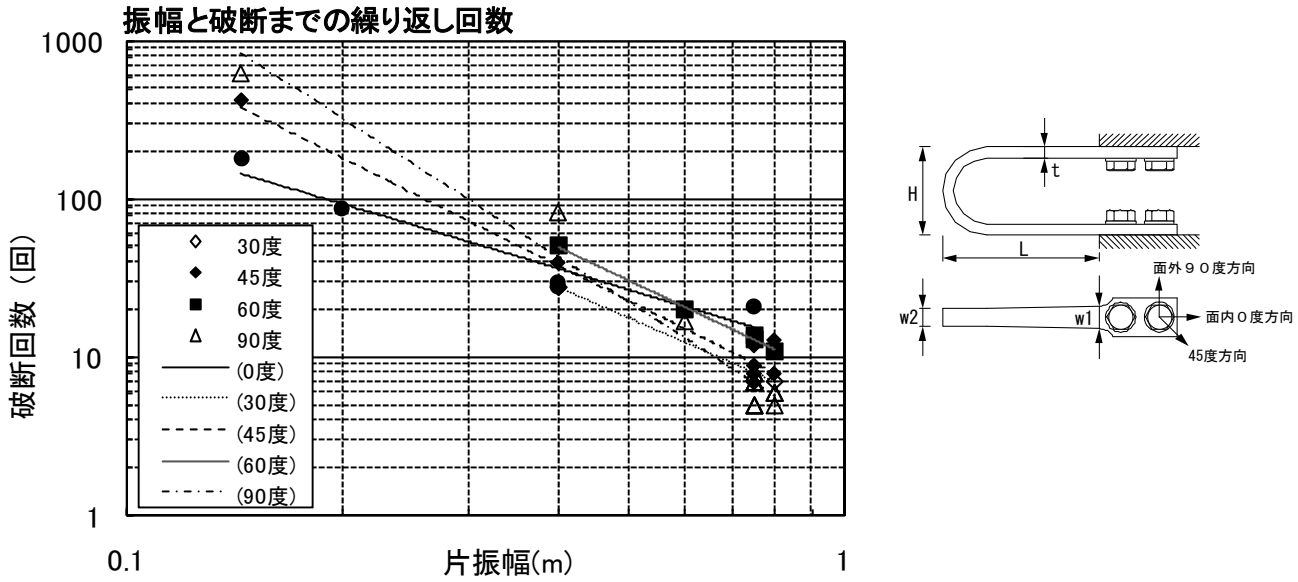


図 1.3.6-28 NSUD50 の疲労特性

表 1.3.6-12 定変位繰り返し試験結果

試験No.	ダンパー種類	振幅（mm）	UD55相当振幅（mm）	破断回数（回）
1	UD40	±10	±16	19,114
2	UD40	±15	±24	4,763
3	UD50	±28	±31	2,568
4	UD50	±28	±31	2,704
5	UD40	±30	±48	1,254
6	UD50	±43	±48	1,007

表 1.3.6-13 ダンパー各部寸法

ダンパー種類	各部寸法（mm）		
	t	L	H
UD40	28	416	231
UD50	40	602	335
UD55	45	673	374

NSUD55 の地震を対象とした振幅での定変位繰り返し試験結果に、表 1.3.6-12 に示す小振幅領域での結果を NSUD55 相当に相似則で振幅を変換した結果を図 1.3.6-29 に示す。地震を対象とした振幅での結果から回帰した疲労曲線(1)に対して、風を対象とした小振幅領域では破断回数は大きくなり、振幅がより小さくなる程顕著になることがわかる。疲労曲線(2)は小振幅も含めた結果から回帰したもの [1.3.6-2)]である。

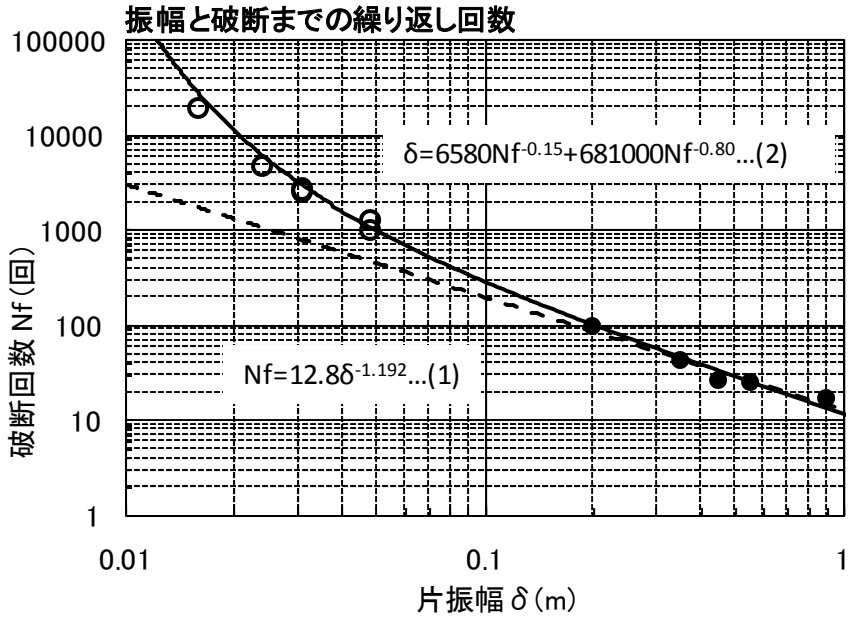


図 1.3.6-29 NSUD55 の疲労特性

3) 小振幅領域でのオフセット変位が疲労性能にあたえる影響

暴風時に風荷重の平均成分に対するオフセット変位を受けた状態で変動成分に対する振幅を繰り返した時を想定し、小振幅領域でのオフセット変位が疲労性能に与える影響について検討する。試験体は NSUD50 を用いて、0 度方向の 2 本組（図 1.3.6-30）による試験を行った。振幅およびオフセット変位および破断回数を表 1.3.6-14 に、履歴ループを図 1.3.6-31 に示す。これより、各ロッドの破断に至るサイクル数は 2568 回から 2847 回の範囲で、オフセット変位が破断回数に与える影響は見られなかった

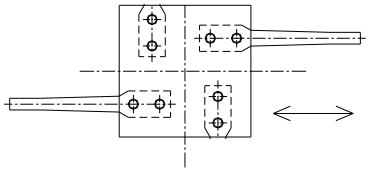


図 1.3.6-30 試験体平面図（UD50、0 度方向、2 本組）

表 1.3.6-14 加振振幅と破断回数

試験 No.	ダンパー 種類	振幅 (mm)	UD55相当 振幅 (mm)	オフセット変位 (mm)	UD55相当 オフセット変位 (mm)	破断回数 1本目 (回)	破断回数 2本目 (回)
1	UD50	±28	±31	0	0	2,568	2,704
2				±28	±31	2,566	2,683
3				±112	±124	2,733	2,847

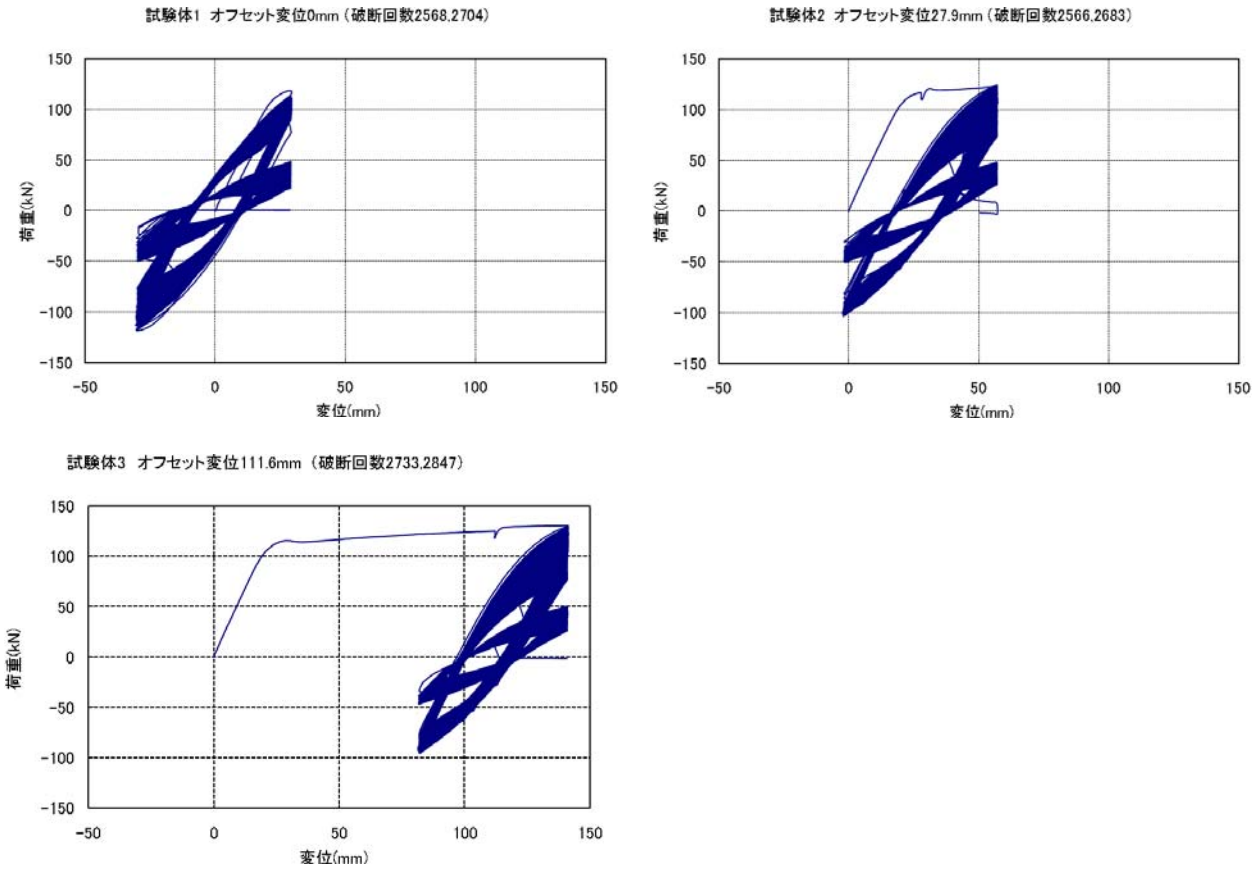


図 1.3.6-31　荷重変形関係

1.3.6.3 まとめと課題

鋼材ダンパーとして主に用いられている免震 U 型ダンパー（NSUD55×4、ダンパーロッド 4 本）について、多数回繰り返し載荷に対する性能確認のための実験を実施した。試験体は 4 体で、定振幅での繰り返し載荷（100mm 及び 400mm、2 ケース）、100、200、300、400mm を組み合わせた変動振幅での繰り返し載荷（2 ケース）を実施した。本実験から得られた主な知見は以下の通りである。

- いずれのケースについても、0 度方向に設置された 2 本のダンパーロッドが相次いで破断し、その後、90 度方向のダンパーロッド 1 本が破断し、実験を終了した。ダンパーの荷重は繰り返しに伴い次第に小さくなり、ダンパーロッドが破断するたびに大きく低下した。
- 1 サイクルの吸収エネルギー量は、定振幅繰り返し載荷において破断に至る数回前のサイクルで 2 サイクル目に対して 85%程度になった。
- 各サイクルの最大荷重は、定振幅繰り返し載荷において破断に至る数回前のサイクルで 2 サイクル目の最大荷重に対し 85%程度になった。
- 定振幅 400mm では載荷時の温度を測定した。破断時の温度は、0 度方向ロッドの先端部分で 80℃に、90 度方向ロッド先端部分で 105℃となった。
- 0 度方向のダンパーロッドについて、累積疲労損傷度（D 値）の評価を行なった。定振幅 100mm では D 値が 1.37 と 1.52 であったが、定振幅 400mm では 0.87 と 0.97 で 1 を下回った。一方、変動振幅の D 値は 1.07～1.36 で 1 を上回る結果となった。
- 90 度方向のダンパーロッドは、0 度方向加力のロッドに対して 3～5 倍の繰り返し回数で破断に至った。

今後の課題としては下記の項目が挙げられる。

- 地震応答変位波形に対する疲労特性
  今回の実験では、4 種類の振幅を組み合わせた変動振幅での繰り返し載荷を実施したが、地震応答のようなランダムな振幅の組み合わせに対しても、マイナー則での疲労予測が可能かどうかを確認する。
- 水平 2 方向加振に対する疲労特性
  水平 2 方向の変形に対しては、U 型ダンパーが変形に追随し機能を発揮することが確認されているが、破断までの加振は行なわれていない。直交方向の変形が作用した場合に 1 方向の疲労特性がどのように変化するか明らかにする。

参考文献

1.3.6-1) 植草、大河原、吉敷、山田、和田：免震 U 型ダンパーの実大動的載荷実験－その 1　速度依存性と寸法効果に関する検討－、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1051-1052、2007 年 8 月

1.3.6-2) 吉敷、大河原、山田、和田：免震構造用 U 字形鋼材ダンパーの繰り返し変形性能に関する研究、日本建築学会構造系論文集、第 73 巻、第 624 号、pp.333-340、2008 年 2 月

1.3.7　鉛ダンパー

1.3.7.1　実験計画

(1)　実験目的と背景

免震構造用鉛ダンパーの長振幅繰り返し試験を実大試験体により実施し、多数回繰り返しに対する性能の把握を目的とする。

鉛ダンパーにおける多数回繰返し性能の既往の研究を以下に列記する。

1)　大変形時の繰返し試験例 [1.3.7-1)]

試験体	加力方向	加力プログラム	
U180（実大）	P,O	正弦波周期 3 秒 （P 方向両振幅加振: ±100mm,3 サイクル →±200mm,3 サイクル →±400mm, 破断まで）	正弦波周期 3 秒 （O 方向両振幅加振: ±100mm,3 サイクル →±200mm,3 サイクル →±400mm, 2 サイクル（周期 100s） →±400mm, 破断まで）
U2426（実大）	P, O		

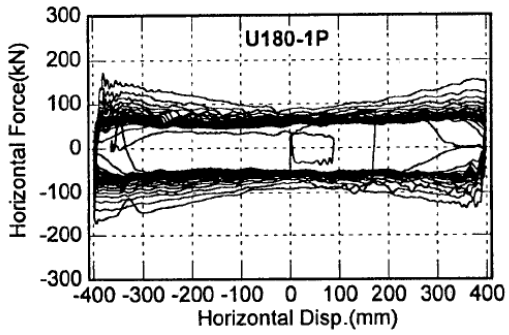


図 1.3.7-1.1 U180 実大 周期 3s P 方向

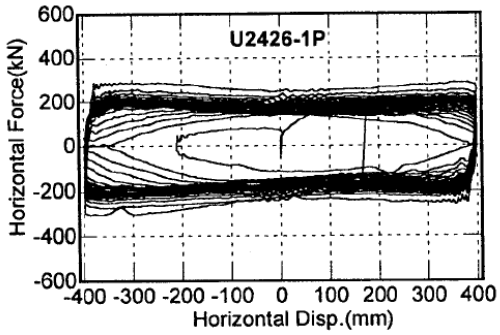


図 1.3.7-1.2 U2426 実大 周期 3s P 方向

上記試験の本来の目的はダンパー反力の計測であった。片振幅 3 サイクルの 0→600mm(U180), 0→800mm（U2426）の試験も実施されている。水平力の履歴形状は剛塑性型で、変形が増えるにつれてハードニングする傾向にある。U180 と U2426 で荷重は違うが、傾向はほぼ同様であった。O 方向についての言及はされていない。

2)　繰返し試験時の特性変化について

繰返し回数とエネルギー吸収量の関係を図 1.3.7-1.3～4 に示す。これより 1 サイクルエネルギー吸収量は繰り返し回数の増加に伴い低下する傾向にあることがわかる。振幅±400mm では 20 回目で約 70%まで低下し、25 回を超えてから破断した。

降伏荷重は、累積変形量の増加に伴い低下する傾向にある。図 1.3.7-1.5 に累積変位量と降伏荷重の変化率の関係を示す。振幅±5mm では累積変形量 170m までにおいて、降伏荷重にほとんど変化は見られない。振幅±20mm では累積変形量が増加するのに伴い降伏荷重は低下し、5500m では初期の約 20%まで低下した。振幅±400mm では累積変形量 25m で約 80%まで低下し、40m で約 50%まで低下後に破断した。

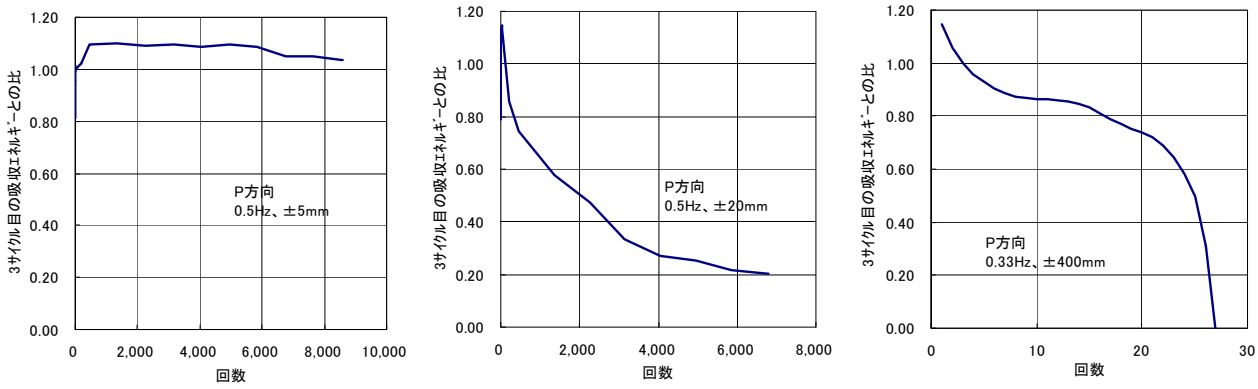


図 1.3.7-1.3　繰り返し回数とエネルギー吸収量の関係（U2426 型）[1.3.7-2)]

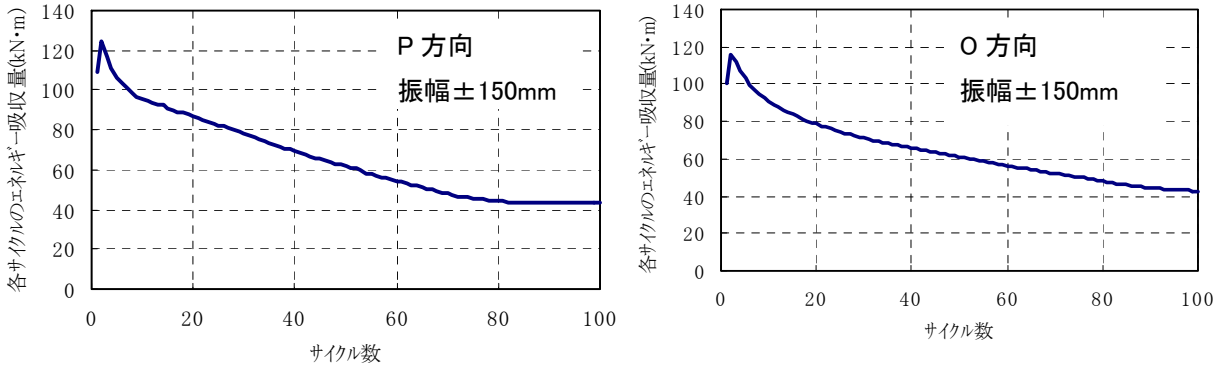


図 1.3.7-1.4 エネルギー吸収量の繰り返し回数依存性(U2426 型、振幅±150mm)[3)]

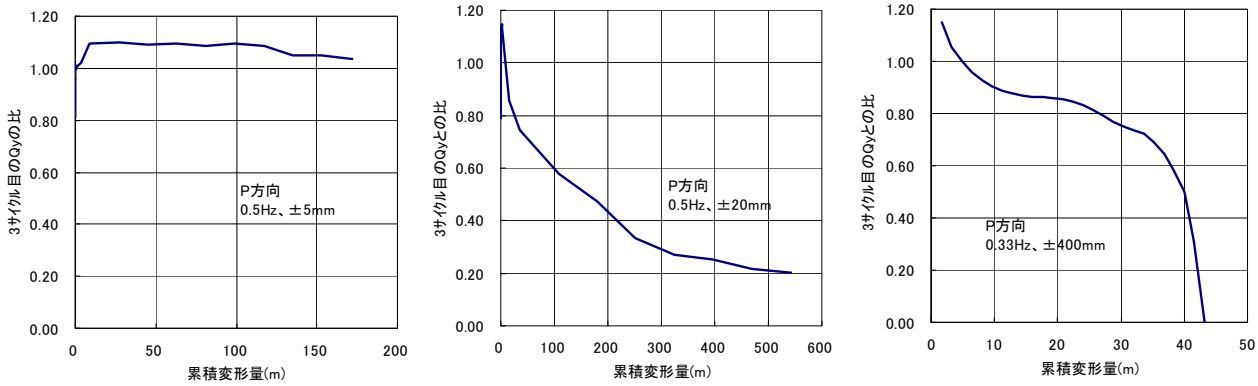


図 1.3.7-1.5　累積変位量と降伏荷重の変化率の関係（U2426 型）[1.3.7-2)]

3)　破断までの繰返し回数

振幅と破断までの繰り返し回数の関係が図 1.3.7-1.6 に示され、式(1.3.7-1)にて表現されている。なお、式(1.3.7-1)は±20～800mm での実験結果より求めたものであるので、±20mm 未満（全振幅 40mm 未満）での破断に到る回数は本疲労曲線を外挿することにより求めることとする。

$$Nd=8.84\times10^{5}\,\delta^{-1.74}=8.84\times10^{5}(\Delta/2)^{-1.74} \qquad (1.3.7\text{-}1)$$

ここに、

Nd：破断時繰り返し回数、δ：片振幅(mm)、Δ：全振幅(mm)

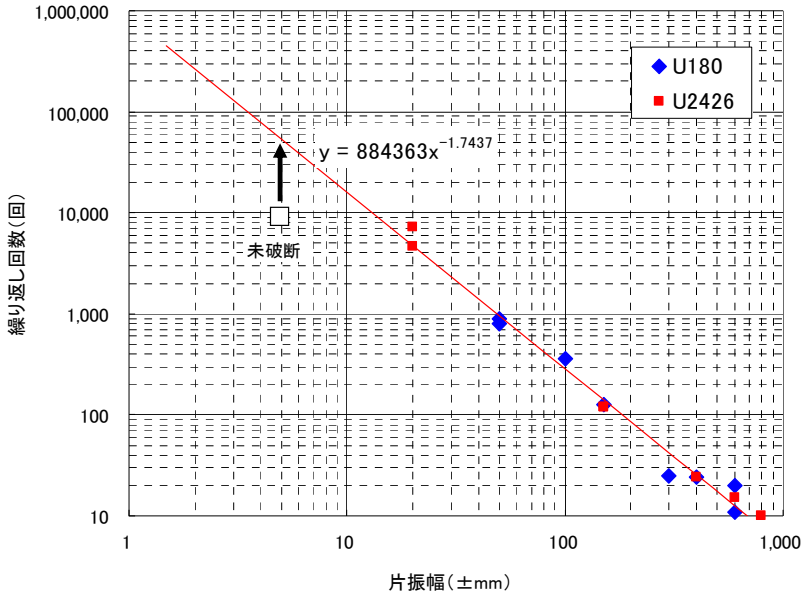


図 1.3.7-1.6　鉛ダンパーの振幅と破断時繰り返し回数の関係 [1.3.7-3)]

式(1.3.7-1)より、主な振幅における破断時繰り返し回数は表 1.3.7-1.1 のようになる。

表 1.3.7-1.1　主な振幅における破断時繰り返し回数 Nd

振幅(mm)	100	200	400
Nd（サイクル）	292	87	26

想定免震建物に対する長周期地震動の時刻歴応答解析における免震層の応答から、レインフロー法により振幅の繰り返し頻度を求めた。検討ケースにおける累積疲労損傷度ΣDi は0.046～0.183 であった[1.3.7-3)]。

4)　既往検討のまとめ

鉛ダンパーの破断に到る繰返し実験は、既に実施されている。また、破断に到るまでの繰返し回数は振幅を用いて定式化されている。ただし、これは定振幅加振結果に基づくものである。繰返しにより、1 サイクルあたりのエネルギー吸収量および降伏耐力は低下する。

長周期地震動の時刻歴解析結果および振幅と破断までに到る繰り返し回数の関係を用い、累積疲労損傷度に関する検討が計算上実施されている。

(2)　実験日および場所

実験は愛知県豊田市の愛知工業大学耐震実験センターにて実施した。

同センターでは，MTS 製 1000kN(ストローク±400mm)のアクチュエータを保有しており、これを用いて試験体を加力した。

試験期間は平成 22 年 12 月 8 日～12 月 24 日であった。

(3)　試験体

試験体は，図 1.3.7-1.7 に示す実大の住友金属鉱山シポレックス製鉛ダンパー(U2426 型)の 3 体であった。1 体の重量は 1,070kgf であり、うち鉛部の重量は 740kgf である。試験体諸元を表 1.3.7-1.2 に示す。

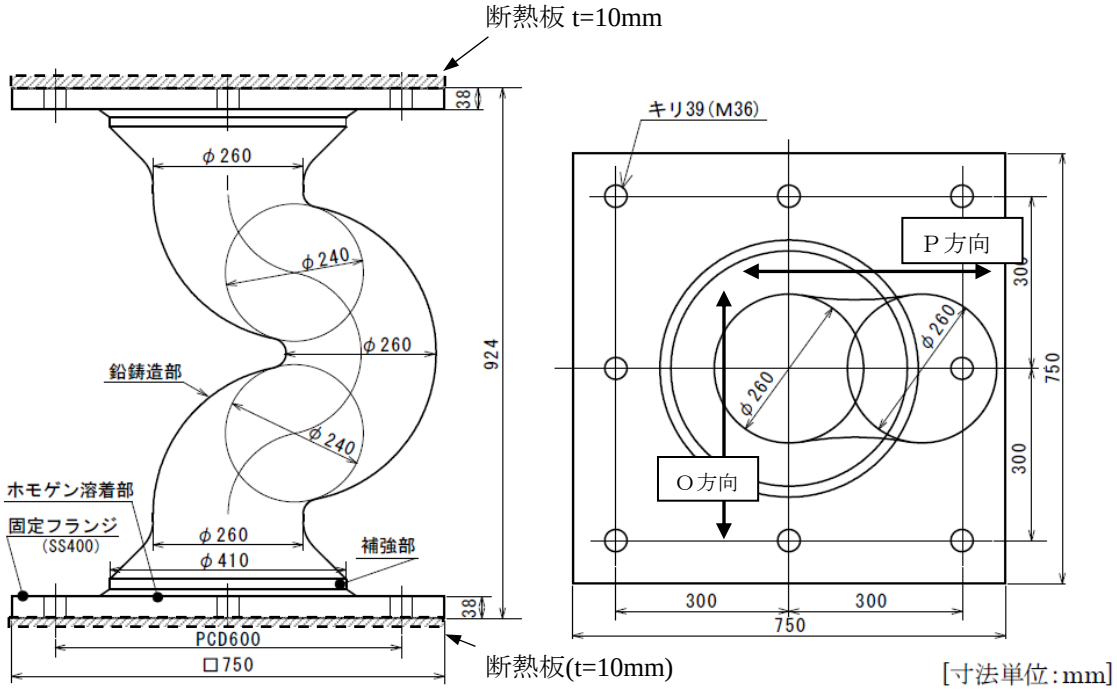


図 1.3.7-1.7　試験体（U2426 型）

表 1.3.7-1.2　鉛ダンパー試験体諸元

名称	高さ (mm)	降伏荷重 (kN)	1 次剛性 (kN/m)	2 次剛性 (kN/m)	降伏変位 (mm)
U2426	924	220	30,000	0	7.33

(4)　試験装置

試験装置を図 1.3.7-1.8 および写真 1.3.7-1.1 に示す。試験体の下端フランジは反力床に固定され、上端フランジは試験機の加力梁に固定されている。アクチュエータにより加力梁を水平移動させ、試験体に所要の水平変形を与える。加力梁はピンを用いた機構にて支持されている。図 1.3.7-1.9 に加力梁支持機構の作動原理を示す。図 1.3.7-1.9 中の A 点が A’点へ水平移動しても、その際の幾何学的な関係から定まる本装置の鉛直変形は非常に小さなものとすることができる。

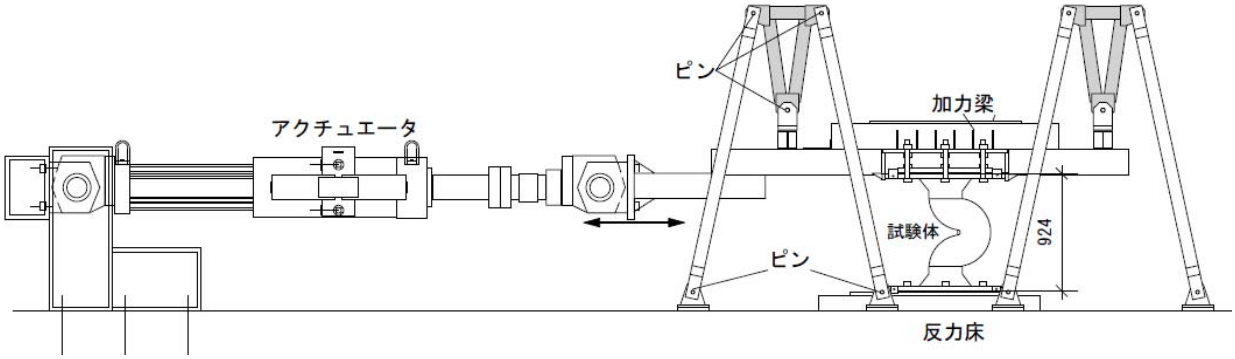


図 1.3.7-1.8　試験装置

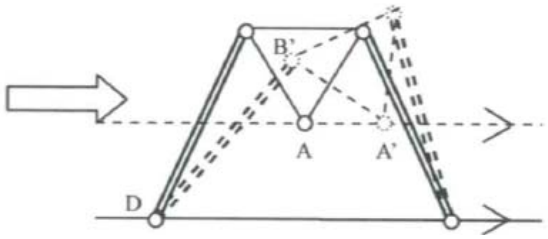


図 1.3.7-1.9　加力梁支持機構の作動原理

写真 1.3.7-1.1　試験装置

(5)　計測項目と計測方法

計測項目は，水平荷重、水平変位、鉛直変位、歪み、鉛およびフランジ表面温度とする．歪みゲージの貼付位置および熱電対による表面温度の計測位置図を図 1.3.7-1.10 に示す。P 方向加力時試験において、上部フランジの変位の正負は、図 1.3.7−1.10 に示すように鉛のくびれが膨らんでいる方向を正側とし、ダンパーの変形および荷重もこの符号と同一とする。

サンプリング周波数は、加力時において 25Hz とする。ただし、表面温度の計測は加力時において 1Hz 計測として、動的計測システムとは別のシステムとした。温度計測には動的サンプリングとの同期目的で水平変位もあわせてデータ収録を行った。計測チャンネルを表 1.3.7-1.3 に示す。

一部の試験条件では加振試験終了後、1 分刻みで温度計測を実施した。また、試験条件 2（方向を変えて断続的に加振）および試験条件 3（地震応答波加振）では、鉛の表面温度分布を調べるために熱画像センサーによる温度計測も実施した。

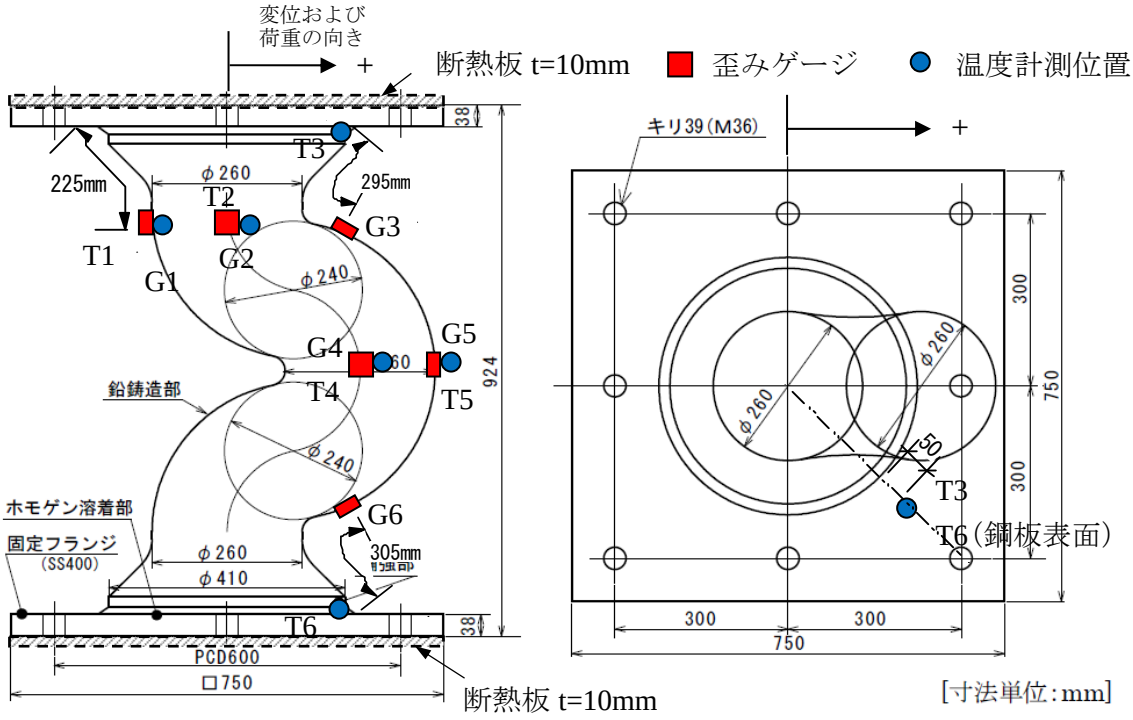


図 1.3.7-1.10 計測位置図

表 1.3.7-1.3　計測チャンネル表

計測項目	計測器(記号)	チャンネル数
水平荷重	ロードセル(L)	1
水平変位（外部変位）*	変位計(DH)	2
上梁の加速度	加速度計(ACC)	1
フランジ間鉛直変位	変位計(DV)	2
歪み分布	歪みゲージ(G)	6×3 方向
鉛表面温度*	T 型熱電対 (T)	4
フランジ表面温度	T 型熱電対 (T)	2

計 30ch　　*水平変位（外部変位）は動的計測(25Hz)と静的計測（1Hz）で収録を行う。

(6)試験方法および試験ケース

試験条件と試験実施日を表 1.3.7-1.4 に示す。

表 1.3.7-1.4 試験体および試験条件一覧

試験体 No.	条件	周期 (秒)	加力方向	水平変位（サイクル数）	累積変形 (m)	Di	実施日
1'*	微小振幅加振	3	P	±0.2mm（3 サイクル）	0.0024	2.06E-07	12/18
				±1mm（3 サイクル）	0.012	3.39E-06	12/18
				±2mm（3 サイクル）	0.024	1.13E-05	12/18
				±4mm（3 サイクル）	0.048	3.79E-05	12/18
				±10mm（3 サイクル）	0.12	1.86E-04	12/18
				±16mm（3 サイクル）	0.192	4.23E-04	12/18
				±20mm（3 サイクル）	0.24	6.23E-04	12/18
小計					0.638	0.0013	
1	漸増連続基本加振	4 →4 →5	P	±100mm（30 サイクル） →±200mm（30 サイクル） →±400mm（破断まで）	12 →36 →破断	0.102 0.344 -	12/18
2－A**	方向を変えて断続的に加振	4	P	±150mm（30 サイクル）	24	0.344	12/20
2－B**		4	O	±150mm（30 サイクル）	48	0.344	12/20
2－C		4	P	±150mm（破断まで）	→破断	-	12/21
3-A	地震応答波加振	4	P	T-TN-AIC003.av 時の免震層応答変位加振×3 回	14m×3	－	12/24
インターバル　3 分							
3-B	地震応答波加振	4	P	T-TN-AIC003.av 時の免震層応答変位加振×9 回	14m×9	－	12/24

注）　P：Parallel，O：Orthogonal，Di：各振幅における疲労損傷度（1 が破断限界）

*　可能な範囲で試験実施。　　**　　加振試験終了後、温度計測（1 分おき程度）

試験条件は以下のとおりである。

○試験条件 1'．微小変形加振（試験体 1）

微小変形の周期 3s 動的正弦波加振を実施した。

変形は、±0.2mm、±1mm、±2mm、±4mm、±10mm、±16mm、±20mm とし、それぞれ 3 サイクルとする。変形量ごとにインターバルを置いて、計測・加振を実施した。

○試験条件 1．漸増連続基本加振（試験体 1）

振幅を段階的に挙げて連続加振を実施した。

100mm（周期 4 秒、30 サイクル,）→200mm（周期 4 秒、30 サイクル,）→400mm（周期 5 秒、破断まで）

加力方向は P 方向とする。

本試験は、振幅が異なる累積損傷の影響を把握するためのデータ取得を目的とする。

一定振幅試験における破断までの繰り返し数（±400mm 時、25 回程度）は既往研究 [1.3.7-3)]を参照する。

○試験条件２．方向を変えて断続的に加振（試験体 2）

P 方向（30 サイクル）→O 方向（30 サイクル）→P 方向（破断まで）と加振する。本試験では繰り返し性状、破断性状について、異なる加振方向の累積変形による影響が見られるのかを把握する。変形は 150mm とする。

単一方向の場合（P 方向）における振動数 0.33Hz の±150mm 一定振幅時の既往試験結果 [1.3.7-4)] を図 1.3.7-1.11 に示す。この図は 100 サイクル（累積変形量：60m）までの結果である。120 サイクル目（累積変形量：72m）にて終局限界となった。

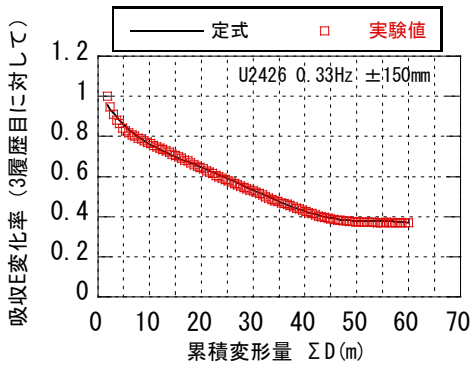


図 1.3.7-1.11　U2426 P 方向　±150mm 振動数 0.33Hz 加振時の
1 ループ分吸収エネルギー変化率

○試験条件３．地震応答波加振（試験体 3）

地震応答 WG（WG3）において、鉛ダンパーU2426 に対して、エネルギー吸収量の時々刻々の変化を模擬しうる応答評価用モデルを提案している。試験体 3 では、応答評価用復元力モデル検証用としてランダム応答時のダンパーの力と変位の関係を取得する。累積変形量と 1 ループ当たりの吸収エネルギーの変化率の実験結果を模擬する復元力特性による 1 質点系の地震応答解析結果を実施し、その応答変位波形を試験体に強制変位として載荷させた。

1 質点系の解析モデルとしては、天然ゴム系積層ゴムを想定した線形弾性要素と鉛ダンパーの完全弾塑性ノーマルバイリニアモデルの並列和からなる。降伏せん断力係数は 0.02、免震層 δ＝35cm 時の等価周期 Teq(δ=35cm)は 4.25 秒と設定した。地震動 T-TN-AIC003.av 入力時の解析結果を図 1.3.7-1.12 に示す。図 1.3.7-1.12 (a),(b)に変形および累積変形量を示す。最大値は 33.8cm で累積変形量は 60 秒から 210 秒の 150 秒間においては 14.0m となる。強制変位波形としては、この 60 秒から 210 秒の 150 秒間の波形を用いる。最初の加振(3-A)では、150 秒の波形を繰り返し連続で 3 回加力した。その後インターバル時間 3 分ののちに 150 秒の波形を繰り返し連続で 9 回加力（3-B）した。この試験で用いた試験体は、合計 12 回の 150 秒波形の強制変位をうけた。

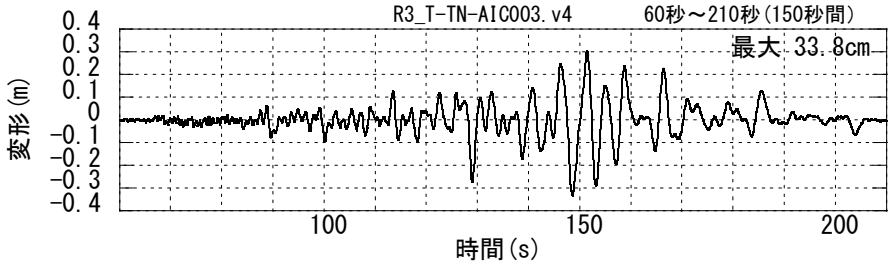
※参考：±150mm，連続 30 サイクル時における温度上昇⊿T（放熱非考慮）

⊿T=q／mc＝Qd×δt／mc

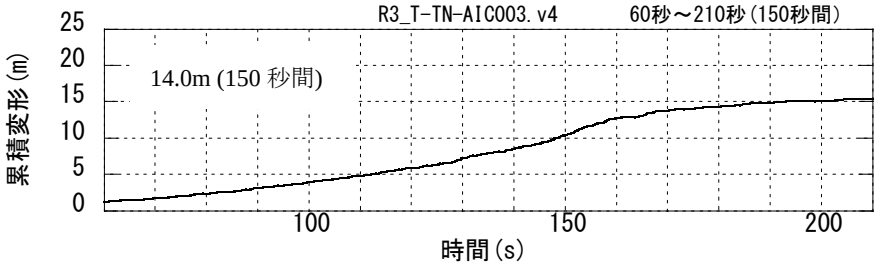
=1000*220*0.15*4*30/(740*129)=<u>41.5</u> (℃)

ここに、δt：累積塑性変形量、⊿T：上昇温度、q：吸収エネルギー量、

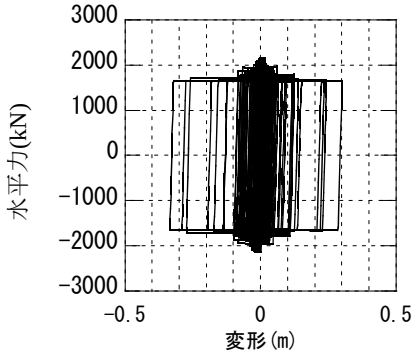
Qd：鉛ダンパーの降伏荷重、m：鉛鋳造体重量（U2426:740kg)、c：鉛の比熱（129J/(kg・K)）



(a)　変形



(b)　累積変形量



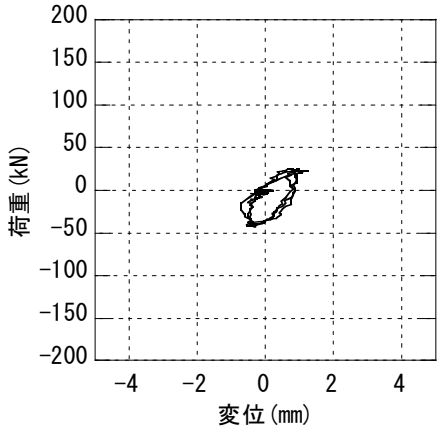
(c) 鉛ダンパーの水平荷重変形関係

図 1.3.7-1.12　地震動 T-TN-AIC003.av 入力時の解析結果

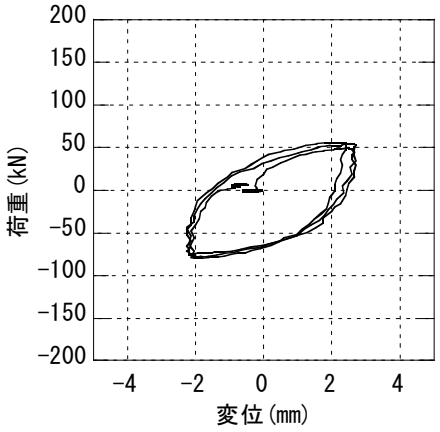
1.3.7.2　試験結果

(1)　微小振幅加振

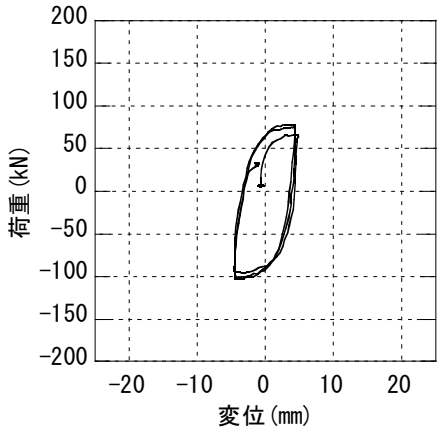
荷重変形関係を図 1.3.7-2.1 に示す。変形±1㎜ 時から履歴はループを描いている。変形が大きくなるほど荷重値は大きくなっていることがわかる。



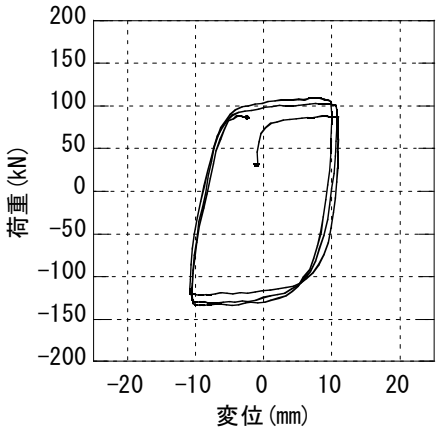
(a)±1mm　荷重変形



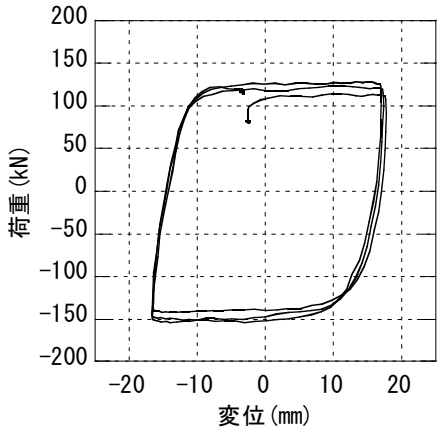
(b)±2mm　荷重変形



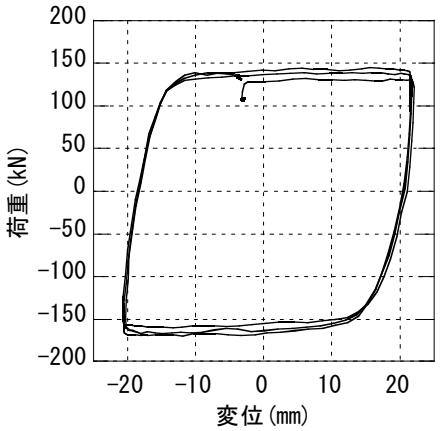
(c)±4mm　荷重変形



(d)±10mm　荷重変形



(e)±16mm　荷重変形



(f)±20mm　荷重変形

図 1.3.7-2.1　微小振幅加振　荷重変形関係

(2)　漸増連続基本加振

水平変位および累積変位の時刻歴を図 1.3.7-2.2 に示す。±400㎜ の 9 サイクル目の負側の最大変位に到達する前に試験体の上部にて破断を確認した。破断までの累積変形量は 50.88m であった。

荷重変形関係図を図 1.3.7-2.3 に示す。(b)図で示す±100㎜ 加力時では、荷重変形関係は正負対称な形である。±200㎜ 加振（図(c)）および±400㎜ 加振では、水平変位の正側と負側で荷重の大きさが異なっている。これは繰り返し加力を受けたことによる試験体の形状変化の影響によるものと考えられる。±200㎜ の繰り返し載荷において、試験体のくびれ部の下側に亀裂が生じており、試験体は初期と異なる形状となっている。同一変形内における繰り返しにより降伏荷重の値は、繰り返し回数とともに低下している。

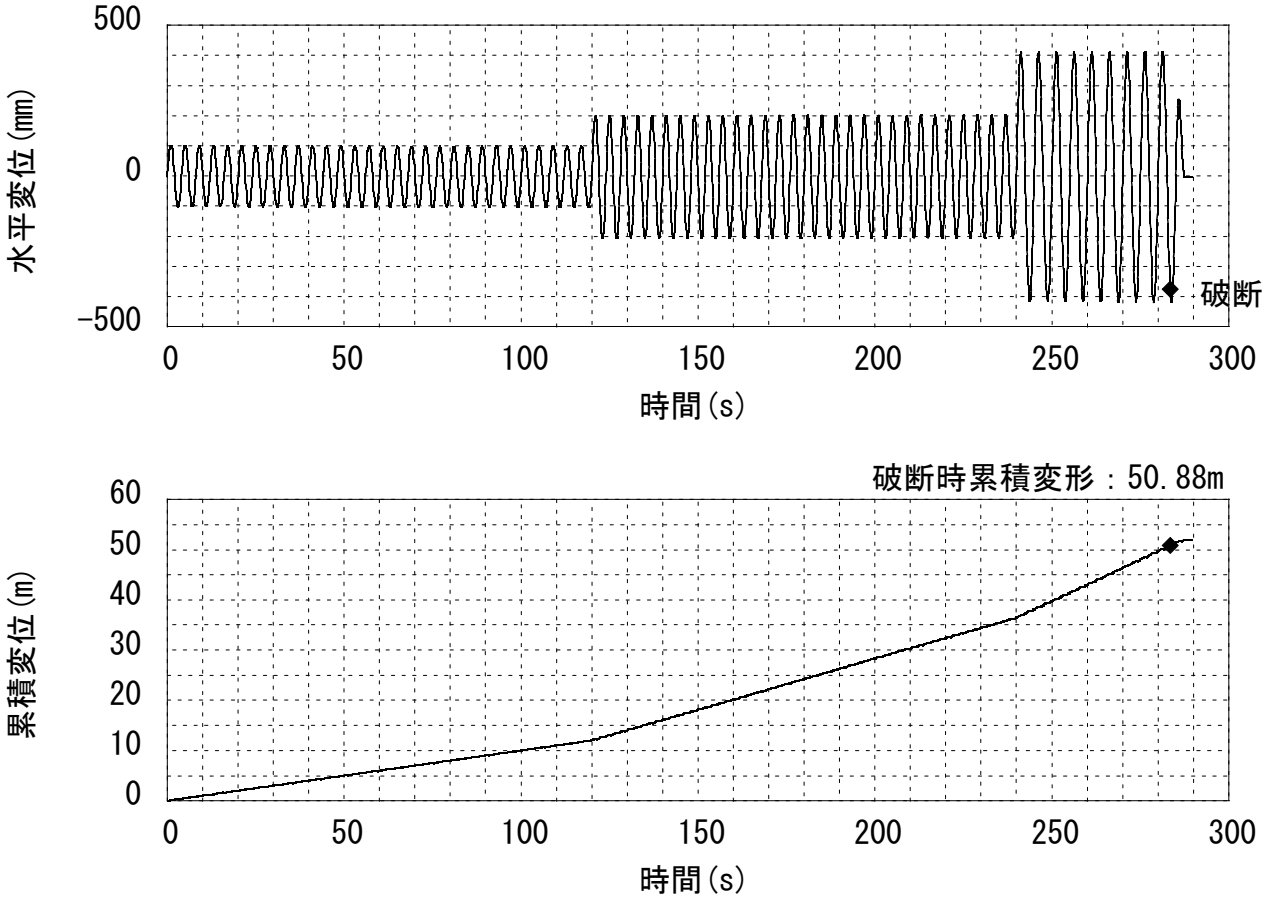
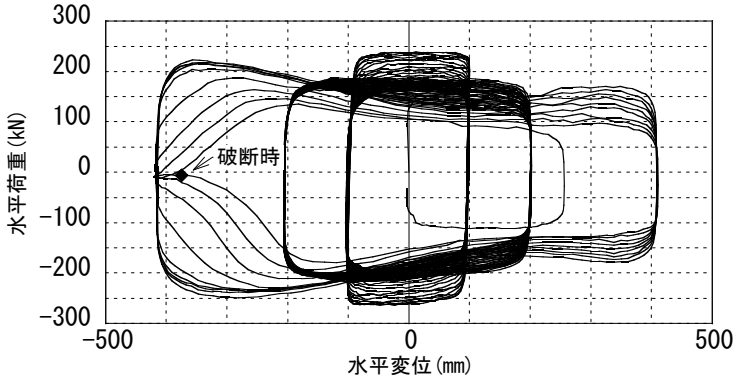
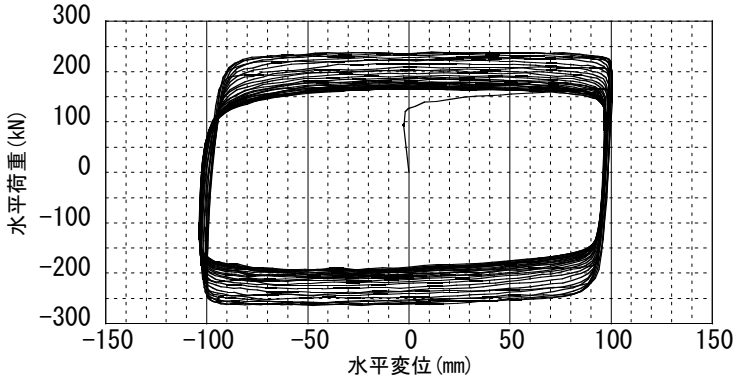


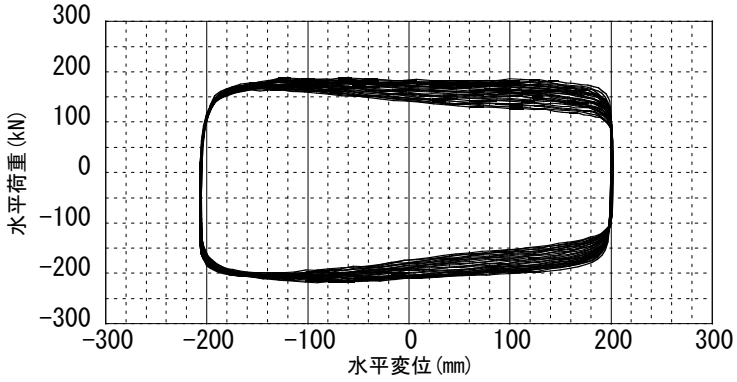
図 1.3.7-2.2　漸増連続基本加振　変位時刻歴



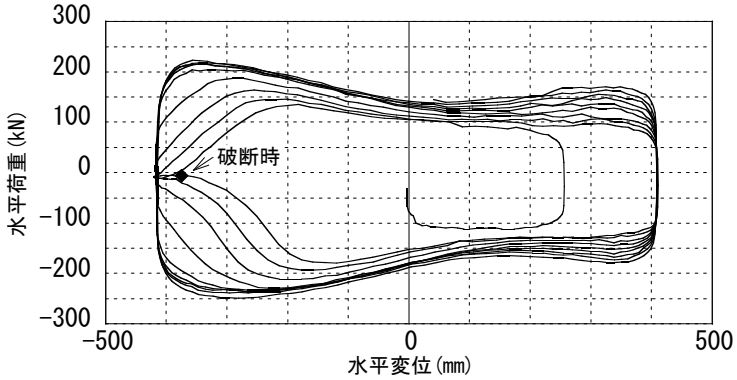
(a)水平荷重変形関係（全データ）



(b)水平荷重変形関係（±100㎜のみ）



(c)水平荷重変形関係（±200㎜のみ）



(d)水平荷重変形関係（±400㎜のみ）

図 1.3.7-2.3　漸増連続基本加振　水平荷重変形関係

降伏荷重と累積変形量の関係を図 1.3.7-2.4 に示す。降伏荷重の算出は、荷重変形関係 1 ループ当りのエネルギー吸収量 W より式(1.3.7-2)を用いて求めた。

$$Q_y = \frac{W}{2(d_{\max} - d_{\min} - d_y)} \tag{1.3.7-2}$$

Q_y　：降伏荷重

W　：1 ループ当りのエネルギー吸収量

d_{maz}、d_{min}：1 ループ内の最大変形および最小変形

d_y　：降伏変位（表 1.3.7-1.2 より　7.33mm）

図 1.3.7-2.4 では降伏荷重を 3 サイクル目の降伏荷重により基準化している。±100㎜ の 30 サイクル繰り返しによる降伏荷重は 3 サイクル目に対して 70%に低減している。変形が±200㎜ に大きくなると、降伏荷重は 80%にまで回復する。その後±200㎜ の繰り返しにより荷重が低下し、30 サイクル終了時では、±100㎜ 加力の 3 サイクル目における降伏荷重値の 65%となる。変形が±400㎜ の加力では再び荷重は回復するが、繰り返し履歴により荷重は低下し、破断時では 45%となった。P 方向±150㎜ および±400 の単一振幅正弦波加振結果 [1.3.7-4, 1.3.7-5] より求めた累積変形量と降伏荷重の低下率の関係を図中にあわせて示す。既往実験による関係式は以下のとおりである。

±150㎜　：$R\_W = -1.411\times10^{-8}Y^5 + 2.391\times10^{-6}Y^4 - 1.470\times10^{-4}Y^3 + 4.101\times10^{-3}Y^2 - 6.261\times10^{-2}Y + 1.093$

(1.3.7-3)

±400㎜　：$R\_W = -1.84\times10^{-7}Y^5 + 1.91\times10^{-5}Y^4 - 7.50\times10^{-4}Y^3 + 1.37\times10^{-2}Y^2 - 0.121Y + 1.32$

(1.3.7-4)

R_W：1 ループ分の吸収エネルギーの 3 サイクル目に対する変化率

Y　：累積変形量(m)

±100㎜ の本試験による低下傾向は、既往の±150㎜ 試験に基づいた低下式とほぼ同様の低下度合いとなっている。ただし、本実験結果では変形が変わる際に荷重の回復現象が見られるため、既往結果と異なる変化を示している。累積エネルギー吸収量と累積変形の関係を図 1.3.7-2.5 に示す。破断直前まで試験体はエネルギーを吸収している。最終的なエネルギー吸収量は 8850kNm であった。

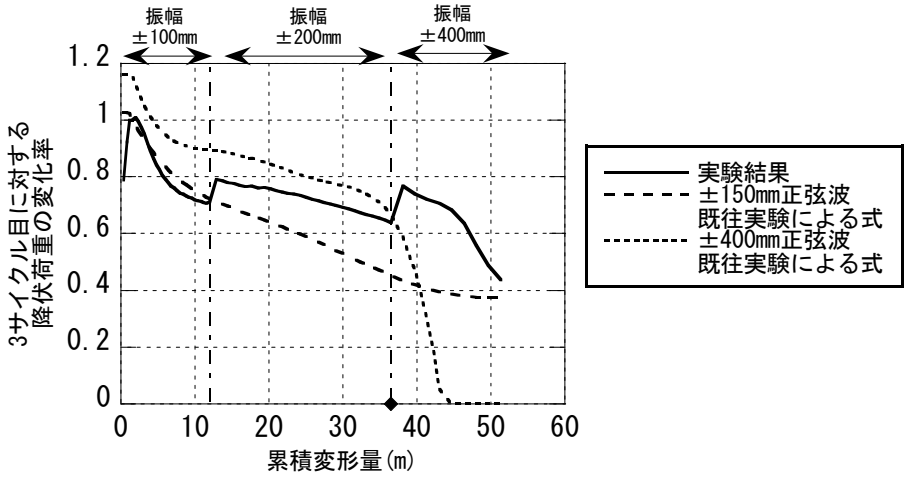


図 1.3.7-2.4　降伏荷重と累積変形量の関係

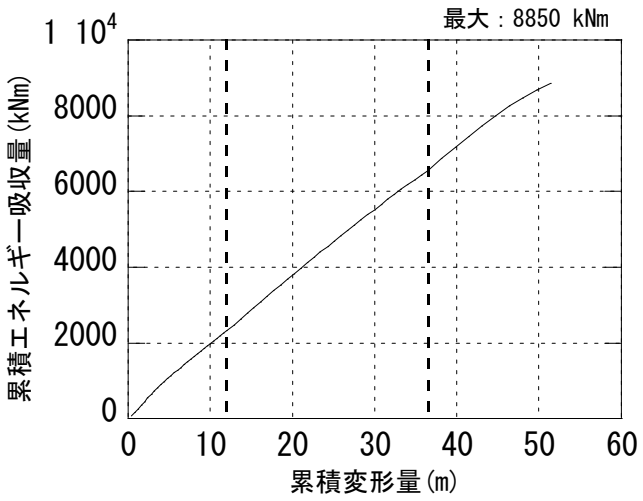


図 1.3.7-2.5　累積エネルギー吸収量と累積変形量の関係

次に累積損傷度の検討を実施した。振幅と破断までの繰り返し回数の関係 [1.3.7-3)]が図 1.3.7-2.6 に示され、式(1.3.7-5)にて表現されている。なお、式(1.3.7-5)は±20～800mm での実験結果より求めたものであるので、±20mm 未満（全振幅 40mm 未満）での破断に到る回数は本疲労曲線を外挿することにより求めることとしている。

$$Nd=8.84\times10^{5}\,\delta^{-1.74}=8.84\times10^{5}(\Delta/2)^{-1.74} \qquad (1.3.7\text{-}5)$$

ここに、

Nd：破断時繰り返し回数、δ：片振幅(mm)、Δ：全振幅(mm)

本実験における累積損傷度の評価結果を表 1.3.7-2.1 に示す。各振幅における損傷度の和は、0.788 となり、1 未満の値となった。

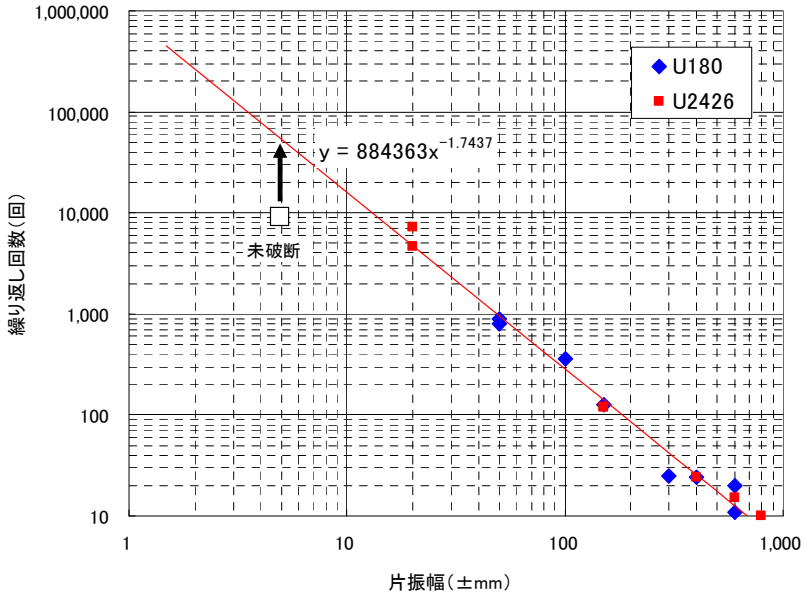
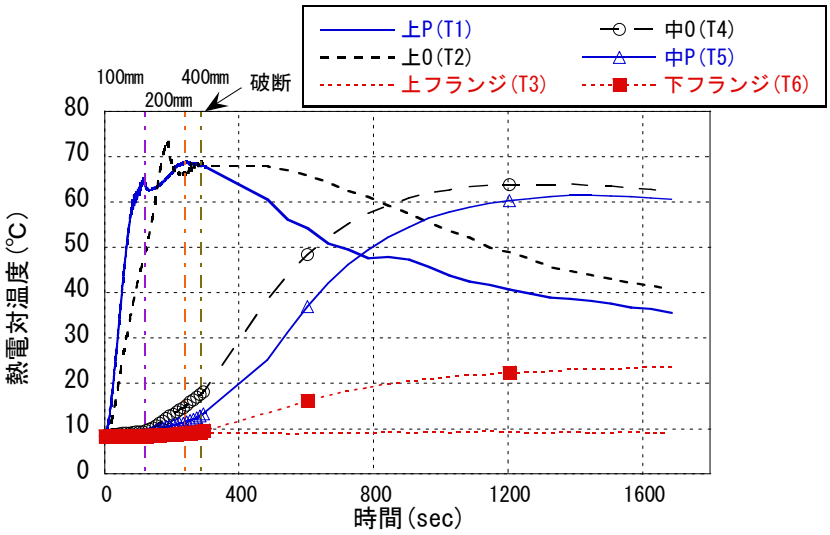


図 1.3.7-2.6　破断までの繰り返し回数と振幅の関係 [1.3.7-3)]

表 1.3.7-2.1　漸増連続基本加振　累積損傷度評価

振幅 δ (mm)	破断時 繰り返し回数 Ndi	実験 繰り返し回数 ni	損傷度 ni/Ndi
100	292.7	30	0.102
200	87.6	30	0.342
400	26.2	9	0.343
累積損傷度			0.788



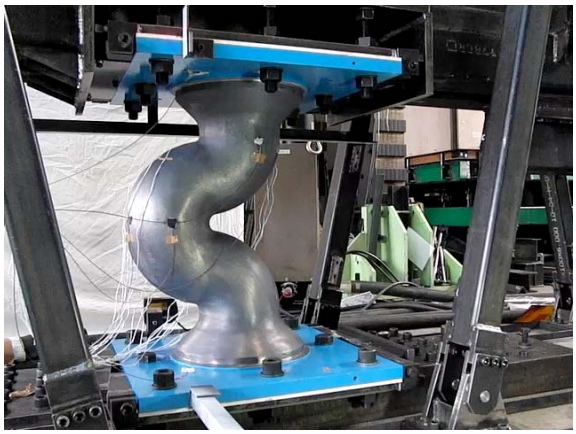
※上フランジの熱電対は鋼板から剥離

図 1.3.7-2.7　漸増連続基本加振　熱電対計測結果

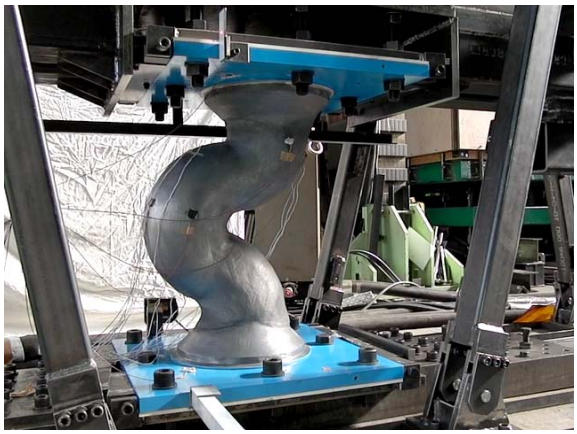
熱電対による試験体表面の温度計測結果を図 1.3.7-2.7 に示す。鉛部上部の温度（T1, T2）は試験開始時から急激に上昇する。ただし、温度が 70℃程度にて頭打ちとなっている。一方、中央のくびれ部およびフランジの加力中における発熱はわずかである。加力が終了すると、鉛上部の温度は漸減する。一方、中央部およびフランジの温度は上昇する。特に、中央部の温度は 60℃から 65℃にまで上昇し、ピークを迎えその後漸減した。なお、本試験の上フランジを計測する熱電対(T3)は試験中に剥離し、計測することができなかった。

次頁以降に、試験体の状況写真を示す。±200㎜ の加振時にはすでに形状変化が顕著に表れ、くびれ部下部の鉛断面は大きくなり、くびれ上部は細くなっている。試験体の破断はくびれ上部の断面が細くなる部分で発生した。なお、破断確認後に変位 0 の位置へアクチュエータを戻して試験体を放置したところ、破断面が結合し、上フランジは自立可能であった。

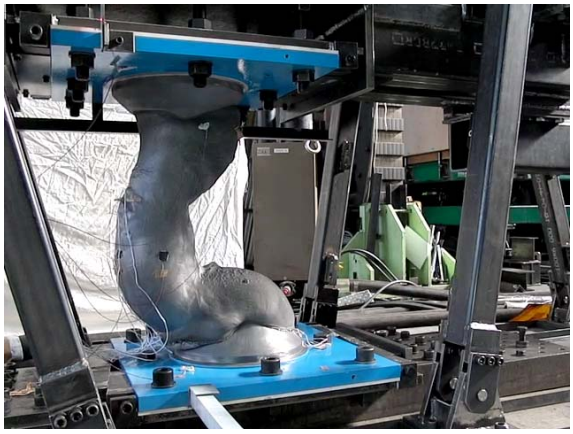
漸増連続基本加振　（試験 No. 1）　試験体状況



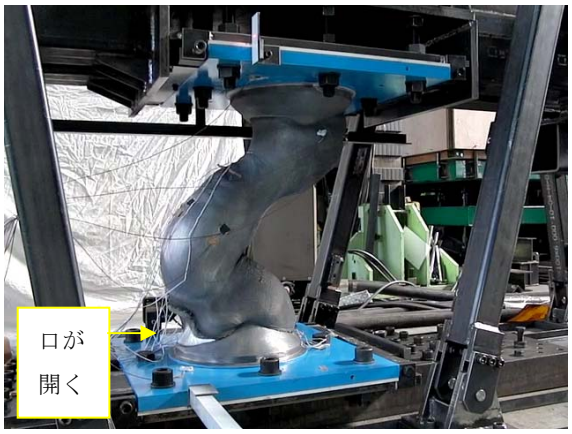
No. 1 試験開始前



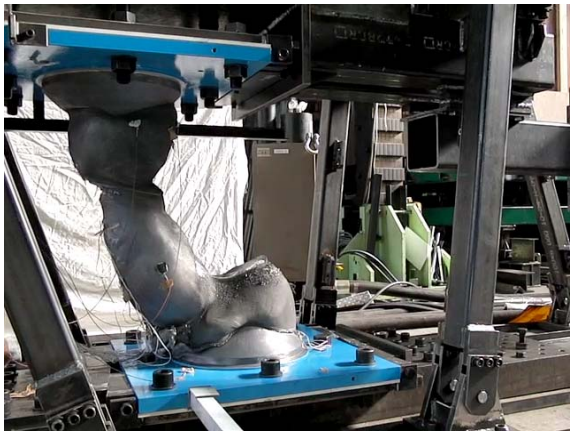
±100㎜　30 サイクル目



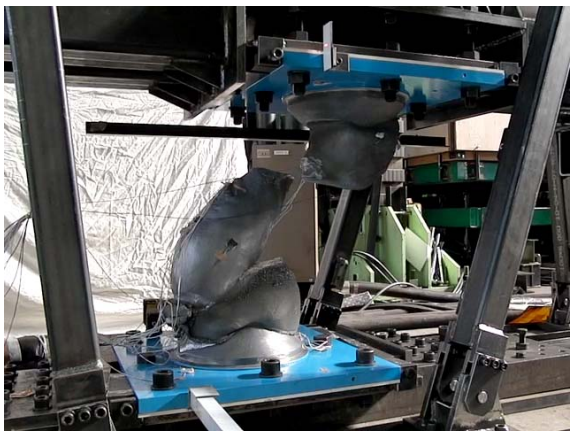
±200㎜　30 サイクル目 変位正側



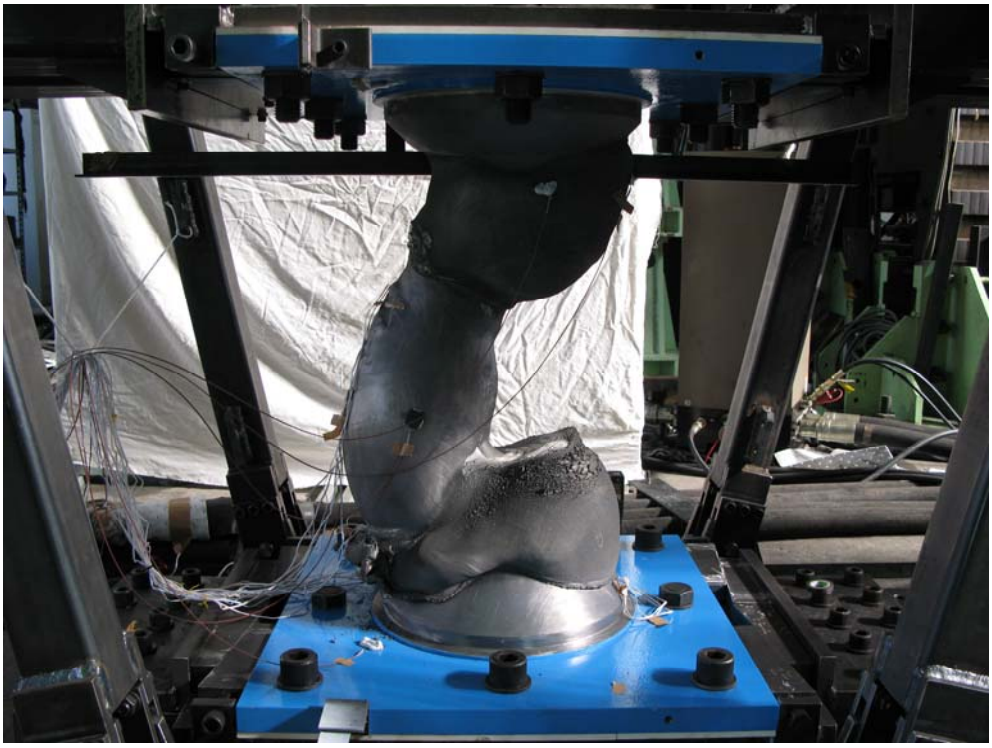
±200㎜　30 サイクル目 変位負側



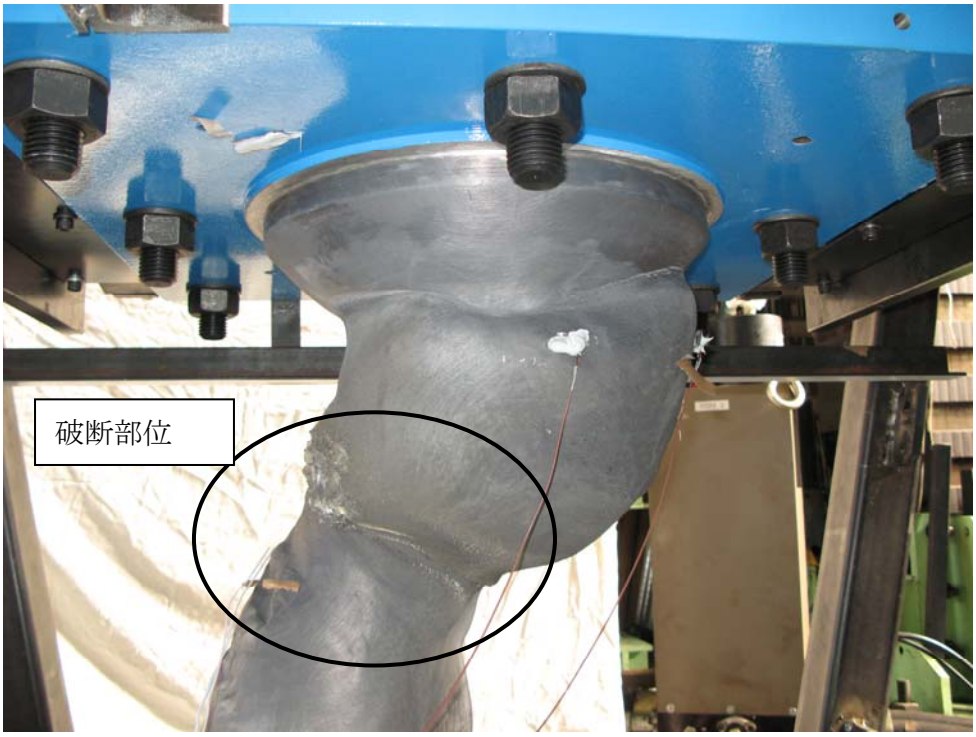
±400㎜　9 サイクル目 変位正側



±400㎜　9 サイクル目 変位負側(破断確認)



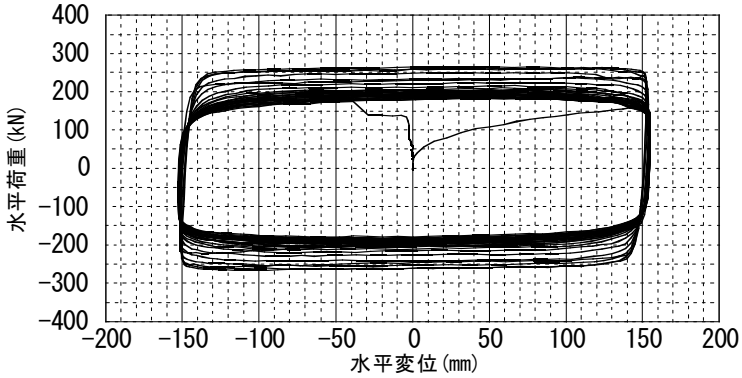
試験体 No. 1　試験後の鉛ダンパー(1)



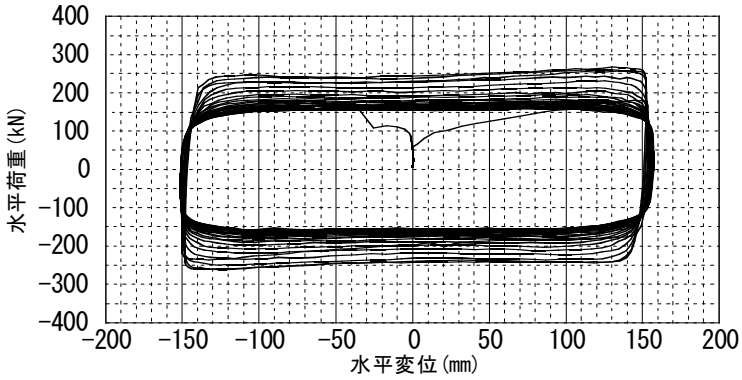
試験体 No. 1　試験後の鉛ダンパー(2)

（３）方向を変えて断続的に加振（試験体２　P 方向→O 方向→P 方向）

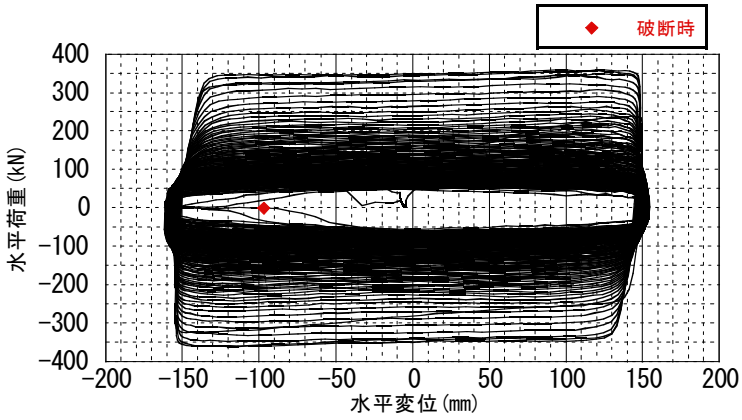
本実験では、P 方向への 2 回目加力時 250 サイクル目（P 方向 1 回目加力とあわせると 280 サイクル）において、試験体上部にて破断を確認した。各加力方向別の水平方向荷重変形関係を図 1.3.7-2.8 に示す。±200mm または±400mm 加振時において確認された変形の正負に対する荷重値の非対称性は各図とも見られなかった。図(a)の P 方向 1 回目の履歴形状と図(b)の O 方向 1 回目の履歴形状をくらべると、図(a)は図(b)に対してやや丸みを帯びた形状となっているものの、大きな違いは確認されず、繰り返しとともに荷重が低減している。P 方向 2 回目の荷重は加力初期に 350kN 程になっており、図(a)、図(b)に対して大きな値となっている。これは、O 方向加力によって、試験体の形状が変化したためであると考えられる。P 方向 2 回目の加力においても、繰り返しにより荷重が低減していく。



(a)　±150㎜ 30 サイクル　P 方向 1 回目　荷重変形関係



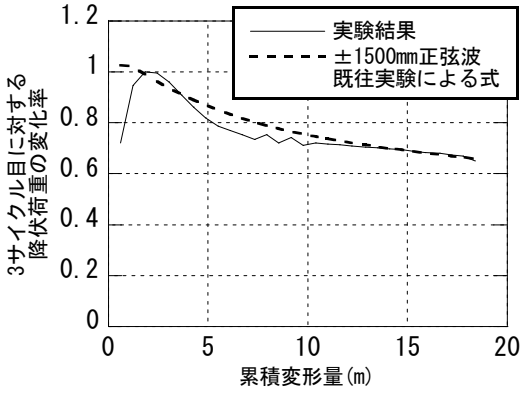
(b)　±150㎜ 30 サイクル　0 方向　荷重変形関係



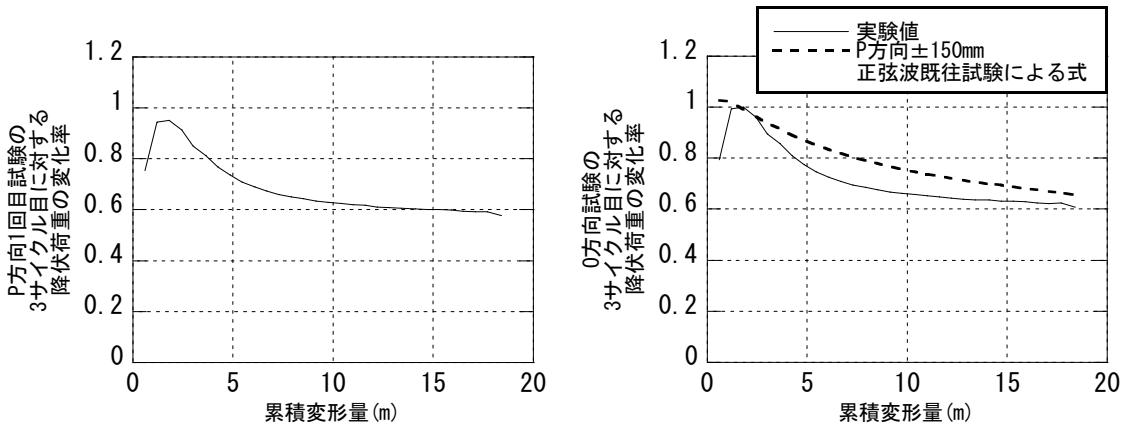
(c) ±150㎜　P 方向２回目　荷重変形関係

図 1.3.7-2.8　方向を変えて断続的に加振　水平方向荷重変形関係

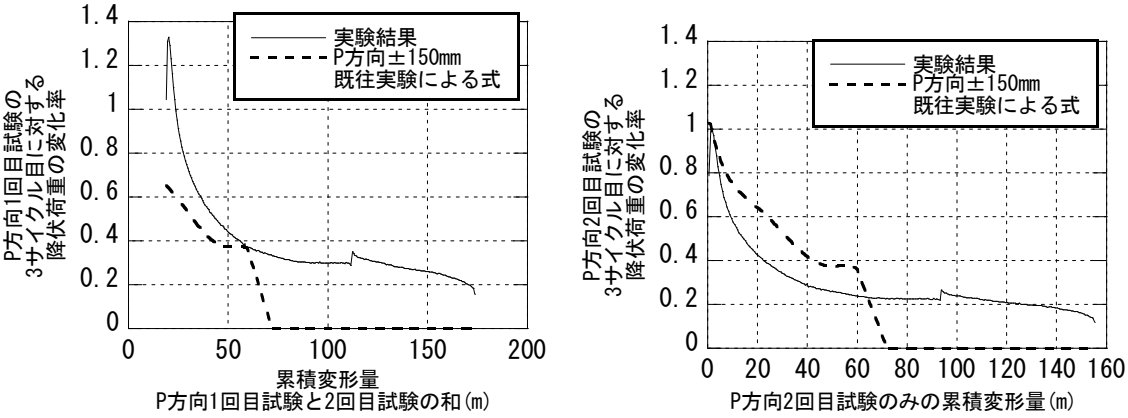
降伏荷重の変化率と累積変形量の関係を図 1.3.7-2.9 に示す。降伏荷重は 1 ループ当りのエネルギー吸収量から式(1.3.7-2)により求めた。図(a)は P 方向 1 回目の 30 サイクルの結果である。既往の±150mm の実験結果から求めた式とよく適合している。O 方向加力時の降伏荷重の低下（図(b)）は、P 方向加力 1 回目とくらべると、その低下傾向はほぼ同様であるものの、同一の累積変形量においてはやや低下度合いが大きい。P 方向の±150mm の既往式と比べても、実験結果はやや下回る値となっている。P 方向 2 回目の降伏荷重は初期において P 方向 1 回目加力の 3 サイクル目にて評価した降伏荷重に対して 1.3 倍程度大きくなっている。その後、累積変形量とともに荷重



(a)　P 方向加力（1 回目）



(b)　O 方向加力



(c)P 方向加力（２回目）

図 1.3.7-2.9　累積変形量と降伏荷重の変化率

は低下し、最終的な荷重値は、P 方向加力 1 回目の 3 サイクル目に対して 0.2 倍、P 方向加力 2 回目の 3 サイクル目に対して 0.12 倍となった。既往実験による累積変形量と変化率の式と P 方向加力 2 回目における降伏荷重の変化率との対応は、P 方向加力 1 回目ほどの対応は得られなかった。

累積変形量と累積吸収エネルギーの関係を図 1.3.7-2.10 に示す。試験体は破断時までエネルギーを吸収している。P 方向 1 回目と O 方向では同様な曲線を描き、P 方向 2 回目はこれらをやや上回った。表 1.3.7-2.2 より破断までの累積変形量は、2 回の P 方向と O 方向をあわせて 192.39m、P 方向のみで 174.03m であった。また累積吸収エネルギーは、2 方向の和で 21887kNm、P 方向のみで 18706kNm となった。

累積損傷度の評価結果を表 1.3.7-2.3 に示す。破断時繰返し数 Ndi は、式(1.3.7-5)より求めた。本実験結果では P 方向のみを考慮した場合の累積損傷度は 1.937 であり、P および Q 方向をともに考慮すると 2.144 となり 1 よりも大きな値となった。漸増連続基本加振において累積損傷度が 1 を下回った結果を踏まえると、加振の連続性も破断に寄与するパラメータとして考えられる。

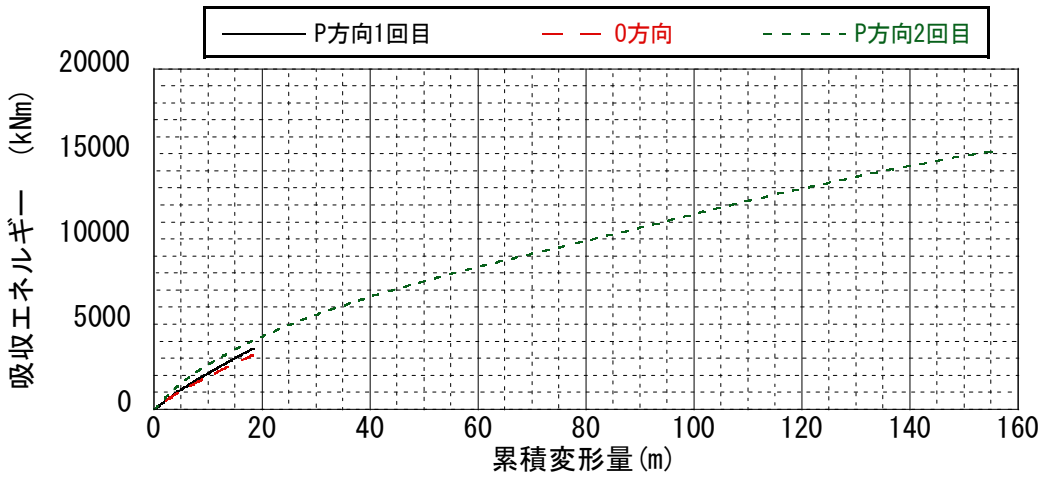


図 1.3.7-2.10　累積変形量と累積吸収エネルギーの関係

表 1.3.7-2.2　方向を変えて断続的に加振　実験結果

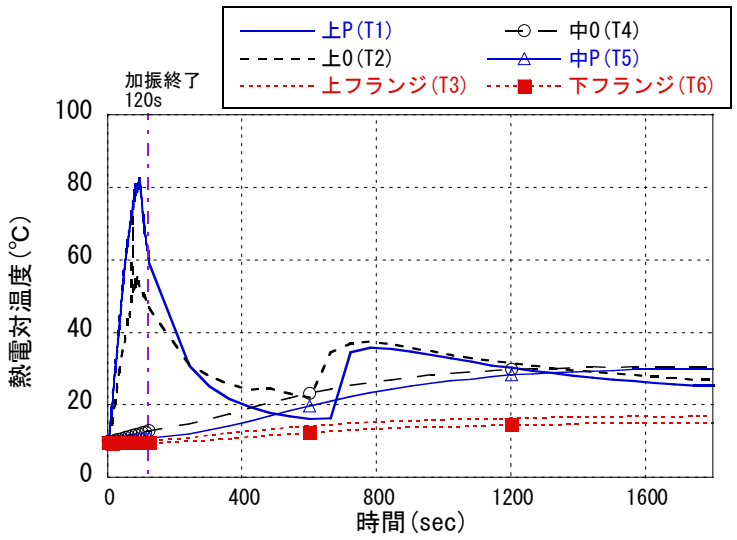
試験条件	振幅/周期	サイクル数	累積変形(m)	吸収 E (kNm)
P 方向 1 回目	150mm/4s	30	18.39	3568
0 方向		30	18.36	3181
P 方向 2 回目		250	155.64	15138
計(P-0-P)		310	192.39	21887
計 (P 2 回分)		280	174.03	18706

表 1.3.7-2.3 累積損傷度

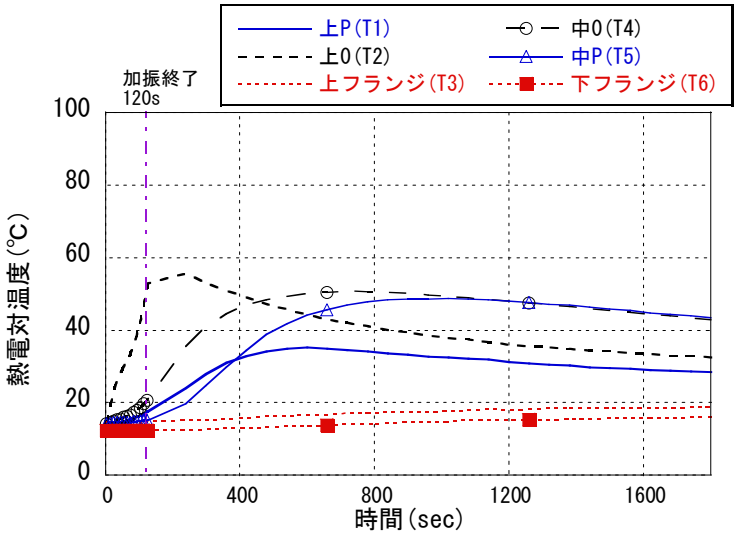
振幅 δ (mm)		破断時 繰り返し回数 Ndi	実験 繰り返し回数 ni	損傷度 ni/Ndi
P 方向	150	144.6	280	1.937
Q 方向	150	144.6	30	0.208
累積損傷度				2.144

熱電対による表面温度計測結果を図 1.3.7-2.11 に示す。P 方向の加力では、試験体上部の T1, T2 の温度が急激に高くなり、続いて中央部の温度がゆっくりと温度上昇する。一方、0 方向加力では、上部の 0 方向(T2)のみ急激に温度が上昇し、上部の P 方向の温度は 0 方向の上部にくらべゆっくり上昇する。いずれの試験結果においてもある程度の時間が経過すると、試験体上部の温度よりも中央部の温度の方が高くなっている。P 方向加力 2 回目では試験体中央部の 0 方向（T4）において 127℃まで温度が上昇している。なお、図(a)の T1, T2 点において 600 秒付近にて温度が上昇しているが、これは 2 点の熱電対受感部と試験体との接触を修正したためである。

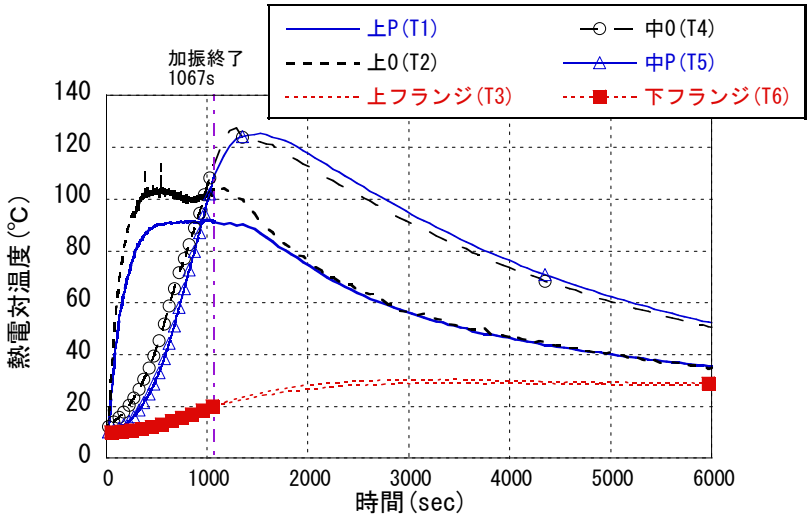
非接触の熱画像センサーによる試験体の温度分布を図 1.3.7-2.12 に示す。温度が高いところは上下に 2 箇所あり、くびれ部と補強部の間で集中的に温度が高くなっていることがわかる。P 方向 2 回目の加振終了時では、温度は 150℃を超える表示となっている。このセンサーは画面内での相対的な温度の高低を捕らえるものである。熱画像センサーは設定する放射率により温度表示が大きく左右される。放射率は、漸増連続基本加振時に接触式熱電対により設定したものの、ここで示す温度の絶対値について精度は高くないことを付け加えておく。



(a)　P 方向加力 1 回目

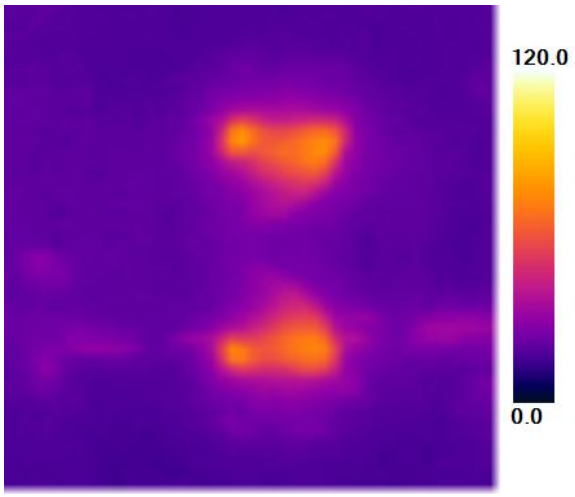


(b)　O 方向加力

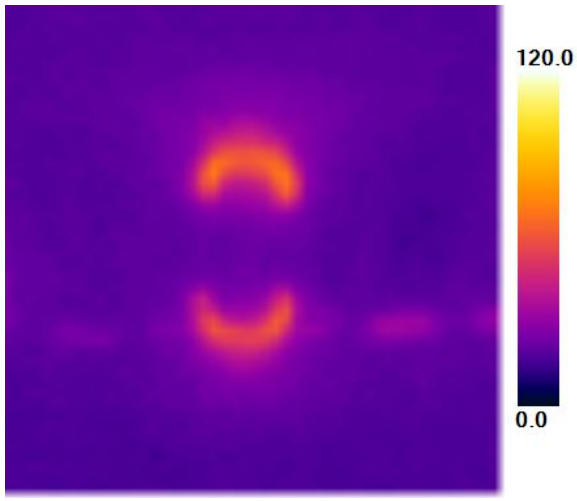


(c)　P 方向加力 2 回目

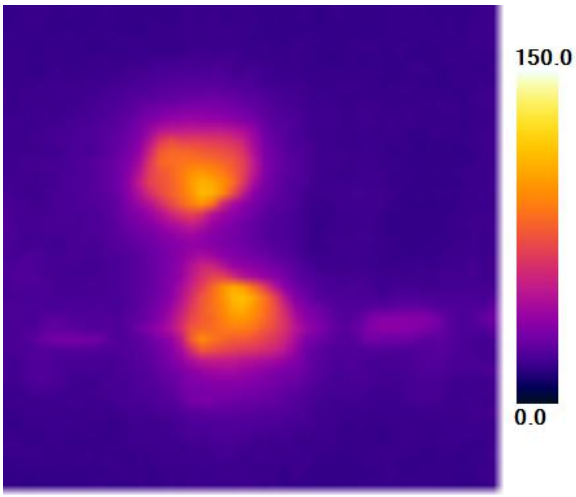
図 1.3.7-2.11　熱電対計測結果



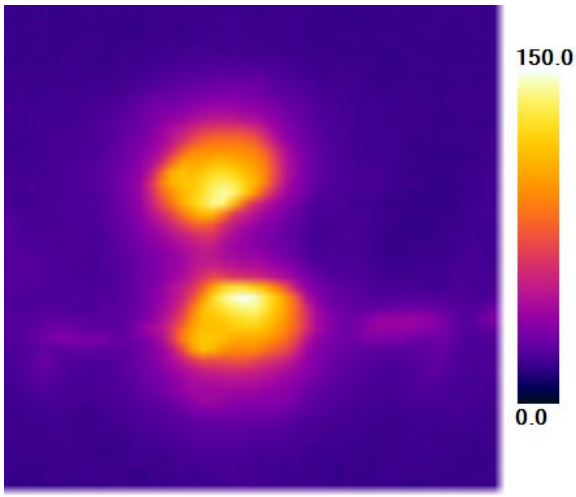
P 方向加力　1 回目　加力終了時



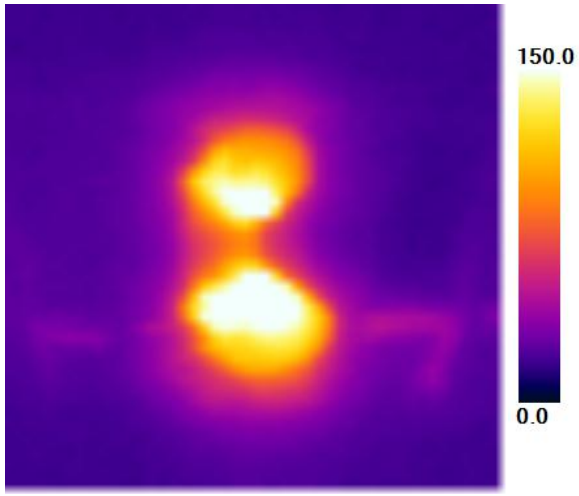
O 方向加力　加力終了時



P 方向加力 2 回目　50 サイクル時



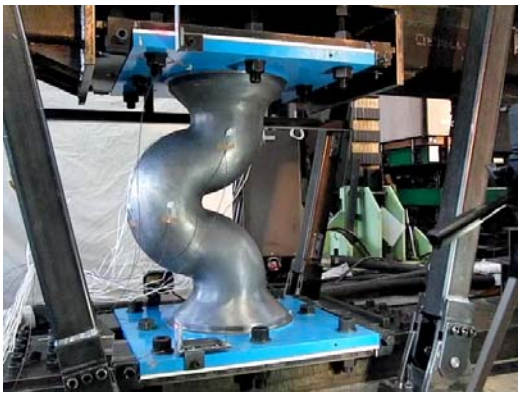
P 方向加力 2 回目　100 サイクル時



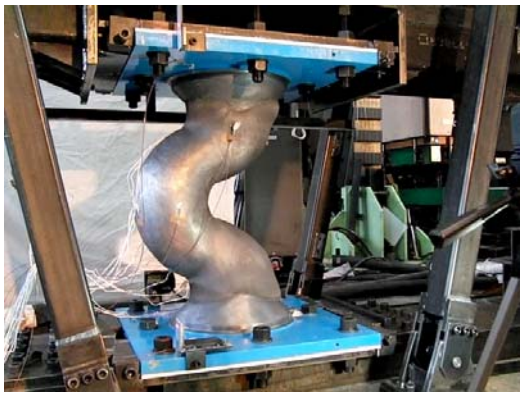
P 方向加力 2 回目　加力終了時

図 1.3.7-2.12　熱画像センサーによる温度分布

試験 No. 2　試験状況　（1）

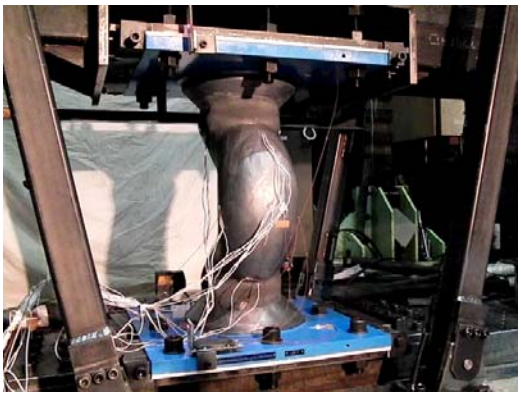


P 方向 1 回目　試験前

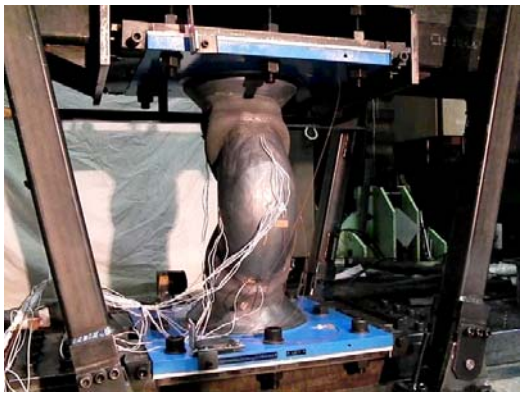


P 方向 1 回目　試験後

P 方向 1 回目　試験後状況



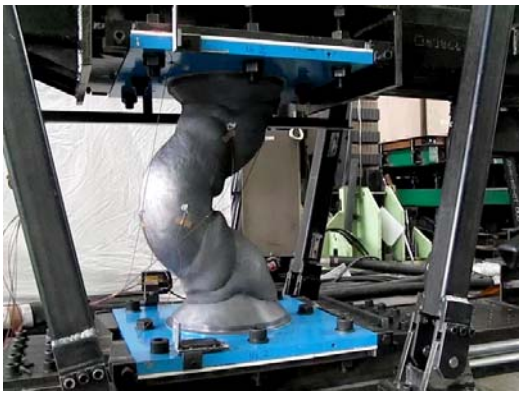
0 方向　試験前



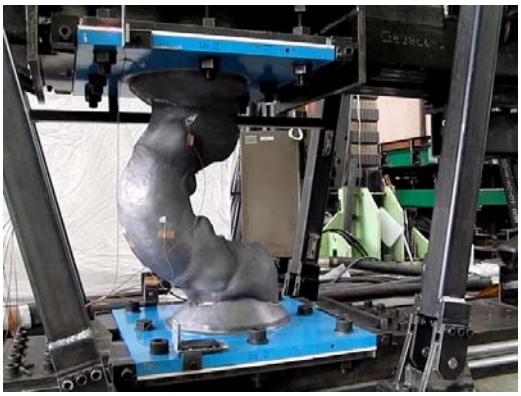
0 方向　試験後

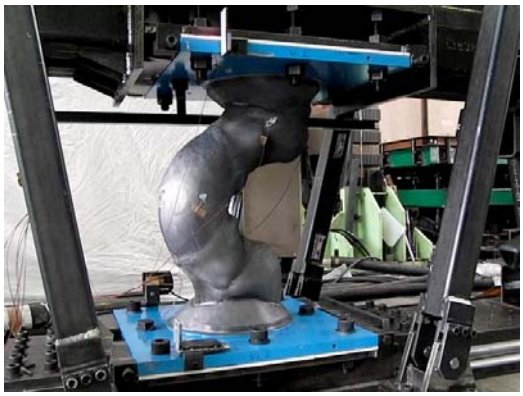
0 方向　試験後　試験体状況

試験 No.2　試験状況　（2）

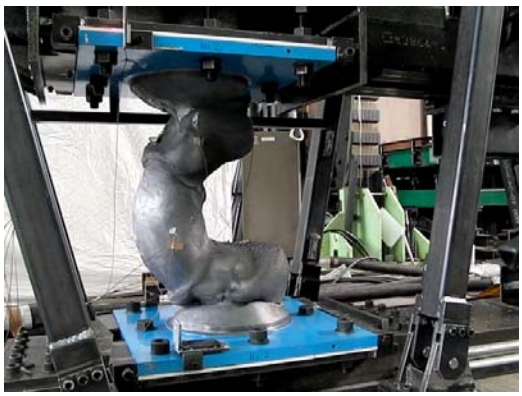


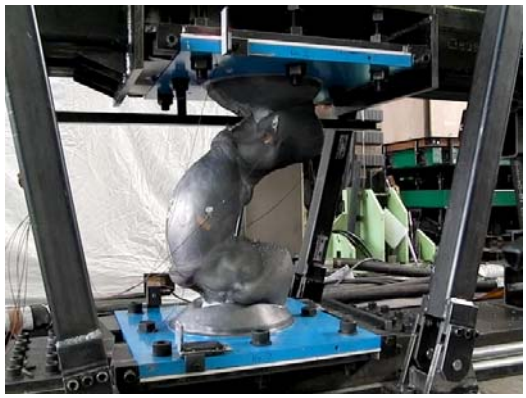
P 方向 2 回目　試験前





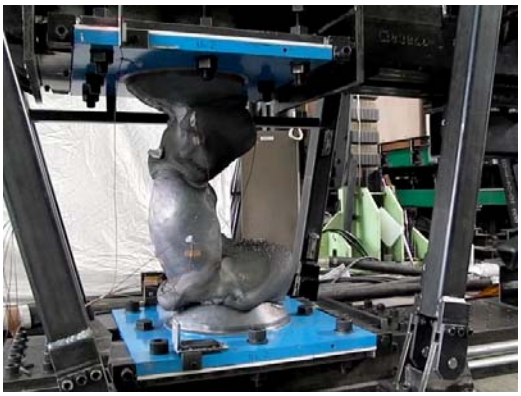
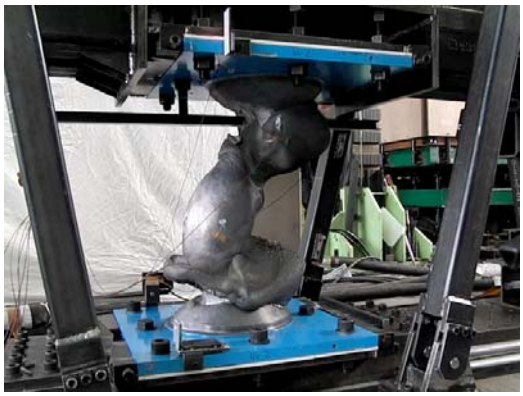
50 サイクル（2 回目試験累積変形　30m）





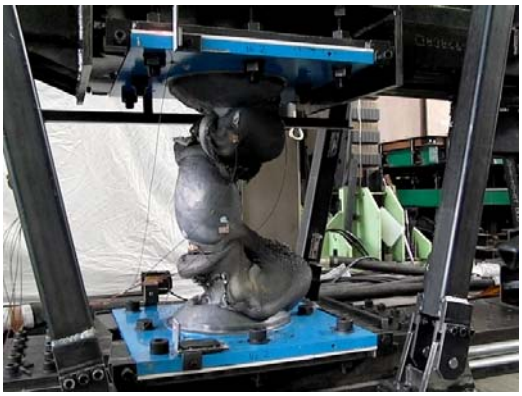
100 サイクル（2 回目試験累積変形　60m）

試験 No.2　試験状況　（3）

150 サイクル　(2 回目試験累積変形　90m)

250 サイクル　(2 回目試験累積変形　150m)



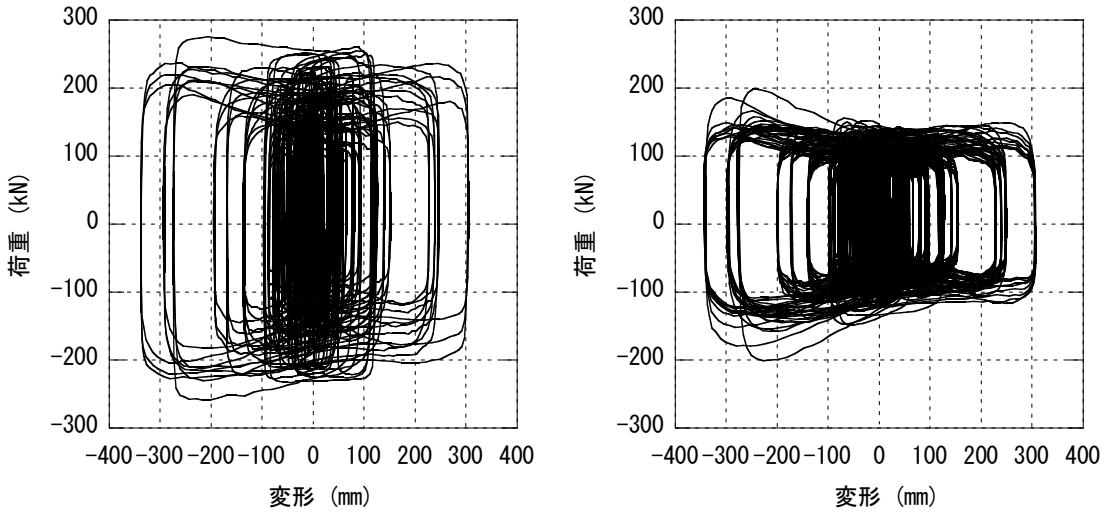
P 方向 2 回目　試験後

（4）地震応答波加振

150 秒間の地震応答波加振を累計 12 回加力した。3 回目と 4 回目の間に約 3 分間のインターバルを除いて、加振は連続して行った。12 回の加振においても、試験体の破断は確認されなかった。試験体の下フランジと試験装置を締結するボルトへ形状変化した鉛が覆いかぶさり、ボルトが外せなくなるおそれがあったため、加力は 12 回で中止された。

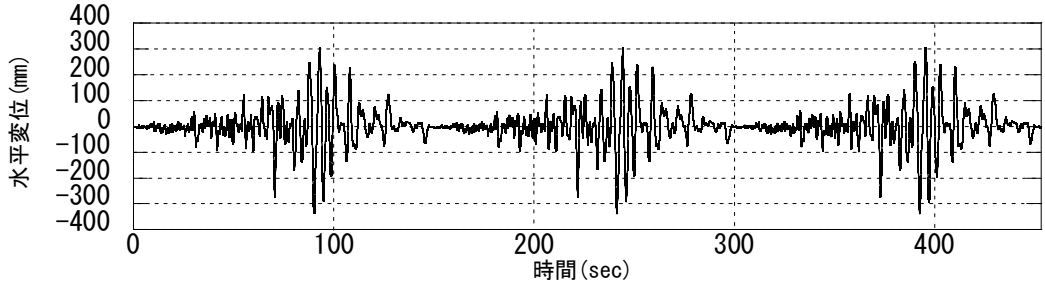
水平方向荷重変形関係を図 1.3.7-2.13 に示す。図(a)の 1～3 回目の荷重は、図(b)の 4～12 回目の荷重値よりも大きな値となっている。前述の試験結果の一部で確認された変形の正負により荷重値が非対称となる傾向がこの試験結果でも見られる。変形が大きい場合、変位が正側、つまり上フランジプレートが試験体のくぼみのある方向へ移動したときに、逆方向へのフランジ移動時に生じる水平力よりも小さくなる傾向がみられる

水平変位および荷重の時刻歴波形を図 1.3.7-2.14 に示す。図(b)より、1 回目の加力における荷重の最大値が最も大きく、2 回、3 回と続くにつれて、荷重の最大値が低減していく。ただし、5 回目以降では、荷重最大値はほぼ一定となっている。図(a)と図(b)より荷重は変形に依存し、変形が小さい場合荷重は小さく、変形が大きくなると荷重は大きくなっている。一般的な鉛ダンパーの復元力特性は完全弾塑性モデルとして表されることが多いが、実験結果は完全弾塑性モデルと異なる傾向を示している。

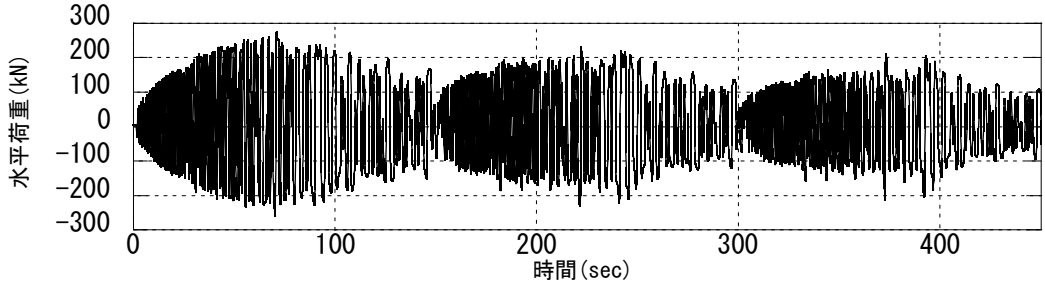


(a) 1～3 回目　　(b) 4～12 回目

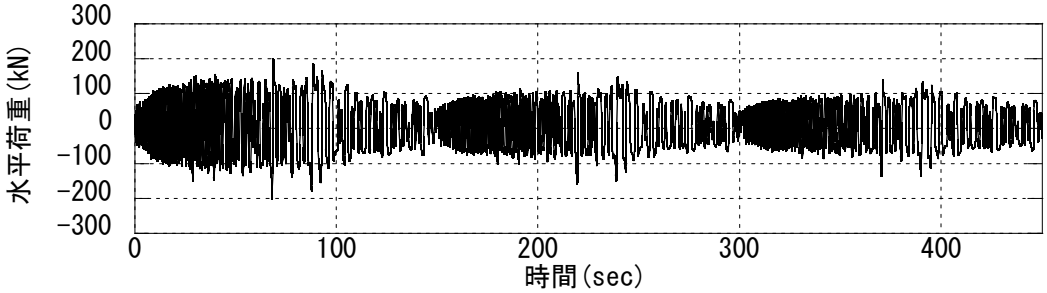
図 1.3.7-2.13　地震応答波加振　荷重変形関係



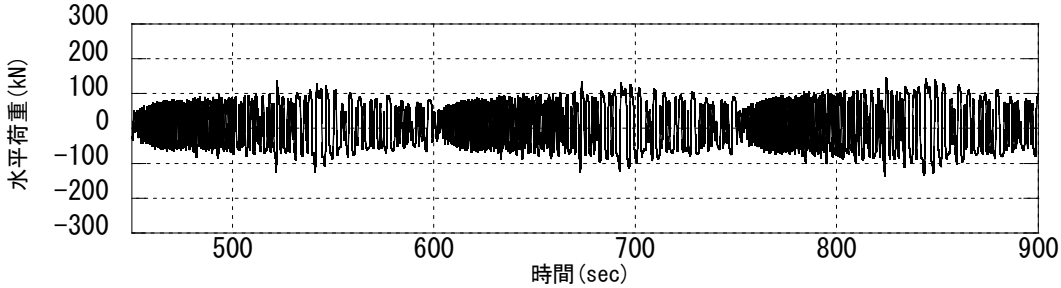
(a)　1～3 回目　水平変位時刻歴



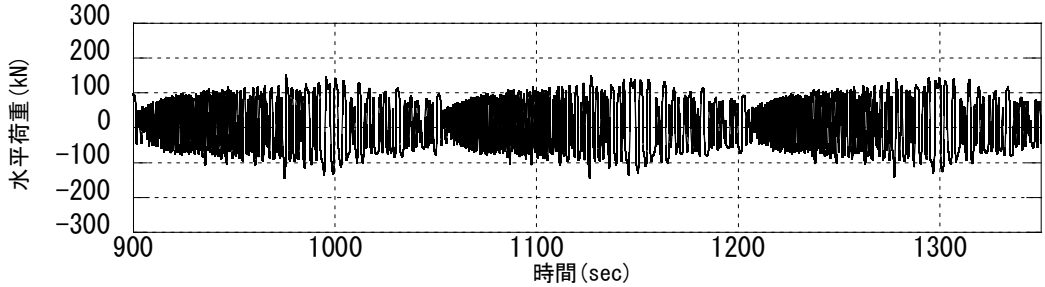
(b)　1～3 回目　水平荷重時刻歴



(c)　4～6 回目　水平荷重時刻歴



(d)　7～9 回目　水平荷重時刻歴



(e)　10～12 回目　水平荷重時刻歴

図 1.3.7-2.14　水平変位および荷重の時刻歴

累積変形量およびエネルギー吸収量を表 1.3.7-2.4 に示す。地震波 1 回当りの累積変形量ΣD は 13.1m であり、12 回目の加振終了時において 162.9m であった。試験体は計 17755kNm のエネルギーを吸収しており、加振が進むにつれ形状が変化したが、継続的にエネルギーを吸収できていることがわかる。また、地震波 1 回当りのエネルギー吸収量 W は、6 回目の地震波加振時が最小となり、1 回目のエネルギー吸収量に対して 44%となった。最終回の吸収エネルギーは 1 回目の地震波に対して 54%であり、6 回目のエネルギー吸収量よりも大きい。

熱電対にて計測された表面温度を図 1.3.7-2.15 に示す。初期温度は各点とも 10℃であった。加振初期では、試験体上部の温度が急激に上昇し、P 方向では 2 回目の加振時に 100℃近くに達した。試験体中央部では徐々に温度が上昇し、全加振終了時には中央部 O 方向の熱電対で 150℃を計測した。上下のフランジも温度が徐々に上昇し、全加振終了時には上フランジ 24℃、下フランジ 25℃となった。

表 1.3.7-2.4　累積変形量、累積吸収エネルギー(ΣW)
および地震波 1 回に吸収するエネルギーと 1 回目に対する変化率

回数	ΣD(m)	ΣW(kNm)	W(kNm)	W/W(1 回目)
1	13.1	2494	2494	1.000
2	26.3	4623	2129	0.853
3	39.8	6366	1743	0.699
4	53.4	7883	1517	0.608
5	67.0	9070	1187	0.476
6	80.7	10158	1088	0.436
7	94.4	11249	1091	0.437
8	108.2	12416	1167	0.468
9	121.9	13698	1281	0.514
10	135.6	15047	1349	0.541
11	149.2	16403	1357	0.544
12	162.9	17755	1352	0.542

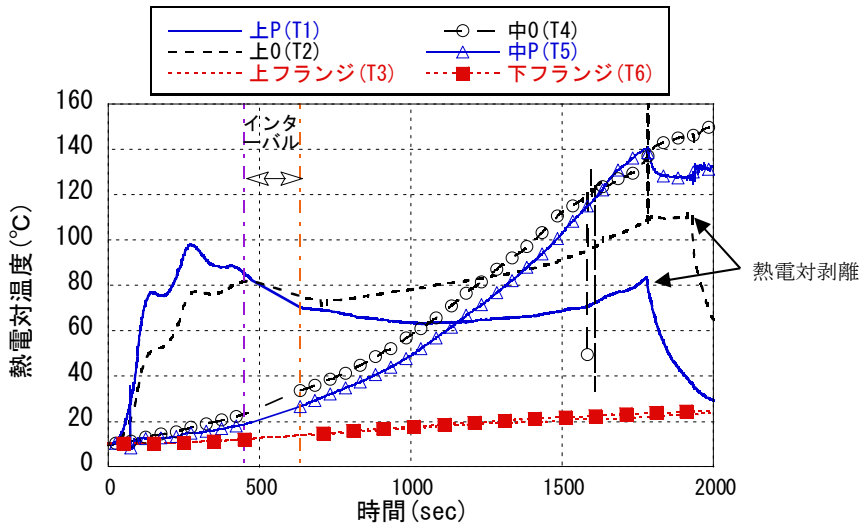
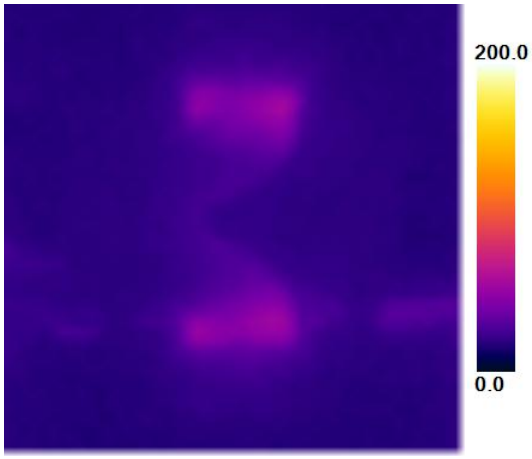
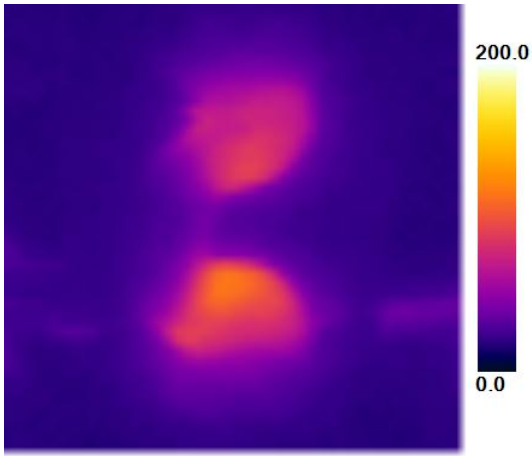


図 1.3.7-2.15　地震応答波加振時　熱電対計測結果

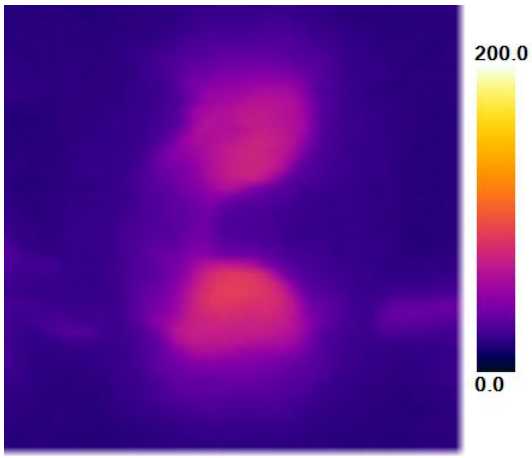
熱温度センサーによる表面温度分布を図 1.3.7-2.16 に示す。3 回目の加振終了時および 4 回目の加振開始時においては、鉛中央のくびれ部と上下の拡幅部の間が高温となっている。加振とともに高温部となる領域が増え、12 回目の加振終了時には高温部が試験体全体に広がっている。



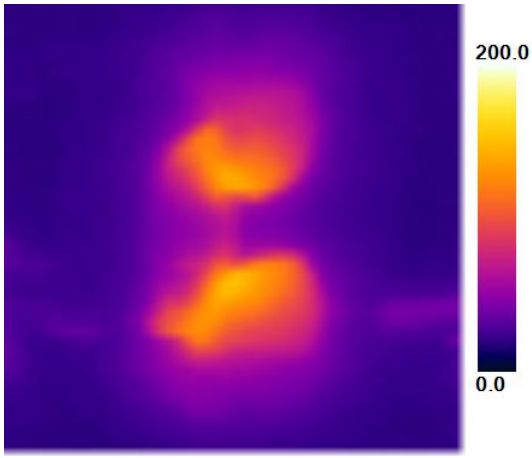
地震応答波加振　1 回目終了時



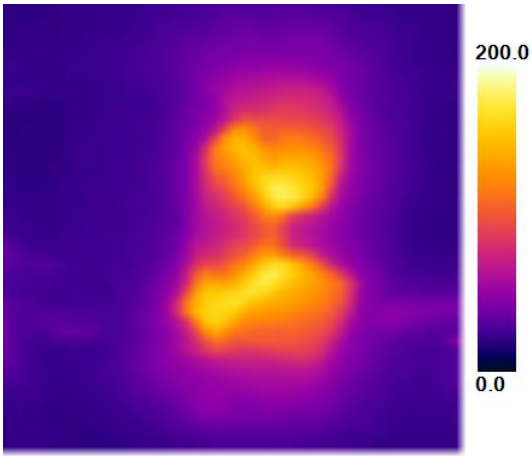
地震応答波加振　3 回目終了時



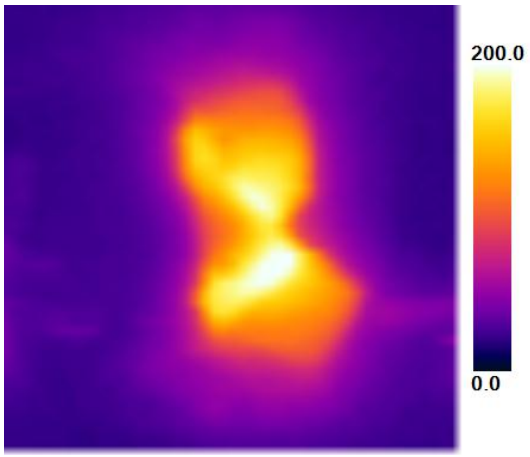
地震応答波加振　4 回目開始時



地震応答波加振　6 回目終了時



地震応答波加振　9 回目終了時



地震応答波加振　12 回目終了時

図 1.3.7-2.16　熱画像センサーによる温度分布

累積損傷度の評価に際して、地震応答波加振 12 回の全水平変形波形に対してレインフロー法[1.3.7-6)]を用い各振幅のサイクル数を算出した。振幅の階級と階級の間隔は 10mm とした。サイクル数の分布を図 1.3.7-2.17 に示す。ここで示す振幅は片振幅（0-p）である。累積損傷度評価結果を表 1.3.7-2.5 に示す。0mm～10mm における振幅については、非常に微小な振動もカウントされている可能性があるため、累積損傷度評価に際しては、検討から除外している。12 回全体の累積損傷度は 1.59 となり、Miner 則では破断限界とみなす 1 よりも実験結果は上回った。なお、今回採用した地震応答波変位の 1 回当りの累積損傷度は、1.59/12＝0.133 となる。

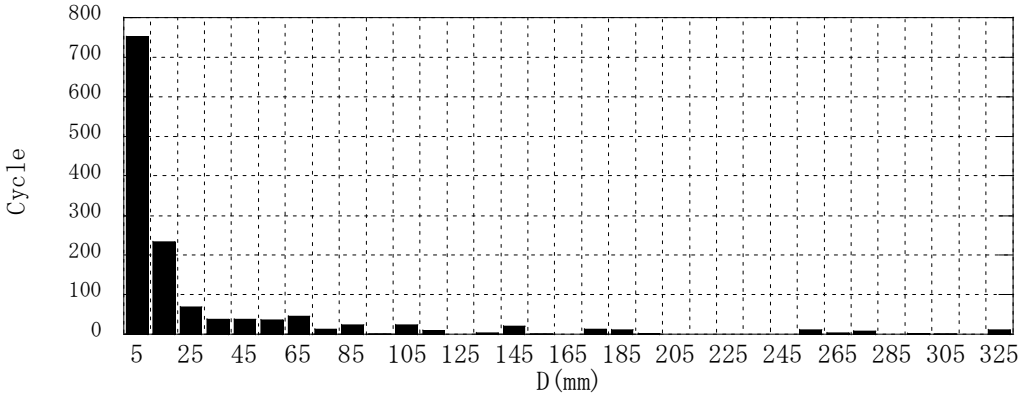


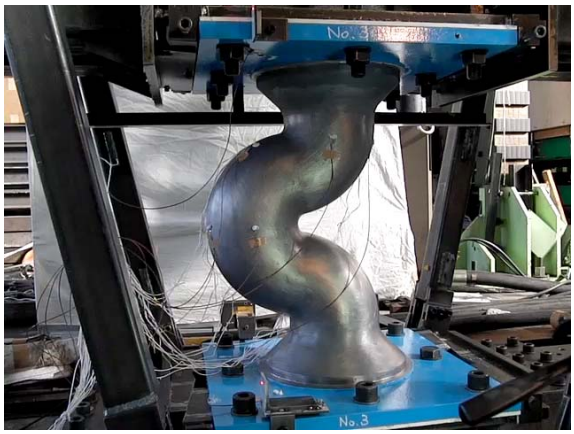
図 1.3.7-2.17　地震応答波加振　レインフロー法による振幅頻度分布

表 1.3.7-2.5　地震応答波加振　累積損傷度評価

変形(mm)	cycle_1	cycle_2	total_cycle	Ndi	ni/Ndi
15	54.5	178.5	233	7944	0.0293
25	12.5	56.5	69	3266	0.0211
35	13.5	23.5	37	1819	0.0203
45	6.5	31.5	38	1175	0.0324
55	9	27	36	828	0.0435
65	11	35	46	619	0.0743
75	2.5	9.5	12	483	0.0249
85	6	18	24	388	0.0618
95	0.5	0.5	1	320	0.0031
105	7	17.5	24.5	269	0.0911
115	1	8.5	9.5	230	0.0414
125	0	0	0	199	0.0000
135	3	0	3	174	0.0173
145	3	18	21	153	0.1369
155	0.5	0.5	1	137	0.0073
165	0	0	0	122	0.0000
175	3	9	12	111	0.1085
185	3	8.5	11.5	100	0.1146
195	0.5	1	1.5	92	0.0164
205	0	0	0	84	0.0000
215	0	0	0	77	0.0000
225	0	0	0	71	0.0000
235	0	0	0	66	0.0000
245	0	0	0	62	0.0000
255	2.5	8	10.5	57	0.1829
265	2.5	1	3.5	54	0.0652
275	0	8	8	50	0.1589
285	0	0	0	47	0.0000
295	1	0.5	1.5	45	0.01.3.7
305	0	0.5	0.5	42	0.0119
315	0	0	0	40	0.0000
325	2.5	8.5	11	38	0.2922

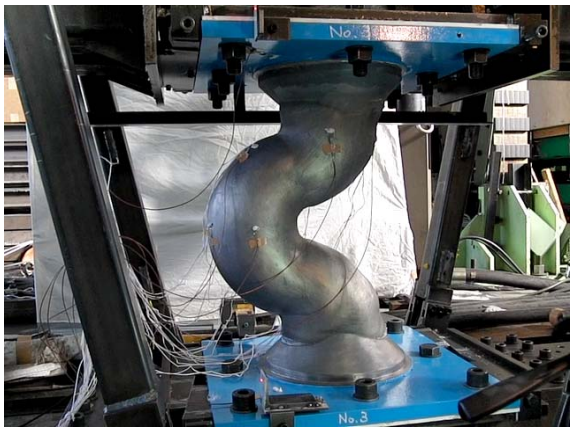
Σni/Ndi	1.59

試験 No.3　試験状況　（1）

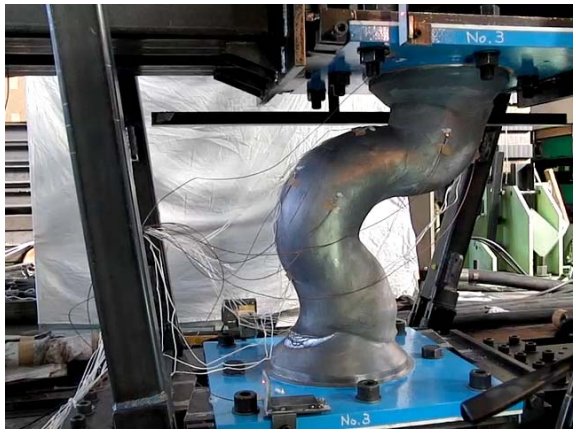


試験開始前

地震波 1 回目　最大変形時



地震波 2 回目　開始前

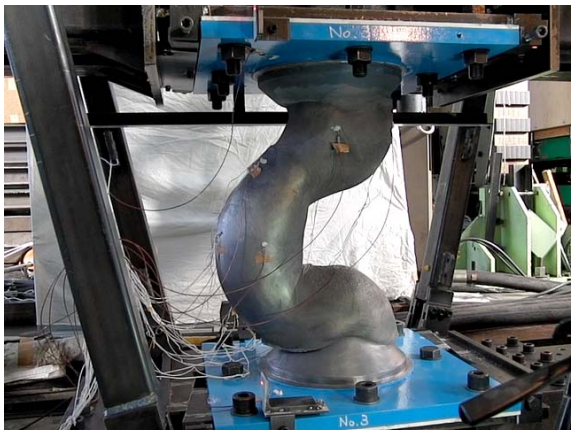


地震波 2 回目　最大変形時

地震波 3 回目　開始前

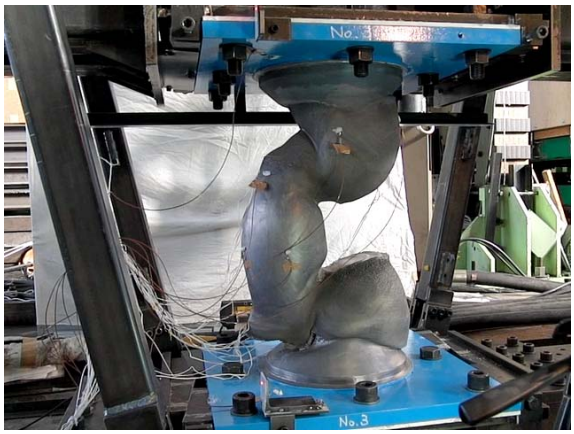
地震波 3 回目　最大変形時

試験 No.3　試験状況　（2）



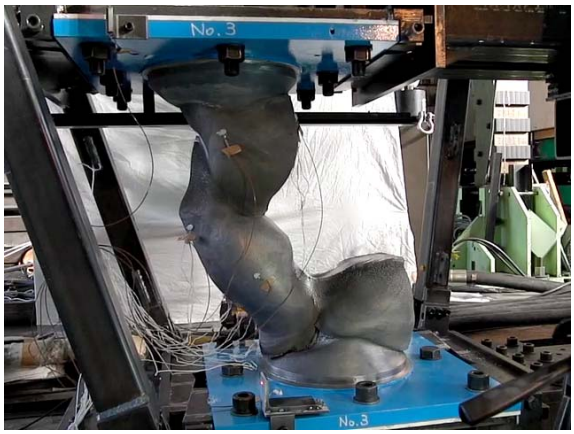
地震波 4 回目　開始前

地震波 4 回目　最大変形時

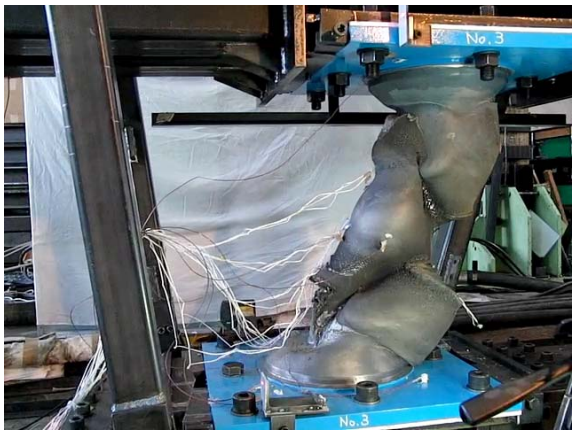


地震波 6 回目　終了時

地震波 7 回目　最大変形時

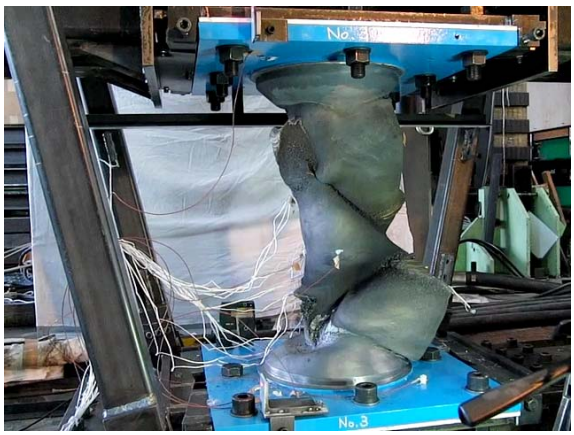


地震波 7 回目　変形時

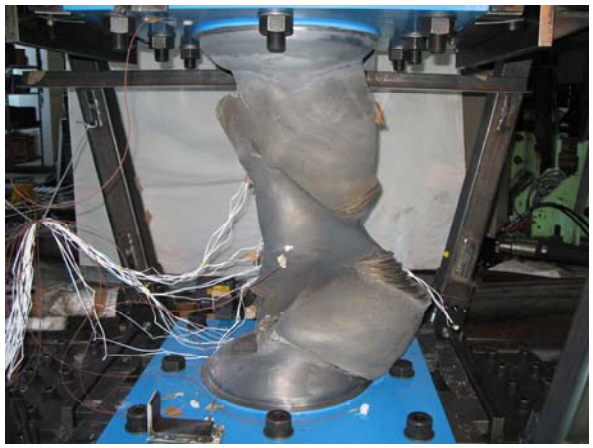


地震波 12 回目　最大変形時

試験 No.3　試験状況　（3）



試験終了後（1）



試験終了後（2）

試験終了後（3）

試験終了後（4）

1.3.7.3 まとめと課題

免震用鉛ダンパーの繰返しに対する性能を確認するために、実大試験体による多数回繰返し試験を実施した。試験は、ダンパー中央部にあるくびれと平行な向きである P 方向に対して±100㎜、±200㎜および±400㎜の漸増正弦波加振、同一試験体に対して加振方向を P 方向、P 方向と直交する 0 方向、P 方向と順に変えた±150㎜の繰返し正弦波加振、および地震応答波加振を実施した。これより以下の事項が確認された

（1）降伏荷重

一定振幅時では繰返しにより降伏荷重は低下する傾向を示した。ただし、0 方向を加力した後の P 方向の加力時のように、荷重が初期の値よりも大きくなる場合もあることが確認された。この場合は、繰返しによる鉛の形状変化に起因するものと考えられる。P 方向の変形が±200㎜以上となる繰返し加振時では、変形の向きにより荷重値が異なる現象が確認された。この現象も鉛の形状変化に起因するものと考えられる。これらより繰り返しによる水平荷重は、発熱のための温度変化および鉛の形状変化により変化する。また、荷重は振幅依存性があり、変位が大きくなるに応じて荷重値も増大する現象が確認された。

（2）破断特性

漸増正弦波加振および方向を変えた繰り返し正弦波加振では、破断まで試験を実施した。破断部位はいずれも試験体のくびれの上部であった。単一振幅における正弦波加振試験に基づいた振幅と破断までの繰返し回数に基づき、各試験について累積損傷度の検討を行った。漸増正弦波加振において破断時の累積損傷度は 0.788 となり、方向を変えた断続的な加振時の累積損傷度は 1.9 を超える値となった。これより、破断に影響を及ぼすパラメータとして、加振の連続性ならびに加力方向が考えられる。

（3）温度分布

繰返し加振とともにダンパー中央のくびれ部と拡幅部との間が集中的に温度上昇することがわかった。また中央にあるくびれ部は、繰返し加振当初の温度上昇はわずかであるが、時間の経過とともに温度が上昇し高温となる。フランジプレートも時間の経過とともに温度が上昇するが、その上昇度合いは鉛のくびれ部位ほど高くならなかった。

本試験結果をふまえ、長周期地震動における応答評価に向けた復元力特性の検討が今後の課題である。

参考文献

1.3.7-1) 高山峯夫ほか:鉛ダンパーの取り付け部に作用する軸力と曲げモーメントに関する研究、日本建築学会九州支部研究報告, 第 45 号, pp. 509-512、2006.3

1.3.7-2) 日本建築センターほか:免震部材のエネルギー吸収性能評価に関する現状と課題 報告書, pp.4-26、2007.3

1.3.7-3) 清水建設ほか：平成 21 年度国土交通省建築基準整備促進補助金事業「12. 免震建築物の基準の整備に資する検討」報告書、pp.4.1-112、2010.3

1.3.7-4) 日本免震構造協会編：第４回技術報告会概要集、pp.39、2006.11

1.3.7-5) 日本免震構造協会編：第５回技術報告会概要集、pp.7-10, 2009.4

1.3.7-6) 遠藤達雄ほか：「Rain Flow Method」の提案とその応用、九州工業大学研究報告（工学)、No.28、pp.33-62

1.3.8　オイルダンパー

1.3.8.1　実験計画

(1) 実験目的と背景

免震構造用オイルダンパーの長振幅繰り返し加振試験を実大試験体により実施し、長周期地震動を想定した多数回繰り返し加振に対するエネルギー吸収性能の把握を目的とする。

オイルダンパーは、温度上昇や繰り返し回数に対して、エネルギー吸収性能の変化が小さいことが知られている。車両用オイルダンパーの繰り返し加振実験においては、オイルダンパーの外壁温度が 100℃以上になるとシール部から作動油の滲みだし免震建築物生じた例があるが、タンク室の油量に余裕があるため、滲みだしが生じても直ちにエネルギー吸収性能が低下することがないという知見が得られている。そこで、免震用オイルダンパーについて、第Ⅱ部第 1 章で提案された長周期地震動を想定したエネルギー吸収性能評価のための試験方法に基づき、油温温度で 100℃程度までの繰り返し加振実験を実施し、温度上昇に伴うエネルギー吸収性能の変化や作動油の滲みだし（限界状態）の発生の有無を確認する。

(2) 試験日時および場所

試験日時：（平成 22 年 12 月 14 日～平成 23 年 1 月 25 日）

試験体 1：12 月 18 日（長周期 2A）、12 月 24 日（限界 2B）、1 月 21 日（公開実験 限界 2B）

試験体 2： 1 月 22 日（限界 2B）

試験体 3：12 月 18 日（限界 2B）

場所：日立オートモティブシステムズ（株）相模事業所

(3) 試験体

日立オートモティブシステムズ（株）製の免震構造用オイルダンパー（最大減衰力 1000kN タイプ、オイルシール：フッ素系樹脂）3 体を試験体として用いた。オイルダンパー試験体の諸元を表 1.3.8-1 に、オイルダンパーの形状及び寸法を図 1.3.8-1 に示す。試験体 1 は、近年最も多く採用されている容量および特性を持つオイルダンパー（形式 BM250-4C 型：最大減衰力 1000kN、ストローク±700mm、速度-減衰力：バイリニア型）で、本実験における基準体として位置づけた。また、基準体に対して減衰係数を上下に振った試験体を各 1 体製作した。試験体 2（減衰係数小）は、速度-減衰力：リニア型の認定品（形式 BM250-6C）に相当し、試験体 3（減衰係数大）は、1 次減衰係数を試験体 1（基準体）の 1.5 倍に設定した特注仕様品である。

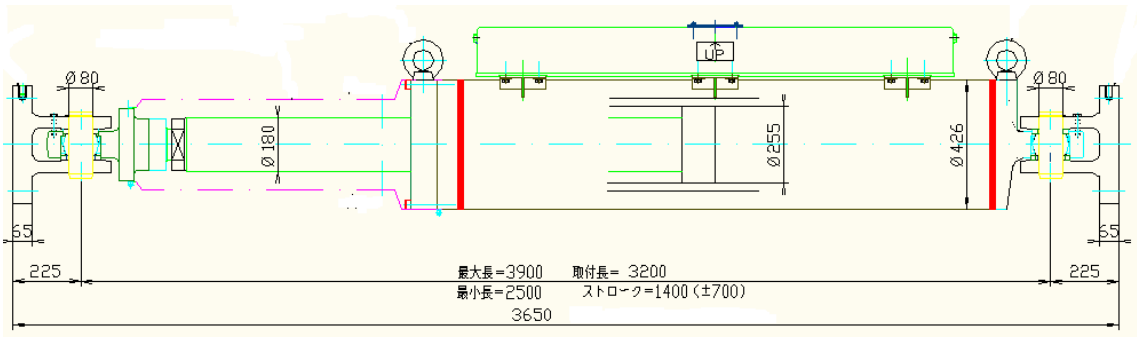


図 1.3.8-1 オイルダンパー形状寸法

表 1.3.8-1 試験体特性

	試験体 1 基準体 (大臣認定品)	試験体 2 減衰係数小 (大臣認定品)	試験体 3 減衰係数大
オイルダンパー形式	BM250-4C	BM250-6C	BM250-特注
減衰力タイプ	バイリニア	リニア	バイリニア
1 次減衰係数(C1)　MN･s/m	2.50	0.80	3.75
2 次減衰係数(C2)　MN･s/m	0.1695	－	0.1695
リリーフ速度　m/s	0.320	－	0.208
リリーフ減衰力　kN	800	－	780
最大速度　m/s	1.50	1.25	1.51
最大減衰力　kN	1000	1000	1000
ストローク　mm	±700	±700	±700

(4) 試験装置

2000kN動的試験機を用いた。試験機諸元を表 1.3.8-2 に、試験機構成を図 1.3.8-2 に示す。

表 1.3.8-2 試験機諸元

No.	項　目	仕　様
1	最大出力(動的)	±2000kN
2	最大変位	±450mm
3	最大速度	150cm/s(但し 1000kN 時は 100cm/s)
4	※連続加振可能回数 (周期 4 秒の正弦波加振の場合)	加振変位　±10cm 時　15 回 ±20cm 時　6 回 ±40cm 時　2 回
5	駆動方式	電気油圧ｻｰﾎﾞ方式
6	加振周波数	0.01～30.0Hz

※ 試験機は、アキュムレータに油圧エネルギーを蓄圧して、その蓄圧エネルギーによって試験を駆動させるものであり、加振力・加振周波数・加振速度と蓄圧エネルギーの関係から連続加振回数に制限がある。よって多数回の加振には、蓄圧によるインターバルが必要である。

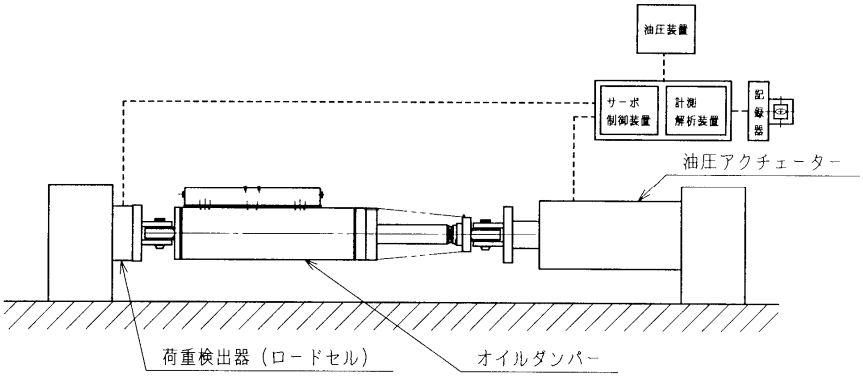


図 1.3.8-2 オイルダンパー形状寸法

(5) 計測項目と計測方法

計測項目を以下に示す。ダンパー減衰力、ダンパー変位、ダンパー各部の温度および室温を計測した。ダンパー減衰力は試験機内に組み込まれたロードセルで計測し、ダンパー変位はアクチュエータのストロークを変位計で計測した。また、ダンパー各部の温度及び室温は K 型熱電対を用いて計測した。温度計測点の位置と熱電対の設置状況を図 1.3.8-3、写真 1.3.8-1 および 1.3.8-2 に示す。油温は、試験体上部のリザーバータンク上面孔から熱電対をタンク内部に挿入して計測した。なお、データ収録のサンプリングは、100 回/秒（サンプリング周期 0.01 秒）とした。

計測項目

(1) ダンパー減衰力

(2) ダンパー変位

(3) 温　度　：タンク内油温，本体（ベースシェル）中央上部表面、本体中央下部表面、ロッド端部表面、ベースシェル端部表面（図 1.3.8-3 参照）

(4) 室　温(雰囲気温度)

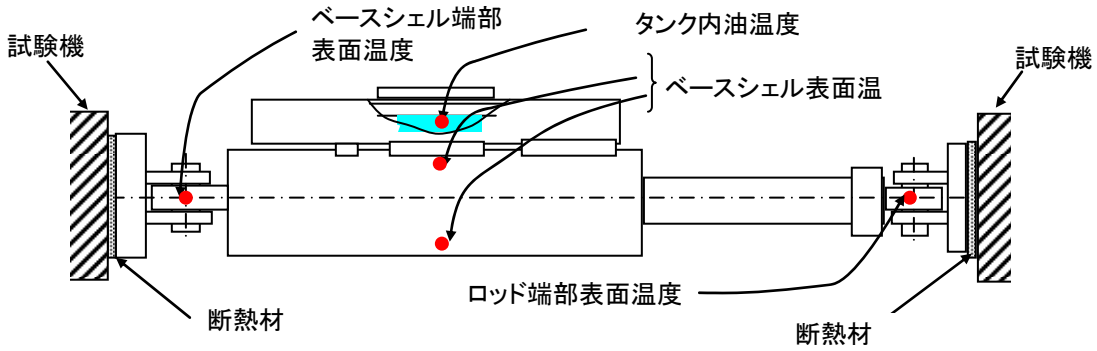


図 1.3.8-3 温度計測点の位置

写真 1.3.8-1 熱電対のセット状況

写真 1.3.8-2 油温計測用熱電対のセット状況

(6) 試験方法および試験ケース

試験項目は、以下に示す出荷検査としての基本特性試験（基本特性 A)、加振周期特性試験（基本特性 B)、微少振幅加振試験、多数回繰り返し加振試験（長周期 2A、限界 2B）及び地震応答波加振試験の 6 項目である。試験条件の詳細は次頁の a)～f)に記す。多数回繰り返し加振試験は、正弦波（周期 4 秒）の連続加振とすることが目標であるが、試験機の連続加振能力の制約（振幅±20cm の場合で 6 サイクル）から、正弦波 6 サイクル毎にアキュムレータ蓄圧のためのインターバル（所用時間約 5 分）を設けた。その結果、長周期 2A（累積変形 50m）条件では、6 サイクル×11 セット（インターバル 10 回)、限界 B 条件（累積変形 100m）では 6 サイクル×21 セット（インターバル 20 回）の加振を実施した。なお、試験機の正弦波は、図 1.3.8-4 に示すように、駆動開始後、逐次変位量を増加させ所定の変位振幅で所定サイクル数駆動し、その後逐次変位量を減少させて停止する波形となるため、所定変位振幅部で加振サイクル数をカウントし、所定変位振幅部の累積変形量が 50m および 100m を超えるよう計画した。漸増・漸減部を含めた累積変形量は長周期 2A 加振で 79.2m、限界 2B 加振で 151.2m である。

また、多数回繰り返し加振試験直後にも出荷検査としての基本特性試験（基本特性 A）を実施し、初期性能に対する最大減衰力およびエネルギー吸収量の変化状況を確認した。更に、試験体 1 については、冷却後においても基本特性試験（基本特性 A）を実施した。なお、ダンパーは、高温用断熱板（ｔ＝10mm，日本 D.M.E 製）を介して試験機に取り付けた。表 1.3.8-8 に試験ケース一覧を示す。

試験項目

a) 長周期加振条件（±20cm、累積変形 50m）による多数回繰り返し加振試験（長周期 2A）
[試験体 1]
b) 限界加振条件（±20cm、累積変形 100m）による多数回繰り返し加振試験（限界 2B）
[試験体 1、試験体 2、試験体 3]
c) 出荷検査としての基本特性試験（基本特性 A） [試験体 1、試験体 2、試験体 3]
d) 加振周期特性試験（基本特性 B） [試験体 1、試験体 2、試験体 3]
e) 地震応答波加振試験 [試験体 1]
f) 微小振幅加振試験 [試験体 1]

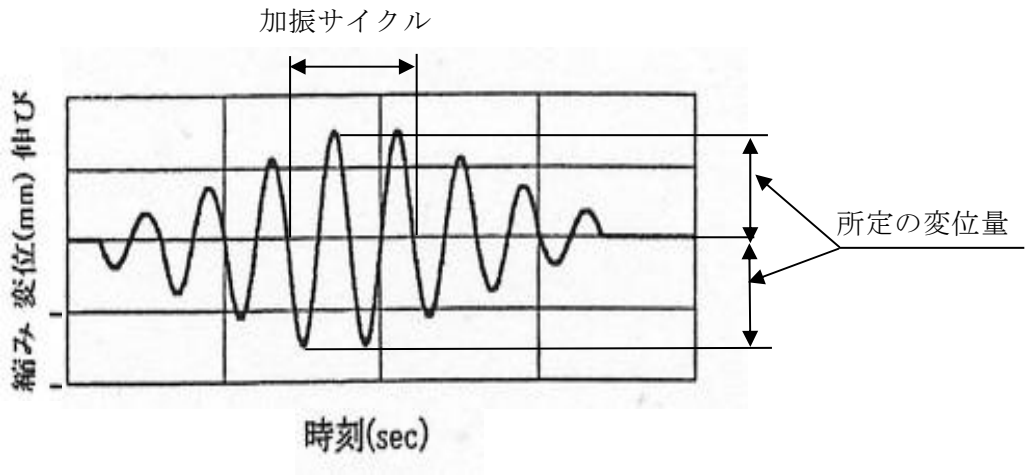


図 1.3.8-4 試験機の正弦波加振波形 (サイクル数 2 の加振波形の例)

a）長周期加振条件（長周期 2A）による多数回繰り返し加振の試験方法

表 1.3.8-3 に示す長周期加振条件でオイルダンパーを加振し、油温温度と最大減衰力、吸収エネルギー量、荷重変位関係の関係を求める。

表 1.3.8-3 長周期加振条件 [2A]

試験体	加振波形	周期 (s)	変位 (cm)	速度 (cm/s)	減衰力 (kN)	加振ｻｲｸﾙ (回)	ｲﾝﾀｰﾊﾞﾙ (回)	累積変形 (m)	吸収ｴﾈﾙｷﾞｰ (kN･m)	温度上昇予想値 (℃)
試験体 1 (ﾊﾞｲﾘﾆｱ C1=2.5)	正弦波	4.0	20.0	31.4	785	66	10	52.8	32553	39

注）累積変形、計画エネルギーは加振波形のうち、図 1.3.8-4 に示す所定サイクル部分の合計を表す。漸増・漸減部分を含む累積変形量は 79.2m、吸収エネルギーは 42026 kN･m である。

b）限界加振条件（限界 2B）による多数回繰り返し加振の試験方法

表 1.3.8-4 に示す限界加振条件でオイルダンパーを加振し、油温温度と最大減衰力、吸収エネルギー、荷重変位関係の関係を求める。

表 1.3.8-4 限界加振条件 [2B]

試験体	加振波形	周期 (s)	変位 (cm)	速度 (cm/s)	減衰力 (kN)	加振ｻｲｸﾙ (回)	ｲﾝﾀｰﾊﾞﾙ (回)	累積変形 (m)	吸収ｴﾈﾙｷﾞｰ (kN･m)	温度上昇予想値 (℃)
試験体 1 (ﾊﾞｲﾘﾆｱ C1=2.5)	正弦波	4.0	20.0	31.4	785	126	20	100.8	62147	75
試験体 2 (ﾊﾞｲﾘﾆｱ C1=0.8)	正弦波	4.0	20.0	31.4	251	126	20	100.8	19871	24
試験体 3 (ﾊﾞｲﾘﾆｱ C1=3.75)	正弦波	4.0	20.0	31.4	798	126	20	100.8	73364	88

注）累積変形、計画エネルギーは加振波形のうち、図 1.3.8-4 に示す所定サイクル部分の合計を表す。漸増・漸減部分を含む累積変形量は 151.2m である。

c）出荷検査としての基本特性試験（基本特性 A）の試験方法

表 1.3.8-5 に示す加振条件でオイルダンパーを加振し、最大減衰力、吸収エネルギー量および荷重変位関係を求める。

表 1.3.8-5 基本性能試験（基本特性 A）の加振条件

試験体	加振 波形	周期 (s)	変位 (cm)	ｻｲｸﾙ数 （回）	速度 (cm/s)	減衰力規格±15% (kN)
試験体 1 (ﾊﾞｲﾘﾆｱ C1=2.5)	正弦波	4.0	9.5	2	15.0	375.0±56.3
		4.0	15.9	2	25.0	625.0±93.8
		4.0	31.8	2	50.0	830.5±124.6
		2.22	35.4	2	100.0	915.3±137.3
試験体 2 (リニア C1=0.8)	正弦波	4.0	15.9	2	25.0	200.0±30.0
		4.0	31.8	2	50.0	400.0±60.0
		2.22	35.4	2	100.0	800.0±120.0
試験体 3 (ﾊﾞｲﾘﾆｱ C1=3.75)	正弦波	4.0	6.4	2	10.0	375.0±56.3
		4.0	9.5	2	15.0	562.5±84.4
		4.0	31.8	2	50.0	829.5±124.4
		2.22	35.4	2	100.0	914.2±137.1

d）加振周期特性試験（基本特性 B）の試験方法

表 1.3.8-6 に示す加振条件でオイルダンパーを加振し、加振周期と最大減衰力、吸収エネルギー量および荷重変位関係の関係を求める。

表 1.3.8-6 加振周期特性試験（基本特性 B）の加振条件

試験体	加振 波形	周期 (s)	変位 (cm)	速度 (cm/s)	減衰力 (kN)
試験体 1 (ﾊﾞｲﾘﾆｱ C1=2.5)	正弦波	2.0	6.4	20.0	500
		3.0	9.5		
		4.0	12.7		
		5.0	15.9		
試験体 2 (リニア C1=0.8)	正弦波	2.0	6.4	20.0	160
		3.0	9.5		
		4.0	12.7		
		5.0	15.9		
試験体 3 (ﾊﾞｲﾘﾆｱ C1=3.75)	正弦波	2.0	6.4	20.0	750
		3.0	9.5		
		4.0	12.7		
		5.0	15.9		

e）地震応答波加振試験 試験方法

地震応答波で加振した際の減衰力、吸収エネルギーを計測した。地震応答波は，東海-東南海地震に対する愛知県津島市の地震動（平均：AIC003-av）による 1 質点系地震応答解析から得られた変位応答波を入力する。変位応答波の入力倍率は、0.5 倍と 1 倍の 2 ケースとする。なお、免震建築物の条件としては、バイリニア型オイルダンパーが設置された、固有周期 4 秒の天然ゴム系免震建物を想定した。1 次減衰係数 C1 に対する減衰定数は h=0.31 である。図 1.3.8-5 に変位応答波形を示す。なお、試験機の加振能力の制約により、入力倍率 1 倍の加振は 170 秒程度までの加振となる。

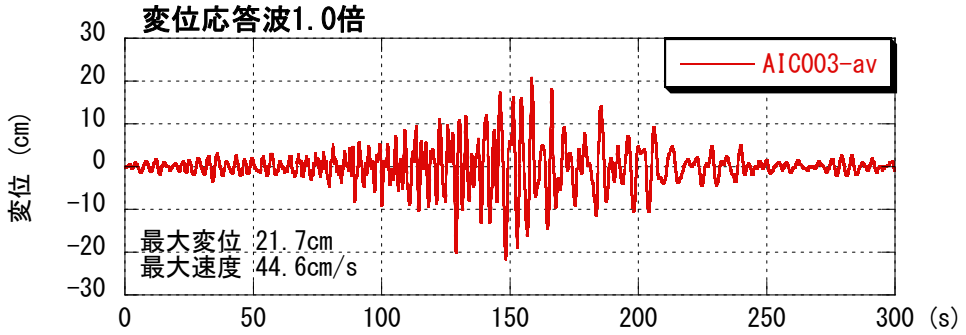


図 1.3.8-5 変位応答波形（AIC003-av）

f）微少振幅加振試験の試験方法

表 1.3.8-7 に示す加振条件でオイルダンパーを加振し、微少変形における荷重変位関係を求める。

表 1.3.8-7 微小振幅加振試験の加振条件

試験体	加振波形	周期 (s)	変位 (cm)	速度 (cm/s)	目標 ｻｲｸﾙ (回)
試験体 1	正弦波	3.0	0.02	0.04	3
		3.0	0.1	0.21	3
		3.0	0.2	0.42	3
		3.0	0.4	0.84	3
		3.0	1.0	2.1	3
		3.0	1.6	3.4	3
		3.0	2.0	4.2	3

表 1.3.8-8 試験ケース一覧

試験体	試験項目	周期 (s)	変位 (cm)	速度 (cm/s)	ｻｲｸﾙ (回)	ｲﾝﾀｰﾊﾞﾙ (回)	備考
試験体1 ﾊﾞｲﾘﾆｱ C1=2.5	基本特性A （出荷検査）	4	9.5	15	2	－	
		4	15.9	25	2	－	
		4	31.8	50	2	－	
		2.22	35.4	100	2	－	
	基本特性B （加振周期）	5	15.9	20	2	－	
		4	12.7	20	2	－	
		3	9.5	20	2	－	
		2	6.4	20	2	－	
	微少振幅加振	3	0.02	0.04	3	－	
		3	0.1	0.21	3	－	
		3	0.2	0.42	3	－	
		3	0.4	0.84	3	－	
		3	1	2.1	3	－	
		3	1.6	3.4	3	－	
		3	2	4.2	3	－	
	長周期(2A)	**4**	**20**	**31.4**	**66**	**10**	累積変形50m
	直後基本特性A （出荷検査）	4	9.5	15	2	－	
		4	15.9	25	2	－	
		4	31.8	50	2	－	
		2.22	35.4	100	2	－	
	冷却						
	後基本特性A （出荷検査）	4	9.5	15	2	－	冷却後の基本特性の確認
		4	15.9	25	2	－	
		4	31.8	50	2	－	
		2.22	35.4	100	2	－	
	限界(2B)	**4**	**20**	**31.4**	**126**	**20**	累積変形100m
	直後基本特性A （出荷検査）	4	9.5	15	2	－	温度上昇後の基本特性の確認
		4	15.9	25	2	－	
		4	31.8	50	2	－	
		2.22	35.4	100	2	－	
	冷却						
	後基本特性A （出荷検査）	4	9.5	15	2	－	冷却後の基本特性の確認
		4	15.9	25	2	－	
		4	31.8	50	2	－	
		2.22	35.4	100	2	－	
	応答波加振 （AIC003）	4	10.9	22.3	－	－	0.5倍入力
		4	21.7	44.6	－	－	1.0倍入力
試験体2 ﾘﾆｱ C1=0.8	基本特性A （出荷検査）	4	15.9	25	2	－	
		4	31.8	50	2	－	
		2.22	35.4	100	2	－	
	基本特性B （加振周期）	5	15.9	20	2	－	
		4	12.7	20	2	－	
		3	9.5	20	2	－	
		2	6.4	20	2	－	
	限界(2B)	**4**	**20**	**31.4**	**126**	**20**	累積変形100m
	直後基本特性A （出荷検査）	4	15.9	25	2	－	温度上昇後の基本特性の確認
		4	31.8	50	2	－	
		2.22	35.4	100	2	－	
試験体3 ﾊﾞｲﾘﾆｱ C1=3.75	基本特性A （出荷検査）	4	6.4	10	2	－	
		4	9.5	15	2	－	
		4	31.8	50	2	－	
		2.22	35.4	100	2	－	
	基本特性B （加振周期）	5	15.9	20	2	－	
		4	12.7	20	2	－	
		3	9.5	20	2	－	
		2	6.4	20	2	－	
	限界(2B)	**4**	**20**	**31.4**	**126**	**20**	累積変形100m
	直後基本特性A （出荷検査）	4	6.4	10	2	－	温度上昇後の基本特性の確認
		4	9.5	15	2	－	
		4	31.8	50	2	－	
		2.22	35.4	100	2	－	

1.3.8.2　実験結果

(1) 試験体 1

試験体 1（基準体）における試験結果を以下に示す。

a）長周期加振条件[2A]における荷重変位関係、温度時歴と基本特性の関係

図 1.3.8-6 に表 1.3.8-3 の条件で加振した 6 波×11 セットの減衰力－変位曲線を重ねて示す。図 1.3.8-7 に加振時の各部温度の時刻歴波形を示す。表 1.3.8-9 に各加振セットにおける吸収エネルギーおよび温度上昇量と、吸収エネルギーをオイルダンパーの熱容量（作動油+接液部鋼材）で除して求めた温度上昇予測値を示す。また、表 1.3.8-10 に各加振セットの 1 サイクル目の吸収エネルギーと最大減衰力の変化を示す。

油温は 60℃まで上昇したが荷重変位関係の変化は小さく、1 サイクル当たりのエネルギー吸収量の低下率は 2%程度、最大減衰力の低下率も 1%程度であった。油漏れは生じなかった。

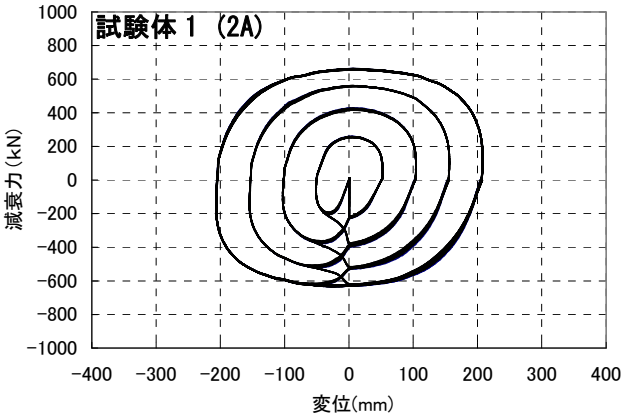


図 1.3.8-6　減衰力－変位曲線（6 波×11 セット）

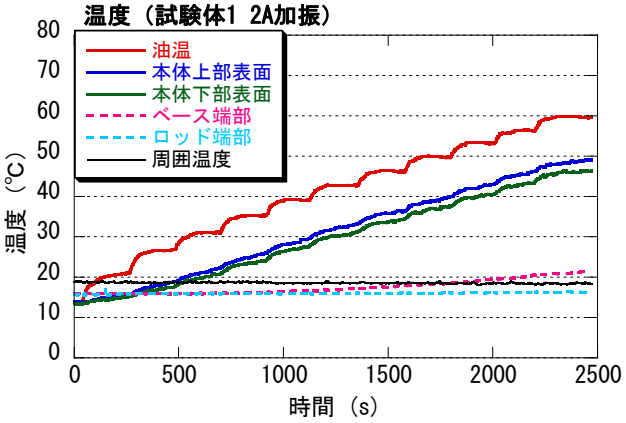


図 1.3.8-7　各部温度の時刻歴波形

表 1.3.8-9　各加振セットにおける吸収エネルギーと温度上昇値

試験体 1 (2A)

周囲温度　19℃

加振波 NO.	吸収エネルギーQ（kN-m＝kJ）				温度上昇（℃）		
	所定振幅 6 波分のみ Qa		前後増減波含み Qt		計算値	試験結果	
	個別	累積	個別	累積	(Qt/C)	ﾀﾝｸ内作動油	本体上部表面
1	2,646.2	2,646.2	3,597.7	3,597.7	4.3	6.8	1.8
2	2,640.0	5,286.2	3,586.7	7,184.3	8.6	12.6	4.7
3	2,638.8	7,925.1	3,582.5	10,766.9	12.9	17.1	8.1
4	2,623.2	10,548.3	3,573.3	14,340.2	17.2	21.2	11.7
5	2,629.2	13,177.5	3,567.7	17,907.9	21.5	25.1	15.4
6	2,622.6	15,800.1	3,560.1	21,468.0	25.8	28.6	18.9
7	2,617.0	18,417.1	3,555.3	25,023.3	30.1	32.1	22.4
8	2,616.1	21,033.1	3,549.7	28,573.1	34.3	35.6	25.5
9	2,612.1	23,645.3	3,543.9	32,117.0	38.6	39.1	29
10	2,608.1	26,253.4	3,537.5	35,654.5	42.9	42.2	31.9
11	2,604.1	28,857.4	3,531.1	39,185.6	47.1	46.0	35.4
合計	28,857.4		39,185.6				

注）温度上昇の計算値は吸収エネルギーを下記の熱容量で除した放熱は考慮しない数値を示す。

オイルダンパー熱容量C：　8.32E+05　J/℃
（作動油+接液部鋼材）

表 1.3.8-10　各セットにおける吸収エネルギーと減衰力の推移（1 サイクル当たり）

試験体 1 (2A)

セット	加振波数	吸収エネルギー kJ (kN・m) (指数)		最大減衰力（kN）			
				伸び側	(指数)	縮み側	(指数)
1	1波目	449.6	(1.00)	662.6	(1.00)	-635.4	(1.00)
2	7波目	448.6	(1.00)	662.8	(1.00)	-635.1	(1.00)
3	13波目	449.0	(1.00)	662.8	(1.00)	-633.2	(1.00)
4	19波目	446.4	(0.99)	661.3	(1.00)	-632.4	(1.00)
5	25波目	446.7	(0.99)	660.8	(1.00)	-632.3	(0.99)
6	31波目	445.2	(0.99)	660.2	(1.00)	-630.9	(0.99)
7	37波目	444.8	(0.99)	659.8	(1.00)	-629.8	(0.99)
8	43波目	444.4	(0.99)	658.5	(0.99)	-629.6	(0.99)
9	49波目	440.8	(0.98)	658.1	(0.99)	-628.5	(0.99)
10	55波目	443.2	(0.99)	657.6	(0.99)	-627.6	(0.99)
11	61波目	442.7	(0.98)	657.4	(0.99)	-627.0	(0.99)

b）限界加振条件[2B]における荷重変位関係、温度時歴と基本特性の関係

図 1.3.8-8 に表 1.3.8-4 の条件で加振した 6 波×21 セットの減衰力－変位曲線を重ねて示す。図 1.3.8-9 に加振時の各部温度の時刻歴波形を示す。表 1.3.8-11 に各加振セットにおける吸収エネルギーおよび温度上昇量と、吸収エネルギーをオイルダンパーの熱容量（作動油+接液部鋼材）で除して求めた温度上昇予想値を示す。また、表 1.3.8-12 に各加振セットの 1 サイクル目の吸収エネルギーと最大減衰力の変化を示す。また、図 1.3.8-10 に限界加振試験後の温度推移の時刻歴を示す。

油温は 88℃まで上昇したが荷重変位関係の変化は小さく、1 サイクル当たりのエネルギー吸収量の低下率は 3%程度、最大減衰力の低下率も 2%程度であった。また、油漏れは生じなかった。

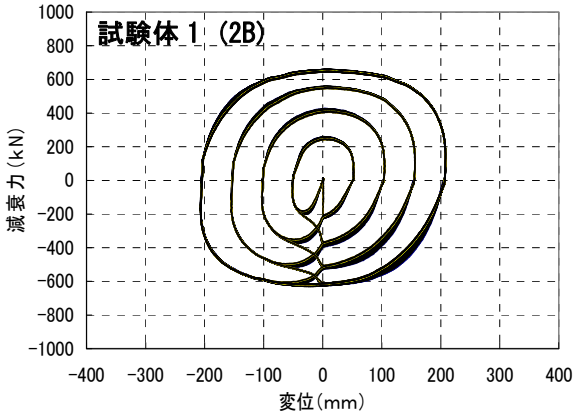


図 1.3.8-8　減衰力－変位曲線（6 波×21 セット）

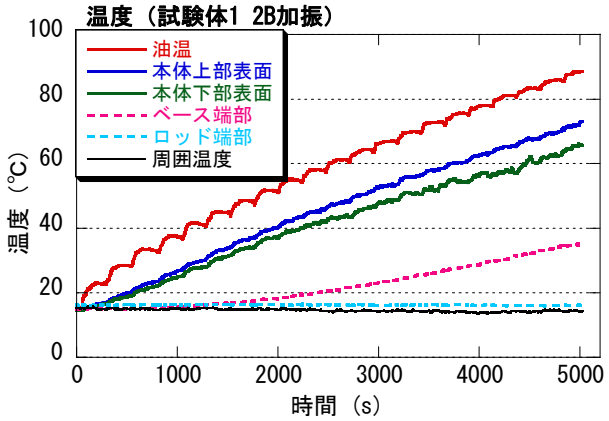


図 1.3.8-9　各部温度の時刻歴波形

表 1.3.8-11　各加振セットにおける吸収エネルギーと温度上昇値

試験体 1 (2B)　　周囲温度　15℃

加振波NO.	吸収エネルギー（kN-m＝kJ）				温度上昇（℃）		
	所定振幅 6 波分のみ		前後増減波含み		計算値	試験結果	
	個別	累積	個別	累積	(Qt/C)	ﾀﾝｸ内作動油	本体上部表面
1	2,666	2,666	3,579	3,579	4.3	7.4	2.1
2	2,659	5,324	3,557	7,136	8.6	12.8	5.3
3	2,661	7,985	3,568	10,704	12.9	17.3	8.4
4	2,625	10,611	3,566	14,269	17.2	21.4	12.2
5	2,658	13,268	3,559	17,828	21.4	25.3	15.2
6	2,654	15,923	3,552	21,380	25.7	28.6	18.9
7	2,648	18,571	3,545	24,925	30.0	31.8	22.2
8	2,644	21,215	3,542	28,467	34.2	35.7	25.4
9	2,640	23,855	3,535	32,002	38.5	38.8	28.4
10	2,638	26,493	3,529	35,531	42.7	42.0	31.0
11	2,635	29,128	3,523	39,054	46.9	45.2	33.4
12	2,629	31,757	3,517	42,572	51.2	48.3	36.5
13	2,591	34,348	3,511	46,083	55.4	51.1	38.6
14	2,624	36,971	3,507	49,590	59.6	54.2	41.4
15	2,615	39,586	3,498	53,088	63.8	56.8	43.7
16	2,612	42,198	3,490	56,578	68.0	59.8	45.8
17	2,606	44,805	3,485	60,063	72.2	62.5	48.1
18	2,602	47,407	3,479	63,542	76.4	65.4	50.5
19	2,581	49,988	3,474	67,016	80.6	67.6	53.0
20	2,597	52,585	3,468	70,483	84.7	70.4	55.4
21	2,602	55,187	3,477	73,960	88.9	73.4	58.5

注）温度上昇の計算値は吸収エネルギーを下記の熱容量で除した放熱は考慮しない数値を示す。

オイルダンパー熱容量C：　8.32E+05　J/℃
（作動油+接液部鋼材）

表 1.3.8-12　各セットにおける吸収エネルギーと減衰力の推移（1 サイクル当たり）

試験体 1 (2B)

セット	加振波数	吸収エネルギー kJ (kN・m)	(指数)	最大減衰力（kN） 伸び側	(指数)	縮み側	(指数)
1	1波目	447.2	(1.00)	657.4	(1.00)	-628.9	(1.00)
2	7波目	446.5	(1.00)	658.7	(1.00)	-629.6	(1.00)
3	13波目	443.2	(0.99)	658.9	(1.00)	-630.2	(1.00)
4	19波目	445.0	(1.00)	658.9	(1.00)	-629.6	(1.00)
5	25波目	443.7	(0.99)	657.9	(1.00)	-629.3	(1.00)
6	31波目	443.7	(0.99)	657.6	(1.00)	-628.3	(1.00)
7	37波目	443.3	(0.99)	656.8	(1.00)	-627.8	(1.00)
8	43波目	442.9	(0.99)	657.2	(1.00)	-627.0	(1.00)
9	49波目	443.0	(0.99)	656.1	(1.00)	-627.2	(1.00)
10	55波目	441.5	(0.99)	655.5	(1.00)	-627.0	(1.00)
11	61波目	440.1	(0.98)	654.9	(1.00)	-625.9	(1.00)
12	67波目	440.4	(0.98)	654.6	(1.00)	-625.7	(0.99)
13	73波目	439.9	(0.98)	653.4	(0.99)	-624.9	(0.99)
14	79波目	439.2	(0.98)	652.7	(0.99)	-623.8	(0.99)
15	85波目	438.3	(0.98)	651.4	(0.99)	-623.8	(0.99)
16	91波目	436.7	(0.98)	650.8	(0.99)	-622.5	(0.99)
17	97波目	436.7	(0.98)	649.5	(0.99)	-621.2	(0.99)
18	103波目	435.7	(0.97)	649.5	(0.99)	-621.2	(0.99)
19	109波目	435.7	(0.97)	648.2	(0.99)	-620.6	(0.99)
20	115波目	434.4	(0.97)	648.2	(0.99)	-620.4	(0.99)
21	121波目	434.8	(0.97)	646.9	(0.98)	-619.3	(0.98)

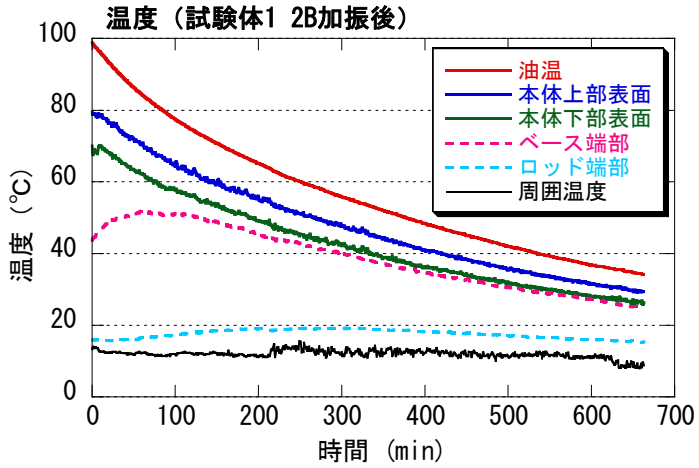


図 1.3.8-10 加振後の温度の降下推移（限界試験 2B 後）

c） 限界加振試験[2B]前後の基本特性の比較

限界加振試験前の常温状態で実施した基本特性 A 試験（出荷検査）と、限界試験直後に高温状態で実施した基本特性 A 試験の結果を比較して以下に示す。図 1.3.8-11、表 1.3.8-13 にＦ－Ｖ特性を比較して示す。また、図 1.3.8-12 に所定振幅での減衰力－変位曲線を比較して示す。

限界試験直後の高温状態（約 90℃）における最大減衰力の変化は小さく、常温下（約 20℃）の初期状態に比べて 1～4%程度の低下率であった。

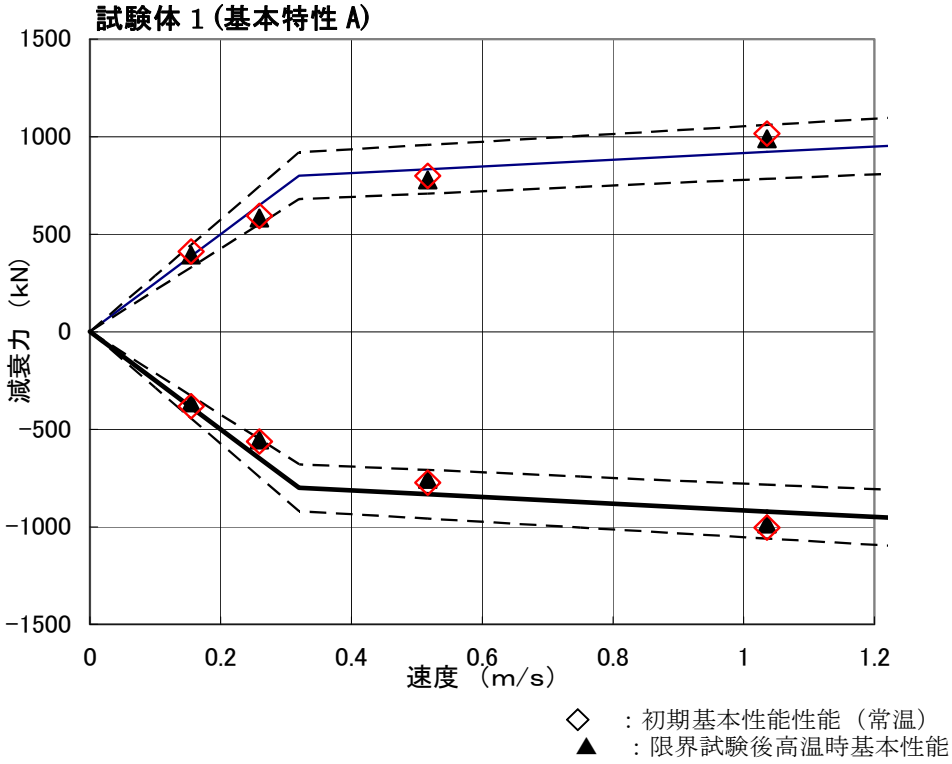
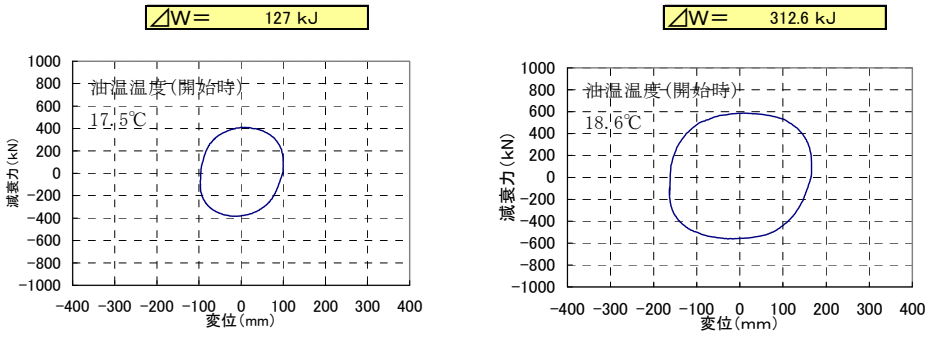


図 1.3.8-11 Ｆ－Ｖ特性（常温および限界試験直後）

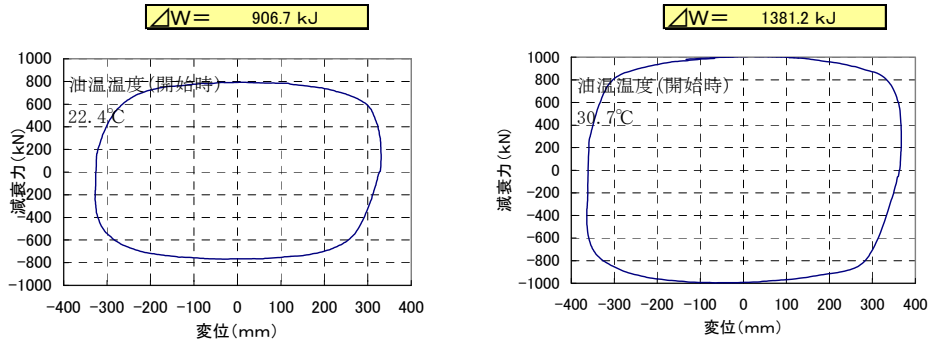
表 1.3.8-13 限界加振試験前後の最大減衰力の比較

試験体 1（基本特性 A）

速度 V （m/s）	減衰力Fd 伸び （kN）	(Fd/F)	縮み （kN）	(Fd/F)	減衰力F（初期常温） 伸び （kN）	縮み （kN）
0.15	393.0	(0.96)	−365.1	(0.96)	411.1	−382.2
0.25	582.6	(0.98)	−554.8	(0.99)	593.1	−562.9
0.5	778.3	(0.97)	−756.6	(0.98)	799.1	−774
1	989.1	(0.97)	−986.1	(0.98)	1014.9	−1004.1

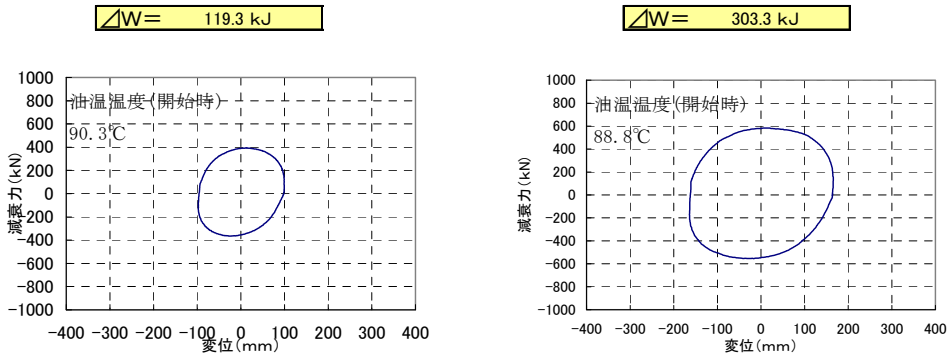


V＝0.15m/s　　V＝0.25m/s

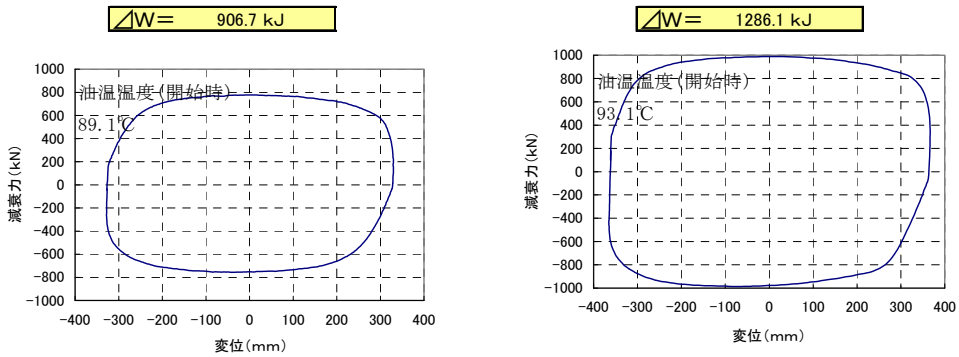


V＝0.5m/s　　V＝1.0m/s

（限界試験前：常温時）【試験体 1】



V＝0.15m/s　　V＝0.25m/s



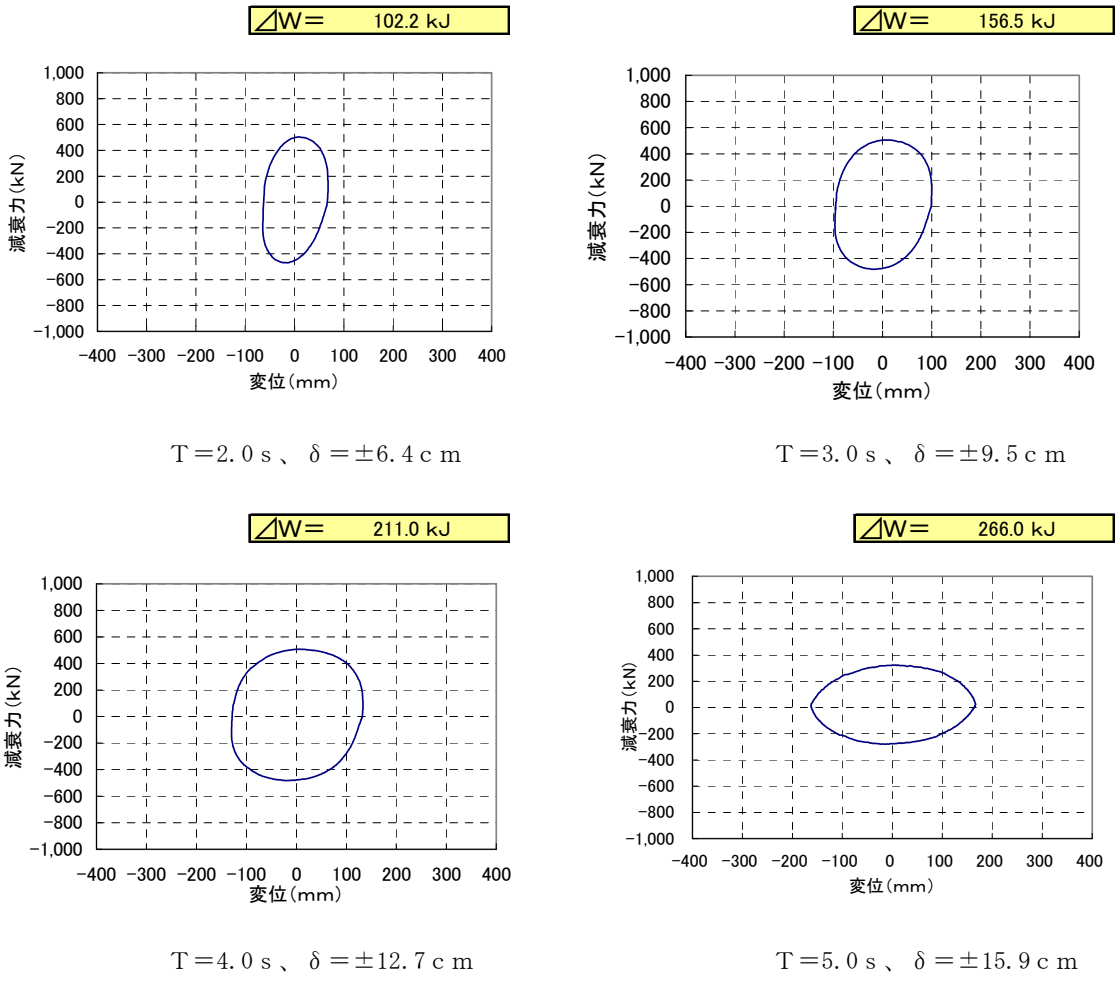
V＝0.5m/s　　V＝1.0m/s

（限界試験後：高温時）【試験体 1】

図 1.3.8-12 基本特性 A 試験の減衰力－変位曲線の比較（限界試験前後）

d）加振周期特性試験（基本特性 B）の試験結果

常温下で実施した基本特性 B 試験の結果を以下に示す。図 1.3.8-13 に V=20cm/s において周期 2、3、4、5 秒で加振した際の、所定振幅での減衰力－変位曲線を比較して示す。また、表 1.3.8-14 に各周期における最大減衰力と等価減衰係数を示す。油の内部剛性による影響で、加振周期が短くなるにつれて等価減衰係数が小さくなる傾向が見られ、周期 2 秒では周期 5 秒に対して約 3%低下する。



T＝2.0ｓ、δ＝±6.4ｃｍ　　T＝3.0ｓ、δ＝±9.5ｃｍ

T＝4.0ｓ、δ＝±12.7ｃｍ　　T＝5.0ｓ、δ＝±15.9ｃｍ

図 1.3.8-13 基本特性 B 試験の減衰力－変位曲線 【試験体 1】

表 1.3.8-14 各加振での最大減衰力と等価減衰係数

試験体 1（基本特性 B）

周期	最大減衰力 (kN)				等価減衰係数 (kN・s/cm)	
	伸側	(指数)	縮側	(指数)		(指数)
5	508.5	1.00	-482.6	1.00	26.65	1.00
4	507.6	1.00	-483.2	1.00	26.51	0.99
3	506.4	1.00	-482.6	1.00	26.35	0.99
2	503.3	0.99	-469.7	0.97	25.81	0.97

e）地震応答波加振結果

図 1.3.8-14 および図 1.3.8-15 に地震応答波（AIC003-av）×0.5 倍加振時の減衰力－変位曲線と、時刻歴波形を示す。

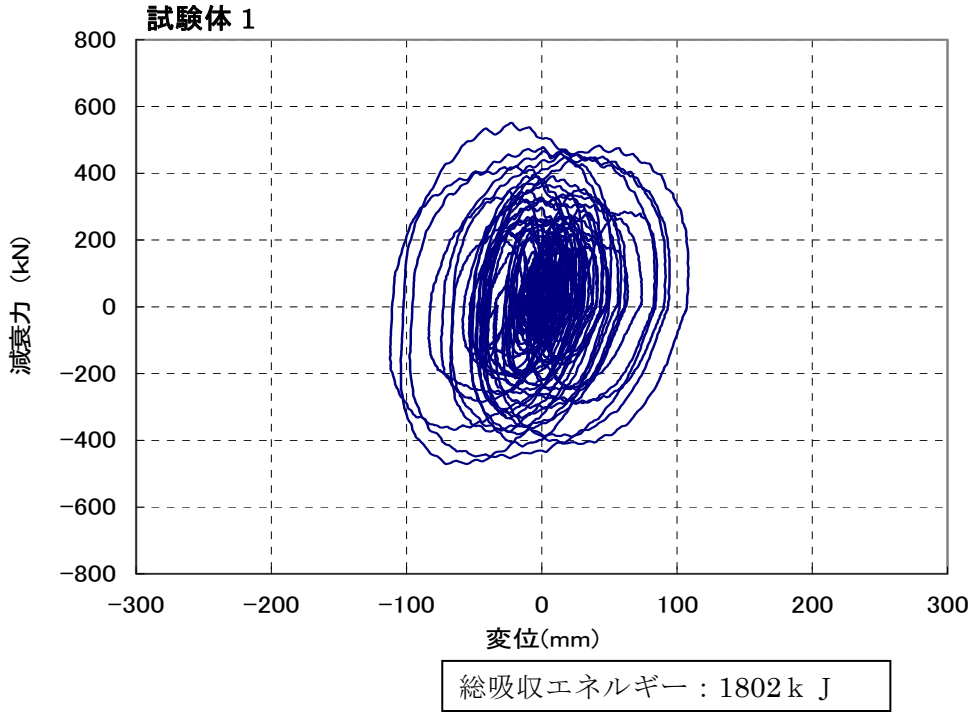


図 1.3.8-14　減衰力－変位曲線　（応答波×0.5 倍）

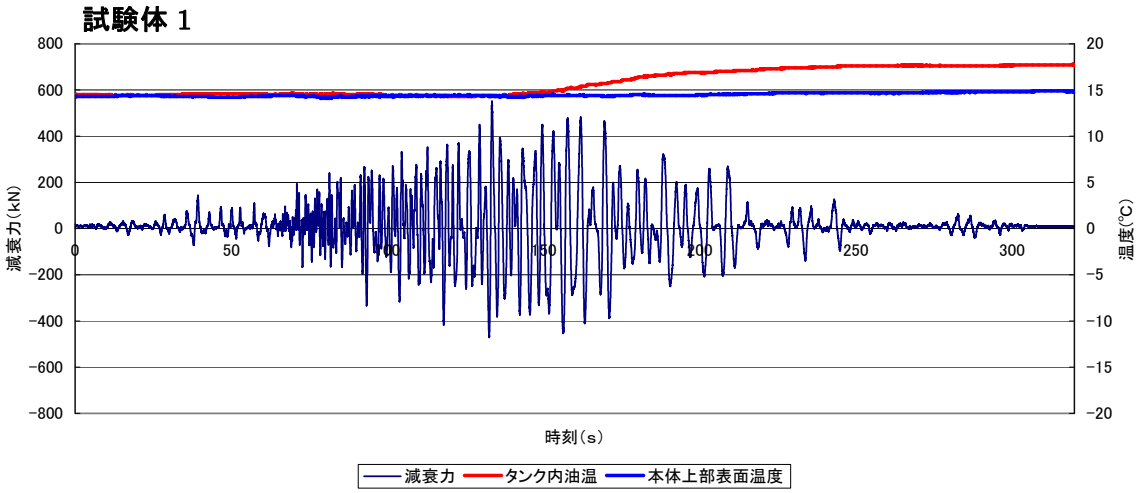


図 1.3.8-15 減衰力と温度上昇の時刻歴波形（応答波×0.5 倍）

図 1.3.8-16 および図 1.3.8-17 に地震応答波（AIC003-av）×1.0 倍加振時の減衰力－変位曲線と、時刻歴波形を示す。加振中にアキュムレータの油圧が低下し、アクチュエータが停止した。

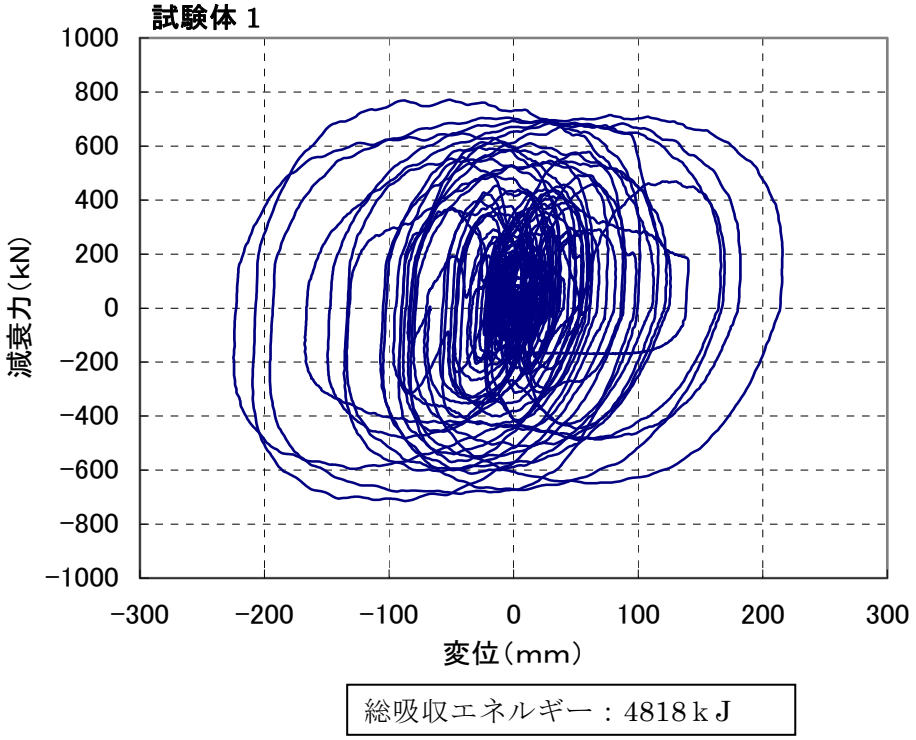


図 1.3.8-16　減衰力－変位曲線　（応答波×1.0 倍）

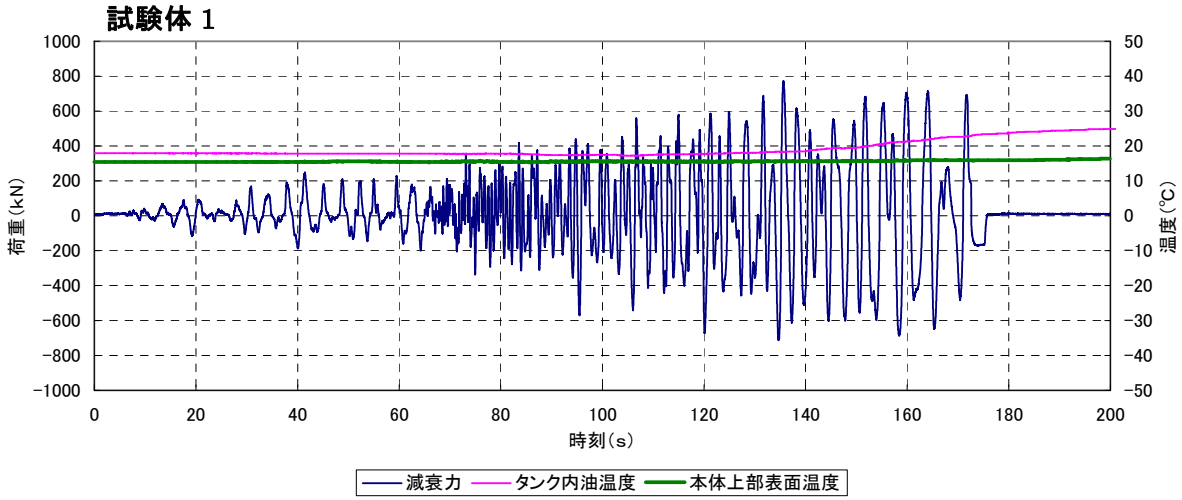


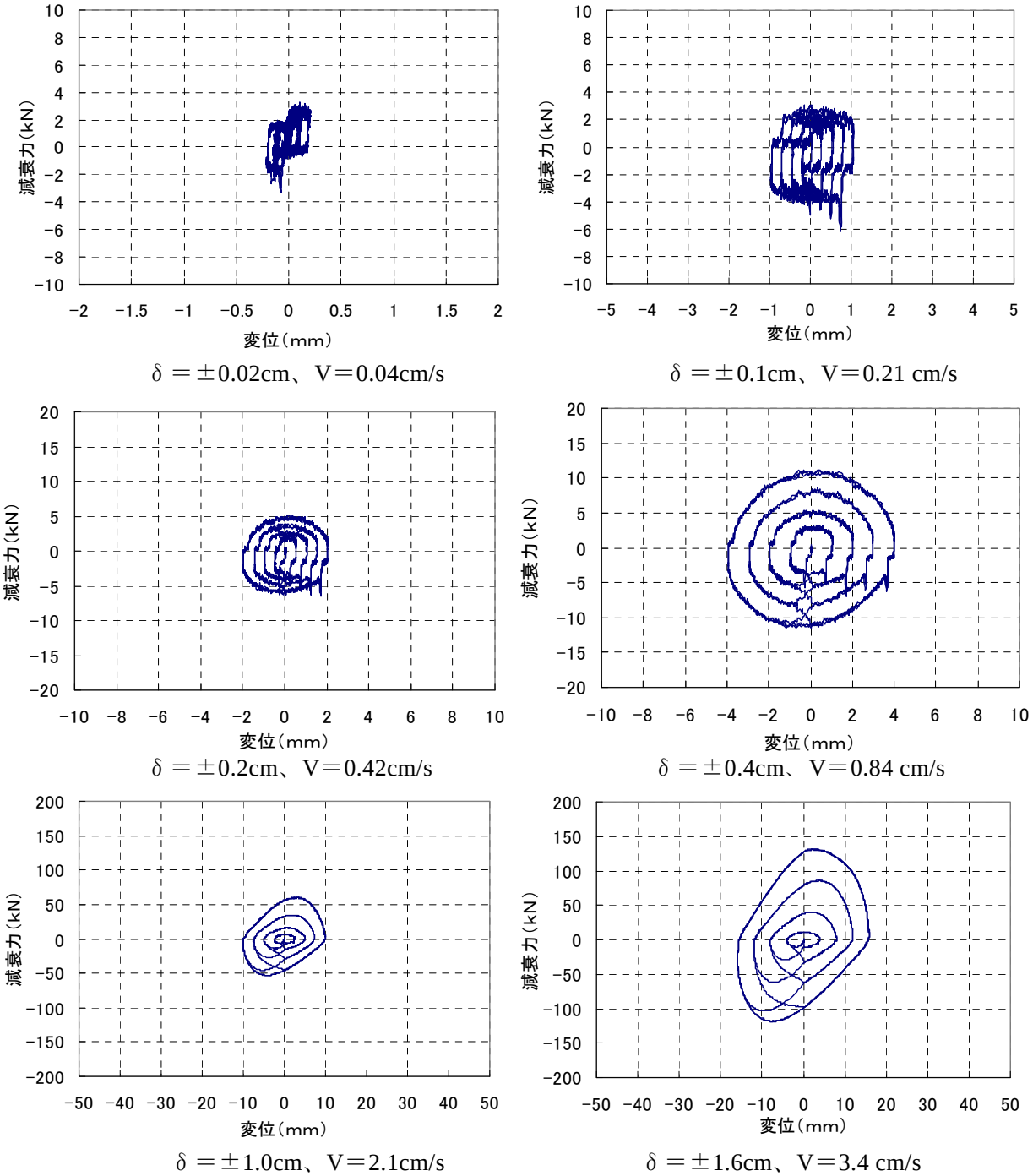
図 1.3.8-17 減衰力と温度上昇の時刻歴波形（応答波×1.0 倍）

f）微小振幅加振結果

図 1.3.8-18 および図 1.3.8-19 に、表 1.3.8-7 の加振条件で加振した微小振幅加振時の減衰力-変位曲線を示す。

・±0.02cm、±0.1cm 加振時は、試験機の漸増・漸減変位において減衰力の変化がなく、フリクションが大勢を占めていると思われる。

・±0.2cm の加振からは、試験機の漸増・漸減変位において減衰力が漸増・漸減しておりオイルダンパーとしての減衰力を発揮している。

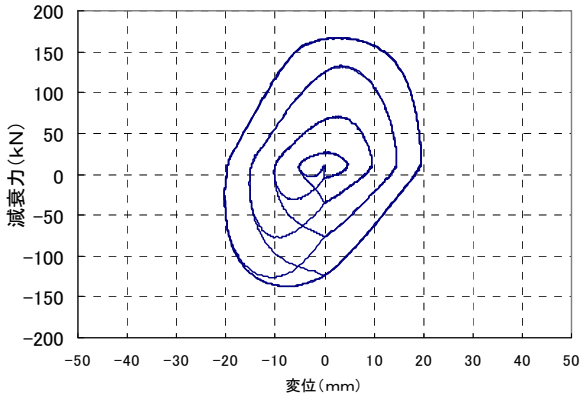


δ ＝±0.02cm、V＝0.04cm/s　　δ ＝±0.1cm、V＝0.21 cm/s

δ ＝±0.2cm、V＝0.42cm/s　　δ ＝±0.4cm、V＝0.84 cm/s

δ ＝±1.0cm、V＝2.1cm/s　　δ ＝±1.6cm、V＝3.4 cm/s

図 1.3.8-18 減衰力-変位曲線（微少振幅加振試験）【試験体 1】



δ ＝±2.0cm、V＝4.2cm/s

図 1.3.8-19 減衰力-変位曲線（微少振幅加振試験）【試験体 1】

(2) 試験体 2

試験体 2（減衰係数小）における試験結果を以下に示す。

a) 限界加振条件[2B]における荷重変位関係、温度時歴と基本特性の関係

図 1.3.8-20 に表 1.3.8-4 の条件で加振した 6 波×21 セットの減衰力－変位曲線を重ねて示す。図 1.3.8-21 に加振時の各部温度の時刻歴波形を示す。表 1.3.8-15 に各加振セットにおける吸収エネルギーおよび温度上昇量と、吸収エネルギーをオイルダンパーの熱容量（作動油+接液部鋼材）で除して求めた温度上昇予測値を示す。表 1.3.8-16 に各加振セットの 1 サイクル目の吸収エネルギーと最大減衰力の変化を示す。油温は 41℃まで上昇したが荷重変位関係の変化は小さく、1 サイクル当たりのエネルギー吸収量の低下率は 2%程度、最大減衰力の低下率も 2%程度であった。油漏れは生じなかった。

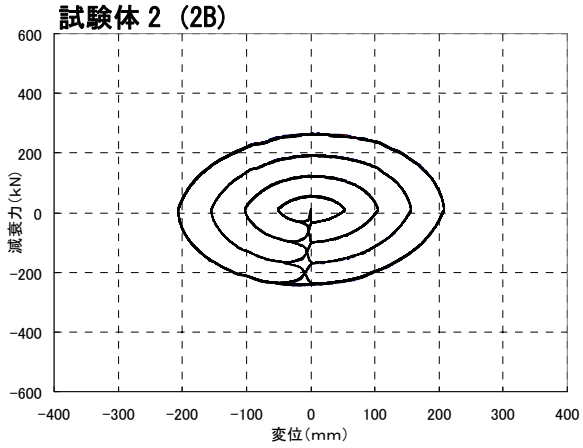


図 1.3.8-20　減衰力－変位曲線（6 波×21 セット）

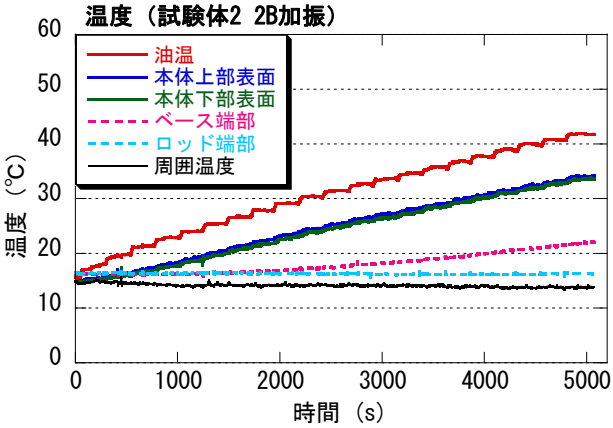


図 1.3.8-21 各部温度の時刻歴波形

表 1.3.8-15　各加振セットにおける吸収エネルギーと温度上昇値

試験体 2 (2B)

周囲温度　14℃

加振波NO.	吸収エネルギー（kN-m＝kJ）				温度上昇（℃）		
	所定振幅 6 波分のみ		前後増減波含み		計算値	試験結果	
	個別	累積	個別	累積	(Qt/C)	ﾀﾝｸ内作動油	本体上部表面
加振前							
1	964	964	1,218	1,218	1.5	2.3	0.5
2	961	1,925	1,217	2,435	2.9	4.1	1.2
3	956	2,882	1,213	3,648	4.4	5.8	2.1
4	957	3,839	1,214	4,861	5.8	7.2	3.2
5	955	4,794	1,212	6,073	7.3	8.5	4.1
6	955	5,749	1,210	7,283	8.8	9.9	5.5
7	956	6,705	1,210	8,493	10.2	11.1	6.6
8	942	7,647	1,209	9,702	11.7	12.2	7.5
9	949	8,596	1,207	10,909	13.1	13.5	8.6
10	948	9,544	1,206	12,115	14.6	14.7	9.6
11	948	10,492	1,204	13,319	16.0	15.9	10.6
12	944	11,436	1,204	14,523	17.5	17.2	11.6
13	951	12,387	1,203	15,726	18.9	18.1	12.2
14	941	13,328	1,202	16,928	20.3	19.2	13.2
15	947	14,275	1,202	18,129	21.8	20.2	14.0
16	936	15,211	1,201	19,330	23.2	21.2	15.1
17	938	16,149	1,202	20,532	24.7	22.1	15.8
18	946	17,095	1,200	21,732	26.1	23.4	16.8
19	937	18,032	1,201	22,933	27.6	24.3	17.5
20	946	18,978	1,200	24,133	29.0	25.2	18.4
21	942	19,920	1,199	25,332	30.4	26.2	19.2

注）温度上昇の計算値は吸収エネルギーを下記の熱容量で除した放熱は考慮しない数値を示す。

オイルダンパー熱容量C：　8.32E+05　J/℃
（作動油+接液部鋼材）

表 1.3.8-16　各セットにおける吸収エネルギーと減衰力の推移（1 サイクル当たり）

試験体 2（2B）

セット	加振波数	吸収エネルギー kJ （kN・m）	（指数）	最大減衰力（kN） 伸び側	（指数）	縮み側	（指数）
1	1波目	161.8	(1.00)	267.4	(1.00)	-244.9	(1.00)
2	7波目	160.5	(0.99)	266.4	(1.00)	-243.8	(1.00)
3	13波目	160.0	(0.99)	265.1	(0.99)	-243.2	(0.99)
4	19波目	160.4	(0.99)	265.1	(0.99)	-243.9	(1.00)
5	25波目	160.4	(0.99)	264.9	(0.99)	-243.2	(0.99)
6	31波目	160.3	(0.99)	264.4	(0.99)	-243.6	(0.99)
7	37波目	160.0	(0.99)	264.2	(0.99)	-243.0	(0.99)
8	43波目	159.7	(0.99)	264.2	(0.99)	-242.3	(0.99)
9	49波目	159.8	(0.99)	263.6	(0.99)	-241.9	(0.99)
10	55波目	159.7	(0.99)	263.6	(0.99)	-241.7	(0.99)
11	61波目	159.2	(0.98)	263.6	(0.99)	-240.9	(0.98)
12	67波目	159.1	(0.98)	262.9	(0.98)	-241.3	(0.99)
13	73波目	158.8	(0.98)	262.9	(0.98)	-241.1	(0.98)
14	79波目	159.0	(0.98)	262.5	(0.98)	-240.6	(0.98)
15	85波目	158.9	(0.98)	262.3	(0.98)	-241.7	(0.99)
16	91波目	158.6	(0.98)	262.1	(0.98)	-241.1	(0.98)
17	97波目	158.8	(0.98)	262.9	(0.98)	-241.3	(0.99)
18	103波目	159.0	(0.98)	262.5	(0.98)	-241.7	(0.99)
19	109波目	158.6	(0.98)	262.3	(0.98)	-240.9	(0.98)
20	115波目	158.7	(0.98)	261.8	(0.98)	-242.3	(0.99)
21	121波目	158.6	(0.98)	262.9	(0.98)	-241.1	(0.98)

b） 限界加振試験[2B]前後の基本特性の比較

限界加振試験前の常温状態で実施した基本特性 A 試験（出荷検査）と、限界試験直後に高温状態で実施した基本特性 A 試験の結果を比較して以下に示す。図 1.3.8-22、表 1.3.8-17 にＦ－Ｖ特性を比較して示す。また、図 1.3.8-23 に所定振幅での減衰力－変位曲線を比較して示す。限界試験直後の温度状態（約 40℃）における最大減衰力の変化は小さく、常温下（約 20℃）の初期状態に比べて 1～2%程度の低下率であった。

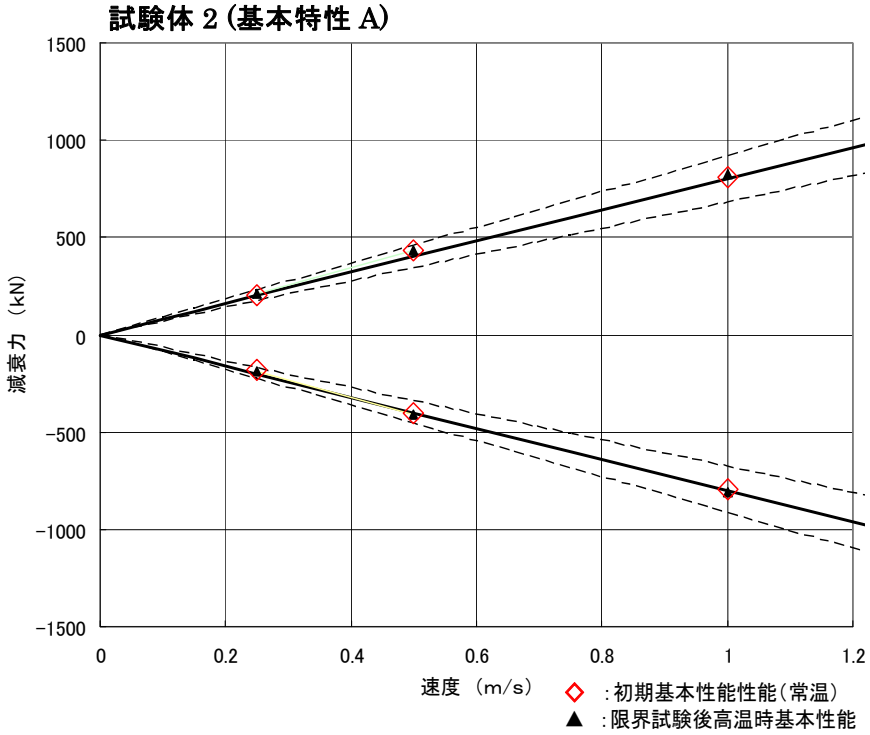
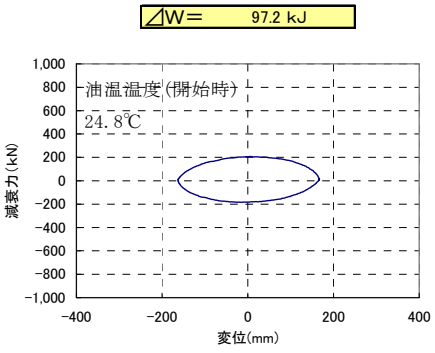


図 1.3.8-22 Ｆ－Ｖ特性（常温―限界試験直後）

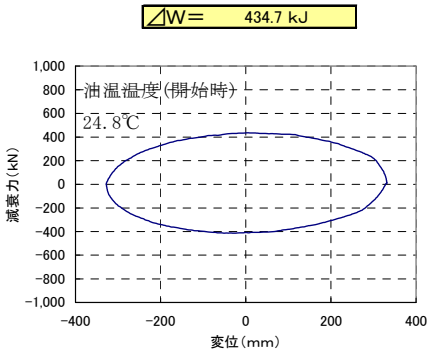
表 1.3.8-17 限界加振試験前後の最大減衰力の比較

試験体 2（基本特性 A）

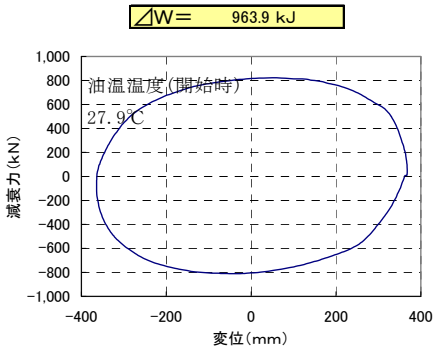
速度 V (m/s)	減衰力Fd				減衰力F(初期常温)	
	伸び (kN)	(Fd/F)	縮み (kN)	(Fd/F)	伸び (kN)	縮み (kN)
0.25	204.6	(0.99)	−183.2	(0.99)	207.4	−184.5
0.5	430.1	(0.98)	−406.5	(0.98)	436.7	−413.3
1	808.5	(0.98)	−794.4	(0.98)	826.1	−810.9



V＝0.25m/s

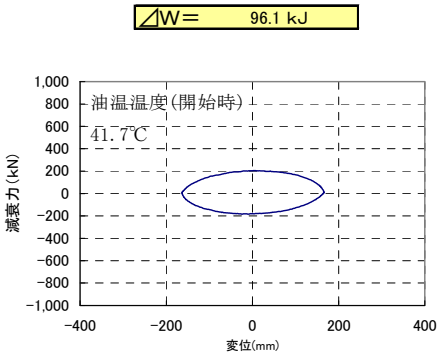


V＝0.5m/s

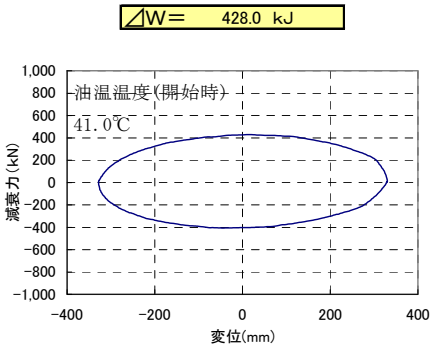


V＝1.0m/s

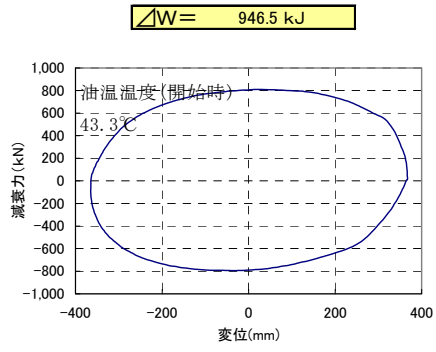
（限界試験前：常温時）【試験体 2】



V＝0.25m/s



V＝0.5m/s



V＝1.0m/s

（限界試験後：高温）【試験体 2】

図 1.3.8-23 基本特性 A 試験の減衰力－変位曲線の比較（限界試験前後）

c）加振周期特性試験（基本特性 B）の試験結果

常温下で実施した基本特性 B 試験の結果を以下に示す。図 1.3.8-24 に V=20cm/s において周期 2、3、4、5 秒で加振した際の、所定振幅での減衰力－変位曲線を比較して示す。また、表 1.3.8-18 に各周期における最大減衰力と等価減衰係数を示す。加振周期による最大減衰力、等価減衰係数の変化は小さい。

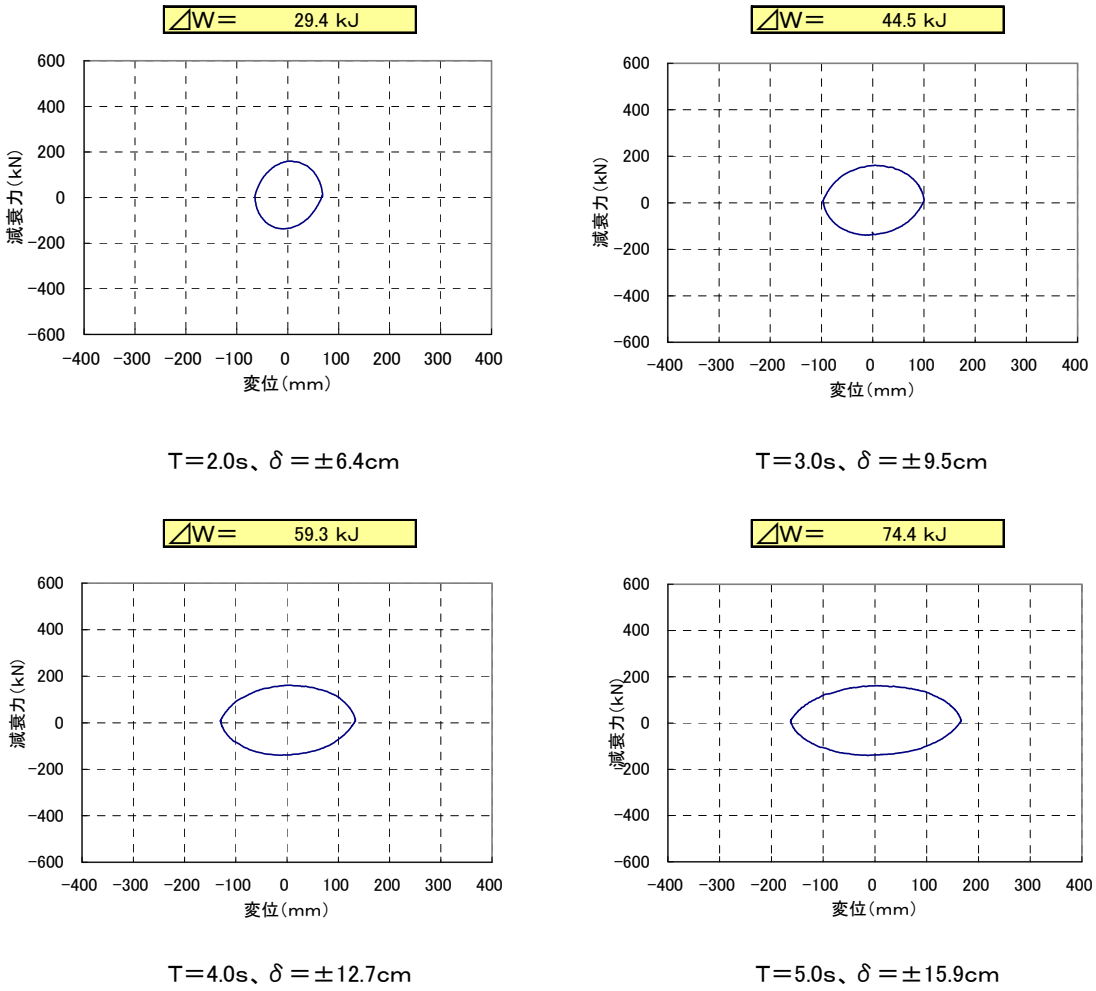


図 1.3.8-24 基本特性 B 試験の減衰力－変位曲線 【試験体 2】

表 1.3.8-18 各加振での最大減衰力と等価減衰係数

試験体 2（基本特性 B）

周期	最大減衰力 (kN)				等価減衰係数 (kN・s/cm)	
	伸側	(指数)	縮側	(指数)		(指数)
5	161.6	1.00	-137.5	1.00	7.45	1.00
4	161.4	1.00	-140.3	1.02	7.45	1.00
3	160.7	0.99	-139.0	1.01	7.49	1.01
2	160.6	0.99	-137.5	1.00	7.27	0.98

(3) 試験体 3

試験体 3（減衰係数大）における試験結果を以下に示す。

a) 限界加振条件[2B]における荷重変位関係、温度時歴と基本特性の関係

図 1.3.8-25 に表 1.3.8-4 の条件で加振した 6 波×22 セットの減衰力－変位曲線を重ねて示す。図 1.3.8-26 に加振時の各部温度の時刻歴波形を示す。表 1.3.8-19 に各加振セットにおける吸収エネルギーおよび温度上昇量と、吸収エネルギーをオイルダンパーの熱容量（作動油+接液部鋼材）で除して求めた温度上昇予測値を示す。また、表 1.3.8-20 に各加振セットの 1 サイクル目の吸収エネルギーと最大減衰力の変化を示す。

油温は 102℃まで上昇したが荷重変位関係の変化は小さく､1 サイクル当たりのエネルギー吸収量の低下率は 4%程度、最大減衰力の低下率も 4%程度であった。油漏れは生じなかった。

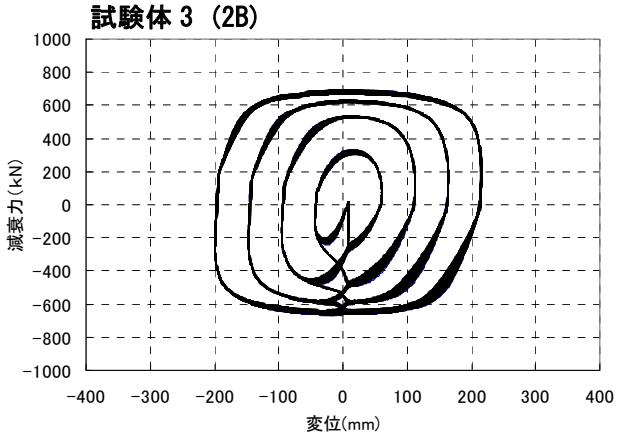


図 1.3.8-25　減衰力－変位曲線（6 波×22 セット）

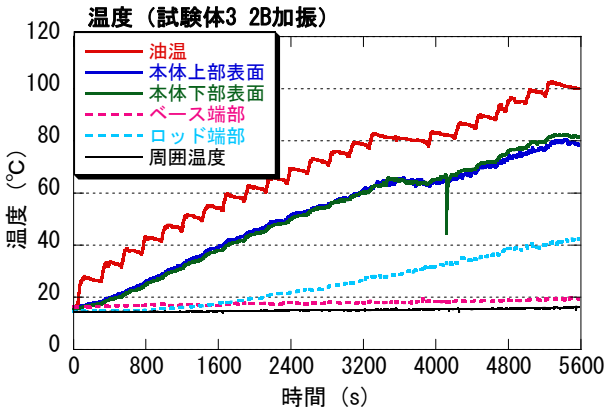


図 1.3.8-26 各部温度の時刻歴波形

表 1.3.8-19　各加振セットにおける吸収エネルギーと温度上昇値

試験体 3 (2B)

周囲温度　19℃

加振波NO.	吸収エネルギー（kN-m＝kJ）				温度上昇（℃）		
	所定振幅 6 波分のみ		前後増減波含み		計算値	試験結果	
	個別	累積	個別	累積	(Qt/C)	ﾀﾝｸ内作動油	本体上部表面
加振前							
1	2,946	2,946	4,061	4,061	4.9	9.9	1.9
2	2,949	5,896	4,048	8,109	9.7	16.1	4.7
3	2,944	8,840	4,046	12,155	14.6	21.0	8.2
4	2,943	11,783	4,033	16,189	19.5	25.7	11.9
5	2,931	14,714	4,036	20,225	24.3	30.3	15.6
6	2,926	17,640	4,028	24,253	29.2	34.0	19.5
7	2,893	20,533	4,019	28,272	34.0	37.7	23.2
8	2,906	23,439	4,012	32,284	38.8	41.7	27.0
9	2,900	26,339	4,003	36,287	43.6	45.1	30.4
10	2,889	29,228	3,992	40,279	48.4	48.4	33.0
11	2,895	32,123	3,977	44,256	53.2	51.7	36.5
12	2,868	34,991	3,974	48,230	58.0	55.3	38.7
13	2,877	37,868	3,966	52,196	62.7	58.7	41.8
14	2,870	40,738	3,957	56,154	67.5	61.9	45.8
15	2,876	43,614	3,942	60,096	72.2	63.3	47.5
16	2,837	46,451	3,942	64,038	77.0	65.5	49.2
17	2,833	49,284	3,932	67,970	81.7	69.1	51.2
18	2,828	52,112	3,920	71,890	86.4	72.2	54.2
19	2,848	54,960	3,906	75,796	91.1	77.0	55.8
20	2,840	57,800	3,900	79,696	95.8	78.5	58.3
21	2,828	60,628	3,888	83,583	100.5	82.0	61.4
22	2,829	63,457	3,876	87,459	105.1	83.4	62.5

注）温度上昇の計算値は吸収エネルギーを下記の熱容量で除した放熱は考慮しない数値を示す。

オイルダンパー熱容量C：　8.32E+05　J/℃
（作動油+接液部鋼材）

表 1.3.8-20　各セットにおける吸収エネルギーと減衰力の推移（1 サイクル当たり）

試験体 3 (2B)

セット	加振波数	吸収エネルギー kJ (kN・m)	(指数)	最大減衰力（kN） 伸び側	(指数)	縮み側	(指数)
1	1波目	495.8	(1.00)	692.8	(1.00)	-667.3	(1.00)
2	7波目	495.1	(1.00)	691.5	(1.00)	-665.8	(1.00)
3	13波目	493.6	(1.00)	690.9	(1.00)	-665.6	(1.00)
4	19波目	493.6	(1.00)	690.8	(1.00)	-664.5	(1.00)
5	25波目	492.8	(0.99)	689.8	(1.00)	-665.6	(1.00)
6	31波目	492.0	(0.99)	689.6	(1.00)	-663.8	(0.99)
7	37波目	491.2	(0.99)	688.3	(0.99)	-662.1	(0.99)
8	43波目	489.6	(0.99)	687.8	(0.99)	-660.8	(0.99)
9	49波目	488.7	(0.99)	686.8	(0.99)	-659.1	(0.99)
10	55波目	487.3	(0.98)	685.9	(0.99)	-658.1	(0.99)
11	61波目	486.5	(0.98)	684.4	(0.99)	-656.6	(0.98)
12	67波目	485.5	(0.98)	683.3	(0.99)	-655.9	(0.98)
13	73波目	484.9	(0.98)	681.8	(0.98)	-653.8	(0.98)
14	79波目	483.7	(0.98)	681.0	(0.98)	-652.5	(0.98)
15	85波目	482.4	(0.97)	679.7	(0.98)	-651.4	(0.98)
16	91波目	481.8	(0.97)	678.9	(0.98)	-649.9	(0.97)
17	97波目	479.5	(0.97)	677.3	(0.98)	-648.0	(0.97)
18	103波目	479.0	(0.97)	675.4	(0.97)	-646.7	(0.97)
19	109波目	478.5	(0.97)	674.4	(0.97)	-645.4	(0.97)
20	115波目	474.3	(0.96)	674.1	(0.97)	-643.7	(0.96)
21	121波目	475.4	(0.96)	672.4	(0.97)	-642.0	(0.96)
22	127波目	474.7	(0.96)	671.8	(0.97)	-640.7	(0.96)

b) 限界加振試験[2B]前後の基本特性の比較

限界加振試験前の常温状態で実施した基本特性 A 試験（出荷検査）と、限界試験直後に高温状態で実施した基本特性 A 試験の結果を比較して以下に示す。図 1.3.8-27、表 1.3.8-21 にＦ－Ｖ特性を比較して示す。また、図 1.3.8-28 に所定振幅での減衰力－変位曲線を比較して示す。

限界試験直後の高温状態（約 100℃）における最大減衰力の変化は、常温下（約 20℃）の初期状態に比べて 3～9%程度の低下率であった。

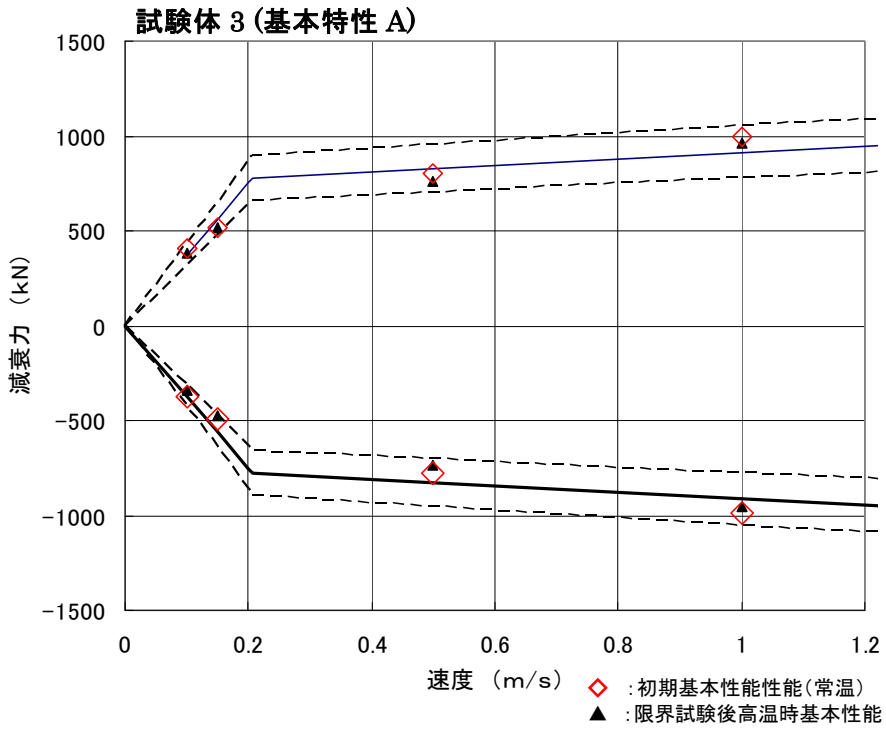
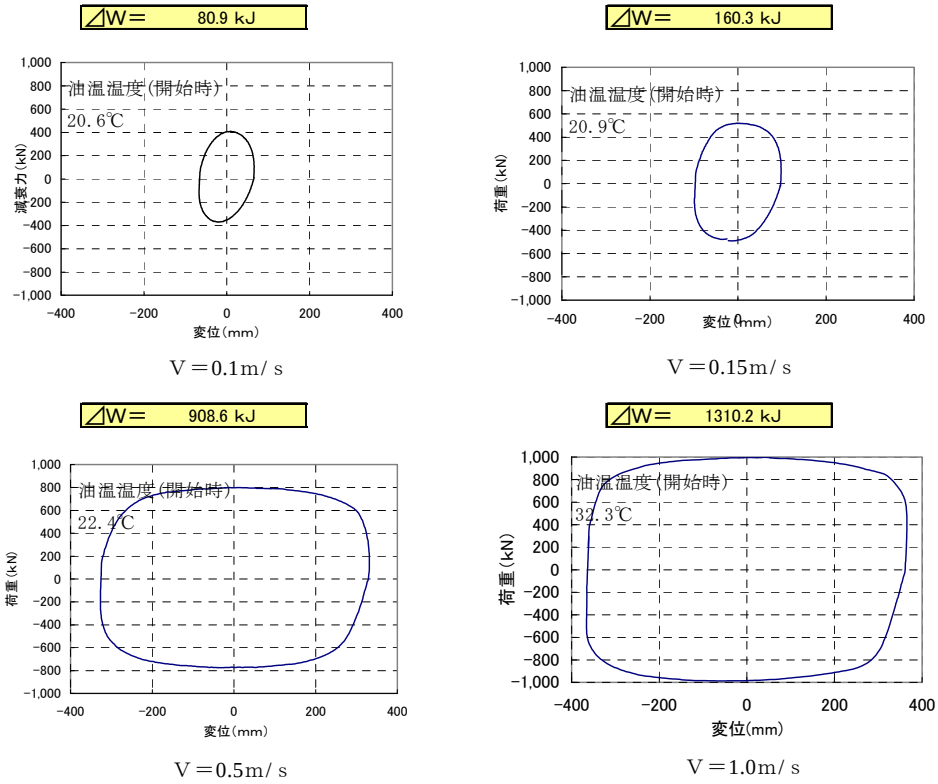


図 1.3.8-27 Ｆ－Ｖ特性（常温―限界試験直後）

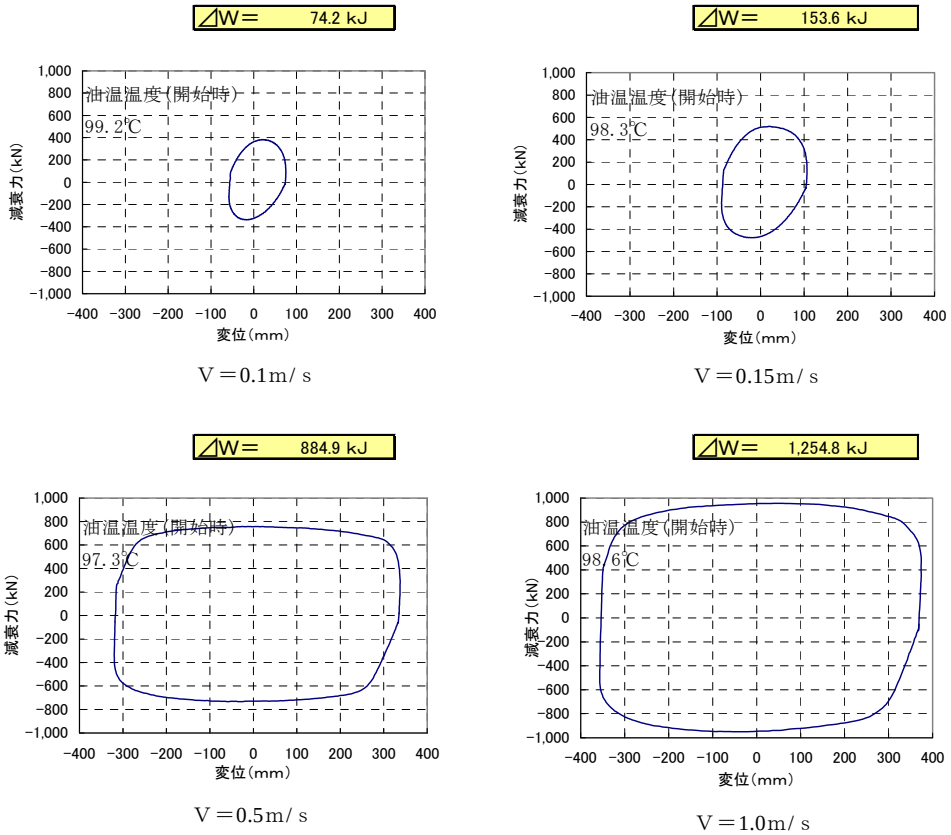
表 1.3.8-21 限界加振試験前後の最大減衰力の比較

試験体 3（基本特性 A）

速度 V (m/s)	減衰力Fd				減衰力F(初期常温)	
	伸び (kN)	(Fd/F)	縮み (kN)	(Fd/F)	伸び (kN)	縮み (kN)
0.1	384.2	(0.94)	−337.7	(0.91)	408.8	−371.3
0.15	518.1	(1.00)	−476.8	(0.97)	520.3	−491.1
0.5	757.9	(0.95)	−732.8	(0.95)	799.1	−774
1	963.2	(0.97)	−950.3	(0.96)	996	−987.4



（限界試験前：常温時）【試験体 3】



（限界試験後：高温）【試験体 3】

図 1.3.8-28 基本特性 A 試験の減衰力－変位曲線の比較（限界試験前後）

c）加振周期特性試験（基本特性 B）の試験結果

常温下で実施した基本特性 B 試験の結果を以下に示す。図 1.3.8-29 に V=20cm/s において周期 2、3、4、5 秒で加振した際の、所定振幅での減衰力－変位曲線を比較して示す。また、表 1.3.8-22 に各周期における最大減衰力と等価減衰係数を示す。油の内部剛性による影響で、加振周期が短くなるにつれて等価減衰係数が小さくなる傾向が見られ、周期 2 秒では周期 5 秒に対して約 5%低下する。

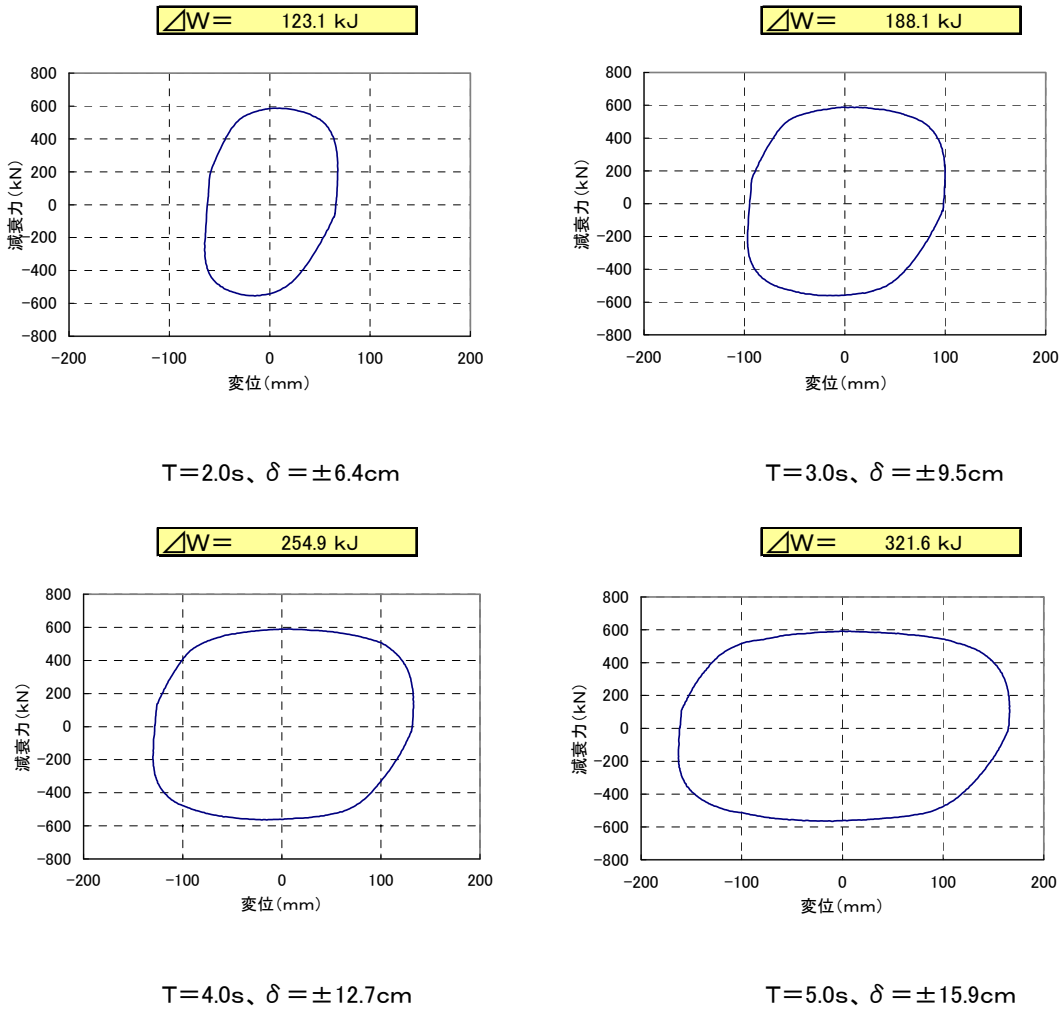


図 1.3.8-29 基本特性 B 試験の減衰力－変位曲線【試験体 3】

表 1.3.8-22 各加振での最大減衰力と等価減衰係数

試験体 3（基本特性 B）

周期	最大減衰力 (kN)				等価減衰係数 (kN・s/cm)	
	伸側	(指数)	縮側	(指数)		(指数)
5	591	1.00	-564.9	1.00	32.22	1.00
4	589.7	1.00	-563.3	1.00	32.03	0.99
3	589.3	1.00	-561.4	0.99	31.68	0.98
2	587.6	0.99	-554.1	0.98	30.45	0.95

1.3.8.3　まとめ

(1) 多数回繰り返し特性

図 1.3.8-30 に多数回繰り返し試験結果について、各試験体の累積変形量（漸増・漸減加振部分を含む）と、累積吸収エネルギーおよび油温上昇量の関係をまとめて示す。また、図 1.3.8-31 に各試験体の累積吸収エネルギーと油温上昇量の関係をまとめて示す。また、図 1.3.8-32 に吸収エネルギーをオイルダンパーの熱容量（作動油+接液部鋼材）で除して求めた油温上昇予想値（放熱無し）と、オイルダンパーの鋼材表面から空気中への熱伝導を考慮して求めた油温上昇予測値（放熱考慮）を実験値と比較して示す。また、図 1.3.8-33 および図 1.3.8-34 に各試験体の油温と最大減衰力・吸収エネルギーの低下率の関係をまとめて示す。これらの結果より、得られた知見は以下である。

・限界加振条件 2B（所定振幅加振部分の累積変形量が約 100m、漸増・漸減加振部分を含む累積変形量が約 150m）の加振による油温上昇量は、試験体 1（2.5MN･s/m）が 73℃（油温 15℃→88℃）、試験体 2（0.8MN･s/m）が 26℃（油温 15℃→41℃）、試験体 3（3.75MN･s/m）が 83℃（油温 19℃→102℃）であった。油温が 100℃を超える試験体もあったが、荷重変位関係の変化は小さく、また、シール部から作動油の滲みだしは見られなかった。
・試験体表面からの空気中への放熱量は少なく、入力エネルギーの大半が油温の温度上昇に反映されているため、累積吸収エネルギー量と油温上昇量の相関は高い。インターバルによる放熱の影響を評価するため、放熱を考慮した油温上昇量の予測値と放熱無しの予測値を比較したところ、加振 90 分間の本実験の放熱量は、試験体 1 が約 11℃、試験体 2 が約 4℃、試験体 3 が約 14℃であり、油温上昇量に比べて放熱量が小さいことがわかる。
・放熱の影響は少なく、累積吸収エネルギーを作動油+接液部鋼材の熱容量で除した油温上昇量の予測（放熱無し）でも実験結果と良い対応をするが、インターバルを設けた本実験においては、放熱を考慮するほうがより精度良く油温上昇量を予測できる。
・多数繰り返し加振による油温の上昇に伴い、最大減衰力と吸収エネルギー量は僅かに低下する傾向が見られる。常温（20℃）に対する最大減衰力の低下率は、油温（100℃）においても伸び側で約 3%、縮み側で約 5%であった。また、1 サイクル当たりのエネルギー吸収量の低下率は、油温（100℃）においても約 5%の低下であった。

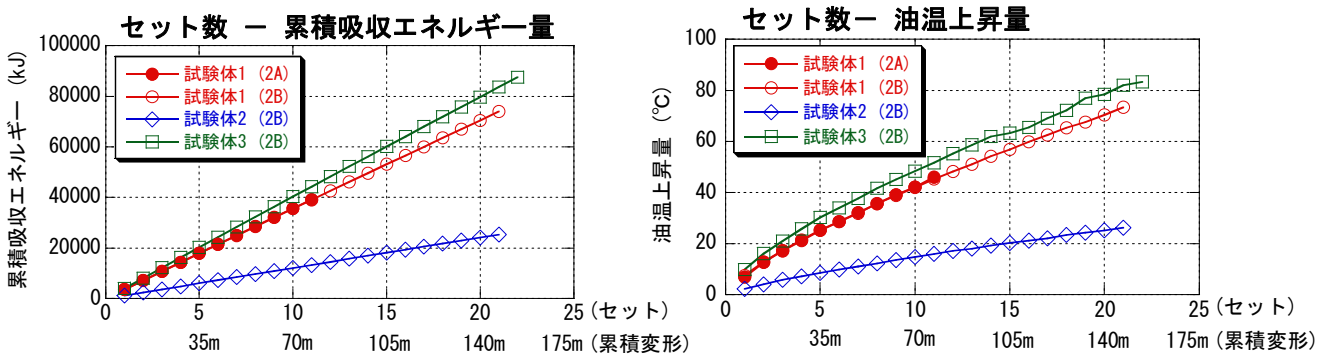


図 1.3.8-30 多数回繰り返し試験結果(累積変形量と累積吸収エネルギー及び油温上昇量の関係)

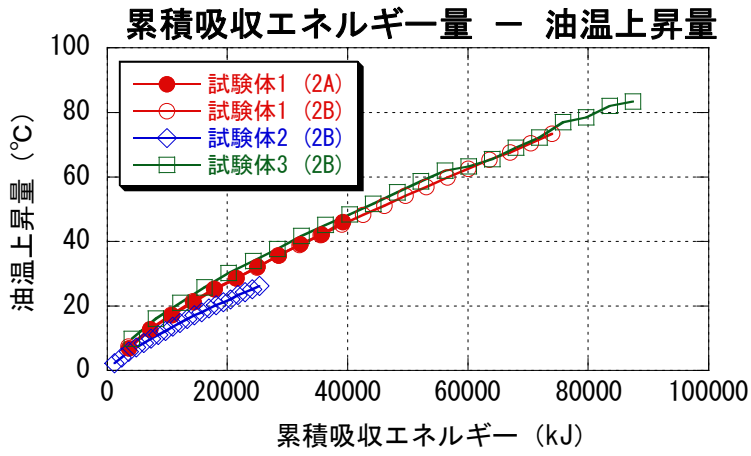


図 1.3.8-31 多数回繰り返し試験結果（累積吸収エネルギーと油温上昇量の関係）

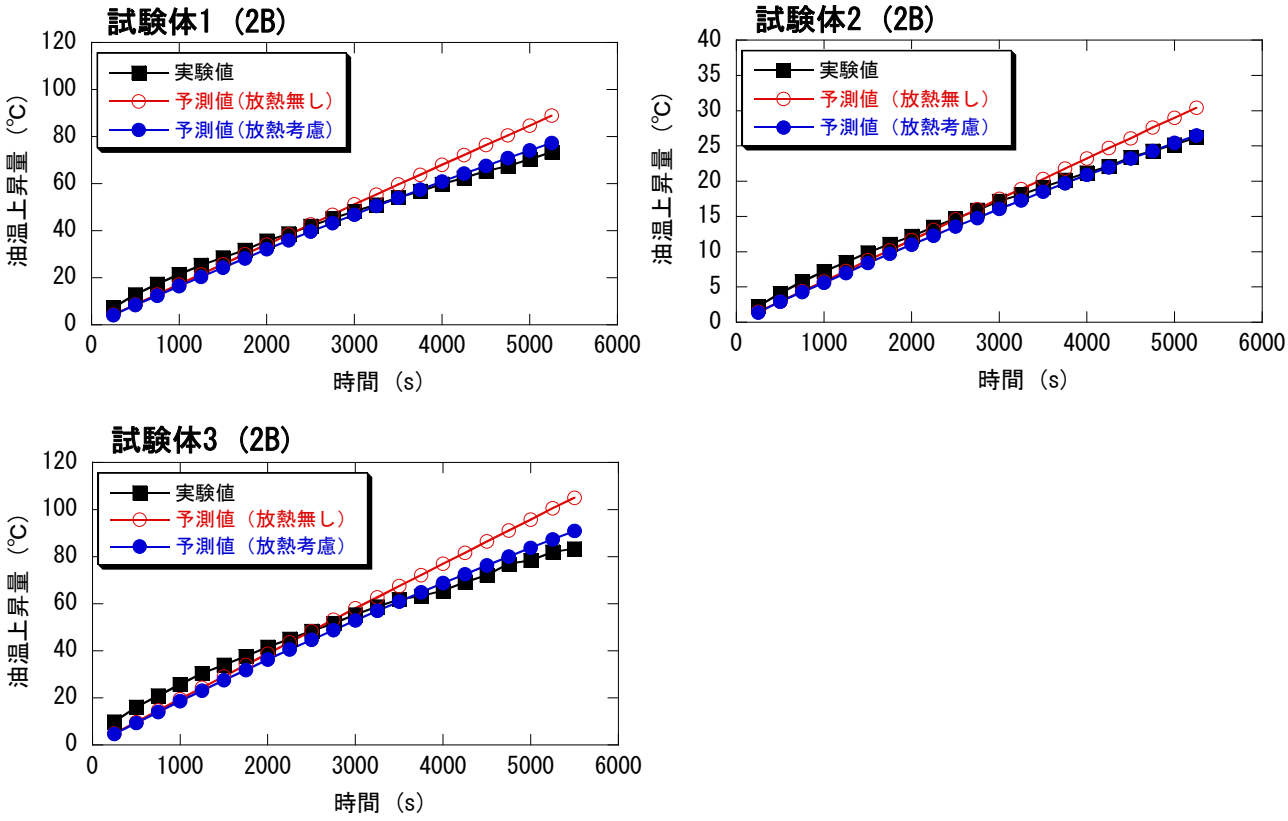


図 1.3.8-32　多数回繰り返し試験結果（油温上昇量の予測値と実験値の比較）

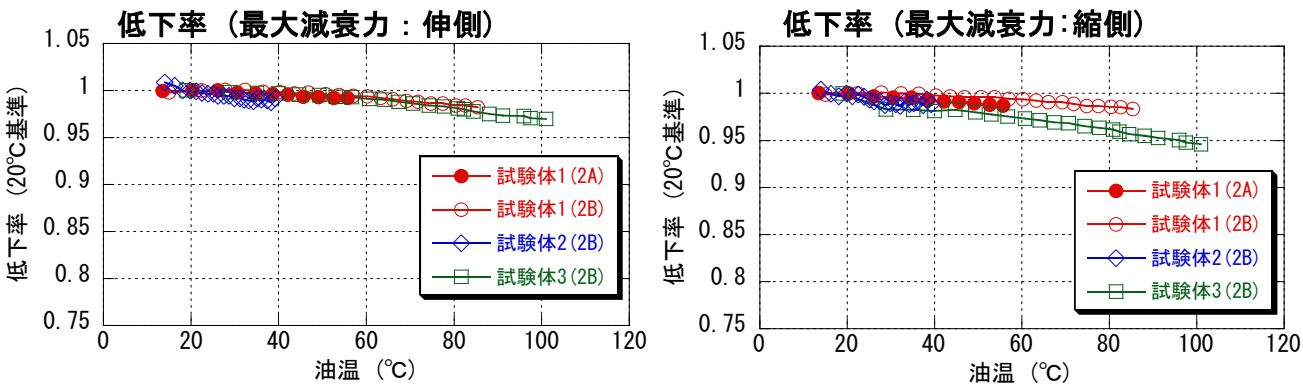


図 1.3.8-33　多数回繰り返し試験結果（油温と最大減衰力の低下率の関係）

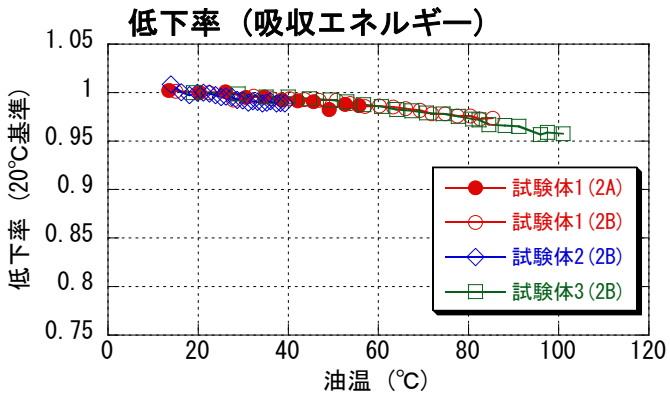


図 1.3.8-34　多数回繰り返し試験結果（油温と吸収エネルギーの低下率の関係）

(2)その他

図 1.3.8-35 に多数回繰り返し試験結果前後および冷却後に実施した基本特性 A 試験（出荷試験）について、初期特性に対する最大減衰力の変化率をまとめて示す。また、基本特性 B 試験（加振周期を変化）について、図 1.3.8-36 に周期 5 秒加振に対する最大減衰力の変化率を、図 1.3.8-37 に周期 5 秒加振に対する吸収エネルギーの変化率をまとめて示す。これらの結果より、得られた知見は以下である。

・多数繰り返し加振直後の高温状態における基本特性（出荷試験の各速度における最大減衰力）の変化は小さく、常温化の初期状態に比べて最大でも 6%程度の低下であった。
・油温が常温状態に戻ると、基本特性（出荷試験の各速度における最大減衰力）は、ほぼ初期状態に復元する。
・加振周期による最大減衰力と等価減衰係数の変化は小さい。加振周期が 2 秒まで短くなっても、最大減衰力（伸び側）はほとんど変化しないが、最大減衰力（縮み側）と等価減衰係数では 3～5%程度の低下が見られる。作動油の内部剛性の影響により、加振周期が短く、減衰係数が大きなダンパーで低下率が大きくなる。作動油の内部剛性の影響を考慮するためには、オイルダンパーの解析モデルは Maxwell モデルとするのが望ましい。

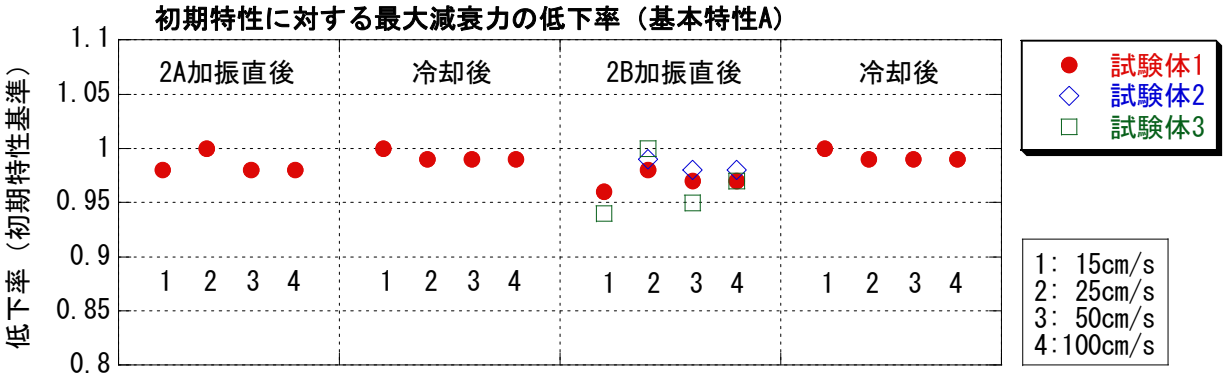


図 1.3.8-35 多数回加振後および冷却後の初期特性に対する最大減衰力の変動（基本特性 A 試験）

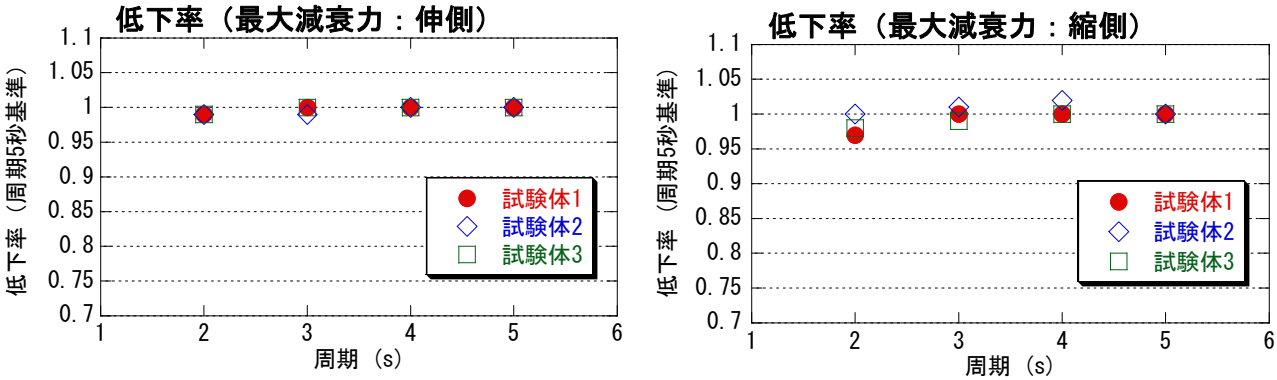


図 1.3.8-36 加振周期による最大減衰力の変化率（基本特性 B 試験）

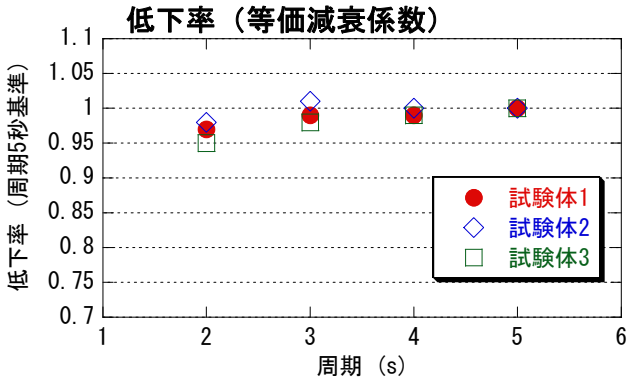


図 1.3.8-37 加振周期による等価減衰係数の変化率（基本特性 B 試験）

(3)今後の課題

加振中における放熱量は小さいため、インターバルを設けた加振の影響は少ないと思われるが、今後の課題としてインターバル無しでの連続加振と地震応答波加振の実施が挙げられる。また、オイルシールとして、フッ素系樹脂よりも限界温度が低いニトリルゴムを用いたダンパーについても、限界加振を実施するのが望ましい。また、伸び側と縮み側で油剛性が異なるユニフロー型の免震ダンパーのエネルギー吸収量を更に精度良く評価するために、伸び側と縮み側の特性を解析モデルに反映することが考えられる。

1.3.9　粘性ダンパー

本節では、粘性ダンパーの多数回繰り返し変形に対する特性の変動について、免震建築物の安全性検証方法に関する国土交通省基準整備に資する知見を取得するための調査について述べる。粘性ダンパーは国土交通省の免震材料に関わる基準において流体系減衰材（作動油を用いないもの）として位置づけられるものである。本調査においては粘性ダンパーを代表する減衰部材として、免制震ディバイス社／THK 社・AT 式増幅機構付き減衰装置－減衰こま（以下、RDT と略称することがある）を調査対象として選択した。

1.3.9.1　実験計画

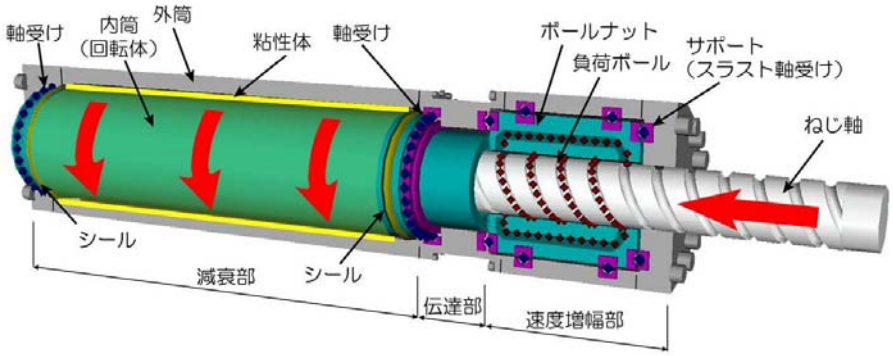
(1) 実験目的と背景

1) 実験目的

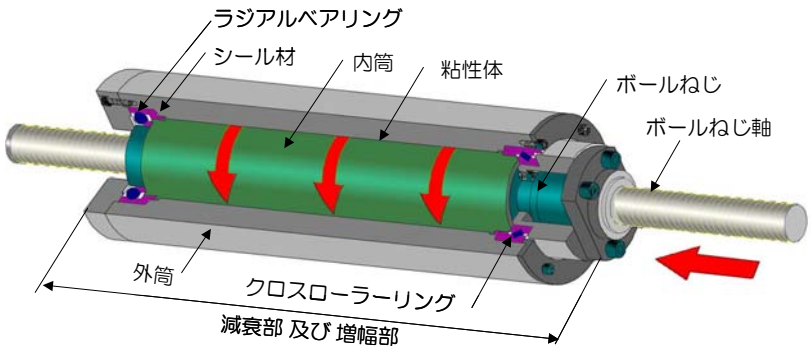
粘性ダンパーの多数回繰り返し変形に対する特性の変動について調査を行い、免震建築物の安全性検証方法に関する国土交通省基準のうち流体系減衰材（作動油を用いないもの）に関わる部分の整備に資する知見を取得する。

2) 調査対象部材の構成

調査対象部材の概要図を図 1.3.9-1 に示す。



a) RDT-AT-10 万 cst・RDT-AT-30 万 cst



b) RDT-AT-Short

図 1.3.9-1 調査対象部材構成概要図

調査対象部材は、免震層の相対変形による直線運動を、ボールねじを介して回転運動に変換し、直線運動の速度を円周方向に増幅させる機構を有している。減衰部の内筒と外筒の隙間には粘性体が充填されており、増幅された円周方向運動により粘性体に大きなせん断歪速度が発生することで、減衰部材として大きな減衰力が得られるものである[1.3.9-1)]。増幅率 S は、ボールねじのピッチ（リード L_d と称される）と、内筒外径 D_n から式（1.3.9-1）で与えられる。軸方向減衰力は軸速度に対して S の二乗で増幅される関係をもつ。

$$S=\pi \cdot D_n / L_d \qquad (1.3.9\text{-}1)$$

3) 既往の研究

a) 粘性体の温度特性

調査対象部材には、粘性材料の中でも粘度の温度依存性が比較的小さいとされているジメチルシリコーンオイルが用いられている。粘性体の温度と粘度の関係を図 1.3.9-2 に示す[1.3.9-1)]。-10℃から 50℃の範囲で調べられている。温度が高くなると粘度は減少する。例えば 50℃の粘性体の動粘度は 25℃の粘性体の対し 0.61 倍である。

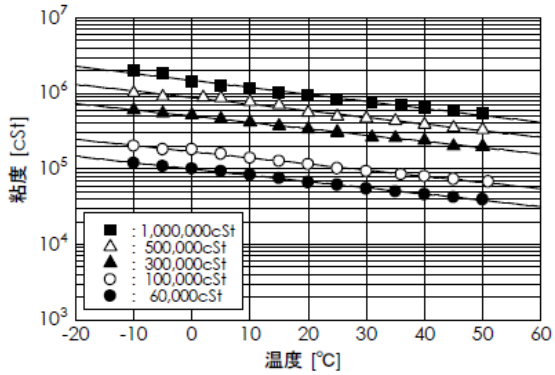


図 1.3.9-2　温度依存性[1.3.9-1)]

粘性体の温度上昇については、調査対象部材の限界性能を検証するための動的加振試験において検討されている[1.3.9-2)]。免震用の試験体（ストローク±750mm、30 万 cSt 型、速度増幅倍率 12.0）に対し、周期 3～4 秒、最大速度：40～150cm/s、サイクル数 4 の漸増漸減正弦波（1 サイクルで漸増、定常 2 サイクル、 1 サイクルで漸減）における加振前後の粘性体温度が計測されている。図 1.3.9-3 に累積吸収エネルギーのピーク値と粘性体の温度上昇を、図 1.3.9-4 に示す検討モデルと表 1.3.9-1 に示す材料諸元により熱容量を算出した結果と併せて示す。理論値／試験値は 0.94～1.68 の範囲にある。大部分の発熱量が速やかに周辺鉄部へ伝わるために温度上昇は小さくなることが解析的に導かれている。

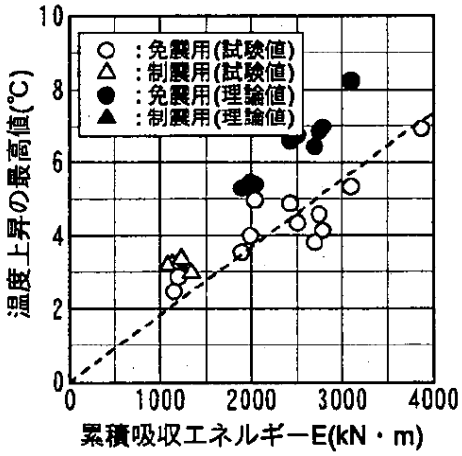


図 1.3.9-3　累積吸収エネルギーと温度上昇値 [1.3.9-2)]

表 1.3.9-1　材料諸元

諸元		外筒	内筒	粘性体	単位
材料		鉄	鉄	シリコーン	
比熱 s		486	486	1488	J/(kg·K)
比重		7.85	7.85	0.978	
熱伝導率		83.5	83.5	0.159	W/(m·K)
容積	免震用	49153	31358	2943	cm^3
	制震用	44285	28860	3084	
質量 m	免震用	386	246	2.9	kg
	制震用	348	225	3.0	
質量×比熱 [m × s]	免震用	188951	119635	4277	J/K
	制震用	188951	109341	4482	

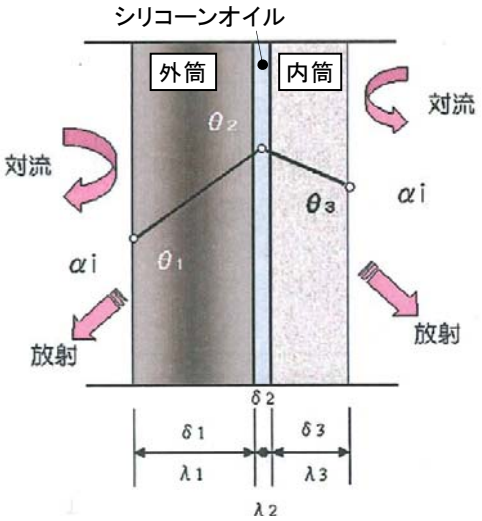
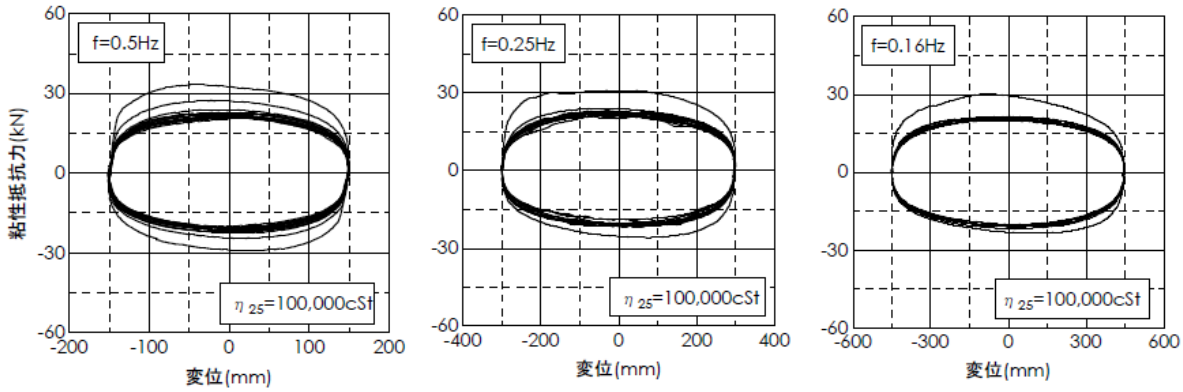


図 1.3.9-4　検討モデル

b) 繰り返し特性

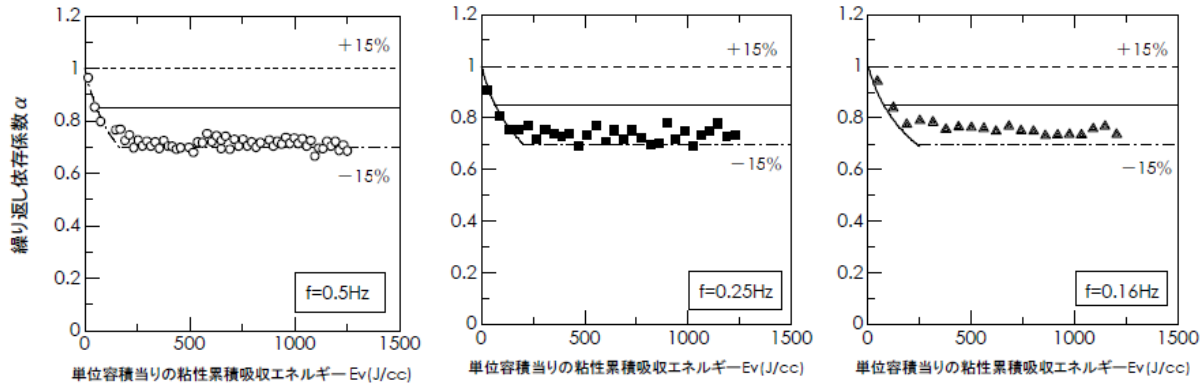
繰り返し回数と抵抗力の関係については、小規模試験体 （型番：RDT4-500S 相当）を用いた調査結果が報告されている [1.3.9-3)~ 1.3.9-5)]。粘性体粘度 10 万 cSt 型に関する試験によって得られた荷重変形関係を図 1.3.9-5 に示す。試験条件は最大速度が同等の 3 条件（(a)加振振動数 0.5Hz、振幅 150mm、(b)0.25Hz、300mm、(c)0.16Hz、450mm）である。図のとおり、連続加振により抵抗力は低下する。この抵抗力の低下は、せん断歪速度の増大とともに、粒子間の相互作用が急速に弱まるため粘度が低下するためであり、粘性体の分子構造自体の破壊により生じるものではないとされており、分子間の応力緩和がもとの状態にもどると減衰性能は回復する。



(a) 0.5Hz　　(b) 0.25Hz　　(c) 0.16Hz

図 1.3.9-5 荷重変形関係（粘性体粘度 10 万 cSt 型）

図 1.3.9-6 は上記試験における粘性抵抗力の繰り返し依存特性を、調査対象部材の抵抗力基準式における繰り返し依存係数 α の変動としてプロットしたものである。α＝0.85 が基準値を定める係数となる。図は粘性体が充填されている容積あたりの粘性累積吸収エネルギー（以下この項では、単位容積粘性エネルギー）の関数として示されている。繰り返しの初期で粘性抵抗力が急激に低減し、α＝0.7225(=0.85×0.85)に至った後は一定値を保つ特性が提示されている。評価範囲は単位容積粘性エネルギー1200J/cc 程度までである。粘性体粘度 30 万 cSt 型についても同様の検討（試験条件は (a)加振振動数 0.5Hz、振幅 80mm、(b)0.25Hz、160mm、(c)0.16Hz、240mm）が行われ、10 万 cSt 型、30 万 cSt 型それぞれについて評価式が求められている。



(a) 0.5Hz　　(b) 0.25Hz　　(c) 0.16Hz

図 1.3.9-6 繰り返し依存係数（粘性体粘度 10 万 cSt 型）

c) まとめ

調査対象部材の多数回繰り返し変形に対する特性の変動に関する既往の知見は以下のようにまとめられる。粘性ダンパーの繰り返しによる性能変動に影響を与える因子として、粘性体の温度特性および粘性体粒子間の相互作用の変化に伴うとされる繰り返し依存性が考えられる。

・粘性体の温度特性は-10℃～50℃の範囲について調べられており、粘性体粘度は温度の上昇により低下する。

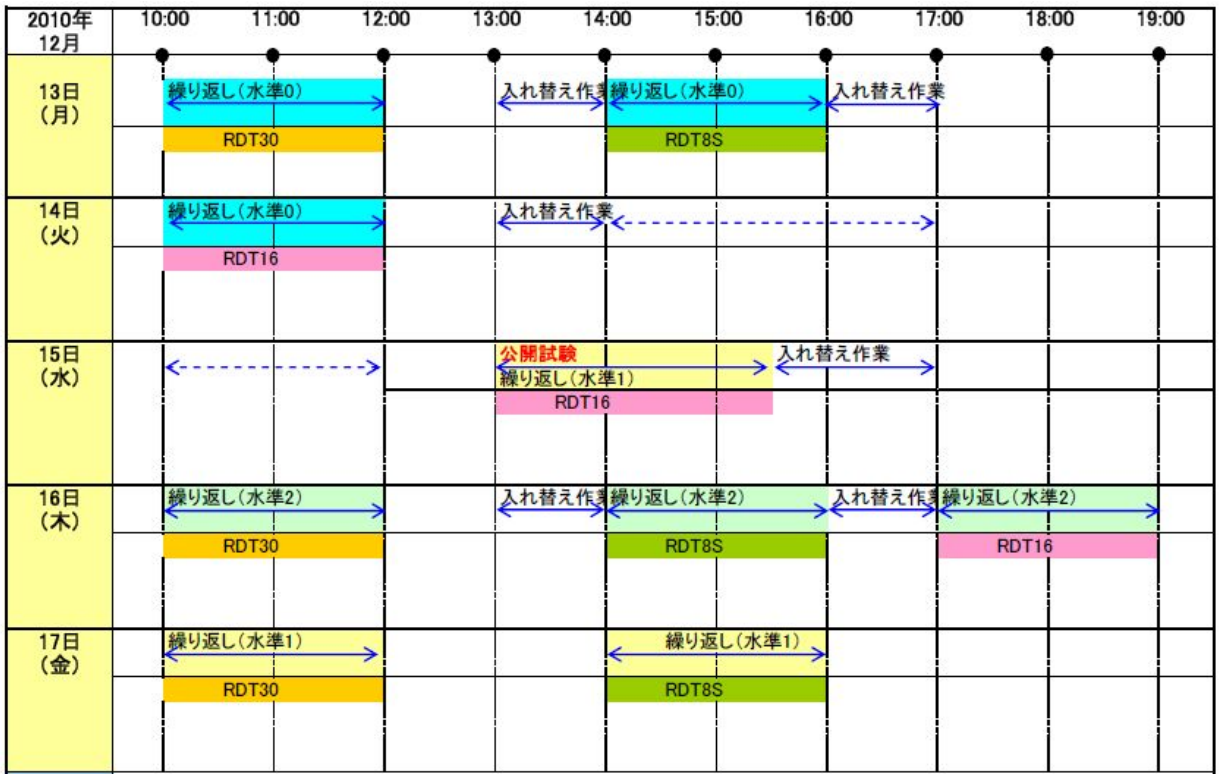
・内部に充填された粘性体の温度上昇は、周辺鉄部への熱伝導によって抑制される。4 サイクル程度の繰り返し試験について解析的に説明が行われている。

・繰り返しに伴う粘性抵抗力の低下は、単位容積粘性エネルギーの関数として定式化されており、評価範囲は単位容積粘性エネルギー1200J/cc 程度までである。

(2) 実験日時および場所

実験は、平成 22 年 12 月 13 日～12 月 17 日に、株式会社免制震ディバイス技術センター（栃木県下野市仁良川１７２６番地）において実施した。実験実施スケジュールは表 1.3.9-2 に示すとおり（試験体名、試験条件名は後述のとおり）である。

表 1.3.9-2 実験実施スケジュール



(3) 試験体

調査対象部材の免震材料認定は、MVBR-0387、0221、0222 の 3 編に分かれているため、各認定に該当する製品から 1 基ずつ、計 3 基の試験体を抽出した。試験体は部材認定リストの実機製品とするが、使用可能な加力装置能力の制約から、抵抗力の基準値が 300kN 以下の製品を選択した。すなわち、実験を実施する装置は、RDT8-500S、RDT16-500、および RDT30-750　各１基である。以下、それぞれ、RDT8 試験体、RDT16 試験体、RDT30 試験体と呼称する。

各試験体の諸元を表 1.3.9-3 に示す。

表 1.3.9-3 試験体諸元

試験体名		RDT8 試験体	RDT16 試験体	RDT30 試験体
型番		RDT8-500S	RDT16-500	RDT30-750
認定番号		MVBR-0387	MVBR-0221	MVBR-0222
認定名称		RDT-AT-Short	RDT-AT-10 万 cst	RDT-AT-30 万 cst
装置全長	mm	1317	1756	1990
有効ストローク	mm	500	500	750
ねじ軸径	mm	40	50	80
リード	mm	40	50	40
内筒外径	mm	108	148	195
抵抗部有効長さ	mm	525	815	490
せん断隙間	mm	2.5	3	3
粘性体動粘度	cSt	100,000（25℃）	100,000（25℃）	300,000（25℃）
粘性体充填容積	cc	456	1160	914
バッファ容量	cc	67	172	136
抵抗力基準値	kN	80.2（1.5m/s）	159.6（1.5m/s）	299（1.5m/s）
質量	Kg	96	246	475

(4) 試験装置

実験には、前記技術センターに設置されている 30t 試験機を用いた。

実験に当たっては、クレビスを介して試験体両端を試験フレーム内に設置し、試験体には軸方向力のみが加わるようにした。試験体と試験機の接触部分に断熱板（アルミニウムカーボネート系断熱板、熱伝導率 0.3W/m/K 程度、厚さ 10mm）を挿入した。

加力はダイナミックアクチュエータの変位制御により実施した。各種計測機器により変位、抵抗力および試験体の温度を計測し、速度-荷重関係のデータを取得した。

30t 試験機の繰り返し試験時最大能力を表 1.3.9-4 に示し、外観を図 1.3.9-7 に示す。

表 1.3.9-4　試験機の能力（繰り返し実験時）

試験機名称	項　目	最大値
30t 試験機	最大荷重	±300kN
	ストローク	±400mm
	最大速度 （繰り返し実験時）	50cm/s

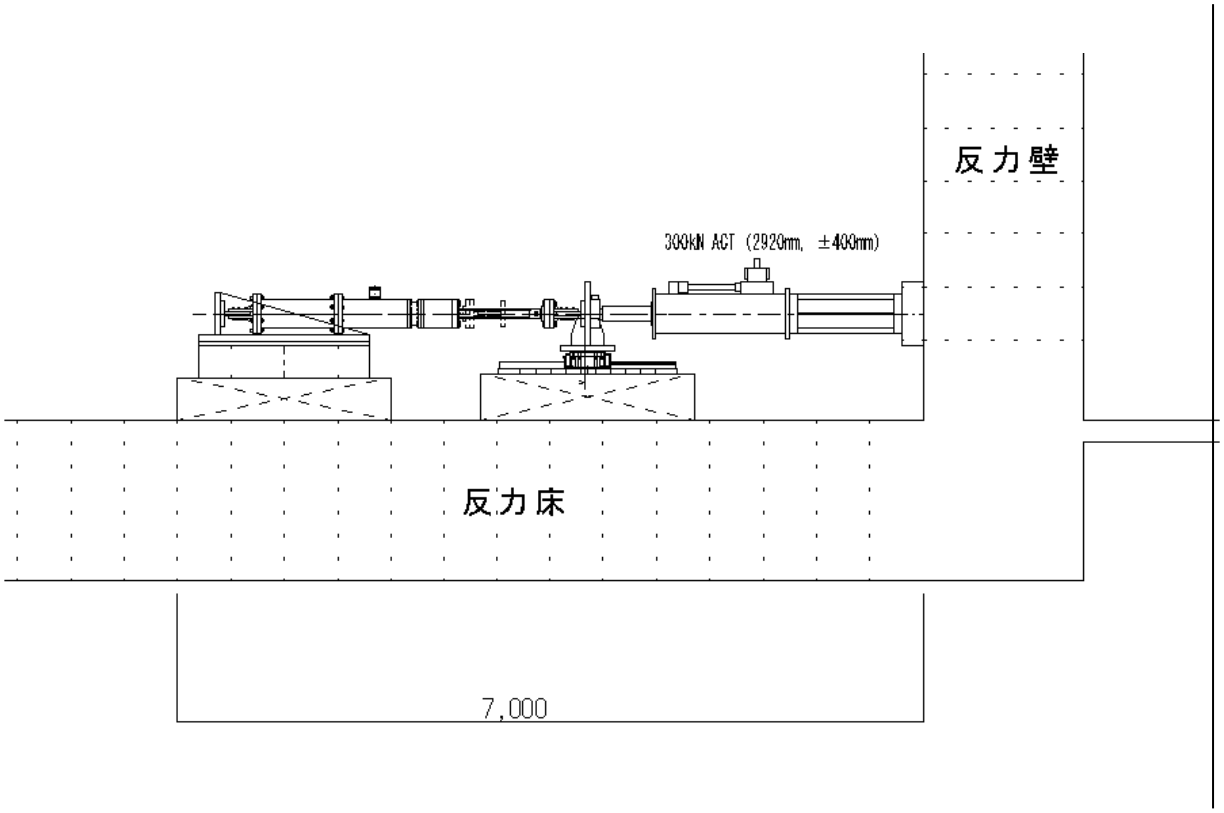


図 1.3.9-7　試験機の外観

(5) 計測項目と計測方法

1) 計測システム

計測項目は水平荷重、水平変位および粘性体温度とした。計測システムの概要を図 1.3.9-8 に示す。インターバル時および試験体冷却時には温度計測のみ実施した。計測サンプリングは加力時およびインターバル時には 100Hz、試験体冷却時は（1 回/5 分）とした。

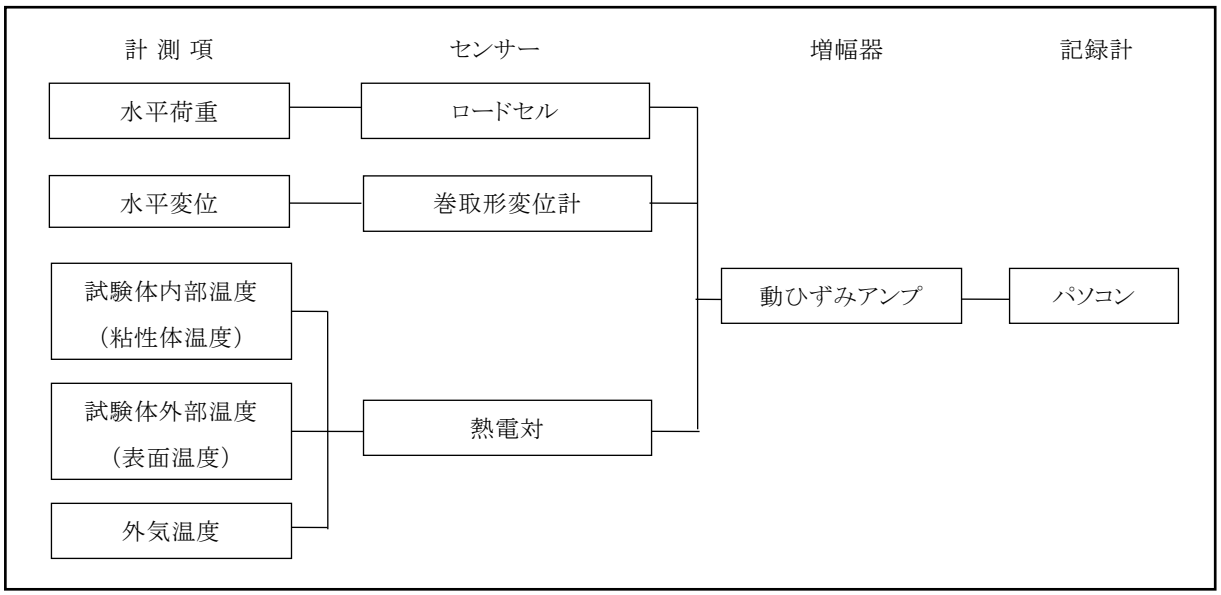


図 1.3.9-8 計測システム

2) 計測機器の詳細および取付位置

計測機器の詳細を表 1.3.9-5 に示し、各機器の取付位置を図 1.3.9-9 に、熱電対取付位置詳細を試験体毎に図 1.3.9-10~12 に示す。

表1.3.9-5　計測機器一覧

計測項目	検出器(センサー)	容量	機器番号	数量	記号	備考
水平荷重	引張･圧縮型荷重計	3,000kN	—	1	LH1	
試験体ストローク量	巻取り形変位計			1	DH1	
全体変位	巻取り形変位計 アクチュエータ FB			1	DH6	
クレビス変位 ※1	ひずみゲージ式	25mm	CDP-25	4	DH2,3,4,5	モニター用
内部温度 （粘性体温度）	熱電対	—	T 型	3	TM1・2・3	
外部温度 （表面温度）				6	TM4・5・6 7・8・9	
外気温度				1	TM10	

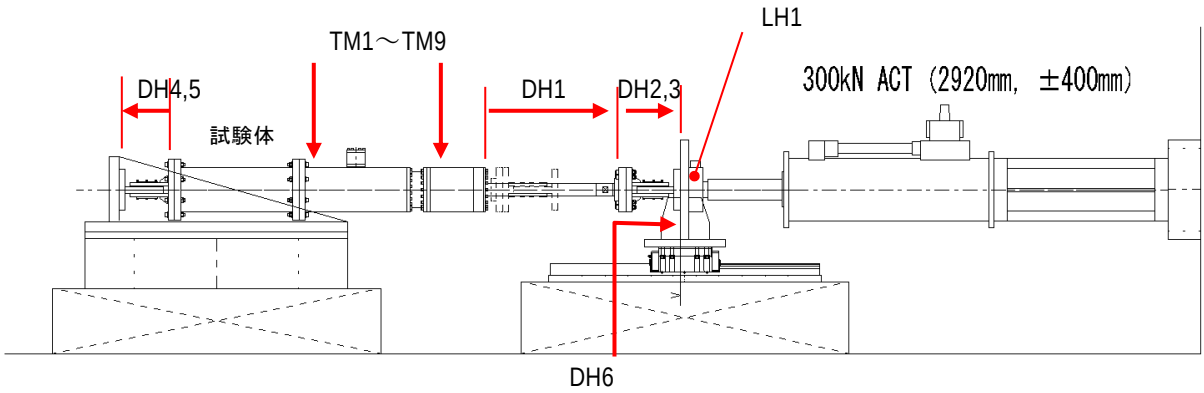


図 1.3.9-9 計測点位置図

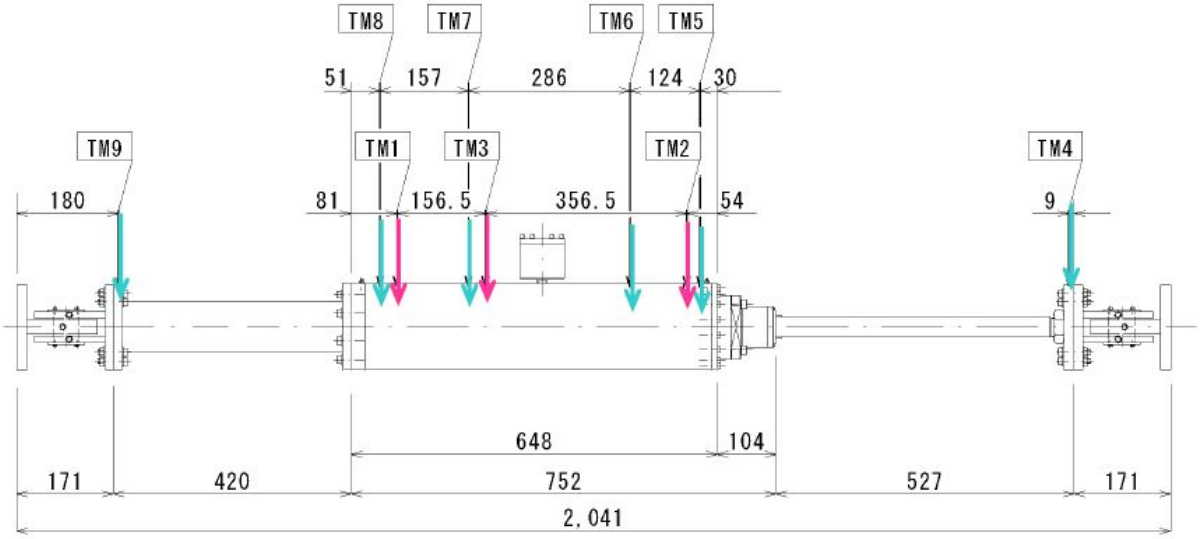


図 1.3.9-10　RDT8 試験体熱電対位置図

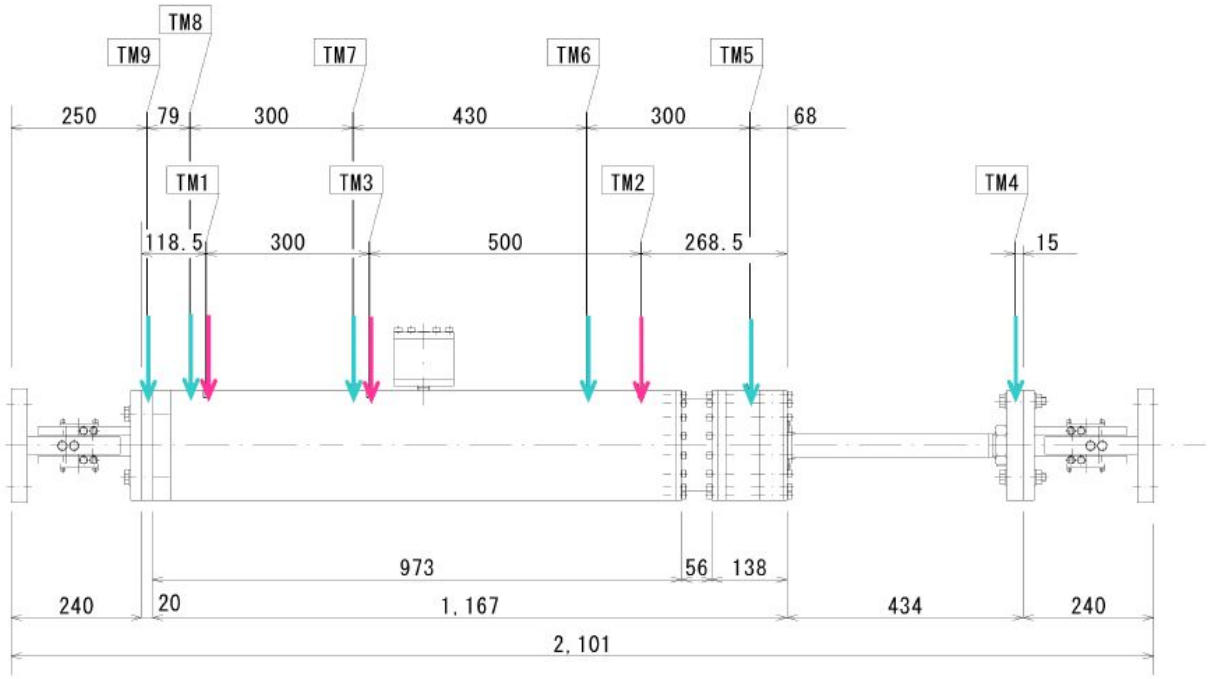


図 1.3.9-11　RDT16 試験体熱電対位置図

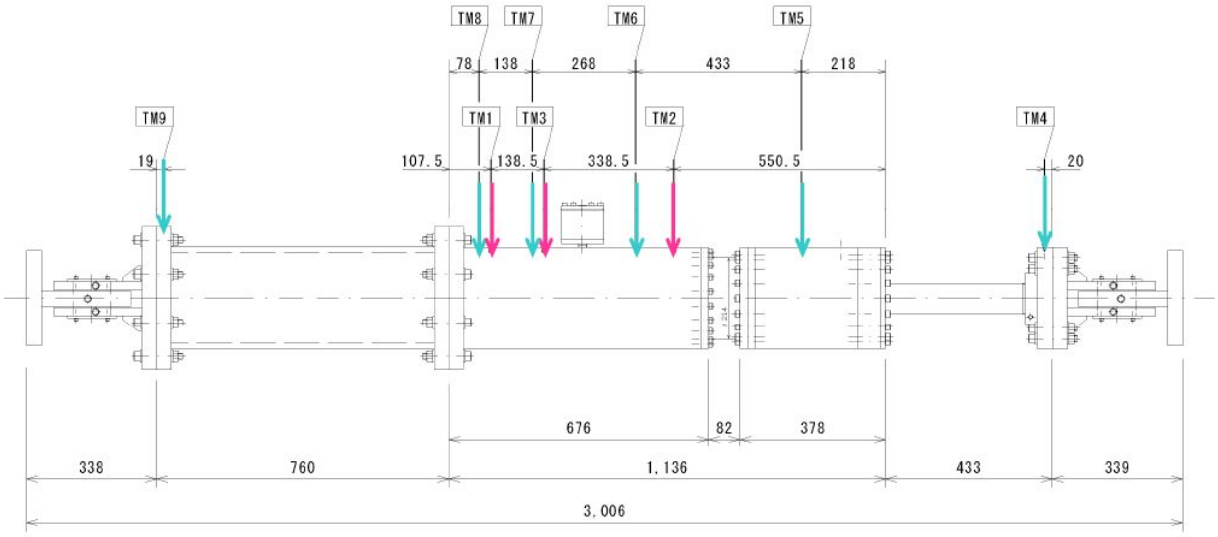


図 1.3.9-12　RDT30 試験体熱電対位置図

(6) 実験方法および実験ケース

1) 基本性能試験

多数回高速繰り返し実験の各水準の直前および直後に実施した。試験条件を表 1.3.9-6 に示す。入力波形は図 1.3.9-13 に示すように前後のテーパー波を含めて 5 サイクルの正弦波とした。試験は環境温度下で実施した。変位振幅は、試験体ストローク量（＝DH1）とした。試験結果とし得られた抵抗力は温度補正により 20℃に換算して評価した。温度補正係数を試験体毎に図 1.3.9-14~図 1.3.9-16 に示す。

表1.3.9-6　基本性能試験の条件

試験名称	加振波形	振動数f (Hz)	周期 (sec)	振幅r (mm)	最大速度V (mm/s)
基本性能試験	正弦波	0.5	2.0	63.7	200

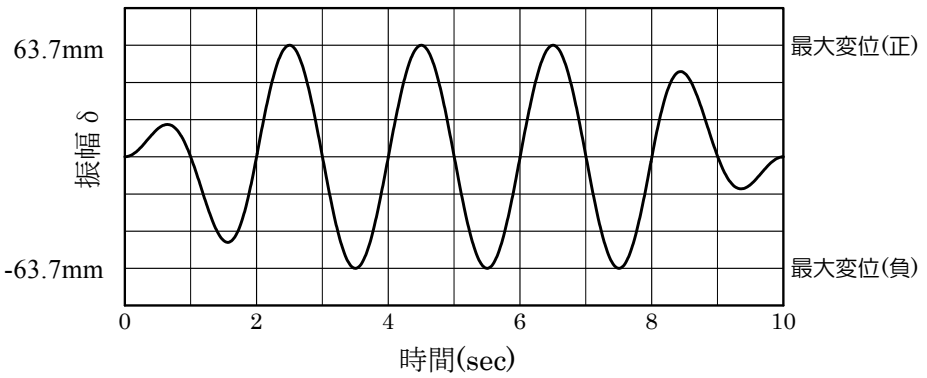


図1.3.9-13　基本性能試験入力波形

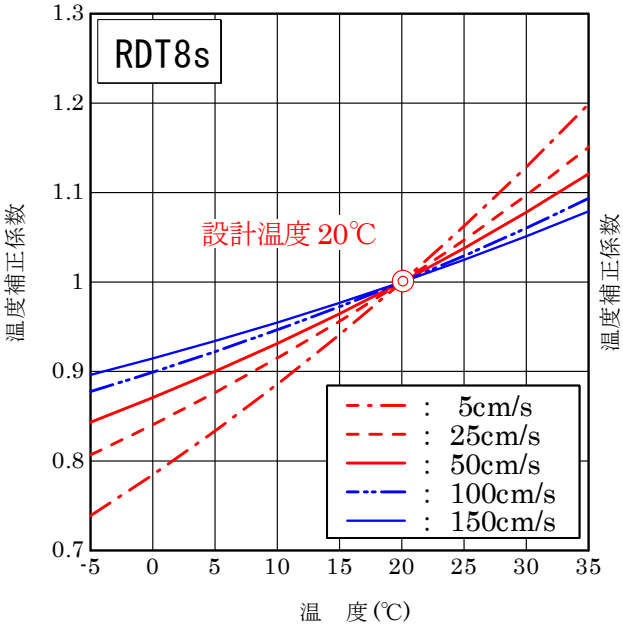


図 1.3.9-14　温度補正係数（RDT8 試験体）

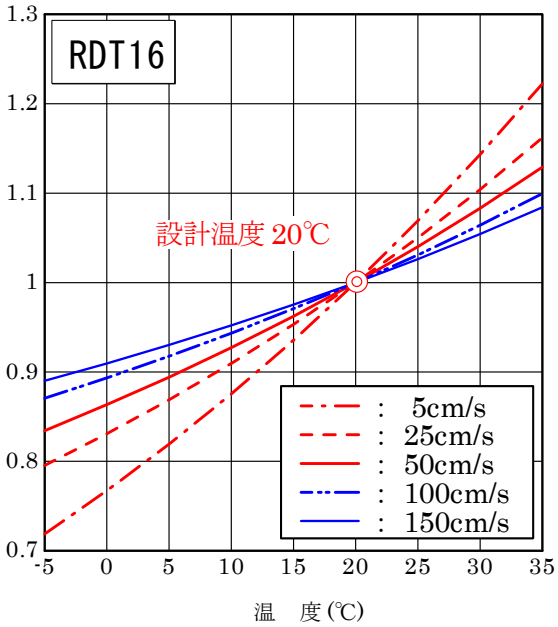


図 1.3.9-15　温度補正係数（RDT16 試験体）

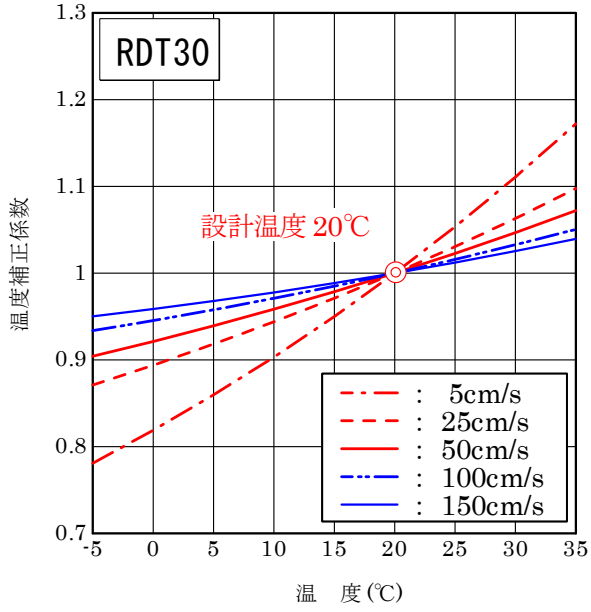


図 1.3.9-16　温度補正係数（RDT30 試験体）

2) 多数回高速繰り返し実験

3 試験体とも同一条件の高速繰り返し実験を行った。1 加振（以下、1 セット）を想定される長周期地震動による応答 1 回分を上回る変位履歴と位置づけ、第Ⅱ部における試験方法の提案に関する記述を参考にして、1 セットの累積変形量が 50m となるまで加振を継続した。加振変位振幅を実験パラメータとし、3 水準設定した。加振変位波形は正弦波、加振周期は 4 秒とし、制御信号をアクチュエータのストローク量（すなわち全体変形（＝DH6））として与えた。同一条件の加振を 3 セットずつ行った。セット間には 10 分のインターバルを設けた。実験は環境温度下で実施した。実験条件を表 1.3.9-7 に示す。

波形は図 1.3.9-17 に示すように連続の正弦波とし、一連の加振の前後にそれぞれ 1 サイクルテーパー波を入力した。

次の水準の実験に移行する場合には、20 時間程度以上実験棟内に放置し、試験体内部の粘性体温度が室温程度に低下したことを確認した後に実施した。

表1.3.9-7　多数回高速繰り返し実験条件

水準		変位振幅 (±mm)	周期 (sec)	振動数 (Hz)	最大速度 (cm/s)	繰り返し数 (回)	継続時間 (sec)	セット数 (回)	累積変位 (m)
0	標準	200	4	0.25	31.4	63	252	3	50.4
1	大変位	300	4	0.25	47.1	42	168	3	50.4
2	小変位	100	4	0.25	15.7	125	500	3	50.0

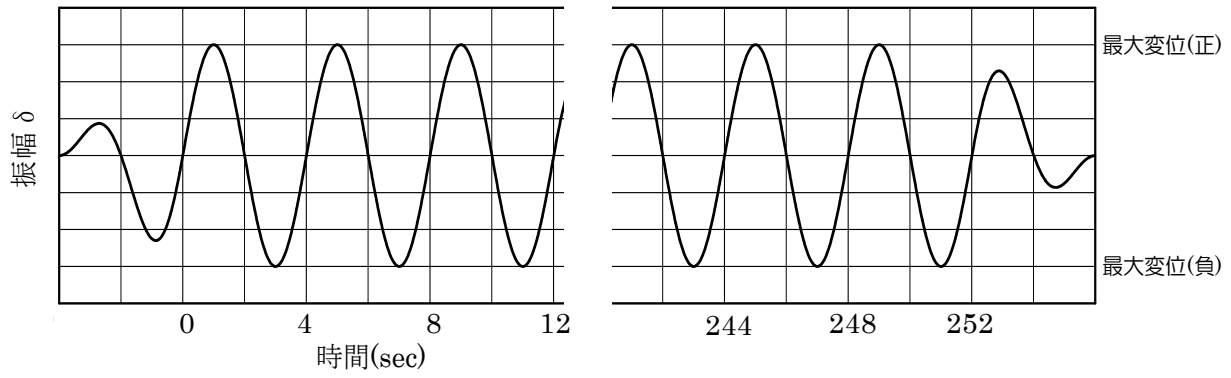


図1.3.9-17　多数回高速繰り返し実験入力波形（時間軸は水準0の場合を表示）

1.3.9.2 実験結果

(1) 製品試験

調査対象の試験体が、免震材料認定に適合するものであることを確認するために製品試験を実施した。

1) RDT8 試験体

寸法試験結果を表 1.3.9-8 に、水平特性試験結果を図 1.3.9-18 および表 1.3.9-9 に示す。RDT8 試験体は免震材料認定に適合するものであることが確認できた。

表 1.3.9-8　RDT8 試験体寸法試験結果

検査項目	基準値 (mm)	実測値 (mm)	許容値(mm)	合否
装置全長	1579.0	1580.0	±5	合格
本体長さ	752.0	752.1	±2.0	合格
限界ストローク(引張)	535.0	536.0	±5	合格
限界ストローク(圧縮)	535.0	537.0	±5	合格
フランジ厚　ねじ軸側	18.0	18.0	±0.8	合格
フランジ厚　減衰部側	25.0	25.0	±0.8	合格
外筒外直径	156.0	155.8	±1.2	合格
外筒内直径	113.00	113.02	±0.1	合格
内筒外直径	108.00	107.99	±0.1	合格
有効長さ	525.0	525.0	±0.5	合格
せん断隙間	2.50	2.52	±0.3	合格

表 1.3.9-9　RDT8 試験体水平特性試験結果

加振パラメータ	振動数	速度	振幅	基準値※1	実験結果						判定値 (Pn'/Pn)	合否
					減衰力	温度	温度補正係数	繰り返し依存係数	温度補正後	繰り返し補正後※2		
				Pn	F	T	β	α'	減衰力	減衰力Pn'		
	Hz	cm/s	mm	KN	kN	℃	−	−	kN	kN		
NO.1	0.5	25.0	79.5	43.9	47.4	23.1	1.03	0.92	48.8	45.1	1.03	合格
NO.2	0.5	50.0	159.2	57.2	54.7	22.9	1.02	0.84	55.7	56.4	0.99	合格
NO.3	0.5	100.0	318.3	71.5	56.5	23.7	1.02	0.72	57.8	68.2	0.95	合格

※1　Pn = 1.16 (0.85･Qv + 2.2)　ここに、Qv:粘性抵抗力

※2　Pn' = Pn(温度補正後) × (0.85 / α')

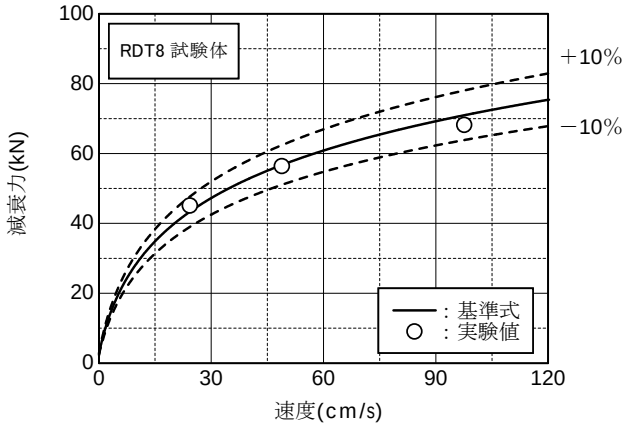


図 1.3.9-18　RDT8 試験体水平特性試験結果

2) RDT16 試験体

寸法試験結果を表 1.3.9-10 に、水平特性試験結果を図 1.3.9-19 および表 1.3.9-11 に示す。RDT16 試験体は免震材料認定に適合するものであることが確認できた。

表 1.3.9-10　RDT16 試験体寸法試験結果

検査項目	基準値 (mm)	実測値 (mm)	許容値(mm)	合否
装置全長	1756.0	1759.0	±5	合格
増幅部長さ	138.0	138.1	±1.2	合格
伝達部長さ	56.0	56.0	±0.8	合格
減衰部長さ	973.0	973.1	±2.0	合格
限界ストローク(引張)	535.0	536.0	±5	合格
限界ストローク(圧縮)	530.0	525.0	±5	合格
フランジ厚　ねじ軸側	30.0	30.0	±0.8	合格
フランジ厚　減衰部側	34.0	34.0	±0.8	合格
外筒外直径	202.0	202.2	±1.2	合格
外筒内直径	154.00	154.02	±0.1	合格
内筒外直径	148.00	148.02	±0.1	合格
有効長さ	815.0	815.0	±0.5	合格
せん断隙間	3.00	3.00	±0.3	合格

表 1.3.9-11　RDT16 試験体水平特性試験結果

加振パラメータ	振動数	速度	振幅	基準値※1	実験結果						判定値 (Pn'/Pn)	合否
					減衰力	温度	温度補正係数	繰り返し依存係数	温度補正後	繰り返し補正後※2		
				Pn	F	T	β	α'	減衰力	減衰力Pn'		
	Hz	cm/s	mm	KN	kN	℃	−	−	kN	kN		
NO.1	0.5	5.0	15.9	35.7	47.5	11.5	0.860	0.99	41.2	35.4	1.00	合格
NO.2	0.5	10.0	31.8	53.7	71.9	11.6	0.878	0.98	63.5	55.1	1.03	合格
NO.3	0.5	20.0	63.7	76.7	99.0	12.0	0.901	0.95	89.5	80.1	1.04	合格

※1　Pn = 1.03 (0.85･Qv + 2.7)　ここに、Qv:粘性抵抗力

※2　Pn' = Pn(温度補正後) × (0.85 / α')

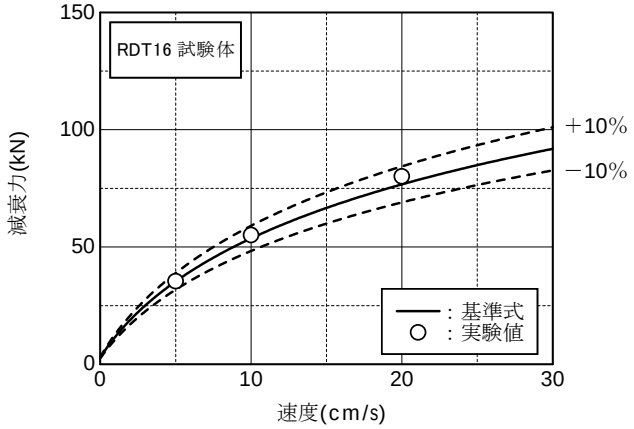


図 1.3.9-19　RDT16 試験体水平特性試験結果

3) RDT30 試験体

寸法試験結果を表 1.3.9-12 に、水平特性試験結果を図 1.3.9-20 および表 1.3.9-13 に示す。RDT30 試験体は免震材料認定に適合するものであることが確認できた。

表 1.3.9-12　RDT30 試験体寸法試験結果

検査項目	基準値 (mm)	実測値 (mm)	許容値(mm)	合否
装置全長	2666.0	2668.0	±5	合格
増幅部長さ	378.0	378.0	±1.2	合格
伝達部長さ	82.0	82.0	±0.8	合格
減衰部長さ	676.0	676.1	±2.0	合格
限界ストローク(引張)	780.0	783.0	±5	合格
限界ストローク(圧縮)	780.0	776.0	±5	合格
フランジ厚　ねじ軸側	41.0	41.0	±0.8	合格
フランジ厚　減衰部側	38.0	38.0	±0.8	合格
外筒外直径	267.0	267.2	±1.2	合格
外筒内直径	201.00	201.01	±0.1	合格
内筒外直径	195.00	194.99	±0.1	合格
有効長さ	490.0	490.1	±0.5	合格
せん断隙間	3.00	3.01	±0.3	合格

表 1.3.9-13　RDT30 試験体水平特性試験結果

加振パラメータ	振動数	速度	振幅	基準値※1	実験結果						判定値 (Pn'/Pn)	合否
					減衰力	温度	温度補正係数	繰り返し依存係数	温度補正後	繰り返し補正後※2		
				Pn	F	T	β	α'	減衰力	減衰力Pn'		
	Hz	cm/s	mm	KN	kN	℃	－	－	kN	kN		
NO.1	0.5	5.0	15.9	130	152.7	10.9	0.906	0.98	139.2	120.7	0.93	合格
NO.2	0.5	10.0	31.8	167	193.1	11.2	0.925	0.94	179.3	162.1	0.97	合格
NO.3	0.5	20.0	63.7	203	222.4	11.8	0.948	0.88	211.3	204.1	1.01	合格

※1　Pn = 1.06 (0.85･Qv + 8.1)　ここに、Qv:粘性抵抗力

※2　Pn' = Pn(温度補正後) × (0.85 / α')

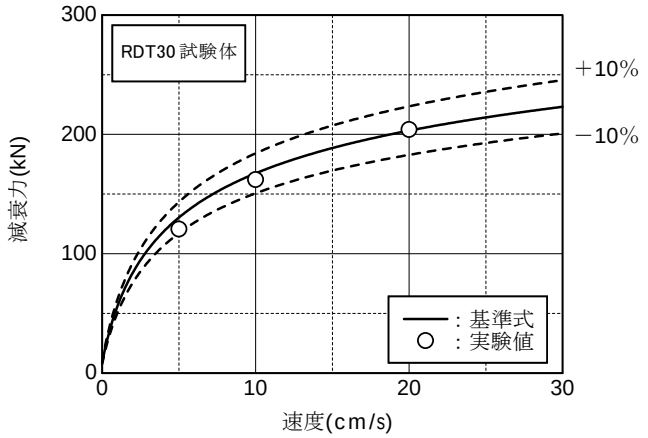


図 1.3.9-20　RDT30 試験体水平特性試験結果

(2) 多数回高速繰り返し実験

1) RDT8 試験体

試験体取り付け状況を写真 1.3.9-1~2 に、当該試験体の実験履歴を表 1.3.9-14 に示す。

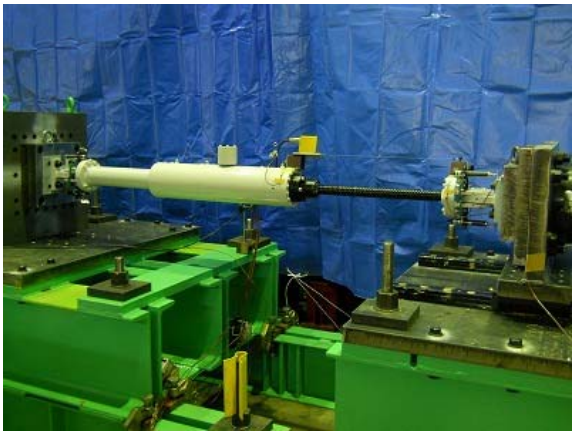


写真 1.3.9-1　RDT8 試験体取り付け状況

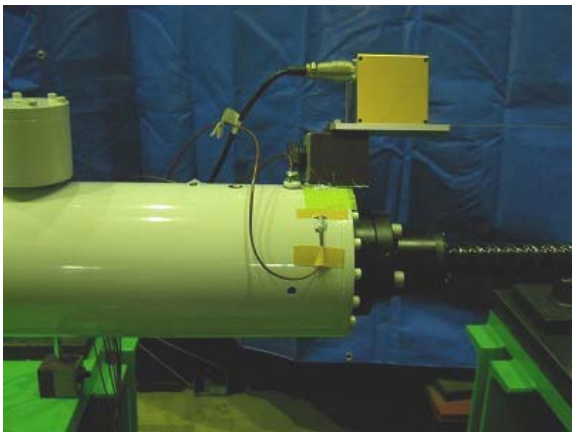


写真 1.3.9-2　RDT8 試験体取り付け状況（部分）

表 1.3.9-14　RDT8 試験体実験履歴

実験内容		水準	実験内容	セット数	振動数	振幅	最大速度	繰返し回数
					Hz	mm	cm/s	回
2010/12/13（月）	14:56	0	基本性能試験	繰返し前	0.5	63.7	20	5
	15:07		多数回高速繰返し実験	1	0.25	200	31.4	63
	15:22			2				
	15:37			3				
	15:53		基本性能試験	繰返し後	0.5	63.7	20	5
2010/12/16（木）	13:49	2	基本性能試験	繰返し前	0.5	63.7	20	5
	13:59		多数回高速繰返し実験	1	0.25	100	15.7	125
	14:20			2				
	14:39			3				
	14:59		基本性能試験	繰返し後	0.5	63.7	20	5
2010/12/17（金）	15:12	1	基本性能試験	繰返し前	0.5	63.7	20	5
	15:23		多数回高速繰返し実験	1	0.25	300	47.1	42
	15:38			2				
	15:52			3				
	実施せず		基本性能試験	繰返し後	0.5	63.7	20	5

以下、実験履歴順に実験結果を示す。

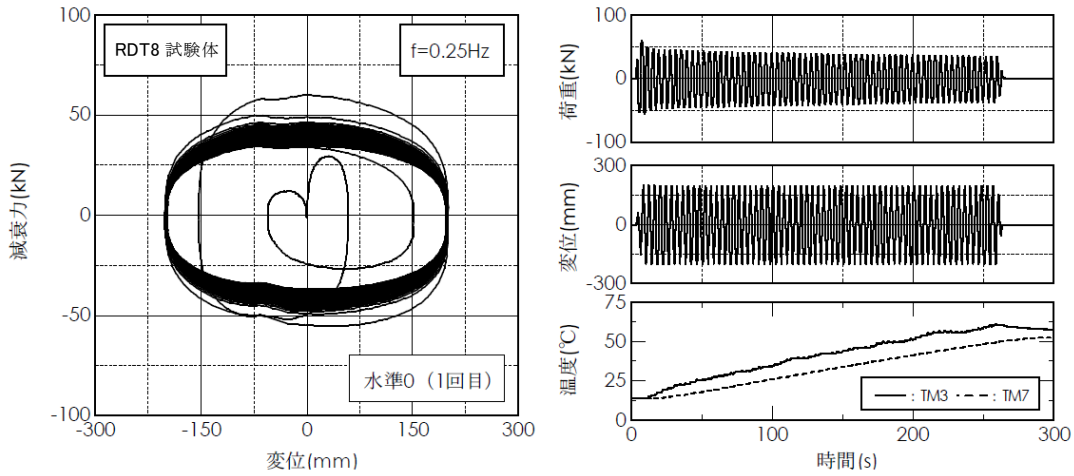
a) 水準 0

図 1.3.9-21 に水準 0 実験の荷重変形関係、荷重時刻歴、変位時刻歴、代表点温度時刻歴を示す。荷重の温度補正は実施していない。温度代表点は減衰部中央付近の計測点(TM3)と、その点と位置的に対応する外筒表面計測点(TM7)である。(a)図は 1 セット目、(b)図は 2 セット目、(c)図は 3 セット目の結果である。1 セット目では、変位 0 切片における荷重（以下、減衰力）の変動は、当初（所定変位振幅に至った直後の負側荷重、以下同じ）の 54kN から 35kN（正負平均、以下同じ）まで低下した。セットを重ねるごとに、セット内での減衰力低下量は小さくなるものの、減衰力の低下は継続し、3 セット目では 30kN（正負平均、以下同じ）となった。但し、3 セット目では若干ながら減衰力が上昇する傾向が見られた。粘性体温度(TM3)は当初の 13.6℃から徐々に上昇し、3 セット目終了時点では 103℃に至った。端的には、減衰力と粘性体温度に相関があると考えられる結果が得られたと言える。

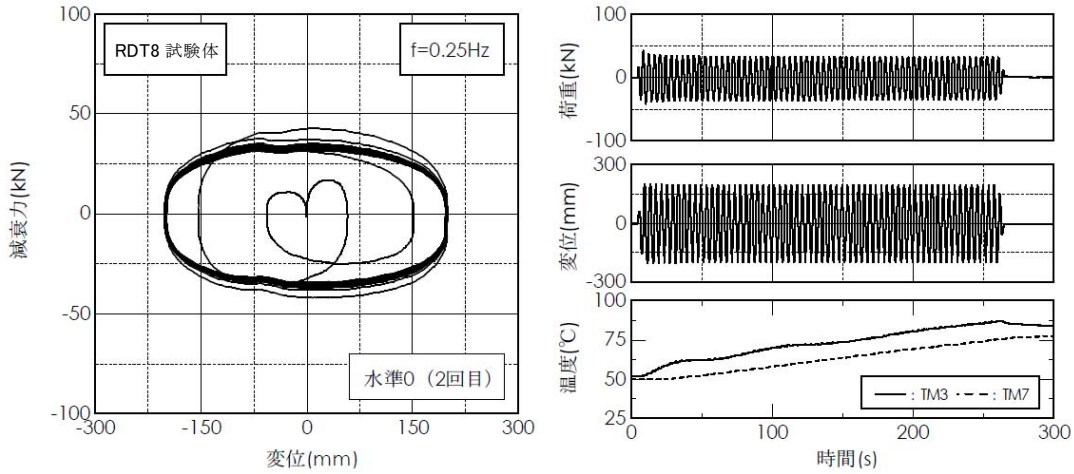
図 1.3.9-22~24 に、減衰力、各点温度、累積吸収エネルギーの変動を 1 セット目から 3 セット目まで連続して表記したものを示す。各セット間の 20 分間のインターバルによって、粘性体温度の低下と減衰力の再上昇が見られるが、数サイクルの繰り返しで前セットの変動曲線の延長線上に復帰している。インターバル間では、外筒端部の TM8 の温度上昇が顕著であり、粘性体から外筒、試験体端部に向けた熱伝導が生じていることが認められる。TM4､TM9 には温度上昇が見られずこの両計測点には熱伝導が及んでいない。粘性体温度相互間では、TM1 計測点温度が他の 2 点に比べやや低く、粘性体内に 5℃程度の温度分布が生じていることがわかる。

3 セット目における減衰力上昇は、後述する RDT30 試験体の結果から類推すれば、粘性体部分の圧力上昇が原因になっていると考えられる。

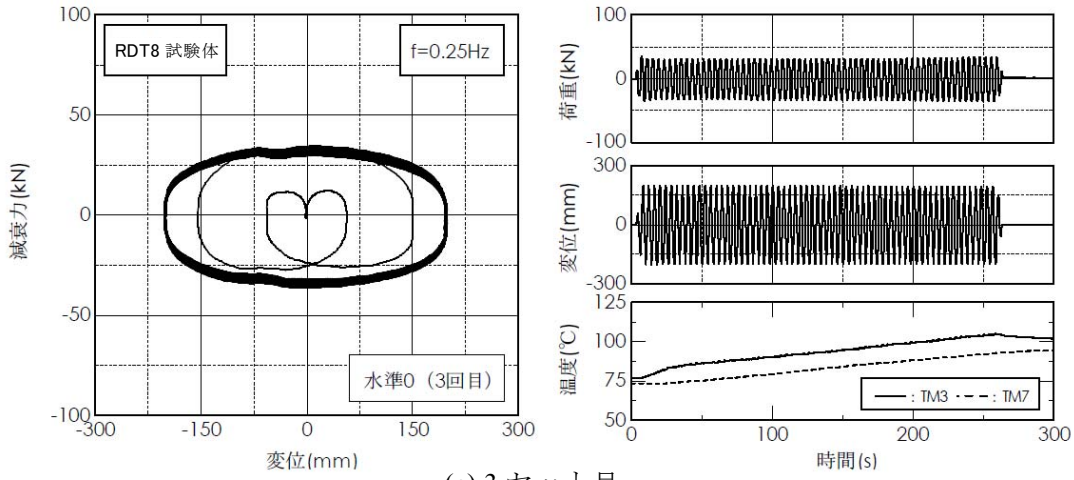
累積吸収エネルギーの履歴は、試験体各点の温度上昇と対応しており、周辺への熱伝導、熱伝達を含めた粘性体の温度上昇やそれに伴う減衰力の低下を累積吸収エネルギーにより簡便に表現できる可能性が認められる。



(a) 1 セット目



(b) 2 セット目



(c) 3 セット目

図 1.3.9-21　RDT8 試験体水準 0 実験結果
（荷重変形関係、荷重時刻歴、変位時刻歴、代表点温度時刻歴）

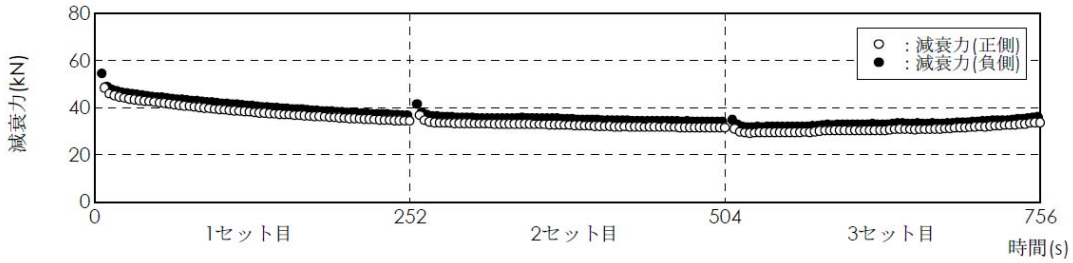


図 1.3.9-22　RDT8 試験体水準 0 実験　減衰力時刻歴

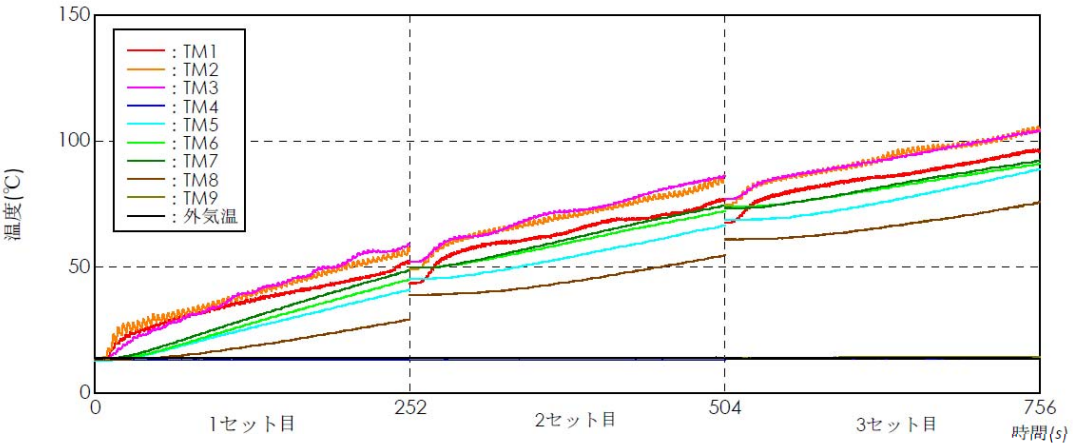


図 1.3.9-23　RDT8 試験体水準 0 実験　温度時刻歴

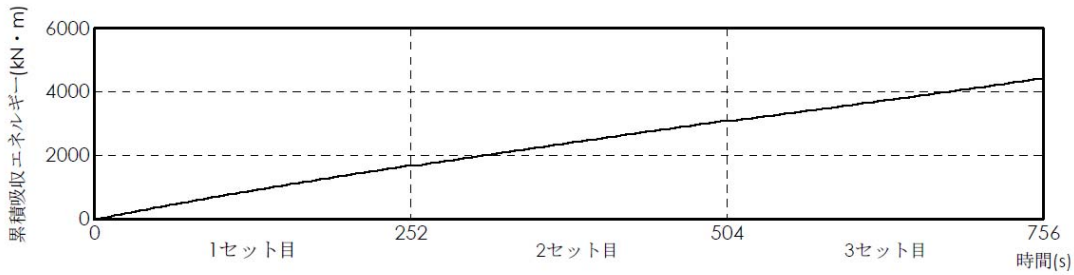


図 1.3.9-24　RDT8 試験体水準 0 実験　累積吸収エネルギー時刻歴

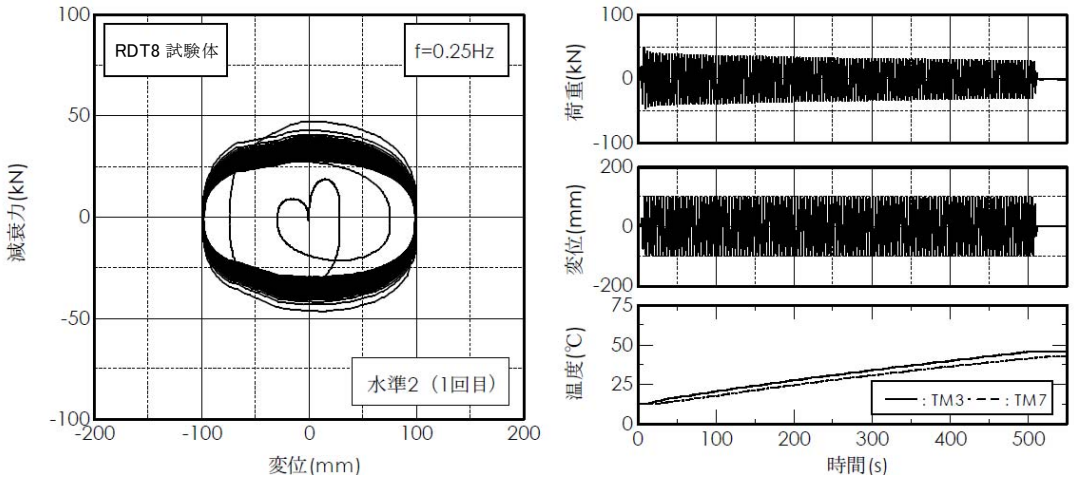
b) 水準 2

図 1.3.9-25 に水準 2 実験の荷重変形関係、荷重時刻歴、変位時刻歴、代表点温度時刻歴を示す。水準 0 と同様、荷重の温度補正は実施していない。温度代表点も水準 0 と同様 TM3 と TM7 を選んだ。減衰力は、1 セット目では当初の 40kN から 32kN まで低下し、セットを重ねるごとに減衰力の低下が継続し、3 セット目の終わりでは 21kN となった。水準 0 でみられた 3 セット目で減衰力が上昇する傾向は見られなかった。粘性体温度(TM3)は当初の 12.8℃から徐々に上昇し、3 セット目終了時点では 79℃に至った。

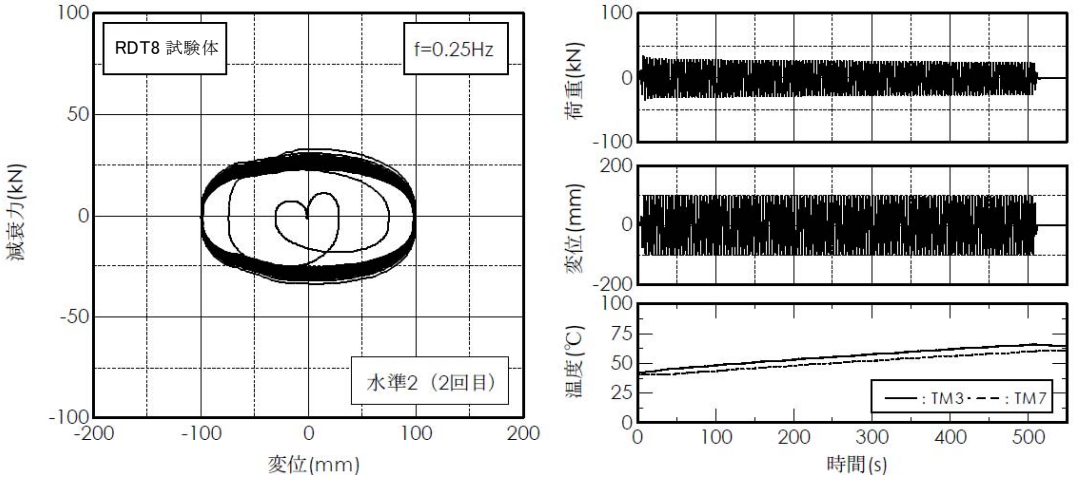
図 1.3.9-26~28 に、減衰力、各点温度、累積吸収エネルギーの変動を 1 セット目から 3 セット目まで連続して表記したものを示す。減衰力や温度変化に見られる、セット間のインターバル後数サイクルの繰り返しで前セットの変動曲線の延長線上に復帰する傾向や、インターバル時に粘性体温度の低下するのに対し、TM8 計測点の温度が上昇する傾向も水準 0 で見られたものと同様である。

総じて、水準 0 に比べ変化の程度が緩やかな実験結果となっており、水準 0 の 3 セット目で見られた一種の使用限界発現の閾値を下回る加力条件であったと解釈できる。

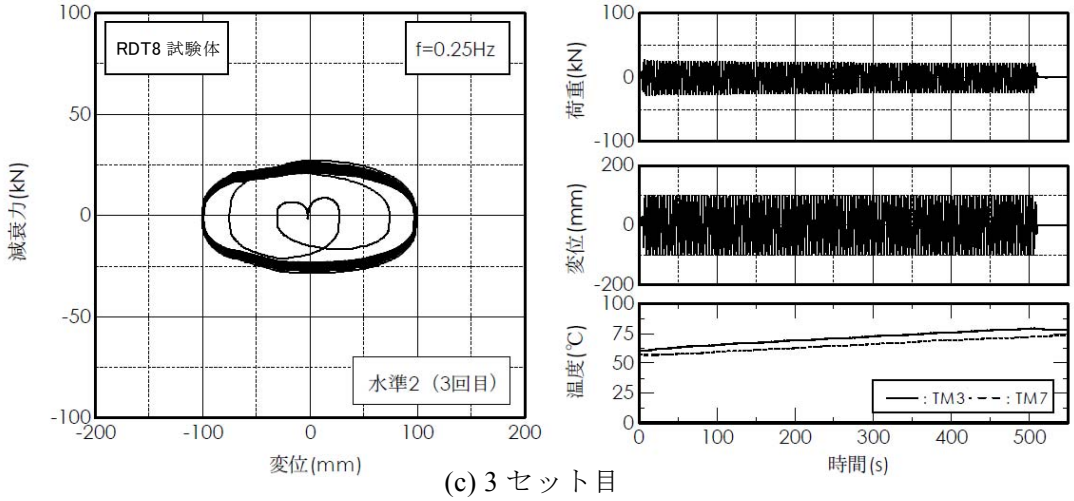
累積吸収エネルギーは、加力に伴い滑らかに上昇し、試験体各点の温度上昇や減衰力低下の傾向とよく対応する。



(a) 1 セット目



(b) 2 セット目



(c) 3 セット目

図 1.3.9-25　RDT8 試験体水準 2 実験結果
（荷重変形関係、荷重時刻歴、変位時刻歴、代表点温度時刻歴）

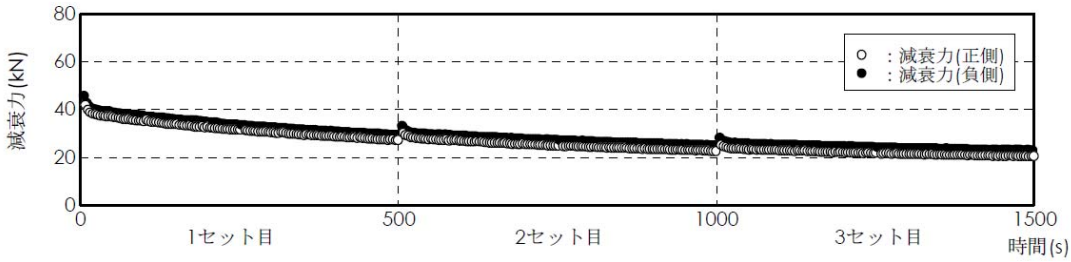


図 1.3.9-26　RDT8 試験体水準 2 実験　減衰力時刻歴

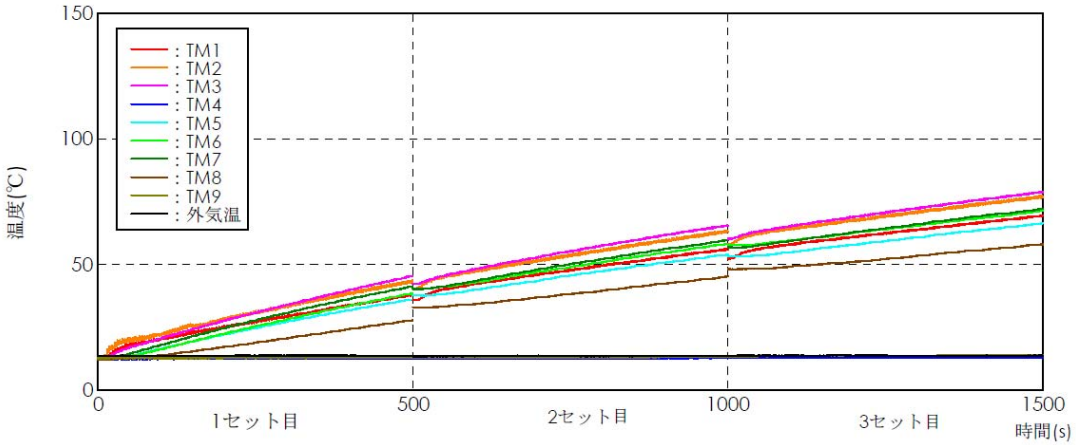


図 1.3.9-27　RDT8 試験体水準 2 実験　温度時刻歴

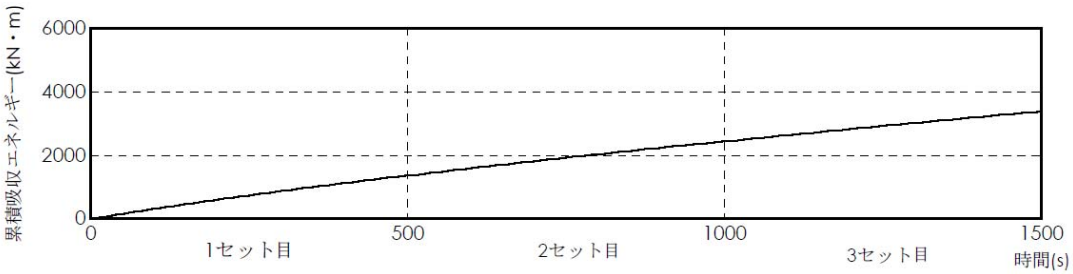


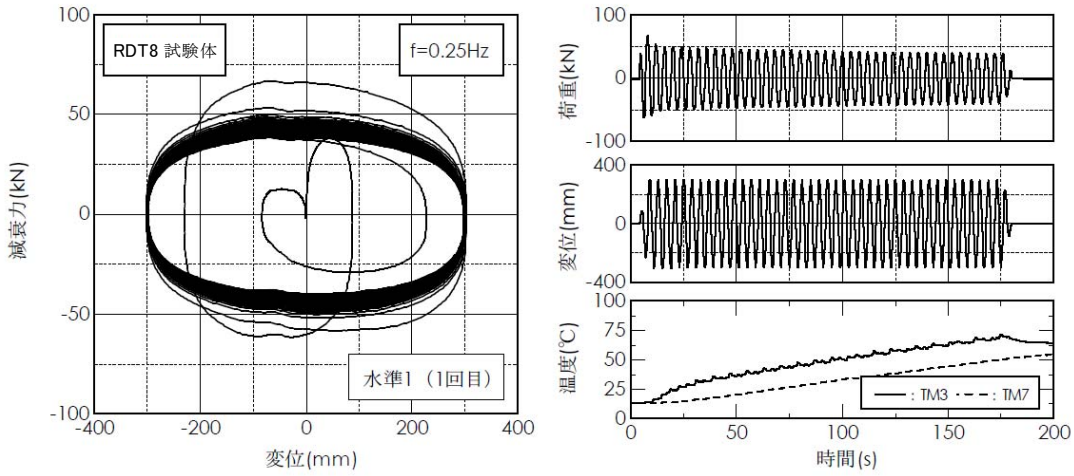
図 1.3.9-28　RDT8 試験体水準 2 実験　累積吸収エネルギー時刻歴

c) 水準 1

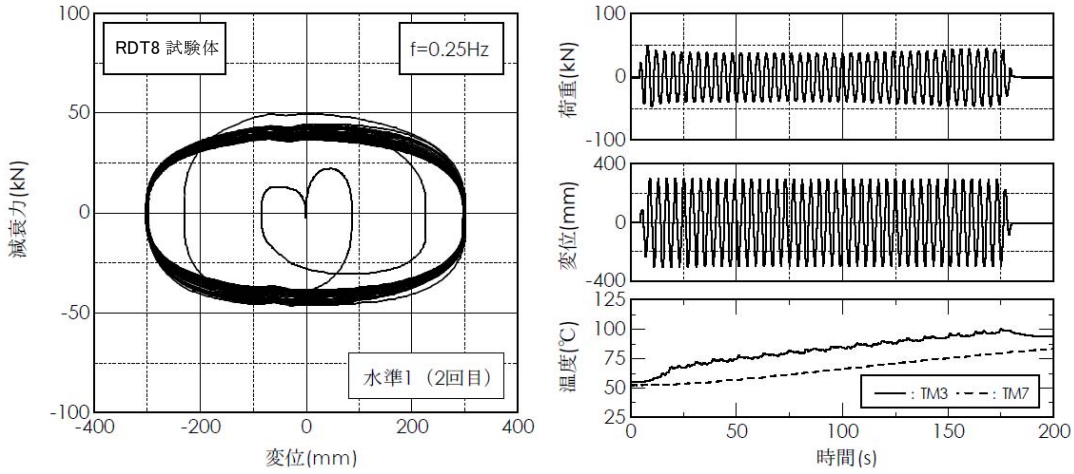
図 1.3.9-29 に水準 1 実験の荷重変形関係、荷重時刻歴、変位時刻歴、代表点温度時刻歴を示す。水準 0､2 と同様、荷重の温度補正は実施していない。温度代表点も水準 0､2 と同様 TM3 と TM7 である。この水準においては、3 セット目の序盤に粘性体温度センサー取付部のエポキシ樹脂によるシールが破損し内部粘性体が漏出したため実験を打ち切った。

減衰力は、1 セット目では、当初の 57kN から 39kN まで低下したが、2 セット目の序盤から殆ど低下が見られず、同セットの中盤から明らかな減衰力上昇が観察された。3 セット目では当初の数サイクルで低下した後､上昇に転じ 14 サイクル目に温度センサーシール部の破損に至った。図 1.3.9-29 の荷重変形関係には、破損後の 5 ループ程度の履歴も描かれており、粘性体の漏出により減衰力は急激に低下するが全く喪失するわけではないことがわかる。粘性体温度(TM3)は当初の 13.3℃から 1 セット目で 72℃まで、2 セット目で 100℃まで上昇した。

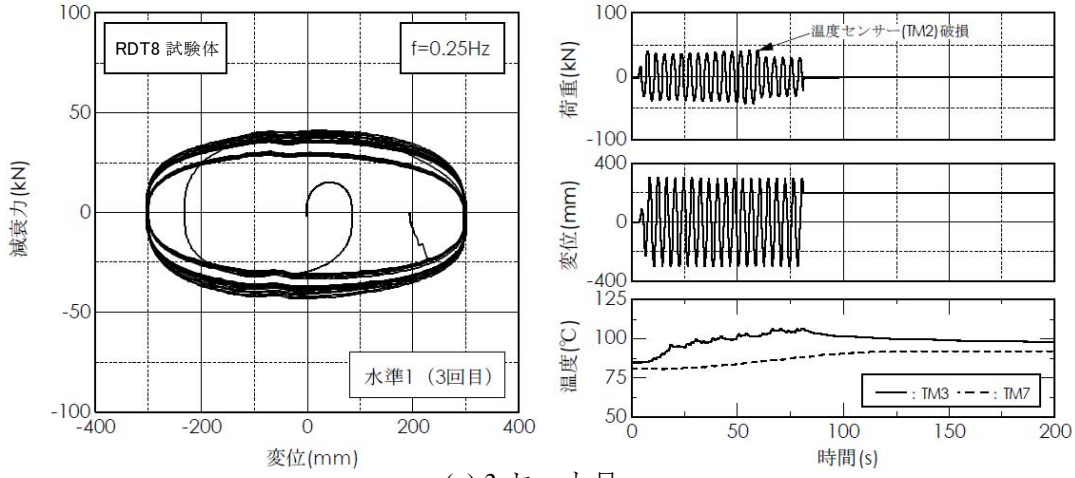
図 1.3.9-30~32 に、減衰力、各点温度、累積吸収エネルギーの変動を 1 セット目から 3 セット目まで連続して表記したものを示す。2 セット目、3 セット目の減衰力上昇が明瞭である。水準 0､2 に比べ、粘性体温度（TM1～3）と外筒温度（TM5～7）の温度差が大きい。これば、入力エネルギーの時間勾配が大きく、各セットの立ち上がり部において外筒表面まで熱伝導が及びにくい為と考えられる。インターバル時における TM8 の温度上昇も水準 0､2 に比べ大きい。



(a) 1 セット目



(b) 2 セット目



(c) 3 セット目

図 1.3.9-29　RDT8 試験体水準 1 実験結果
（荷重変形関係、荷重時刻歴、変位時刻歴、代表点温度時刻歴）

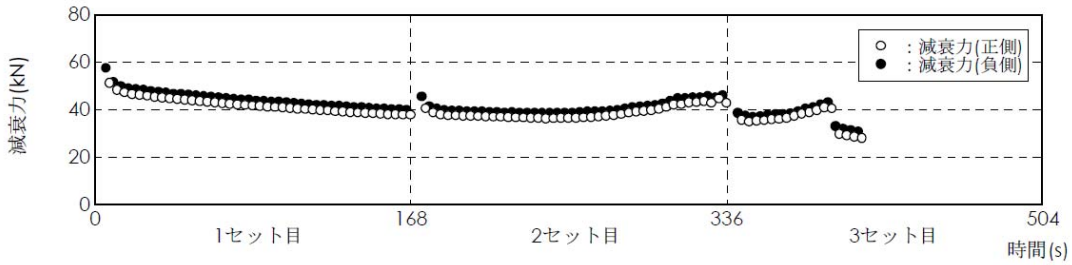


図 1.3.9-30　RDT8 試験体水準 1 実験　減衰力時刻歴

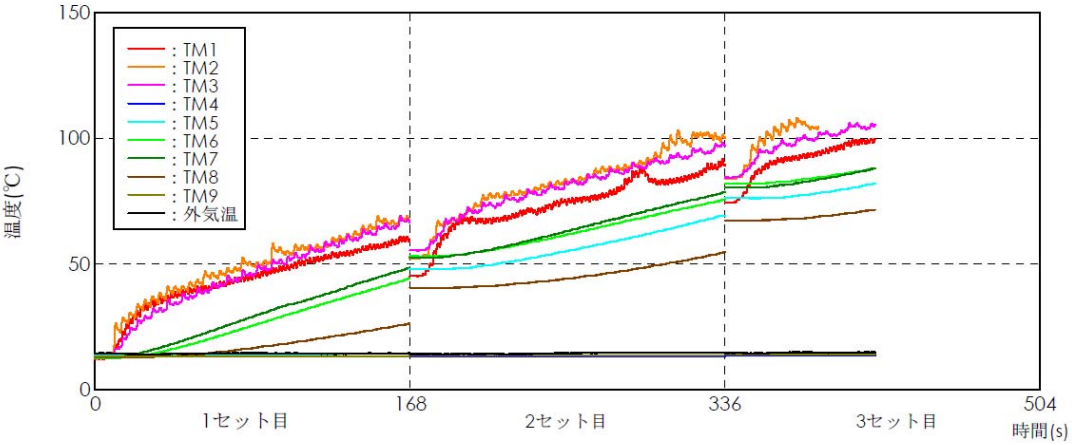


図 1.3.9-31　RDT8 試験体水準 1 実験　温度時刻歴

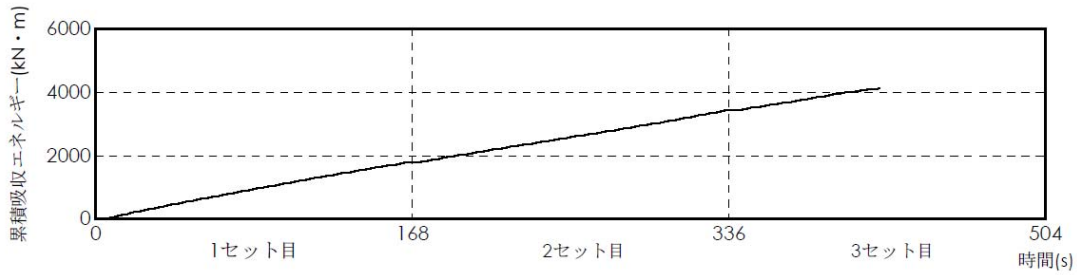


図 1.3.9-32　RDT8 試験体水準 1 実験　累積吸収エネルギー時刻歴

2) RDT16 試験体

試験体取り付け状況を写真 1.3.9-3~4 に、当該試験体の実験履歴を表 1.3.9-15 に示す。

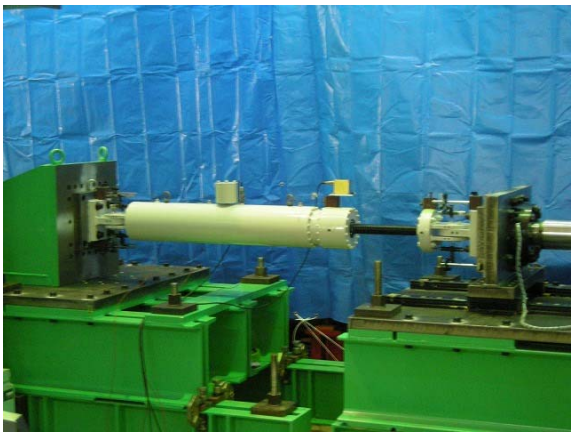


写真 1.3.9-3　RDT16 試験体取り付け状況

写真 1.3.9-4　RDT16 試験体取り付け状況（部分）

表 1.3.9-15　RDT16 試験体実験履歴

実験内容		水準	実験内容	セット数	振動数	振幅	最大速度	繰返し回数
					Hz	mm	cm/s	回
2010/12/14（火）	10:09	0	基本性能試験	繰返し前	0.5	63.7	20	5
	10:16		多数回高速繰返し実験	1	0.25	200	31.4	63
	10:31			2				
	10:48			3				
	11:03		基本性能試験	繰返し後	0.5	63.7	20	5
2010/12/15（水）	14:09	1	基本性能試験	繰返し前	0.5	63.7	20	5
	14:21		多数回高速繰返し実験	1	0.25	300	47.1	42
	14:39			2				
	14:56			3				
	15:10		基本性能試験	繰返し後	0.5	63.7	20	5
2010/12/16（木）	17:05	2	基本性能試験	繰返し前	0.5	63.7	20	5
	17:15		多数回高速繰返し実験	1	0.25	100	15.7	125
	17:34			2				
	17:55			3				
	18:15		基本性能試験	繰返し後	0.5	63.7	20	5

以下、実験履歴順に実験結果を示す。

a) 水準 0

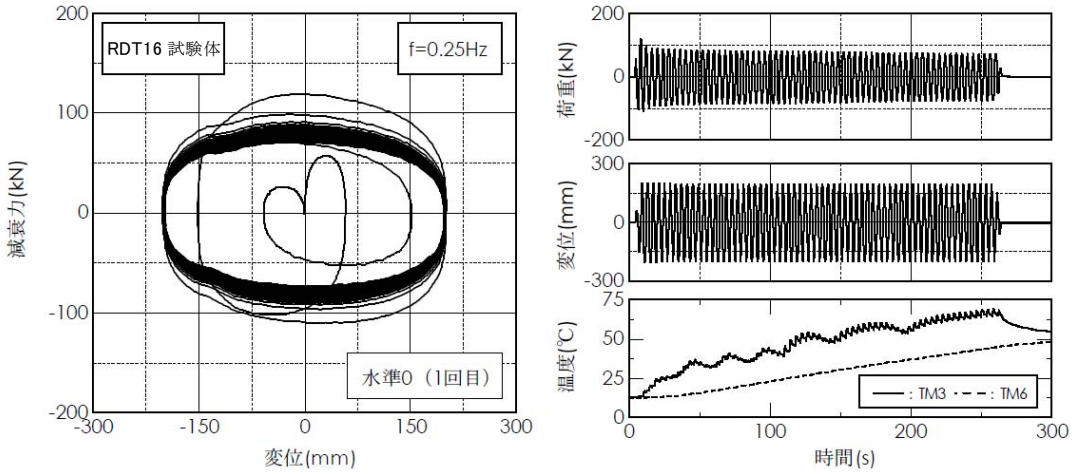
図 1.3.9-33 に水準 0 実験の荷重変形関係、荷重時刻歴、変位時刻歴、代表点温度時刻歴を示す。荷重の温度補正は実施していない。温度代表点として、粘性体、外筒表面それぞれについて最高温度を記録した TM3 と TM6 を選択した。

減衰力は、1 セット目では、当初の 109kN から 72kN まで低下し、セットを重ねるごとに減衰力の低下が継続し、3 セット目の終わりでは 54kN となった。セットを重ねるごとに、セット内での減衰力低下量は小さくなったが、RDT8 試験体でみられた 3 セット目で減衰力が上昇する傾向は見られなかった。粘性体温度(TM3)は当初の 12.9℃から徐々に上昇し、3 セット目終了時点では 101℃に至った。

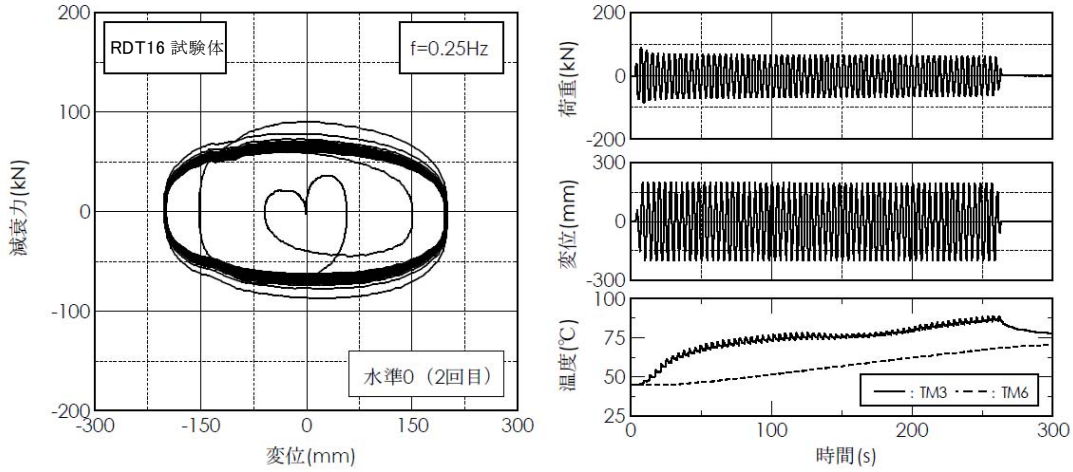
図 1.3.9-34~37 に、減衰力、各点温度、粘性体圧力、累積吸収エネルギーの変動を 1 セット目から 3 セット目まで連続して表記したものを示す。セット間のインターバル後の数サイクルを除いて､減衰力が連続的に低下し粘性体および外筒温度が連続的に上昇する傾向が明瞭である。粘性体内の温度分布については、この試験体においても TM1 が相対的に低い。インターバル後には速度増幅部外殻の TM5 計測点にも温度上昇が見られる。TM9 計測点は試験体の構成上 RDT8 試験体、RDT30 試験体に比べ相対的に粘性体充填部に近いが、加振中には TM5 計測点とともに温度上昇が見られない。粘性体最大圧力は振動的な増減を伴いながらセットを重ねるごとに上昇を続け 0.53MPa（5.2 気圧）に至った。この程度の圧力は減衰力上昇として観察される一種の使用限界発現の閾値を下回ると解釈できる。

大きな温度上昇が見られたものの、力学性状は RDT8 試験体に比べ安定しており、粘性体の熱容量、バッファ部分を含めた体積、周辺鉄部（外筒、内筒）の熱容量などの試験体の構造上、優れた繰り返し特性を発揮できる構成となっていたものと考えられる。

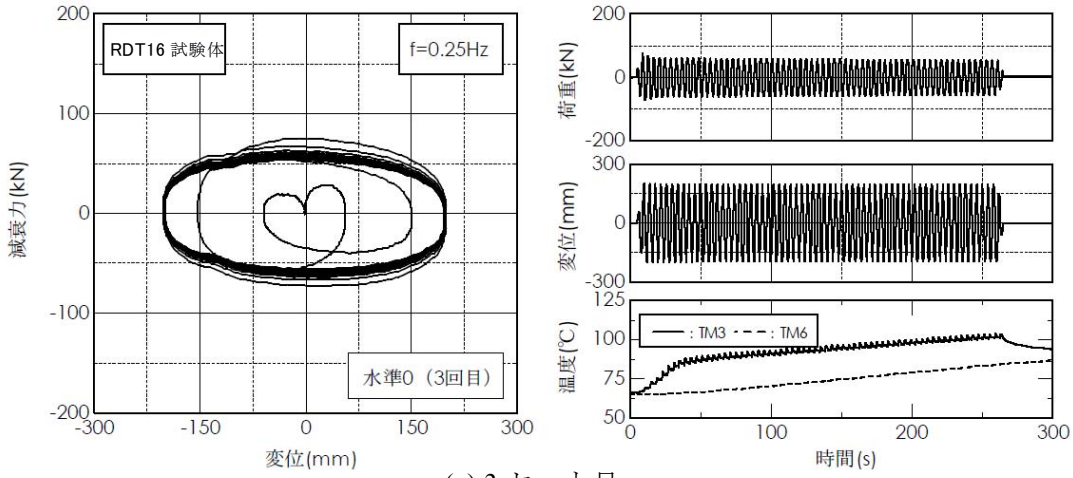
累積吸収エネルギーは、加力に伴い滑らかに上昇し、各セットの立ち上がり部を除き、試験体各点の温度上昇や減衰力低下の傾向とよく対応する。



(a) 1 セット目



(b) 2 セット目



(c) 3 セット目

図 1.3.9-33　RDT16 試験体水準 0 実験結果
（荷重変形関係、荷重時刻歴、変位時刻歴、代表点温度時刻歴）

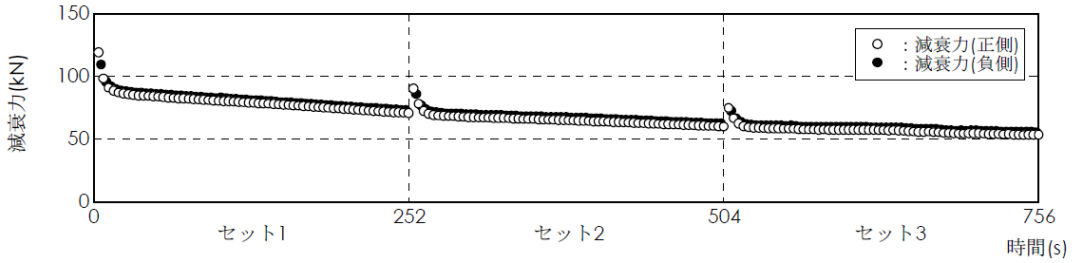


図 1.3.9-34　RDT16 試験体水準 0 試験　減衰力時刻歴

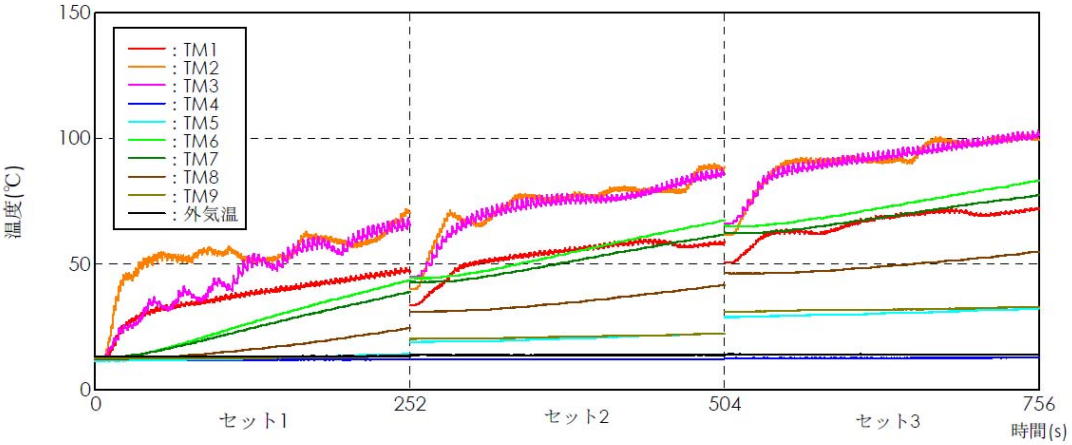


図 1.3.9-35　RDT16 試験体水準 0 試験　温度時刻歴

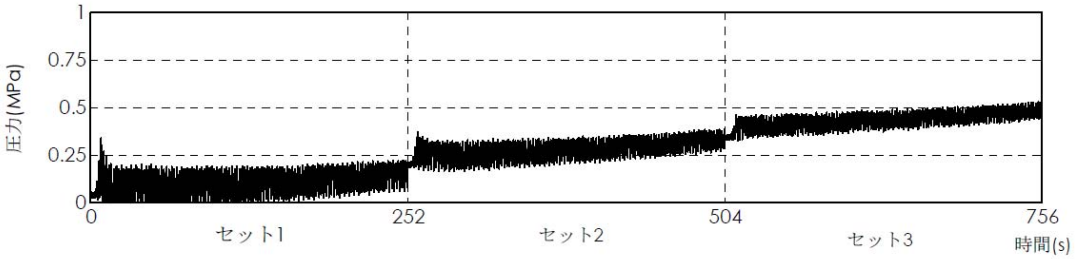


図 1.3.9-36　RDT16 試験体水準 0 試験　粘性体圧力時刻歴

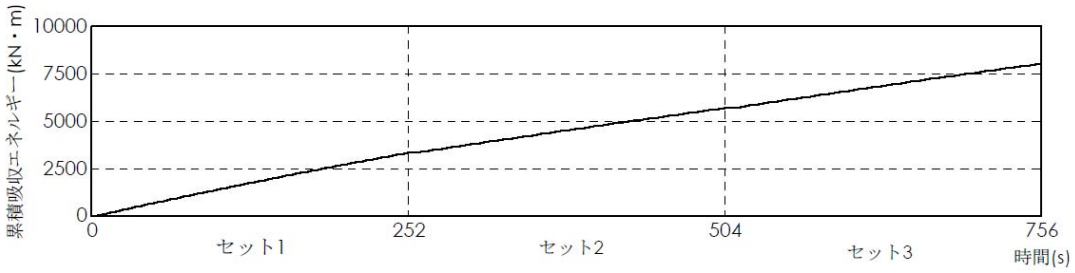


図 1.3.9-37　RDT16 試験体水準 0 試験　累積吸収エネルギー時刻歴

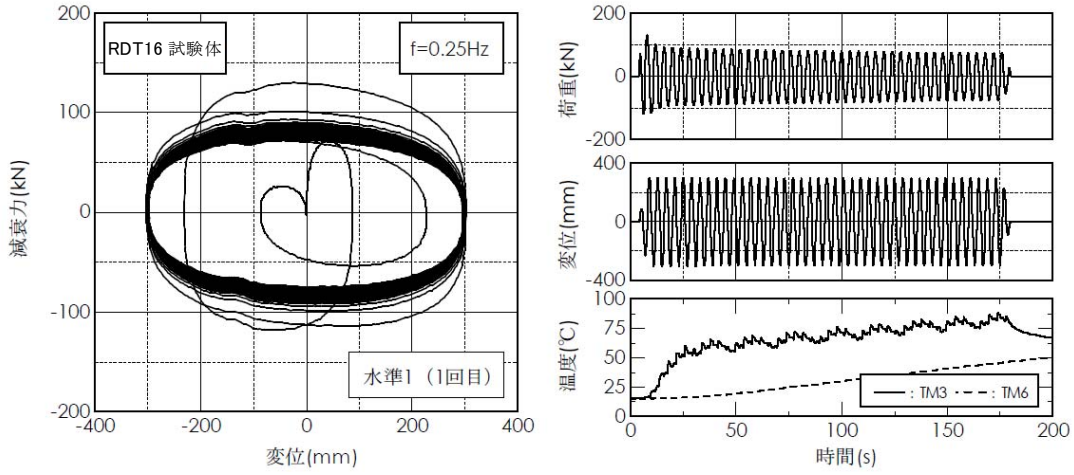
b) 水準 1

図 1.3.9-38 に水準 1 実験の荷重変形関係、荷重時刻歴、変位時刻歴、代表点温度時刻歴を示す。荷重の温度補正は実施していない。温度代表点として、水準 0 と同様、TM3 と TM6 を選択した。

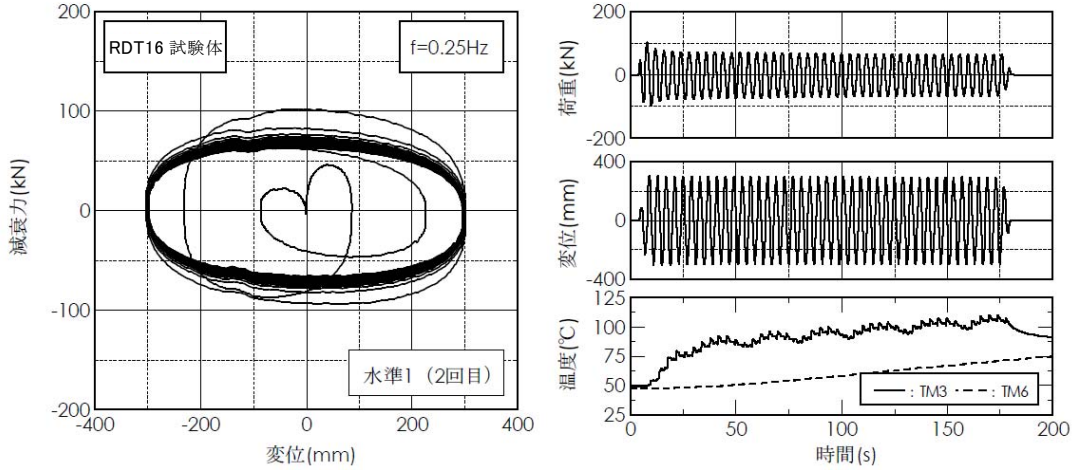
減衰力は、1 セット目では、当初の 113kN から 74kN 程度低下し、セットを重ねるごとに減衰力の低下が継続し、3 セット目の終わりでは 59kN となった。この水準でも減衰力が上昇する傾向は見られなかった。粘性体温度(TM3)は当初の 15.3℃から徐々に上昇し、3 セット目終了時点では 125℃に達した。

図 1.3.9-39~42 に、減衰力、各点温度、粘性体圧力、累積吸収エネルギーの変動を連続して表記したものを示す。水準 0 と同様、セット間のインターバル後の数サイクルを除いて、減衰力が連続的に低下し粘性体および外筒温度が連続的に上昇する傾向が明瞭に確認できる。粘性体温度は、TM3 が数サイクルないし 10 サイクル程度周期で増減する傾向をもつほか、TM1、TM2 においてもセット内で細かな増減が見られる。この原因は不明であるが、粘性体の温度分布が均一でなくかつ流動していることが可能性として考えられる。3 点の相対的な傾向では、水準 0 と同様 TM1 が相対的に低い。TM2、TM3 については RDT8 試験体と同様、水準 0 に比べ外筒表面温度(TM6、7)との開きが大きくなった。粘性体最大圧力は 0.72MPa（7.1 気圧）に至ったが、力学性状が安定していることから、減衰力上昇として観察される一種の使用限界発現の閾値としての圧力にはまだ余裕があるものと解釈できる。

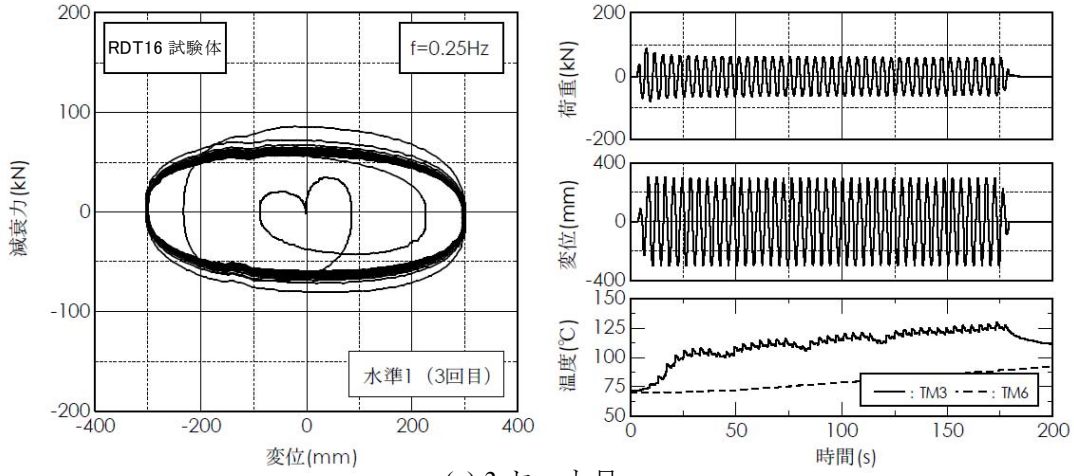
吸収エネルギーの時間勾配は、水準 0 に比べ 1.5 倍以上大きい。



(a) 1 セット目



(b) 2 セット目



(c) 3 セット目

図 1.3.9-38　RDT16 試験体水準 1 実験結果
（荷重変形関係、荷重時刻歴、変位時刻歴、代表点温度時刻歴）

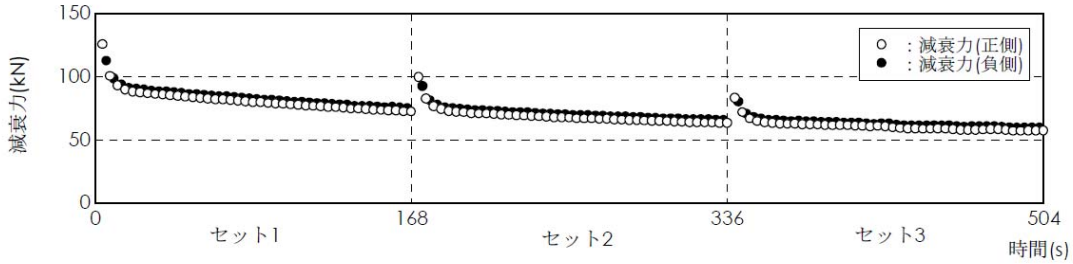


図 1.3.9-39　RDT16 試験体水準 1 試験　減衰力時刻歴

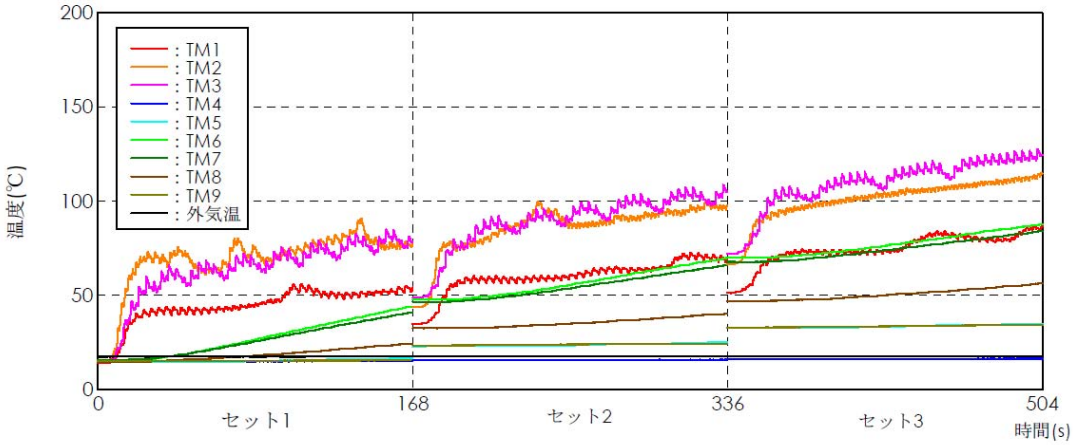


図 1.3.9-40　RDT16 試験体水準 1 試験　温度時刻歴

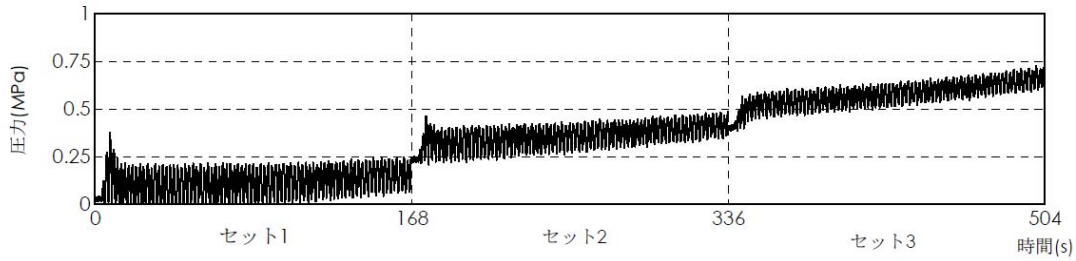


図 1.3.9-41　RDT16 試験体水準 1 試験　粘性体圧力時刻歴

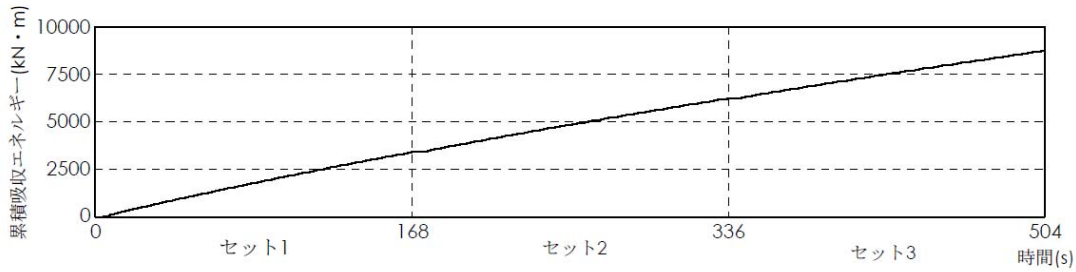


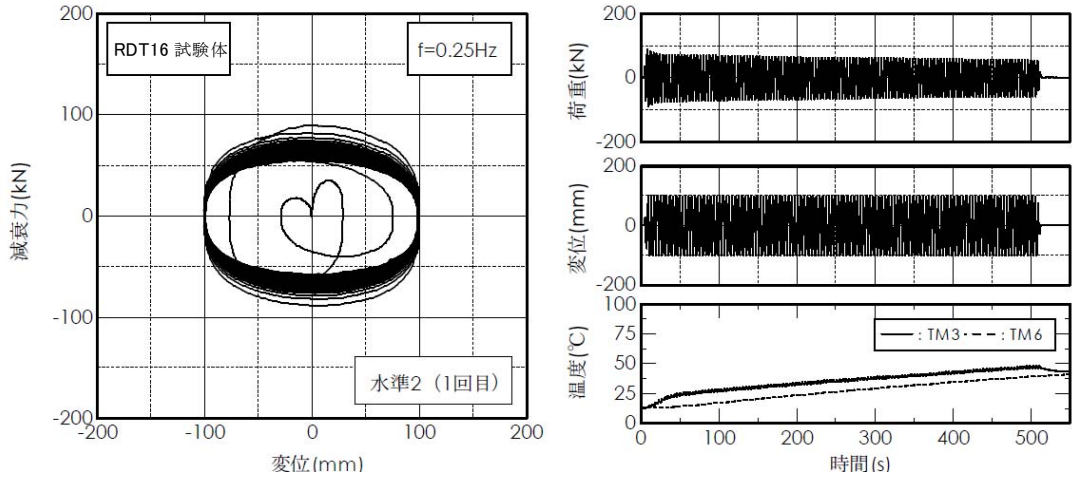
図 1.3.9-42　RDT16 試験体水準 1 試験　累積吸収エネルギー時刻歴

c) 水準 2

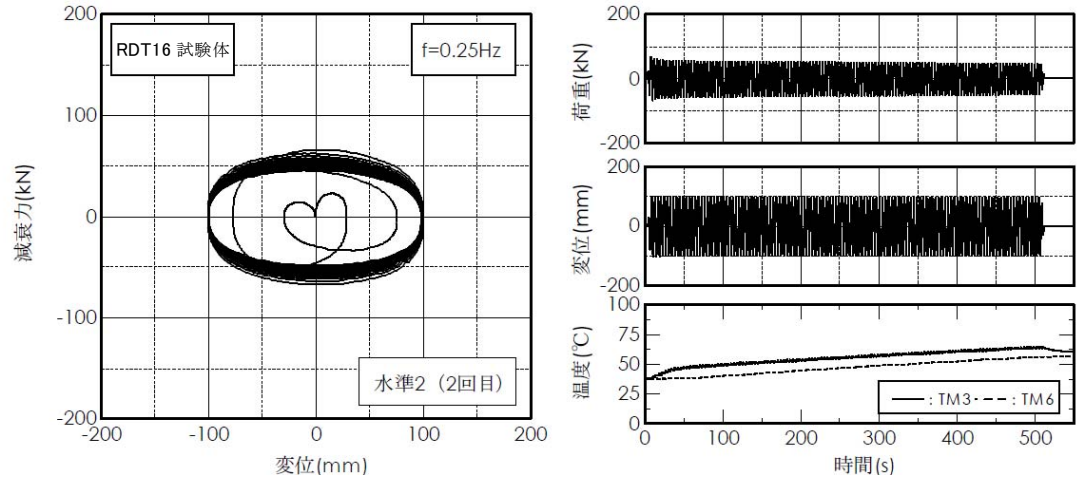
図 1.3.9-43 に水準 2 実験の荷重変形関係、荷重時刻歴、変位時刻歴、代表点温度時刻歴を示す。荷重の温度補正は実施していない。温度代表点として TM3 と TM6 を選択した。

減衰力は、1 セット目では、当初の 88kN から 56kN まで低下した。セットを重ねるごとに減衰力の低下が継続し、3 セット目の終わりでは 42kN となった。減衰力が上昇する傾向は見られなかった。粘性体温度(TM3)は当初の 13.5℃から徐々に上昇し、3 セット目終了時点では 76℃に達した。

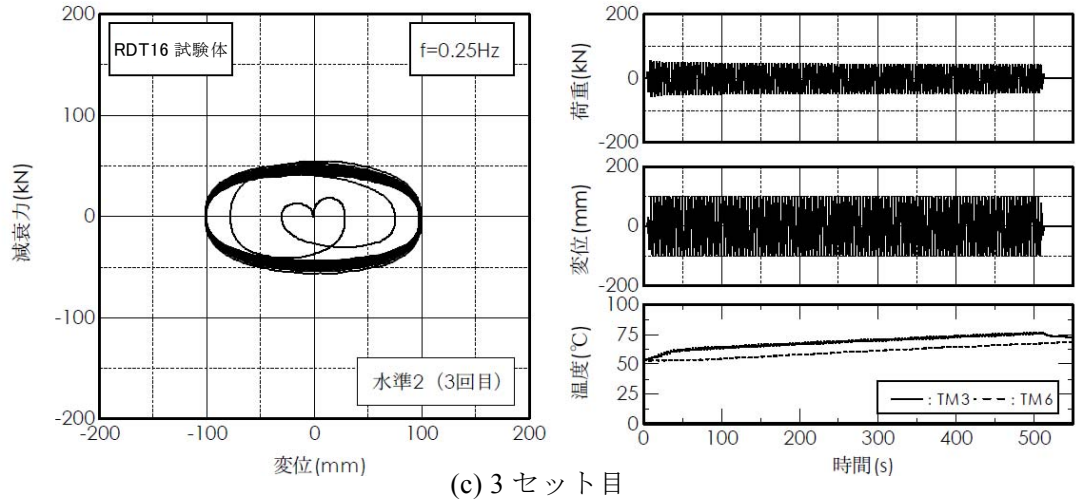
図 1.3.9-44~47 に、減衰力、各点温度、粘性体圧力、累積吸収エネルギーの変動を連続して表記したものを示す。水準 0､1 と同様、セット間のインターバル後の数サイクルを除いて、減衰力が連続的に低下し粘性体および外筒温度が連続的に上昇する傾向が確認できる。水準 0､1 に比べ粘性体温度(TM2､3)と外筒表面温度(TM6､7)の開きは小さかった。水準 1 で見られた粘性体温度がセット内で細かく増減する傾向は現れなかった。粘性体最大圧力は 0.36MPa（3.6 気圧）であった。吸収エネルギーの時間勾配は、水準 0 の 1/2 以下であった。



(a) 1 セット目



(b) 2 セット目



(c) 3 セット目

図 1.3.9-43　RDT16 試験体水準 2 実験結果
（荷重変形関係、荷重時刻歴、変位時刻歴、代表点温度時刻歴）

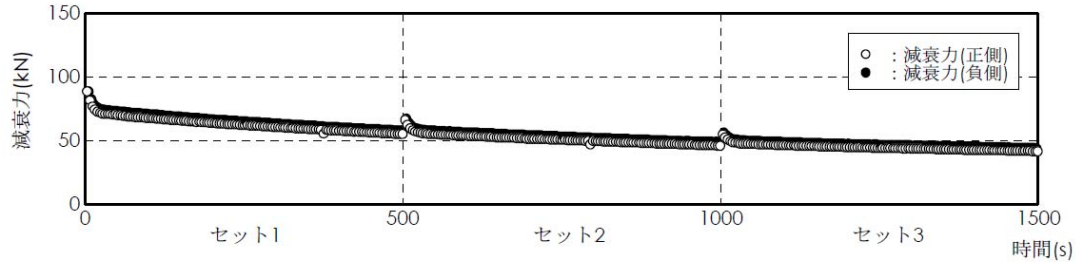


図 1.3.9-44　RDT16 試験体水準 2 試験　減衰力時刻歴

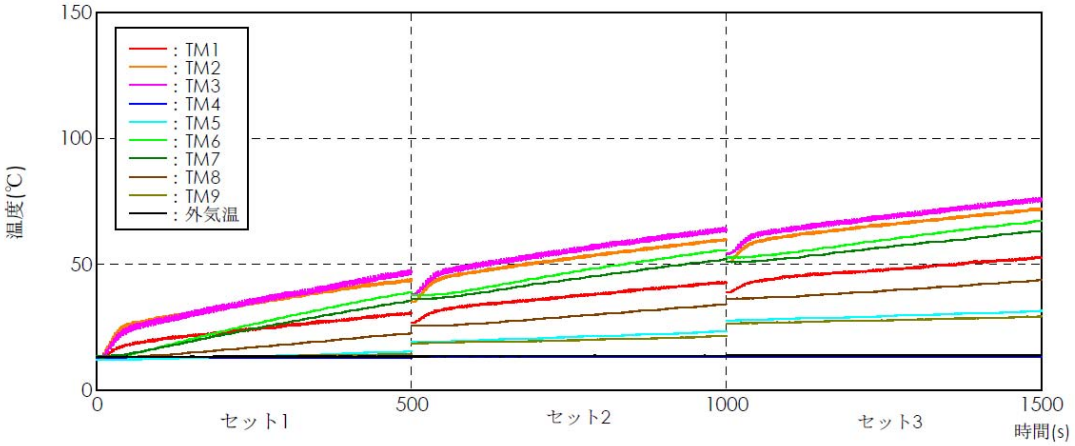


図 1.3.9-45　RDT16 試験体水準 2 試験　温度時刻歴

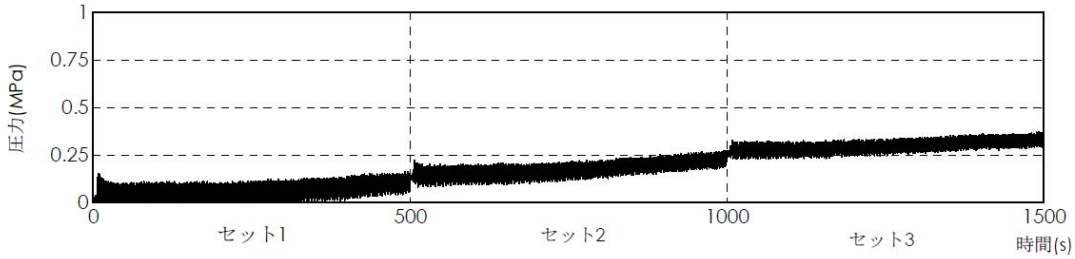


図 1.3.9-46　RDT16 試験体水準 2 試験　粘性体圧力時刻歴

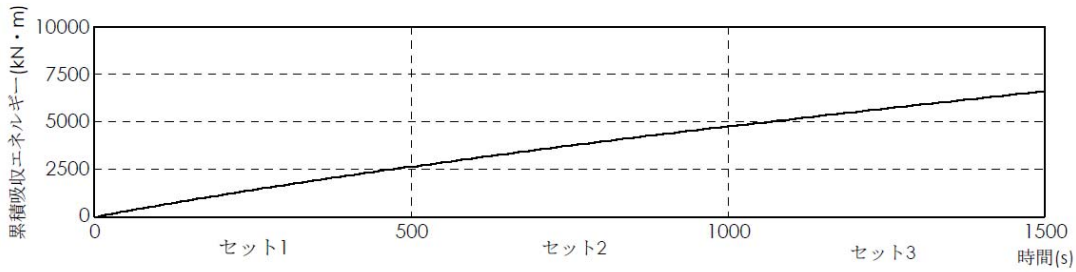


図 1.3.9-47　RDT16 試験体水準 2 試験　累積吸収エネルギー時刻歴

3) RDT30 試験体

試験体取り付け状況を写真 1.3.9-5~6 に、当該試験体の実験履歴を表 1.3.9-16 に示す。

写真 1.3.9-5　RDT30 試験体取り付け状況

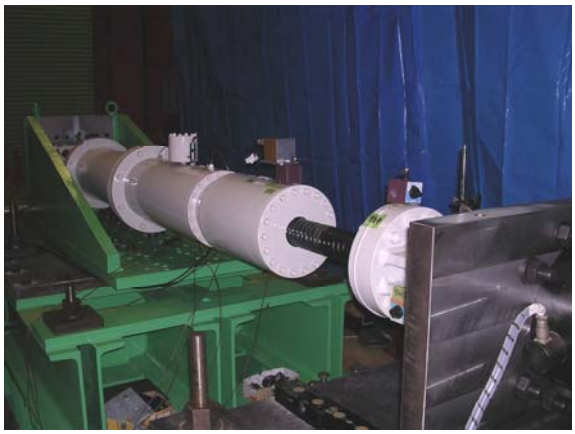


写真 1.3.9-6　RDT30 試験体取り付け状況（部分）

表 1.3.9-16　RDT30 試験体実験履歴

実験内容		水準	実験内容	セット数	振動数	振幅	最大速度	繰返し回数
					Hz	mm	cm/s	回
2010/12/13（月）	10:19	0	基本性能試験	繰返し前	0.5	63.7	20	5
	10:27		多数回高速繰返し実験	1	0.25	200	31.4	63
	10:42			2				
	10:57			3				
	11:13		基本性能試験	繰返し後	0.5	63.7	20	5
2010/12/16（木）	9:35	2	基本性能試験	繰返し前	0.5	63.7	20	5
	9:45		多数回高速繰返し実験	1	0.25	100	15.7	125
	10:05			2				
	10:25			3				
	10:45		基本性能試験	繰返し後	0.5	63.7	20	5
2010/12/17（金）	9:59	1	基本性能試験	繰返し前	0.5	63.7	20	5
	10:11		多数回高速繰返し実験	1	0.25	300	47.1	42
	10:26			2				
	10:42			3				
	10:55		基本性能試験	繰返し後	0.5	63.7	20	5

以下、実験履歴順に実験結果を示す。

a) 水準 0

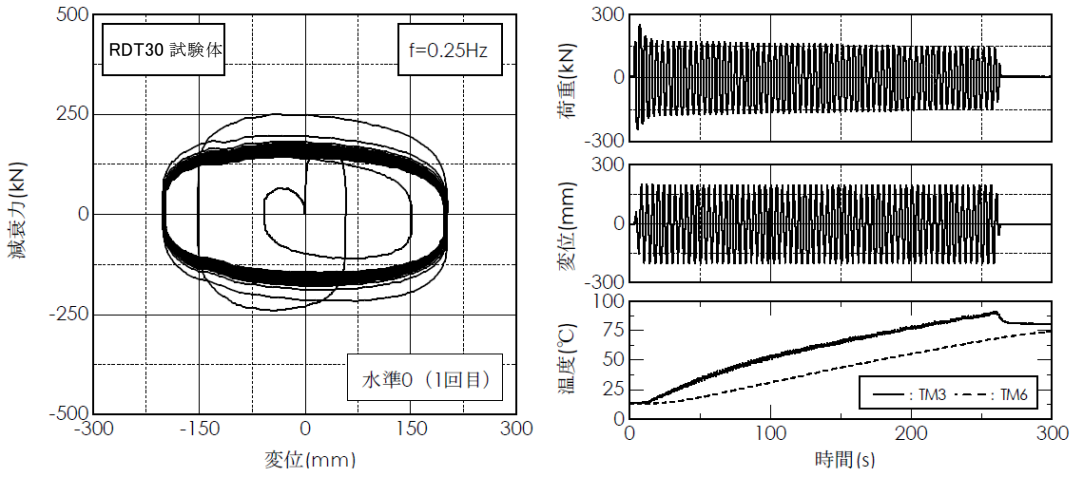
図 1.3.9-48 に水準 0 実験の荷重変形関係、荷重時刻歴、変位時刻歴、代表点温度時刻歴を示す。荷重の温度補正は実施していない。温度代表点として TM3 と TM6 を選択した。

減衰力は、1 セット目では、当初の 214kN 程度から 144kN まで低下し、セットを重ねるごとに減衰力の低下が継続し､3 セット目の中盤以降では 122kN となった｡セットを重ねるごとに、セット内での減衰力低下量は小さくなり、3 セット目の後半ではほとんど低下が見られなくなった。荷重変形関係から判断する限り力学性状は安定していた。なお、荷重変形関係の形状を RDT8､RDT16 試験体と比較すると、最大、最小変位における減衰力のギャップ量が相対的に大きい（矩形に近い）形状を示した。これは、減衰力の基準値を求める設計式に定数項として表現されている値に相当し、粘性体粘度の違いによる減衰部材の性状が反映された結果と考えられる。粘性体温度(TM3)は当初の 13.6℃から徐々に上昇し、3 セット目終了時点では 153℃に至った。

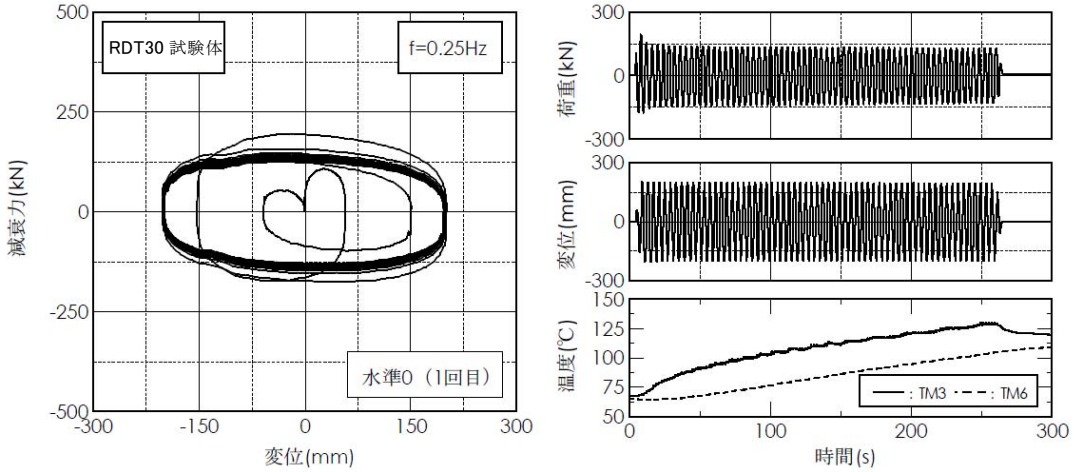
図 1.3.9-49~52 に、減衰力、各点温度、粘性体圧力、累積吸収エネルギーの変動を 1 セット目から 3 セット目まで連続して表記したものを示す。1 セット目の中盤に減衰力変動が必ずしも滑らかでない区間が見られるが、大局的には RDT8､RDT16 試験体と同様に、セット間のインターバル後の数サイクルを除いて、減衰力が連続的に低下し粘性体および外筒温度が連続的に上昇する傾向は確認できる。1 セット目の序盤を除いて、TM3 の温度が TM1､TM2 に比べ相対的に高い。TM4､TM9 のみでなく TM5 計測点にも加振中にはほとんど温度上昇が見られない。

粘性体最大圧力は 2.0MPa（19.7 気圧）に至った。特に 3 セット目に入り圧力が 1MPa を超えた後に圧力上昇の時間勾配が大きくなった。

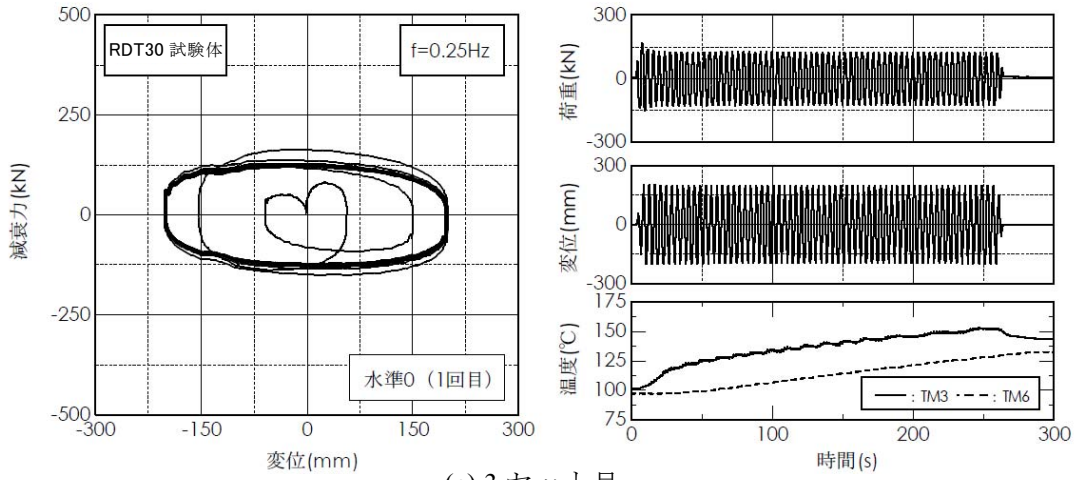
累積吸収エネルギーの時間勾配は、RDT16 試験体水準 0 の 2 倍以上となった。本試験体は、RDT16 試験体に比べ大きな減衰力を発揮する部材である一方で粘性体体積が小さいため、大きな温度上昇と圧力上昇が生じやすい構成となっていると考えられる。総吸収エネルギーは 17.9MJ であった。



(a) 1 セット目



(b) 2 セット目



(c) 3 セット目

図 1.3.9-48　RDT30 試験体水準 0 実験結果
（荷重変形関係、荷重時刻歴、変位時刻歴、代表点温度時刻歴）

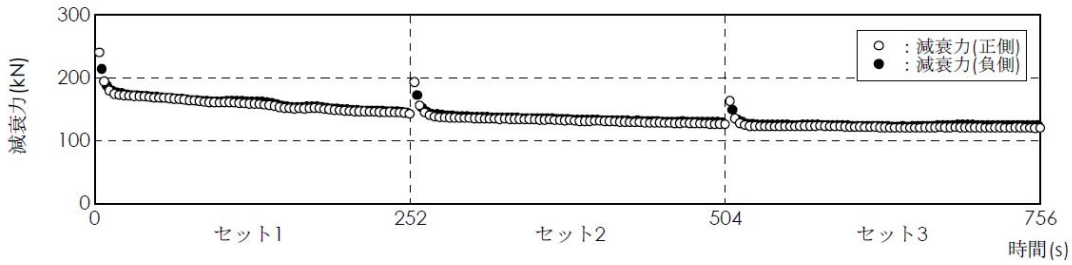


図 1.3.9-49　RDT30 試験体水準 0 試験　減衰力時刻歴

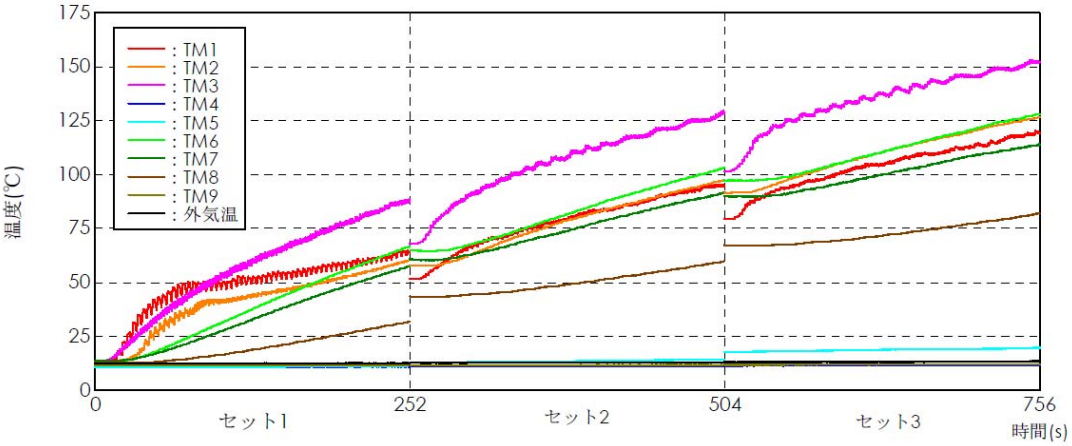


図 1.3.9-50　RDT30 試験体水準 0 試験　温度時刻歴

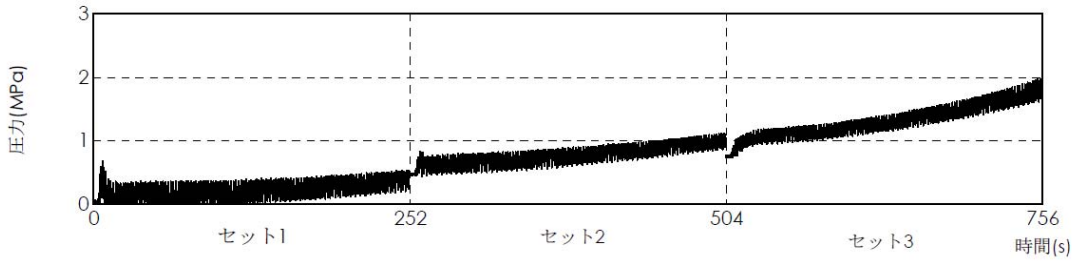


図 1.3.9-51　RDT30 試験体水準 0 試験　粘性体圧力時刻歴

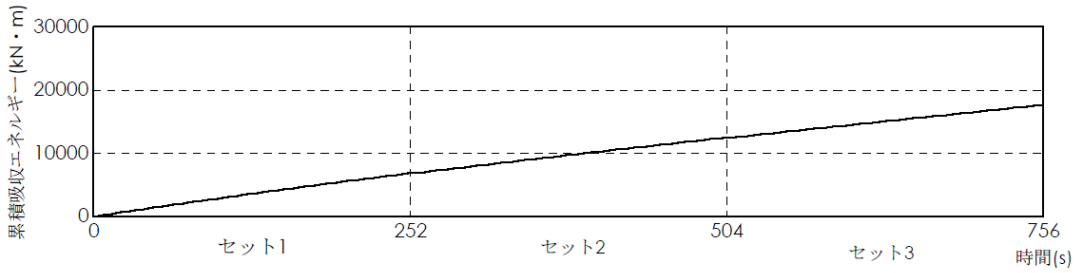


図 1.3.9-52　RDT30 試験体水準 0 試験　累積吸収エネルギー時刻歴

b) 水準 2

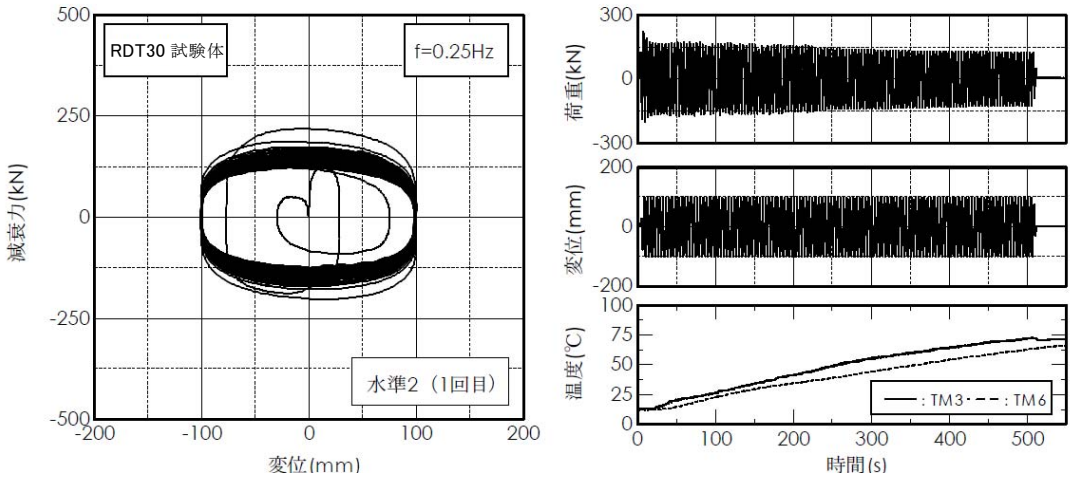
図 1.3.9-53 に水準 2 実験の荷重変形関係、荷重時刻歴、変位時刻歴、代表点温度時刻歴を示す。荷重の温度補正は実施していない。温度代表点として TM3 と TM6 を選択した。

減衰力は、1 セット目では、199kN から 122kN まで低下し、3 セット目の終わりでは 94kN となった。1 セット目の前半では、荷重時刻歴の包絡線が必ずしも滑らかではない。セットを重ねるごとにセット内での減衰力低下量は小さくなったが、減衰力が上昇する傾向は見られなかった。3 セット目まで安定した力学性状を示した。

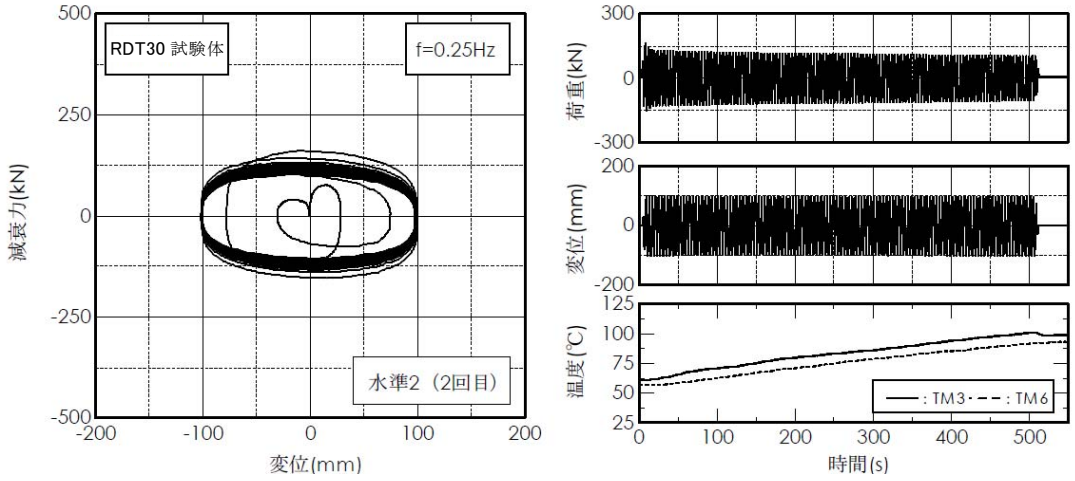
粘性体温度(TM3)は当初の 12.6℃から徐々に上昇し、3 セット目終了時点では 119℃に至った。

図 1.3.9-54~57 に、減衰力、各点温度、粘性体圧力、累積吸収エネルギーの変動を連続して表記したものを示す。1 セット目の前半でサイクルごとの減衰力がばらつきを有している区間が見られるが、大局的には減衰力が漸減する傾向を有していると判断できる。この区間では、粘性体圧力の変動も大きい。減衰力ばらつきの原因として、水準 0 実施後の冷却期間でバッファ部分から空気が粘性体に入り込み、せん断隙間内に広がったことが可能性として考えられる。セット間のインターバル後の数サイクルを除いて、減衰力が連続的に低下し粘性体および外筒温度が連続的に上昇する傾向は、RDT8、RDT16 試験体と同様である。粘性体内部の温度分布は、TM3 が最も高く、TM2、TM1 の順に低くなる。

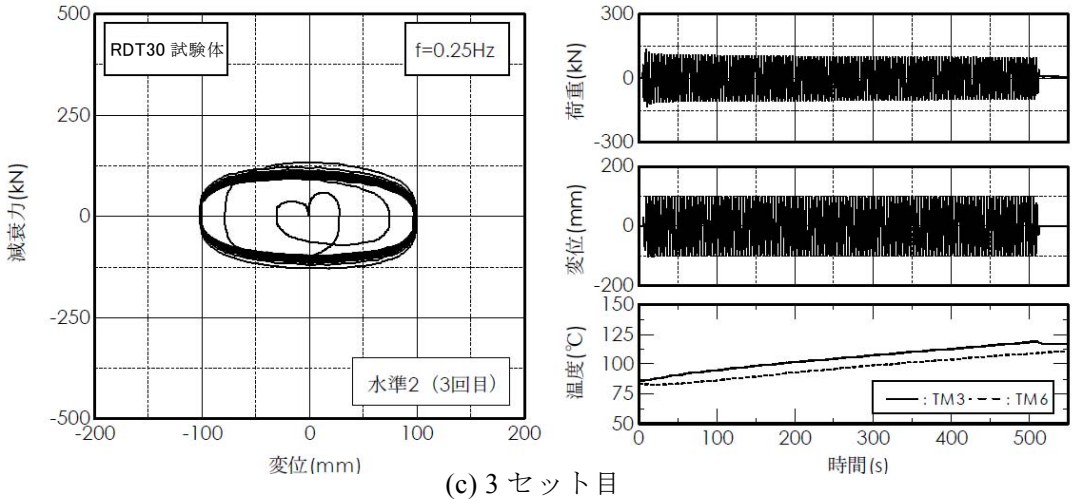
粘性体最大圧力は 0.88MPa（8.7 気圧）であった。総吸収エネルギーは 15.1MJ となり、水準 0 の 0.84 倍であった。



(a) 1 セット目



(b) 2 セット目



(c) 3 セット目

図 1.3.9-53　RDT30 試験体水準 2 実験結果
（荷重変形関係、荷重時刻歴、変位時刻歴、代表点温度時刻歴）

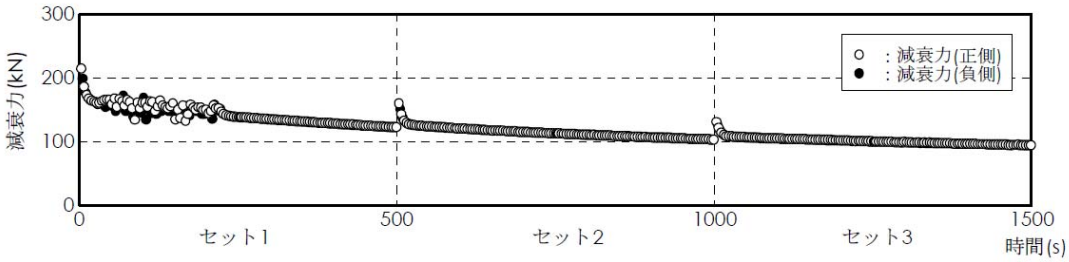


図 1.3.9-54　RDT30 試験体水準 2 試験　減衰力時刻歴

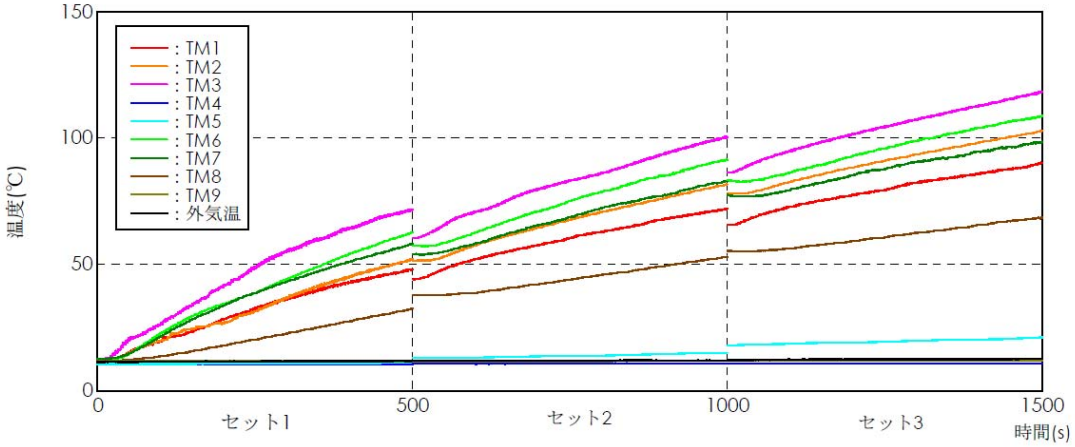


図 1.3.9-55　RDT30 試験体水準 2 試験　温度時刻歴

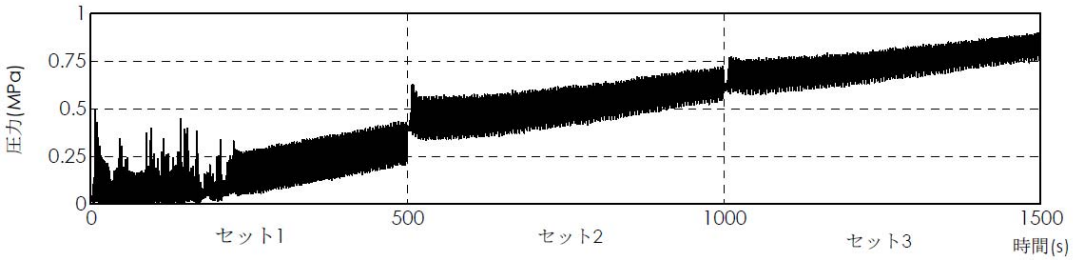


図 1.3.9-56　RDT30 試験体水準 2 試験　粘性体圧力時刻歴

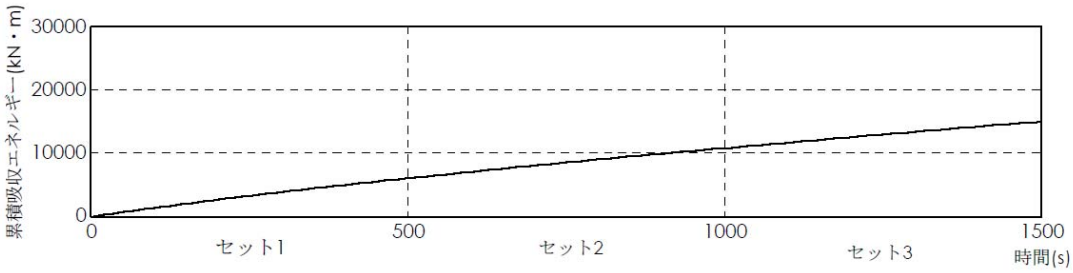


図 1.3.9-57　RDT30 試験体水準 2 試験　累積吸収エネルギー時刻歴

c) 水準 1

図 1.3.9-58 に水準 1 実験の荷重変形関係、荷重時刻歴、変位時刻歴、代表点温度時刻歴を示す。荷重の温度補正は実施していない。温度代表点は TM3 と TM6 である。

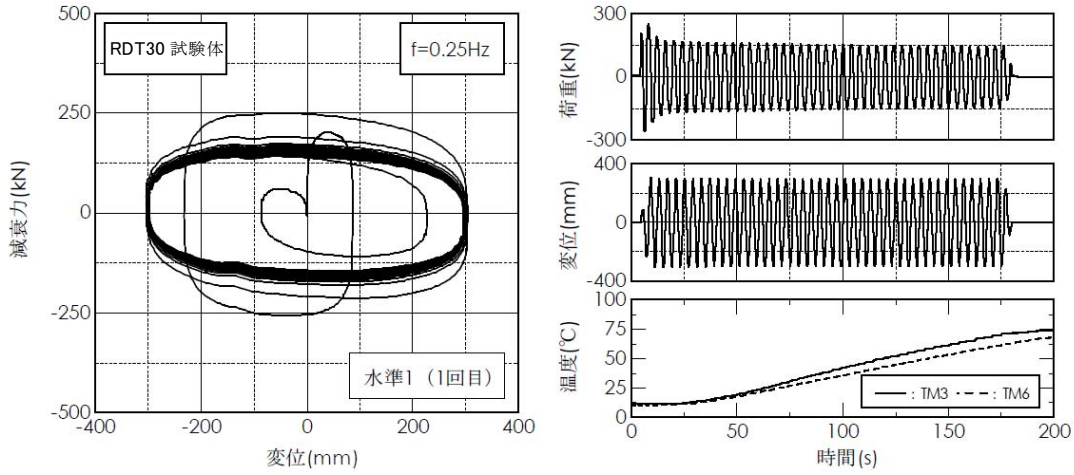
変位 0 切片における減衰力は、1 セット目では、当初の 207kN から 142kN まで低下した。2 セット目では中盤まで減衰力がわずかに低下し、その後わずかに上昇した。3 セット目では、最初の数サイクルでインターバルでの復帰分が低下した後、前半部では減衰力上昇が見られ、後半では再び低下した。

粘性体温度(TM3)は当初の 11.2℃から徐々に上昇し､3 セット目終了時点では 143℃となった。

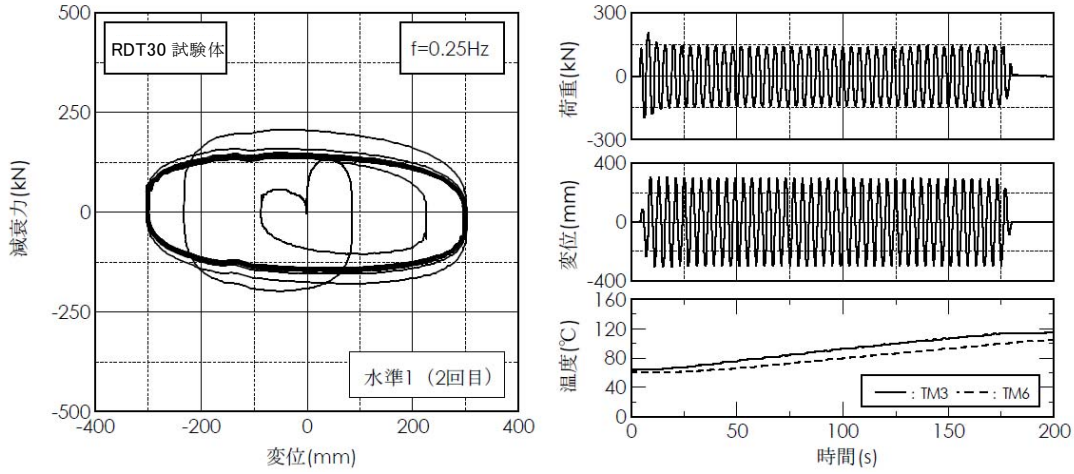
図 1.3.9-59~62 に、減衰力、各点温度、粘性体圧力、累積吸収エネルギーの変動を連続して表記したものを示す。前述のように 2 セット目以降減衰力が増減したのに対し、温度は連続的に上昇した。粘性体内部の温度分布は、TM2 が相対的にやや低く、インターバル時の低下は TM1 が相対的に大きい。

粘性体最大圧力は 2 セット目で 2.5MPa（24.4 気圧）、3 セット目で 6.5MPa（64.0 気圧）に至った。2 セット目の後半で圧力が 1MPa を超えた付近から圧力上昇の時間勾配が大きくなる現象が観察された。総吸収エネルギーは 18.2MJ であり、吸収エネルギーの時間勾配は水準 0 の 1.5 倍程度であった。

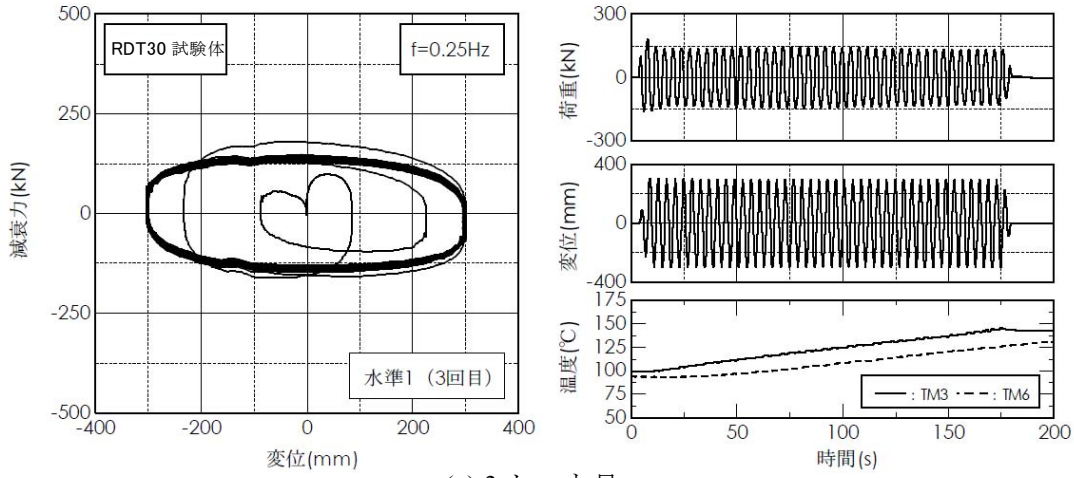
本試験体は、前述したように、大きな温度上昇と圧力上昇が生じやすい構成となっていると考えられるが、長周期地震動によるエネルギー入力として相当厳しいと考えられるこの加力水準においても、粘性体圧力上昇が顕著となる 2 セット目の途中までは安定した力学性状を示した。



(a) 1 セット目



(b) 2 セット目



(c) 3 セット目

図 1.3.9-58　RDT30 試験体水準 1 実験結果
（荷重変形関係、荷重時刻歴、変位時刻歴、代表点温度時刻歴）

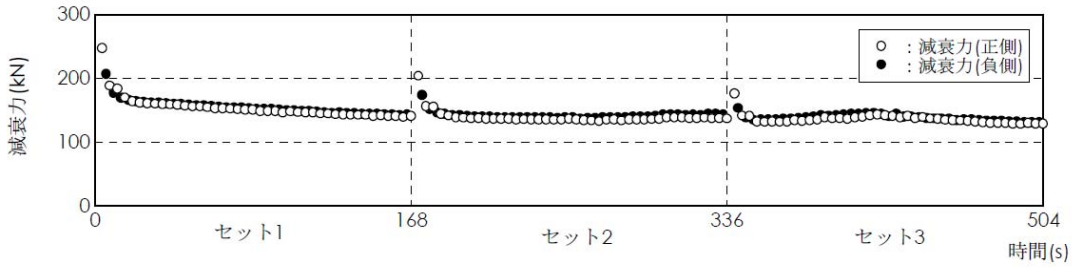


図 1.3.9-59　RDT30 試験体水準 1 試験　減衰力時刻歴

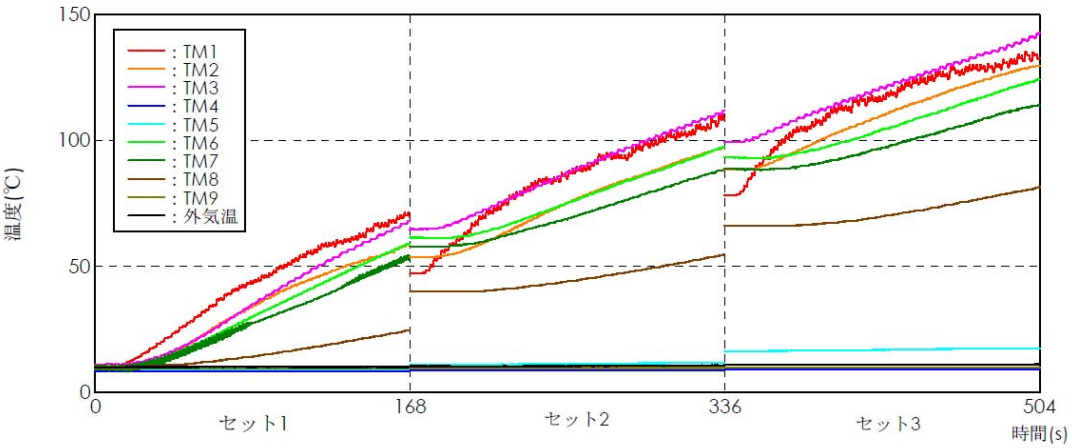


図 1.3.9-60　RDT30 試験体水準 1 試験　温度時刻歴

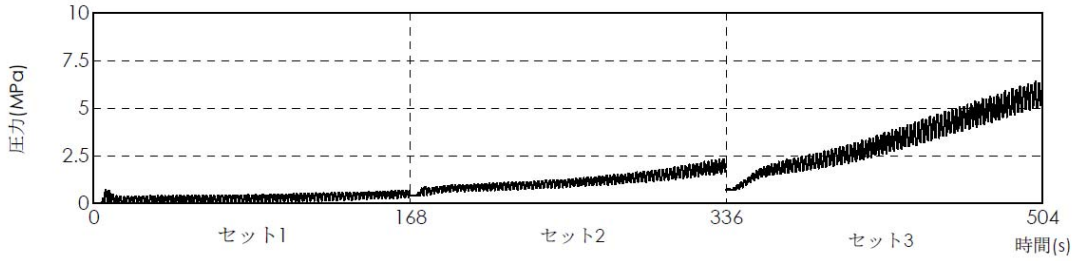


図 1.3.9-61　RDT30 試験体水準 1 試験　粘性体圧力時刻歴

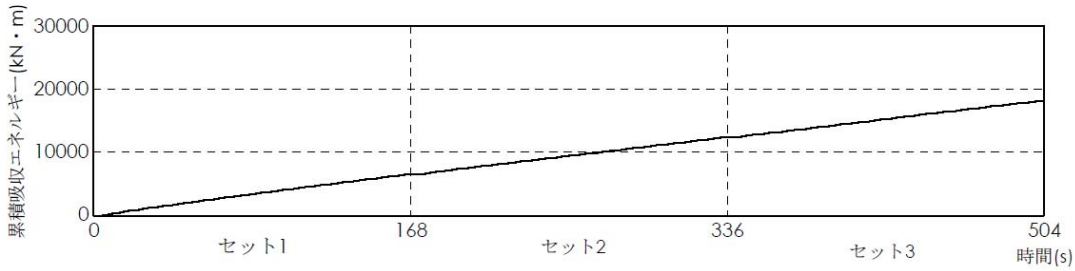


図 1.3.9-62　RDT30 試験体水準 1 試験　累積吸収エネルギー時刻歴

(3) 基本性能試験

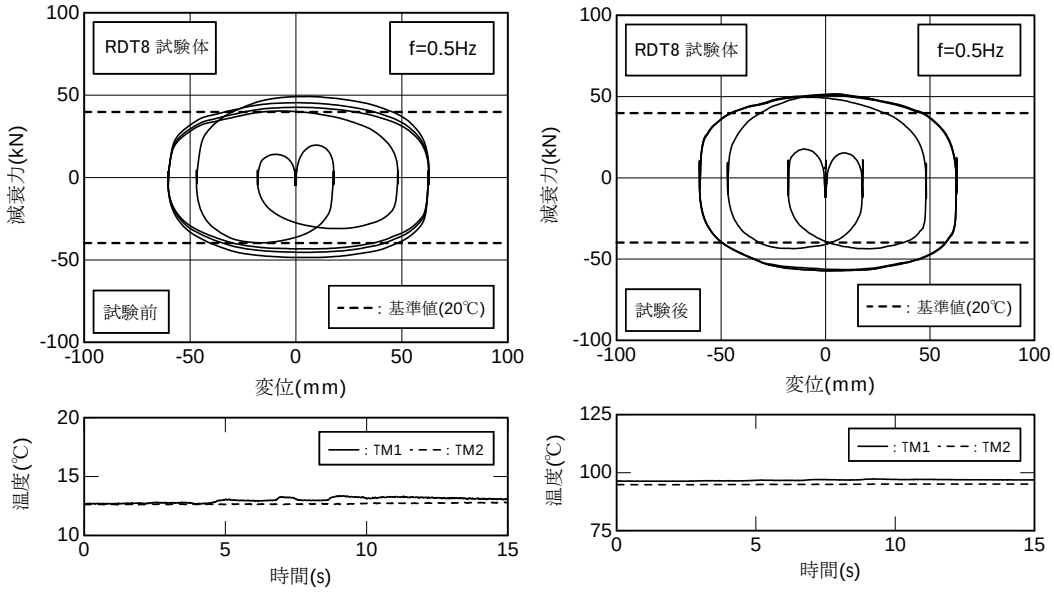
多数回高速繰り返し実験の直前直後に実施した基本性能試験結果を比較する。

1) RDT8 試験体

a) 水準 0 の前後

図 1.3.9-63 に、RDT8 試験体水準 0 前後の基本性能試験結果を示す。減衰力はいずれも 20℃に補正した。温度補正に用いる粘性体温度は製品試験における方法に従い TM1 および TM2 の平均値を採った（以下同じ）。水準 0 直後の温度は温度補正式の適用外であるが、式を外挿し適用した。

水準 0 直後の基本性能試験における温度補正後減衰力は、水準 0 直前の温度補正後減衰力を上回る。内部圧力上昇による減衰力の上昇と、温度補正式外挿による誤差が原因と考えられ、粘性体自体に特性の変化が生じていたかどうかは明らかでない。



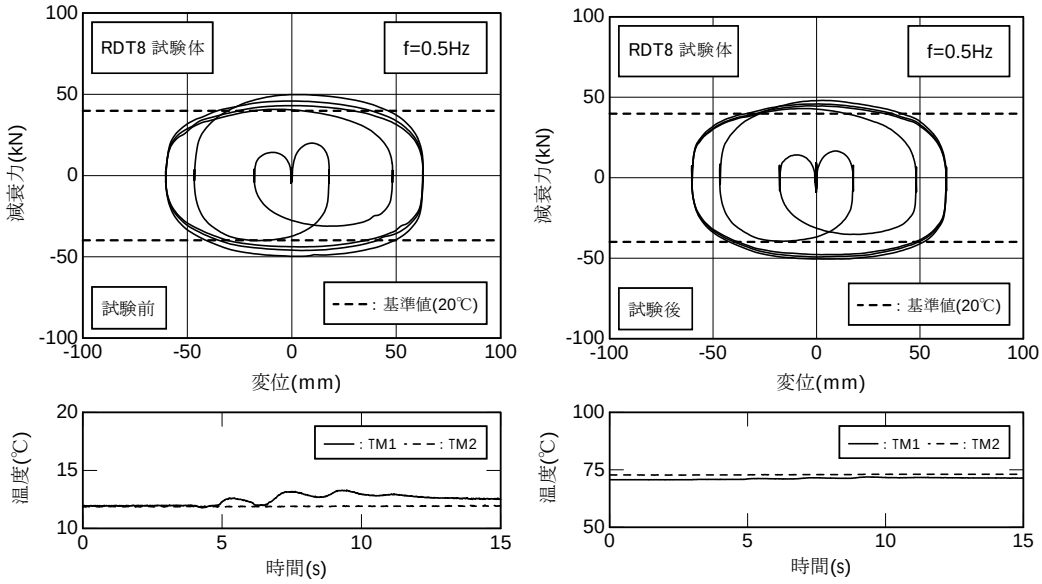
(a) 水準 0 直前　　(b) 水準 0 直後

図 1.3.9-63　RDT8 試験体水準 0 前後の基本性能試験結果

b) 水準 2 の前後

図 1.3.9-64 に、RDT8 試験体水準 2 前後の基本性能試験結果を示す。温度補正に関する扱いは水準 0 と同様である。

水準 2 直前の基本性能試験による荷重変形関係は、水準 0 直前のそれと同様であり、冷却後の特性に変化は見られない。水準 2 直後の温度補正後減衰力は、水準 2 直前の温度補正後の減衰力と同程度であり、この温度領域においては、粘性体自体の特性の変化はほとんどなく、温度補正式も適用可能であると考えられる。



(a) 水準 2 直前　　(b) 水準 2 直後

図 1.3.9-64　RDT8 試験体水準 2 前後の基本性能試験結果

c) 水準 1 の直前

図 1.3.9-65 に、RDT8 試験体水準 1 直前の基本性能試験結果を示す。温度補正に関する扱いは水準 0､2 と同様である。水準 1 は限界状態発現により試験を中断したため、直後の基本性能試験は実施していない。

水準 1 直前の基本性能試験による荷重変形関係は、水準 0 直前および水準 2 直前のそれと同様であり、冷却後の特性に変化は見られない。

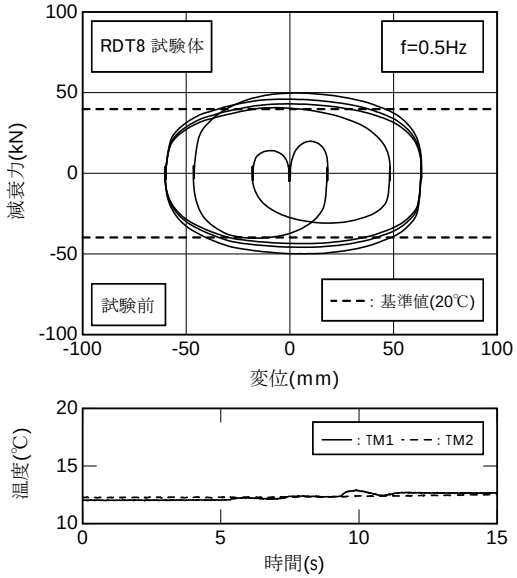


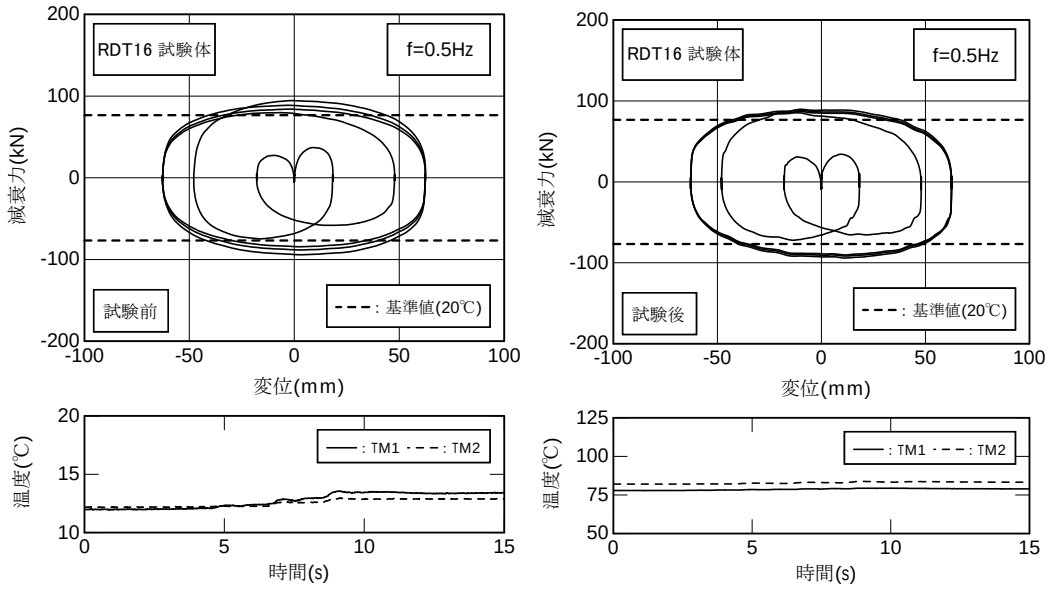
図 1.3.9-65　RDT8 試験体水準 1 直前の基本性能試験結果

2) RDT16 試験体

a) 水準 0 の前後

図 1.3.9-66 に、RDT16 試験体水準 0 前後の基本性能試験結果を示す。温度補正に関する扱いは RDT8 試験体と同様、TM1 および TM2 の平均値を用いて減衰力を 20℃相当の値に補正した。

水準 0 直後の温度補正後減衰力は、水準 0 直前の温度補正後の減衰力と同程度であり、粘性体自体の特性の変化はほとんどなく、温度補正式も適用可能であると考えられる。



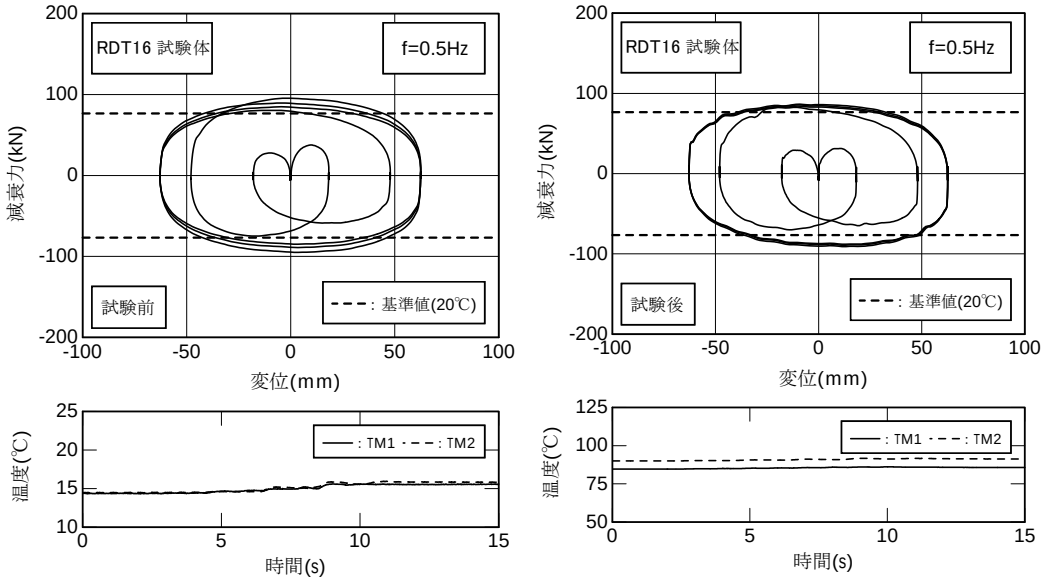
(a) 水準 0 直前　　(b) 水準 0 直後

図 1.3.9-66　RDT16 試験体水準 0 前後の基本性能試験結果

b) 水準 1 の前後

図 1.3.9-67 に、RDT16 試験体水準 1 前後の基本性能試験結果を示す。温度補正に関する扱いは水準 0 と同様である。

水準 1 直前の基本性能試験による荷重変形関係は、水準 0 直前のそれと同様であり、冷却後の特性に変化は見られない。水準 1 直後の温度補正後減衰力は、水準 1 直前の温度補正後の減衰力と同程度であり、粘性体自体の特性の変化はほとんどなく、温度補正式も適用可能であると考えられる。



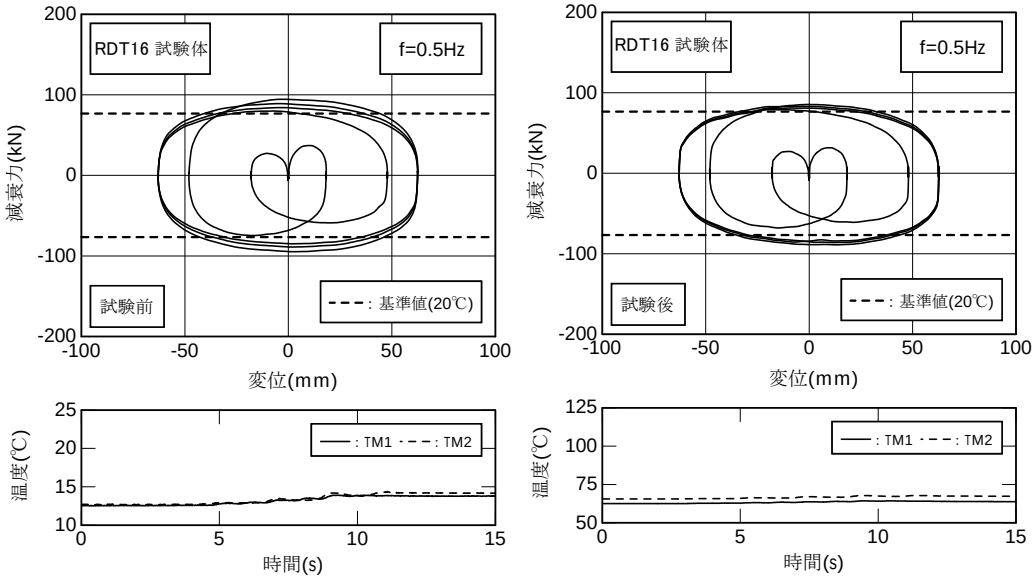
(a) 水準 1 直前　　(b) 水準 1 直後

図 1.3.9-67　RDT16 試験体水準 1 前後の基本性能試験結果

c) 水準 2 の前後

図 1.3.9-68 に、RDT16 試験体水準 2 前後の基本性能試験結果を示す。温度補正に関する扱いは水準 0､1 と同様である。

水準 2 直後の温度補正後減衰力は、水準 2 直前の温度補正後の減衰力と同程度であり、粘性体自体の特性の変化はほとんどなく、温度補正式も適用可能であると考えられる。



(a) 水準 2 直前　　(b) 水準 2 直後

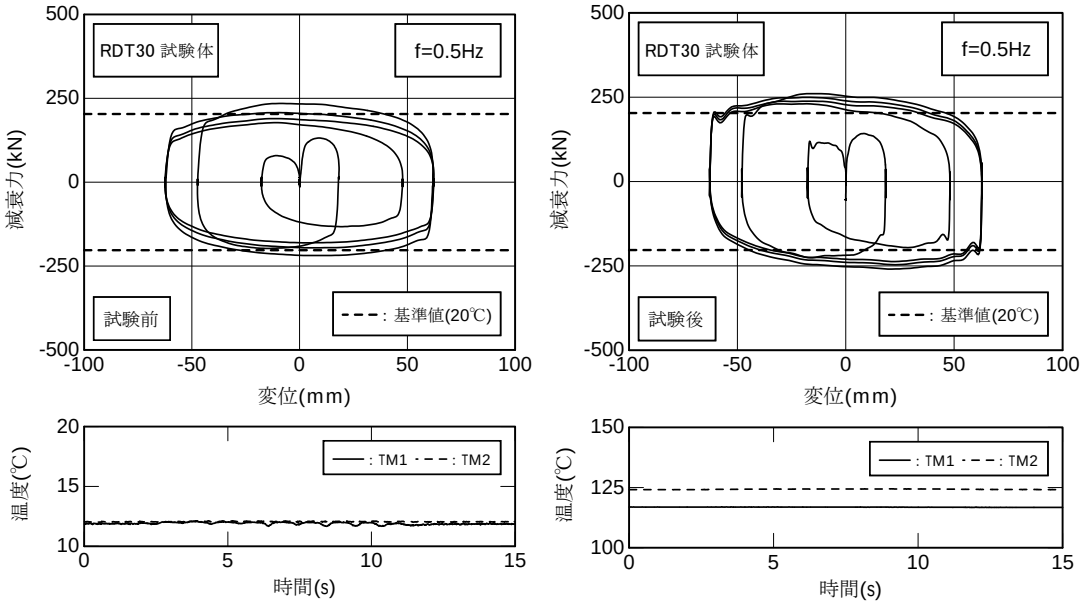
図 1.3.9-68　RDT16 試験体水準 2 前後の基本性能試験結果

3) RDT30 試験体

a) 水準 0 の前後

図 1.3.9-69 に、RDT30 試験体水準 0 前後の基本性能試験結果を示す。温度補正に関する扱いは RDT8 試験体、RDT16 試験体と同様、TM1 および TM2 の平均値を用いて減衰力を 20℃相当の値に補正した。

水準 0 直後の基本性能試験における温度補正後減衰力は、水準 0 直前の温度補正後減衰力をわずかながら上回る。内部圧力上昇による減衰力の上昇と、温度補正式外挿による誤差が原因と考えられ、粘性体自体に特性の変化が生じていたかどうかは明らかでない。



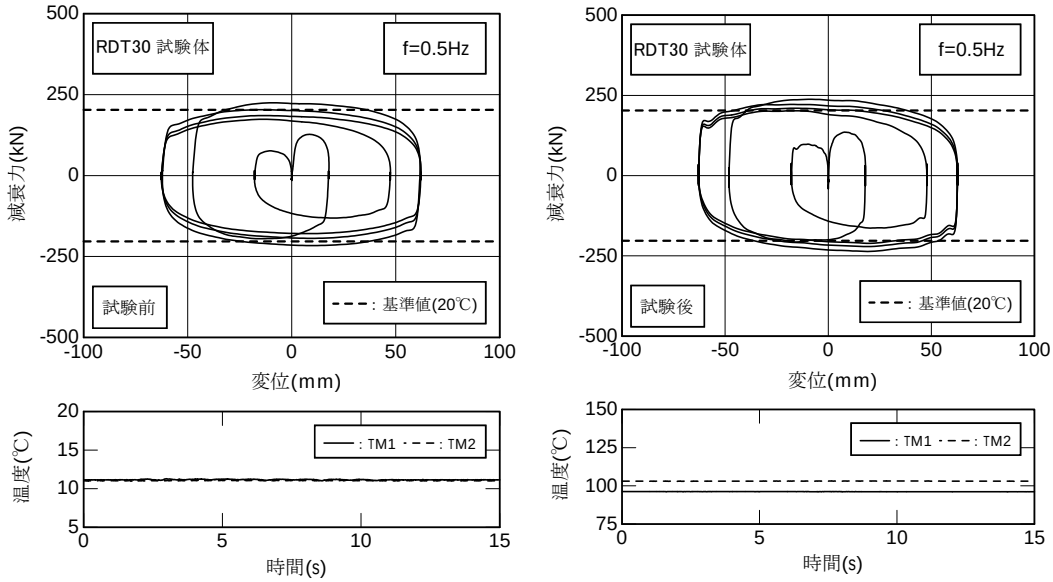
(a) 水準 0 直前　　(b) 水準 0 直後

図 1.3.9-69　RDT30 試験体水準 0 前後の基本性能試験結果

b) 水準 2 の前後

図 1.3.9-70 に、RDT30 試験体水準 2 前後の基本性能試験結果を示す。温度補正に関する扱いは水準 0 と同様である。

水準 2 直前の基本性能試験による荷重変形関係は、水準 0 直前のそれと同様であり、冷却後の特性に変化は見られない。水準 2 直後の温度補正後減衰力は、水準 2 直前の温度補正後の減衰力と同程度であり、この温度領域においては、粘性体自体の特性の変化はほとんどなく、温度補正式も適用可能であると考えられる。



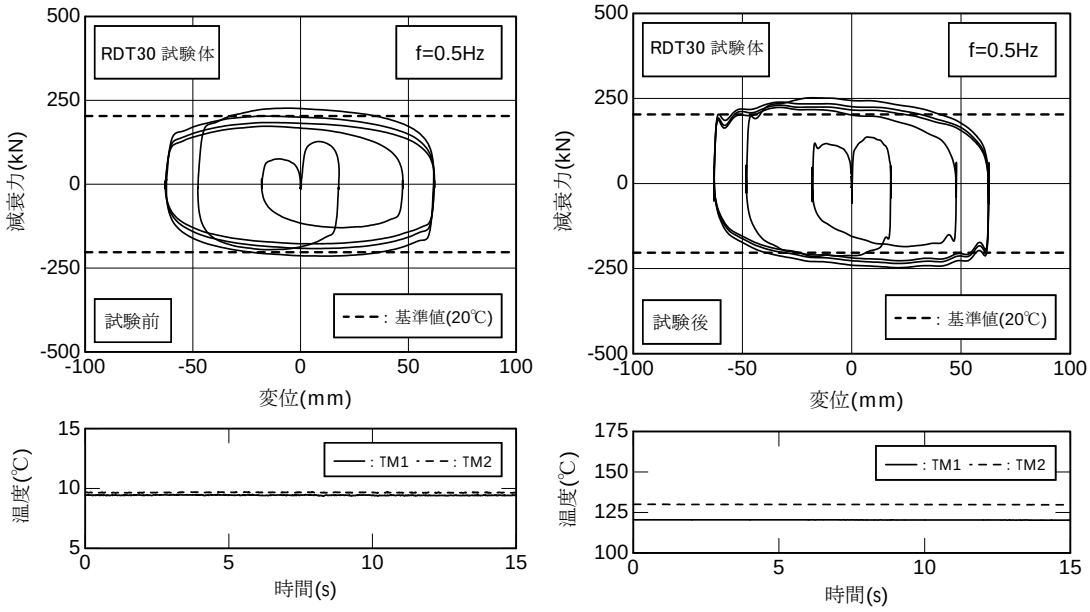
(a) 水準 2 直前　　(b) 水準 2 直後

図 1.3.9-70　RDT30 試験体水準 2 前後の基本性能試験結果

c) 水準 1 の前後

図 1.3.9-71 に、RDT30 試験体水準 1 前後の基本性能試験結果を示す。温度補正に関する扱いは水準 0､2 と同様である。

水準 1 直前の基本性能試験による荷重変形関係は、水準 0 直前および水準 2 直前のそれと同様であり、冷却後の特性に変化は見られない。水準 1 直後の基本性能試験における温度補正後減衰力は、水準 1 直前の温度補正後減衰力をわずかながら上回る。内部圧力上昇による減衰力の上昇と、温度補正式外挿による誤差が原因と考えられ、粘性体自体に特性の変化が生じていたかどうかは明らかでない。



(a) 水準 1 直前　　(b) 水準 1 直後

図 1.3.9-71　RDT30 試験体水準 1 前後の基本性能試験結果

(4) 温度低下性状

多数回高速繰り返し実験における各セット間のインターバル時(インターバル前半の 5 分間)、および各水準終了後に温度計測を実施した。

1) RDT8 試験体

a) インターバル時

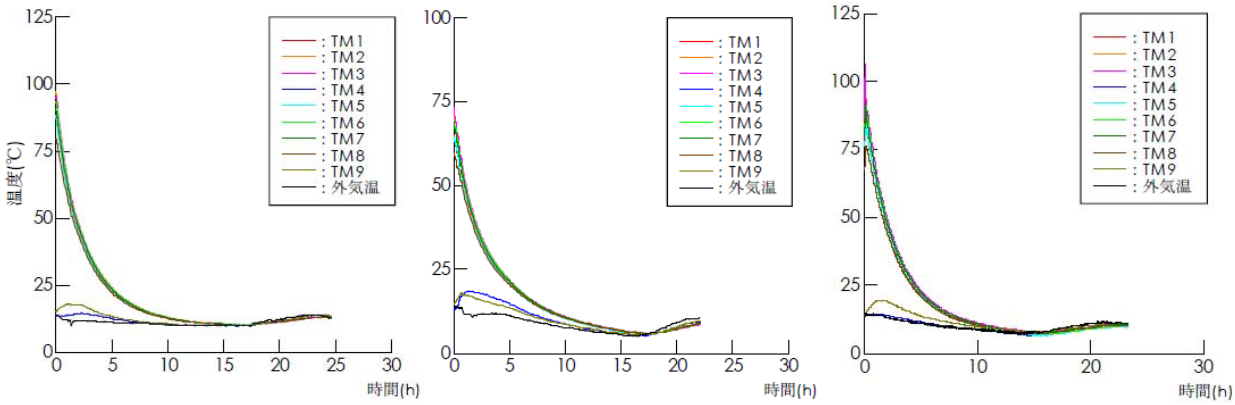
図 1.3.9-72（次ページ）に、各インターバル時の温度変化時刻歴を示す。(a)～(c)図が水準 0 実験における 1 セット目後～3 セット目後、(d)～(f)図が水準 2 実験における 1 セット目後～3 セット目後、(g)～(j)図が水準 1 実験における 1 セット目後～3 セット目後の計測結果である。

インターバル直後の数十秒～100 秒程度の間に粘性体温度の低下と周辺鉄部の温度上昇が見られるが、その後は大幅な温度の変化は見られない。粘性体温度の低下は、水準 0 で 10℃程度、水準 2 で 5℃程度、水準 1 で 20℃程度であった。

b) 各水準終了後

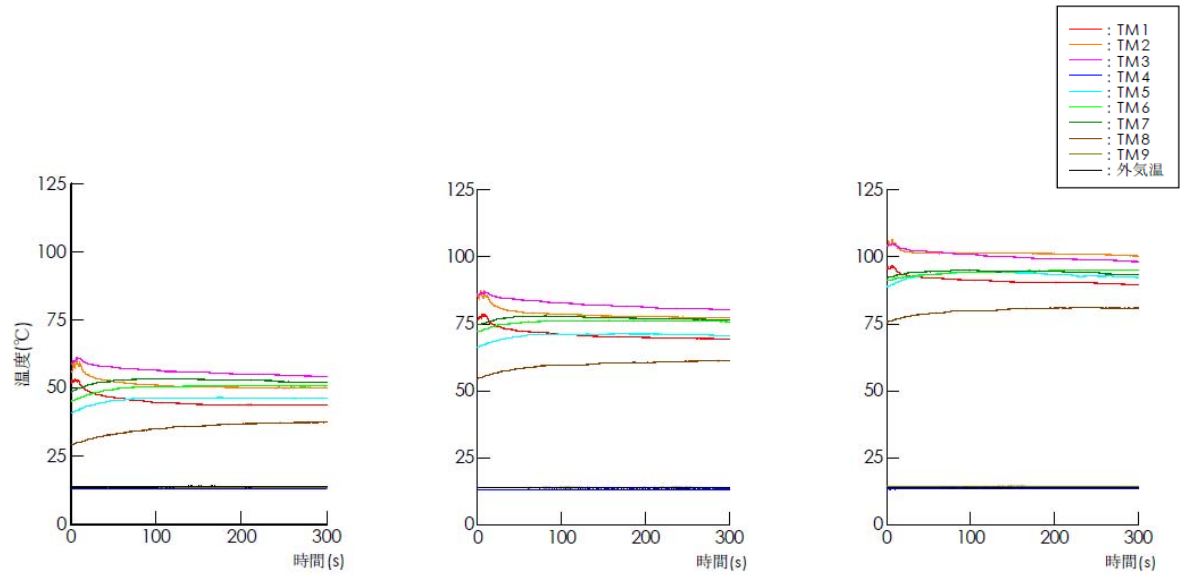
各水準終了後に加力装置から試験体を取り外し、実験場内に放置した状態で温度計測を実施した。図 1.3.9-73 に、各水準後の温度変化時刻歴を示す。(a)図が水準 0 実験後、(b)図が水準 2 実験後、(c)図が水準 1 実験後の計測結果である。

高温となった TM1～TM3、TM5～TM8 の各点温度は最初の 10 時間程度で大幅に低下する。当初の 2～3 時間は TM4、TM9 に温度上昇が見られ試験体内の熱伝導による熱の拡散が生じていることがわかるが、その後は全計測点の温度が低下し、熱伝達（対流）による冷却が支配的となる。粘性体および鉄部の各点温度がほぼ一様となり、かつ室温程度に冷却されるまでには、15～17 時間要する。

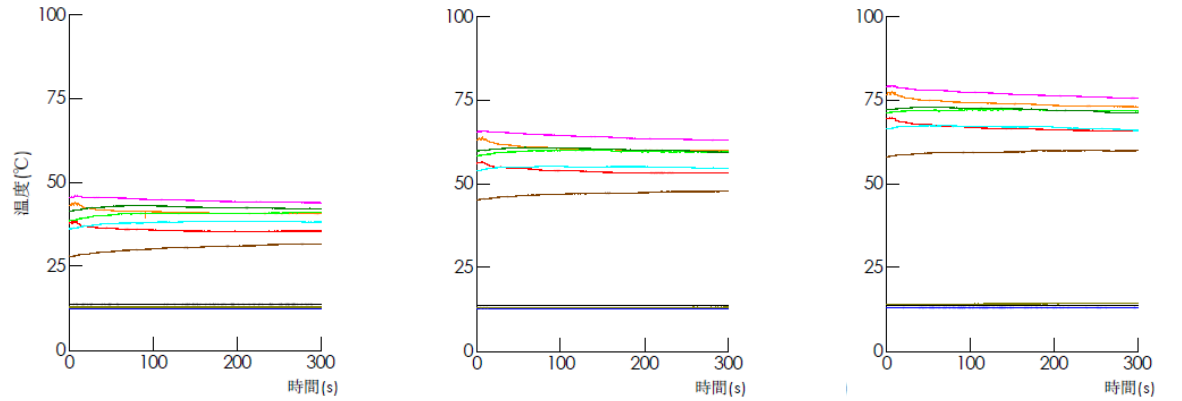


(a) 水準 0 実験後　　(b) 水準 2 実験後　　(c) 水準 1 実験後

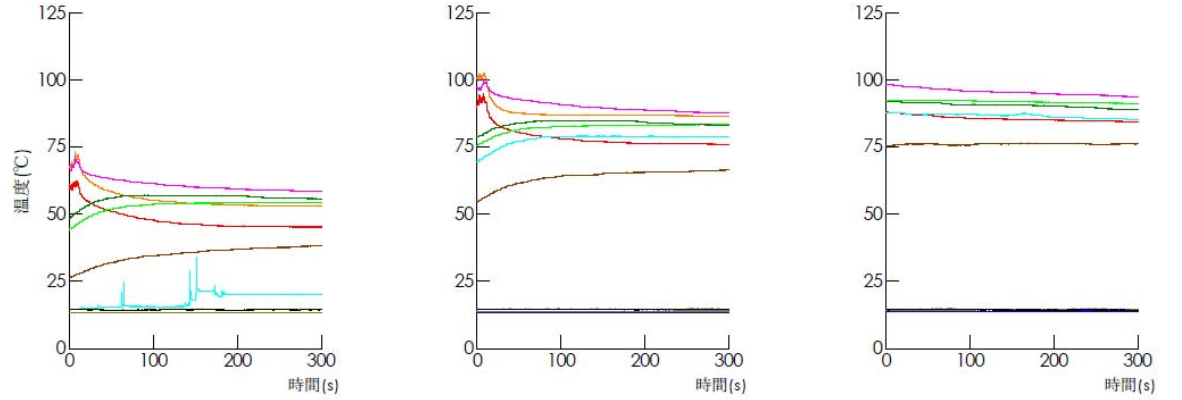
図 1.3.9-73　RDT8 試験体各水準後の温度変化時刻歴



(a) 水準 0　1 セット目実験後　(b) 水準 0　2 セット目実験後　(c) 水準 0　3 セット目実験後



(d) 水準 2　1 セット目実験後　(e) 水準 2　2 セット目実験後　(f) 水準 2　3 セット目実験後



(g) 水準 1　1 セット目実験後　(h) 水準 1　2 セット目実験後　(j) 水準 1　3 セット目実験後

図 1.3.9-72　RDT8 試験体各水準後の温度変化時刻歴

2) RDT16 試験体

a) インターバル時

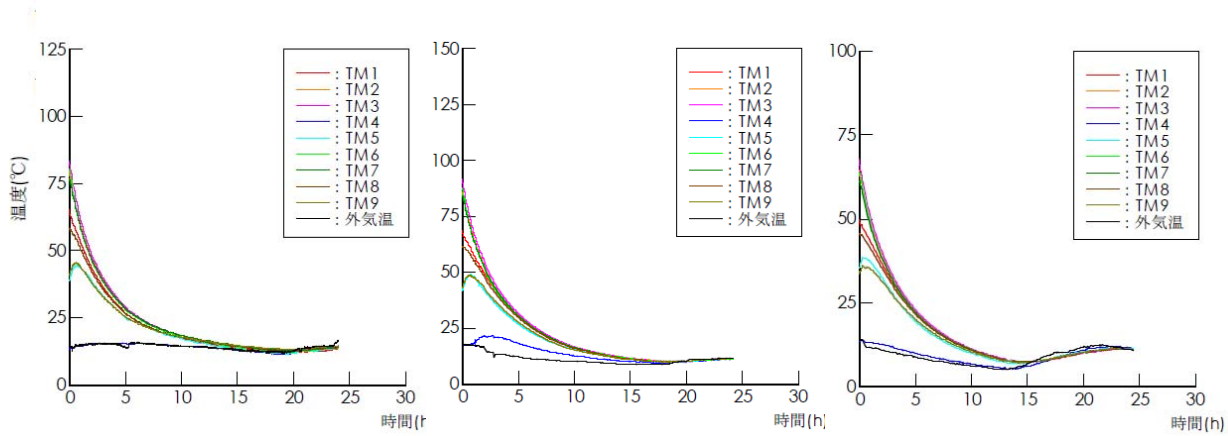
図 1.3.9-74（次ページ）に、各インターバル時の温度変化時刻歴を示す。((a)～(c)図が水準 0 実験における 1 セット目後～3 セット目後、(d)～(f)図が水準 1 実験における 1 セット目後～3 セット目後、(g)～(j)図が水準 2 実験における 1 セット目後～3 セット目後の計測結果である。

RDT8 試験体と同様の性状を示す。粘性体温度の低下は、水準 0 で 20℃程度、水準 1 で 30℃程度、水準 2 で 10℃程度であった。

b) 各水準終了後

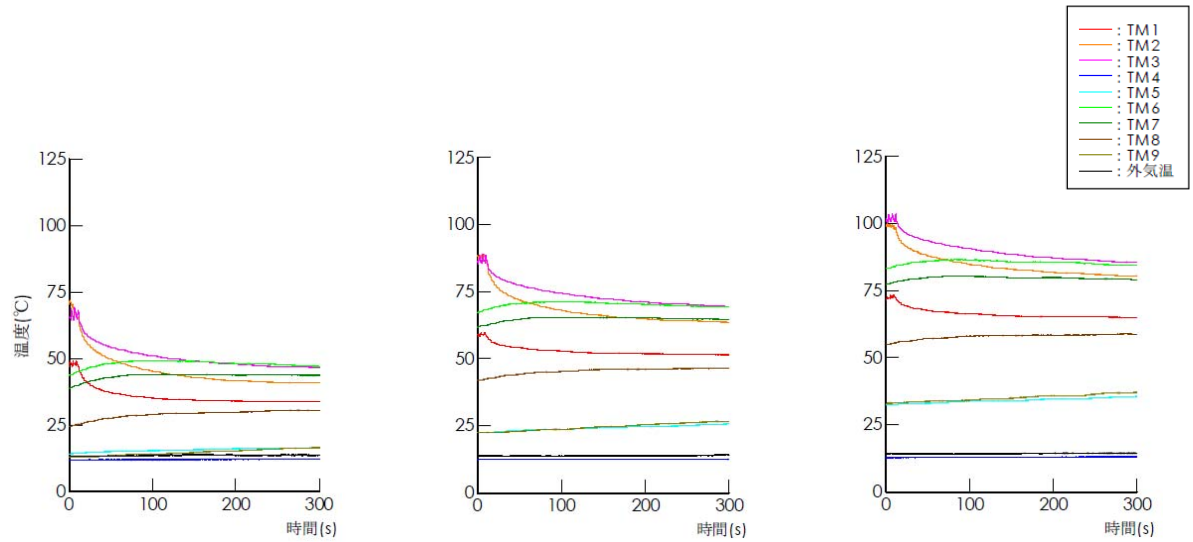
各水準終了後に加力装置から試験体を取り外し、実験場内に放置した状態で温度計測を実施した。図 1.3.9-75 に、各水準後の温度変化時刻歴を示す。(a)図が水準 0 実験後、(b)図が水準 1 実験後、(c)図が水準 2 実験後の計測結果である。

RDT8 試験体と同様の性状であるが、高温部の温度低下はやや緩慢であり、熱伝導による熱の拡散は水準 0、水準 2 であまり明確ではない。粘性体および鉄部の各点温度がほぼ一様となり、かつ室温程度に冷却されるまでには、15～20 時間要する。

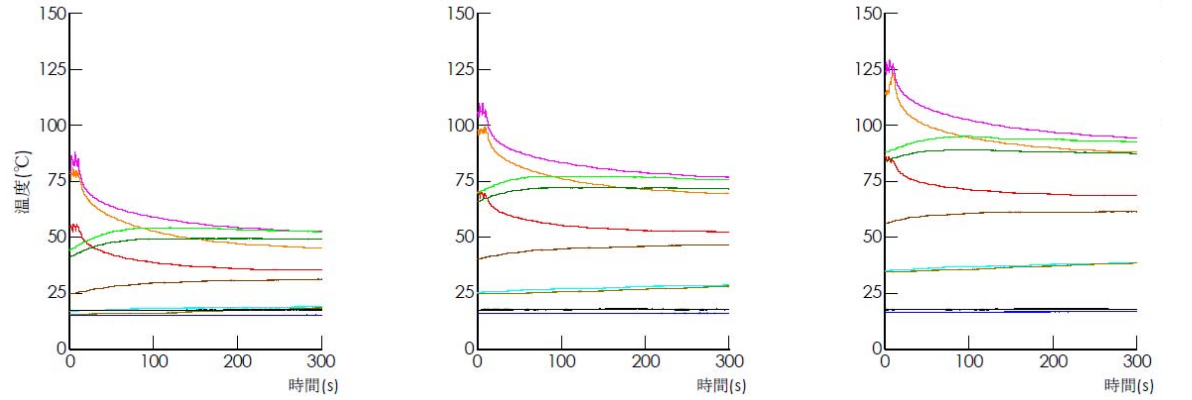


(a) 水準 0 実験後　　(b) 水準 1 実験後　　(c) 水準 2 実験後

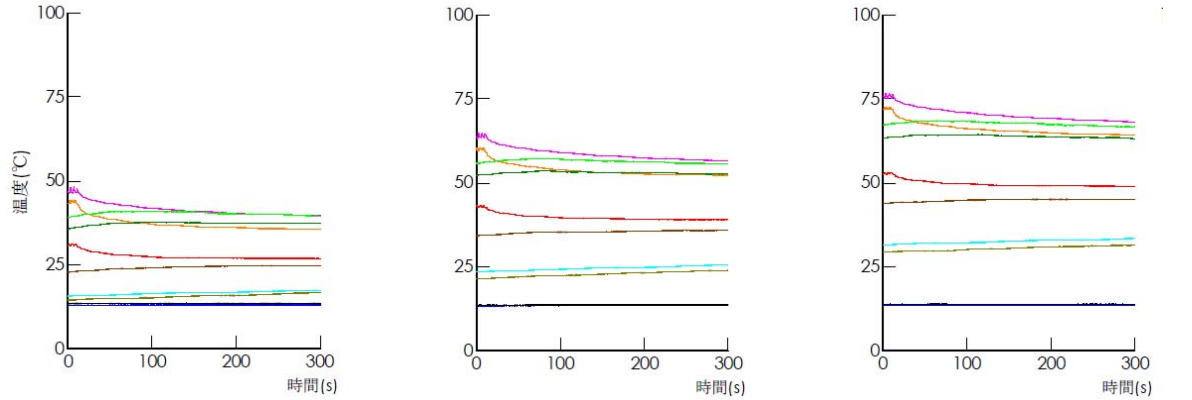
図 1.3.9-75　RDT16 試験体各水準後の温度変化時刻歴



(a) 水準 0　1 セット目実験後　(b) 水準 0　2 セット目実験後　(c) 水準 0　3 セット目実験後



(d) 水準 1　1 セット目実験後　(e) 水準 1　2 セット目実験後　(f) 水準 1　3 セット目実験後



(g) 水準 2　1 セット目実験後　(h) 水準 2　2 セット目実験後　(j) 水準 2　3 セット目実験後

図 1.3.9-74　RDT16 試験体各水準後の温度変化時刻歴

3) RDT30 試験体

a) インターバル時

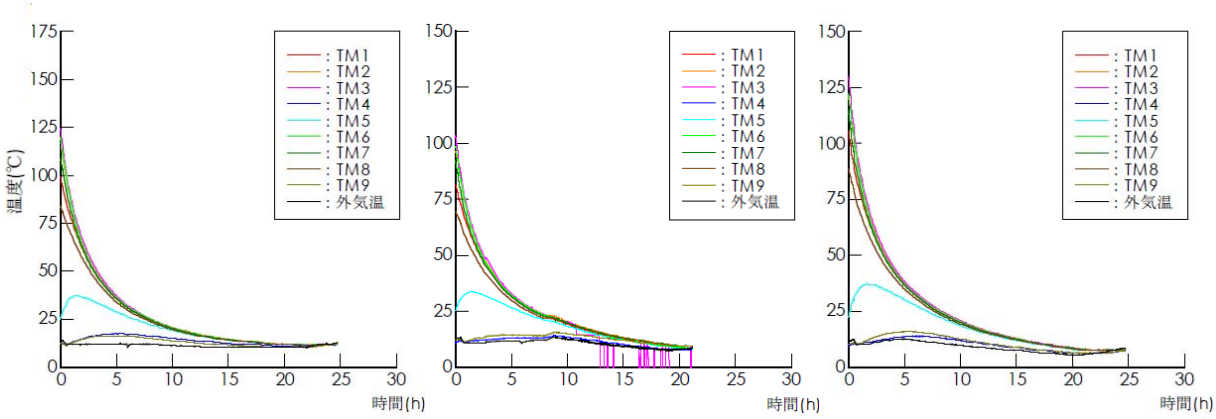
図 1.3.9-76（次ページ）に、各インターバル時の温度変化時刻歴を示す。(a)～(c)図が水準 0 実験における 1 セット目後～3 セット目後、(d)～(f)図が水準 2 実験における 1 セット目後～3 セット目後、(g)～(j)図が水準 1 実験における 1 セット目後～3 セット目後の計測結果である。

RDT8、RDT16 試験体と同様の性状を示す。5 分間の粘性体温度の低下は、水準 0 の TM1、TM3 で 20℃程度、水準 1 の TM1 で 30℃程度、水準 2 の TM1～TM3 で 10℃程度であった。

b) 各水準終了後

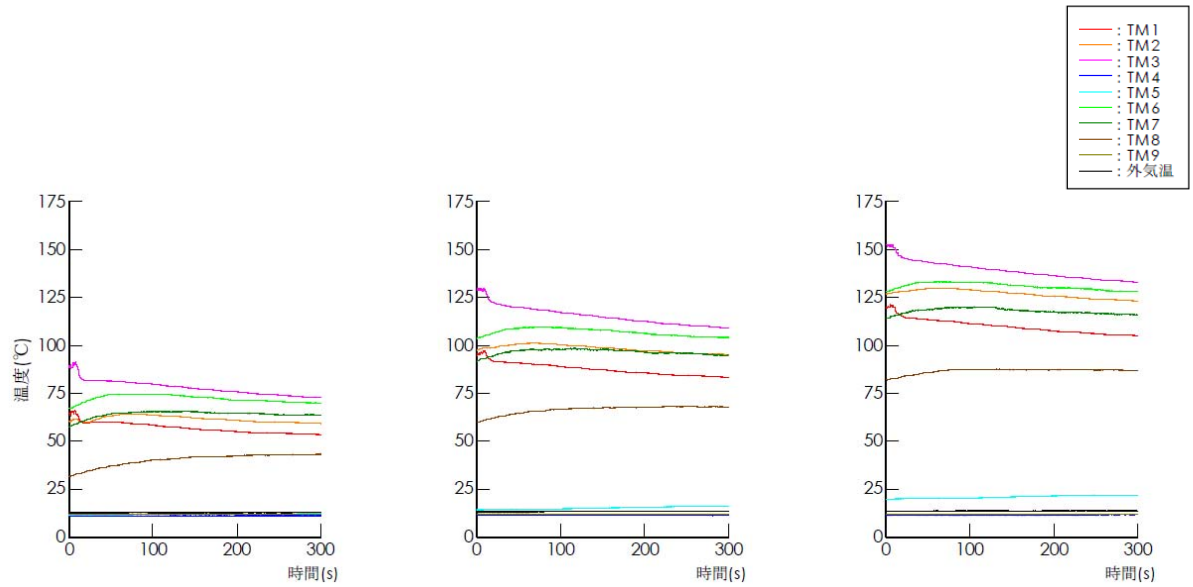
各水準終了後に加力装置から試験体を取り外し、実験場内に放置した状態で温度計測を実施した。図 1.3.9-77 に、各水準後の温度変化時刻歴を示す。(a)図が水準 0 実験後、(b)図が水準 2 実験後、(c)図が水準 1 実験後の計測結果である。

RDT8、RDT16 試験体と同様の性状である。熱伝導による TM4、TM9 への熱の拡散は水準 0、水準 1 で放置後 6 時間程度まで確認できる。粘性体および鉄部の各点温度がほぼ一様となり、かつ室温程度に冷却されるまでには、22～25 時間要する。

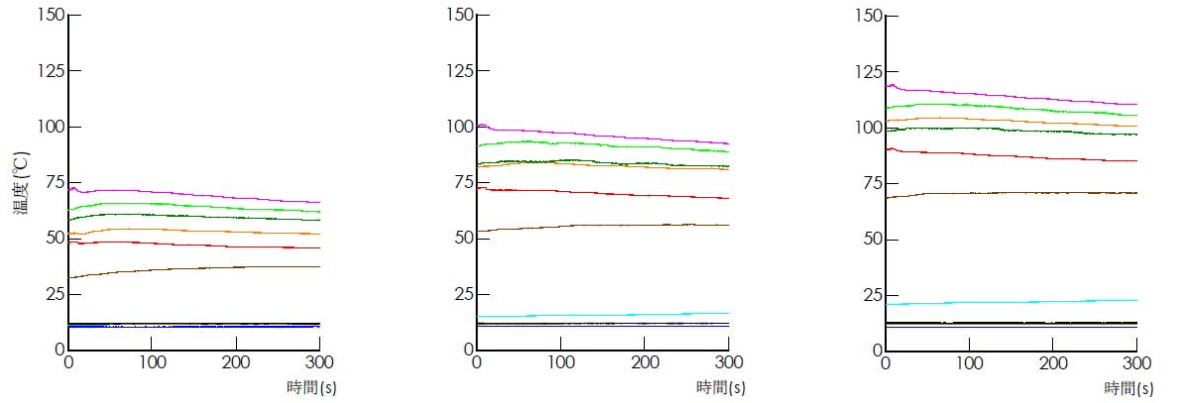


(a) 水準 0 実験後　　(b) 水準 2 実験後　　(c) 水準 1 実験後

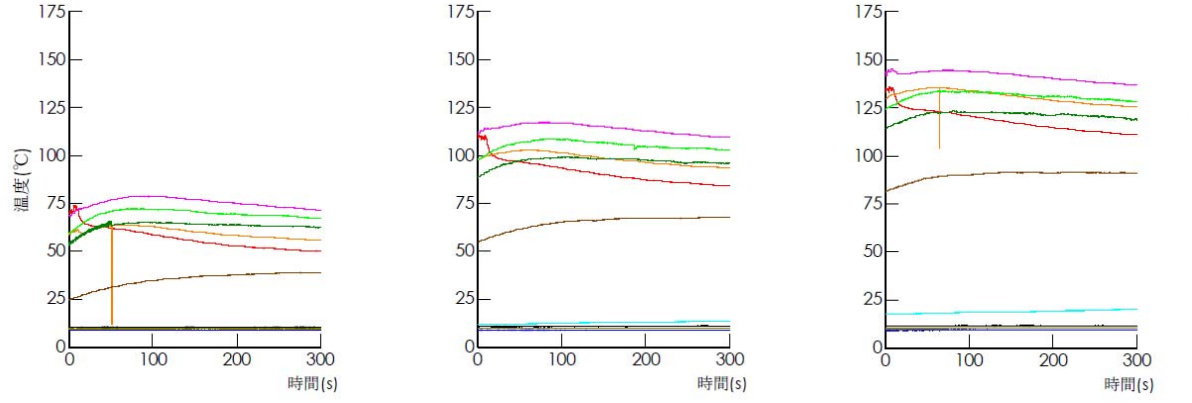
図 1.3.9-77　RDT30 試験体各水準後の温度変化時刻歴



(a) 水準 0　1 セット目実験後　(b) 水準 0　2 セット目実験後　(c) 水準 0　3 セット目実験後



(d) 水準 2　1 セット目実験後　(e) 水準 2　2 セット目実験後　(f) 水準 2　3 セット目実験後



(g) 水準 1　1 セット目実験後　(h) 水準 1　2 セット目実験後　(j) 水準 1　3 セット目実験後

図 1.3.9-76　RDT30 試験体各水準後の温度変化時刻歴

(5) 考察

1) 繰り返し特性評価

a) 既往の評価法による適用限界

図 1.3.9-78～80 に、RDT8、RDT16、RDT30 各試験体の各水準実験毎に、減衰力の変動を既往式による評価と重ね書きして示す。既往の評価式は、式(1.3.9-2)による繰り返し依存性と、式(1.3.9-3)による温度依存性を乗じたものである。式(1.3.9-2)には粘性抵抗力による累積吸収エネルギー量と粘性体の充填されている容積の比（以下、単位体積エネルギー）Ev / Vv に、式(1.3.9-3) には粘性体温度 t に適用範囲があり、今般調査の範囲はその適用範囲を超えるが、式(1.3.9-2)、式(1.3.9-3)が外挿可能であるものとして適用した。評価にあたって、粘性体温度は TM1、TM2 計測点の平均値を採った。

$$\alpha = 1 /(1 + a (Ev / Vv))^{b} \qquad (1.3.9\text{-}2)$$

ここで、 α ：繰り返し依存係数（下限値： α ＝0.7、基準値 α ＝0.85）

Ev：粘性抵抗力による累積吸収エネルギー量(J)

Vv：粘性体の充填されている容積(cc)

適用範囲 Ev / Vv≦1200J/cc

a ＝0.0016 $Ln(f)$ +0.011 （short 型、10 万 cst 型）

a ＝0.0014 $Ln(f)$ +0.009 （30 万 cst 型）

b＝0.394･$f^{0.087}$

f：振動数(Hz) 適用範囲 2s≦1 / f ≦6s

$$\left.\begin{aligned} &\xi_2 = \eta(Vs,t) / \eta(Vs,20) \\ &\eta(Vs,t) = \eta_t /(1+ b \cdot Vs)^{\beta} \times 10^{-6} \\ &b = 0.000472 \cdot \eta_t^{0.276} \\ &\beta = 0.308 \cdot \eta_t^{0.081} \\ &\eta_t = 1.02^{(25-t)} \cdot \eta_{25} \end{aligned}\right\} \qquad (1.3.9\text{-}3)$$

ここで、 t：粘性体温度（℃） 適用範囲 0℃≦t ≦40℃

Vs：せん断ひずみ速度（s^{-1}）

$\eta(Vs,t)$：せん断ひずみ速度 Vs、温度 t における見かけの粘度(Pa･s)

η_t：低速度定常領域、温度 t における動粘度(cSt)

η_{25}：温度 25℃における動粘度(cSt)

η_{25}＝100000 （short 型、10 万 cst 型）

η_{25}＝300000 （30 万 cst 型）

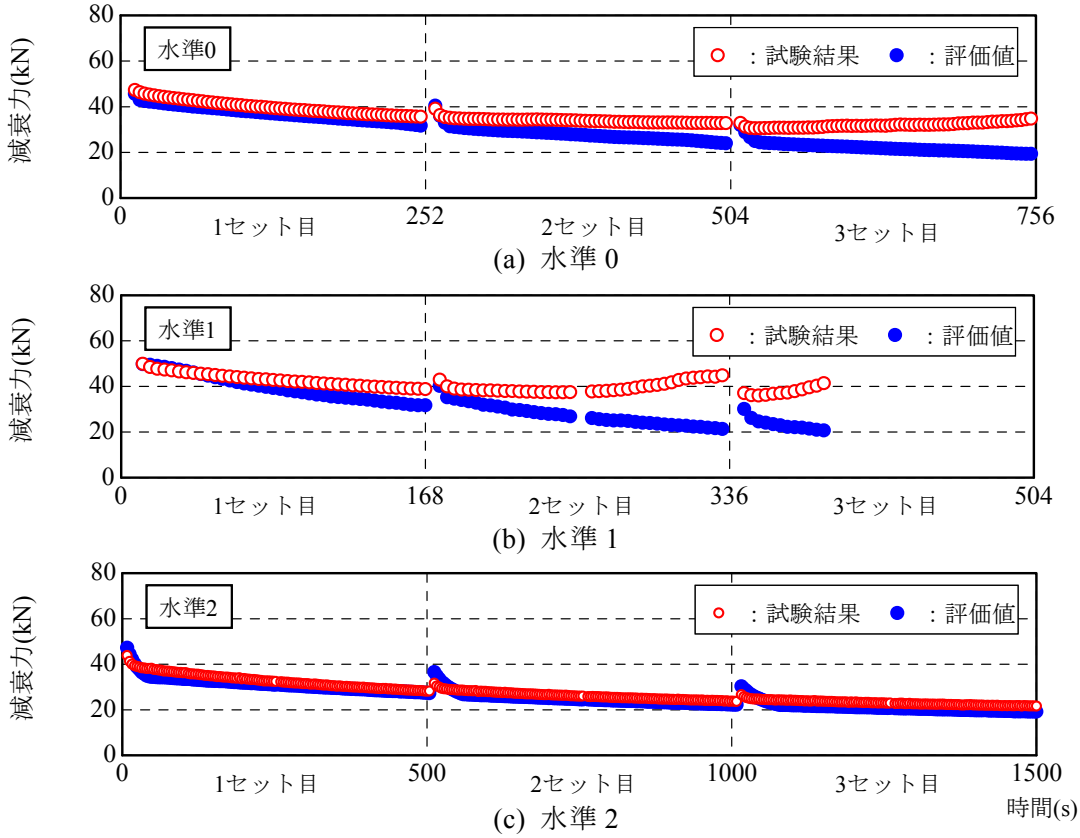


図 1.3.9-78　RDT8 試験体　繰り返し特性評価　実験値と既往評価式の比較

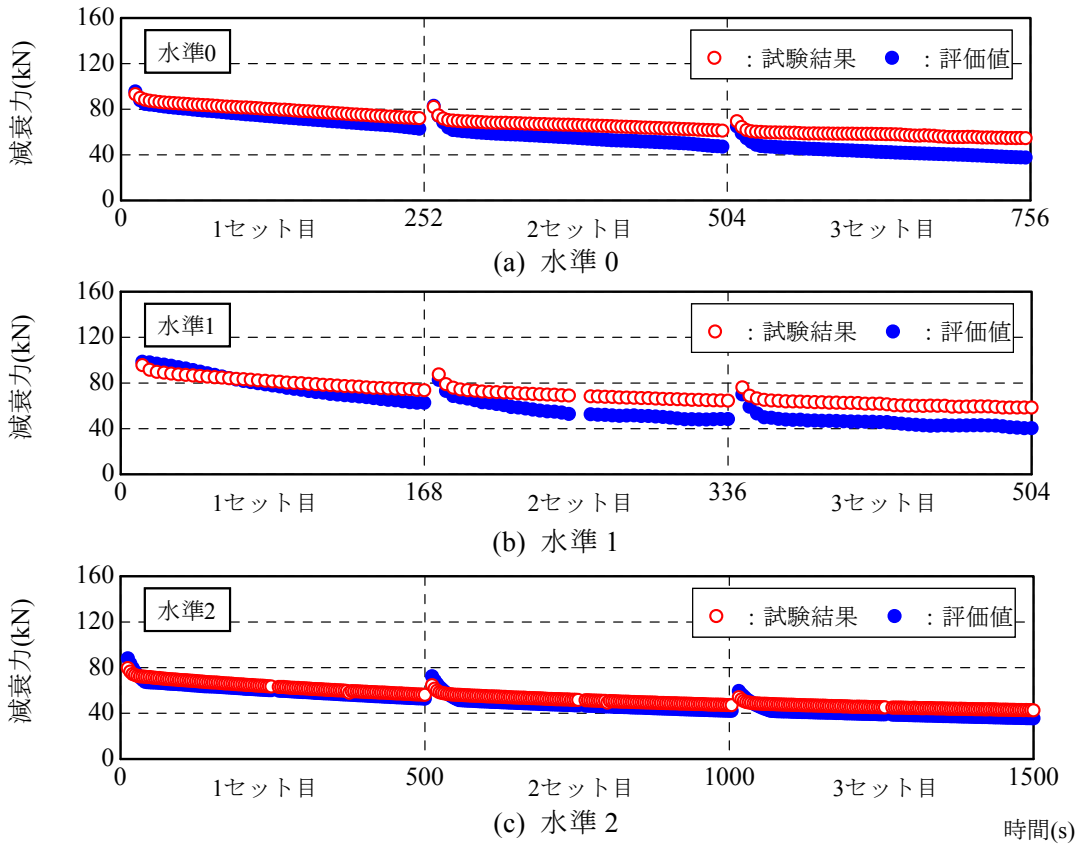


図 1.3.9-79　RDT16 試験体　繰り返し特性評価　実験値と既往評価式の比較

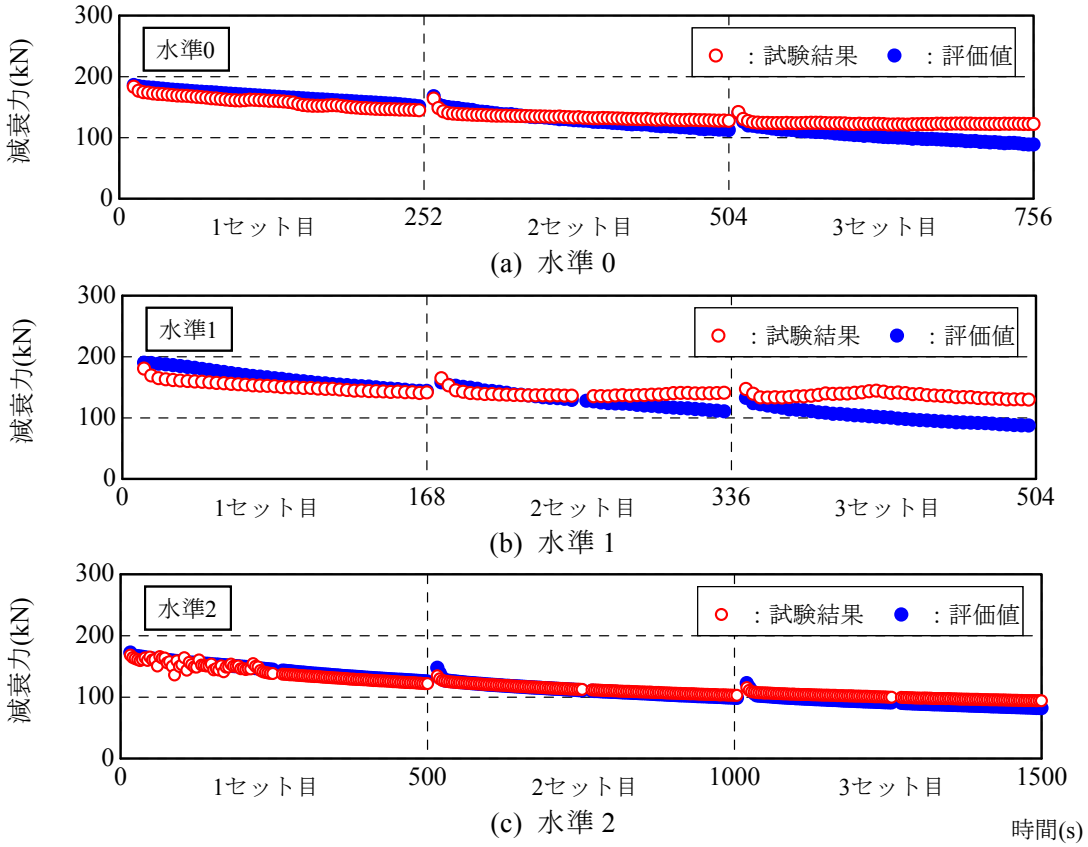
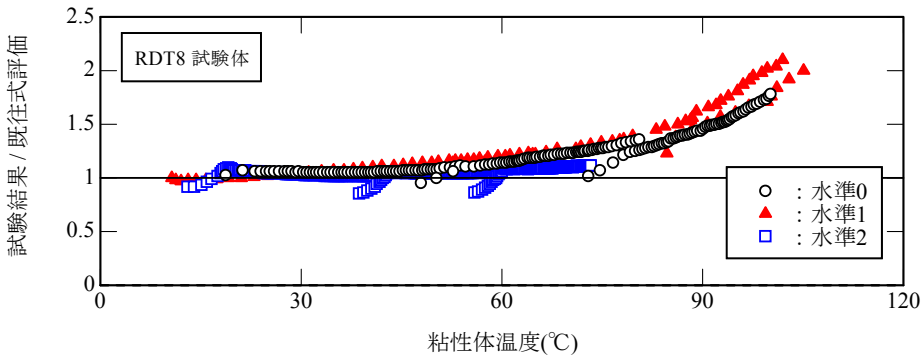


図 1.3.9-80　RDT30 試験体　繰り返し特性評価　実験値と既往評価式の比較

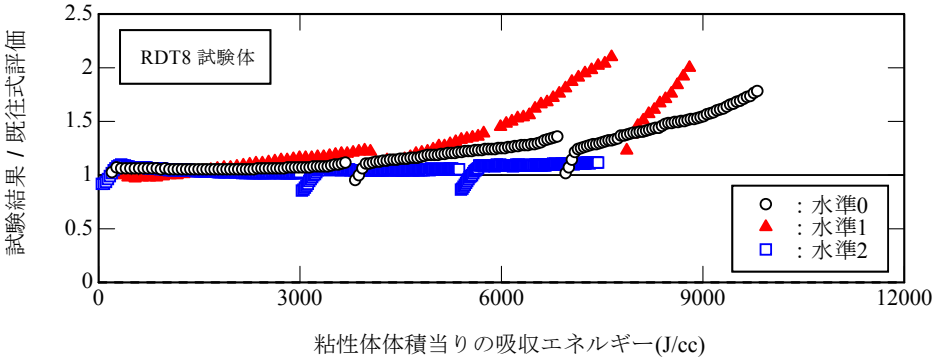
3 試験体とも水準 0 については 1 セット目に関する既往評価式による評価は実験結果とほぼ一致する。水準 2 については 1～3 セット目の全実験区間に関して、良い適合を示す。水準 1 については、RDT8、RDT16 試験体では 1 セット目の中盤で、RDT30 試験体では 2 セット目の中盤で既往評価式による評価は実験結果と乖離する。それ以後の乖離の方向は安全側（既往式による評価が実験結果よりも小さめの減衰力を与える）である。

詳細にみると、RDT8、RDT16 試験体における水準 1 の 1 セット目前半、RDT30 試験体における水準 0 および水準 1 の 2 セット目前半までは、既往評価式による評価が実験結果よりも大きく危険側の評価となっている。両者の差は RDT30 試験体における水準 0 の 1 セット目前半で大きい。

図 1.3.9-81～83 に、RDT8、RDT16、RDT30 各試験体について、実験結果による減衰力と既往評価式による値との比を、(a)粘性体温度（TM1、TM2 計測点の平均値）、(b)単位体積エネルギーで整理して示す。

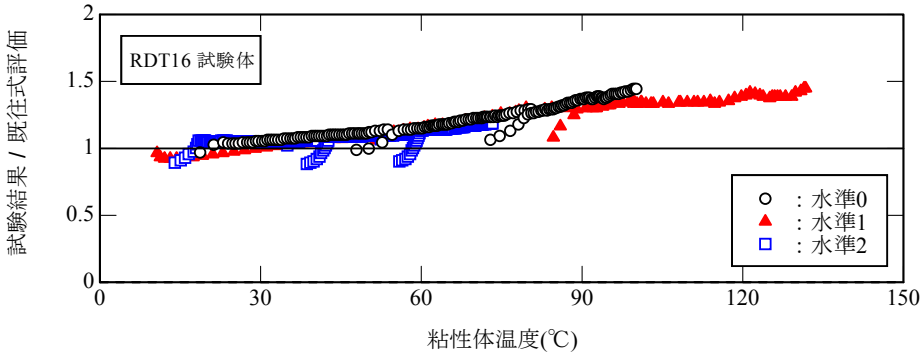


(a) 粘性体温度

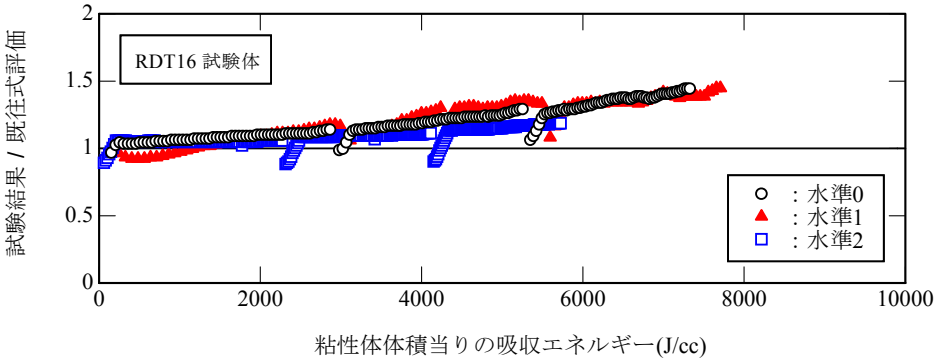


(b) 単位体積エネルギー

図 1.3.9-81　RDT8 試験体　既往評価式の適用限界

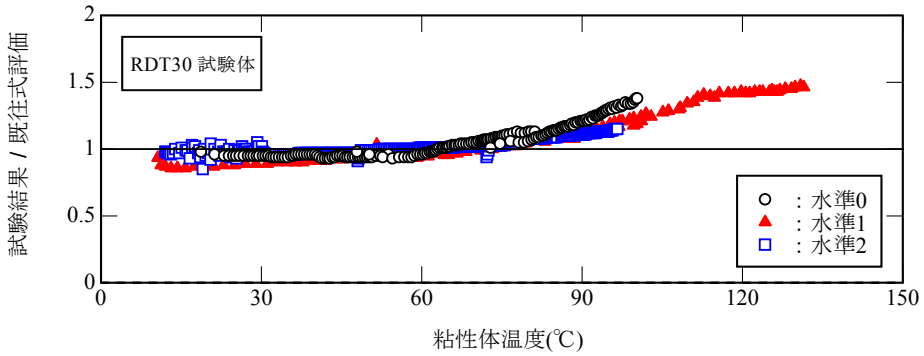


(a) 粘性体温度

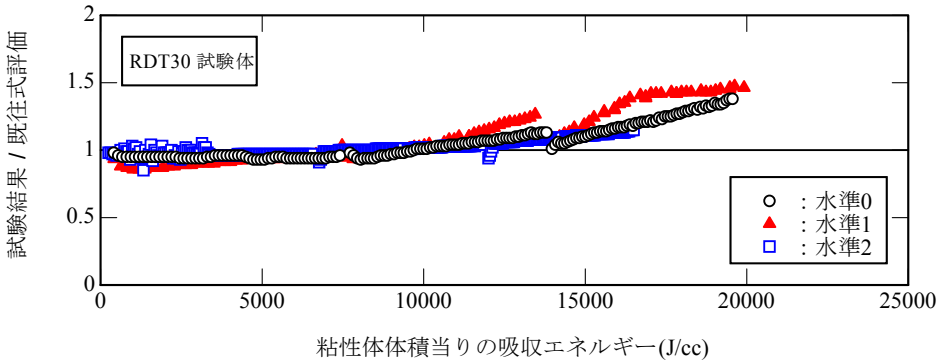


(b) 単位体積エネルギー

図 1.3.9-82　RDT16 試験体　既往評価式の適用限界



(a) 粘性体温度



(b) 単位体積エネルギー

図 1.3.9-83　RDT30 試験体　既往評価式の適用限界

実験結果による減衰力と既往評価式による値が乖離を始める点として、RDT8 試験体では、粘性体温度については 50℃、単位体積エネルギーについては 3000 J/cc、RDT16 試験体ではそれぞれ 30℃、1200 J/cc、RDT30 試験体では 60℃、10000 J/cc 程度と評価でき、試験体によって相当の差がある。

既往評価式の適用限界は、試験体によっては、今般調査で想定した長周期地震動による応答で生じる温度上昇や単位体積エネルギーをカバーできない。限界を超えた領域では既往減衰力評価式は多くの場合実験結果を安全側に評価するが、長周期地震動に対する部材性能をより精度よく設計に反映させるためには、評価式の改善が必要となる。

b) 評価式の改善

前項の検討で、既往評価式が長周期地震動による応答を想定した多数回高速繰り返し領域に必ずしも適用できないことがわかったため、本項で評価式の改善を検討する。

また、既往の評価式は、繰り返し依存性と温度依存性が、それぞれ単位体積エネルギーと粘性体温度の関数として与えられており、評価の際にはそれらを組み合わせる必要がある。ところが、通常の構造設計における地震応答解析で、減衰材料に関する熱伝導解析をリアルタイムに行い時々刻々粘性体温度を評価することは設計ツールの問題でほとんど行われておらず、既往の評価式の運用には不便がある。また、本調査の実験結果として得られた温度分布を熱伝導解析によって予測する試みを実施したところ、温度上昇が認められる領域が粘性体充填部に限定される定性的な傾向については説明できるものの、3 試験体それぞれの定量的な温度上昇評価については必ずしも充分な精度が得られないという結果となり、設計ツールとして用いる地震応答解析と熱伝導解析を組み合わせるには相当の困難が予想される。

そこで、本調査においては、実験結果として得られた減衰力変動を、グロスで単位体積エネルギーの関数として表現することを原則とする。また、既往評価式では単位体積エネルギーには粘性吸収エネルギーEvのみが評価されているが、ここでは簡便さを考慮して全吸収エネルギーEdを用いて、Ed/Vvを単位体積エネルギーと呼ぶ。また、必要に応じ、単位体積エネルギーの時間勾配$\Delta Ed/Vv$を評価関数として導入する。

評価式は実験式として、試験体毎に別個に表すものとする。

i) RDT8 試験体

図 1.3.9-84 に実験結果で得られた減衰力（0 変位切片荷重）Q と初期条件の減衰力基準値 Q_0 の差分を、各水準毎に単位体積エネルギーEd/Vvとの相関で示す。減衰力基準値 Q_0 は表 1.3.9-17 に示すとおりである。ここで、実験中に減衰力の上昇が見られた水準 0 の 3 セット目、水準 1 の 2 セット目後半と 3 セット目は評価対象から省いた。

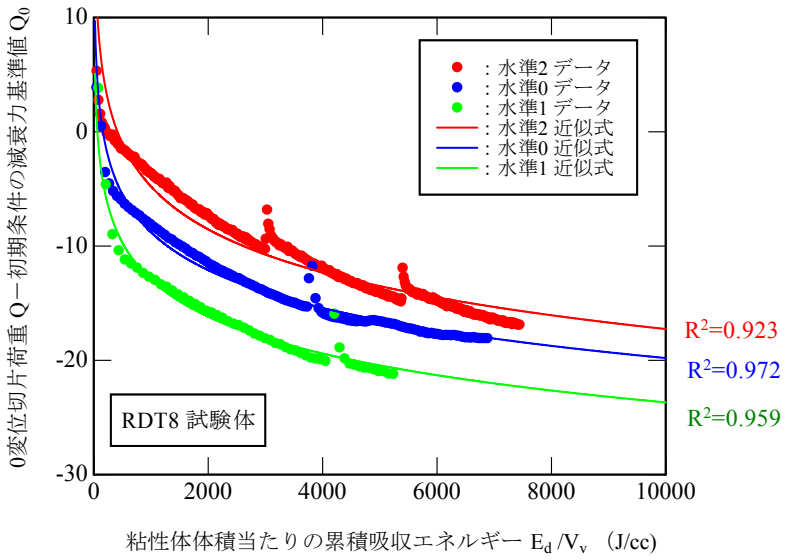


図 1.3.9-84　RDT8 試験体　減衰力低下量と単位体積エネルギーとの相関

表 1.3.9-17　RDT8 試験体　減衰力基準値 Q_0

水準	初期温度	速度	初期温度時の減衰力基準値
	℃	cm/s	kN
0	13.5	31.4	50.9
1	13.3	47.1	58.9
2	12.6	15.7	38.5

セット間のインターバル直後の数サイクルを除いて、各水準についてほぼ連続的な変化が生じていると解釈できる。実験条件のように 10 分程度のインターバルで長周期地震動が連続することを評価対象とすることは原則としてあり得ず、また、仮にあり得たとしても減衰力評価においては安全側の評価となることから、この部分的な不連続は評価式策定の対象から省き、一連の連続関数として評価する。

各水準について、$Q-Q_0$ を Ed/Vv の関数で近似すると式(1.3.9-4)を得る。

$$\left.\begin{aligned} &\text{水準 0：} \quad g_0(E_d/V_v) = Q - Q_0 = -4.78 \cdot \log_e(E_d/V_v) + 24.5 \\ &\text{水準 1：} \quad g_1(E_d/V_v) = Q - Q_0 = -4.67 \cdot \log_e(E_d/V_v) + 19.3 \\ &\text{水準 2：} \quad g_2(E_d/V_v) = Q - Q_0 = -5.42 \cdot \log_e(E_d/V_v) + 32.7 \end{aligned}\right\} \qquad (1.3.9\text{-}4)$$

3 水準の減衰力変動の差が、温度上昇の程度など吸収エネルギーの時間勾配に支配される要因に基づくと考えると、式(1.3.9-4)における各水準の差を粘性体体積当たりの吸収エネルギーの時間勾配$\Delta Ed/Vv$ で表現する必要がある。ここでは、水準 0 を基準として、各水準の実験結果と水準 0 に関する式(1.3.9-4)との残差を$\Delta Ed/Vv$ で整理する。結果を図 1.3.9-85 に示す。水準毎の平均値を意識して近似式を求めると式(1.3.9-5)を得る。式(1.3.9-4)と組合せて RDT8 試験体に関する減衰力の多数回繰り返し特性評価式として式(1.3.9-6)を得る。

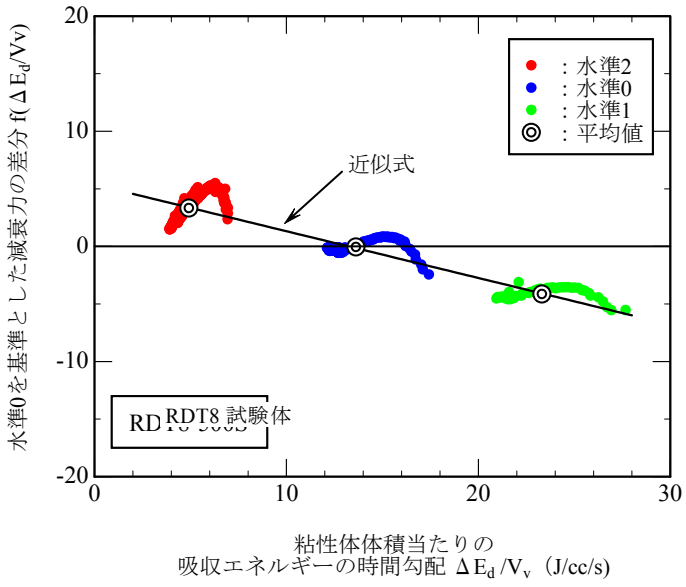


図 1.3.9-85　RDT8 試験体　各水準における減衰力低下量の水準 0 に関する式(1.3.9-4)との残差と単位体積エネルギーの時間勾配との相関

$$f\left(\Delta E_d / V_v\right) = -0.37 \times \left(\Delta E_d / V_v\right) + 5.07 \quad (1.3.9\text{-}5)$$

$$Q = Q_0 + \left(g_0\left(E_d / V_v\right) + f\left(\Delta E_d / V_v\right)\right) \quad (1.3.9\text{-}6)$$

式(1.3.9-6)の寄与率 R^2 は 0.907 である。

ii) RDT16 試験体

図 1.3.9-86 に実験結果で得られた減衰力（0 変位切片荷重）Q と初期条件の減衰力基準値 Q_0 の差分を、水準毎に単位体積エネルギーEd / Vv との相関で示す。減衰力基準値 Q_0 は表 1.3.9-18 に示すとおりである。各水準とも全セットを評価対象とした。

各水準について、$Q-Q_0$ を Ed / Vv の関数で近似すると式(1.3.9-7)を得る。

表 1.3.9-18　RDT16 試験体　減衰力基準値 Q_0

水準	初期温度	速度	初期温度時の減衰力基準値
	℃	cm/s	kN
0	12.7	31.4	100.0
1	15.7	47.1	113.6
2	13.1	15.7	73.6

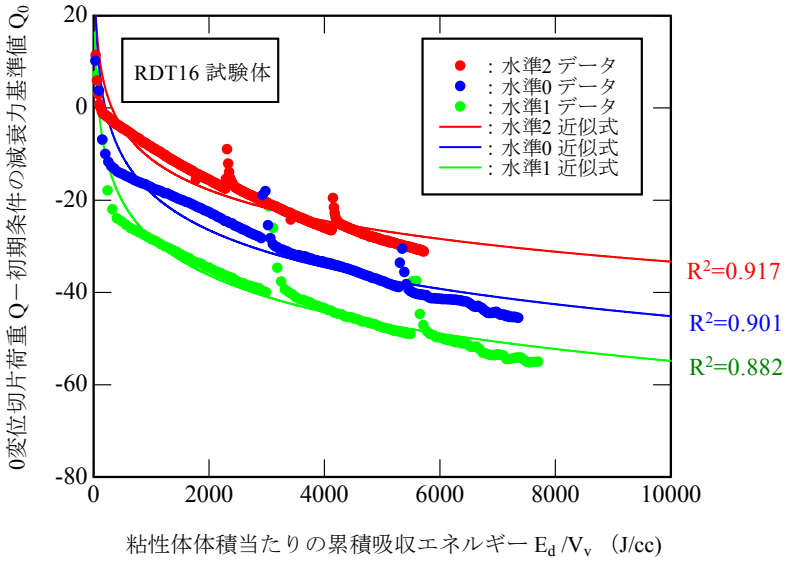


図 1.3.9-86　RDT16 試験体　減衰力低下量と単位体積エネルギーとの相関

$$\left.\begin{aligned} &\text{水準 0：} \quad g_0\left(E_d / V_v\right) = Q - Q_0 = -11.6 \cdot \log_e\left(E_d / V_v\right) + 61.6 \\ &\text{水準 1：} \quad g_1\left(E_d / V_v\right) = Q - Q_0 = -11.5 \cdot \log_e\left(E_d / V_v\right) + 51.5 \\ &\text{水準 2：} \quad g_2\left(E_d / V_v\right) = Q - Q_0 = -9.66 \cdot \log_e\left(E_d / V_v\right) + 55.6 \end{aligned}\right\} \quad (1.3.9\text{-}7)$$

水準 0 を基準として、各水準の実験結果と水準 0 に関する式(1.3.9-7)との残差を⊿Ed /Vv で整理したものを図 1.3.9-87 に示す。これを水準毎の平均値を意識して近似式を求めると式(1.3.9-8)を得る。式(1.3.9-7)と組合せて RDT16 試験体に関する減衰力の多数回繰り返し特性評価式として式(1.3.9-9)を得る。

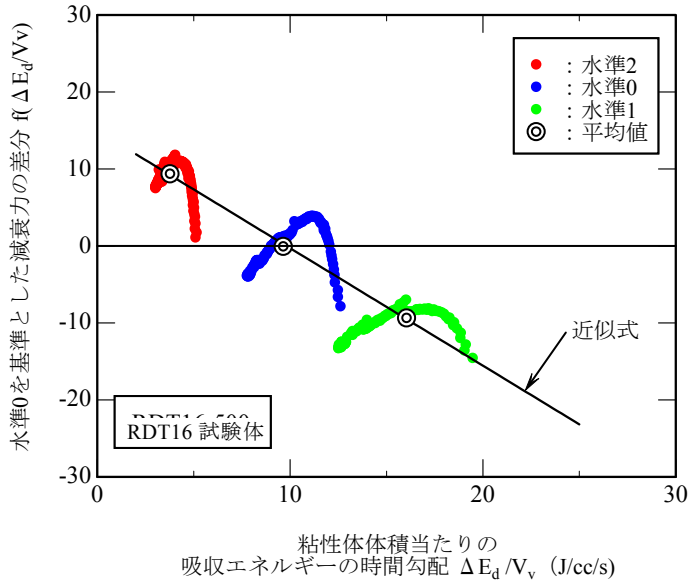


図 1.3.9-87　RDT16 試験体　各水準における減衰力低下量の水準 0 に関する式(1.3.9-7)との残差と単位体積エネルギーの時間勾配との相関

$$f\left(\Delta E_d / V_v\right) = -1.55 \times \left(\Delta E_d / V_v\right) + 14.8 \tag{1.3.9-8}$$

$$Q = Q_0 + \left(g_0\left(E_d / V_v\right) + f\left(\Delta E_d / V_v\right)\right) \tag{1.3.9-9}$$

式(1.3.9-9)の寄与率 R^2 は 0.861 である。

iii) RDT30 試験体

図 1.3.9-88 に実験結果で得られた減衰力（0 変位切片荷重）Q と初期条件の減衰力基準値 Q_0 の差分を、水準毎に単位体積エネルギーEd / Vv との相関で示す。減衰力基準値 Q_0 は表 1.3.9-19 に示すとおりである。水準 0 の 3 セット目後半、水準 1 の 2 セット目後半と 3 セット目は評価対象から省いた。

表 1.3.9-19　RDT30 試験体　減衰力基準値 Q_0

水準	初期温度	速度	初期温度時の減衰力基準値
	℃	cm/s	kN
0	13.1	31.4	233.8
1	10.6	47.1	255.0
2	12.2	15.7	201.7

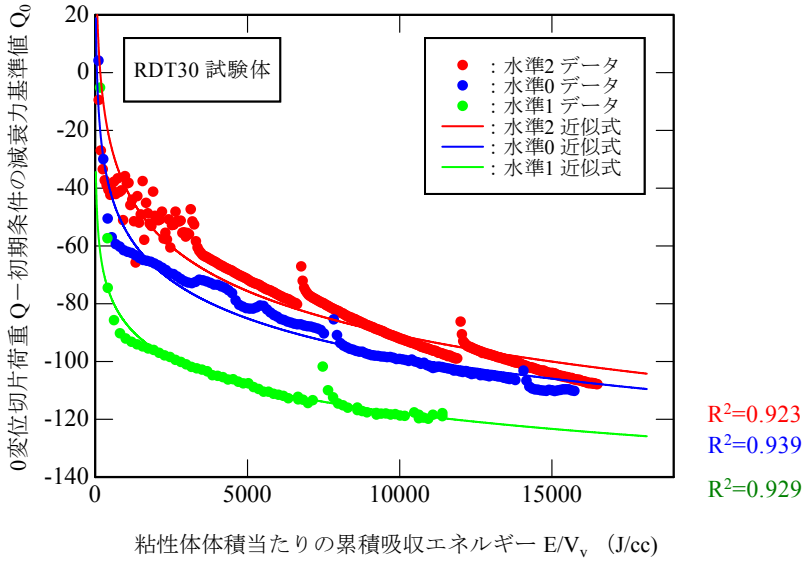


図 1.3.9-88　RDT30 試験体　減衰力低下量と単位体積エネルギーとの相関

各水準について、$Q-Q_0$ を Ed/Vv の関数で近似すると式(1.3.9-10)を得る。

$$\left.\begin{aligned} &\text{水準 0：}\ g_0(E_d/V_v)=Q-Q_0=-18.9\cdot\log_e(E_d/V_v)+76.6\\ &\text{水準 1：}\ g_1(E_d/V_v)=Q-Q_0=-13.5\cdot\log_e(E_d/V_v)+6.78\\ &\text{水準 2：}\ g_2(E_d/V_v)=Q-Q_0=-22.2\cdot\log_e(E_d/V_v)+113.6 \end{aligned}\right\} \quad (1.3.9\text{-}10)$$

水準 0 を基準として、各水準の実験結果と水準 0 に関する式(1.3.9-10)との差分を⊿Ed/Vv で整理したものを図 1.3.9-89 に示す。これを水準毎の平均値を意識して近似式を求めると式(1.3.9-11)を得る。式(1.3.9-10)と組合せて RDT30 試験体に関する減衰力の多数回繰り返し特性評価式として式(1.3.9-12)を得る。

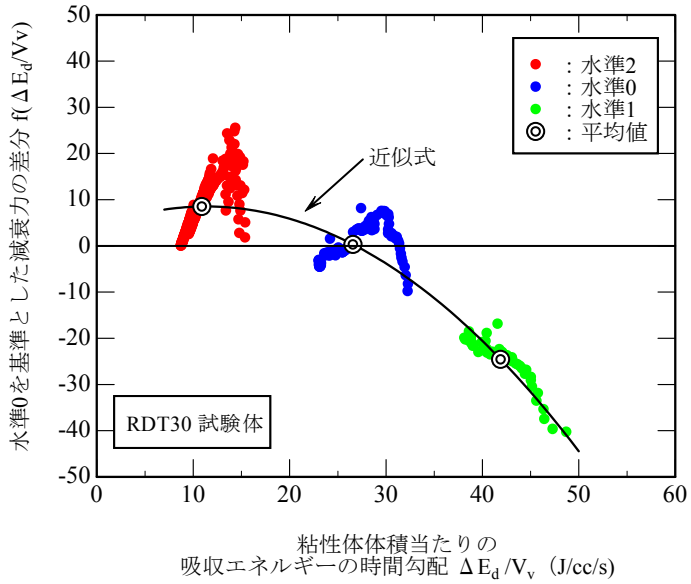


図 1.3.9-89　RDT30 試験体　各水準における減衰力低下量の水準 0 に関する式(1.3.9-10)との残差と単位体積エネルギーの時間勾配との相関

$$f\left(\Delta E_d / V_v\right) = -0.046\left(\Delta E_d / V_v\right)^2 + 1.403\left(\Delta E_d / V_v\right) + 1.97 \qquad (1.3.9\text{-}11)$$

$$Q = Q_0 + \left(g_0\left(E_d / V_v\right) + f\left(\Delta E_d / V_v\right)\right) \qquad (1.3.9\text{-}12)$$

式(1.3.9-12)の寄与率 R^2 は 0.907 である。

式(1.3.9-6) (1.3.9-9) (1.3.9-12)は、当該試験体に関する実験式である。調査対象とならなかった製品についても同形式の実験式を求めることができると考えられるが、その係数は当該製品における粘性体の熱容量、粘性体に接する鉄部の有効体積などの構成に依存するものと考えられる。

2) 限界状態

a) 使用限界

前述のように、RDT8 試験体水準 0 の 3 セット目、水準 1 の 2 セット目後半および 3 セット目、RDT30 試験体の水準 1 の 2 セット目後半および 3 セット目において、従前の実験でいったん低下した減衰力が上昇に転じるという現象が把握された。RDT30 試験体では粘性体圧力が計測されており、この減衰力の再上昇と圧力の上昇傾向とが対応する事象であると解釈できる。

すなわち、「多数回繰り返し変形による過大なエネルギー吸収」→「粘性体の温度上昇」→「粘性体圧力の過大な上昇」→「減衰力の再上昇」という連関が想定でき、減衰力の再上昇として現れた現象を当該免震材料の使用限界発現であると解釈することができる。

RDT30 試験体の実験結果から、使用限界発現の閾値としての粘性体圧力を評価する。

水準 0 の 3 セット目では減衰力上昇は観察されなかったものの減衰力低下がごくわずかであった。このセットにおける粘性体最大圧力は 2.0MPa（19.7 気圧）であった。一方、水準 1 の 2 セット目ではその後半でわずかな減衰力上昇が観察された。このセットにおける粘性体最大圧力は 2.5MPa（24.4 気圧）であった。

これらの実験結果から、粘性体最大圧力 2.0～2.5MPa が、減衰力上昇として観察される使用限界発現の閾値に相当すると評価できる。

b) 終局限界

RDT8 試験体水準 1 の 3 セット目では、粘性体温度センサー取付用キャップのセンサー挿入孔をふさぐエポキシ樹脂シールが破損し内部粘性体が漏出した（写真 1.3.9-7～8）。センサー取付用キャップは出荷実験時に温度センサーを挿入するために設けられているものであり、出荷時には孔のないキャップに交換されるので、今般実験で生じた破損が実製品で生じるとは考えにくく、今般実験に用いた試験体に限定された終局限界として位置づけられる。

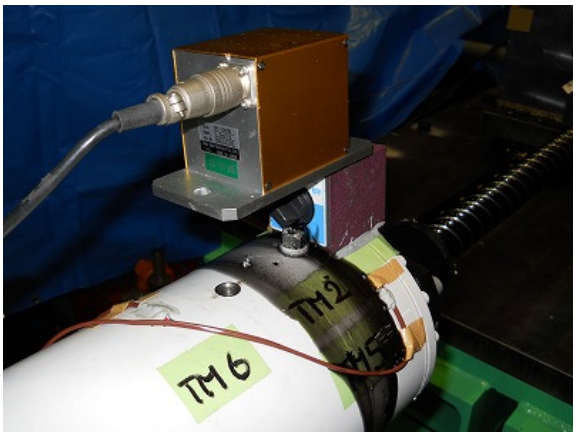


写真 1.3.9-7　RDT8 試験体の内部粘性体漏出の状況

写真 1.3.9-8　RDT8 試験体のセンサー取付用キャップの状況

但し、破損直前には減衰力再上昇が相当程度生じており、RDT30 試験体では減衰力再上昇と粘性体圧力上昇が対応する事象として観察されていることから、この破損は上述の使用限界発現に連続する事象であると考えることができ、実製品においては、オイルバッファ部またはシール部などで起こり得る終局限界の一つの可能性を示唆していると解釈することができる。

RDT30 試験体で計測された粘性体最大圧力は水準 1 の 3 セット目における 6.5MPa（64.0 気圧）であり、この時点で減衰力再上昇の程度は、RDT8 試験体の破損直前ほどには著しくない。したがって、上記のような終局限界の発現を想定したとしても、その閾値に相当する粘性体最大圧力は 6.5MPa を大きく上回ると考えることができる。

1.3.9.3 まとめと課題

(1) まとめ

粘性ダンパー（国土交通省の免震材料に関わる基準において流体系減衰材（作動油を用いないもの）として位置づけられるもの）を代表する減衰部材として、免制震ディバイス社／THK社・AT式増幅機構付き減衰装置－減衰こまを対象として、多数回高速繰り返し実験を実施することにより特性の変動を調査した。

長周期地震動による応答1回分に相当する実験条件として累積変形量50m以上となる高速繰り返し条件を設定した。具体的には、加振波形を正弦波とし、振幅の異なる3水準（水準0：振幅200mm、水準1：振幅300mm、水準2：振幅100mm）を実験パラメータとして設定した。長周期地震動による応答1回分の実験を1セットと称し、10分程度のインターバルを挟んで、原則として3セットまで行った。同一の試験体に対し異なる水準の実験を行う場合には、20時間程度以上実験棟内に放置し、試験体内部の各点温度がほぼ一様となり、かつ粘性体温度が室温程度に低下したことを確認した後に実施した。

後述するRDT8試験体水準1の3セット目を除き、いずれの試験体、何れの水準についても、安定した形状の荷重変形関係が確認され、減衰部材としての機能が失なわれることはなかった。大局的には、減衰力（0変位切片荷重）は各セット内およびセット間を通じて連続的に低下し、粘性体温度、外筒表面温度は連続的に上昇する傾向を示した。既往評価式は長周期地震動を想定していないため、適用範囲を超過した領域で実験結果から安全側に乖離する傾向を示した。

調査対象部材に関わる3種類の材料認定のうち、10万cst型を代表するRDT16試験体については全ての水準で、30万cst型を代表するRDT30試験体では水準0および水準2で、short型を代表するRDT8試験体では水準2で、上述した減衰力、温度の変動傾向が確認された。但し、RDT30試験体の水準0の3セット目では、減衰力低下はごくわずかであった。RDT30試験体水準0で粘性体最高温度は150℃程度に至った。

RDT30試験体の水準1、RDT8試験体の水準0および水準1では2セット目の後半ないし3セット目の序盤から、いったん低下した減衰力が再上昇する傾向が見られた。RDT8 試験体の水準1では3セット目の前半で減衰力の上昇に続いて温度センサー取付用キャップのセンサー挿入孔をふさぐエポキシ樹脂シールが破損し内部粘性体が漏出した。RDT30試験体の粘性体圧力計測結果から、減衰力の再上昇と圧力の上昇傾向とは対応する事象であると解釈でき、粘性体シール部破損による漏出はそれに連続する事象であると考えられる。調査対象とした試験体については、前者を使用限界、後者を終局限界と位置付けることができる。粘性体圧力との対応から、前者の閾値に相当する粘性体最大圧力を2.0～2.5MPaと、後者の閾値に相当する粘性体最大圧力は6.5MPaを相当上回ると考えることができる。なお、実建物に用いられる製品では、温度センサー取付用キャップは孔のないキャップに交換されて出荷されるので、今般実験で発現した終局限界は実製品で起こり得る終局限界の一つの可能性を示唆しているとの解釈に留まる。

繰り返し特性に関する既往評価式の限界を超える領域までの適用を考慮して、粘性体体積当たりの吸収エネルギーとその時間勾配を説明変数とする近似式を各試験体について求めた。寄与率R^2はRDT8試験体、RDT16試験体、RDT30試験体のそれぞれについて0.907、0.861、0.907となった。

(2) 今後の課題

既往の繰り返し特性評価式は、長周期地震動による応答を想定していないため、検討条件によっては適用範囲を超える可能性がある。また、設計条件を超える想定外の繰り返しに対しては乖離が大きくなる惧れがある。本調査では、対象とした試験体それぞれについて実験結果を近似する評価式を求めたが、多くの製品に適用できる統一的評価式とはなっていない。各式における係数は、各試験体における粘性体と周辺部材の熱容量のバランスを反映していると考えられるので、今後、必要に応じて、実験的、解析的検討を行い、統一的評価を策定してゆくことが望まれる。

試験体や実験水準によっては、設計条件を超える領域で、一旦低下した減衰力の再上昇や温度センサー取付部のシール破損による粘性体流出として把握される限界状態の発現が見られた。

これらの現象は、温度上昇に伴う粘性体圧力の上昇に起因するものと推測され、粘性体圧力はバッファ部分を含めた粘性体充填部分の容積に、温度上昇は粘性体と周辺部材の熱容量のバランスに影響を受けると考えられる。今後、免震材料に要求される設計余裕度の考え方によっては、より温度上昇、圧力上昇を抑制可能な免震材料の構成方法を検討する必要が生じることも考えられる。

また、限界状態を確認しておくことは、設計者が余裕度を明確に設定するための有益なデータとなるので、免震材料自体の設計や性能把握の過程で、設計条件を超える領域における特性と限界状態の発現に関わる情報を明確にしておくことが望ましい。

参考文献

1.3.9-1) 日本免震構造協会編：免震構造　部材の基本から設計・施工まで；オーム社、2010.12
1.3.9-2) 光阪勇治ほか：増幅機構付き減衰装置の高速度領域における性能評価（その 2）高速試験結果；日本建築学会大会学術講演梗概集、B2、P761、2003.9
1.3.9-3) 国土交通省：AT 式増幅機構付き減衰装置－減衰こま（RDT-AT-short）建築材料認定書（MVBR-0387）；別表、2008.8
1.3.9-4) 国土交通省：AT 式増幅機構付き減衰装置－減衰こま（Rotary Damping Tube）RDT-AT-10 万 cst 建築材料認定書（MVBR-0221）；別表、2004.4
1.3.9-5) 国土交通省：AT 式増幅機構付き減衰装置－減衰こま（Rotary Damping Tube）RDT-AT-30 万 cst 建築材料認定書（MVBR-0222）；別表、2004.4

1.4 まとめ

長周期地震動に対する免震建築物の安全性を検討するために必要となる各種免震部材の性能を明らかとすることを目的として、部材の多数回繰り返し実験（縮小または実大実験）を行った。

実験の対象とする部材は、免震支承、免震ダンパーとして一般的に用いられているものを対象とした。各部材の試験条件として、第Ⅱ部第 2 章の検討結果および既往の研究成果を参考に、振幅 400mm 以下の３水準（400、200、100mm）の変位振幅および累積変形量２水準（50m, 100m）を目標とする正弦波加振を設定し、各部材の試験を実施した。

各部材の実験により得られた主な知見と今後の課題を以下に示す。

・天然ゴム系積層ゴム

荷重−変位関係では、γ=50%およびγ=100%では長周期・限界の両試験とも繰り返しに伴う履歴形状の変化は極めて小さく、全ケースにおいても長周期・限界の試験条件に対して安定した特性を示すことが確認された。

今後の課題として、多数回繰り返しによる特性値評価式の検討および地震応答解析への反映、実大試験体による特性値変動に対するスケール効果の確認などが挙げられる。

・鉛プラグ入り積層ゴム

いずれの加振ケースについても、履歴曲線の面積は加振に伴い徐々に小さくなったが、長周期加振で履歴形状が安定し、それ以上の加振を与えても履歴特性はほとんど変化しないことが確認された。

鉛プラグの温度上昇に伴う力学特性の変化を設計に反映するための評価法が今後の課題となる。また、3 本プラグタイプでは 1 本プラグタイプと比較して繰り返しによる降伏荷重の低下が小さいことが確認され、解析的検討などさらなる検討が期待される。

・高減衰ゴム系積層ゴム

多数回繰り返し加振による水平復元力特性値の低下の下限値は、3 サイクル目の値に対して K_{eq} は 0.7 倍程度、H_{eq} および u は 0.6〜0.7 倍程度とみられる。累積変形量、累積エネルギー量、試験体温度と水平復元力特性値の関係を見ると、K_{eq} は累積エネルギー量に対して加振振幅に関わらずほぼ一致した傾向を示している。

今後の課題としては、繰り返しによる特性変化を地震応答解析に反映させる際の評価指標の整理、サイズの違いによる影響の確認などが挙げられる。

・弾性すべり支承（高摩擦）

基準面圧（20N/mm^2）の長周期、限界試験における摩擦係数は回数を繰り返すことで減少した。繰り返しに伴う摩擦係数の減少傾向はインターバル時間中には一旦止まり、摩擦係数が復帰する傾向にあった。基準面圧（20N/mm^2）、振幅±100mm、インターバルありのすべり板温度は、長周期で 236〜238℃、限界で 258℃まで上昇した。すべり板の温度と摩擦係数には比較的良い負の相関が見られた。

今後の課題として、多数回繰り返しによる特性値評価式の検討および地震応答解析への反映、

実大試験体による温度上昇や特性値変動に対するスケール効果の確認などが挙げられる。

・弾性すべり支承（低摩擦）

面圧 20MPa 試験体では全 10 セットにわたり、面圧 30MPa 試験体では当初の 4~5 セットにわたり、各セットの摩擦係数下限値にほとんど変化は見られない。また、各セットのエネルギー吸収量の変動もほとんどない。インターバル時間を 3 分としたセットでは、摩擦係数の復帰が小さかったが、下限値に大きな変化はない。以上の実験結果より、調査対象とした免震部材は、繰り返し特性に優れた部材であると評価できる。

今後の課題として、高速繰り返し試験条件におけるすべり板温度とその変動に対する変化率の考慮、吸収エネルギーなどを指標とした評価式、実用性に向けた評価式の検証などが挙げられる。

・鋼材ダンパー

いずれのケースについても、0 度方向に設置された 2 本のダンパーロッドが相次いで破断し、その後、90 度方向のダンパーロッド 1 本が破断し、実験を終了した。ダンパーの荷重は繰り返しに伴い次第に小さくなり、ダンパーロッドが破断するたびに大きく低下した。1 サイクルの吸収エネルギー量は、定振幅繰り返し載荷において破断に至る数回前のサイクルで 2 サイクル目に対して 85%程度になった。

今後の課題としては、地震応答変位波形に対する疲労特性および水平 2 方向加振に対する疲労特性の把握が挙げられる。

・鉛ダンパー

一定振幅時では繰り返しにより降伏荷重は低下する傾向を示した。繰り返しによる水平荷重は、発熱のための温度変化および鉛の形状変化により変化する。また、荷重は振幅依存性があり、変位が大きくなるに応じて荷重値も増大する現象が確認された。また、破断に影響を及ぼすパラメータとして、加振の連続性ならびに加力方向が考えられた。

本試験結果をふまえ、長周期地震動における応答評価に向けた復元力特性の検討が今後の課題である。

・オイルダンパー

多数繰り返し加振直後の高温状態における基本特性（出荷試験の各速度における最大減衰力）の変化は小さく、常温化の初期状態に比べて最大でも 6%程度の低下であった。油温が常温状態に戻ると、基本特性（出荷試験の各速度における最大減衰力）は、ほぼ初期状態に復元する。

今後の課題としてインターバル無しでの連続加振と地震応答波加振の実施が挙げられる。

・粘性ダンパー

基本的に安定した形状の履歴ループが確認され、減衰材料としての機能が失われることはなかった。大局的には、減衰力（0 変位切片荷重）は各セット内およびセット間を通じて連続的に低下し、粘性体温度、外筒表面温度は連続的に上昇する傾向を示した。

今後の課題としては、実験的、解析的検討による統一的評価式の策定などが挙げられる。

以上より、免震部材実験によって、多数回繰り返しのもとでのエネルギー吸収性能の変化を確

認した。今後の課題として、影響要因の整理と繰り返し特性を反映した履歴特性および特性値評価式の検討、地震応答や連続加振（インターバルなし）のもとでの特性把握、実大試験体の実験によるスケール効果の把握、などが挙げられる。

第 2 章　免震部材の繰り返し特性と長周期地震動に対する免震建築物の応答評価（１）

2.1　目的

長周期地震動に対する免震建築物の安全性照査のクライテリア設定に向けて、多数回繰り返し時の免震部材の特性評価とモデル化、免震部材の特性を考慮した応答解析に基づく応答評価を実施する。

2.2　全体方針

(1) 方針

既往の研究と免震部材メーカー提供による多数回繰り返し特性を解析に反映させ、長周期地震動に対する免震建築物の応答解析を実施し、応答評価を行う。

検討ケースは以下の通りとする。

① 鉛プラグ入り積層ゴム
② 高減衰ゴム系積層ゴム
③ 天然ゴム系積層ゴム＋鋼材ダンパー
④ 天然ゴム系積層ゴム＋鉛ダンパー
⑤ 天然ゴム系積層ゴム＋オイルダンパー
⑥ 天然ゴム系積層ゴム＋弾性すべり支承（高摩擦）
⑦ 天然ゴム系積層ゴム＋弾性すべり支承（低摩擦）＋粘性ダンパー

各免震部材について、応答解析に反映させるべきもの（累積変形、温度上昇などの関数として評価できるもの)、通常の応答解析を行って結果から評価できるものなど、評価手法を整理する。応答解析に反映させるものについては、各社が独自にプログラムを改良し、繰り返し依存性を考慮できる解析プログラムを整備する。

検討用長周期地震動に対する応答解析結果を整理し、多数回繰り返しによって何が問題となるかを抽出する。また、入力倍率が 1.0 倍、1.25 倍、1.5 倍と大きくなることによって、繰り返し依存性がどのように応答に影響するかを考察し、繰り返し依存性を考慮した場合としない場合の比較から、今後の課題等を抽出する。

(2) 解析モデル

解析モデルは上部構造を剛体モデルとした 1 質点モデルとし、免震層の設定は積層ゴムによる免震周期 4.0 秒程度、ダンパーの負担せん断力係数 3.0～3.5%を標準とし、免震支承毎に設定を行なう。

また、①鉛プラグ入り積層ゴム、⑥天然ゴム系積層ゴム＋弾性すべり支承（高摩擦）については、２方向入力に対する検討を行い、２方向入力が応答に与える影響について検討する。

(3) 入力地震動

入力地震動は以下の４波とする。

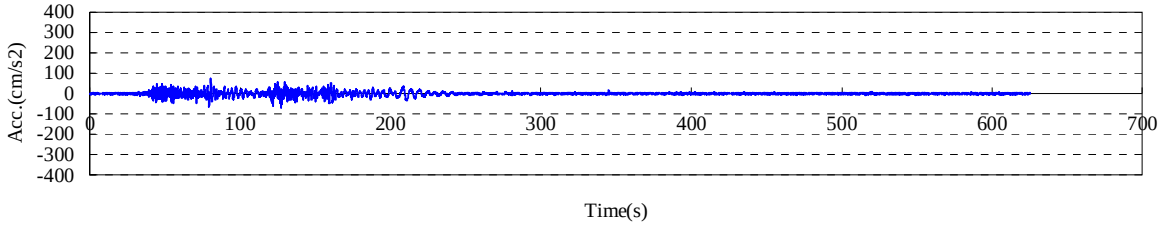
N-OSKH02-AV	（大阪・此花（南海地震）平均）
T-TN-AIC003-AV	（愛知・津島 K-NET（東海・東南海連動）平均）
T-TN-AIC004-AV	（名古屋K-NET（東海・東南海連動）平均）
T-TN-KGIN1F-AV	（東京・工学院大（東海・東南海連動）平均）

入力地震動の諸元を表 2.2-1 に、加速度時刻歴波形を図 2.2-1、擬似速度応答スペクトルを図 2.2-2、エネルギースペクトルを図 2.2-3 に示す。

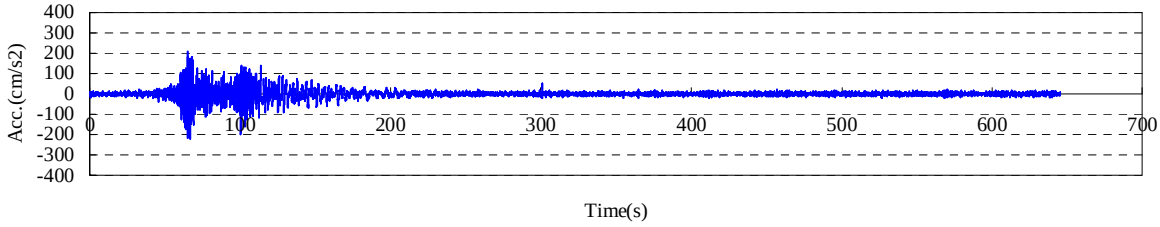
表 2.2-1　入力地震動諸元

地震波	加速度 (cm/s^2)	速度 (cm/s)	変位 (cm)	継続時間 (s)
N-OSKH02-AV	70.9	34.2	30.4	625.36
T-TN-AIC003-AV	221	31.0	24.1	645.36
T-TN-AIC004-AV	323	22.3	13.7	645.36
T-TN-KGIN1F-AV	89.6	21.5	23.1	620.0

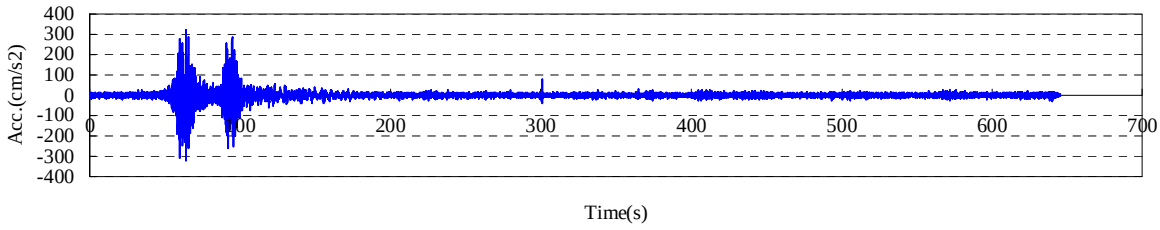
検討には上記入力地震動のレベルを 1.0 倍、1.25 倍、1.5 倍として応答解析を実施する。



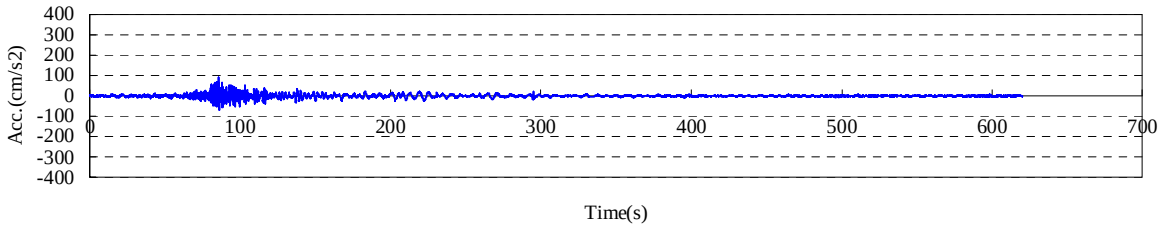
(a) N-OSKH02-AV



(b) T-TN-AIC003-AV



(c) T-TN-AIC004-AV



(d) T-TN-KGIN1F-AV

図 2.2-1　入力地震動加速度時刻歴波形

図 2.2-2　入力地震波擬似速度応答スペクトル(h=0.05)

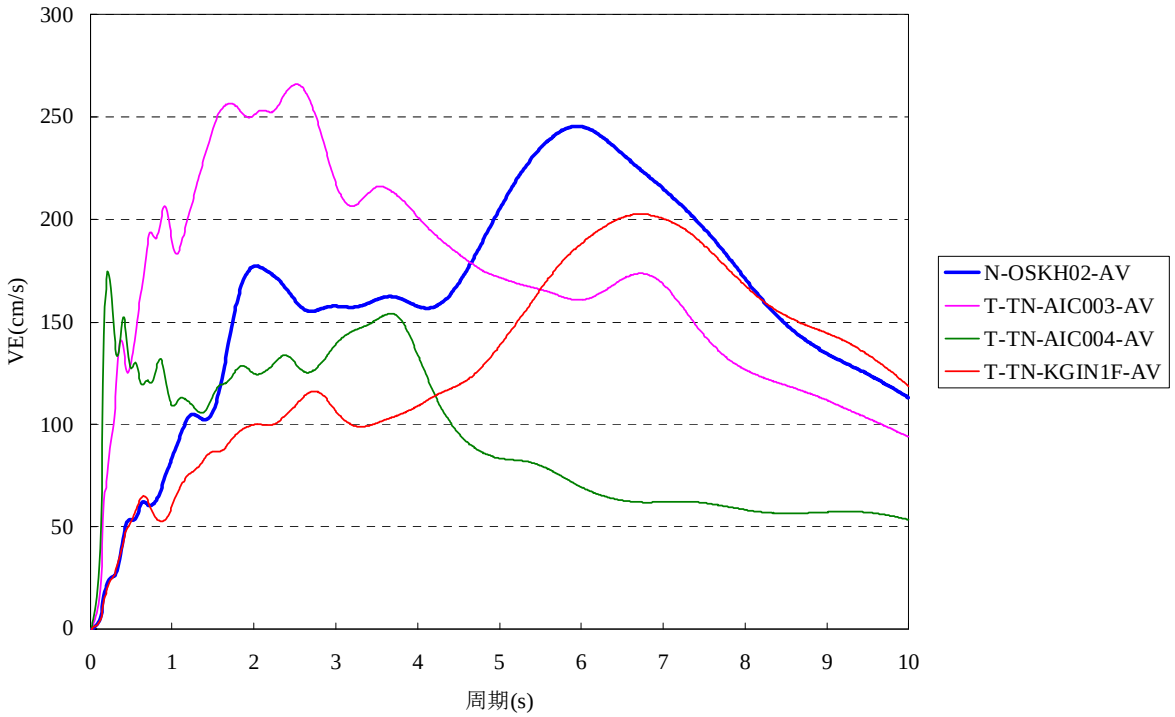
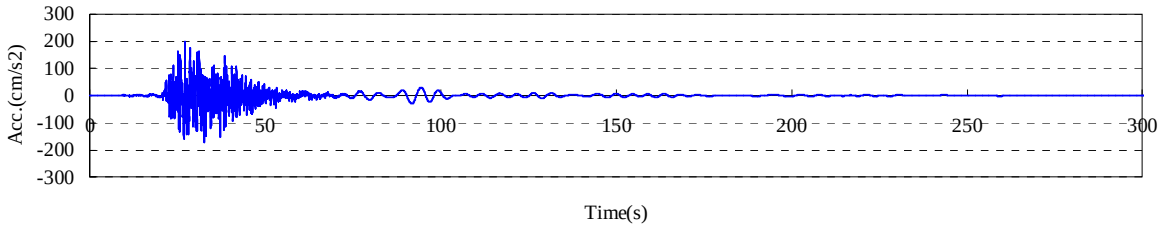


図 2.2-3　入力地震波エネルギースペクトル(h=0.10)

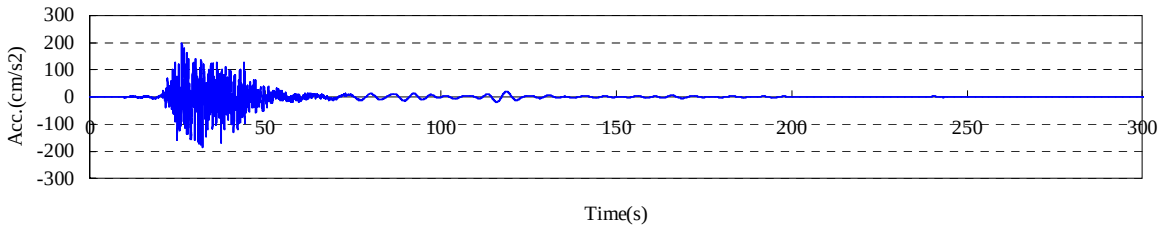
また、一部の免震支承の検討には 2 方向入力を考慮した解析を行う。2 方向入力地震動の諸元を表 2.2-2 に、加速度時刻歴波形を図 2.2-4，擬似速度応答スペクトルを図 2.2-5，エネルギースペクトルを図 2.2-6 に示す。

表 2.2-2　2 方向入力地震動諸元（各最大値と継続時間）

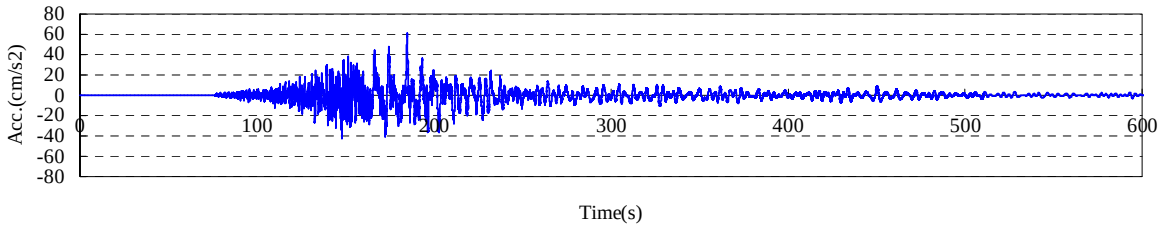
地震波	成分	加速度 (cm/s^2)	速度 (cm/s)	変位 (cm)	継続時間 (s)
WAVE-Ts1	NS	197	40.5	31.4	327.69
	EW	197	37.1	48.8	327.69
WAVE-Ts2	NS	59.5	30.6	38.9	600.0
	EW	60.8	35.7	52.2	600.0
WAVE-Tk	NS	190	30.6	22.3	1000.0
	EW	192	38.3	39.1	1000.0
WAVE-S	NS	84.9	25.5	19.1	297.92
	EW	69.3	24.8	19.9	297.92
WAVE-K	NS	106	19.2	19.2	668.86
	EW	87.2	15.1	13.6	668.86



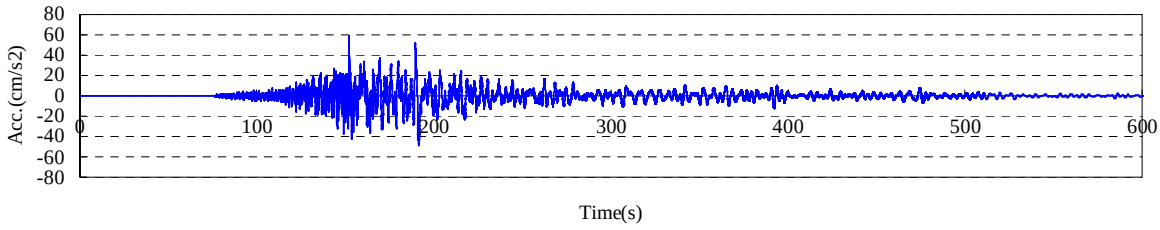
(a-1) WAVE-Ts1-NS



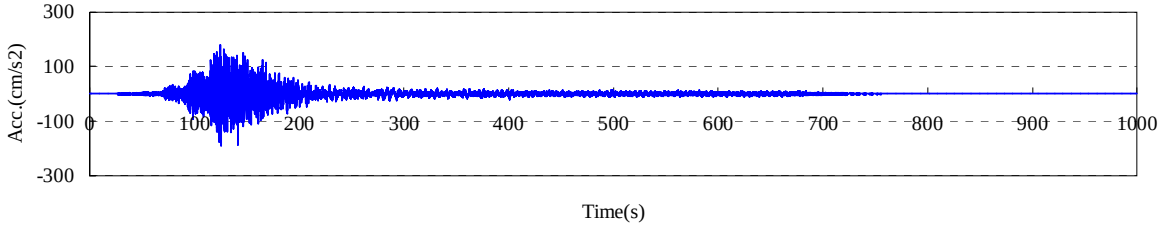
(a-2) WAVE-Ts1-EW



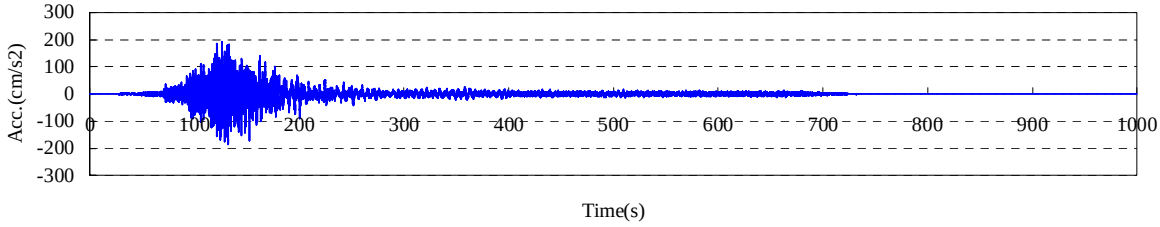
(b-1) WAVE-Ts2-NS



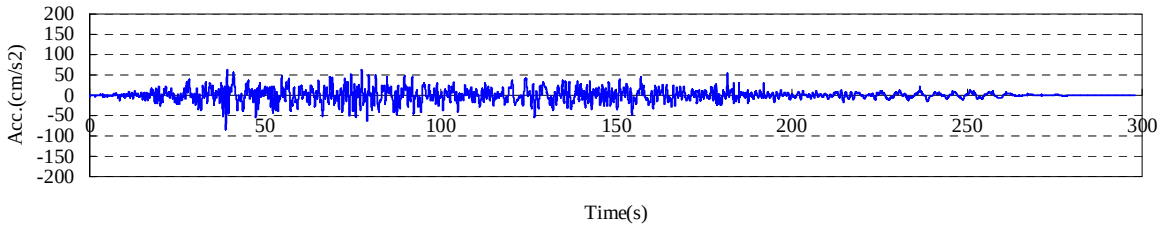
(b-2) WAVE-Ts2-EW



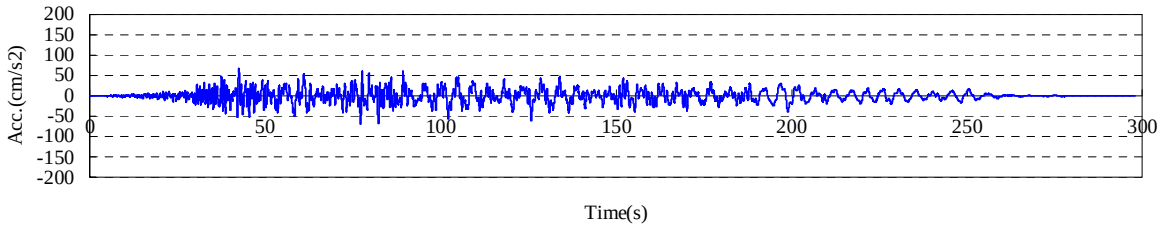
(c-1) WAVE-Tk-NS



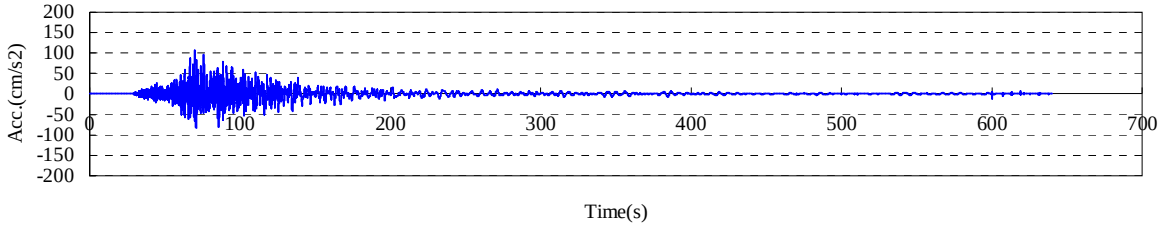
(c-2) WAVE-Tk-EW



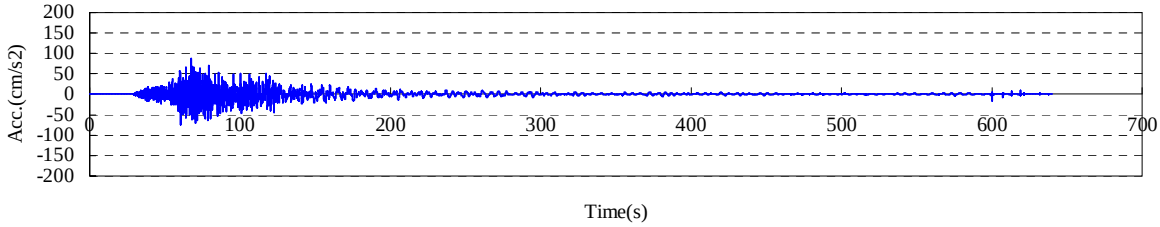
(d-1) WAVE-S-NS



(d-2) WAVE-S-EW

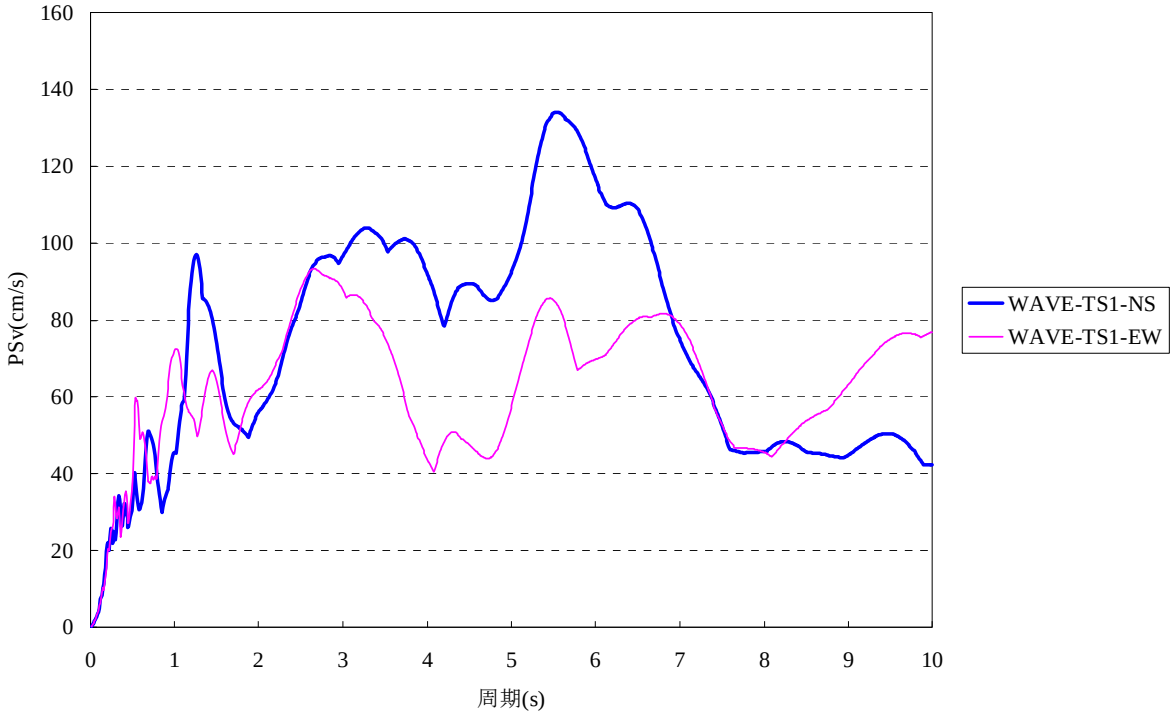


(e-1) WAVE-K-NS



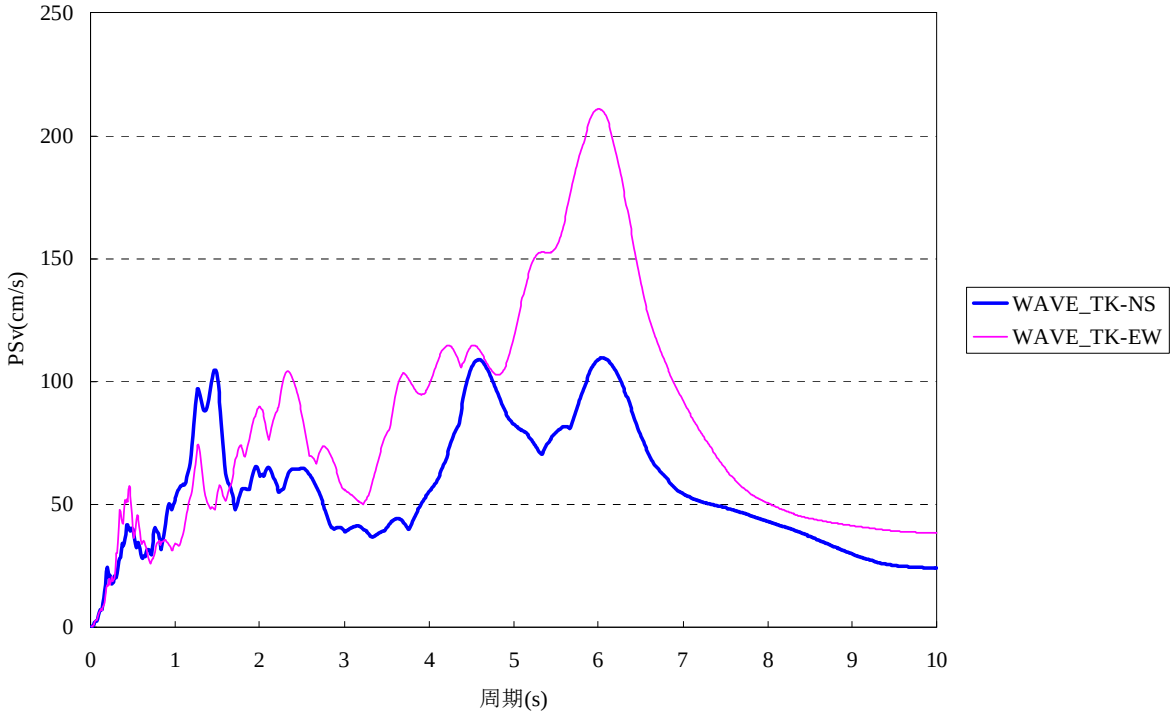
(e-1) WAVE-K-NS

図 2.2-4　2 方向入力地震動加速度時刻歴波形



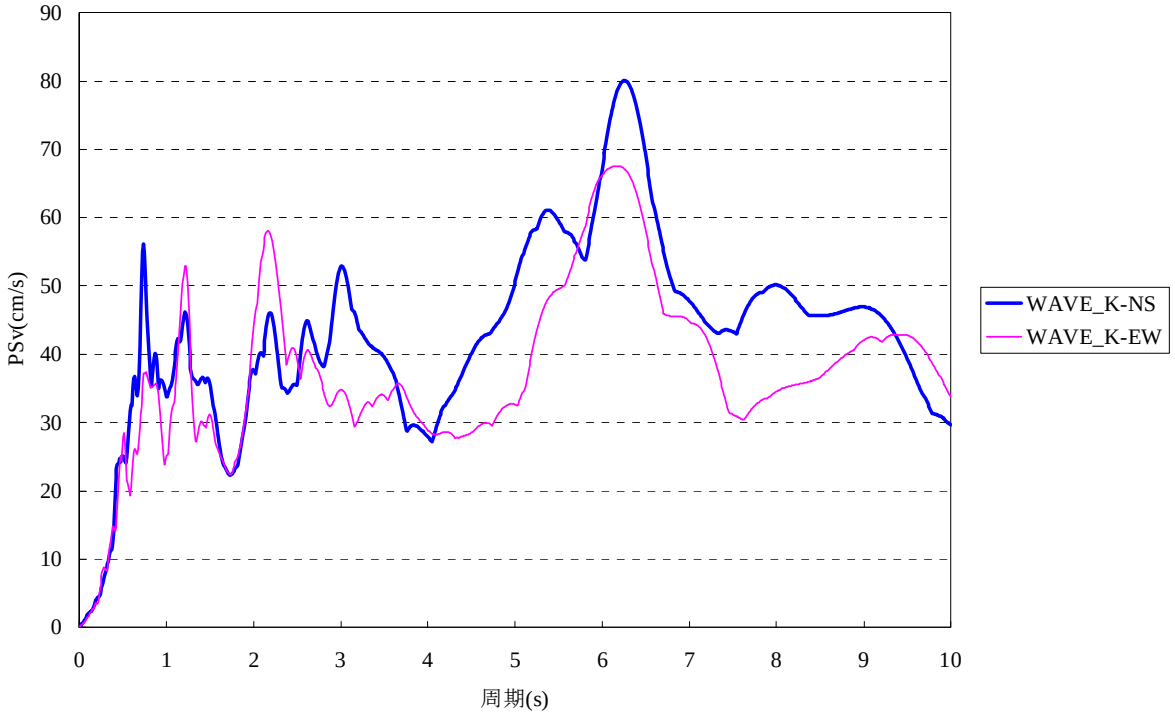
(a) WAVE-Ts1

(b) WAVE-Ts2



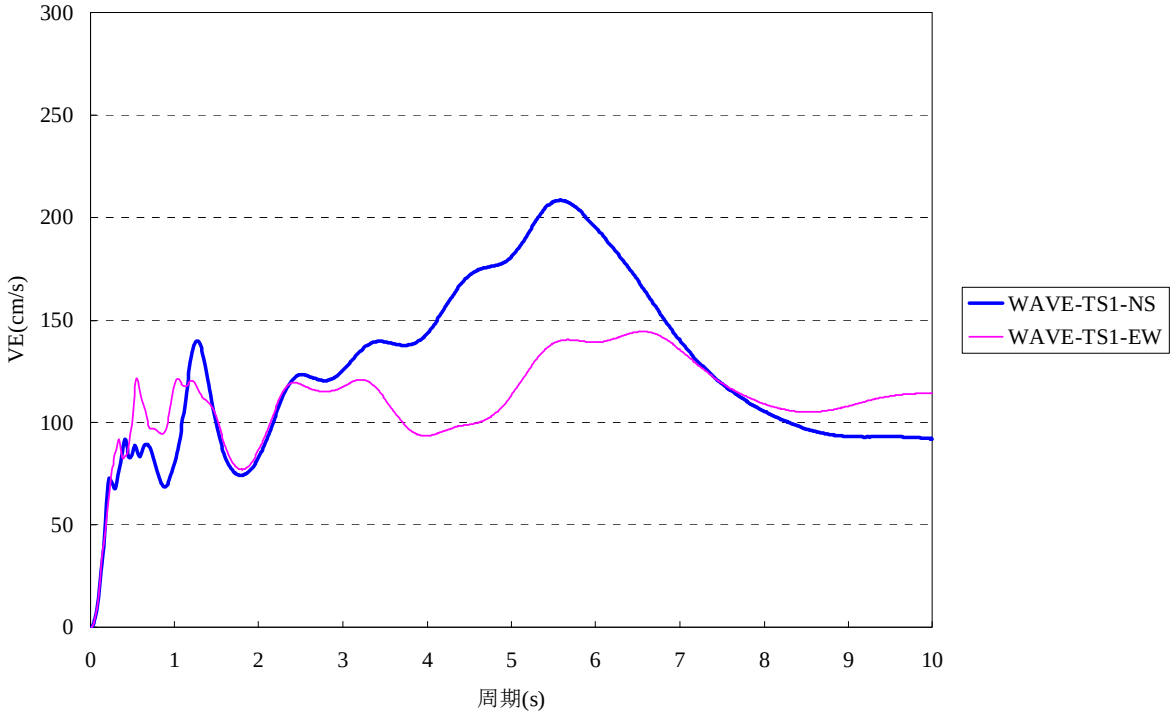
(c) WAVE-Tk

(d) WAVE-S

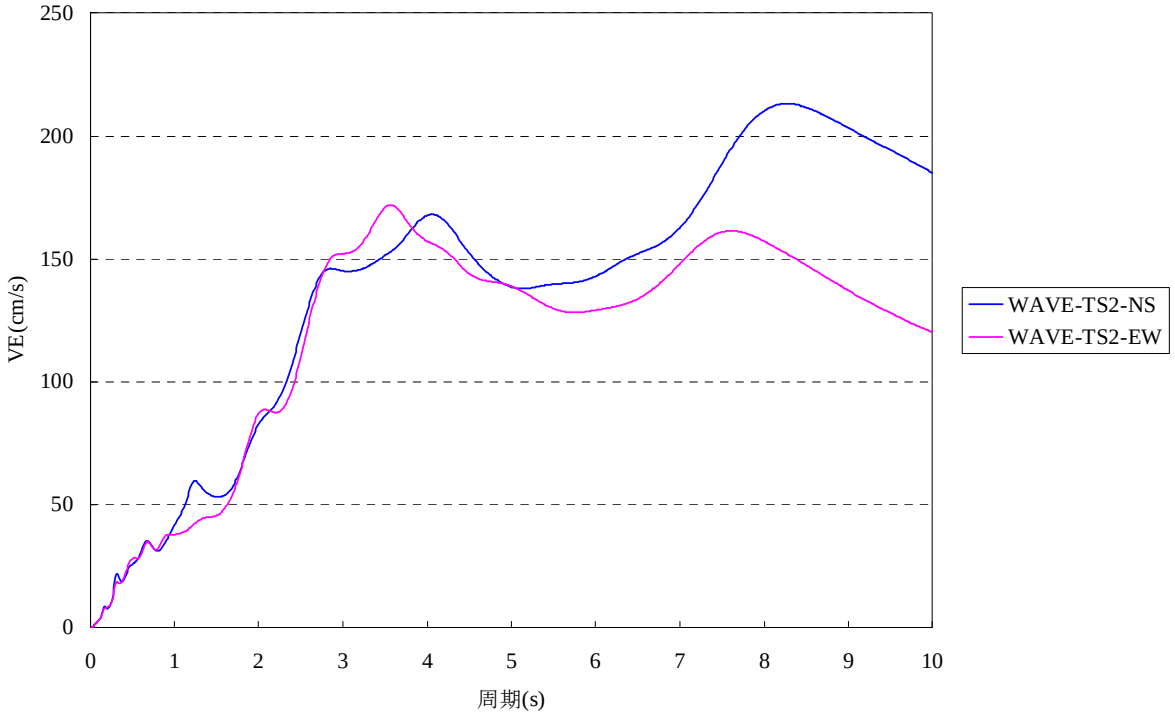


(e) WAVE-K

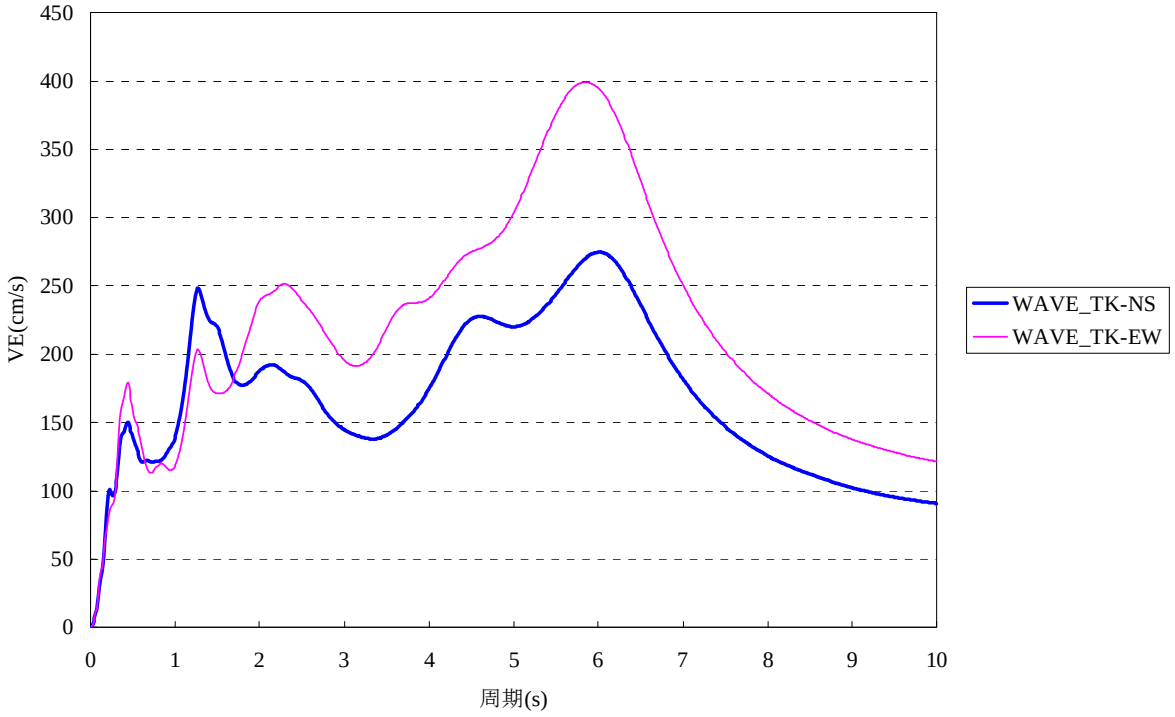
図 2.2-5　2 方向入力地震動擬似速度応答スペクトル(h=0.05)



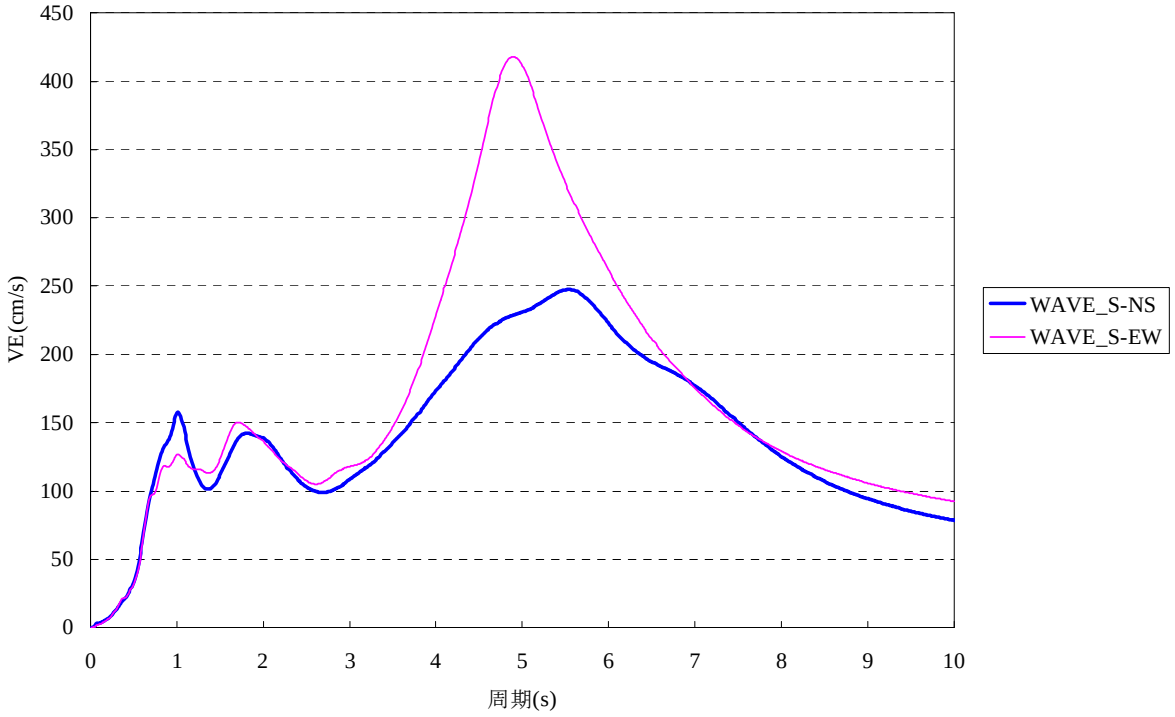
(a) WAVE-Ts1



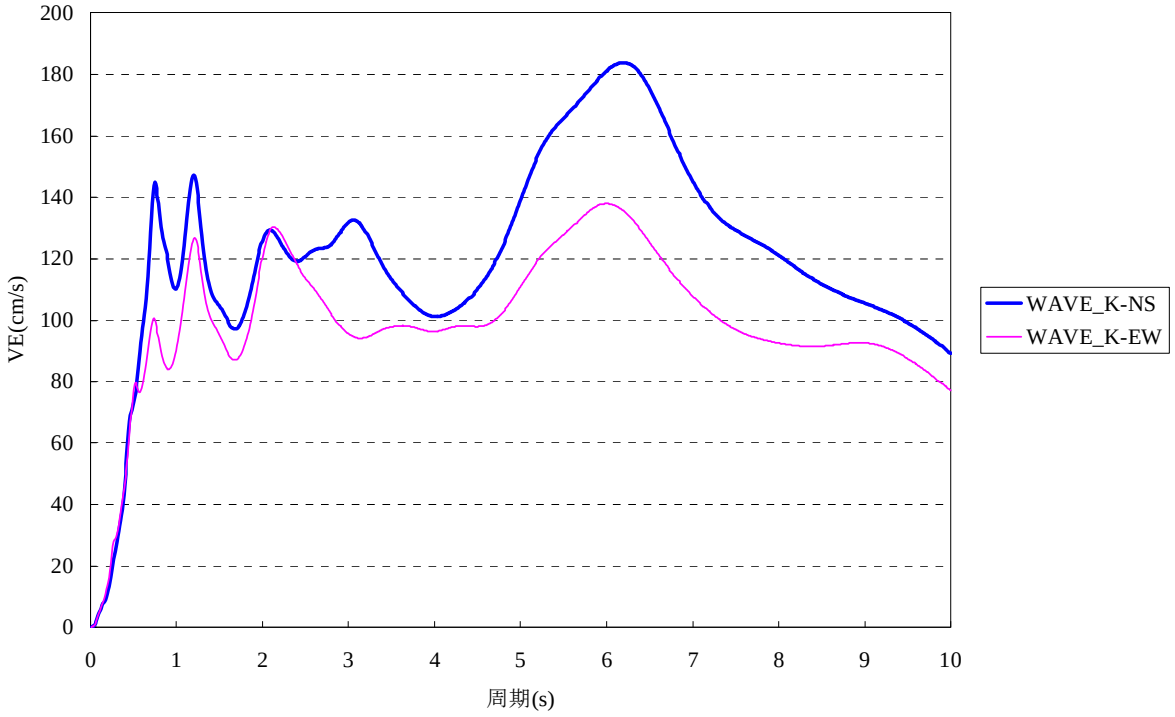
(b) WAVE-Ts2



(c) WAVE-Tk



(d) WAVE-S



(e) WAVE-K

図 2.2-6　2 方向入力地震動エネルギースペクトル

2.3　免震部材の繰り返し特性モデルと地震応答解析（その 1）

2.3.1　鉛プラグ入り積層ゴム

免震材料として鉛プラグ入り積層ゴム(LRB)を適用した免震建築物を対象として、長周期地震動による繰り返し加振による温度上昇に伴い、降伏荷重が低下する特性を考慮した地震応答解析を実施し、その影響評価を行った。

(1)　各種依存性に関する既往の研究

表 2.3.1-1 に鉛プラグ入り積層ゴムの繰り返し加振時の温度上昇に伴う特性変化に関する主要文献を示す。

表 2.3.1-1　鉛プラグ入り積層ゴムの温度上昇に伴う特性変化に関する主要文献

番号	論文名	著者名	掲載誌
1	鉛プラグ入り積層ゴムの速度依存性と繰り返し依存性	人見泰義他	建築学会学術講演集、1998.9
2	鉛プラグ型積層ゴムの圧縮面圧下における限界変形能力	高山峯夫他	技術報告集 No.16,2002.12
3	鉛プラグ入り積層ゴムの繰り返し加振実験報告	西澤崇雄他	建築学会学術講演集、2004.8
4	長周期地震動を想定した LRB1000 の内部温度特性確認実験　～地震応答波の 1/1 加振実験～	河内山修他	建築学会学術講演集、2006.9
5	大振幅繰返し変形を受ける積層ゴム支承の熱・力学的連成挙動に関する研究 (その 1～14)	竹中康雄他	建築学会学術講演集、2007～2010
6	Durability of Rubber Isolators by Long-Duration Ground Motion due to Large Earthquakes	Mineo Takayama et.el	14WCEE,2008.10
7	積層ゴムの熱･力学的連成挙動に関する実験的研究	竹中康雄他	構造系論文集、No.646、2009.12

以下、主要文献について内容をまとめる。文中の文献番号は表 2.3.1-1 による。

鉛プラグ入り積層ゴムの繰り返し加振時における特性変化については文献 1 により、LRB ϕ 500 に対して γ =150%で 30 回繰り返し加振時に降伏荷重特性値 Q_d は初期値の約 55%に低下していることが示されている。文献 2 においても LRB ϕ 300 に対して γ =300%で 30 回繰り返し加振時に 3 サイクル目と比較して 27 サイクル目には 85%、90%に低下したことが示されている。本文献中では鉛吸収エネルギーと比較して鉛温度上昇が小さく熱伝導解析による検討が必要と指摘されている。文献 3 では LRB ϕ 250 に対して γ =250%で 50 回繰り返し加振時に降伏後剛性 K_d はほとんど変化せず、降伏荷重特性値 Q_d は 65%に低下していることが示されている。以上についてはそれぞれが正弦波加振下での特性変化について示されているが、文献 4 では地震応答波加振を実施しており、正弦波加振下での実験結果と同様の結果が得られている。文献 5 では鉛プラグ入り積層ゴムと高減衰積層ゴムを対象とした正弦波加振試験、地震応答波加振試験の結果及び実験結果のシミュレーション解析手法が示されており、鉛プラグ入り積層ゴムについては鉛プラグの温度上昇を考慮した地震応答解析手法が提案されている。また実験結果については文献 7 にまとめられている。文献 6 では LRB ϕ 410 に対して γ =200%で 200 回繰り返し加振時に降伏荷重特性値 Q_d は 3 サイクル目に対し約 42%に低下したことが示されており、実験結果よりエネルギー吸収量と Q_d 低下率の関係を用い、Q_d の低下を考慮した地震応答解析を実施している。

(2)　解析条件

応答評価を行った建物モデル諸元を表 2.3.1-2 に示す。応答解析は上部建物を 1 質点としてモデル化し実施した。免震層は鉛プラグ入り積層ゴムのみで構成されるものとし、鉛プラグ入り積層ゴムはゴム種 G4、外径 ϕ 1000、鉛径 200mm、ゴム総厚 200mm とし、積層ゴムのゴム剛性による周期 T_f=4.5s、鉛降伏せん断力係数（α s=0.035）となるよう設定した。

表 2.3.1-2　対象建物諸元

上部構造重量 (積層ゴム 1 基当り) (kN)	LRB 平均面圧 (N/mm^2)	T_f (sec)	α s
7477	9.9	4.5	0.035

T_f: ゴム剛性による免震周期

α s: 鉛プラグ降伏せん断力係数

地震応答解析には LRB の温度について熱伝導解析を行いながら、鉛プラグ部の温度によって LRB の降伏荷重 Q_d を変化させながら行う手法を用いている（参考文献 2.3.1-1）参照)。

地震応答解析には、鉛プラグ入り積層ゴムの熱伝導方程式と免震建物運動方程式を並行して解く、時刻歴応答解析法（参考文献 2.3.1-1）参照）を行う手法である。鉛プラグ入り積層ゴム熱伝導解析差分法モデル、鉛プラグの温度−降伏荷重関係、時刻歴応答解析法はそれぞれ以下のように設定する。

鉛プラグ入り積層ゴムにおける熱伝導解析差分法モデルは、前進差分法による鉛プラグ入り積層ゴムを要素分割した差分法モデルとする（図 2.3.1-1(a)参照)。地震エネルギーの吸収量はすべて鉛プラグ部での発熱となると仮定し、モデル化範囲には取り付け部も含めることによって、鉛プラグから積層ゴム部、フランジ、上下基礎への熱エネルギーの拡散を考慮する。また、鉛プラグの温度−降伏荷重関係は、下式(2.3.1-1)の提案式に基づくものとする。(図 2.3.1-1(b)参照)。本式は、鉛プラグが約 200℃まで温度上昇した実験ケースを含む鉛プラグ入り積層ゴム加振実験結果の分析により得られた実験式である。

$$\tau = \tau_o\left\{1-(T/T_L)^{\alpha_T}\right\},\ \alpha_T = 0.4+0.25\cdot(T/T_L) \qquad \text{…..（2.3.1-1）}$$
$$\tau_o = 15.0(N/mm^2),\ T_L = 327.5(℃)$$

ここに、τ ：鉛降伏応力、τ_0：鉛降伏応力設計値

T：鉛プラグ平均温度、T_L：鉛融点

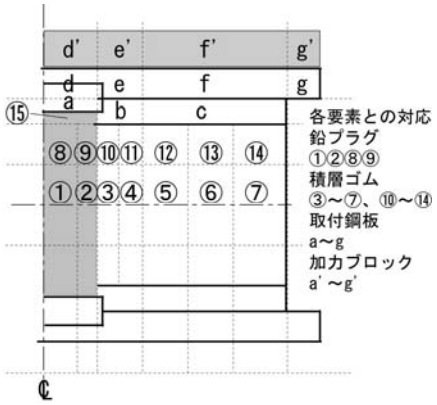


図2.3.1-1(a)　鉛プラグ入り積層ゴムの熱伝導差分法モデルの例

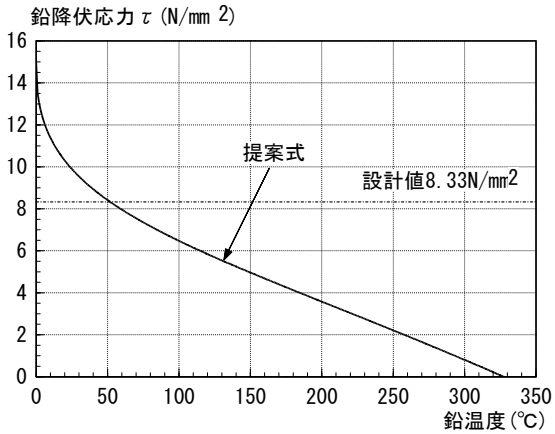


図2.3.1-1(b)　鉛プラグ温度-降伏応力関係

解析において鉛入り積層ゴムは修正バイリニアモデルによる履歴を考慮し、免震層の履歴減衰のみ考慮した。また、温度上昇を考慮する場合の初期温度は 15℃とした。

(3)　解析結果

表 2.3.1-3 に各入力地震動における解析結果を、図 2.3.1-2 に各入力地震動における積層ゴムの応答せん断ひずみ－免震層せん断力係数図を示す。
図 2.3.1-3 に各入力地震動における鉛プラグの降伏応力の時刻歴を、図 2.3.1-4 に鉛部の平均温度時刻歴を、図 2.3.1-5 に累積変位量時刻歴を、図 2.3.1-6 に免震層における履歴吸収エネルギー量の速度換算値の時刻歴を示す。

解析結果より、入力地震動のうち T-TN-AIC003_AV の場合には免震層応答最大水平変位は温度上昇非考慮時に比較して、考慮時にはその増大がみられ、入力地震動の倍率が 1.0 倍の場合に変位増大率が 1.18 倍､地震動倍率が 1.5 倍の場合に変位増大率が 1.38 倍となっている｡また、積層ゴムのせん断ひずみは入力地震動の倍率が 1.2 倍で温度上昇を考慮した場合にγ=200%程度、1.5 倍でγ=300%程度である。
その他の地震動においては入力倍率が 1.5 倍の場合に変位増大率が 1.35 倍となるケースがあるものの、積層ゴムのせん断ひずみはγ=100%以内である。

表 2.3.1-3(a)　応答解析結果

入力地震動		免震層水平変位 (cm)			応答最大加速度 (cm/s2)		
	入力倍率	温度上昇非考慮	温度上昇考慮	考慮／非考慮	温度上昇非考慮	温度上昇考慮	考慮／非考慮
N-OSKH02_AV	1.00	9.9	9.6	0.97	59	63	1.07
	1.25	13.2	13.3	1.01	64	68	1.05
	1.50	16.1	21.8	1.35	69	73	1.06
T-TN-AIC003_AV	1.00	20.4	24.2	1.18	76	74	0.98
	1.25	30.2	39.4	1.30	94	95	1.02
	1.50	41.8	57.5	1.38	113	119	1.05
T-TN-AIC004_AV	1.00	8.6	8.1	0.94	55	58	1.04
	1.25	12.2	11.8	0.97	63	63	1.00
	1.50	18.9	19.4	1.02	74	72	0.97
T-TN-KGIN_AV	1.00	3.6	4.0	1.11	42	51	1.22
	1.25	6.7	5.5	0.83	50	52	1.03
	1.50	10.0	8.6	0.86	59	58	0.99

表 2.3.1-3(b)　応答解析結果

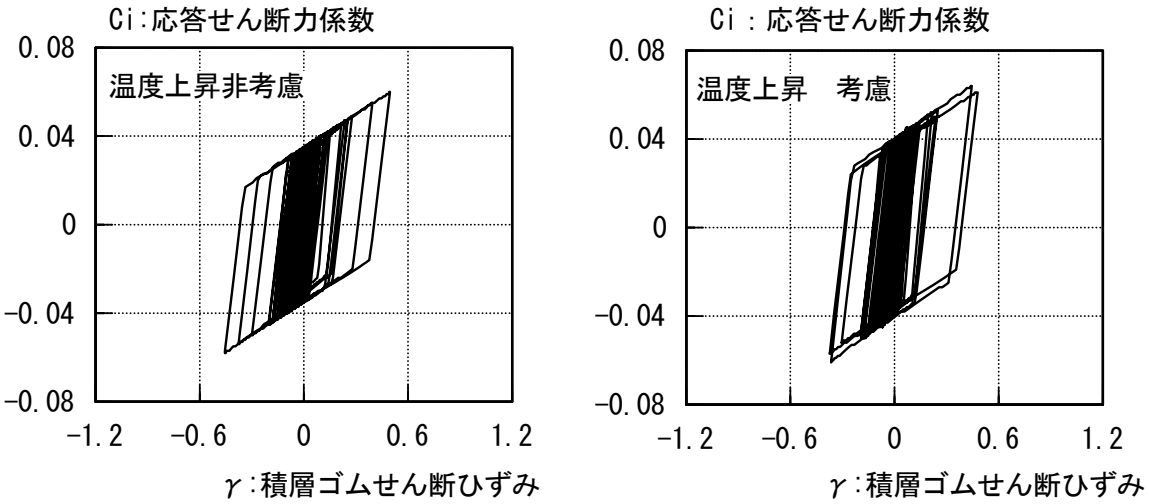
入力地震動		免震層せん断ひずみ (%)			免震層応答最大せん断力係数		
	入力倍率	温度上昇非考慮	温度上昇考慮	考慮／非考慮	温度上昇非考慮	温度上昇考慮	考慮／非考慮
N-OSKH02_AV	1.00	50	48	0.97	0.060	0.064	1.07
	1.25	66	67	1.01	0.066	0.069	1.05
	1.50	81	109	1.35	0.071	0.075	1.06
T-TN-AIC003_AV	1.00	102	121	1.18	0.078	0.076	0.98
	1.25	151	197	1.30	0.095	0.097	1.02
	1.50	209	288	1.38	0.115	0.122	1.06
T-TN-AIC004_AV	1.00	43	40	0.94	0.057	0.059	1.04
	1.25	61	59	0.97	0.064	0.064	1.00
	1.50	95	97	1.02	0.075	0.073	0.97
T-TN-KGIN_AV	1.00	18	20	1.11	0.042	0.052	1.22
	1.25	33	28	0.83	0.051	0.053	1.03
	1.50	50	43	0.86	0.060	0.060	0.99

表 2.3.1-3(c)　応答解析結果

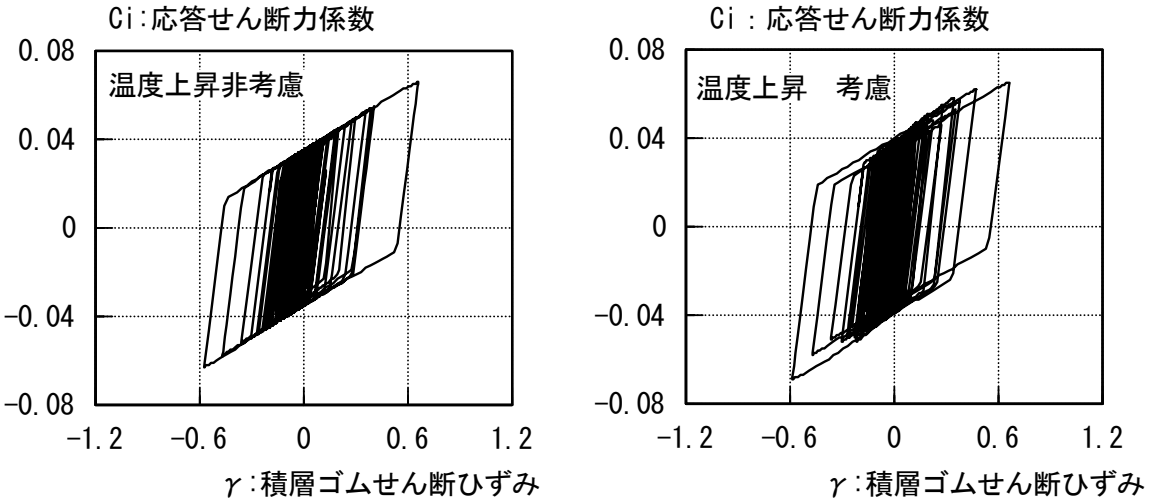
入力地震動		免震層累積変位量 *1 (m)			免震層吸収エネルギ 速度換算値 (cm/s)			最大鉛 平均温度 (℃)
	入力倍率	温度上昇 非考慮	温度上昇 考慮	考慮 ／非考慮	温度上昇 非考慮	温度上昇 考慮	考慮 ／非考慮	温度上昇 考慮
N-OSKH02_AV	1.00	5.3	5.9	1.11	121.7	120.8	0.99	45.9
	1.25	6.8	7.6	1.12	147.7	151.1	1.02	61.2
	1.50	9.3	10.6	1.14	182.9	196.9	1.08	88.6
T-TN-AIC003_AV	1.00	11.4	13.2	1.16	224.4	231.6	1.03	127.3
	1.25	14.9	20.0	1.34	273.6	283.7	1.04	175.3
	1.50	19.1	27.0	1.41	321.4	318.3	0.99	212.9
T-TN-AIC004_AV	1.00	5.0	5.5	1.10	106.5	101.8	0.96	38.2
	1.25	6.4	7.0	1.09	137.9	139.5	1.01	56.9
	1.50	8.4	9.5	1.13	173.8	182.7	1.05	85.7
T-TN-KGIN_AV	1.00	3.2	4.9	1.53	68.7	69.0	1.00	25.7
	1.25	4.0	4.9	1.23	91.0	91.6	1.01	33.9
	1.50	4.7	5.6	1.19	111.8	111.7	1.00	42.6

初期温度 15℃

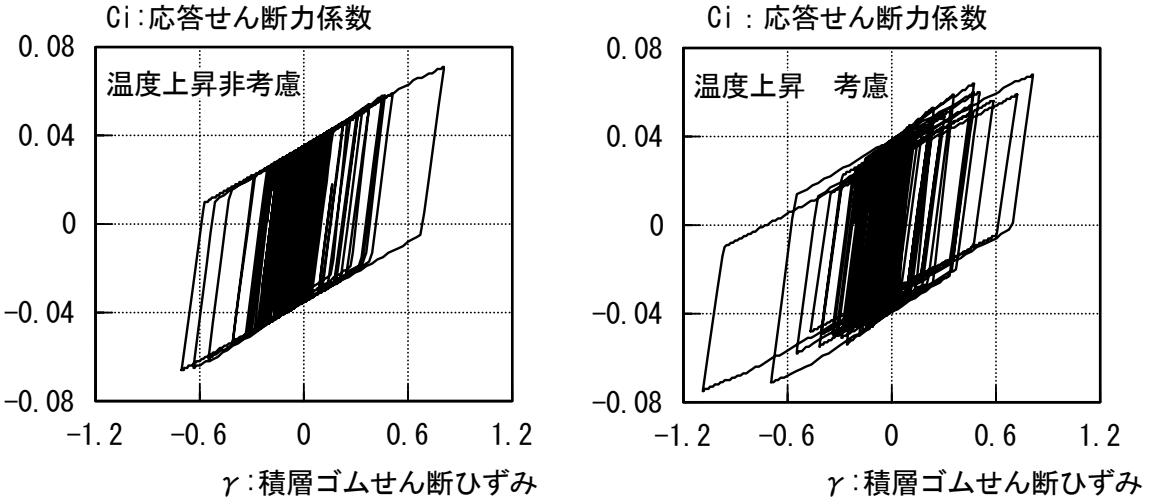
*1　免震層累積変位量については総入力エネルギーの 95%の時刻における値とした。



(i) 1.0 倍入力時

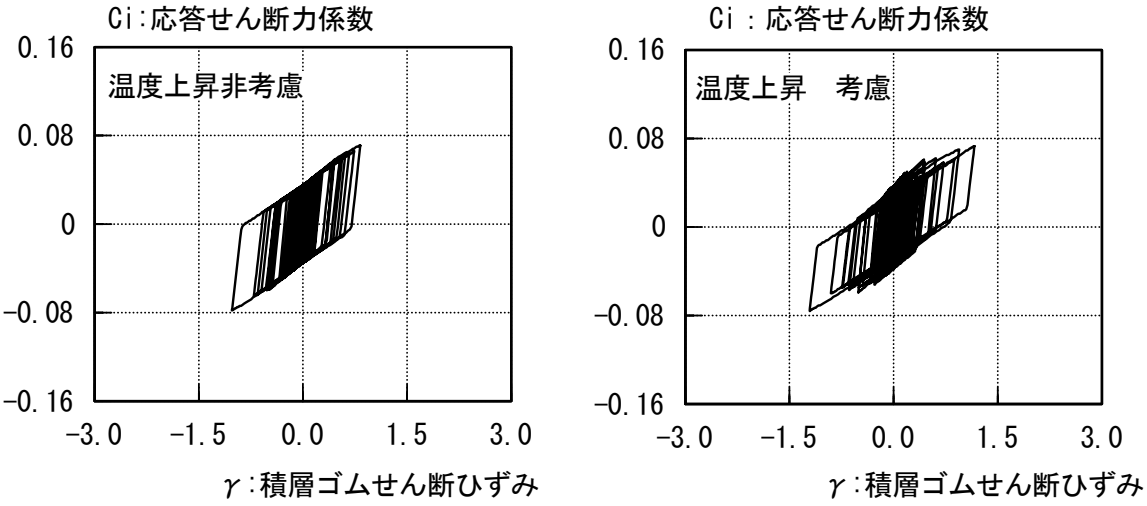


(ii) 1.25 倍入力時

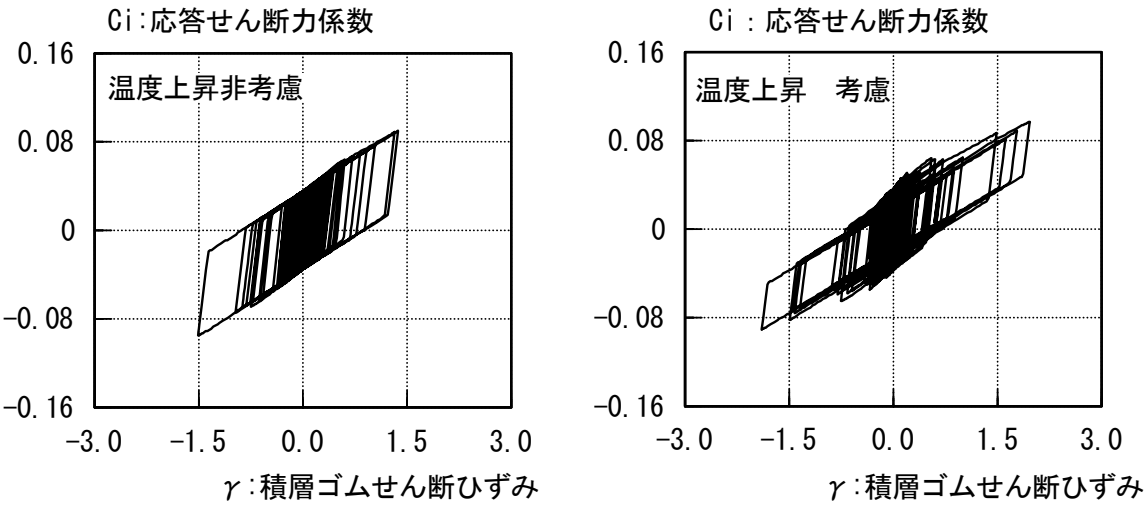


(iii) 1.5 倍入力時

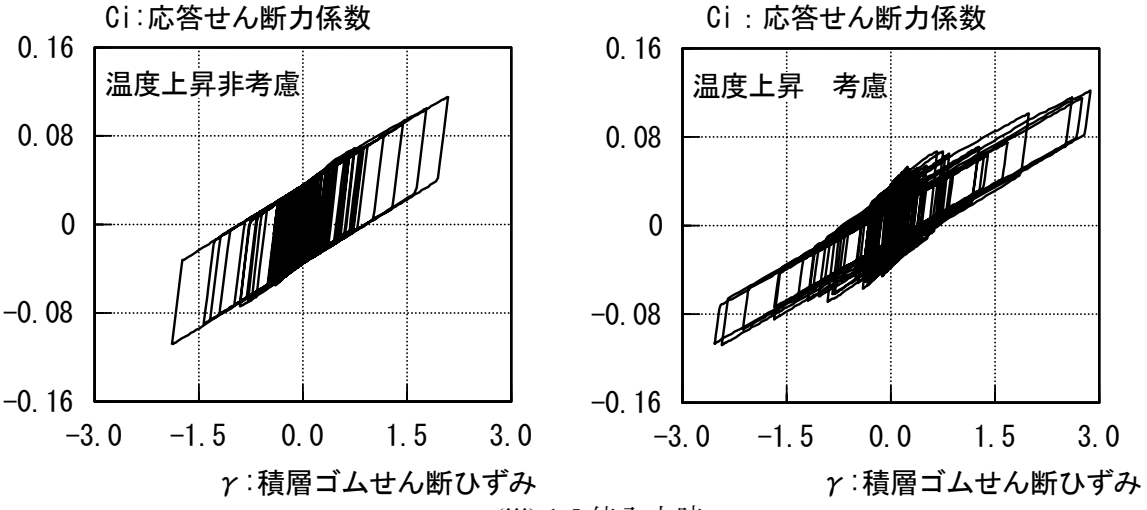
図 2.3.1-2(a)　積層ゴムせん断ひずみ－免震層せん断力係数図（N-OSKH02_AV）



(i) 1.0 倍入力時

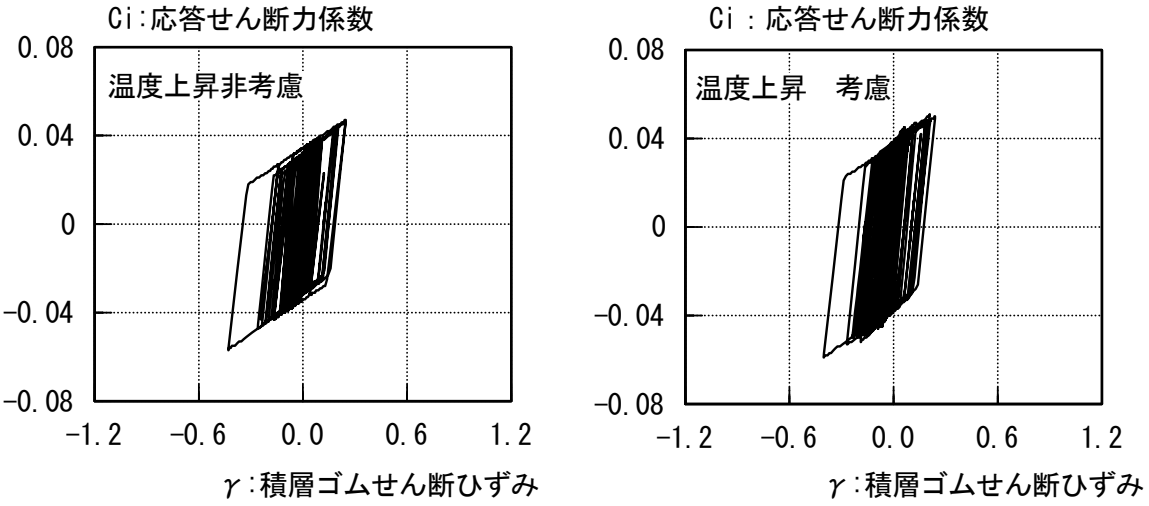


(ii) 1.25 倍入力時

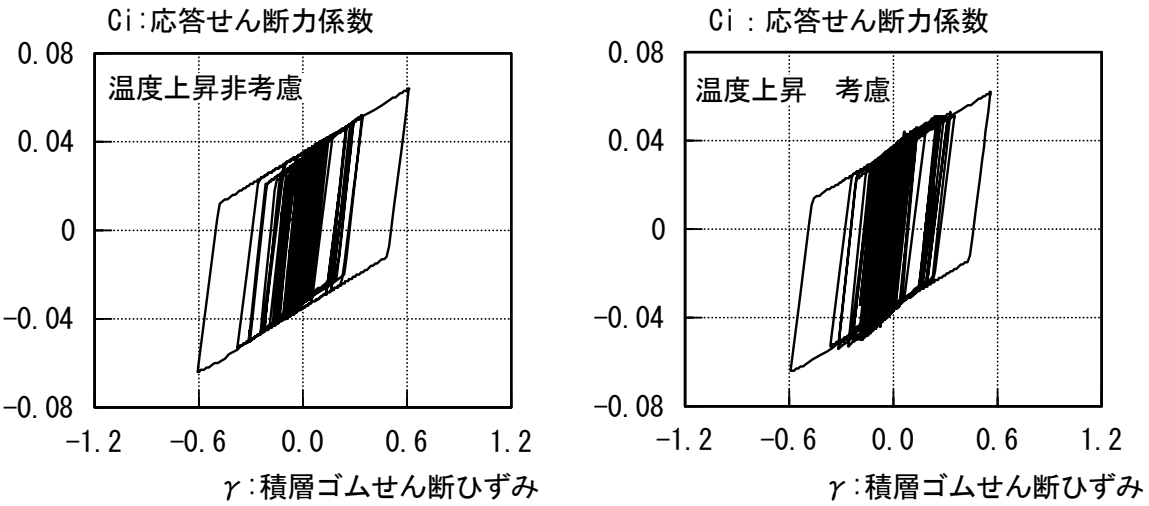


(iii) 1.5 倍入力時

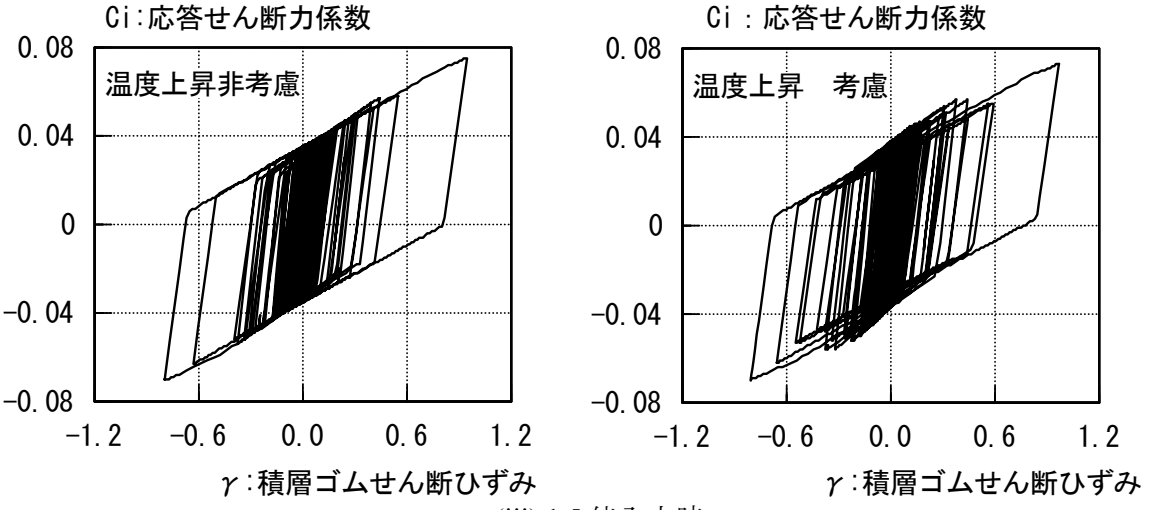
図 2.3.1-2(b)　積層ゴムせん断ひずみ－免震層せん断力係数図（T-TN-AIC003_AV）



(i) 1.0 倍入力時

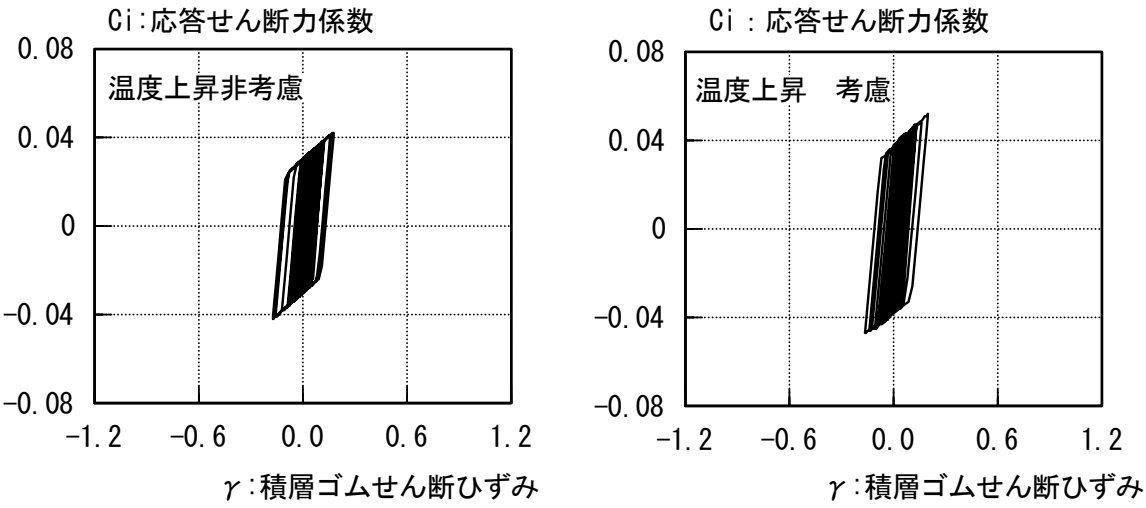


(ii) 1.25 倍入力時

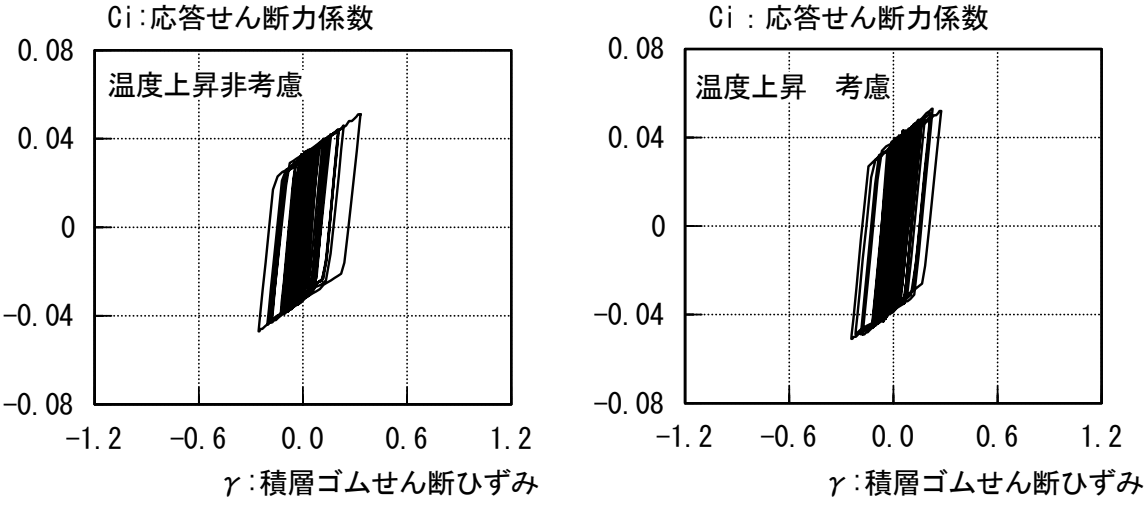


(iii) 1.5 倍入力時

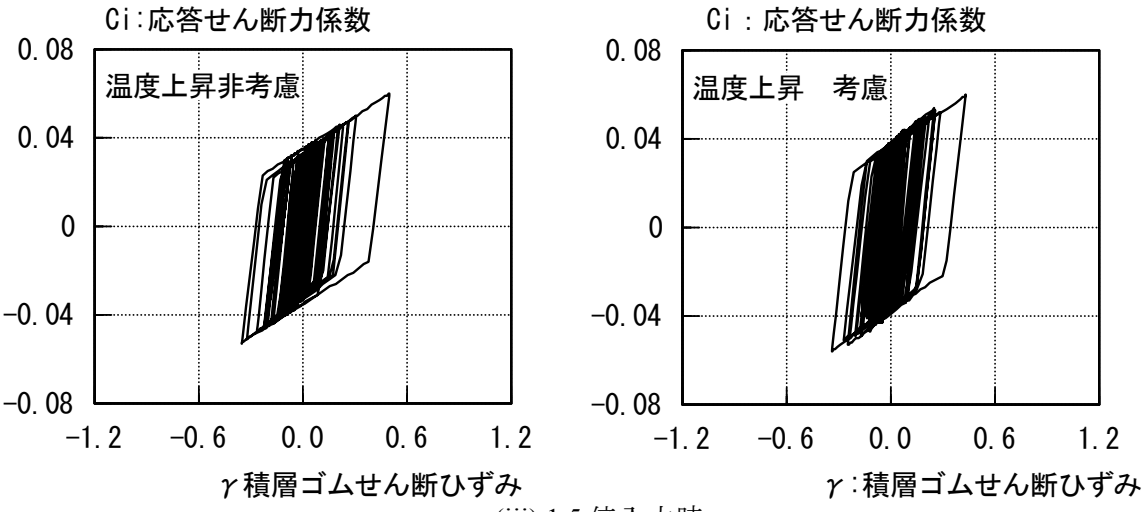
図 2.3.1-2(c)　積層ゴムせん断ひずみ－免震層せん断力係数図（T-TN-AIC004_AV）



(i) 1.0 倍入力時



(ii) 1.25 倍入力時



(iii) 1.5 倍入力時

図 2.3.1-2(d)　積層ゴムせん断ひずみ－免震層せん断力係数図（T-TN-KGIN_AV）

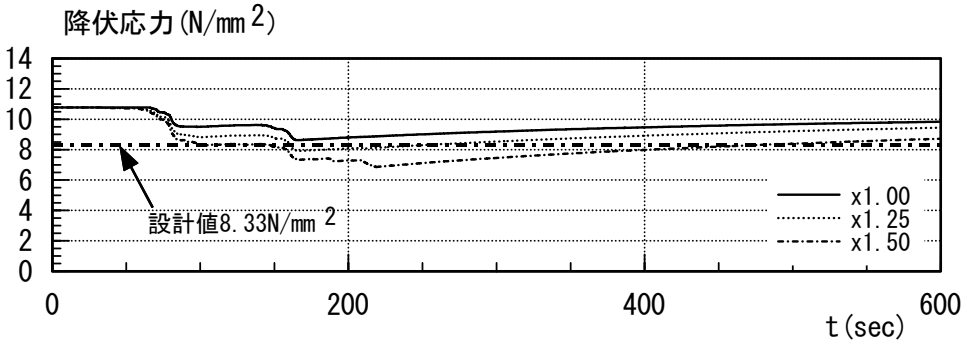


図 5.3.1-3(a)　降伏応力時刻歴（N-OSKH02_AV）

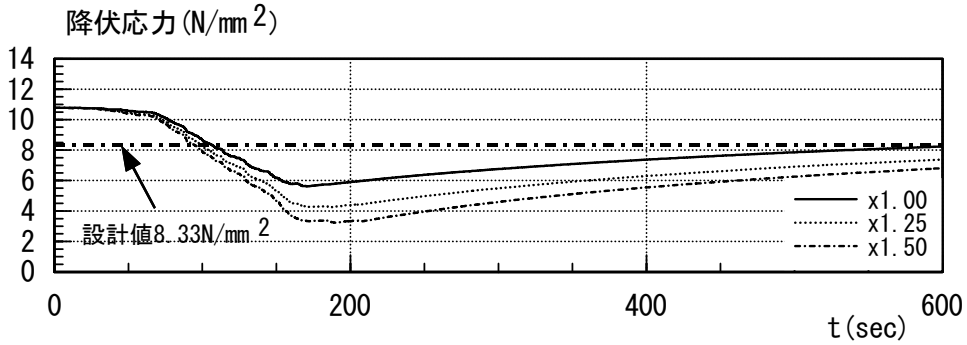


図 2.3.1-3(b)　降伏応力時刻歴（T-TN-AIC003_AV）

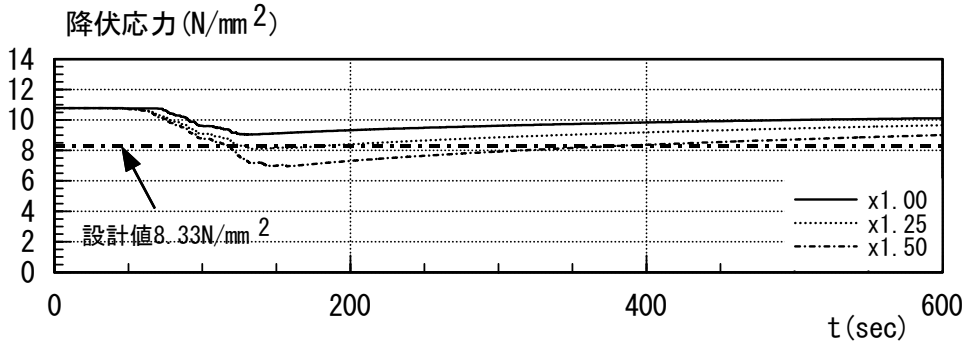


図 2.3.1-3(c)　降伏応力時刻歴（T-TN-AIC004_AV）

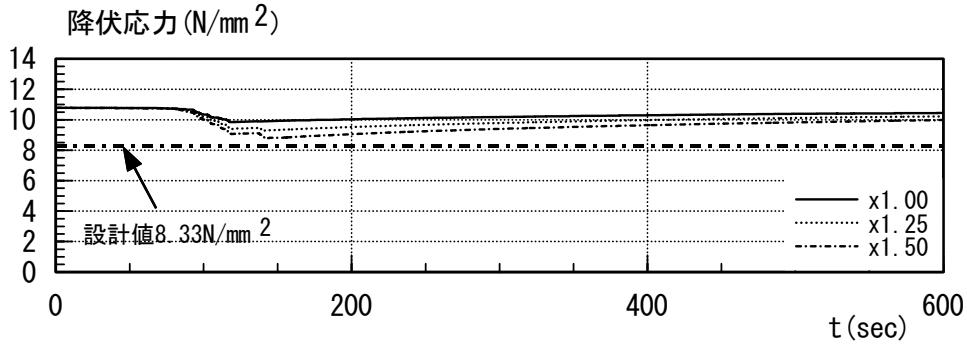
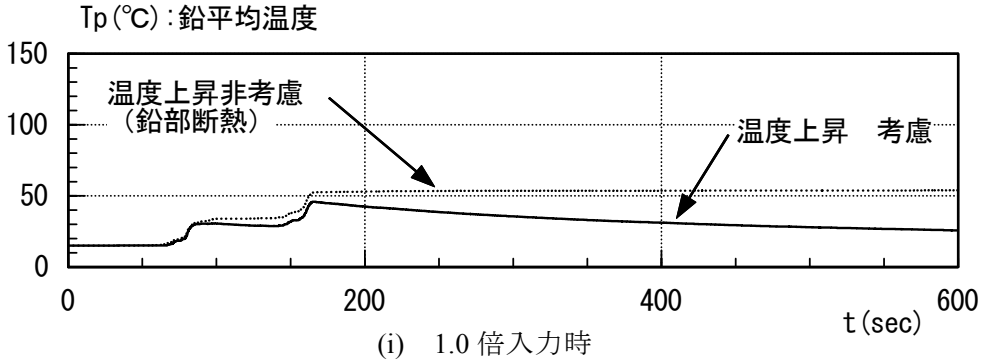
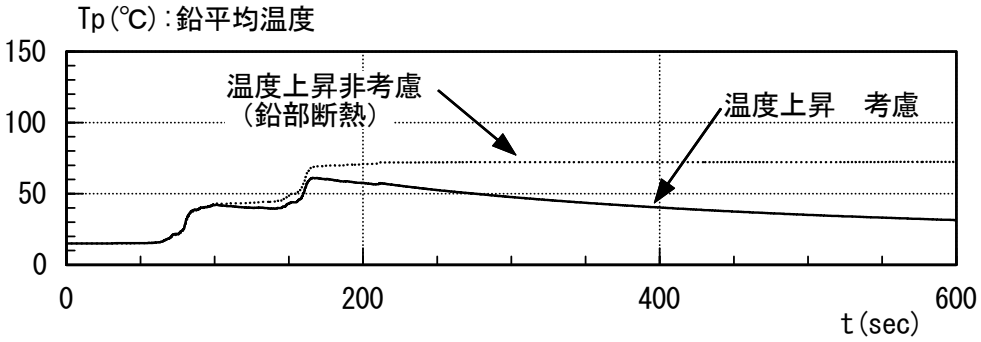


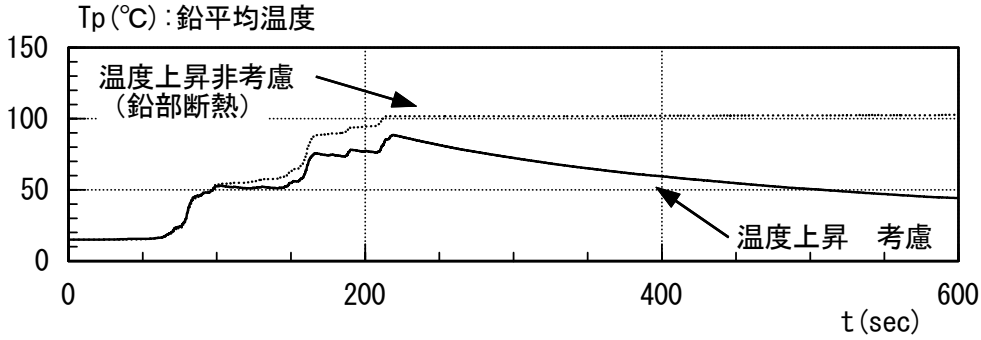
図 2.3.1-3(d)　降伏応力時刻歴（T-TN-KGIN_AV）



(i)　1.0 倍入力時

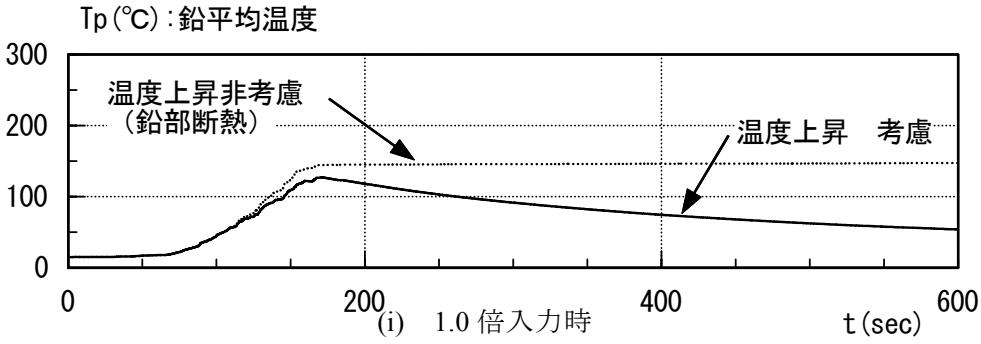


(ii)　1.25 倍入力時

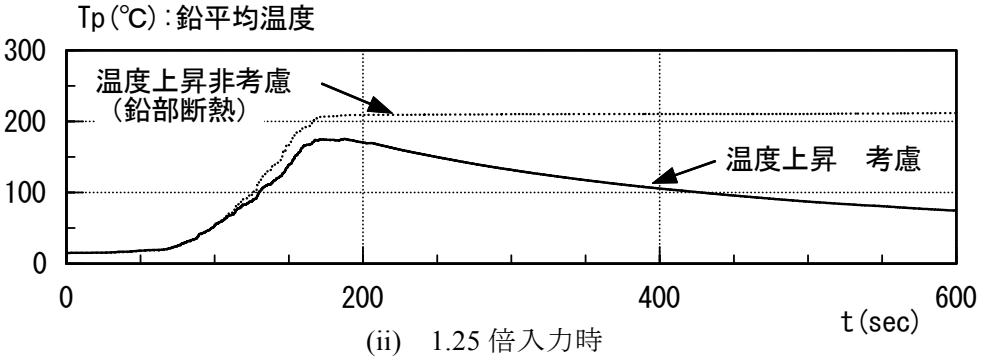


(iii)　1.5 倍入力時

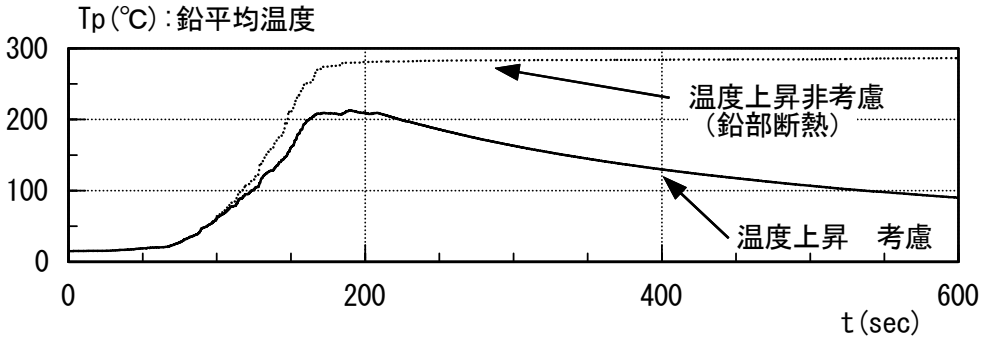
図 2.3.1-4(a)　鉛部平均温度時刻歴（N-OSKH02_AV）



(i)　1.0 倍入力時

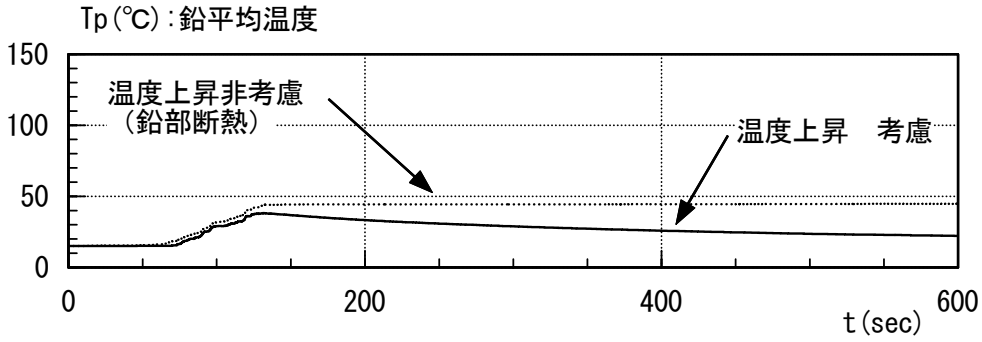


(ii)　1.25 倍入力時

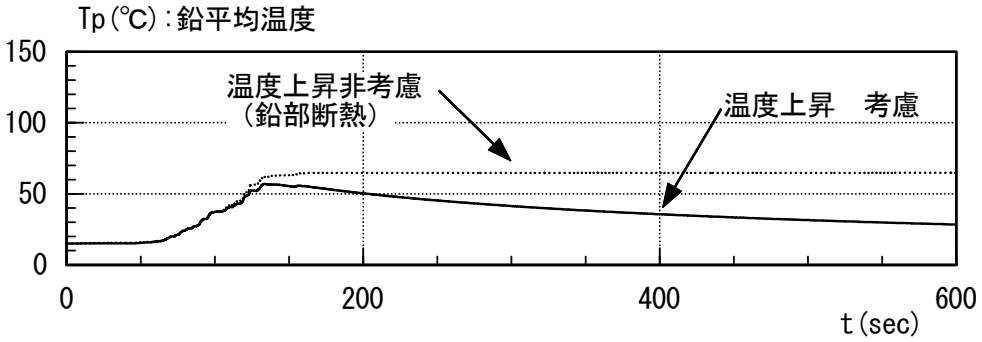


(iii)　1.5 倍入力時

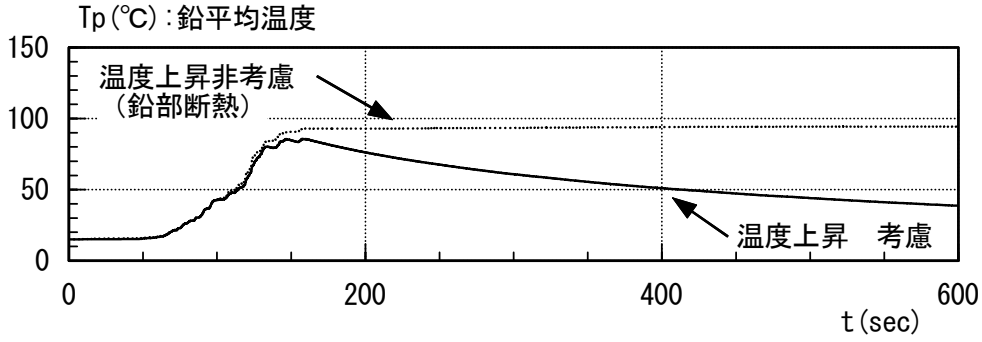
図 2.3.1-4(b)　鉛部平均温度時刻歴（T-TN-AIC003_AV）



(i)　1.0 倍入力時

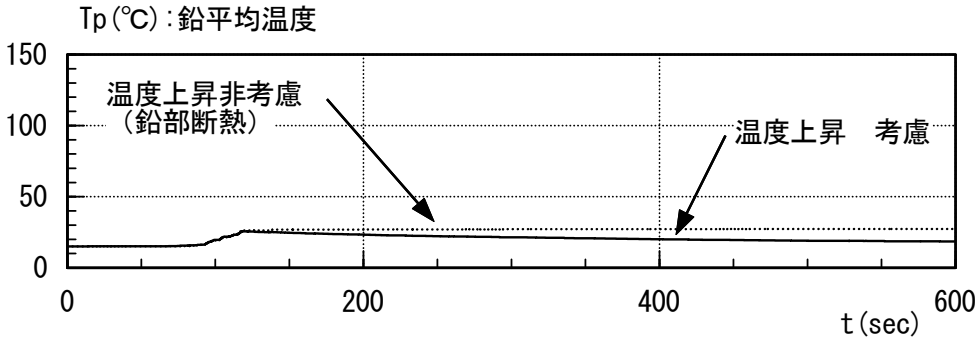


(ii)　1.25 倍入力時

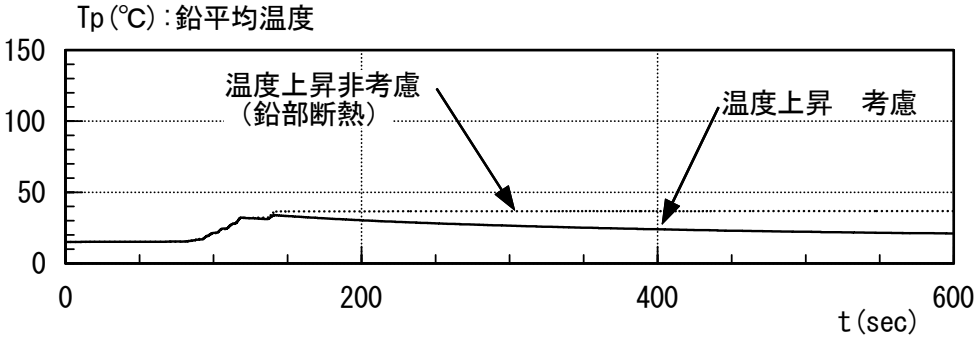


(iii)　1.5 倍入力時

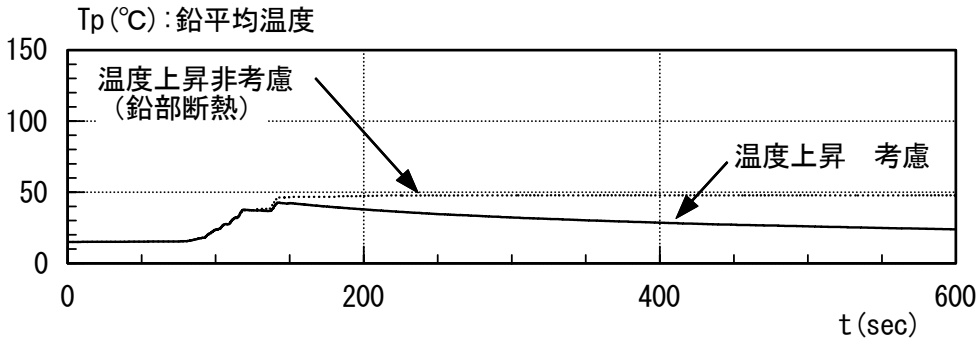
図 2.3.1-4(c)　鉛部平均温度時刻歴（T-TN-AIC004_AV）



(i)　1.0 倍入力時



(ii)　1.25 倍入力時

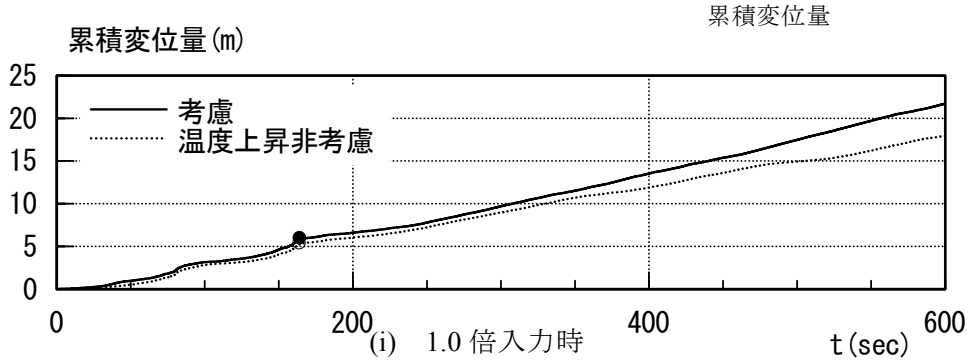


(iii)　1.5 倍入力時

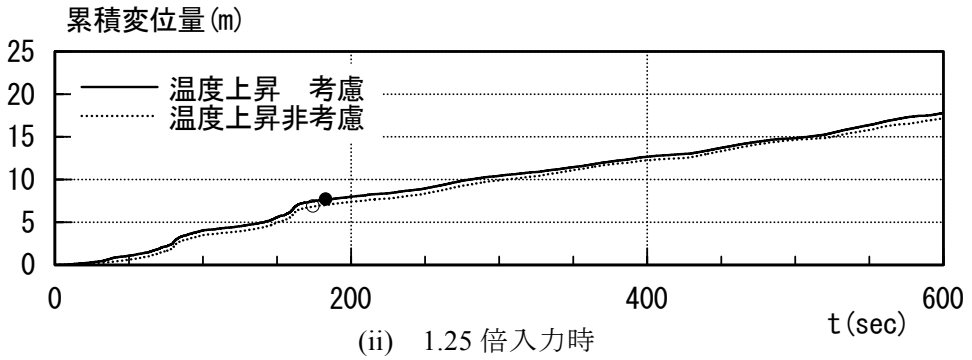
図 2.3.1-4(d)　鉛部平均温度時刻歴（T-TN-KGIN_AV）

●, ○　総入力エネルギーの 95%時

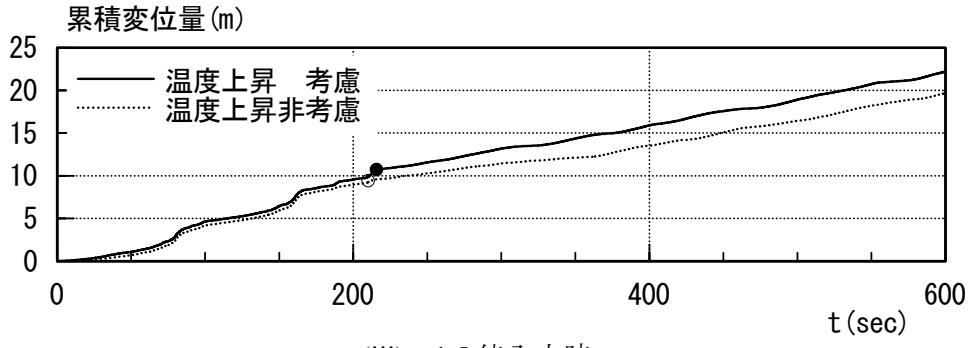
累積変位量



(i)　1.0 倍入力時



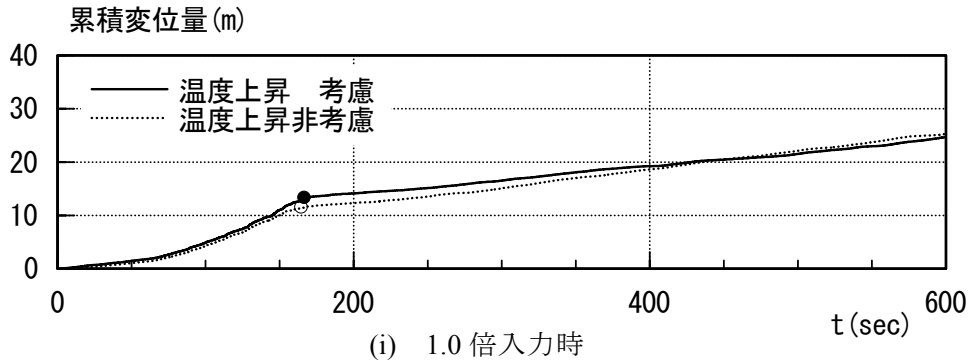
(ii)　1.25 倍入力時



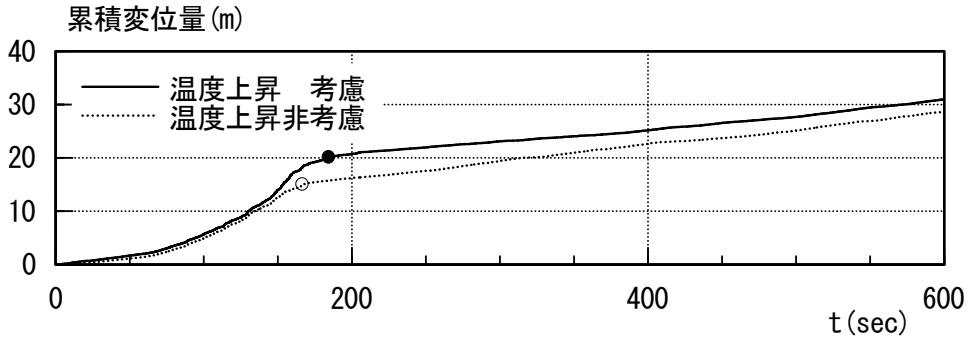
(iii)　1.5 倍入力時

図 2.3.1-5(a)　免震層累積変位量時刻歴（N-OSKH02_AV）

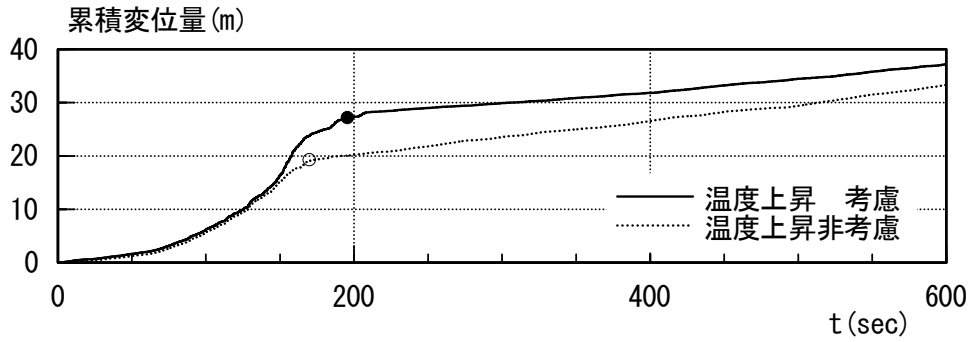
●, ○　総入力エネルギーの 95%時
累積変位量



(i)　1.0 倍入力時



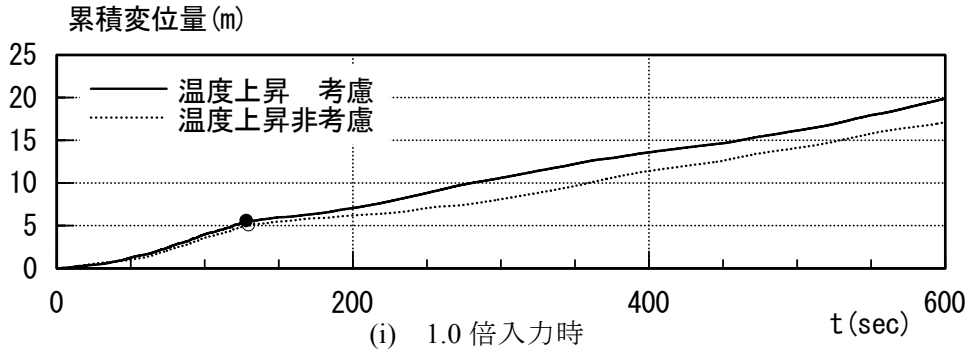
(ii)　1.25 倍入力時



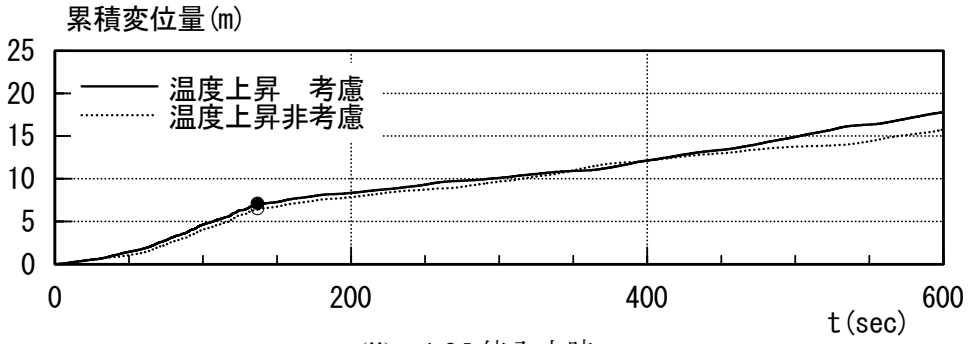
(iii)　1.5 倍入力時

図 2.3.1-5(b)　免震層累積変位量時刻歴（T-TN-AIC003_AV）

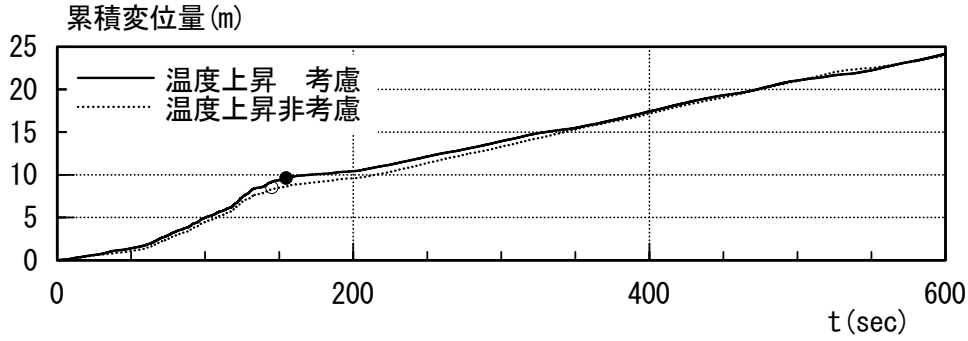
●, ○　総入力エネルギーの 95%時
累積変位量



(i)　1.0 倍入力時



(ii)　1.25 倍入力時

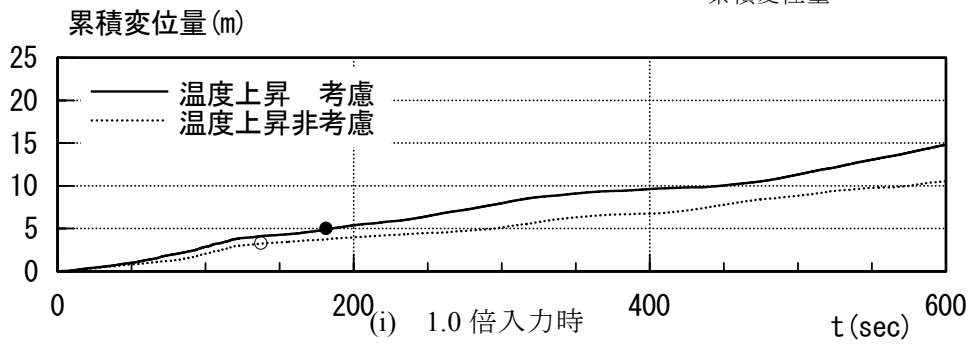


(iii)　1.5 倍入力時

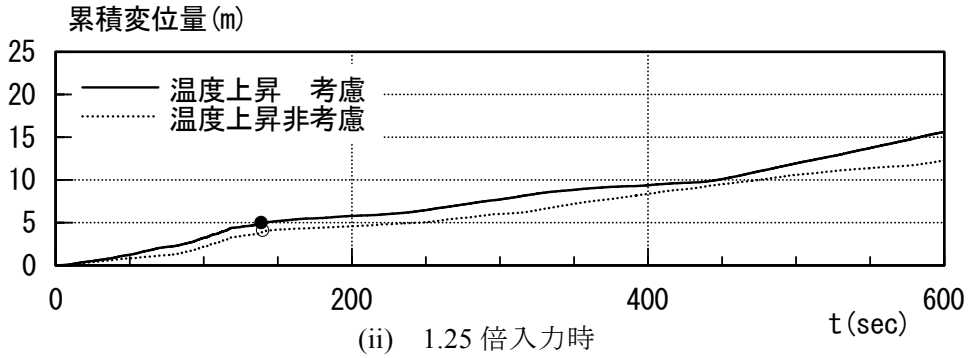
図 2.3.1-5(c)　免震層累積変位量時刻歴（T-TN-AIC004_AV）

●, ○　総入力エネルギーの 95%時

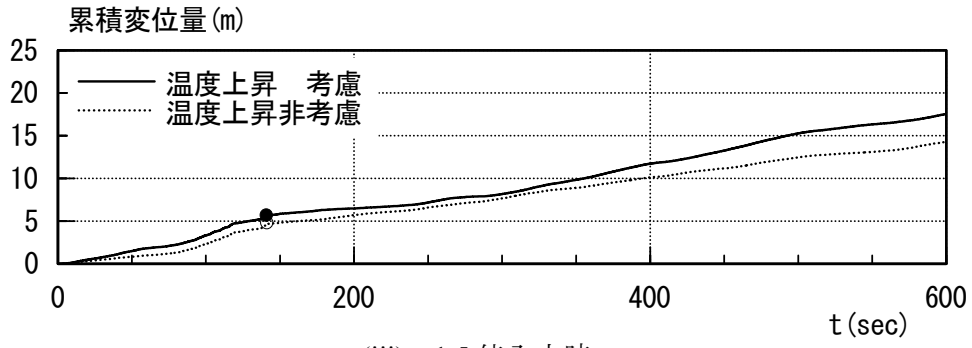
累積変位量



(i)　1.0 倍入力時

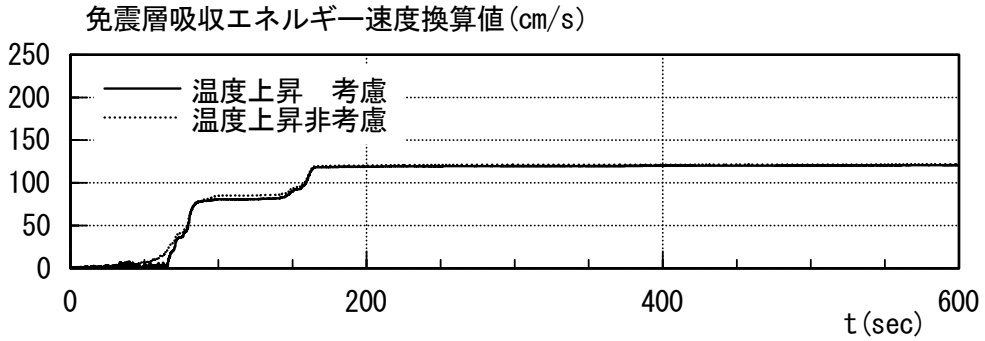


(ii)　1.25 倍入力時

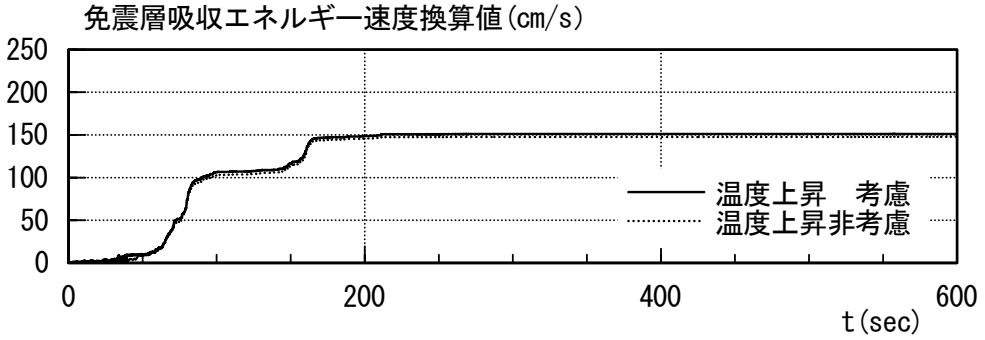


(iii)　1.5 倍入力時

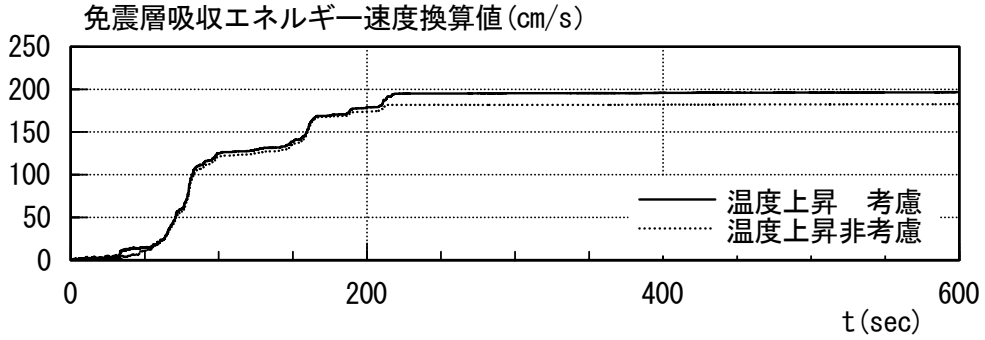
図 2.3.1-5(d)　免震層累積変位量時刻歴（T-TN-KGIN_AV）



(i)　1.0 倍入力時

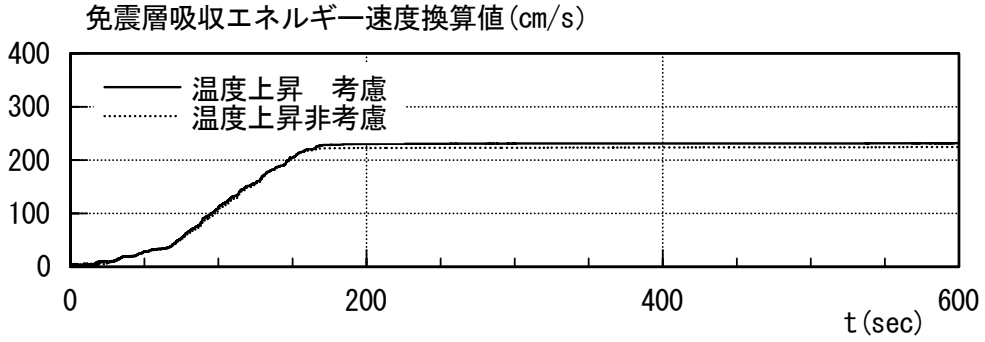


(ii)　1.25 倍入力時

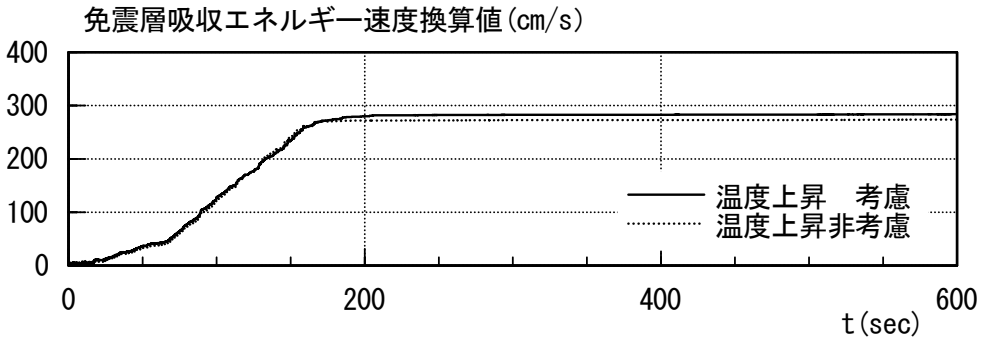


(iii)　1.5 倍入力時

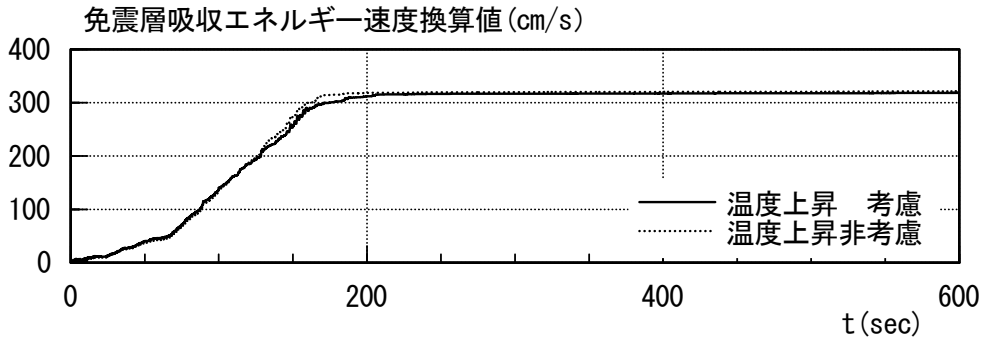
図 2.3.1-6(a)　免震層履歴吸収エネルギー速度換算値時刻歴（N-OSKH02_AV）



(i)　1.0 倍入力時

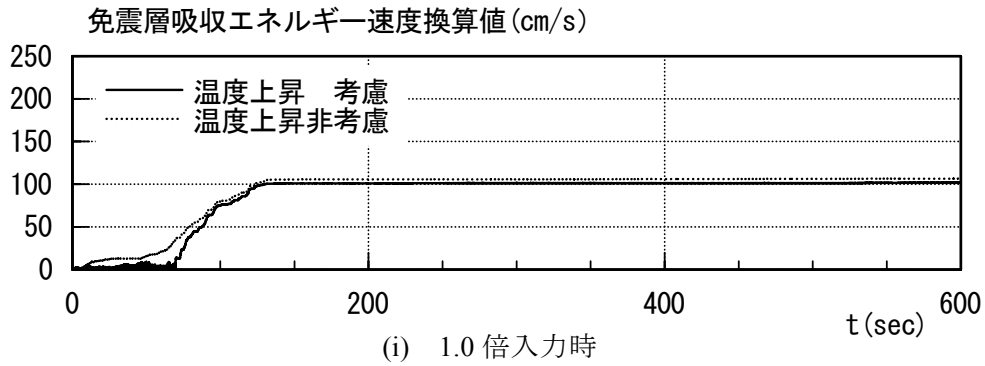


(ii)　1.25 倍入力時

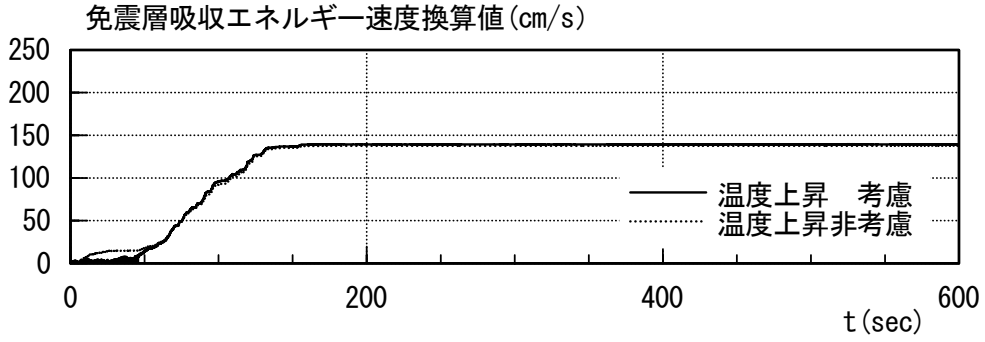


(iii)　1.5 倍入力時

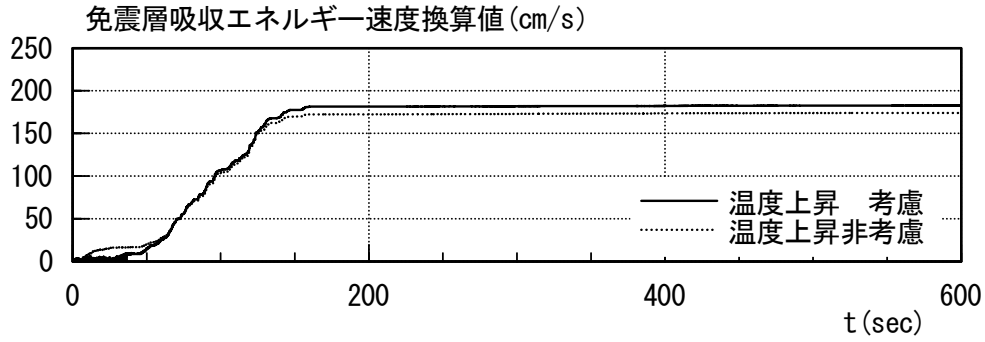
図 2.3.1-6(b)　免震層履歴吸収エネルギー速度換算値時刻歴（T-TN-AIC003_AV）



(i)　1.0 倍入力時

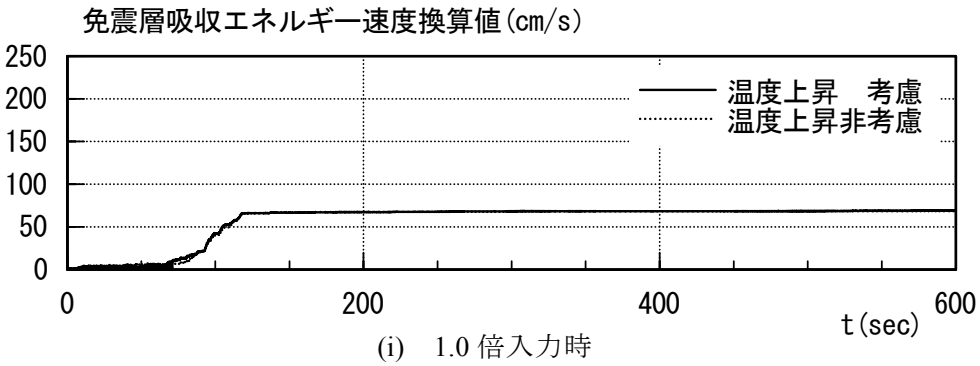


(ii)　1.25 倍入力時

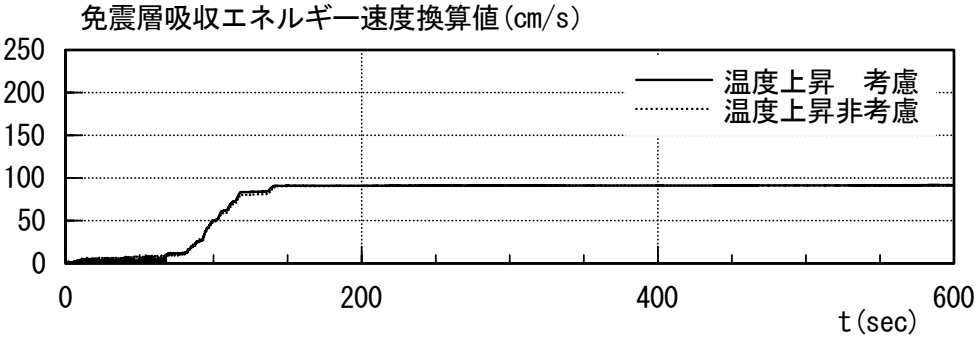


(iii)　1.5 倍入力時

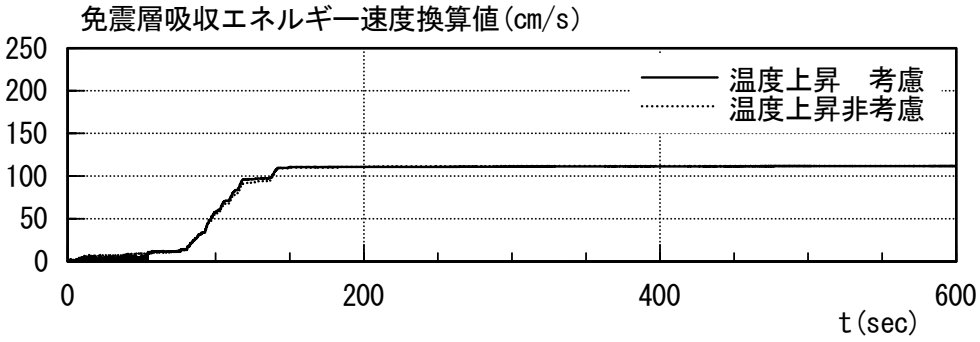
図 2.3.1-6(c)　免震層履歴吸収エネルギー速度換算値時刻歴（T-TN-AIC004_AV）



(i)　1.0 倍入力時



(ii)　1.25 倍入力時



(iii)　1.5 倍入力時

図 2.3.1-6(d)　免震層履歴吸収エネルギー速度換算値時刻歴（T-TN-KGIN_AV）

(4)　2 方向入力の検討

2 方向入力地震動については 2.2 に示す地震動において検討を実施した。解析においては地震動の NS、EW の 2 方向成分について、X 方向に NS 成分を、Y 方向に EW 成分を入力した。解析において鉛プラグ入り積層ゴムは MSS モデルとした。

表 2.3.1-4 に各地震動における応答解析結果を、図 2.3.1-7 に積層ゴムせん断ひずみーせん断力係数図を示す。

表 2.3.1-4(a)　2 方向地震動入力時の免震層水平変位

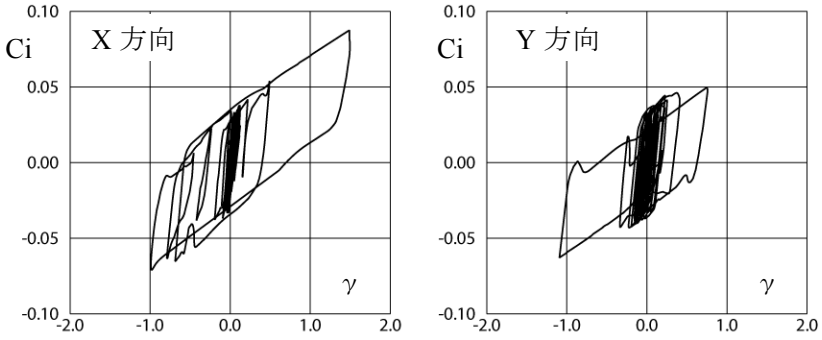
	免震層水平変位(cm)							
	温度上昇非考慮時				温度上昇　考慮時			
	2方向同時入力		1方向入力		2方向同時入力		1方向入力	
	NS	EW	NS	EW	NS	EW	NS	EW
WAVE-Ts1	29.9	21.9	27.9	17.3	27.6	20.6	27.1	15.8
WAVE-Ts2	8.2	13.6	6.5	8.9	6.9	10.5	6.1	8.6
WAVE-Tk	13.8	21.5	12.1	19.5	22.8	41.8	12.4	21.5
WAVE-S	7.9	8.4	6.8	9.3	7.8	8.3	5.9	9.0
WAVE-K	6.2	6.6	6.0	6.7	6.3	6.7	5.6	5.9

表 2.3.1-4(b)　2 方向地震動入力時の免震層応答最大せん断力係数

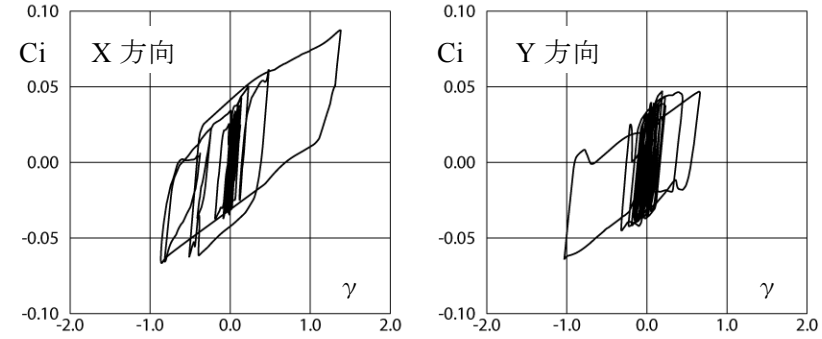
	免震層せん断力係数							
	温度上昇非考慮時				温度上昇　考慮時			
	2方向同時入力		1方向入力		2方向同時入力		1方向入力	
	NS	EW	NS	EW	NS	EW	NS	EW
WAVE-Ts1	0.088	0.063	0.091	0.073	0.087	0.064	0.096	0.078
WAVE-Ts2	0.053	0.066	0.051	0.057	0.056	0.067	0.058	0.065
WAVE-Tk	0.063	0.078	0.064	0.076	0.063	0.093	0.064	0.077
WAVE-S	0.053	0.055	0.052	0.058	0.053	0.055	0.057	0.060
WAVE-K	0.047	0.049	0.050	0.052	0.050	0.050	0.054	0.054

表 2.3.1-4(c)　2 方向地震動入力時の入力エネルギーの速度換算値 V_E

	V_E(cm/s)							
	温度上昇非考慮時				温度上昇　考慮時			
	2方向同時入力		1方向入力		2方向同時入力		1方向入力	
	NS	EW	NS	EW	NS	EW	NS	EW
WAVE-Ts1	133.6		96.6	101.9	134.8		97.8	102.9
			140.4				142.0	
WAVE-TSs2	105.9		65.2	64.5	88.8		63.2	53.8
			91.7				83.0	
WAVE-Tk	269.1		174.5	205.4	291.9		176.1	211.8
			269.5				275.4	
WAVE-S	195.6		128.4	139.4	189.7		124.6	137.4
			189.5				185.5	
WAVE-K	153.8		120.0	105.2	155.7		120.9	107.6
			159.6				161.8	

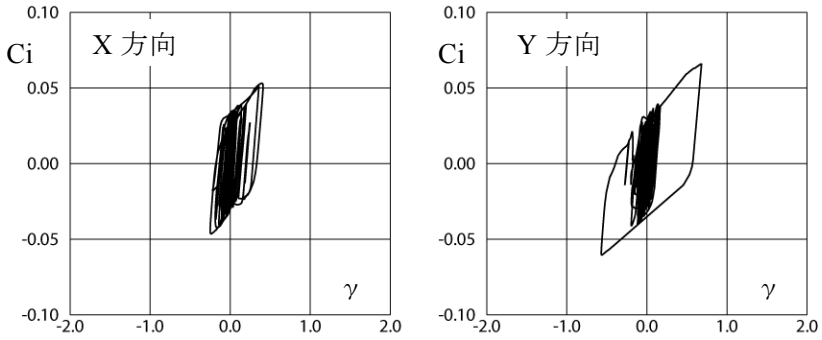


(i)温度上昇非考慮時

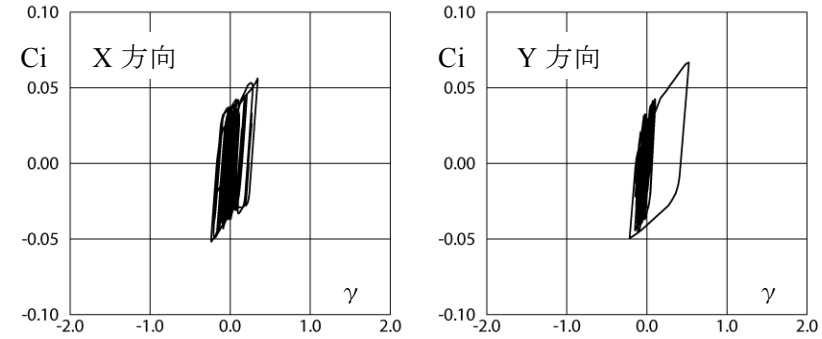


(ii)温度上昇　考慮時

図 2.3.1-7(a)　2 方向入力時積層ゴムせん断ひずみーせん断力係数図（WAVE-Ts1）

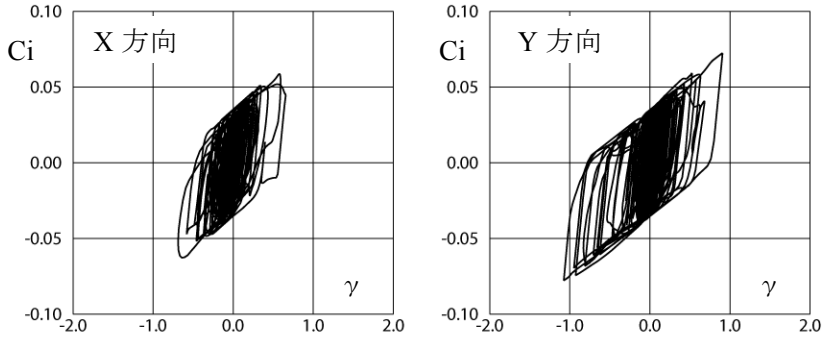


(i)温度上昇非考慮時

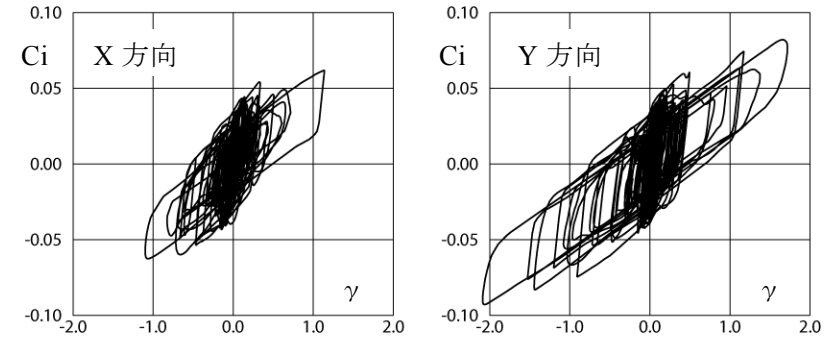


(ii)温度上昇　考慮時

図 2.3.1-7(b)　2 方向入力時積層ゴムせん断ひずみーせん断力係数図（WAVE-Ts2）

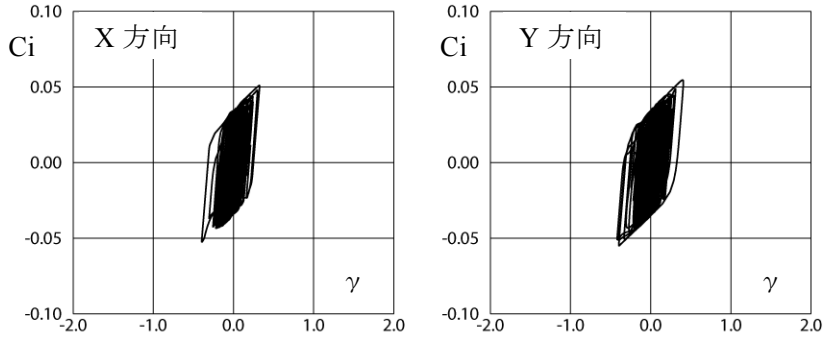


(i)温度上昇非考慮時

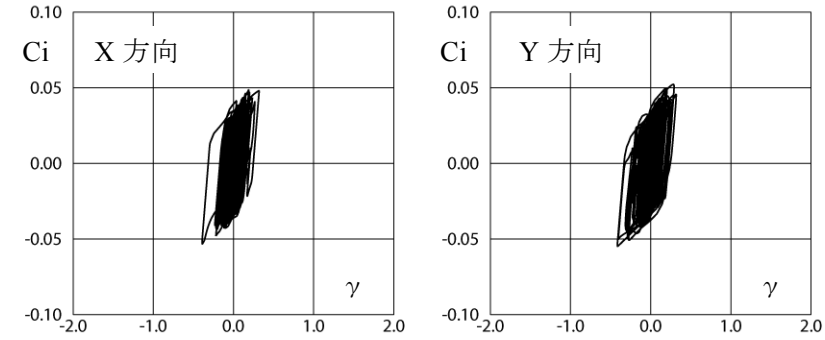


(ii)温度上昇　考慮時

図 2.3.1-7(c)　2 方向入力時積層ゴムせん断ひずみーせん断力係数図（WAVE-Tk）

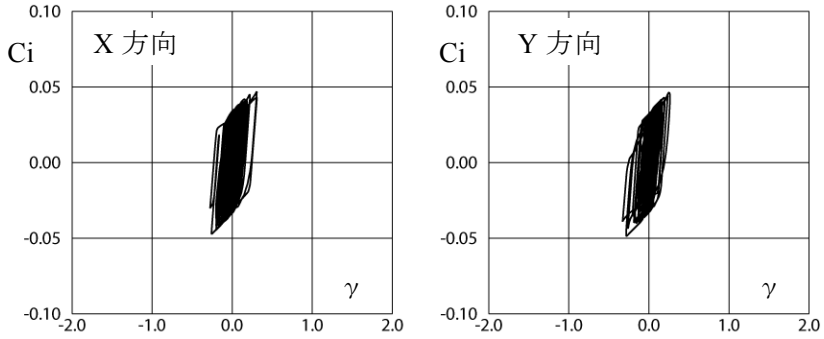


(i)温度上昇非考慮時

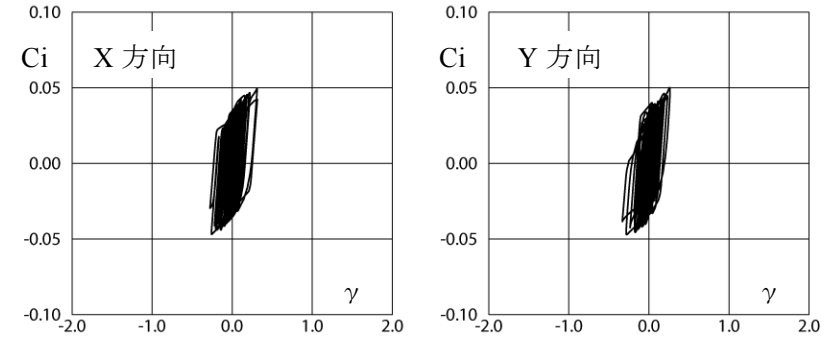


(ii)温度上昇　考慮時

図 2.3.1-7(d)　2 方向入力時積層ゴムせん断ひずみーせん断力係数図（WAVE-S）



(i)温度上昇非考慮時



(ii)温度上昇　考慮時

図 2.3.1-7(e)　2 方向入力時積層ゴムせん断ひずみーせん断力係数図（WAVE-K）

図 2.3.1-8 に WAVE-Ts1 及び WAVE-Tk 入力時の免震層水平変位（X,Y 方向）、鉛降伏応力の時刻歴波形を示す。

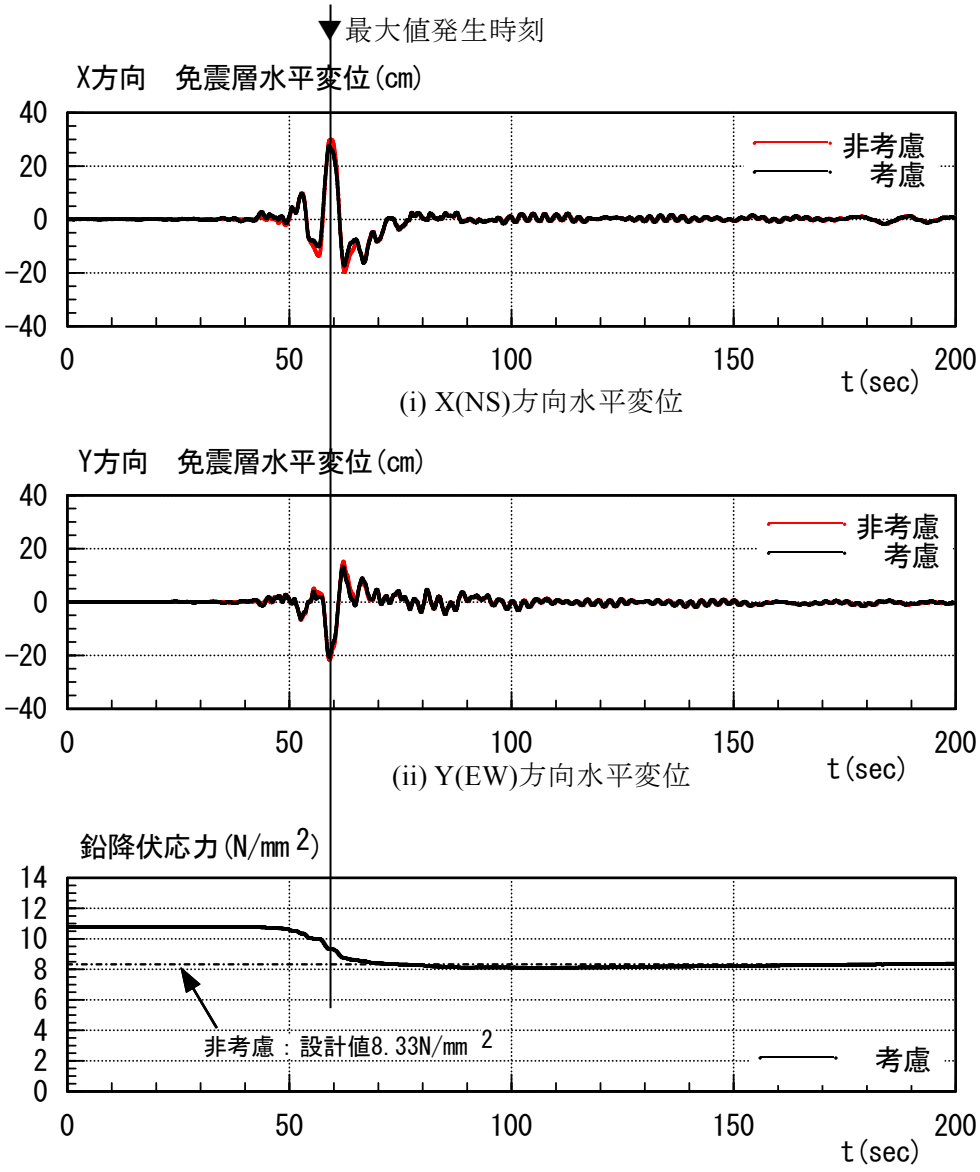
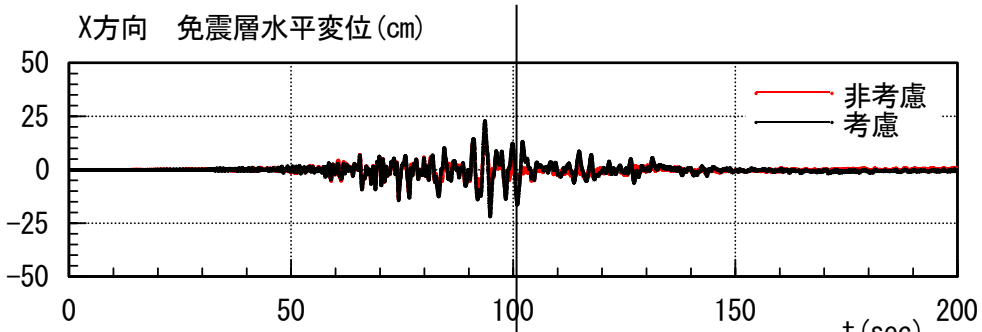
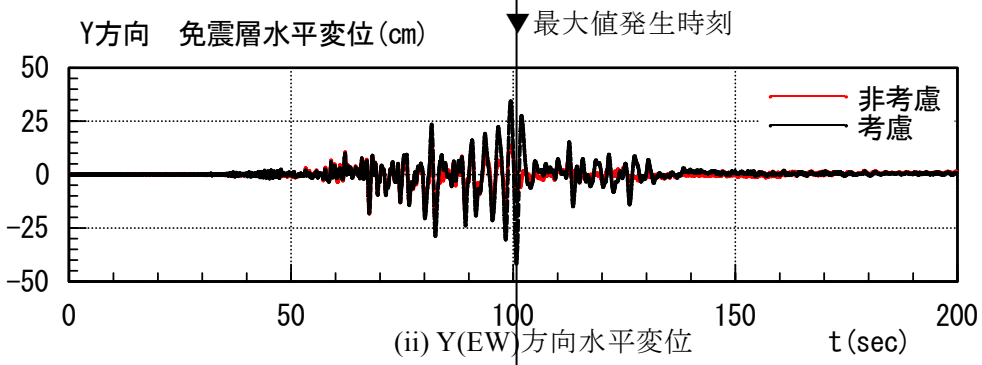


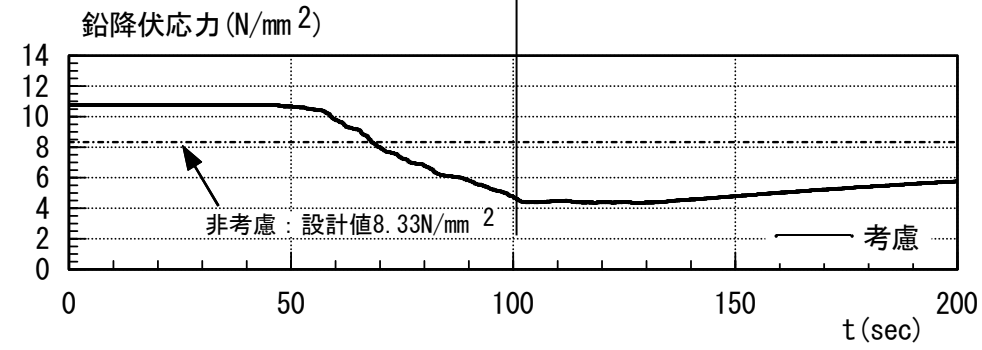
図 2.3.1-8(a)　2 方向入力時免震層水平変位、鉛降伏応力時刻歴（WAVE-Ts1）



(i) X(NS)方向水平変位



(ii) Y(EW)方向水平変位



(iii) 鉛降伏応力

図 2.3.1-8(b)　2 方向入力時免震層水平変位、鉛降伏応力時刻歴（WAVE-Tk）

地震動の 2 方向入力を考慮した場合には、入力エネルギーを大きく評価することになるため、免震材料におけるエネルギー吸収による温度上昇が大きくなり、特性変動が大きくなることが考えられる。このため、免震層における最大水平変位は温度上昇を考慮した場合には大きくなると考えられる。

今回の地震応答解析における評価では設定された入力地震動において、免震層の応答最大水平変位は温度上昇考慮時には非考慮時に比較して同等程度若しくは小さくなっている。場合が見られる。WAVE-Ts1 の場合を例にとると、図 2.3.1-7(a)に示すように免震層の最大水平変位が地震動の初期の部分で発生しており、その時には鉛の降伏応力が設計値より大きな値となっている。このため、温度上昇を考慮した場合に免震層の水平変位が非考慮の場合と比較して小さくなっていると考えられる。

一方、WAVE-Tk については地震動の入力エネルギーが大きいため鉛プラグ入り積層ゴムの温度上昇による影響が大きく、免震層の水平変位の最大値発生時刻においては鉛降伏応力が設計値を下回っている。このことから温度上昇考慮時に非考慮時と比較して免震層応答最大水平変位が大きくなっていると考えられる。免震層の応答最大水平変位は非考慮時に比較して考慮時には NS 方向（X 方向）で 1.66 倍、EW 方向（Y 方向）で 1.94 倍である。ただし、積層ゴムのせん断ひずみとしては最大で γ＝210％程度である。免震層の応答最大層せん断力係数についても温度上昇考慮時には非考慮時に比較して同等程度であるが、WAVE-Tk の場合に EW 方向（Y 方向）で 1.19 倍となっている。

(5) まとめ

免震材料として鉛プラグ入り積層ゴムを適用した免震建築物では、地震動の 1 方向入力時に地震動の入力倍率が 1.0 倍の場合に変位増大率は 0.94～1.18 倍である。T-TN-AIC003_AV 地震動の入力倍率 1.5 倍の場合に変位増大率が 1.38 倍となるケースがあるものの、積層ゴムのせん断ひずみはγ=100%（水平変位 20cm）以内である。

地震動の 2 方向入力時には免震層の応答最大水平変位は入力エネルギーが大きい WAVE-Tk の場合に温度上昇考慮時には非考慮時に比較して X（NS）方向で 1.65 倍、Y(EW)方向で 1.94 倍と大きくなっている。ただし、積層ゴムのせん断ひずみとしては最大でγ＝210%（水平変位 42cm）程度である。

その他の入力地震動においては免震層の応答最大水平変位は温度上昇考慮時に非考慮時と比較して同等程度若しくは小さくなっている。

今後、鉛プラグ入り積層ゴムについて実施された実験結果についての評価を実施し、鉛プラグの温度上昇に伴う降伏荷重の低下に代表される繰り返し加振時の特性変化について現状の評価方法の検証が必要と考えられる。また、免震材料及び免震建築物応答に及ぼす温度上昇の影響を簡易的に評価できる手法についての検討が望まれている。

参考文献

2.3.1-1) 竹中康雄ほか：大振幅繰返し変形を受ける積層ゴム支承の熱・力学的連成挙動に関する研究（その 9　熱伝導解析による実験結果のシミュレーション、その 10　鉛入り積層ゴムにおける鉛温度～降伏応力関係の提案、その 11　LRB の温度上昇を考慮した地震応答解析）、日本建築学会大会学術講演梗概集、2008.9.

2.3.2 高減衰ゴム系積層ゴム

(1) 各種依存性に関する既往の研究

(1.1) 技術資料による高減衰ゴム系積層ゴムの復元力特性

高減衰ゴム系積層ゴムの復元力特性は、以下の 3 つの特性値により決定する(図 2.3.2-1)[2.3.2-1)]。

・等価せん断弾性率 G_{eq} (等価せん断剛性 $K_{eq} = G_{eq}A / h_r$)

・等価減衰定数 $H_{eq} = \Delta W / (2\pi \cdot K_{eq} \cdot \delta_0{}^2)$

・降伏荷重特性係数 $u = Q_d / (K_{eq} \cdot \delta_0)$

(A: 積層ゴム断面積、h_r: ゴム層総厚)

上記 3 つの特性値により決まるバイリニア型の復元力特性に、せん断ひずみ依存性の修正係数を適用した修正バイリニアモデルが高減衰ゴム系積層ゴムの復元力特性の設計式として用いられている。表 2.3.2-1 に、メーカーの技術資料 [2.3.2-1)]によるせん断ひずみ依存性の修正係数を示す。

高減衰ゴム系積層ゴムの等価剛性 K_{eq}、および等価減衰定数 H_{eq} は、温度によって値が変化するため、多数回繰返し加振時の積層ゴムの発熱による温度上昇は、これらの特性値を変化させる。高減衰ゴム系積層ゴムの温度依存性の特性値の変化については、任意の温度状態における試験で得られた特性値を、基準温度 20℃における値へ補正するための補正係数の算出式が技術資料に示されている。式(2.3.2-1)に等価剛性の補正係数 β_k、式(2.3.2-2)に等価減衰定数の補正係数 β_h の算出式を示す(式中の係数は下表)。また、図 2.3.2-2 に温度補正式と実験結果の比較を示す。

$$\beta_k = \frac{1}{a + bT + cT^2 + dT^3} \tag{2.3.2-1}$$

$$\beta_h = \frac{1}{e + fT + gT^2 + hT^3} \tag{2.3.2-2}$$

T: 試験時温度

ゴム材料	a	b	c	d	e	f	g	h
X0.6R	1.21	-1.86×10^{-2}	5.99×10^{-4}	-8.99×10^{-6}	1.06	-4.13×10^{-3}	1.10×10^{-4}	-3.10×10^{-6}

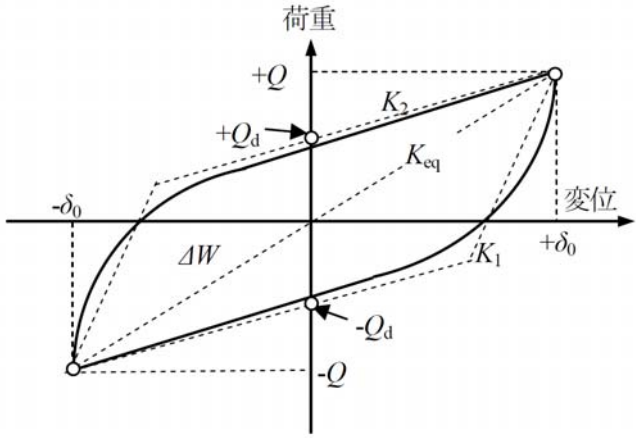
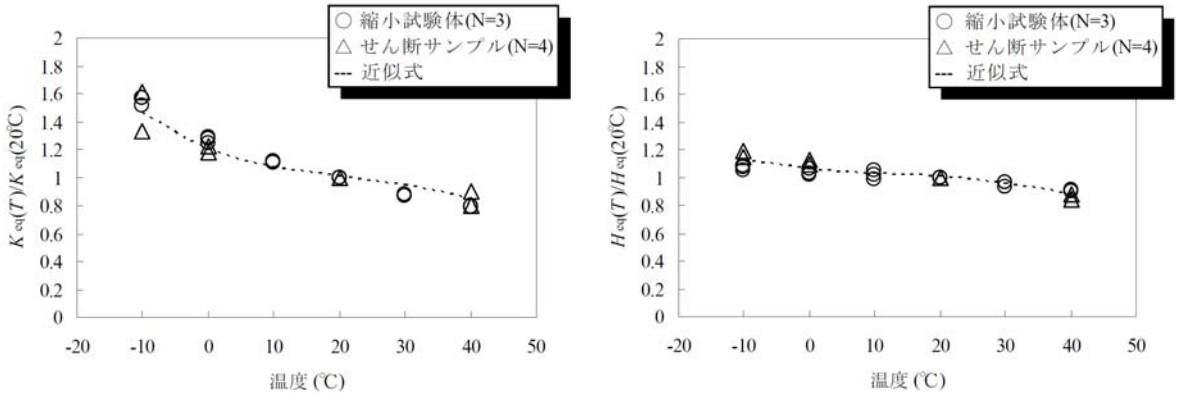


図 2.3.2-1 高減衰ゴム系積層ゴムの水平復元力特性

表 2.3.2-1 高減衰ゴム系積層ゴム(X0.6R)設計式 [2.3.2-1)]

ゴム材料呼称	代表特性値 (γ=100%)	各関数 (10%≦γ≦270%)
X0.6R	G_{eq}=0.620N/mm^2 H_{eq}=0.240	$G(\gamma)=G_0\times(2.855-3.878\gamma+2.903\gamma^2-1.016\gamma^3+0.1364\gamma^4)$ G_0=0.620、γ=1.0 におけるせん断弾性係数
		$H_{eq}(\gamma)=H_{eq\,0}\times(0.9150+0.2364\gamma-0.1804\gamma^2+0.02902\gamma^3)$ $H_{eq\,0}$=0.240、γ=1.0 における等価減衰定数
		$u(\gamma)=u_0\times(0.9028+0.2711\gamma-0.2083\gamma^2+0.03421\gamma^3)$ u_0=0.408、γ=1.0 における降伏荷重特性比



(a) 等価剛性 K_{eq}　　(b) 等価粘性減衰定数 H_{eq}

図 2.3.2-2 高減衰ゴム系積層ゴムの水平復元力特性値の温度依存性

(1.2) 高減衰ゴム系積層ゴムの多数回繰返し加振時の特性変化に関する既往の研究

高減衰ゴム系積層ゴムの繰返し加振時特性変化について、既往の研究[2.3.2-2), 2.3.2- 3)]では等価剛性 K_{eq} を累積履歴エネルギー吸収量 E/V の関数として評価する実験式(式(2.3.2-3)、式(2.3.2-4))が示されている。この時、等価減衰定数 H_{eq} および降伏荷重特性係数 u については、E/V による変化率は小さいとして一定としている。図 2.3.2-3 に、式(2.3.2-3)および式(2.3.2-4)のグラフを示す。

$$\frac{K_{eq}}{K_{eq0}} = -2.5 + 0.2e^{-(E/V)} + 3.4e^{-(E/1000V)} \tag{2.3.2-3}$$

$$\frac{K_{eq}}{K_{eq0}} = -2.56 + 0.18e^{-(E/2V)} + 3.36e^{-(E/3000V)} \tag{2.3.2-4}$$

(K_{eq0}: 等価剛性の初期値、E: 累積履歴エネルギー吸収量、V: ゴム体積)

平成 21 年度の基準整備事業「12 免震建築物の基準の整備に資する検討」[2.3.2-4)]においては、免震建物の地震応答解析結果より高減衰ゴム系積層ゴムによる履歴吸収エネルギーE を算出し、式(2.3.2-4)を用いて等価剛性の低下率を求めている。表 2.3.2-2 に、「12 免震建築物の基準の整備に資する検討」報告書より抜粋した地震応答解析結果による等価剛性の低下率を示す。表中の地震入力によって高減衰ゴム系積層ゴムの等価剛性が初期状態の 8 割程度に低下することが推察される。

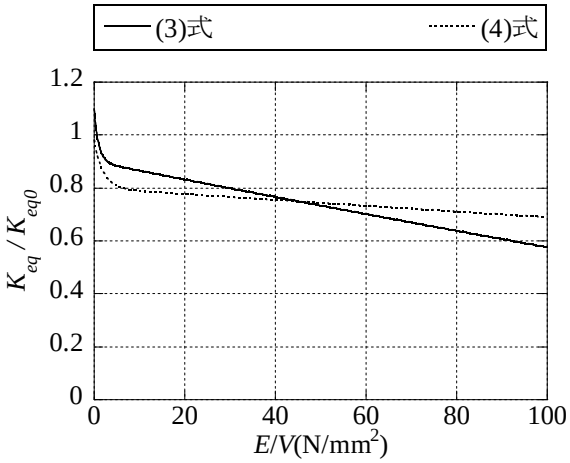


図 2.3.2-3　E/V と K_{eq}/K_{eq0} の関係

表 2.3.2-2 地震応答解析結果による等価剛性 K_{eq} の低下率[2.3.2-4)]

入力地震動	E (kNm)	δ_{max} (m)	E/V_r (N/mm^2)	$K_{eq}/{}_0K_{eq}$
N-OSKH02-AV	5.12×10^4	0.12	4.8	0.811
N-OSKH02-SD	1.46×10^5	0.22	13.8	0.784
T-TN-AIC003-AV	1.19×10^5	0.26	11.2	0.788
T-TN-AIC003-SD	2.66×10^5	0.41	25.2	0.772

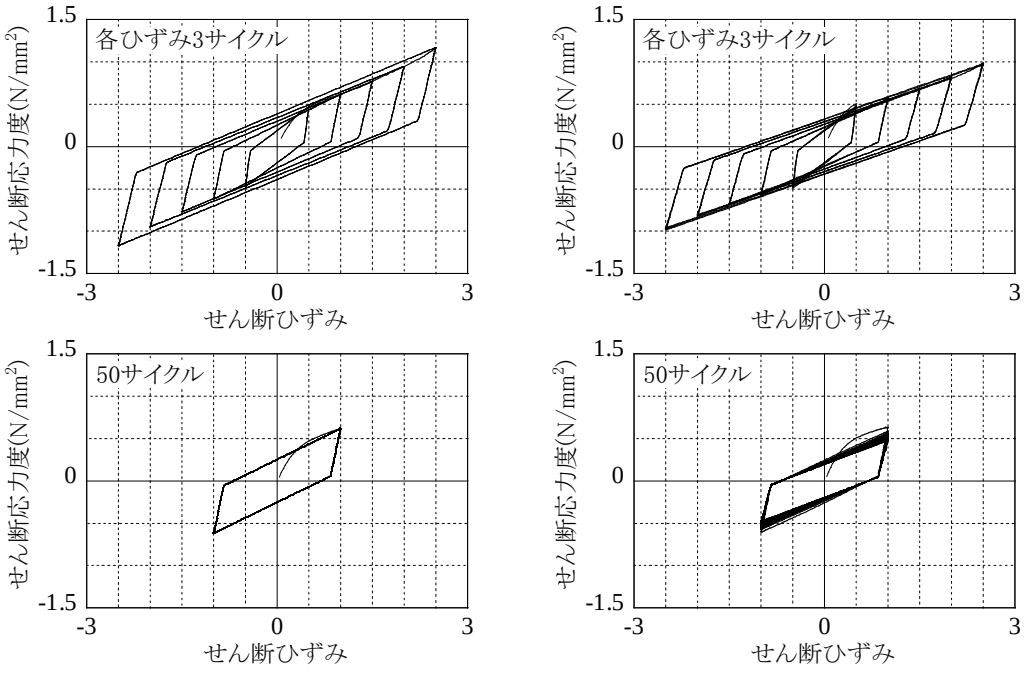
(2) 解析条件

(2.1) 高減衰ゴム系積層ゴムの復元力モデル

繰返し加振時の特性変化を考慮した解析モデルとして、単位ゴム体積当たりの累積履歴吸収エネルギーを指標とした等価剛性の評価式である式(2.3.2-3)を、修正バイリニアモデルによる高減衰ゴム系積層ゴム(X0.6R)の設計式(表 2.3.2-1)に取り入れた解析モデルを適用する。時時刻々の特性値変化を取り入れた解析方法は、以下①～④のようになる。

① 時刻歴応答解析の 1 ステップごとに履歴吸収エネルギーE を求める。
② 式(2.3.2-3)を用いて、等価剛性の低下率 C_e (=K_{eq} / K_{eq0})を求める。
③ K_{eq} =C_e ・K_{eq0} を用いて次ステップの応答計算を実施する。
④ ①～③を繰返し計算する。

図 2.3.2-4 に、表 2.3.2-1 に示す設計式による復元力モデル(設計式モデル)と、設計式に式(2.3.2-3)による等価剛性の低下を考慮した復元力モデル(剛性低下モデル)を比較して示す。設計式モデルは繰返し加振に関わらず一定の履歴ループを描くのに対し、剛性低下モデルは繰返し加振に伴い等価剛性が低下し、最大荷重が除々に小さくなっている。



(a) 設計式モデル　　(b) 剛性低下モデル

図 2.3.2-4 設計式モデルと剛性低下モデルの比較

(2.2) 解析モデル

解析モデルは、高減衰ゴム系積層ゴムのみで構成される免震層を有する 1 質点剛体モデルとする。図 2.3.2-5 に、解析モデル概念図を示す。せん断ひずみ 200%時の等価周期が 3.5 秒、4.0 秒(共通設定)、4.5 秒の 3 種類のモデルで検討を行う。表 2.3.2-3 に解析モデルの諸元を示す。免震層は 2 種地盤相当の JSSI 波により免震層変位が、せん断ひずみ 200%以下となるよう設定する。高減衰ゴム系積層ゴムの復元力特性として、図 2.3.2-4 に示す設計式モデル、剛性低下モデルの両方を用い、応答の違いを検討する。入力地震動は、表 2.3.2-4 に示す 4 波を 1.0 倍、1.25 倍、1.5 倍と係数倍して入力する。

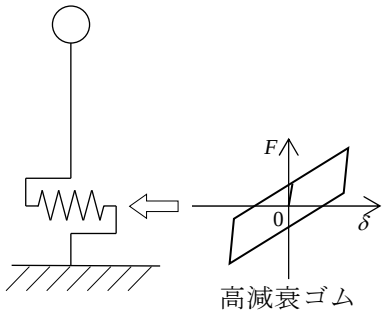


図 2.3.2-5　解析モデルイメージ

表 2.3.2-3　　高減衰ゴム系積層ゴム解析モデル

	免震周期 3.5 秒	免震周期 4.0 秒	免震周期 4.5 秒
想定建物	RC 造、10 階建て 基礎免震	RC 造、10 階建て 基礎免震	RC 造、12 階建て 基礎免震
上部構造重量	46,000kN	46,000kN	55,000kN
積層ゴム台数	12 台	12 台	12 台
積層ゴム直径(内径)	800mm (20mm)	700mm (15mm)	700mm (15mm)
ゴム層総厚	199.8mm	202.1mm	202.1mm
積層ゴム面圧	7.6 N/mm^2	10.0 N/mm^2	11.9 N/mm^2
γ=100%時等価周期	3.1 秒	3.6 秒	4.0 秒
γ=200%時等価周期	3.6 秒	4.1 秒	4.5 秒
JSSI 波による 免震層応答変位	400mm (γ=200%)以下	400mm (γ=200%)以下	400mm (γ=200%)以下

表 2.3.2-4　応答解析用入力地震動

入力地震動	最大加速度
N-OSKH02-AV	70.9Gal
T-TN-AIC003-AV	221.2Gal
T-TN-AIC004-AV	323.0Gal
T-TN-KGIN1F-AV	89.6Gal

(3) 解析結果

(3.1) 最大応答値

表 2.3.2-5～7 に、地震応答解析結果の最大応答値一覧を示す。応答値は質点加速度、免震層変位、せん断力係数であり、設計式モデルの結果と剛性低下モデルの結果を比較して示す。また、図 2.3.2-6 に、入力加速度と免震層変位、せん断力係数の最大応答値の関係を示す。

各入力地震動の 1.0 倍入力による設計式モデルの結果は、免震周期 3.5 秒、4.0 秒、4.5 秒の 3 種類のモデルとも免震層変位はせん断ひずみ 200%(約 400mm)以下となっている。1.0 倍入力で最も免震層変位が大きいのは、免震周期 4.5 秒モデルに T-TN-AIC003-AV を入力したケースで、281.0mm(γ=139%)である。免震周期 3.5 秒モデル、4.0 秒モデルについても T-TN-AIC003-AV を入力したケースが最も大きな応答値を示している。入力地震動を 1.25 倍、1.5 倍と係数倍して入力すると応答値も大きくなっていくが、免震層変位が設計式モデルでγ=200%を超えるケースは、免震周期 4.0 秒モデルに T-TN-AIC003-AV の 1.5 倍を入力したケース、免震周期 4.5 秒モデルに N-OSKH02-AV の 1.5 倍を入力したケース、および免震周期 4.5 秒モデルに T-TN-AIC003-AV の 1.5 倍を入力したケースの 3 ケースである。また、せん断力係数については地震動を係数倍入力したケースも含め、ほとんどのケースで 0.1 よりも小さい値となっている。設計式モデルにおいてせん断力係数が 0.1 以上となっているのは、免震周期 3.5 秒モデルに T-TN-AIC003-AV の 1.25 倍、1.5 倍を入力したケース、および免震周期 4.0 秒モデルに T-TN-AIC003-AV の 1.5 倍を入力したケースの 3 ケースである。

設計式モデルと剛性低下モデルの応答値を比較すると、ほとんどのケースで剛性低下モデルの方が大きな免震層変位を示しており、設計式モデルよりも 10～20%程度免震層変位が大きい。N-OSKH02-AV を入力したケースにおいて、設計式モデルと剛性低下モデルによる免震層変位の差が明確に現れており、剛性低下モデルの方が設計式モデルよりも 70%程度大きな値となるケースもある。せん断力係数については、ほとんどのケースにおいて剛性低下モデルは設計式モデルに対して 5～10%程度小さな値を示している。ただし、剛性低下モデルの免震層変位が設計式モデルに対して 70%程度と非常に大きくなるケースでは、剛性低下モデルの方が設計式モデルよりも 10%程度大きなせん断力係数を示している。

図 2.3.2-6 に示す入力加速度と最大応答値の関係を見ると、設計式モデルは入力地震動の加速度の倍率を上げると、それに対応してほぼ一定の割合で応答値も増加しているが、剛性低下モデルは免震周期 3.5 秒モデルに N-OSKH02-AV を入力したケースや、免震周期 4.5 秒モデルに T-TN-KGIN1F-AV を入力したケースのように、入力倍率の増加に対し応答値が急激に跳ね上がるケースが見られ、この場合設計式モデルの応答値との差が大きくなっている。

表 2.3.2-5 免震周期 3.5 秒モデルの最大応答値一覧

入力			応答					
地震波	倍率	加速度 (Gal)	質点加速度(Gal)		免震層変位(mm)		せん断力係数	
			設計式	剛性低下	設計式	剛性低下	設計式	剛性低下
N-OSKH02-AV	1.00	70.90	66.61	60.38 (0.91)	125.1	122.5 (0.98)	0.068	0.062 (0.91)
	1.25	88.63	72.06	63.47 (0.88)	154.2	149.5 (0.97)	0.074	0.065 (0.88)
	1.50	106.35	75.42	85.82 (1.14)	174.4	297.2 (1.70)	0.077	0.088 (1.14)
T-TN-AIC003-AV	1.00	221.20	82.86	77.13 (0.93)	218.2	244.8 (1.12)	0.085	0.079 (0.93)
	1.25	276.50	98.80	93.05 (0.94)	297.5	334.6 (1.12)	0.101	0.095 (0.94)
	1.50	331.80	119.37	106.03 (0.89)	388.6	402.0 (1.03)	0.122	0.108 (0.89)
T-TN-AIC004-AV	1.00	323.00	62.93	60.83 (0.97)	108.7	120.7 (1.11)	0.064	0.062 (0.97)
	1.25	403.75	72.98	66.47 (0.91)	159.6	163.1 (1.02)	0.074	0.068 (0.91)
	1.50	484.50	78.69	70.24 (0.89)	194.1	188.9 (0.97)	0.080	0.072 (0.89)
T-TN-KGIN1F-AV	1.00	89.60	49.57	48.74 (0.98)	67.9	67.7 (1.00)	0.051	0.050 (0.98)
	1.25	112.00	60.76	60.05 (0.99)	100.3	109.1 (1.09)	0.062	0.061 (0.99)
	1.50	134.40	68.42	65.83 (0.96)	134.0	149.7 (1.12)	0.070	0.067 (0.96)

※(　)内の数字は、剛性低下モデルの値を設計式モデルの値で除した値。

表 2.3.2-6 免震周期 4.0 秒モデルの最大応答値一覧

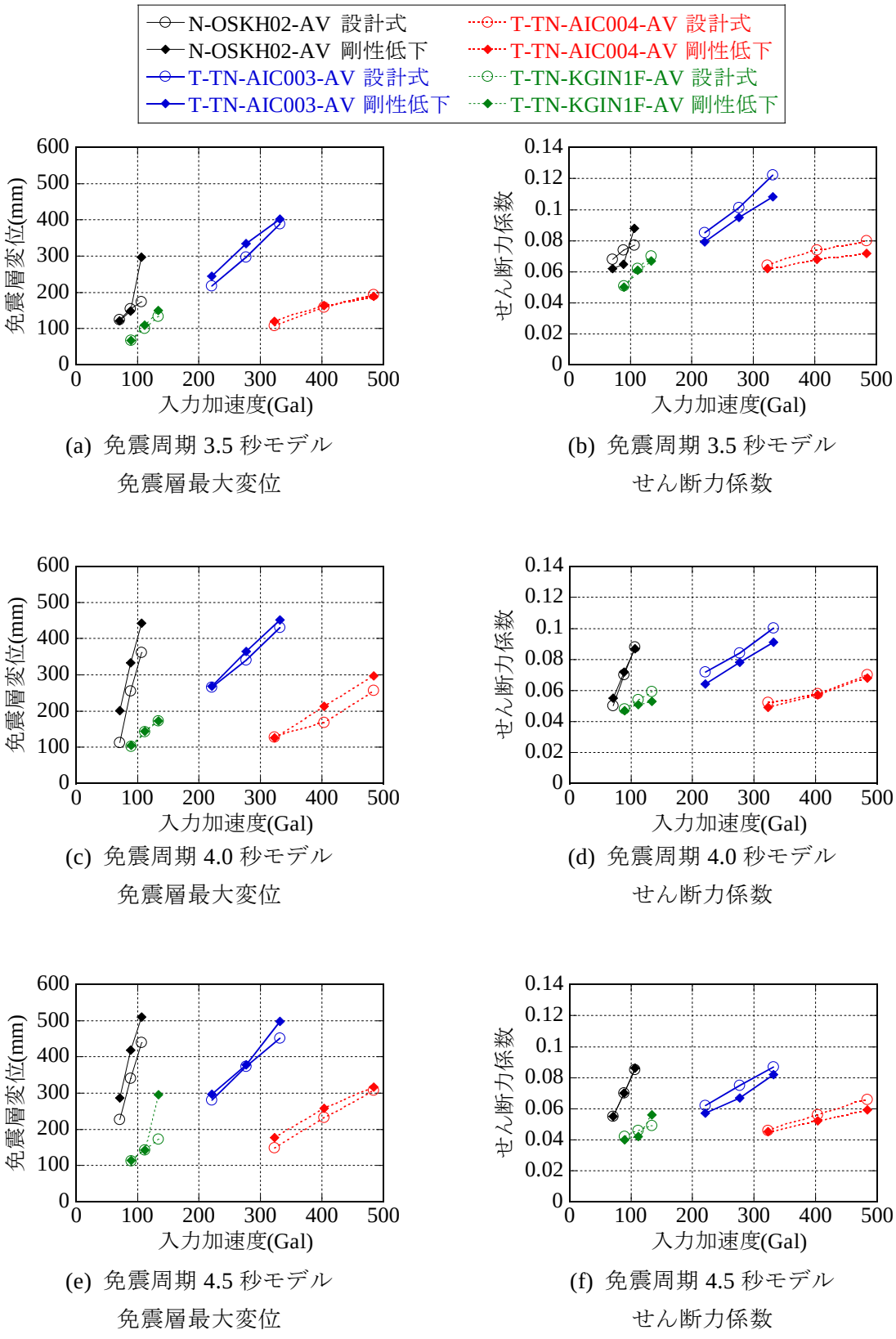
入力			応答					
地震波	倍率	加速度 (Gal)	質点加速度(Gal)		免震層変位(mm)		せん断力係数	
			設計式	剛性低下	設計式	剛性低下	設計式	剛性低下
N-OSKH02-AV	1.00	70.90	48.83	53.78 (1.10)	113.4	201.0 (1.77)	0.050	0.055 (1.10)
	1.25	88.63	68.40	70.41 (1.03)	255.4	333.4 (1.31)	0.070	0.072 (1.03)
	1.50	106.35	85.98	85.33 (0.99)	361.6	442.0 (1.22)	0.088	0.087 (0.99)
T-TN-AIC003-AV	1.00	221.20	70.10	62.68 (0.89)	266.5	269.2 (1.01)	0.072	0.064 (0.89)
	1.25	276.50	82.27	76.22 (0.93)	340.0	364.9 (1.07)	0.084	0.078 (0.93)
	1.50	331.80	98.21	89.19 (0.91)	431.5	451.2 (1.05)	0.100	0.091 (0.91)
T-TN-AIC004-AV	1.00	323.00	51.23	47.76 (0.93)	127.9	125.6 (0.98)	0.052	0.049 (0.93)
	1.25	403.75	56.77	55.66 (0.98)	168.5	213.0 (1.26)	0.058	0.057 (0.98)
	1.50	484.50	68.49	66.24 (0.97)	256.0	296.6 (1.16)	0.070	0.068 (0.97)
T-TN-KGIN1F-AV	1.00	89.60	46.74	45.63 (0.98)	102.8	104.8 (1.02)	0.048	0.047 (0.98)
	1.25	112.00	53.39	49.97 (0.94)	142.6	144.7 (1.01)	0.054	0.051 (0.94)
	1.50	134.40	57.39	52.34 (0.91)	173.4	173.4 (1.00)	0.059	0.053 (0.91)

※(　)内の数字は、剛性低下モデルの値を設計式モデルの値で除した値。

表 2.3.2-7 免震周期 4.5 秒モデルの最大応答値一覧

入力			応答					
地震波	倍率	加速度 (Gal)	質点加速度(Gal)		免震層変位(mm)		せん断力係数	
			設計式	剛性低下	設計式	剛性低下	設計式	剛性低下
N-OSKH02-AV	1.00	70.90	53.78	53.65 (1.00)	227.0	286.6 (1.26)	0.055	0.055 (1.00)
	1.25	88.63	68.86	68.66 (1.00)	340.3	417.9 (1.23)	0.070	0.070 (1.00)
	1.50	106.35	83.34	84.15 (1.01)	439.1	509.9 (1.16)	0.085	0.086 (1.01)
T-TN-AIC003-AV	1.00	221.20	60.54	55.79 (0.92)	281.0	297.8 (1.06)	0.062	0.057 (0.92)
	1.25	276.50	73.53	65.48 (0.89)	372.9	378.8 (1.02)	0.075	0.067 (0.89)
	1.50	331.80	85.33	80.81 (0.95)	451.2	498.3 (1.10)	0.087	0.082 (0.95)
T-TN-AIC004-AV	1.00	323.00	45.28	43.68 (0.96)	148.2	177.1 (1.19)	0.046	0.045 (0.96)
	1.25	403.75	54.51	51.18 (0.94)	233.2	257.6 (1.10)	0.056	0.052 (0.94)
	1.50	484.50	64.29	57.83 (0.90)	308.2	316.7 (1.03)	0.066	0.059 (0.90)
T-TN-KGIN1F-AV	1.00	89.60	40.72	39.03 (0.96)	112.9	113.8 (1.01)	0.042	0.040 (0.96)
	1.25	112.00	44.62	41.50 (0.93)	142.4	143.5 (1.01)	0.046	0.042 (0.93)
	1.50	134.40	47.90	54.87 (1.15)	172.5	295.8 (1.71)	0.049	0.056 (1.15)

※(　)内の数字は、剛性低下モデルの値を設計式モデルの値で除した値。



(a) 免震周期 3.5 秒モデル
免震層最大変位

(b) 免震周期 3.5 秒モデル
せん断力係数

(c) 免震周期 4.0 秒モデル
免震層最大変位

(d) 免震周期 4.0 秒モデル
せん断力係数

(e) 免震周期 4.5 秒モデル
免震層最大変位

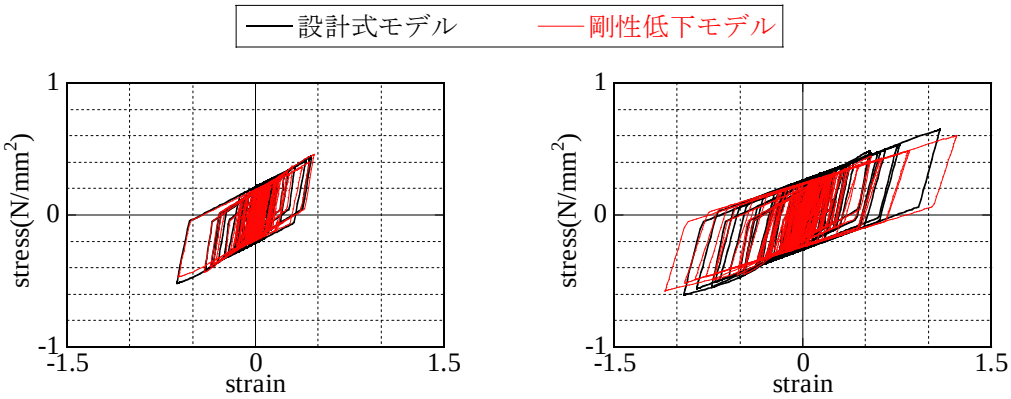
(f) 免震周期 4.5 秒モデル
せん断力係数

図 2.3.2-6 入力加速度と最大応答値の関係

(3.2) せん断ひずみ応力度関係

図 2.3.2-7～12 に、各入力地震動の 1.0 倍および 1.5 倍入力時の高減衰ゴム系積層ゴムのせん断ひずみ応力度関係を示す。設計式モデルによる解析結果と剛性低下モデルによる解析結果を重ねて示す。最大せん断ひずみが 50%程度のケースでは、設計式モデルと剛性低下モデルの履歴ループはほぼ重なっているが、50%よりも大きなせん断ひずみを生じるケースでは、剛性低下モデルの履歴ループに等価剛性の低下と変位の増大が明確に現れている。N-OSKH02-AV を入力したケースは、等価剛性が低下することで大きく変位が増大している。これに対し、T-TN-AIC003-AV を入力したケースは、履歴ループに剛性低下が明確に現れているが、変位の増大はそれほど大きくない。

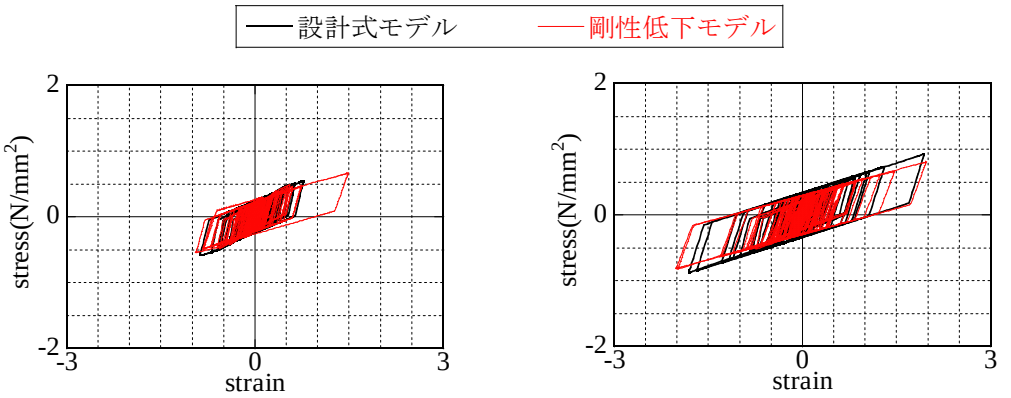
図 2.3.2-13～15 に、剛性低下モデルの解析結果における免震層の累積履歴吸収エネルギーを積層ゴムのゴム体積で除した E/V と、剛性低下モデルにおける等価剛性の初期値に対する低下率(K_{eq}/K_{eq0})の関係を示す。剛性低下モデルは、等価剛性の低下率を E/V の関数で評価する式(2.3.2-3)を適用しているので、グラフ中に実線で示す式(2.3.2-3)の曲線に沿って等価剛性が低下していく。免震周期 3.5 秒、4.0 秒のモデルは T-TN-AIC003-AV 入力時に E/V が最も大きく、1.5 倍入力において免震周期 3.5 秒モデルでは約 20N/mm^2、免震周期 4.0 秒モデルでは約 22N/mm^2 となっている。免震周期 4.5 秒モデルでは、N-OSKH02-AV 入力時が最も E/V が大きく、1.5 倍入力時に約 24N/mm^2 となっている。各ケースにおいて等価剛性は E/V に応じて低下し、初期値に対して 90～80%程度まで低下している。今回検討したケースでは、等価剛性が初期値の 80%より小さくなるケースはなかった。



(a) N-OSKH02-AV 入力　　(b) T-TN-AIC003-AV 入力

(c) T-TN-AIC004-AV 入力　　(d) T-TN-KGIN1F-AV 入力

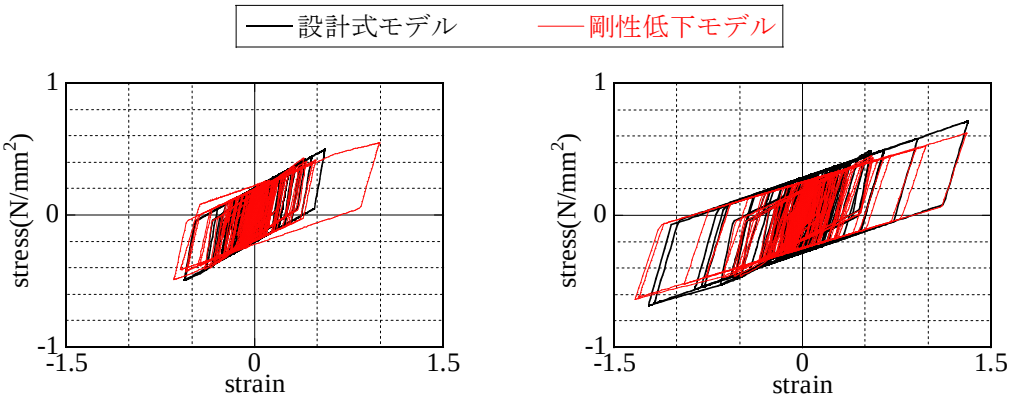
図 2.3.2-7 免震周期 3.5 秒モデル、入力地震動 1.0 倍入力



(a) N-OSKH02-AV 入力　　(b) T-TN-AIC003-AV 入力

(c) T-TN-AIC004-AV 入力　　(d) T-TN-KGIN1F-AV 入力

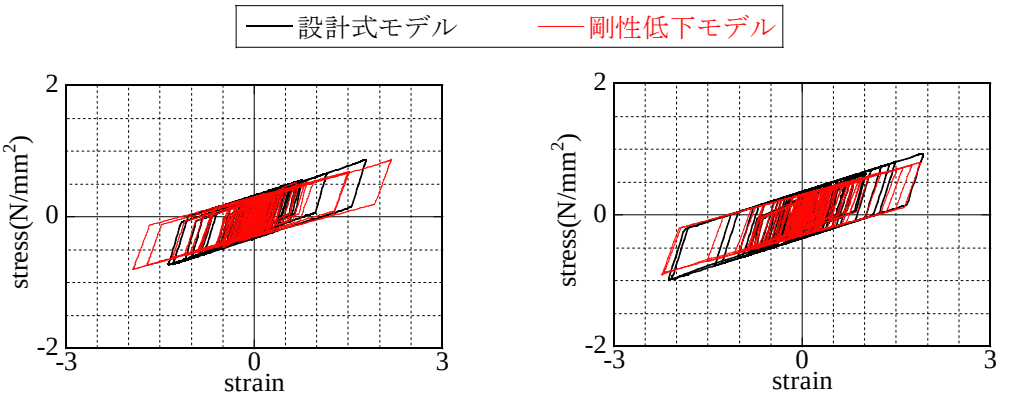
図 2.3.2-8 免震周期 3.5 秒モデル、入力地震動 1.5 倍入力



(a) N-OSKH02-AV 入力　　(b) T-TN-AIC003-AV 入力

(c) T-TN-AIC004-AV 入力　　(d) T-TN-KGIN1F-AV 入力

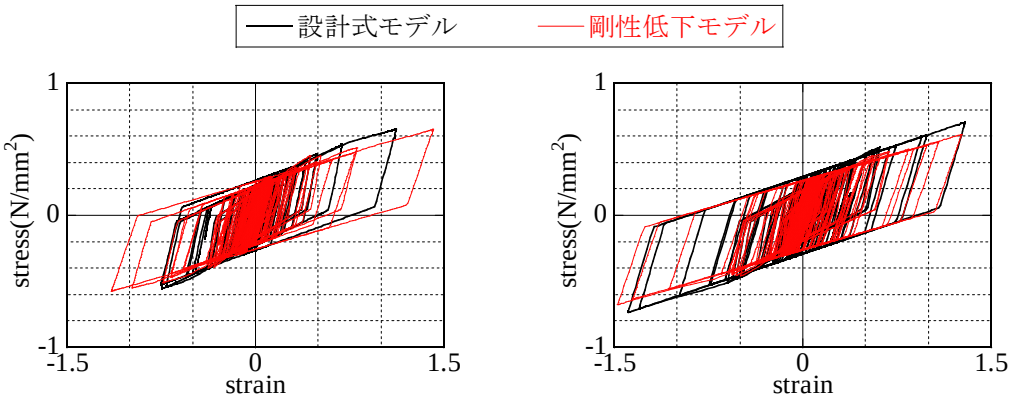
図 2.3.2-9 免震周期 4.0 秒モデル、入力地震動 1.0 倍入力



(a) N-OSKH02-AV 入力　　(b) T-TN-AIC003-AV 入力

(c) T-TN-AIC004-AV 入力　　(d) T-TN-KGIN1F-AV 入力

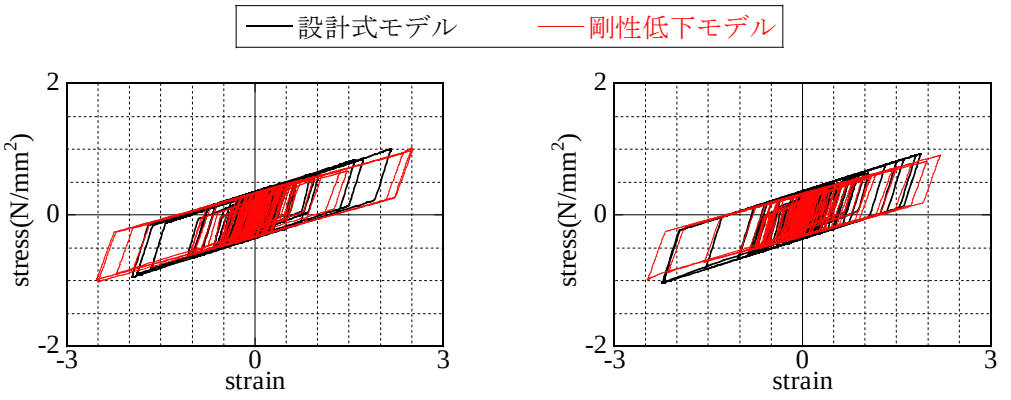
図 2.3.2-10 免震周期 4.0 秒モデル、入力地震動 1.5 倍入力



(a) N-OSKH02-AV 入力　　(b) T-TN-AIC003-AV 入力

(c) T-TN-AIC004-AV 入力　　(d) T-TN-KGIN1F-AV 入力

図 2.3.2-11 免震周期 4.5 秒モデル、入力地震動 1.0 倍入力



(a) N-OSKH02-AV 入力　　(b) T-TN-AIC003-AV 入力

(c) T-TN-AIC004-AV 入力　　(d) T-TN-KGIN1F-AV 入力

図 2.3.2-12 免震周期 4.5 秒モデル、入力地震動 1.5 倍入力

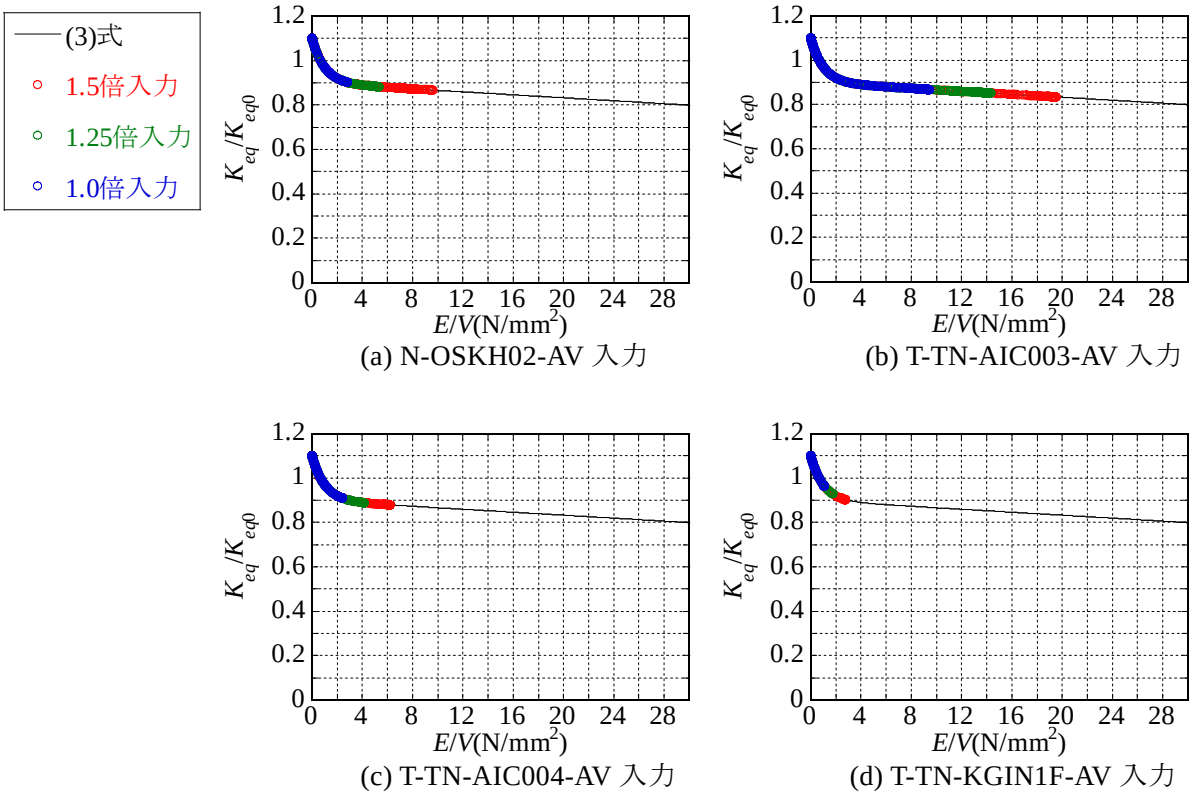


図 2.3.2-13 免震周期 3.5 秒モデル累積履歴吸収エネルギーと等価剛性の低下率

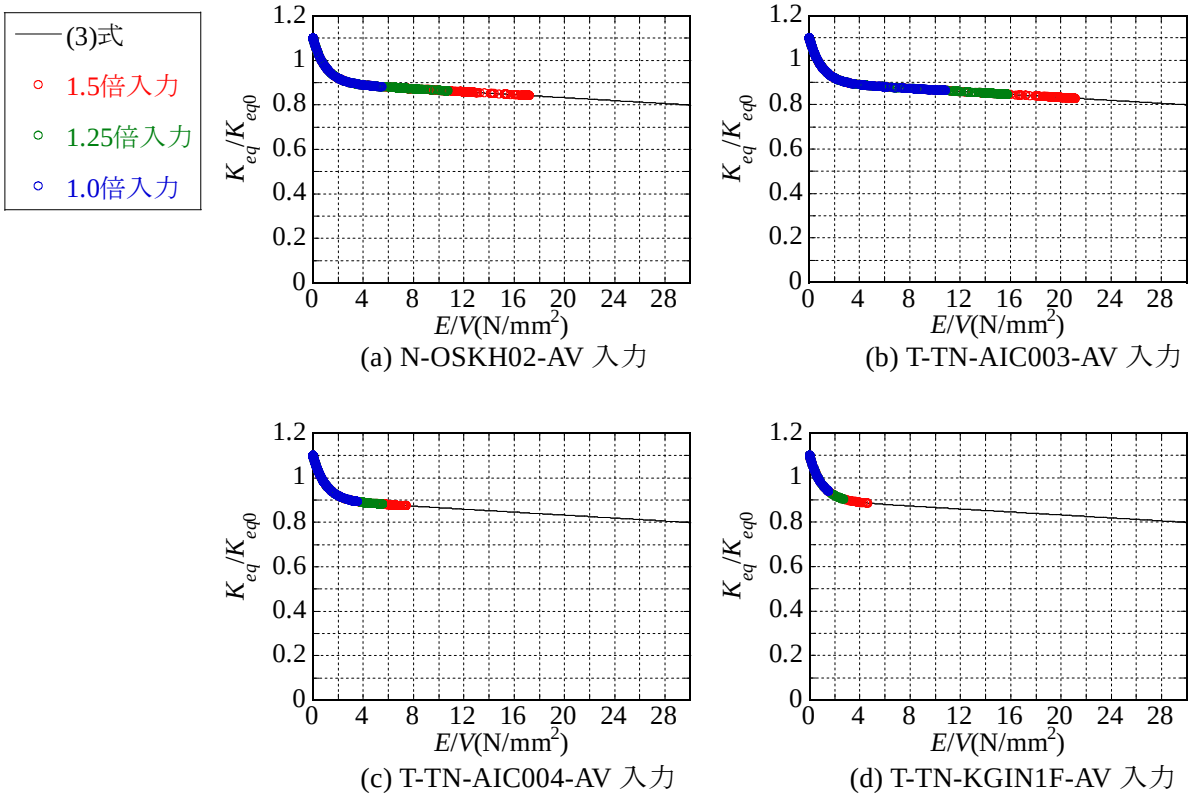
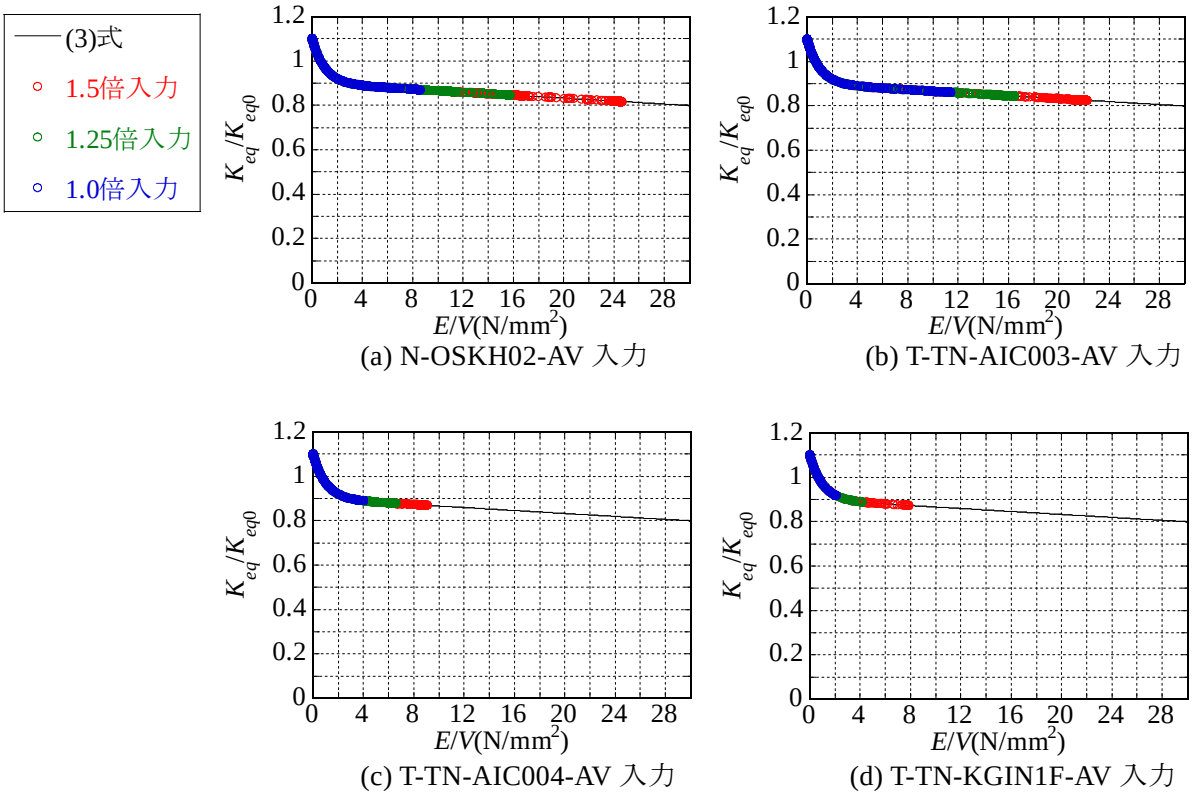


図 2.3.2-14 免震周期 4.0 秒モデル累積履歴吸収エネルギーと等価剛性の低下率



(a) N-OSKH02-AV 入力　(b) T-TN-AIC003-AV 入力

(c) T-TN-AIC004-AV 入力　(d) T-TN-KGIN1F-AV 入力

図 2.3.2-15 免震周期 4.5 秒モデル累積履歴吸収エネルギーと等価剛性の低下率

(3.3) 累積変形量、累積履歴吸収エネルギー

表 2.3.2-8～10 に、解析結果の累積変形量および累積履歴吸収エネルギー量の値の一覧を示す。履歴吸収エネルギーは、エネルギーを積層ゴムのゴム体積で除した E/V、および等価速度 V_E で示している。また、累積変形量は、履歴吸収エネルギーが全入力エネルギーの 95%に達した時点の値としている。

各解析モデルにおいて、累積変形量、累積履歴吸収エネルギーとも T-TN-AIC003-AV を入力したケースが最も大きく、1.0 倍入力において累積変形量はおよそ 11～13m、累積履歴吸収エネルギー量は、等価速度でおよそ 2.0～2.2m/sec である。他の地震動を入力したケースでは、1.0 倍入力では累積変形量は 10m 以下、累積履歴吸収エネルギーは 2.0m/sec 以下となっている。地震動の入力倍率を上げると累積値もそれに伴い増加し、免震周期 4.5 秒モデルに T-TN-AIC003-AV の 1.5 倍を入力したケースが最も累積変形量が大きく 20.9m。また、免震周期 3.5 秒モデルに T-TN-AIC003-AV の 1.5 倍を入力したケースが最も累積 V_E が大きく、3.19m/sec である。

設計式モデルと剛性低下モデルの結果を比較すると、累積変形量においては剛性低下モデルの結果が設計式モデルよりも 10～20%大きな値を示している。累積履歴吸収エネルギー量においては、T-TN-AIC003-AV を入力したケースのみ、剛性低下モデルの方が設計式モデルよりも小さな値を示しているが、他の地震動を入力したケースでは剛性低下モデルの方が設計式モデルより 10～20%程度大きな値を示している。

図 2.3.2-16～27 に、解析結果の免震層の累積変形量と累積履歴吸収エネルギーの時刻歴推移を示す。累積変形量は、履歴吸収エネルギー量が全入力エネルギーの 95%に達した時点の値で頭打ちとして描いている。また、履歴吸収エネルギーは等価速度 V_E で表す。累積履歴吸収エネルギーは主要動部で値が増加した後はほぼ一定となっており、N-OSKH02-AV、T-TN-KGIN1F-AV 入力のケースは 250 秒以降、T-TN-AIC003-AV、T-TN-AIC004-AV 入力のケースは 200 秒以降ほとんどエネルギーを吸収していない。また、履歴吸収エネルギーの増加傾向としては、N-OSKH02-AV、T-TN-KGIN1F-AV 入力のケースでは、階段状に値が増加していき、T-TN-AIC003-AV、T-TN-AIC004-AV 入力のケースでは比較的滑らかに値が上昇している。設計式モデルと剛性低下モデルの累積履歴吸収エネルギーの時刻歴推移は、ほぼ同じ傾向で一致している。

表 2.3.2-8 免震周期 3.5 秒モデルの累積値一覧

入力			応答					
地震波	倍率	加速度 (Gal)	累積変形量(m)		累積 E/V(N/mm^2)		累積 V_E(m/sec)	
			設計式	剛性低下	設計式	剛性低下	設計式	剛性低下
N-OSKH02-AV	1.00	70.90	5.46	6.02 (1.10)	2.73	2.83 (1.04)	1.18	1.21 (1.02)
	1.25	88.63	7.79	8.61 (1.11)	4.54	2.3.2 (1.17)	1.53	1.65 (1.08)
	1.50	106.35	10.59	12.77 (1.21)	7.65	9.57 (1.25)	1.98	2.22 (1.12)
T-TN-AIC003-AV	1.00	221.20	11.67	12.40 (1.06)	9.41	9.42 (1.00)	2.20	2.20 (1.00)
	1.25	276.50	15.17	16.52 (1.09)	14.26	14.32 (1.00)	2.71	2.71 (1.00)
	1.50	331.80	18.13	19.87 (1.10)	19.88	19.48 (0.98)	3.19	3.16 (0.99)
T-TN-AIC004-AV	1.00	323.00	4.90	5.53 (1.13)	2.11	2.38 (1.13)	1.04	1.10 (1.06)
	1.25	403.75	7.13	7.50 (1.05)	3.79	4.14 (1.09)	1.39	1.46 (1.05)
	1.50	484.50	8.83	9.31 (1.05)	5.89	6.21 (1.06)	1.74	1.79 (1.03)
T-TN-KGIN1F-AV	1.00	89.60	3.55	3.99 (1.12)	1.06	1.09 (1.03)	0.74	0.75 (1.01)
	1.25	112.00	3.75	4.13 (1.10)	1.64	1.75 (1.06)	0.92	0.95 (1.03)
	1.50	134.40	5.19	6.01 (1.16)	2.55	2.74 (1.07)	1.14	1.18 (1.03)

※(　)内の数字は、剛性低下モデルの値を設計式モデルの値で除した値。

表 2.3.2-9 免震周期 4.0 秒モデルの累積値一覧

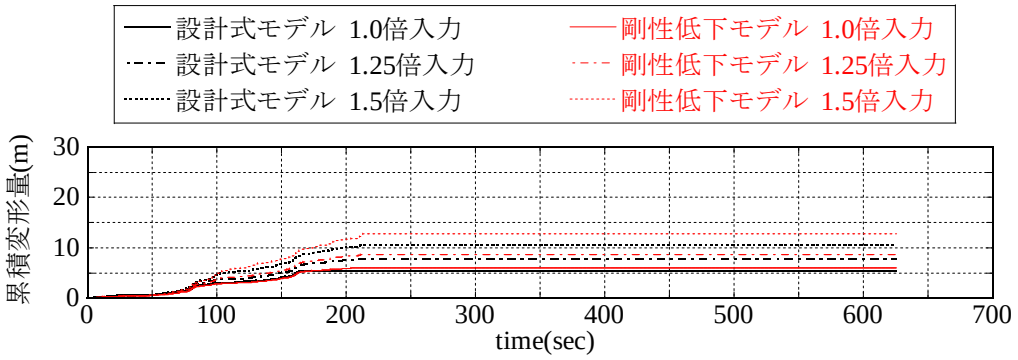
入力			応答					
地震波	倍率	加速度	累積変形量(m)		累積 E/V(N/mm^2)		累積 V_E(m/sec)	
		(Gal)	設計式	剛性低下	設計式	剛性低下	設計式	剛性低下
N-OSKH02-AV	1.00	70.90	7.63	8.88 (1.16)	4.53	5.47 (1.21)	1.34	1.47 (1.10)
	1.25	88.63	11.30	13.45 (1.19)	8.83	10.70 (1.21)	1.87	2.06 (1.10)
	1.50	106.35	15.17	18.26 (1.20)	14.21	17.14 (1.21)	2.38	2.61 (1.10)
T-TN-AIC003-AV	1.00	221.20	13.08	13.46 (1.03)	11.36	10.80 (0.95)	2.13	2.07 (0.97)
	1.25	276.50	16.61	16.81 (1.01)	16.93	15.73 (0.93)	2.59	2.50 (0.96)
	1.50	331.80	20.74	20.62 (0.99)	23.35	21.17 (0.91)	3.05	2.90 (0.95)
T-TN-AIC004-AV	1.00	323.00	6.12	6.41 (1.05)	3.24	3.48 (1.07)	1.14	1.18 (1.04)
	1.25	403.75	8.19	8.55 (1.04)	5.25	5.50 (1.05)	1.44	1.48 (1.02)
	1.50	484.50	9.94	10.33 (1.04)	7.76	7.40 (0.95)	1.76	1.71 (0.98)
T-TN-KGIN1F-AV	1.00	89.60	3.56	4.50 (1.26)	1.42	1.50 (1.06)	0.75	0.77 (1.03)
	1.25	112.00	5.61	5.87 (1.05)	2.52	2.72 (1.08)	1.00	1.04 (1.04)
	1.50	134.40	7.19	8.03 (1.12)	3.90	4.64 (1.19)	1.25	1.36 (1.09)

※(　)内の数字は、剛性低下モデルの値を設計式モデルの値で除した値。

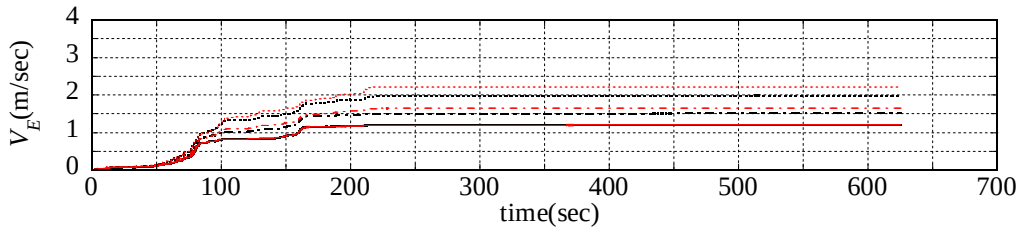
表 2.3.2-10 免震周期 4.5 秒モデルの累積値一覧

入力			応答					
地震波	倍率	加速度	累積変形量(m)		累積 E/V(N/mm^2)		累積 V_E(m/sec)	
		(Gal)	設計式	剛性低下	設計式	剛性低下	設計式	剛性低下
N-OSKH02-AV	1.00	70.90	9.94	11.74 (1.18)	7.10	8.62 (1.21)	1.54	1.69 (1.10)
	1.25	88.63	14.06	16.73 (1.19)	12.94	15.74 (1.22)	2.07	2.29 (1.10)
	1.50	106.35	18.73	21.82 (1.17)	20.86	24.61 (1.18)	2.63	2.86 (1.09)
T-TN-AIC003-AV	1.00	221.20	13.33	13.51 (1.01)	12.24	11.37 (0.93)	2.02	1.94 (0.96)
	1.25	276.50	17.28	17.13 (0.99)	18.08	16.45 (0.91)	2.45	2.34 (0.95)
	1.50	331.80	20.90	21.02 (1.01)	24.40	22.21 (0.91)	2.85	2.72 (0.95)
T-TN-AIC004-AV	1.00	323.00	6.60	6.87 (1.04)	4.02	3.96 (0.98)	1.16	1.15 (0.99)
	1.25	403.75	8.40	16.54 (1.97)	5.98	6.55 (1.10)	1.41	1.48 (1.05)
	1.50	484.50	10.42	11.52 (1.11)	8.57	9.05 (1.06)	1.69	1.73 (1.03)
T-TN-KGIN1F-AV	1.00	89.60	4.61	4.86 (1.05)	1.91	2.07 (1.08)	0.80	0.83 (1.04)
	1.25	112.00	6.47	7.24 (1.12)	3.47	4.12 (1.19)	1.07	1.17 (1.09)
	1.50	134.40	8.90	10.69 (1.20)	5.93	7.83 (1.32)	1.40	1.61 (1.15)

※(　)内の数字は、剛性低下モデルの値を設計式モデルの値で除した値。

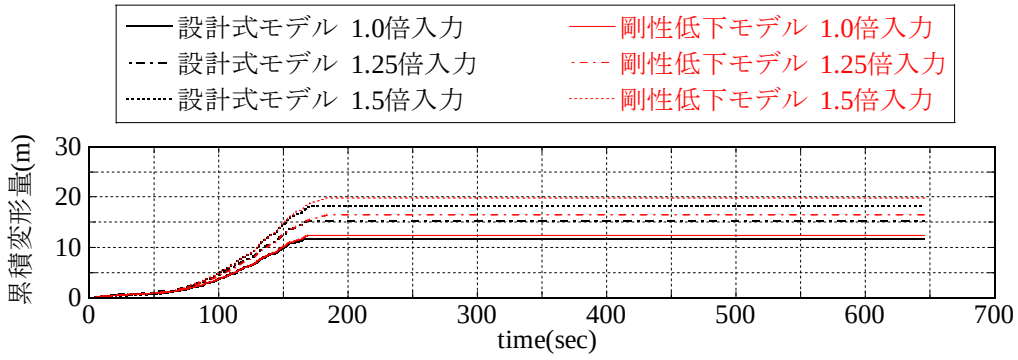


(a) 累積変形量

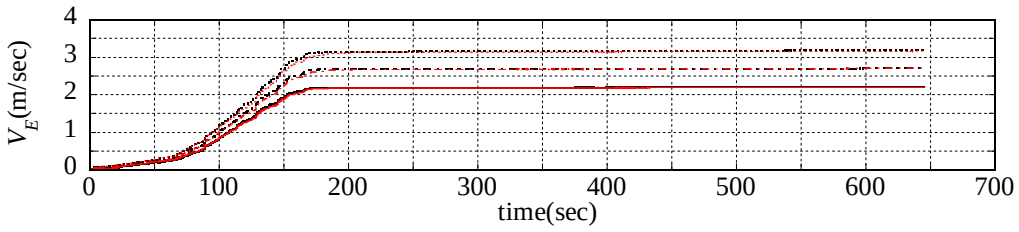


(b) 累積履歴吸収エネルギー等価速度

図 2.3.2-16 免震周期 3.5 秒モデル、N-OSKH02-AV 入力時の累積値

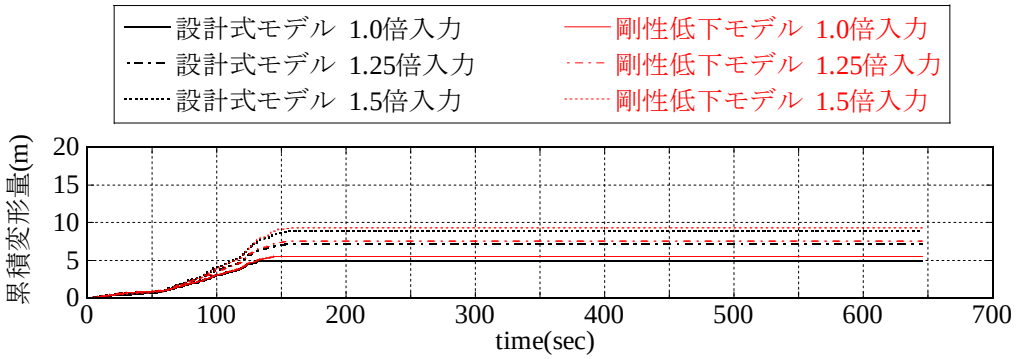


(a) 累積変形量

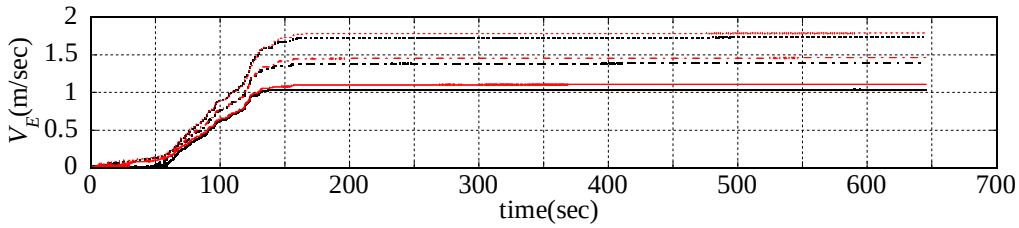


(b) 累積履歴吸収エネルギー等価速度

図 2.3.2-17 免震周期 3.5 秒モデル、T-TN-AIC003-AV 入力時の累積値

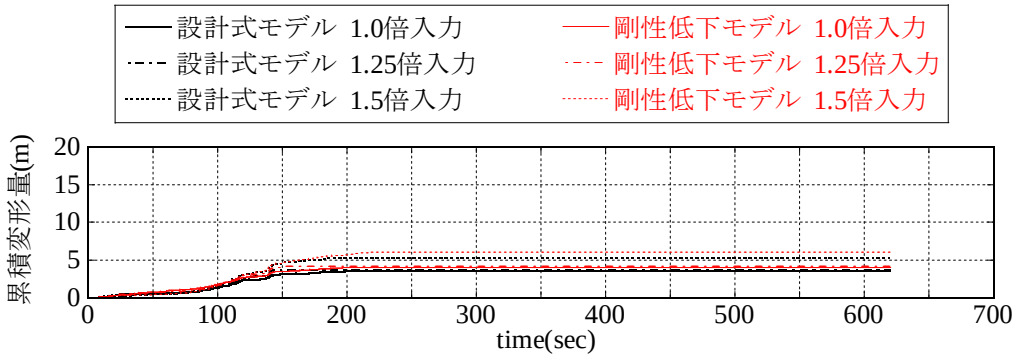


(a) 累積変形量

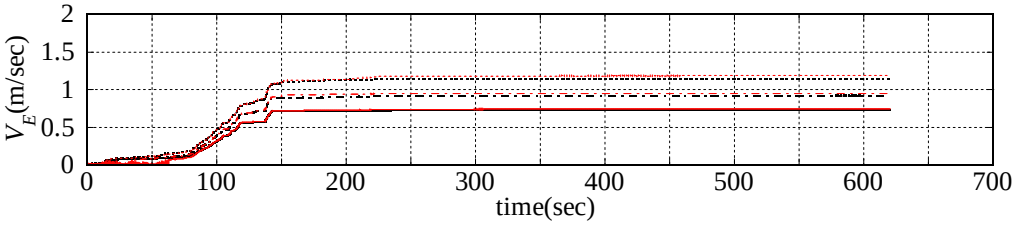


(b) 累積履歴吸収エネルギー等価速度

図 2.3.2-18 免震周期 3.5 秒モデル、T-TN-AIC004-AV 入力時の累積値

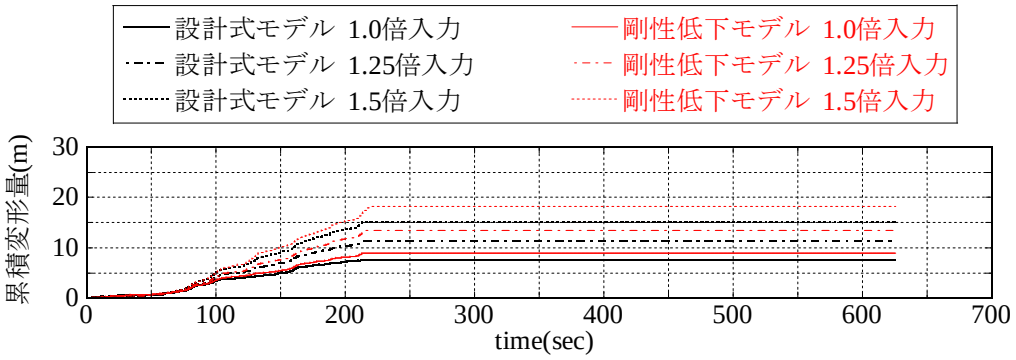


(a) 累積変形量

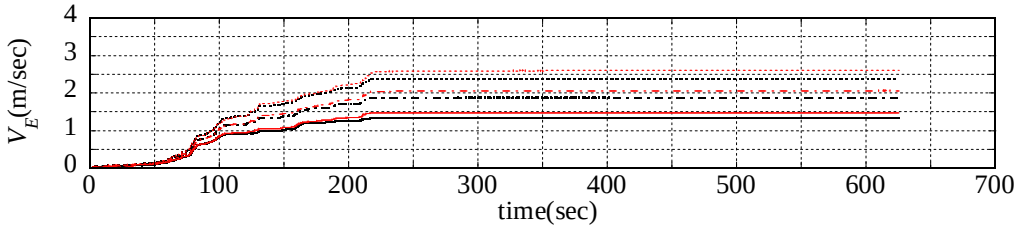


(b) 累積履歴吸収エネルギー等価速度

図 2.3.2-19 免震周期 3.5 秒モデル、T-TN-KGIN1F-AV 入力時の累積値

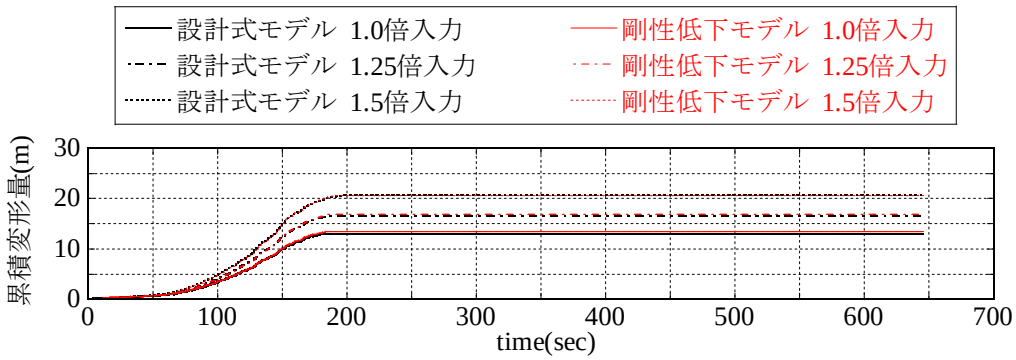


(a) 累積変形量

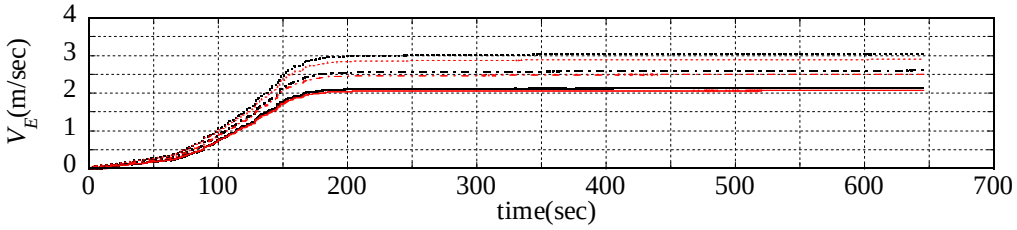


(b) 累積履歴吸収エネルギー等価速度

図 2.3.2-20 免震周期 4.0 秒モデル、N-OSKH02-AV 入力時の累積値

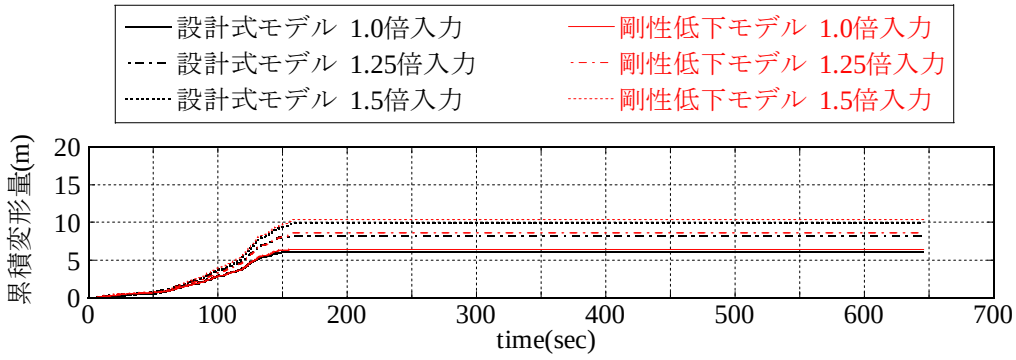


(a) 累積変形量

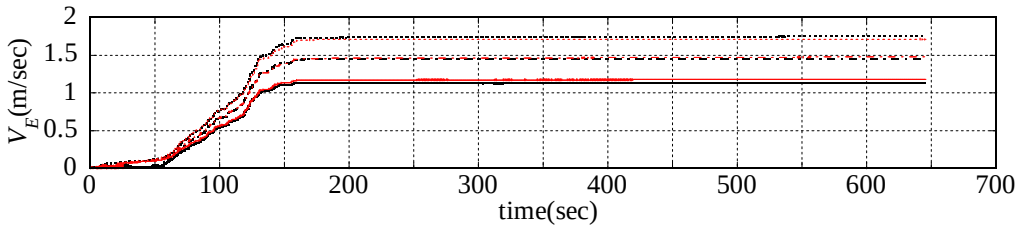


(b) 累積履歴吸収エネルギー等価速度

図 2.3.2-21 免震周期 4.0 秒モデル、T-TN-AIC003-AV 入力時の累積値

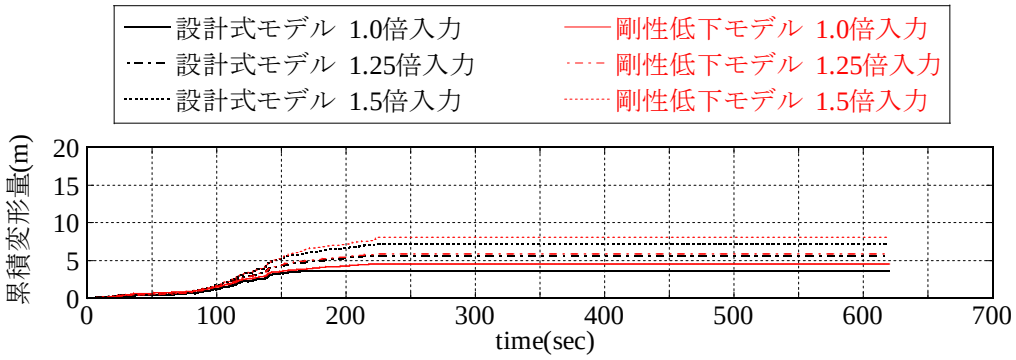


(a) 累積変形量

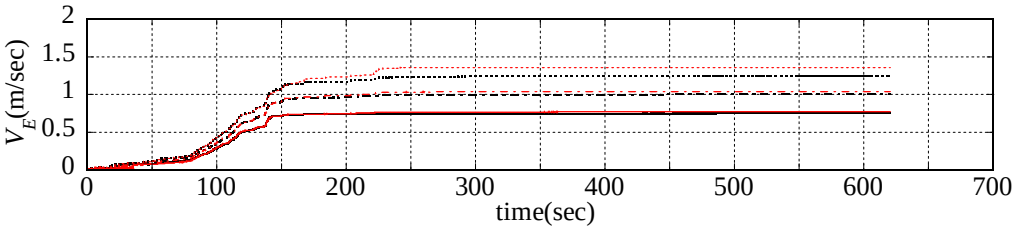


(b) 累積履歴吸収エネルギー等価速度

図 2.3.2-22 免震周期 4.0 秒モデル、T-TN-AIC004-AV 入力時の累積値

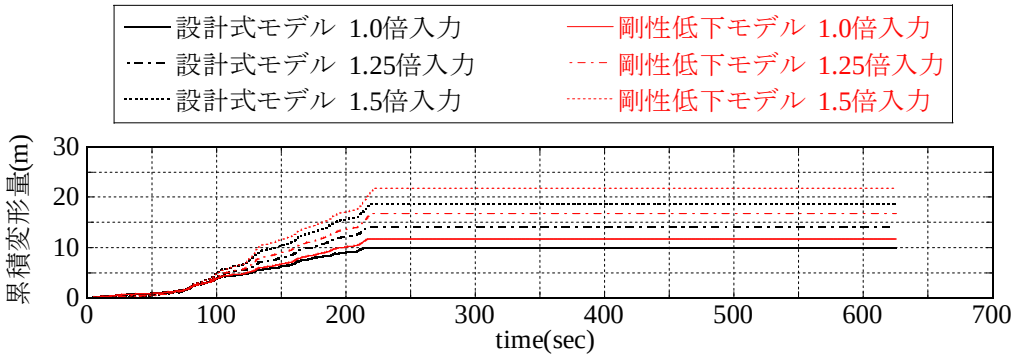


(a) 累積変形量

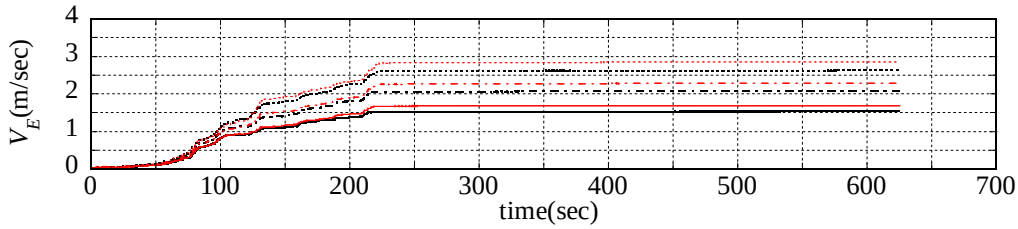


(b) 累積履歴吸収エネルギー等価速度

図 2.3.2-23 免震周期 4.0 秒モデル、T-TN-KGIN1F-AV 入力時の累積値

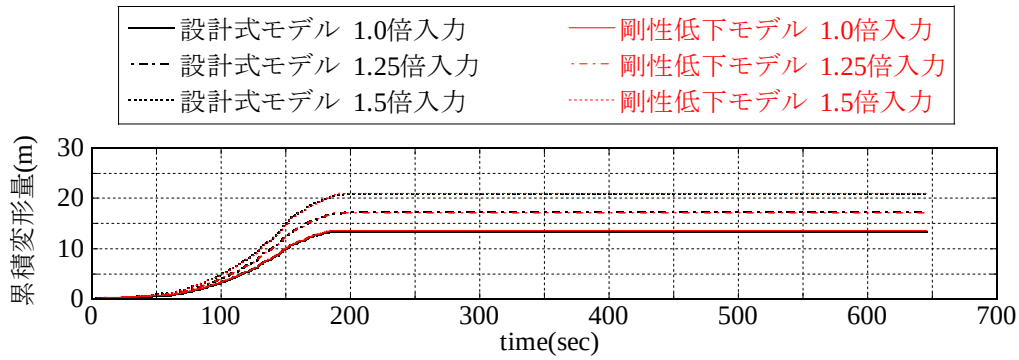


(a) 累積変形量

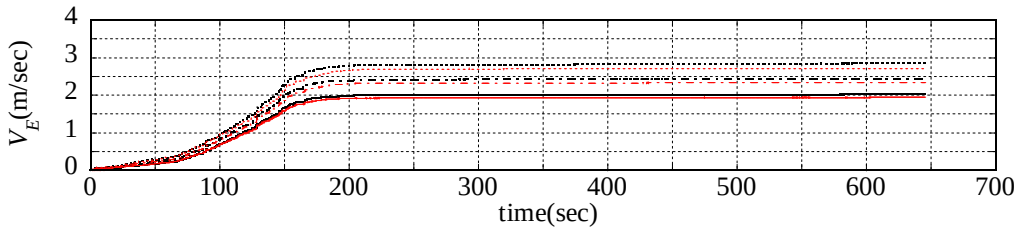


(b) 累積履歴吸収エネルギー等価速度

図 2.3.2-24 免震周期 4.5 秒モデル、N-OSKH02-AV 入力時の累積値

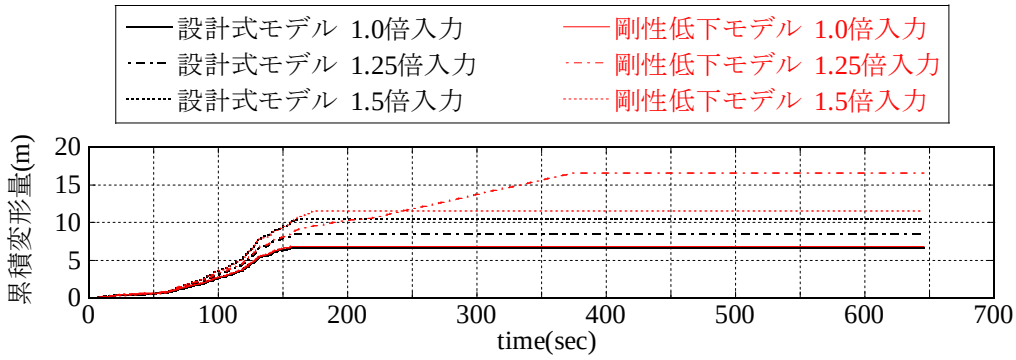


(a) 累積変形量

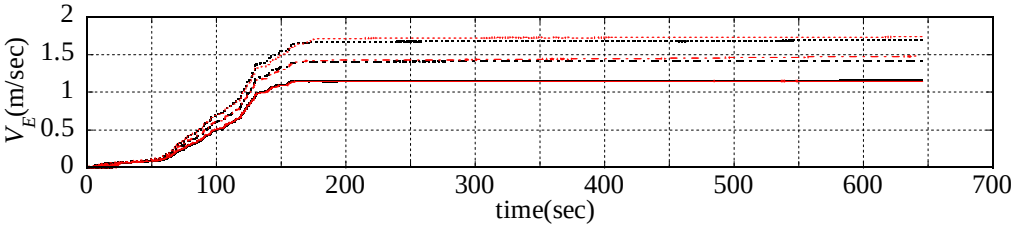


(b) 累積履歴吸収エネルギー等価速度

図 2.3.2-25 免震周期 4.5 秒モデル、T-TN-AIC003-AV 入力時の累積値

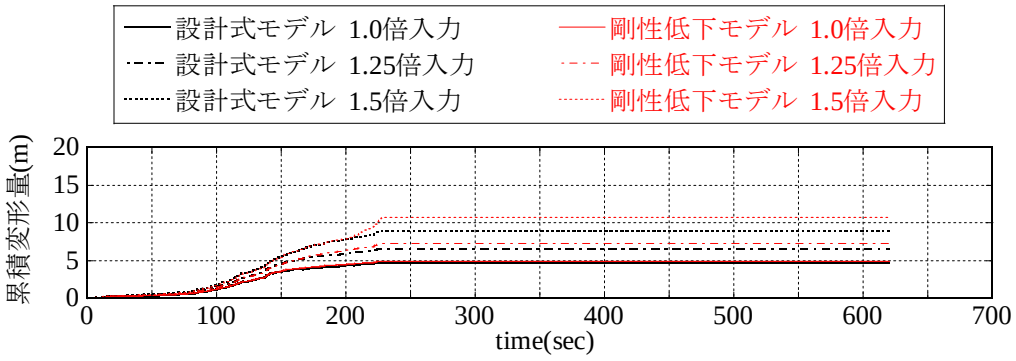


(a) 累積変形量

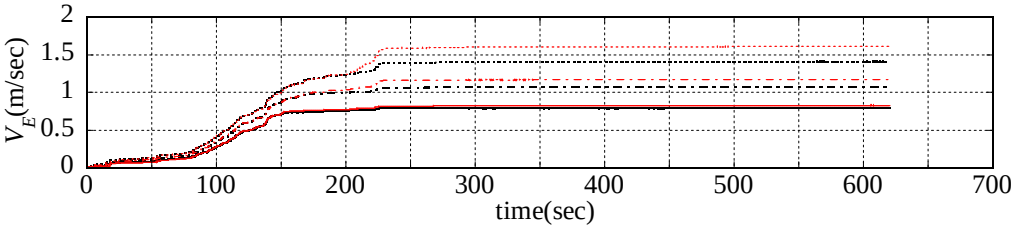


(b) 累積履歴吸収エネルギー等価速度

図 2.3.2-26 免震周期 4.5 秒モデル、T-TN-AIC004-AV 入力時の累積値



(a) 累積変形量



(b) 累積履歴吸収エネルギー等価速度

図 2.3.2-27 免震周期 4.5 秒モデル、T-TN-KGIN1F-AV 入力時の累積値

(4) まとめ

高減衰ゴム系積層ゴムにより構成される免震層を有する 1 質点系に長周期地震動を入力した応答解析を実施した。高減衰ゴム系積層ゴムの復元力特性に、既往の研究により提案されている累積履歴エネルギー吸収量による等価剛性の評価式を用いることで、多数回繰返し加振を受けることによる復元力特性の変化を考慮し、免震層の特性変化が建物応答に与える影響を検討した。

(4.1) 最大応答値

検討に用いた長周期地震動 4 波の原波の入力では現行の設計式を用いた解析モデルの免震層変位はせん断ひずみで 200%以下であり、せん断力係数も 0.1 以下であった。入力地震動を係数倍にして入力したところ、T-TN-AIC003-AV、N-OSKH02-AV の 1.5 倍入力により免震層変位がせん断ひずみ 200%を超えるケースが生じた。

現行の設計式によるモデルと、繰返し加振による等価剛性の低下を考慮したモデルの最大応答値を比較すると、ほとんどのケースで剛性低下を考慮したモデルの方が、設計式のモデルに対し 10～20%程度免震層変位が大きくなった。せん断力係数については、剛性低下を考慮したモデルの方が 5～10%程度小さな値を示した。

(4.2) 水平荷重変位関係

最大せん断ひずみが 50%以下のケースでは、設計式によるモデルと剛性低下を考慮したモデルの履歴ループにほとんど差は見られなかったが、せん断ひずみが 50%を超えるケースでは剛性低下を考慮したモデルの履歴ループに等価剛性の低下と変位の増加が明確に現れた。今回検討したケースでは、剛性低下を考慮することにより、等価剛性が初期値に対して 90～80%程度まで低下した。

(4.3) 累積値

検討に用いた長周期地震動 4 波の原波入力では、T-TN-AIC003-AV を入力したケースが最も大きな累積値を示し、累積変形量が 11～13m、累積履歴吸収エネルギー量は等価速度で 2.0～2.2m/sec であった。他の 3 波の原波を入力したケースでは、累積変位量は 10m 以下、エネルギー等価速度は 2.0m/sec 以下であった。

設計式によるモデルと繰返しによる剛性低下を考慮したモデルの解析結果を比較すると、累積変形量は剛性低下を考慮したモデルの方が設計式モデルよりも 10～20%大きな値を示した。累積履歴吸収エネルギー量は、T-TN-AIC003-AV を入力したケースは、剛性低下を考慮したモデルの結果が設計式モデルの結果よりもやや小さな値を示したが、他の地震動を入力したケースでは剛性低下を考慮したモデルの方が設計式モデルよりも 10～20%程度大きな値を示した。

今後は､平成 22 年度に実施した部材実験の結果を基に既往の研究における検証よりも広範囲に渡って既往の評価式を検証することで適用範囲の拡大を図り、必要であれば修正を加える。また、他の評価方法についても検討し、繰返しによる特性変化の影響を地震応答解析に適切に反映できる評価手法を検証する。

参考文献

2.3.2-1) 株式会社ブリヂストン:高減衰ゴム系積層ゴム支承(X0.6R)技術資料

2.3.2-2)北村春幸他: 高減衰積層ゴムの熱・力学的連成挙動の免震建物応答への影響評価、日本建築学会構造系論文集、第 655 号、1635-1644、2010.9.

2.3.2-3)竹中康雄他: 積層ゴムの熱・力学的連成挙動に関する実験的研究、日本建築学会構造系論文集、第 646 号、2245-222.3.2009.12.

2.3.2-4)平成 21 年度建築基準整備促進補助金事業:「12 免震建築物の基準の整備に資する検討」報告書、2010.3.

2.3.3 天然ゴム系積層ゴム＋鋼材ダンパー

免震材料として天然ゴム系積層ゴムと鋼材ダンパーを適用した免震建築物を対象として、長周期地震動による地震応答解析を実施した。天然ゴム系積層ゴム及び鋼材ダンパーは繰り返し加振に対して特性変化が生じないと考えられるので地震応答解析により応答値を確認し、鋼材ダンパーについて疲労損傷評価を行った。

(1) 各種依存性に関する既往の研究

表 2.3.3-1 に鋼材ダンパーの繰り返し加振実験に関する主要文献を示す。

表 5.3.3-1 鋼材ダンパの繰り返し加振実験に関する主要文献

番号	論文名	著者名	掲載誌
1	免震 U 型ダンパーに関する実験的研究 (その 1～6)	鈴木一弁他	建築学会学術講演集、1999～2000
2	免震 U 型ダンパーの実大動的載荷試験 (その 1、2)	植草雅浩他	建築学会学術講演集、2007
3	免震構造用 U 字型ダンパーの繰り返し変形性能に関する研究	吉敷祥一他	構造系論文集、No.646、2009.12
4	免震 U 型ダンパーの実大試験体による動的載荷試験（その 1、2）	西本晃治他	建築学会学術講演集、2008

以下、主要文献について内容をまとめる。文中の文献番号は表 2.3.3-1 による。

鋼材ダンパーの繰り返し加振時における特性については文献 2.3.3-1 により、積層ゴム φ600 に対応する鋼材ダンパーで 0 度、45 度、90 度の静的漸増加振結果により疲労特性が、縮小試験体により速度依存性、温度依存性が求められている。また、実大 4 本組試験体により縮小試験体と同様の特性が得られ相似則が成立することが示されている。文献 2.3.3-2 では縮小試験体の定振幅載荷実験により疲労曲線を求め、ランダム振幅に対する破断回数の予測方法として Miner 則による方法を提示している。文献 2.3.3-3、2.3.3-4 では実大試験体の動的載荷試験を行い鋼材ダンパーの履歴挙動と 0 度、45 度、90 度方向載荷時の疲労性能を評価している。また 2 方向の地震応答波加振も実施している。

(2)　解析条件

応答評価を行った建物モデル諸元を表 2.3.3-2 に示す。応答解析は上部建物を 1 質点としてモデル化し実施した。免震層は天然ゴム系積層ゴムと鋼材ダンパーで構成されるものとし、天然ゴム系積層ゴムはゴム種 G4、外径φ1000、ゴム総厚 200mm とし、積層ゴムのゴム剛性による周期 T_f=4.0s、鋼材ダンパーの降伏せん断力係数 α s=0.035 となるよう設定した。鋼材ダンパーは U 型ダンパーとし、NSUD50x4 を想定している。解析においては免震層の履歴減衰のみ考慮した。

表 2.3.3-2　対象建物諸元

上部構造重量 (積層ゴム 1 基当り) (kN)	積層ゴム平均面圧 (N/mm^2)	T_f (sec)	α s
7477	7.8	4.0	0.035

T_f: ゴム剛性による免震周期

α s：鋼材ダンパー降伏せん断力係数

(3)　解析結果

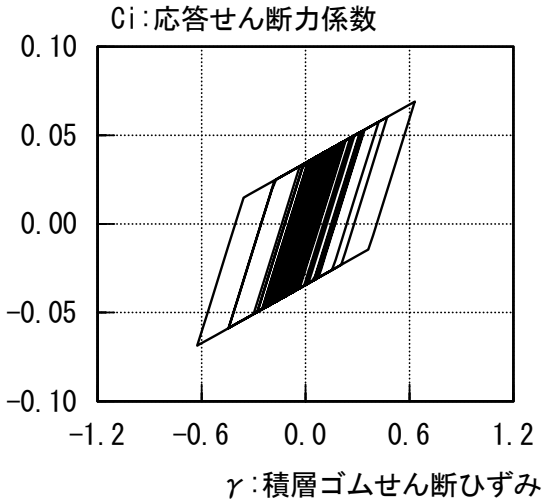
表 2.3.3-3 に各入力地震動における応答解析結果を示す。

表 2.3.3-3　地震応答解析結果

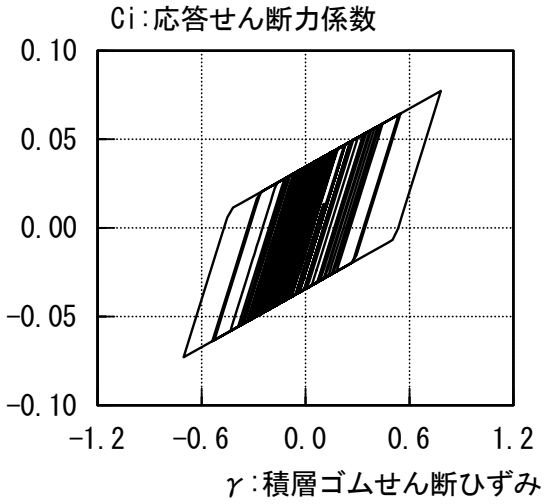
入力地震動	入力倍率	免震層水平変位 (cm)	免震層応答最大せん断力係数	応答最大加速度 (cm/s^2)	免震層 *1 累積変位 (m)	免震層吸収エネルギ速度換算値 (cm/s)
N-OSKH02_AV	1.00	12.6	0.069	68	8.7	123.3
	1.25	15.6	0.077	76	10.7	161.6
	1.50	18.6	0.085	84	14.0	205.8
T-TN-AIC003_AV	1.00	22.7	0.097	95	17.1	233.3
	1.25	33.7	0.127	124	21.1	285.0
	1.50	40.1	0.144	142	25.4	333.9
T-TN-AIC004_AV	1.00	11.3	0.065	64	9.4	118.0
	1.25	18.3	0.085	83	11.8	155.6
	1.50	22.8	0.097	95	13.6	188.6
T-TN-KGIN_AV	1.00	6.7	0.053	52	6.7	85.8
	1.25	12.2	0.068	67	8.3	115.6
	1.50	16.1	0.079	77	9.7	136.7

*1　免震層累積変位量については総入力エネルギーの 95%の時刻における値とした。

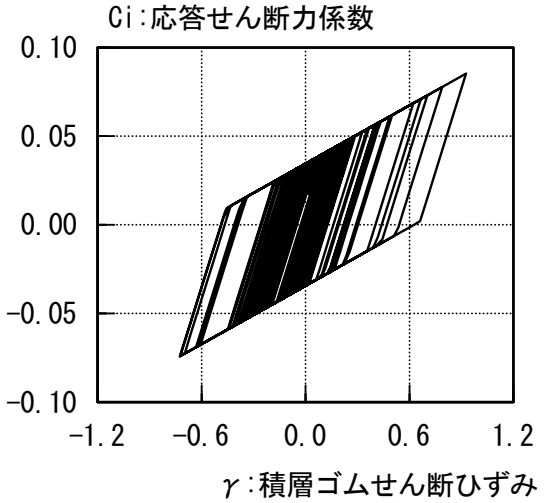
図 2.3.3-1 に各入力地震動時の積層ゴムせん断ひずみ－免震層せん断力係数図を、図 2.5.3-2 に免震層における累積変位量時刻歴を、図 2.5.3-3 に免震装置における吸収エネルギーの速度換算値の時刻歴を示す。



(i) 1.0 倍入力時

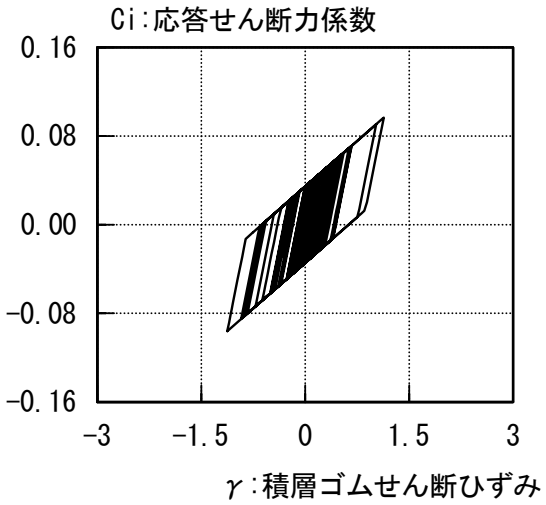


(ii) 1.25 倍入力時

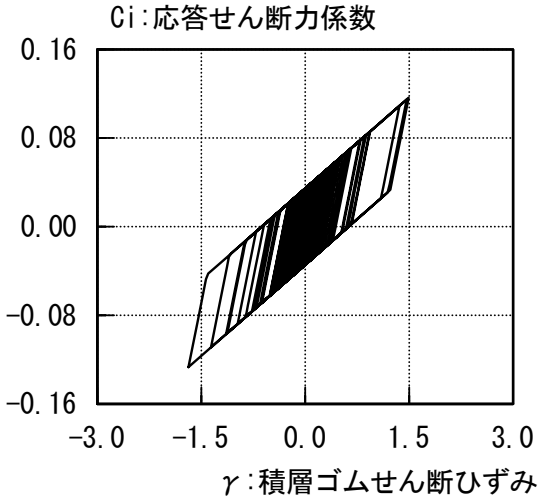


(iii) 1.5 倍入力時

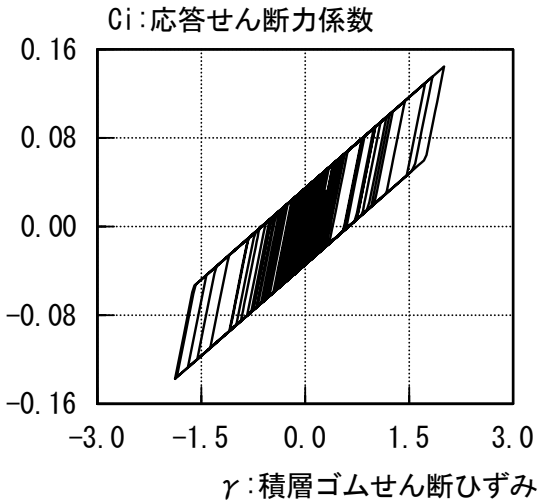
図 2.3.3-1(a)　積層ゴムせん断ひずみ－免震層せん断力係数図（N-OSKH02_AV）



(i) 1.0 倍入力時

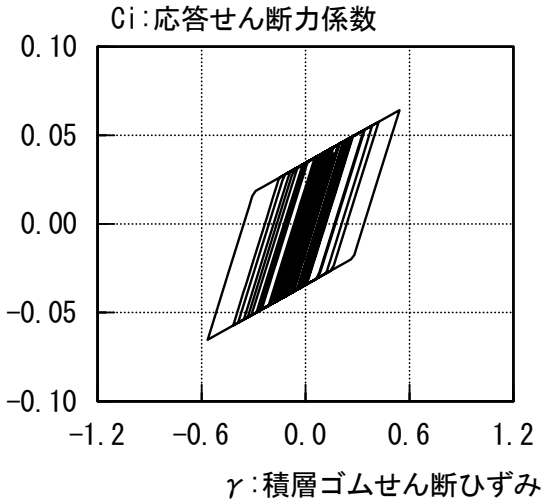


(ii) 1.25 倍入力時

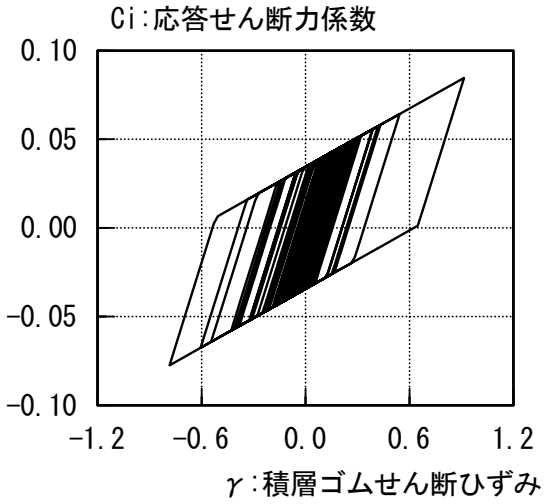


(iii) 1.5 倍入力時

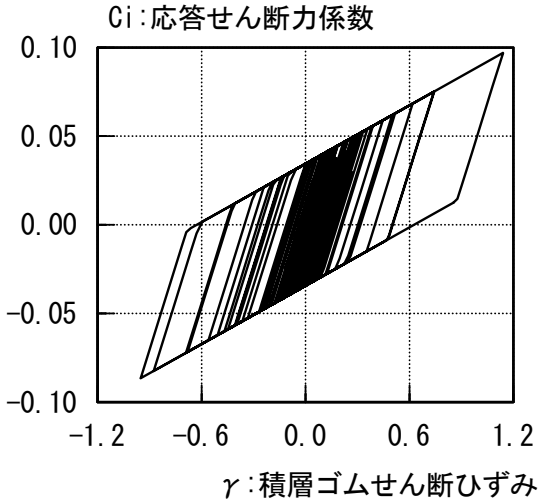
図 2.3.3-1(b)　積層ゴムせん断ひずみ－免震層せん断力係数図（T-TN-AIC003_AV）



(i) 1.0 倍入力時

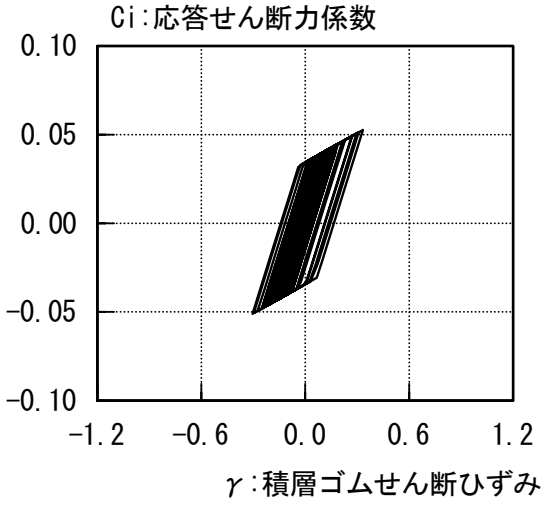


(ii) 1.25 倍入力時

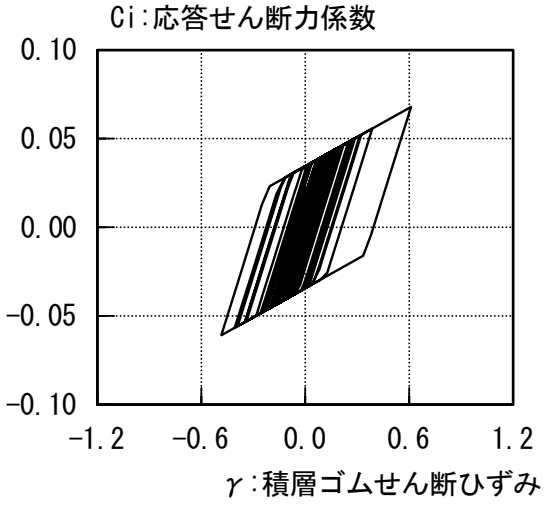


(iii) 1.5 倍入力時

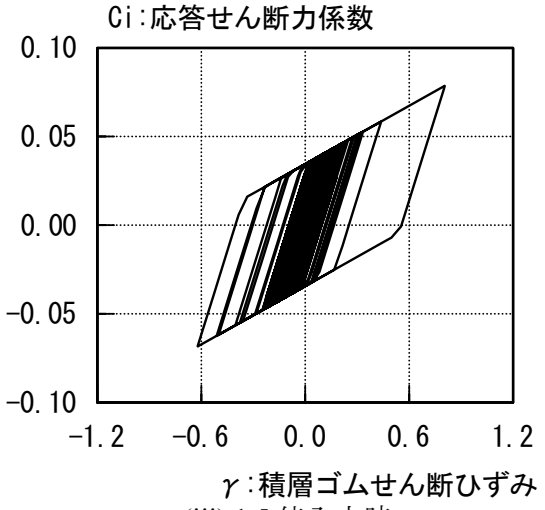
図 2.3.3-1(c)　積層ゴムせん断ひずみ－免震層せん断力係数図（T-TN-AIC004_AV）



(i) 1.0 倍入力時



(ii) 1.25 倍入力時



(iii) 1.5 倍入力時

図 2.3.3-1(d)　積層ゴムせん断ひずみ－免震層せん断力係数図（T-TN-KGIN_AV）

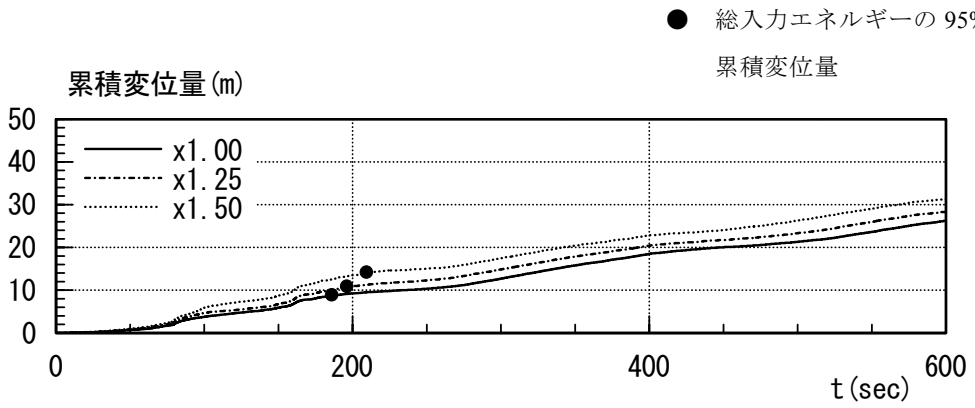


図 2.3.3-2(a)　免震層累積変位量時刻歴（N-OSKH02_AV）

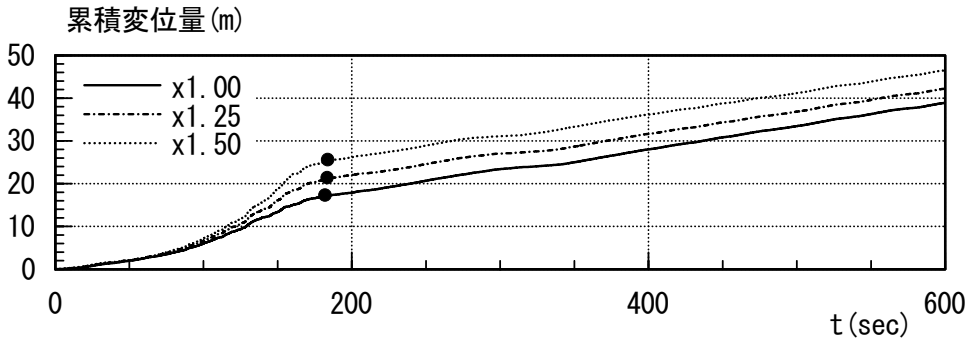


図 2.3.3-2(b)　免震層累積変位量時刻歴（T-TN-AIC003_AV）

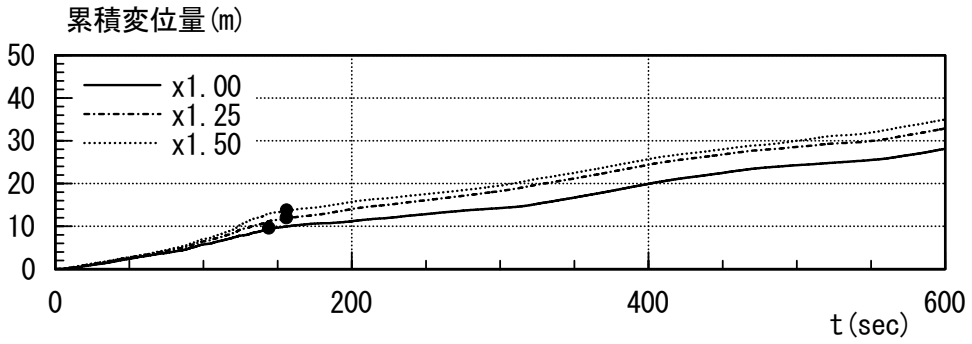


図 2.3.3-2(c)　免震層累積変位量時刻歴（T-TN-AIC004_AV）

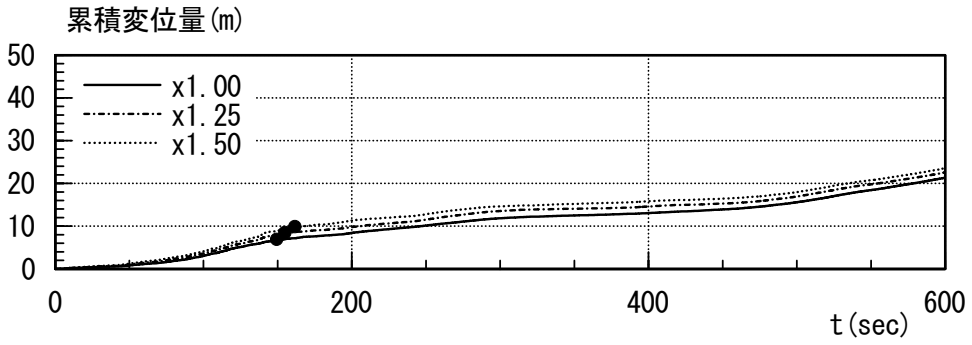


図 2.3.3-2(d)　免震層累積変位量時刻歴（T-TN-KGIN_AV）

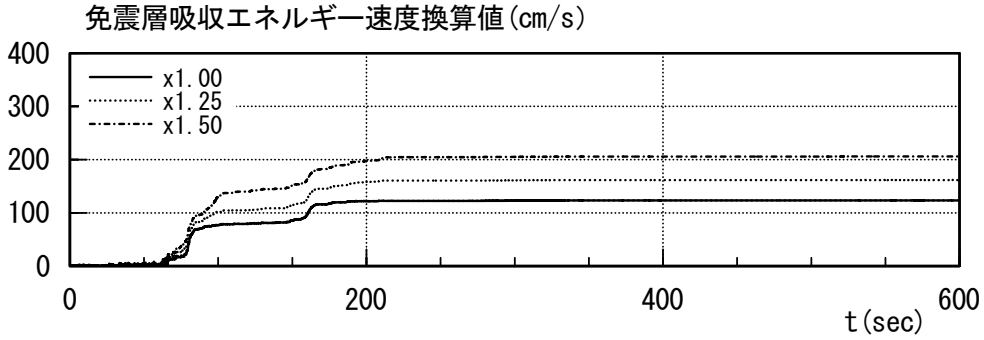


図 2.3.3-3(a)　免震層吸収エネルギー速度換算値時刻歴（N-OSKH02_AV）

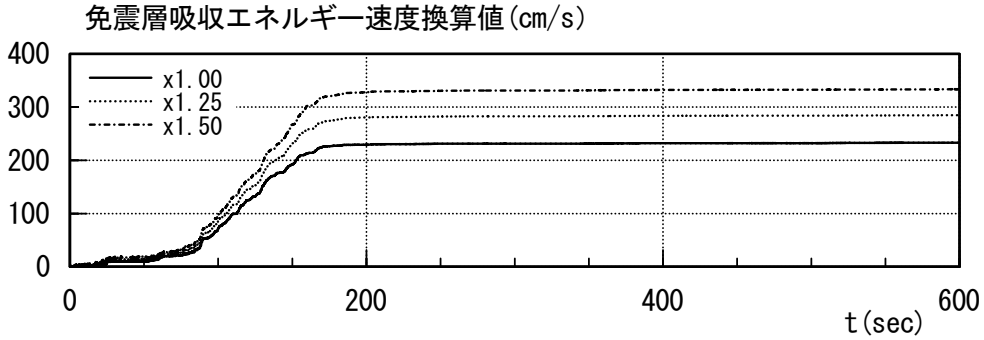


図 2.3.3-3(b)　免震層吸収エネルギー速度換算値時刻歴（T-TN-AIC003_AV）

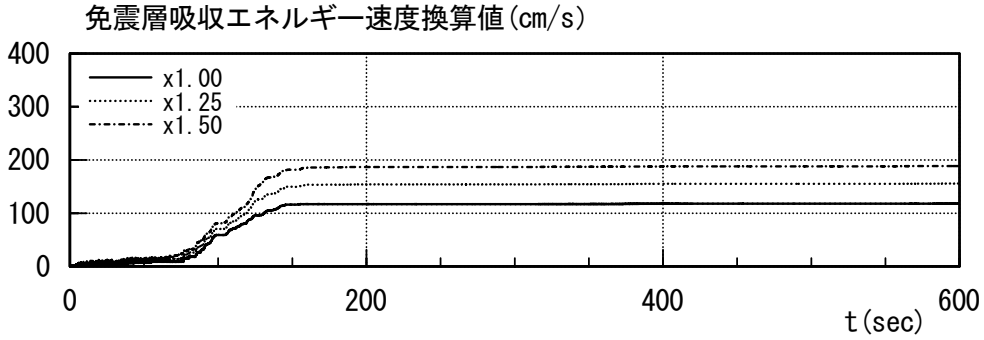


図 2.3.3-3(c)　免震層吸収エネルギー速度換算値時刻歴（T-TN-AIC004_AV）

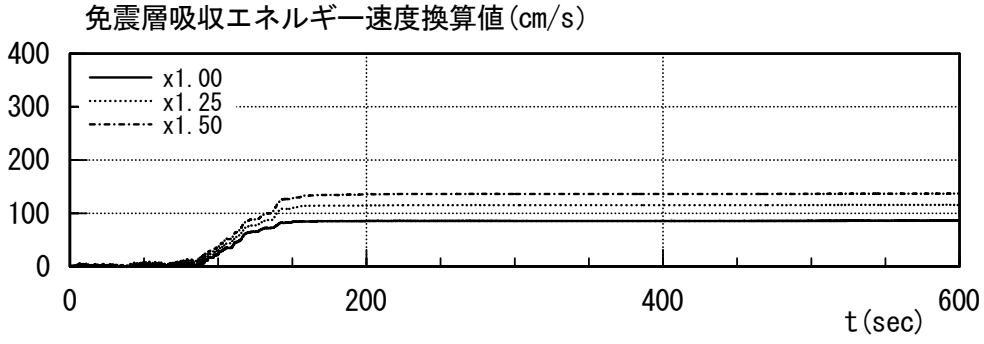


図 2.3.3-3(d)　免震層吸収エネルギー速度換算値時刻歴（T-TN-KGIN_AV）

鋼材ダンパーについては、Miner 則に基づく疲労損傷評価を行う。評価に当たっては地震応答解析によって得られた免震材料の変位波形よりレインフロー法により波形分解を行い、各歪範囲レベルでの繰返し頻度 N_i を累積する。

鋼材ダンパーについて表 2.3.3-1 の文献番号 3 により得られている変位振幅 Δ_i と破断回数 N_i の関係（図 2.3.3-4：参考文献 2.3.3-1）に基づいて、下式により損傷度 D を評価する。損傷値 D=1 の場合、疲労損傷（破断）が起きるとする。

$$D = \sum_i \frac{N_i}{N_f}$$

N_i: 変位振幅 Δ_i での頻度

N_f: 変位振幅 Δ_i での破断回数

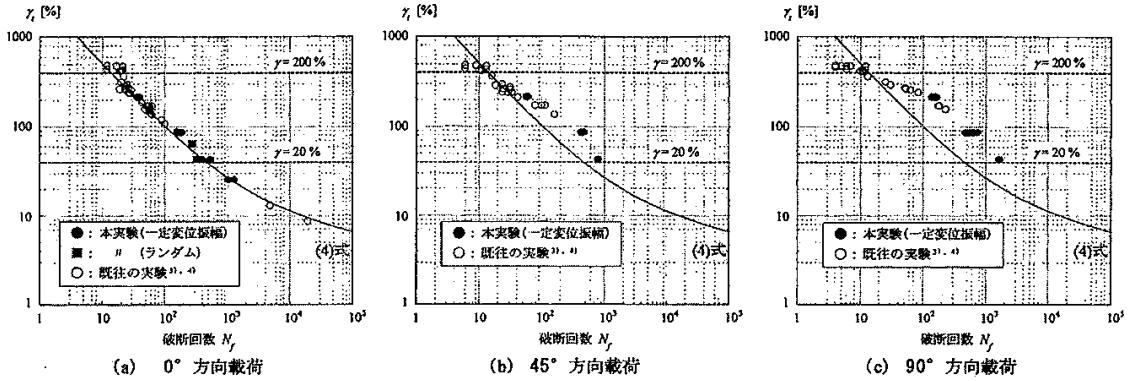


図１０　U ダンパーの疲労性能（全変位振幅 δ_t の平均せん断変形角 γ_t と破断回数 N_f の関係）

上図中　（4）式は、 $\gamma_t = 35N_f^{-0.15} + 3620N_f^{-0.80}$

ただし、γ_t は全変位振幅 δ_t を U 型ダンパーの高さ h で除した平均せん断変形角である。

図 2.3.3-4　鋼材ダンパーの疲労性能 2.3.3-1)

鋼材ダンパーについては応答解析より得られた応答変位時刻歴を使って、疲労損傷評価を行った。鋼材ダンパーは U 型ダンパーの NSUD50x4 を想定している。表 2.3.3-4 に疲労損傷度を示す。疲労損傷は図 2.3.3-4 に示されるように免震材料における吸収エネルギが頭打ちとなる継続時間 300 秒間について評価した、また疲労損傷度は破断時を 100%として評価した値である。

表 2.3.3-4　鋼材ダンパーの疲労損傷度

入力地震動	入力倍率	免震層水平変形（cm）	疲労損傷度（%）
N-OSKH02_AV	1.00	12.6	8.1
	1.25	15.6	12.2
	1.50	18.6	18.8
T-TN-AIC003_AV	1.00	22.7	26.4
	1.25	33.7	39.2
	1.50	40.1	55.3
T-TN-AIC004_AV	1.00	11.3	7.7
	1.25	18.3	13.2
	1.50	22.8	17.8
T-TN-KGIN_AV	1.00	6.7	4.9
	1.25	12.2	7.5
	1.50	16.1	9.9

（4）　まとめ

天然ゴム系積層ゴムと鋼材ダンパーを適用した免震建築物では T-TN-AIC003_AV の入力倍率が 1.0 倍の場合に積層ゴムのせん断ひずみは γ=114%（水平変位 22.7cm）で最大となる。その他の地震動では積層ゴムのせん断ひずみは γ =50%程度（水平変位 10cm 程度）である。また、T-TN-AIC003_AV の入力倍率が 1.5 倍の場合に積層ゴムのせん断ひずみは γ=200%（水平変位 40.1cm）となるものの、その他の入力の場合には積層ゴムのせん断ひずみは γ=100%程度（水平変位 20cm 程度）である。また、鋼材ダンパーの疲労損傷度は T-TN-AIC003_AV の入力倍率が 1.0 倍の場合に 26.4%であるが、その他の地震動では 10%以下である。T-TN-AIC003_AV の入力倍率が 1.5 倍の場合に破断に対する疲労損傷度が 55.3%となる。この場合には風外乱や中小地震による疲労損傷度の累積を考慮すると鋼材ダンパーの破断に対して厳しい値となっていると考えられる。

今後、鋼材ダンパーについて実施された実験結果についての評価を実施し、繰返し加振時の特性評価と疲労損傷度の評価について現状の評価方法の検証が必要と考えられる。疲労損傷度については大地震時の評価だけでなく、風外乱や中小地震時にも疲労損傷が蓄積することから大地震時の疲労損傷度のクライテリアをどの程度にするかが今後の課題である。また、2 方向地震動入力時の応答及びそれが疲労損傷度に及ぼす影響評価についても今後の課題と考えられる。

参考文献

2.3.3-1) 吉敷祥一ほか：免震構造用U字鋼材ダンパーの繰り返し変形性能に関する研究、日本建築学会構造系論文集、第 624 号、pp333-344、2008.2.

2.3.4　天然ゴム系積層ゴム＋鉛ダンパー

1)　各種依存性に関する既往の研究

1)　温度依存性および繰返しによるエネルギー吸収量の依存性

繰り返し試験におけるダンパー製造者の技術資料としては、3 ループ目のエネルギー吸収量における温度依存性が示されている。グラフを図 2.3.4-1 に示す。また、振幅±150mm および±400mm、周期 3s 正弦波繰り返し加振時の累積変形量と 1 ループ分エネルギー吸収量の 3 ループ目に対する変化率を図 2.3.4-2 および図 2.3.4-3 に示す。図 2.3.4-2 および図 2.3.4-3 は、免震部材メーカーから提供された実験データに、回帰により求めた関数を追加したものである。いずれの結果も低下率は最小二乗法により定式化されている。これらは住友金属鉱山シポレックス製 U2426 の結果である。本検討では、上記に示したデータに基づき、鉛ダンパーのエネルギー吸収による劣化モデルを考慮した地震応答解析を実施した。なお、鉛ダンパーの復元力特性は完全弾塑性のノーマルバイリニア型として表現する。

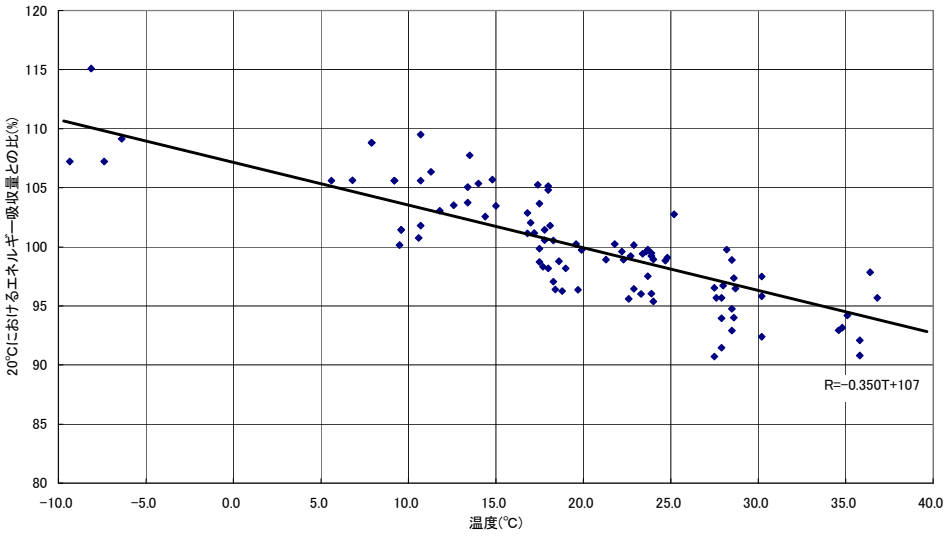


図 2.3.4-1　20℃に対するエネルギー吸収量の温度依存性（U2426）[2.3.4-1)]

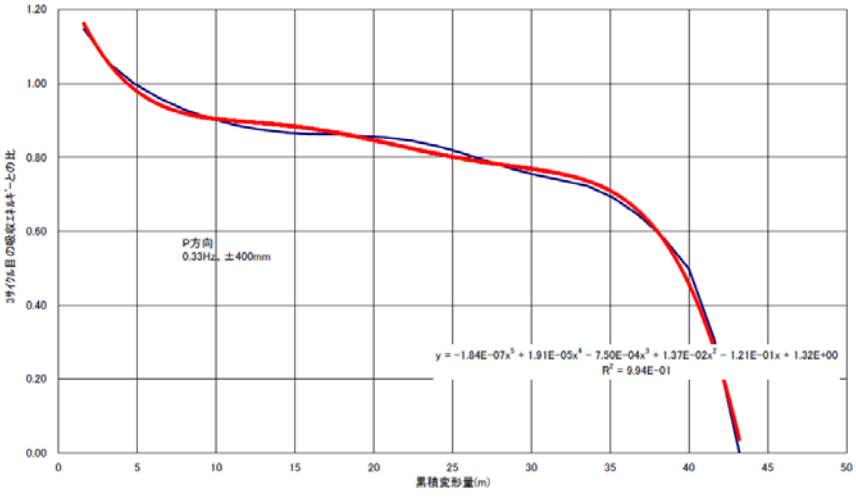


図 2.3.4-2　正弦波繰り返し加振時の累積変形量と
1 ループ分エネルギー吸収量の変化率
（P 方向振幅±400mm、周期 3s）

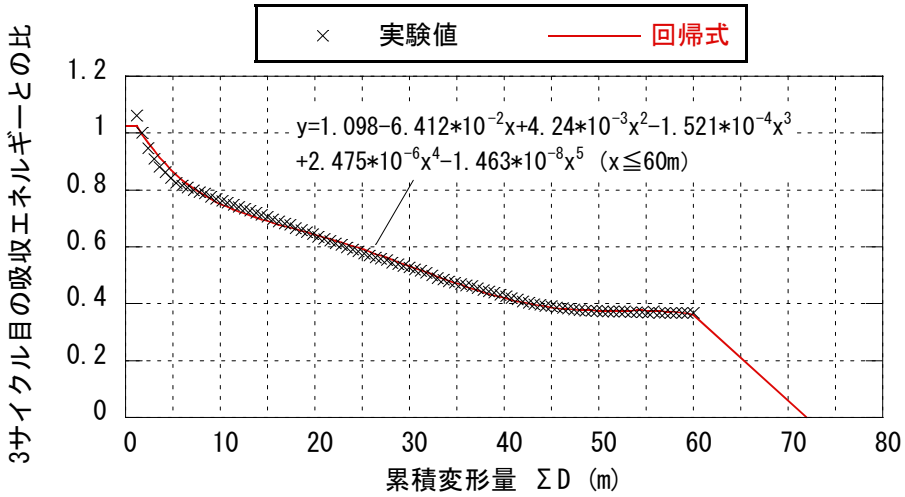


図 2.3.4-3　正弦波繰り返し加振時の累積変形量と
1 ループ分エネルギー吸収量の変化率
（P 方向振幅±150㎜、周期 3s）

2)　鉛ダンパーの耐力劣化モデル

エネルギー吸収による時々刻々の耐力劣化のモデルは、以下の Type A～D とする。

a)　Type A　完全弾塑性のノーマルバイリニア型で時々刻々の耐力劣化非考慮

b)　Type B　エネルギー吸収量の温度依存性を考慮

エネルギー吸収量 W の温度依存性 W/W(Te=20℃)は、図 2.3.4-1 より

$$W/W(Te=20℃) = -0.0035Te + 1.07 \qquad (2.3.4\text{-}1)$$

Te:温度（℃）

復元力の変化を考える上において、降伏時変位は変化しないとすると、（エネルギー吸収量の変化率）＝（降伏耐力の変化）と考える。

ダンパーのエネルギー吸収量が、すべて鉛自身の内部エネルギー上昇に消費されるとする。また、断熱状態と仮定し、鉛各部は均等に温度上昇がなされるものとすると、ダンパーのエネルギー吸収量ΔW による鉛の温度上昇の平均値ΔTe は以下のようになる。

$$\Delta Te = \Delta W / (\rho m) \qquad (2.3.4\text{-}2)$$

ρ ：比熱（＝129 J/kg）、m：鉛の質量

時々刻々のエネルギー吸収量の増分値から式(2.3.4-2)により鉛の温度を求め、式 (2.3.4-1)により温度に応じて降伏耐力を変化させる。

c)　Type C　　正弦波繰り返し加振時の累積変形量と 1 ループ分エネルギー吸収量の変化率を考慮

【P 方向±400㎜ の加振実験に基づいた場合】

P 方向振幅±400㎜、周期 3s 正弦波繰り返し加振時の累積変形量と 1 ループ分エネルギー吸収量の 3 ループ目に対する変化率（図 2.3.4-2）より、累積変形量 $Y=\Sigma\delta$ (m) と 1 ループ分のエネルギー吸収量の変化率 R_W は、

$$R\_W = -1.84\times10^{-7}Y^5 + 1.91\times10^{-5}Y^4 - 7.50\times10^{-4}Y^3 + 1.37\times10^{-2}Y^2 - 0.121Y + 1.32 \qquad (2.3.4\text{-}3)$$

式(2.4.3-3)は、3 ループ目に対する比率となっている。1 ループ目の累積変位である 0≦Y≦1.6(m)では 1 ループ目の値である R_W ＝1.163 とする。また、R_W≧0 とする。ここでは、復元力の変化を考える上において、降伏時変位は変化しないとし、（エネルギー吸収量の変化率）＝（降伏耐力の変化）と考える。鉛ダンパーの累積変形量から、式(2.4.3-3)により時々刻々の R_W を求め、降伏耐力を変化させる。

d) Type D　正弦波繰り返し加振時の累積変形量と 1 ループ分エネルギー吸収量の変化率を考慮

【P 方向±150㎜ の加振実験に基づいた場合】

P 方向振幅±150㎜、周期 3s 正弦波繰り返し加振時の累積変形量と 1 ループ分エネルギー吸収量の 3 ループ目に対する変化率（図 2.3.4-3）より、累積変形量 Y =Σ δ（m）と 1 ループ分のエネルギー吸収量の変化率 R_W は、

$$R\_W = -1.411\times10^{-8}Y^5 + 2.391\times10^{-6}Y^4 - 1.470\times10^{-4}Y^3 + 4.101\times10^{-3}Y^2 - 6.261\times10^{-2}Y + 1.093 \qquad (2.3.4\text{-}4)$$

ただし、累積変形量が 0 から 2 ループ目となる Y=1.2m まで R_W は、2 ループ目の値である 1.027 一定とする。また、累積変形量 Y=60m となる 100 サイクル目まで R_W は式(2.3.4-4)とし、Y≧60m から、破断限界である Y=72m（120 サイクル）までは、R_W(Y=60m)の値と Y=72m 時に R_W=0 を直線で結ぶモデルとした。上記のモデル化による値（凡例にて回帰式と表記）を図 2.3.4-3 に示す。

±150mm および±400mm のエネルギー吸収量の累積変形量による変化の実験値を図 2.3.4-4 に併せて示す。振幅が異なるとエネルギー吸収量が 0 となる累積変形量が異なる。また累積変形量が 40m 以下までは、±150mm の低下率が±400mm の低下率を下回っている。

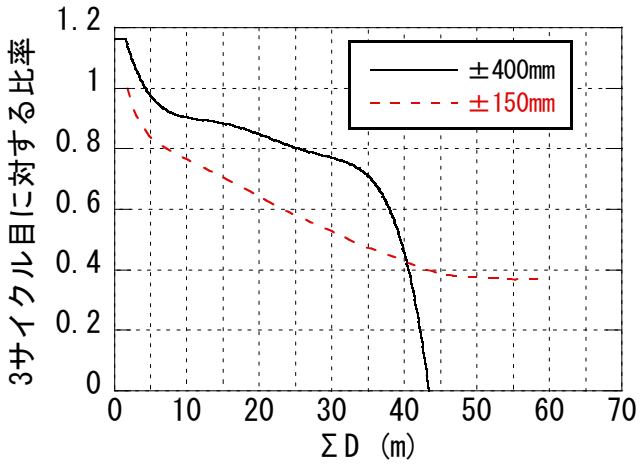
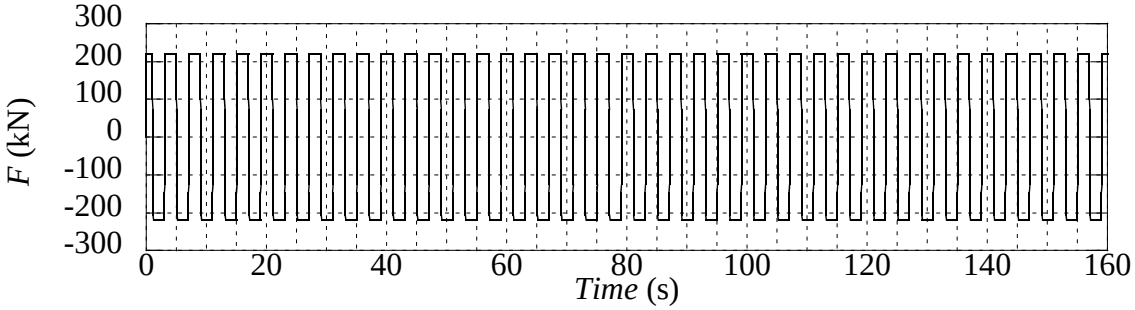
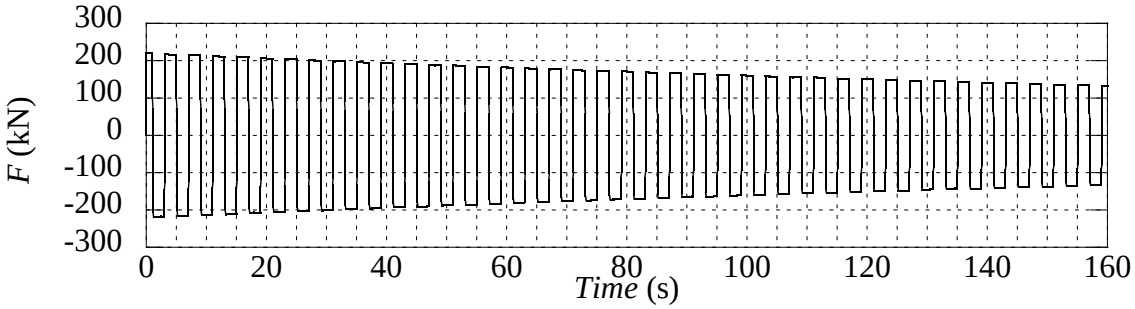


図 2.3.4-4　P 方向、0.33Hz 正弦波繰り返し加振時の累積変形量と
1 ループ分エネルギー吸収量の変化率

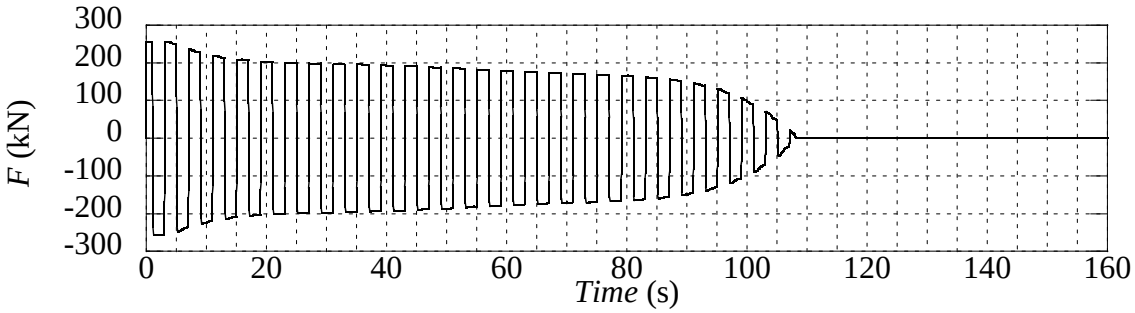
鉛ダンパーの復元力案 Type A～D に対して周期 4 秒、±400mm、40 サイクルの変位を与え、水平荷重履歴を求めた。鉛ダンパーは住友金属鉱山シポレックス製　U2426 とする。降伏荷重は 220kN、初期剛性は 30,000kN/m とし、初期温度は 20℃とする。



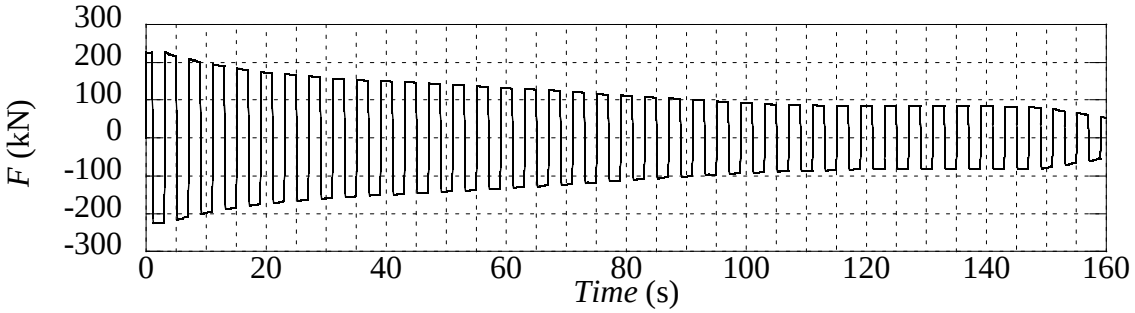
(a)　Type A 耐力劣化非考慮



(b)　Type B 温度依存性考慮



(c)　Type C 累積変形量による耐力劣化考慮



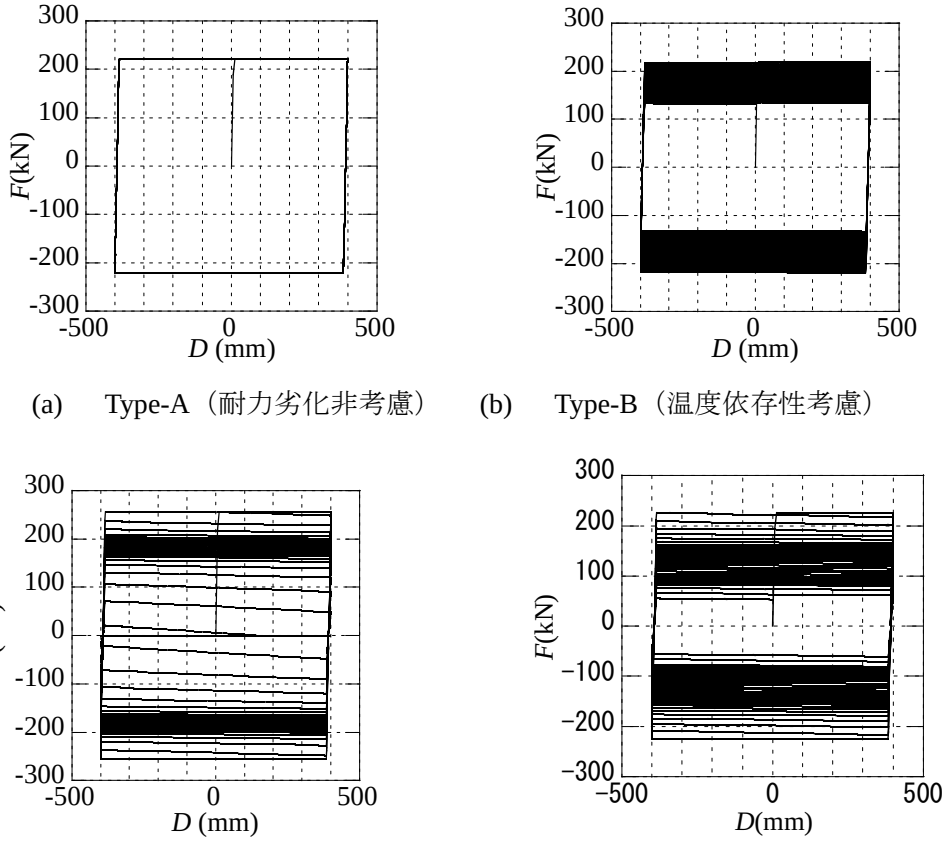
(d)　Type D 累積変形量による耐力劣化考慮

図 2.3.4-5　正弦波加振水平荷重の時刻歴

水平荷重の時刻歴を図 2.3.4-5 に示す。Type B（温度依存性考慮）と Type-C（±400mm の累積変形量による耐力劣化考慮）の耐力低下の違いは、加振最初および累積変形量 35m 以上で顕著である。ただし累積変形量 35m 以下では両者のモデルの違いはわずかである。水平荷重変形関係を図 2.3.4-6 に示す。

図(b),(c),(d)より Type B、C、D の履歴ループが描く面積は小さくなっていくことがわかる。Type B および Type D では降伏耐力が最後まで残っているが、Type C では降伏耐力が 0 にまで低減した。Type B、

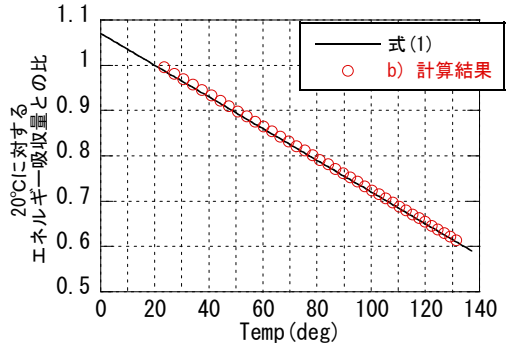
Type C および Type D モデルの計算結果と温度依存式・累積変形量による吸収率低下式との関係を図 2.3.4-7 に示す。それぞれのモデルによる計算結果は、式(2.3.4-1)、式(2.3.4-3)および式(2.3.4-4)と整合している。



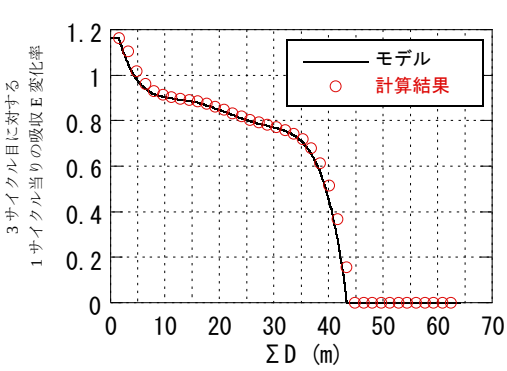
(a) Type-A（耐力劣化非考慮）　(b) Type-B（温度依存性考慮）

(c) Type-C（累積変形量による耐力劣化:±400mm）　(d) Type-D（累積変形量による耐力劣化:±150mm）

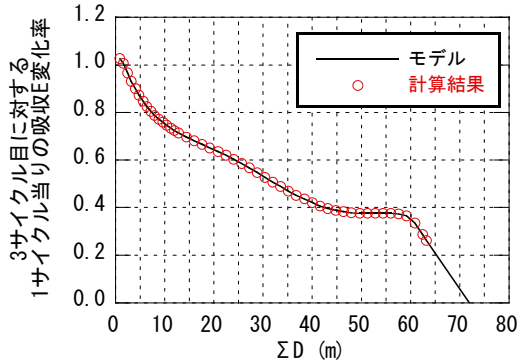
図 2.3.4-6　正弦波加振 水平荷重変形関係



(a) Type-B



(b) Type-C



(c) Type-D

図 2.3.4-7　正弦波加振　計算結果と温度依存式・累積変形量による吸収率低下式との関係

（2）解析条件

天然ゴム系積層ゴムと鉛ダンパーからなる免震層を有する 1 質点系の地震応答解析を実施した。

1)　解析モデル

解析で想定する建物モデルを表 2.3.4-1 に示す。上部構造の重量は 46,000kN である。天然ゴム系積層ゴムによる免震周期は 3.5 秒、4.0 秒および 4.5 秒とし、それぞれを Model I,II,III とする。鉛ダンパーの負担せん断力係数は、Model I,II,III ともに 0.038（U2426 型鉛ダンパー8 台）とした。天然ゴム系積層ゴムの復元力特性は線形弾性とする。鉛ダンパーは完全弾塑性とし、前項 2)で示した Type A～Type D の４種類のモデルを適用する。Type B における鉛ダンパーの初期温度は 20℃とした。免震層の減衰は鉛ダンパーの履歴減衰のみを考慮した。解析モデルを図 2.3.4-8 に示す。なお本検討は水平方向 1 自由度とする。解析手法は Newmark β 法（β=1/4）を用いた。

入力地震動は表 2.3.4-2 に示す長周期地震動４波とする。長周期地震動は加速度を 1.0 倍、1.25 倍、1.5 倍に係数倍した波を入力した。表 2.3.4-2 に示した最大加速度は係数 1.0 時の値である。

表 2.3.4-1 天然ゴム系積層ゴム＋鉛ダンパー解析モデル

	免震周期 3.5 秒 (Model I)	免震周期 4.0 秒 (Model II)	免震周期 4.5 秒 (Model III)
想定建物	RC 造、10 階建て 基礎免震	RC 造、10 階建て 基礎免震	RC 造、10 階建て 基礎免震
上部構造重量	46,000kN	46,000kN	46,000kN
鉛ダンパー台数	8 台	8 台	8 台
積層ゴム台数	12 台	10 台	8 台
積層ゴム直径(内径)	800mm(20mm)	750mm(15mm)	750mm(15mm)
積層ゴム面圧	7.6 N/mm^2	10.1 N/mm^2	12.5 N/mm^2
ゴムによる周期	3.6 秒	4.0 秒	4.4 秒
鉛ダンパー負担 せん断力係数	0.038	0.038	0.038

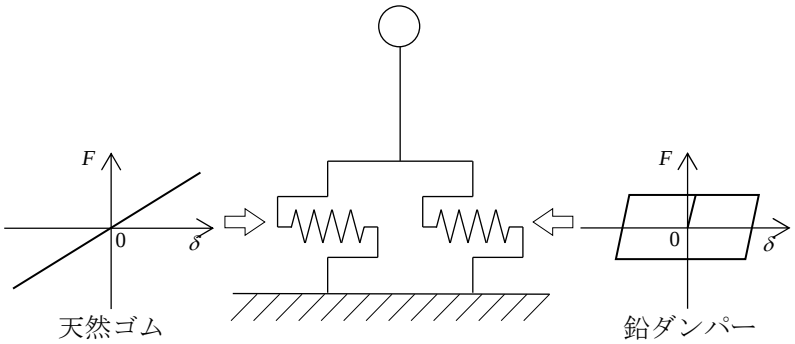


図 2.3.4-8　解析モデル模式図

表 2.3.4-2　応答解析用入力地震動

入力地震動	最大加速度
N-OSKH02-AV	70.9Gal
T-TN-AIC003-AV	221.2Gal
T-TN-AIC004-AV	323.0Gal
T-TN-KGIN1F-AV	89.6Gal

(3) 解析結果

1) 最大変形

入力地震動の入力倍率が 1.0 の場合における最大変形を表 2.3.4-3～5 に、入力倍率 1.25 の場合を表 2.3.4-6～8 に、入力倍率 1.5 倍時を 2.3.4-9～11 に示す。表中の最大値は、入力地震動 4 波のうち最も大きくなった地震動時の値を示している。また、B/A、C/A、D/A は Type B、Type C、Type D の値の Type A 時の値に対する比であり、耐力劣化考慮時の耐力劣化未考慮時に対する比率である。ほとんどの建物モデルにおいて、入力地震動 4 波のうち最も大きな変形となる入力波は、T-TN-AIC003-AV の場合である。鉛ダンパーの耐力劣化を考慮しない Type A の場合、T-TN-AIC003-AV の最大変形は入力倍率 1.0 時に 16.1cm、1.25 倍時に 24.6cm、1.5 倍時に 33.5cm であった。

Type B～Type D による復元力特性の繰返し劣化による最大変形の増大は、Type A の劣化非考慮の場合に対して Type B（温度依存性考慮）で 1.0～1.18 倍、Type C（±400mm の正弦波繰返し劣化特性考慮）では 0.80～1.24 倍、Type D（±150mm の正弦波繰返し劣化特性考慮）は 0.98～1.71 倍となっており、Type B < Type C <Type D の順で最大変位に与える影響が大きくなっている。また入力倍率が大きいほど、耐力劣化非考慮時に対する耐力劣化時の比が大きくなる傾向にある。入力倍率が 1.0 の場合、Type A, B、C、D で最も大きな変形はそれぞれ 16.1cm、17.0cm 、18.0cm、21.3cm であり、入力倍率が 1.25 では 24.6cm、25.9cm、26.9cm、35.5cm、入力倍率が 1.5 の場合で 33.5cm、39.6cm、41.6cm、56.4cm であった。ゴム総厚を 200mm とすると入力倍率 1.5 倍時の最大変形量 56.4cm 時のせん断ひずみは 282%であり、400%には達していない。

表 2.3.4-3　免震周期 3.5 秒　最大変位（長周期地震動入力倍率 1.0）

入力地震動	Type A (cm)	Type B (cm)	B/A	Type C (cm)	C/A	Type D (cm)	D/A
N-OSKH02 -AV	8.20	8.22	1.00	7.83	0.95	9.34	1.14
T-TN-AIC003-AV	15.40	16.48	1.07	17.59	1.14	21.28	1.38
T-TN-AIC004-AV	6.26	6.37	1.02	6.28	1.00	7.68	1.23
T-TN-KGIN1F-AV	4.20	4.20	1.00	3.37	0.80	4.20	1.00
最大値	15.4	16.5	1.07	17.6	1.14	21.3	1.38
最大時の地震動	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV

表 2.3.4-4　免震周期 4.0 秒　最大変位（長周期地震動入力倍率 1.0）

入力地震動	Type A (cm)	Type B (cm)	B/A	Type C (cm)	C/A	Type D (cm)	D/A
N-OSKH02 -AV	7.67	7.68	1.00	7.65	1.00	9.04	1.18
T-TN-AIC003-AV	15.87	16.84	1.06	17.89	1.13	21.11	1.33
T-TN-AIC004-AV	6.23	6.35	1.02	6.28	1.01	7.57	1.21
T-TN-KGIN1F-AV	4.41	4.41	1.00	3.62	0.82	4.39	1.00
最大値	15.9	16.8	1.06	17.9	1.13	21.1	1.33
最大時の地震動	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV

表 2.3.4-5　免震周期 4.5 秒　最大変位（長周期地震動入力倍率 1.0）

入力地震動	Type A (cm)	Type B (cm)	B/A	Type C (cm)	C/A	Type D (cm)	D/A
N-OSKH02 -AV	7.21	7.20	1.00	7.45	1.03	8.74	1.21
T-TN-AIC003-AV	16.12	16.99	1.05	17.98	1.12	20.73	1.29
T-TN-AIC004-AV	6.19	6.30	1.02	6.26	1.01	7.50	1.21
T-TN-KGIN1F-AV	4.54	4.54	1.00	3.78	0.83	4.59	1.01
最大値	16.1	17.0	1.05	18.0	1.12	20.7	1.29
最大時の地震動	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV

表 2.3.4-6　免震周期 3.5 秒　最大変位（長周期地震動入力倍率 1.25）

入力地震動	Type A (cm)	Type B (cm)	B/A	Type C (cm)	C/A	Type D (cm)	D/A
N-OSKH02 -AV	12.36	12.56	1.02	12.82	1.04	13.68	1.11
T-TN-AIC003-AV	24.32	25.90	1.06	26.89	1.11	29.01	1.19
T-TN-AIC004-AV	9.84	10.02	1.02	10.18	1.03	11.97	1.22
T-TN-KGIN1F-AV	4.96	4.95	1.00	5.04	1.02	4.85	0.98
最大値	24.3	25.9	1.06	26.9	1.11	29.0	1.22
最大時の地震動	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC004-AV

表 2.3.4-7　免震周期 4.0 秒　最大変位（長周期地震動入力倍率 1.25）

入力地震動	Type A (cm)	Type B (cm)	B/A	Type C (cm)	C/A	Type D (cm)	D/A
N-OSKH02 -AV	11.81	11.97	1.01	12.18	1.03	12.88	1.09
T-TN-AIC003-AV	24.59	25.83	1.05	26.62	1.08	33.06	1.34
T-TN-AIC004-AV	9.69	9.86	1.02	10.05	1.04	11.83	1.22
T-TN-KGIN1F-AV	5.18	5.18	1.00	5.23	1.01	5.07	0.98
最大値	24.6	25.8	1.05	26.6	1.08	33.1	1.34
最大時の地震動	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV

表 2.3.4-8　免震周期 4.5 秒　最大変位（長周期地震動入力倍率 1.25）

入力地震動	Type A (cm)	Type B (cm)	B/A	Type C (cm)	C/A	Type D (cm)	D/A
N-OSKH02 -AV	11.30	11.44	1.01	11.62	1.03	12.35	1.09
T-TN-AIC003-AV	24.45	25.40	1.04	26.12	1.07	35.52	1.45
T-TN-AIC004-AV	9.52	9.67	1.02	9.89	1.04	11.11	1.17
T-TN-KGIN1F-AV	5.35	5.35	1.00	5.41	1.01	5.26	0.98
最大値	24.5	25.4	1.04	26.1	1.07	35.5	1.45
最大時の地震動	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV

表 2.3.4-9　免震周期 3.5 秒　最大変位（長周期地震動入力倍率 1.5）

入力地震動	Type A (cm)	Type B (cm)	B/A	Type C (cm)	C/A	Type D (cm)	D/A
N-OSKH02 -AV	16.26	16.44	1.01	16.66	1.02	17.18	1.06
T-TN-AIC003-AV	33.17	34.06	1.03	33.94	1.02	44.37	1.34
T-TN-AIC004-AV	13.76	14.59	1.06	15.75	1.14	18.85	1.37
T-TN-KGIN1F-AV	5.88	5.96	1.01	5.88	1.00	7.77	1.32
最大値	33.2	34.1	1.06	33.9	1.14	44.4	1.37
最大時の地震動	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC004-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC004-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC004-AV

表 2.3.4-10　免震周期 4.0 秒　最大変位（長周期地震動入力倍率 1.5）

入力地震動	Type A (cm)	Type B (cm)	B/A	Type C (cm)	C/A	Type D (cm)	D/A
N-OSKH02 -AV	15.28	15.42	1.01	15.60	1.02	20.34	1.33
T-TN-AIC003-AV	32.94	37.57	1.14	38.67	1.17	56.40	1.71
T-TN-AIC004-AV	13.78	14.70	1.07	15.88	1.15	17.98	1.31
T-TN-KGIN1F-AV	6.37	6.47	1.01	6.25	0.98	8.50	1.33
最大値	32.9	37.6	1.14	38.7	1.17	56.4	1.71
最大時の地震動	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV

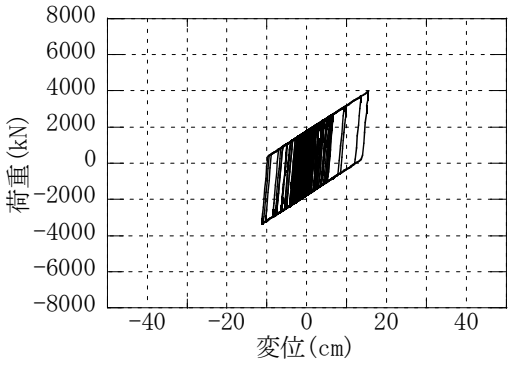
表 2.3.4-11　免震周期 4.5 秒　最大変位（長周期地震動入力倍率 1.5）

入力地震動	Type A (cm)	Type B (cm)	B/A	Type C (cm)	C/A	Type D (cm)	D/A
N-OSKH02 -AV	14.58	14.71	1.01	14.89	1.02	24.58	1.69
T-TN-AIC003-AV	33.54	39.62	1.18	41.65	1.24	48.82	1.46
T-TN-AIC004-AV	12.99	14.28	1.10	15.86	1.22	18.06	1.39
T-TN-KGIN1F-AV	6.80	6.92	1.02	6.68	0.98	9.03	1.33
最大値	33.5	39.6	1.18	41.6	1.24	48.8	1.69
最大時の地震動	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	N-OSKH02-AV

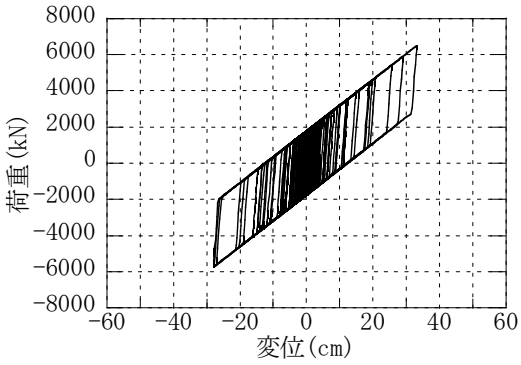
2)　荷重変形関係

免震層の荷重変形関係を図 2.3.4-9～11 に示す。免震層変位が大きい T-TN-AIC003-AV の場合を示す。各図の左側は入力倍率 1.0 の場合、右側は入力倍率 1.5 のものであり、上から順に Type A、B、C、D と並んでいる。Type C、D では、小さな変形域と大きな変形とで描いたループの高さが変わっていることから、地震動による繰り返しによりダンパーの耐力が変化していることがわかる。Type B の荷重変形関係は Type C、D ほどの耐力変化が見られない。

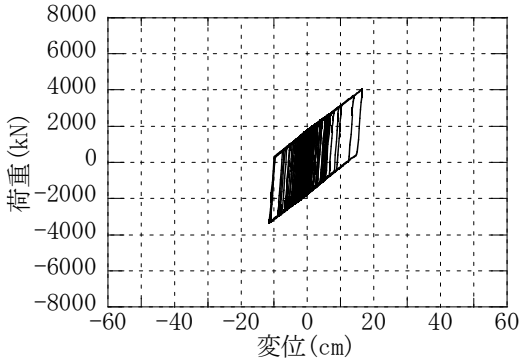
最大応答せん断力係数を表 2.3.4-12～20 に示す。入力倍率が 1.0 の場合、Type A, B、C、D で最も大きな応答せん断力係数はそれぞれ 0.086、0.088、0.089、0.095 であり、入力倍率が 1.25 では 0.114、0.116、0.118、0.117、入力倍率が 1.5 の場合で 0.141、0.141、0.139、0.167 であった。入力が 1.0 倍および 1.25 倍の場合は、Type A、 B、C、D のいずれの場合においても免震周期 3.5 秒が最も大きなせん断力を示した。入力が 1.5 倍と大きくなると、Type D では免震周期 4.0 秒の場合にせん断力が最も大きくなった。



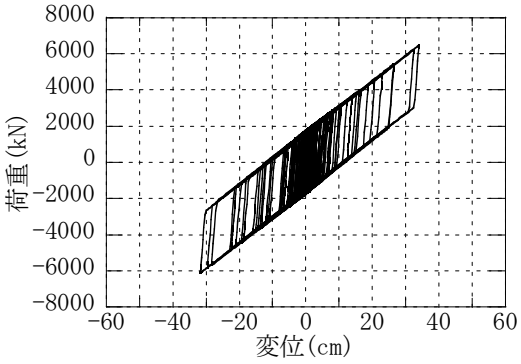
(a) Type A　入力倍率 1.0



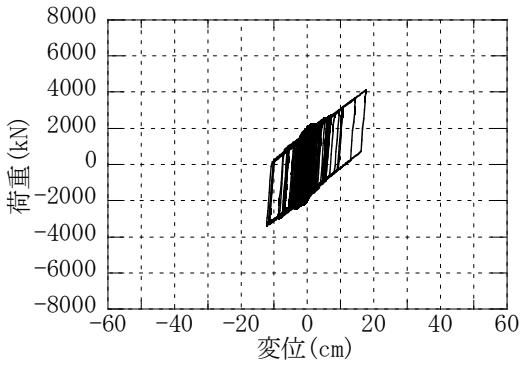
(b) Type A　入力倍率 1.5



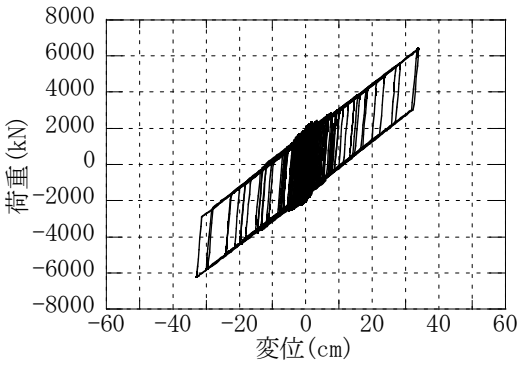
(c) Type B　入力倍率 1.0



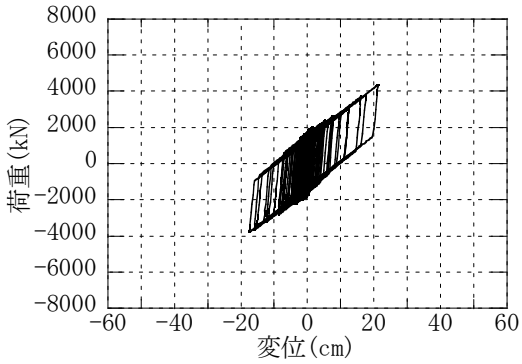
(d) Type B　入力倍率 1.5



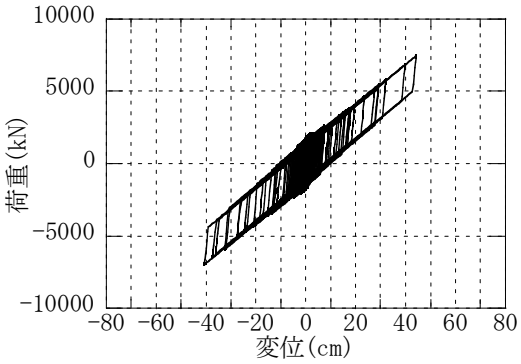
(e) Type C　入力倍率 1.0



(f) Type C　入力倍率 1.5

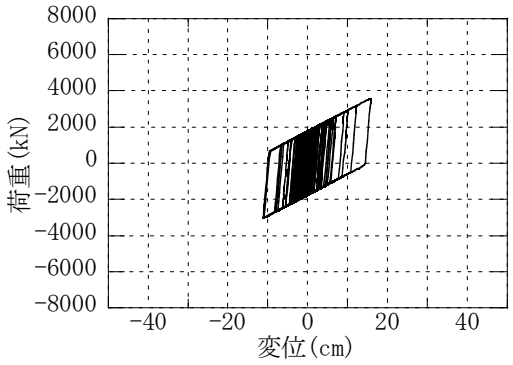


(g) Type D　入力倍率 1.0

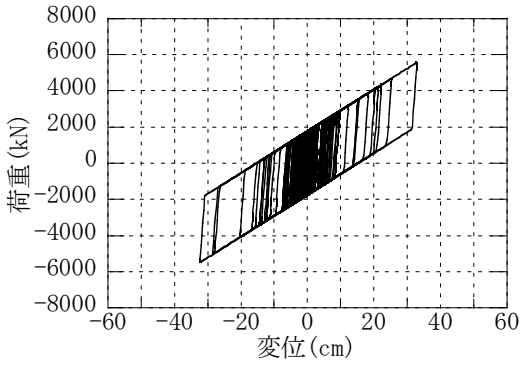


(h) Type D　入力倍率 1.5

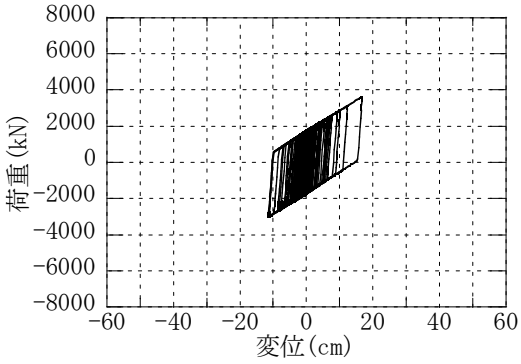
図 2.3.4-9　免震周期 3.5 秒　免震層荷重変形関係　（T-TN-AIC003-AV）



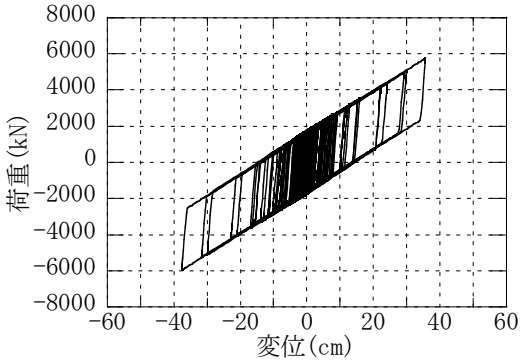
(a) Type A　入力倍率 1.0



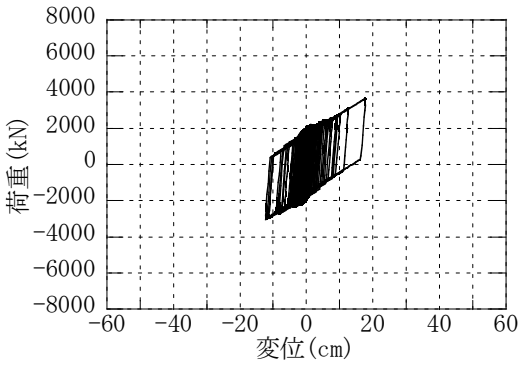
(b) Type A　入力倍率 1.5



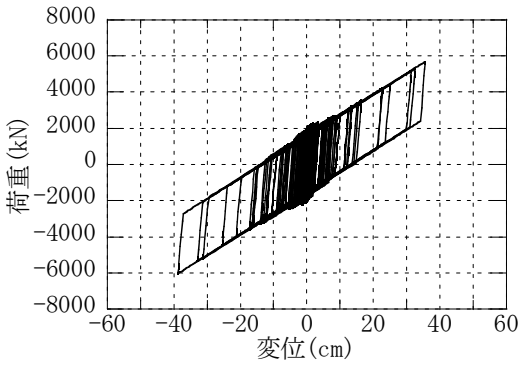
(c) Type B　入力倍率 1.0



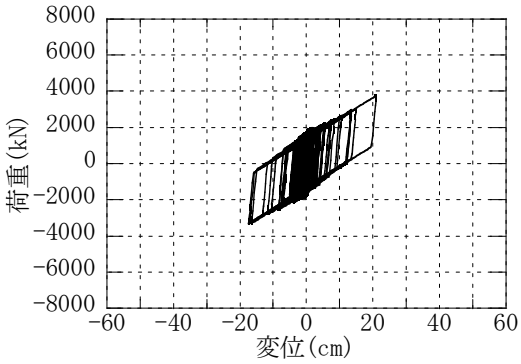
(d) Type B　入力倍率 1.5



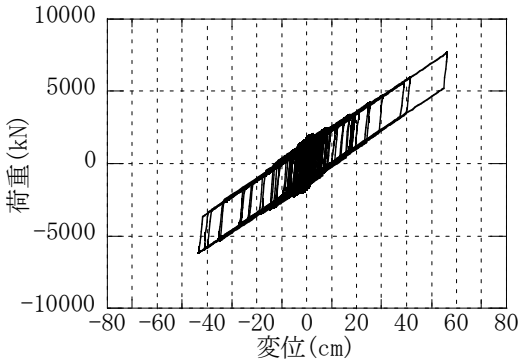
(e) Type C　入力倍率 1.0



(f) Type C　入力倍率 1.5

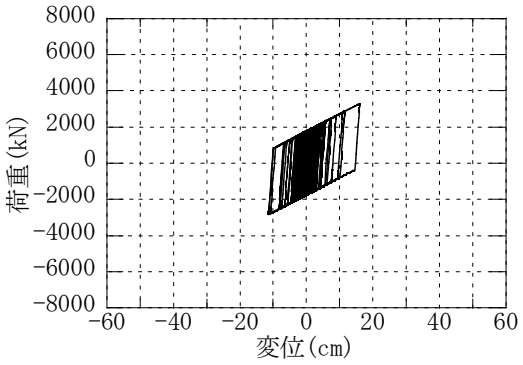


(g) Type D　入力倍率 1.0

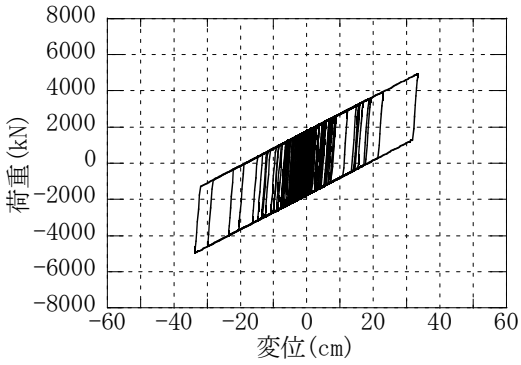


(h) Type D　入力倍率 1.5

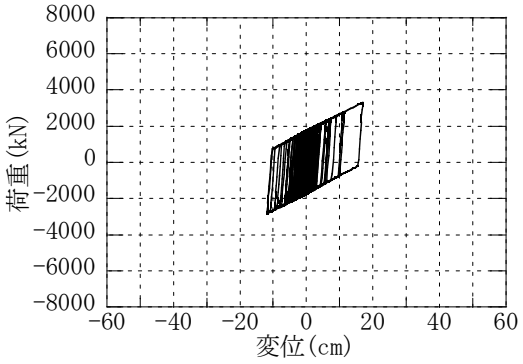
図 2.3.4-10　免震周期 4.0 秒　免震層荷重変形関係　（T-TN-AIC003-AV）



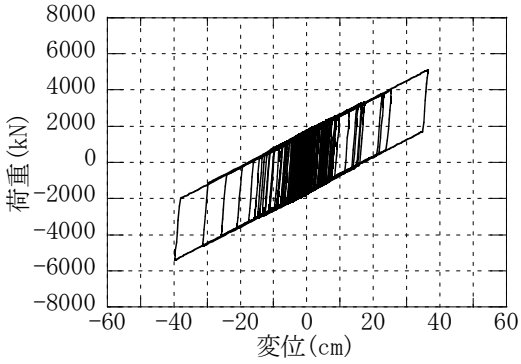
(a) Type A　入力倍率 1.0



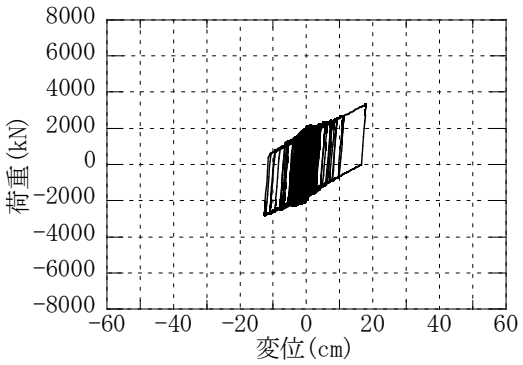
(b) Type A　入力倍率 1.5



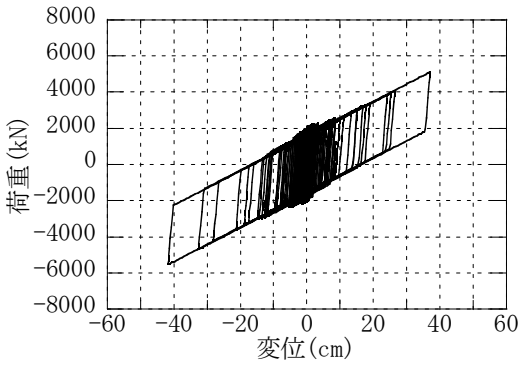
(c) Type B　入力倍率 1.0



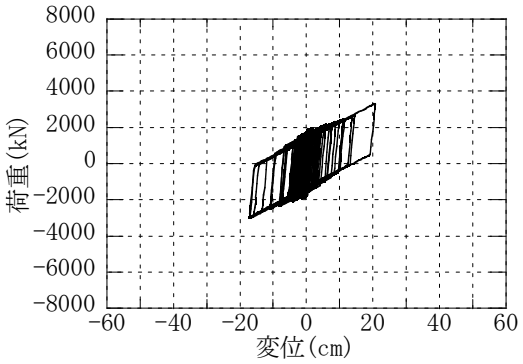
(d) Type B　入力倍率 1.5



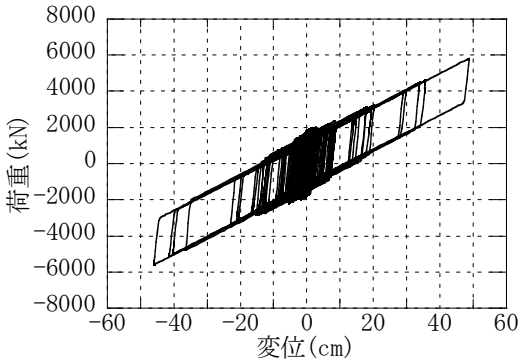
(e) Type C　入力倍率 1.0



(f) Type C　入力倍率 1.5



(g) Type D　入力倍率 1.0



(h) Type D　入力倍率 1.5

図 2.3.4-11　免震周期 4.5 秒　免震層荷重変形関係　（T-TN-AIC003-AV）

表 2.3.4-12　免震周期 3.5 秒　最大応答せん断力係数（長周期地震動入力倍率 1.0）

入力地震動	Type A	Type B	B/A	Type C	C/A	Type D	D/A
N-OSKH02 -AV	0.064	0.064	1.00	0.067	1.05	0.063	1.00
T-TN-AIC003-AV	0.086	0.088	1.02	0.089	1.04	0.095	1.10
T-TN-AIC004-AV	0.058	0.058	1.00	0.058	1.00	0.057	0.99
T-TN-KGIN1F-AV	0.051	0.051	1.00	0.054	1.06	0.050	0.97
最大値	0.086	0.088	1.02	0.089	1.06	0.095	1.10
最大時の地震動	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-KGIN1F-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV

表 2.3.4-13　免震周期 4.0 秒　最大応答せん断力係数（長周期地震動入力倍率 1.0）

入力地震動	Type A	Type B	B/A	Type C	C/A	Type D	D/A
N-OSKH02 -AV	0.058	0.057	1.00	0.062	1.08	0.057	0.99
T-TN-AIC003-AV	0.078	0.079	1.01	0.080	1.02	0.082	1.05
T-TN-AIC004-AV	0.054	0.054	1.00	0.054	1.00	0.052	0.97
T-TN-KGIN1F-AV	0.049	0.049	1.00	0.052	1.06	0.048	0.97
最大値	0.078	0.079	1.01	0.080	1.08	0.082	1.05
最大時の地震動	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	N-OSKH02 -AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV

表 2.3.4-14　免震周期 4.5 秒　最大応答せん断力係数（長周期地震動入力倍率 1.0）

入力地震動	Type A	Type B	B/A	Type C	C/A	Type D	D/A
N-OSKH02 -AV	0.053	0.053	1.00	0.058	1.10	0.052	0.98
T-TN-AIC003-AV	0.072	0.072	1.00	0.072	1.01	0.072	1.01
T-TN-AIC004-AV	0.051	0.051	1.00	0.051	1.00	0.049	0.96
T-TN-KGIN1F-AV	0.048	0.048	1.00	0.051	1.07	0.046	0.97
最大値	0.072	0.072	1.00	0.072	1.10	0.072	1.01
最大時の地震動	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	N-OSKH02 -AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV

表 2.3.4-15　免震周期 3.5 秒　最大応答せん断力係数（長周期地震動入力倍率 1.25）

入力地震動	Type A	Type B	B/A	Type C	C/A	Type D	D/A
N-OSKH02 -AV	0.077	0.077	1.00	0.076	1.00	0.075	0.98
T-TN-AIC003-AV	0.114	0.116	1.02	0.118	1.04	0.117	1.03
T-TN-AIC004-AV	0.069	0.069	1.00	0.069	1.00	0.069	1.00
T-TN-KGIN1F-AV	0.054	0.053	1.00	0.059	1.10	0.052	0.97
最大値	0.114	0.116	1.02	0.118	1.10	0.117	1.03
最大時の地震動	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-KGIN1F-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV

表 2.3.4-16　免震周期 4.0 秒　最大応答せん断力係数（長周期地震動入力倍率 1.25）

入力地震動	Type A	Type B	B/A	Type C	C/A	Type D	D/A
N-OSKH02 -AV	0.068	0.068	1.00	0.067	0.99	0.065	0.96
T-TN-AIC003-AV	0.100	0.101	1.01	0.101	1.01	0.111	1.10
T-TN-AIC004-AV	0.063	0.062	1.00	0.062	0.99	0.062	0.99
T-TN-KGIN1F-AV	0.051	0.051	1.00	0.056	1.09	0.049	0.96
最大値	0.100	0.101	1.01	0.101	1.09	0.111	1.10
最大時の地震動	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-KGIN1F-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV

表 2.3.4-17　免震周期 4.5 秒　最大応答せん断力係数（長周期地震動入力倍率 1.25）

入力地震動	Type A	Type B	B/A	Type C	C/A	Type D	D/A
N-OSKH02 -AV	0.062	0.061	0.99	0.061	0.99	0.059	0.95
T-TN-AIC003-AV	0.089	0.089	1.00	0.089	1.00	0.101	1.14
T-TN-AIC004-AV	0.058	0.058	1.00	0.057	0.99	0.056	0.96
T-TN-KGIN1F-AV	0.049	0.049	1.00	0.054	1.09	0.048	0.97
最大値	0.089	0.089	1.00	0.089	1.09	0.101	1.14
最大時の地震動	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-KGIN1F-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-KGIN1F-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV

表 2.3.4-18　免震周期 3.5 秒　最大応答せん断力係数（長周期地震動入力倍率 1.5）

入力地震動	Type A	Type B	B/A	Type C	C/A	Type D	D/A
N-OSKH02-AV	0.089	0.088	1.00	0.088	0.99	0.085	0.95
T-TN-AIC003-AV	0.141	0.141	1.00	0.139	0.99	0.162	1.15
T-TN-AIC004-AV	0.081	0.083	1.02	0.085	1.05	0.090	1.10
T-TN-KGIN1F-AV	0.057	0.056	1.00	0.061	1.07	0.058	1.02
最大値	0.141	0.141	1.02	0.139	1.07	0.162	1.15
最大時の地震動	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC004-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-KGIN1F-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV

表 2.3.4-19　免震周期 4.0 秒　最大応答せん断力係数（長周期地震動入力倍率 1.5）

入力地震動	Type A	Type B	B/A	Type C	C/A	Type D	D/A
N-OSKH02-AV	0.077	0.076	0.99	0.075	0.98	0.081	1.05
T-TN-AIC003-AV	0.121	0.130	1.07	0.131	1.08	0.167	1.38
T-TN-AIC004-AV	0.073	0.074	1.02	0.076	1.04	0.076	1.05
T-TN-KGIN1F-AV	0.054	0.054	1.00	0.058	1.07	0.055	1.01
最大値	0.121	0.130	1.07	0.131	1.08	0.167	1.38
最大時の地震動	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV

表 2.3.4-20　免震周期 4.5 秒　最大応答せん断力係数（長周期地震動入力倍率 1.5）

入力地震動	Type A	Type B	B/A	Type C	C/A	Type D	D/A
N-OSKH02-AV	0.069	0.068	0.99	0.067	0.98	0.081	1.18
T-TN-AIC003-AV	0.108	0.118	1.09	0.121	1.12	0.127	1.17
T-TN-AIC004-AV	0.065	0.067	1.03	0.069	1.05	0.069	1.05
T-TN-KGIN1F-AV	0.052	0.052	1.00	0.056	1.06	0.053	1.01
最大値	0.108	0.118	1.09	0.121	1.12	0.127	1.18
最大時の地震動	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	N-OSKH02-AV

3)　最大応答加速度

入力倍率が 1.0 の最大応答加速度を表 2.3.4-21～23 に、1.25 倍の場合を表 2.3.4-24～26 に、1.5 倍の場合を表 2.3.4-27～29 にそれぞれ示す。表中に示す最大値は、同一解析条件および鉛ダンパーの復元力特性が同じ場合における 4 波の応答解析結果のうち、最大値を示す。T-TN-AIC003-AV がどの解析モデルにおいても最も大きくなった。入力倍率が 1.0 の場合においては、耐力劣化を考慮しない場合（Type A）では、47～85Gal であった。この場合、免震周期が長いほど最大応答加速度が小さくなっている。復元力の違いによる影響に関して表中の最大値で比較すると、Type A ＜Type B＜Type C<Type D の傾向がみられた。

表 2.3.4-21　免震周期 3.5 秒　最大応答加速度（長周期地震動入力倍率 1.0）

入力地震動	Type A (Gal)	Type B (Gal)	B/A	Type C (Gal)	C/A	Type D (Gal)	D/A
N-OSKH02 -AV	62.5	62.4	1.00	65.7	1.05	62.2	1.00
T-TN-AIC003-AV	84.4	86.1	1.02	87.7	1.04	93.1	1.10
T-TN-AIC004-AV	56.6	56.5	1.00	56.5	1.00	55.9	0.99
T-TN-KGIN1F-AV	50.3	50.3	1.00	53.3	1.06	48.9	0.97
最大値	84.4	86.1	1.02	87.7	1.06	93.1	1.10
最大時の地震動	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-KGIN1F-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV

表 2.3.4-22　免震周期 4.0 秒　最大応答加速度（長周期地震動入力倍率 1.0）

入力地震動	Type A (Gal)	Type B (Gal)	B/A	Type C (Gal)	C/A	Type D (Gal)	D/A
N-OSKH02 -AV	56.4	56.3	1.00	60.9	1.08	56.0	0.99
T-TN-AIC003-AV	76.7	77.5	1.01	78.3	1.02	80.6	1.05
T-TN-AIC004-AV	52.9	52.8	1.00	52.8	1.00	51.4	0.97
T-TN-KGIN1F-AV	48.4	48.4	1.00	51.5	1.06	46.8	0.97
最大値	76.7	77.5	1.01	78.3	1.08	80.6	1.05
最大時の地震動	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	N-OSKH02 -AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV

表 2.3.4-23　免震周期 4.5 秒　最大応答加速度（長周期地震動入力倍率 1.0）

入力地震動	Type A (Gal)	Type B (Gal)	B/A	Type C (Gal)	C/A	Type D (Gal)	D/A
N-OSKH02 -AV	52.2	52.0	1.00	57.4	1.10	51.4	0.98
T-TN-AIC003-AV	70.4	70.7	1.00	70.9	1.01	70.9	1.01
T-TN-AIC004-AV	50.1	50.0	1.00	50.0	1.00	47.9	0.96
T-TN-KGIN1F-AV	46.8	46.7	1.00	50.1	1.07	45.6	0.97
最大値	70.4	70.7	1.00	70.9	1.10	70.9	1.01
最大時の地震動	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	N-OSKH02 -AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV

表 2.3.4-24　免震周期 3.5 秒　最大応答加速度（長周期地震動入力倍率 1.25）

入力地震動	Type A (Gal)	Type B (Gal)	B/A	Type C (Gal)	C/A	Type D (Gal)	D/A
N-OSKH02 -AV	75.1	75.1	1.00	74.9	1.00	73.6	0.98
T-TN- AIC003-AV	111.6	114.1	1.02	115.5	1.04	114.5	1.03
T-TN- AIC004-AV	67.5	67.4	1.00	67.3	1.00	67.8	1.00
T-TN- KGIN1F-AV	52.5	52.4	1.00	57.7	1.10	50.7	0.97
最大値	111.6	114.1	1.02	115.5	1.10	114.5	1.03
最大時の地震動	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- KGIN1F-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV

表 2.3.4-25　免震周期 4.0 秒　最大応答加速度（長周期地震動入力倍率 1.25）

入力地震動	Type A (Gal)	Type B (Gal)	B/A	Type C (Gal)	C/A	Type D (Gal)	D/A
N-OSKH02 -AV	66.7	66.4	1.00	66.0	0.99	63.7	0.96
T-TN- AIC003-AV	98.2	99.0	1.01	99.4	1.01	108.4	1.10
T-TN- AIC004-AV	61.4	61.2	1.00	61.0	0.99	60.7	0.99
T-TN- KGIN1F-AV	50.3	50.2	1.00	54.9	1.09	48.4	0.96
最大値	98.2	99.0	1.01	99.4	1.09	108.4	1.10
最大時の地震動	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- KGIN1F-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV

表 2.3.4-26　免震周期 4.5 秒　最大応答加速度（長周期地震動入力倍率 1.25）

入力地震動	Type A (Gal)	Type B (Gal)	B/A	Type C (Gal)	C/A	Type D (Gal)	D/A
N-OSKH02 -AV	60.5	60.2	0.99	59.8	0.99	57.4	0.95
T-TN- AIC003-AV	87.4	87.1	1.00	87.0	1.00	99.4	1.14
T-TN- AIC004-AV	56.9	56.6	1.00	56.2	0.99	54.4	0.96
T-TN- KGIN1F-AV	48.4	48.4	1.00	52.9	1.09	46.9	0.97
最大値	87.4	87.1	1.00	87.0	1.09	99.4	1.14
最大時の地震動	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- KGIN1F-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- KGIN1F-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV

表 2.3.4-27　免震周期 3.5 秒　最大応答加速度（長周期地震動入力倍率 1.5）

入力地震動	Type A (Gal)	Type B (Gal)	B/A	Type C (Gal)	C/A	Type D (Gal)	D/A
N-OSKH02 -AV	87.0	86.6	1.00	85.9	0.99	83.0	0.95
T-TN- AIC003-AV	138.6	138.2	1.00	136.7	0.99	159.3	1.15
T-TN- AIC004-AV	79.4	81.0	1.02	83.2	1.05	87.8	1.10
T-TN- KGIN1F-AV	55.4	55.3	1.00	59.6	1.07	56.6	1.02
最大値	138.6	138.2	1.02	136.7	1.07	159.3	1.15
最大時の地震動	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC004-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- KGIN1F-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV

表 2.3.4-28　免震周期 4.0 秒　最大応答加速度（長周期地震動入力倍率 1.5）

入力地震動	Type A (Gal)	Type B (Gal)	B/A	Type C (Gal)	C/A	Type D (Gal)	D/A
N-OSKH02 -AV	75.2	74.6	0.99	73.7	0.98	79.3	1.05
T-TN- AIC003-AV	118.8	127.1	1.07	128.7	1.08	163.5	1.38
T-TN- AIC004-AV	71.5	72.9	1.02	74.3	1.04	74.9	1.05
T-TN- KGIN1F-AV	53.2	53.1	1.00	56.8	1.07	54.0	1.01
最大値	118.8	127.1	1.07	128.7	1.08	163.5	1.38
最大時の地震動	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV

表 2.3.4-29　免震周期 4.5 秒　最大応答加速度（長周期地震動入力倍率 1.5）

入力地震動	Type A (Gal)	Type B (Gal)	B/A	Type C (Gal)	C/A	Type D (Gal)	D/A
N-OSKH02 -AV	67.2	66.6	0.99	66.0	0.98	79.1	1.18
T-TN- AIC003-AV	105.9	115.3	1.09	118.3	1.12	124.2	1.17
T-TN- AIC004-AV	64.0	65.8	1.03	67.5	1.05	67.4	1.05
T-TN- KGIN1F-AV	51.3	51.2	1.00	54.4	1.06	51.6	1.01
最大値	105.9	115.3	1.09	118.3	1.12	124.2	1.18
最大時の地震動	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	N-OSKH02-AV

4)　累積変形およびエネルギー吸収量

免震層の累積変形を表 2.3.4-30～38 に示す。ここで示す累積変形は、免震層の加振終了時における累積エネルギー吸収の 95%時点の値としている。4 波のうち最も大きな累積変形となる地震動は、入力倍率 1.0 の免震周期 4.0 秒にて T-TN-AIC004-AV であったが、ほかのすべての解析モデルにおいて T-TN-AIC003-AV であった。入力倍率が 1.0 の場合、Type A, B、C、D で最も大きな累積変形はそれぞれ 1634cm、1837cm、1547cm、1222cm であり、入力倍率が 1.25 では 1949cm、2058cm、1759cm、1716cm、入力倍率が 1.5 の場合で 2313cm、2329cm、2088cm、2392cm であった。

累積吸収エネルギーから求めた等価速度 V_E を図 2.3.4-12～13 に示す。T-TN-AIC003 が最も大きく、入力倍率 1.0 で 230cm/s、入力倍率 1.5 で 300～350cm/s となっている。モデルの違いによる V_E の差はほとんどのケースでわずかであるが、図 2.3.4-12 で示す N-OSKH02-AV において入力倍率が大きくなるとともに Type D のみ他のモデルの解析結果とやや異なる値となった。

表 2.3.4-30　免震周期 3.5 秒　累積変形（長周期地震動入力倍率 1.0）

入力地震動	Type A (cm)	Type B (cm)	B/A	Type C (cm)	C/A	Type D (cm)	D/A
N-OSKH02 -AV	500	502	1.00	516	1.03	551	1.10
T-TN-AIC003-AV	1501	1792	1.19	1547	1.03	1222	0.81
T-TN-AIC004-AV	1477	1614	1.09	930	0.63	519	0.35
T-TN-KGIN1F-AV	357	483	1.35	403	1.13	428	1.20
最大値	1501	1792	1.35	1547	1.13	1222	1.20
最大時の地震動	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-KGIN1F-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-KGIN1F-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-KGIN1F-AV

表 2.3.4-31　免震周期 4.0 秒　累積変形（長周期地震動入力倍率 1.0）

入力地震動	Type A (cm)	Type B (cm)	B/A	Type C (cm)	C/A	Type D (cm)	D/A
N-OSKH02 -AV	503	506	1.01	505	1.00	563	1.12
T-TN-AIC003-AV	1577	1820	1.15	1525	0.97	1173	0.74
T-TN-AIC004-AV	1584	1640	1.04	872	0.55	511	0.32
T-TN-KGIN1F-AV	347	550	1.59	317	0.91	493	1.42
最大値	1584	1820	1.59	1525	1.00	1173	1.42
最大時の地震動	T-TN-AIC004-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-KGIN1F-AV	T-TN-AIC003-AV	N-OSKH02 -AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-KGIN1F-AV

表 2.3.4-32　免震周期 4.5 秒　累積変形（長周期地震動入力倍率 1.0）

入力地震動	Type A (cm)	Type B (cm)	B/A	Type C (cm)	C/A	Type D (cm)	D/A
N-OSKH02 -AV	499	506	1.01	485	0.97	554	1.11
T-TN-AIC003-AV	1603	1837	1.15	1520	0.95	1141	0.71
T-TN-AIC004-AV	1634	1649	1.01	829	0.51	523	0.32
T-TN-KGIN1F-AV	755	585	0.77	311	0.41	476	0.63
最大値	1634	1837	1.15	1520	0.97	1141	1.11
最大時の地震動	T-TN-AIC004-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	N-OSKH02 -AV	T-TN-AIC003-AV	N-OSKH02 -AV

表 2.3.4-33　免震周期 3.5 秒　累積変形（長周期地震動入力倍率 1.25）

入力地震動	Type A (cm)	Type B (cm)	B/A	Type C (cm)	C/A	Type D (cm)	D/A
N-OSKH02 -AV	643	624	0.97	710	1.10	685	1.07
T-TN-AIC003-AV	1878	2058	1.10	1759	0.94	1716	0.91
T-TN-AIC004-AV	1603	1698	1.06	1059	0.66	649	0.40
T-TN-KGIN1F-AV	404	524	1.30	349	0.86	428	1.06
最大値	1878	2058	1.30	1759	1.10	1716	1.07
最大時の地震動	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-KGIN1F-AV	T-TN-AIC003-AV	N-OSKH02 -AV	T-TN-AIC003-AV	N-OSKH02-AV

表 2.3.4-34　免震周期 4.0 秒　累積変形（長周期地震動入力倍率 1.25）

入力地震動	Type A (cm)	Type B (cm)	B/A	Type C (cm)	C/A	Type D (cm)	D/A
N-OSKH02 -AV	616	671	1.09	697	1.13	683	1.11
T-TN-AIC003-AV	1916	2026	1.06	1707	0.89	1704	0.89
T-TN-AIC004-AV	1667	1732	1.04	968	0.58	631	0.38
T-TN-KGIN1F-AV	440	618	1.40	360	0.82	457	1.04
最大値	1916	2026	1.40	1707	1.13	1704	1.11
最大時の地震動	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-KGIN1F-AV	T-TN-AIC003-AV	N-OSKH02 -AV	T-TN-AIC003-AV	N-OSKH02-AV

表 2.3.4-35　免震周期 4.5 秒　累積変形（長周期地震動入力倍率 1.25）

入力地震動	Type A (cm)	Type B (cm)	B/A	Type C (cm)	C/A	Type D (cm)	D/A
N-OSKH02 -AV	611	688	1.13	689	1.13	695	1.14
T-TN-AIC003-AV	1949	1984	1.02	1681	0.86	1608	0.83
T-TN-AIC004-AV	1701	1776	1.04	860	0.51	629	0.37
T-TN-KGIN1F-AV	607	421	0.69	366	0.60	415	0.68
最大値	1949	1984	1.13	1681	1.13	1608	1.14
最大時の地震動	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	N-OSKH02 -AV	T-TN-AIC003-AV	N-OSKH02 -AV	T-TN-AIC003-AV	N-OSKH02-AV

表 2.3.4-36　免震周期 3.5 秒　累積変形（長周期地震動入力倍率 1.5）

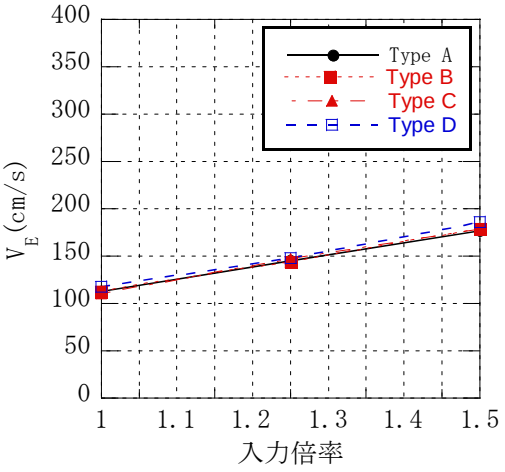
入力地震動	Type A (cm)	Type B (cm)	B/A	Type C (cm)	C/A	Type D (cm)	D/A
N-OSKH02 -AV	827	836	1.01	837	1.01	887	1.07
T-TN-AIC003-AV	2291	2329	1.02	2088	0.91	2392	1.04
T-TN-AIC004-AV	1734	1812	1.04	1109	0.64	865	0.50
T-TN-KGIN1F-AV	454	510	1.12	415	0.91	503	1.11
最大値	2291	2329	1.12	2088	1.01	2392	1.11
最大時の地震動	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-KGIN1F-AV	T-TN-AIC003-AV	N-OSKH02 -AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-KGIN1F-AV

表 2.3.4-37　免震周期 4.0 秒　累積変形（長周期地震動入力倍率 1.5）

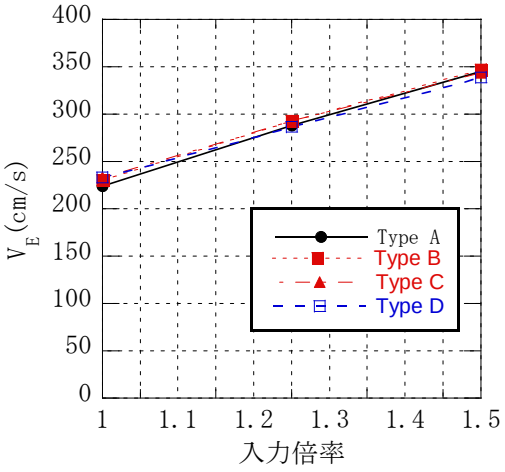
入力地震動	Type A (cm)	Type B (cm)	B/A	Type C (cm)	C/A	Type D (cm)	D/A
N-OSKH02 -AV	820	825	1.01	830	1.01	911	1.11
T-TN-AIC003-AV	2313	2275	0.98	2026	0.88	2392	1.03
T-TN-AIC004-AV	1763	1810	1.03	950	0.54	833	0.47
T-TN-KGIN1F-AV	495	498	1.01	420	0.85	482	0.97
最大値	2313	2275	1.03	2026	1.01	2392	1.11
最大時の地震動	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC004-AV	T-TN-AIC003-AV	N-OSKH02 -AV	T-TN-AIC003-AV	N-OSKH02-AV

表 2.3.4-38　免震周期 4.5 秒　累積変形（長周期地震動入力倍率 1.5）

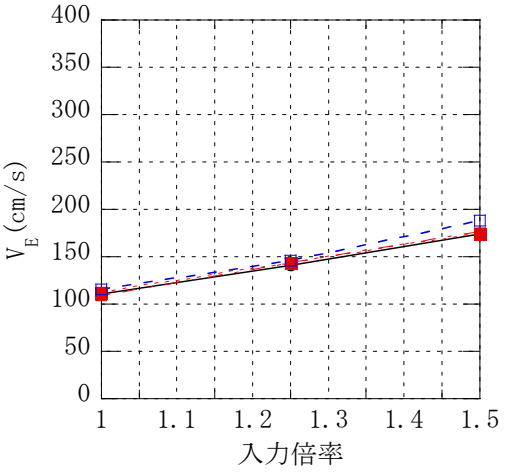
入力地震動	Type A (cm)	Type B (cm)	B/A	Type C (cm)	C/A	Type D (cm)	D/A
N-OSKH02 -AV	808	818	1.01	827	1.02	942	1.17
T-TN-AIC003-AV	2298	2236	0.97	1948	0.85	2224	0.97
T-TN-AIC004-AV	1772	1786	1.01	902	0.51	824	0.47
T-TN-KGIN1F-AV	527	432	0.82	424	0.80	483	0.92
最大値	2298	2236	1.01	1948	1.02	2224	1.17
最大時の地震動	T-TN-AIC003-AV	T-TN-AIC003-AV	N-OSKH02 -AV	T-TN-AIC003-AV	N-OSKH02 -AV	T-TN-AIC003-AV	N-OSKH02-AV



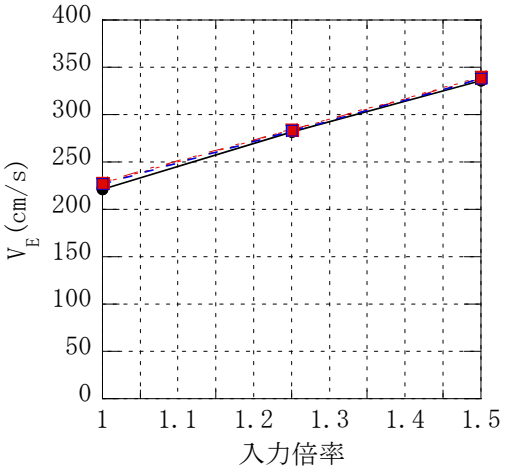
(a)　免震周期 3.5s



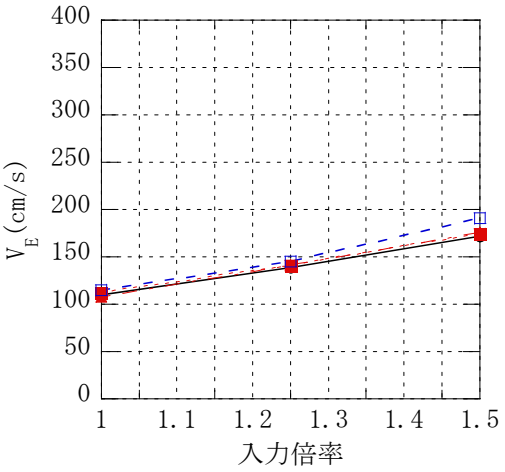
(b)　免震周期 3.5s



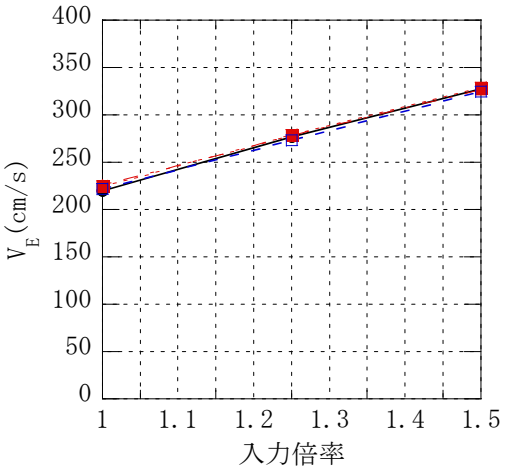
(c)　免震周期 4.0s



(d)　免震周期 4.0s

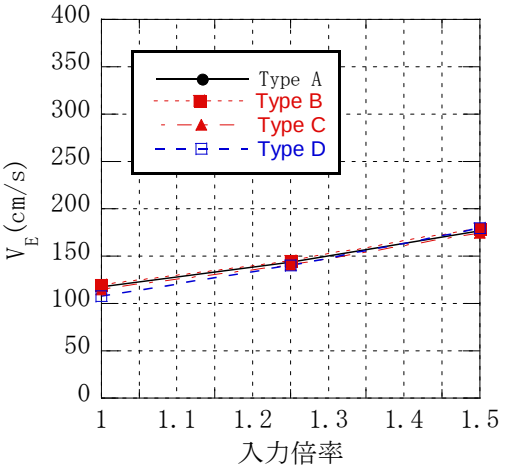


(e)　免震周期 4.5s

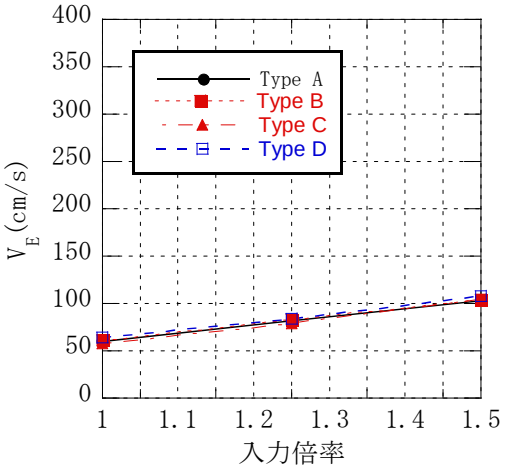


(f)　免震周期 4.5s

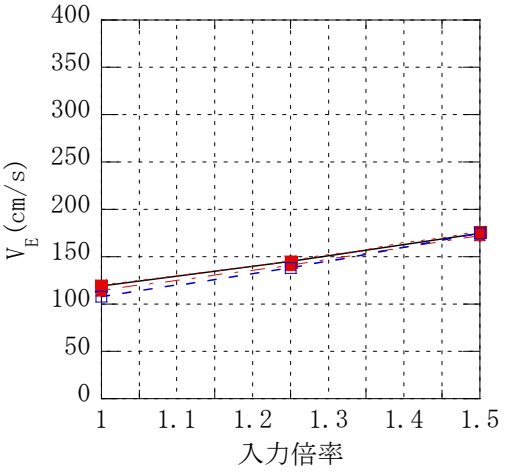
図 2.3.4-12 累積吸収エネルギーによる等価速度
（入力地震波　左：N-OSKH02-AV、右：T-TN-AIC003-AV）



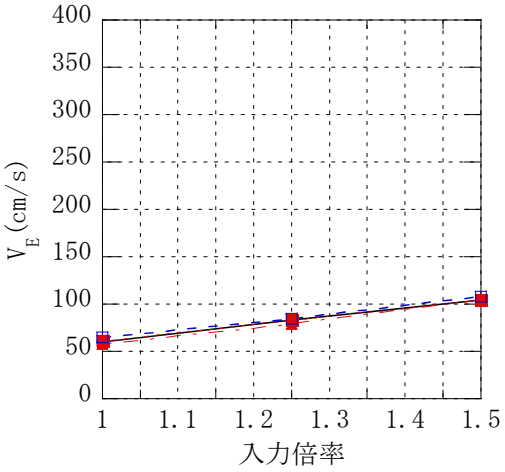
(a)　免震周期 3.5s



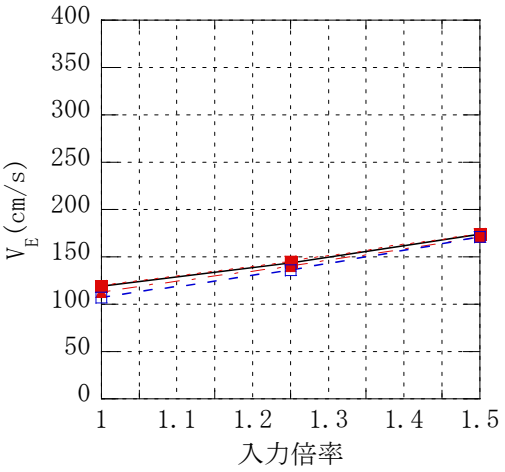
(b)　免震周期 3.5s



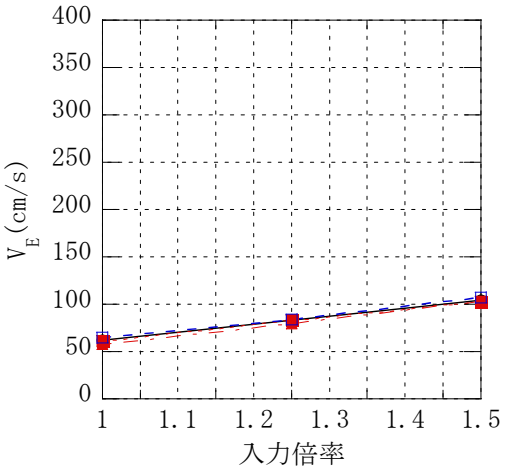
(c)　免震周期 4.0s



(d)　免震周期 4.0s



(e)　免震周期 4.5s



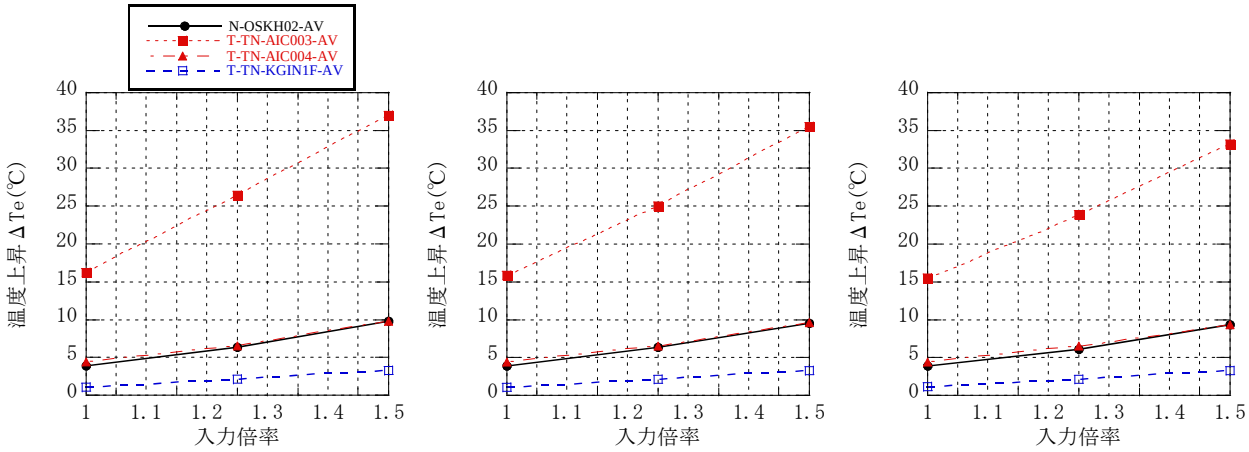
(f)　免震周期 4.5s

図 2.3.4-13 累積吸収エネルギーによる等価速度
（入力地震波　左：T-TN-AIC004-AV、右：T-TN-KGIN1F-AV）

5)　加振による温度上昇

鉛ダンパーの復元力特性 Type B では、エネルギー吸収量に応じ鉛の温度を求めている。復元力特性 Type B を用いた解析ケースにおける地震応答前後の鉛の温度上昇値を図 2.3.4-14 に示す。計算仮定として、ダンパーのエネルギー吸収量がすべて鉛地震の内部エネルギー上昇に消費されるものとする。また、断熱状態と仮定し、鉛各部は均等に温度上昇がなされるものとする。

4 波の入力地震動のなかで、T-TN-AIC003-AV が最も温度上昇量が高く、前項 4)で示した等価速度 V_E の解析結果と対応する。この場合、入力倍率 1.0 で 16℃程度、入力倍率 1.25 で 25℃程度、入力倍率 1.5 で 35℃程度の温度上昇であった。



(a)免震周期 3.5 秒　　(b)免震周期 4.0 秒　　(c)免震周期 4.5 秒

図 2.3.4-14　地震応答終了時の温度上昇（Type B の復元力特性を用いた場合）

2.3.4.3 まとめ

温度依存性および過去に実施された一定振幅正弦波加振試験結果に基づき、鉛ダンパーの繰返しによる耐力劣化を考慮した解析モデルを用い、鉛ダンパーと天然ゴム系積層ゴムからなる免震層をもつ1質点系に長周期地震動を入力波とした応答解析を実施した。本解析結果より以下のことが確認された。

(1)最大変形

ほとんどの建物モデルにおいて、入力地震動4波のうち最も大きな変形となる入力波は、T-TN-AIC003-AVの場合である。耐力結果を考慮しないType Aの復元力特性の場合、T-TN-AIC003-AVの最大変形は入力倍率1.0時に16.1cm、1.25倍時に24.6cm、1.5倍時に33.5cmであった。復元力特性の繰返し劣化による最大変形の増大は、劣化非考慮の場合に対してType B（温度依存性考慮）で1.0～1.18倍、Type C（±400mmの正弦波繰返し劣化特性考慮）では0.80～1.24倍、Type D（±150mmの正弦波繰返し劣化特性考慮）は0.98～1.71倍となっており、Type B < Type C <Type Dの順で最大変位に与える影響が大きくなった。入力の増大とともに劣化非考慮時に対する変形の増大比率は大きくなる傾向を示した。

(2)最大層せん断力

入力倍率が1.0の場合、Type A, B、C、Dの応答せん断力係数はそれぞれ0.086、0.088、0.089、0.095であり、入力倍率が1.5の場合で0.141、0.141、0.139、0.167であった。入力が1.0倍および1.25倍の場合は、Type A、 B、C、Dのいずれの場合においても免震周期3.5秒が最も大きなせん断力を示した。入力が1.5倍に大きくなると、Type Dでは免震周期4.0秒の場合にせん断力が最も大きくなった。

(3)累積変形

最も大きな累積変形となる地震動は、4波のうち最も大きな累積変形となる地震動は、ほとんどの解析モデルにおいてT-TN-AIC003-AVであった。入力倍率が1.0の場合、Type A, B、C、Dで最も大きな累積変形はそれぞれ1634cm、1837cm、1547cm、1222cmであり、入力倍率が1.25では1949cm、2058cm、1759cm、1716cm、入力倍率が1.5の場合で2313cm、2329cm、2088cm、2392cmであった。

(4)エネルギー吸収量

累積吸収エネルギーから求めた等価速度はT-TN-AIC003が最も大きく、入力倍率1.0で230cm/s、入力倍率1.5で300～350cm/sであった。モデルの違いによる等価速度の差はほとんどのケースでわずかであった。

今後は、平成22年度に実施した部材実験の結果と上記モデルの整合性を検証し、必要であれば解析モデルの見直しを検討する。また、地震応答解析では、免震部材特性のばらつきを考慮した場合における応答特性を把握する必要があると考えられる。

参考文献

2.3.4-1) 日本免震構造協会，第4回技術報告会概要集，p.40 ， 2006年11月

2.3.5 天然ゴム系積層ゴム＋オイルダンパー

(1) 各種依存性に関する既往の研究

オイルダンパーは、繰り返し回数や温度上昇によって、性能がほとんど変化しないことが知られている。しかし、吸収エネルギーが大きいと、オイルダンパーの表面温度が上昇し、シールから作動油が漏れるという知見がある。設計限界温度は、シールの材質特性に余裕を見て、表面温度 80℃（メーカーの一例）としているが、100℃程度まで油漏れ等の問題が生じないことが実験により確認されている。[2.3.5-1)]

継続時間の長い長周期地震動は入力エネルギーが大きいため、時刻歴応答で入力エネルギーを算出し、温度上昇予測式を用いて、表面温度が許容値以下に入ることを確認する必要がある。温度上昇の予測において、対象とするオイルダンパーの温度は表面温度とし，その温度分布は常に一様とする。温度上昇の一般式[2.3.5-2)]に用いる代表的な記号を次のように定める。

t	:	温度	[℃]
t_a	:	周囲温度	[℃]
V	:	体積	[m^3]
F	:	表面積	[m^2]
ρ	:	密度	[kg/m^3]
C_P	:	比熱	[kJ / (kg・℃)]
C	:	熱容量 $= V\rho C_P$	[kJ / ℃]
U	:	熱伝達係数	[kJ / (m^2・h・℃)]
Q	:	発熱量	[kJ /h]
τ	:	経過時間	[h]

微小時間 $d\tau$に対象物の温度が dt だけ上がったとすると、この時間内の発熱量 $Q \cdot d\tau$から放熱量 $U(t - t_a) \cdot F \cdot d\tau$を差引いた残りが、$dt$ なる温度上昇に預かった発熱量と考えられることから，次式が成り立つ。

$$Cdt = Qd\tau - U(t - t_a)Fd\tau \tag{2.3.5-1}$$

オイルダンパーの減衰力を F_d[kN]、入力速度を $\dot{x}$ [m/s]とすると、微小時間 $d\tau$に生じる減衰エネルギーE_d [kN・m](= [kJ]) は

$$E_d = F_d \dot{x} \cdot d\tau \tag{2.3.5-2}$$

となる。減衰エネルギーE_dがすべて熱エネルギーに変換されるものとすると、発熱量 Q との関係は次式となる.

$$E_d = Q \cdot d\tau \tag{2.3.5-3}$$

すなわちオイルダンパーの温度 t は、式(2.3.5-2),(2.3.5-3)を用いて式(2.3.5-1)の微分方程式を逐次数値積分することで温度上昇の時刻歴が得られる。

ここで熱容量 C は $C = V\rho C_P$ として与えられ、体積 V を鉄鋼部品と作動油に分類し、鉄鋼部品の体積を Vs、オイル体積を Vo とする。密度ρ、比熱比 C_P も上述と同様にして鉄鋼部品の密度をρ_S、比熱比を Cs とし、またオイル密度をρ_O、比熱比を Co とする。したがって、熱容量 C は式(2.3.5-4)となる。

$$C = V_S\ \rho_S C_S + V_O\ \rho_O C_O \tag{2.3.5-4}$$

熱伝達係数は、オイルダンパーの温度上昇程度であればほとんど変化しないため、一定の値として計算できる。また、地震動による単位時間当たりの入力エネルギーに比べて、放熱エネルギーは小さいので、安全側に考え、放熱を無視した簡略式は、式(2.3.5-5)となる。

$$T_m = \frac{Q_m}{V_S\ \rho_S C_S + V_O\ \rho_O C_O} + t_a \tag{2.3.5-5}$$

(2) 解析条件

1 質点モデルを用いた応答解析を行い、長周期地震動によるオイルダンパーの温度上昇を検討する。免震層は天然ゴム系積層ゴムとオイルダンパーで構成される。天然ゴム系積層ゴムは弾性バネで、オイルダンパーはリリーフ特性を考慮した粘性要素でモデル化した。解析モデルを図 2.3.5-1 に、天然ゴム系積層ゴムの諸元を表 2.3.5-1 に、オイルダンパーの諸元を表 2.3.5-2 示す。

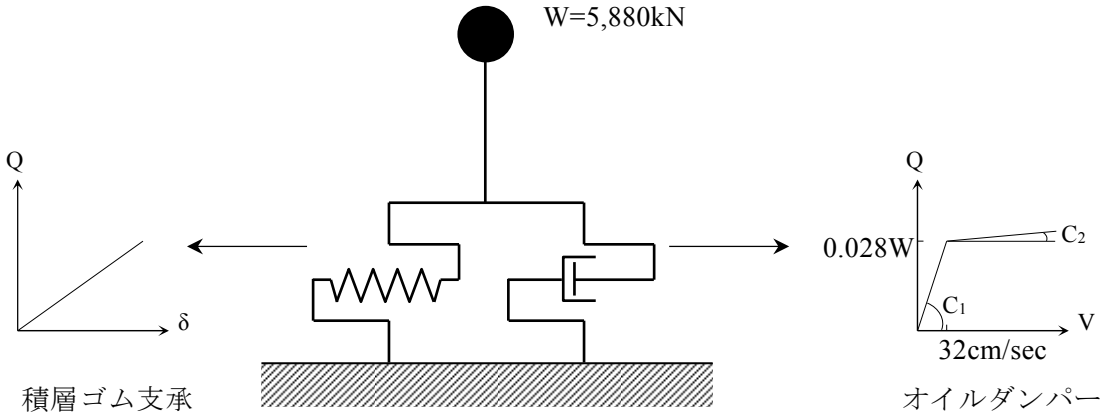


図 2.3.5-1 解析モデル

表 2.3.5-1 天然ゴム系積層ゴムの諸元

径	台数	せん断弾性率 G(N/mm^2)	ゴム総厚(mm) (層×層数)	断面積 (cm^2)	形状係数		水平剛性 (kN/cm)
					一次 S_1	二次 S_2	
Φ700	12	0.44	137.8 (5.3×26)	3,839	31.4	5.1	12.3

表 2.3.5-2 オイルダンパーの諸元

型式	台数	最大減衰力(kN)	減衰係数(kN/kine)		リリーフ荷重(kN)	リリーフ速度(kine)
			C1	C2		
BDS1201600-B-1	2	1,000	25	1.695	800	32

オイルダンパーは繰り返しによる依存性がないものとしてモデル化し、応答解析結果から温度上昇を推定する。温度上昇の計算に用いた入力パラメータを表 2.3-5-3 に示す。

表 2.3.5-3 オイルダンパーの温度上昇計算入力パラーメタ

オイルダンパー型式			BDS1201600-B-1	
鉄鋼部品	体積	V_s	0.0932	[m^3]
	密度	ρ_s	7,850	[kg/m^3]
	比熱	C_s	0.465	[kgJ/kg・℃]
	表面積	F	2,.890	[m^2]
作動油	体積	V_o	0.173	[m^3]
	密度	ρ_o	892	[kg/m^3]
	比熱	C_o	1.821	[kgJ/kg・℃]
温度	初期温度	t_i	20	[℃]
	周囲温度	t_a	20	[℃]
熱伝達係数		U	17.0	[kJ/(h･m^2･℃)]

・鉄鋼部品質量は接油部分の質量とした。

・作動油量はカタログ値を用いた。

・熱伝達係数は、17.0kJ/(h･m^2･℃)とした。(=無風)

・実用油圧ポケットブック [2.3.5-3)]によると、風速 0m/s で熱伝達係数は 17～30kJ/(h･m^2･℃)

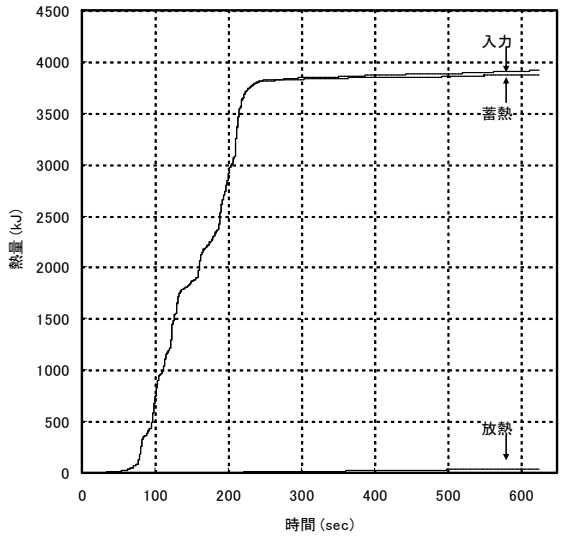
(3) 解析結果

各入力地震動における応答値を表 2.3.5-4 に示す。また、オイルダンパーの放熱を考慮した場合の 1 台当たりの入出力エネルギーの時刻歴を図 2.3.5-2～図 2.3.5-5 に、オイルダンパーの温度上昇の時刻歴を図 2.3.5-6～図 2.3.5-9 に示す。

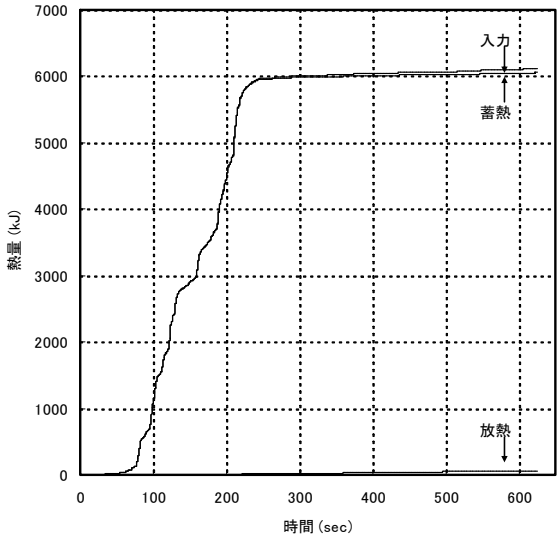
表 2.3.5-4 解析結果

入力地震動	入力倍率	最大応答加速度 (gal)	免震層応答値				オイルダンパー最大温度 (初期温度 20℃)	
			最大応答変形 (cm)	最大応答せん断力係数	累積変形 (m)	吸収エネルギー V_E (cm/sec)	放熱考慮 (℃)	放熱無視 (℃)
N-OSKH02-AV	1.00	61.1	22.4	0.062	16.9	163.1	26.2	26.3
	1.25	76.4	28.1	0.078	21.2	203.9	29.7	29.8
	1.50	95.3	34.9	0.097	25.5	244.6	34.0	34.2
T-TN-AIC003-AV	1.00	70.0	23.3	0.071	20.9	206.4	30.0	30.1
	1.25	98.2	32.7	0.100	26.6	257.9	35.6	35.8
	1.50	138.3	47.4	0.141	33.1	310.4	42.6	42.8
T-TN-AIC004-AV	1.00	50.2	17.2	0.051	11.8	126.7	23.8	23.8
	1.25	62.8	21.5	0.064	14.7	158.3	25.9	25.9
	1.50	78.5	26.9	0.080	17.8	190.0	28.5	28.6
T-TN-KGIN1F-AV	1.00	35.6	13.3	0.036	13.6	112.3	23.0	23.0
	1.25	44.5	16.6	0.045	17.0	140.4	24.6	24.7
	1.50	53.4	20.0	0.054	20.3	168.4	26.7	26.7

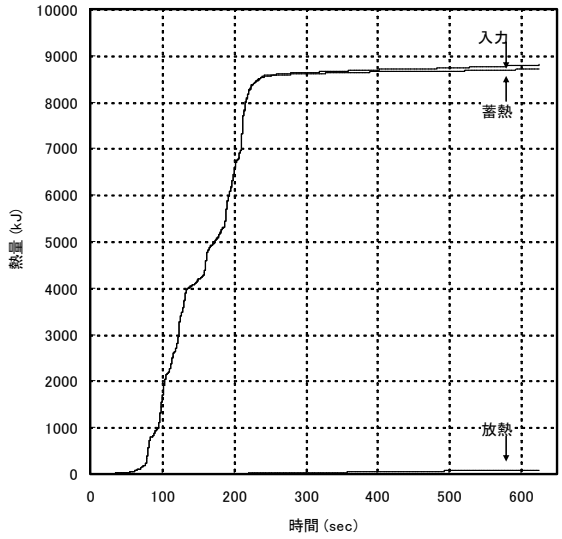
・最大応答せん断力係数は、天然ゴム系積層ゴムが負担するせん断力と、オイルダンパーが負担するせん断力の和から求めた。



入力倍率 1.00 倍

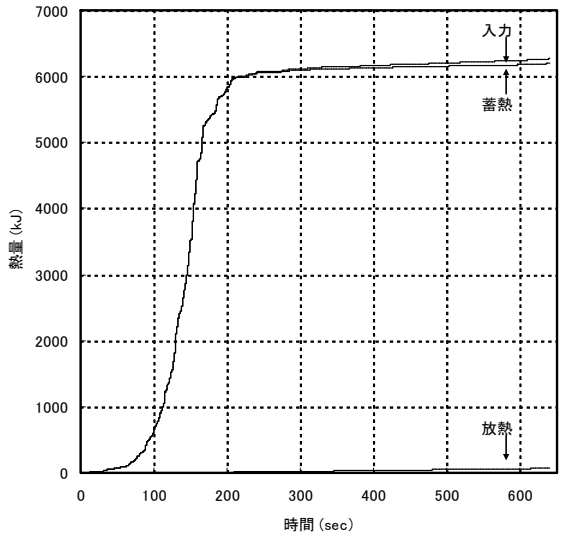


入力倍率 1.25 倍

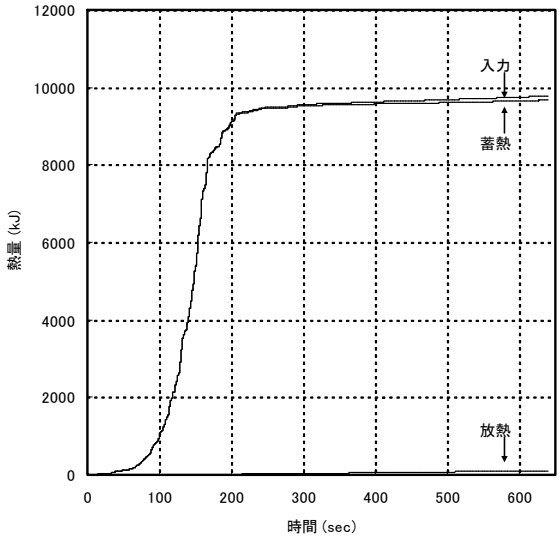


入力倍率 1.50 倍

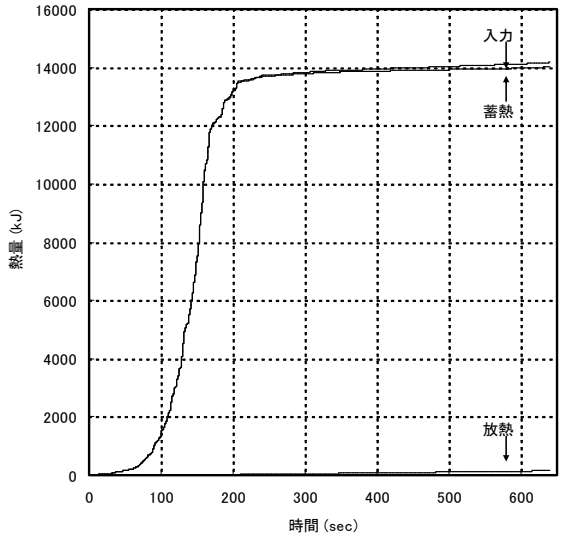
図 2.3.5-2 オイルダンパー 1 台当たりの入出力エネルギーの時刻歴
（N-OSKH02-AV　放熱考慮）



入力倍率 1.00 倍

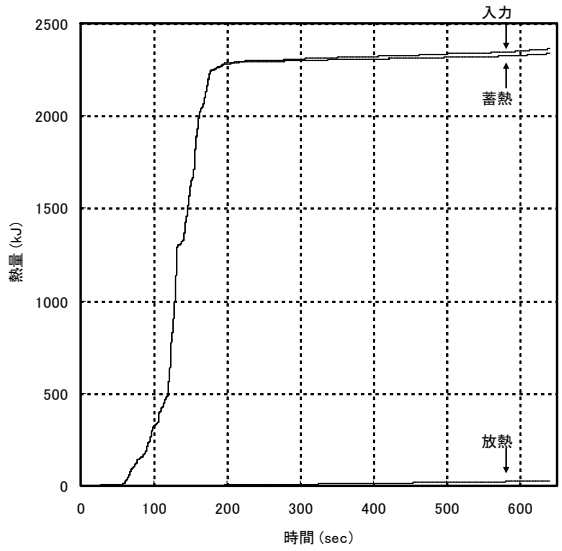


入力倍率 1.25 倍

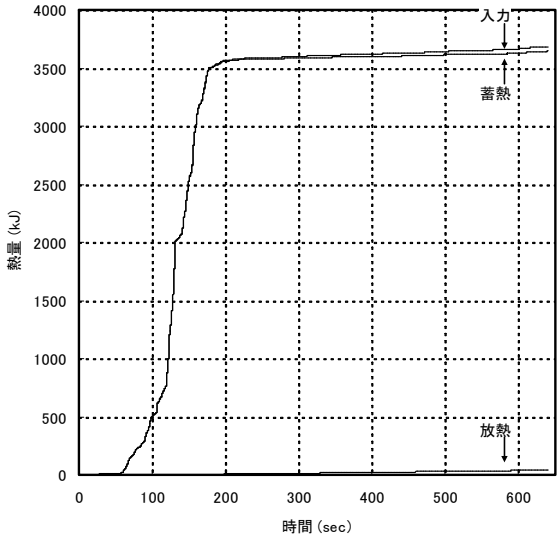


入力倍率 1.50 倍

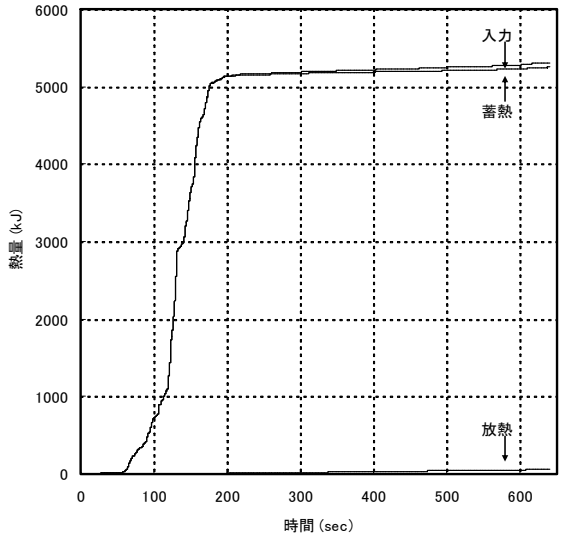
図 2.3.5-3 オイルダンパー 1 台当たりの入出力エネルギーの時刻歴
（T-TN-AIC003-AV　放熱考慮）



入力倍率 1.00 倍

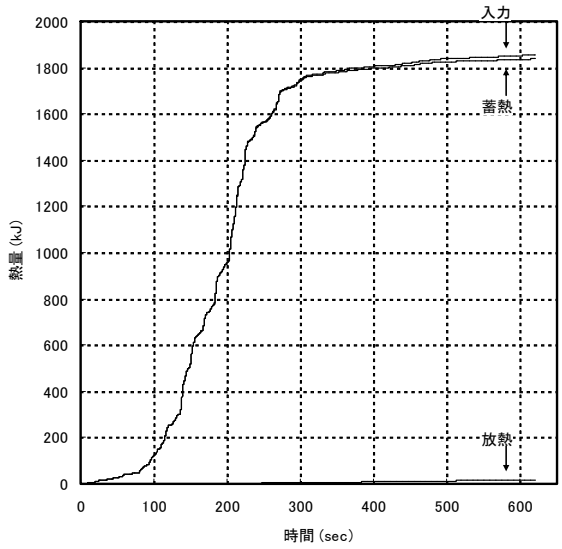


入力倍率 1.25 倍

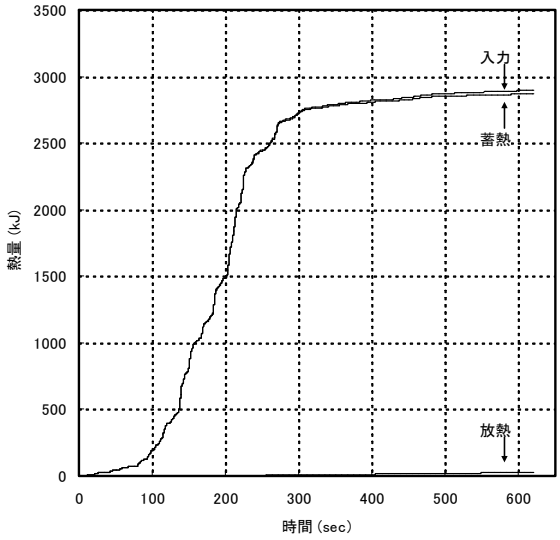


入力倍率 1.50 倍

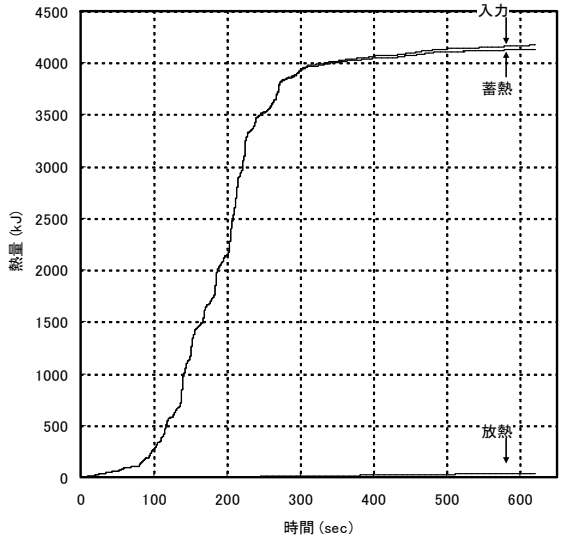
図 2.3.5-4 オイルダンパー 1 台当たりの入出力エネルギーの時刻歴
（T-TN-AIC004-AV　放熱考慮）



入力倍率 1.00 倍

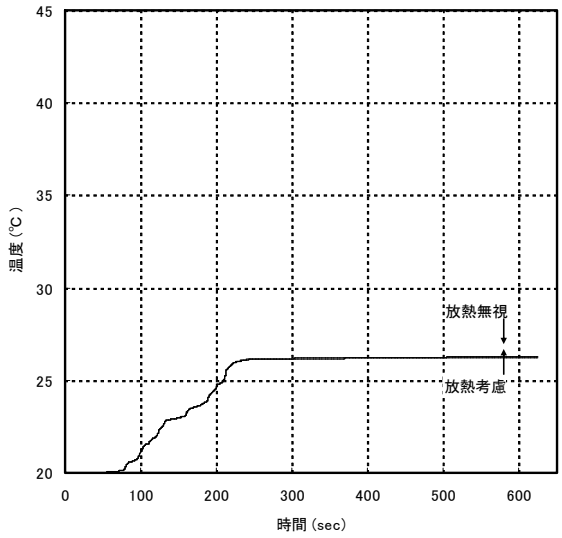


入力倍率 1.25 倍

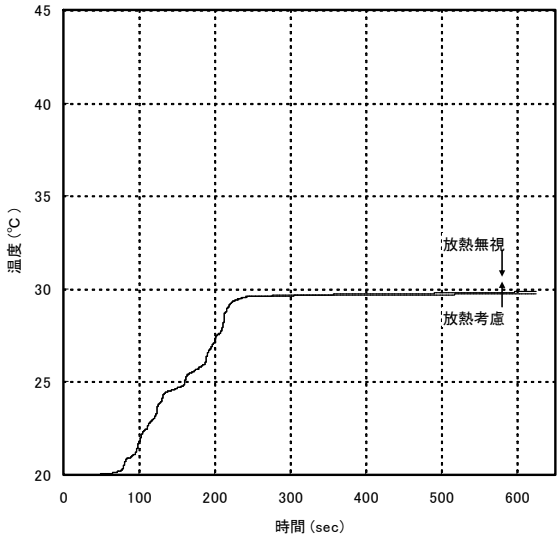


入力倍率 1.50 倍

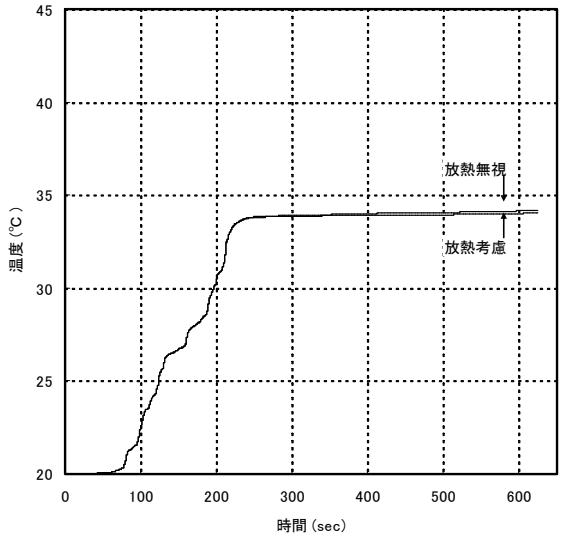
図 2.3.5-5 オイルダンパー 1 台当たりの入出力エネルギーの時刻歴
（T-TN-KGIN1F-AV　放熱考慮）



入力倍率 1.00 倍

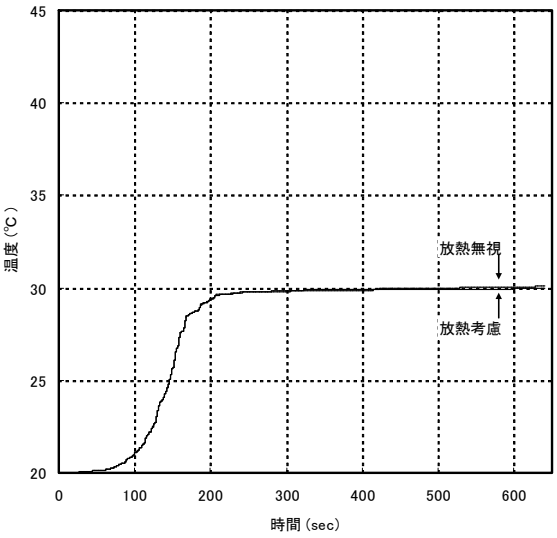


入力倍率 1.25 倍

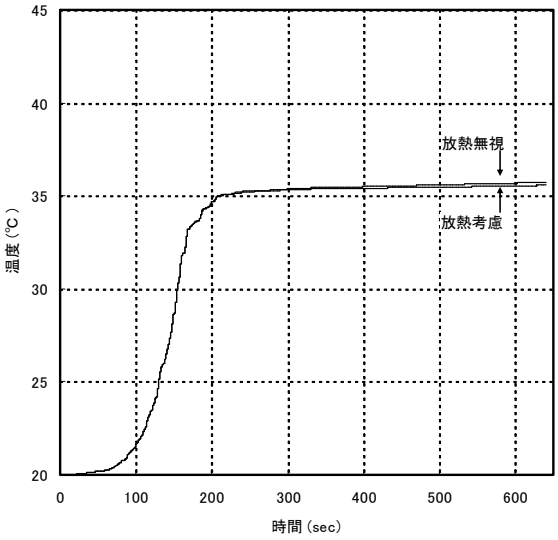


入力倍率 1.50 倍

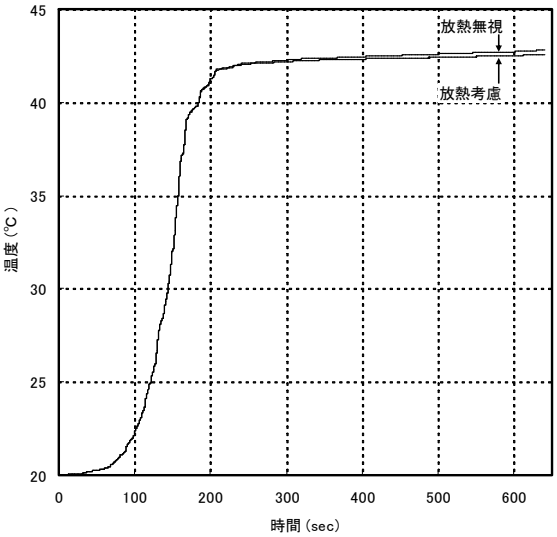
図 2.3.5-6 オイルダンパーの温度上昇の時刻歴（N-OSKH02-AV）



入力倍率 1.00 倍

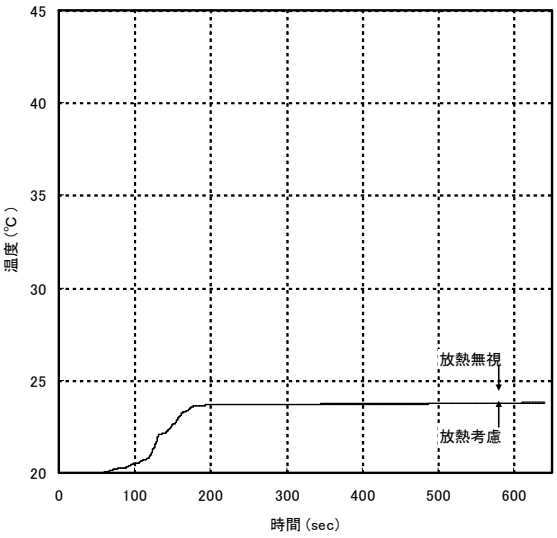


入力倍率 1.25 倍

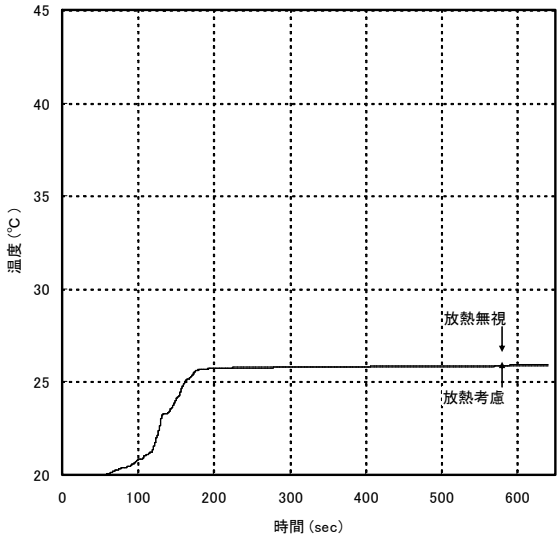


入力倍率 1.50 倍

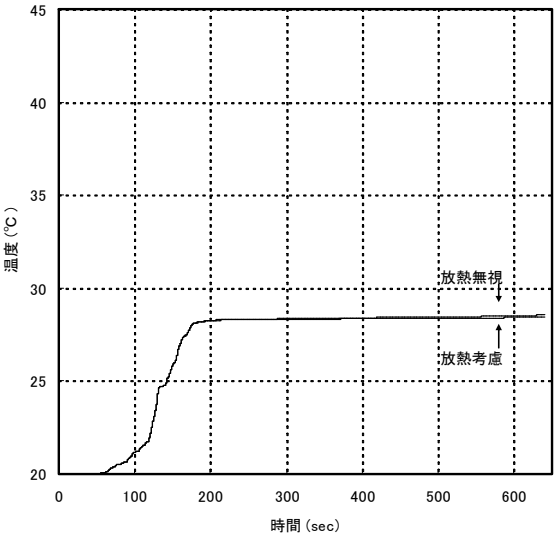
図 2.3.5-7 オイルダンパーの温度上昇の時刻歴（T-TN-AIC003-AV）



入力倍率 1.00 倍

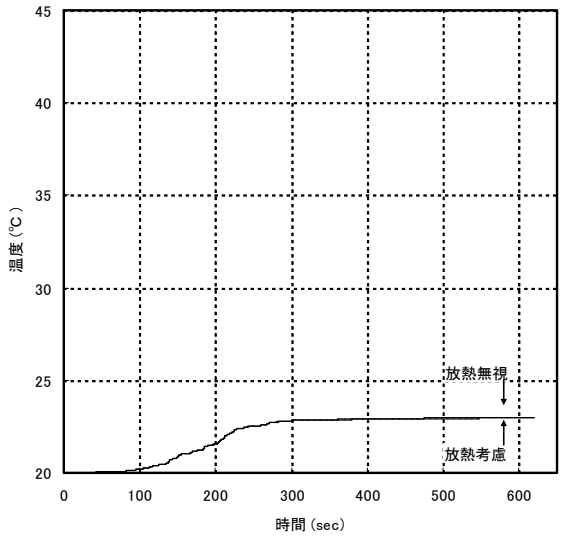


入力倍率 1.25 倍

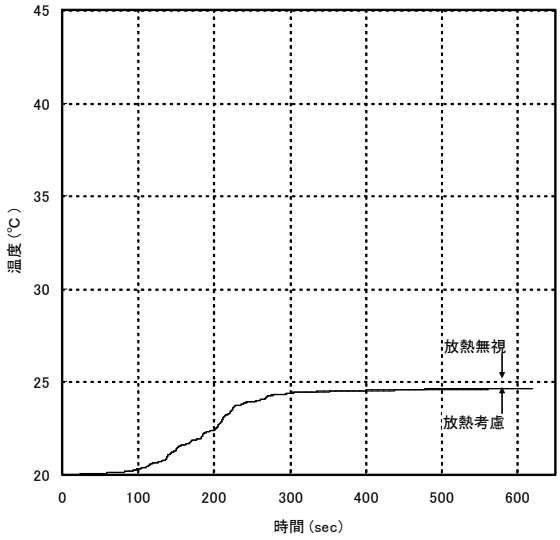


入力倍率 1.50 倍

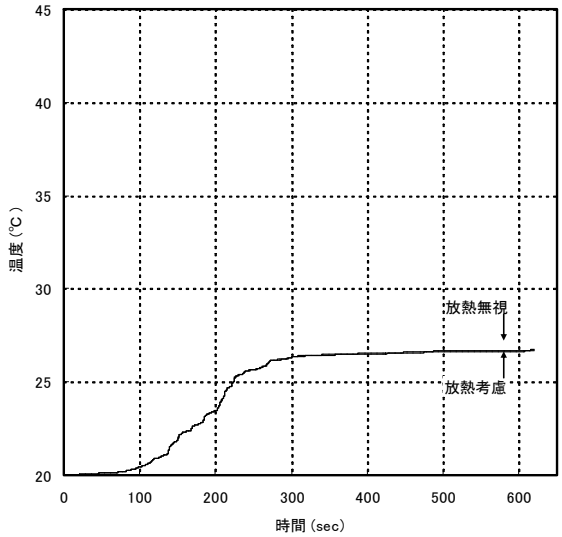
図 2.3.5-8 オイルダンパーの温度上昇の時刻歴（T-TN-AIC004-AV）



入力倍率 1.00 倍



入力倍率 1.25 倍



入力倍率 1.50 倍

図 2.3.5-9 オイルダンパーの温度上昇の時刻歴（T-TN-KGIN1F-AV）

(4) まとめ

免震層が天然ゴム系積層ゴムとオイルダンパーで構成された建物を 1 質点系でモデル化し、地震動応答解析を行った。オイルダンパーの表面温度が最も高くなったのは、入力地震動が T-TN-AIC003-AV で入力倍率が 1.50 倍のケースで 、外気温度が 20℃の場合、放熱を考慮した検討では 42.6℃、放熱を無視した検討では 42.8℃となった。設計限界温度は 80℃であるので、検討した条件では温度上昇が問題になることは無いと思われる。

また、温度上昇の計算では、放熱を無視した値は、放熱を考慮した値と大きく違わなかった。入力地震動が T-TN-AIC003-AV で入力倍率が 1.50 倍のケースでは、放熱エネルギーは入力エネルギーの約 1%であった。長周期地震動によるオイルダンパーの温度上昇の検討に関しては、放熱を考慮しない簡易式で評価した値は、放熱を考慮した値と大きく違わず、値も安全側であるため、使用して問題ないと考えられる。

参考文献

2.3.5-1) 社団法人日本免震構造協会編：免震構造－「部材の基本から設計・施工まで」、オーム社、pp.164-165

2.3.5-2) 千輝淳二：伝熱計算法、工学図書、pp.214-215

2.3.5-3) 社団法人日本フルードパワー工業会編：実用油圧ポケットブック（2008 年版）、p.354

2.3.6 天然ゴム系積層ゴム＋弾性すべり支承（高摩擦）

(1) 各種依存性に関する既往の研究

弾性すべり支承（高摩擦）に関する各種依存性に関する既往の研究としては、日比野らによる研究[2.3.6-1) 2.3.6-,2)]が知られている。以下にその概要を示す。

日比野らは大口径の弾性すべり支承試験体についてその力学的特性の把握および地震時安全性を確認するための地震応答解析に用いる力学モデルの構築を目的として、高面圧下における動的載荷実験を実施した[2.3.6-14)～2.3.6-16)]。

試験体は弾性すべり支承およびすべり板（図 2.3.6-1）とで構成される。表 2.3.6-1 に試験体の仕様一覧を示す。

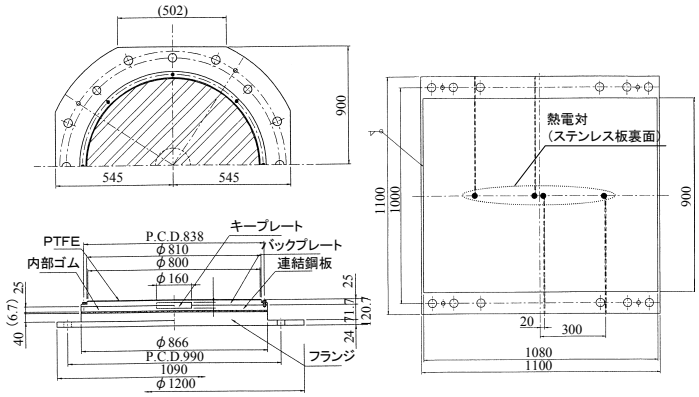


図 2.3.6-1 支承試験体の外観例（B-800）

表 2.3.6-1 試験体の仕様

支承タイプ		T-600	T-800	B-600	B-800
積層ゴム	ゴム部材質	クロロプレンゴム		天然ゴム	
	直径(mm)	600	800	600	800
	せん断弾性係数(N/cm^2)	78.5		117.6	
	ゴム厚(mm)	5.0	6.7	5.0	6.7
	1次形状係数	30.0	29.9	30.0	29.9
	2次形状係数	120.0	119.4	120.0	119.4
	支承せん断剛性(kN/mm)	44.4	58.9	66.5	88.2
連結鋼板	材質	SS400		SS400	
	厚さ(mm)	40.0		20+20	25+25
すべり材	材質	充填材入り PTFE		充填材入り PTFE	
	直径(mm)	600	800	600	800
	厚さ(mm)	2		2	
試験体数		3	1	3	1

載荷は変位制御とし、基本摩擦特性および地震時の応答履歴特性を把握するため、定常波およびランダム波による載荷を行った。正弦波繰り返し載荷では標準面圧 σ=20N/mm^2、標準速度 v=20cm/s、標準すべり変位振幅 d(0-p.)を 100mm とし、載荷装置の性能範囲内で面圧 5～40N/mm^2、載荷速度 0.1～60cm/s、すべり変位振幅 30～100mm の間で複数の試験条件を設定した。

ランダム波載荷では、弾性すべり支承と積層ゴムを併用した免震建築物のモデルに対し、観測地震動波形（Kobe(1995) NS、 El Centro(1940) NS、 Hachinohe (1968) EW）を入力波とする地震応答解析により求められた免震層の変位応答波を用いた。

動摩擦係数の評価では、正弦波載荷における変位原点付近の荷重を読み取ることにより、三角波等の速度一定載荷と同等の結果を得ることができるものと考えた。具体的には国土交通省告示（第 2010 号）に準拠し、次式により定義し、n サイクル目の動摩擦係数 $\bar{\mu}_n$ を載荷サイクル毎に往復の平均値で表示した。

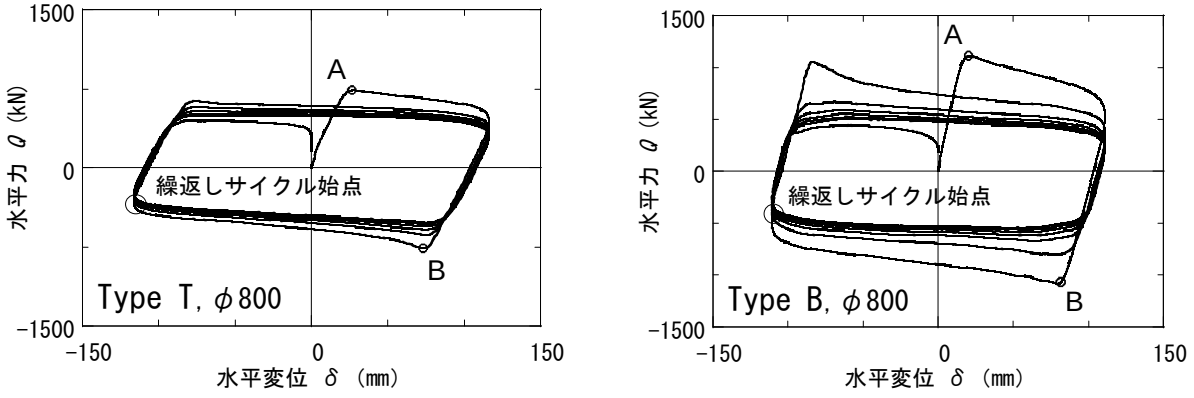
$$\bar{\mu}_n = (Q_n^+ / P_n^+ - Q_n^- / P_n^-) / 2 \qquad (2.3.6\text{-}1)$$

ここに、Q_n^+、 Q_n^-は n サイクルめの水平力－水平変位関係における正負の切片荷重、P_n^+、P_n^-は同履歴点の鉛直力である。

○正弦波載荷による摩擦係数の各種依存性

・水平力－水平変位関係

図 2.3.6-2 の A、B 点などに見られるように、一連の試験ではすべり始め部分で摩擦が極大となる点が確認された。弾性すべり支承ではすべり始めで速度を持つため、厳密にはこの摩擦は静摩擦と異なるが、載荷開始直後の初期サイクルほど、また載荷速度が増すほど大きな値を示すなど、繰り返しおよび速度などの動的パラメータに対する依存性が確認された。そこで、以下ではすべり始め部分の摩擦係数を立ち上がり摩擦係数 $\hat{\mu}_m$（添字は載荷開始からｍ番目を表し、図においては A,B,C...で表示する）と呼び、その各依存性を $\bar{\mu}_n$ と併せて考察することにする。$\hat{\mu}_m$はすべり初期ほど特徴的な性質を示すこと、$\bar{\mu}_n$ については前述の国土交通省告示では摩擦係数の基準値を繰り返し３サイクルめで規定していることから、以下の検討では $\hat{\mu}_m$および $\bar{\mu}_n$ の代表値として $\hat{\mu}_{1.5}$（$\hat{\mu}_1$、$\hat{\mu}_2$の平均値で定義する）および $\bar{\mu}_3$ を用いる。また、$\hat{\mu}_m$と $\bar{\mu}_n$ を総称して摩擦係数 μ と表現する。



(a) σ =10N/mm^2 ,v=20cm/s　　(b) σ =20N/mm^2 ,v=40cm/s

図 2.3.6-2 正弦波載荷による水平力－水平変位関係の一例

1) 摩擦係数の面圧依存性

図 2.3.6-3 に標準速度（v =20 cm/s）における面圧 σ による $\hat{\mu}_{1.5}$および $\bar{\mu}_3$ の変化を示す。全タイプとも同一面圧では $\hat{\mu}_{1.5} > \bar{\mu}_3$ となっており、$\hat{\mu}_{1.5}$、$\bar{\mu}_3$ ともに面圧の上昇に伴い値が減少する共通の傾向がみられる。

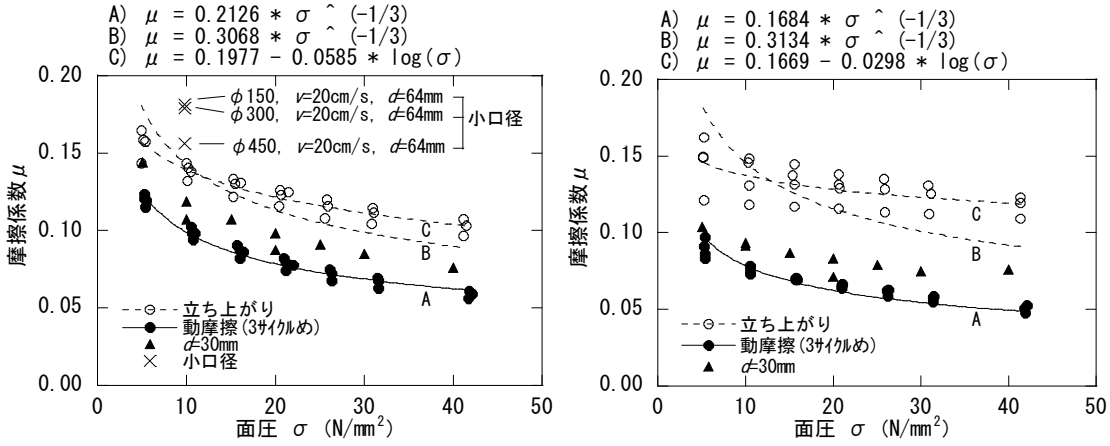
図 2.3.6-3 には $\hat{\mu}_{1.5}$および $\bar{\mu}_3$ 各々の回帰結果を併せて示す。最初の回帰関数としては、トライボロジー理論に基づく荷重依存型モデル[2.3.6-13)]に準じて次式を用いた。

$$\mu = a\sigma^{(-1/3)} \qquad (5 \leqq \sigma \leqq 42\ [\mathrm{N/mm^2}]) \qquad (2.3.6\text{-}2)$$

ここに a は回帰係数である。$\hat{\mu}_{1.5}$ については特に 20N/mm^2 以上の高面圧下における回帰結果に改善の余地があるため、種々の関数形を検討した結果、最も適合度の高い対数関数型の次式を選定した。

$$\mu = a + b \cdot \log(\sigma) \qquad (5 \leqq \sigma \leqq 42\ [\mathrm{N/mm^2}]) \qquad (2.3.6\text{-}3)$$

ここに a、b は回帰係数である。式(2.3.6-3)による $\hat{\mu}_{1.5}$ の回帰結果では、全ての面圧領域で式(2.3.6-2)による結果に比べて改善が図られている。



(a) Type T　　(b) Type B

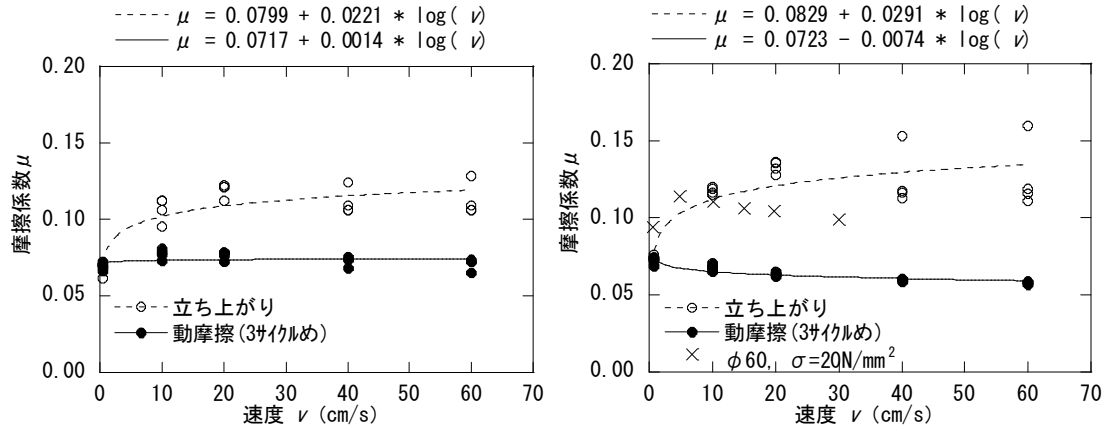
図 2.3.6-3 摩擦係数の面圧依存性（v=20cm/s）

2) 摩擦係数の速度依存性

図 2.3.6-4 に標準面圧（σ =20N/mm^2）における速度 v による $\hat{\mu}_{1.5}$ および $\bar{\mu}_3$ の変化を示す。同図では $\hat{\mu}_{1.5}$ は瞬間速度、$\bar{\mu}_3$ は一定速度に対する関係で示している。図 2.3.6-4 には、次式の対数関数型による回帰結果を併せて示す。

$$\mu = a + b \cdot \log(v) \qquad (0.1 \leqq v \leqq 60\ [\mathrm{cm/s}]) \qquad (2.3.6\text{-}4)$$

ここに a、b は回帰係数である。



(a) Type T　　(b) Type B

図 2.3.6-4 摩擦係数の速度依存性（σ=20N/mm^2）

3) 載荷振幅依存性

図 2.3.6-3 には、標準条件の d=100mm に加え載荷振幅による影響を把握するために行った d=30mm の結果も示した。試験では振幅の影響のみを調べるため、載荷振動数を変更し載荷振幅によらず同一の載荷速度・面圧となるようにした。d=30mm の $\bar{\mu}_3$ は d=100mm に比べて総じて大きく、その比はタイプ毎の平均値で 1.05～1.54 となっている。

4) 摩擦係数の繰り返し依存性

標準条件（v =20 cm/s、σ=20N/mm^2）における繰り返し依存性確認試験での繰り返し回数 n および累積すべり変位 S=Σd に対する $\bar{\mu}$ およびすべり板温度 T の変化を図 2.3.6-5 に示す。載荷開始直後は T が載荷前の管理温度（30℃）から急激に上昇、$\bar{\mu}$ は初期の値から急激に下降する。その後、T の上昇および $\bar{\mu}$ の下降傾向は次第に直線的になる。これを T-$\bar{\mu}$ 関係（図 2.3.6-6）で表すと、$\bar{\mu}$ は T の上昇に伴いほぼ直線的に低下する傾向が確認できる。

図 2.3.6-7 には正弦波載荷試験（d=100mm、30mm）による摩擦係数の累積すべり変位依存性の一例を示す。$\hat{\mu}$ は S が小さいうちは最大速度が大きいほど大きな値を示すが、S が大きくなると次第に減少し、v<1cm/s の準静的なケースの $\hat{\mu}$ にほぼ漸近する。

$$\mu = a + b \cdot \log S \qquad (40 \leqq S \leqq 2196\ [\mathrm{mm}]) \qquad (2.3.6\text{-}5)$$

ここに a、b は回帰係数である。

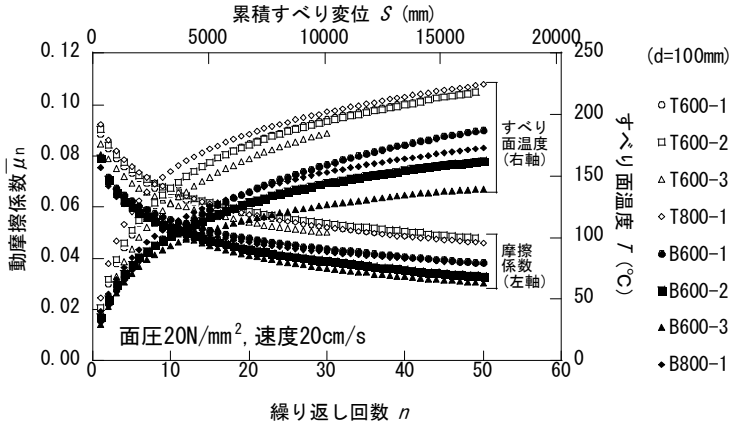


図 2.3.6-5 摩擦係数の繰り返し依存性（Type T&B, σ =20N/mm2, v=20cm/s）

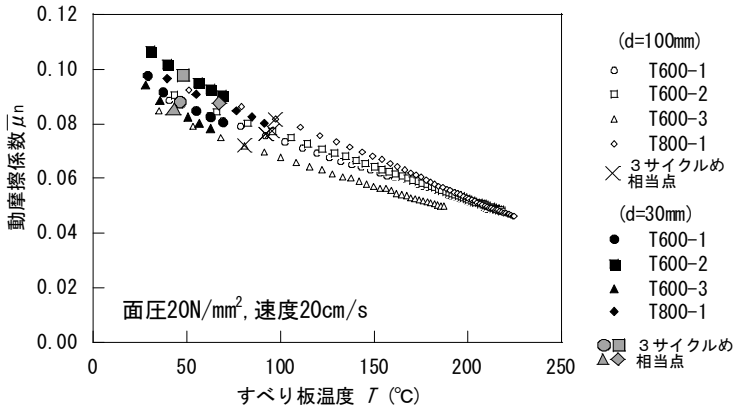
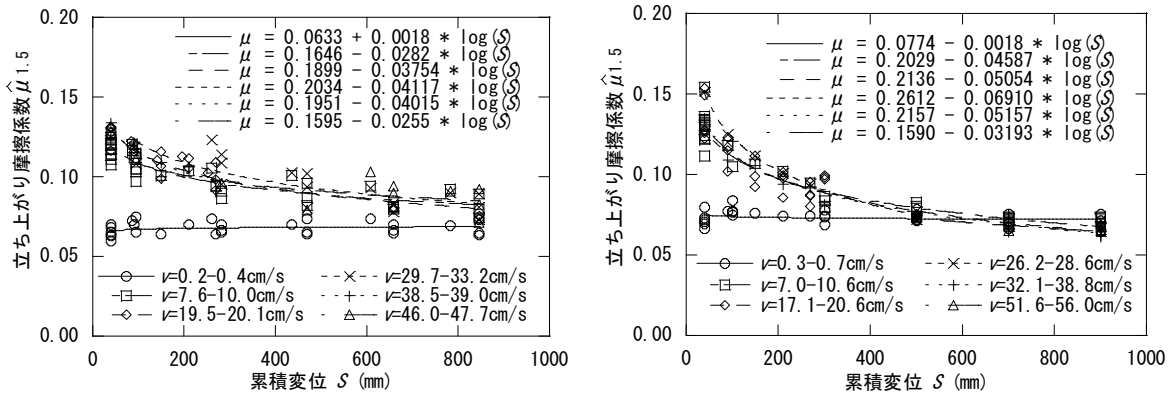
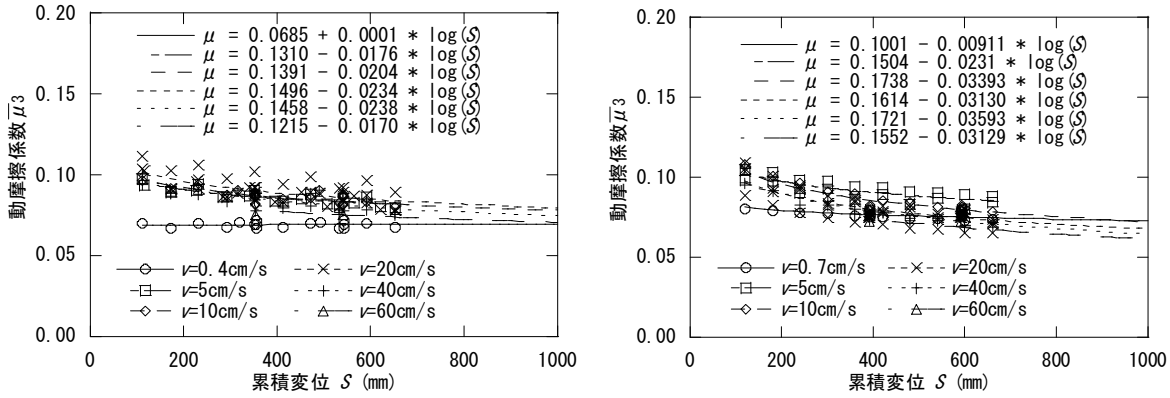


図 2.3.6-6 摩擦係数のすべり板温度依存性（Type T, σ =20N/mm^2, v=20cm/s）



i) Type T　　ii) Type B

(a) 立ち上がり摩擦係数 $\hat{\mu}_{1.5}$



i) Type T　　ii) Type B

(b) 動摩擦係数 $\bar{\mu}_3$

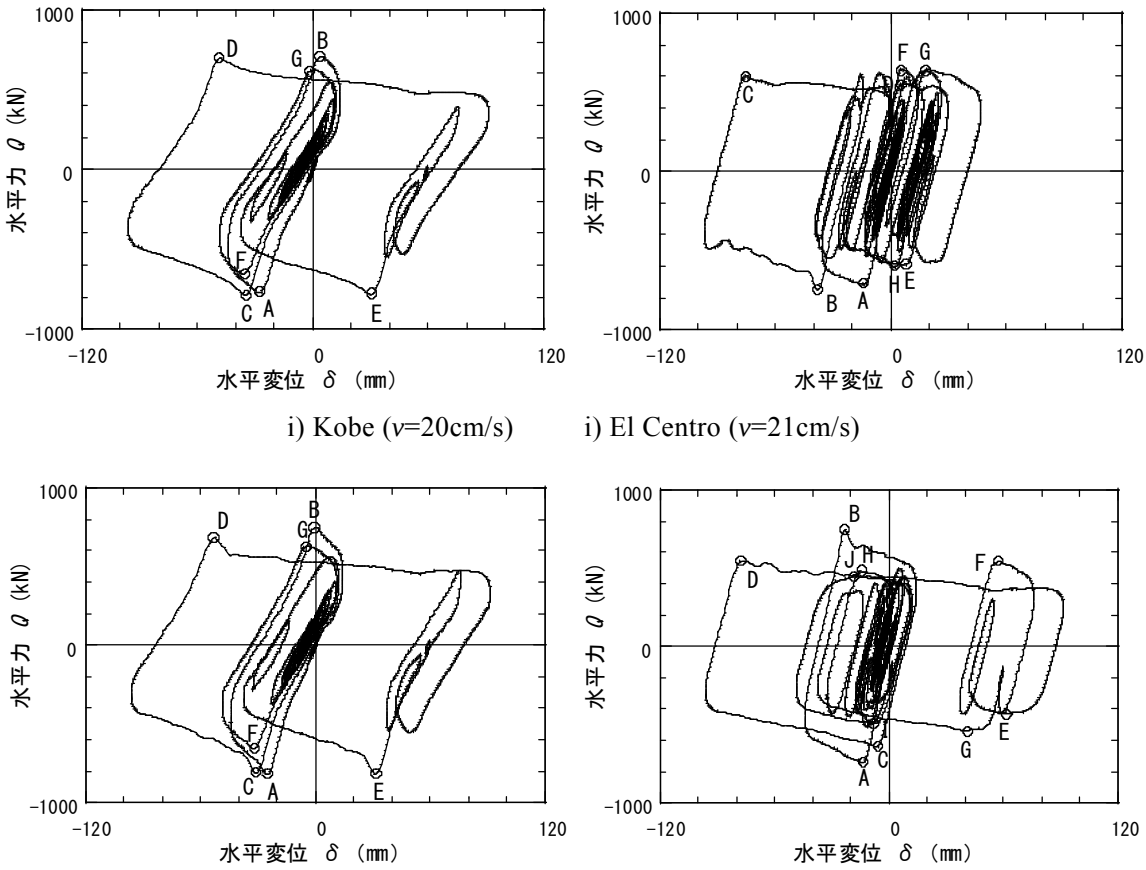
図 2.3.6-7 正弦波載荷（d=100mm,30mm）による累積すべり変位依存性（σ =20N/mm^2）

○地震応答波載荷による摩擦特性

1) 荷重－水平変位関係にみられる傾向

図 2.3.6-8 に標準面圧（σ=20N/mm^2）下のランダム波載荷における水平力－水平変位関係の一例を示す。

図 2.3.6-8 (a)i)と ii)には、同じ Kobe 応答波を用い最大速度 v_{max} を変えて載荷した結果を示す。v_{max} が大きいほどすべり始め部分の履歴が尖鋭になる傾向があり、速度条件が立ち上がり摩擦の大小に影響を与えていることが分かる。以下では、ランダム波載荷における立ち上がり摩擦係数を $\hat{\mu}_m^{(eq)}$とし、正弦波載荷による $\hat{\mu}_m$ と区別して扱う。



i) Kobe (v=20cm/s)　　i) El Centro (v=21cm/s)

ii) Kobe (v=52cm/s)　　ii) Kobe (v=52cm/s)

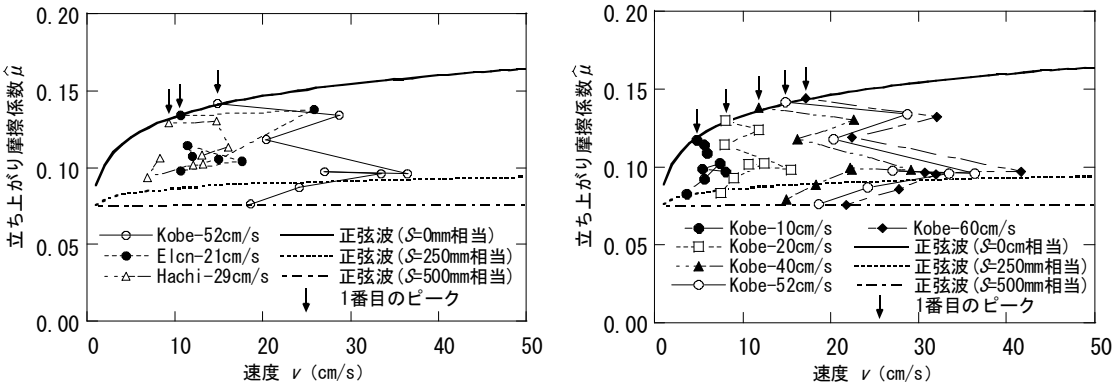
(a) Type T（φ600-2）　(b) Type B（φ600-1）

図 2.3.6-8 ランダム波載荷による水平力－水平変位関係（φ600,σ=20N/mm^2）

2) 載荷中の摩擦係数の変化

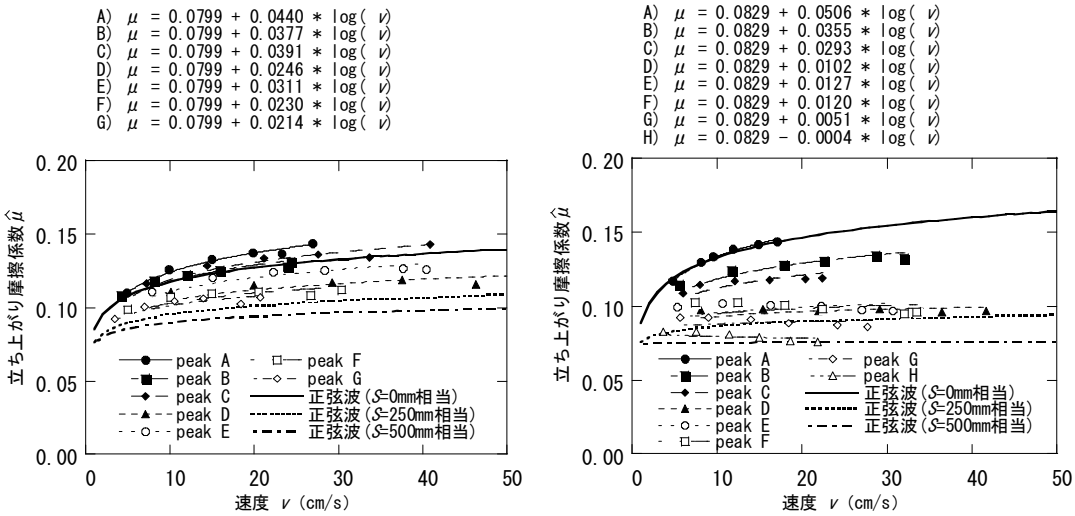
図 2.3.6-9 は、図 2.3.6-8 の履歴上に丸印を付したすべり始め部分の点で水平力と鉛直力の比から立ち上がり摩擦係数 $\hat{\mu}_m^{(eq)}$を読み取り、正弦波載荷と同様に求めた瞬間速度 v（計算時間刻みを 0.002 秒とした）との関係として示したものである。同図中のプロットは 3 体(φ600) の平均値を表し、折れ線は各点を発生時刻順に結んだものである。各入力地震波とも、図中に矢印で示す 1 番目のピークで決まる $\hat{\mu}_1^{(eq)}$が最大となっている。図 2.3.6-9 (a)に示すように、いずれの入力地震波においてもすべりを繰返すにつれて $\hat{\mu}_m^{(eq)}$が次第に小さくなる傾向があるが、単調に減少するだけでなく何らかの原因により $\hat{\mu}_m^{(eq)}$が再び大きくなる現象も見られる。

図 2.3.6-9 (b)に示す各ケースでは、最大速度の調整に時間スケールを変更する方法をとっているため、各ケースの m 番目のピークにおける累積すべり変位量 $S_m^{(eq)}$はケース間で互いにほぼ等しいものと考えられる。そこで、 図 2.3.6-10 には各ケースの m 番目のピークを改めて系列化して示した。各系列のデータは明瞭な速度依存性を示しており、$\hat{\mu}_m$ と同様に対数関数的な傾向を示す。



(a) 入力地震波による比較（応答原波）　　(b) 最大速度による比較（Kobe）

図 2.3.6-9 ランダム波載荷による立ち上がり摩擦係数の変化（Type B, 600Φ,σ=20N/mm^2）



(a) Type T　　(b) Type B

図 2.3.6-10 ランダム波載荷による立ち上がり摩擦係数の速度依存性（Kobe, φ600, σ=20N/mm^2）

○弾性すべり支承の摩擦特性モデルの提案

1) 摩擦係数の各依存性のモデル化

支承の摩擦係数を規定する変数を時刻 t における面圧 σ(t)、速度 v(t)、累積すべり変位 S(t)とする場合、摩擦係数は、

$$\mu(t) = f\left(\sigma(t), v(t), S(t)\right) \qquad (2.3.6\text{-}6)$$

と表すことができる。ここでは簡便化のため、標準面圧 $\sigma_{std.}$ [N/mm^2]について得られた回帰式に対して、面圧条件が σ [N/mm^2]に変化する場合の補正係数 α を導入して、摩擦係数を

$$\mu(t) = \alpha[\sigma/\sigma_{std.}]\cdot\mu'(t)[\sigma_{std.}] \qquad (2.3.6\text{-}7)$$

のように表現できるものと仮定し、まず

$$\mu'(t)[\sigma_{std.}] = f\left(v(t), S(t)\right) \qquad (2.3.6\text{-}8)$$

を v、S の２変数回帰分析により求める。摩擦係数の速度、累積すべり変位依存性は対数関数により概ね良好に回帰できること、図 2.3.6-7 や図 2.3.6-10 に示したように v-μ 依存関係の回帰係数は S の変化に、S -μ 依存関係の回帰係数は v の変化に伴って変動することを考慮し、以下の

関数型を用いる。

$$\mu'(t) = a \cdot (\log v(t) - \log v_0) \cdot (\log S(t) - \log S_0) + b \qquad (2.3.6\text{-}9)$$

ここに a、b は回帰係数である。v、S 軸を対数軸として、式(2.3.6-9)で表される曲面を３次元座標空間に表現したものを図 2.3.6-11 に示す。式(2.3.6-9)の定数 v_0、S_0 は、μ が一定値 b となる速度、累積すべり変位を表す。

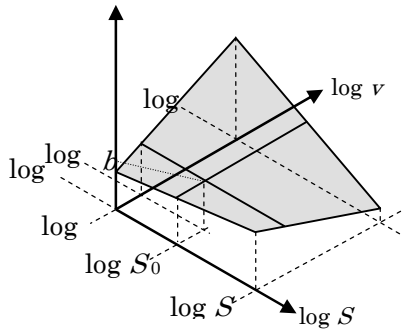


図 2.3.6-11 速度・すべり変位依存性の面回帰モデル

表 2.3.6-2　回帰係数一覧

タイプ	摩擦係数	面圧 σ (N/mm²)	回帰パラメータ					使用データ範囲			
			a	b	v_0 (cm/s)	S_0 (mm)	重回帰係数 R	v_{min} (cm/s)	v_{max} (cm/s)	S_{min} (mm)	S_{max} (mm)
T	立ち上がり	10	−0.0240	0.0904	0.545	1684	0.850	0.1	60.6	40	846
		20	−0.0179	0.0684	0.293	2562	0.854	0.2	47.7	40	846
	動摩擦	10	−0.0207	0.0901	1.412	1470	0.521	0.4	60.0	110	2050
		20	−0.0131	0.0712	0.255	1638	0.742	0.4	60.0	112	2048
B	立ち上がり	10	−0.0364	0.0894	0.544	539	0.916	0.3	56.0	40	900
		20	−0.0314	0.0720	0.345	626	0.916	0.3	56.0	40	900
	動摩擦	10	−0.0195	0.0892	0.296	511	0.732	0.7	60.0	120	2196
		20	−0.0148	0.0811	0.100	398	0.848	0.7	60.0	120	2195

2) 水平力―水平変位関係のシミュレーション

式(2.3.6-9)および表 2.3.6-2 による $\hat{\mu}$ と $\bar{\mu}$ の推定値は同一の v、S に対しても差を持つため、履歴上では $\hat{\mu}$ から $\bar{\mu}$ に滑らかに移行する様に図 2.3.6-12 に示す cosine テーパを使用した。同図の静摩擦保持距離 l は、正弦波載荷時の履歴ループにおいて、すべり始め部分の摩擦力が動摩擦にほぼ収斂するまでのすべり距離である。

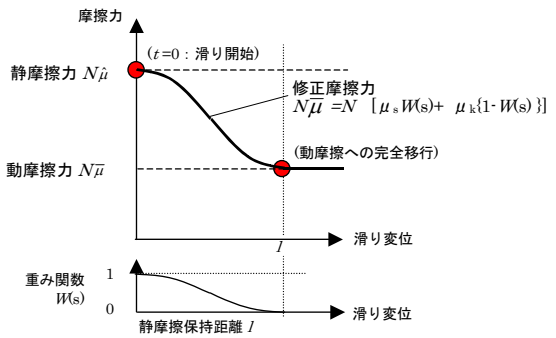
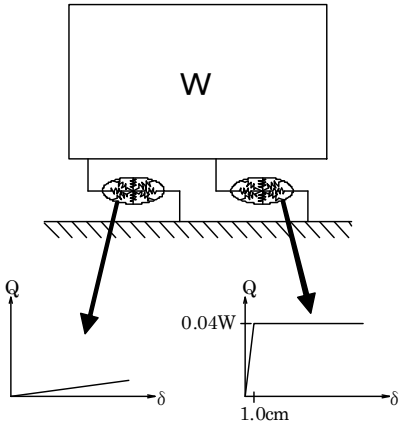


図 2.3.6-12 立ち上がり摩擦から動摩擦への移行モデル

(2) 解析条件

本検討では、長周期地震動に対する摩擦係数の累積すべり変位依存性を確認することを目的とする。解析モデルを図 2.3.1-13 に示す上部構造を剛体とした 1 質点系モデルとする。また、2 方向入力を考慮して免震支承は塑性論モデルとする。



積層ゴム支承　　弾性すべり支承

T_1=1.0s，T_2=4.0s

建物重量	W=51,453.9kN
弾性すべり支承負担軸力	Ns=20,920.1kN
基準摩擦係数	μ =0.098
弾性すべり支承水平耐力	Qy= 2,058.0kN
	(Ci=0.04)
弾性すべり支承平均面圧	σ =8.04N/mm^2
考慮する依存性	累積すべり距離

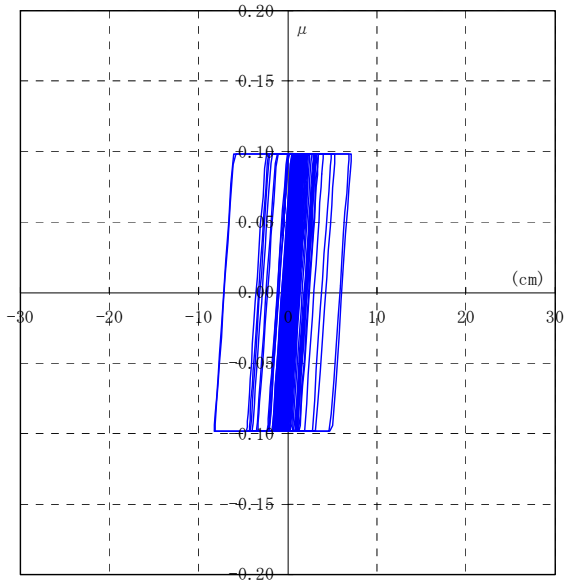
図 2.3.6-13 解析モデル

(3) 1 方向入力解析結果

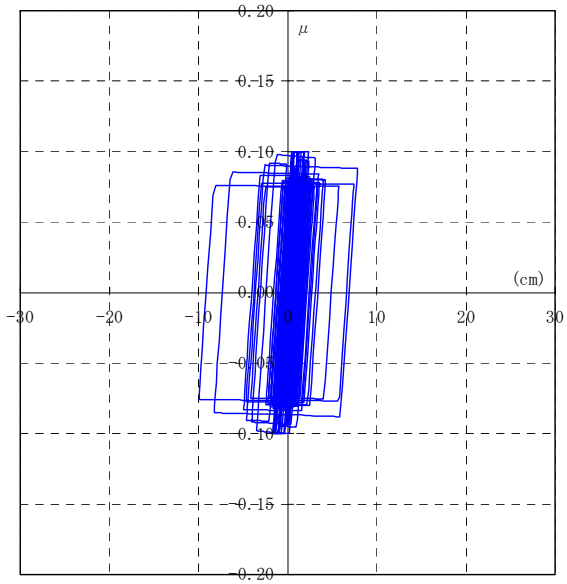
N-OSKH02-AV,T-TN-AIC003-AV,T-TN-AIC004,T-TN-KGIN1F-AV 入力における応答最大値を表 2.3.6.-3 に示す。また、入力 1.0 倍,1.25 倍,1.50 倍とした場合の弾性すべり支承の摩擦係数-変形履歴，免震層の荷重-変形履歴図 2.3.6-14～16 に依存性を無視したケースと依存性を考慮したケースを比較して示す。同様に、各入力レベルにおける，弾性すべり支承の累積すべり変位時刻歴波形を図 2.3.6-17～19 に示す。

表 2.3.6-3　応答最大値一覧

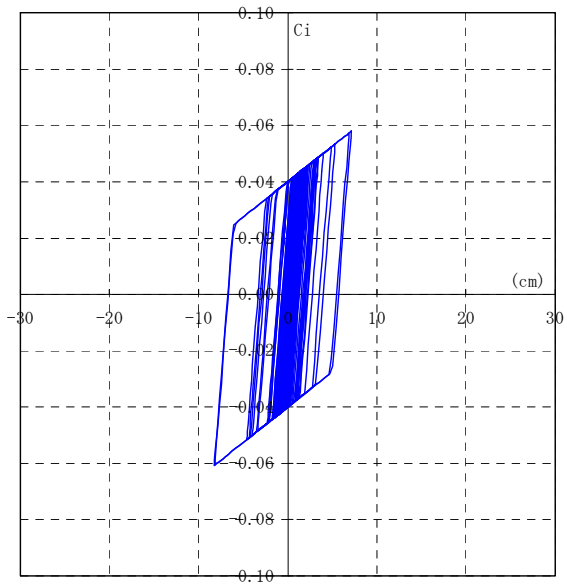
入力		応答最大値											
地震波	倍率	加速度(Gal)		免震層変位(cm)		せん断力係数		累積変位(m)		累積すべり変位(m)		V_E(cm/s)	
		依存性無視	依存性考慮	依存性無視	依存性考慮	依存性無視	依存性考慮	依存性無視	依存性考慮	依存性無視	依存性考慮	依存性無視	依存性考慮
N-OSKH02	1.00	59.5	54.9	8.2	10.0	0.061	0.056	19.1	15.6	1.74	2.14	116.8	118.3
	1.25	69.4	62.1	12.2	13.2	0.071	0.063	20.1	16.9	2.70	3.51	145.7	148.7
	1.50	77.6	81.7	15.6	21.2	0.079	0.083	21.1	19.6	3.93	6.28	175.6	196.1
T-TN-AIC003	1.00	80.2	81.0	16.6	20.9	0.082	0.083	23.4	22.9	5.93	8.09	215.7	221.6
	1.25	101.3	106.9	25.2	31.4	0.103	0.109	27.7	27.9	9.70	12.44	275.8	273.5
	1.50	121.9	135.5	33.5	43.0	0.124	0.138	32.4	33.7	13.66	17.76	327.3	325.9
T-TN-AIC004	1.00	56.8	51.8	7.1	8.3	0.058	0.053	13.8	12.0	1.34	1.56	102.7	102.8
	1.25	64.9	64.5	10.4	14.2	0.066	0.066	14.8	14.4	2.02	2.88	126.0	135.5
	1.50	74.3	74.6	14.2	18.3	0.076	0.076	16.5	17.2	3.09	4.80	155.7	172.3
T-TN-KGIN1F	1.00	48.9	49.5	3.9	3.9	0.050	0.050	15.0	12.6	0.56	0.66	66.8	69.4
	1.25	50.9	50.1	4.8	6.6	0.052	0.051	14.8	13.1	0.95	1.18	86.6	90.6
	1.50	58.2	56.8	7.7	10.5	0.059	0.058	15.8	13.2	1.46	1.87	107.3	111.4



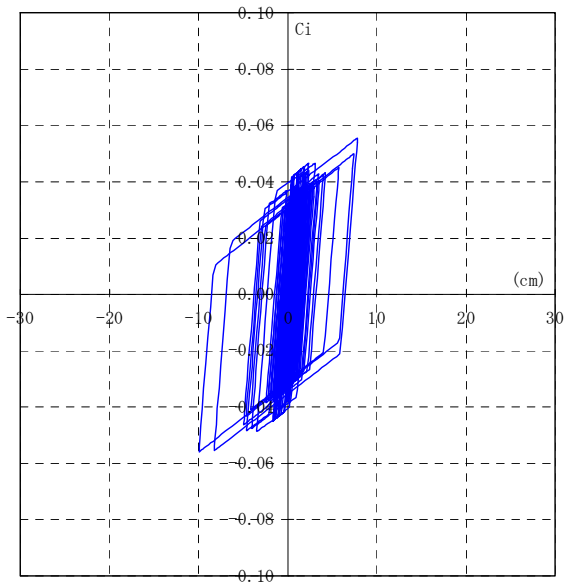
弾性すべり支承 μ－δ 履歴（依存性無視）



弾性すべり支承 μ－δ 履歴（累積すべり変位依存性考慮）

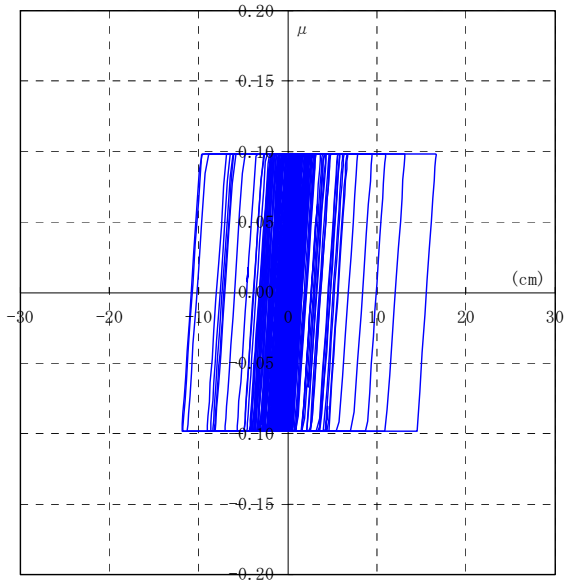


免震層C－δ 履歴（依存性無視）

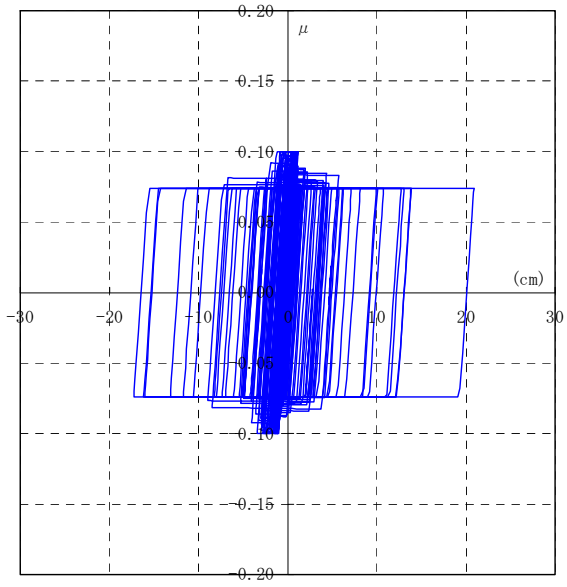


免震層C－δ 履歴（累積すべり変位依存性考慮）

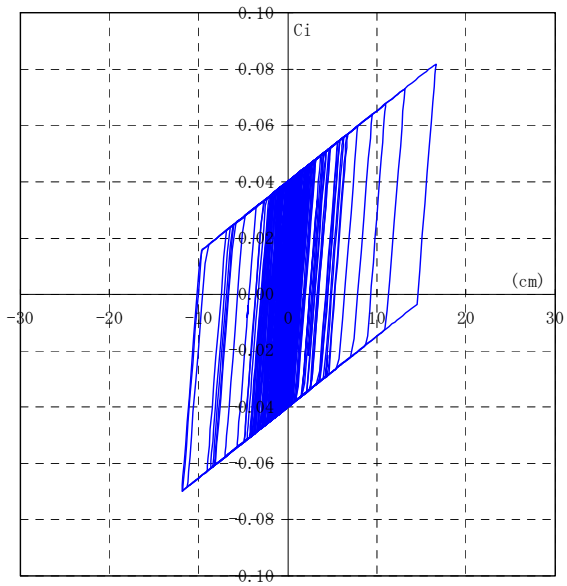
(a) N-OSKH02-AV



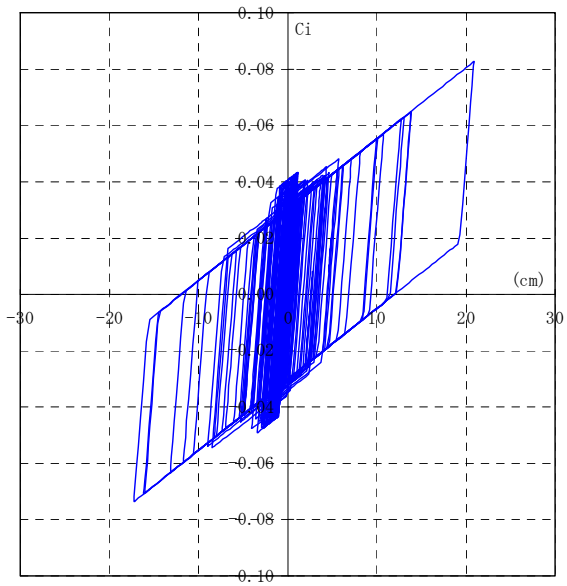
弾性すべり支承 μ－δ 履歴（依存性無視）



弾性すべり支承 μ－δ 履歴（累積すべり変位依存性考慮）

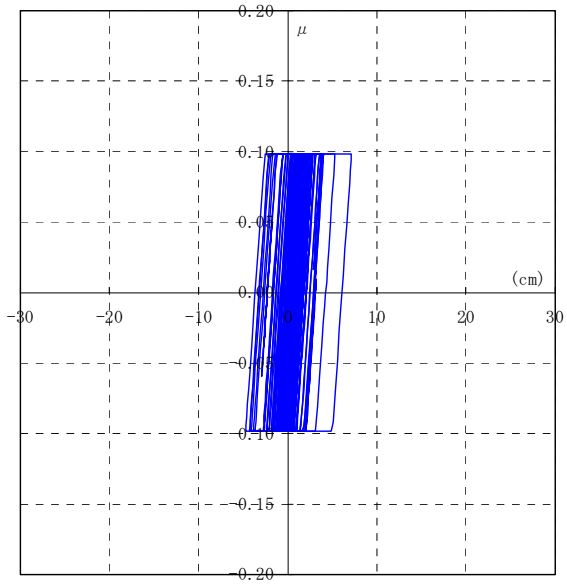


免震層C－δ 履歴（依存性無視）

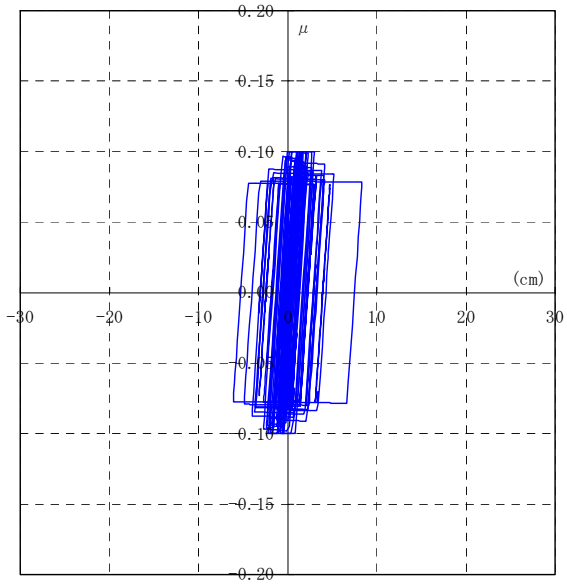


免震層C－δ 履歴（累積すべり変位依存性考慮）

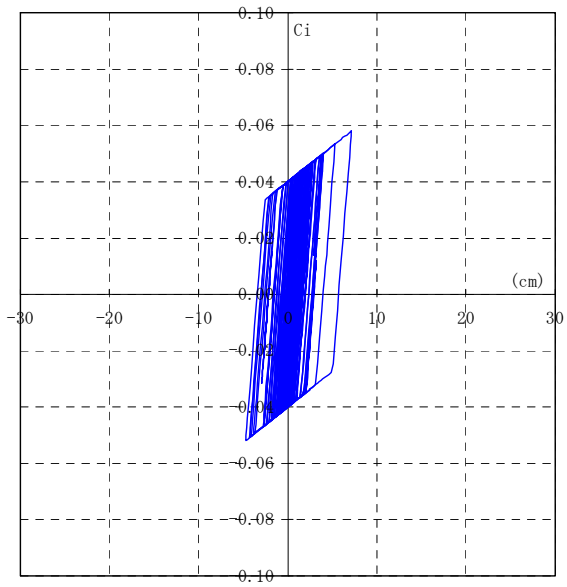
(b) T-TN-AIC003-AV



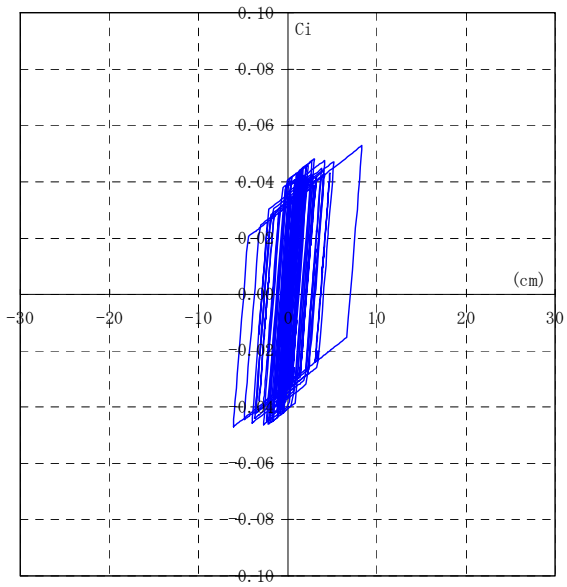
弾性すべり支承 μ－δ 履歴（依存性無視）



弾性すべり支承 μ－δ 履歴（累積すべり変位依存性考慮）

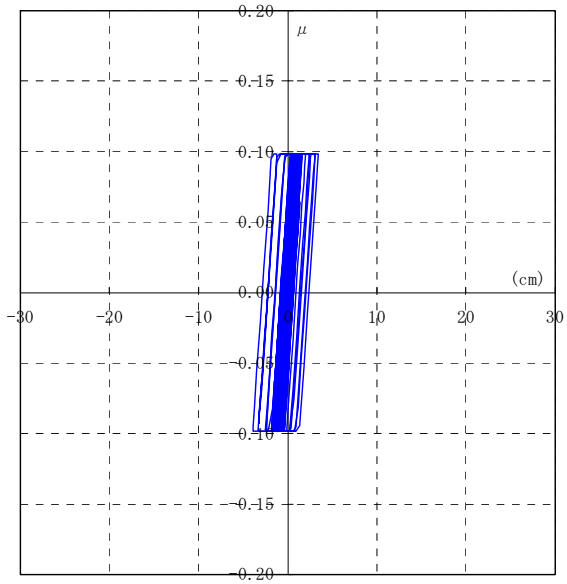


免震層C－δ 履歴（依存性無視）

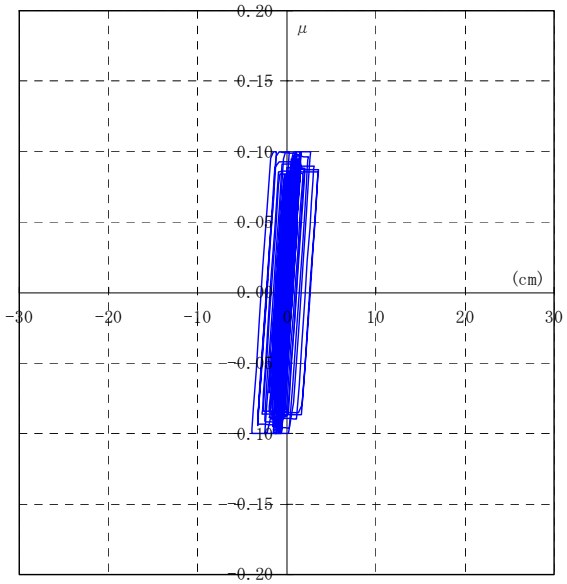


免震層C－δ 履歴（累積すべり変位依存性考慮）

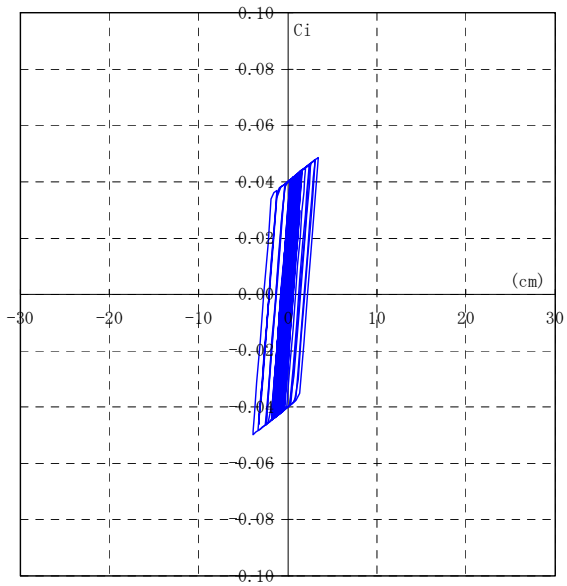
(c) T-TN-AIC004-AV



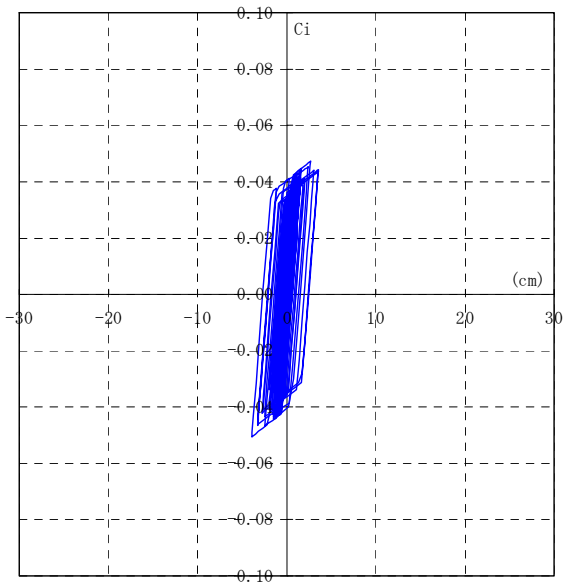
弾性すべり支承 μ－δ 履歴（依存性無視）



弾性すべり支承 μ－δ 履歴（累積すべり変位依存性考慮）



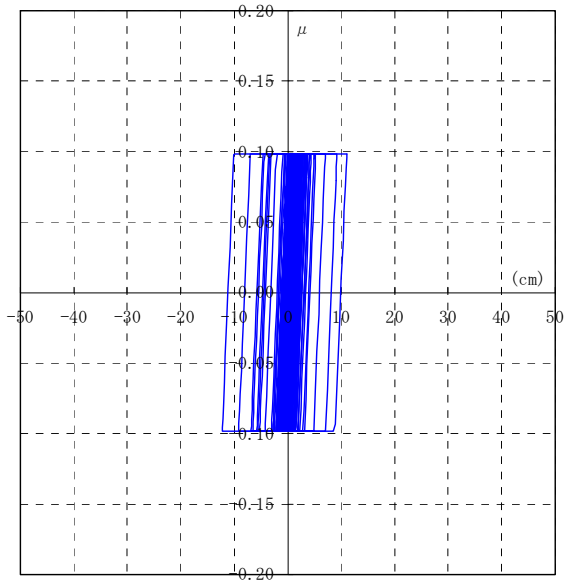
免震層C－δ 履歴（依存性無視）



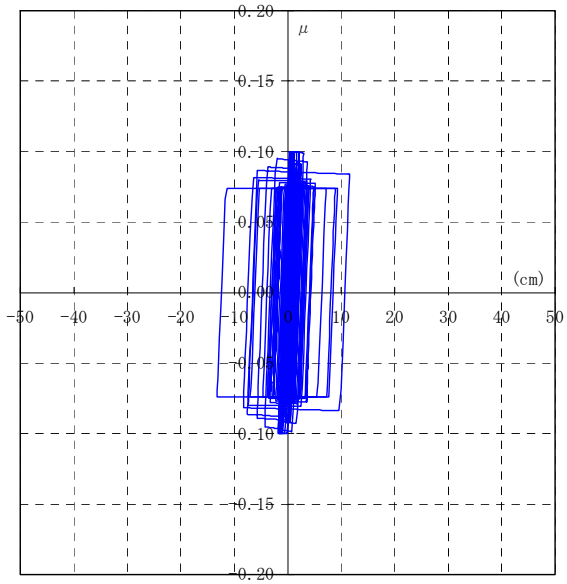
免震層C－δ 履歴（累積すべり変位依存性考慮）

(d) T-TN-KGIN1F-AV

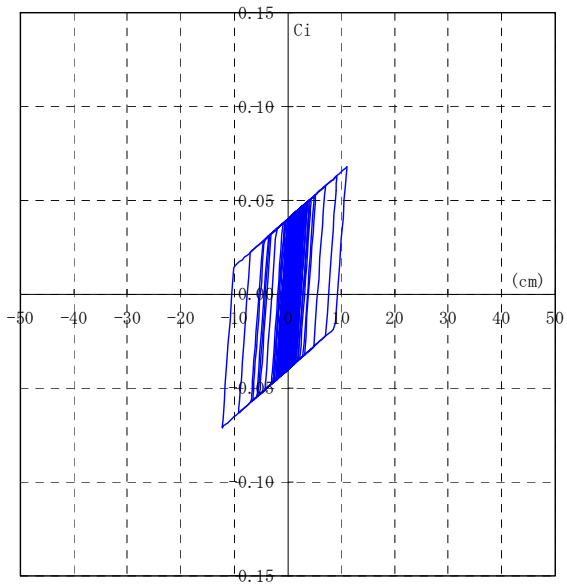
図 2.3.6-14　応答履歴(入力×1.0)



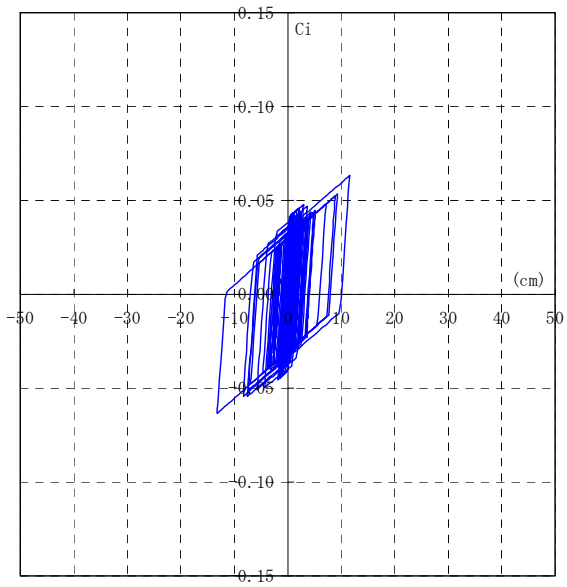
弾性すべり支承 μ－δ 履歴（依存性無視）



弾性すべり支承 μ－δ 履歴（累積すべり変位依存性考慮）

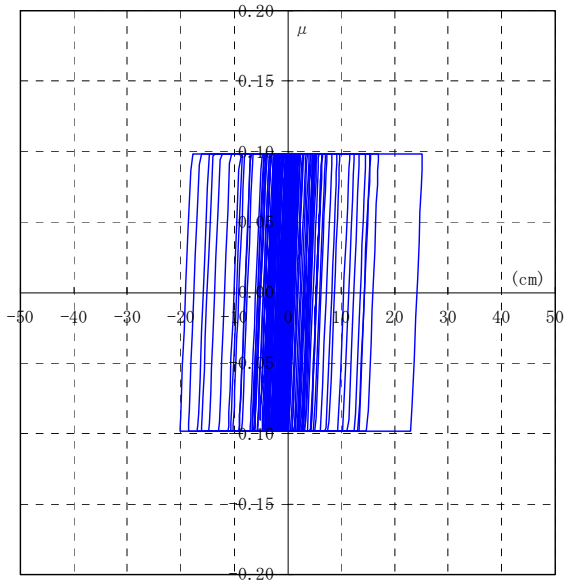


免震層C－δ 履歴（依存性無視）

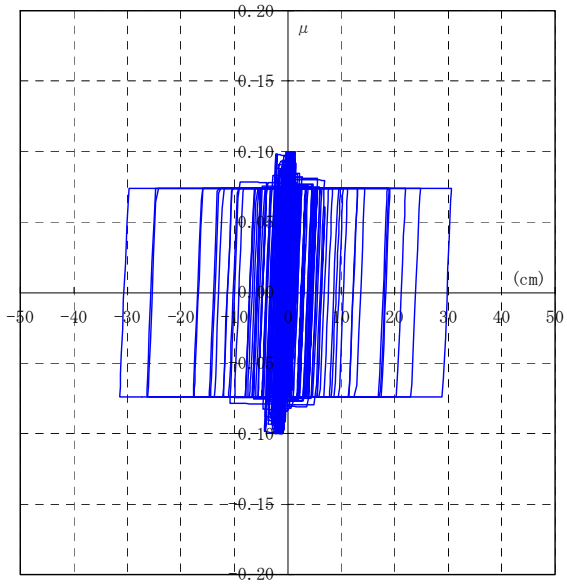


免震層C－δ 履歴（累積すべり変位依存性考慮）

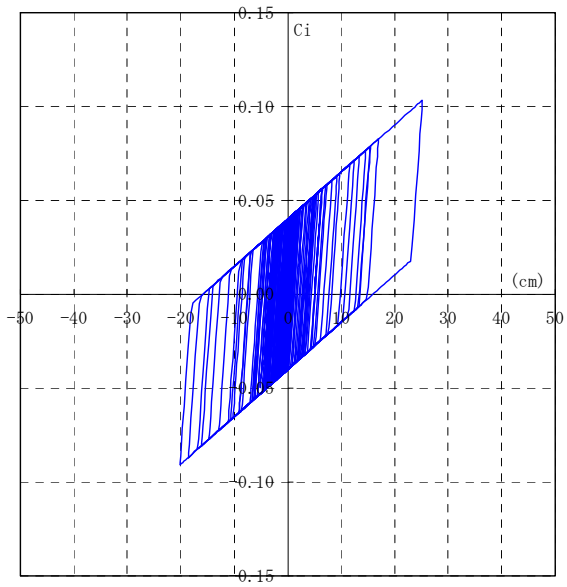
(a) N-OSKH02-AV



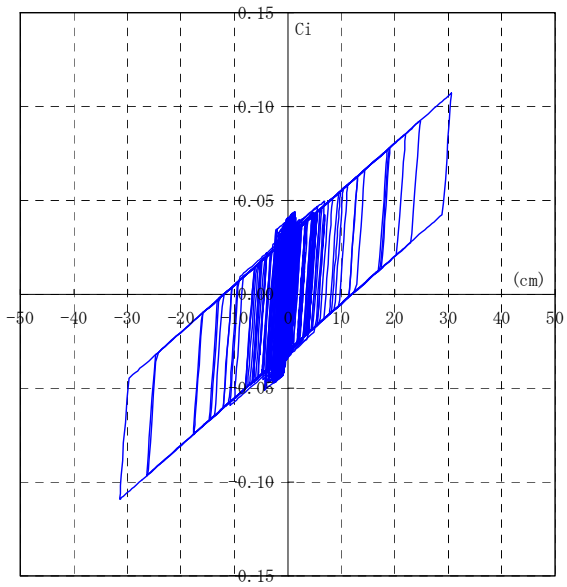
弾性すべり支承 μ－δ 履歴（依存性無視）



弾性すべり支承 μ－δ 履歴（累積すべり変位依存性考慮）

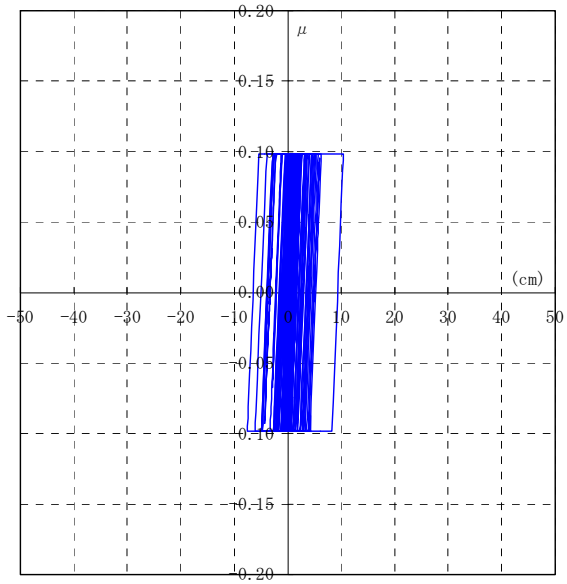


免震層C－δ 履歴（依存性無視）

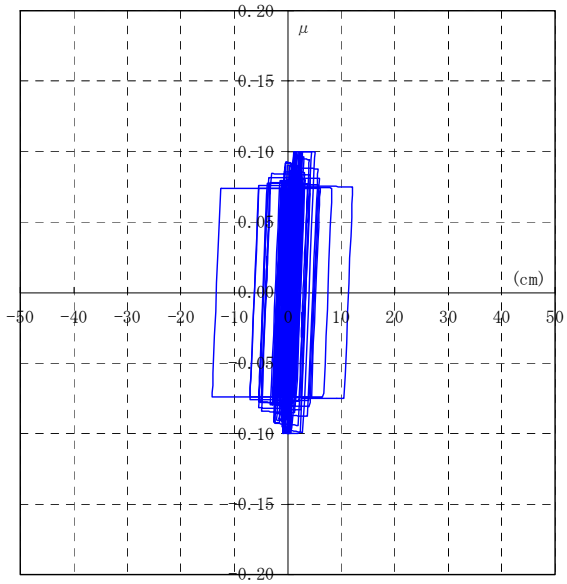


免震層C－δ 履歴（累積すべり変位依存性考慮）

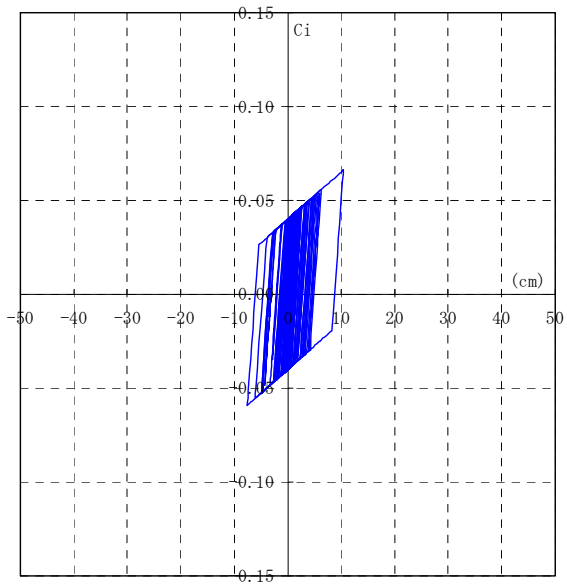
(b) T-TN-AIC003-AV



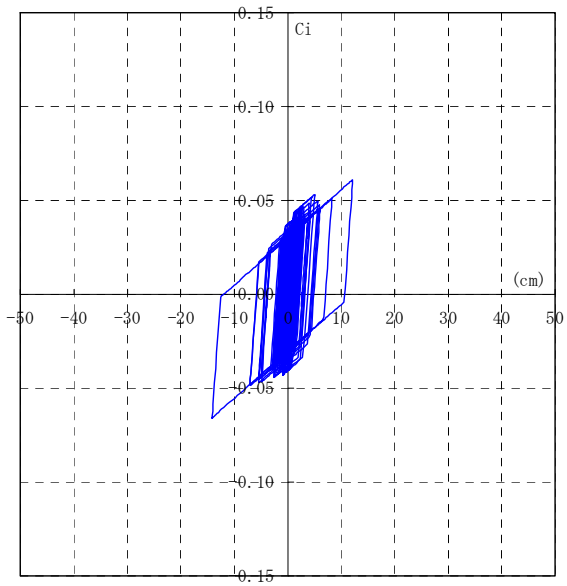
弾性すべり支承 μ－δ 履歴（依存性無視）



弾性すべり支承 μ－δ 履歴（累積すべり変位依存性考慮）

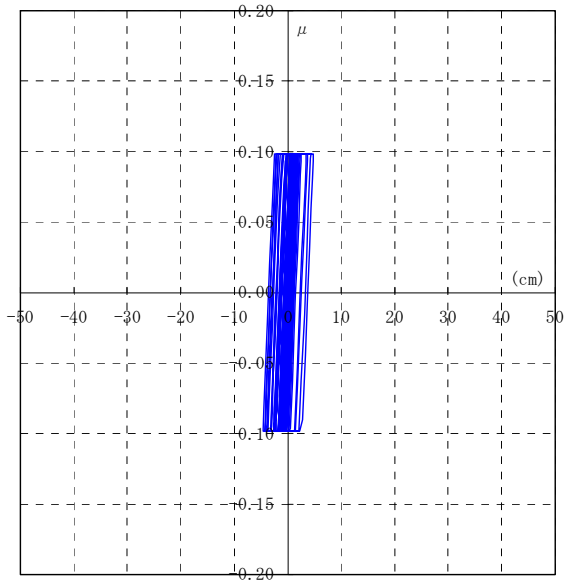


免震層C－δ 履歴（依存性無視）

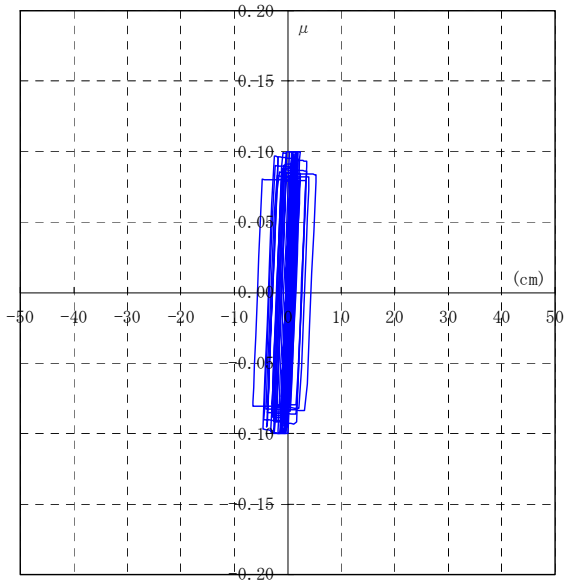


免震層C－δ 履歴（累積すべり変位依存性考慮）

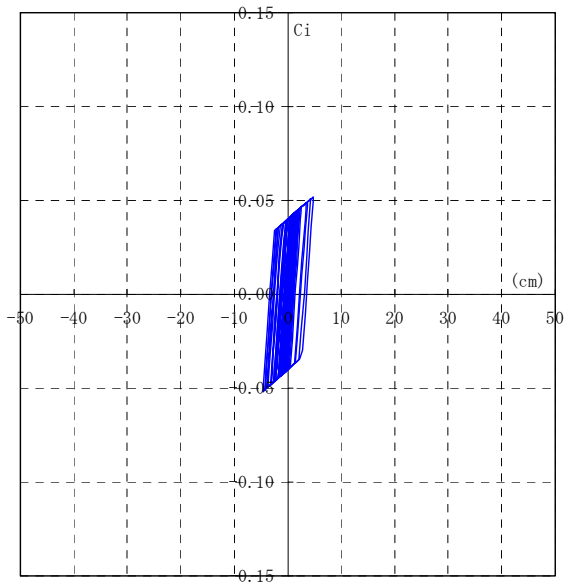
(c) T-TN-AIC004-AV



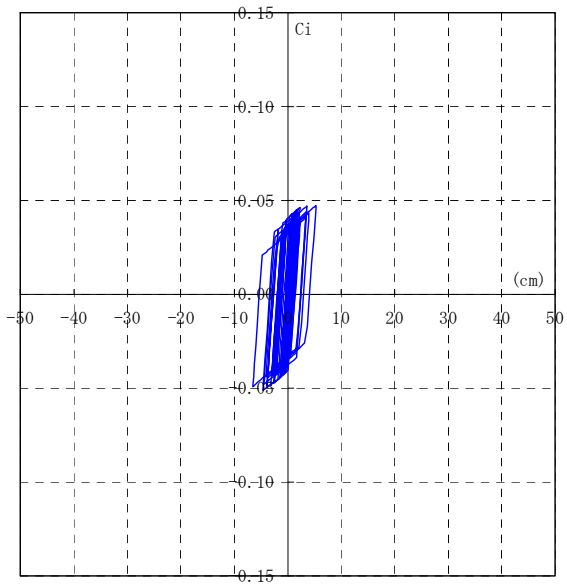
弾性すべり支承 μ－δ 履歴（依存性無視）



弾性すべり支承 μ－δ 履歴（累積すべり変位依存性考慮）



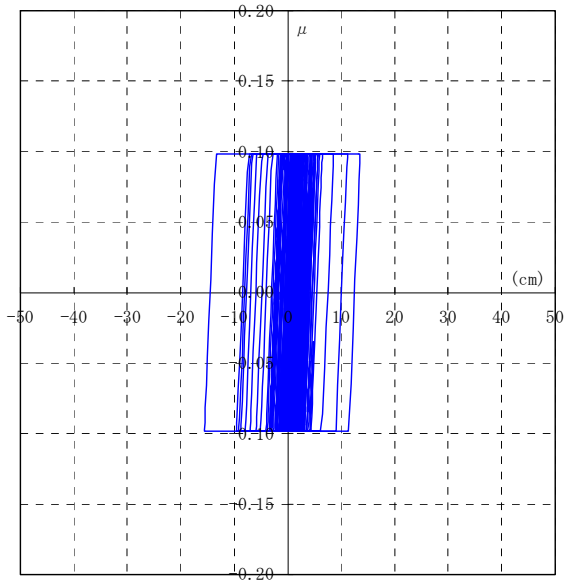
免震層C－δ 履歴（依存性無視）



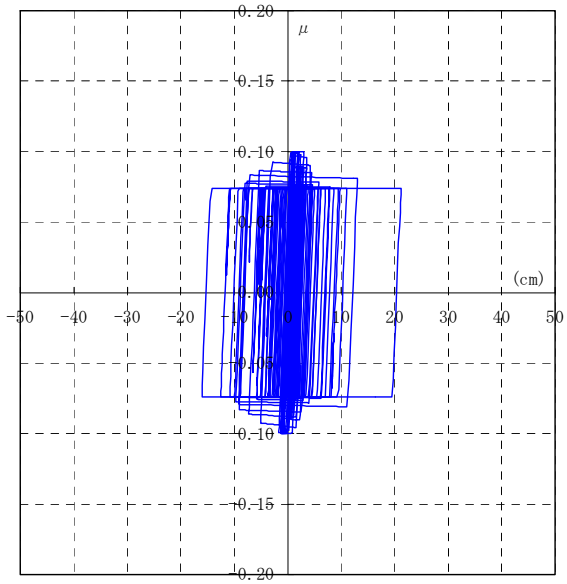
免震層C－δ 履歴（累積すべり変位依存性考慮）

(d) T-TN-KGIN1F-AV

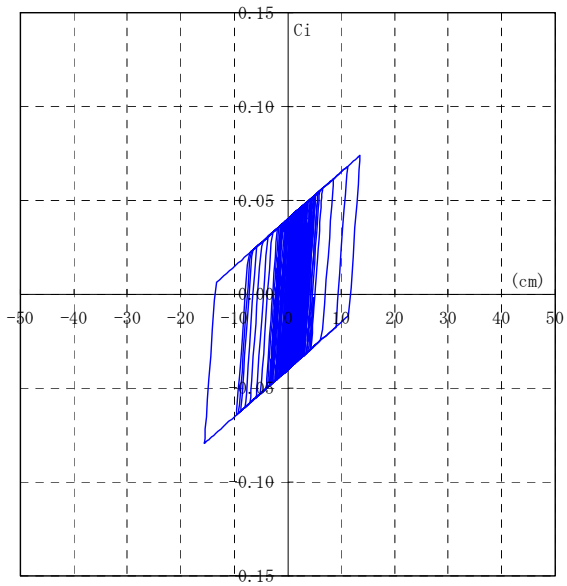
図 2.3.6-15　応答履歴(入力×1.25)



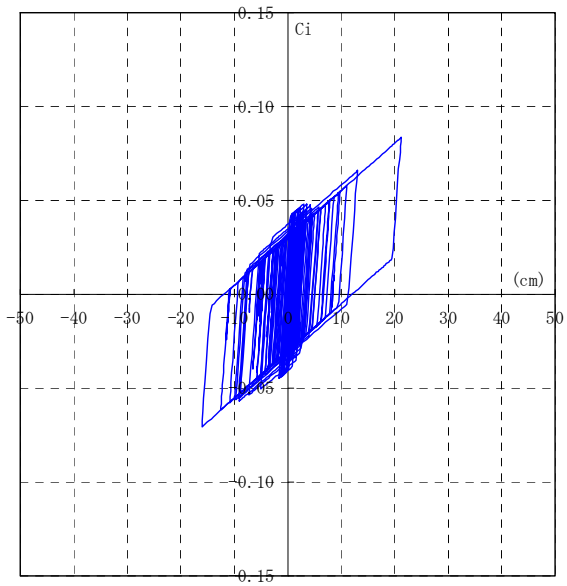
弾性すべり支承 μ－δ 履歴（依存性無視）



弾性すべり支承 μ－δ 履歴（累積すべり変位依存性考慮）

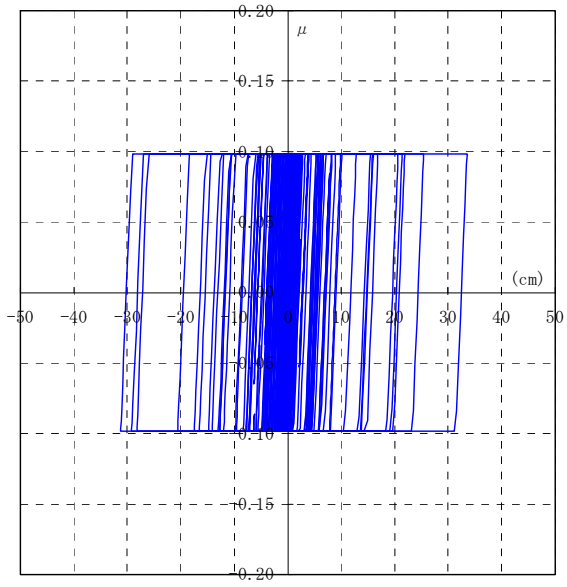


免震層C－δ 履歴（依存性無視）

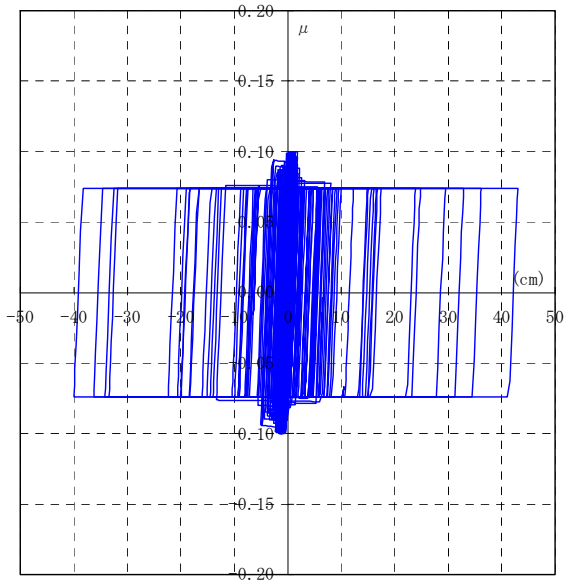


免震層C－δ 履歴（累積すべり変位依存性考慮）

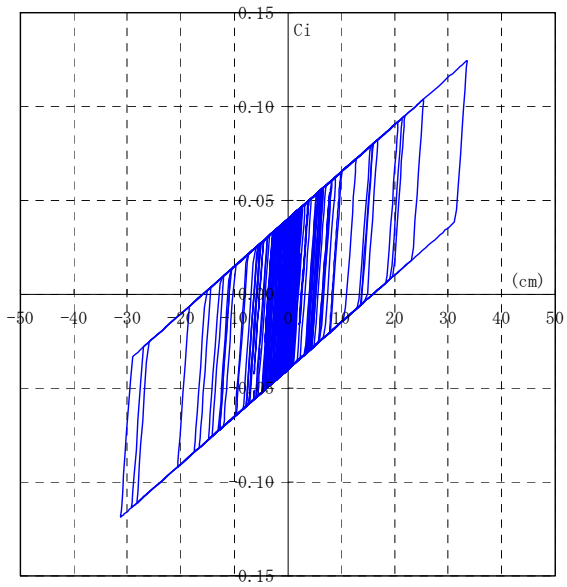
(a) N-OSKH02-AV



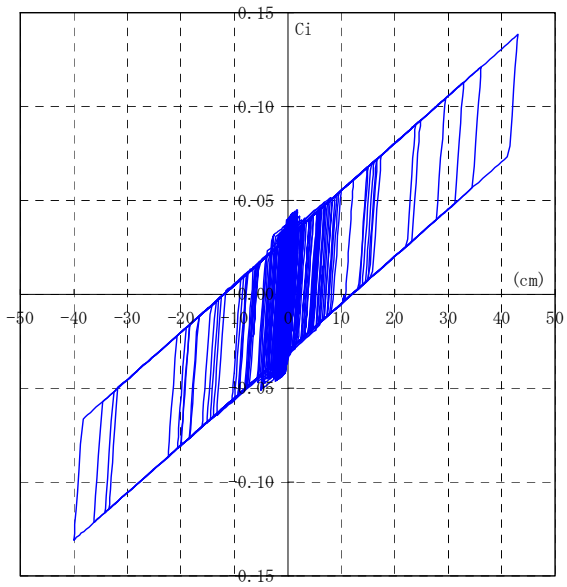
弾性すべり支承 μ－δ 履歴（依存性無視）



弾性すべり支承 μ－δ 履歴（累積すべり変位依存性考慮）

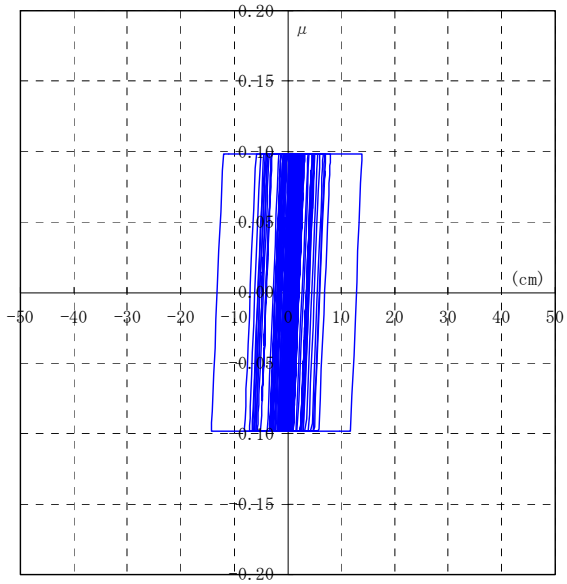


免震層C－δ 履歴（依存性無視）

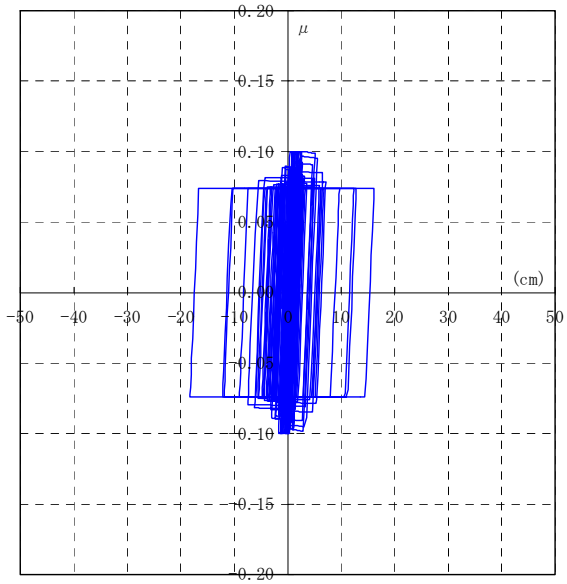


免震層C－δ 履歴（累積すべり変位依存性考慮）

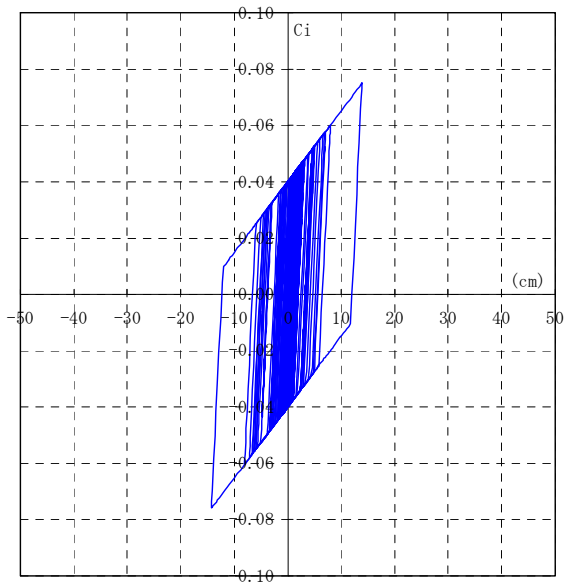
(b) T-TN-AIC003-AV



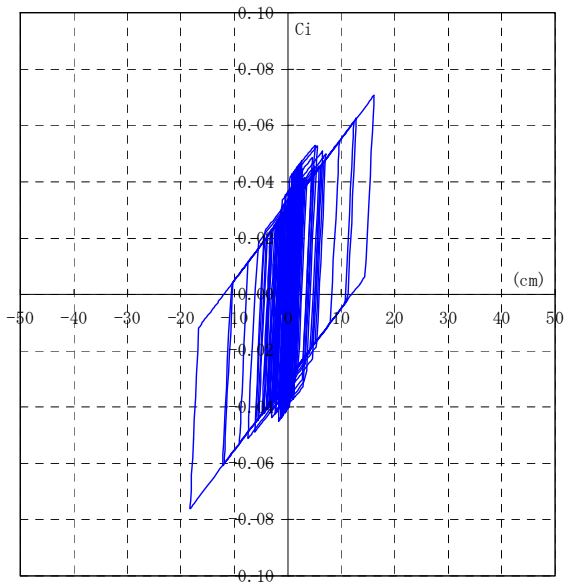
弾性すべり支承 μ－δ 履歴（依存性無視）



弾性すべり支承 μ－δ 履歴（累積すべり変位依存性考慮）

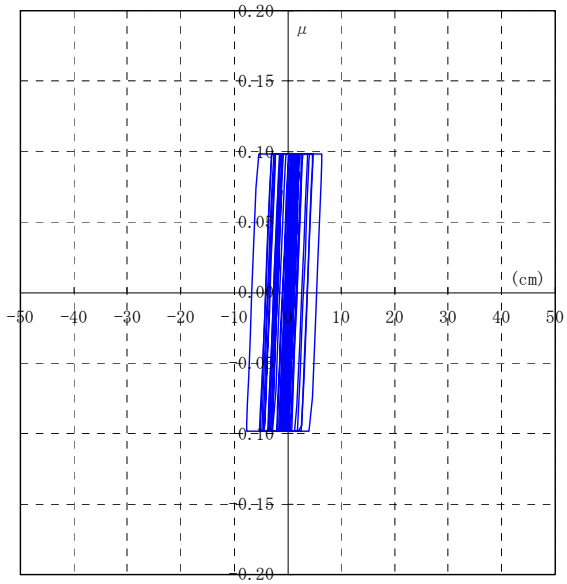


免震層C－δ 履歴（依存性無視）

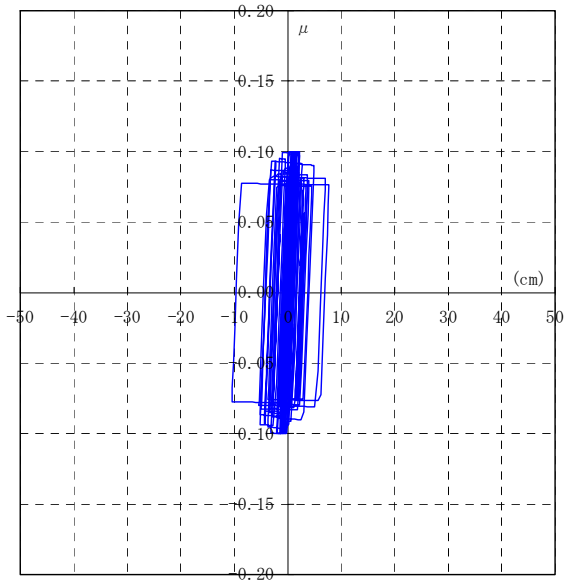


免震層C－δ 履歴（累積すべり変位依存性考慮）

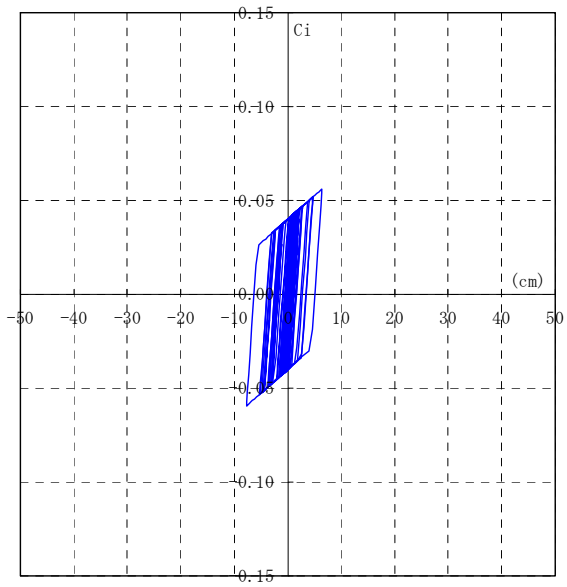
(c) T-TN-AIC004-AV



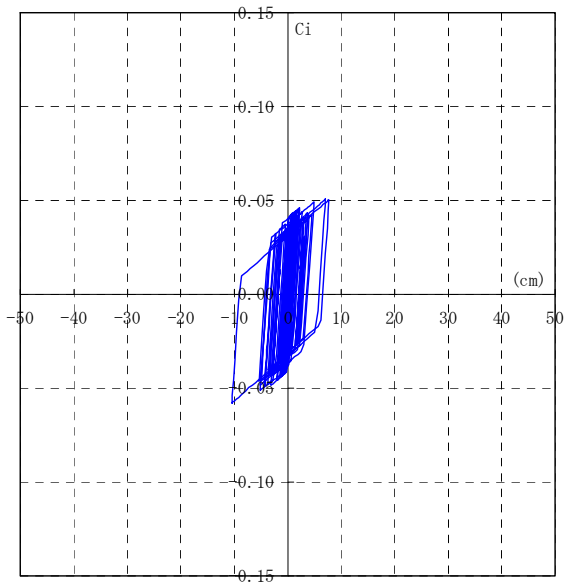
弾性すべり支承 μ－δ 履歴（依存性無視）



弾性すべり支承 μ－δ 履歴（累積すべり変位依存性考慮）



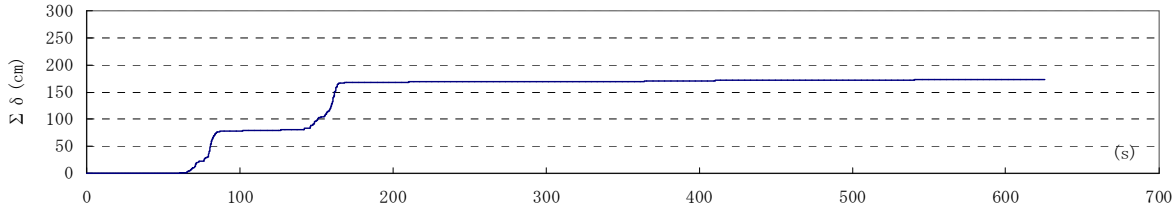
免震層C－δ 履歴（依存性無視）



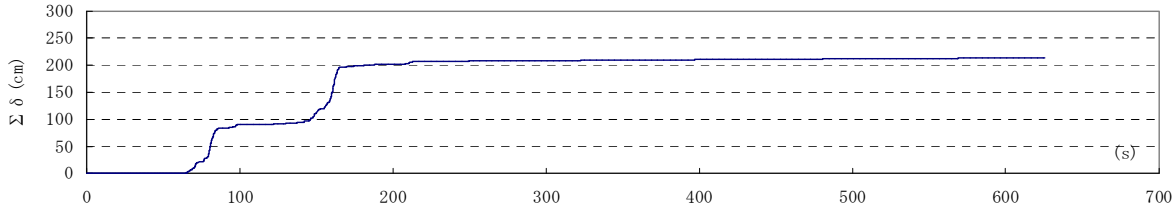
免震層C－δ 履歴（累積すべり変位依存性考慮）

(d) T-TN-KGIN1F-AV

図 2.3.6-16　応答履歴(入力×1.50)

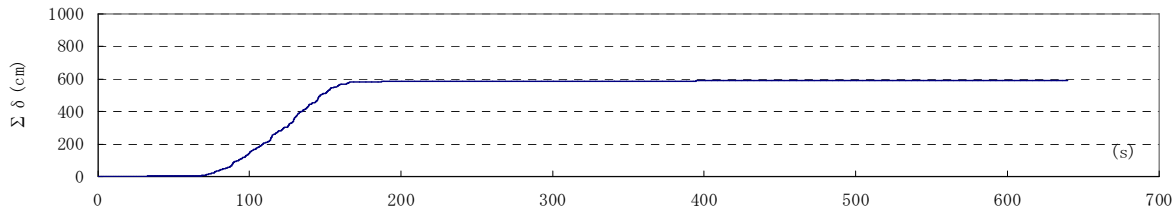


累積すべり変位時刻歴波形（依存性無視）

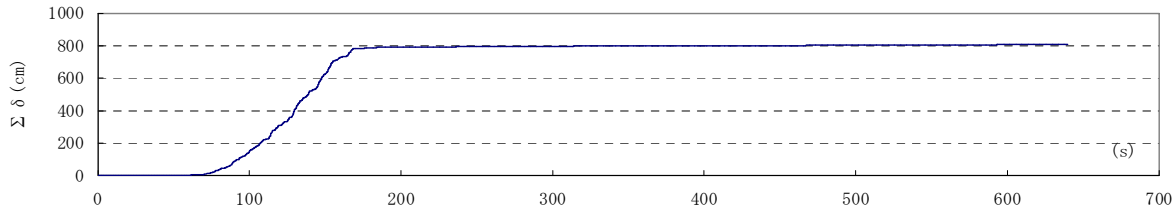


累積すべり変位時刻歴波形（累積すべり変位依存性考慮）

(a) N-OSKH02-AV

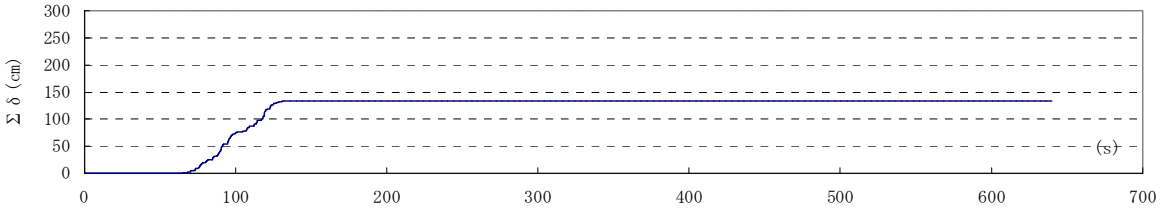


累積すべり変位時刻歴波形（依存性無視）

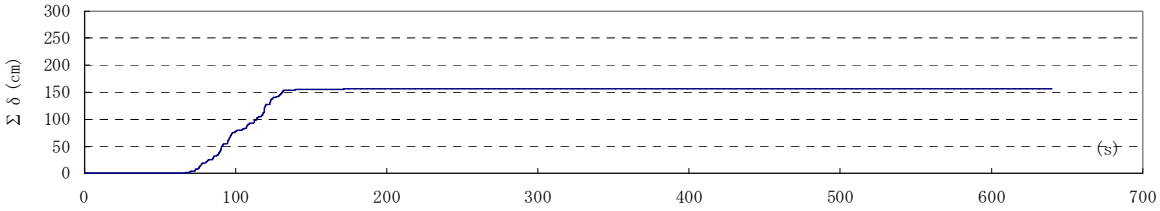


累積すべり変位時刻歴波形（累積すべり変位依存性考慮）

(b) T-TN-AIC003-AV

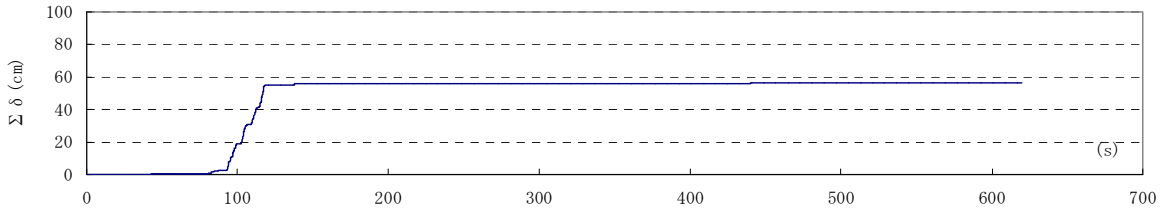


累積すべり変位時刻歴波形（依存性無視）

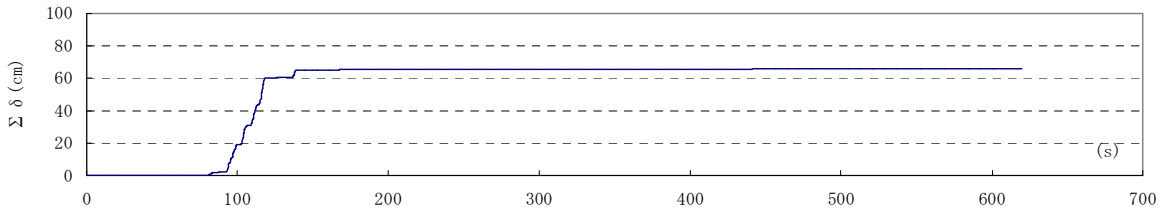


累積すべり変位時刻歴波形（累積すべり変位依存性考慮）

(c) T-TN-AIC004-AV



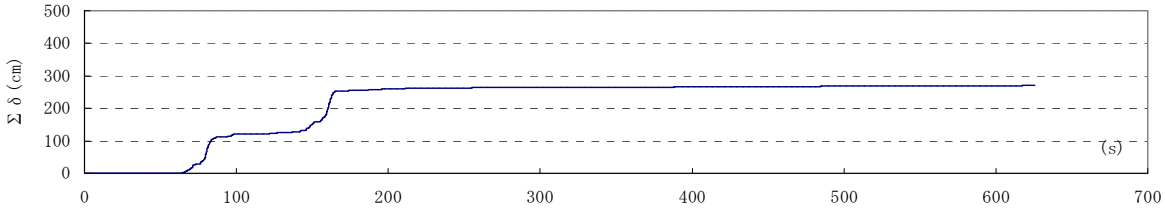
累積すべり変位時刻歴波形（依存性無視）



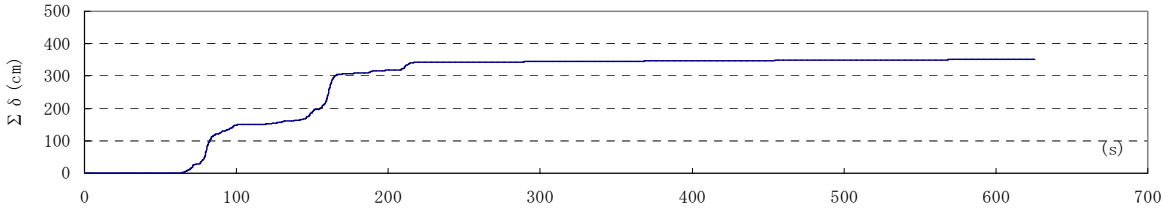
累積すべり変位時刻歴波形（累積すべり変位依存性考慮）

(d) T-TN-KGIN1F-AV

図 2.3.6-17　弾性すべり支承累積すべり変位(入力×1.0)

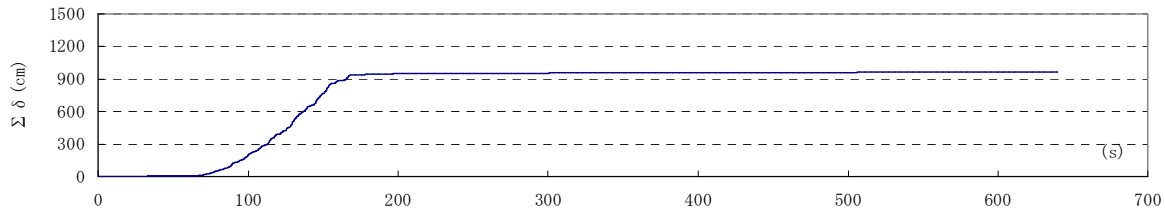


累積すべり変位時刻歴波形（依存性無視）

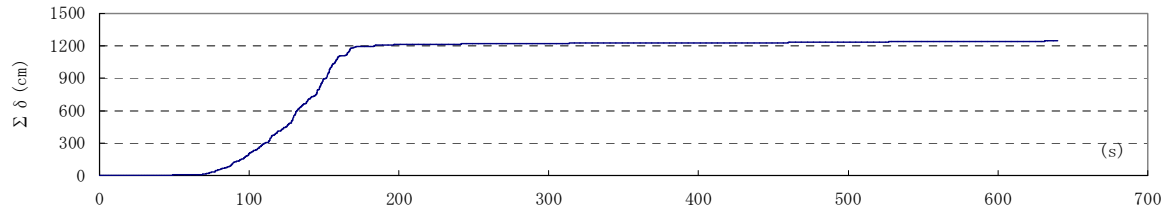


累積すべり変位時刻歴波形（累積すべり変位依存性考慮）

(a) N-OSKH02-AV

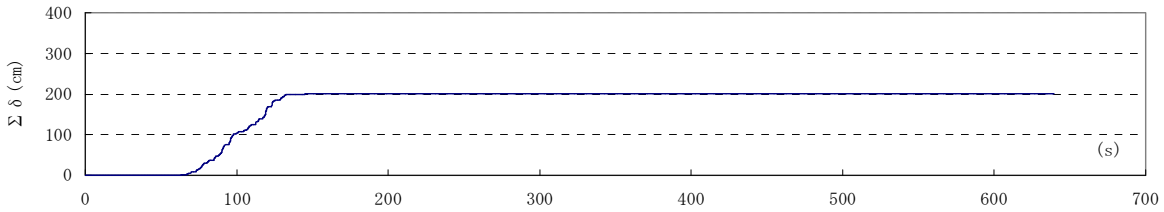


累積すべり変位時刻歴波形（依存性無視）

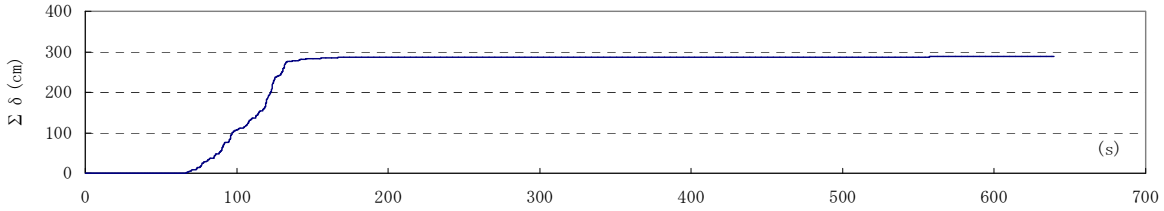


累積すべり変位時刻歴波形（累積すべり変位依存性考慮）

(b) T-TN-AIC003-AV

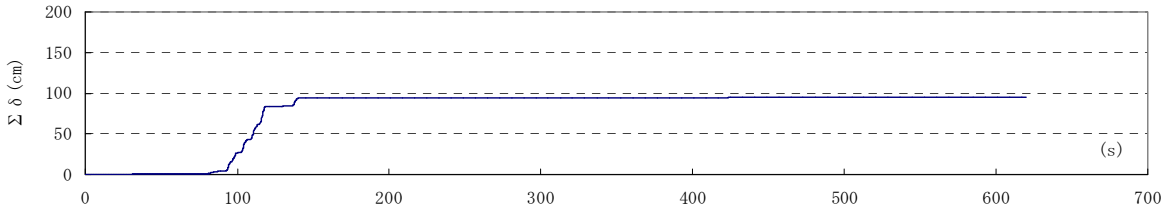


累積すべり変位時刻歴波形（依存性無視）

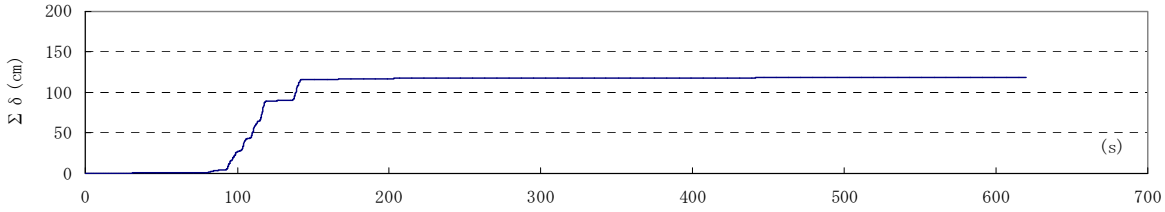


累積すべり変位時刻歴波形（累積すべり変位依存性考慮）

(c) T-TN-AIC004-AV



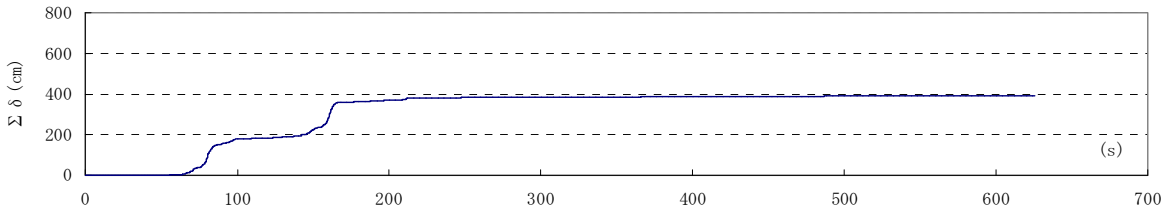
累積すべり変位時刻歴波形（依存性無視）



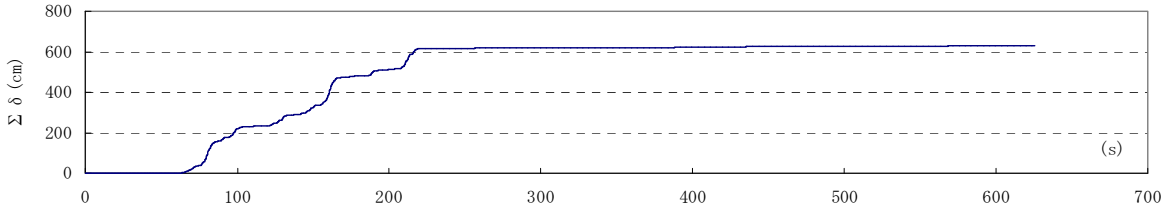
累積すべり変位時刻歴波形（累積すべり変位依存性考慮）

(d) T-TN-KGIN1F-AV

図 2.3.6-18　弾性すべり支承累積すべり変位(入力×1.25)

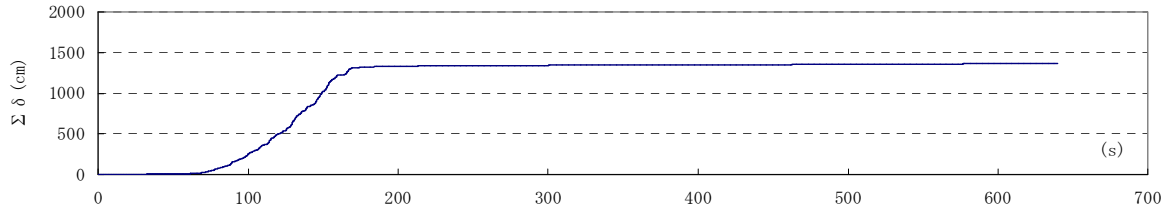


累積すべり変位時刻歴波形（依存性無視）

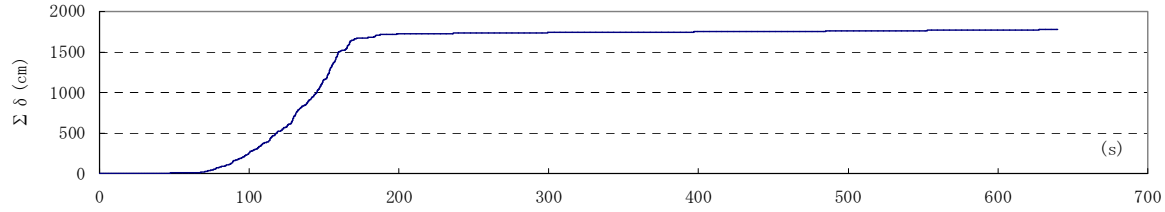


累積すべり変位時刻歴波形（累積すべり変位依存性考慮）

(a) N-OSKH02-AV

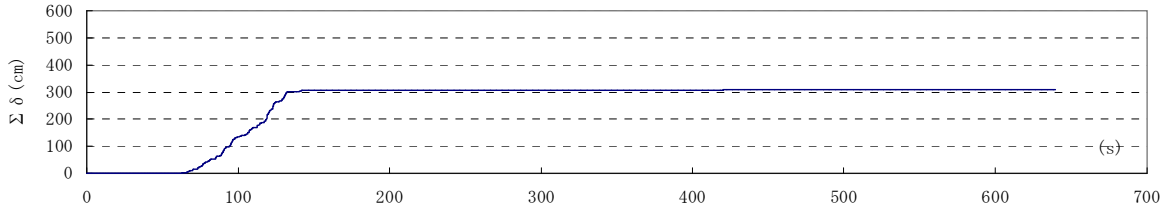


累積すべり変位時刻歴波形（依存性無視）

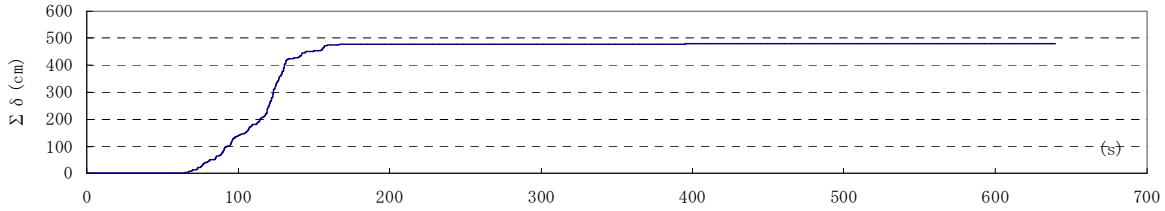


累積すべり変位時刻歴波形（累積すべり変位依存性考慮）

(b) T-TN-AIC003-AV

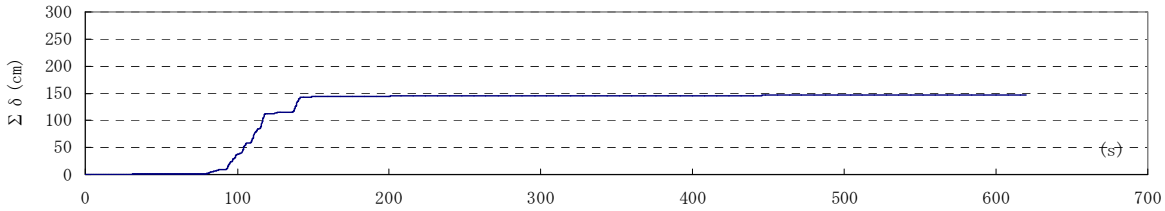


累積すべり変位時刻歴波形（依存性無視）

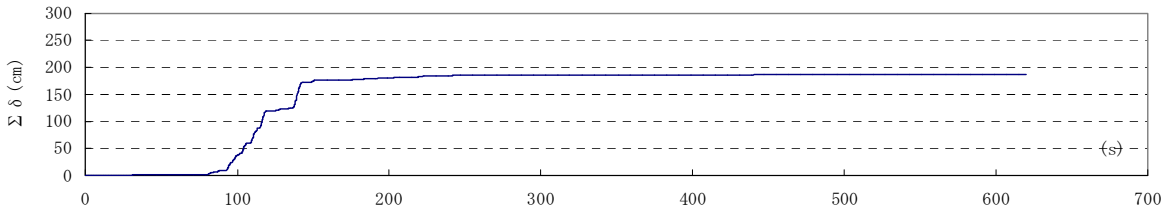


累積すべり変位時刻歴波形（累積すべり変位依存性考慮）

(c) T-TN-AIC004-AV



累積すべり変位時刻歴波形（依存性無視）



累積すべり変位時刻歴波形（累積すべり変位依存性考慮）

(d) T-TN-KGIN1F-AV

図 2.3.6-19　弾性すべり支承累積すべり変位(入力×1.5)

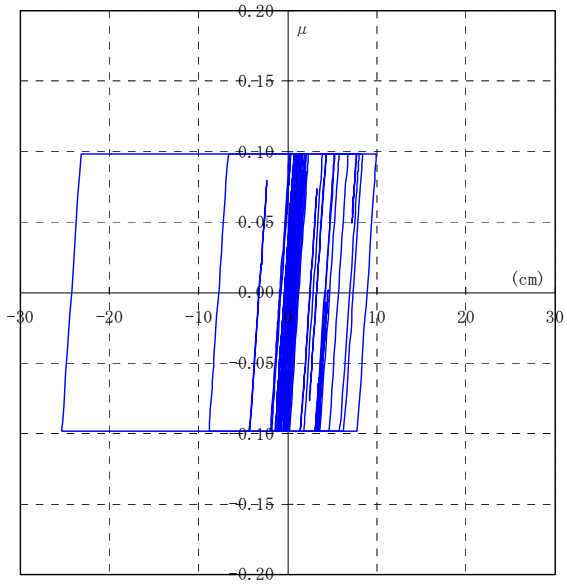
(4) ２方向入力の検討

2 方向入力用地震動を各方向に単独に入力した場合(1 方向入力)と、2 方向同時入力した場合の応答性状について、依存性無視したケースと累積すべり変位依存性を考慮したケースを比較する。

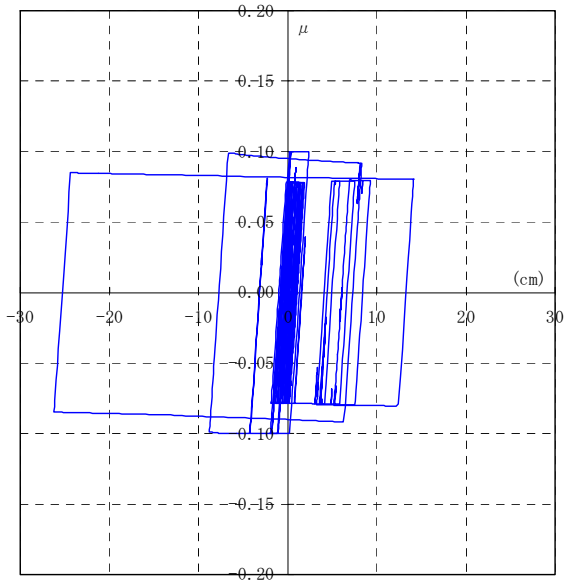
応答最大値一覧を表 2.3.6-3 に示す。また、1 方向単独入力の場合と 2 方向同時入力の場合の応答履歴を各方向成分毎に図 2.3.6-20～2.3.6-24 に、累積すべり変位時刻歴波形を図 2.3.6.-25～2.3.6-29 に示す。

表 2.3.6-3　応答最大値一覧

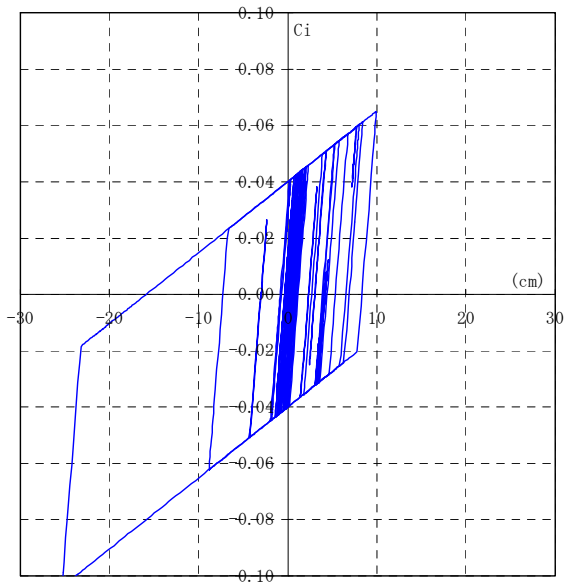
入力			応答最大値									
地震波	入力方法	成分	加速度(Gal)		免震層変位(cm)		せん断力係数		累積すべり変位(m)		V_E(cm/s)	
			依存性無視	依存性考慮	依存性無視	依存性考慮	依存性無視	依存性考慮	依存性無視	依存性考慮	依存性無視	依存性考慮
WAVE-Ts1	1方向	NS	101.7	98.5	25.3	26.2	0.104	0.101	1.21	1.32	97.5	95.1
		EW	78.1	75.8	15.8	16.1	0.080	0.077	1.38	1.59	104.3	103.7
	2方向	NS	102.3	101.1	27.8	29.4	0.104	0.103	2.59	2.97	142.7	137.5
		EW	70.4	69.4	20.3	21.5	0.072	0.071				
WAVE-Ts2	1方向	NS	49.9	50.7	4.4	6.1	0.051	0.052	0.40	0.53	56.4	63.2
		EW	56.8	56.4	7.1	8.4	0.058	0.058	0.42	0.50	58.0	61.2
	2方向	NS	54.5	51.3	6.2	7.5	0.056	0.052	0.98	1.51	87.6	101.1
		EW	54.7	59.1	8.0	12.3	0.056	0.060				
WAVE-Tk	1方向	NS	67.2	60.4	11.4	12.3	0.069	0.062	3.91	4.64	175.2	169.6
		EW	79.8	83.7	16.5	22.0	0.081	0.085	4.93	6.97	196.6	206.2
	2方向	NS	66.3	61.5	12.8	13.3	0.068	0.063	8.33	11.27	255.6	260.5
		EW	85.0	93.2	18.8	26.5	0.087	0.095				
WAVE-S	1方向	NS	54.1	50.6	6.0	66.6	0.055	0.052	2.19	2.51	131.1	127.4
		EW	61.5	55.1	9.1	10.1	0.063	0.056	2.34	2.97	135.7	137.5
	2方向	NS	55.1	48.1	6.5	7.6	0.056	0.049	4.51	6.12	188.0	193.7
		EW	59.4	54.3	8.4	10.3	0.061	0.055				
WAVE-K	1方向	NS	53.6	49.1	5.8	6.2	0.055	0.050	1.77	2.15	117.9	118.6
		EW	54.1	51.4	6.0	7.0	0.055	0.052	1.50	1.68	108.6	106.3
	2方向	NS	55.0	46.9	6.5	6.8	0.056	0.048	3.04	3.65	154.4	151.4
		EW	53.4	46.3	6.0	6.2	0.055	0.047				



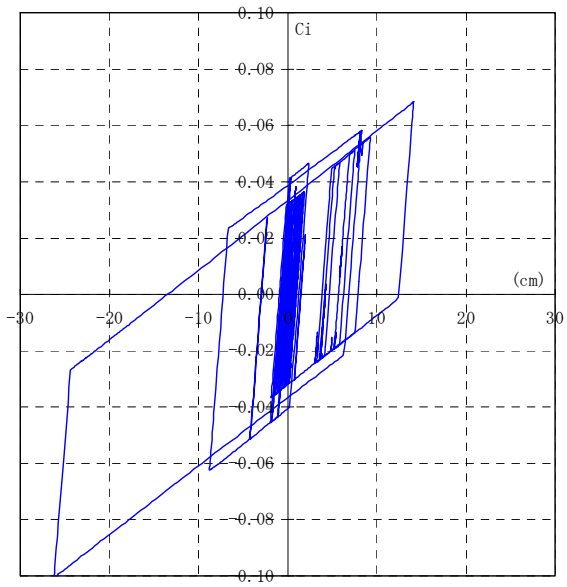
弾性すべり支承 μ－δ 履歴（依存性無視）



弾性すべり支承 μ－δ 履歴（累積すべり変位依存性考慮）

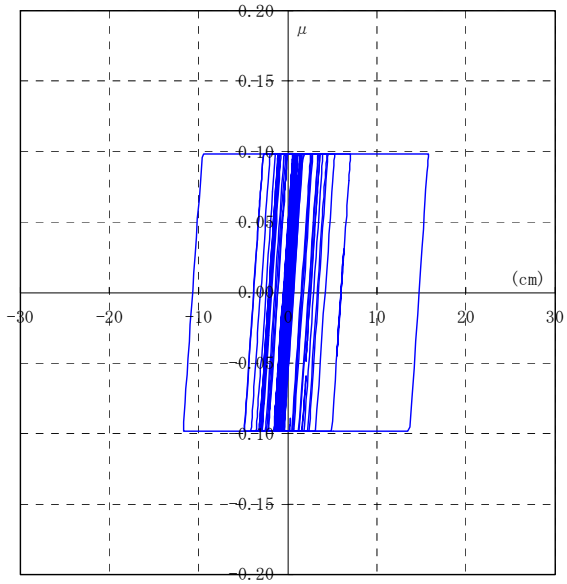


免震層C－δ 履歴（依存性無視）

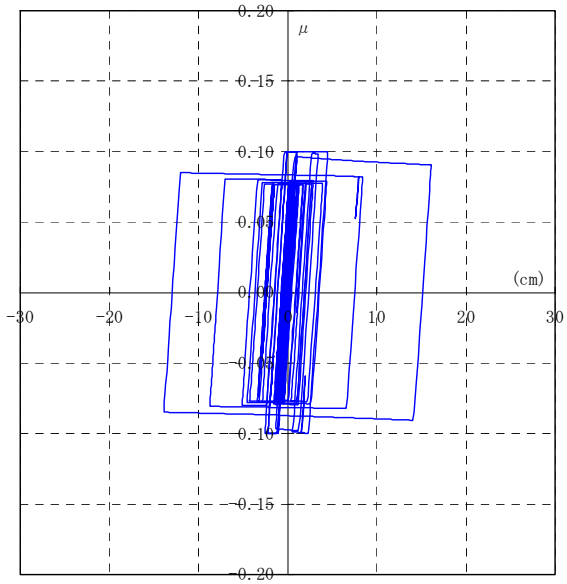


免震層C－δ 履歴（累積すべり変位依存性考慮）

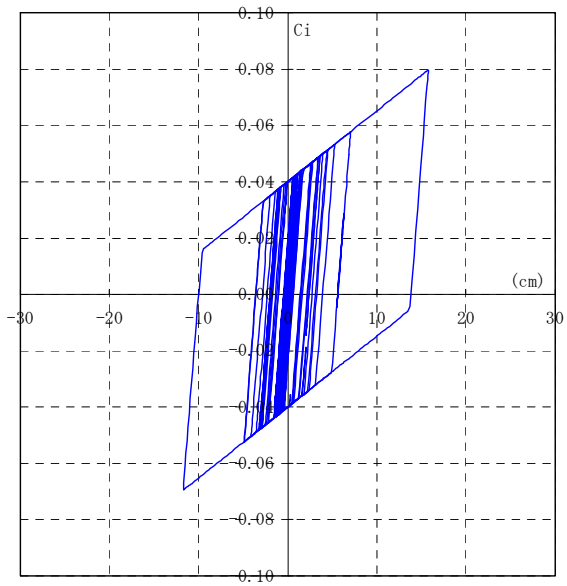
(a) WAVE-Ts1　1 方向入力(NS 成分)



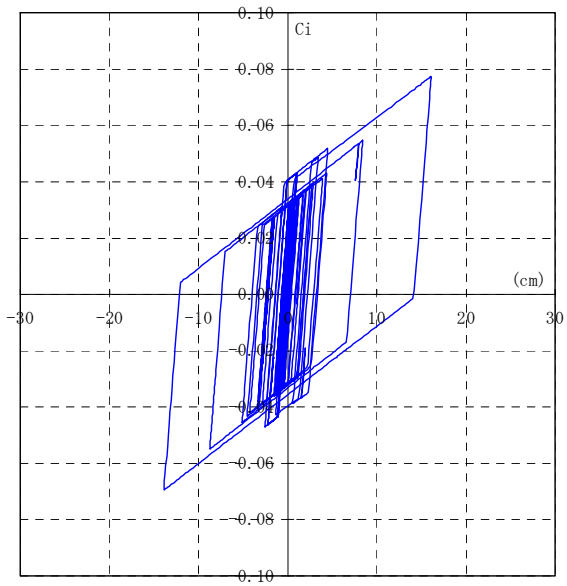
弾性すべり支承 μ－δ 履歴（依存性無視）



弾性すべり支承 μ－δ 履歴（累積すべり変位依存性考慮）

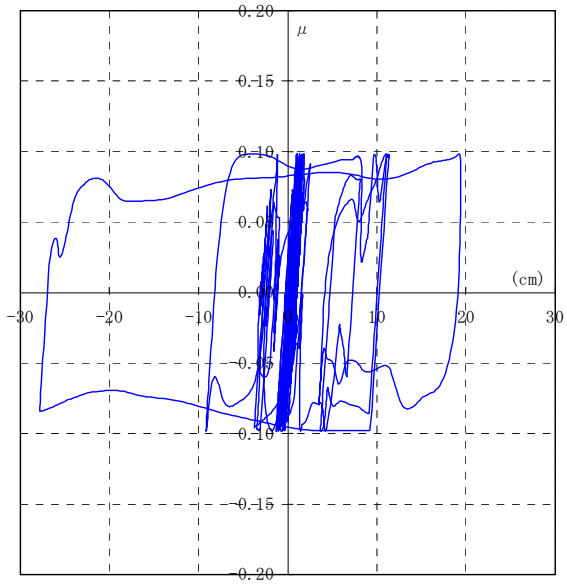


免震層C－δ 履歴（依存性無視）

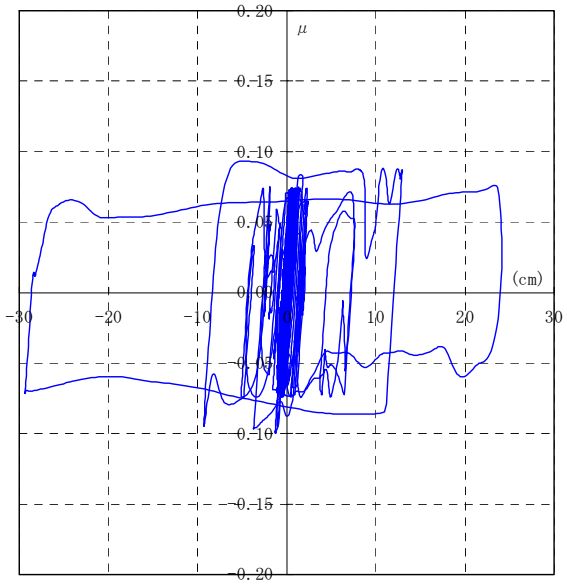


免震層C－δ 履歴（累積すべり変位依存性考慮）

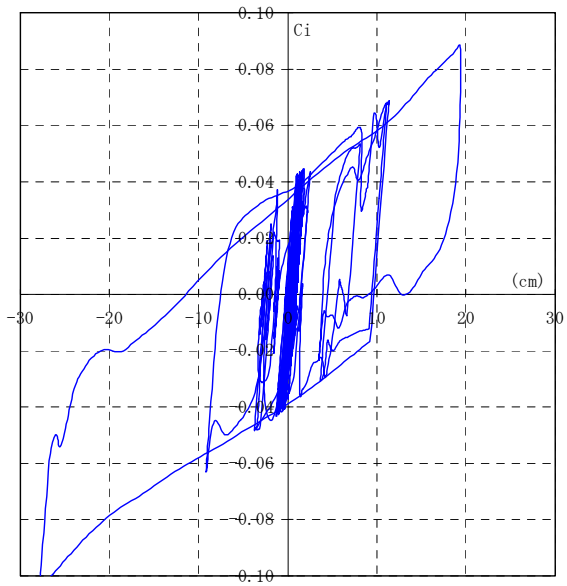
(b) WAVE-Ts1　1 方向入力(EW 成分)



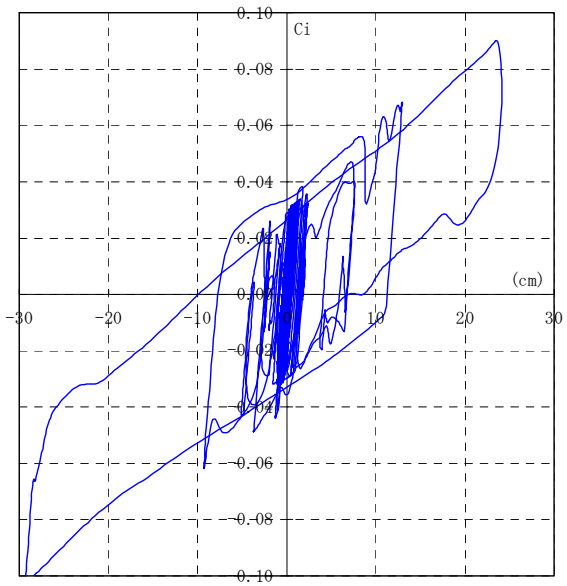
弾性すべり支承 μ－δ 履歴（依存性無視）



弾性すべり支承 μ－δ 履歴（累積すべり変位依存性考慮）

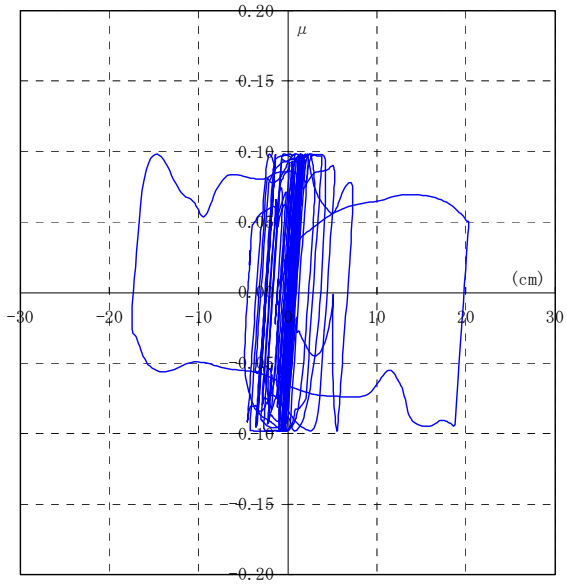


免震層C－δ 履歴（依存性無視）

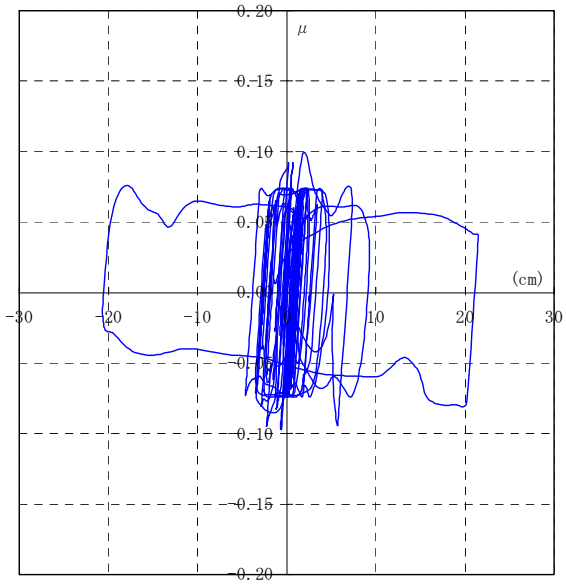


免震層C－δ 履歴（累積すべり変位依存性考慮）

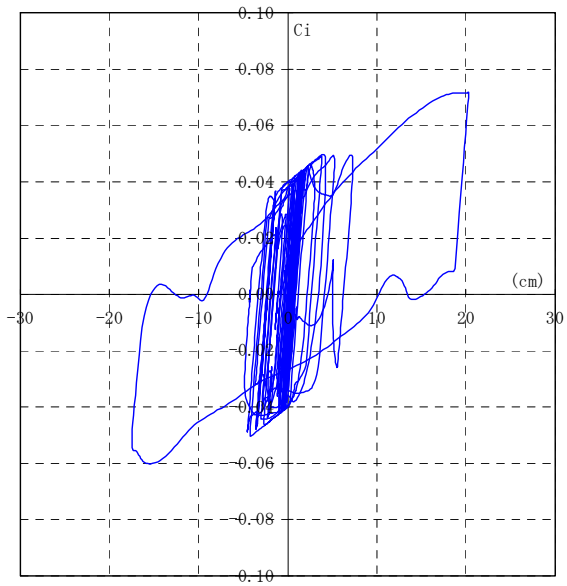
(c) WAVE-Ts1　2 方向入力(NS 成分)



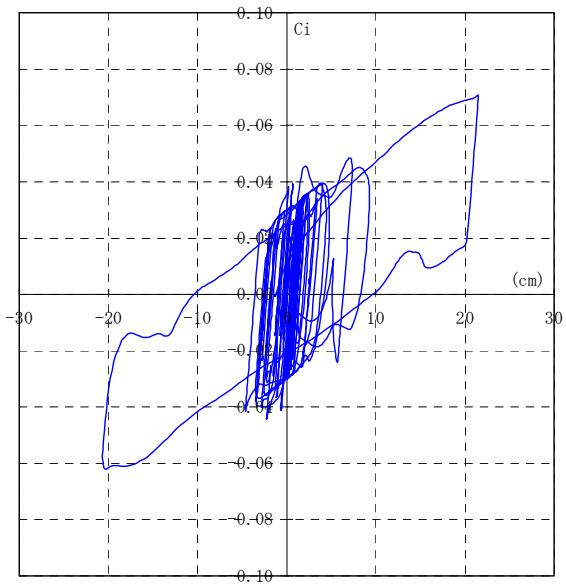
弾性すべり支承 μ－δ 履歴（依存性無視）



弾性すべり支承 μ－δ 履歴（累積すべり変位依存性考慮）



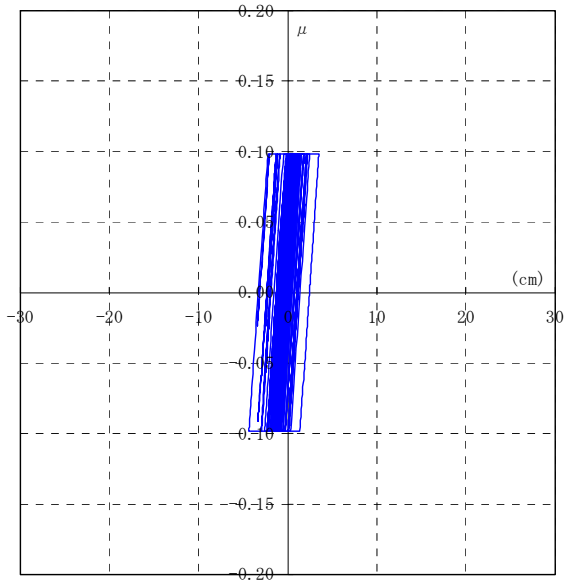
免震層C－δ 履歴（依存性無視）



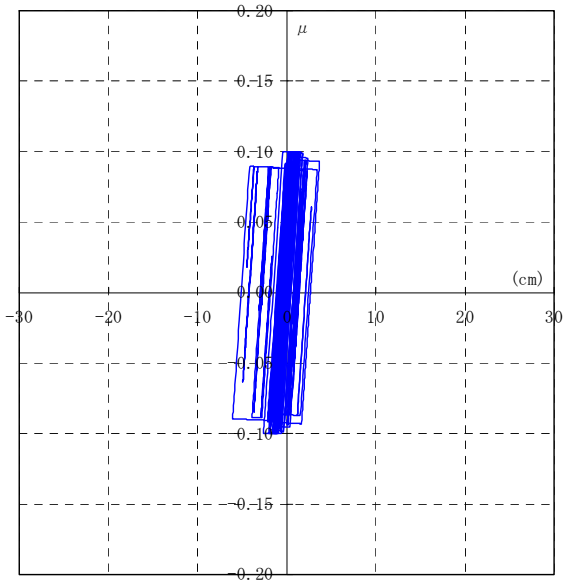
免震層C－δ 履歴（累積すべり変位依存性考慮）

(d) WAVE-Ts1　2 方向入力(EW 成分)

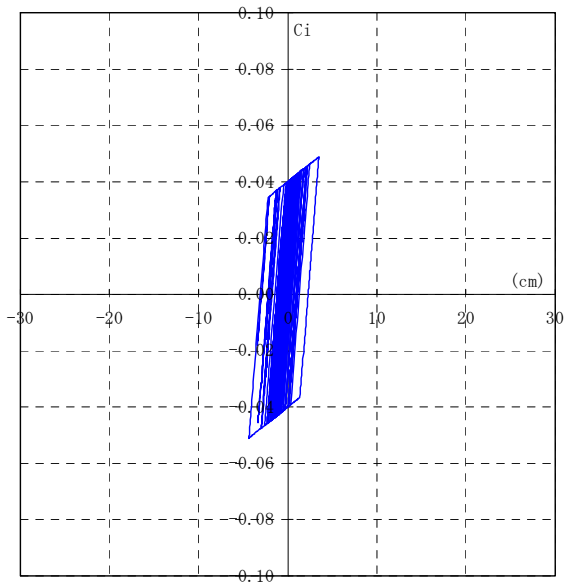
図 2.3.6-20　応答履歴の比較(WAVE-Ts1)



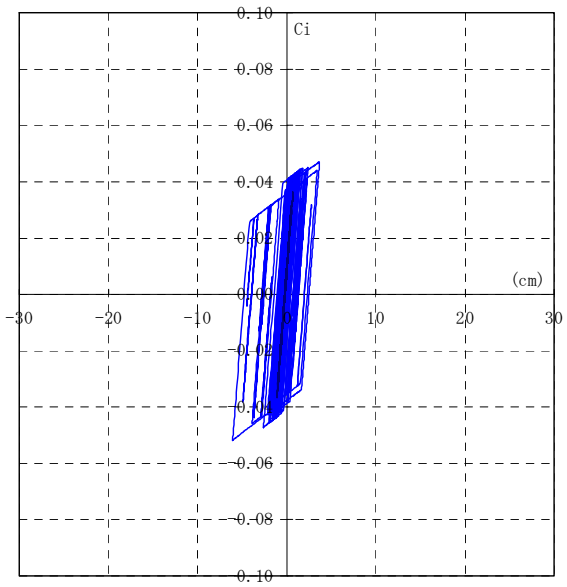
弾性すべり支承 μ－δ 履歴（依存性無視）



弾性すべり支承 μ－δ 履歴（累積すべり変位依存性考慮）

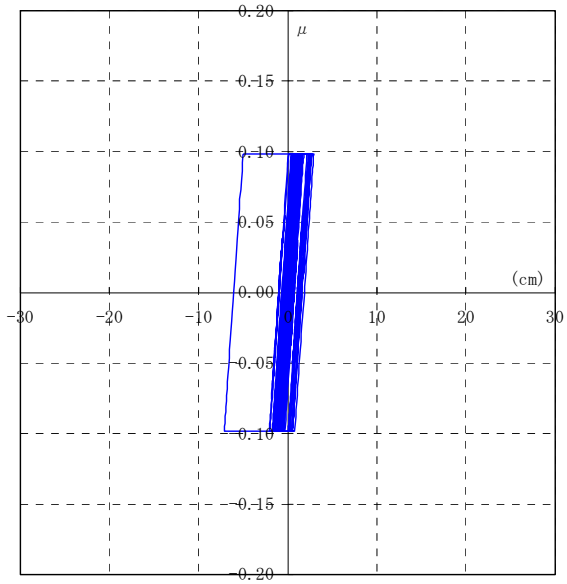


免震層C－δ 履歴（依存性無視）

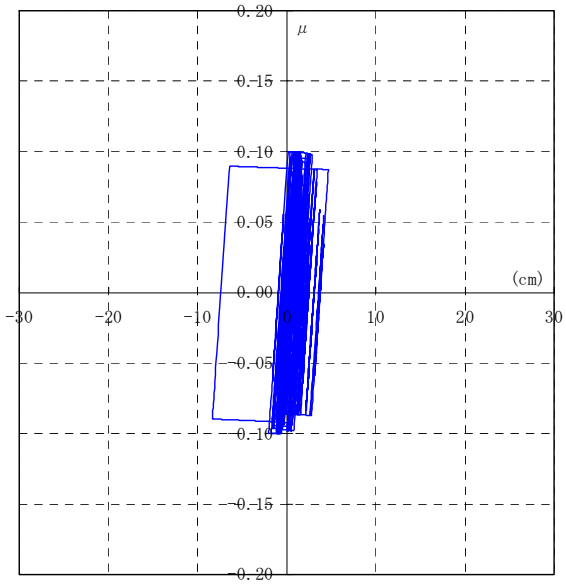


免震層C－δ 履歴（累積すべり変位依存性考慮）

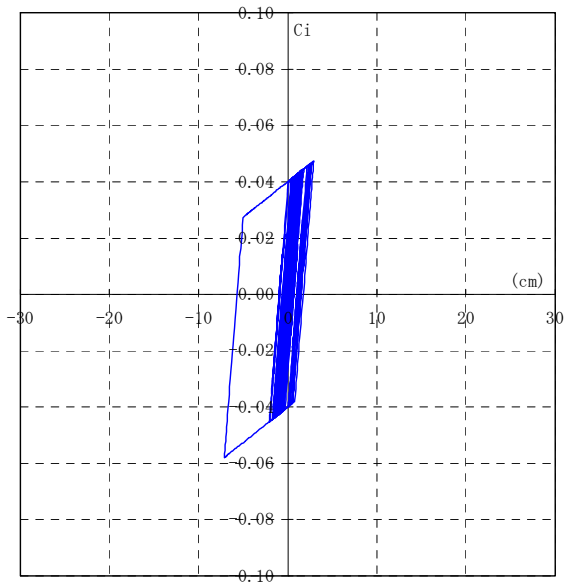
(a) WAVE-Ts2　1 方向入力(NS 成分)



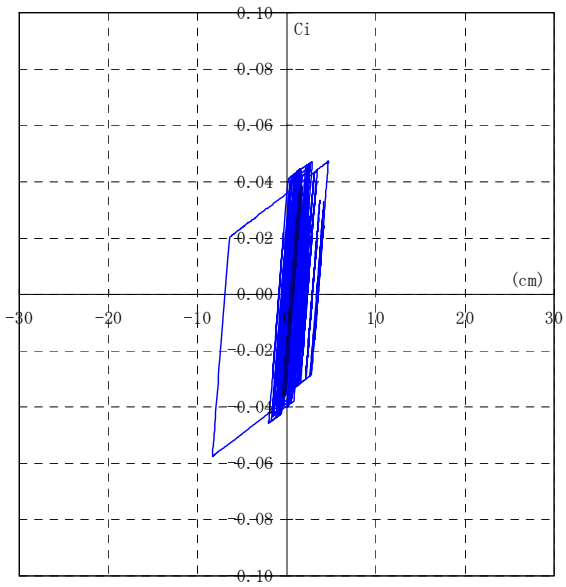
弾性すべり支承 μ－δ 履歴（依存性無視）



弾性すべり支承 μ－δ 履歴（累積すべり変位依存性考慮）

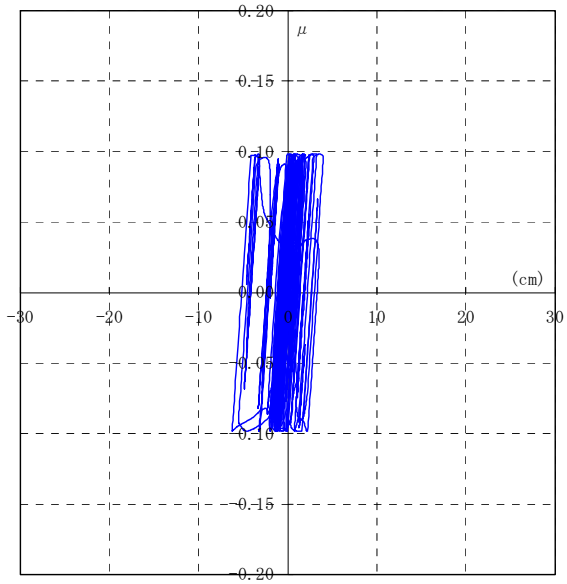


免震層C－δ 履歴（依存性無視）

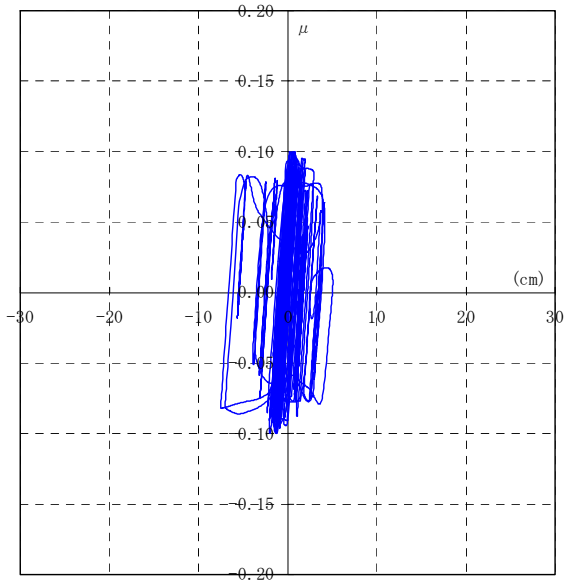


免震層C－δ 履歴（累積すべり変位依存性考慮）

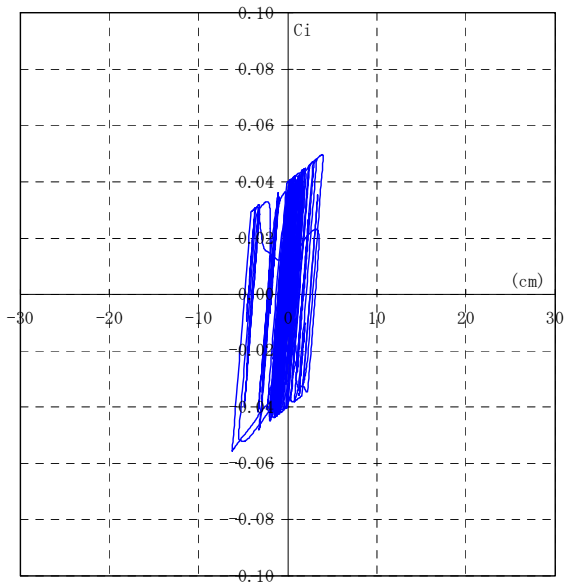
(b) WAVE-Ts2　1 方向入力(EW 成分)



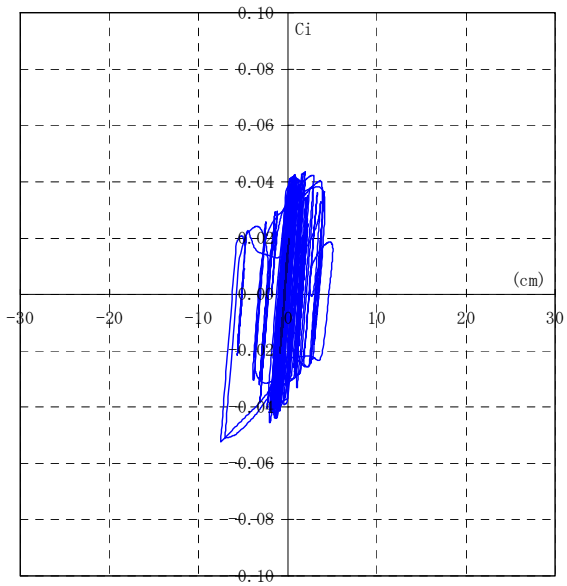
弾性すべり支承 μ－δ 履歴（依存性無視）



弾性すべり支承 μ－δ 履歴（累積すべり変位依存性考慮）

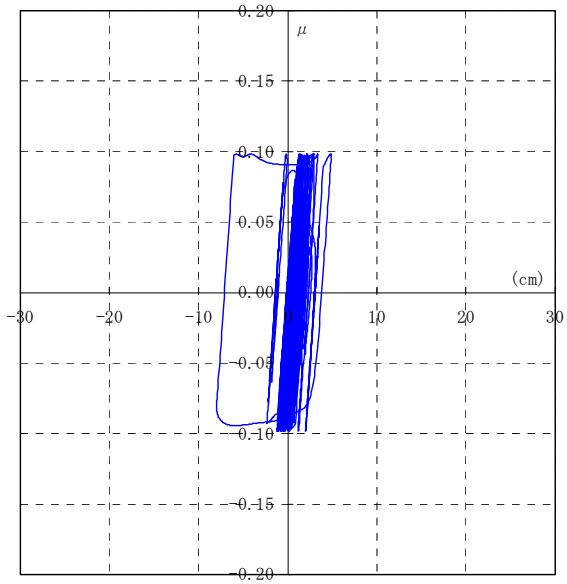


免震層C－δ 履歴（依存性無視）

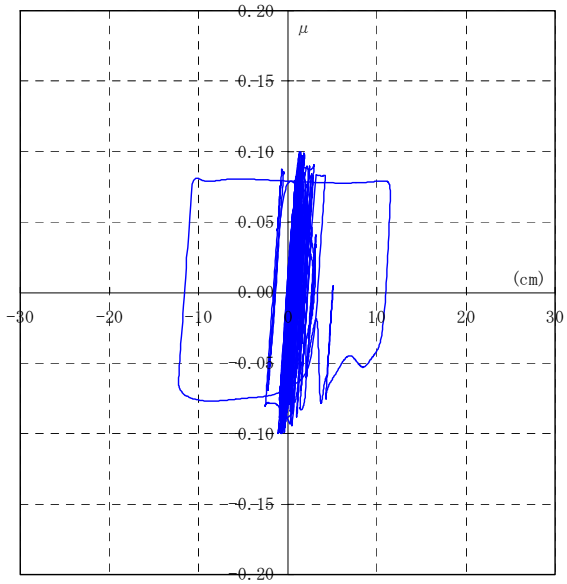


免震層C－δ 履歴（累積すべり変位依存性考慮）

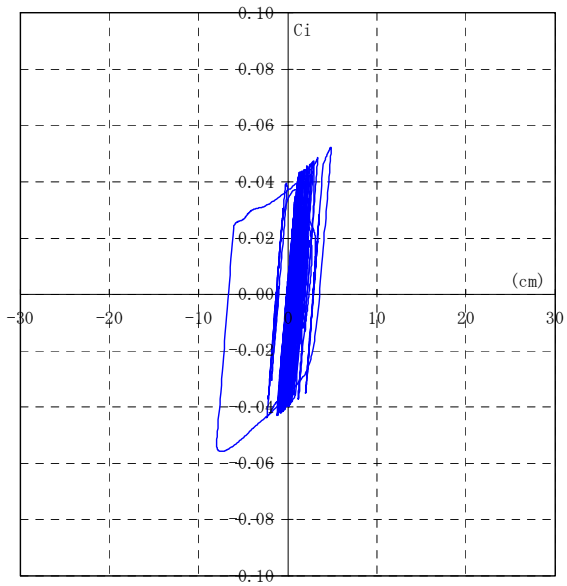
(c) WAVE-Ts2　2 方向入力(NS 成分)



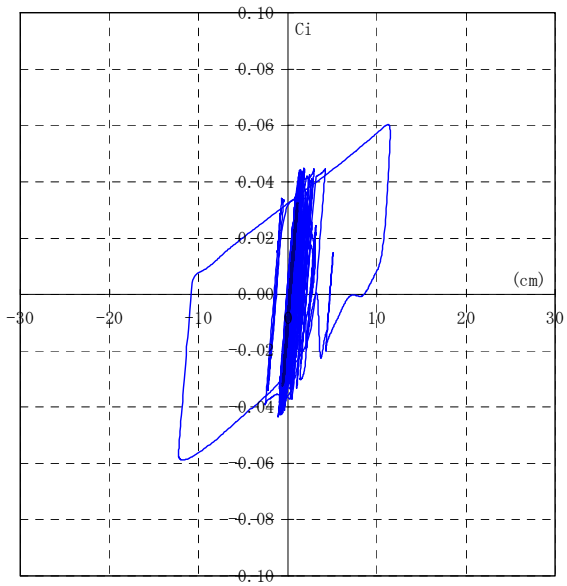
弾性すべり支承 μ－δ 履歴（依存性無視）



弾性すべり支承 μ－δ 履歴（累積すべり変位依存性考慮）



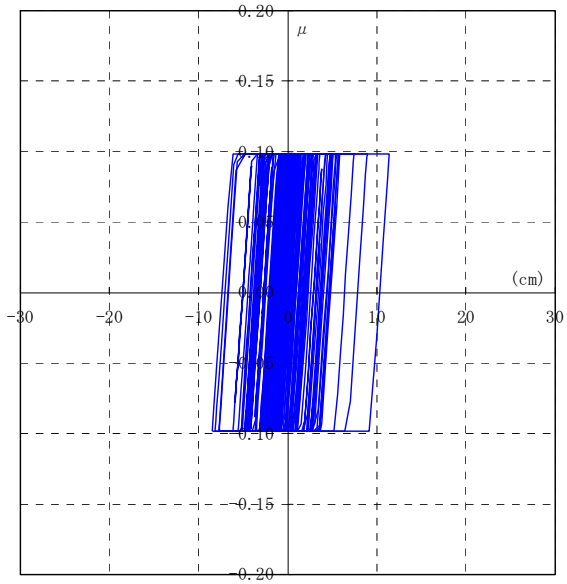
免震層C－δ 履歴（依存性無視）



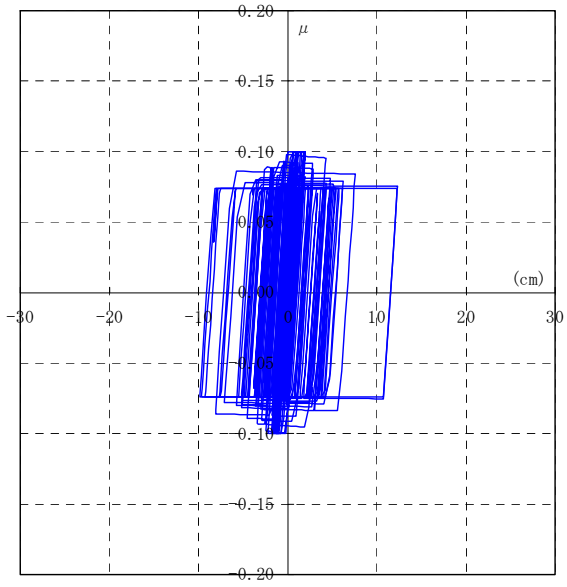
免震層C－δ 履歴（累積すべり変位依存性考慮）

(d) WAVE-Ts2　2 方向入力(EW 成分)

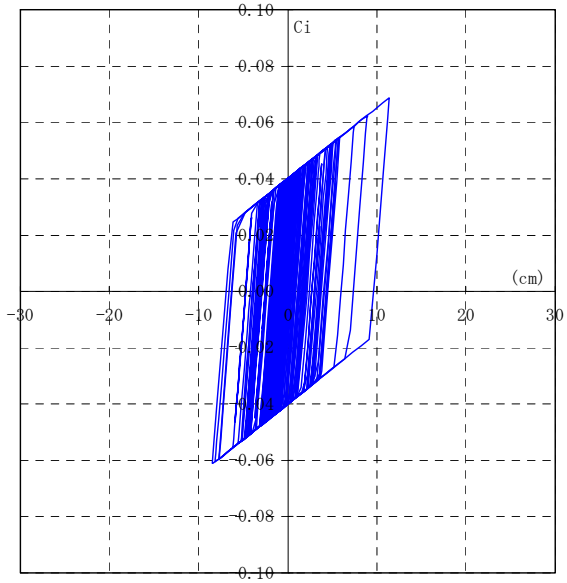
図 2.3.6-21　応答履歴の比較(WAVE-Ts2)



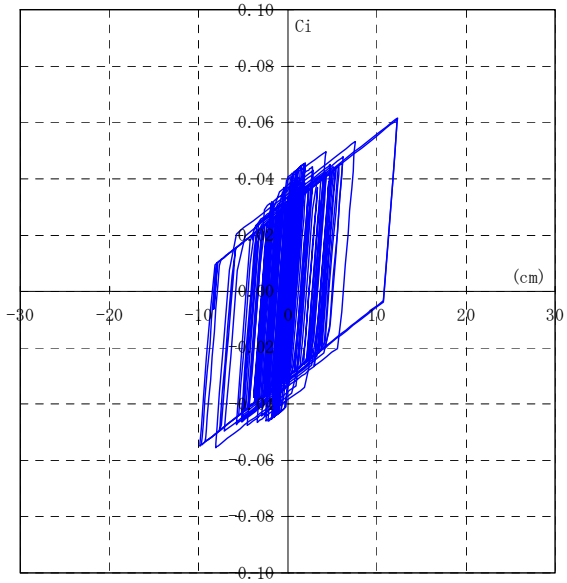
弾性すべり支承 μ－δ 履歴（依存性無視）



弾性すべり支承 μ－δ 履歴（累積すべり変位依存性考慮）

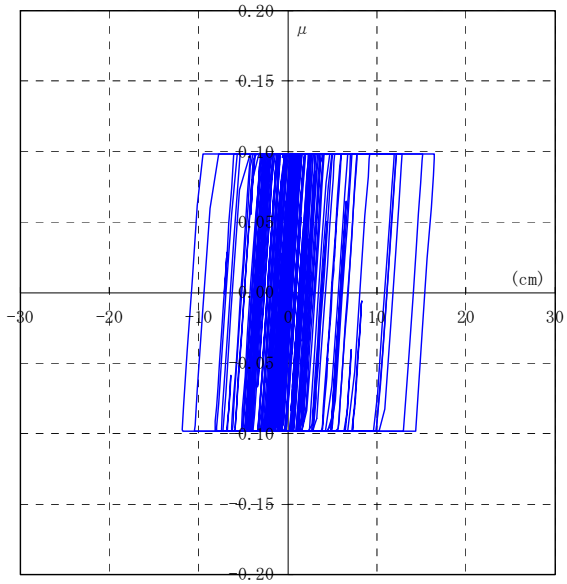


免震層C－δ 履歴（依存性無視）

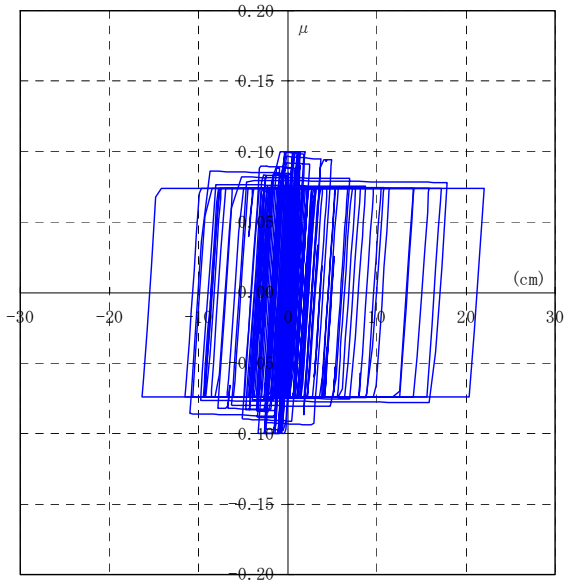


免震層C－δ 履歴（累積すべり変位依存性考慮）

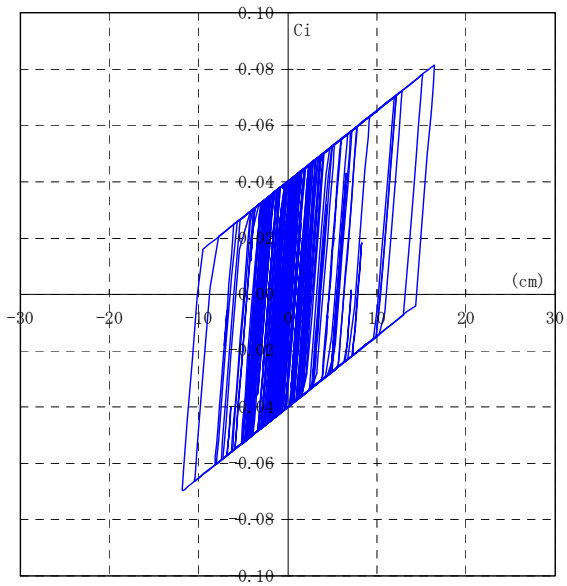
(a) WAVE-Tk　1 方向入力(NS 成分)



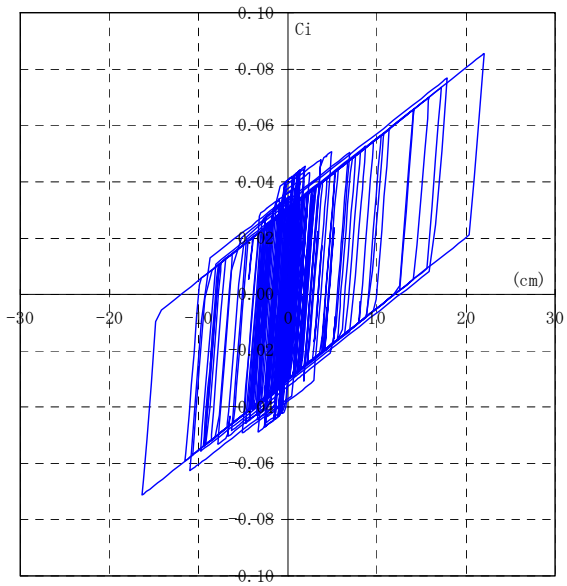
弾性すべり支承 μ－δ 履歴（依存性無視）



弾性すべり支承 μ－δ 履歴（累積すべり変位依存性考慮）

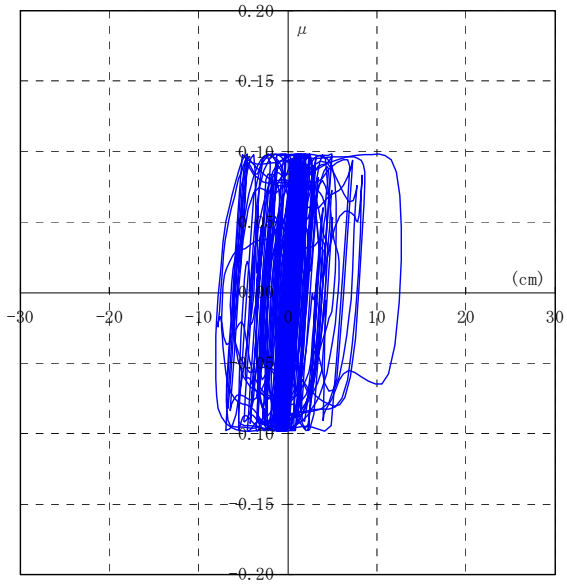


免震層C－δ 履歴（依存性無視）

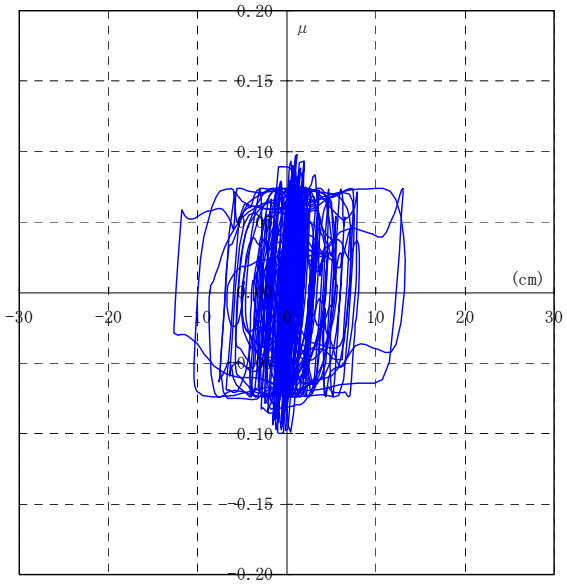


免震層C－δ 履歴（累積すべり変位依存性考慮）

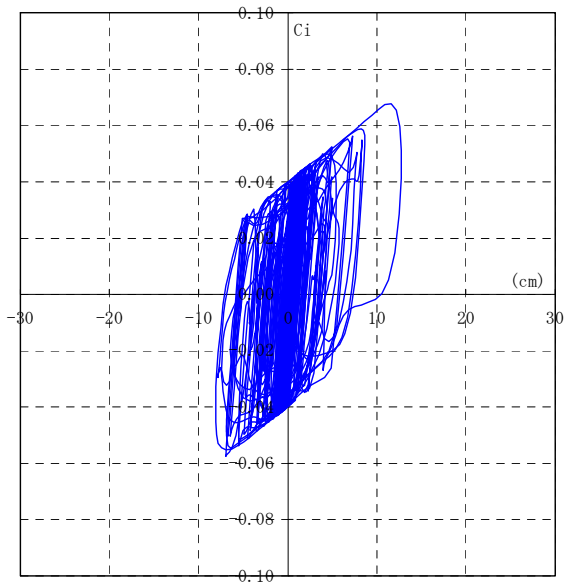
(b) WAVE-Tk　1 方向入力(EW 成分)



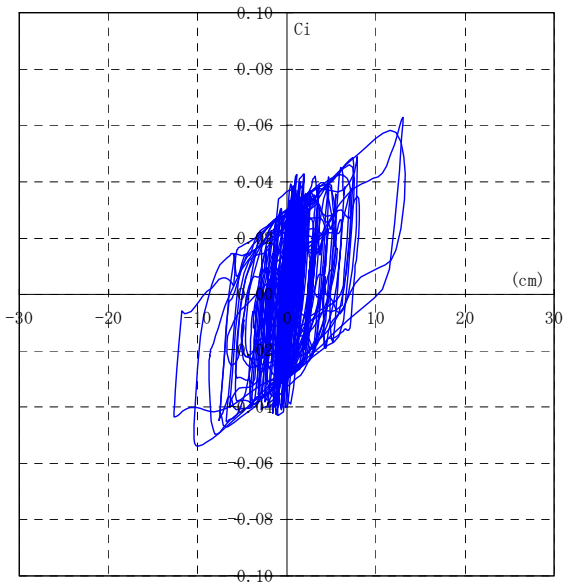
弾性すべり支承 μ－δ 履歴（依存性無視）



弾性すべり支承 μ－δ 履歴（累積すべり変位依存性考慮）

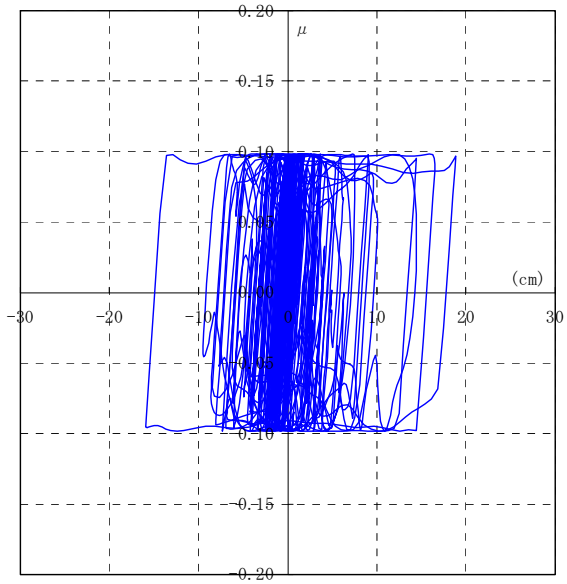


免震層C－δ 履歴（依存性無視）

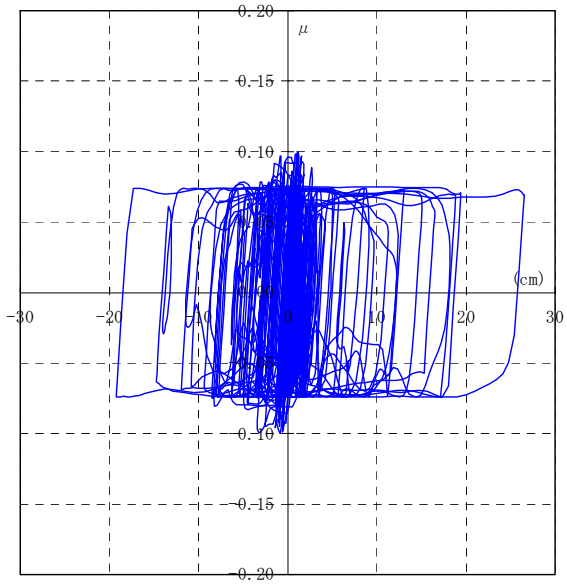


免震層C－δ 履歴（累積すべり変位依存性考慮）

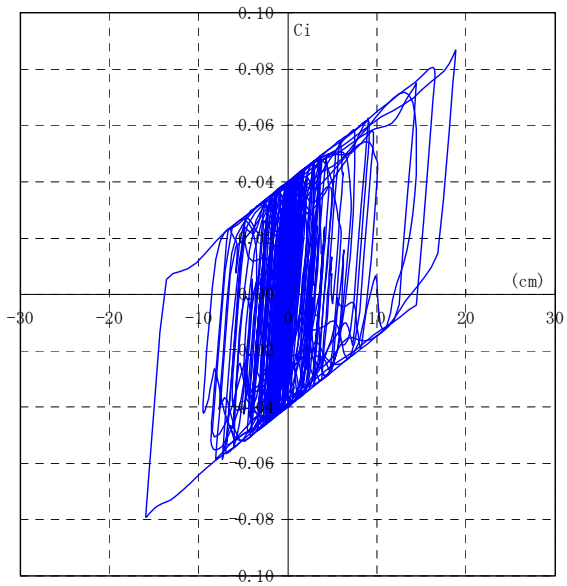
(c) WAVE-Tk　2 方向入力(NS 成分)



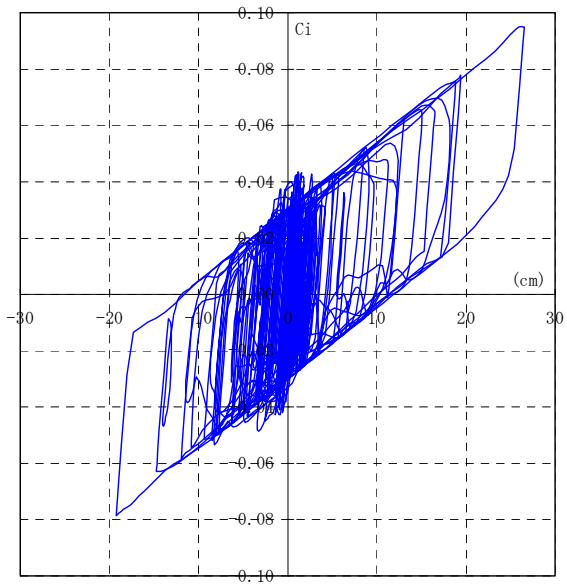
弾性すべり支承 μ－δ 履歴（依存性無視）



弾性すべり支承 μ－δ 履歴（累積すべり変位依存性考慮）



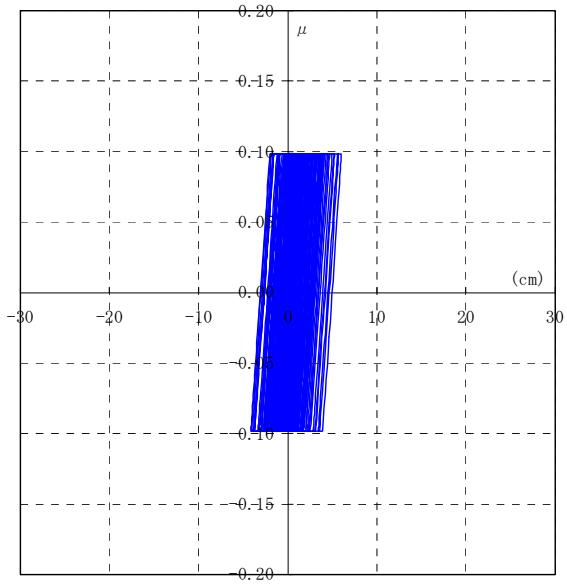
免震層C－δ 履歴（依存性無視）



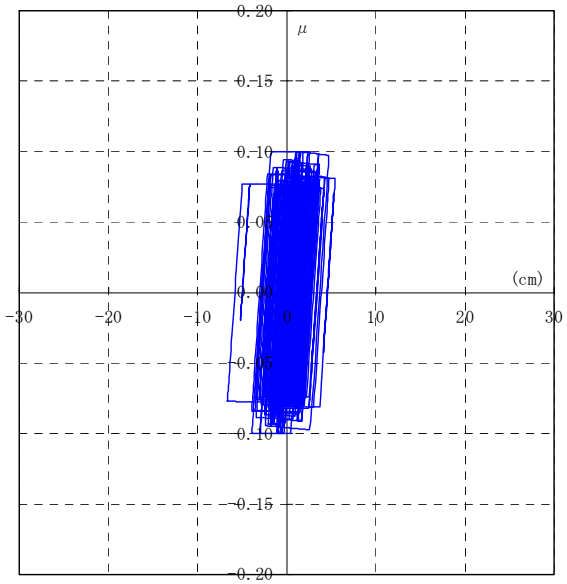
免震層C－δ 履歴（累積すべり変位依存性考慮）

(d) WAVE-Tk　2 方向入力(EW 成分)

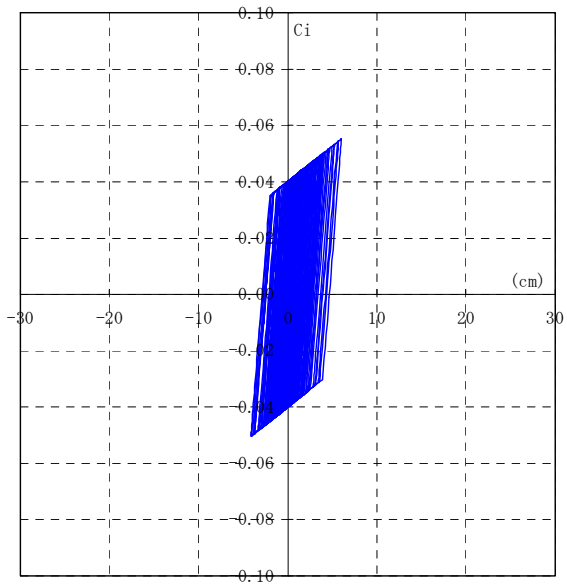
図 2.3.6-22　応答履歴の比較(WAVE-Tk)



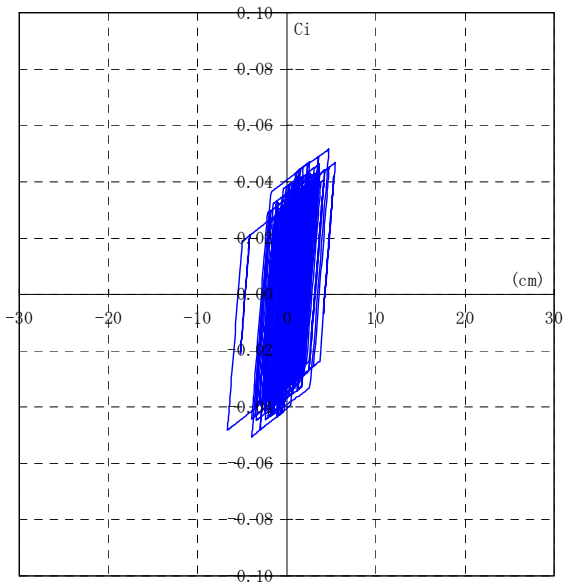
弾性すべり支承 μ－δ 履歴（依存性無視）



弾性すべり支承 μ－δ 履歴（累積すべり変位依存性考慮）

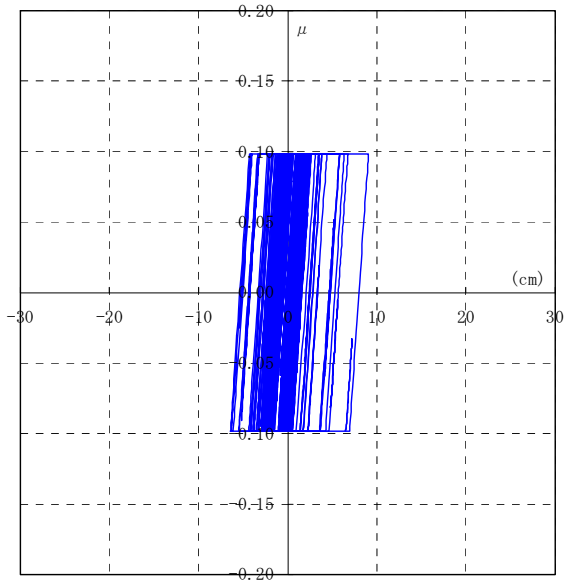


免震層C－δ 履歴（依存性無視）

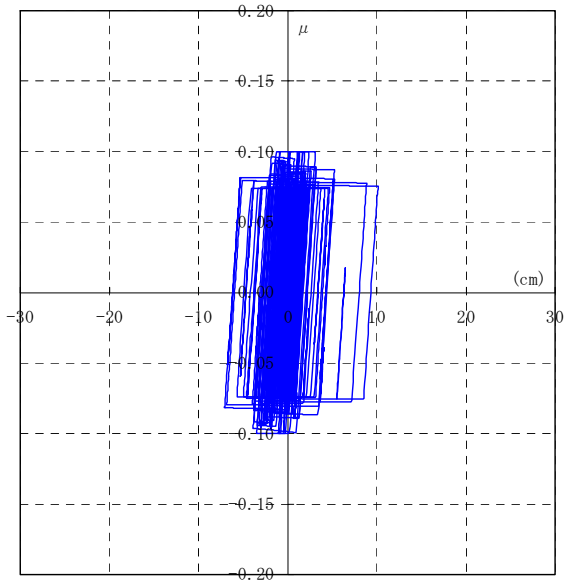


免震層C－δ 履歴（累積すべり変位依存性考慮）

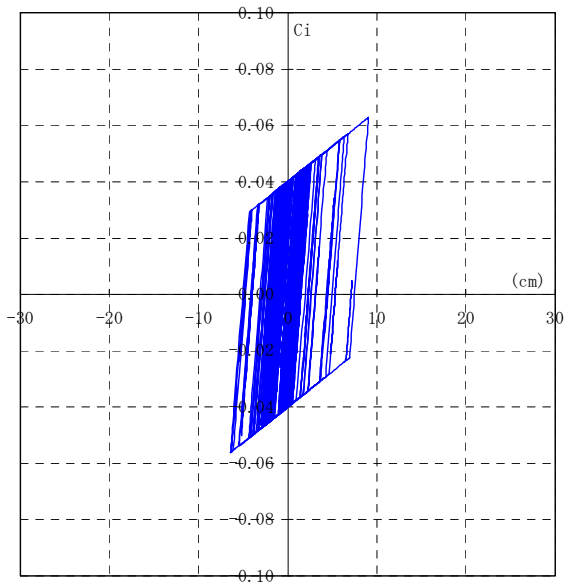
(a) WAVE-S　1 方向入力(NS 成分)



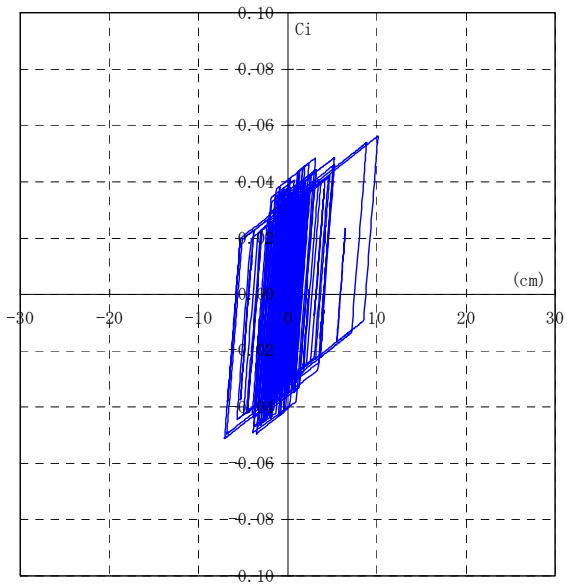
弾性すべり支承 μ－δ 履歴（依存性無視）



弾性すべり支承 μ－δ 履歴（累積すべり変位依存性考慮）

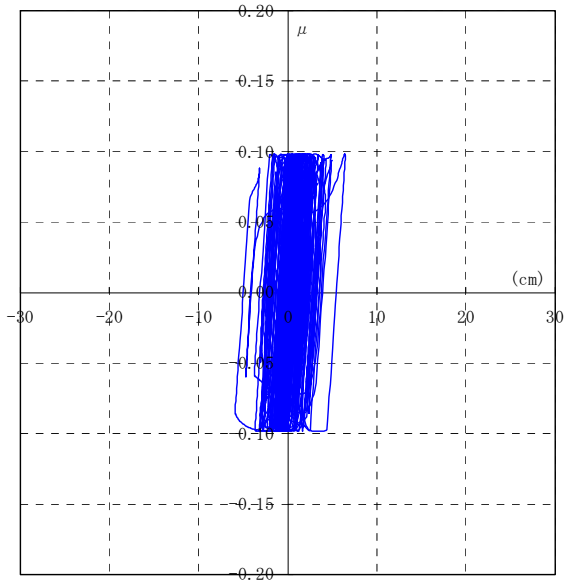


免震層C－δ 履歴（依存性無視）

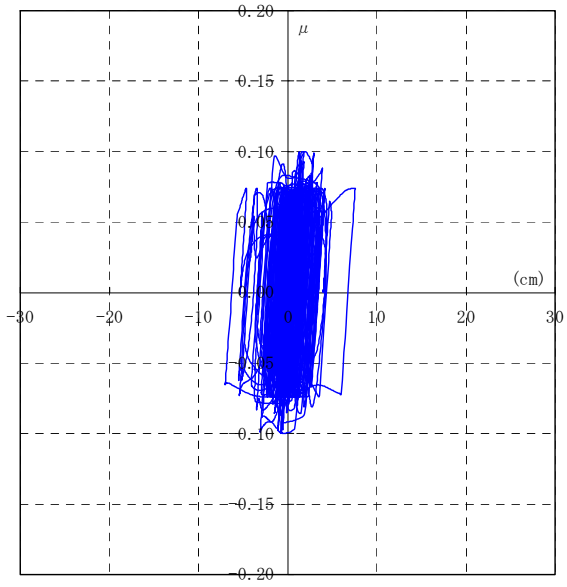


免震層C－δ 履歴（累積すべり変位依存性考慮）

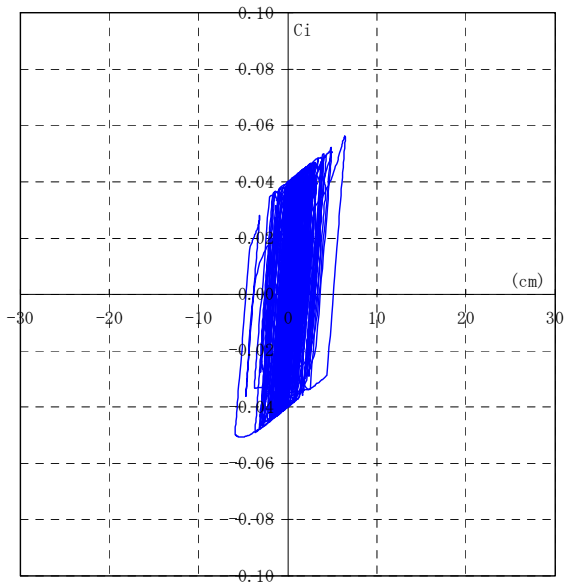
(b) WAVE-S　1 方向入力(EW 成分)



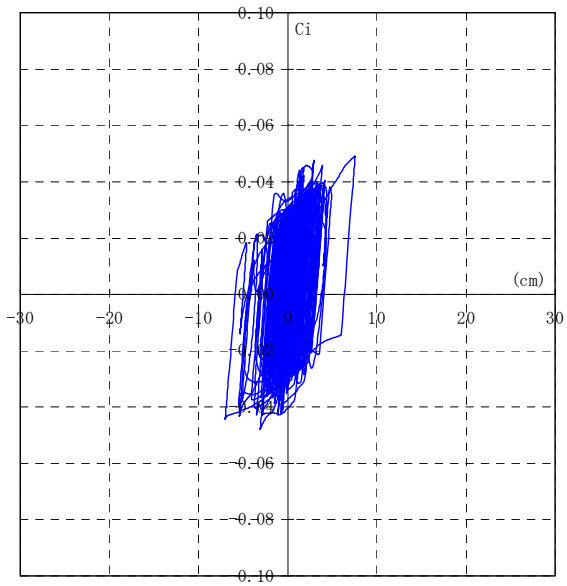
弾性すべり支承 μ－δ 履歴（依存性無視）



弾性すべり支承 μ－δ 履歴（累積すべり変位依存性考慮）

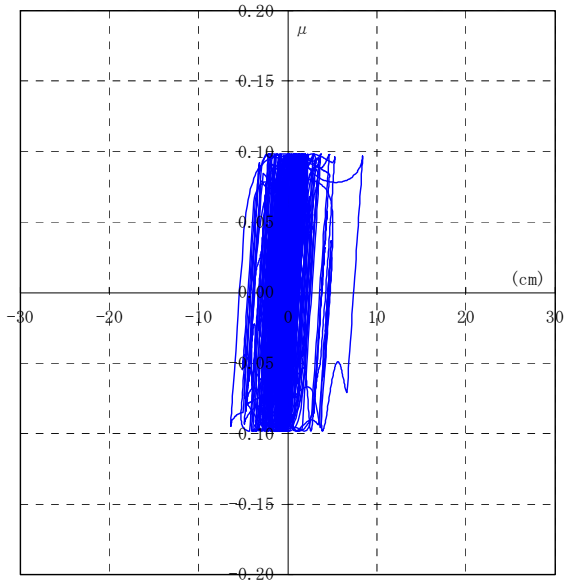


免震層C－δ 履歴（依存性無視）

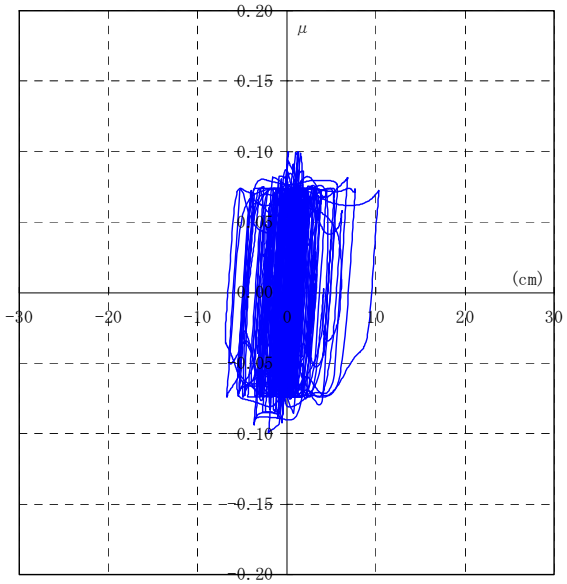


免震層C－δ 履歴（累積すべり変位依存性考慮）

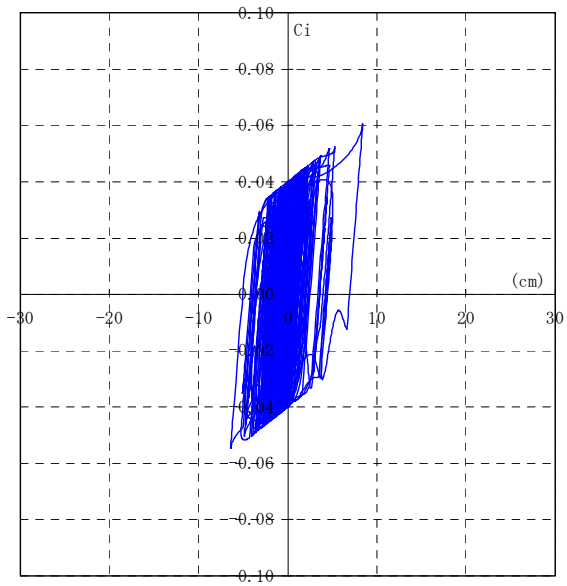
(c) WAVE-S　2 方向入力(NS 成分)



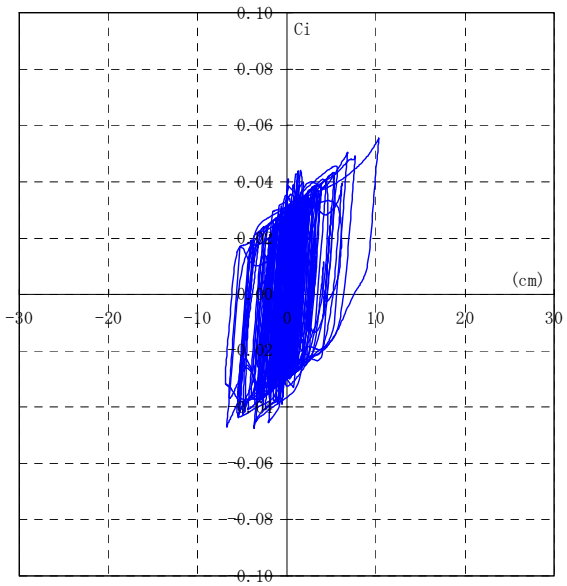
弾性すべり支承 μ－δ 履歴（依存性無視）



弾性すべり支承 μ－δ 履歴（累積すべり変位依存性考慮）



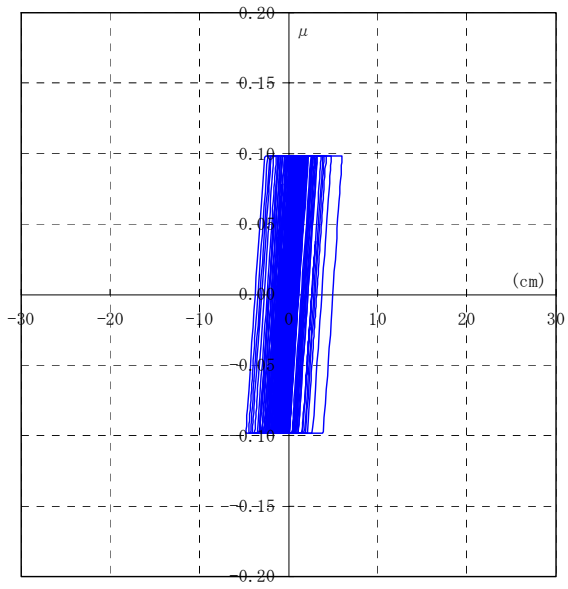
免震層C－δ 履歴（依存性無視）



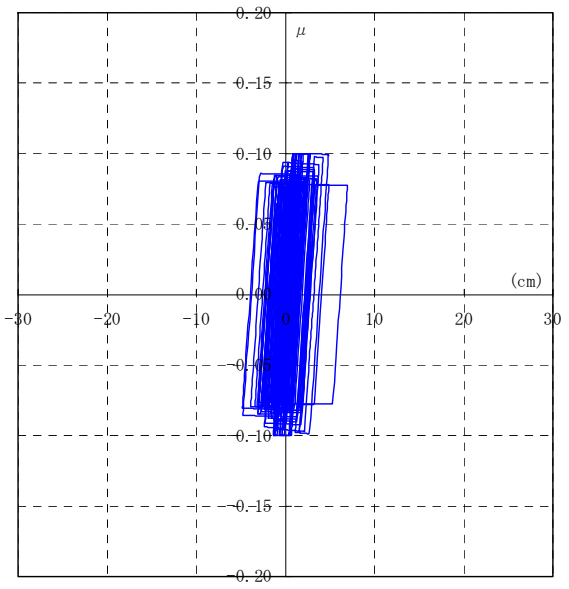
免震層C－δ 履歴（累積すべり変位依存性考慮）

(d) WAVE-S　2 方向入力(EW 成分)

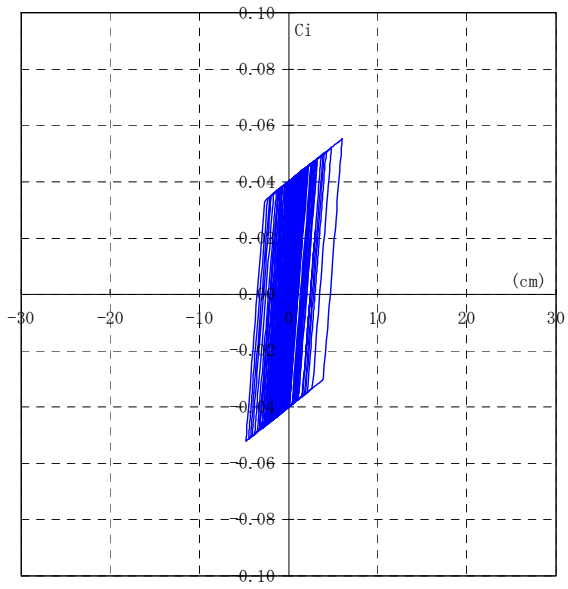
図 2.3.6-23　応答履歴の比較(WAVE-S)



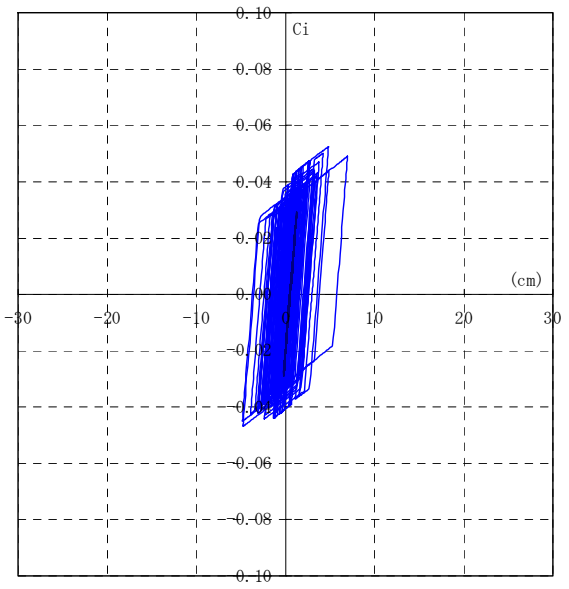
弾性すべり支承 μ－δ 履歴（依存性無視）



弾性すべり支承 μ－δ 履歴（累積すべり変位依存性考慮）

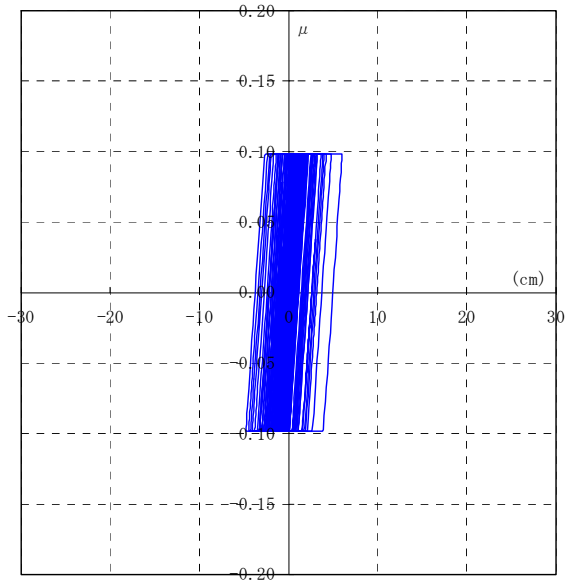


免震層C－δ 履歴（依存性無視）

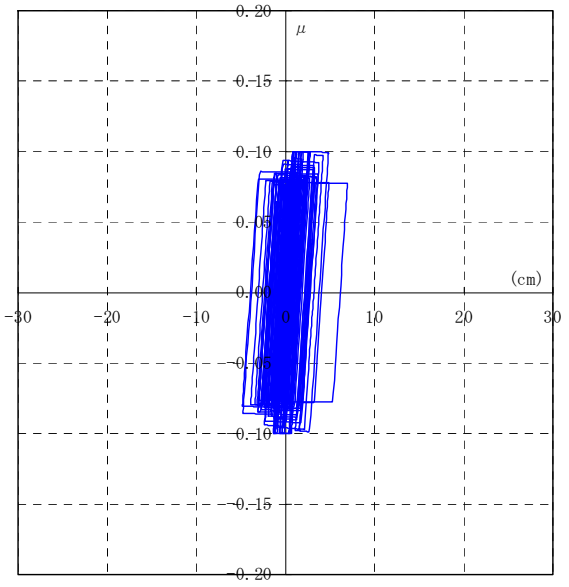


免震層C－δ 履歴（累積すべり変位依存性考慮）

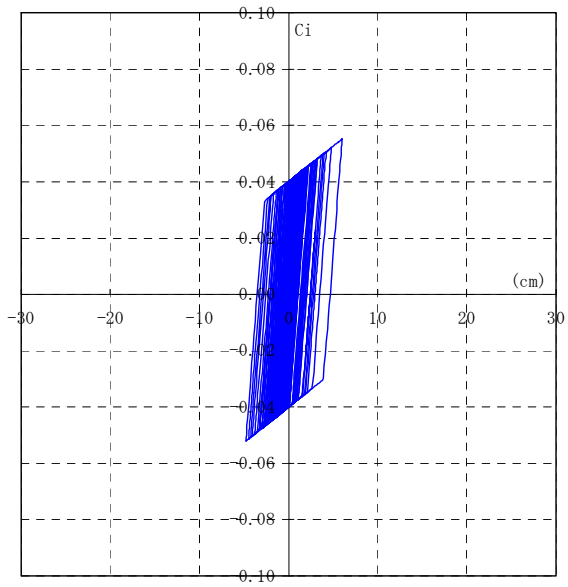
(a) WAVE-K　1 方向入力(NS 成分)



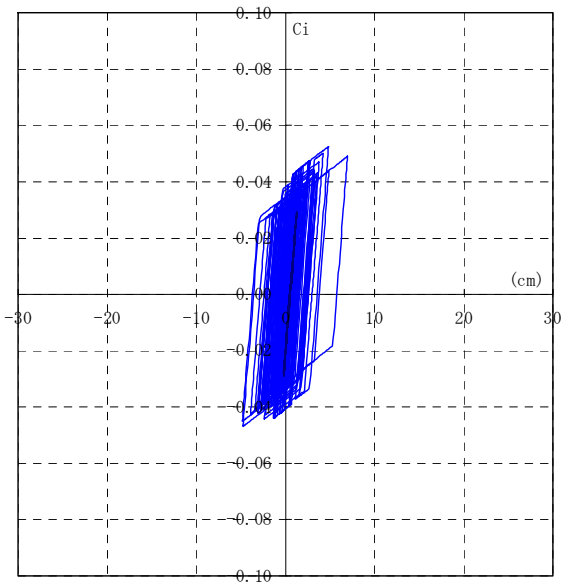
弾性すべり支承 μ－δ 履歴（依存性無視）



弾性すべり支承 μ－δ 履歴（累積すべり変位依存性考慮）

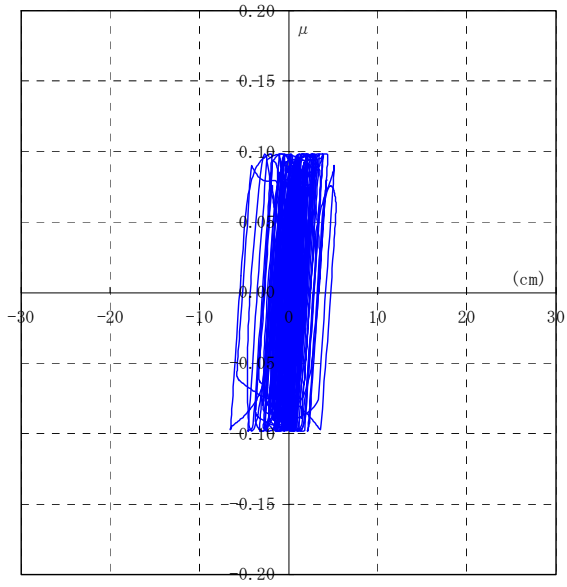


免震層C－δ 履歴（依存性無視）

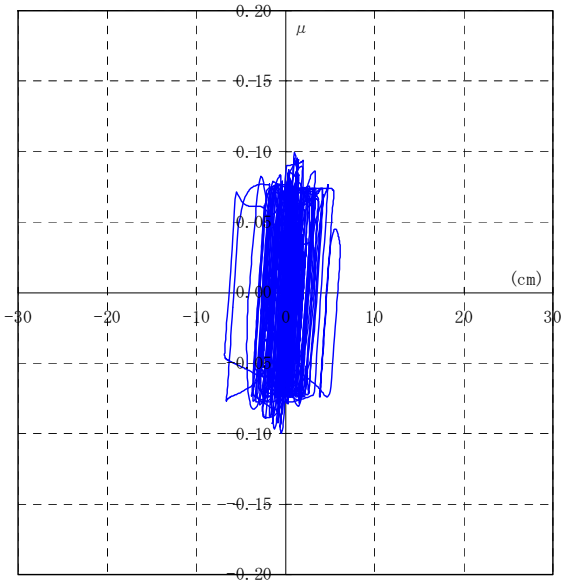


免震層C－δ 履歴（累積すべり変位依存性考慮）

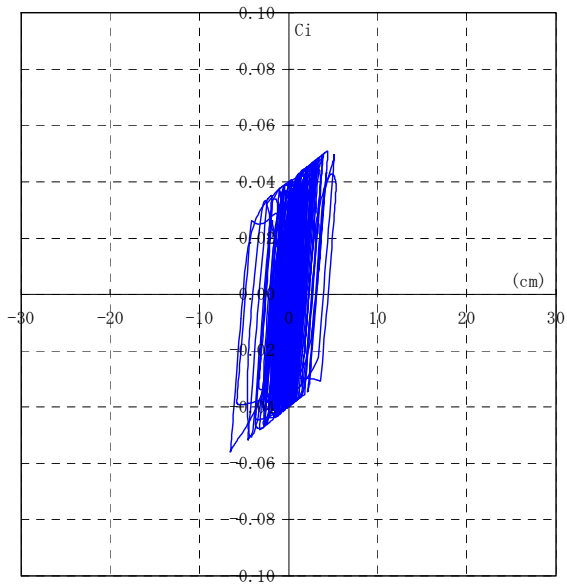
(b) WAVE-K　1 方向入力(EW 成分)



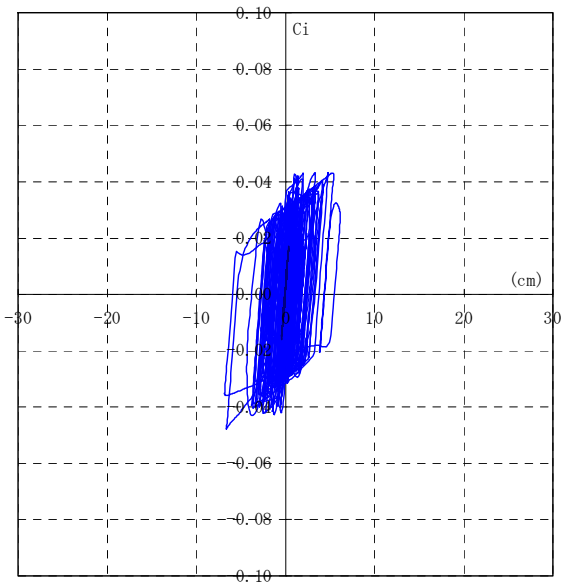
弾性すべり支承 μ－δ 履歴（依存性無視）



弾性すべり支承 μ－δ 履歴（累積すべり変位依存性考慮）

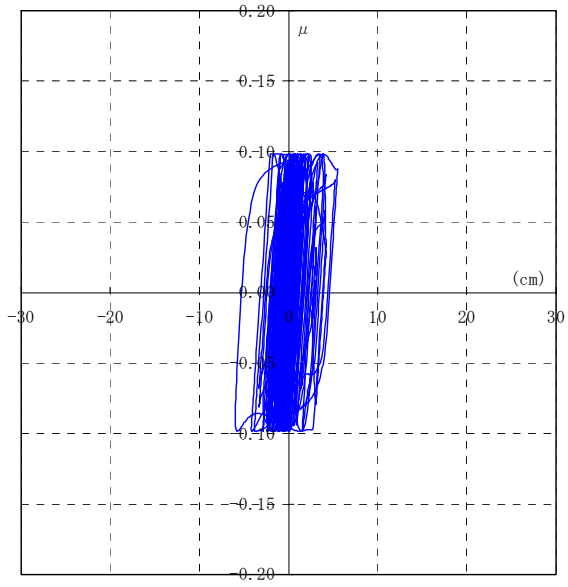


免震層C－δ 履歴（依存性無視）

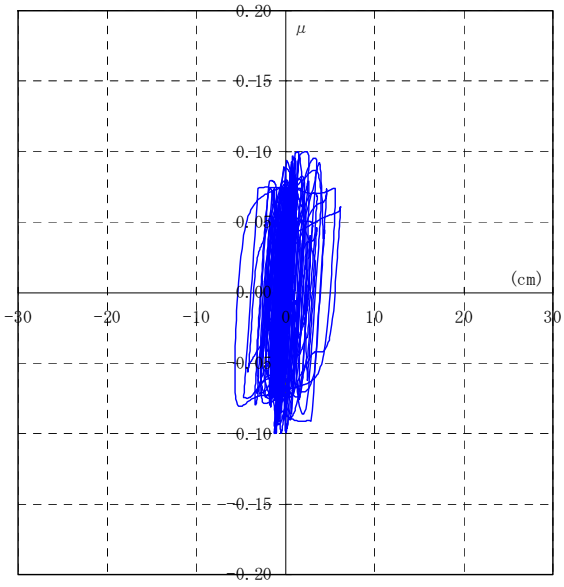


免震層C－δ 履歴（累積すべり変位依存性考慮）

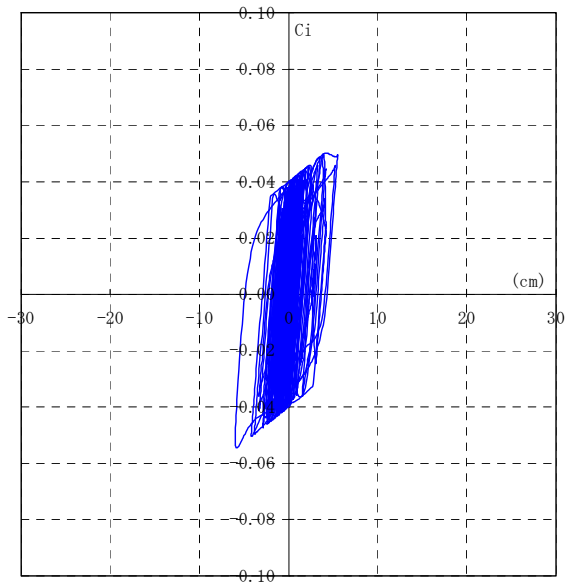
(c) WAVE-K　２方向入力(NS 成分)



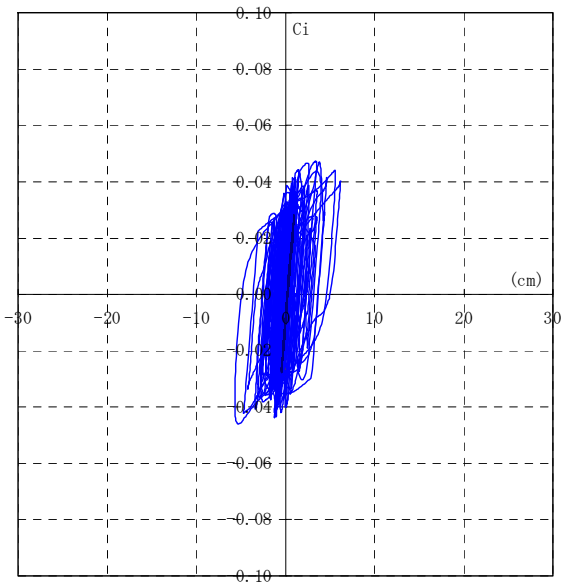
弾性すべり支承 μ－δ 履歴（依存性無視）



弾性すべり支承 μ－δ 履歴（累積すべり変位依存性考慮）



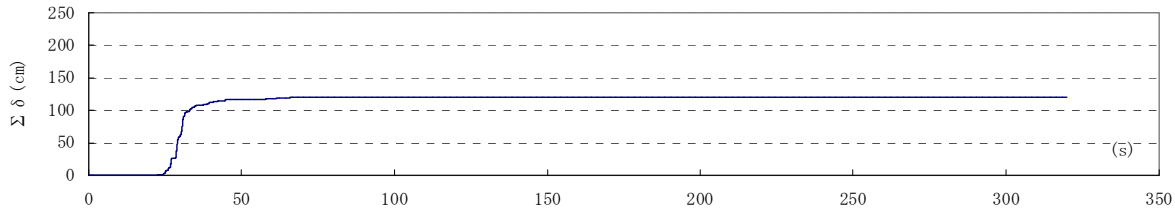
免震層C－δ 履歴（依存性無視）



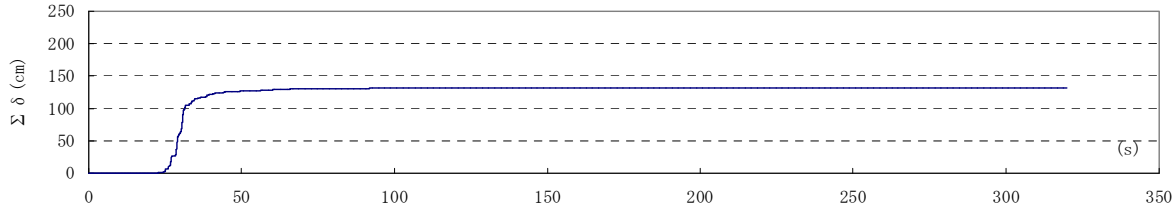
免震層C－δ 履歴（累積すべり変位依存性考慮）

(d) WAVE-K　２方向入力(EW 成分)

図 2.3.6-24　応答履歴の比較(WAVE-K)

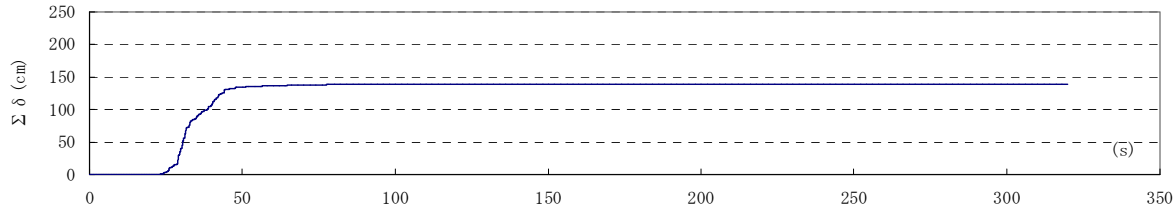


累積すべり変位時刻歴波形（依存性無視）

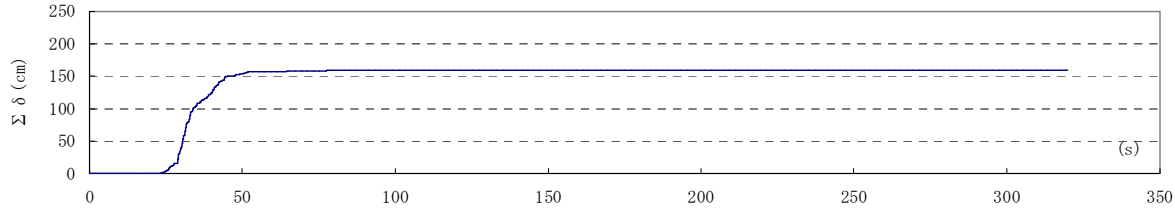


累積すべり変位時刻歴波形（累積すべり変位依存性考慮）

(a) WAVE-Ts1　1 方向入力(NS 成分)

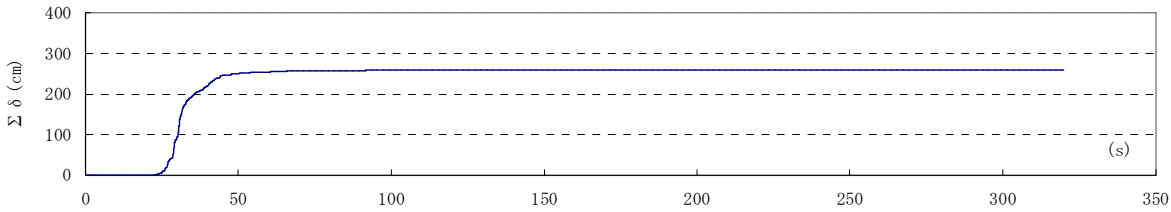


累積すべり変位時刻歴波形（依存性無視）

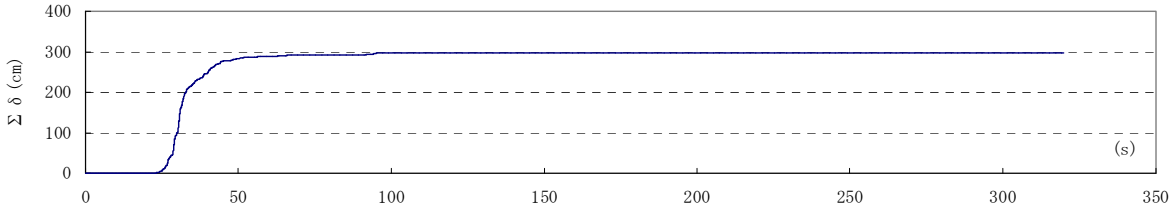


累積すべり変位時刻歴波形（累積すべり変位依存性考慮）

(b) WAVE-Ts1　1 方向入力(EW 成分)



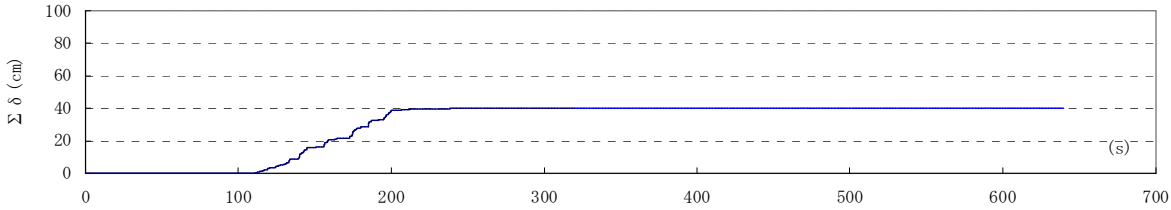
累積すべり変位時刻歴波形（依存性無視）



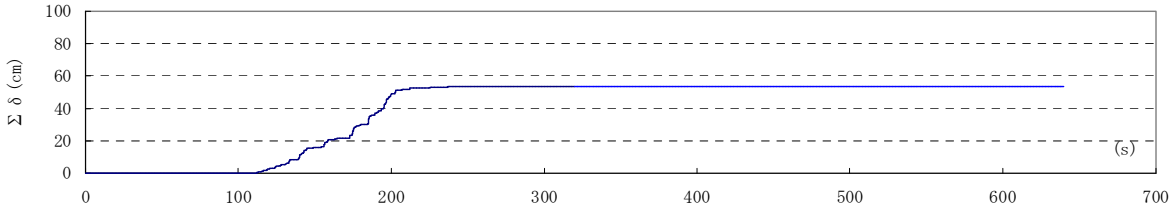
累積すべり変位時刻歴波形（累積すべり変位依存性考慮）

(c) WAVE-Ts1　2 方向入力

図 2.3.6.-25　累積すべり変位時刻歴波形(WAVE-Ts1)

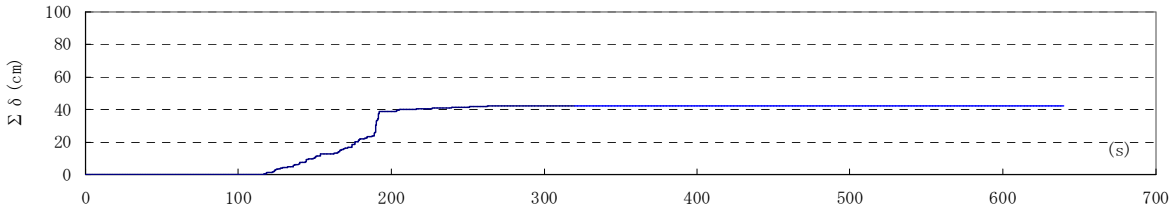


累積すべり変位時刻歴波形（依存性無視）

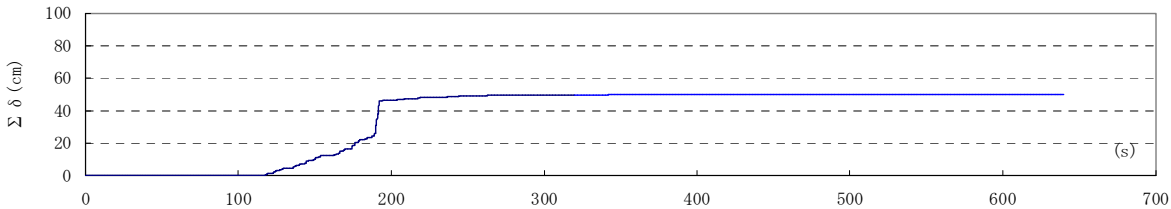


累積すべり変位時刻歴波形（累積すべり変位依存性考慮）

(a) WAVE-Ts2　1 方向入力(NS 成分)

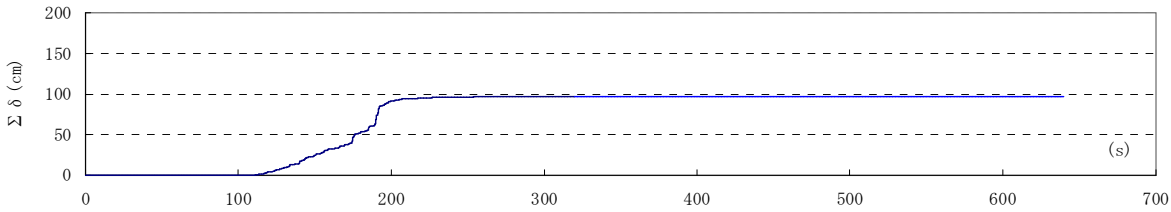


累積すべり変位時刻歴波形（依存性無視）

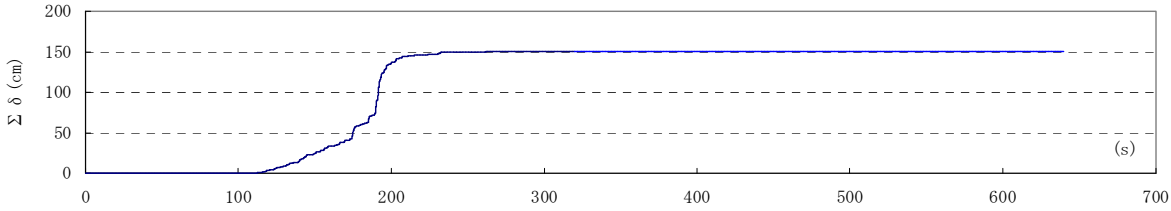


累積すべり変位時刻歴波形（累積すべり変位依存性考慮）

(b) WAVE-Ts2　1 方向入力(EW 成分)



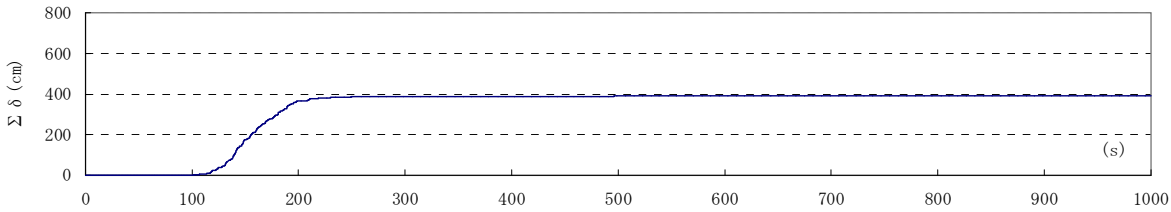
累積すべり変位時刻歴波形（依存性無視）



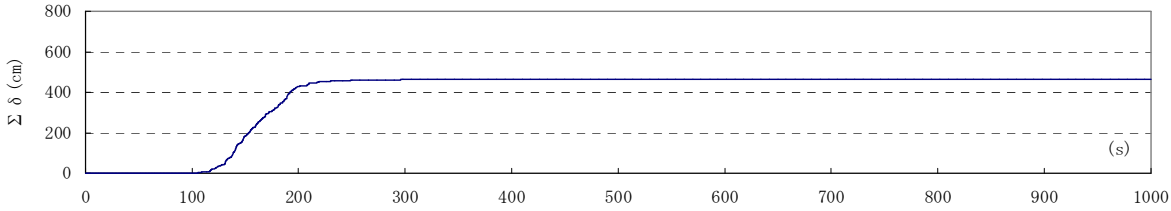
累積すべり変位時刻歴波形（累積すべり変位依存性考慮）

(c) WAVE-Ts2　2 方向入力

図 2.3.6.-26　累積すべり変位時刻歴波形(WAVE-Ts2)

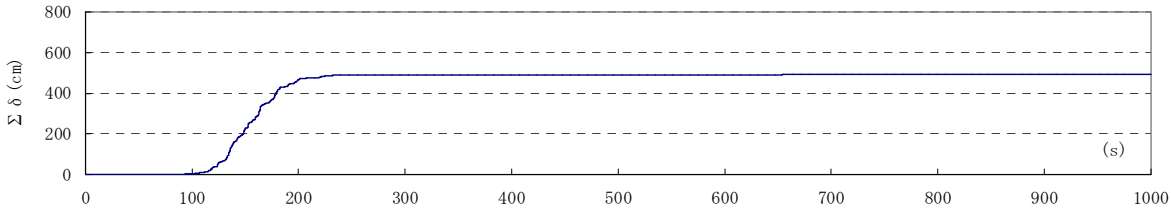


累積すべり変位時刻歴波形（依存性無視）

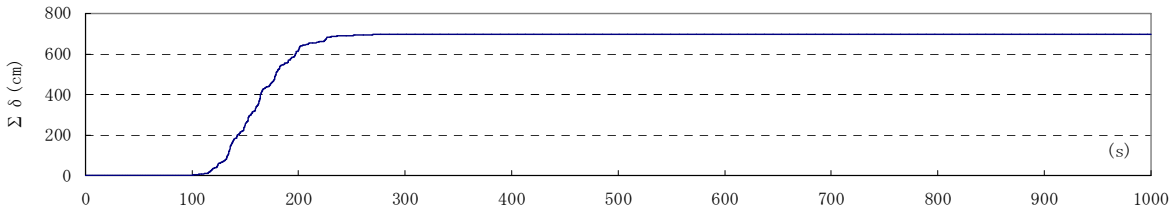


累積すべり変位時刻歴波形（累積すべり変位依存性考慮）

(a) WAVE-Tk　1 方向入力(NS 成分)

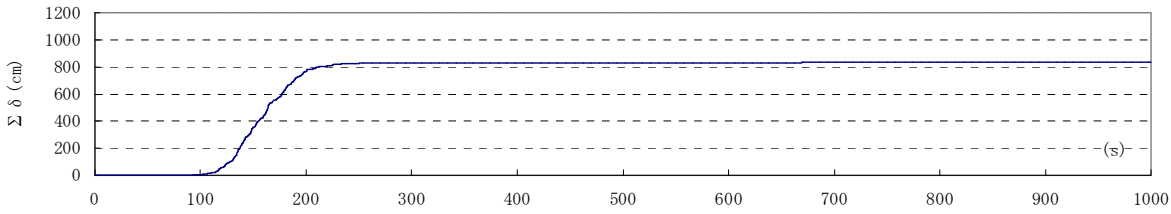


累積すべり変位時刻歴波形（依存性無視）

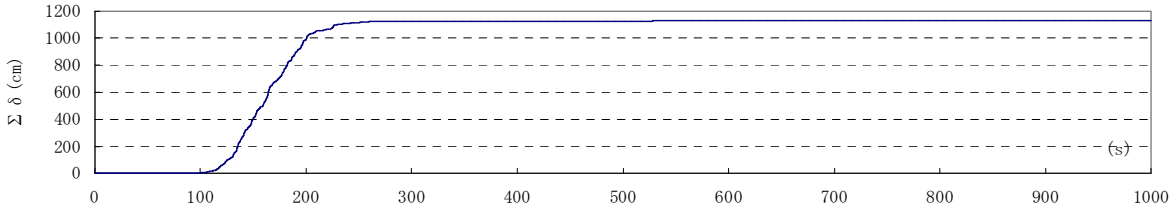


累積すべり変位時刻歴波形（累積すべり変位依存性考慮）

(b) WAVE-Tk　1 方向入力(EW 成分)



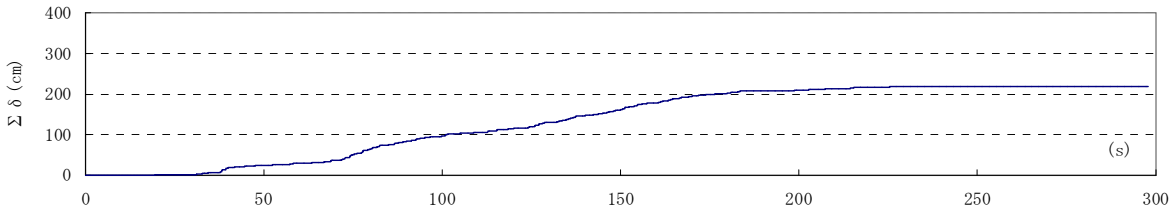
累積すべり変位時刻歴波形（依存性無視）



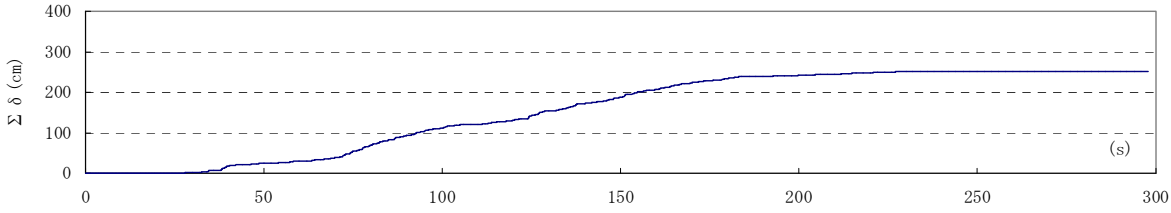
累積すべり変位時刻歴波形（累積すべり変位依存性考慮）

(c) WAVE-Tk　2 方向入力

図 2.3.6.-27　累積すべり変位時刻歴波形(WAVE-Tk)

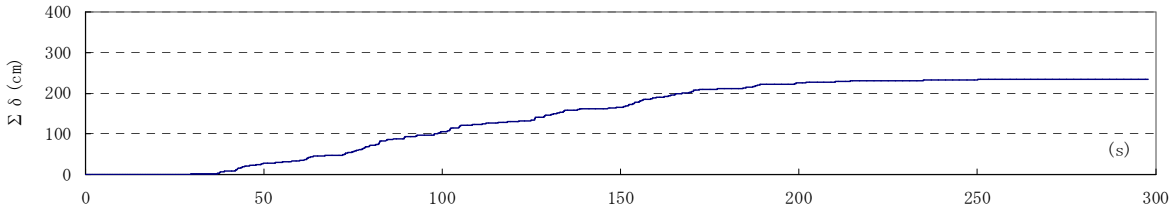


累積すべり変位時刻歴波形（依存性無視）

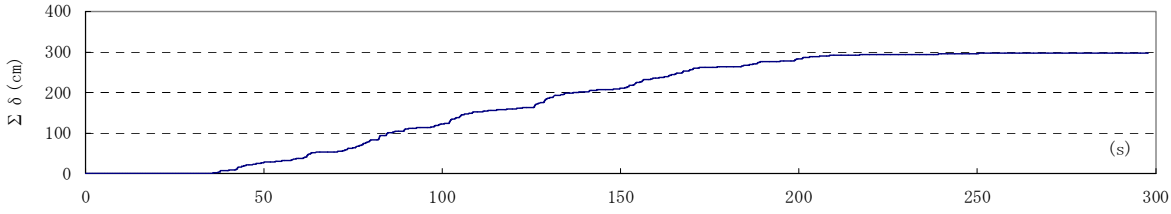


累積すべり変位時刻歴波形（累積すべり変位依存性考慮）

(a) WAVE-S　1 方向入力(NS 成分)

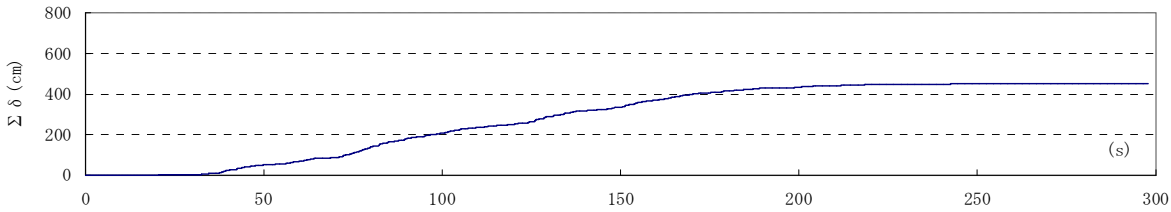


累積すべり変位時刻歴波形（依存性無視）

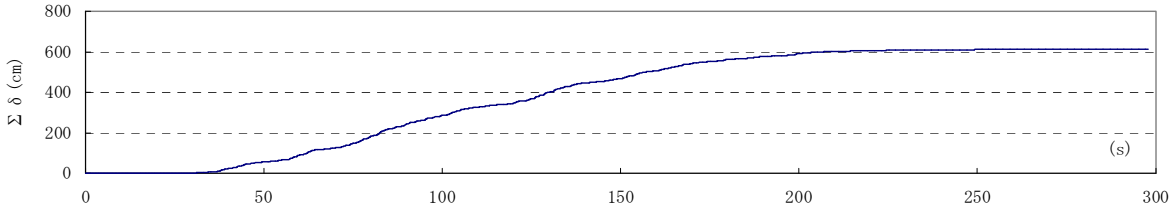


累積すべり変位時刻歴波形（累積すべり変位依存性考慮）

(b) WAVE-S　1 方向入力(EW 成分)



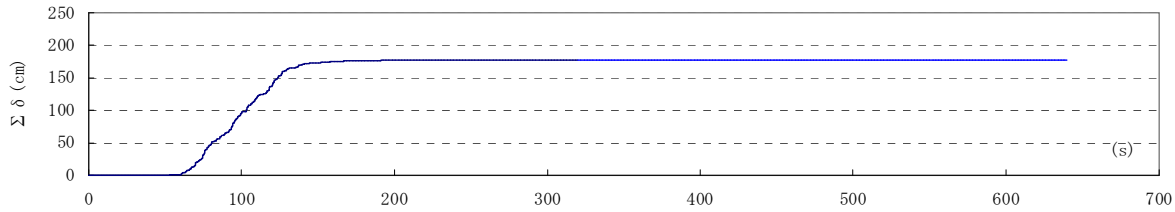
累積すべり変位時刻歴波形（依存性無視）



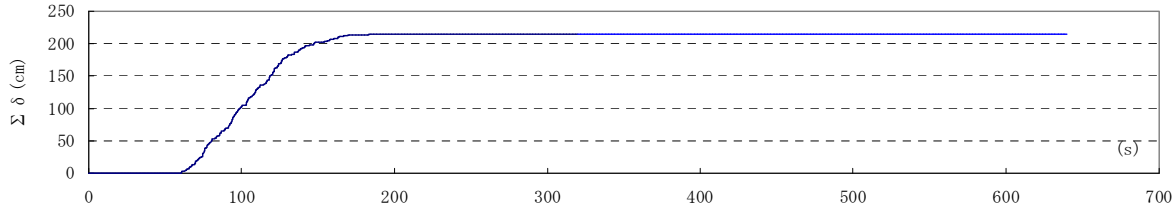
累積すべり変位時刻歴波形（累積すべり変位依存性考慮）

(c) WAVE-S　2 方向入力

図 2.3.6.-28　累積すべり変位時刻歴波形(WAVE-S)

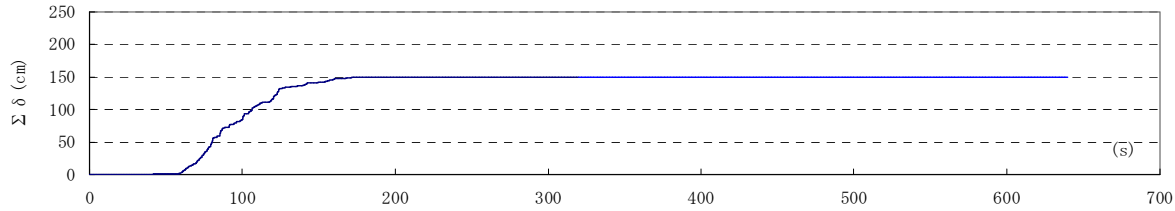


累積すべり変位時刻歴波形（依存性無視）

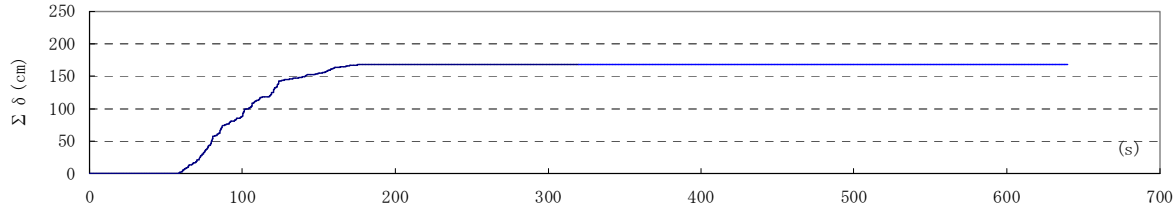


累積すべり変位時刻歴波形（累積すべり変位依存性考慮）

(a) WAVE-K　1 方向入力(NS 成分)

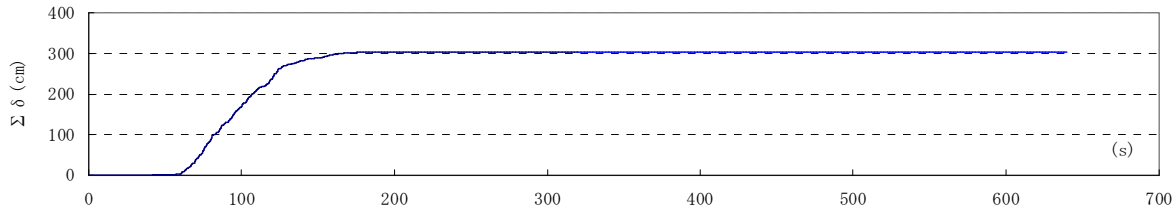


累積すべり変位時刻歴波形（依存性無視）

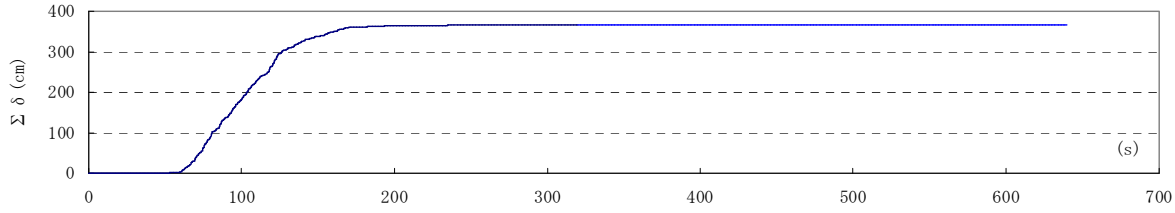


累積すべり変位時刻歴波形（累積すべり変位依存性考慮）

(b) WAVE-K　1 方向入力(EW 成分)



累積すべり変位時刻歴波形（依存性無視）



累積すべり変位時刻歴波形（累積すべり変位依存性考慮）

(c) WAVE-K　2 方向入力

図 2.3.6.-29　累積すべり変位時刻歴波形(WAVE-K)

(5) まとめ

以上の検討より以下の知見を得た。

- 摩擦係数の累積すべり変位依存性を考慮することにより、繰り返し荷重により摩擦係数が低下し、応答変位が大きくなることが確認された。
- 2 方向入力を考慮した場合、累積すべり変位は 1 方向入力よりも増加するため応答変位が大きくなる。つまり、すべり支承を用いる場合は 2 方向入力を適切に評価する必要があると考えられる。
- ここで適用した累積すべり変位依存性の評価式にはすべり変位の適用範囲があり、本検討で用いたような継続時間が長く累積すべり変位が増加する応答に対しては十分には適応できていない。今後、弾性すべり支承の繰り返し載荷実験を実施し適用範囲を拡大することが望まれる。

参考文献

2.3.6-1) 日比野浩、高木政美、勝田庄二：実大弾性すべり支承の載荷実験に基づく摩擦特性のモデル化、日本建築学会構造系論文集、第 574 号、pp.45-52、2003.12

2.3.6-2) 日比野浩、久保哲夫、高木政美、勝田庄二：弾性すべり支承と積層ゴム支承を併用した複合免震建物の地震応答性状－摩擦特性回帰モデルに基づく解析的検討－、日本建築学会構造系論文集、第 574 号、pp.45-52、2003.12

2.3.6-3) 富島誠司、大橋智樹、佐藤啓治：すべり支承方式の免震に用いるすべり材の動摩擦係数に関する研究、日本建築学会技術報告集、第 1 号、pp.140-145、 1995.12

2.3.6-4) 岡本晋、藤井俊二、尾崎大輔、M.C.Constantinou、P.C.Tsopelas：すべり方式免震システムを有する橋梁の動特性に関する実験的研究、土木学会論文集、No. 507/I-30 号、pp.167-177、1995.1

2.3.6-5) 江森純一、山中久幸、谷垣政治、平田裕一、山岸邦彰：弾性すべり支承の基本性能に関する実験的研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2、487-488、1998.9

2.3.6-6) 浜口弘樹、東野雅彦、遠山幸太郎、安部裕、沖芳郎：低摩擦特性のすべり支承に関する研究（その３）実大装置の性能確認試験、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2、pp.701-702、1999.9

2.3.6-7) 増田圭司、三山剛史：低摩擦滑り支承を用いた免震構法の開発　その１．低摩擦支承の開発、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2、pp.737-738、2000.9

2.3.6-8) 松本喜代隆、高澤恒男、加藤直樹、岡本守、市村敦史：弾性すべり支承の開発（その 4：摩擦係数の動特性）、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2、pp.505-506、2002.8

2.3.6-9) 松崎浩、森利弘、渡辺則雄、滝沢賢一：すべり支承とせん断型コイルばねによる免震構法（その２）すべり支承加力試験、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2、pp.495-496、1998.9

2.3.6-10) 林章二、北村佳久、猿田正明：積層ゴムとすべり支承による複合免震システムに関する研究、日本地震工学シンポジウム論文集、Vol.10-3、pp.2807-2812、1998

2.3.6-11) 南輝弥、加藤朝郎、大場政章、村角保行：FBR 免震設計に関する研究　その 30　複合免震装置の原子炉施設への適用（弾性すべり支承を用いた複合免震構法の検討　その２）、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2、pp.1219-1220、1999.9

2.3.6-12) 高坂隆一、木本幸一郎、竹内貞光、伊藤嘉朗、降旗大助、芳沢利和、和田章：弾性すべり支承免震の実験的研究、その３：振動実験と弾性すべり支承の面圧、速度依存性を考慮したシミュレーションの比較、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2、pp.727-728、2000.9

2.3.6-13) 田中寛人、高橋良和、家村浩和：滑り支承の速度・荷重依存性のモデル化と免震効果に関する研究、土木学会年次学術講演会講演概要集、第 1 部 Vol.57 、pp.905-906、2002.9

2.3.6-14) 勝田庄二、日比野浩、高澤恒男、澤田　毅、柳　勝幸：大口径弾性すべり支承の摩擦特性試験、（その１）試験の概要、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2、pp.641-642、2001.9

2.3.6-15) 日比野浩、高木政美、高澤恒男、澤田　毅、柳　勝幸：大口径弾性すべり支承の摩擦特性試験、（その２）動摩擦特性の基本的傾向、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2、pp.642-643、2001.9

2.3.6-16) 日比野浩、高木政美、勝田庄二、室田伸夫、原　暢彦：大口径弾性すべり支承の摩擦

特性試験、(その３)載荷振幅が摩擦係数に及ぼす影響、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2、pp.503-504、2002.8

2.3.7 天然ゴム系積層ゴム＋弾性すべり支承（低摩擦）＋粘性ダンパー

(1) 各種依存性に関する既往の研究

1) 弾性すべり支承（低摩擦）

弾性すべり支承（低摩擦）（以下、低摩擦すべり支承と称する）の繰り返し回数と摩擦係数の関係に関する既往の実験概要を表 2.3.7-1 にまとめる。

一般的に、低摩擦すべり支承は設計領域における摩擦係数の変動はほとんどないとされている。ただし、設計領域以上に繰り返し回数が増えると摩擦係数の上昇が見られる。一方、温度の上昇に対して摩擦係数の変化は小さい。冷却後に摩擦係数が回復しないことから、摩擦係数は温度よりもすべり材の通過回数やコーティング摩耗量との関連が強いと考えられる。

表 2.3.7-1 既往の実験概要

実験名	概要
実験 A[2.3.7-1)]	すべり支承（ϕ300 およびϕ400、μ0.011、基準面圧 20MPa）を用いて、40 サイクル以上の正弦波繰り返し試験を実施し、摩擦係数の変化率を調査
実験 B[2.3.7-1)]	実物大のすべり支承試験体（ϕ540、ϕ720 およびϕ900、μ0.015、基準面圧 18MPa）を用いて、50 サイクルの繰り返し試験を実施し、摩擦係数の変化率を調査
実験 C[2.3.7-2)]	すべり支承（すべり材径ϕ100、μ0.01、基準面圧 20MPa）を用いて、正弦波による 45 波の繰り返し試験（試験体によっては 400 波）を実施し、摩擦係数の変動を調査
実験 D[2.3.7-3)]	すべり支承（すべり材径ϕ90、μ0.012、基準面圧 20MPa）を用いて、正弦波による連続 25 サイクルを 40 回、計 1000 サイクルの繰り返し試験を実施し、摩擦係数・表面温度の変動を調査
実験 E[2.3.7-4)]	実物大のすべり支承試験体（ϕ916、μ0.024、基準面圧 14MPa）を用いて、数種類の変位振幅が繰り返し現れる試験（累積距離 35m）を実施し、摩擦係数の変動、経過時間と温度の関係を調査
実験 F[2.3.7-5), 2.3.7-6)]	実物大のすべり支承試験体（すべり材径ϕ202、μ0.015、基準面圧 18MPa）を用いて、非常に長い累積変位量（692 サイクル、約 390m）を与える試験を実施し、すべりによる発熱と摩擦係数の関係を調査

本解析では、低摩擦すべり支承の剛性および各種依存性については、表 2.3.7-1 の実験 C で使用されている試験体の建築材料認定書[2.3.7-2)]を参考にモデル化を行っている。低摩擦すべり支承は水平方向の非線形特性として図 2.3.7-1 に示すバイリニア特性を持つ要素としてモデル化する。

材料認定書より低摩擦すべり支承の水平剛性 K_H および鉛直剛性 K_V は式（2.3.7-1）および式（2.3.7-2）によって決まる。

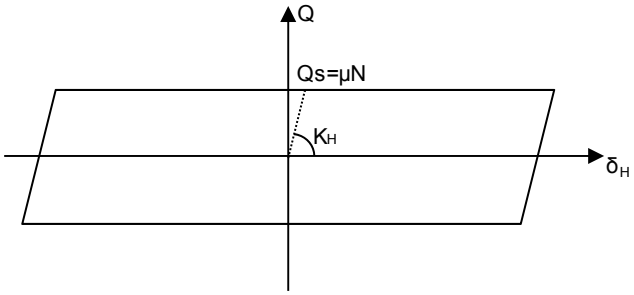


図 2.3.7-1　低摩擦すべり支承のバイリニア特性

$$K_H = G_r \cdot \frac{A_r}{H} \qquad (2.3.7\text{-}1)$$

ここに、G_r はゴムのせん断弾性率を示し、次の値を用いる。 $G_r = \begin{cases} 0.588N/mm^2 [G6] \\ 0.784N/mm^2 [G8] \end{cases}$

また、A_r は積層ゴム断面積（mm²）、H は積層ゴム総厚（mm）を意味する。

$$K_V = \alpha_V \cdot \frac{A_r}{H} \cdot \frac{E_0(1+2\cdot\kappa\cdot S_1^2)\cdot E_\infty}{E_0(1+2\cdot\kappa\cdot S_1^2)+E_\infty} \qquad (2.3.7\text{-}2)$$

ここに、E_0 はゴムの縦弾性係数を示し、次の値を用いる。 $E_0 = \begin{cases} 1.76N/mm^2 [G6] \\ 2.35N/mm^2 [G8] \end{cases}$

また、E_∞ はゴムの体積弾性係数（=1,960N/mm²）、κ はゴム定数（=0.85）、S_1 は 1 次形状係数、α_V はすべり材による鉛直剛性修正係数（=0.70）を示す。

すべり耐力 Q_S については式（2.3.7-3）に示すように鉛直支持力 N および摩擦係数 μ によって決まる。

$$Q_S = \mu \cdot N \qquad (2.3.7\text{-}3)$$

本解析では、低摩擦すべり支承の摩擦係数 μ は面圧・速度依存性および繰り返し依存性を考慮して算定する。ただし、経年変化および制作誤差については本解析では考慮しない。低摩擦すべり支承の面圧・速度依存性および繰り返し依存性を以下の項で説明する。

a) 面圧・速度依存性

材料認定書[2.3.7-2)]より低摩擦すべり支承の摩擦係数は式（2.3.7-4）を用いて計算される。

$$\mu(\sigma_s, V) = (0.0355 - 0.0093 \cdot exp(-0.1 \cdot V)) \cdot \sigma_s^{-0.44} \qquad (2.3.7\text{-}4)$$

ここに、σ_s は面圧（N/mm^2）、V は水平速度（mm/sec）を示す。面圧を一定とした場合の速度依存性は図 2.3.7-2 のようになる。

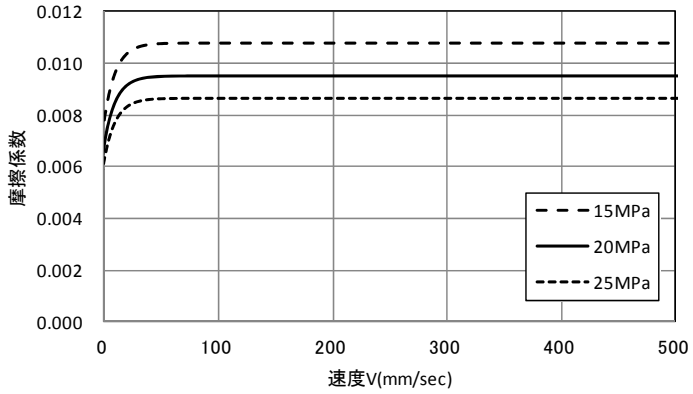


図 2.3.7-2　低摩擦すべり支承の面圧・速度依存性（面圧 15MPa、20MPa および 25MPa）

b) 繰り返し依存性

摩擦係数の繰り返し依存性は、メーカー提供の試験データを参考にモデル化した。累積すべり量 50m を超える領域までの試験データが得られており、その間の摩擦係数の変動範囲は 0.0085～0.0120 である。

なお、本解析では面圧・速度依存性も同時に考慮するため、繰り返し依存性による摩擦係数の変動状況を累積すべり量 0m 時の摩擦係数からの変化率と考える。従って、（2.3.7-4）式で算出した面圧・速度依存の摩擦係数に繰り返し依存の変化率を乗じることで時々刻々の摩擦係数を計算する。

2) 粘性ダンパー

本解析でモデル化する粘性ダンパーは増幅機構付き減衰装置（減衰こま）としており、以下では増幅機構付き減衰装置を粘性ダンパーとして扱うものとする。また、当該粘性ダンパーでは粘性体の回転による慣性力がダンパーの減衰力に影響を与えるとされており、本解析では回転による慣性力も含めた検討を実施する。

当該粘性ダンパーで用いられている粘性体の温度特性については、粘性体温度が高くなると粘度が減少する傾向を示すことがわかっている[2.3.7-7)]。また、温度上昇に関する検討として、装置の熱容量から温度上昇の理論値を算定し、実験値との比較が実施されている[2.3.7-8)]。その結果、実験では当該粘性ダンパーの大部分の発熱量は鉄へ奪われるため、理論値に比して温度上昇は小さくなる結果が得られている。

繰り返し回数と抵抗力の関係については、繰り返し依存性を調べる試験が実施されており、連続加振により抵抗力が低下することが分かっている[2.3.7-1), 2.3.7-7)]。この抵抗力の低下はせん断ひずみ速度の増大とともに、粒子間の相互作用が急速に弱まり粘性体の粘度が低下するためである。ただし、粘性体の分子構造自体の破壊により生じるものではないので、分子間の応力緩

和がもとの状態に戻るとともに減衰性能は回復していく。

当該粘性ダンパーの特性および各種依存性については調査対象部材の材料認定書 2.3.7-9)~2.3.7-11)を参考にモデル化を行っている。

粘性ダンパーの軸減衰力 P_n は式（2.3.7-5）～式（2.3.7-15）を使って計算され、図 2.3.7-3 に示すような軸速度依存性を示す。なお、式（2.3.7-5）で示した設計式では前述の回転体の慣性力による影響は無視している。本解析では、実現象に近いモデルとするため既往の研究 2.3.7-12)を参考として式（2.3.7-5）に慣性項 Q_i を加えた式（2.3.7-14）を用いて解析モデルを作成している。

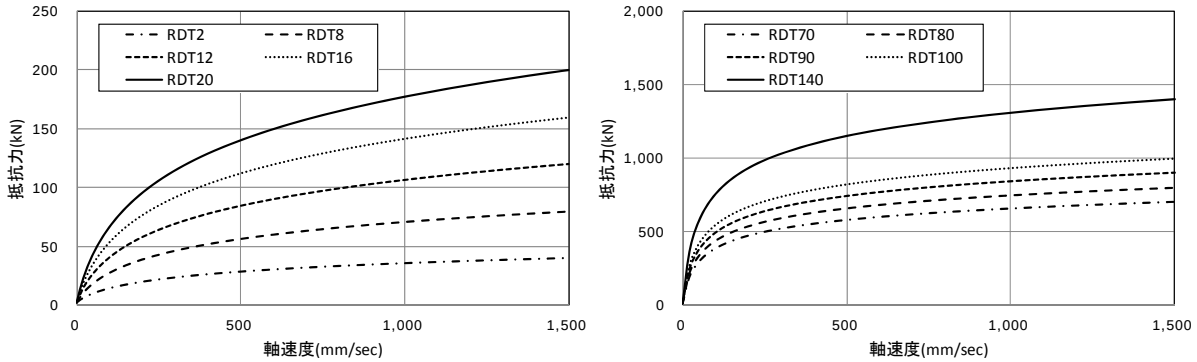


図 2.3.7-3 軸減衰力 P_n の軸速度依存性の一例
（調査対象部材・材料認定書 2.3.7-9)~ 2.3.7-11)より作成）

① 軸減衰力 P_n

$$P_n = a \times (\alpha \cdot Q_V + b) \qquad (2.3.7\text{-}5)$$

ここに、α はくり返し依存係数、Q_V は粘性抵抗力（kN）を示す。式（2.3.7-5）内の係数 a および b は粘性ダンパーの種類によって決まり、表 2.3.7-2 にその値を示す。

表 2.3.7-2　軸減衰力基準式の係数 a および b について

デバイスタイプ	係数 a	係数 b
Short タイプ	1.16	2.2
動粘度 10 万 cst タイプ	1.03	2.7
動粘度 30 万 cst タイプ（減衰力 30ton~60ton）	1.06	8.1
動粘度 30 万 cst タイプ（減衰力 70ton~140ton）	1.15	11.5

② 粘性抵抗力 Q_V

$$Q_V = S \cdot \eta(Vs,t) \cdot Vs \cdot A \qquad (2.3.7\text{-}6)$$

ここに、S は増幅率、$\eta(Vs,t)$ は見かけの粘度（kPa・s）、V_S はせん断ひずみ速度（sec^{-1}）、A は有効面積（m^2）を示す。

③ 増幅率 S

$$S = \pi \times D_n / L_d \qquad (2.3.7\text{-}7)$$

ここに D_n は内筒外直径（m）、L_d はリード長さ（m）を示す。

④ 見かけの粘度 $\eta(Vs,t)$

$$\eta(Vs,t) = \eta_t / (1 + b \cdot Vs^{\beta}) \times 10^{-6} \qquad (2.3.7\text{-}8)$$

係数 b および係数 β は以下の式で表わされる。

$$b = 0.000472 \cdot \eta_t^{0.276} \qquad (2.3.7\text{-}9)$$

$$\beta = 0.308 \cdot \eta_t^{0.081} \qquad (2.3.7\text{-}10)$$

ここに、η_t は粘性体温度が t 度のときの動粘度（cst）を示し、以下の式で表わされる。

$$\eta_t = 1.02^{(25-t)} \cdot \eta_{25} \qquad (2.3.7\text{-}11)$$

なお、η_{25} はせん断歪速度 0、粘性体温度 25 度のときの動粘度（cst）を示す。

⑤ せん断ひずみ速度 V_S

$$Vs = S \cdot V_N / dy \qquad (2.3.7\text{-}12)$$

ここに、V_N は軸方向速度（m/sec）、dy はせん断隙間（m）を示す。

⑥ 有効面積 A

$$A = D_n \cdot \pi \cdot L_e \qquad (2.3.7\text{-}13)$$

ここに、L_e は有効長さ（m）を示す。

⑦ 粘性体の回転による慣性項を考慮した軸減衰力

$$P_n = a \times (\alpha \cdot Q_V + b + Q_i) \qquad (2.3.7\text{-}14)$$

ここに、Q_i は粘性体の回転による慣性力（kN）を示し、以下の式で表わされる [2.3.7-12)]。

$$Q_i = M \cdot \frac{D_n^{\,2} + D_{nn}^{\,2}}{8} \cdot \left(\frac{2\pi}{L_d}\right)^2 \cdot A_N \qquad (2.3.7\text{-}15)$$

ここに、M は回転体質量（ton）、D_{nn} は内筒内直径（m）、A_N は軸方向加速度（m/sec^2）を示す。

当該粘性ダンパーの代表的な依存性としては、繰り返し依存性および温度依存性が挙げられる。本解析では繰り返し依存性は考慮するが、解析中の温度変化は生じないものとしている。

ただし、設計温度は解析開始時の温度として考慮する。また、経年変化および制作誤差についても本解析では考慮しない。繰り返し依存性および温度依存性について以下の項で説明する。

a) 繰り返し依存性

粘性ダンパーの繰り返し試験結果の一例を図 2.3.7-4 に示す。認定書記載の試験結果から、繰り返し依存係数αは粘性抵抗力 Q_v による累積吸収エネルギーE_vの関数として式（2.3.7-16）および式（2.3.7-17）を用いて計算される。なお、αの下限値は 0.70 としている。

$$\alpha = 1/(1 + a \cdot (Ev / Vv))^b \qquad (2.3.7\text{-}16)$$

$$a = \begin{cases} 0.0016 \cdot Ln(f) + 0.011 \text{(shortタイプ、動粘度10万cstタイプ)} \\ 0.0014 \cdot Ln(f) + 0.009 \text{(動粘度30万cstタイプ)} \end{cases} \qquad (2.3.7\text{-}17)$$

$$b = 0.394 \cdot f^{0.087}$$

ここに、Ev は粘性抵抗力（$= \alpha \cdot Q_V$）による累積吸収エネルギー量（J）、Vv は充填されている粘性体の容積（cc）、f は定常波の振動数あるいは建屋の 1 次固有振動数（Hz）を示す。

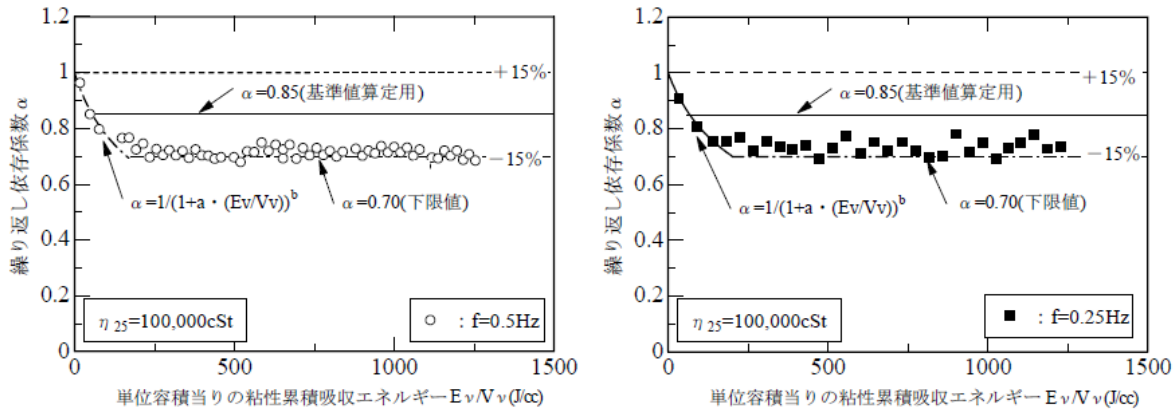


図 2.3.7-4　単位容積当りの粘性累積吸収エネルギーEvと繰り返し依存係数αの関係の一例
（調査対象部材・材料認定書 2.3.7-9)~ 2.3.7-11)より抜粋）

b) 温度依存性

粘性ダンパーの温度依存性を図 2.3.7-5 に示す。既往の試験結果から、温度の上昇に伴い得られる減衰力が徐々に小さくなることが分かっている。ただし、本解析では解析開始時の温度（20 度に設定）から変わらないものとしており、温度変化による変化率は考慮していない。

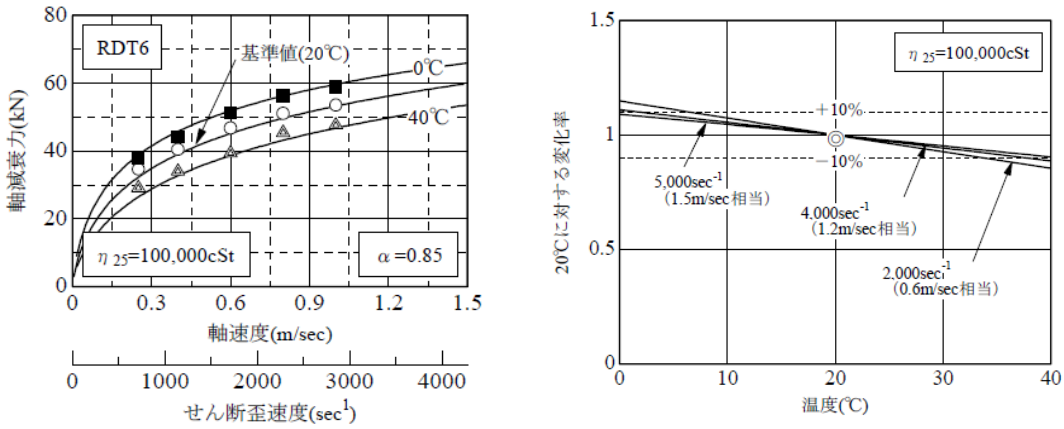


図 2.3.7-5　軸減衰力の温度依存性および温度・せん断ひずみ速度・変化率の関係の一例
（調査対象部材・材料認定書 2.3.7-9)~ 2.3.7-11)より抜粋）

(2) 解析条件

仮定する建物は 30m×30m の平面形状を持つ RC 造の 9 層建物とする。建物の総重量は 100,000kN とする。免震周期、ダンパーの諸条件は以下の通りとした。

・建物の免震周期は 4 秒程度
・免震層の最大応答変位は 250mm 程度
・ダンパーの負担層せん断力係数は 3.0%~3.5%程度

免震部材の配置状況を図 2.3.7-6 に示す。配置する免震部材は天然ゴム系積層ゴム、低摩擦すべり支承および粘性ダンパーとする。解析では建物を 1 質点剛体でモデル化し、水平 1 方向入力とする。そのため粘性ダンパーについては加振方向に平行に配置された 4 基のみをモデル化する（図 2.3.7-7）。以下の項で各免震部材について説明する。

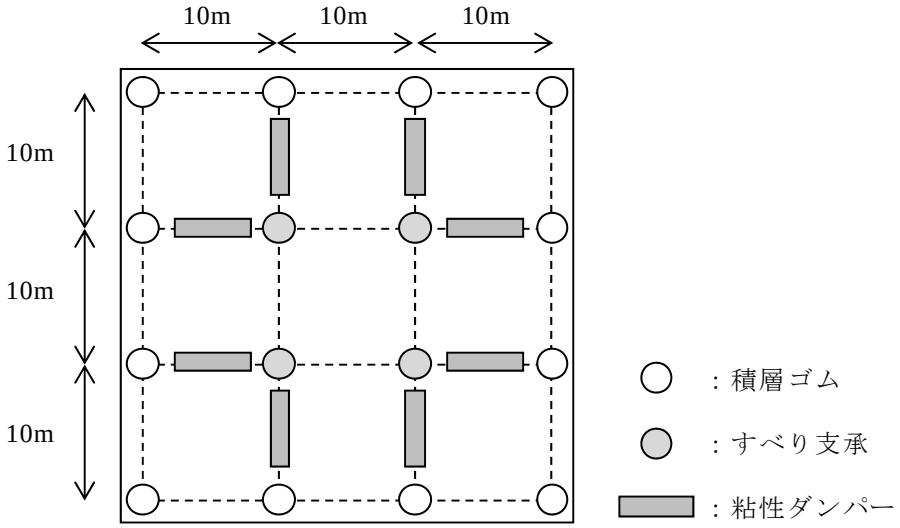


図 2.3.7-6 想定する建物モデルの平面形状

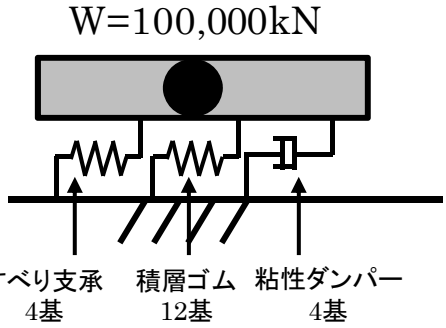


図 2.3.7-7　解析モデル（水平モデル）

1) 天然ゴム系積層ゴム

仮定する積層ゴムはゴム種 G6、φ850、H=160mm とし、12 基配置する。積層ゴム 1 基の水平剛性 k_{Hrb} は、

$$k_{Hrb} = \frac{GA}{H} = \frac{0.6 \times \pi \times 850^2 / 4}{160} = 2{,}130 N / mm$$

よって、免震層全体では

$$K_{Hrb} = 2{,}130 \times 12 = 25{,}600 N / mm$$

なお、解析では積層ゴムのハードニングは考慮せず、線形モデルとして扱う。

2) 低摩擦すべり支承

低摩擦すべり支承は、すべり材径φ700 のものを仮定し、4 基配置する。基準面圧は 19.6MPa とし、すべり荷重は 272kN 程度を想定している。代表的な諸元の値を表 2.3.7-3 に示す。

表 2.3.7-3　仮定する低摩擦すべり支承の諸元一覧

諸元	値
ゴムのせん断弾性率(N/mm^2) :【G6】	0.588
積層ゴム外形(mm)	800
内径(mm)	25
ゴム 1 層厚(mm)	7.0
ゴム層数(層)	5
ゴム層総厚(mm)	35
1 次形状係数	27.7
すべり材径(mm)	700
鉛直剛性(kN/m)	10,600,000
水平剛性(kN/m)	8440

3) 粘性ダンパー

ダンパーの負担層せん断力係数を 3.0～3.5%とすることから、低摩擦すべり支承の負担分約 0.3%（前述の 272kN）を差し引き、粘性ダンパーの負担分を 2.7～3.2%程度（100,000kN×0.027～0.032→2,700～3,200kN）と仮定する。周期 4.0 秒で図 2.3.7-8 の荷重変形関係を描く粘性ダンパーとして、軸速度 1.5m/s 時の抵抗力が 100tf の粘性ダンパー（RDT100）を選定し、各方向に 4 基ずつの配置としている。表 2.3.7-4 に RDT100 の代表的な諸元を示す。

一方向に作用する 4 基の粘性ダンパーによる減衰力は約 2,800kN である。すべり支承と合計すると免震層のダンパー負担層せん断力係数は約 3.1%となる。

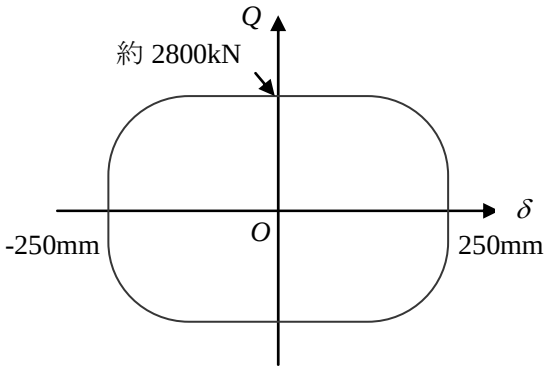


図 2.3.7-8　仮定する粘性ダンパーの荷重変形関係（4 基の粘性ダンパーを仮定）

表 2.3.7-4　仮定した粘性ダンパー（RDT100）の諸元一覧

諸元	値
ねじ軸直径(m)	0.10
リード長さ(m)	0.05
内筒内直径(m)	0.142
内筒外直径(m)	0.227
有効長さ(m)	1.440
せん断隙間(m)	0.003
25℃時の粘性体粘度(cst)	300000
粘性体充填容量(cc)	3110
回転体の質量(ton)	0.375

4) 建物の免震周期

天然ゴムの水平剛性は 1)から K_{Hrb}=25,600N/mm である。また 2)からすべり支承のすべり荷重は 4 基で 272,000N となる。

よって、すべり支承を含めた全体の等価剛性 K_H は図 2.3.7-9 より

$$K_H = 6{,}670{,}000 / 250 = 26{,}700\,N / mm$$

免震周期 T は W＝100,000kN≒10,000ton であるから、

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi\sqrt{\frac{M}{K_H}}$$

$$= 2\pi\sqrt{\frac{10{,}000\times 1000}{26{,}700\times 1000}} = 3.85\,sec$$

となる。

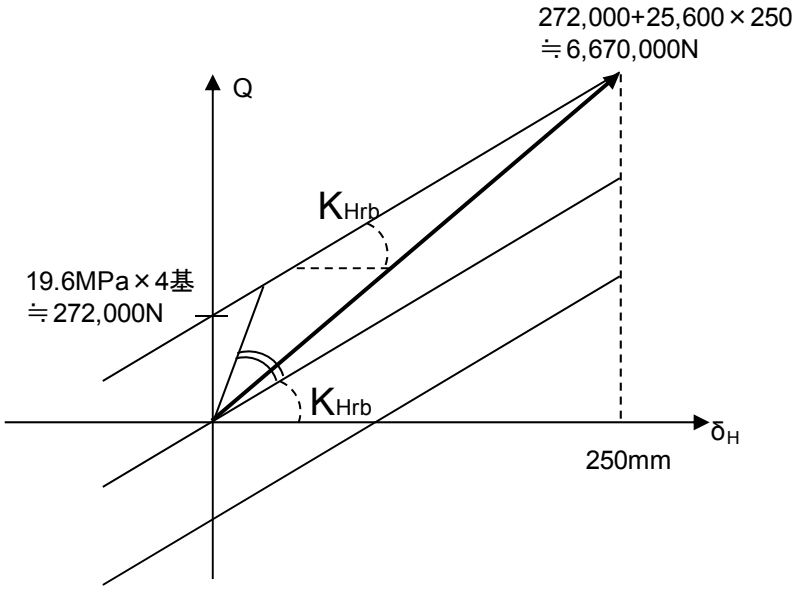


図 2.3.7-9　すべり支承を含めた等価剛性

(3) 解析結果

前述の解析モデルに対して、長周期地震動 4 波による地震応答解析を実施する。1)では当該粘性ダンパーの粘性体の回転による慣性項の影響を確認する。2)では繰り返し依存性による応答への影響比較を実施する。なお、2)では入力地震動を 1.25 倍、1.5 倍に係数倍した場合の解析についても実施している。比較する応答結果は免震層の最大応答変形および加速度、せん断力係数 Ci、累積変形量、等価エネルギー速度 V_E、および免震部材の荷重変形関係とする。なお、等価エネルギー速度 V_E（m/s）は以下の式（2.3.7-18）を用いて算定している。

$$V_E = \sqrt{\frac{2E}{M}} \qquad (2.3.7\text{-}18)$$

ここに、E は解析終了時の免震層の累積吸収エネルギー（J）、M は建屋質量（kg）を示す。

1) 粘性ダンパーの慣性項の考慮・非考慮による応答比較

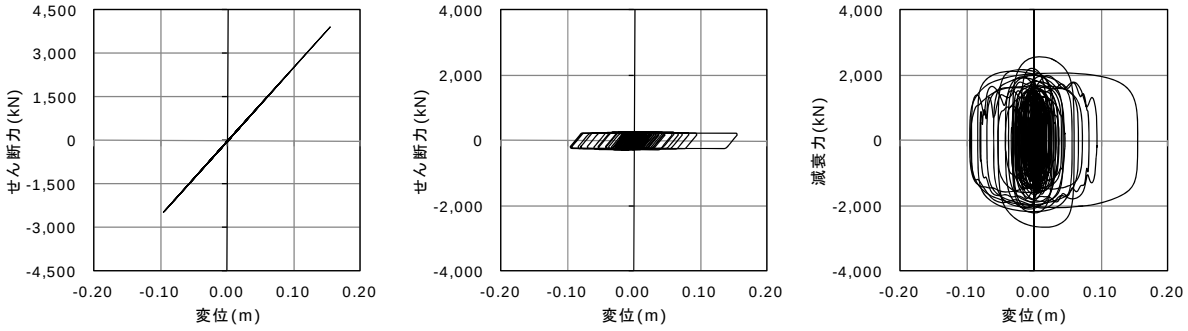
本節では、粘性ダンパーの慣性項の影響を確認する。解析の共通条件として入力地震動は 1 倍入力、解析温度は 20 度とし、繰り返し依存性を考慮している。表 2.3.7-5 に慣性項を考慮したモデルと考慮していないモデルの応答解析結果を示す。図 2.3.7-10～図 2.3.7-17 には各ケースの荷重変形関係を示す。

粘性体の回転による慣性を考慮したモデルと考慮しないモデルでは免震層の応答に最大 4%程の差異が見られ、慣性項の有無が応答に影響を与えていることがわかる。以降の検討では慣性項を考慮するモデルを基本として検討を実施する。

表 2.3.7-5　免震層の応答結果一覧

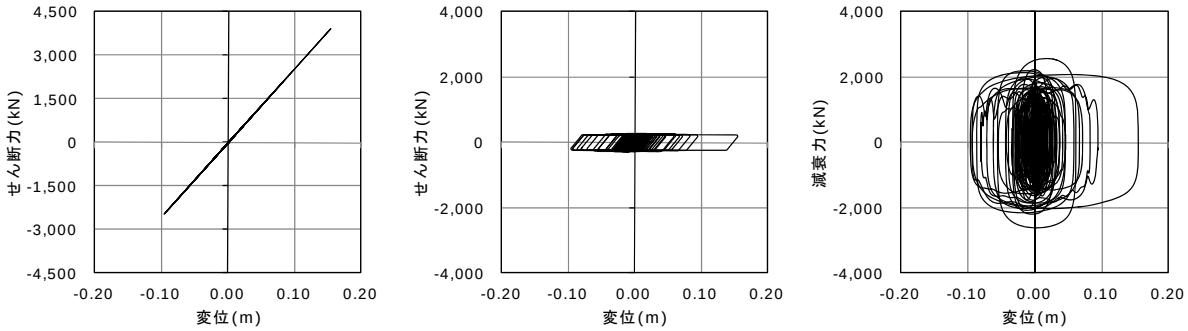
入力地震	N-OSKH02-AV		T-TN-AIC003-AV		T-TN-AIC004-AV		T-TN-KGIN1F-AV	
慣性項	考慮	非考慮	考慮	非考慮	考慮	非考慮	考慮	非考慮
最大応答変位(cm)	15.4 (1.00)	15.4	19.5 (0.99)	19.6	8.57 (0.98)	8.78	6.10 (1.00)	6.11
最大応答加速度 (cm/s^2)	54.1 (0.99)	54.6	66.3 (0.97)	68.2	38.1 (0.96)	39.8	30.4 (0.98)	31.2
せん断力係数 *Ci*	0.0551 (0.99)	0.0557	0.0677 (0.97)	0.0695	0.0389 (0.96)	0.0406	0.0310 (0.98)	0.0317
累積変位量 (m)	7.05 (0.99)	7.12	12.4 (0.98)	12.6	5.81 (0.98)	5.92	4.06 (0.99)	4.09
等価エネルギー速度 V_E(m/s)	1.43 (0.99)	1.44	2.07 (0.99)	2.10	1.20 (0.99)	1.21	0.906 (0.99)	0.913

・( )の数値は慣性項考慮モデルと慣性項非考慮モデルの比率を示す



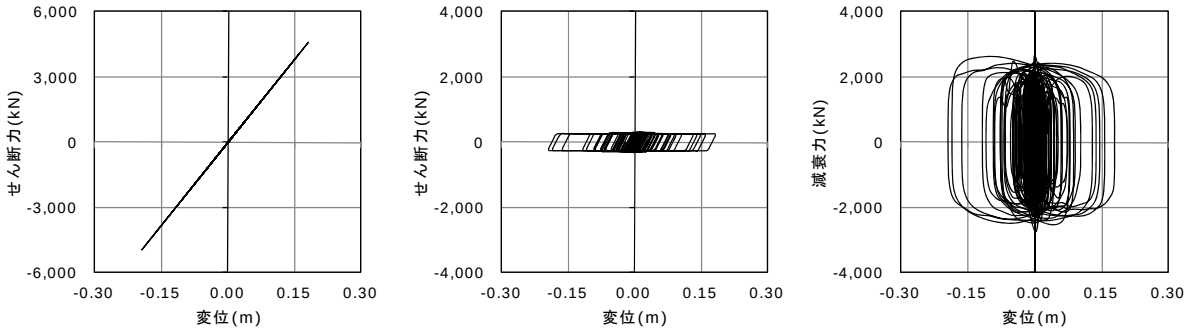
(a)積層ゴム　　(b)すべり支承　　(c)粘性ダンパー

図 2.3.7-10　免震層の荷重変形関係（N-OSKH02-AV・慣性項考慮）



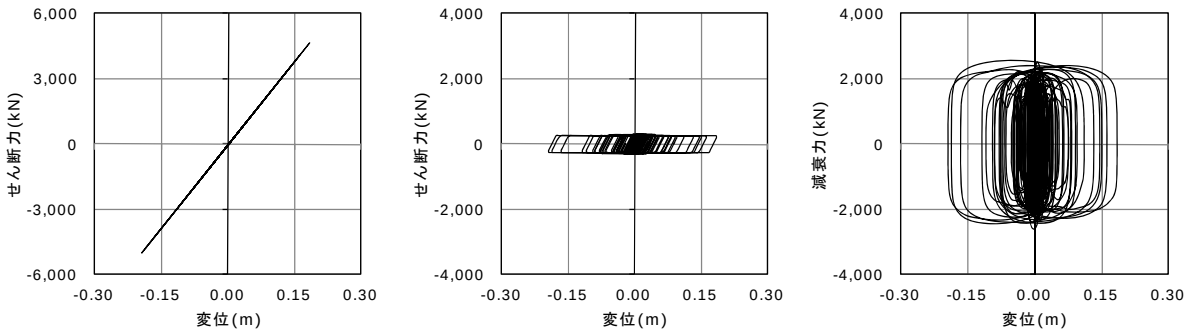
(a)積層ゴム　　(b)すべり支承　　(c)粘性ダンパー

図 2.3.7-11　免震層の荷重変形関係（N-OSKH02-AV・慣性項非考慮）



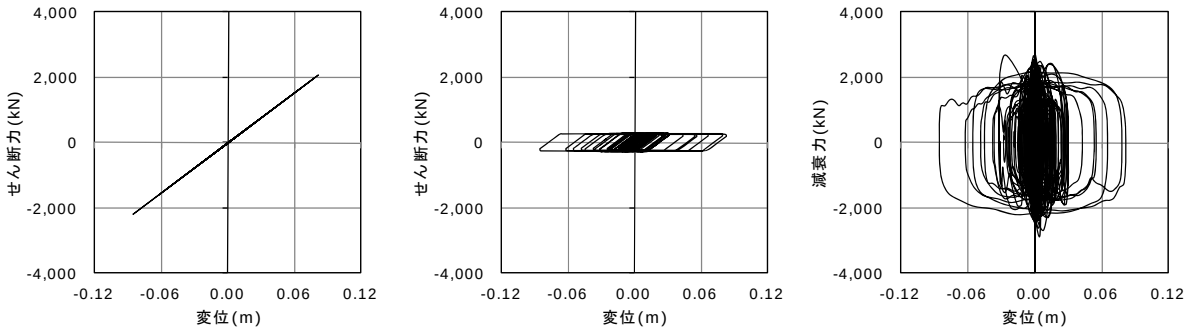
(a)積層ゴム　　(b)すべり支承　　(c)粘性ダンパー

図 2.3.7-12　免震層の荷重変形関係（T-TN-AIC003-AV・慣性項考慮）



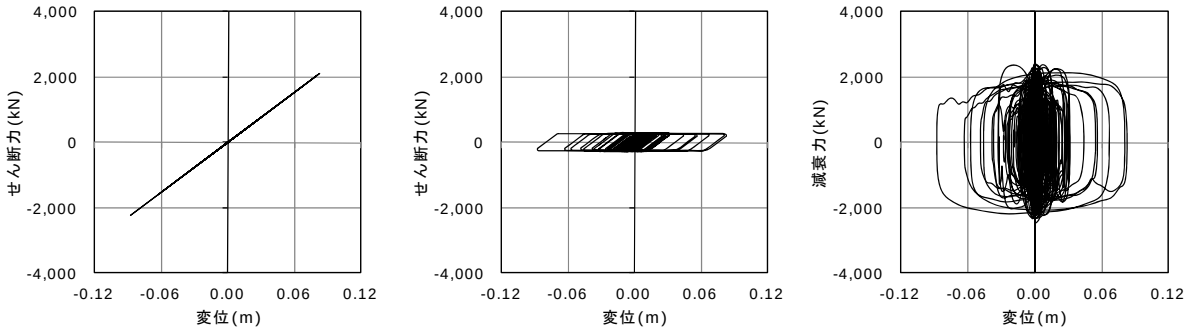
(a)積層ゴム　　(b)すべり支承　　(c)粘性ダンパー

図 2.3.7-13　免震層の荷重変形関係（T-TN-AIC003-AV・慣性項非考慮）



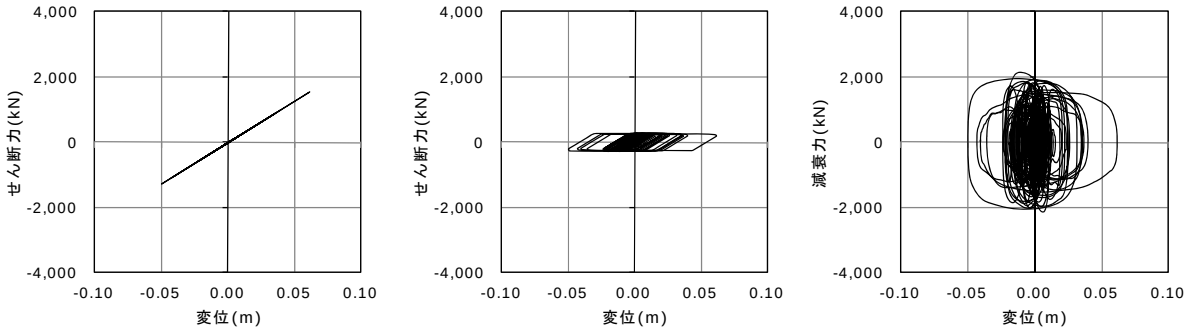
(a)積層ゴム　　(b)すべり支承　　(c)粘性ダンパー

図 2.3.7-14　免震層の荷重変形関係（T-TN-AIC004-AV・慣性項考慮）



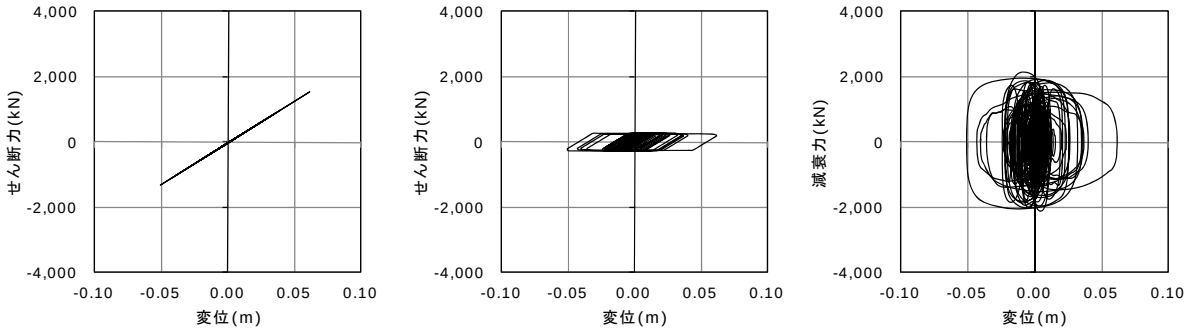
(a)積層ゴム　　(b)すべり支承　　(c)粘性ダンパー

図 2.3.7-15　免震層の荷重変形関係（T-TN-AIC004-AV・慣性項非考慮）



(a)積層ゴム　　(b)すべり支承　　(c)粘性ダンパー

図 2.3.7-16　免震層の荷重変形関係（T-TN-KGIN1F-AV・慣性項考慮）



(a)積層ゴム　　(b)すべり支承　　(c)粘性ダンパー

図 2.3.7-17　免震層の荷重変形関係（T-TN-KGIN1F-AV・慣性項非考慮）

2) 繰り返し依存性の考慮・非考慮による応答比較

本節では繰り返し依存性の影響を検討する。低摩擦すべり支承・粘性ダンパーそれぞれの免震部材に繰り返し依存性を定義しているが、解析では二つの免震部材同時に繰り返し依存性を考慮する場合・しない場合でケース分けをしている。

表 2.3.7-6 および表 2.3.7-7 に応答結果の一覧を示す。なお、ここでは免震層の累積変位に加えて、低摩擦すべり支承の累積すべり量についても示しておく。図 2.3.7-18～図 2.3.7-41 には、各ケースにおける免震層の荷重変形関係を示す。また、図 2.3.7-42～図 2.3.7-49 には免震層の累積変位量の時刻歴を示す。

図 2.3.7-50～図 2.3.7-53 には解析終了時の低摩擦すべり支承の摩擦係数変化率および粘性ダンパーの繰り返し依存係数を示す。このとき、低摩擦すべり支承の横軸は累積すべり量とし、弾性変形分は除いている。

全体の傾向として繰り返し依存性を考慮したケースの応答結果は、依存性を考慮しないケースに比して 2 割程度大きくなっている。最大応答変位では最大 1.42 倍、最大応答加速度では最大 1.26 倍（いずれも T-TN-AIC004-AV、1.5 倍入力）、累積変位量では最大 1.21 倍（N-OSKH02-AV、1.25 倍入力）応答が大きくなっている。

また、入力を係数倍して大きくしていくに従い、依存性考慮モデルと依存性非考慮モデルの比率がわずかであるが大きくなる傾向が見られる。

繰り返し依存性の変化状況を見ると粘性ダンパーの繰り返し依存係数は 1 倍入力で既に下限値 0.7 に達しており、応答への影響としてはすべり支承に比して粘性ダンパーの繰り返し依存性による影響が大きいと思われる。

また、すべり支承の累積変形量は実験で確認されている累積変形量に対して 3 倍入力の応答値でも十分な余裕が見られる。一方、粘性ダンパーについては 1 倍入力においても横軸の *Ev/Vv* の値が実験で確認されている数値を超えるケースが見られた（T-TN-AIC003-AV 波）。

表 2.3.7-6　免震層の応答結果一覧　その 1

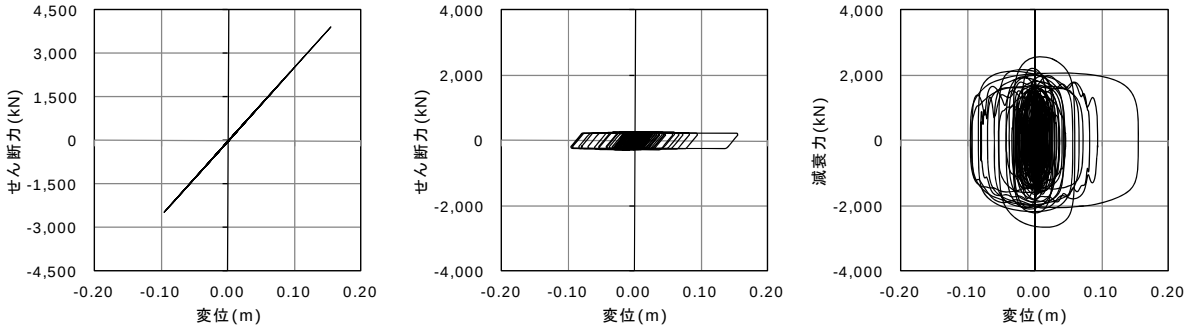
入力地震	N-OSKH02-AV					
	1 倍入力		1.25 倍入力		1.5 倍入力	
繰り返し依存性	考慮	非考慮	考慮	非考慮	考慮	非考慮
最大応答変位(cm)	15.4 (1.30)	11.9	23.1 (1.24)	18.6	48.6 (1.13)	43.1
最大応答加速度(cm/s^2)	54.1 (1.13)	48.0	74.7 (1.12)	66.7	141 (1.07)	131
せん断力係数 *Ci*	0.0551 (1.13)	0.0489	0.0761 (1.12)	0.0681	0.144 (1.07)	0.134
累積変位量(m)	7.05 (1.18)	5.98	10.5 (1.21)	8.66	23.3 (1.20)	19.5
累積すべり量(m) (低摩擦すべり支承)	4.11 (1.38)	2.97	7.16 (1.37)	5.21	18.9 (1.26)	15.0
等価エネルギー速度 V_E(m/s)	1.43 (1.06)	1.35	1.88 (1.06)	1.77	3.17 (1.03)	3.08
入力地震	T-TN-AIC003-AV					
	1 倍入力		1.25 倍入力		1.5 倍入力	
繰り返し依存性	考慮	非考慮	考慮	非考慮	考慮	非考慮
最大応答変位(cm)	19.5 (1.17)	16.6	28.2 (1.18)	23.9	42.2 (1.29)	32.8
最大応答加速度(cm/s^2)	66.3 (1.04)	64.1	89.1 (1.08)	82.5	125 (1.18)	106
せん断力係数 *Ci*	0.0677 (1.04)	0.0653	0.0909 (1.08)	0.0841	0.127 (1.18)	0.108
累積変位量(m)	12.4 (1.14)	10.9	17.2 (1.14)	15.1	22.7 (1.15)	19.8
累積すべり量(m) (低摩擦すべり支承)	7.66 (1.27)	6.05	11.8 (1.24)	9.54	16.6 (1.22)	13.6
等価エネルギー速度 V_E(m/s)	2.07 (1.01)	2.04	2.58 (1.01)	2.56	3.09 (1.01)	3.07

・( )の数値は依存性考慮モデルと依存性非考慮モデルの比率を示す

表 2.3.7-7　免震層の応答結果一覧　その 2

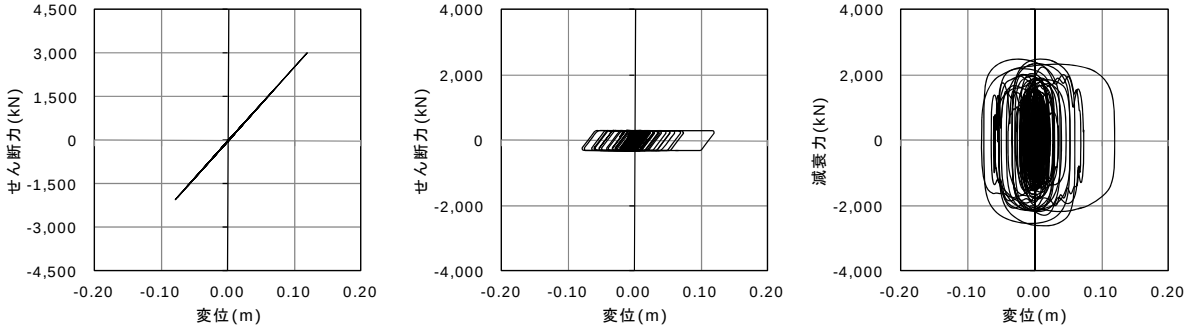
入力地震	T-TN-AIC004-AV					
	1 倍入力		1.25 倍入力		1.5 倍入力	
繰り返し依存性	考慮	非考慮	考慮	非考慮	考慮	非考慮
最大応答変形(cm)	8.57 (1.15)	7.44	14.1 (1.34)	10.5	21.5 (1.42)	15.1
最大応答加速度(cm/s^2)	38.1 (0.97)	39.1	52.1 (1.09)	47.6	71.4 (1.26)	59.1
せん断力係数 *Ci*	0.0389 (0.97)	0.0399	0.0531 (1.09)	0.0485	0.0728 (1.21)	0.0603
累積変位量(m)	5.81 (1.12)	5.18	8.03 (1.14)	7.04	10.5 (1.15)	9.15
累積すべり量(m) (低摩擦すべり支承)	2.03 (1.42)	1.43	3.58 (1.38)	2.59	5.49 (1.35)	4.06
等価エネルギー速度 V_E(m/s)	1.20 (1.04)	1.16	1.52 (1.04)	1.46	1.84 (1.03)	1.78
入力地震	T-TN-KGIN1F-AV					
	1 倍入力		1.25 倍入力		1.5 倍入力	
繰り返し依存性	考慮	非考慮	考慮	非考慮	考慮	非考慮
最大応答変形(cm)	6.10 (1.23)	4.95	10.0 (1.30)	7.68	14.0 (1.27)	11.1
最大応答加速度(cm/s^2)	30.4 (0.99)	30.6	38.7 (1.03)	37.5	49.9 (1.11)	45.1
せん断力係数 *Ci*	0.0310 (0.99)	0.0312	0.0394 (1.03)	0.0382	0.0509 (1.11)	0.0460
累積変位量(m)	4.06 (1.08)	3.75	5.98 (1.16)	5.16	8.06 (1.18)	6.80
累積すべり量(m) (低摩擦すべり支承)	1.25 (1.30)	0.962	2.76 (1.44)	1.92	4.54 (1.43)	3.18
等価エネルギー速度 V_E(m/s)	0.906 (1.04)	0.873	1.20 (1.06)	1.13	1.49 (1.07)	1.40

・( )の数値は依存性考慮モデルと依存性非考慮モデルの比率を示す



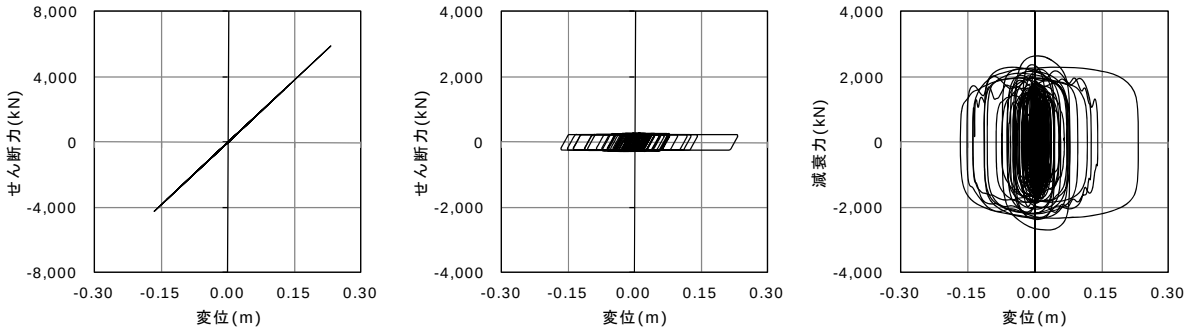
(a)積層ゴム　　(b)すべり支承　　(c)粘性ダンパー

図 2.3.7-18　免震層の荷重変形関係（N-OSKH02-AV・1 倍入力・繰り返し依存性考慮）



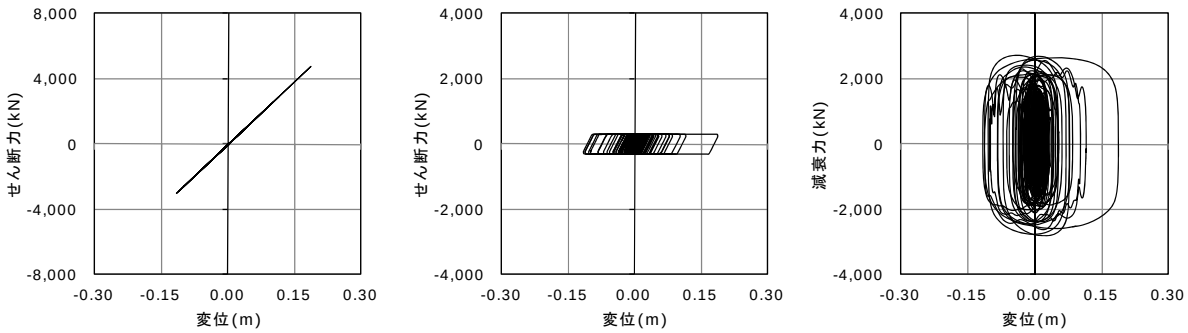
(a)積層ゴム　　(b)すべり支承　　(c)粘性ダンパー

図 2.3.7-19　免震層の荷重変形関係（N-OSKH02-AV・1 倍入力・繰り返し依存性非考慮）



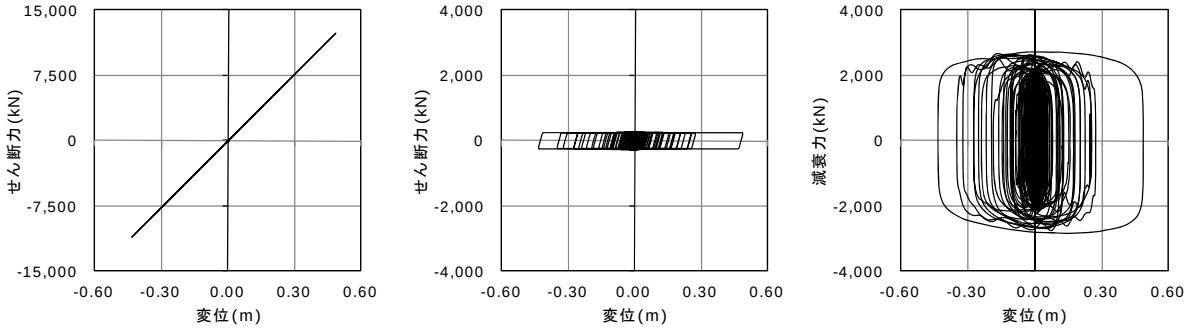
(a)積層ゴム　　(b)すべり支承　　(c)粘性ダンパー

図 2.3.7-20　免震層の荷重変形関係（N-OSKH02-AV・1.25 倍入力・繰り返し依存性考慮）



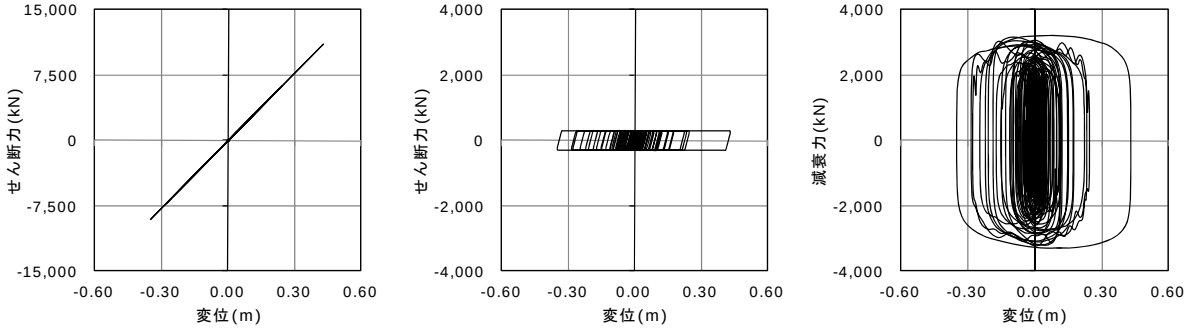
(a)積層ゴム　　(b)すべり支承　　(c)粘性ダンパー

図 2.3.7-21　免震層の荷重変形関係（N-OSKH02-AV・1.25 倍入力・繰り返し依存性非考慮）



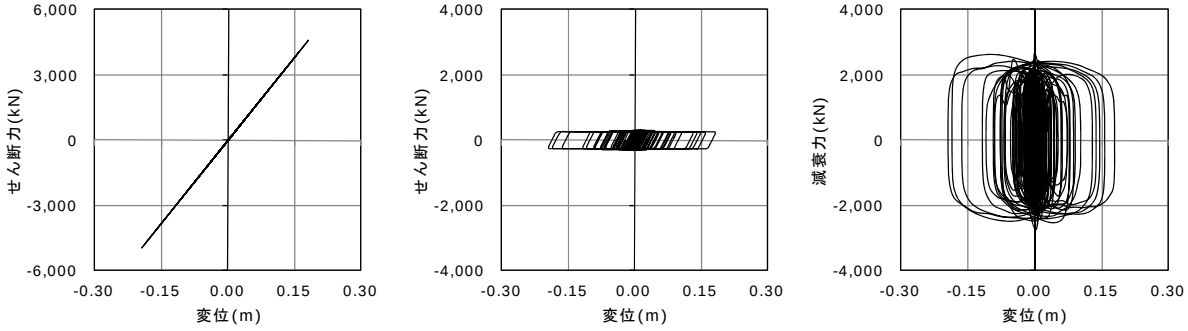
(a)積層ゴム　　(b)すべり支承　　(c)粘性ダンパー

図 2.3.7-22　免震層の荷重変形関係（N-OSKH02-AV・1.5 倍入力・繰り返し依存性考慮）



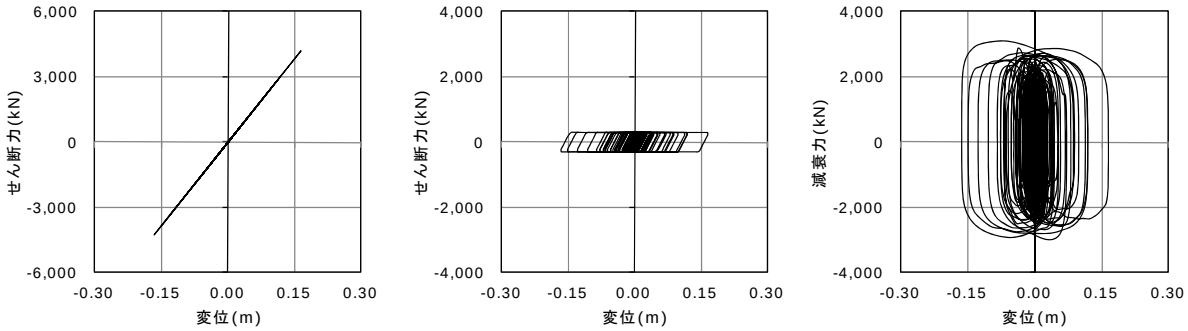
(a)積層ゴム　　(b)すべり支承　　(c)粘性ダンパー

図 2.3.7-23　免震層の荷重変形関係（N-OSKH02-AV・1.5 倍入力・繰り返し依存性非考慮）



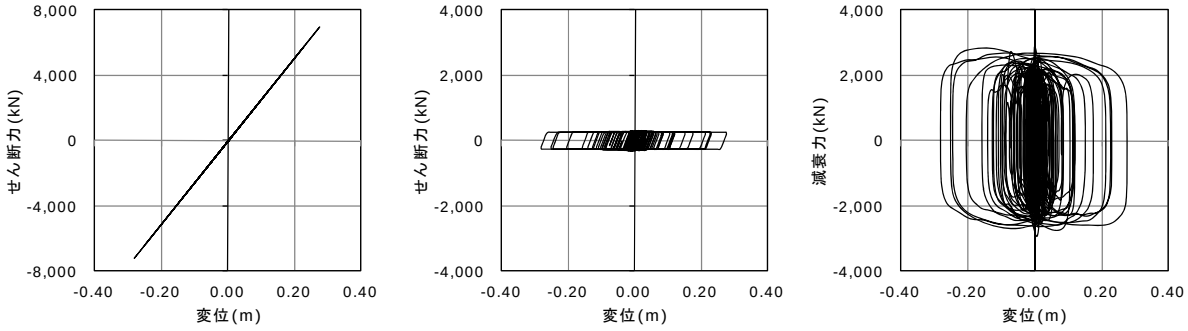
(a)積層ゴム　　(b)すべり支承　　(c)粘性ダンパー

図 2.3.7-24　免震層の荷重変形関係（T-TN-AIC003-AV・1 倍入力・繰り返し依存性考慮）



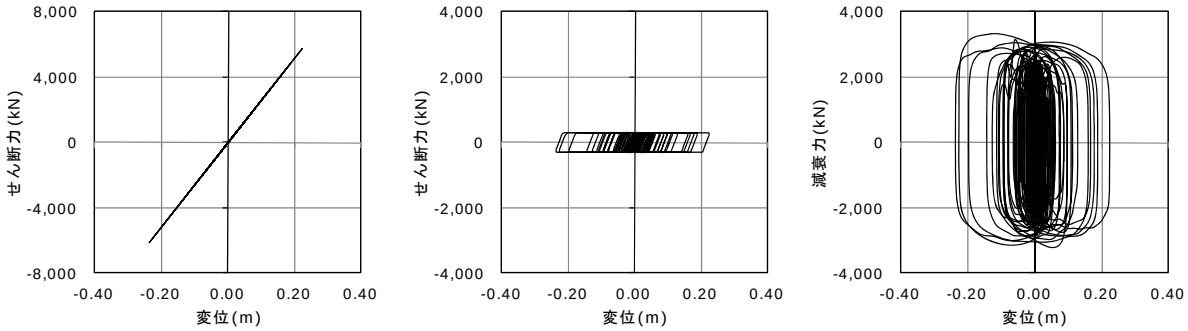
(a)積層ゴム　　(b)すべり支承　　(c)粘性ダンパー

図 2.3.7-25　免震層の荷重変形関係（T-TN-AIC003-AV・1 倍入力・繰り返し依存性非考慮）



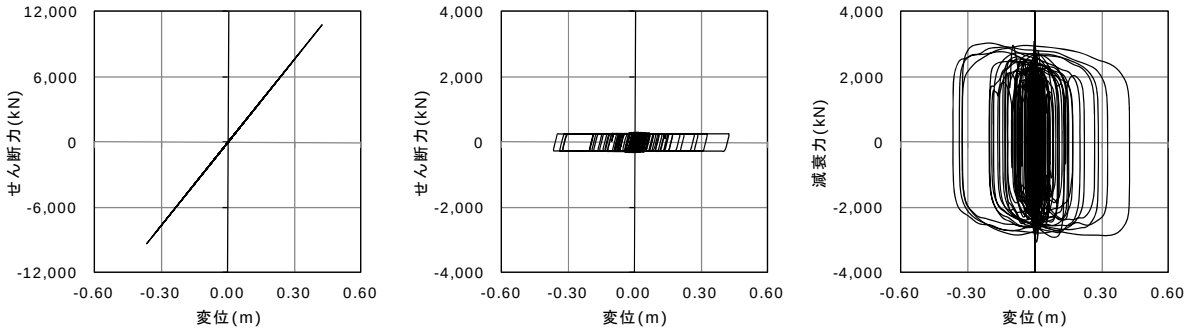
(a)積層ゴム　　(b)すべり支承　　(c)粘性ダンパー

図 2.3.7-26　免震層の荷重変形関係（T-TN-AIC003-AV・1.25 倍入力・繰り返し依存性考慮）



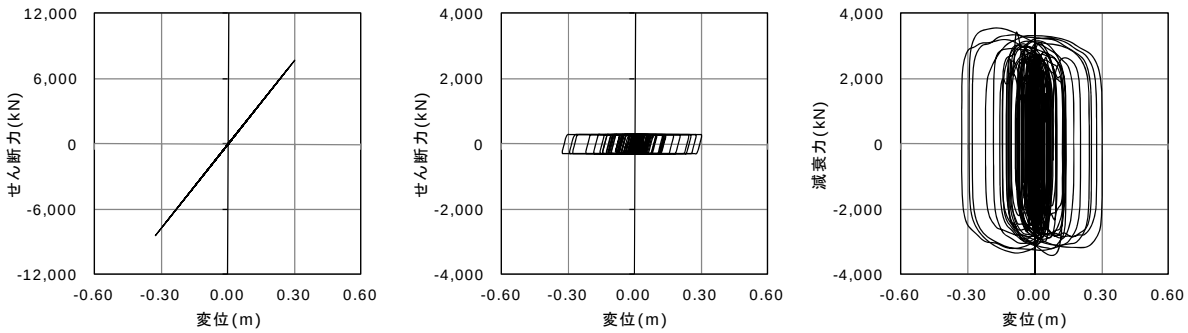
(a)積層ゴム　　(b)すべり支承　　(c)粘性ダンパー

図 2.3.7-27　免震層の荷重変形関係（T-TN-AIC003-AV・1.25 倍入力・繰り返し依存性非考慮）



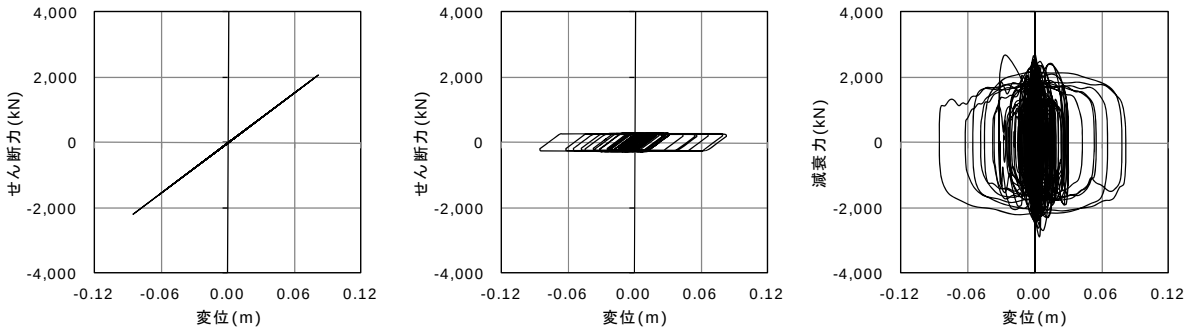
(a)積層ゴム　　(b)すべり支承　　(c)粘性ダンパー

図 2.3.7-28　免震層の荷重変形関係（T-TN-AIC003-AV・1.5 倍入力・繰り返し依存性考慮）



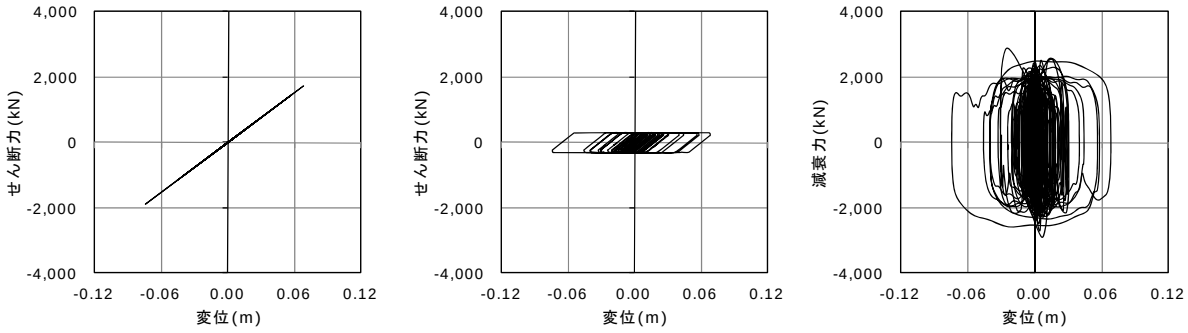
(a)積層ゴム　　(b)すべり支承　　(c)粘性ダンパー

図 2.3.7-29　免震層の荷重変形関係（T-TN-AIC003-AV・1.5 倍入力・繰り返し依存性非考慮）



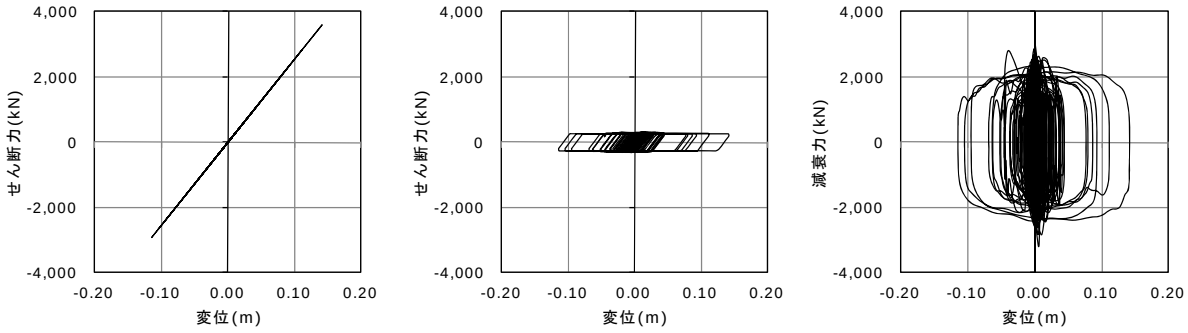
(a)積層ゴム　　(b)すべり支承　　(c)粘性ダンパー

図 2.3.7-30　免震層の荷重変形関係（T-TN-AIC004-AV・1 倍入力・繰り返し依存性考慮）



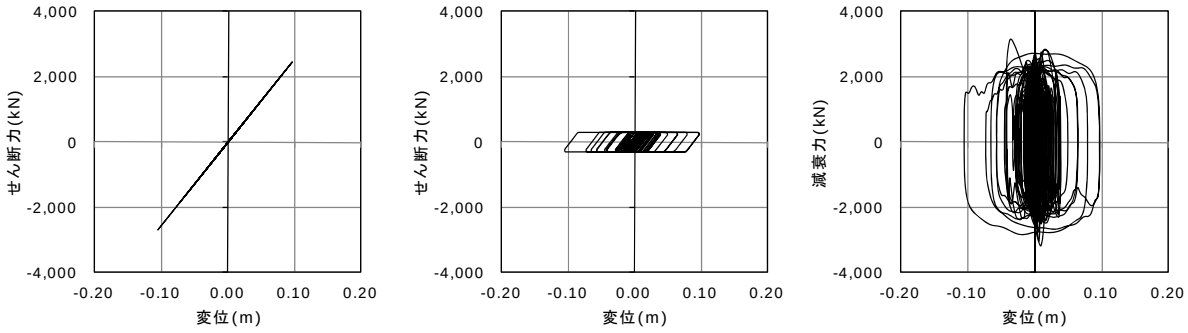
(a)積層ゴム　　(b)すべり支承　　(c)粘性ダンパー

図 2.3.7-31　免震層の荷重変形関係（T-TN-AIC004-AV・1 倍入力・繰り返し依存性非考慮）



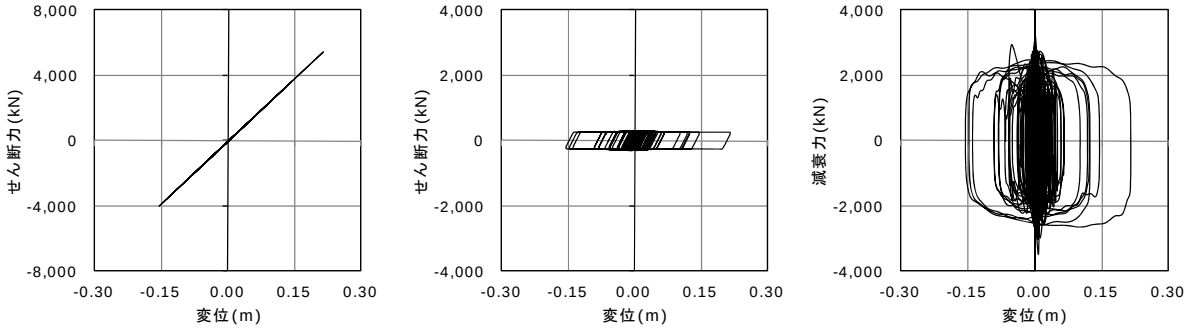
(a)積層ゴム　　(b)すべり支承　　(c)粘性ダンパー

図 2.3.7-32　免震層の荷重変形関係（T-TN-AIC004-AV・1.25 倍入力・繰り返し依存性考慮）



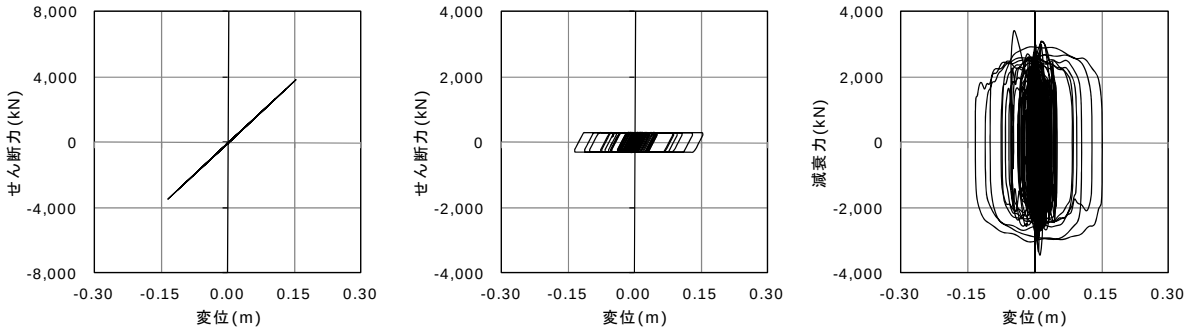
(a)積層ゴム　　(b)すべり支承　　(c)粘性ダンパー

図 2.3.7-33　免震層の荷重変形関係（T-TN-AIC004-AV・1.25 倍入力・繰り返し依存性非考慮）



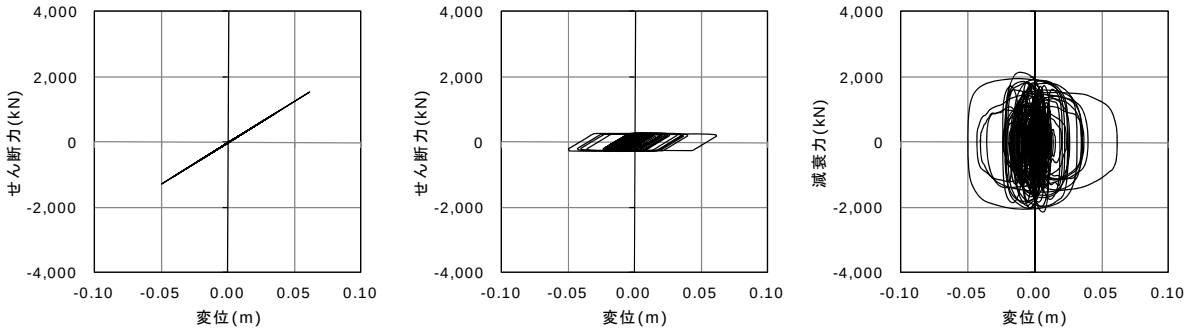
(a)積層ゴム　　(b)すべり支承　　(c)粘性ダンパー

図 2.3.7-34　免震層の荷重変形関係（T-TN-AIC004-AV・1.5 倍入力・繰り返し依存性考慮）



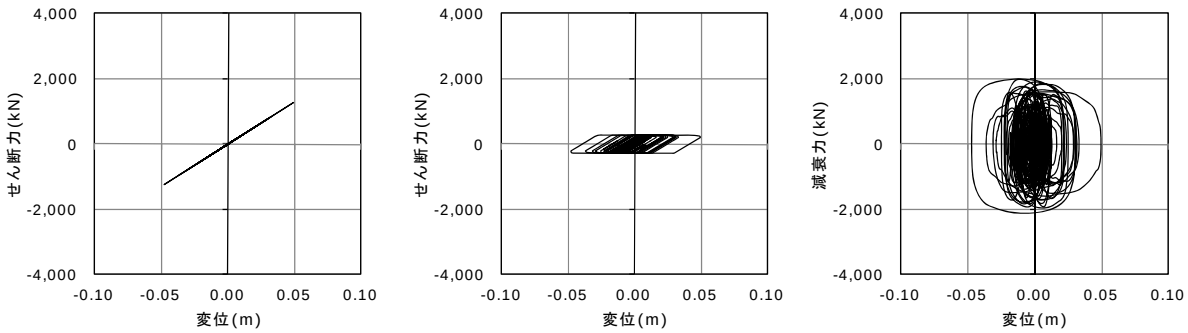
(a)積層ゴム　　(b)すべり支承　　(c)粘性ダンパー

図 2.3.7-35　免震層の荷重変形関係（T-TN-AIC004-AV・1.5 倍入力・繰り返し依存性非考慮）



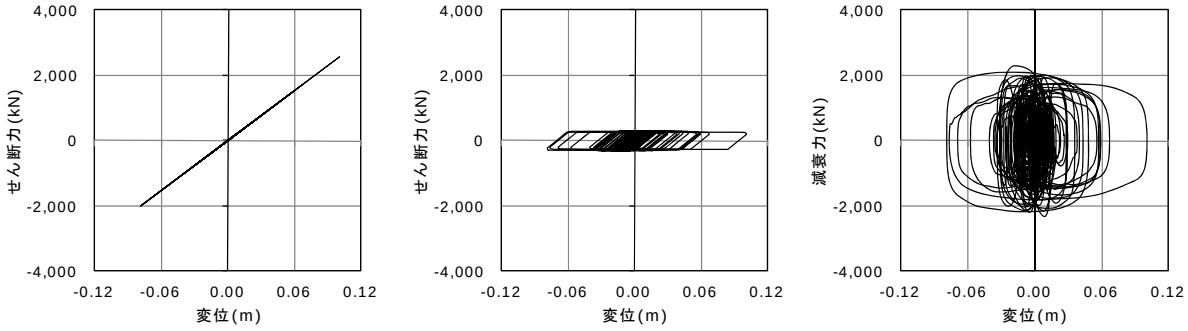
(a)積層ゴム　　(b)すべり支承　　(c)粘性ダンパー

図 2.3.7-36　免震層の荷重変形関係（T-TN-KGIN1F-AV・1 倍入力・繰り返し依存性考慮）



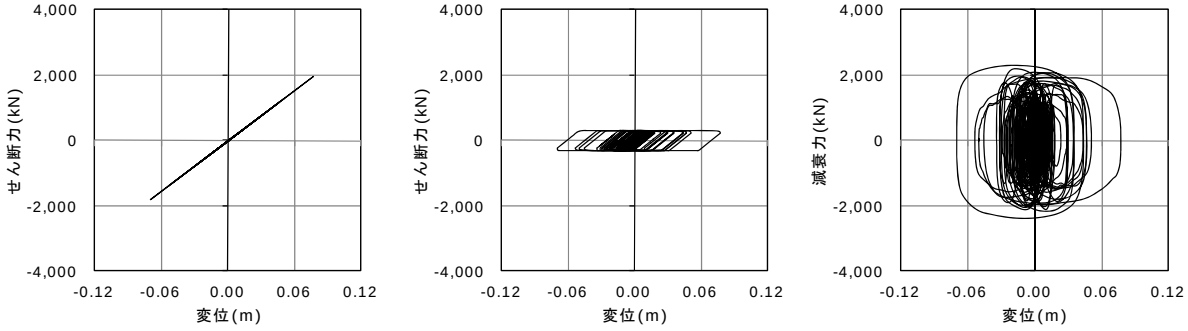
(a)積層ゴム　　(b)すべり支承　　(c)粘性ダンパー

図 2.3.7-37　免震層の荷重変形関係（T-TN-KGIN1F-AV・1 倍入力・繰り返し依存性非考慮）



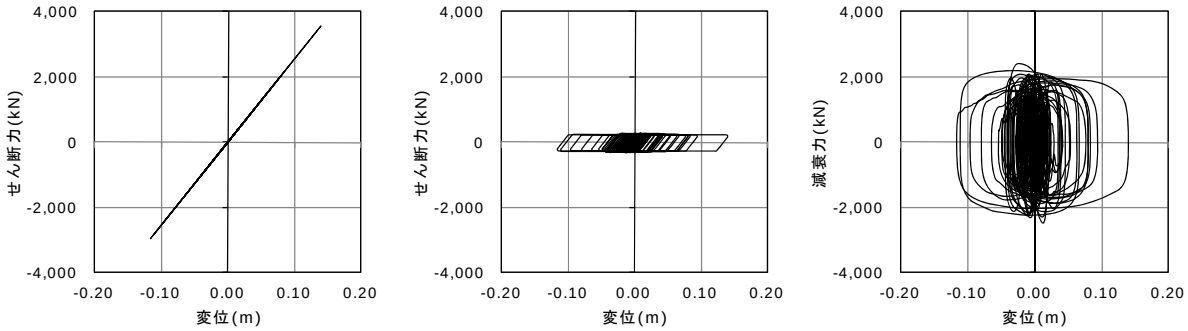
(a)積層ゴム　　(b)すべり支承　　(c)粘性ダンパー

図 2.3.7-38　免震層の荷重変形関係（T-TN-KGIN1F-AV・1.25 倍入力・繰り返し依存性考慮）



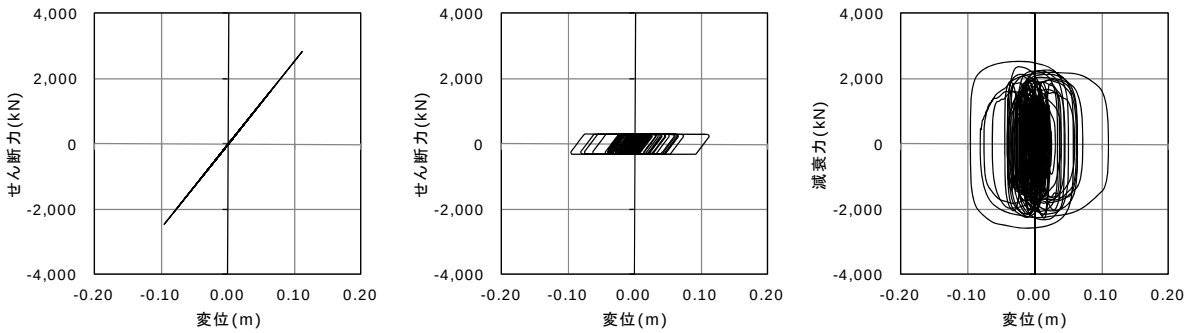
(a)積層ゴム　　(b)すべり支承　　(c)粘性ダンパー

図 2.3.7-39　免震層の荷重変形関係（T-TN-KGIN1F-AV・1.25 倍入力・繰り返し依存性非考慮）



(a)積層ゴム　　(b)すべり支承　　(c)粘性ダンパー

図 2.3.7-40　免震層の荷重変形関係（T-TN-KGIN1F-AV・1.5 倍入力・繰り返し依存性考慮）



(a)積層ゴム　　(b)すべり支承　　(c)粘性ダンパー

図 2.3.7-41　免震層の荷重変形関係（T-TN-KGIN1F-AV・1.5 倍入力・繰り返し依存性非考慮）

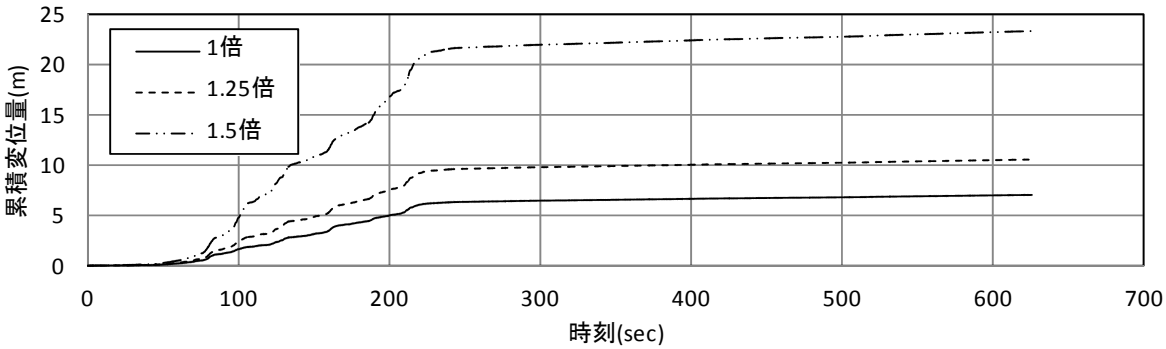


図 2.3.7-42 免震層の累積変位量（N-OSKH02-AV・繰り返し依存性考慮）

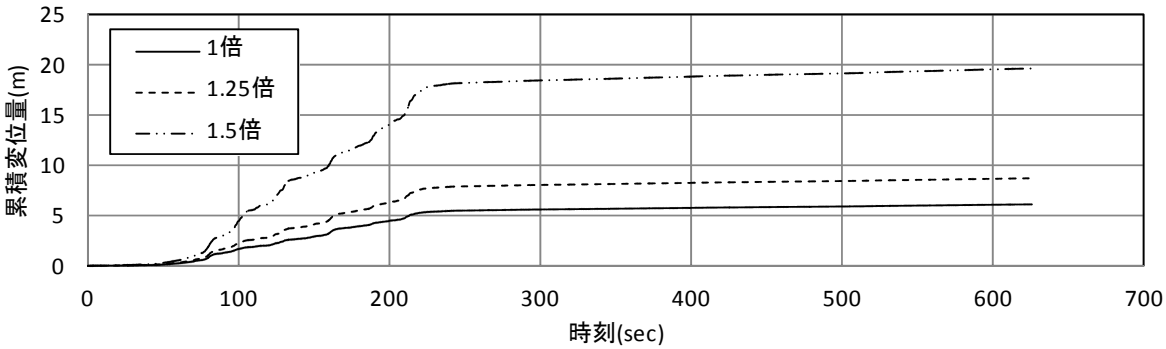


図 2.3.7-43 免震層の累積変位量（N-OSKH02-AV・繰り返し依存性非考慮）

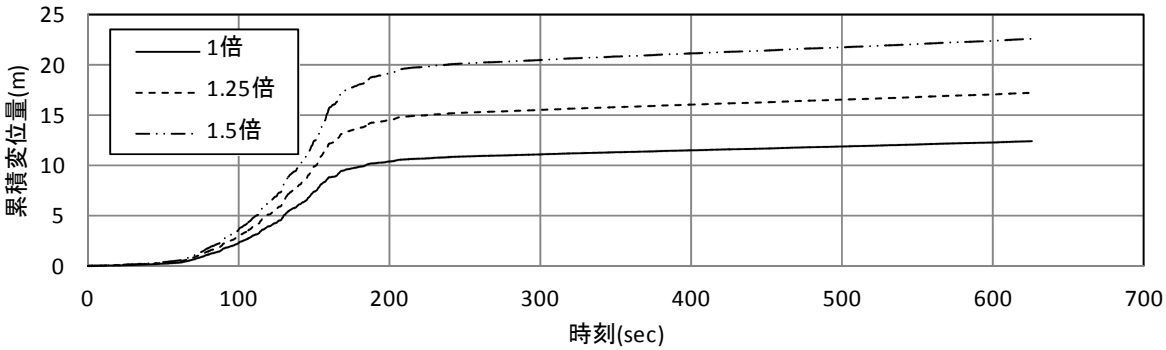


図 2.3.7-44 免震層の累積変位量（T-TN-AIC003-AV・繰り返し依存性考慮）

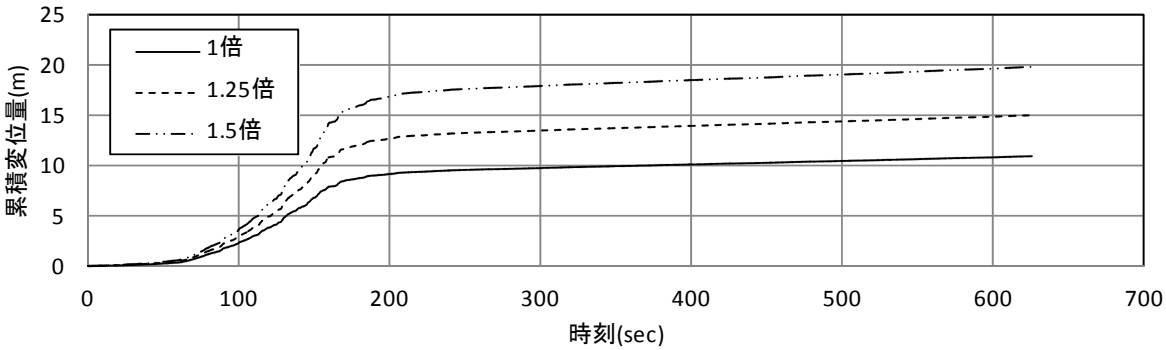


図 2.3.7-45 免震層の累積変位量（T-TN-AIC003-AV・繰り返し依存性非考慮）

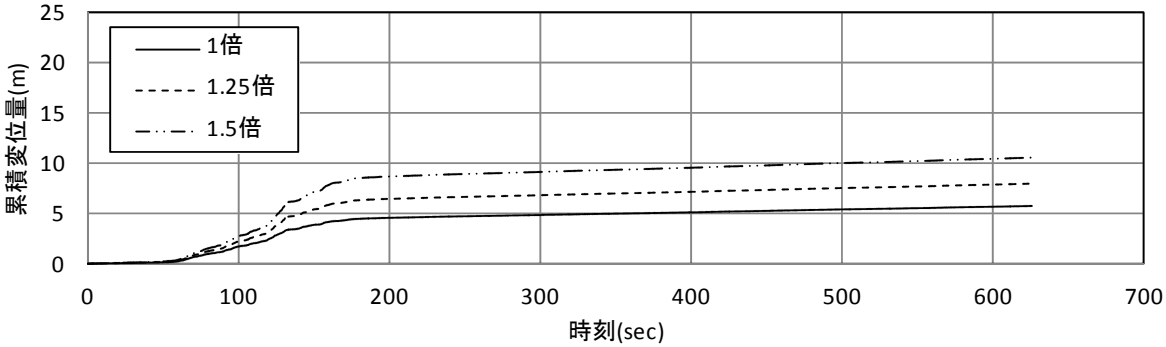


図 2.3.7-46 免震層の累積変位量（T-TN-AIC004-AV・繰り返し依存性考慮）

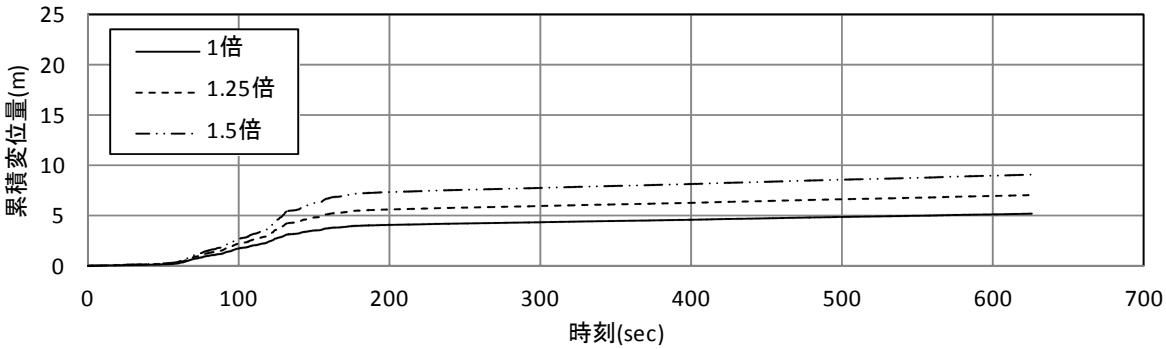


図 2.3.7-47 免震層の累積変位量（T-TN-AIC004-AV・繰り返し依存性非考慮）

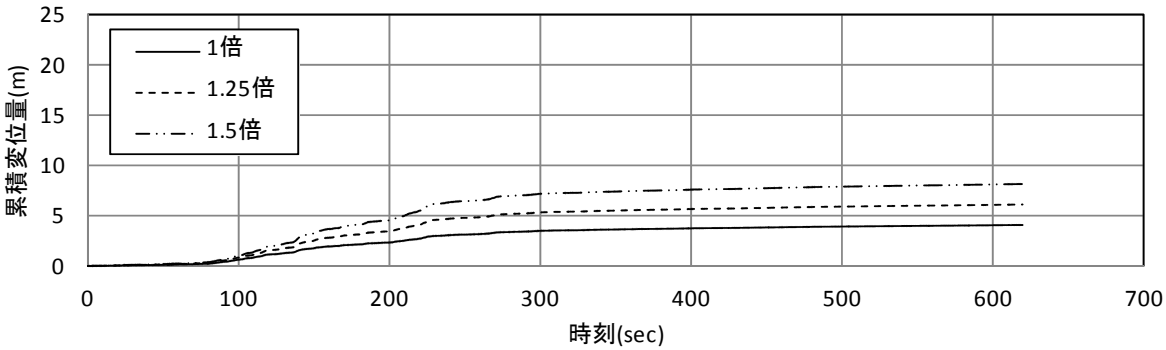


図 2.3.7-48 免震層の累積変位量（T-TN-KGIN1F-AV・繰り返し依存性考慮）

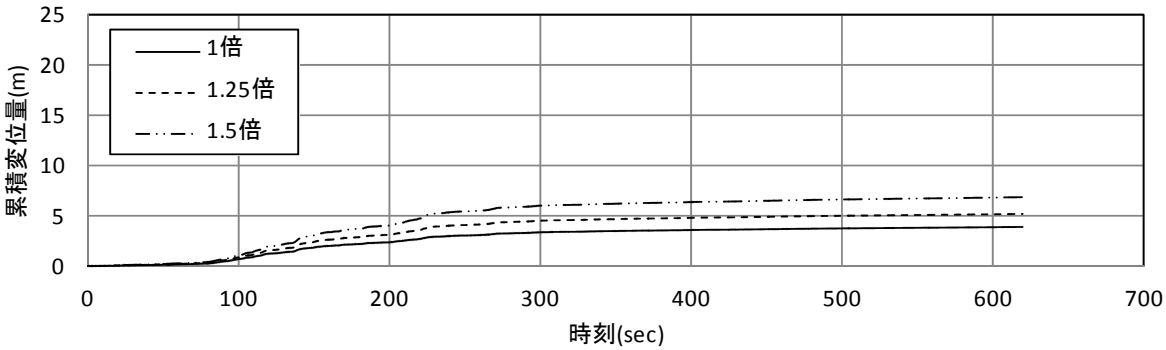
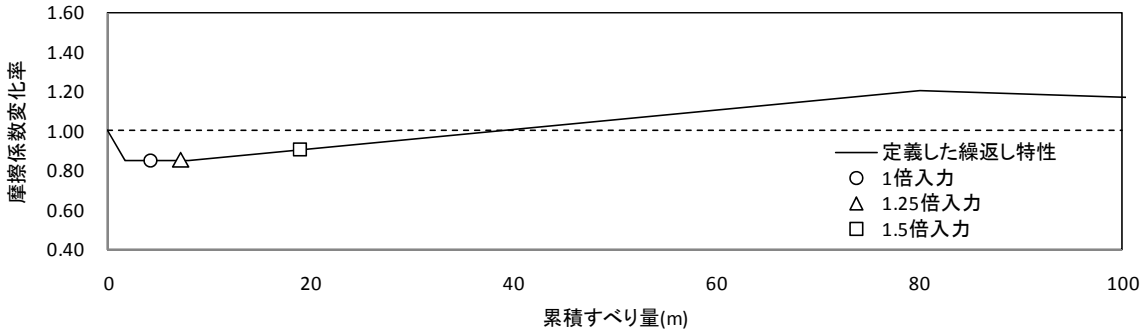
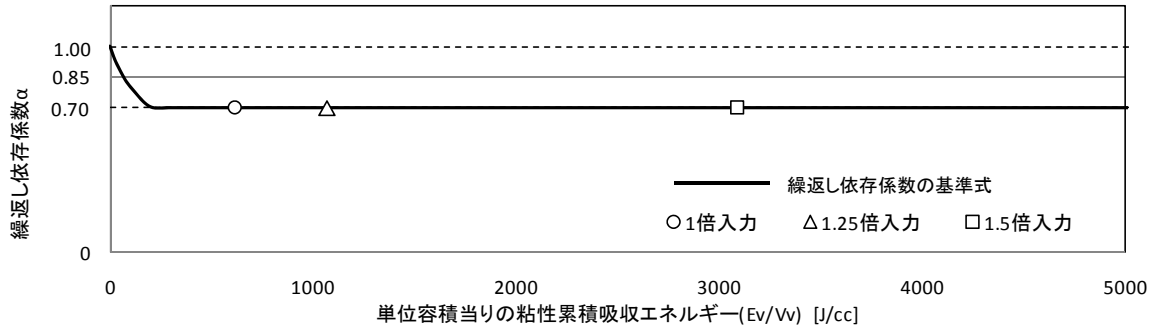


図 2.3.7-49 免震層の累積変位量（T-TN-KGIN1F-AV・繰り返し依存性非考慮）

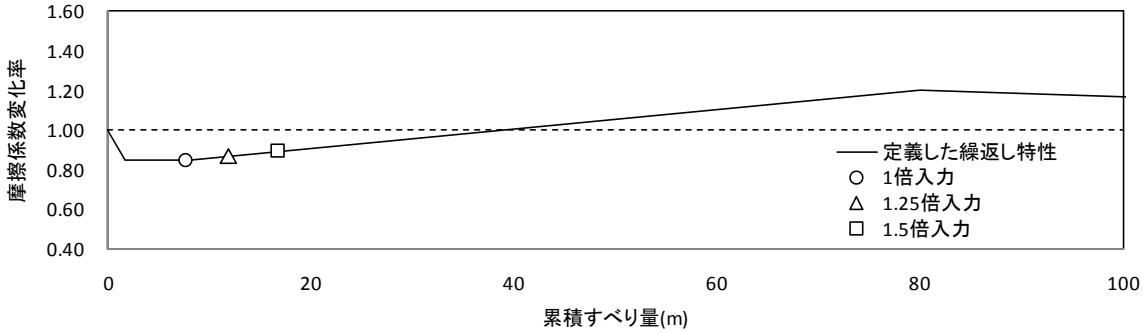


(a) 低摩擦すべり支承

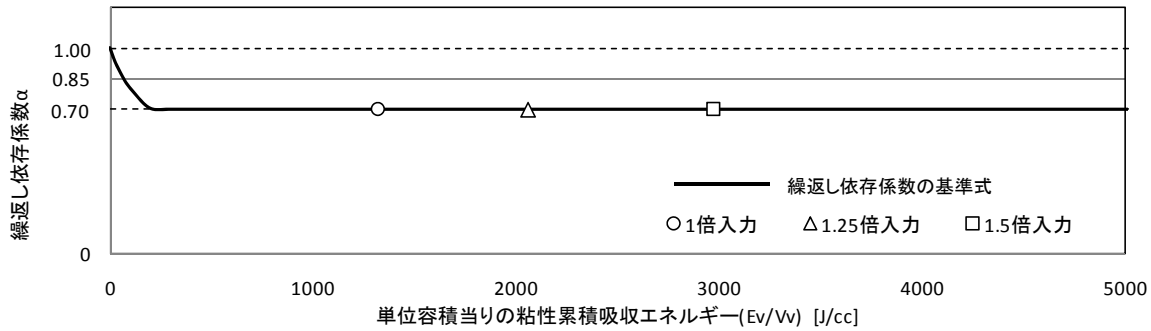


(b) 粘性ダンパー

図 2.3.7-50　N-OSKH02-AV 波による繰り返し依存性の変化

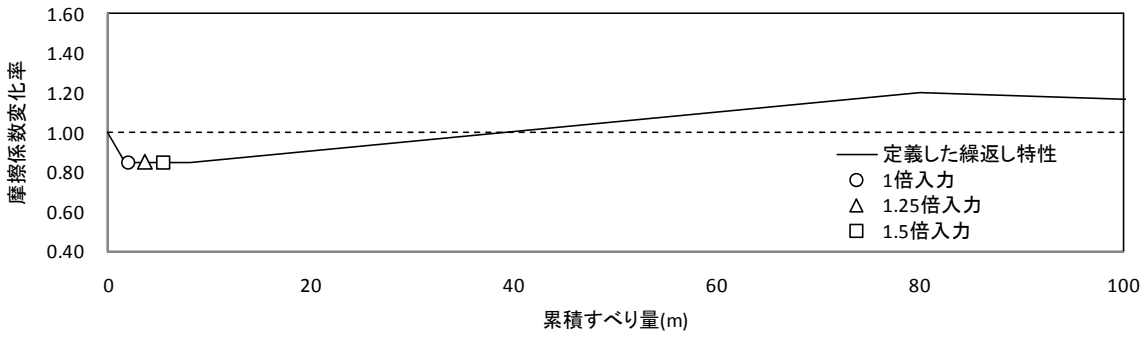


(a) 低摩擦すべり支承

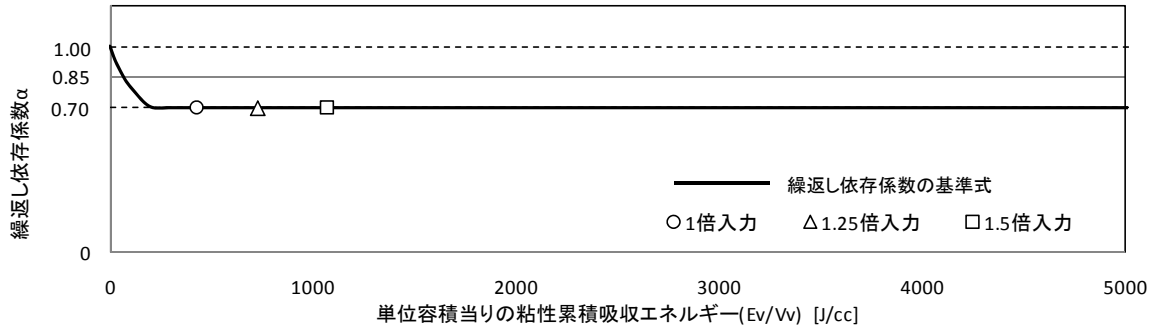


(b) 粘性ダンパー

図 2.3.7-51　T-TN-AIC003-AV 波による繰り返し依存性の変化

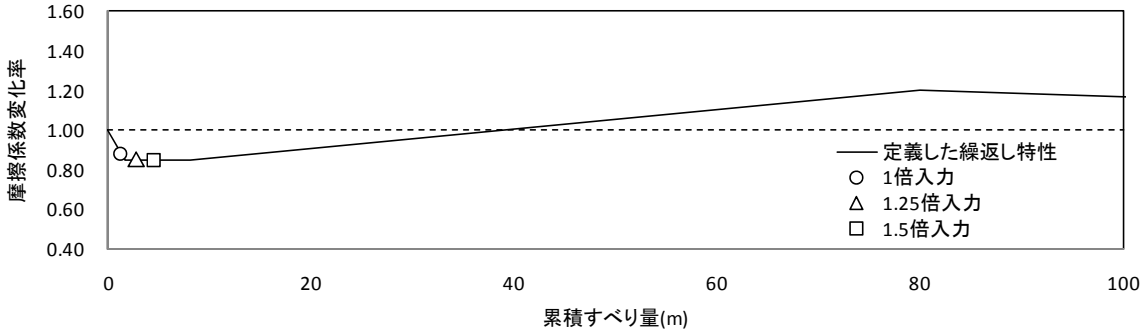


(a) 低摩擦すべり支承

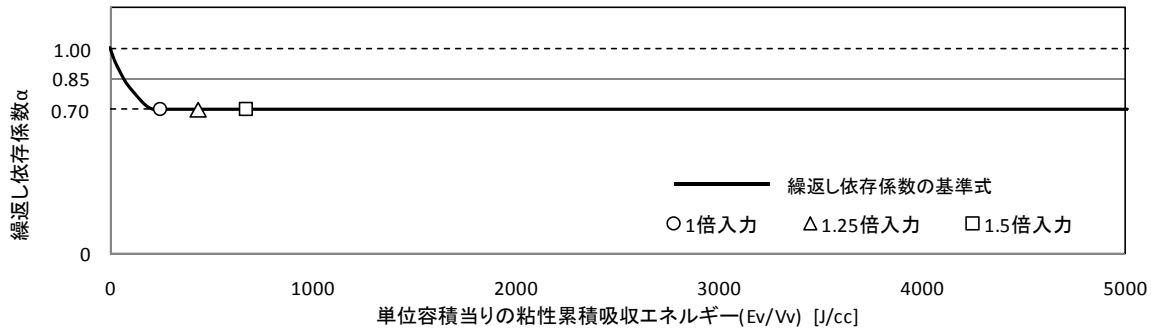


(b) 粘性ダンパー

図 2.3.7-52　T-TN-AIC004-AV 波による繰り返し依存性の変化



(a) 低摩擦すべり支承



(b) 粘性ダンパー

図 2.3.7-53　T-TN-KGIN1F-AV 波による繰り返し依存性の変化

(4) まとめ

繰り返し依存性を考慮した免震部材として弾性すべり支承（低摩擦）および粘性ダンパーを用いた 1 質点系剛体モデルを作成し、長周期地震による地震応答解析を実施した。

その結果、次の知見が得られた。

1) 免震層に低摩擦すべり支承と粘性ダンパーを併用した本解析モデルでは、粘性体の回転による慣性の影響は最大で 4%程度見られた。
2) 長周期地震動 4 波による地震応答解析を実施した結果、繰り返し依存性を考慮したモデルでは最大累積変形が 1 倍入力で 12.4m（T-TN-AIC003-AV）、1.5 倍入力で 23.3m（N-OSKH02-AV）となった。
3) 各免震部材の繰り返し依存性を考慮したケースの応答値は、非考慮のケースに比して全体として 2 割程度大きい値を示した。
4) 弾性すべり支承（低摩擦）の場合、繰り返し依存性を決める累積すべり量は 1.5 倍入力時においても、実験で確認されている累積変形量に対して十分な余裕が見られた。一方、粘性ダンパーの繰り返し依存係数を決める粘性抵抗力による累積吸収エネルギー量は、1 倍入力時においても実験で確認されているエネルギー量を上回るケースが見られた。

参考文献

2.3.7-1) 財団法人日本建築センター免震構造審査委員会ほか：免震部材のエネルギー吸収性能評価に関する現状と課題　報告書；2007.3

2.3.7-2) 国土交通省：オイレス式弾性すべり支承　建築材料認定書（認定番号 MVBR-0377）別表、2008.6

2.3.7-3) 日本ピラー工業株式会社：免震用すべり材（低摩擦材）の繰り返しすべり試験による摩擦係数の変化；技術連絡書（資料 2）、2010.7

2.3.7-4) 嶺脇重雄ほか：超高層免震建物の地震応答を想定した実大免震支承部材の性能確認試験；構造工学論文集、Vol.55B、2009.3

2.3.7-5) 浜崎宏典ほか：弾性スベリ支承の耐久性能に関する実験的研究　その 2 低摩擦タイプと高摩擦タイプの弾性スベリ支承の実験結果；日本建築学会大会学術講演梗概集、B2、P.1061、2007.8

2.3.7-6) 技術委員会ほか：積層ゴムと弾性すべり支承のエネルギー吸収性能；MENSHIN、No.67、P.33、2010.2

2.3.7-7) 技術委員会免震部材部会ダンパー小委員会：免震部材部会ダンパー小委員会活動報告；2007.3

2.3.7-8) 光阪勇治ほか：増幅機構付き減衰装置の高速度領域における性能評価　その 2 高速試験結果；日本建築学会大会学術講演梗概集、B2、P.761、2003.9

2.3.7-9) 国土交通省：AT 式増幅機構付き減衰装‐減衰こま（Rotary Damping Tube）RDT-AT-Short 建築材料認定書（認定番号 MVBR-0220）別表、2004.4

2.3.7-10) 国土交通省：AT 式増幅機構付き減衰装‐減衰こま（Rotary Damping Tube）RDT-AT-10 万 cst　建築材料認定書（認定番号 MVBR-0221）別表、2004.4

2.3.7-11) 国土交通省：AT 式増幅機構付き減衰装‐減衰こま（Rotary Damping Tube）RDT-AT-30 万 cst　建築材料認定書（認定番号 MVBR-0222）別表、2004.4

2.3.7-12) 中南滋樹ほか：慣性質量要素を有する粘性減衰装置の開発；三井住友建設技術研究所報告、No.3、pp.157-164、2005

2.4 まとめ

既往の研究と免震部材メーカー提供による多数回繰り返し特性を解析に反映させ、長周期地震動に対する免震建築物の応答解析を実施し、応答評価を行った。その中で、各免震部材について､応答解析に反映させるべきもの(累積変形､温度上昇などの関数として評価できるもの)、通常の応答解析を行なって結果から評価できるものなど、評価手法を整理した。応答解析に反映させるものについては、各社が独自にプログラムを改良し、繰り返し依存性を考慮できる解析プログラムを整備した。

各免震部材の繰り返し依存性がどのように応答に影響するかを考察し、繰り返し依存性を考慮した場合としない場合の比較から抽出した、まとめと今後の課題は以下の通りである。

・鉛プラグ入り積層ゴム

繰り返し加振による温度上昇に伴い､降伏荷重が低下する特性を考慮した応答解析を実施し、その影響評価を行った。今後は実験結果についての評価を実施し、鉛プラグの温度上昇に伴う降伏荷重の低下に代表される繰り返し加振時の特性変化ついて現状の評価手法の検証が必要である。

・高減衰ゴム系積層ゴム

既往の研究により提案されている累積履歴エネルギー吸収量による等価剛性の評価式を用いることで、多数回繰り返し加振を受けることによる復元力特性の変化を考慮した。今後は部材実験の結果を基に、広範囲に渡って既往の評価式を検証することで適用範囲の拡大を図る必要がある。

・鋼材ダンパー

繰り返し加振によって特性変化が生じないと考えられるので、応答値に対する疲労損傷評価を行った。今後は実験結果についての評価を実施し、繰り返し加振時の特性評価と疲労損傷度の評価について現状の評価手法の検証が必要である。

・鉛ダンパー

温度依存性および過去に実施された一定振幅正弦波加振試験結果に基づき、鉛ダンパーの繰り返しによる耐力劣化を考慮した解析モデルを用いた。今後は部材実験の結果との整合性を検証し、耐力劣化モデルの見直しを検討する必要がある。

・オイルダンパー

繰り返し回数や温度上昇によって性能がほとんど変化しないことが知られているが、地震の入力エネルギーに対する温度上昇について放熱を考慮した場合と無視した場合について検討し、その違いは小さかった。これより放熱を考慮しない簡略式でも安全側で評価できると考えられる。

・弾性すべり支承（高摩擦）

摩擦係数の累積すべり変位依存性により、摩擦係数の低下を考慮した検討を行い、応答量が適用範囲を超える結果となった。今後は実験結果に基づいて、累積すべり変位依存性を考慮する評価式の適用範囲を拡大する必要がある。また、支承径の違いによる温度変化を評価するために、熱収支解析による摩擦係数変化の修正を行う必要がある。

・弾性すべり支承（低摩擦）

摩擦係数の繰り返し依存性を考慮した検討を行った。累積すべり量は実験で確認されている累積変形量に対して十分な余裕があった。

・粘性ダンパー

材料認定書記載の繰り返し依存性を考慮し、温度変化は生じないものとして検討した。今後は部材実験の結果を分析し、繰り返しによる温度上昇に伴う抵抗力の低下を適切に評価する必要がある。

また、鉛プラグ入り積層ゴム、天然ゴム系積層ゴム＋弾性すべり支承（高摩擦）については、２方向入力に対する検討を行い、２方向入力が応答に与える影響について検討した。

・鉛プラグ入り積層ゴム

２方向入力時には入力エネルギーが大きい地震動の場合に、温度上昇を考慮すると考慮しない場合に比べて免震層の最大応答変形が大きくなった。

・弾性すべり支承（高摩擦）

２方向入力を考慮した場合、１方向入力に比べて応答変位が大きくなる傾向になる。また、繰り返し依存性を考慮すると更に応答変位が大きくなる傾向がある。つまり、すべり支承を用いる場合は２方向入力を適切に評価する必要がある。

以上より、長周期地震動に対する免震建築物の応答評価における今後の課題は、免震部材実験結果に対する評価を実施し、現状の評価手法の検証と見直しをすることである。また、免震部材および免震建築物応答に及ぼす繰り返し依存性の影響を簡易的に評価できる手法の検討が望まれる。

第 3 章　免震部材の繰り返し特性と長周期地震動に対する免震建築物の応答評価（２）

3.1　目的

長周期地震動に対する免震建築物の安全性照査のクライテリア設定に向けて、多数回繰り返し時の免震部材の特性評価とモデル化、免震部材の特性を考慮した応答解析に基づく応答評価を実施する。

3.2　全体方針

(1) 方針

第Ⅲ部第1章に示す免震部材実験結果を基にした詳細なモデル化をプログラムに反映し、多数回繰り返し特性を考慮した長周期地震動に対する 1 質点モデルの応答解析を実施し、応答評価を行う。

検討ケースは以下の通りとする。

① 鉛プラグ入り積層ゴム
② 高減衰ゴム系積層ゴム
③ 天然ゴム系積層ゴム＋鋼材ダンパー
④ 天然ゴム系積層ゴム＋鉛ダンパー
⑤ 天然ゴム系積層ゴム＋弾性すべり支承（高摩擦）
⑥ 天然ゴム系積層ゴム＋弾性すべり支承（低摩擦）＋粘性ダンパー（減衰こま）

詳細なモデル化を行えるようプログラムを改良し、繰り返し依存性を考慮できる解析プログラムを整備する。

検討用長周期地震動に対する応答解析結果を整理し、多数回繰り返しによって何が問題となるかを抽出する。また、入力倍率が 1.0 倍、1.25 倍、1.5 倍と大きくなることによって、繰り返し依存性がどのように応答に影響するかを考察し、繰り返し依存性を考慮した場合としない場合の比較から、今後の課題等を抽出する。

(2) 解析モデル

解析モデルは上部構造を剛体モデルとした 1 質点モデルとし、免震層の設定は積層ゴムによる免震周期 4.0 秒程度、ダンパーの負担せん断力係数 3.0～3.5%を標準とし、免震支承毎に設定を行なう。

(3) 入力地震動

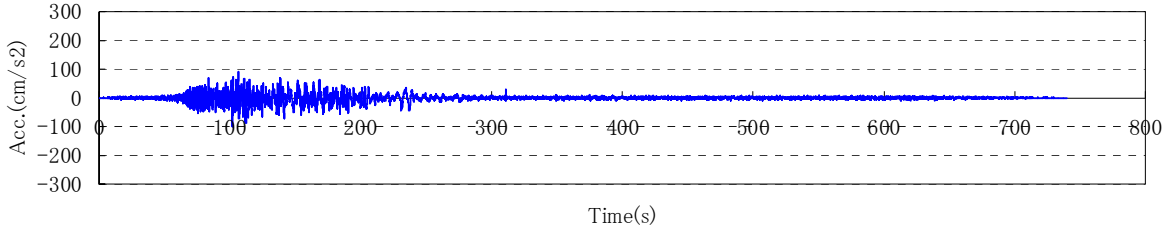
検討用入力地震動は、東海･東南海･南海地震が連続して発生すると想定して作成した以下の４波とする。

OSKH02　（大阪・此花　平均）
AIC003　（愛知・津島　平均）
SZO024　（静岡・浜松　平均）
KGIN　（東京・新宿　平均）

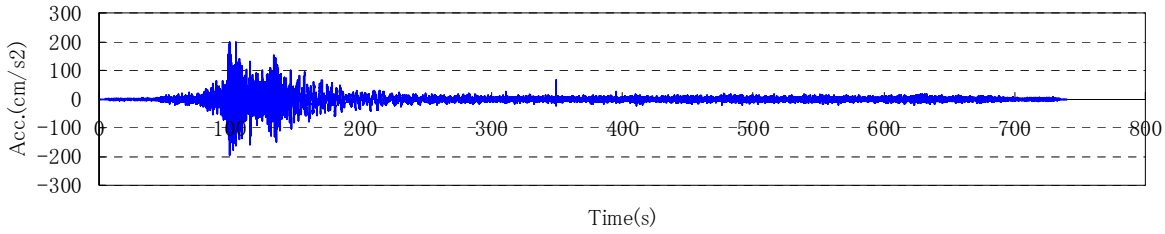
入力地震動の諸元を表 3.2-1 に、加速度時刻歴波形，速度時刻歴波形，変位時刻歴波形を図 3.2-1～3、擬似速度応答スペクトルを図 3.2-4、エネルギースペクトルを図 3.2-5 に示す。

表 3.2-1　入力地震動諸元（加速度、速度、変位は最大値）

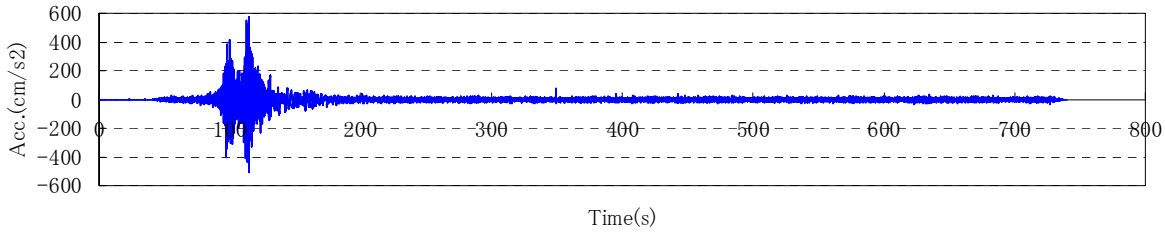
地震波名	3連動地震			
	OSKH02 （此花）	AIC003 （津島）	SZO024 （浜松）	KGIN （新宿）
加速度 (cm/s^2)	98.49	199.4	576.9	42.11
速度 (cm/s)	38.07	26.78	40.08	21.60
変位 (cm)	31.43	21.62	21.13	26.29
継続時間 (s)	739.82	739.82	739.82	739.82



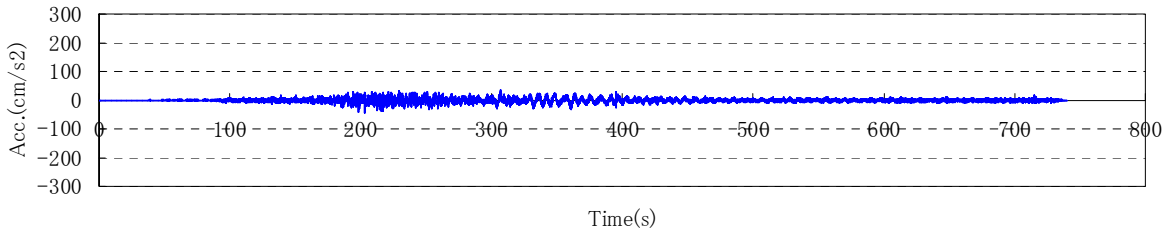
(a) OSKH02



(b) AIC003

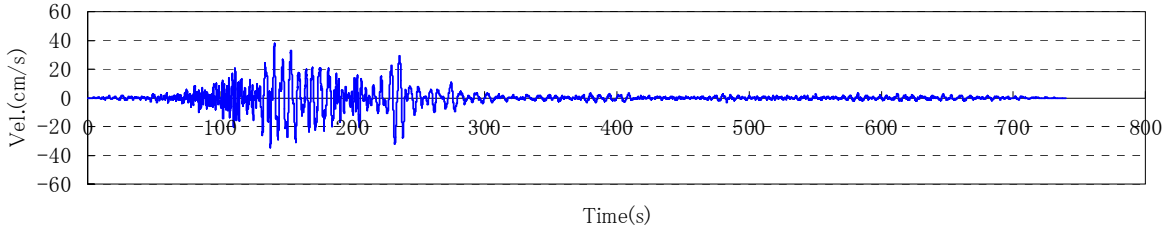


(c) SZO024

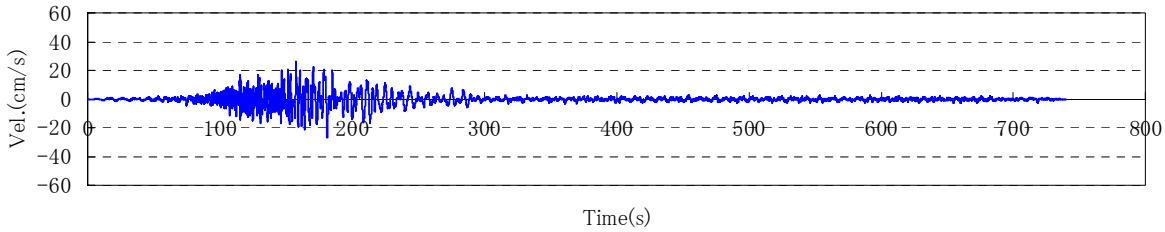


(d) KGIN

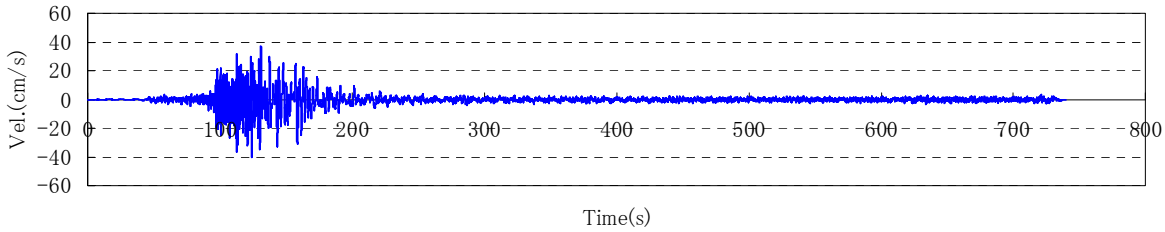
図 3.2-1　入力地震動加速度時刻歴波形



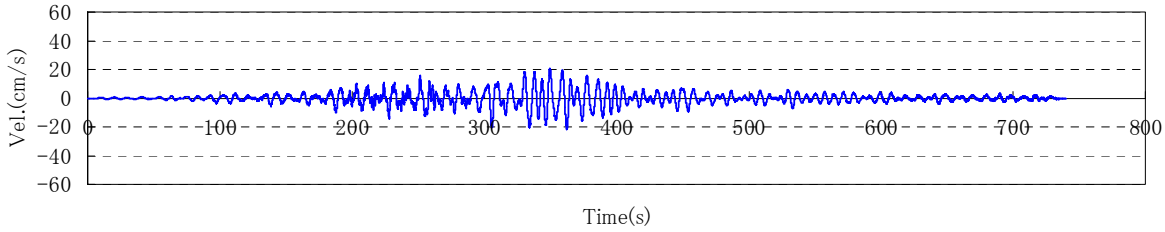
(a) OSKH02



(b) AIC003

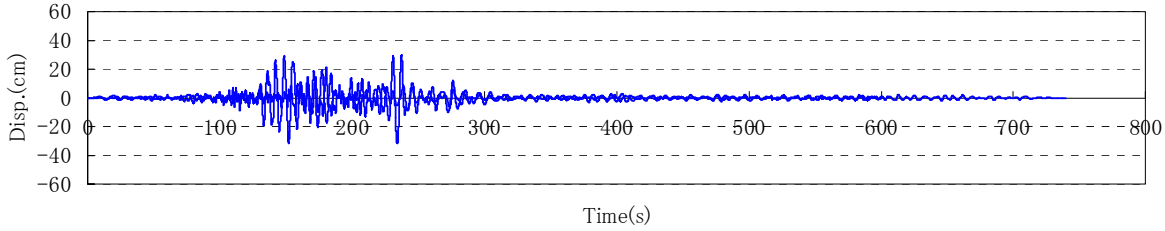


(c) SZO024

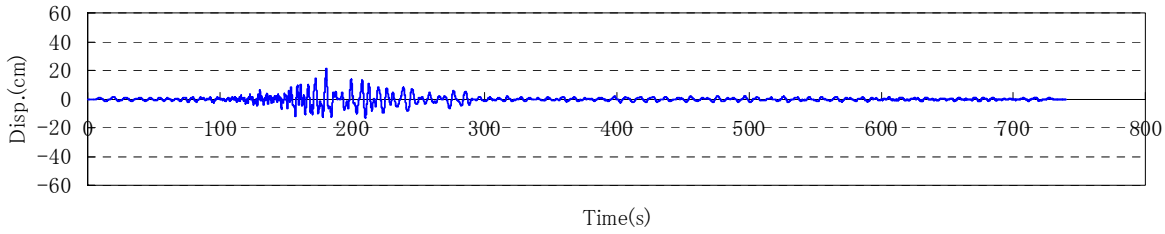


(d) KGIN

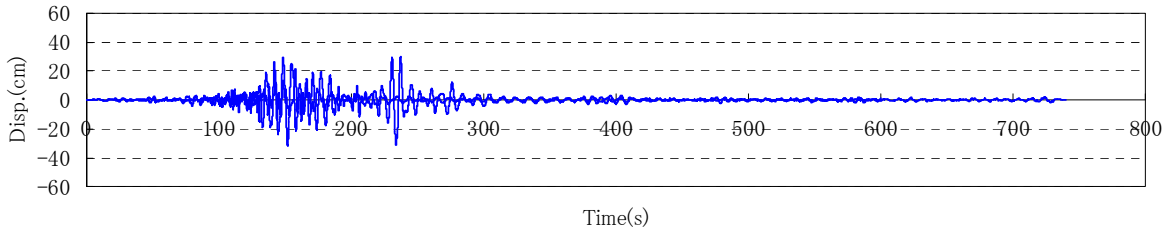
図 3.2-2　入力地震動速度時刻歴波形



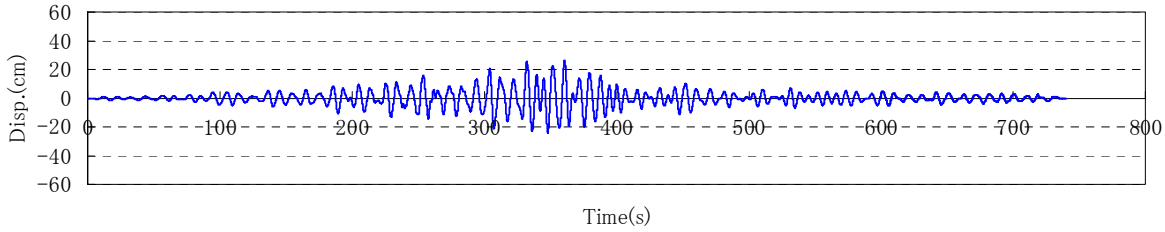
(a) OSKH02



(b) AIC003



(c) SZO024



(d) KGIN

図 3.2-3　入力地震動変位時刻歴波形

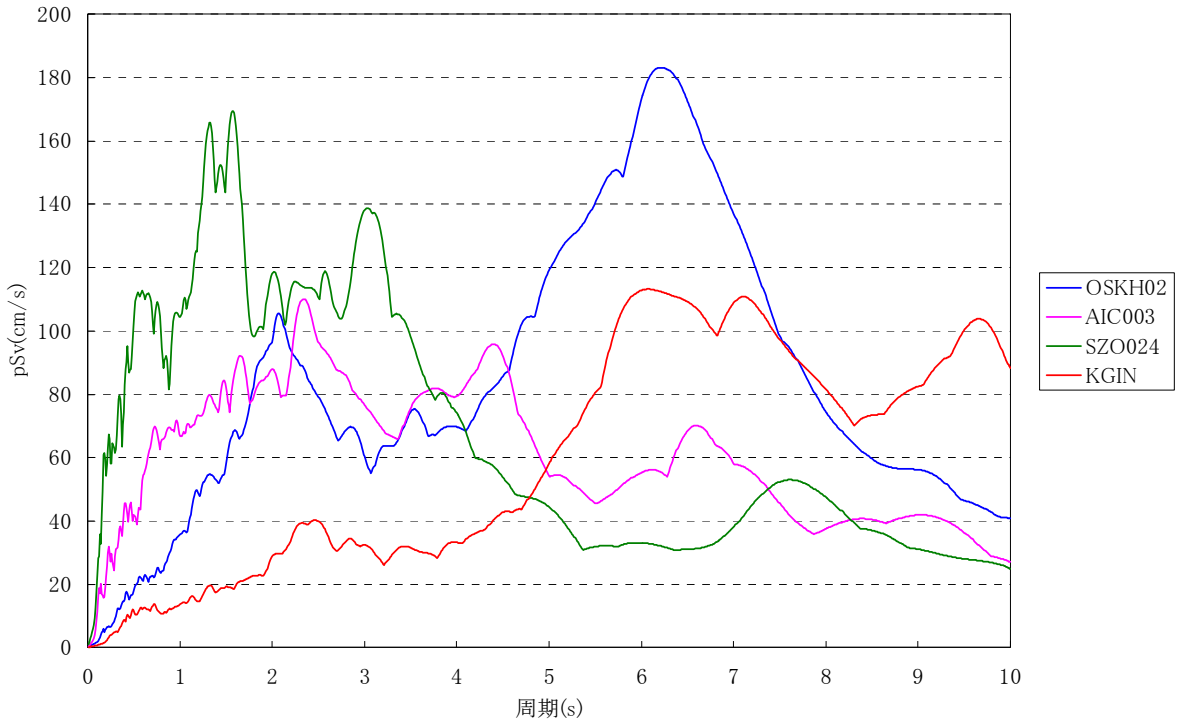


図 3.2-4　入力地震波擬似速度応答スペクトル(h=0.05)

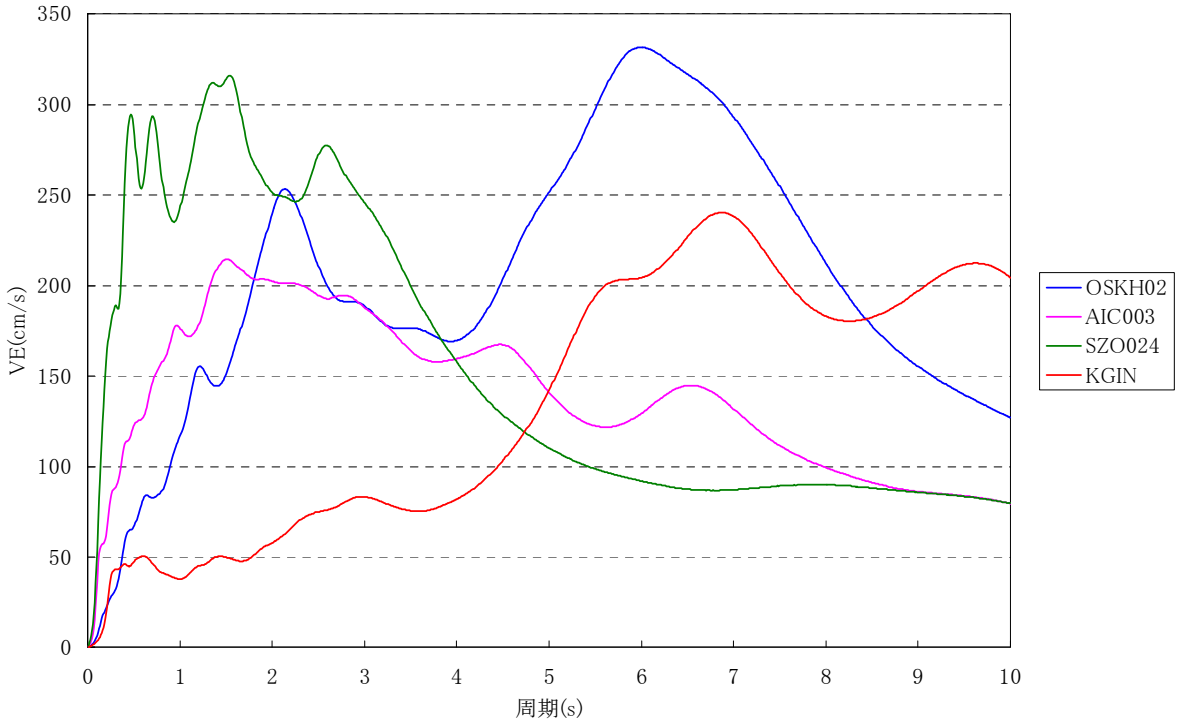


図 3.2-5　入力地震波エネルギースペクトル(h=0.10)

3.3 免震部材の繰り返し特性モデルと地震応答解析（その 2）

3.3.1　鉛プラグ入り積層ゴム

(1) 鉛プラグ入り積層ゴム実験結果のモデル化

(a) １本プラグの実験結果のモデル化

鉛プラグ入り積層ゴムの鉛プラグ１本タイプを対象とし、繰り返しに伴う降伏荷重特性値 Q_d の低下に着目した評価結果を以下に示す。

解析においては実験時の水平変位を与えることにより、曲線型モデルである修正 HD モデルに基づく荷重変形関係を求め、履歴吸収エネルギーが全て鉛部分の熱エネルギーに変換されているとし、熱伝導解析により得られた鉛部温度と、設定した鉛温度～降伏荷重関係に基づき降伏荷重を時々刻々修正していく手法である（参考文献 3.3.1-1～3.3.1-3）。

解析対象は限界試験として実施した表 3.3.1-1 に示す 3 ケースとした。

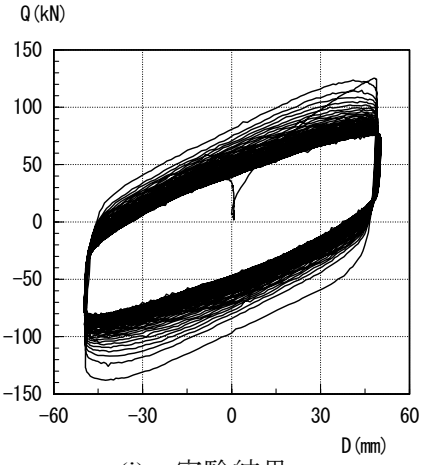
表 3.3.1-1　解析対象実験ケース

試験種類		加振周期 (s)	せん断歪 (%)	サイクル数	累積変形 (m)
正弦波加振(限界)	1B	4	50	250	49.5
	2B		100	120	47.52
	3B		200	60	47.52

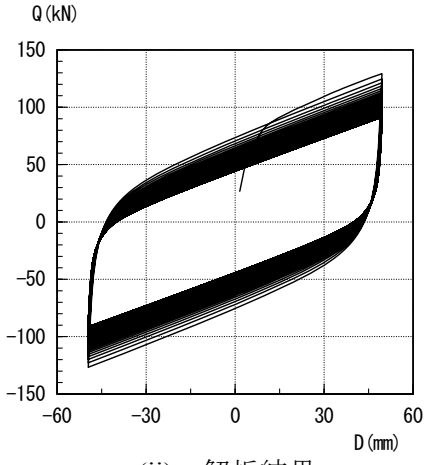
解析においては、初期温度を 15℃とし、鉛プラグ入り積層ゴムの解析開始時の Q_d については各ケースにおいて限界試験の直前に実施した基本特性試験結果から設定した。なお、取付部については実験時に使用した断熱板の熱伝導率を考慮している。

図 3.3.1-1 に荷重変形関係について実験結果とシミュレーション解析とを比較して示す。

図 3.3.1-2、図 3.3.1-3 に Q_d の低下について、実験結果とシミュレーション解析結果とを比較して示す。

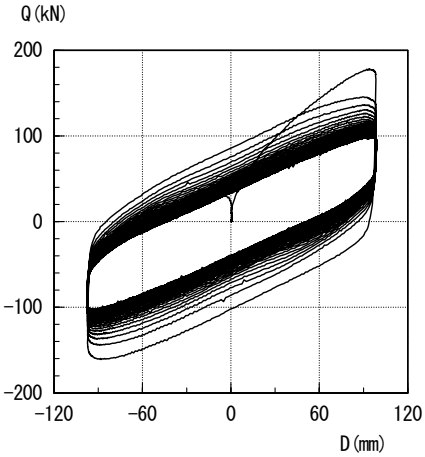


(i)　実験結果

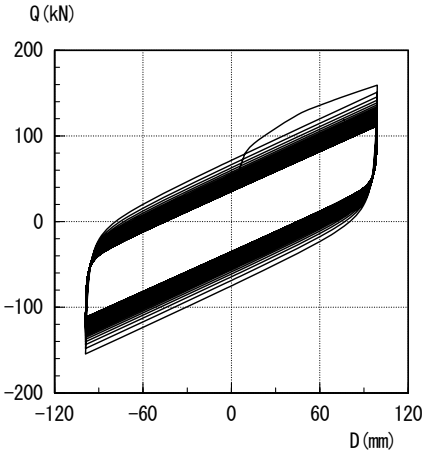


(ii)　解析結果

(a) 実験ケース 1B　（T=4s,γ=50%,250cycle）

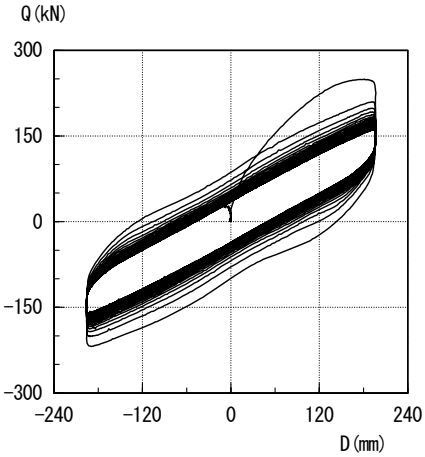


(i)　実験結果

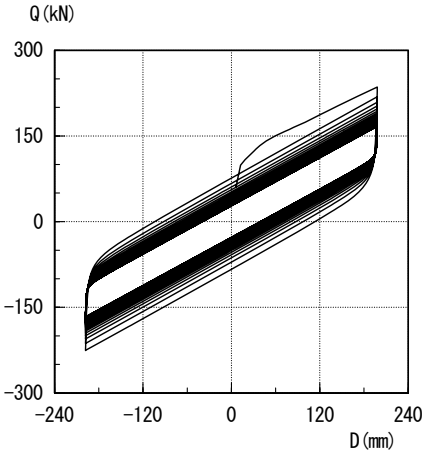


(ii)　解析結果

(b) 実験ケース 2B　（T=4s,γ=100%,120cycle）



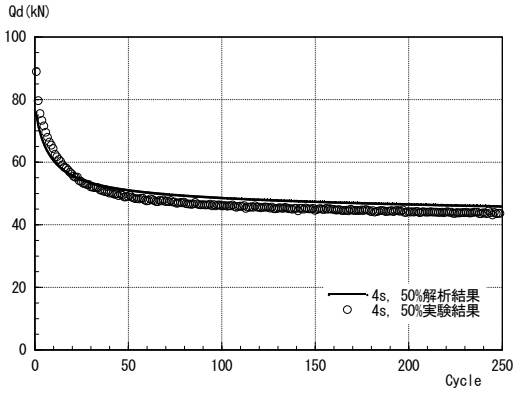
(i)　実験結果



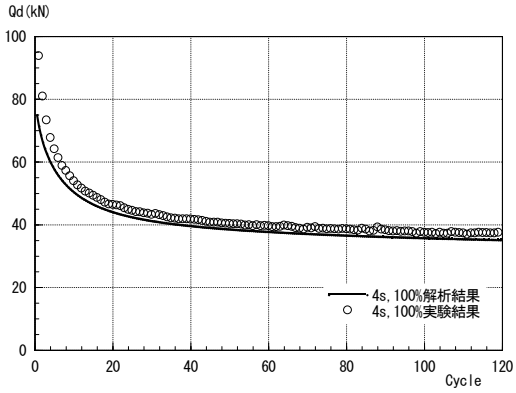
(ii)　解析結果

(c) 実験ケース 3B　（T=4s,γ=200%,60cycle）

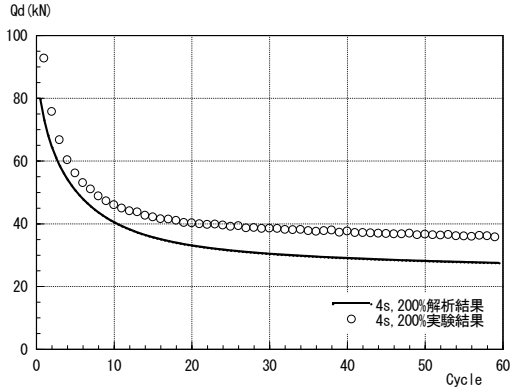
図 3.3.1-1　実験結果と解析結果との比較（荷重変形関係）



(a) 実験ケース 1B
（T=4s,γ=50%,250cycle）

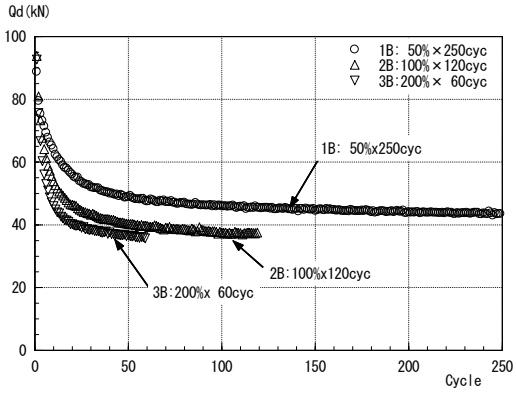


(b) 実験ケース 2B
（T=4s,γ=100%,120cycle）

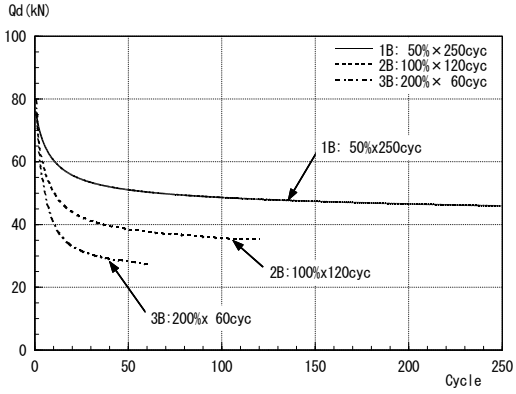


(c) 実験ケース 3B
（T=4s,γ=200%,60cycle）

図 3.3.1-2　実験結果と解析結果との比較（Q_d での比較）



(a)　実験結果



(b)シミュレーション解析結果

図 3.3.1-3　Q_dの実験ケースでの比較実験結果と解析結果との比較（Q_d での比較）

(b) ３本プラグの実験結果のモデル化

鉛プラグ入り積層ゴムの鉛プラグ３本タイプを対象とし、繰り返しに伴う降伏荷重特性値 Q_d の低下に着目した評価結果を以下に示す。

(a)で示した解析手法と同様とし、解析対象は限界試験として実施した表 3.3.1-2 に示すケースとした。

表 3.3.1-2　解析対象実験ケース（鉛プラグ３本タイプ）

試験種類		加振周期 (s)	せん断歪 (%)	サイクル数	累積変形 (m)
正弦波加振 (限界)	1B	4	50	250	49.5
	3B		200	60	47.52

鉛プラグ３本タイプの熱伝導解析モデルを図 3.3.1-4 に示す。熱伝導解析モデルのモデル化範囲は対称性を考慮して、断面における 1/6 部分、立面における 1/2 部分を各要素に分割した。

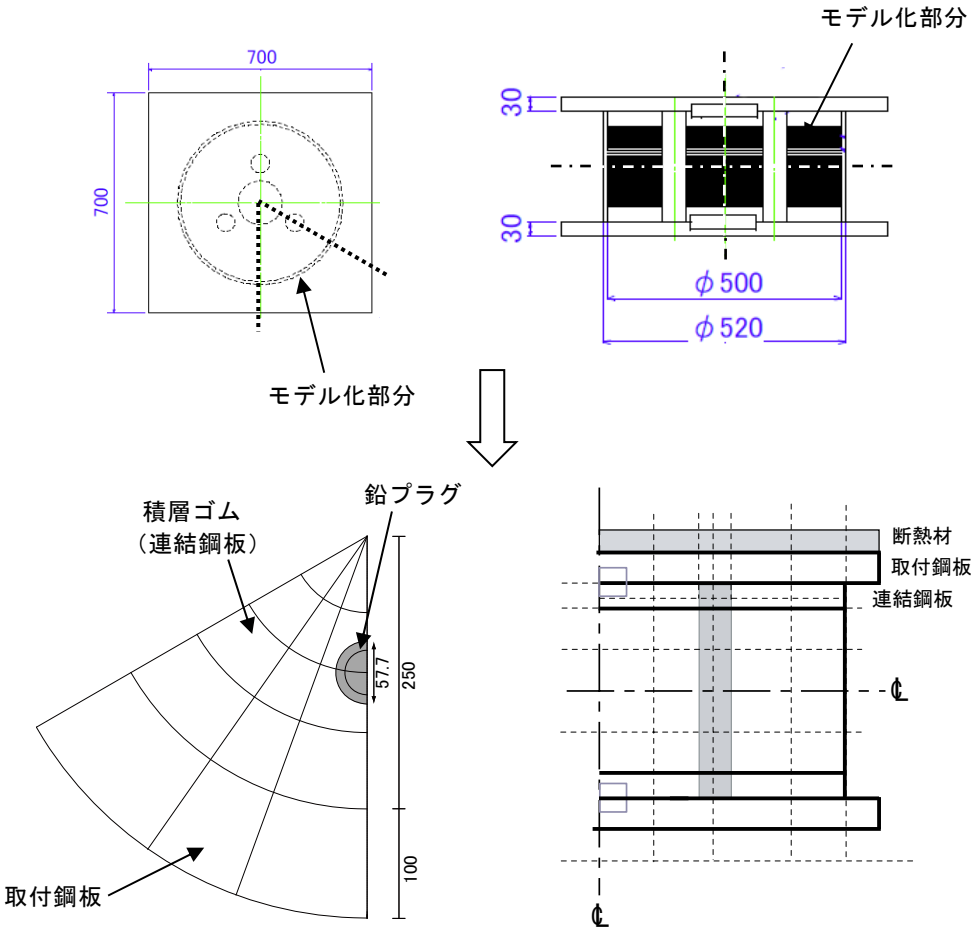


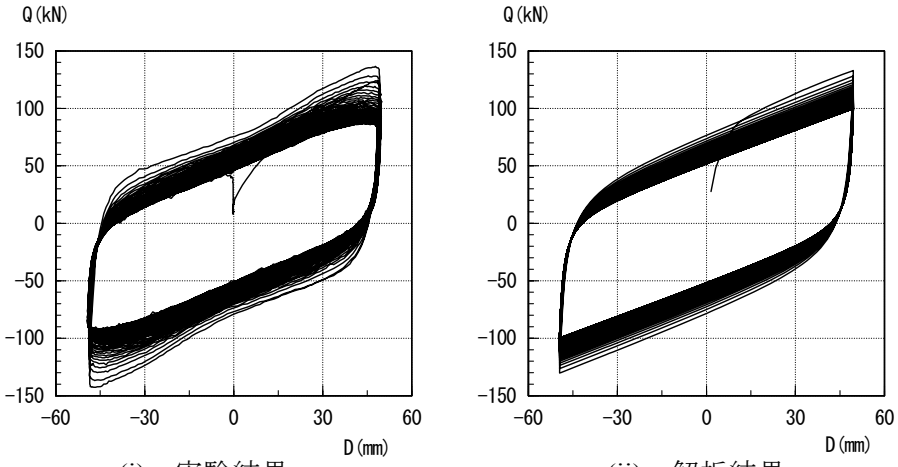
図 3.3.1-4　熱伝導解析モデル（鉛プラグ３本タイプ）

第Ⅲ部第 1 章に示した実験結果のシミュレーション解析においては、(a)で示した鉛プラグ 1 本タイプでの解析と同様に初期温度を 15℃とし、鉛プラグ入り積層ゴムの解析開始時の Q_d は各ケースにおいて限界試験の直前に実施した基本特性試験結果から設定した。

図 3.3.1-5 に荷重変形関係について鉛プラグ３本タイプの実験結果とシミュレーション解析とを比較して示す。

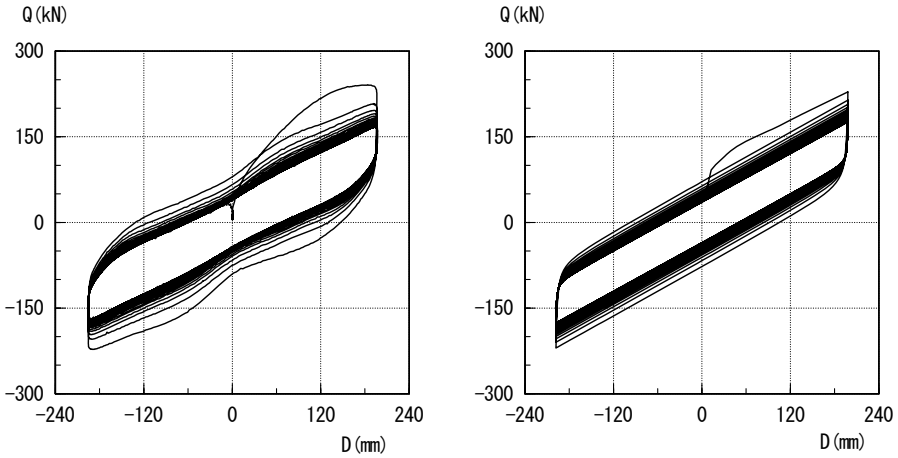
図 3.3.1-6 に Q_d の低下について、実験結果とシミュレーション解析結果とを比較して示す。

図 3.3.1-7 に Q_d の低下について、3 サイクル目の値で基準化した値の実験結果とシミュレーション解析結果とを比較して示す。



(i)　実験結果　　(ii)　解析結果

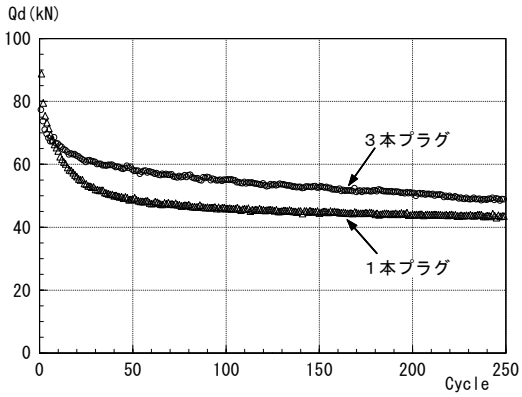
(a) 実験ケース 1B（３本プラグタイプ）　（T=4s,γ=50%,250cycle）



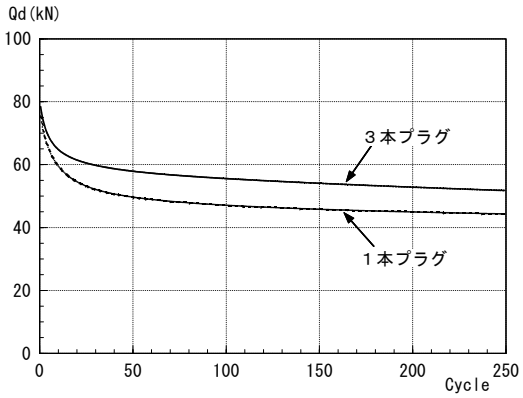
(i)　実験結果　　(ii)　解析結果

(c) 実験ケース 3B（３本プラグタイプ）　（T=4s,γ=200%,60cycle）

図 3.3.1-5　実験結果と解析結果との比較（荷重変形関係）

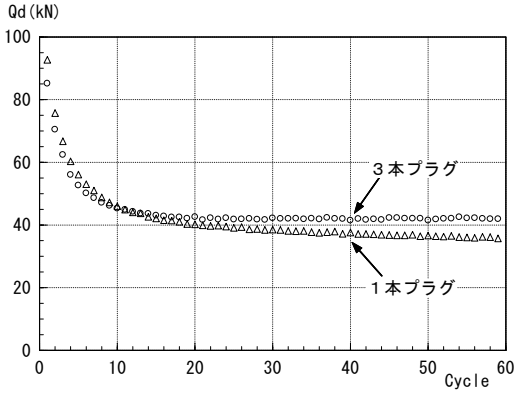


(i)　実験結果

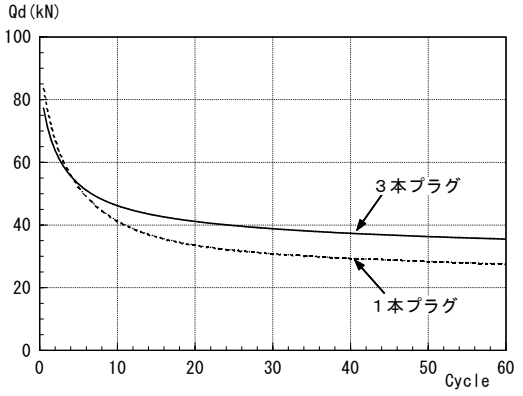


(ii)　解析結果

(a) 実験ケース 1B　（T=4s,γ=50%,250cycle）



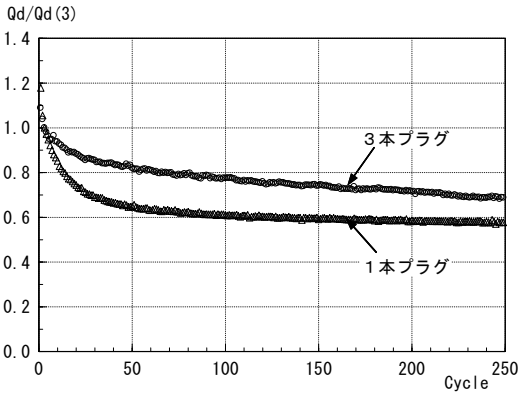
(i)　実験結果



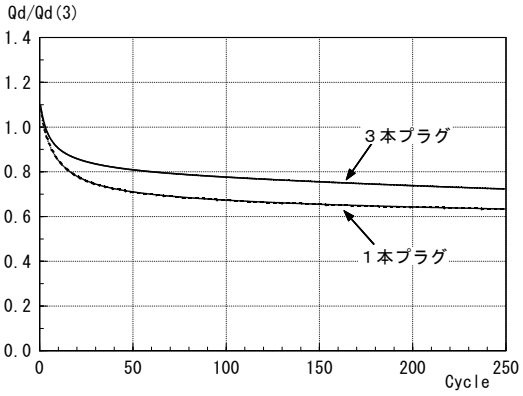
(ii)　解析結果

(c) 実験ケース 3B　（T=4s,γ=200%,60cycle）

図 3.3.1-6　実験結果と解析結果との比較（Q_d での比較）

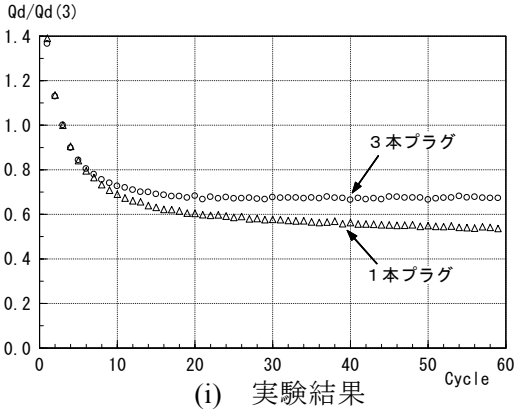


(i)　実験結果

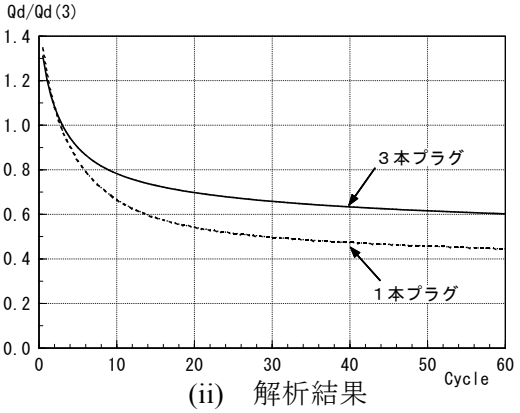


(ii)　解析結果

(a) 実験ケース 1B　（T=4s,γ=50%,250cycle）



(i)　実験結果



(ii)　解析結果

(c) 実験ケース 3B　（T=4s,γ=200%,60cycle）

図 3.3.1-7　実験結果と解析結果との比較（Q_d 3 サイクル目の値で基準化）

第Ⅲ部第１章に示した実験を実施した鉛プラグ入り積層ゴムについて、鉛プラグ１本タイプと３本タイプの正弦波繰返加力実験を対象として、シミュレーション解析を実施した。その結果、降伏荷重特性値 Q_d の低下について実験と解析とで一致した結果が得られた。また、鉛プラグ１本タイプと３本タイプとでの違いを解析にて追跡することができた。

(2) 地震応答解析の条件設定

応答評価を行った建物モデル諸元を表 3.3.1-3 に示す。応答解析は上部建物を 1 質点としてモデル化し実施した。免震層は鉛プラグ入り積層ゴム（LRB）のみで構成されるものとし、鉛プラグ入り積層ゴムはゴム種 G4、外径φ1000、鉛径 200mm（１本プラグ）、ゴム総厚 200mm とし、積層ゴムのゴム剛性による周期 T_f=4.5s、鉛降伏せん断力係数（α s=0.035）となるよう設定した。

表 3.3.1-3　対象建物諸元

上部構造重量 (積層ゴム 1 基当り) (kN)	LRB 平均面圧 (N/mm^2)	T_f (sec)	α s
7477	9.9	4.5	0.035

T_f: ゴム剛性による免震周期

α s:鉛プラグ降伏せん断力係数

地震応答解析には LRB の温度について熱伝導解析により評価し、鉛プラグ部の温度によって LRB の降伏荷重特性値（以下 Q_d ）を変化させながら、運動方程式を並行して解く手法を用いている（参考文献 3.3.1-2）参照)。鉛プラグ入り積層ゴム熱伝導解析差分法モデル、鉛プラグの温度−降伏荷重関係、時刻歴応答解析法はそれぞれ以下のように設定する。

鉛プラグ入り積層ゴムにおける熱伝導解析差分法モデルは、前進差分法による鉛プラグ入り積層ゴムを要素分割した差分法モデルとする（図 3.3.1-8(a)参照)。地震エネルギーの吸収量はすべて鉛プラグせん断変形部での発熱となると仮定し、モデル化範囲には取付部（断熱材）も含めることによって、鉛プラグから積層ゴム部、フランジ、上下基礎への熱エネルギーの拡散を考慮する。なお、地震応答解析においては取付部を鉄筋コンクリートとしてモデル化している。また、鉛プラグの温度−降伏荷重関係は、下式(3.3.1-1)の提案式に基づくものとする。（図 3.3.1-8(b)参照)。本式は、鉛プラグが約 200℃まで温度上昇した実験ケースを含む鉛プラグ入り積層ゴム加振実験結果の分析により得られた実験式である。

$$\tau = \tau_o \left\{ 1-(T/T_L)^{\alpha_T} \right\},\ \alpha_T = 0.4 + 0.25\cdot(T/T_L) \qquad \text{…..（3.3.1-1）}$$
$$\tau_o = 15.0(N/mm^2),\ T_L = 327.5(℃)$$

ここに、τ ：鉛降伏応力、τ_0：鉛降伏応力設計値

T：鉛プラグ平均温度、T_L：鉛融点

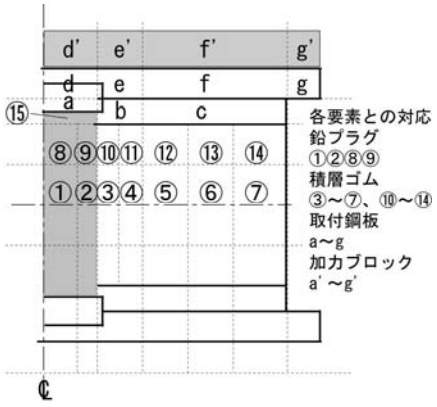


図3.3.1-8(a)　鉛プラグ入り積層ゴムの熱伝導差分法モデルの例

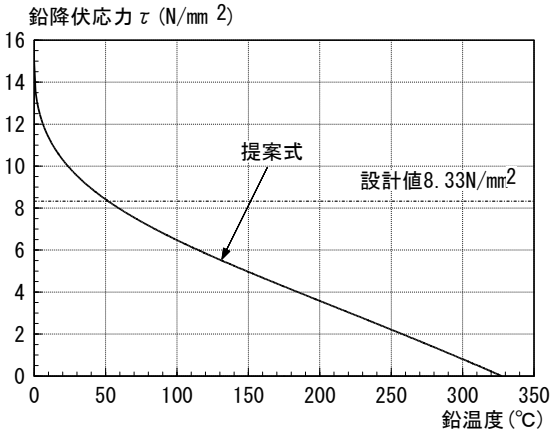


図3.3.1-8(b)　鉛プラグ温度−降伏応力関係

解析において鉛プラグ入り積層ゴムは修正バイリニアモデルによる履歴を考慮し、免震層の履歴減衰のみ考慮した。また、温度上昇を考慮する場合の初期温度は 15℃とした。

(2)　地震応答解析結果

表 3.3.1-4 に各入力地震動における解析結果を、図 3.3.1-9 に各入力地震動における積層ゴム応答せん断ひずみ－免震層せん断力係数図を示す。

図 3.3.1-10 に各入力地震動における鉛プラグの降伏応力の時刻歴を、図 3.3.1-11 に鉛部の平均温度時刻歴を、図 3.3.1-12 に累積変位量時刻歴を、図 3.3.1-13 に免震層における履歴吸収エネルギー量の速度換算値の時刻歴を示す。なお、OSKH02 の入力倍率 1.5 倍、温度上昇を考慮した場合には応答変位及び鉛平均温度が解析の適用範囲を越えたため結果からは除外した。

解析結果より、繰返しによる鉛プラグの温度上昇を考慮した場合の免震層水平変位の増幅率は 1.01～1.83 であり、概ね 1.2 倍程度の増幅率となっている。

入力地震動のうち AIC003 の場合には免震層応答最大水平変位は温度上昇非考慮時に比較して、温度上昇考慮時にはその増大がみられ、入力地震動の倍率が 1.0 倍の場合に変位増大率が 1.05 倍、地震動倍率が 1.5 倍の場合に変位増大率が 1.83 倍となっている。

SZO024 の場合には温度上昇非考慮時と比較した温度上昇考慮時の水平変位応答増大率は 1.2 倍程度であるものの、水平変形の値は温度上昇考慮時に入力 1.5 倍の場合に 48.1cm とγ=250% 程度の値となっている。

表 3.3.1-4(a)　応答解析結果（応答水平変位、応答加速度）

入力地震動		免震層水平変位 (cm)			応答最大加速度 (cm/s2)		
	入力倍率	温度上昇非考慮	温度上昇考慮	考慮／非考慮	温度上昇非考慮	温度上昇考慮	考慮／非考慮
OSKH02_AV	1.00	17.9	19.0	1.06	72	72	0.99
	1.25	30.9	34.6	1.12	95	95	1.01
	1.50	43.0	－	－	115	－	－
AIC003_AV	1.00	13.8	14.4	1.05	65	64	0.98
	1.25	18.0	20.7	1.15	72	67	0.93
	1.50	20.4	37.4	1.83	76	93	1.22
SZO024_AV	1.00	23.3	24.2	1.04	81	76	0.93
	1.25	29.7	36.5	1.23	93	90	0.97
	1.50	37.8	48.1	1.27	107	106	1.00
KGIN_AV	1.00	2.0	2.1	1.04	36	44	1.24
	1.25	2.1	2.3	1.12	36	45	1.24
	1.50	2.5	2.5	1.01	38	46	1.21

表 3.3.1-4(b)　応答解析結果（応答せん断ひずみ、応答せん断力係数）

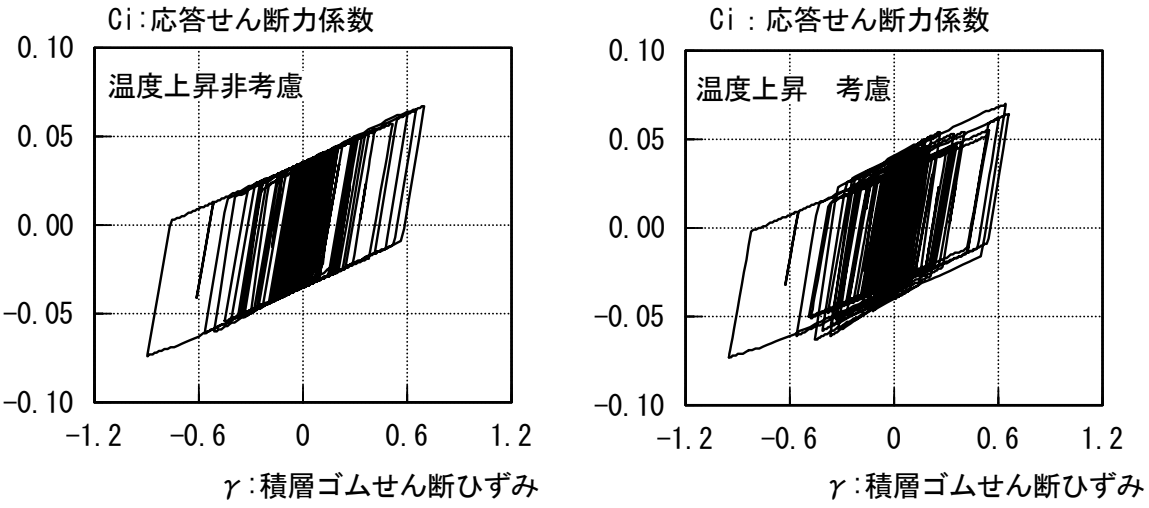
入力地震動		免震層せん断ひずみ (%)			免震層応答最大せん断力係数		
	入力倍率	温度上昇非考慮	温度上昇考慮	考慮／非考慮	温度上昇非考慮	温度上昇考慮	考慮／非考慮
OSKH02_AV	1.00	90	95	1.06	0.074	0.073	0.99
	1.25	154	173	1.12	0.096	0.097	1.01
	1.50	215	－	－	0.117	－	－
AIC003_AV	1.00	69	72	1.05	0.067	0.066	0.98
	1.25	90	103	1.15	0.074	0.069	0.93
	1.50	102	187	1.83	0.078	0.077	0.99
SZO024_AV	1.00	117	121	1.04	0.083	0.077	0.93
	1.25	149	182	1.23	0.095	0.092	0.97
	1.50	189	240	1.27	0.109	0.108	0.99
KGIN_AV	1.00	10	10	1.04	0.037	0.045	1.24
	1.25	10	12	1.12	0.037	0.046	1.24
	1.50	13	13	1.01	0.039	0.047	1.21

表 3.3.1-4(c)　応答解析結果（累積変位量、吸収エネルギー、鉛平均温度）

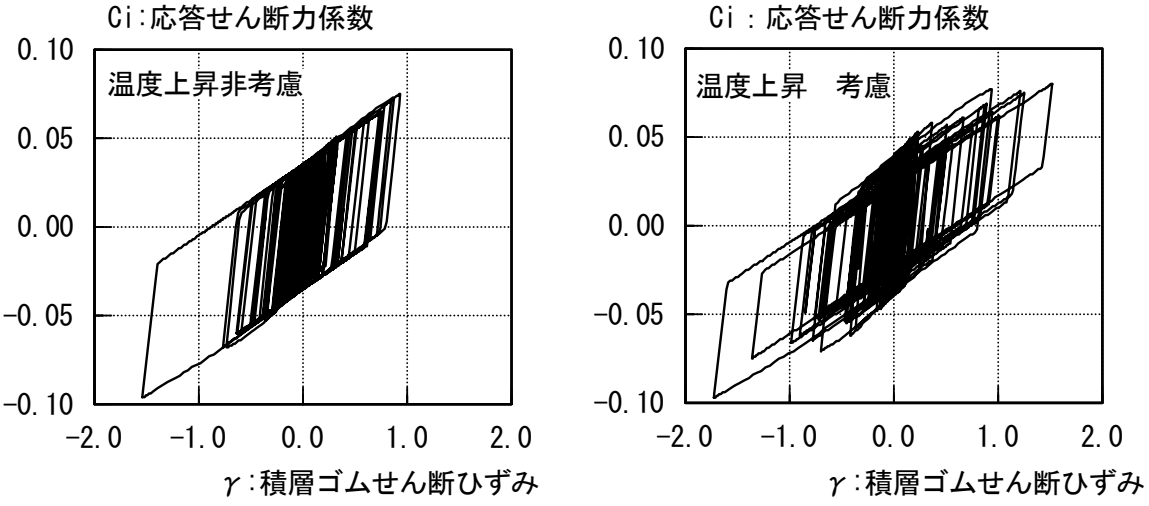
入力地震動		免震層累積変位量 *1 (m)			免震層吸収エネルギ 速度換算値 (cm/s)			最大鉛 平均温度 (℃)
	入力倍率	温度上昇 非考慮	温度上昇 考慮	考慮 ／非考慮	温度上昇 非考慮	温度上昇 考慮	考慮 ／非考慮	温度上昇 考慮
OSKH02_AV	1.00	10.9	11.3	1.04	186.7	193.4	1.04	86.5
	1.25	12.7	16.6	1.30	237.0	262.9	1.11	146.5
	1.50	17.1	-	-	295.1	-	-	-
AIC003_AV	1.00	9.2	9.7	1.05	186.2	188.6	1.01	90.7
	1.25	11.8	13.1	1.11	222.6	227.0	1.02	119.6
	1.50	14.7	16.7	1.13	259.9	260.5	1.00	150.2
SZO024_AV	1.00	11.3	12.4	1.09	232.3	231.6	1.00	128.8
	1.25	14.8	16.0	1.08	275.1	260.8	0.95	155.0
	1.50	18.2	19.6	1.08	311.5	284.7	0.91	177.8
KGIN_AV	1.00	10.8	13.6	1.26	41.0	44.0	1.07	18.1
	1.25	9.0	11.6	1.29	51.2	52.0	1.02	19.5
	1.50	8.4	10.5	1.25	63.6	62.2	0.98	21.5

初期温度 15℃

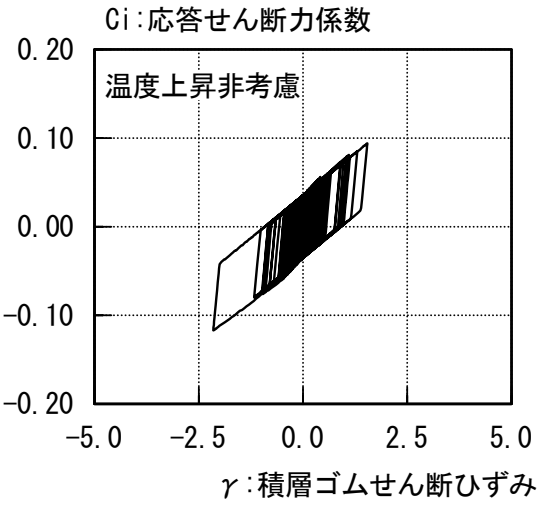
*1　免震層累積変位量については総入力エネルギーに対して、入力エネルギーが 95%となる時刻における値とした。



(i) 1.0 倍入力時

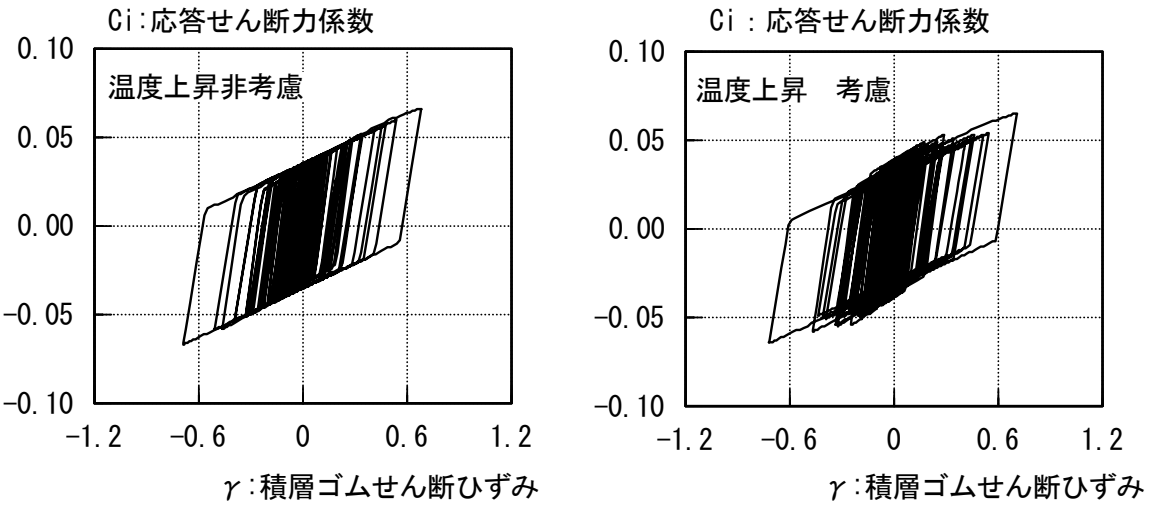


(ii) 1.25 倍入力時

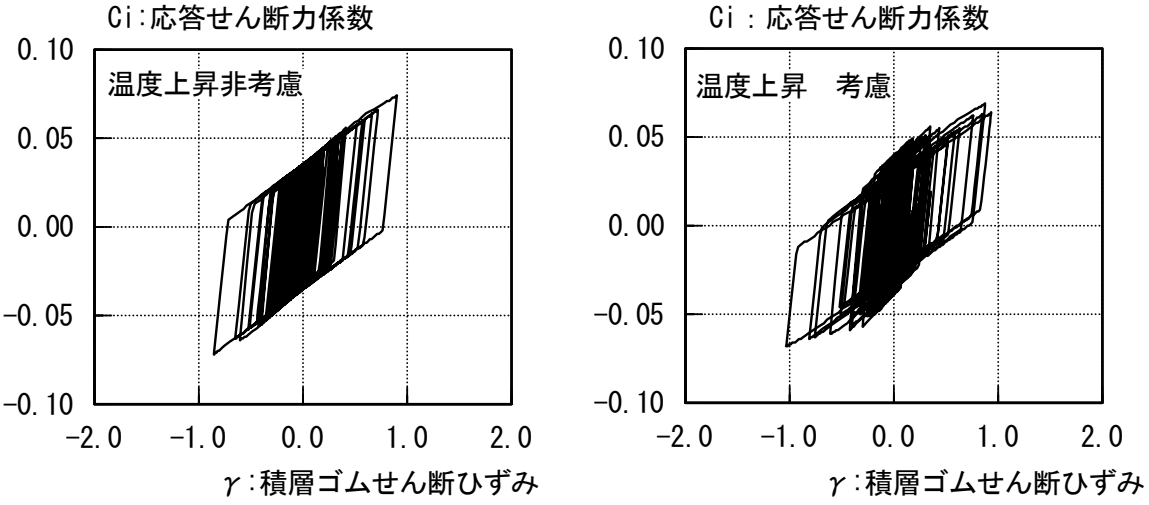


(iii) 1.5 倍入力時

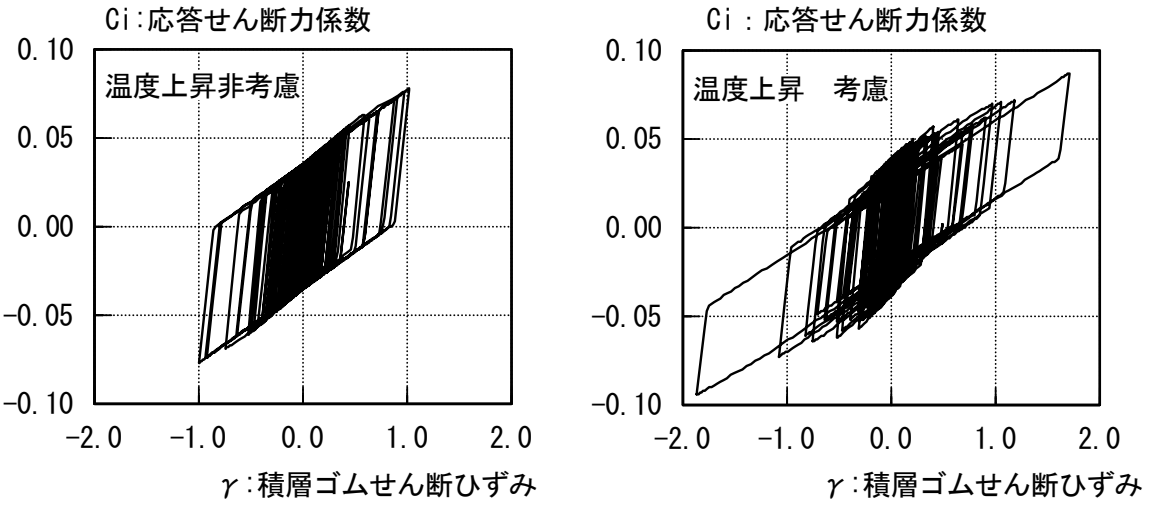
図 3.3.1-9(a)　積層ゴムせん断ひずみ－免震層せん断力係数図（OSKH02_AV）



(i) 1.0 倍入力時

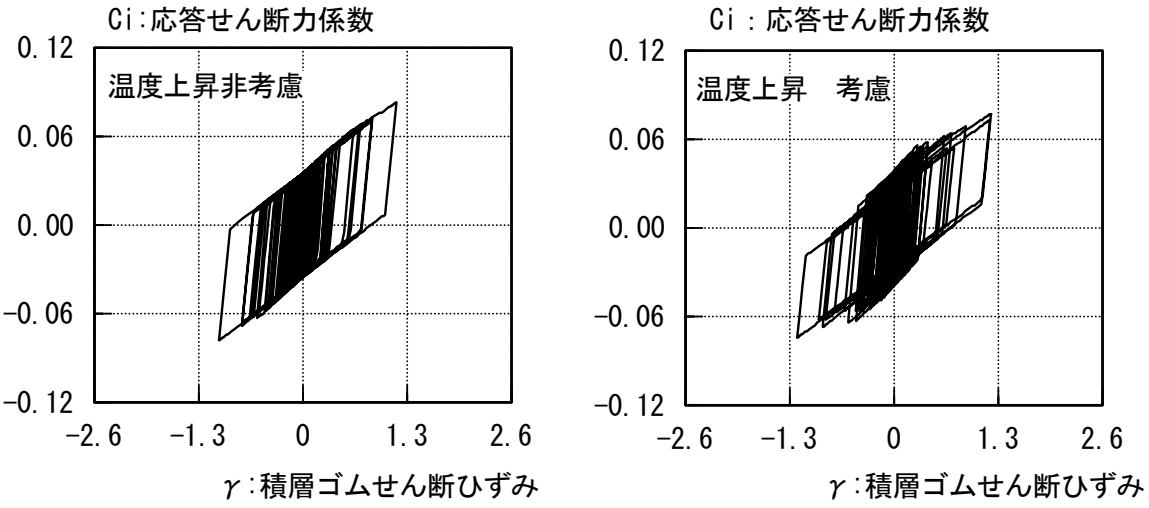


(ii) 1.25 倍入力時

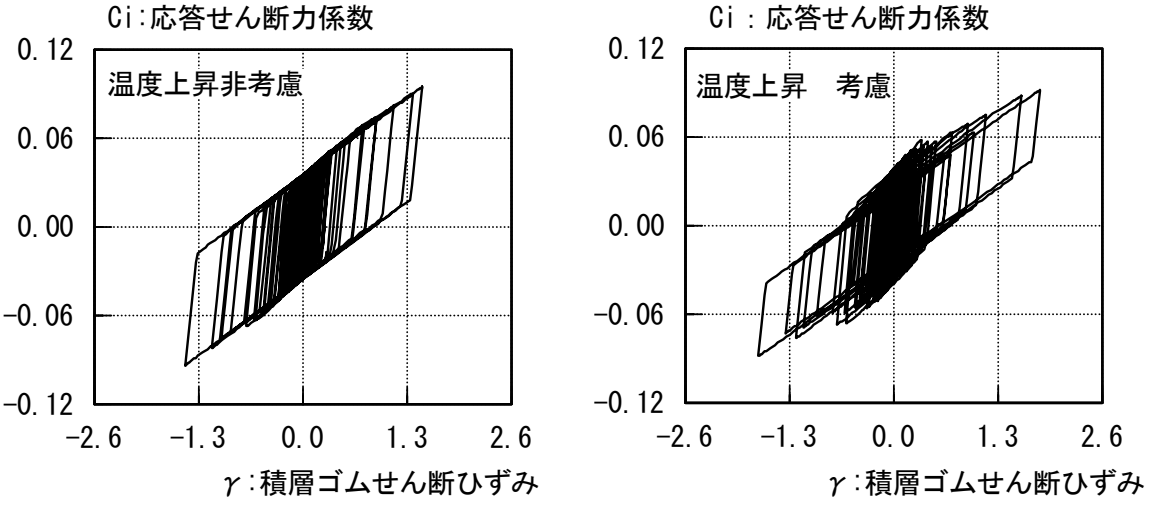


(iii) 1.5 倍入力時

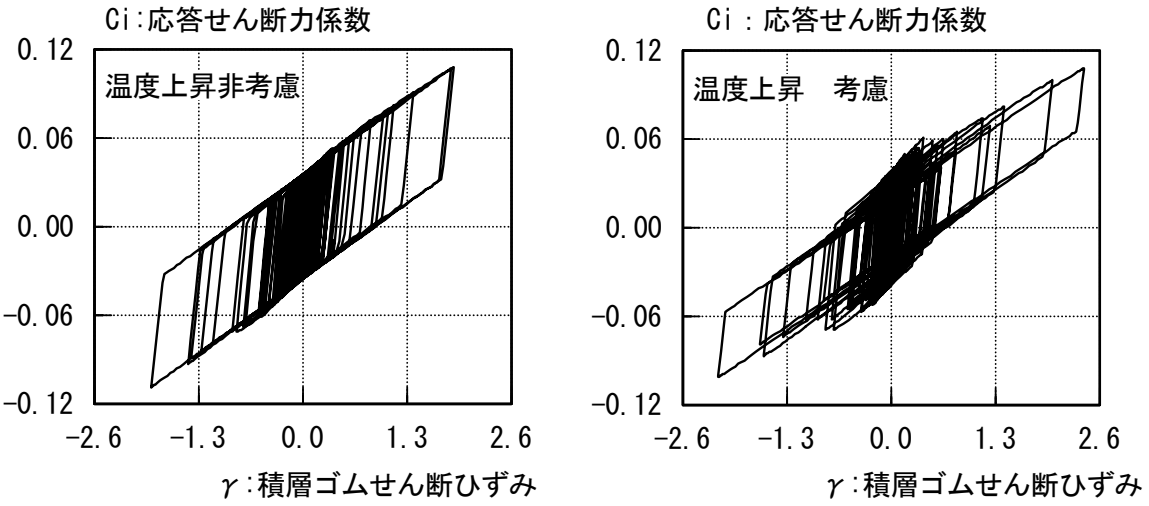
図 3.3.1-9(b)　積層ゴムせん断ひずみ－免震層せん断力係数図（AIC003_AV）



(i) 1.0 倍入力時

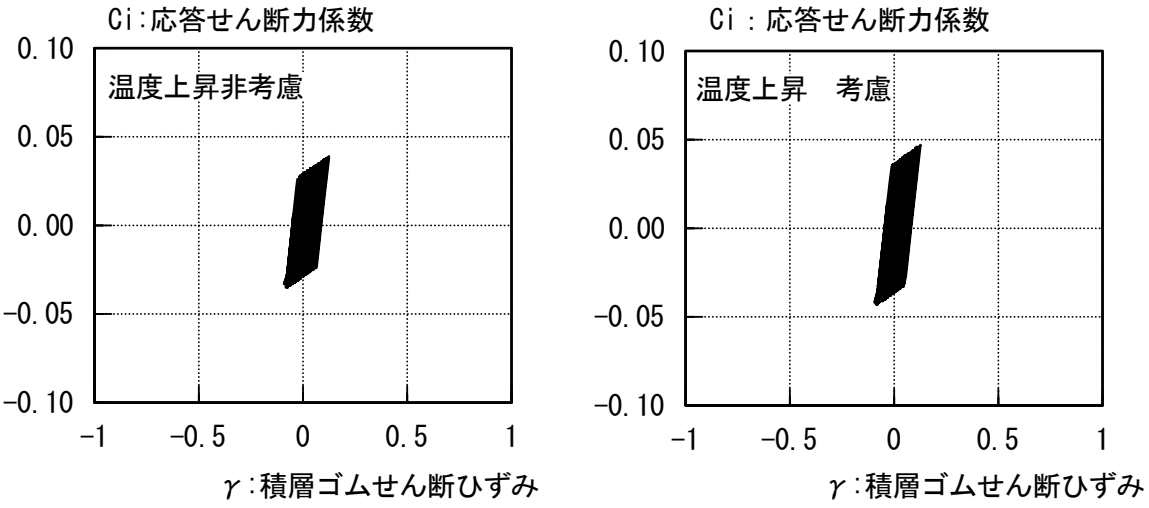


(ii) 1.25 倍入力時

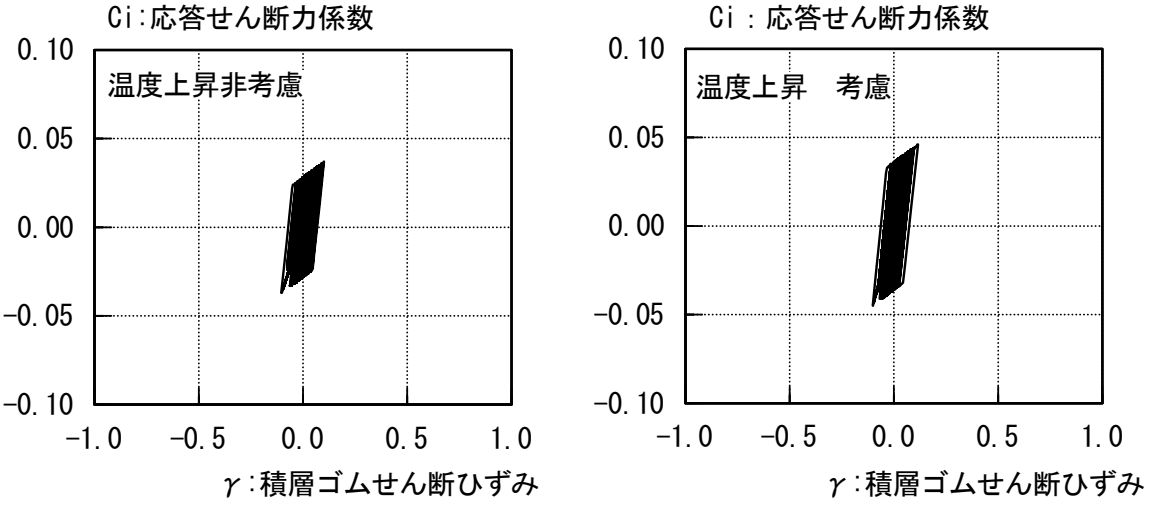


(iii) 1.5 倍入力時

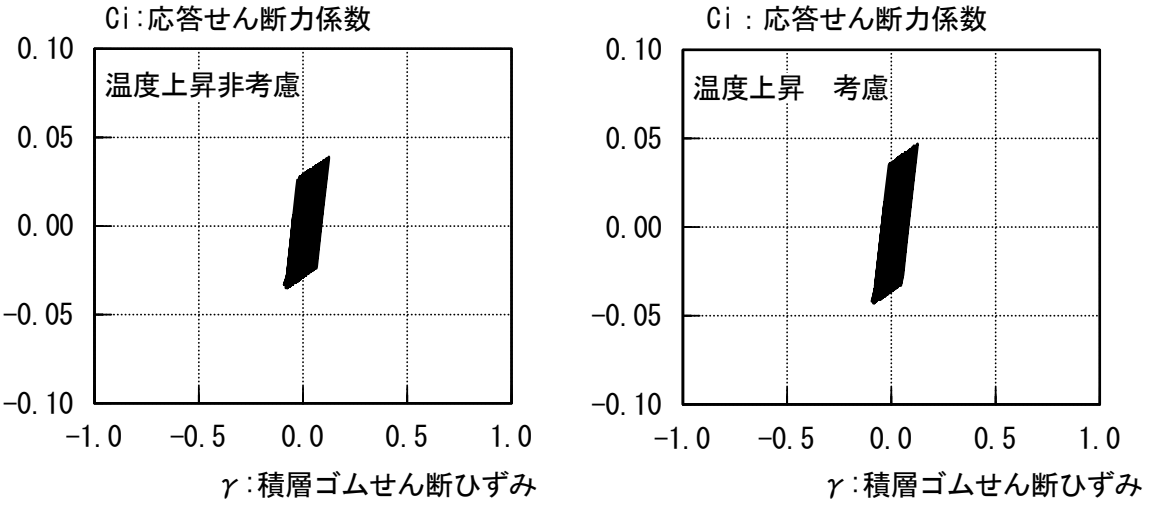
図 3.3.1-9(c)　積層ゴムせん断ひずみ－免震層せん断力係数図（SZO024_AV）



(i) 1.0 倍入力時



(ii) 1.25 倍入力時



(iii) 1.5 倍入力時

図 3.3.1-9(d)　積層ゴムせん断ひずみ－免震層せん断力係数図（KGIN_AV）

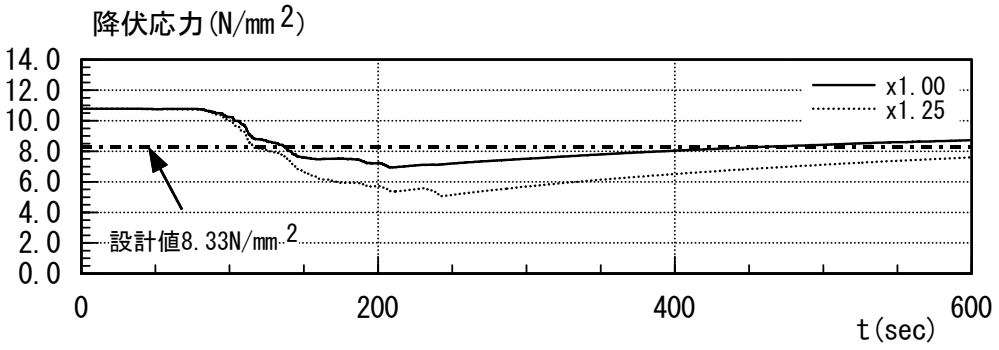


図 3.3.1-10(a)　降伏応力時刻歴（OSKH02_AV）

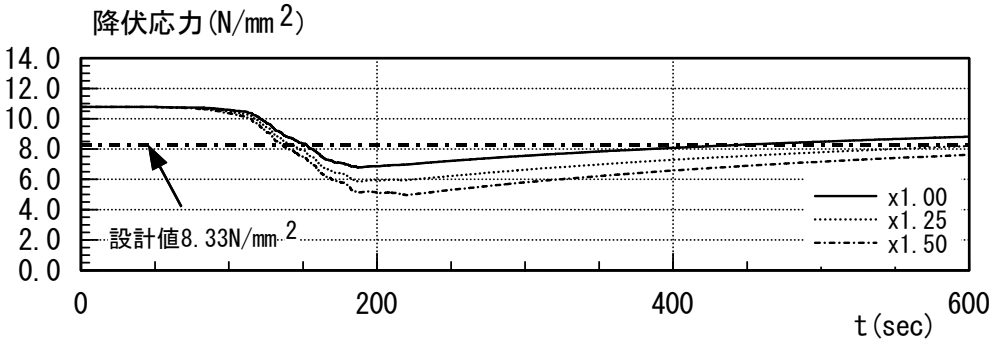


図 3.3.1-10(b)　降伏応力時刻歴（AIC003_AV）

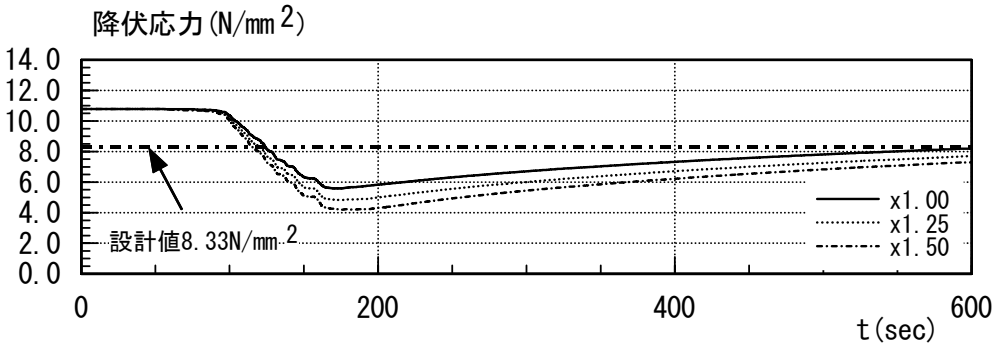


図 3.3.1-10(c)　降伏応力時刻歴（SZO024_AV）

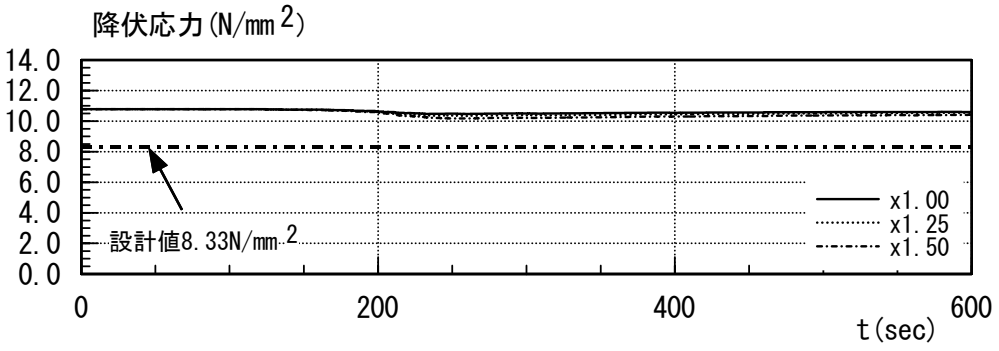
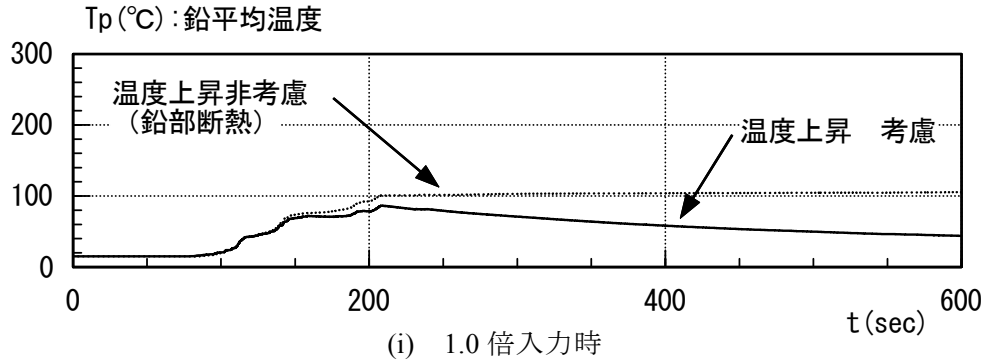
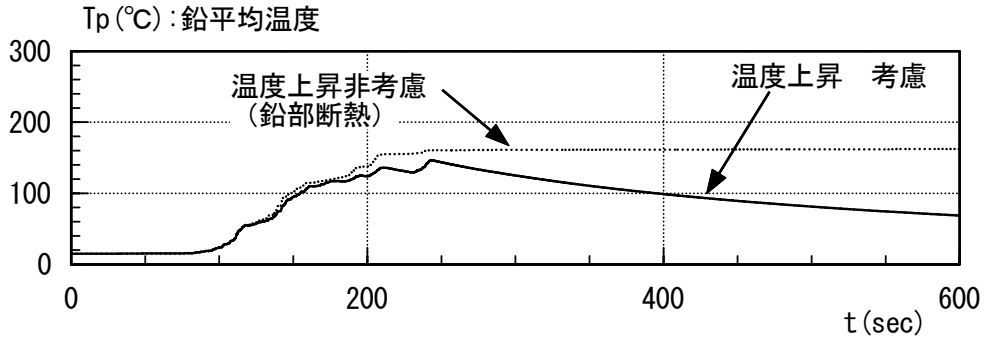


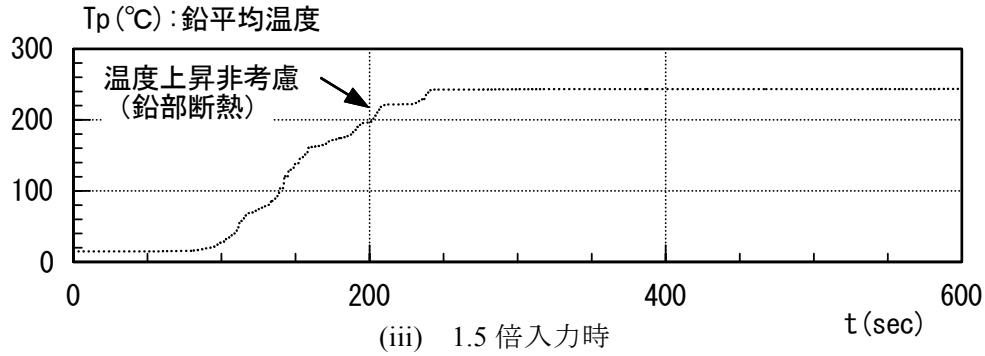
図 3.3.1-10(d)　降伏応力時刻歴（KGIN_AV）



(i)　1.0 倍入力時

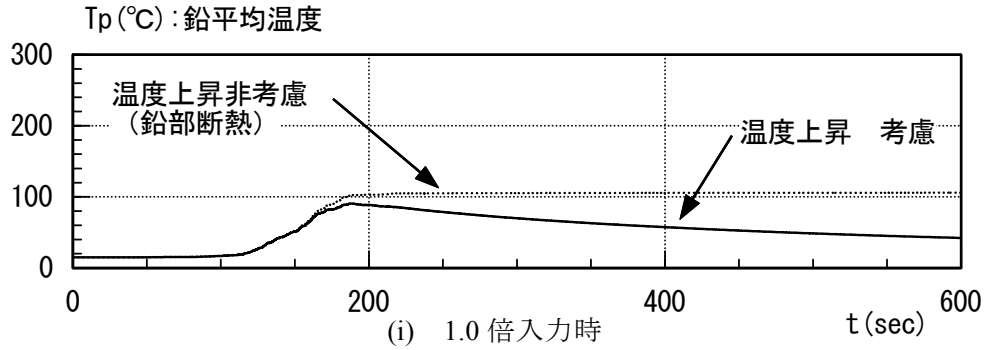


(ii)　1.25 倍入力時

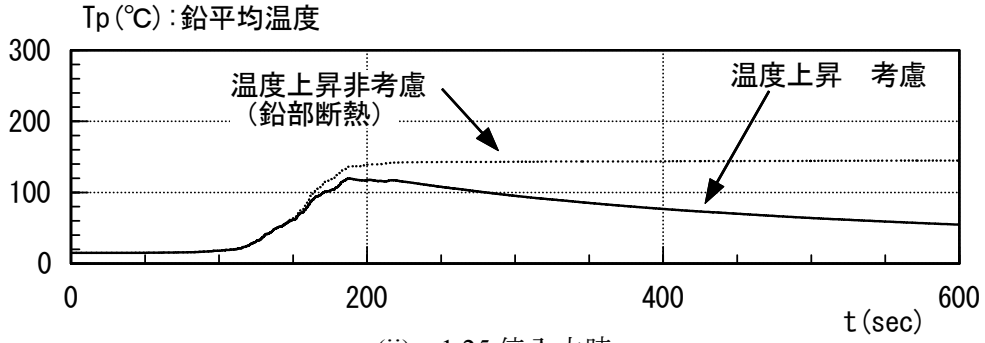


(iii)　1.5 倍入力時

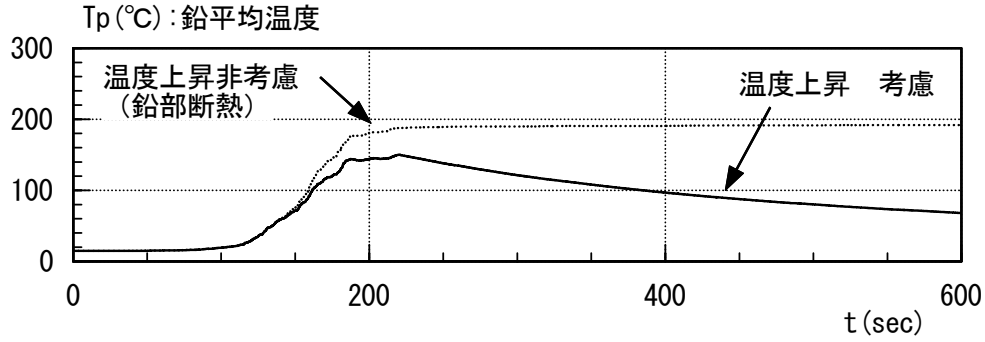
図 3.3.1-11(a)　鉛部平均温度時刻歴（OSKH02_AV）



(i)　1.0 倍入力時

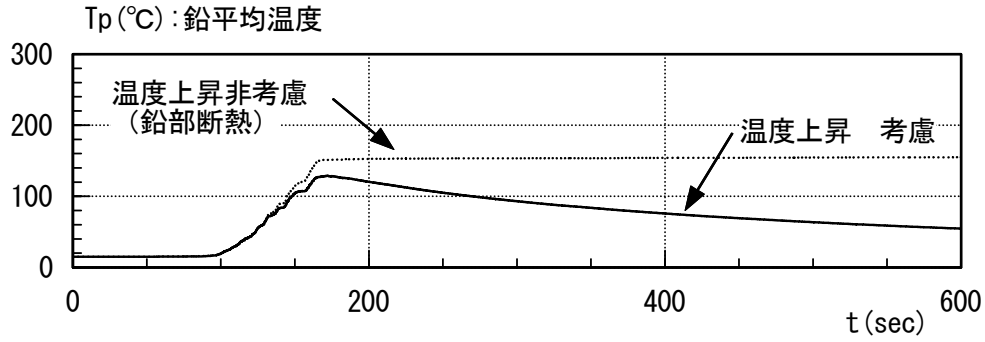


(ii)　1.25 倍入力時

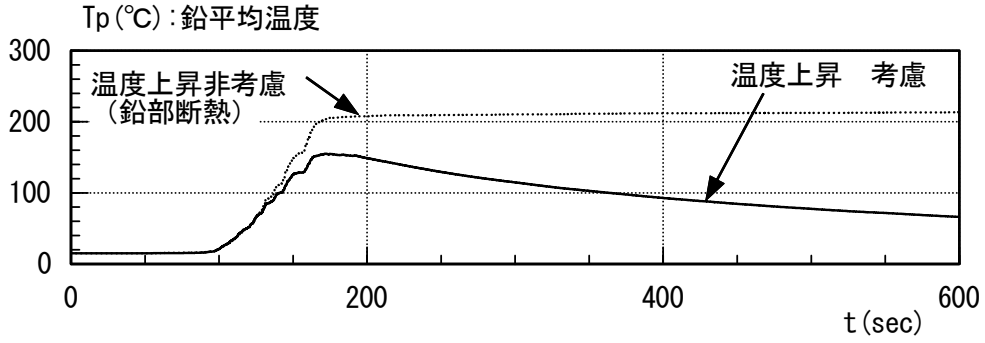


(iii)　1.5 倍入力時

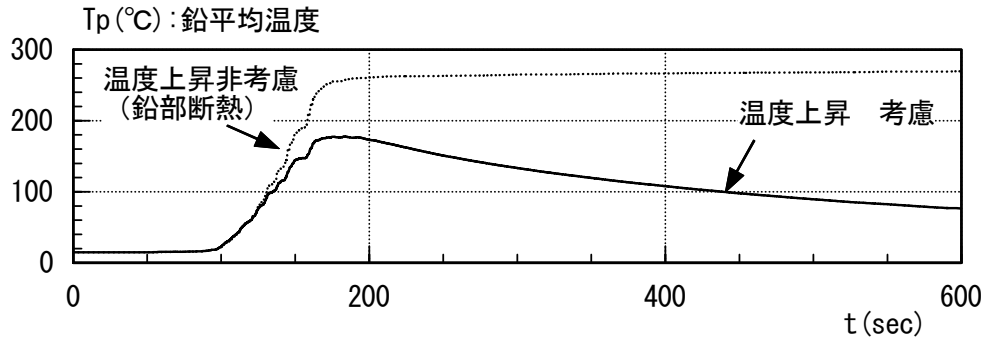
図 3.3.1-11(b)　鉛部平均温度時刻歴（AIC003_AV）



(i)　1.0 倍入力時

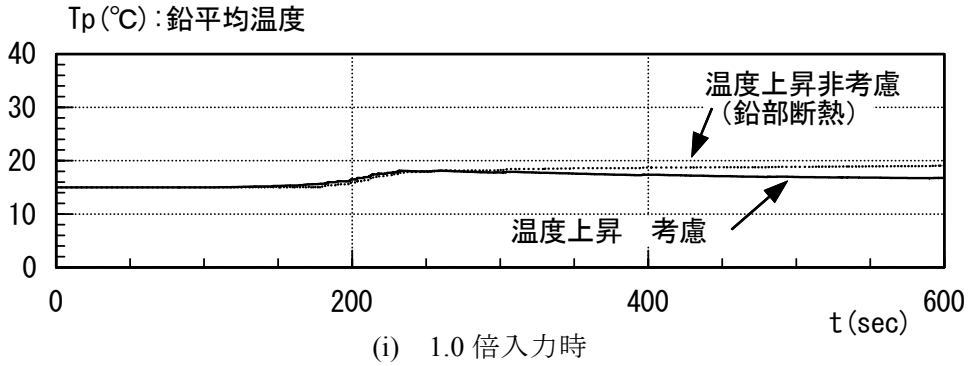


(ii)　1.25 倍入力時

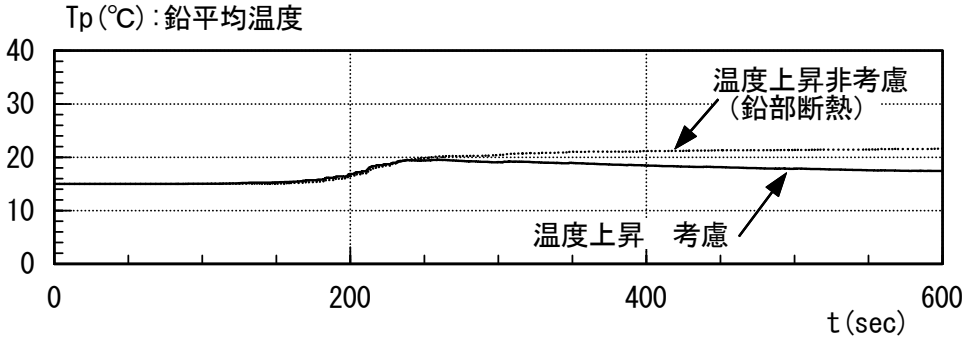


(iii)　1.5 倍入力時

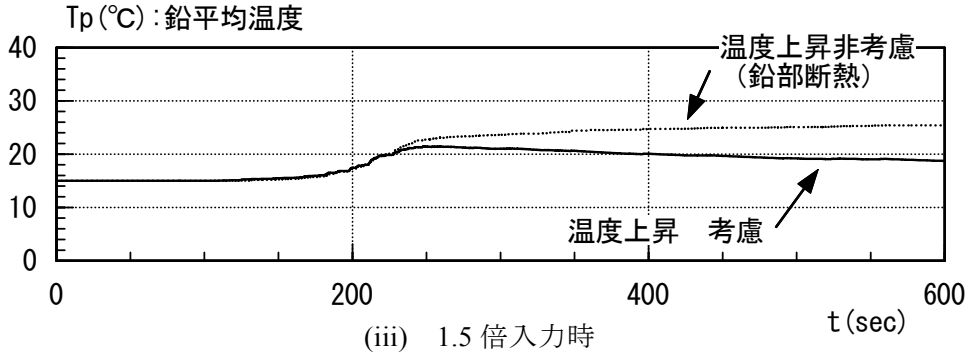
図 3.3.1-11(c)　鉛部平均温度時刻歴（SZO024_AV）



(i)　1.0 倍入力時

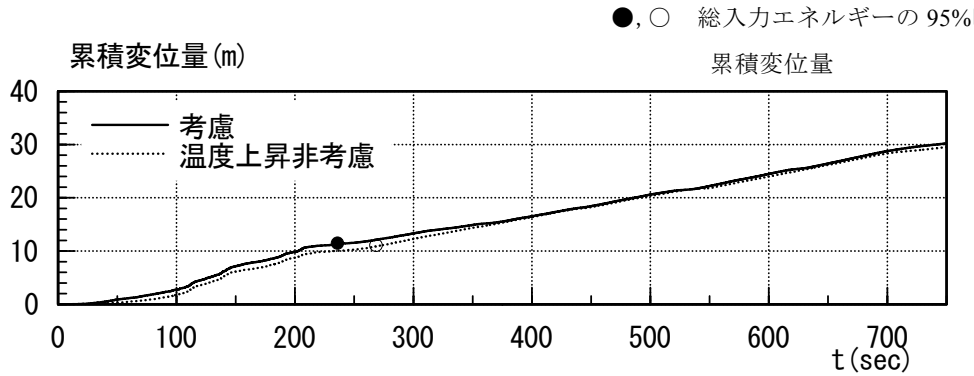


(ii)　1.25 倍入力時

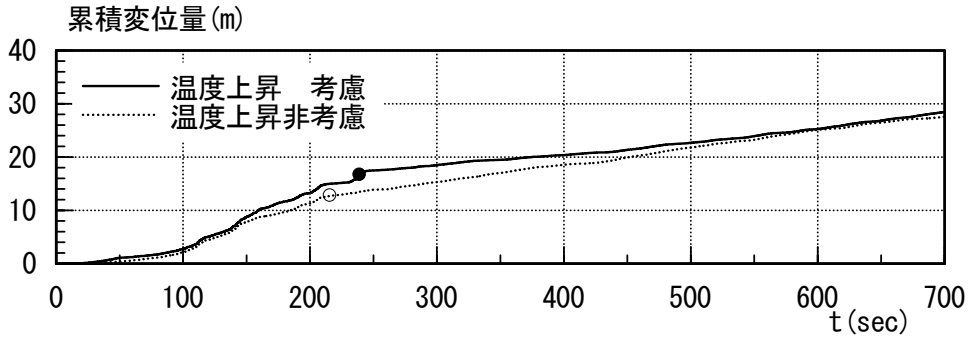


(iii)　1.5 倍入力時

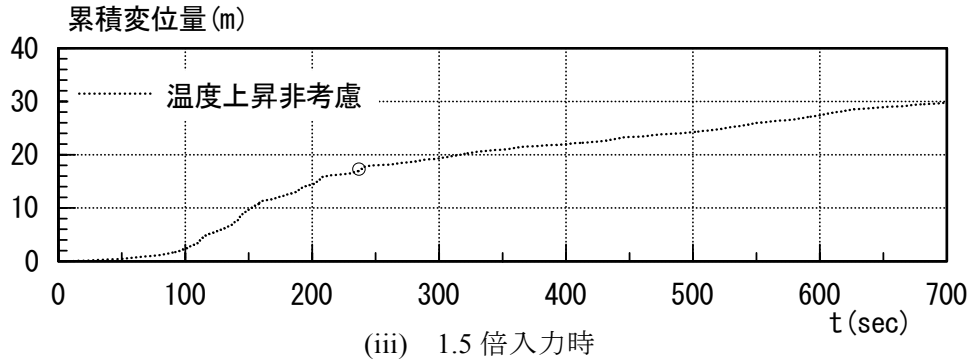
図 3.3.1-11(d)　鉛部平均温度時刻歴（KGIN_AV）



(i)　1.0 倍入力時



(ii)　1.25 倍入力時

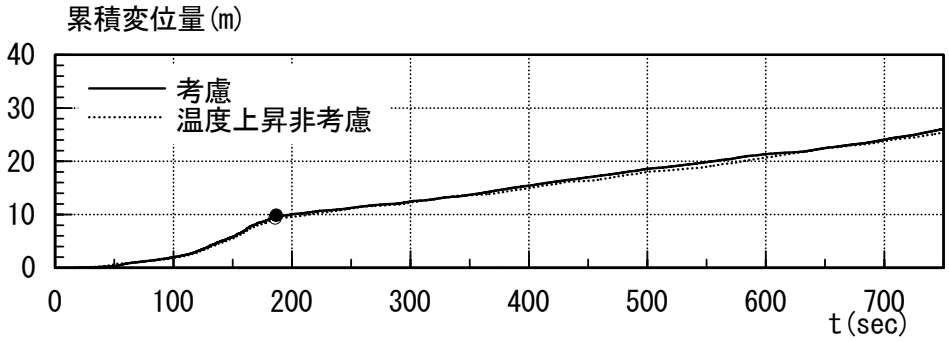


(iii)　1.5 倍入力時

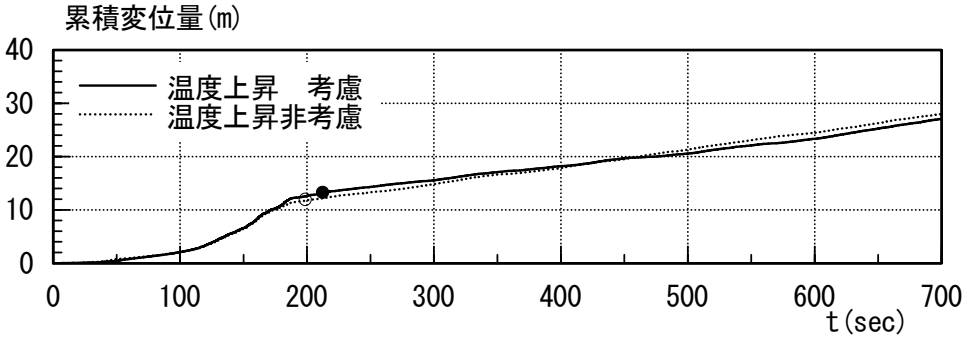
図 3.3.1-12(a)　免震層累積変位量時刻歴（OSKH02_AV）

●, ○　総入力エネルギーの 95%時

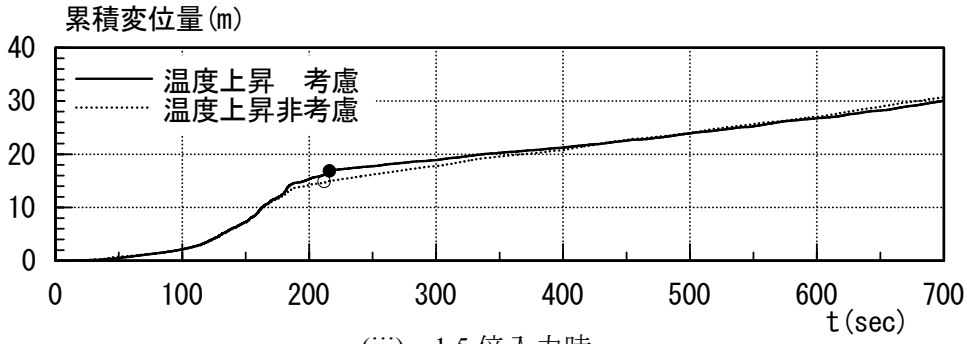
累積変位量



(i)　1.0 倍入力時

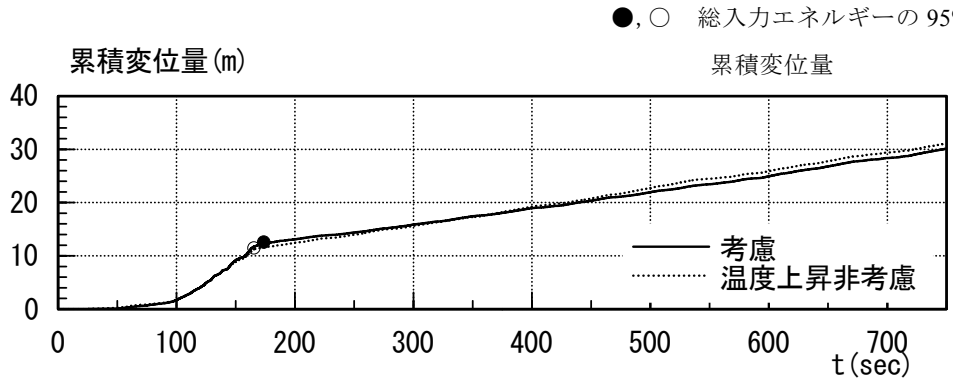


(ii)　1.25 倍入力時

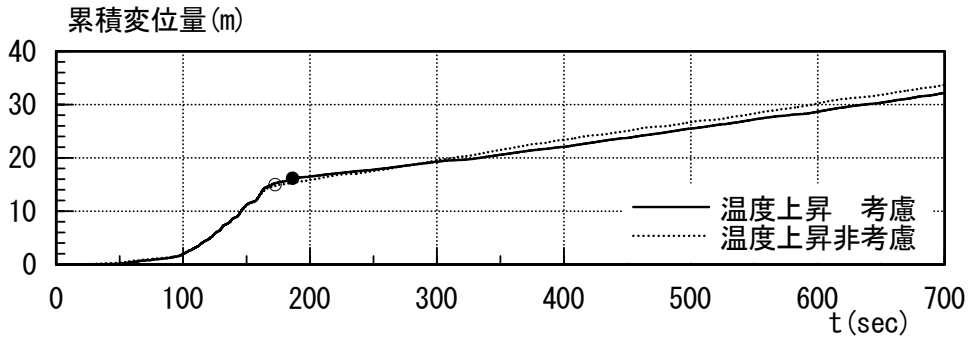


(iii)　1.5 倍入力時

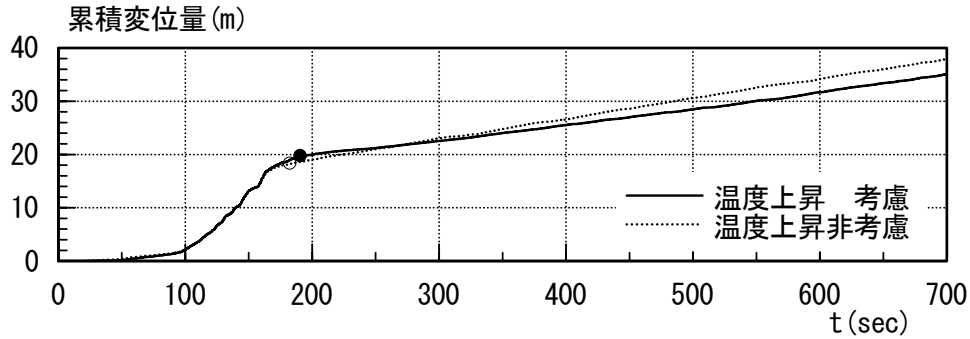
図 3.3.1-12(b)　免震層累積変位量時刻歴（AIC003_AV）



(i)　1.0 倍入力時



(ii)　1.25 倍入力時

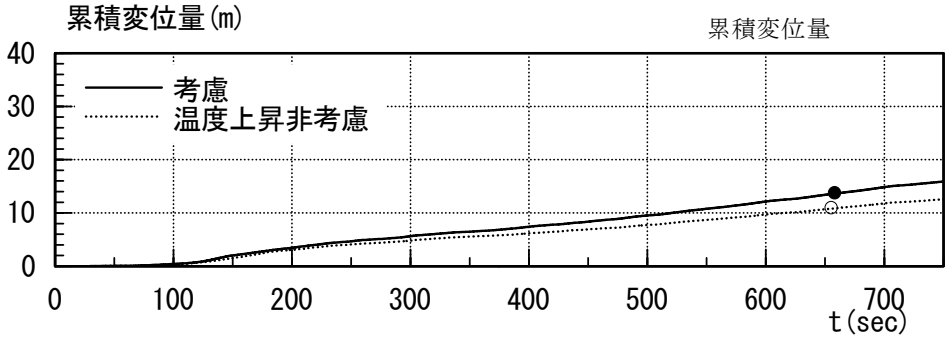


(iii)　1.5 倍入力時

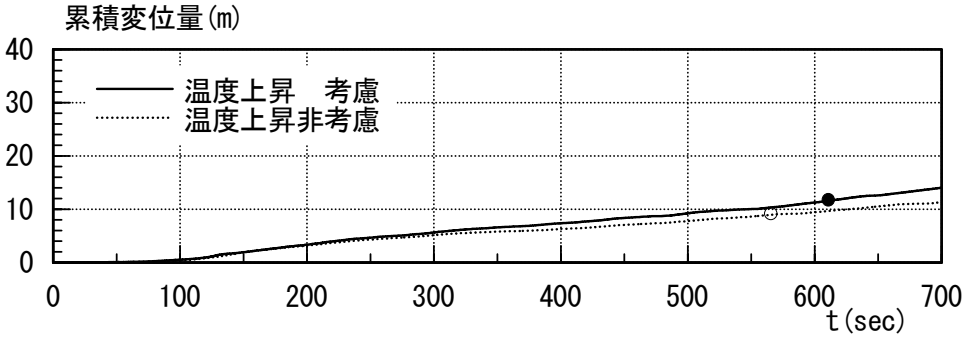
図 3.3.1-12(c)　免震層累積変位量時刻歴（SZO024_AV）

●, ○　総入力エネルギーの 95%時

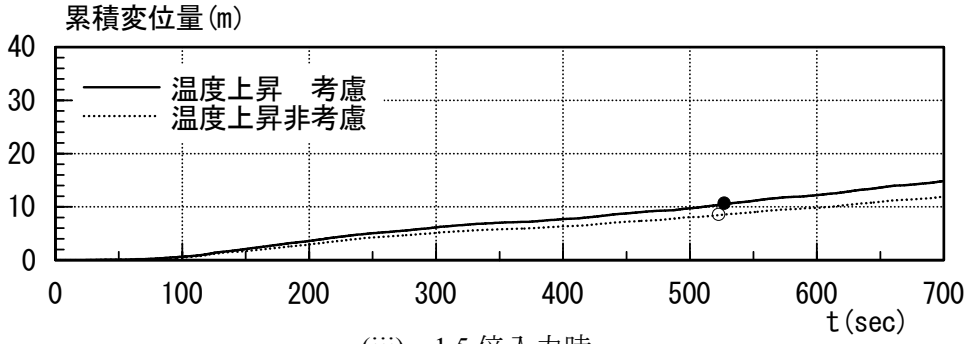
累積変位量



(i)　1.0 倍入力時

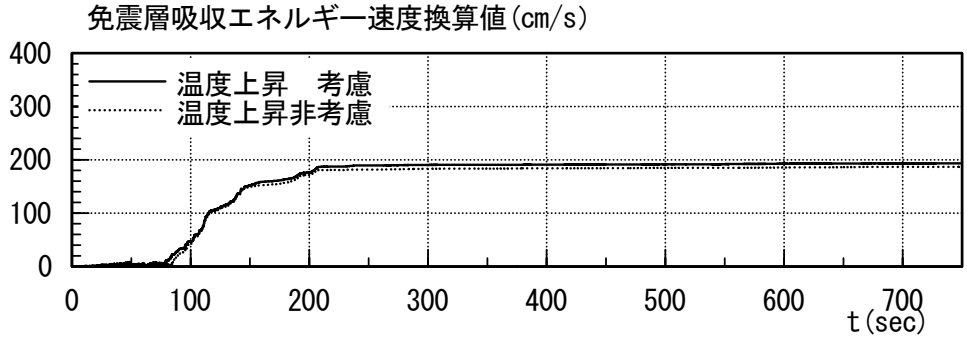


(ii)　1.25 倍入力時

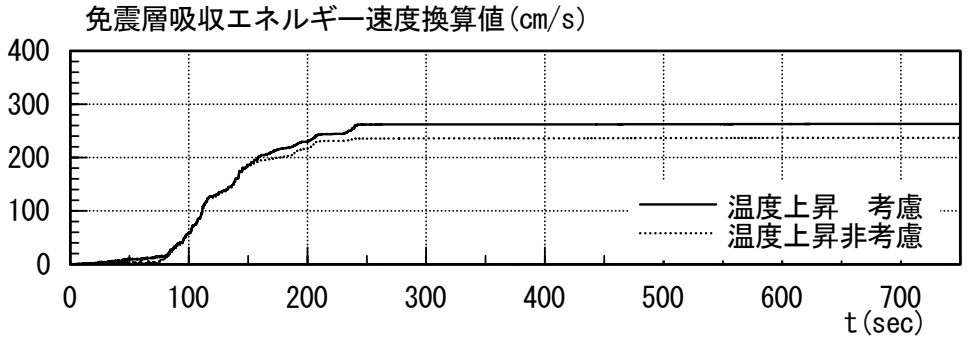


(iii)　1.5 倍入力時

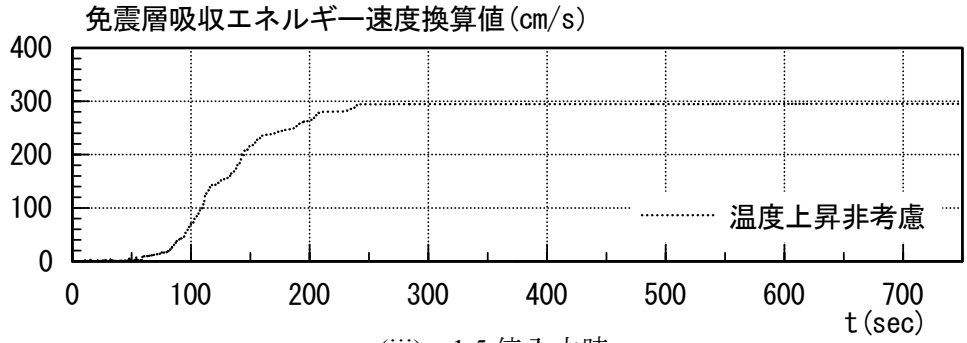
図 3.3.1-12(d)　免震層累積変位量時刻歴（KGIN_AV）



(i)　1.0 倍入力時

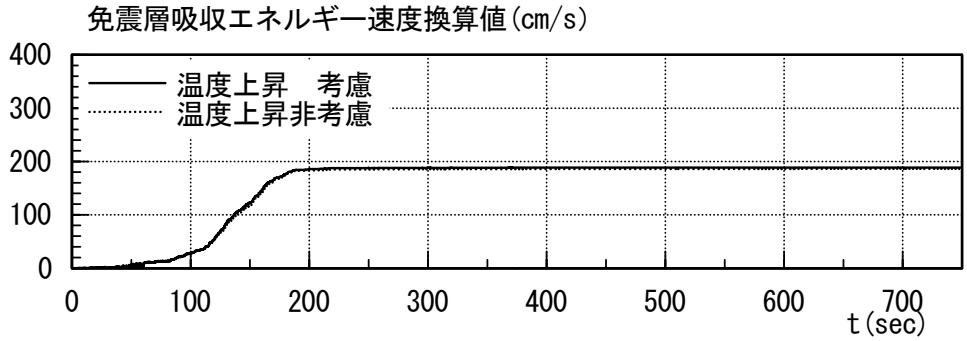


(ii)　1.25 倍入力時

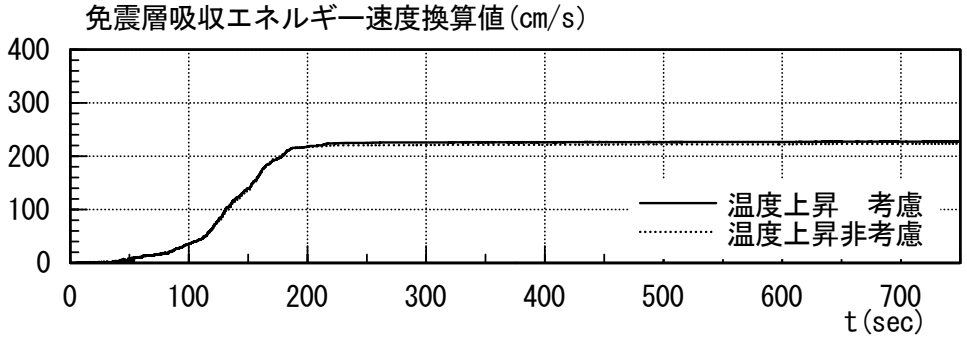


(iii)　1.5 倍入力時

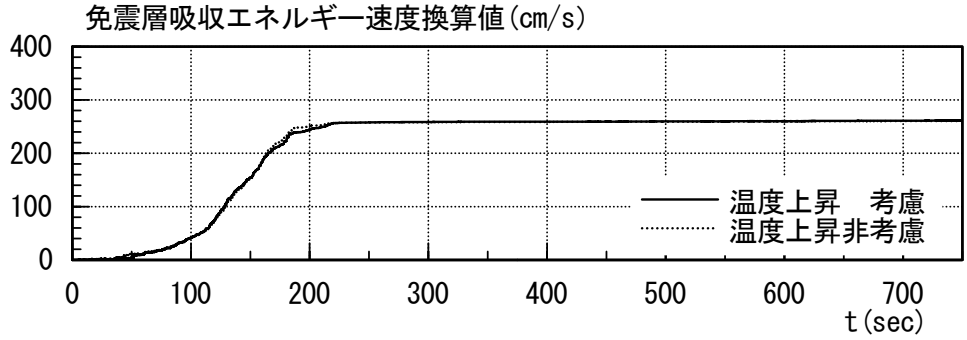
図 3.3.1-13(a)　免震層履歴吸収エネルギー速度換算値時刻歴（OSKH02_AV）



(i)　1.0 倍入力時

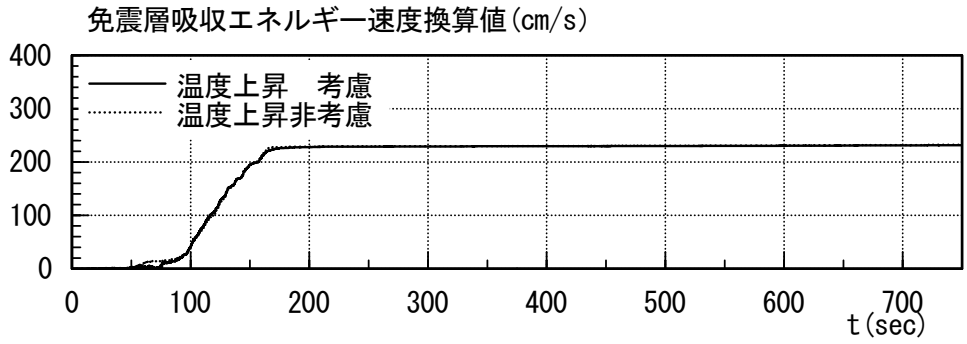


(ii)　1.25 倍入力時

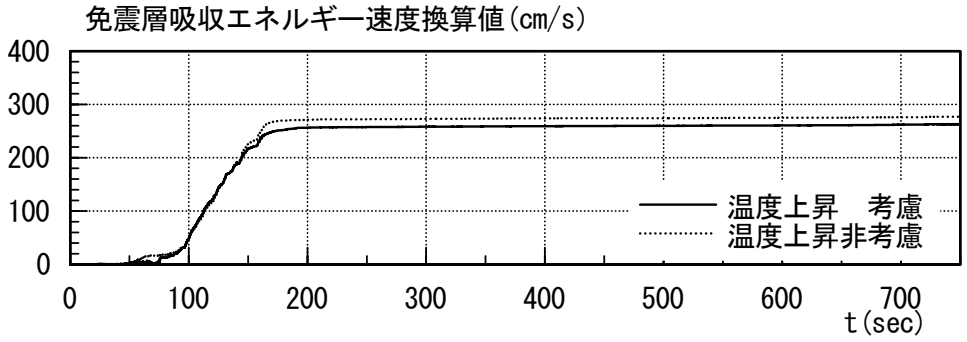


(iii)　1.5 倍入力時

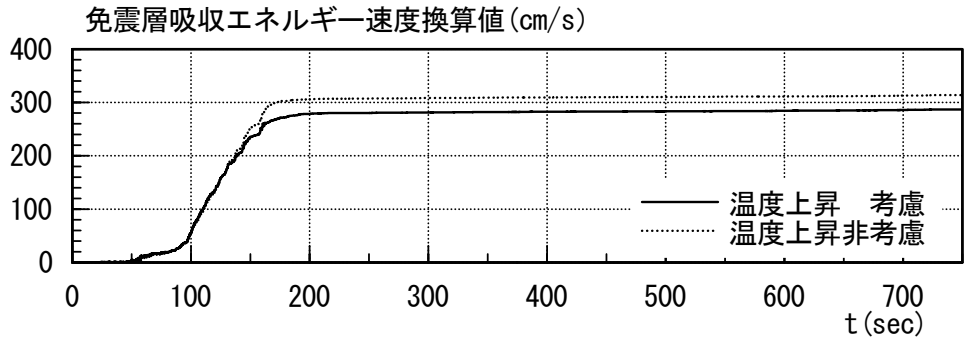
図 3.3.1-13(b)　免震層履歴吸収エネルギー速度換算値時刻歴（AIC003_AV）



(i)　1.0 倍入力時

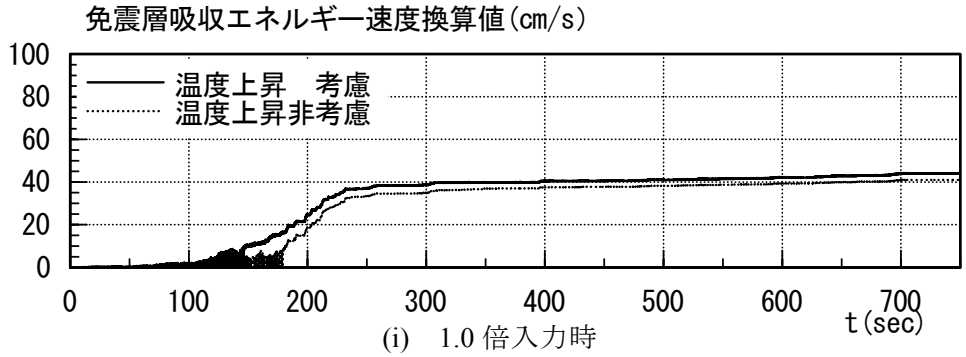


(ii)　1.25 倍入力時

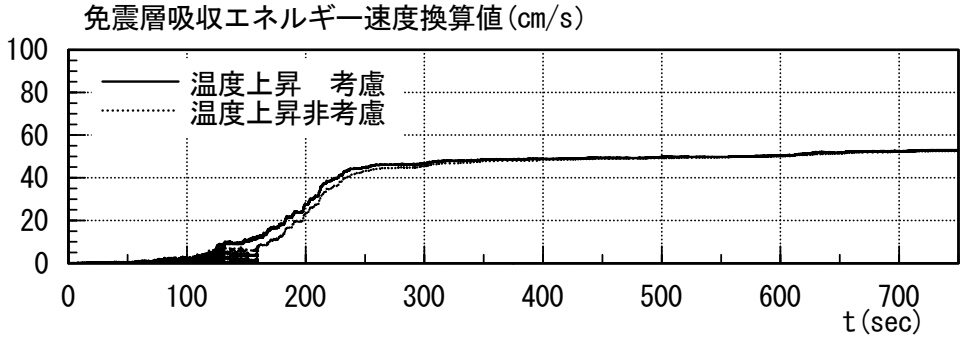


(iii)　1.5 倍入力時

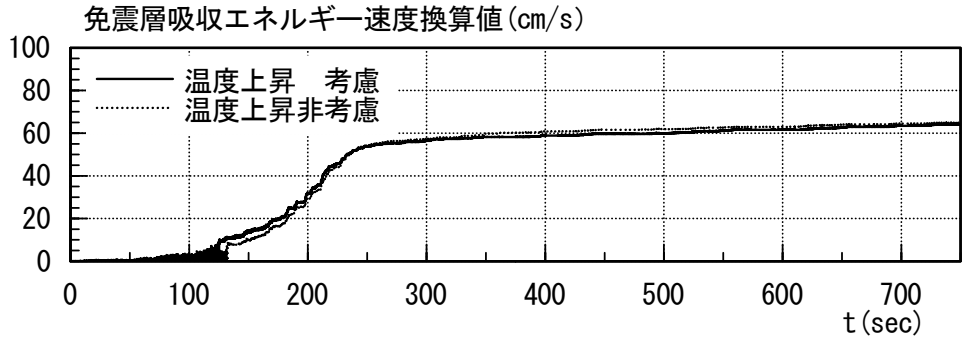
図 3.3.1-13(c)　免震層履歴吸収エネルギー速度換算値時刻歴（SZO024_AV）



(i)　1.0 倍入力時



(ii)　1.25 倍入力時

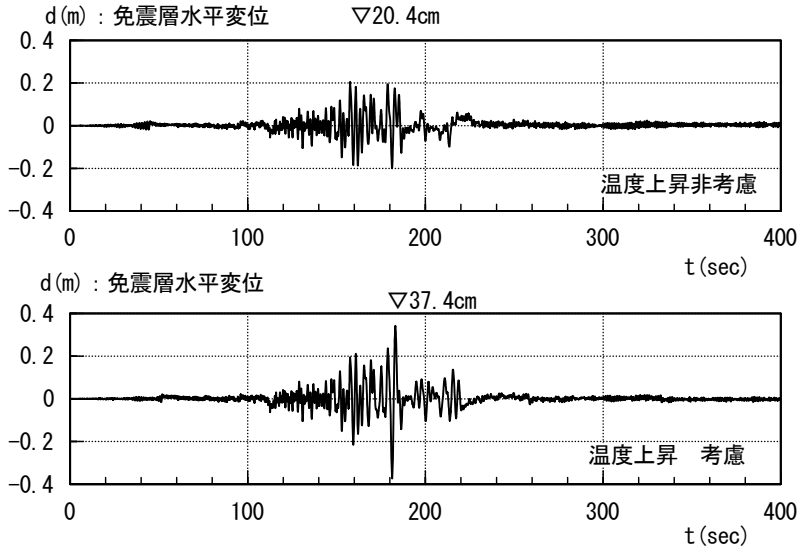


(iii)　1.5 倍入力時

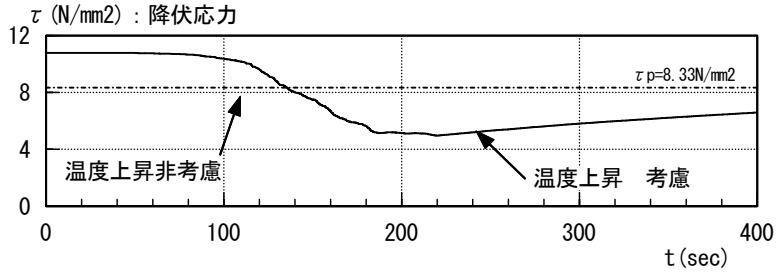
図 3.3.1-13(d)　免震層履歴吸収エネルギー速度換算値時刻歴（KGIN_AV）

図 3.3.1-14 に鉛プラグの温度上昇非考慮時と温度上昇考慮時の水平変位応答増大率が 1.83 と大きかった AIC003x1.5 入力時の結果を示す。

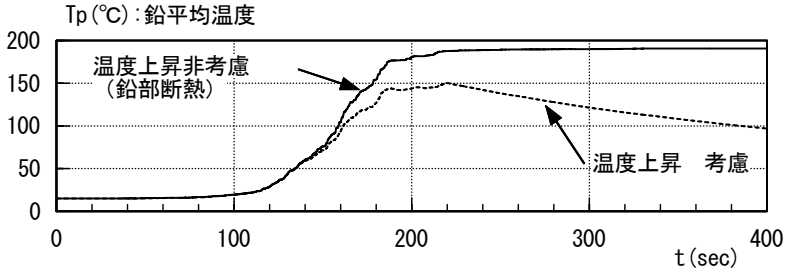
鉛プラグの温度上昇考慮時に最大応答変位が生じている時刻においては、鉛プラグの降伏応力が設計時の値と比較して、60%程度に低下しており、その時の鉛プラグ平均温度も 150℃程度となっている。このため、鉛プラグの耐力が低下した時点での地震入力により温度上昇考慮時の変位が温度上昇非考慮時と比較して大きくなったものと推察される。



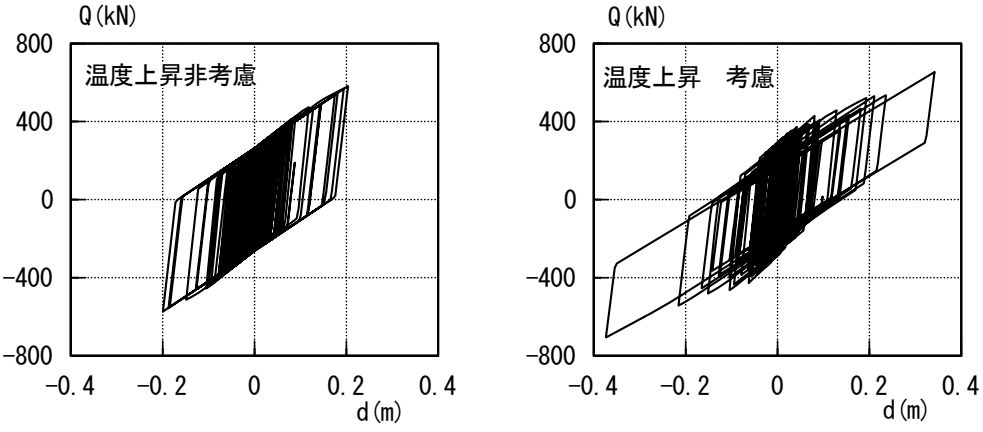
(a) 免震層水平変位



(b) 鉛降伏応力時刻歴



(c) 鉛平均温度



(d) 荷重変形関係

図 3.3.1-14　AIC003x1.5 での解析結果

(4) まとめ

鉛プラグ入り積層ゴムの繰り返し特性を考慮した解析手法として熱伝導解析と温度上昇による力学的特性変化を考慮した手法について、平成 22 年度に実施した正弦波繰返加力実験のシミュレーション解析を実施することによりその妥当性を確認した。

免震材料として鉛プラグ入り積層ゴムを適用した免震建築物では、繰り返しによる鉛プラグの温度上昇の影響を考慮しないケースと考慮したケースとを比較した場合に、地震動の入力倍率が 1.0 倍の場合に変位増大率は 1.04～1.06 倍である。AIC003_AV 地震動の入力倍率 1.5 倍の場合に変位増大率が 1.83 倍となるケースがあるものの、積層ゴムのせん断ひずみは最大でも γ =250%（水平変位 50cm）以内である。

今後の課題として、鉛プラグ入り積層ゴムについて免震材料及び免震建築物応答に及ぼす温度上昇の影響を時刻歴応答解析によらずに簡易的に評価できる手法についての検討が望まれている。

参考文献

3.3.1-1) 本間友規ほか：大振幅繰返し変形を受ける積層ゴム支承の熱・力学的連成挙動に関する研究（その 9 熱伝導解析による実験結果のシミュレーション）、日本建築学会学術講演梗概集、2008.9.

3.3.1-2) 近藤明洋ほか：大振幅繰返し変形を受ける積層ゴム支承の熱・力学的連成挙動に関する研究（その 10 鉛入り積層ゴムにおける鉛温度～降伏応力関係の提案）、日本建築学会学術講演梗概集、2008.9.

3.3.1-3) 竹中康雄ほか：大振幅繰返し変形を受ける積層ゴム支承の熱・力学的連成挙動に関する研究（その 11 LRB の温度上昇を考慮した地震応答解析）、日本建築学会学術講演梗概集、2008.9.

3.3.2 高減衰ゴム系積層ゴム

(1) 免震部材実験結果に基づくモデル化

(1.1) 縮小試験体実験結果

平成 22 年度に実施した縮小試験体(HDRϕ250)の実験概要と実験結果を示す。写真 3.3.2-1 に、加振状況を示す。試験体は、実大サイズ(直径 1000mm)の 1/4 サイズの直径 250mm の高減衰ゴム系積層ゴム(X0.6R)×4 体である。表 3.3.2-1 に、実大サイズの積層ゴムと試験体の諸元を合わせて示す。計測項目は、水平・鉛直の荷重・変位、および試験体各部の温度である。試験体温度は熱電対および非接触型の温度計により、加力中および加力後の温度を計測した。図 3.3.2-1 に、試験体の温度計測点を示す。また、加振により試験体に発生する熱が試験機に伝達しないよう、試験体の上下に D-M-E 高温用断熱板(厚さ 10mm)を設置して、加振を実施した。

表 3.3.2-2 に、多数回繰返し加振の実験ケース一覧を示す。実験は、15.0N/mm^2 の一定面圧下における加振周期 4.0 秒の正弦波による多数回繰返し加振である。高減衰ゴム系積層ゴムが持つ各種依存性の繰返し特性への影響を検討するため、加振振幅、初期温度、荷重履歴を変化させた連続正弦波加振、およびランダム加振として地震応答波による加振を実施した。加振の繰返し回数は、全ての実験ケースについて累積変形量が 100m となるよう設定している(地震応答波を除く)。地震応答波は、高減衰ゴム系積層ゴムのみで構成される免震層を有する等価周期 4.0 秒(γ=200%時)の 1 質点剛体モデルに、T-TN-AIC003-AV を入力した応答変位波形を用いた。図 3.3.2-2 に、T-TN-AIC003-AV の加速度時刻歴波形を示す。実験には、継続時間 600 秒以上の入力による応答波のうち、主要動部分を含む 60～210 秒の 150 秒間の応答変位波形を 4 回連続入力した。図 3.3.2-3 に、実験に用いた応答変位波形を示す。

図 3.3.2-4 に、多数回繰返し実験結果の荷重変形関係を示す。各実験ケースの履歴ループは、繰返し加振に伴い、最大荷重とループ面積が徐々に低下している。初期 0℃の履歴ループは、初期 30℃の履歴ループに比べて、加振開始時のループ面積が大きいが、繰返しによる特性変化も大きい。漸増と漸減の履歴ループを比較すると、荷重履歴の違いが繰返し特性に影響を与えることが確認できる。図 3.3.2-5 に、多数回繰返し実験の加振中および加振終了後の試験体温度の推移を示す。図 3.3.2-5 の試験体温度は、図 3.3.2-1 に示す温度計測点のうち、試験体のゴム中心部である X-Bc の温度を示している。ただし、漸減のケースのみ X-Bc が断線したため Y-Bc の温度を示している。加振振幅が大きい方が温度上昇が大きく、漸増、漸減のケースでは加振振幅の変化に応じて、温度上昇の度合いが変化していることが確認できる。

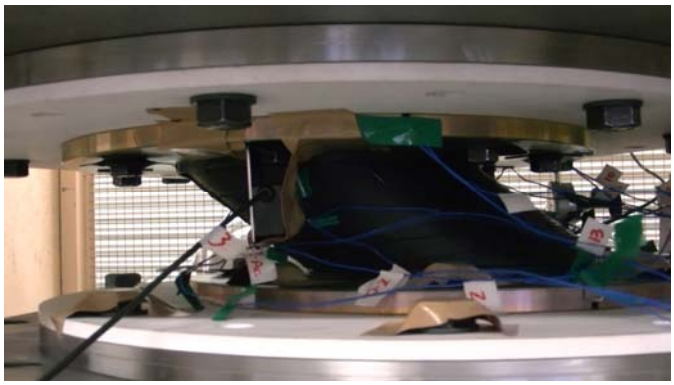


写真 3.3.2-1　加振状況

表 3.3.2-1 高減衰ゴム系積層ゴム試験体諸元

	外径 (mm)	内径 (mm)	ゴム層厚	内部鋼板厚 (mm)	S1	S2
実大サイズ	1000	25	6.7mm×30 層=201mm	4.4	36.4	4.98
試験体(HDRϕ250)	250	10	1.7mm×30 層=51mm	1.2	35.3	4.9

$G_{eq}(\gamma$=100%時) = 0.620N/mm^2

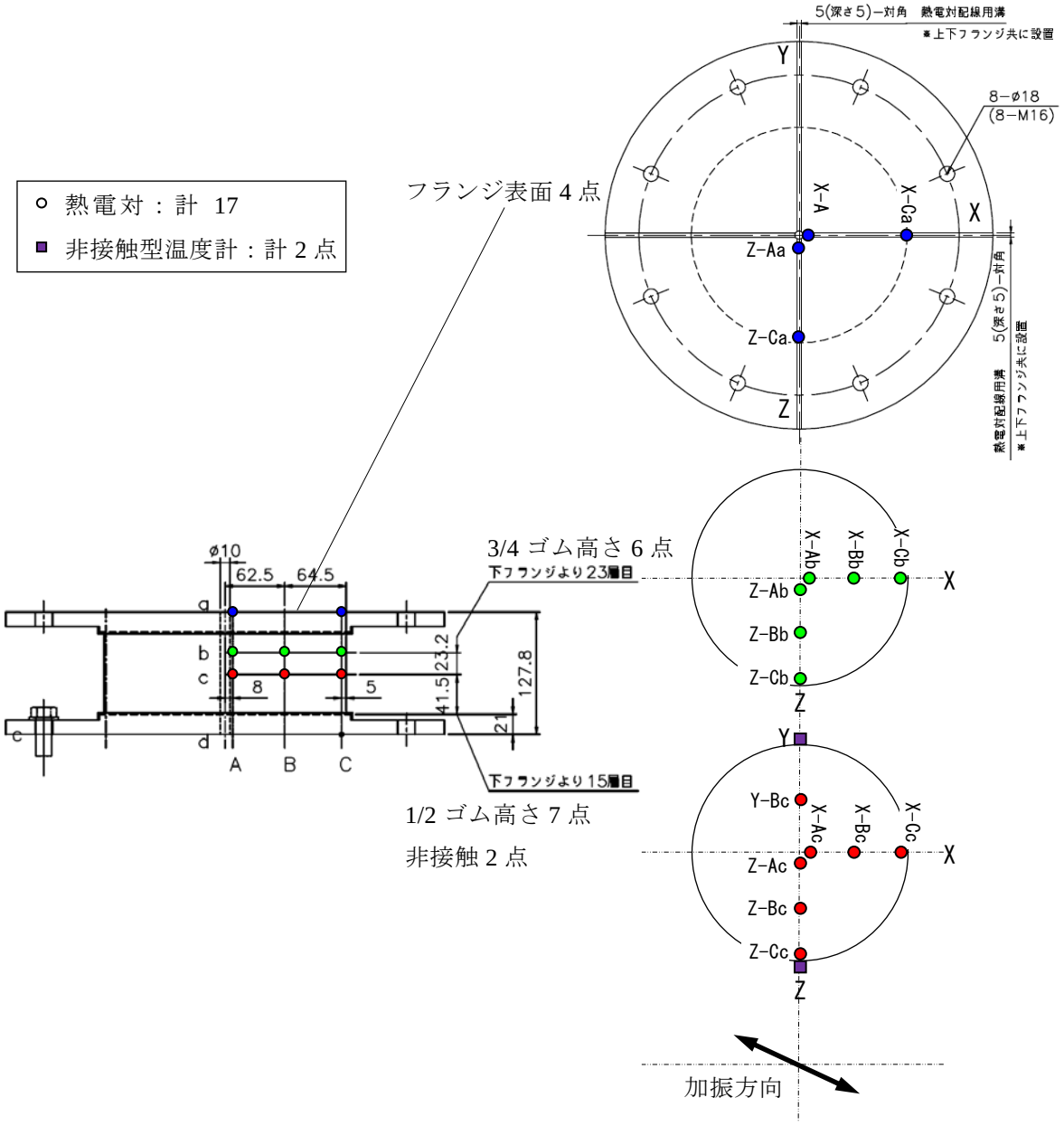


図 3.3.2-1　試験体温度計測点

表 3.3.2-2　HDRϕ250 縮小試験体多数回繰返し加振実験ケース一覧

試験体	試験条件	加振周期 (sec)	ひずみ (%)	変位 (mm)	換算速度 (cm/s)	サイクル数	累積変形 (m)	試験体初期温度 (℃)
1	限界 1B	4.0	50	26	4.0	1000	104	20
	限界 2B	4.0	100	51	8.0	500	102	20
	限界 3B	4.0	200	102	16.0	250	102	20
2	初期 0℃	4.0	200	102	16.0	250	102	0
	初期 30℃	4.0	200	102	16.0	250	102	30
3	漸増	4.0	50	26	4.0	245		20
			100	51	8.0	122		
			200	102	16.0	61		
			250	128	20.0	49	100	
4	漸減	4.0	250	128	20.0	49		20
			200	102	16.0	61		
			100	51	8.0	122		
			50	26	4.0	245	100	
	地震応答	－	max.約 130	max 約 70	－	－	約 3.4 ×4 回	20

※試験体初期温度については、設定温度±5℃を許容値とする。

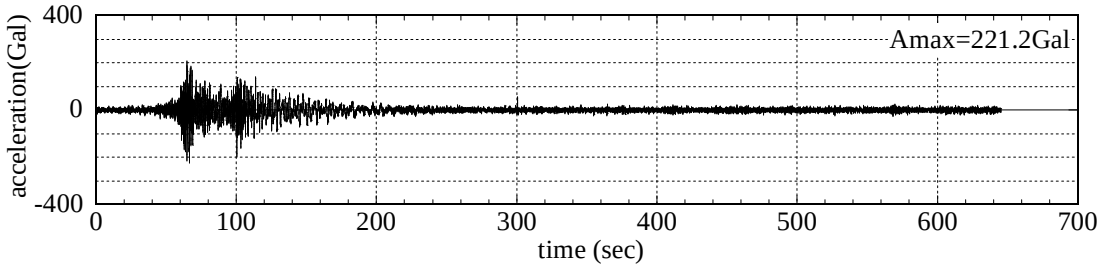


図 3.3.2-2　T-TN-AIC003-AV の加速度時刻歴波形

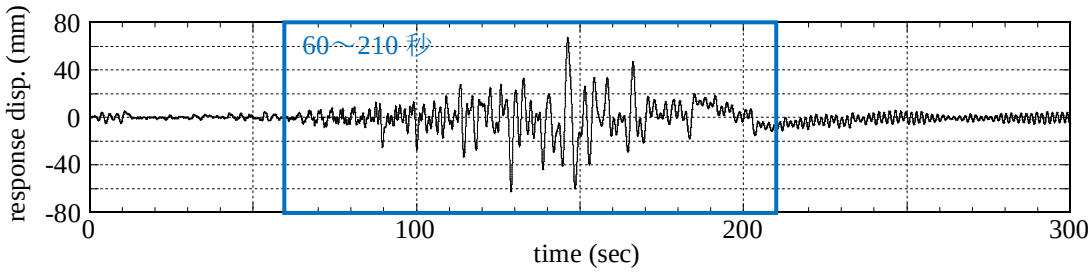
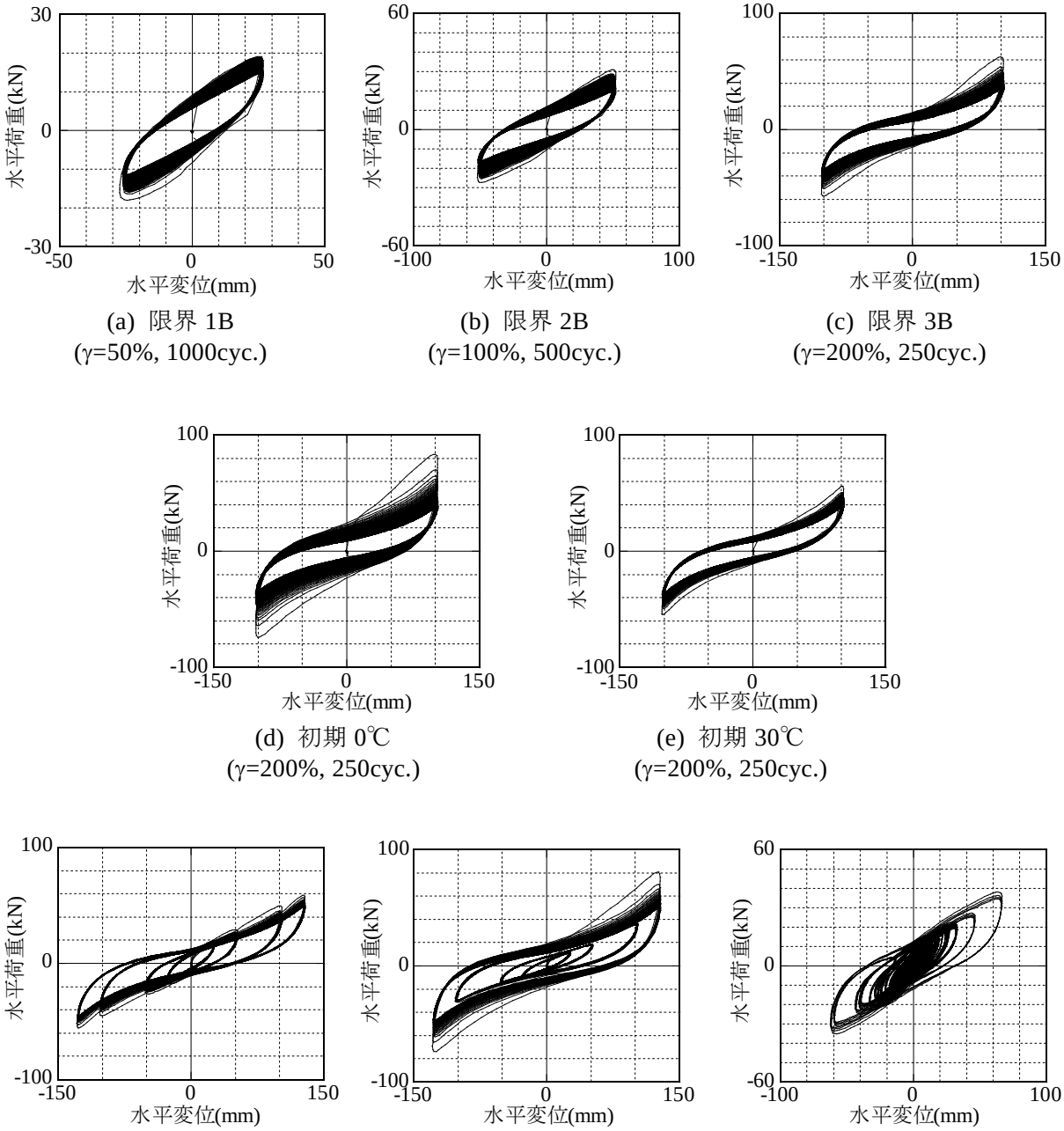


図 3.3.2-3　T-TN-AIC003-AV 入力時の応答変位波形(HDRϕ250 試験体相当)



(a) 限界 1B
(γ=50%, 1000cyc.)

(b) 限界 2B
(γ=100%, 500cyc.)

(c) 限界 3B
(γ=200%, 250cyc.)

(d) 初期 0℃
(γ=200%, 250cyc.)

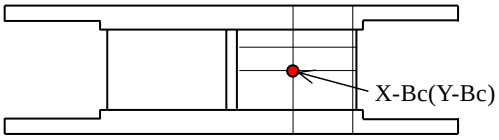
(e) 初期 30℃
(γ=200%, 250cyc.)

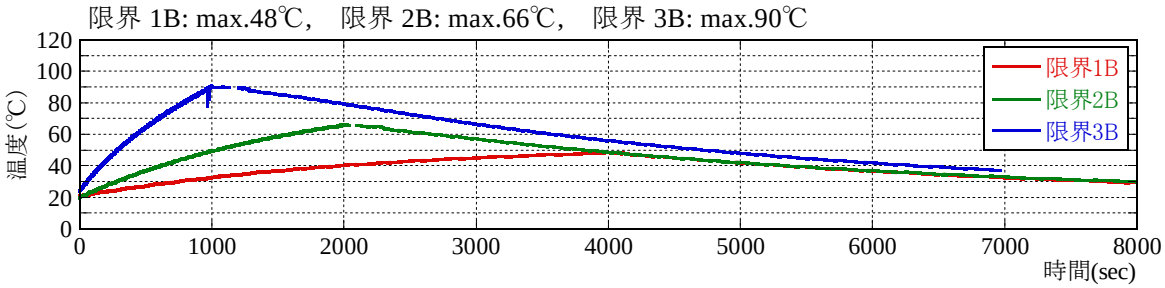
(f) 漸増
(γ=50,100,200,250%)

(g) 漸減
(γ=250,200,100,50%)

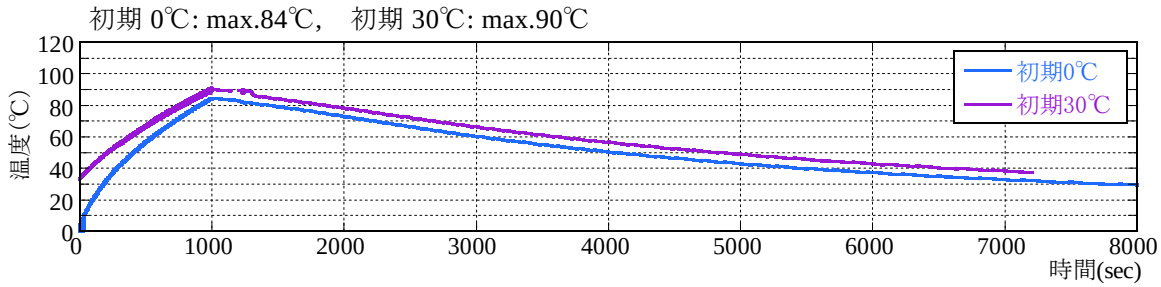
(h) 地震応答波
(4 回連続入力)

図 3.3.2-4　HDRϕ250 多数回繰返し実験結果の荷重変形関係

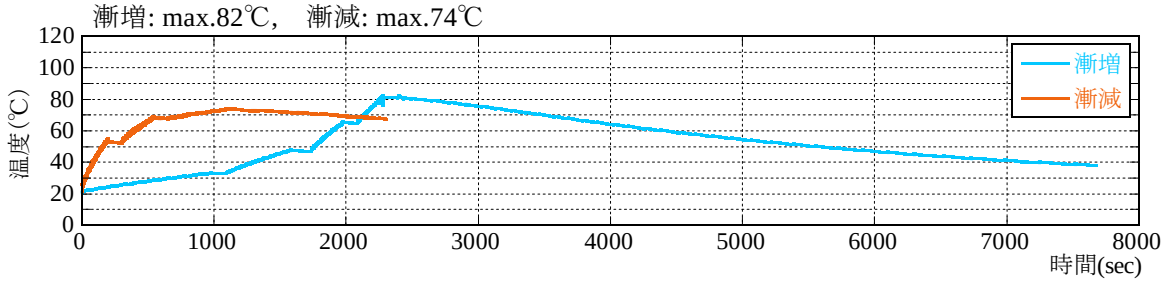




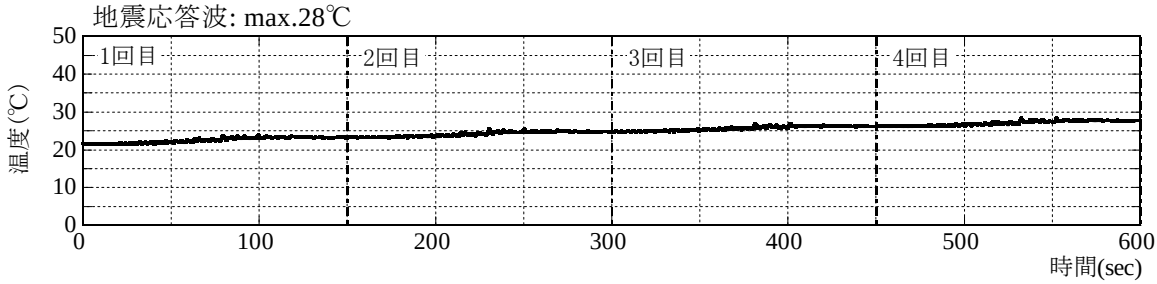
(a) 限界 1B、限界 2B、限界 3B の温度推移



(b) 初期 0℃、初期 30℃の温度推移



(c) 漸増、漸減の温度推移



(d) 地震応答波の温度推移

図 3.3.2-5　加振中および加振終了後の試験体の温度推移 (計測点 X-Bc (漸減のみ Y-Bc))

(1.2) 繰返し特性を考慮した高減衰ゴム系積層ゴムの復元力モデル

(1.2.1) 技術資料による設計式

メーカーの技術資料 [3.3.2-1)]による高減衰ゴム系積層ゴムの復元力モデルは、等価剛性 K_{eq}、等価減衰定数 H_{eq}、降伏荷重特性係数 u の 3 つの復元力特性値により決定され、それぞれ式(3.3.2-1)～(3.3.2-3)によって算出される(図 3.3.2-6)。

$$K_{eq} = G_{eq} \cdot A / h_r \tag{3.3.2-1}$$

$$H_{eq} = \Delta W / (2\pi \cdot K_{eq} \cdot \delta_0^{\,2}) \tag{3.3.2-2}$$

$$u = Q_d / (K_{eq} \cdot \delta_0) \tag{3.3.2-3}$$

ここで、G_{eq} はゴムのせん断弾性係数、A は積層ゴム断面積、h_r はゴム層総厚である。K_{eq}(G_{eq})、H_{eq}、u の 3 つの復元力特性値は、表 3.3.2-3 のようにせん断ひずみγの関数として与えられる。この時のせん断ひずみγは最大経験せん断ひずみが用いられ、せん断ひずみが大きくなるのに伴って、各復元力特性値が更新されていく。このせん断ひずみに依存して変化する復元力特性値を用いた修正バイリニアモデルにより、高減衰ゴム系積層ゴムの復元力特性が表現される。上記の 3 つの復元力特性値 K_{eq}、 H_{eq}、 u を用いて、バイリニアモデルの 1 次剛性 K_1、2 次剛性 K_2、降伏荷重特性値 Q_d は、式(3.3.2-4)～(3.3.2-6)によって算出される。

$$K_1 = K_{eq} \frac{u - \pi H_{eq} / 2 + u\pi H_{eq} / 2}{u - \pi H_{eq} / 2} \tag{3.2.2-4}$$

$$K_2 = K_{eq}(1-u) \tag{3.2.2-5}$$

$$Q_d = u \cdot K_{eq} \cdot h_r \cdot \gamma \tag{3.2.2-6}$$

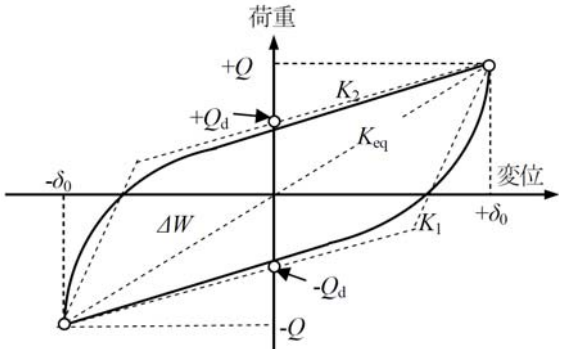


図 3.3.2-6　高減衰ゴム系積層ゴムの水平復元力特性 [3.3.2-1)]

表 3.3.2-3　高減衰ゴム系積層ゴム(X0.6R)の設計式 [3.3.2-1)]

ゴム材料呼称	代表特性値 (γ=100%)	各関数 (10%≦γ≦270%)
X0.6R	G_{eq}=0.620N/mm^2 H_{eq}=0.240	$G(\gamma)=G_0\times(2.855-3.878\gamma+2.903\gamma^2-1.016\gamma^3+0.1364\gamma^4)$ G_0=0.620、γ=1.0 におけるせん断弾性係数
		$H_{eq}(\gamma)=H_{eq0}\times(0.9150+0.2364\gamma-0.1804\gamma^2+0.02902\gamma^3)$ H_{eq0}=0.240、γ=1.0 における等価減衰定数
		$u(\gamma)=u_0\times(0.9028+0.2711\gamma-0.2083\gamma^2+0.03421\gamma^3)$ u_0=0.408、γ=1.0 における降伏荷重特性比

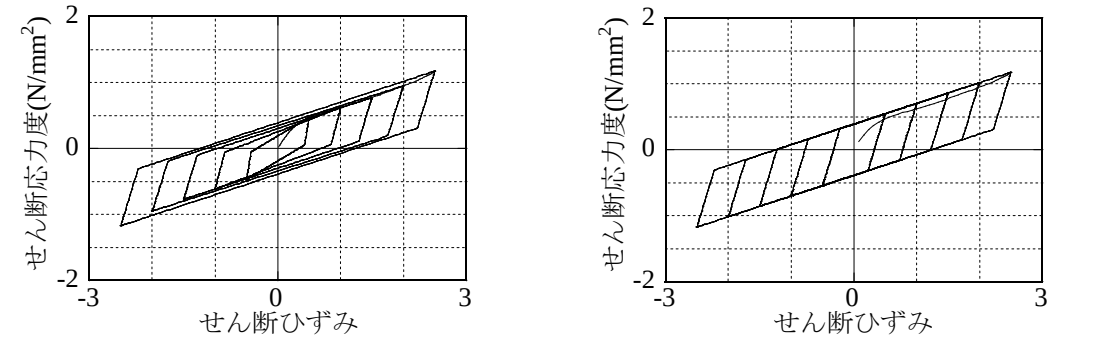
(1.2.2) 漸減入力に対応した修正バイリニアモデルの履歴則

図 3.3.2-7 に、(1.2.1)に示す設計式で表される修正バイリニアモデルによる高減衰ゴム系積層ゴムのせん断応力度－ひずみ関係を示す。図 3.3.2-7(a)は、せん断ひずみを 50%から 250%まで漸増した復元力特性、図 3.3.2-7(b)は、せん断ひずみを 250%から 50%まで漸減した復元力特性である。図 3.3.2-7(b)に示す漸減の場合、最初に経験した最大せん断ひずみによってバイリニアの特性値が決定され、その後の漸減加振においては特性値が固定されたバイリニアとなる。このように、設計式で用いられる修正バイリニアモデルは、せん断ひずみによる復元力特性値の更新が、せん断ひずみの最大値更新時にのみ行われるため、一度高ひずみを経験すると、その後の小ひずみ領域においても更新された高ひずみ域に合わせた復元力特性値を使い続ける。よって、主要動終了後の小振幅入力や、大地震後の余震を考慮した地震動の連続入力等、漸減入力を含むランダム波の応答解析において、小ひずみ領域の等価剛性を過小評価する傾向がある。最大応答値の予測を目的とした解析においては問題ないが、長周期地震動を対象とした本検討では累積変形量や累積吸収エネルギーといった累積値の算出も重要な項目であり、上記の傾向は累積値を過大に算出する原因となり得る。よって、本検討では漸減入力にも対応可能な修正バイリニアモデルの履歴則を提案し、解析に使用する。

漸減入力に対応可能な修正バイリニアモデルの履歴則として、除荷点のせん断ひずみを用いた修正バイリニアモデルを提案する。高ひずみ経験後においても、再びせん断ひずみがゼロに戻ると復元力特性値は小ひずみ領域の値に復帰すると仮定して、最大経験せん断ひずみの値をリセットし、せん断ひずみがゼロを通過した後の最大せん断ひずみによって復元力特性値を算出し直す。図 3.3.2-8 に、本検討で提案する修正バイリニアモデルの履歴則の概要図を示す。最大せん断ひずみγ_{max} 更新時に復元力特性値が更新されるのは、設計式の修正バイリニアモデルと同様である(図 3.3.2-8 青線)。これに加え、載荷後にせん断ひずみがゼロに戻り、逆載荷によってせん断ひずみが 10%(設計式の下限値)を超える場合、次の除荷点において除荷時のせん断ひずみγ_{rev}を用いて復元力特性値 G_{eq}、H_{eq}、u を更新してバイリニアを作り直す(図 3.3.2-8 赤線)。ただし、載荷後にせん断ひずみがゼロまで戻らずに再載荷する場合は、復元力特性値は更新しない(図 3.3.2-8 緑線)。

図 3.3.2-9 に、除荷点のせん断ひずみを用いた修正バイリニアモデルによるせん断応力度－ひずみ関係を示す。図 3.3.2-9(a)に示すせん断ひずみ 50%～250%までの漸増加振、および図 3.3.2-9(b)に示すせん断ひずみ 250%～50%までの漸減加振とも、ほぼ同様の復元力特性となっており、高ひずみ経験後の小ひずみ領域において、復元力特性値が小ひずみ時の値に復帰する挙動を表している。図 3.3.2-10 に、表 3.3.2-2 に示す実験ケース一覧のうち、地震応答波入力の実験結果の荷重時刻歴と、一般的な修正バイリニアモデル(設計式)、および除荷点修正バイリニアモデルによる解析結果の荷重時刻歴を比較して示す。実験結果および解析結果は、地震応答波 4 回連続入力のうち、1 回目と 2 回目の結果を続けて示している。どちらの解析結果も、最大荷重は 1 回目、2 回目とも実験結果とよく一致している。しかし、設計式による解析結果(図 3.3.2-10(a))は、1 回目の主要動終了後から 2 回目の主要動までの振幅の小さい領域で、実験結果に比べて荷重を過大に評価している。これに対し、除荷点修正バイリニアモデルによる解析結果(図 3.3.2-10(b))は、主要動終了後の振幅の小さい領域においても、実験結果の荷重を比較的良好に追跡できている。図 3.3.2-11 に、地震応答波入力の実験結果の累積吸収エネルギーと、設計式および除荷点修正バイリニアモデルによる解析結果の累積吸収エネルギーを比較して示

す。設計式の結果に比べて、除荷点修正バイリニアモデルの結果は累積吸収エネルギーの値がやや小さくなり、実験結果の値に近づいている。ただし、繰返し加振による特性変化を考慮していないので､除荷点修正バイリニアモデルの解析結果も実験結果より大きな値を示している。



(a) γ=50%→100%→150%→200%→250%
(各 4 サイクル)

(b) γ=250%→200%→150%→100%→50%
(各 4 サイクル)

図 3.3.2-7　設計式の修正バイリニアモデルによる復元力特性

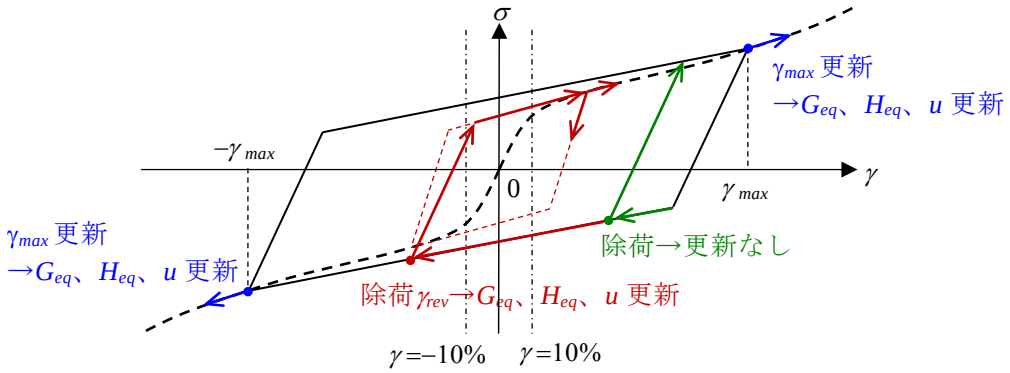
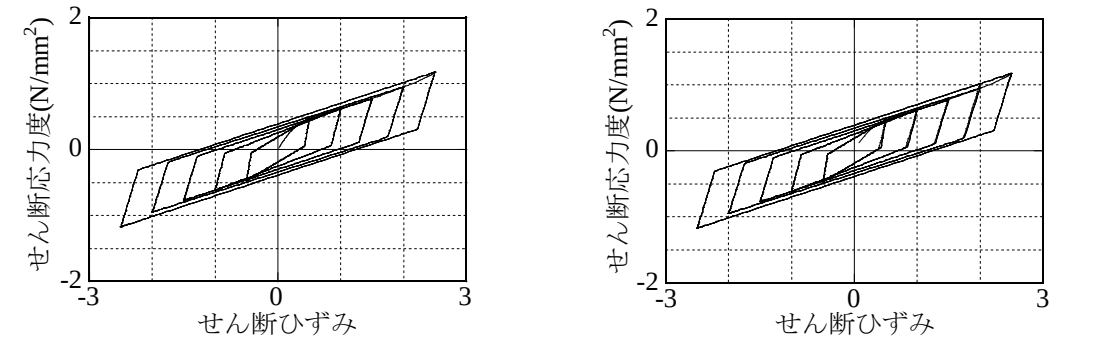


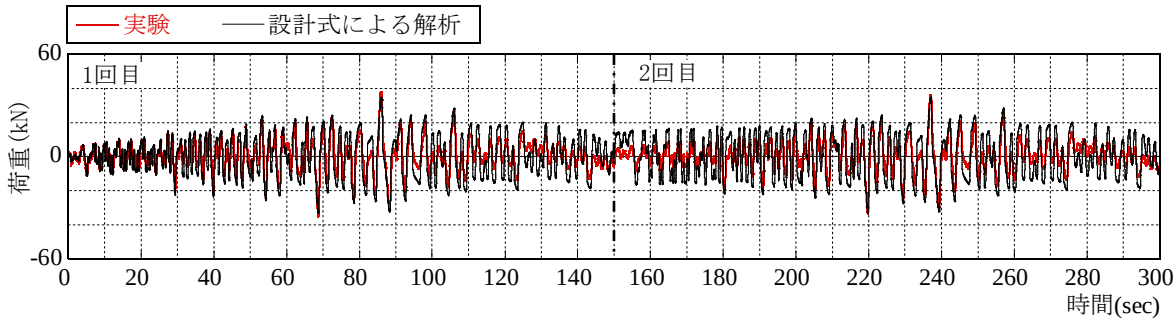
図 3.3.2-8　除荷点のせん断ひずみを用いた修正バイリニアモデルの履歴則概要



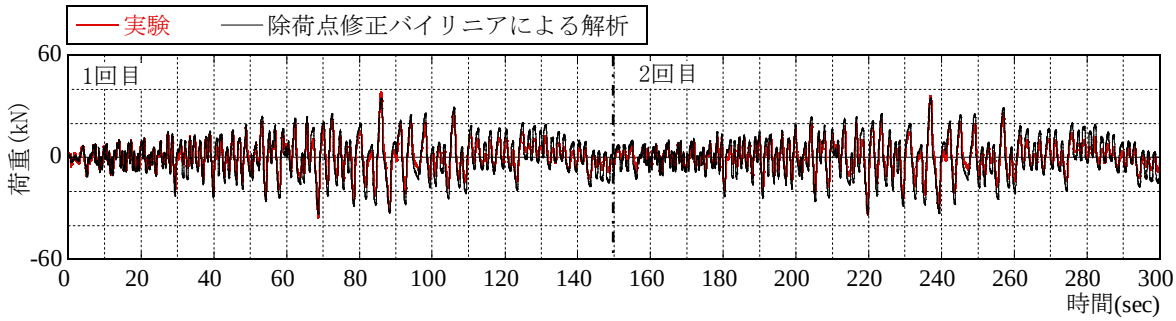
(a) γ=50%→100%→150%→200%→250%
(各 4 サイクル)

(b) γ=250%→200%→150%→100%→50%
(各 4 サイクル)

図 3.3.2-9　除荷点せん断ひずみを用いた修正バイリニアモデルによる復元力特性



(a) 設計式(一般的な修正バイリニアモデル)による解析結果と実験結果の比較



(b) 除荷点修正バイリニアモデルによる解析結果と実験結果の比較

図 3.3.2-10　地震応答波加振の実験結果と解析結果の荷重時刻歴の比較

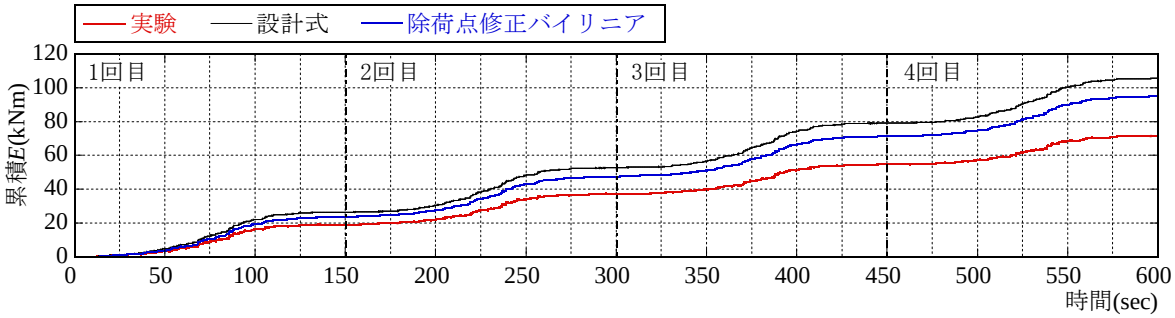


図 3.3.2-11　地震応答波加振の実験結果と解析結果の累積吸収エネルギーの比較

(1.2.3) 積層ゴム温度を用いた復元力特性変化のモデル化

図 3.3.2-4 に示す実験結果より、多数回の繰返し加振により高減衰ゴム系積層ゴムの履歴ループは最大荷重とループ面積が減少していく。高減衰ゴム系積層ゴムは温度依存性を持つ部材であることも考慮し、実験結果に見られる繰返し加振による特性変化を、加振による温度上昇を評価指標としてモデル化を行う。図 3.3.2-12 に、表 3.3.2-2 に示す実験ケースのうち限界 1B(γ=50%, 1000 サイクル)、限界 2B(γ=100%, 500 サイクル)、限界 3B(γ=200%, 250 サイクル)の一定振幅加振の実験ケースについて、実験結果の復元力特性値 K_{eq}、H_{eq}、u と試験体温度の関係を示す。試験体温度は、図 3.3.2-12 中の試験体図の赤丸で示すゴム部中心点の温度である。本検討では、このゴム部中心点の温度を試験体の代表温度として用いる。各復元力特性値は、20℃時の値を基準値として、等価剛性変化率 C_K、等価減衰定数変化率 C_H、降伏荷重特性係数変化率 C_u として示している。図 3.3.2-12 より、K_{eq}、H_{eq}、u とも試験体の温度上昇にともない値が低下しており、その低下傾向は加振振幅に関わらずおおよそ一定の傾向を示している。この試験体の温度変化による復元力特性値の変化率 C_K、C_H、C_u を、試験体代表温度 T の関数として評価し、これを用いて繰返しによる復元力特性値の変化を考慮する(式(3.3.2-7)～(3.3.2-9))。

$$\left.\begin{aligned} K_{eq}' &= C_K \cdot K_{eq} \\ C_K &= 1.288 - 0.0144T \quad (T \le 20℃) \\ C_K &= 1.668 - 0.548\log(T - 3.45) \quad (T > 20℃) \end{aligned}\right\} \tag{3.3.2-7}$$

$$\left.\begin{aligned} H_{eq}' &= C_H \cdot H_{eq} \\ C_H &= (-0.0065T + 1.130) \end{aligned}\right\} \tag{3.3.2-8}$$

$$\left.\begin{aligned} u' &= C_u \cdot u \\ C_u &= (-0.0065T + 1.130) \end{aligned}\right\} \tag{3.3.2-9}$$

図 3.3.2-12 中の赤線が、式(3.3.2-7)～(3.3.2-9)で表される復元力特性値変化率 C_K、C_H、C_u の評価式である。図 3.3.2-12 中には、等価剛性と等価減衰定数について技術資料 [3.3.2-1)]による温度依存式も紫線により合わせて示している。提案する評価式は、この温度依存式と大きくずれないよう設定しており、初期温度による復元力特性値の違いについても同時に考慮可能としている。

繰返し加振による試験体温度の上昇は、加振による履歴吸収エネルギーから算出する。図 3.3.2-13 に、実験結果の累積履歴吸収エネルギーと試験体温度増分の関係を示す。図 3.3.2-13 中の黒の点線は、累積吸収エネルギーを高減衰ゴムの熱容量で除して求めた試験体温度増分、赤の点線は累積吸収エネルギーを高減衰ゴムの熱容量と内部鋼板の熱容量の和で除して求めた試験体温度増分である。表 3.3.2-4 に、高減衰ゴム(X0.6R)と鋼板の物性値を示す。図 3.3.2-14 には、高減衰ゴム(X0.6R)の比熱と温度の関係を示す。高減衰ゴムの比熱は、温度が高くなると大きくなる特性があるが、検討には 20℃時の値である 1.45(kJ/(kg K))を用いた。実験結果の試験体温度増分は、累積吸収エネルギーをゴムと鋼板の熱容量の和で除して求めた温度増分(図 3.3.2-13 中赤の点線)におおよそ一致し、累積吸収エネルギーに比例した温度上昇を示している。ただし、累積吸収エネルギーが大きくなると実験結果の温度上昇は、試験体の熱容量から求めた温度上昇の傾きよりも上昇傾向がやや緩やかになる。これは、試験体温度が高温になると外気やフランジとの温度差による放熱が大きくなるためと考えられる。この傾向は、加振振幅の小さい限界 1B のケースにおいてより顕著に見られるが、加振振幅が小さいと時間当たりの入

力エネルギーが小さいために、放熱の影響がより顕著に現れるためと考えられる。また、図 3.3.2-5 より、試験体温度は加振が終了すると、ただちに低下し始める。地震波は、大振幅と小振幅が混在し、連続正弦波入力時のように連続的なエネルギー入力ではなく、大振幅時における断続的なエネルギー入力となる。従って、小振幅時においてはエネルギー入力がほとんどなく、上昇した試験体温度が低下する場合も考えられ、ランダム波応答を考える場合、放熱の影響も考慮しなければ試験体温度を過大に評価する可能性がある。以上より、本検討では加振による履歴吸収エネルギーから、放熱による損失エネルギーを差し引いた有効エネルギーが試験体の温度上昇に寄与していると仮定して、試験体温度を算出する。

図 3.3.2-15(a)に、各実験の載荷終了時点からの温度低下の時間経過を示す。各実験ケースの 0～4000 秒程度までの温度低下を比較すると、載荷終了時点の温度が高温のケースほど、急な温度低下を示している。図 3.3.2-15(b)は、(a)のグラフを限界 3B(200%, 250 サイクル)のグラフを基準として、載荷終了時点(温度低下開始時点)の温度が、限界 3B のグラフ上に乗るよう各実験ケースのグラフの時間をシフトさせたものである。図 3.3.2-15(b)より、試験体の温度低下は低下開始時点の温度にのみ依存し、どの実験ケースにおいても一致した傾向で低下していることがわかる。この時、雰囲気温度は約 20℃である。図 3.3.2-15(b)に示す温度低下傾向を低下開始時からの経過時間 t 秒、低下開始から t 秒後の温度 T_e(℃)として、式(3.3.2-11)のように回帰する。図 3.3.2-15(b)中の赤の点線が、式(3.3.2-11)のグラフである。

$$T_e = 88.5 \cdot e^{-0.00015t} \tag{3.3.2-11}$$

式(3.3.2-11)を用いて、任意の温度低下開始温度 T_s(℃)から、任意のΔt 秒間に低下した温度変化 ΔT を求めると、式(3.3.2-12)のように表される。

$$\Delta T = T_s \cdot (1 - e^{-0.00015\Delta t}) \tag{3.3.2-12}$$

試験体の熱容量を、高減衰ゴムと内部鋼板の熱容量の和とすると、式(3.3.2-12)より、放熱による損失エネルギーE_{loss} は、式(3.3.2-13)のように表される。

$$E_{loss} = (C_R + C_S) \cdot T_s \cdot (1 - e^{-0.00015\Delta t}) \tag{3.3.2-13}$$

ここで、C_R はゴムの熱容量、C_S は鋼板の熱容量である。試験体の荷重変形関係から算出される履歴吸収エネルギーを E_{get} とすると、試験体の温度上昇に寄与する有効エネルギーE_{eff} は、式(3.3.2-14)により算出される。

$$E_{eff} = E_{get} - E_{loss} \tag{3.3.2-14}$$

有効エネルギーE_{eff} を用いて、試験体温度 T は、式(3.3.2-15)により算出される。

$$T = \frac{E_{eff}}{(C_R + C_S)} \tag{3.3.2-15}$$

図 3.3.3-16 に、以上の手法により繰返し特性を考慮した高減衰ゴム系積層ゴムの解析フローを示す。

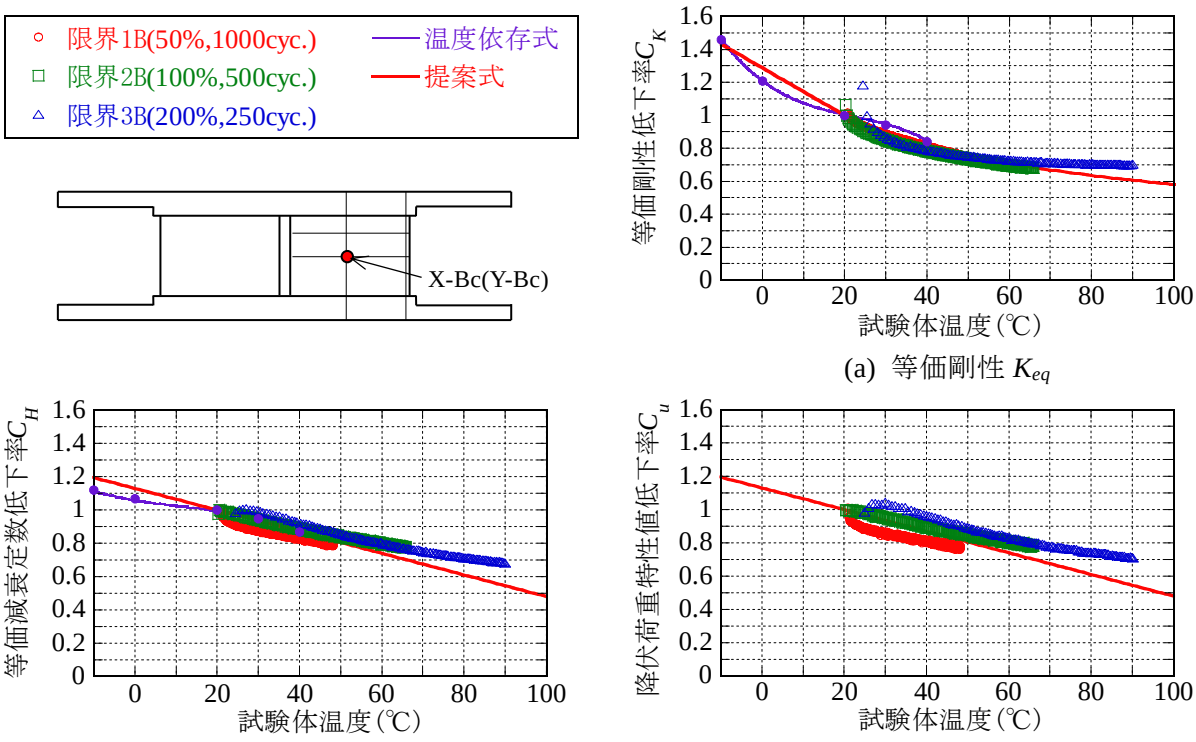


図 3.3.2-12　実験結果の試験体温度と復元力特性値変化率の関係

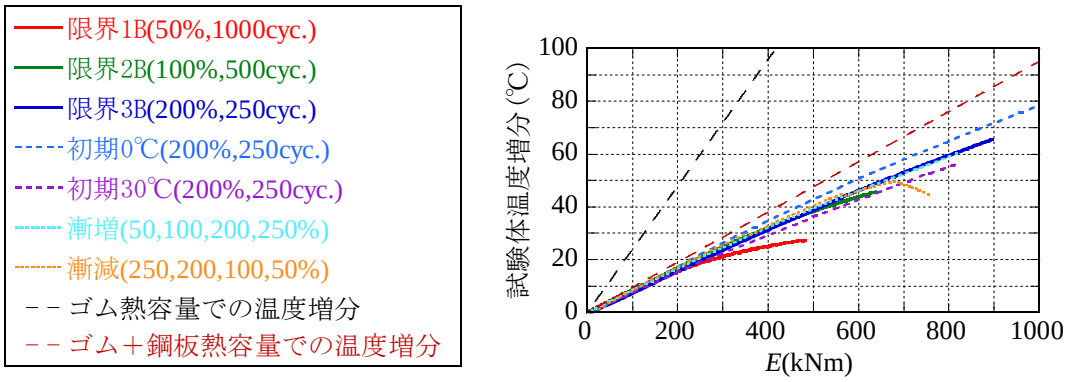


図 3.3.2-13　実験結果の累積吸収エネルギーEと試験体温度増分の関係

表 3.3.2-4　HDRϕ250 試験体の材料物性値

材料	体積 (m^3)	密度 (kg/m^3)	比熱 (kJ/kg K)	熱容量 (kJ/K)
高減衰ゴム (X0.6R)	0.002499	1150	1.45	4.167
内部鋼板 (SS400)	0.001706	7860	0.473	6.343

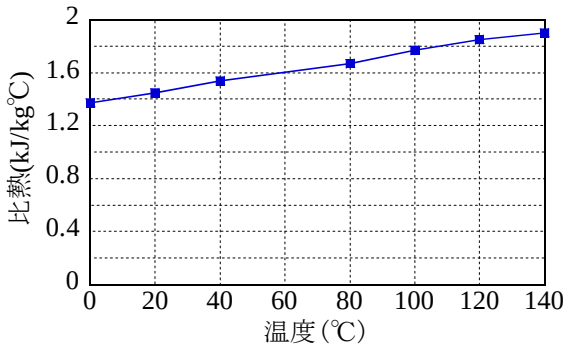
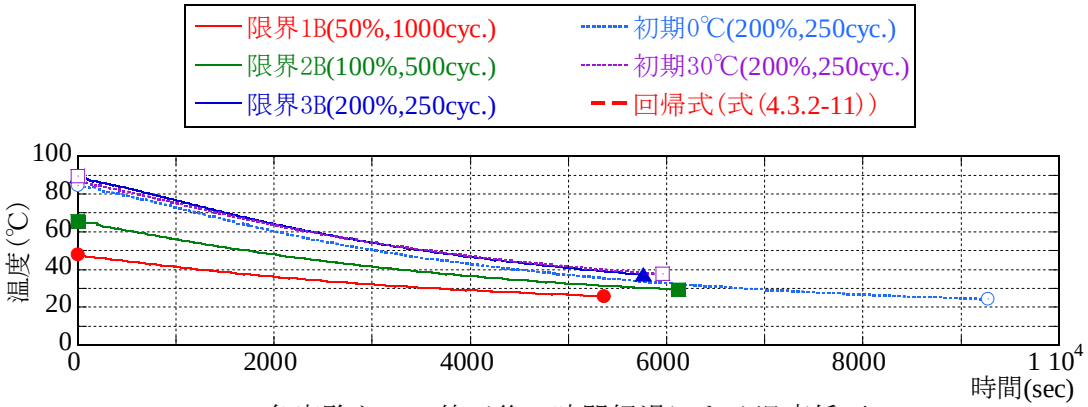
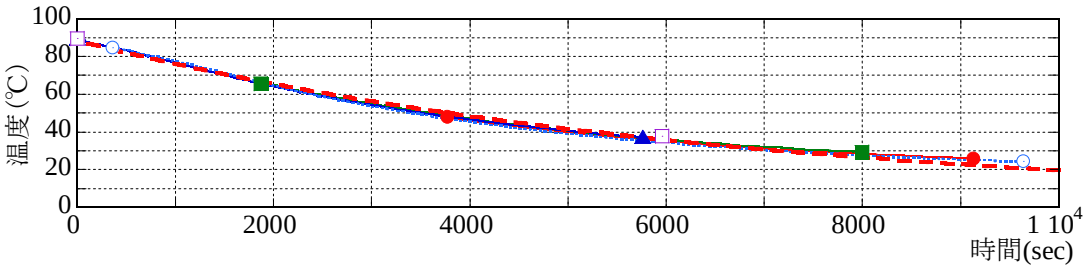


図 3.3.2-14　高減衰ゴム(X0.6R)の比熱と温度の関係



(a) 各実験ケース終了後の時間経過による温度低下



(b) 低下開始時の温度により、(a)の各実験ケースのグラフの時間をシフト

図 3.3.2-15　実験結果の載荷終了後の試験体温度の推移

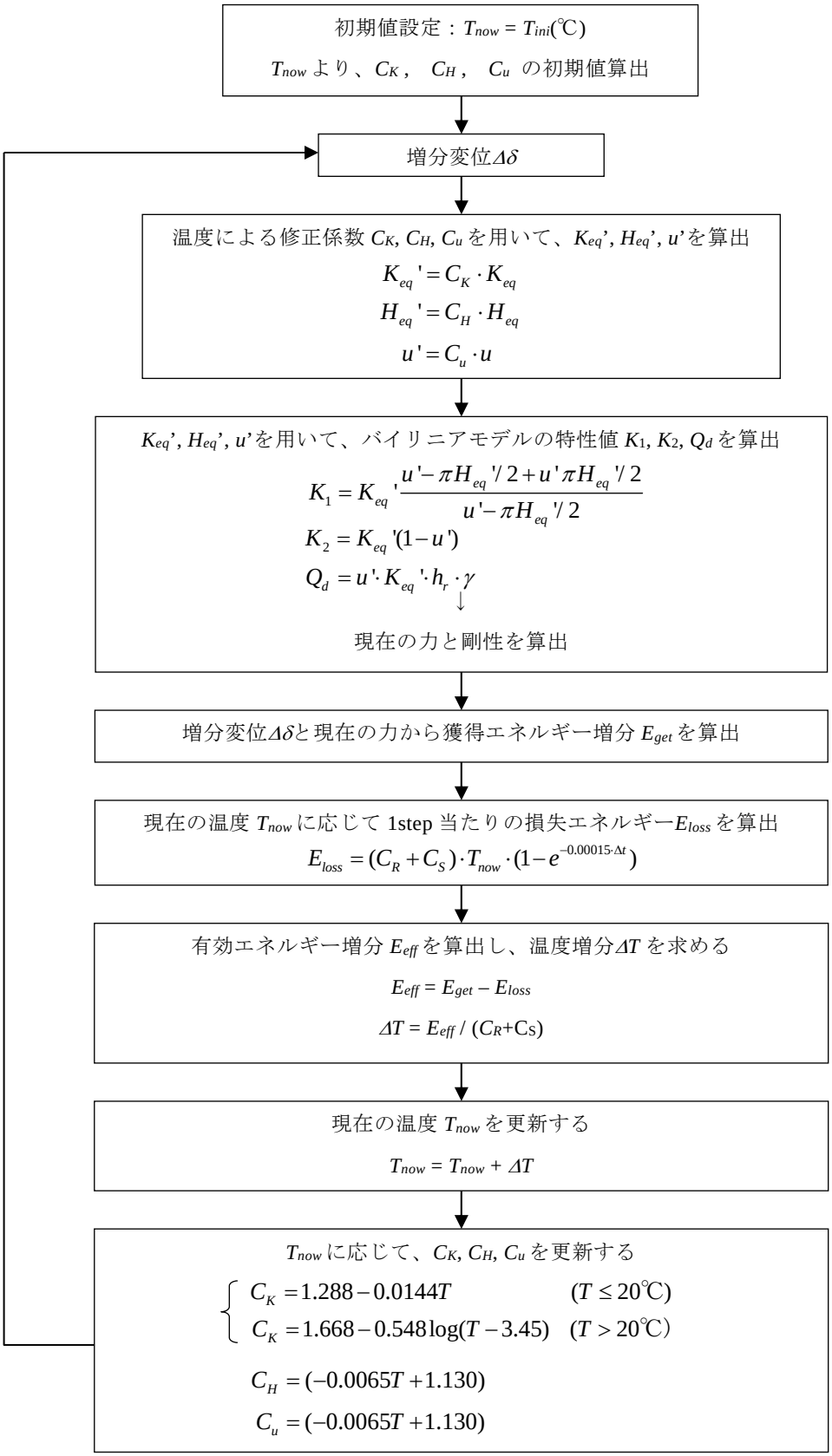


図 3.3.2-16　繰返し特性を考慮した高減衰ゴム系積層ゴムの解析手法フロー

(1.2.4) 実験結果と解析結果の比較

(1.2.1)～(1.2.3)に示す、繰返し特性を考慮した高減衰ゴム系積層ゴムの復元力モデルを用いて、(1.1)に示す縮小試験体 HDRϕ250 の多数回繰返し加振実験のシミュレーション解析を実施した。試験体の材料物性値は、表 3.3.2-4 に示す値を用いた。試験体の初期温度は、実験結果における加振開始時点の実測温度を使用した。

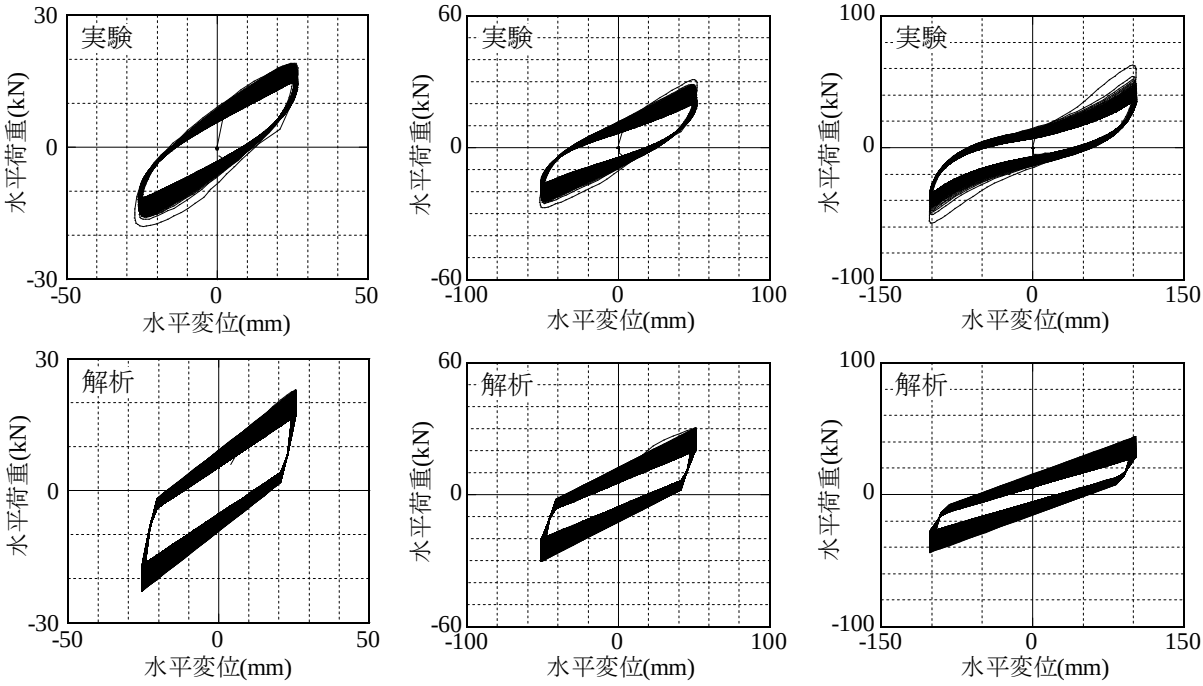
図 3.3.2-17 に、実験結果と解析結果の荷重変形関係を比較して示す。図 3.3.2-17(a)、(b)、(c)は、それぞれ限界 1B、限界 2B、限界 3B と加振振幅の異なる実験ケースの実験結果と解析結果を比較して示している。加振振幅の異なる 3 ケースの実験結果について、解析結果は繰返し荷重による履歴特性の変化を良く追跡している。ただし、(a)に示す限界 1B(γ=50%, 1000 サイクル)については、解析結果は実験結果よりも最大荷重をやや高めに評価している。また、(c)に示す限界 3B(γ=200%,250 サイクル)において、実験結果はわずかにハードニングを示しているが、解析モデルはバイリニア型でハードニングを考慮していないため、解析結果は実験結果とややループ形状が異なる。図 3.3.2-17(d)、(e)は、初期 0℃、初期 30℃と加振開始時点の試験体温度が異なるケースの実験結果および解析結果の荷重変形関係を示している。実験結果において、初期 0℃の履歴ループは、初期 30℃の履歴ループに比べて加振開始時点のループ面積が大きく、繰返し荷重によるループ形状の変化も大きい。解析結果は、このような初期温度による加振開始時のループ形状の違い、および繰返しによる履歴特性変化の違いを表現することができている。図 3.3.2-17(f)、(g)は荷重履歴の異なるケースの実験結果と解析結果の荷重変形関係を示している。(1.2.2)に示す、除荷点のせん断ひずみを用いた履歴則を適用することで、(g)に示す、せん断ひずみがγ=250%から漸減していくケースの荷重変形関係についても、解析結果は実験結果を良く追跡することができている。ただし、高ひずみ域でのハードニング挙動については、(c)に示す限界 3B のケースと同様に、バイリニア型では表現できない。図 3.3.2-17(h)は、地震応答波加振の実験結果と解析結果の荷重変形関係であり、主要動部分の 4 回連続入力の結果を全て重ねて描いている。実験結果、解析結果とも繰返しによる特性変化はわずかであり、4 回連続入力の 1 回目～4 回目までの履歴ループ形状に大きな差は生じていない。

図 3.3.2-18 に、実験結果と解析結果の累積履歴吸収エネルギーの時刻歴を比較して示す。(a)に示す限界 1B、限界 2B、限界 3B のケースにおいて、限界 1B の解析結果は実験結果よりも履歴吸収エネルギーを大きく算出している。これは、図 3.3.2-17(a)で示したように、解析結果が最大荷重を高めに評価しているためと考えられる。図 3.3.2-18 (a)に示す限界 2B、3B、(b)に示す初期 0℃、初期 30℃のケースについては、解析結果と実験結果の履歴吸収エネルギーは良く対応していることから、せん断ひずみ 50%以下において、解析結果は最大荷重と履歴吸収エネルギーを大きく評価する傾向がある。(c)に示す漸増、漸減のケースにおいて、実験結果に見られる加振振幅の変化による履歴吸収エネルギー推移の変化を、解析結果は良く追跡している。(d)に示す地震応答波の結果において、実験結果は変形が大きい時のみエネルギーが増加する断続的なエネルギー吸収挙動を示しており、解析結果はやや値が大きいが断続的なエネルギー吸収挙動を良く追跡している。

図 3.3.2-19 に、実験結果と解析結果の試験体温度の時刻歴推移を示す。(a)に示す限界 1B、限界 2B のケースにおいては、解析結果は試験体の最高温度を実験結果より 6℃程度高く評価しているが、(a)に示す限界 3B、(b)に示す初期 0℃、初期 30℃の解析結果は加振中の温度上昇から、

加振終了後の温度低下まで実験結果の試験体温度の推移を良好に追跡することができている。(c)に示す漸増、漸減の結果において、実験では振幅の変化時にわずかにインターバルをはさんだため、実験結果と解析結果の時間推移がややずれているが、解析結果は実験結果に見られる加振振幅の変化による温度推移の変化を良好に追跡している。(d)に示す地震応答波加振による試験体温度は、正弦波による多数回連続加振に比べて温度変化が小さく、約 21℃から 27℃へと 6℃程度の温度上昇であった。解析結果は、このランダム波による温度変化についても良好に再現することができている。

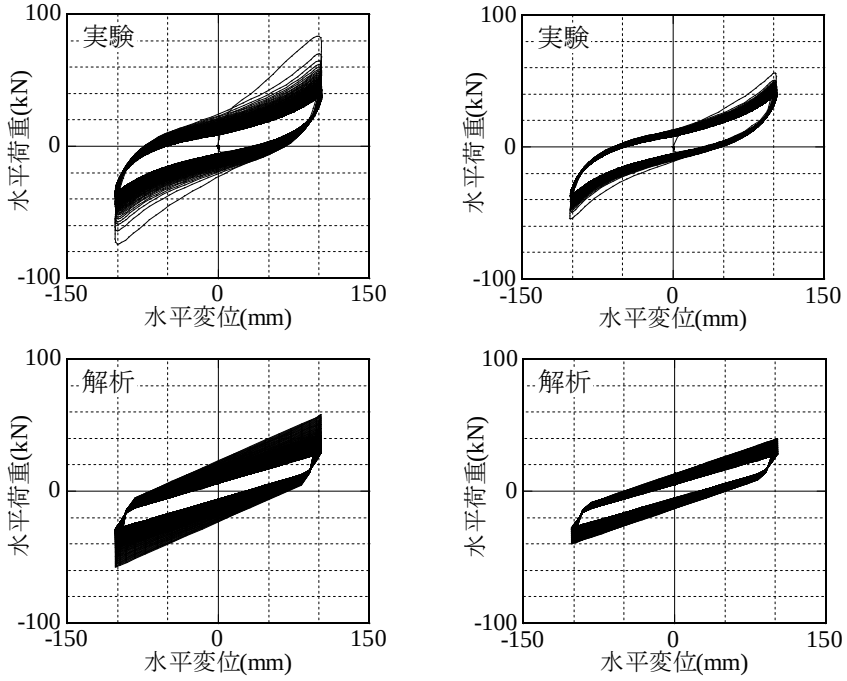
図 3.3.2-20 に、実験結果と解析結果の多数回繰返し加振による等価剛性および等価減衰定数の低下率を示す。実験結果の等価剛性および等価減衰定数の低下率は、限界 1B(γ=50%)、限界 2B(γ=100%)、限界 3B(γ=200%)の実験結果の 3 サイクル目の値を、せん断ひずみ 50%、100%、200%の基準値として、各実験ケースのせん断ひずみに応じた低下率を求めている。漸増および漸減のγ=250%での加振時の値については、限界 3B(γ=200%)の値を基準値とした。地震応答波の実験結果については、最大変形時の荷重と変形から等価剛性を求めて、表 3.3.2-3 の設計式より、最大変形時のせん断ひずみγ=130%における等価剛性の設計値を求め、その値を基準値として実験結果の等価剛性の値を除して低下率を求めた。図 3.3.2-20 (a)に示す限界 1B、限界 2B、限界 3B において、限界 1B の解析結果は等価剛性、等価減衰定数とも、実験結果の低下率と良く対応している。限界 2B の解析結果は、等価剛性は実験結果との対応がいいが、等価減衰定数については、実験結果よりも大きな低下を示している。限界 3B の解析結果は、等価剛性、等価減衰定数とも、実験結果よりも大きな低下を示している。(b)に示す初期 0℃、初期 30℃についても、解析結果は実験結果よりもやや低下率が大きい。限界 3B、初期 0℃、初期 30℃において、解析結果の復元力特性値の低下率が実験結果よりも大きいのは、図 3.3.2-12 に示す復元力特性値の試験体温度による評価式において、60℃以上の高温域における限界 3B の実験結果と回帰式の間のずれが原因と考えられ、試験体温度が 90℃程度の高温になる実験ケースで、実験結果と解析結果に差が生じていると考えられる。(c)に示す漸増、漸減の結果においては、等価剛性、等価減衰定数とも、最初の加振振幅時は、解析結果と実験結果は良く対応しているが、加振振幅が変化する際に、実験結果と解析結果に差が生じている。これは、漸増加振時において振幅が大きくなった時に、一度等価剛性が復帰する挙動を解析では表現できないことや、実験時に加振振幅が変わる際にわずかにインターバルをとったことによる温度低下等が原因と考えられる。(d)に示す地震応答波加振の結果においては、実験結果は最大変形時のみの値であるが、解析結果の等価剛性低下率を示す線上におおよそ乗っている。ただし、4 回目の加振でも低下率は 0.9 程度と特性変化は小さい。



(a) 限界 1B
(γ=50%, 1000cyc.)

(b) 限界 2B
(γ=100%, 500cyc.)

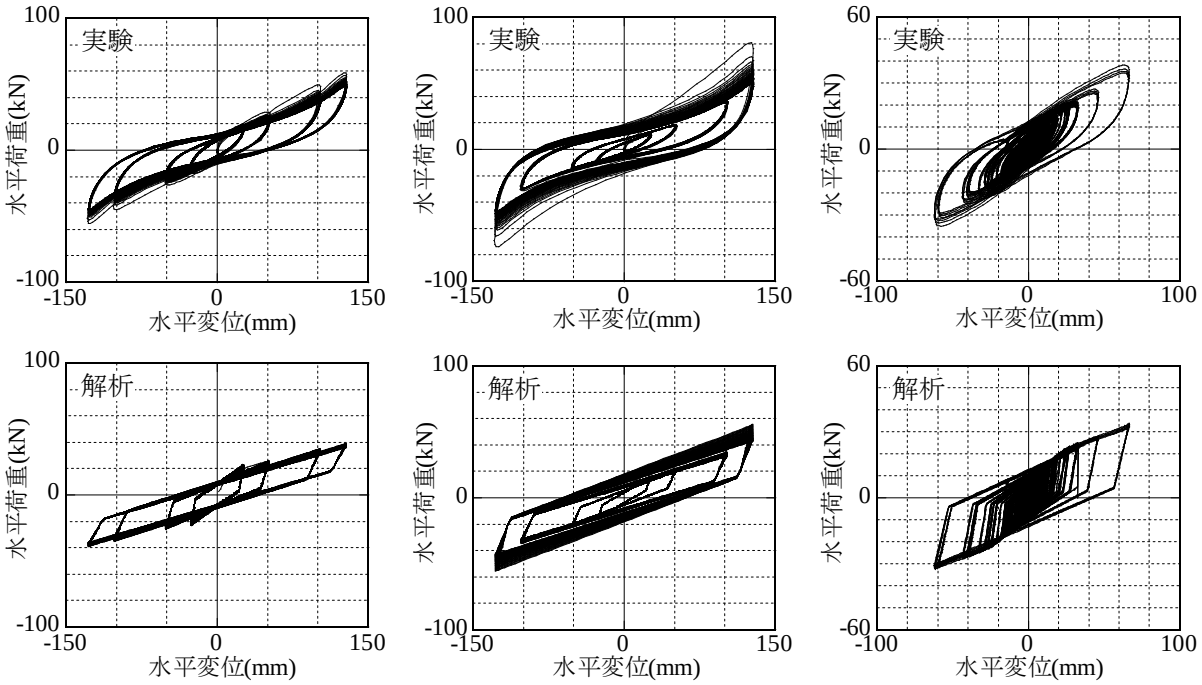
(c) 限界 3B
(γ=200%, 250cyc.)



(d) 初期 0℃
(γ=200%, 250cyc.)

(e) 初期 30℃
(γ=200%, 250cyc.)

図 3.3.2-17　実験結果と解析結果の荷重変形関係の比較

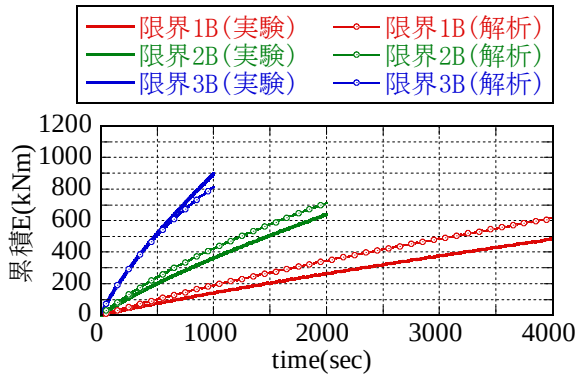


(f) 漸増
(γ=50,100,200,250%)

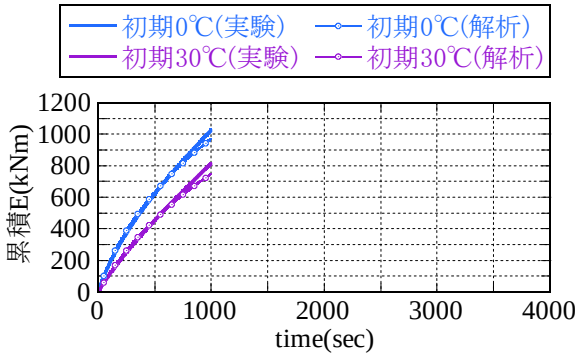
(g) 漸減
(γ=250,200,100,50%)

(h) 地震応答波
(4 回連続入力)

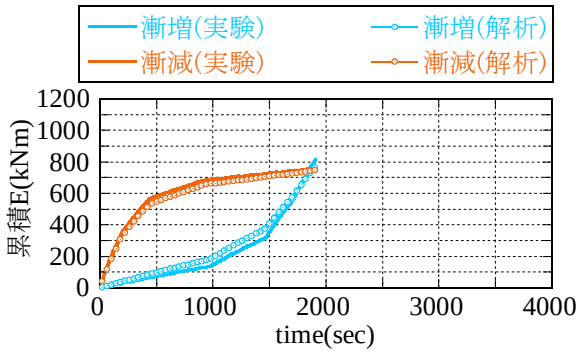
図 3.3.2-17　実験結果と解析結果の荷重変形関係の比較



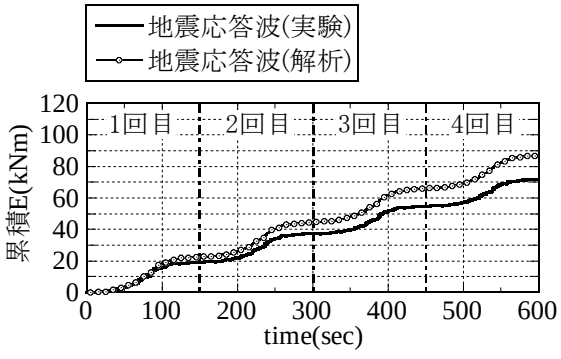
(a) 限界 1B、限界 2B、限界 3B



(b) 初期 0℃、初期 30℃

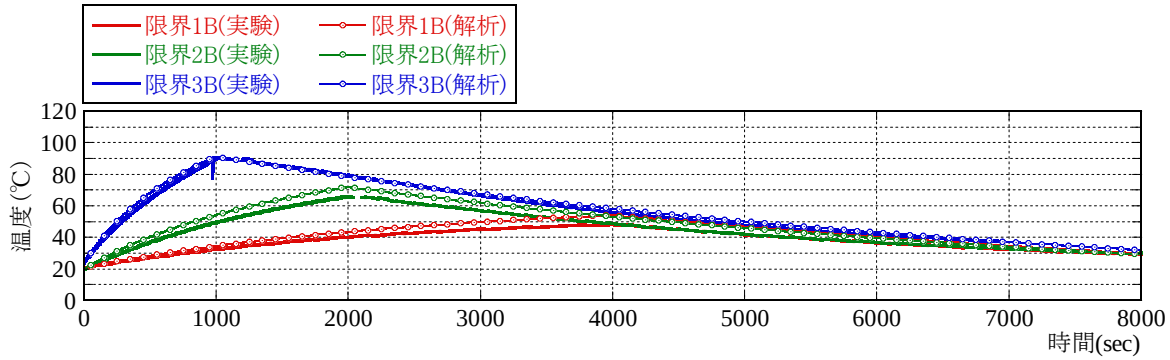


(c) 漸増、漸減

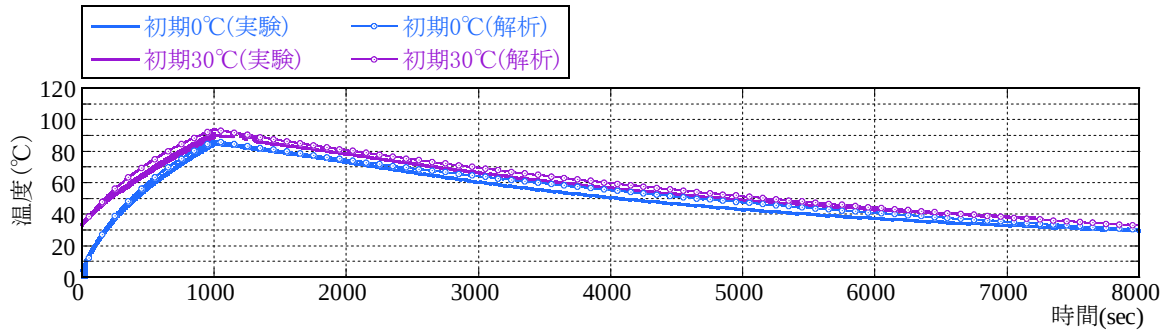


(d) 地震応答波

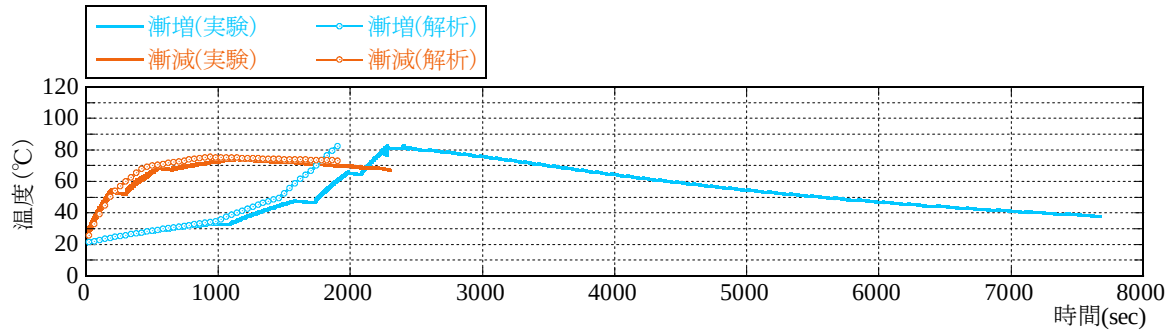
図 3.3.2-18　実験結果と解析結果の累積履歴吸収エネルギーの比較



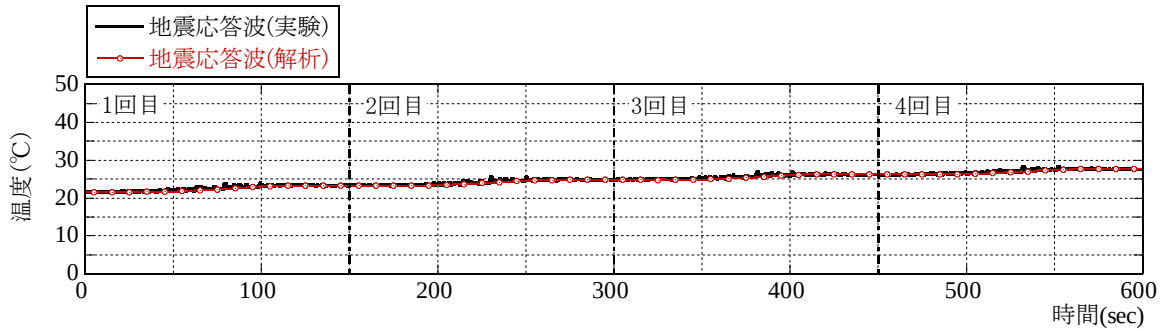
(a) 限界 1B、限界 2B、限界 3B の温度時間推移の実験結果と解析結果の比較



(b) 初期 0℃、初期 30℃の温度時間推移の実験結果と解析結果の比較

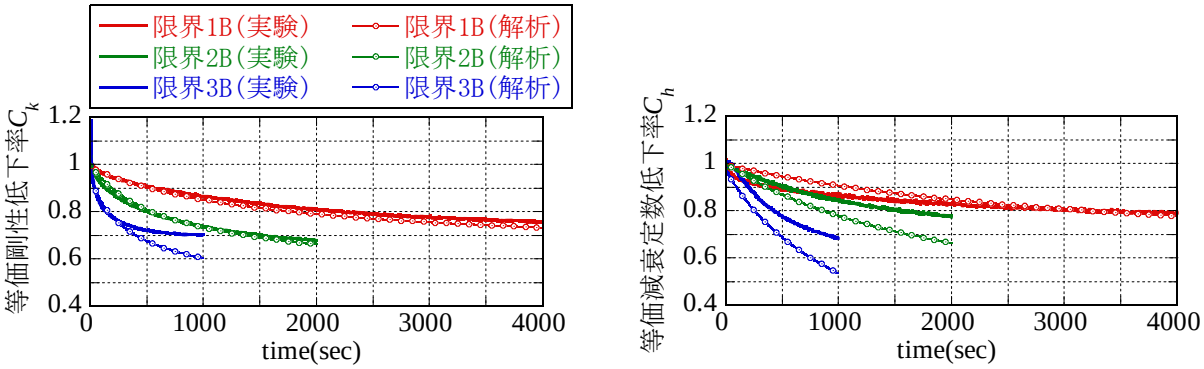


(c) 漸増、漸減の温度時間推移の実験結果と解析結果の比較

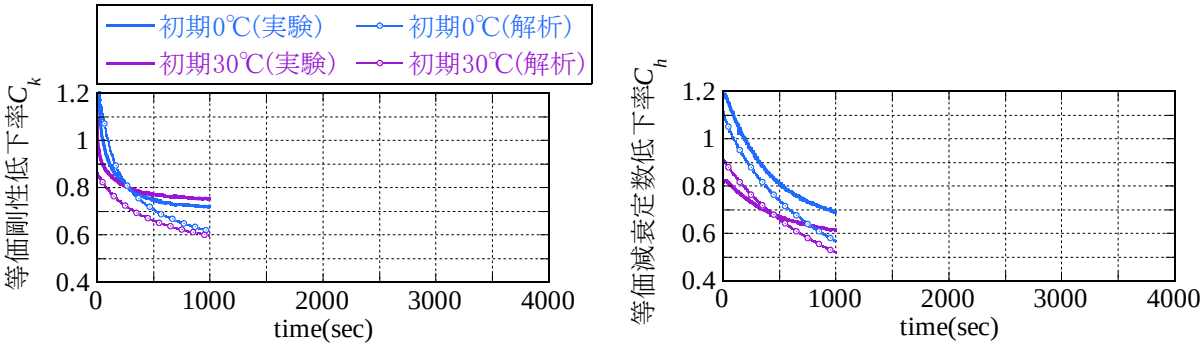


(d) 地震応答波の温度時間推移の実験結果と解析結果の比較

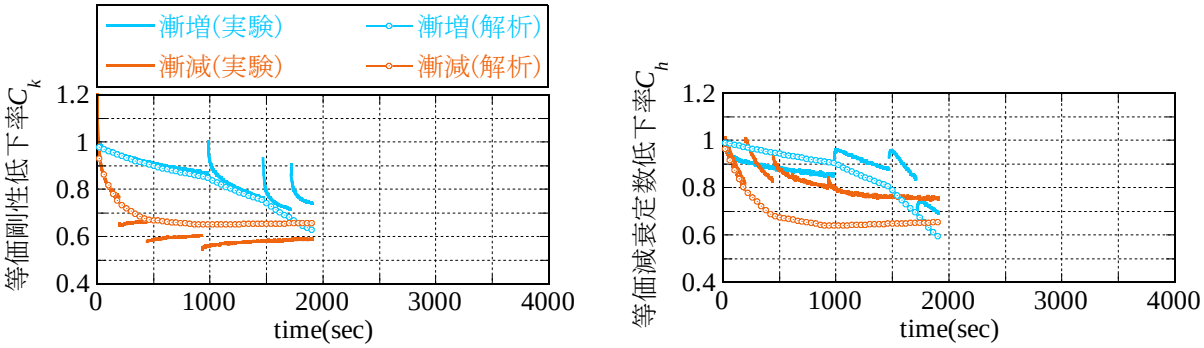
図 3.3.2-19　実験結果と解析結果の温度の時間推移比較



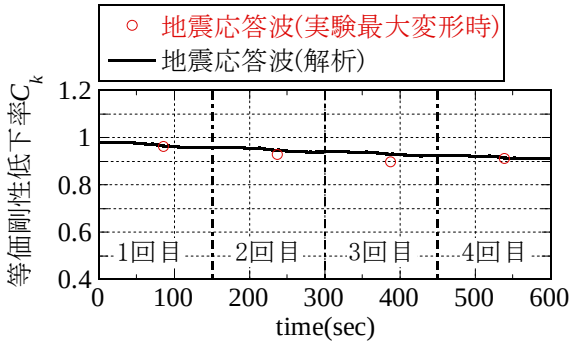
(a) 限界 1B、限界 2B、限界 3B の等価剛性・等価減衰定数の低下率推移



(b) 初期 0℃、初期 30℃の等価剛性・等価減衰定数の低下率推移



(c) 漸増、漸減の等価剛性・等価減衰定数の低下率推移



(d) 地震応答波の等価剛性の低下率推移

図 3.3.2-20　実験結果と解析結果の等価剛性・等価減衰定数の推移比較

(2) 解析条件

建物応答評価に用いる解析モデルは、高減衰ゴム系積層ゴムのみで構成される免震層を有する 1 質点剛体モデルとする。図 3.3.2-21 に、解析モデルの概念図を示す。免震層は、せん断ひずみ 200%時の等価剛性が約 4.0 秒となるよう設定する。表 3.3.2-5 に、解析モデルの諸元を示す。高減衰ゴム系積層ゴムの特性としては、繰返し特性を考慮しない復元力特性と、繰返し特性を考慮した復元力特性を設定し、繰返し特性の考慮の有無が応答値に影響を与えるか検討する。繰返し特性を考慮する場合、考慮しない場合とも修正バイリニアの履歴則は、(1.2.2)に示す除荷点のせん断ひずみを用いた履歴則とし、繰返し特性を考慮しない復元力モデルは(1.2.3)に示す温度による復元力特性値の変化を適用しないモデル、繰返し特性を考慮する復元力モデルは(1.2.3)に示す温度による復元力特性値の変化を適用したモデルとする。温度による特性変化を考慮するケースにおいて、初期温度は全て 20℃とする。入力地震動は、表 3.3.2-6 に示す 4 波を、1.0 倍、1.25 倍、1.5 倍と係数倍して入力する。

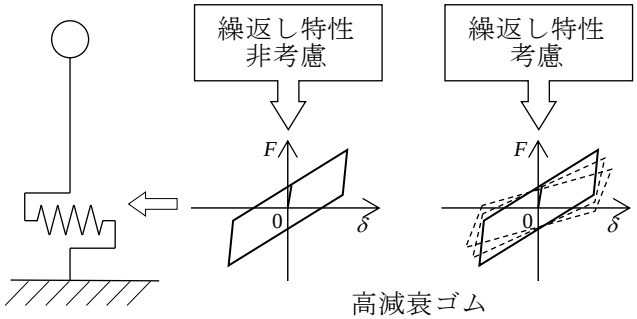


図 3.3.2-21　解析モデルイメージ

表 3.3.2-5 解析モデル諸元

想定建物	RC 造、10 階建て、基礎免震
上部構造重量	46,000kN
積層ゴム台数	12 台
積層ゴム直径(内径)	700mm (15mm)
ゴム層総厚	202.1mm
積層ゴム面圧	10.0N/mm2
γ=100%時等価周期	3.6 秒
γ=100%時等価周期	4.1 秒

表 3.3.2-6 入力地震動（加速度、速度、変位は最大値）

地震波	加速度 (cm/s^2)	速度 (cm/s)	変位 (cm)	継続時間 (s)
OSKH02(此花)	98.49	38.07	31.43	739.82
AIC003(津島)	199.4	26.78	21.62	739.82
SZO024(浜松)	576.9	40.08	21.13	739.82
KGIN(新宿)	42.11	21.60	26.29	739.82

(3) 解析結果

表 3.3.2-7 に、解析結果の最大応答値一覧を示す。応答加速度は、1.0 倍入力で 36～76Gal、1.5 倍入力で 50～129Gal 程度の応答となっている。免震層変位は、OSKH02 入力のケースが最も大きく、1.0 倍入力で 308mm(γ=152%)、1.5 倍入力で 549mm(γ=272%)と大きな変形を示している。KGIN 入力のケースでは免震層変位は小さく、1.0 倍入力で 64mm(γ=32%)、1.5 倍入力で 123mm(γ=61%)程度である。繰返し特性を考慮しない解析結果(非考慮)と、繰返し特性を考慮した解析結果(考慮)の最大応答加速度に差はなく、ほぼ同じ値示している。免震層変位についても、繰返し特性を考慮した方がわずかに大きな変位を示すが、その差は 1～5%と非常に小さい。

表 3.3.2-8 に、解析結果の累積値および積層ゴムの最高温度の一覧を示す。累積エネルギー換算速度 V_E は、総入力エネルギー(加振終了時の累積エネルギー)の 95%の値で算出している。累積変形量は、累積エネルギーが総入力エネルギーの 95%に達した時点の値としている。解析結果の累積変形量は、OSKH02、AIC003、SZO024 の 1.0 倍入力時は 12～13m 程度、1.5 倍入力時は 18～23m 程度である。KGIN 入力時の累積変形量は、1.0 倍入力時で 5m 程度、1.5 倍入力時で 9m 程度と他の 3 波に比較して小さい。累積エネルギー換算速度は、OSKH02、AIC003、SZO024 の 1.0 倍入力時で 2.0m/sec 弱、KGIN1.0 倍入力時で 0.7m/sec 程度である。OSKH02 の 1.5 倍入力時では、累積エネルギー換算速度は 3.0m/sec を超える。繰返し特性を考慮しない解析結果(非考慮)と、繰返し特性を考慮した解析結果(考慮)の累積値に大きな差はなく、ほぼ同じ値となっている。累積変形量は、繰返し特性を考慮した方がわずかに大きな値を示すが、その差は 1～5%程度である。積層ゴムの最高温度は、最も累積吸収エネルギーの大きい OSKH02 の 1.5 倍入力時でも 25.9℃と、初期値の 20℃から 6℃程度の上昇にとどまっている。KGIN 入力のケースでは、1.5 倍入力時でも積層ゴムの温度は初期値の 20℃からほとんど上昇していない。従って、繰返し特性を考慮した場合でも、復元力特性値はほとんど変化せず、繰返し特性考慮の有無による応答の差が現れない結果となっている。

図 3.3.2-22～3.3.2-25 に、繰返し特性を考慮しない解析結果と、繰返し特性を考慮した解析結果の免震層のせん断応力度－ひずみ関係を比較して示す。繰返し特性を考慮した解析においても、積層ゴムの温度上昇がわずかであり、復元力特性値の変化がほとんど生じていないため、繰返し特性考慮・非考慮の履歴ループともほぼ同様であり、明確な差は現れていない。

図 3.3.2-26～3.3.2-29 に、解析結果の応答加速度、免震層変位、累積変形量、累積エネルギー換算速度、積層ゴム温度、等価剛性低下率 C_K、等価減衰定数低下率 C_H の時刻歴推移を示す。応答加速度、免震層変位、累積変形量、累積エネルギー換算速度については、繰返し特性非考慮と繰返し特性考慮の解析結果を比較して示す。積層ゴム温度、等価剛性低下率 C_K、等価減衰定数低下率 C_H については、繰返し特性考慮の解析結果のみを示す。入力地震動 4 波の継続時間は 700 秒以上あるが、応答変位波形において変形の大きな時間は、OSKH02、AIC003、SZO024 入力時で 100～150 秒間である。KGIN 入力時の応答変位波形では、主要な揺れが 3 つに分かれているのが明確に見てとれ、変形の大きな時間は 200 秒間程度である。累積エネルギー換算速度、および積層ゴム温度の時刻歴より、エネルギーの吸収は変形の大きな主要動部分のみで行われ、これにより積層ゴム温度が上昇している。主要動終了後はエネルギー吸収がほとんどなく、積層ゴム温度は徐々に低下している。また、等価剛性低下率 C_K、等価減衰定数低下率 C_H の時刻歴推移より、等価剛性および等価減衰定数は、積層ゴム温度の上昇に伴って低下し、主要動が終了し積層ゴム温度が低下し始めると同時に回復し始めている。ただし、最も温度上昇

が大きかったOSKH02の1.5倍入力時(図3.3.2-26(b))においても、C_KおよびC_Hは0.9を下回ることはなく、復元力特性の大きな変化は生じなかった。従って、入力地震動4波の1.0～1.5倍入力のどのケースにおいても、繰返し特性考慮の有無による応答の違いはほとんど生じなかった。図3.3.2-26(b)に示す、OSKH02の1.5倍入力時に、140秒付近で最大変形を示した後の免震層変位が、繰返し特性を考慮した解析結果の方がわずかに大きくなっているのが見てとれる程度である。

以上より、本検討で用いた4つの入力地震動に対しては、1.5倍まで係数倍した入力においても、積層ゴムの温度上昇は最大で6℃程度、高減衰ゴム系積層ゴムの繰返しによる特性変化は1割以下に留まり、建物の応答にはほとんど影響を与えないことが確認された。ただし、今回検討に使用した高減衰ゴム系積層ゴムの解析モデルは、直径250mmの縮小試験体の実験結果を基に作成したものであり、実大サイズにおいてはゴム体積が大きくなるために放熱しにくい等、放熱特性が変わる可能性がある。その場合、今回検討結果よりも繰返しによる特性変化が大きくなり、建物応答への影響が現れてくることが考えられる。

表 3.3.2-7 応答解析結果の最大応答値一覧（入力加速度、各応答値は最大値）

入力			応答					
地震波	倍率	加速度	質点加速度(Gal)		免震層変位(mm)		せん断力係数	
		(Gal)	非考慮	考慮	非考慮	考慮	非考慮	考慮
OSKH02	1.00	98.49	76.28	76.03 (1.00)	304.64	308.31 (1.01)	0.0778	0.0776 (1.00)
	1.25	123.11	97.30	96.74 (0.99)	426.45	433.05 (1.02)	0.0993	0.0987 (0.99)
	1.50	147.73	128.83	129.30 (1.00)	540.36	548.66 (1.02)	0.1315	0.1319 (1.00)
AIC003	1.00	199.40	54.82	54.69 (1.00)	153.34	157.92 (1.03)	0.0559	0.0558 (1.00)
	1.25	249.25	68.43	68.73 (1.00)	255.56	266.95 (1.04)	0.0698	0.0701 (1.00)
	1.50	299.10	84.38	84.72 (1.00)	352.24	368.68 (1.05)	0.0861	0.0865 (1.00)
SZO024	1.00	576.78	71.69	70.79 (0.99)	276.65	279.92 (1.01)	0.0732	0.0722 (0.99)
	1.25	720.98	85.96	83.97 (0.98)	361.47	363.91 (1.01)	0.0877	0.0857 (0.98)
	1.50	865.17	100.63	98.07 (0.97)	444.24	449.92 (1.01)	0.1027	0.1001 (0.97)
KGIN	1.00	42.11	36.49	36.49 (1.00)	64.15	64.16 (1.00)	0.0372	0.0372 (1.00)
	1.25	52.64	43.70	43.68 (1.00)	88.87	88.91 (1.00)	0.0446	0.0446 (1.00)
	1.50	63.17	50.34	50.27 (1.00)	122.26	123.18 (1.01)	0.0514	0.0513 (1.00)

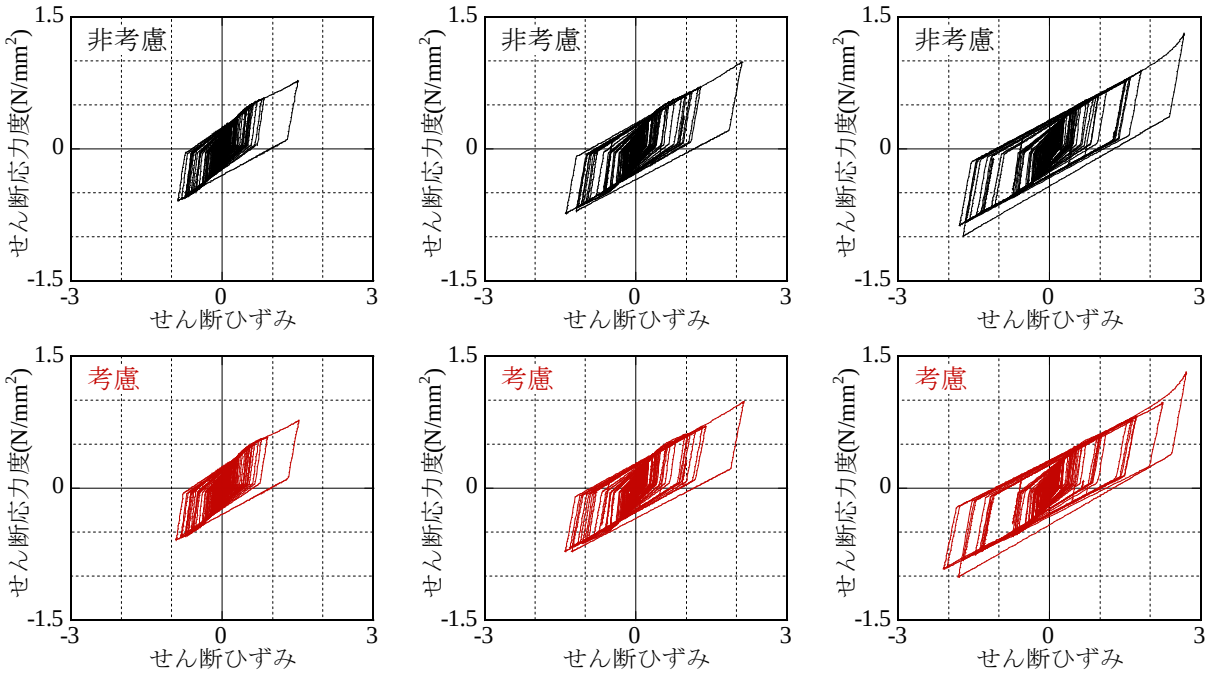
※(　)内の数字は、繰返し特性考慮の結果の非考慮の結果に対する比 (考慮／非考慮)。

表 3.3.2-8 応答解析結果の累積値および最高温度一覧

入力			応答				
地震波	倍率	加速度	累積変形量(m)		累積 V_E(m/sec)		温度(℃)
		(Gal)	非考慮	考慮	非考慮	考慮	考慮
OSKH02	1.00	98.49	13.20	13.43 (1.02)	1.95	1.96 (1.01)	21.95
	1.25	123.11	18.15	18.69 (1.03)	2.54	2.56 (1.01)	23.64
	1.50	147.73	23.44	24.57 (1.05)	3.13	3.19 (1.02)	25.91
AIC003	1.00	199.40	12.02	11.89 (0.99)	1.65	1.65 (1.00)	21.30
	1.25	249.25	14.27	14.36 (1.01)	1.99	1.99 (1.00)	22.07
	1.50	299.10	17.85	18.40 (1.03)	2.36	2.38 (1.01)	23.02
SZO024	1.00	576.78	13.15	13.20 (1.00)	1.94	1.92 (0.99)	21.94
	1.25	720.98	16.78	16.79 (1.00)	2.30	2.28 (0.99)	22.83
	1.50	865.17	20.06	21.15 (1.05)	2.64	2.61 (0.99)	23.75
KGIN	1.00	42.11	5.18	5.18 (1.00)	0.74	0.74 (1.00)	20.05
	1.25	52.64	6.95	6.95 (1.00)	0.99	0.99 (1.00)	20.13
	1.50	63.17	8.71	8.74 (1.00)	1.25	1.25 (1.00)	20.35

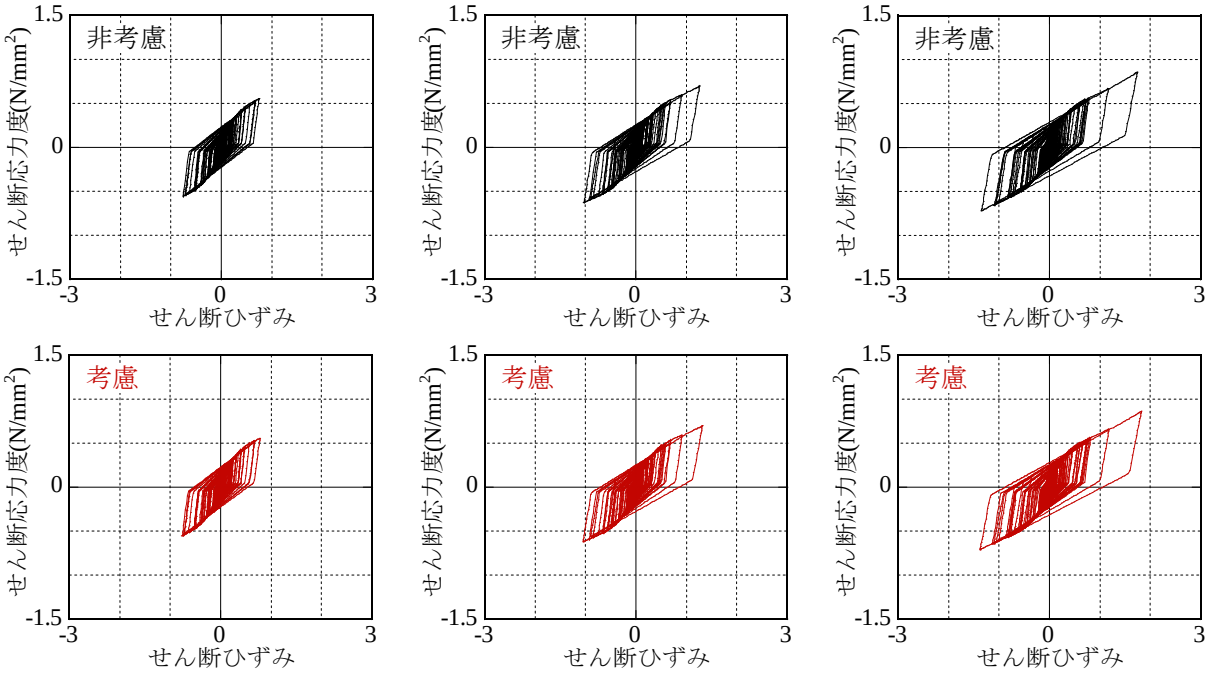
※累積エネルギーは、加振終了時の 95%の値。

※累積変形量は、累積エネルギー95%時の値。



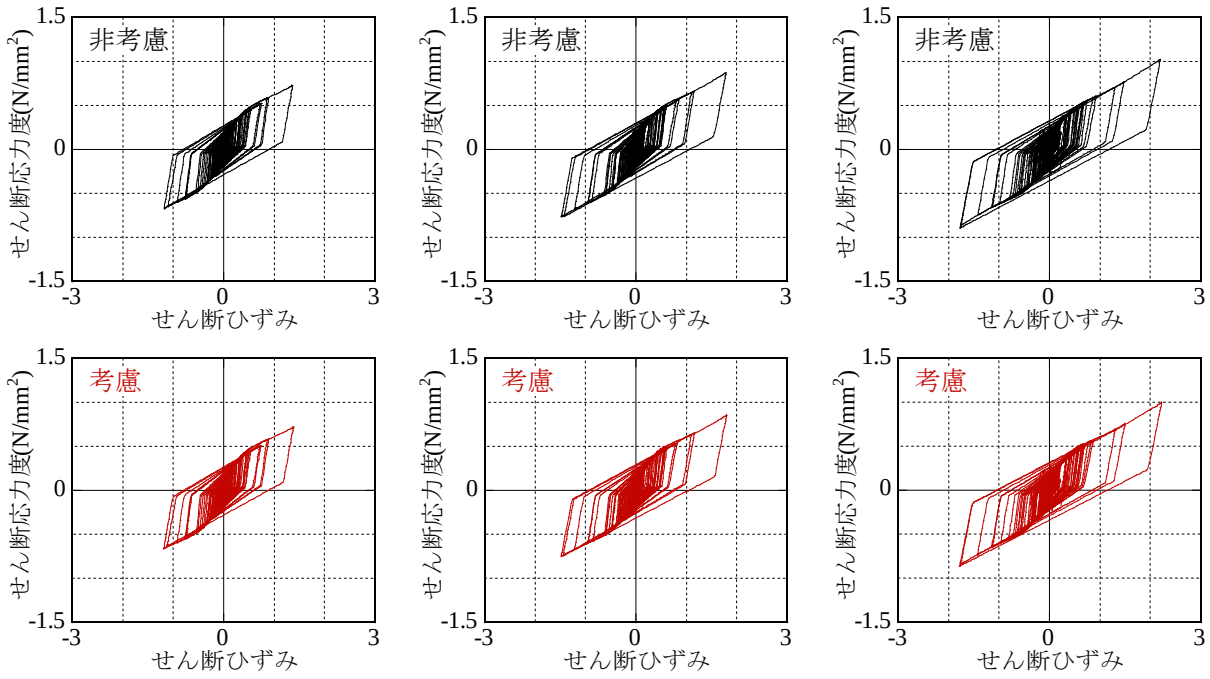
(a) 1.0 倍入力　　(b) 1.25 倍入力　　(c) 1.5 倍入力

図 3.3.2-22　OSKH02 入力時の免震層せん断応力度－ひずみ関係



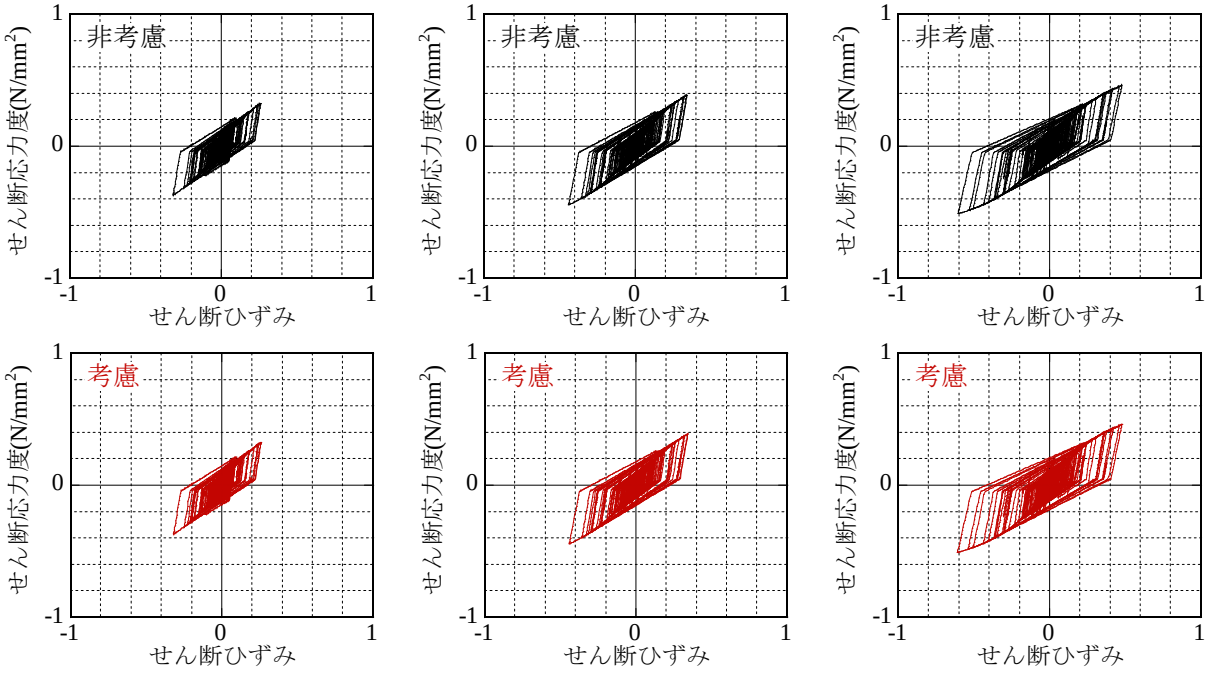
(a) 1.0 倍入力　　(b) 1.25 倍入力　　(c) 1.5 倍入力

図 3.3.2-23　AIC003 入力時の免震層せん断応力度－ひずみ関係



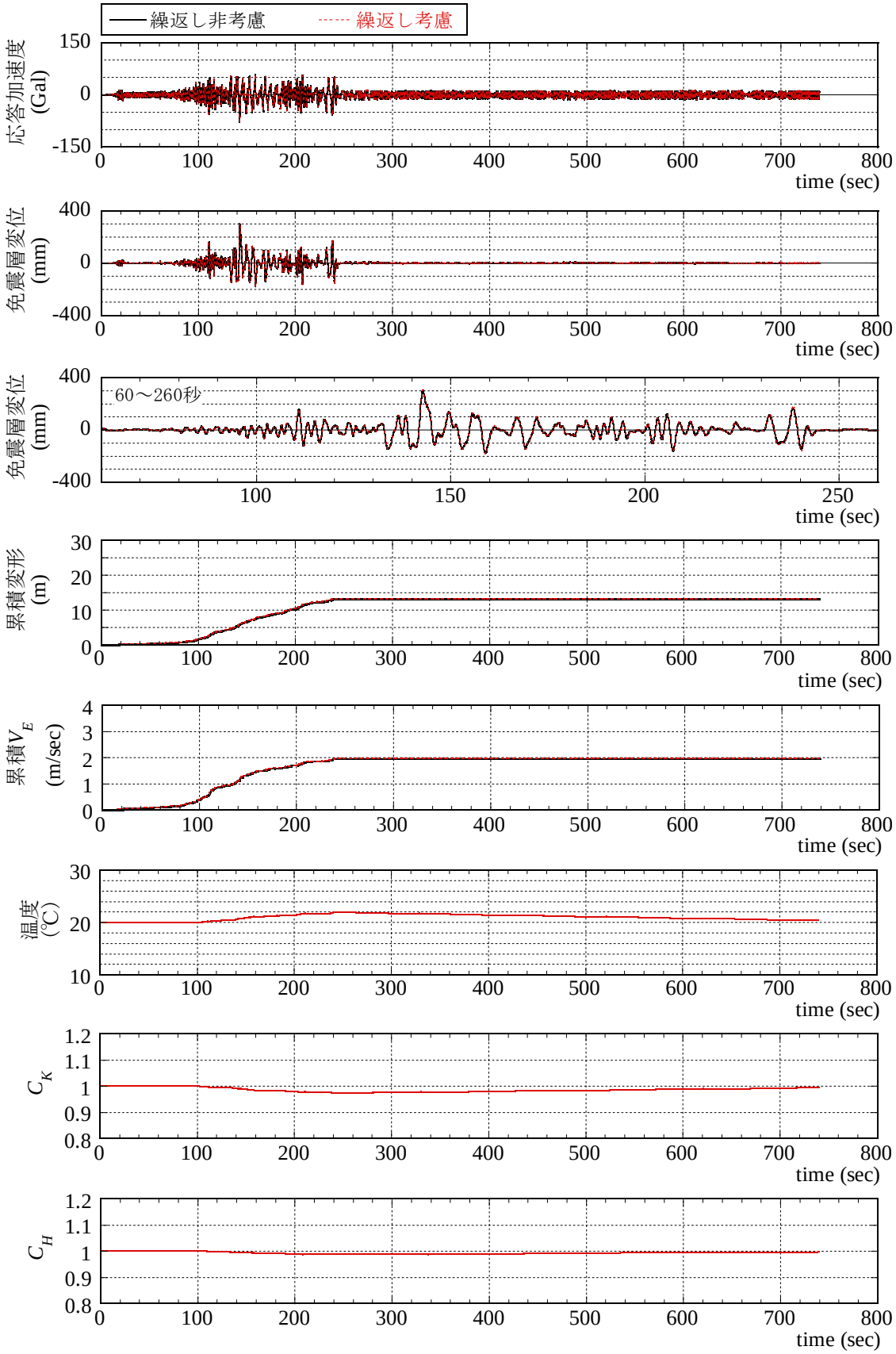
(a) 1.0 倍入力　(b) 1.25 倍入力　(c) 1.5 倍入力

図 3.3.2-24　SZO024 入力時の免震層せん断応力度－ひずみ関係



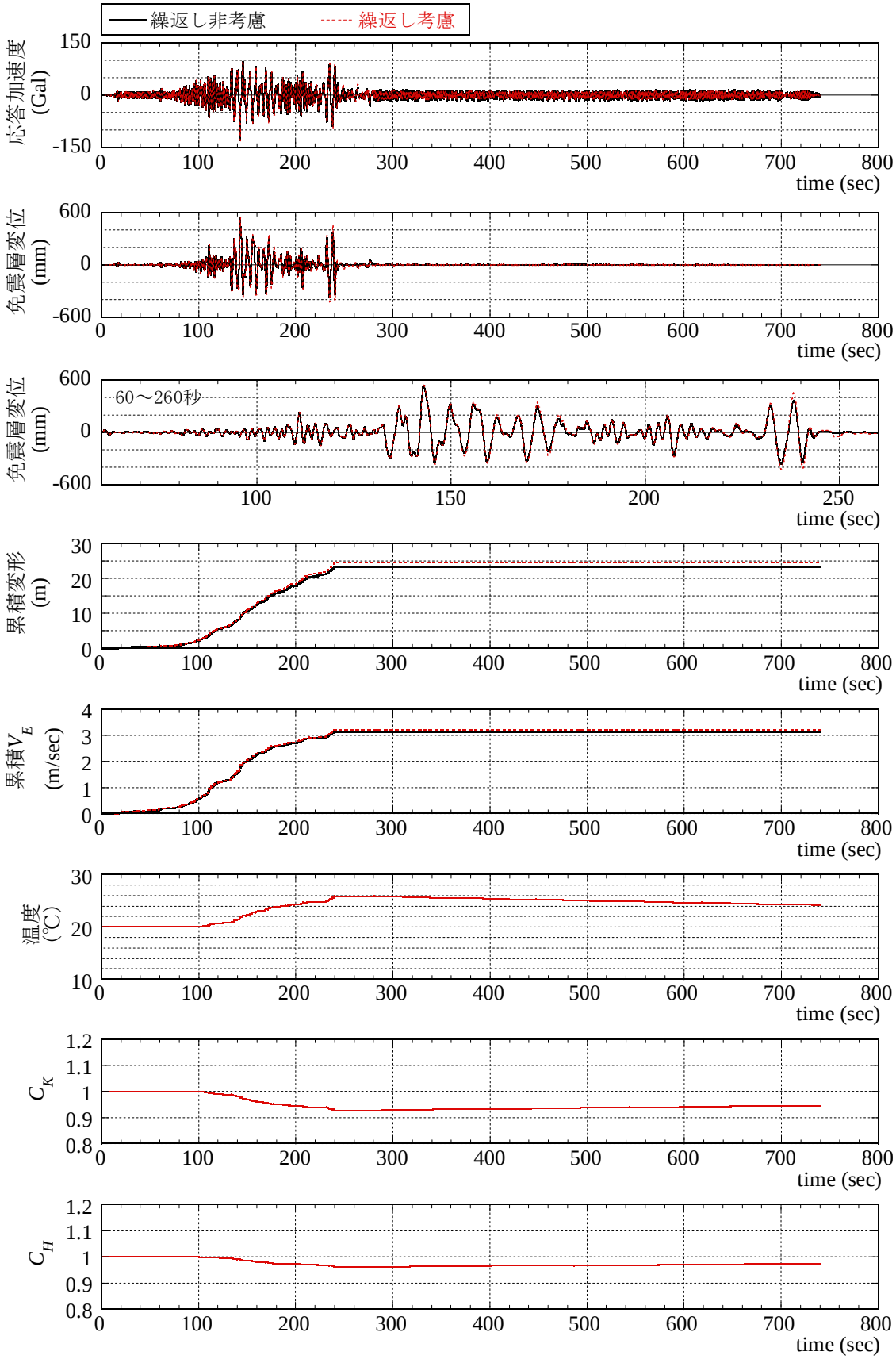
(a) 1.0 倍入力　(b) 1.25 倍入力　(c) 1.5 倍入力

図 3.3.2-25　KGIN 入力時の免震層せん断応力度－ひずみ関係



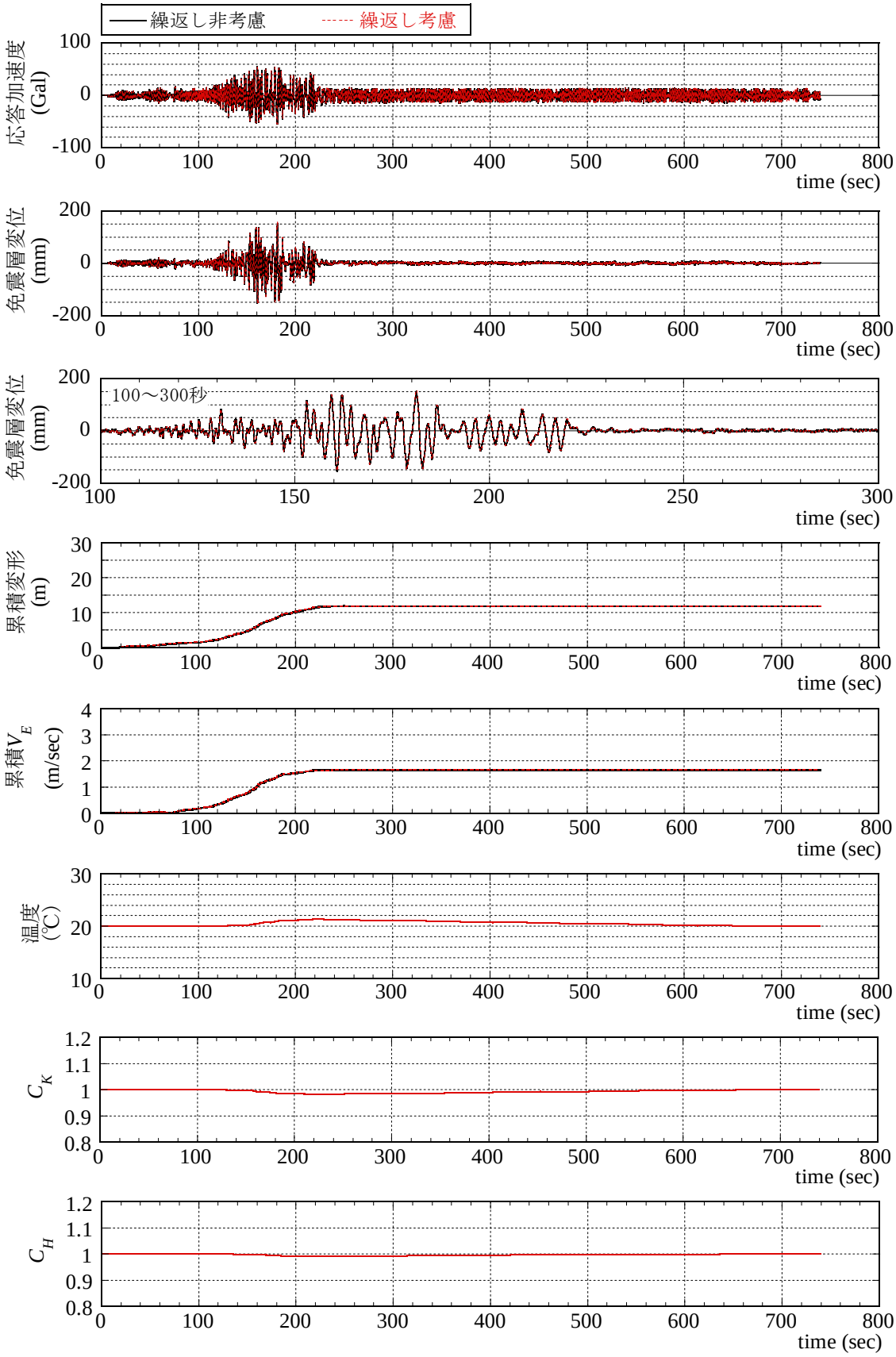
(a) 1.0 倍入力時

図 3.3.2-26　OSKH02 入力時の解析結果の時刻歴推移



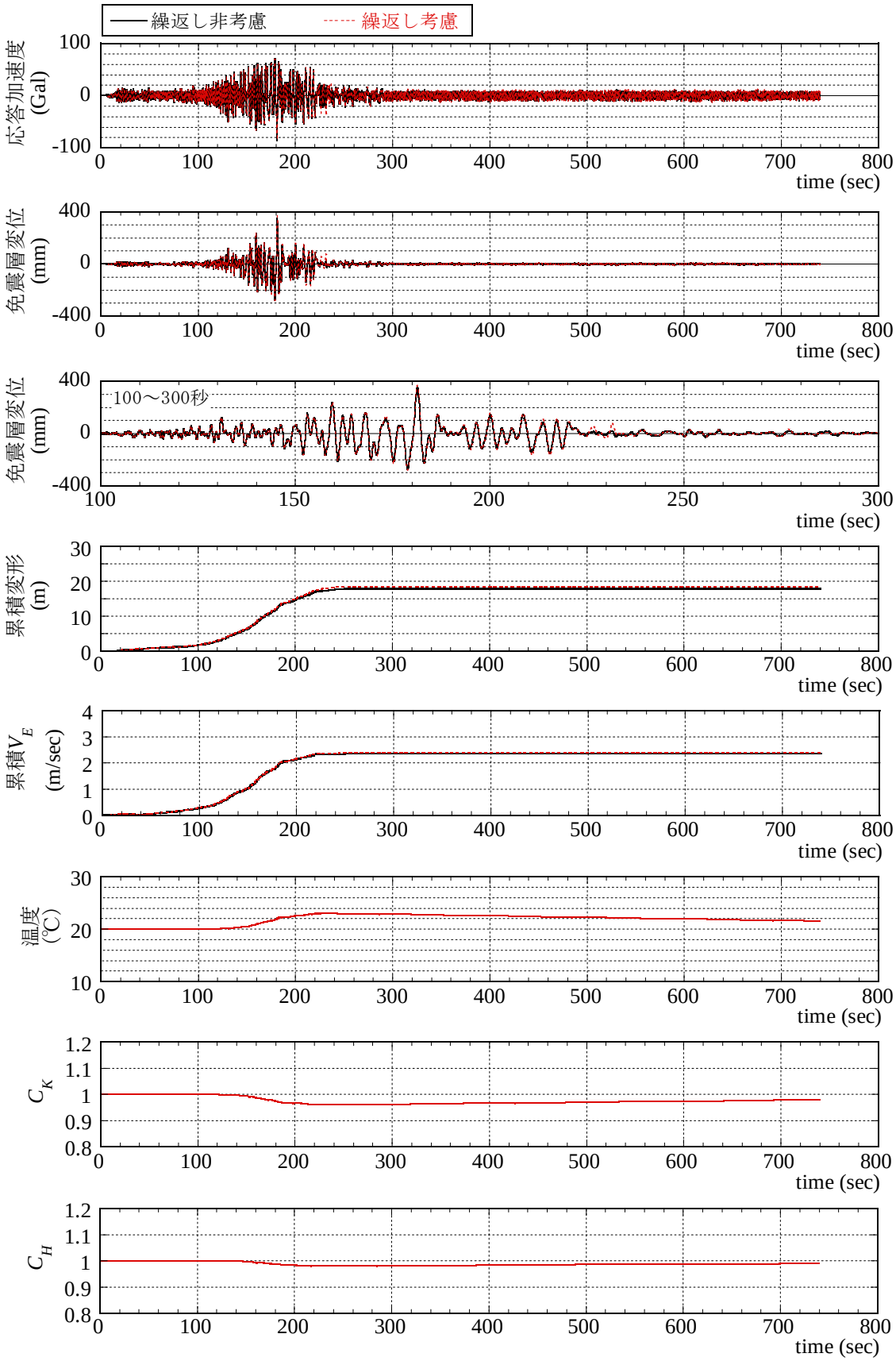
(b) 1.5 倍入力時

図 3.3.2-26　OSKH02 入力時の解析結果の時刻歴推移



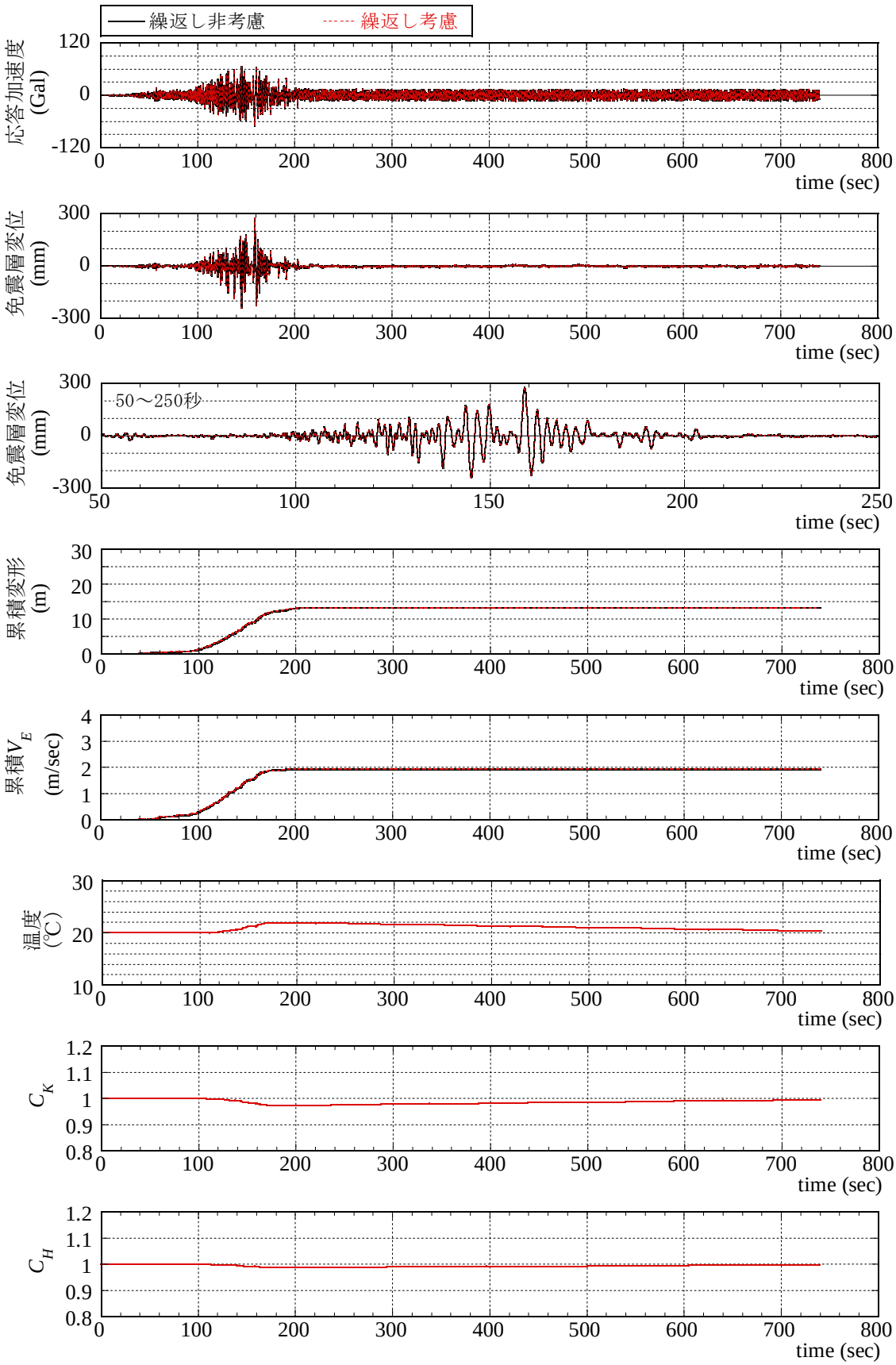
(a) 1.0 倍入力時

図 3.3.2-27　AIC003 入力時の解析結果の時刻歴推移



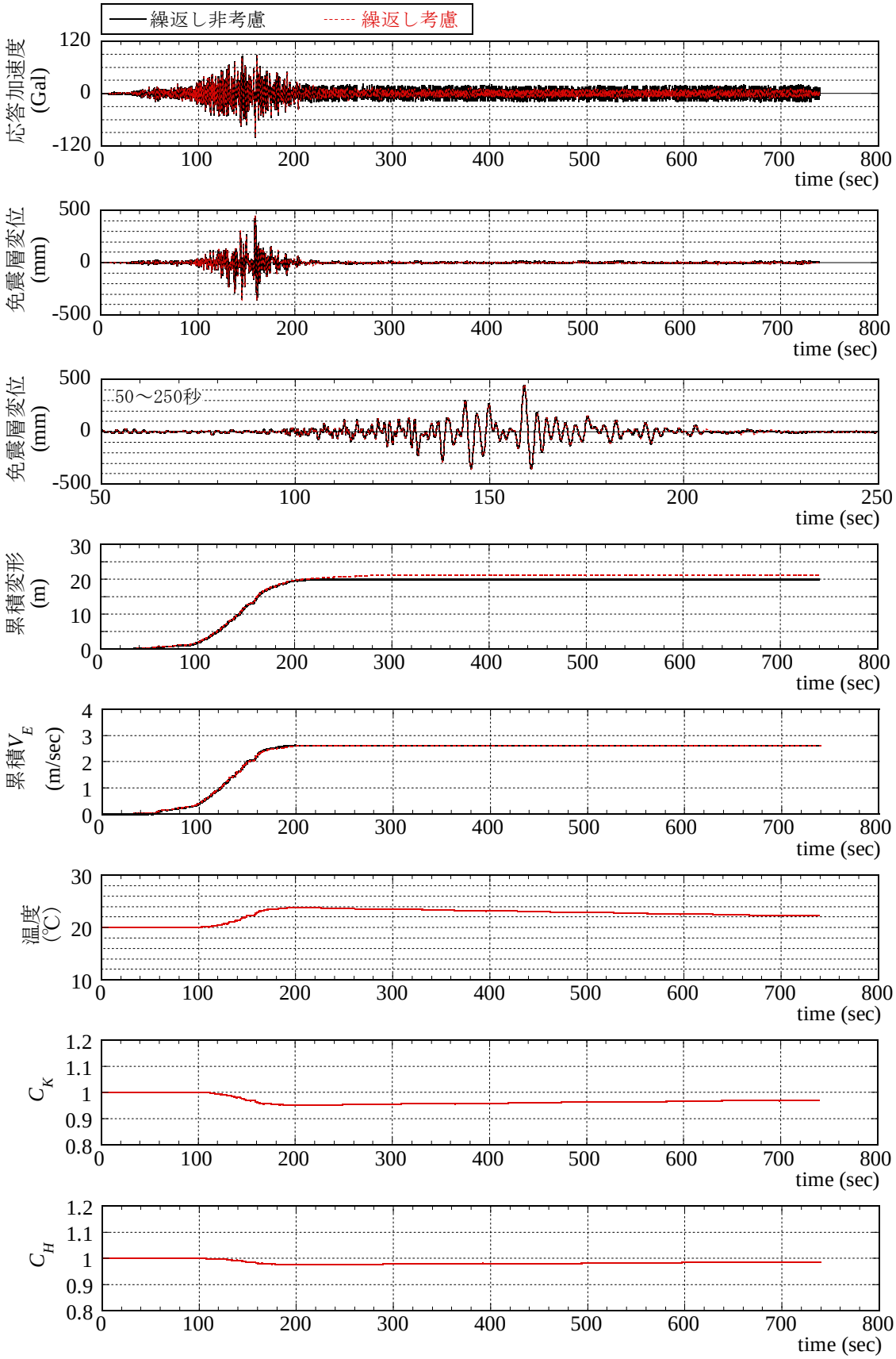
(b) 1.5 倍入力時

図 3.3.2-27　AIC003 入力時の解析結果の時刻歴推移



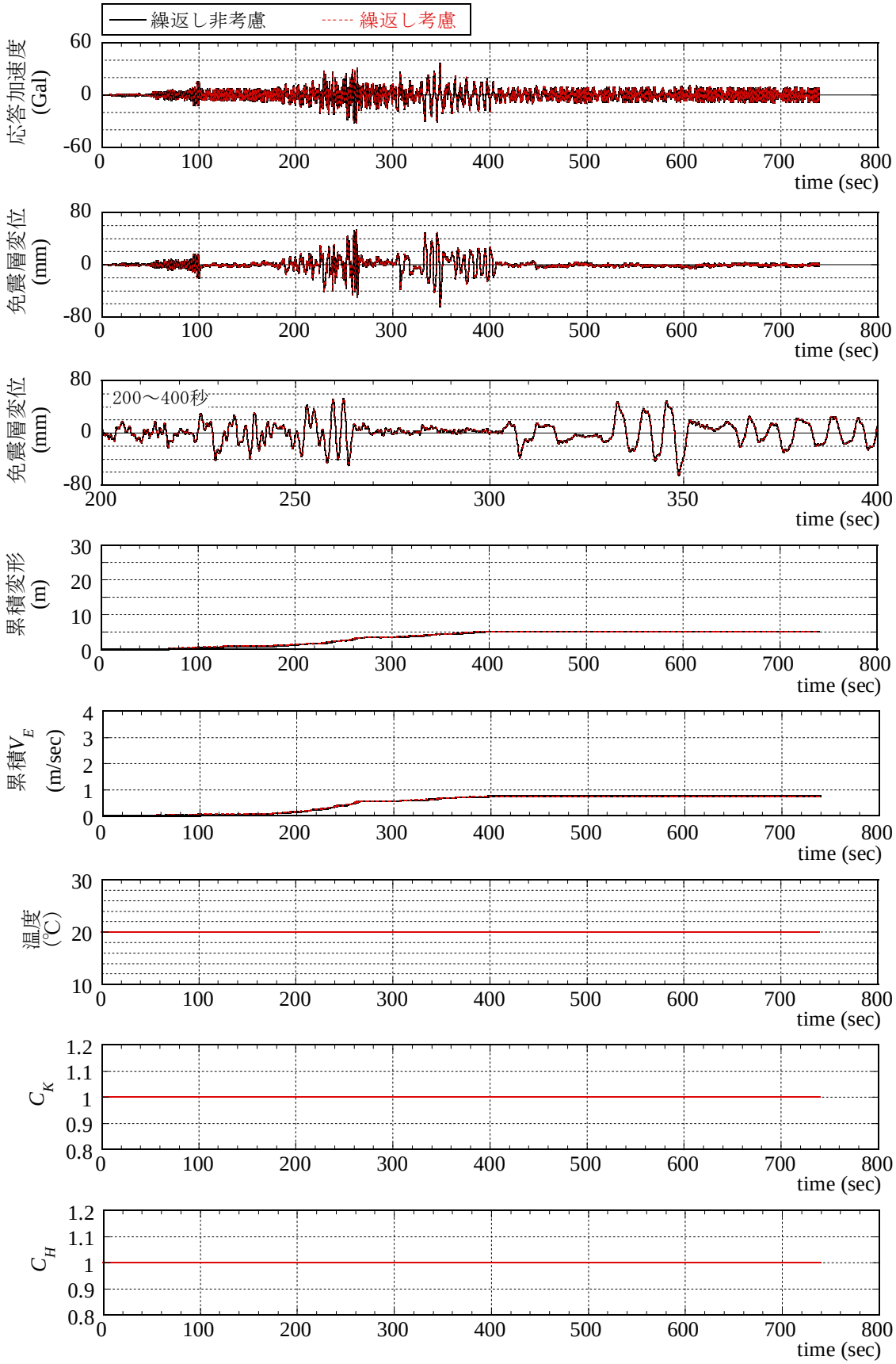
(a) 1.0 倍入力時

図 3.3.2-28　SZO024 入力時の解析結果の時刻歴推移



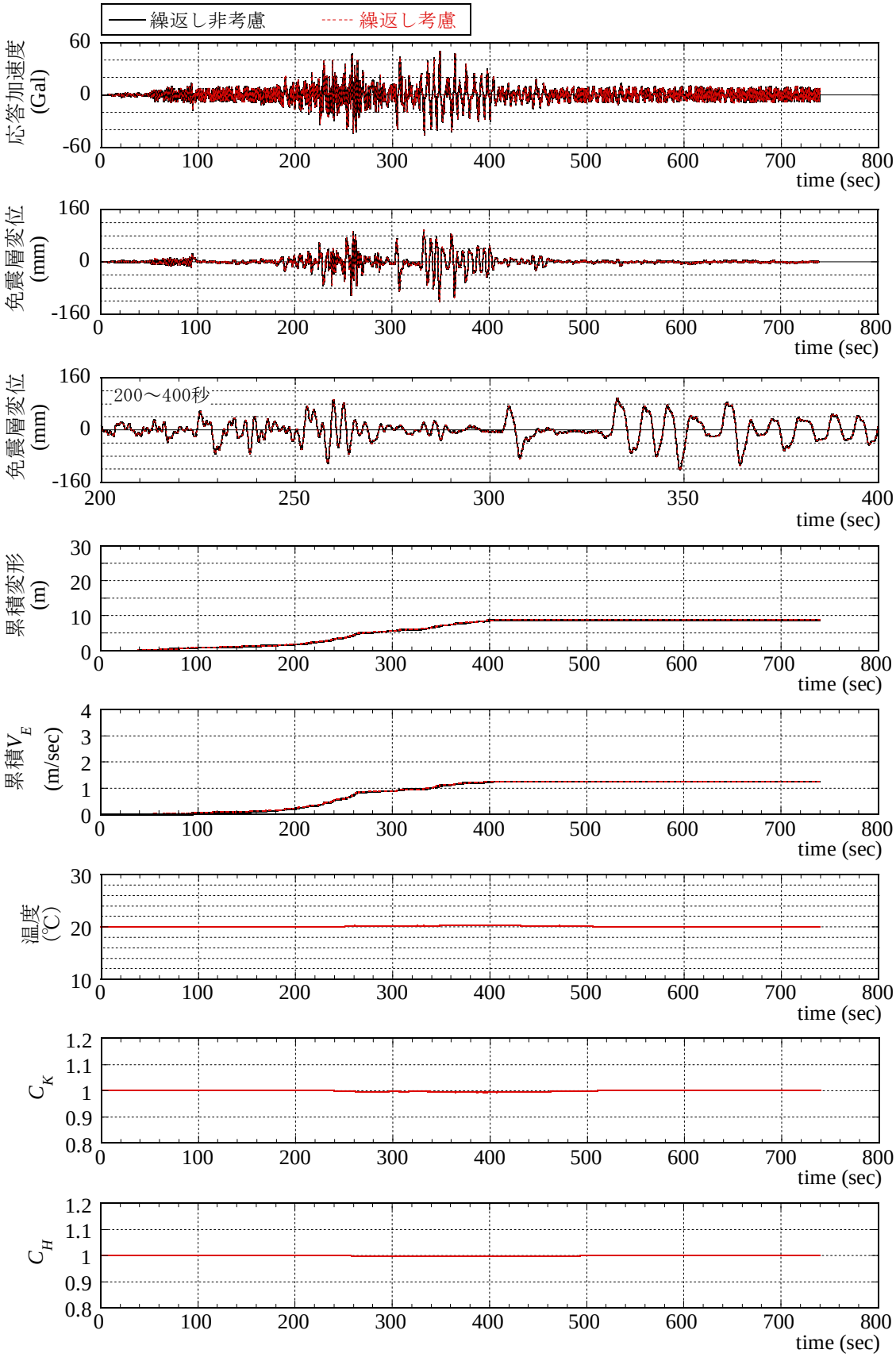
(b) 1.5 倍入力時

図 3.3.2-28　SZO024 入力時の解析結果の時刻歴推移



(a) 1.0 倍入力時

図 3.3.2-29　KGIN 入力時の解析結果の時刻歴推移



(b) 1.5 倍入力時

図 3.3.2-29　KGIN 入力時の解析結果の時刻歴推移

(4) まとめ

高減衰ゴム系積層ゴムの繰返し特性が、免震建物応答に与える影響を把握するため、平成 22 年度に実施した縮小試験体の多数回繰返し実験の結果を基に、繰返し特性を考慮した復元力モデルを作成し、これを用いて 1 質点モデルによる地震応答解析を行った。

高減衰ゴム系積層ゴムの繰返し特性を考慮した復元力モデルとして、積層ゴムの代表温度を評価指標として復元力特性値を変化させる解析モデルを作成した。解析における積層ゴム温度は、荷重変形関係から求められる履歴吸収エネルギーから、放熱による損失エネルギーを差し引いた有効エネルギーが温度上昇に寄与すると仮定して、有効エネルギーを積層ゴムの熱容量で除して求めることとした。また、漸減入力を含むランダム波に対応可能なよう、修正バイリニアモデルの履歴則について、除荷点のせん断ひずみを用いた履歴則を提案し、適用した。作成した復元力モデルは、縮小試験体の多数回繰返し実験結果を良好に再現し、その妥当性を確認した。

上記の繰返し特性を考慮した復元力モデルを用いて、1 質点モデルによる地震応答解析を実施した。温度による特性変化を適用しない復元力モデルによる応答解析も実施し、繰返し特性考慮の有無による応答値の違いを検討した。解析結果より、本検討で用いた 4 波の入力地震動に対しては、1.5 倍まで係数倍した入力においても、高減衰ゴム系積層ゴムの温度上昇は最大で 6℃程度、繰返しによる特性変化は 1 割以下に留まり、温度による特性変化を考慮した解析結果、および考慮しない解析結果ともほぼ同様の応答値を示した。従って、今回検討の地震動については、高減衰ゴム系積層ゴムの繰返し特性は、建物応答にほとんど影響を与えないことを確認した。

ただし、今回検討に使用した高減衰ゴム系積層ゴムの解析モデルは、直径 250mm の縮小試験体の実験結果を基に作成したものであり、実大サイズにおいてはゴム体積が大きくなるために放熱しにくい等、放熱特性が変わる可能性がある。その場合、今回検討結果よりも繰返しによる特性変化が大きくなると考えられる。また、水平 2 方向同時入力時においては、履歴吸収エネルギーの評価の仕方や、繰返し特性への影響が異なってくると考えられる。これらについては、平成 24 年度実施予定の実大実験の結果を基に、必要であれば復元力モデルを修正し、再検討を行う必要がある。また、今回検討に使用した復元力モデルはバイリニア型であり、大変形領域のハードニングは考慮していない。本検討では、積層ゴムのせん断ひずみが 250%を超えるケースは OSKH02 の 1.5 倍入力時の 1 ケースのみであり、ハードニングの影響はほとんどないと考えられるが、さらに大変形の応答値を検討する場合は、ハードニングを考慮した復元力モデルによる検討が必要と考えられる。

参考文献

3.3.2-1) 株式会社ブリヂストン：高減衰ゴム系積層ゴム支承(X0.6R)技術資料

3.3.3 天然ゴム系積層ゴム＋鋼材ダンパー

免震材料として天然ゴム系積層ゴムと鋼材ダンパーを適用した免震建築物を対象として、長周期地震動による地震応答解析を実施した。鋼材ダンパーについては第Ⅲ部第 2 章で応答評価に用いた設計モデル（バイリニアモデル）によるケースと、第Ⅲ部第 1 章に示した実験結果をトリリニアモデルでモデル化したケースで地震応答解析を実施し、両者の結果を比較した。

(1) 鋼材ダンパー実験結果のモデル化

第Ⅲ部第 1 章で示した鋼材ダンパー（NSUD55x4）の実験結果を基に、特に小振幅時の荷重変形関係の精度を向上させるため、トリリニアモデル及び菊地らの提案モデル（多項式モデル）[3.3.3-1)]を用いたモデル化ついて検討する。

表 3.3.3-1 に昨年の実験ケース一覧を、図 3.3.3-1～図 3.3.3-3 に実験結果とトリリニアモデルによるモデル化の荷重変形関係及び吸収エネルギーを、図 3.3.3-4～図 3.3.3-5 に実験結果と菊地らの提案モデル（多項式モデル）によるモデル化の荷重変形関係及び吸収エネルギーを示す。

表 3.3.3-1　実験ケース

試験体番号	載荷方法
1	定振幅(±100mm)で繰り返し
2	定振幅(±400mm)で繰り返し
3	変動振幅Ａ(±100mm×38 回＋±200mm×5 回＋±300mm×3 回＋±400mm×1 回）で繰り返し
4	変動振幅Ｂ（±100mm×3 回＋±200mm×2 回＋±300mm×1 回＋±400mm×2 回）で繰り返し

第Ⅲ部第 1 章で示した実験結果を用いた鋼材ダンパーのモデル化についての検討の結果、トリリニアモデル及び多項式モデルともに実験結果の荷重変形関係や吸収エネルギー量についてよく表現できることがわかった。このため、以下に検討を実施する地震応答解析については取り扱いが簡易なトリリニアモデルを用いて検討を実施する。

A）トリリニアモデル

トリリニアモデルの第一・第三勾配は、図 3.3.3-1 に示すようにそれぞれ設計バイリニアモデルの第一・第二勾配を用い、トリリニアモデル第二勾配は、第一勾配に対して 1/6 とした。具体的な値は下記の通りである。

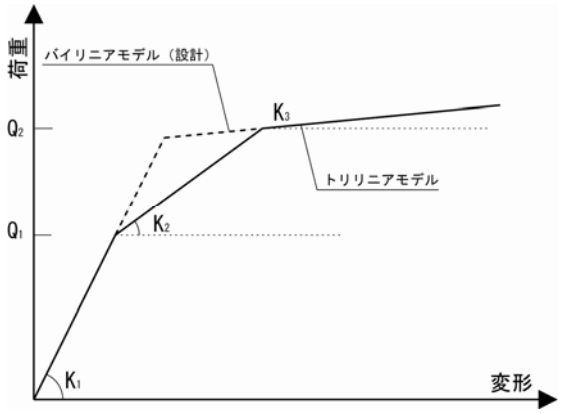


図 3.3.3-1　トリリニアモデル概念図

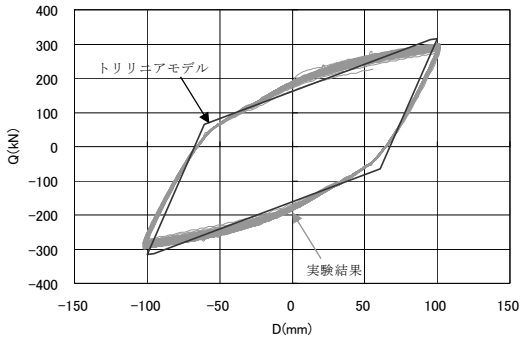
K1 = 9600kN/m

K2 = 1600kN/m (=1/6 K1)

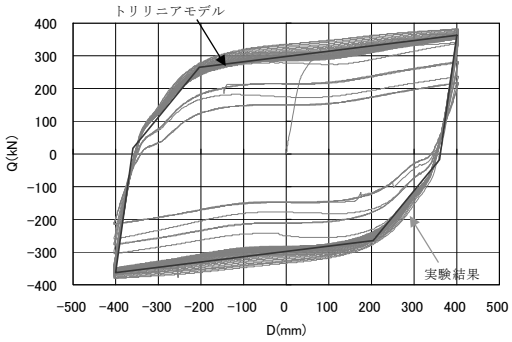
K3 = 160kN/m　(=1/60 K1)

Q1 = 190kN

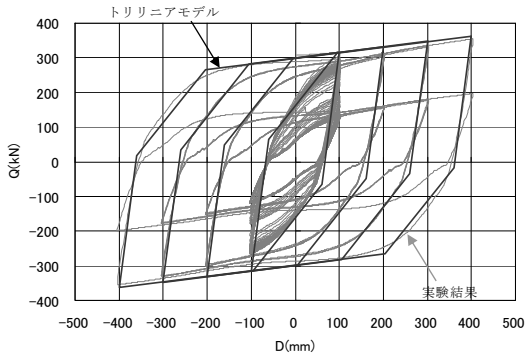
Q2 = 315kN



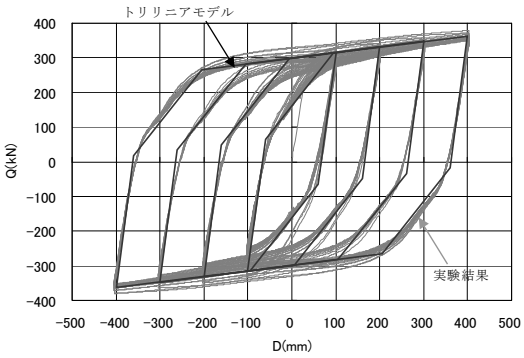
試験体１



試験体２

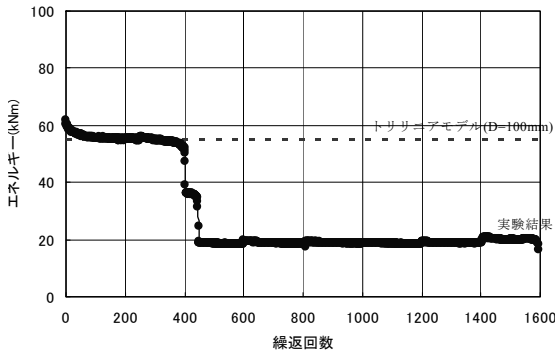


試験体３

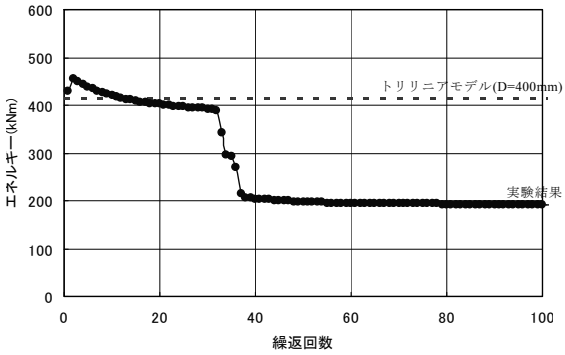


試験体４

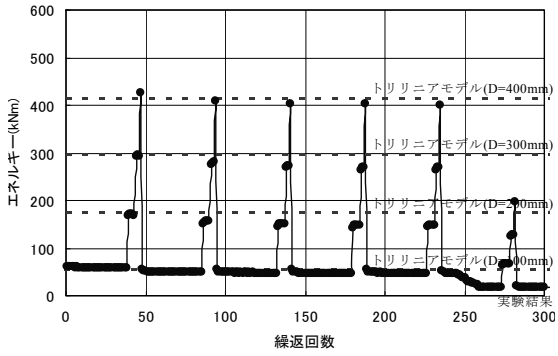
図 3.3.3-2　荷重変形関係の比較（実験―トリリニアモデル）



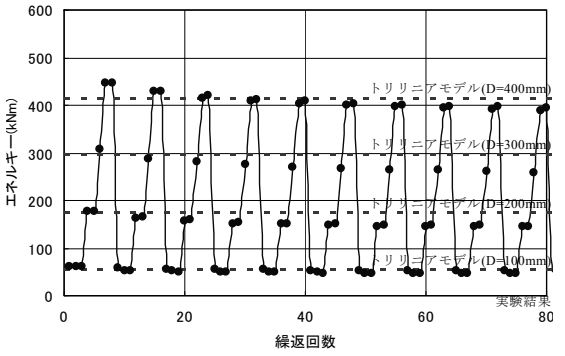
試験体１



試験体２



試験体３



試験体４

図 3.3.3-3　エネルギーの比較（実験―トリリニアモデル）

Ｂ）菊地らの提案モデル（多項式モデル）

・菊地[3.3.3-1)]らにより、鋼材ダンパー（Ｕ型ダンパーNSUD55x6）に対するモデル化について検討されている。第Ⅲ部第 1 章で示した実験は NSUD55x4 を用いて行ったため、K_{eq} の評価式のみダンパー本数を考慮して 4/6 倍することにより補正する。

・以下に復元力パラメータの評価式を示す。ここに、X はダンパーの変形(m)である。

$$
\begin{aligned}
K_{eq} &= 0.633X^{-0.571}(MN/m) && (X \le 0.5)\\
&= 2.53 - 3.95X + 2.35X^2(MN/m) && (0.5 < X \le 0.9)\\
h_{eq} &= -0.0582 + 4.22X - 13.7X^2 + 16.6X^3 && (X \le 0.2)\\
&= 0.132 + 1.65X - 2.47X^2 + 1.10X^3 && (0.2 < X \le 0.9)\\
u &= -0.506 + 20.6X - 111X^2 + 214X^3 && (X \le 0.1)\\
&= 0.257 + 5.28X - 14.3X^2 + 15.6X^3 - 6.22X^4 && (0.1 < X \le 0.9)\\
n &= 1.0 && (X \le 0.2)\\
&= 12.4X - 1.48 && (0.2 < X \le 0.9)
\end{aligned}
$$

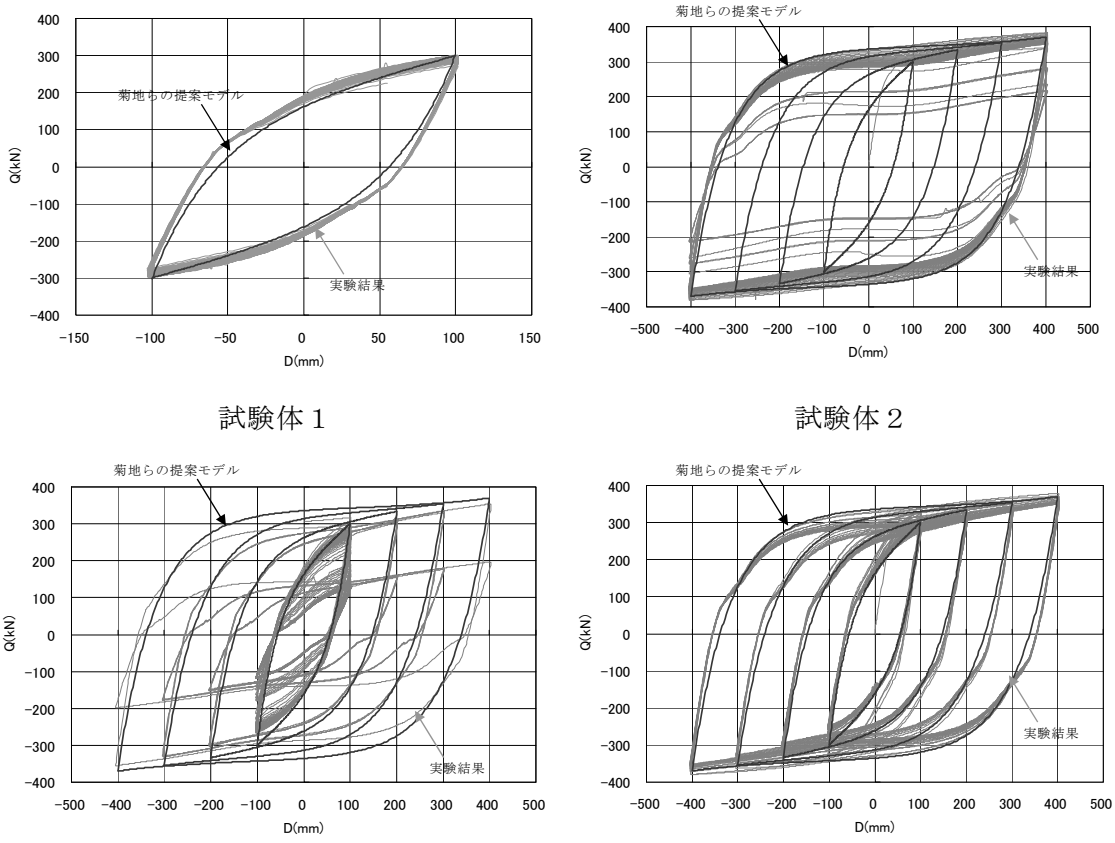
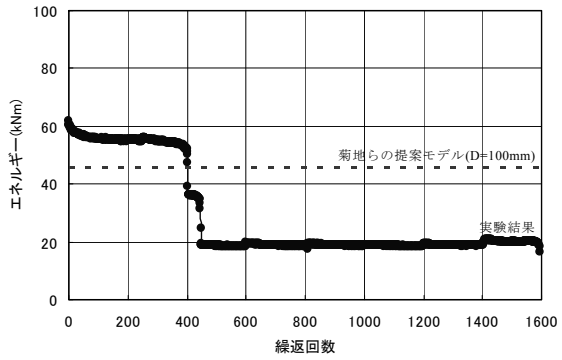
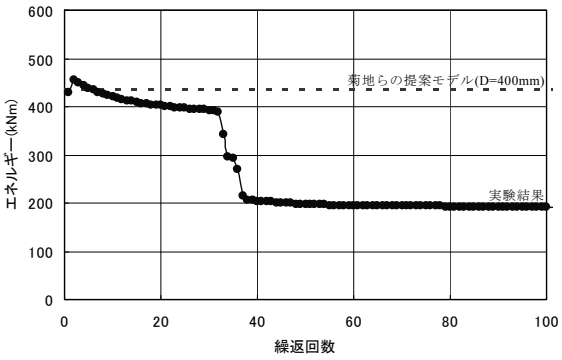


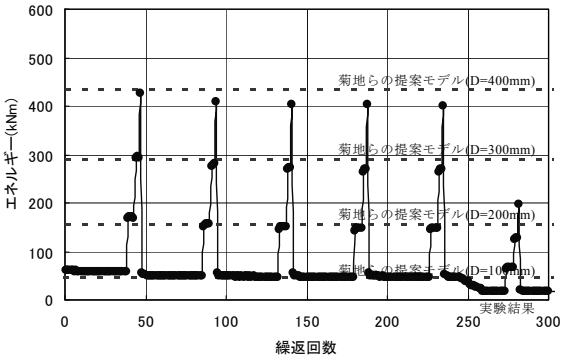
図　3.3.3-4　荷重変形関係の比較（実験―菊地らの提案モデル）



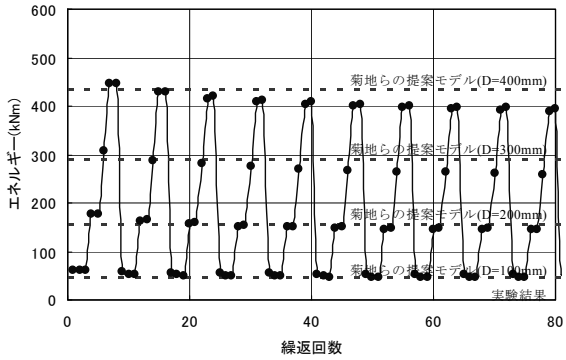
試験体１



試験体２



試験体３



試験体４

図　3.3.3-5　エネルギーの比較（実験―菊地らの提案モデル）

(2) 地震応答解析の条件設定

地震応答解析による応答評価を行った建物モデル諸元を表 3.3.3-2 に示す。地震応答解析は上部建物を 1 質点としてモデル化し実施した。免震層は天然ゴム系積層ゴムと鋼材ダンパーで構成されるものとし、天然ゴム系積層ゴムはゴム種 G4、外径 φ1000、ゴム総厚 200mm とし、積層ゴムのゴム剛性による周期 T_f=4.0s、鋼材ダンパーの降伏せん断力係数 αs=0.035 となるよう設定した。鋼材ダンパーは U 型ダンパーとし、平成 22 年度に実験を実施した鋼材ダンパーと同一のもの（NSUD55x4）を想定している。解析においては免震層の履歴減衰のみ考慮した。

表 3.3.3-2　対象建物諸元

上部構造重量 (積層ゴム 1 基当り) (kN)	積層ゴム平均面圧 (N/mm^2)	T_f (sec)	αs
7477	7.8	4.0	0.035

T_f:ゴム剛性による免震周期

αs:鋼材ダンパー降伏せん断力係数

(3) 設計モデルによる地震応答解析結果

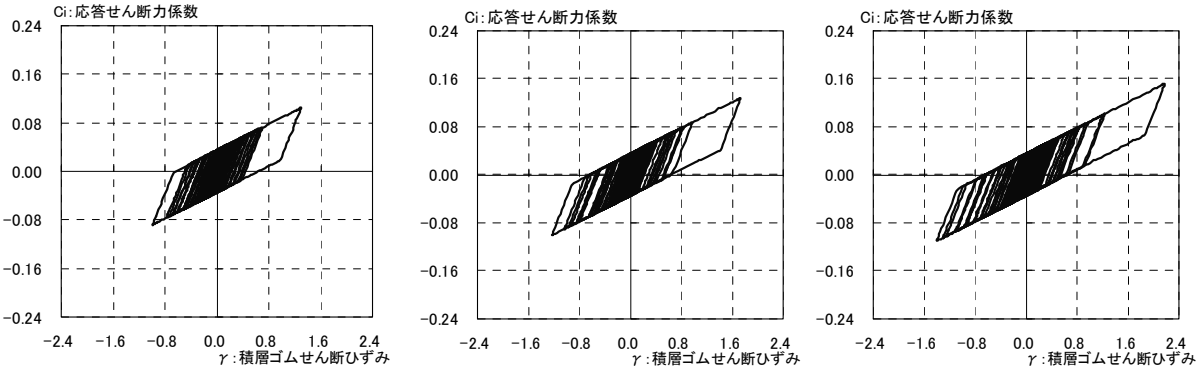
表 3.3.3-3 に設計モデルを用いた場合の各入力地震動における応答解析結果を示す。解析においては、鋼材ダンパーの特性について設計時に用いられるバイリニアモデルを用いた。

表 3.3.3-3　地震応答解析結果（設計モデル）

入力地震動		入力倍率	免震層 水平変位 (cm)	免震層応答最大 せん断力係数	応答 最大加速度 (cm/s^2)	免震層 累積変位 (m)	免震層吸収エネルギ 速度換算値 (cm/s)
OSKH02	KONOHANA	1.00	26.0	0.105	103	15.1	203.6
		1.25	34.7	0.128	126	18.2	250.2
		1.50	43.7	0.152	150	22.3	301.1
AIC003	TSUSHIMA	1.00	19.3	0.087	85	14.1	175.7
		1.25	24.1	0.100	98	16.9	211.9
		1.50	28.5	0.111	109	19.4	246.5
SZO024	HAMAMATSU	1.00	26.0	0.105	103	15.0	235.1
		1.25	36.3	0.132	130	18.6	278.9
		1.50	48.7	0.166	163	22.4	321.1
KGIN	SHINJYUKU	1.00	5.6	0.050	49	6.4	40.5
		1.25	6.8	0.053	52	7.8	59.4
		1.50	9.7	0.061	59	9.2	84.6

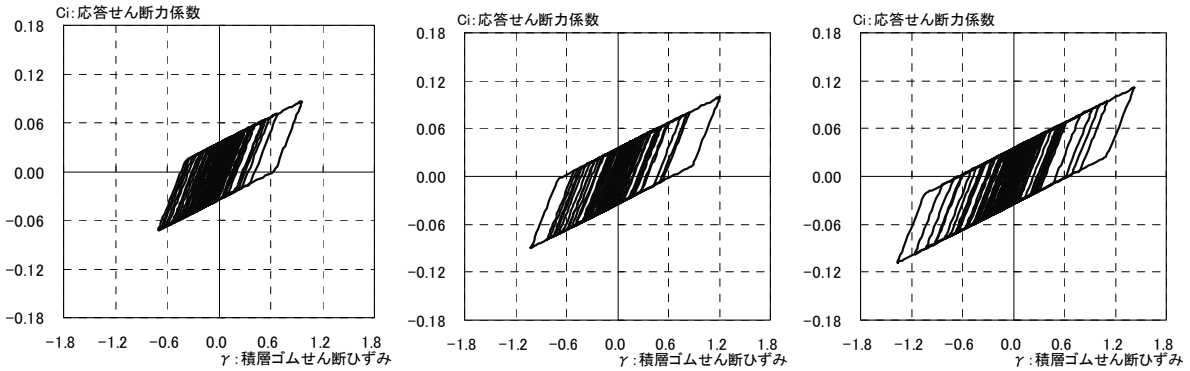
*1　免震層累積変位量については総入力エネルギーの 95%の時刻における値とした。

設計モデルを用いた解析結果として、図 3.3.3-6 に各入力地震動時の積層ゴムせん断ひずみ－免震層せん断力係数図を、図 3.3.3-7 に免震層における累積変位量時刻歴を、図 3.3.3-8 に免震材料における吸収エネルギーの速度換算値の時刻歴を示す。



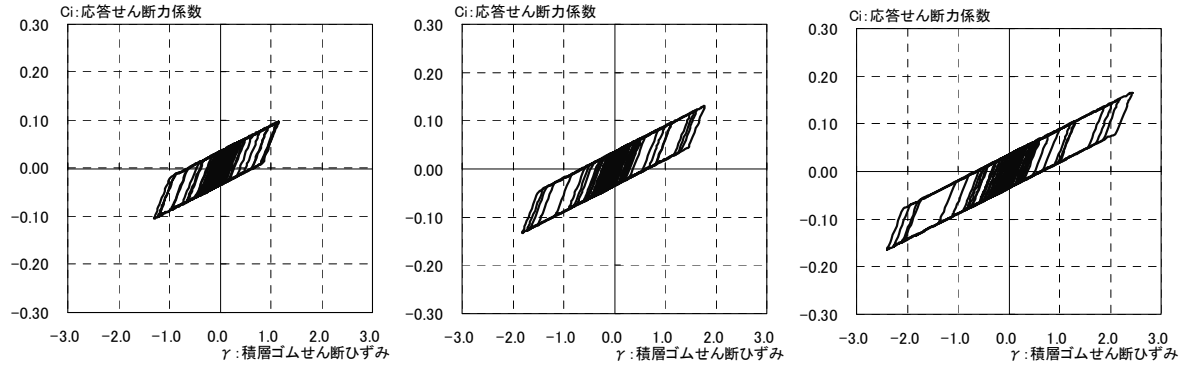
(i) 1.0 倍入力時　　(ii) 1.25 倍入力時　　(iii) 1.5 倍入力時

図 3.3.3-6(a)　積層ゴムせん断ひずみ－免震層せん断力係数図（OSKH02）



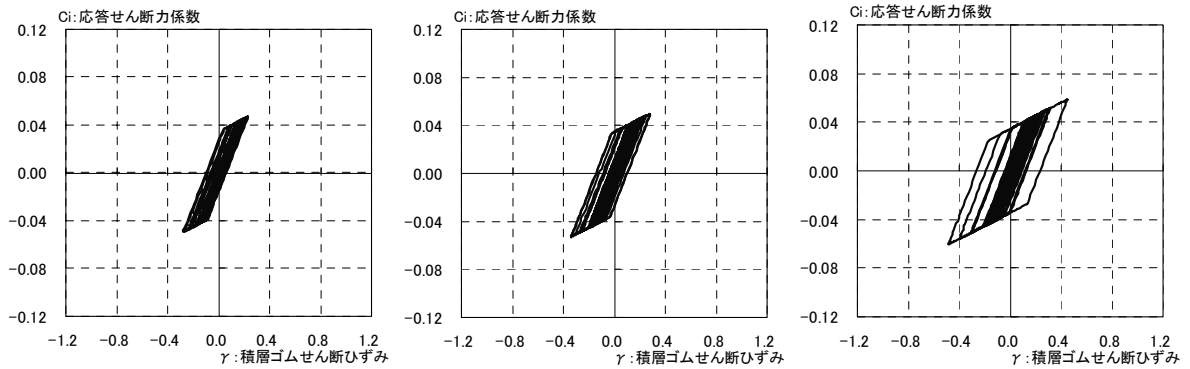
(i) 1.0 倍入力時　　(ii) 1.25 倍入力時　　(iii) 1.5 倍入力時

図 3.3.3-6(b)　積層ゴムせん断ひずみ－免震層せん断力係数図（AIC003）



(i) 1.0 倍入力時　　(ii) 1.25 倍入力時　　(iii) 1.5 倍入力時

図 3.3.3-6 (c)　積層ゴムせん断ひずみ－免震層せん断力係数図（SZO024）



(i) 1.0 倍入力時　　(ii) 1.25 倍入力時　　(iii) 1.5 倍入力時

図 3.3.3-6 (d)　積層ゴムせん断ひずみ－免震層せん断力係数図（KGIN）

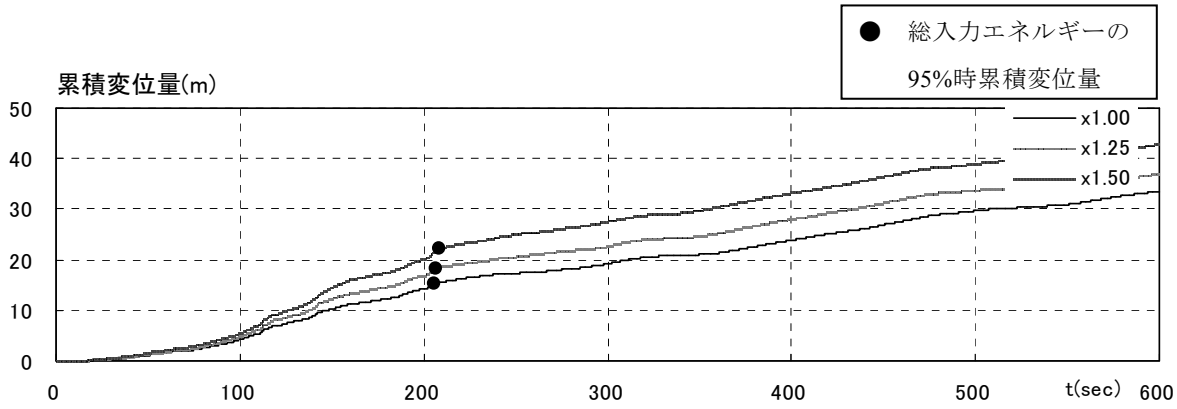


図 3.3.3-7 (a)　免震層累積変位量時刻歴（OSKH02）

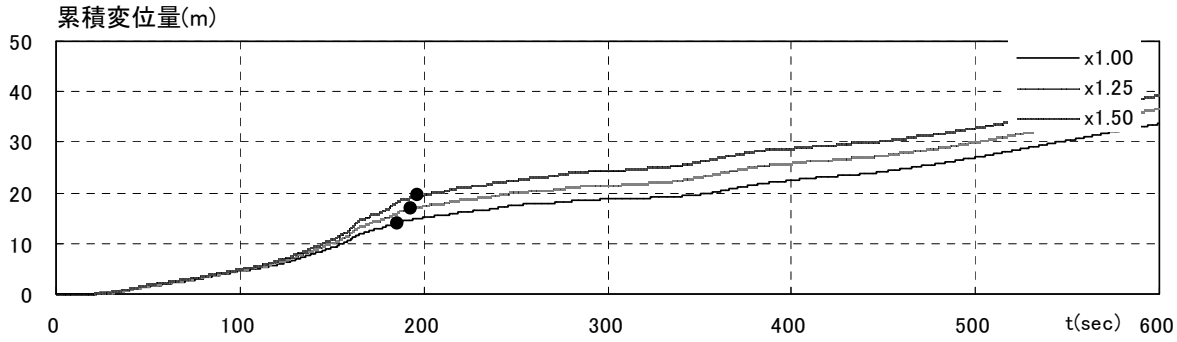


図 3.3.3-7 (b)　免震層累積変位量時刻歴（AIC003）

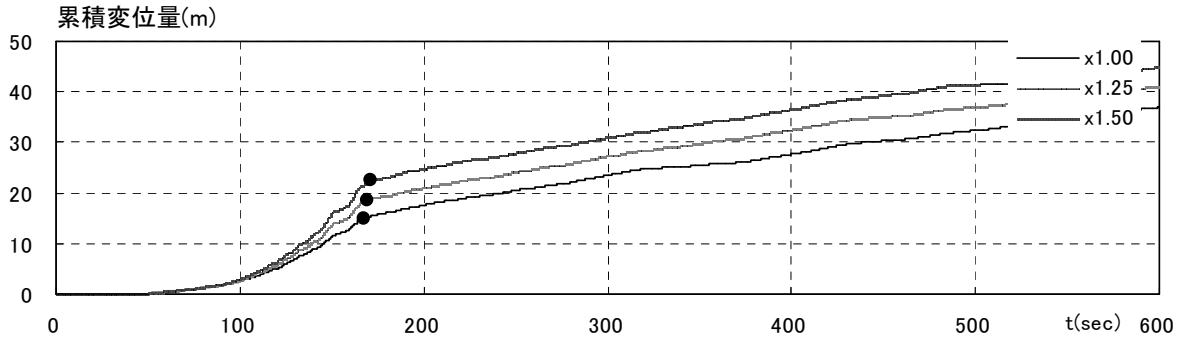


図 3.3.3-7 (c)　免震層累積変位量時刻歴（SZO024）

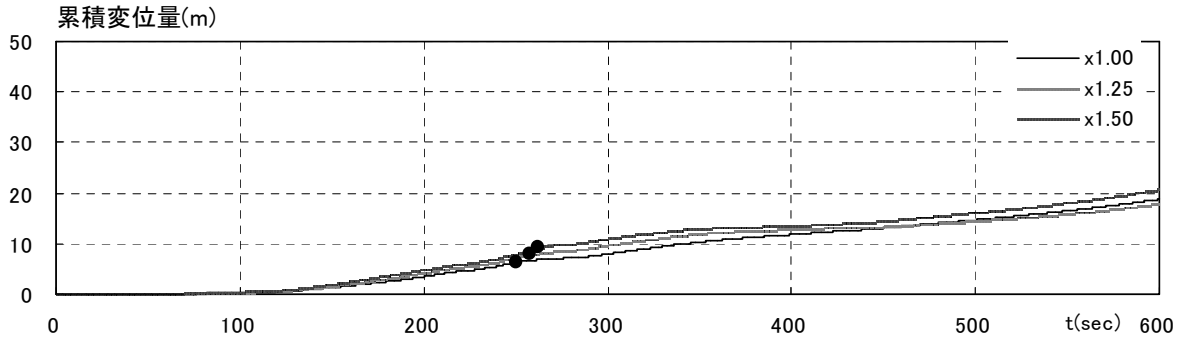


図 3.3.3-7 (d)　免震層累積変位量時刻歴（KGIN）

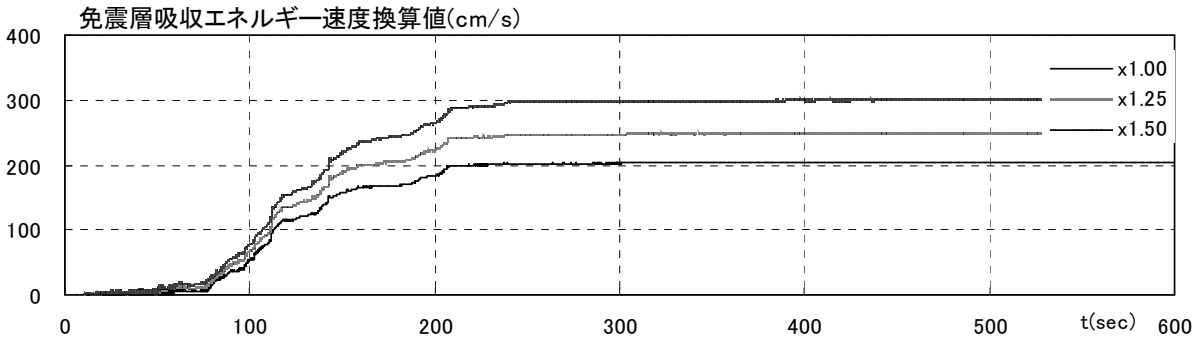


図 3.3.3-8 (a)　免震層吸収エネルギー速度換算値時刻歴（OSKH02）

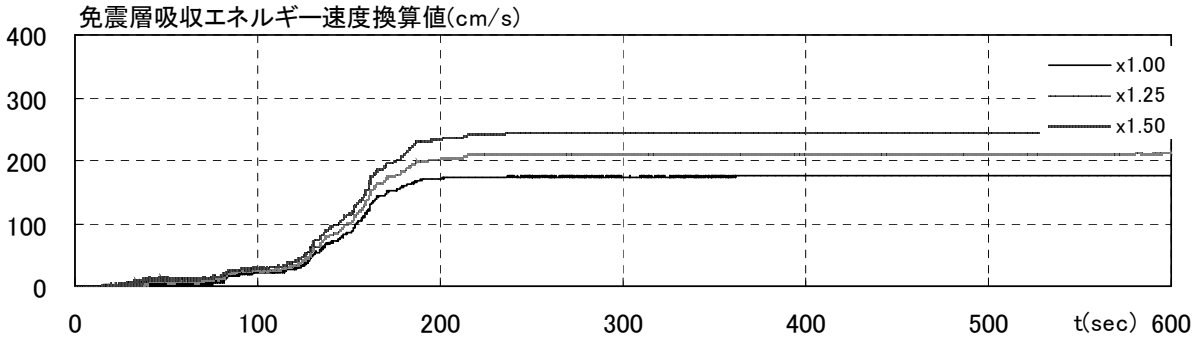


図 3.3.3-8 (b)　免震層吸収エネルギー速度換算値時刻歴（AIC003）

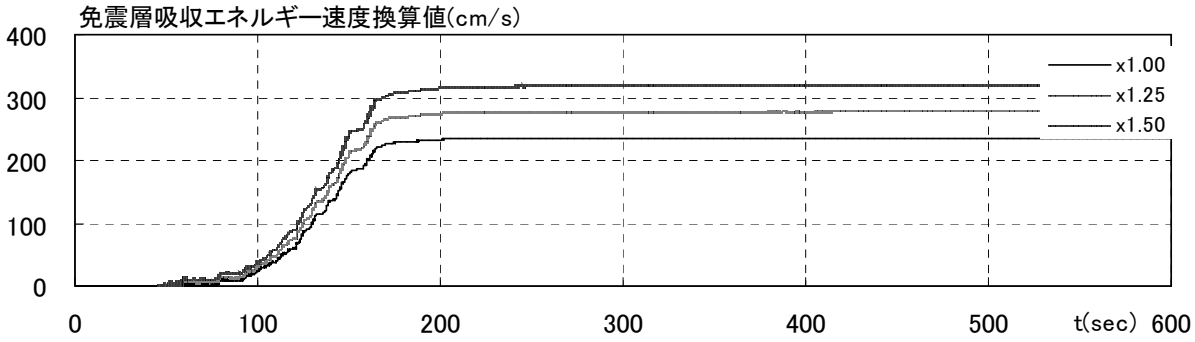


図 3.3.3-8 (c)　免震層吸収エネルギー速度換算値時刻歴（SZO024）

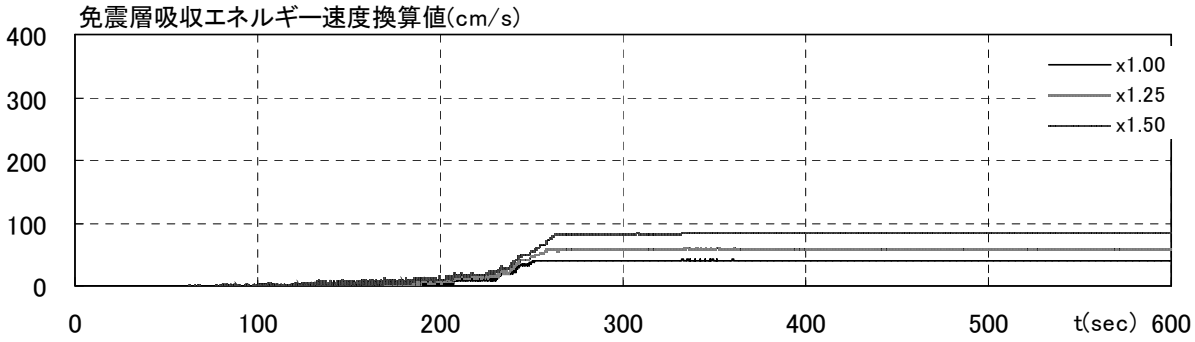


図 3.3.3-8 (d)　免震層吸収エネルギー速度換算値時刻歴（KGIN）

(4) トリリニアモデルによる地震応答解析結果

鋼材ダンパーのモデル化として第Ⅲ部第 1 章に示した実験結果に対する評価を反映させたトリリニアモデルとしてトリリニアモデルを採用した場合の地震応答解析結果を表 3.3.3-4 に示す。鋼材ダンパーのモデル化以外の解析条件は（3）と同様である。

トリリニアモデルを用いた解析結果として、図 3.3.3-9 に各入力地震動時の積層ゴムせん断ひずみ－免震層せん断力係数図を、図 3.3.3-10 に免震層における累積変位量時刻歴を、図 3.3.3-11 に免震装置における吸収エネルギーの速度換算値の時刻歴を示す。

表 3.3.3-5 に各入力地震動における応答解析結果を、表 3.3.3-5 にトリリニアモデルの解析結果について、設計モデル（バイリニアモデル）に対する応答値の比を示す。

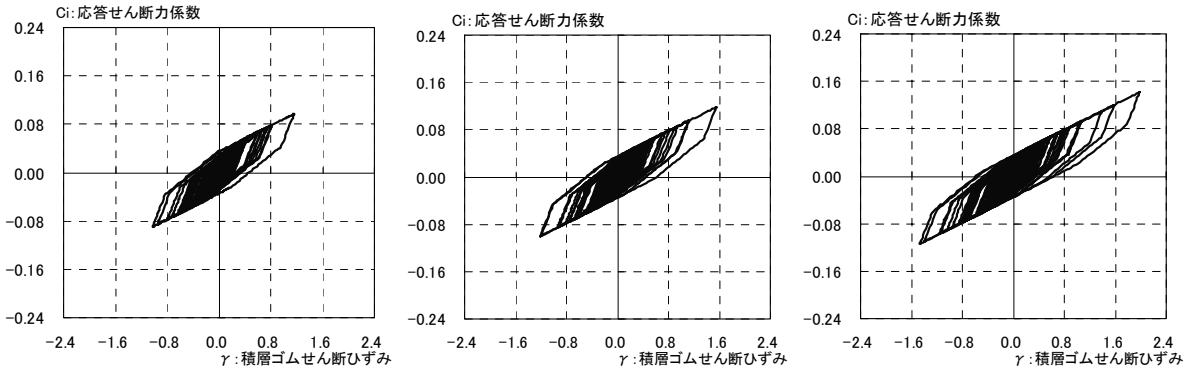
表 3.3.3-4　地震応答解析結果

入力地震動		入力倍率	免震層 水平変位 (cm)	免震層応答最大 せん断力係数	応答 最大加速度 (cm/s^2)	免震層 累積変位 (m)	免震層吸収エネルギ 速度換算値 (cm/s)
OSKH02	KONOHANA	1.00	23.2	0.097	95	15.7	203.7
		1.25	31.1	0.119	116	19.3	247.0
		1.50	39.7	0.142	139	24.4	297.1
AIC003	TSUSHIMA	1.00	23.4	0.098	96	13.2	169.3
		1.25	28.5	0.111	109	16.1	203.1
		1.50	33.2	0.124	122	19.2	239.7
SZO024	HAMAMATSU	1.00	29.7	0.115	113	15.5	230.3
		1.25	41.0	0.145	143	19.7	276.7
		1.50	53.3	0.179	175	23.8	319.4
KGIN	SHINJYUKU	1.00	6.3	0.046	45	6.2	57.2
		1.25	9.0	0.058	57	7.3	79.4
		1.50	11.7	0.066	65	8.6	96.8

*1　免震層累積変位量については総入力エネルギーの 95%の時刻における値とした。

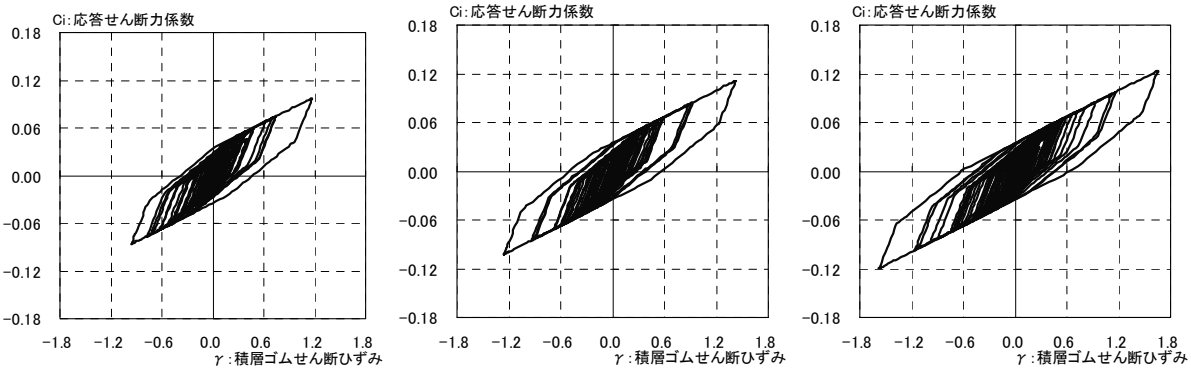
表 3.3.3-5　バイリニアモデルに対するトリリニアモデルの解析結果の比

入力地震動		入力倍率	免震層 水平変位	免震層応答最大 せん断力係数	応答 最大加速度	免震層 累積変位	免震層吸収エネルギ 速度換算値
OSKH02	KONOHANA	1.00	0.89	0.93	0.93	1.04	1.00
		1.25	0.90	0.93	0.93	1.06	0.99
		1.50	0.91	0.93	0.93	1.10	0.99
AIC003	TSUSHIMA	1.00	1.21	1.13	1.13	0.94	0.96
		1.25	1.18	1.12	1.12	0.95	0.96
		1.50	1.17	1.11	1.12	0.99	0.97
SZO024	HAMAMATSU	1.00	1.14	1.09	1.10	1.03	0.98
		1.25	1.13	1.10	1.10	1.06	0.99
		1.50	1.10	1.08	1.08	1.07	0.99
KGIN	SHINJYUKU	1.00	1.12	0.92	0.92	0.97	1.41
		1.25	1.33	1.09	1.09	0.93	1.34
		1.50	1.21	1.09	1.09	0.93	1.14



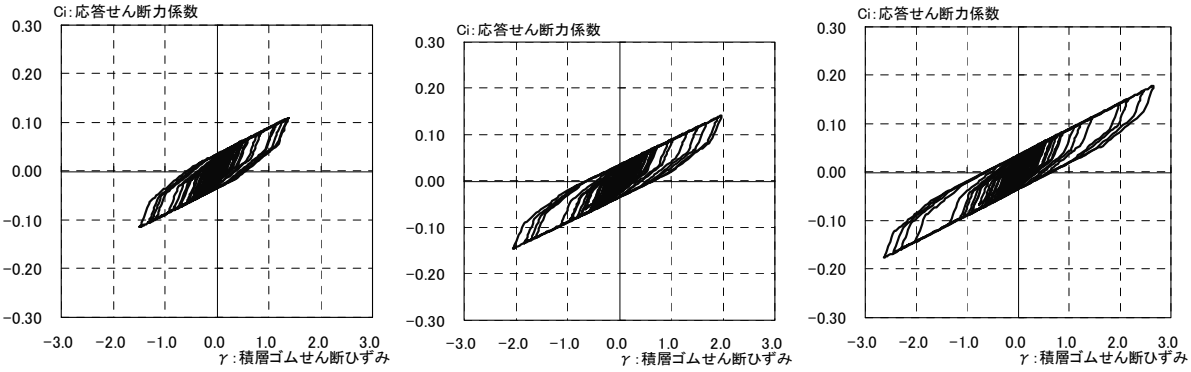
(i) 1.0 倍入力時　　(ii) 1.25 倍入力時　　(iii) 1.5 倍入力時

図 3.3.3-9 (a)　積層ゴムせん断ひずみ－免震層せん断力係数図（OSKH02）



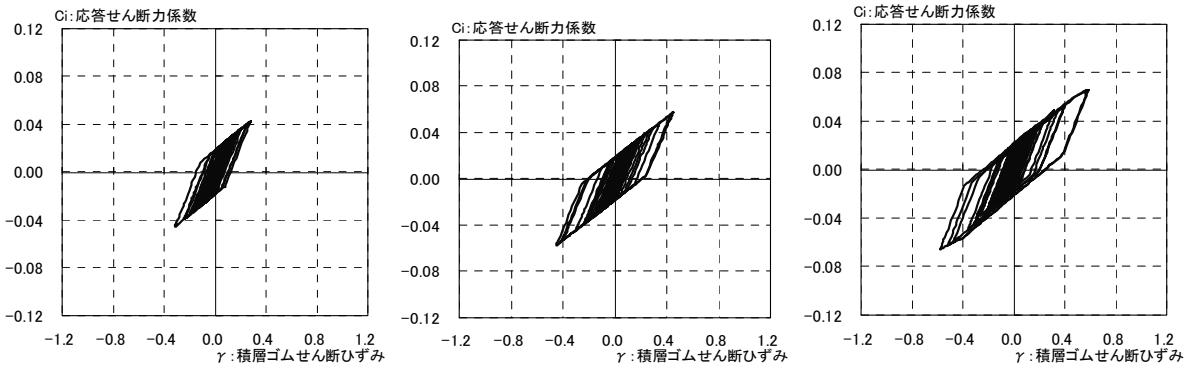
(i) 1.0 倍入力時　　(ii) 1.25 倍入力時　　(iii) 1.5 倍入力時

図 3.3.3-9(b)　積層ゴムせん断ひずみ－免震層せん断力係数図（AIC003）



(i) 1.0 倍入力時　　(ii) 1.25 倍入力時　　(iii) 1.5 倍入力時

図 3.3.3-9 (c)　積層ゴムせん断ひずみ－免震層せん断力係数図（SZO024）



(i) 1.0 倍入力時　　(ii) 1.25 倍入力時　　(iii) 1.5 倍入力時

図 3.3.3-9 (d)　積層ゴムせん断ひずみ－免震層せん断力係数図（KGIN）

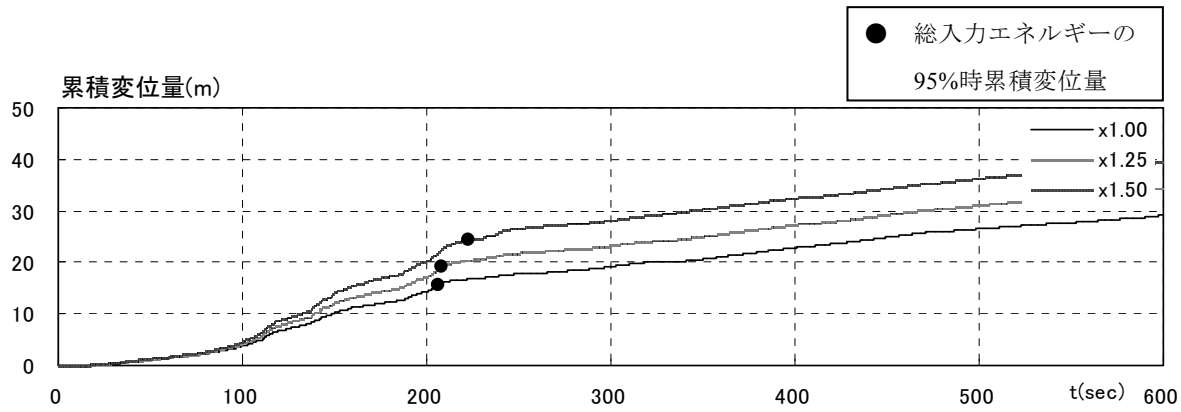


図 3.3.3-10 (a)　免震層累積変位量時刻歴（OSKH02）

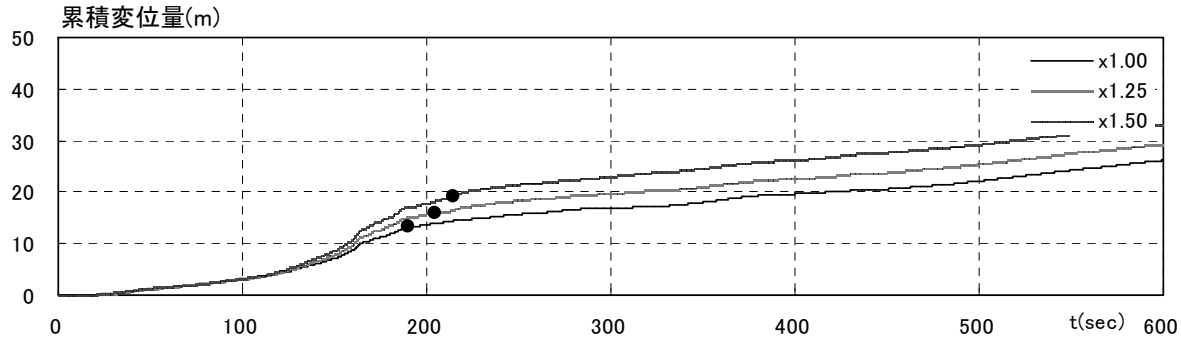


図 3.3.3-10 (b)　免震層累積変位量時刻歴（AIC003）

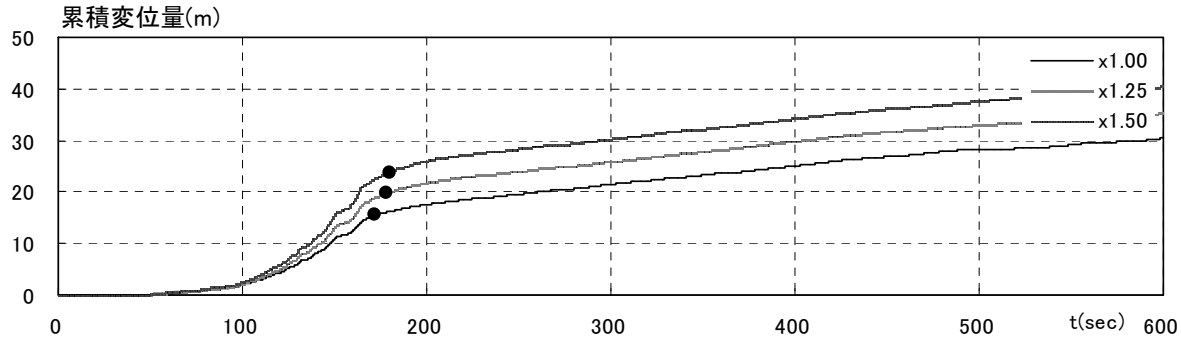


図 3.3.3-10 (c)　免震層累積変位量時刻歴（SZO024）

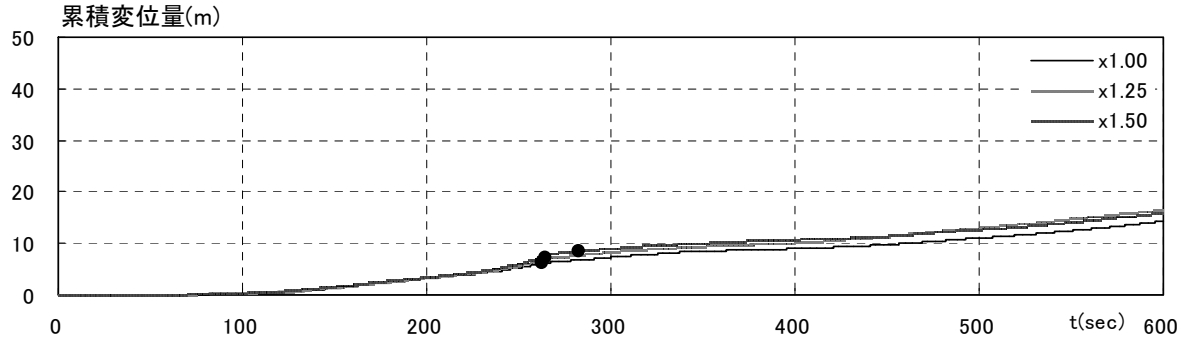


図 3.3.3-10 (d)　免震層累積変位量時刻歴（KGIN）

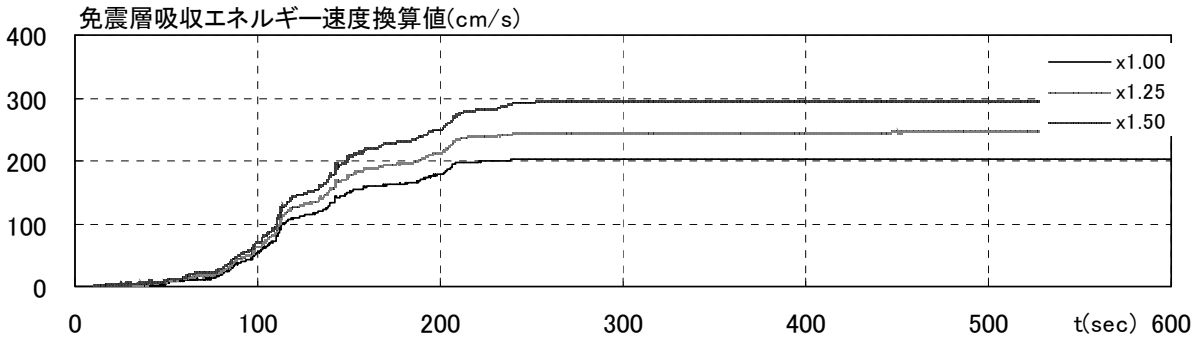


図 3.3.3-11 (a)　免震層吸収エネルギー速度換算値時刻歴（OSKH02）

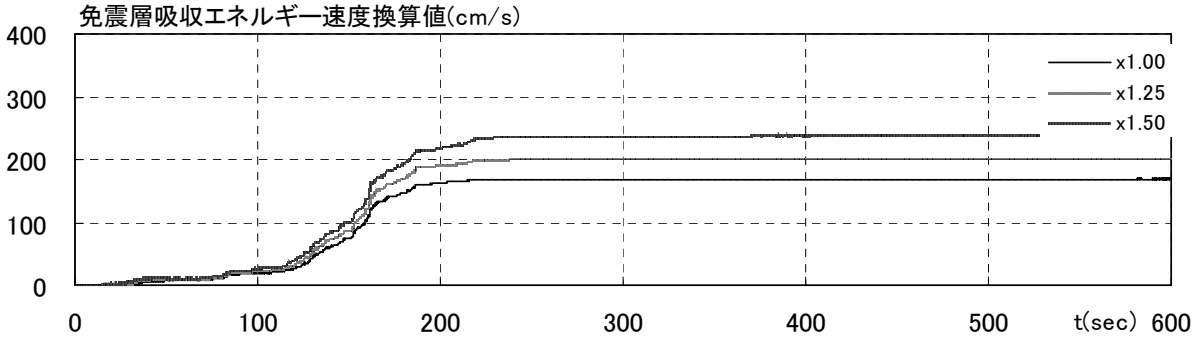


図 3.3.3-11 (b)　免震層吸収エネルギー速度換算値時刻歴（AIC003）

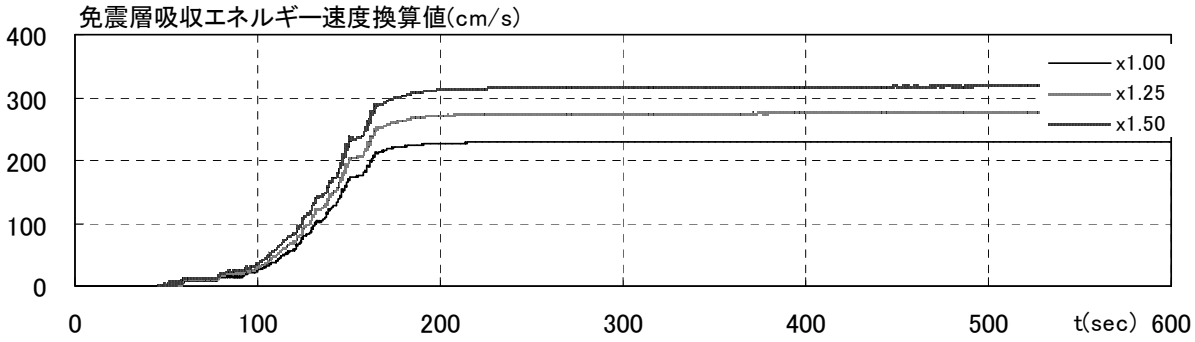


図 3.3.3-11 (c)　免震層吸収エネルギー速度換算値時刻歴（SZO024）

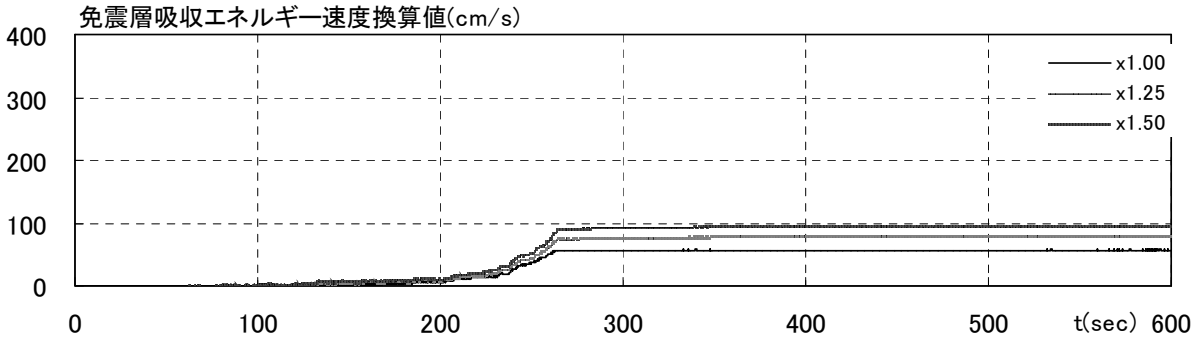


図 3.3.3-11 (d)　免震層吸収エネルギー速度換算値時刻歴（KGIN）

(5) 鋼材ダンパーの疲労損傷度の評価

鋼材ダンパーについては、Miner 則に基づく疲労損傷評価を行う。評価に当たっては地震応答解析によって得られた免震材料の変位波形よりレインフロー法により波形分解を行い、各歪範囲レベルでの繰返し頻度 N_i を累積する。

変位振幅 Δ_i と破断回数 N_i の関係（第Ⅲ部、図 2.3.3-4 参照）に基づいて、下式により損傷度 D を評価する。損傷値 D=1 の場合、疲労損傷（破断）が起きるとする。

$$D = \sum_i \frac{N_i}{N_f}$$

N_i:変位振幅 Δ_i での頻度

N_f:変位振幅 Δ_i での破断回数

表 3.3.3-6 に上記により評価した疲労損傷度を示す。鋼材ダンパーは U 型ダンパー NSUD55x4 を想定している。疲労損傷度は図 3.3.3-8、図 3.3.3-11 に示されるように免震材料における吸収エネルギーが頭打ちとなる継続時間 300 秒間について評価した、また疲労損傷度は破断時を 100%として評価した値である。

表 3.3.3-6　鋼材ダンパーの疲労損傷度

		設計モデル（バイリニアモデル）		トリリニアモデル	
入力地震動	入力倍率	免震層水平変形（cm）	疲労損傷度（%）	免震層水平変形（cm）	疲労損傷度（%）
OSKH02_AV	1.00	26.0	17.6	23.2	20.4
	1.25	34.7	26.1	31.1	30.3
	1.50	43.7	37.9	39.7	43.7
AIC003_AV	1.00	19.3	14.7	23.4	14.7
	1.25	24.1	20.6	28.5	20.8
	1.50	28.5	27.2	33.2	28.7
SZO024_AV	1.00	26.0	26.2	29.7	27.0
	1.25	36.3	37.0	41.0	39.5
	1.50	48.7	42.8	53.3	42.5
KGIN_AV	1.00	5.6	2.3	6.3	1.8
	1.25	6.8	3.6	9.0	3.3
	1.50	9.7	5.2	11.7	4.6

(6) まとめ

天然ゴム系積層ゴムと鋼材ダンパーを適用した免震建築物では鋼材ダンパーについて設計モデルによる地震応答解析の結果 OSKH02 及び SZO024 の入力倍率が 1.0 倍の場合に積層ゴムのせん断ひずみは γ=130％（水平変位 26.0cm）で最大となる。また、SZO024 の入力倍率が 1.5 倍の場合に積層ゴムのせん断ひずみは γ=244％（水平変位 48.7cm）となっている。

鋼材ダンパーについて第Ⅲ部第 2 章で応答評価に用いた設計モデル（バイリニア）によるケースと、トリリニアモデルとしたケース用いた場合と比較して、平均的には 1.1～1.2 倍程度の水平変形の増大率となった。KGIN の場合は水平変形の増大率が最大で 1.33 倍程度になるが水平変形の絶対値は最大でも 10cm 程度である。

鋼材ダンパーの疲労損傷度は設計モデルによる評価時には入力倍率が 1.0 倍の場合には SZO024 の場合に 26.2％であるが、その他の地震動では 20％以下である。入力倍率が 1.5 倍の場合に SZO024 で破断に対する疲労損傷度が 42.8％となる。この場合には風外乱や中小地震による疲労損傷度の累積を考慮すると鋼材ダンパーの破断に対して厳しい値となっていると考えられる。

また、鋼材ダンパーのモデル化について検討を行い、履歴モデルを第Ⅲ部第 2 章で応答評価に用いた設計モデル（バイリニア）によるものと、トリリニアモデルとしたものの比較を行った。その結果、概ね応答値の差は小さいものの、入力波および倍率によっては最大水平変形で 2 割程度差が生じることを確認した。

今後の課題として、鋼材ダンパーについては大地震時だけでなく、風外乱や中小地震時にも疲労損傷が蓄積することから大地震時の疲労損傷度のクライテリアをどの程度にするかが今後の課題である。

参考文献

3.3.3-1） 菊地優ほか、履歴減衰型免震部材の復元力モデルに関する研究、日本建築学会構造系論文集、第 565 号、63-71、2003 年 3 月

3.3.3-2） 吉敷祥一ほか：免震構造用Ｕ字鋼材ダンパーの繰り返し変形性能に関する研究、日本建築学会構造系論文集、第 624 号、pp333-344、2008.2.

3.3.4　天然ゴム系積層ゴム+鉛ダンパー

(1) 繰返しによる特性変化を考慮した鉛ダンパーの解析モデル

1) はじめに

平成 22 年度に実施した鉛ダンパーU2426 の正弦波加振では､繰返しによる耐力劣化が確認された。また、漸増正弦波加振では、振幅の上昇とともに耐力上昇が確認された。これらの現象を表現するために、本検討ではバイリニアモデルの復元力特性に対して骨格曲線を曲線表示し、繰返しによる降伏荷重の低下を考慮した解析モデルを構築する。また、このモデルに対して地震応答波変位を入力し、実験結果との比較を行う。

2) 骨格曲線

鉛ダンパーの降伏荷重は、図 3.3.4-1 のように振幅依存性がある [3.3.4-1)]。これより、バイリニアモデルの骨格曲線を以下のように与える。

1) 初期は線形とし、剛性は U2426 ダンパーの初期剛性規格値 K_1 (=30,000kN/m)とする。

2) 降伏変形（d_y）を超えると、水平変形 d の n 乗として規定される。

骨格曲線 Q_d は以下の式(3.3.4-1)および(3.3.4-2)となる。

$$d < d_y\text{(m)} \qquad Q_d = K_1 \cdot d \qquad \text{(kN)} \qquad (3.3.4\text{-}1)$$

$$d \geqq d_y\text{ (m)} \qquad Q_d = Q_o \cdot d^n \qquad \text{(kN)} \qquad (3.3.4\text{-}2)$$

ただし、U2426 鉛ダンパーに対して、パラメータを以下のように設定する。

K_1　：初期剛性　30,000 (kN/m)

d_y　：降伏変位　5.88×10^{-3} (m)

d　：水平変形(m)

Q_o　：293.1

n　：0.0958

式(3.3.4-2) 中の Q_o、n の算出にあたっては、平成 22 年度に実施の漸増正弦波加振試験結果と整合するように算出した。履歴曲線はバイリニアモデルとし、除荷剛性は常に初期剛性 K_1、二次剛性は 0 とする。骨格曲線と履歴形状を図 3.3.4-2 に示す。

表 3.3.4-1　骨格曲線上の変形と荷重

変形 d(m)	5.88×10^{-3}	0.1	0.2	0.4
荷重 Q_d (kN)	179.2	235.1	251.2	268.5

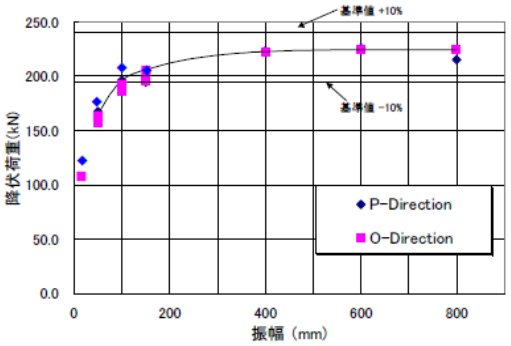


図 3.3.4-1　降伏荷重と振幅の関係 [3.3.4-1)]

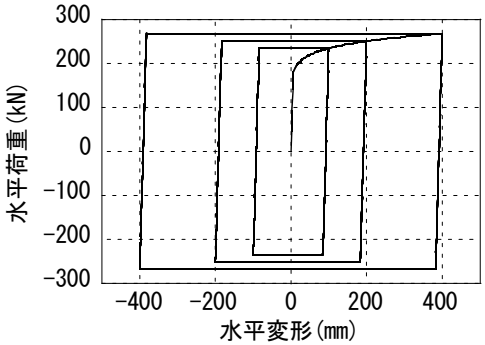


図 3.3.4-2　骨格曲線と履歴形状

3) 繰返しによる耐力劣化

本モデルでは、マクロ的に装置へのダメージ度合いを表しうるダンパーの累積吸収エネルギー*E* を指標として、繰返しによる耐力劣化を表現する。

正弦波加振時の累積吸収エネルギー*E* と 3 サイクル目に対する 1 ループ分のエネルギー変化率との関係を図 3.3.4-3 に示す。図 3.3.4-3 は、既往の知見である累積変形量と変化率の関係から求めた。累積吸収エネルギーがある値に達すると、*E* と変化率は直線的に変化し、さらに *E* が大きくなると 1 ループあたりの吸収エネルギーは急激に低下する。さらに、図 3.3.4-3 より変化率が水平変形によって異なることがわかる。これより本モデルでは、降伏荷重の変化率 r_Q_d と吸収エネルギー*E* の関係を図 3.3.4-4 に示す折れ線にて表現する。折れ点の位置は図中の①～④の位置で水平変形により変化する。折れ線の座標（E,r_Q_d）は式(3.3.4-3)～(3.3.4-6)にて表現され、水平変形 *d*(m)をパラメータとして平成 22 年度に実施した漸増連続正弦波加振結果に整合するように定めた。

①：耐力劣化開始点($E1$,r_Q_d1=1.0)

$$E1 = -37 + 2322|d| \quad (0.1 \leqq |d| \leqq 0.4)$$

195（$|d|$<0.1），892（$|d|$>0.4）（単位:kNm） (3.3.4-3)

②：第 2 折れ点($E2$=2205(kNm), r_Q_d2)

$$r\_Q_d2 = 0.62 + 0.60|d| \quad (0.1 \leqq |d| \leqq 0.4)$$

0.680（$|d|$<0.1），0.860（$|d|$>0.4） (3.3.4-4)

③：第 3 折れ点($E3$=8000(kNm), r_Q_d3)

$$r\_Q_d3 = 0.375 + 0.525|d| \quad (0.1 \leqq |d| \leqq 0.4)$$

0.428（$|d|$<0.1），0.585（$|d|$>0.4） (3.3.4-5)

④：耐力喪失点($E4$, r_Q_d4=0)

$$E4 = 9683 - 2060|d| \quad (0.15 \leqq |d| \leqq 0.4)$$

9,854（$|d|$<0.15），8,859（$|d|$>0.4）（単位:kNm） (3.3.4-6)

耐力劣化は変形が反転する際に生じ、その時点の水平変形 *d* および累積吸収エネルギー*E* により降伏荷重の変化率 r_Q_d を求める。変形反転後の降伏耐力 Q_d'は以下の式(3.3.4-7)とする。

$$Q_d' = Q_d \cdot r\_Q_d \quad (3.3.4-7)$$

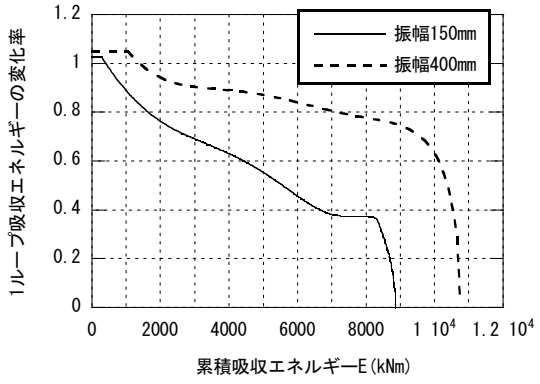


図 3.3.4-3　累積吸収エネルギーE と 1 ループ分のエネルギー変化率

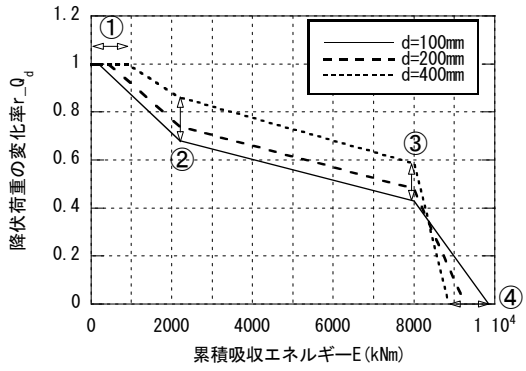


図 3.3.4-4　累積吸収エネルギーと降伏荷重の変化率

4) 解析モデルによる実験結果との比較

解析モデルに平成 22 年度に実施した鉛ダンパーU2426 実大実験で得られた水平変形を与え、出力される荷重値と実験結果を比較した。実験条件を表 3.3.4-2 に示す。今回の検討は試験体 No.1、No.2－A、No. 2－B および No.3 の試験結果に対して実施した。

試験体 No.1 の漸増連続基本加振における吸収エネルギーE と降伏荷重 Q_d の関係を図 3.3.4-5 に示す。降伏荷重は 1 ループ分の吸収エネルギーW より式(3.3.4-8)にて算出した。

$$Q_d = \frac{|d| \cdot K1 - \sqrt{d^2 \cdot K1^2 - W \cdot K1}}{2} \qquad (3.3.4\text{-}8)$$

図 3.3.4-5 より解析モデルによる Q_d は実験結果とよく整合している。また、吸収エネルギーE の時刻歴と実験結果との対応も良好である。試験体 No.1 の荷重変形関係を図 3.3.4-6 に示す。振幅±100mm、±200mm で履歴性状も解析モデルは実験結果とよく整合している。±400mm 時の履歴形状では試験結果のループが変形に対して非対称となっているため、本解析モデルによる表現が難しい。

表 3.3.4-2 試験体および試験条件一覧

試験体 No.	条件	周期 (秒)	加力方向	水平変位（サイクル数）	累積変形 (m)	Di
1	漸増連続基本加振	4 →4 →5	P	±100mm（30 サイクル） →±200mm（30 サイクル） →±400mm（破断まで）	12 →36 →破断	0.102 0.344 -
2－A	方向を変えて断続的に加振	4	P	±150mm（30 サイクル）	24	0.344
2－B		4	O	±150mm（30 サイクル）	48	0.344
2－C		4	P	±150mm（破断まで）	→破断	-
3	地震応答波加振	4	P	T-TN-AIC003.av 時の免震層応答変位加振×3 回	14m×3	―
		インターバル　3 分				
		4	P	T-TN-AIC003.av 時の免震層応答変位加振×9 回	14m×9	―

注）　P：Parallel，O：Orthogonal，Di：各振幅における疲労損傷度（1 が破断限界）

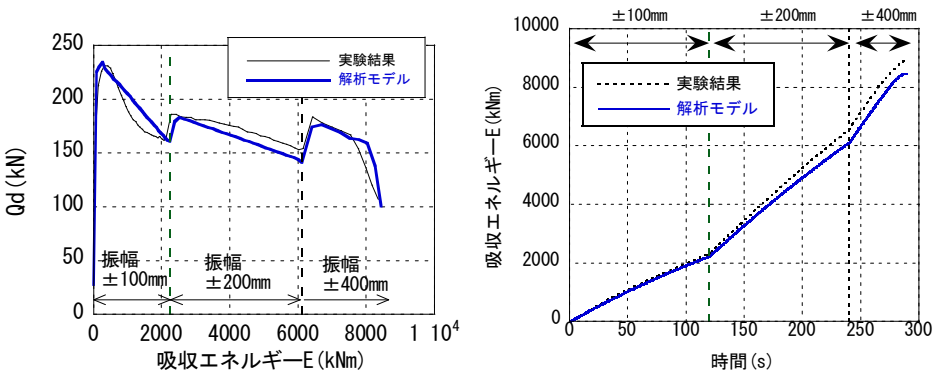
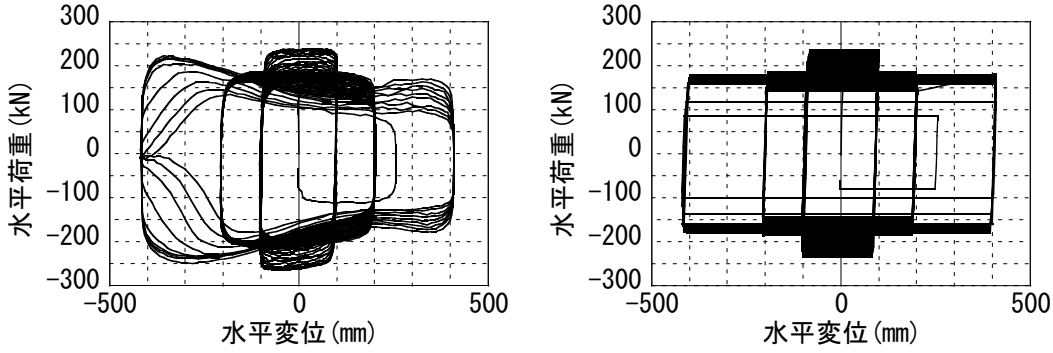
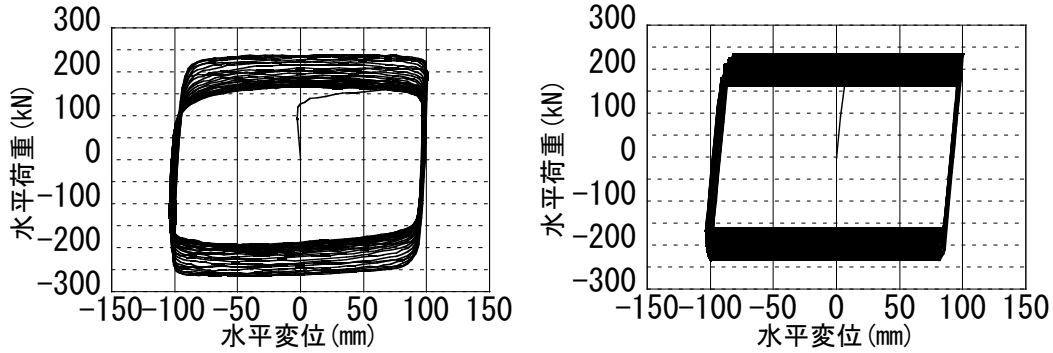


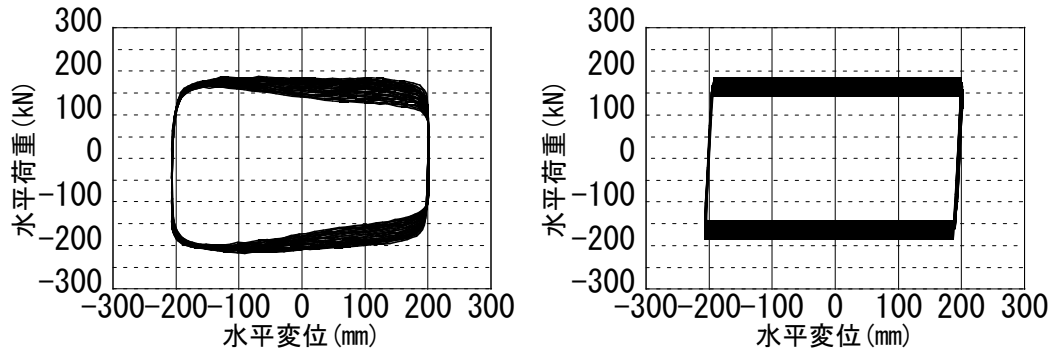
図 3.3.4-5　試験体 No.1（漸増連続基本加振）　吸収エネルギーE と Q_d の関係



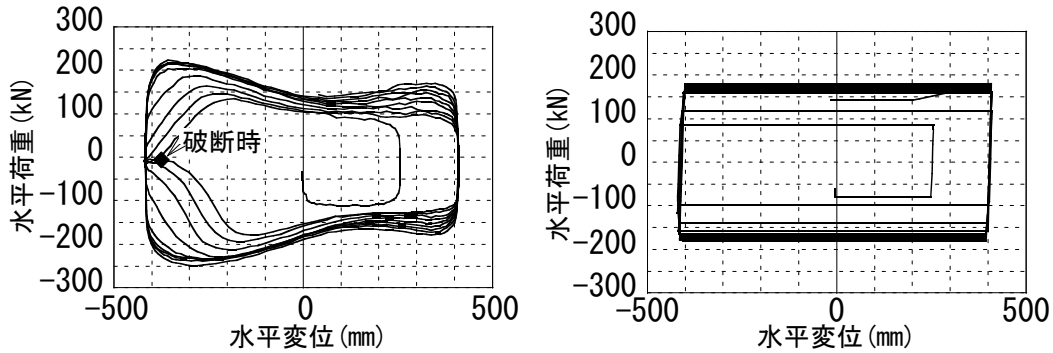
実験全データ



±100mm　周期 4 秒　30 サイクル



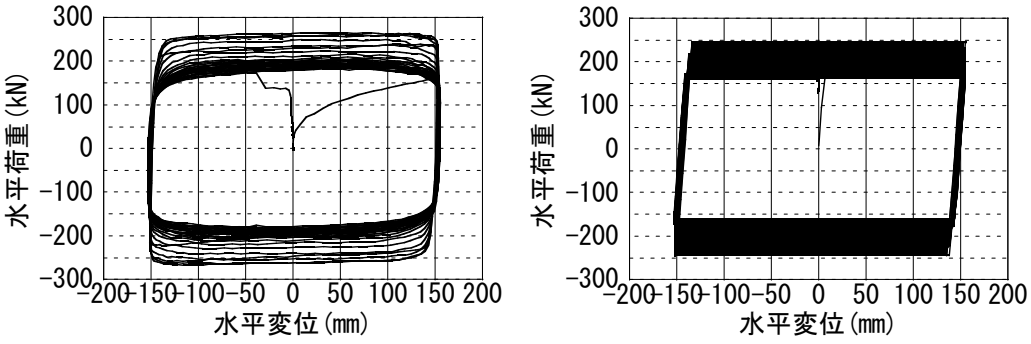
±200mm　周期 4 秒　30 サイクル



±400mm　周期 5 秒　9 サイクル（破断まで）

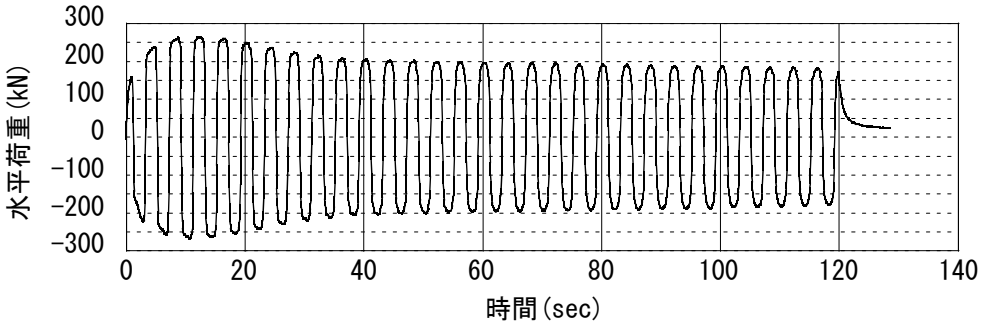
(a)実験結果　　(b)解析モデル

図 3.3.4-6　試験体 No.1（漸増連続基本加振）　荷重変形関係

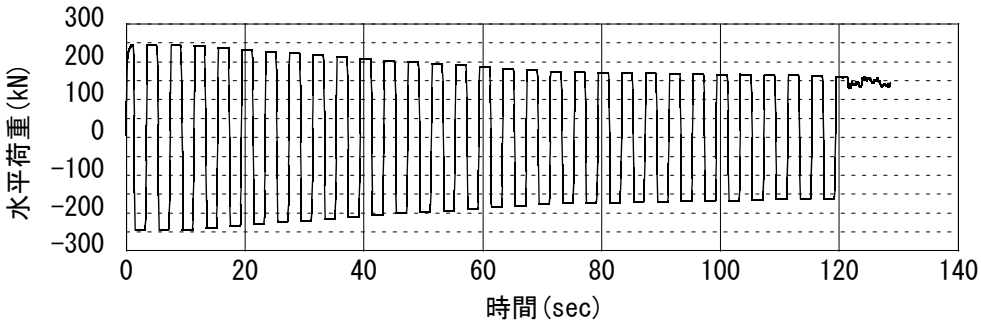


実験結果　　解析モデル

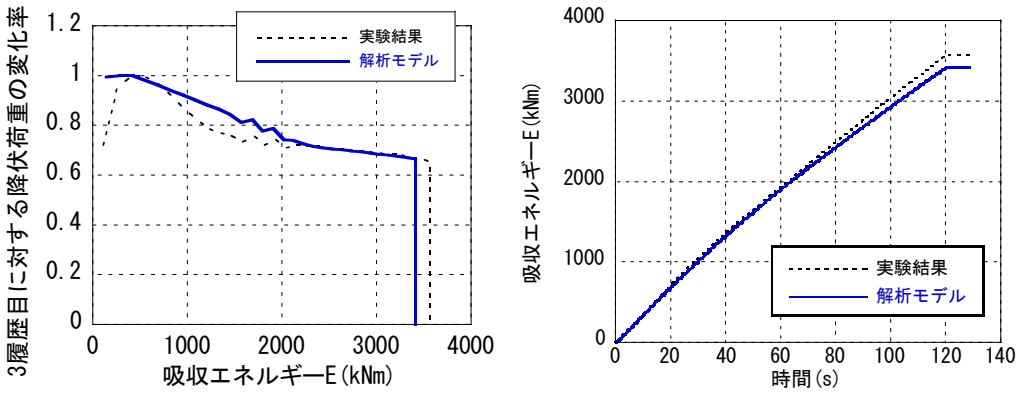
(a)　荷重変形関係



(b)　荷重時刻歴　実験

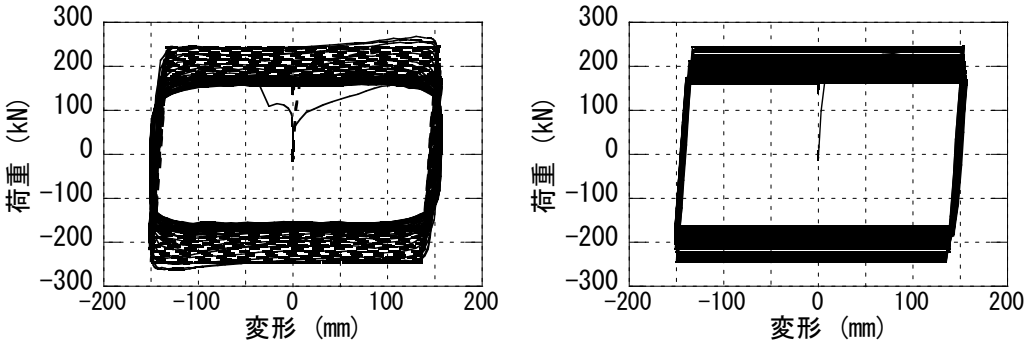


(c) 荷重時刻歴　解析



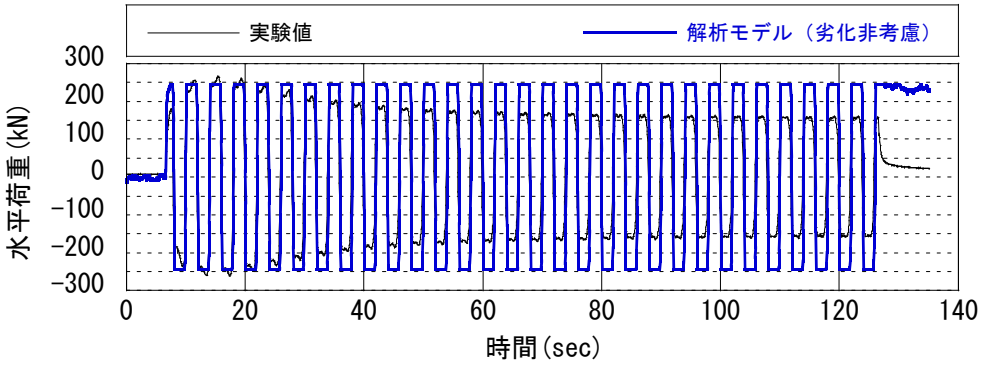
(d)　吸収エネルギーと降伏荷重変化率の関係(e)吸収え

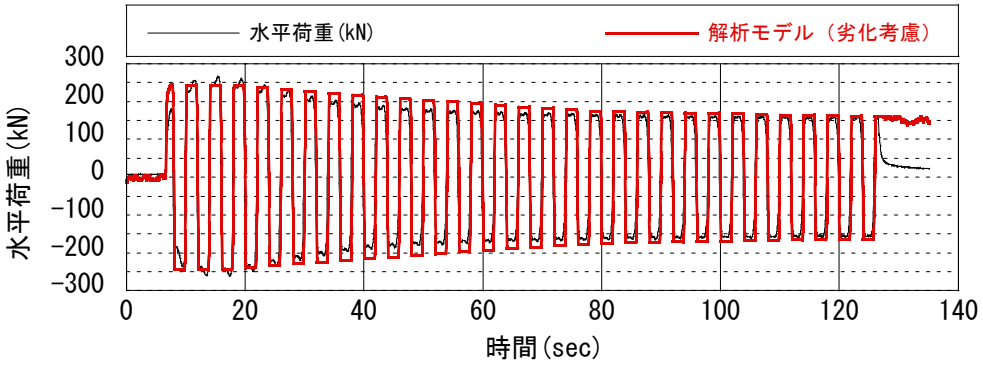
図 3.3.4-7　試験体 No.2－A（P 方向：±150mm 30 サイクル）との比較



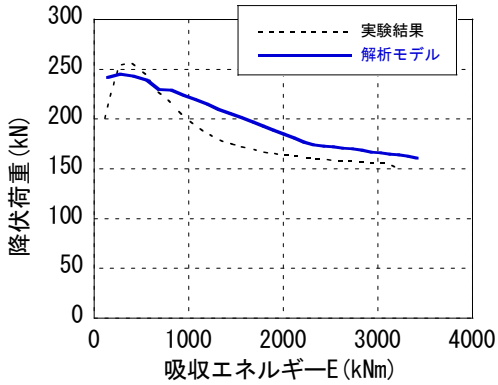
実験結果　　解析モデル

(a)　荷重変形関係





(b) 荷重時刻歴



(c)　吸収エネルギーと降伏荷重変化率の関係

図 3.3.4-8　試験体 No.2－B（O 方向：±150mm 30 サイクル）との比較

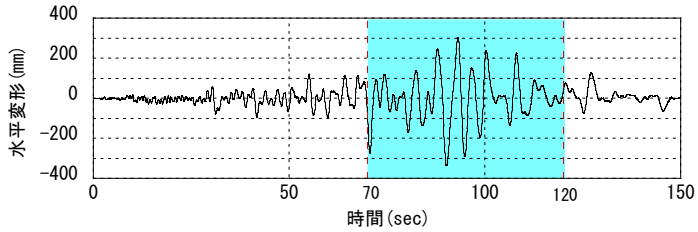
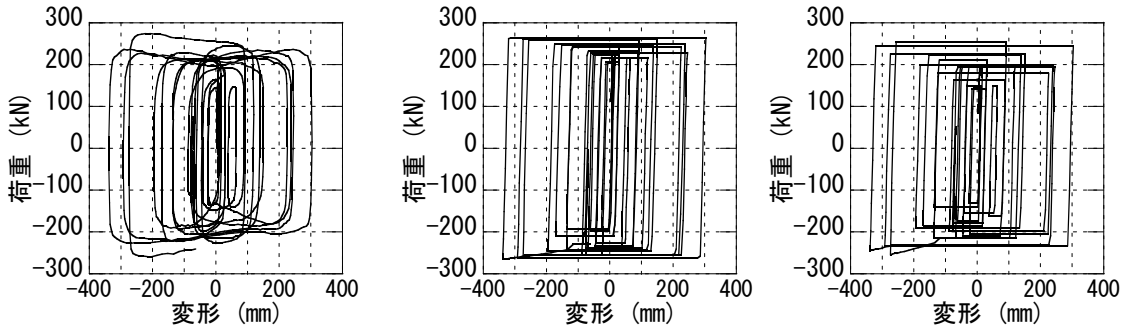


図 3.3.4-9　地震応答波 1 波の水平変形

しかし、ループ全体の大きさとしては、図 3.3.4-5 の結果と考え併せて妥当なものと考えられる。試験体 No.2－A（P 方向±150mm,30 サイクル）の場合を図 3.3.4-7 に示す。解析モデルの荷重値は試験体 No.2－A の場合でも実験結果とよく整合していることがわかる。

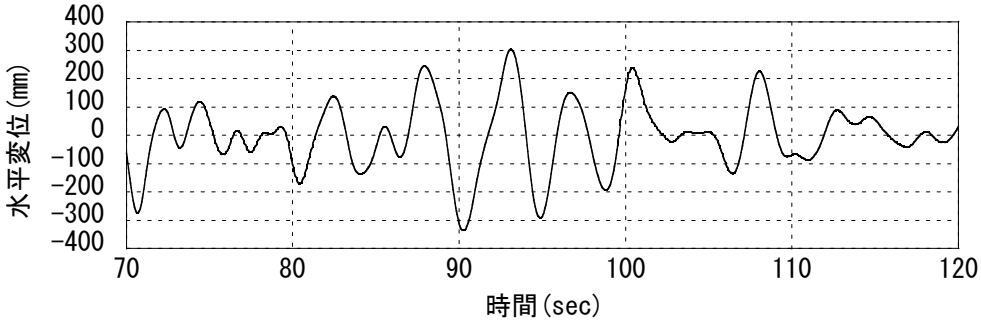
提案モデルが O 方向の特性を表現可能であるかを検証した。試験体 No.2－B（O 方向：±150mm 30 サイクル）との比較を図 3.3.4-8 に示す。図 3.3.4-8(a)の荷重変形関係において、提案モデルは試験結果とよく対応していることがわかる。図 3.3.4-8(b)の荷重時刻歴、(c)吸収エネルギーと降伏荷重変化率の関係において、解析モデルは 7～17 サイクル目にて実験結果をやや過大評価する傾向にあるものの、耐力劣化の傾向をよく表現できていることがわかる。

試験体 No.3（地震応答波加振 12 サイクル）の地震応答波 1 波の水平変位を図 3.3.4-9 に示す。比較的大きな変形が繰返し現れる 70 秒～120 秒の 50 秒間における結果を図 3.3.4-10～図 3.3.4-13 に示す。図 3.3.4-10 は地震波 1 波目、図 3.3.4-11～13 は地震波 3 波目、5 波目および 12 波目の場合である。地震応答波では、繰返しによる劣化を非考慮とした場合も検討した。劣化非考慮の荷重値は実験結果を上回り、地震波の繰返し数が大きくなるにつれ実験結果との乖離は大きくなる傾向がある。一方、図 3.3.4-10～図 3.3.4-12 より、地震波 5 波目までは、繰返しによる劣化を考慮した解析モデルは実験結果をよく表現できていることがわかる。ただし、図 3.3.4-13 に示す地震波 12 波目においては、劣化考慮の解析モデルは荷重値がほとんど 0 となっている。1～3 波目の累積吸収エネルギーの時刻歴を図 3.3.4-14(a)に、4～12 波目を図 3.3.4-14(b)に示す。図 3.3.4-14(a)より 1～3 波目にて解析モデルは試験結果をやや下回るものの、性状をよく表現できている。また図 3.3.4-14(b)より、5 波目（0～300 秒）まで解析モデルと実験結果の対応はよい。地震応答波加振における地震波 1 波の吸収エネルギーW と累積吸収エネルギーE を表 3.3.4-3 に示す。表 3.3.4-3 の解析は劣化考慮モデルの場合を示している。地震波 1～5 波目における実験と解析モデルとの乖離は W で最大 13%、E で 11%であった。 6 波目で解析モデルによる W は実験値に対して－57%となった。また 7 波目以降では、実験結果に対してより小さな値となっている。これは、解析モデルの耐力喪失時における累積吸収エネルギー$E4$（図 3.3.4-4 中の④点）を漸増正弦波加振結果から式(3.3.4-6)のように $E4$=8,859～9,854 kNm として設定しているためである。今回の解析モデルの適用範囲としては、地震波 5 波目の累積吸収エネルギーE に相当する 8,000kNm 程度までである。ただし 5 波目の吸収エネルギーW は 1 波目の半分にまで低下し、写真 3.3.4-3 より 5 波目の最大変形時に試験体下部に生じた亀裂が大きく開き、大きな形状変化が生じていることがわかる。一方、表 3.3.4-3 に示すように E =18,000 kNm 程度まで U2426 鉛ダンパーはエネルギー吸収をおこなっている。写真 3.3.4-3 および 3.3.4-4 のようなダンパーの状態を許容し、1 台のダンパーに対する累積吸収エネルギーE が 8,000kNm を超える入力を検討する際には、地震応答波実験結果の 6 波目以降もシミュレート可能な解析モデルを構築する必要がある。

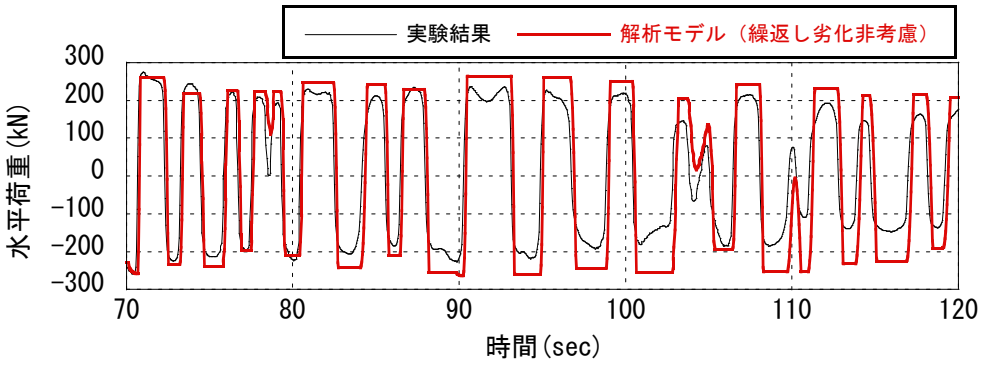


実験結果　　解析モデル（劣化非考慮）　　解析モデル（劣化考慮）

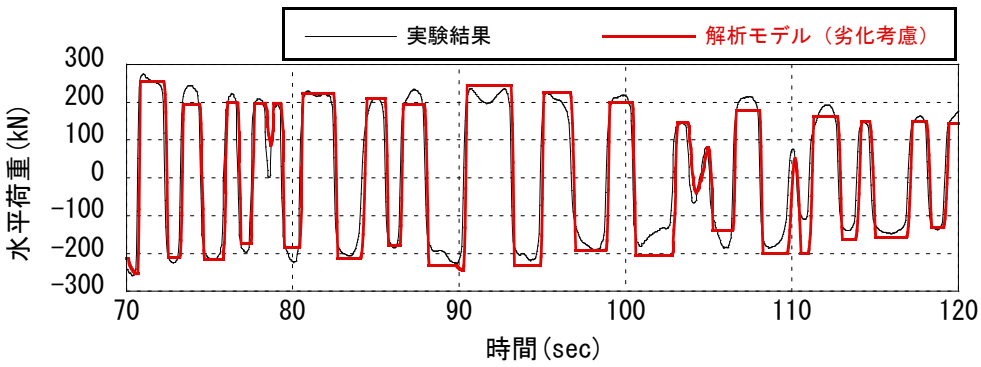
(a)　荷重変形関係



(b)　水平変形

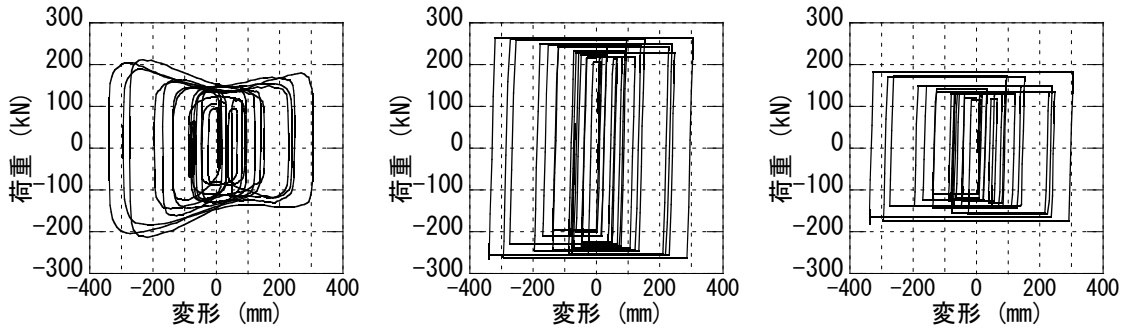


(c)　水平荷重　劣化非考慮



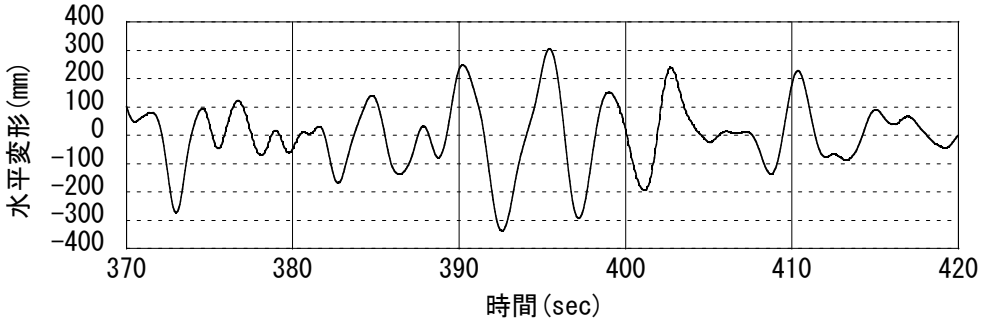
(d)　水平荷重　劣化考慮

図 3.3.4-10　試験体 No.3（地震応答波加振）１波目

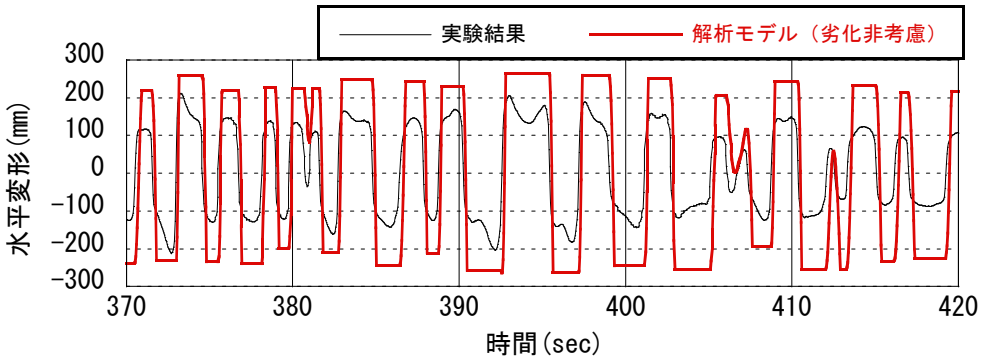


実験結果　　解析モデル（劣化非考慮）　　解析モデル（劣化考慮）

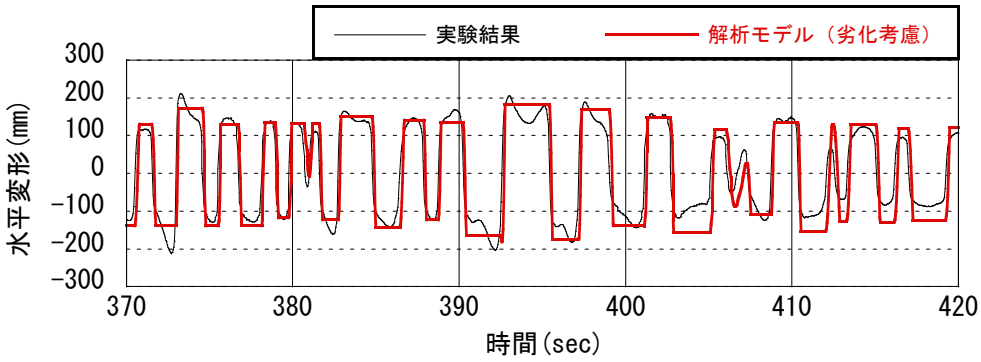
(a)　荷重変形関係



(b)　水平変形

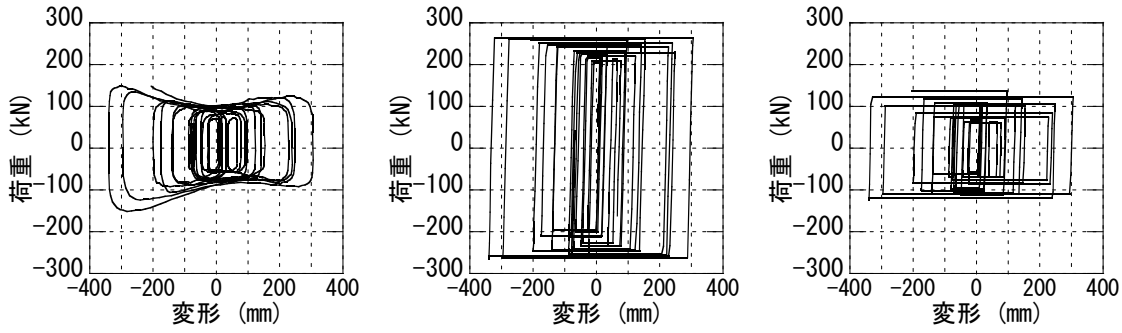


(c)　水平荷重　劣化非考慮



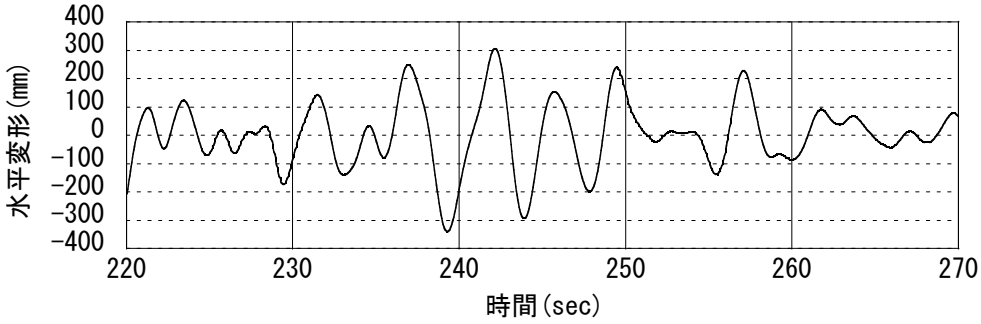
(d)　水平荷重　劣化考慮

図 3.3.4-11　試験体 No.3（地震応答波加振）3 波目

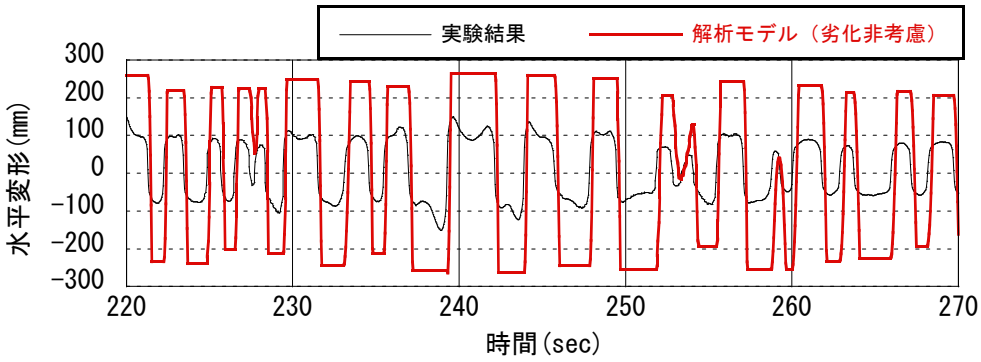


実験結果　　解析モデル（劣化非考慮）　　解析モデル（劣化考慮）

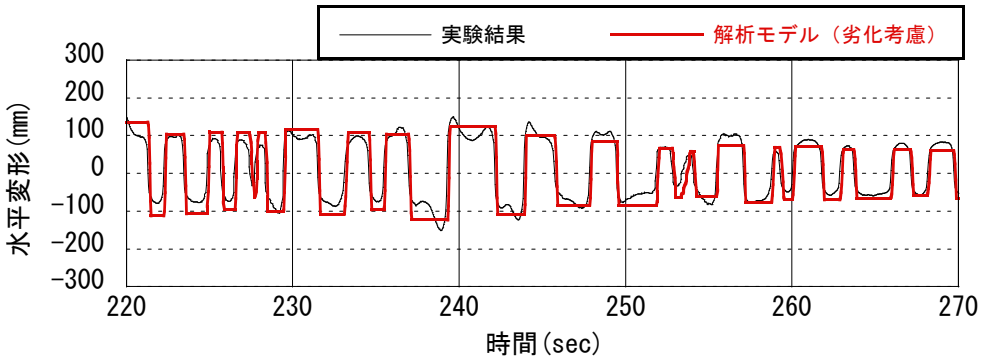
(a)　荷重変形関係



(b)　水平変形

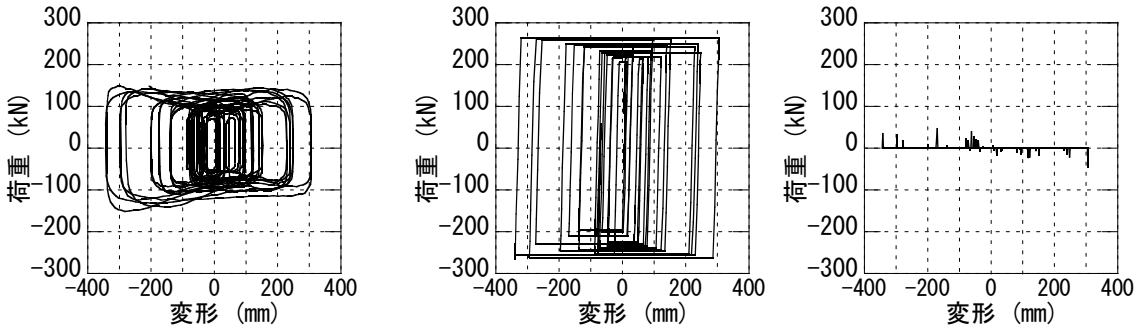


(c)　水平荷重　劣化非考慮



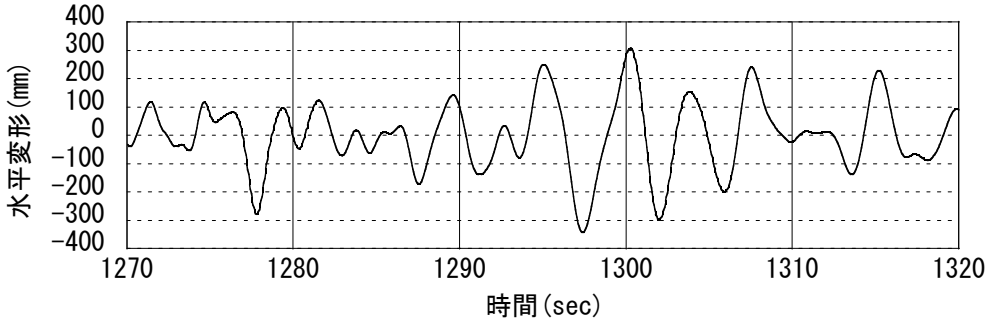
(d)　水平荷重　劣化考慮

図 3.3.4-12　試験体 No.3（地震応答波加振）5 波目

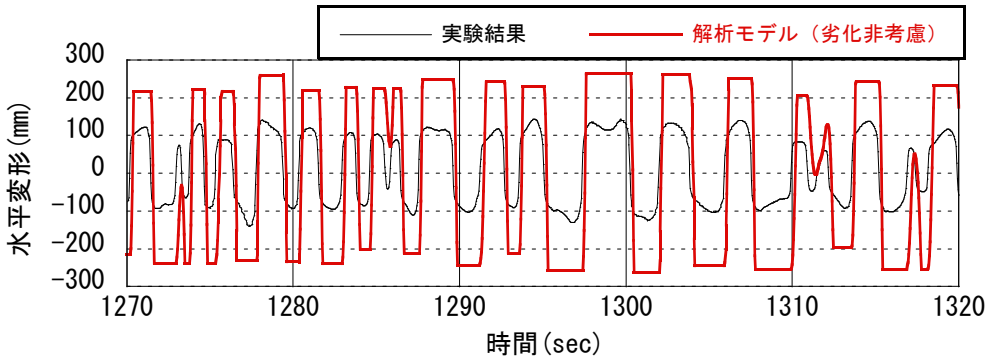


実験結果　　解析モデル（劣化非考慮）　　解析モデル（劣化考慮）

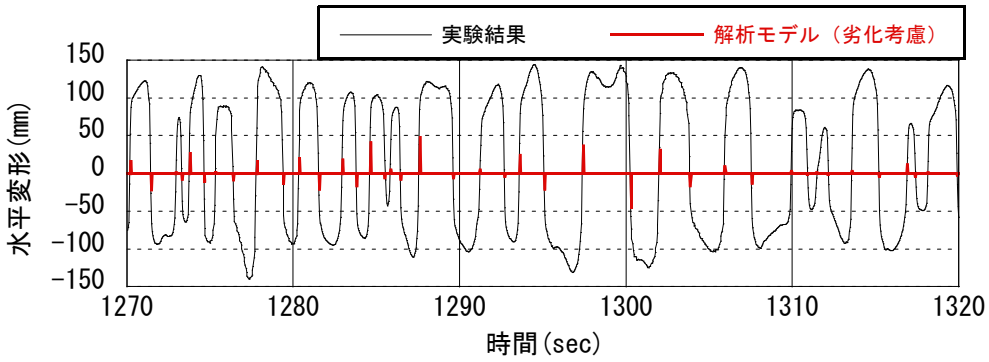
(a)　荷重変形関係



(b)　水平変形

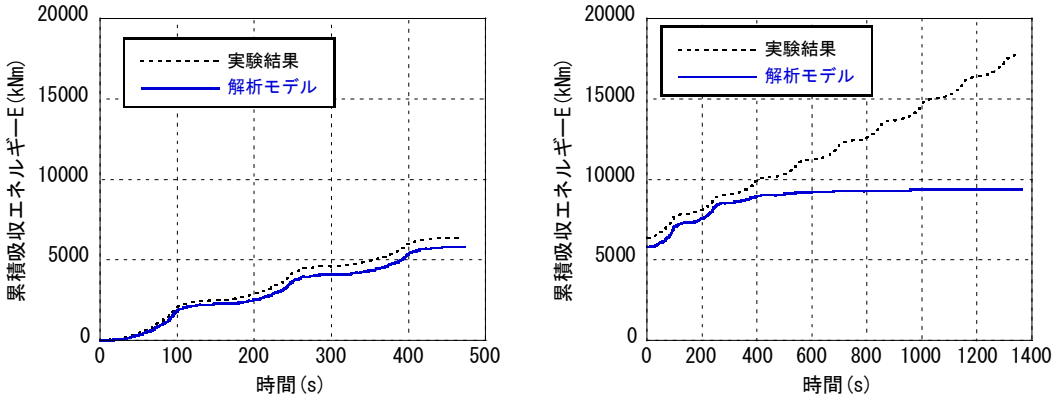


(c)　水平荷重　劣化非考慮



(d)　水平荷重　劣化考慮

図 3.3.4-13　試験体 No.3（地震応答波加振）12 波目



(a)地震応答波加振　1～3 回目　　(b)地震応答波加振　4～12 回目

図 3.3.4-14　試験体 No.3（地震応答波加振）の累積吸収エネルギー

表 3.3.4-3 地震波 1 波の吸収エネルギー*W* と累積吸収エネルギー*E*

回数	Σ*d*(m)	*W*（実験）	*W*（解析）	*W* 解析/*W* 実験	*E*（実験）	*E*（解析）	*E* 解析/ *E* 実験
1	13.1	2,494	2,270	0.91	2,494	2,270	0.91
2	26.3	2,129	1,844	0.87	4,623	4,114	0.89
3	39.8	1,743	1,691	0.97	6,366	5,805	0.91
4	53.4	1,517	1,538	1.01	7,883	7,343	0.93
5	67.0	1,187	1,237	1.04	9,070	8,580	0.95
6	80.7	1,088	465	0.43	10,158	9,045	0.89
7	94.4	1,091	172	0.16	11,249	9,217	0.82
8	108.2	1,167	81	0.07	12,416	9,298	0.75
9	121.9	1,281	38	0.03	13,698	9,336	0.68
10	135.6	1,349	19	0.01	15,047	9,355	0.62
11	149.2	1,357	10	0.01	16,403	9,365	0.57
12	162.9	1,352	6	0.00	17,755	9,371	0.53

※*W*,*E* の単位は(kNm)、解析モデルは劣化考慮の場合を示す。

写真 3.3.4-1　地震応答波 1 波目　最大変形時

写真 3.3.4-2　地震応答波 3 波目　最大変形時

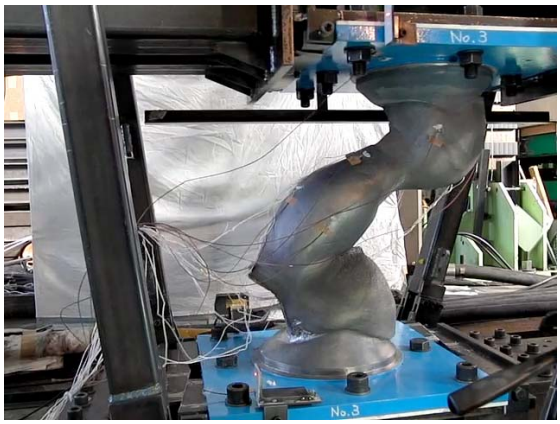


写真 3.3.4-3　地震応答波 5 波目　最大変形時

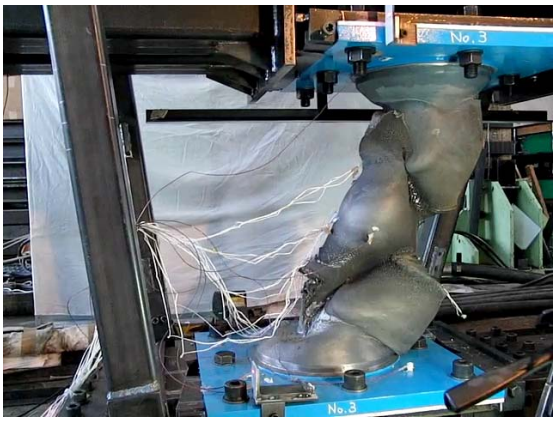


写真 3.3.4-4　地震応答波 12 波目　最大変形時

5) まとめと今後の課題

平成 22 年度に実施した鉛ダンパーU2426 の実験結果から、繰返しによる耐力低下が確認された。実験結果から得られたダンパー耐力の実性状を表現するために、解析モデルの検討を行った。提案した解析モデルは、振幅および繰返しによるエネルギー吸収量に応じてダンパーの耐力を変化させる。長周期地震動時における応答波加振時の実験結果に対して、解析モデルは累積吸収エネルギー8,000～9,000kNm まで力学特性を精度よく表現できることを確認した。

以下に今後の課題を列挙する。

①ダンパーの累積吸収エネルギーE が 8,000kNm を超える場合への適用範囲の拡大

今回提案した解析モデルは、漸増連続基本加振の破断時累積吸収エネルギー8,000～9,000kNm 程度までが適用範囲である。地震応答波多数回繰返し加振結果では、上記を超えるエネルギー量においてもダンパーはエネルギー吸収が可能であることを確認している。建物条件や入力地震動によって上記の適用範囲を超える検討を行う場合には、本提案モデルの適用範囲の拡大が必要となる。

②２方向加力特性の評価および 2 方向特性を表現可能な解析モデルの提案

鉛ダンパーの 2 方向加力時特性を実験的に把握した研究は発表されていない。地震時実挙動と照らして考えると、2 方向加力時特性を実験的に確認し、これらの特性を精度よく評価可能なモデルの構築が必要である。

(2) 地震応答解析

前節にて提案した繰返しによる降伏荷重の変化を考慮できる鉛ダンパーの復元力特性を用いて、天然ゴム系積層ゴムと鉛ダンパーからなる免震層を有する 1 質点系の地震応答解析を実施した。

1) 解析モデル

解析で想定する建物諸元を表 3.3.4-4 に示す。また解析モデルを図 3.3.4-15 に示す。上部構造は 1 質点とした。上部構造の重量は 46,000kN である。天然ゴム系積層ゴムによる免震周期は 4.0 秒とする。鉛ダンパーの負担せん断力係数は 0.033（U2426 型鉛ダンパー7 台）とする。

天然ゴム系積層ゴムの復元力特性は線形弾性とする。

鉛ダンパーの復元力特性は、前節で示した振幅ならびに繰返しによる累積吸収エネルギーに応じて降伏耐力が変化するバイリニアモデルとした。本節では、繰返しによる降伏耐力の変化による免震建物応答への影響を評価するため、繰返しによる降伏耐力の変化を考慮するモデルを用いた場合と非考慮の場合で応答解析結果を比較する。なお、両モデルとも降伏耐力の振幅依存性は考慮している。鉛ダンパー解析モデルの地震波入力時の履歴性状を図 3.3.4-16 に示す。

免震層の減衰は鉛ダンパーの履歴減衰のみを考慮した。なお本検討は水平方向 1 自由度とする。解析手法は Newmark β 法（β=1/4）を用いた。

表 3.3.4-4 天然ゴム系積層ゴム＋鉛ダンパー解析モデル

想定建物	RC 造、10 階建て 基礎免震
上部構造重量	46,000kN
鉛ダンパー台数	7 台
積層ゴム台数	10 台
積層ゴム直径(内径)	750mm(15mm)
積層ゴム面圧	10.1 N/mm^2
ゴムによる周期	4.0 秒
鉛ダンパー負担 せん断力係数	0.033

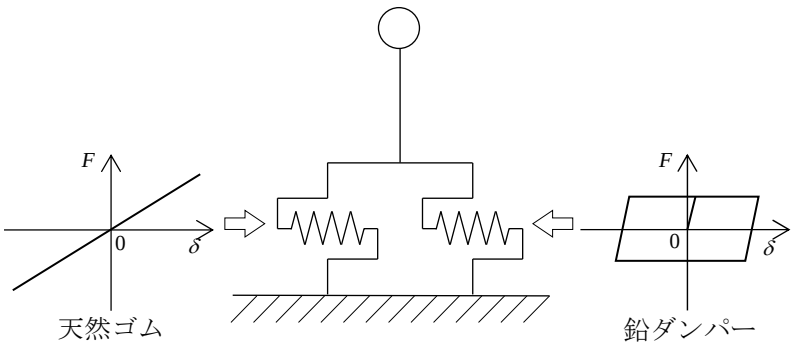
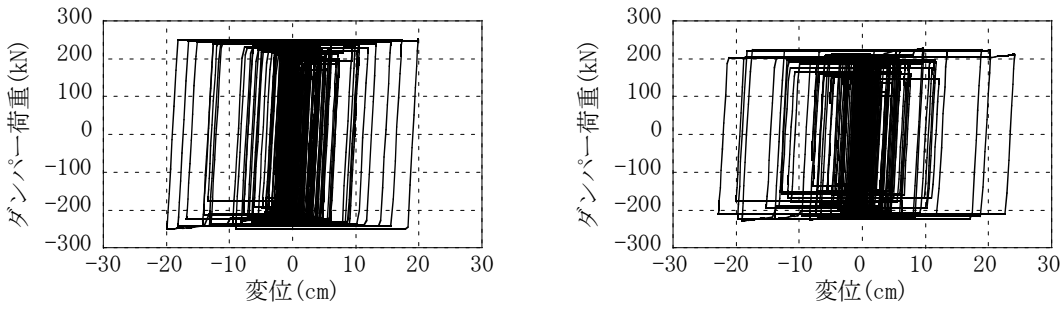


図 3.3.4-15　解析モデル模式図



(a)繰返しによる耐力変化非考慮　　(b) 繰返しによる耐力変化考慮

図 3.3.4-16 鉛ダンパーの解析モデル復元力特性（地震波入力：AIC003 入力倍率：1.5）

2) 解析結果

時刻歴応答解析結果を表 3.3.4-5 に示す。各応答値の繰返し非考慮モデルに対する繰返し考慮モデルの比率も併せて表中に示している。表 3.3.4-5(c)に示す免震層の累積変形量は、免震層の累積吸収エネルギー95%時における値としている。鉛ダンパー1 台あたりの累積吸収エネルギーの最大値は、表 3.3.4-5(b)より SZO024 入力倍率 1.5 時における 3,542kNm であった。これは鉛ダンパー解析モデルの適用範囲内である。

入力地震動 KGIN の場合では、入力倍率 1.5 倍においても応答値各項目において繰返しによる影響は表れなかった。これは、繰返し考慮モデルは累積吸収エネルギーが少なくとも 195kN を超えないと降伏耐力が変化しないためであり、KGIN の応答結果は最大変位が 4cm 以下、ダンパー1 台あたりの累積吸収エネルギーが 150kNm 以下であったことによる。

繰返しによる降伏耐力の変化を考慮すると、免震層最大変位は非考慮時に対して 0.97～1.21 倍となった。SZO024 の入力倍率 1.5 時では繰返し考慮時に 40.9cm となり、今回の検討入力波のうちで最も大きな変位となっている。

応答最大加速度は 38～135cm/s^2、免震層の応答最大せん断力係数は 0.04～0.13 であった。繰返し特性考慮時のこれらの値は非考慮時に対して 0.95～1.05 倍であり、最大変位に比べて変化は小さい。

鉛ダンパー1 台あたりの累積吸収エネルギーは、最大で約 3,500kNm であった。正弦波±400mm 時加振時の最終エネルギー吸収量は 8,850kNm であり、いずれの入力地震波においてもこの値を下回った。ダンパー1 台あたりの累積吸収エネルギーは、繰返しによる劣化考慮により 0.95～1.12 倍になった。

免震層の累積変形量は、8.5m～19.4mであった。繰返し考慮時で 0.96～1.21 倍であった。増幅率は免震層の最大変位と同程度であった。免震層の吸収エネルギーから求めた速度換算値は繰返し考慮時で 0.97～1.06 倍であった。

表 3.3.4-5(a) 応答解析結果（最大応答水平変位、応答加速度）

入力地震動	入力倍率	免震層最大水平変位 (cm)			応答最大加速度 (cm/s^2)		
		繰返し非考慮	繰返し考慮	考慮/非考慮	繰返し非考慮	繰返し考慮	考慮/非考慮
OSKH02_AV	1.00	13.61	14.75	1.084	69.7	71.0	1.018
	1.25	22.43	24.93	1.111	93.3	97.9	1.049
	1.50	32.58	35.76	1.098	119.7	125.9	1.052
AIC003_AV	1.00	13.18	13.47	1.022	68.5	67.6	0.987
	1.25	17.39	16.93	0.973	79.9	76.3	0.955
	1.50	19.90	24.17	1.215	86.6	91.2	1.054
SZO024_AV	1.00	20.26	21.42	1.057	87.5	87.6	1.001
	1.25	27.95	29.92	1.070	107.7	107.9	1.002
	1.50	35.73	40.89	1.145	127.8	134.7	1.054
KGIN_AV	1.00	2.86	2.86	1.000	38.2	38.2	1.000
	1.25	3.29	3.29	1.000	39.7	39.7	1.000
	1.50	3.69	3.69	1.000	41.0	41.0	1.000

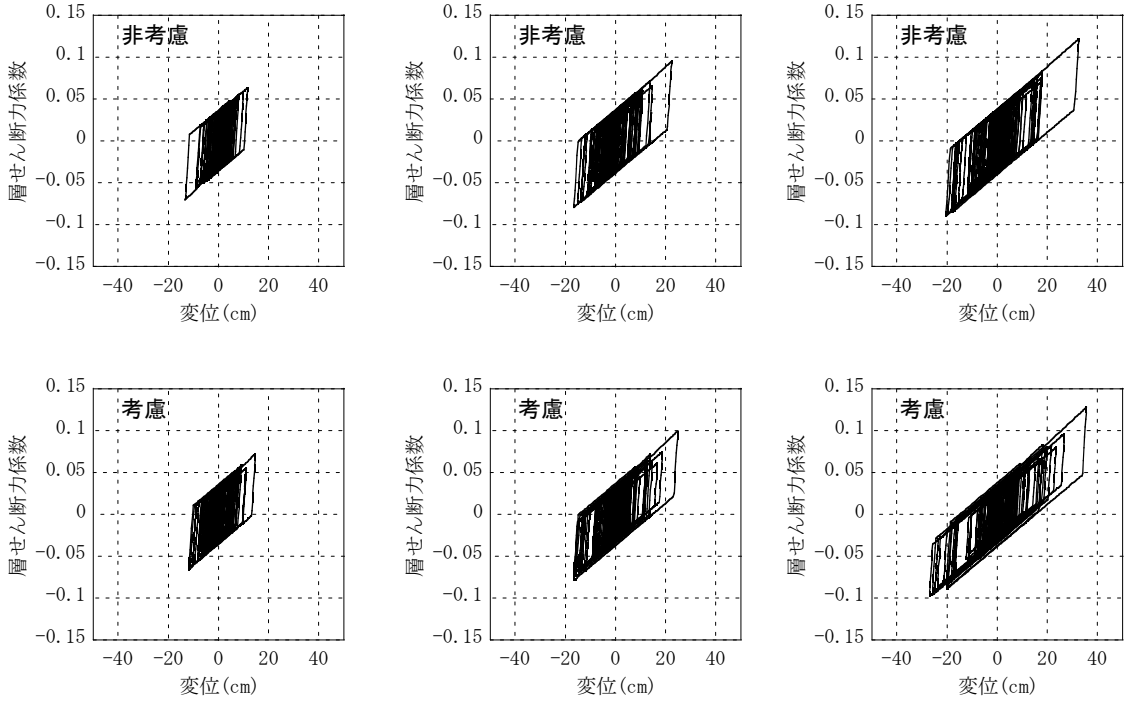
表 3.3.4-5(b) 応答解析結果（応答せん断力係数、ダンパーの累積吸収エネルギー）

入力地震動	入力倍率	免震層応答最大せん断力係数			ダンパー1台あたりの累積吸収エネルギー(kNm)		
		繰返し非考慮	繰返し考慮	考慮/非考慮	繰返し非考慮	繰返し考慮	考慮/非考慮
OSKH02_AV	1.00	0.071	0.072	1.018	1086.7	1167.6	1.074
	1.25	0.095	0.100	1.049	1842.8	2033.3	1.103
	1.50	0.122	0.128	1.052	2793.3	3114.1	1.115
AIC003_AV	1.00	0.070	0.069	0.987	1152.9	1158.0	1.004
	1.25	0.081	0.078	0.955	1690.1	1717.7	1.016
	1.50	0.088	0.093	1.054	2312.8	2403.3	1.039
SZO024_AV	1.00	0.089	0.089	1.001	1698.5	1769.5	1.042
	1.25	0.110	0.110	1.002	2615.9	2575.9	0.985
	1.50	0.130	0.137	1.054	3542.4	3381.8	0.955
KGIN_AV	1.00	0.039	0.039	1.000	53.5	53.5	1.000
	1.25	0.040	0.040	1.000	90.0	90.0	1.000
	1.50	0.042	0.042	1.000	153.2	153.2	1.000

表 3.3.4-5(c) 応答解析結果（免震層累積変形量、累積吸収エネルギー速度換算値）

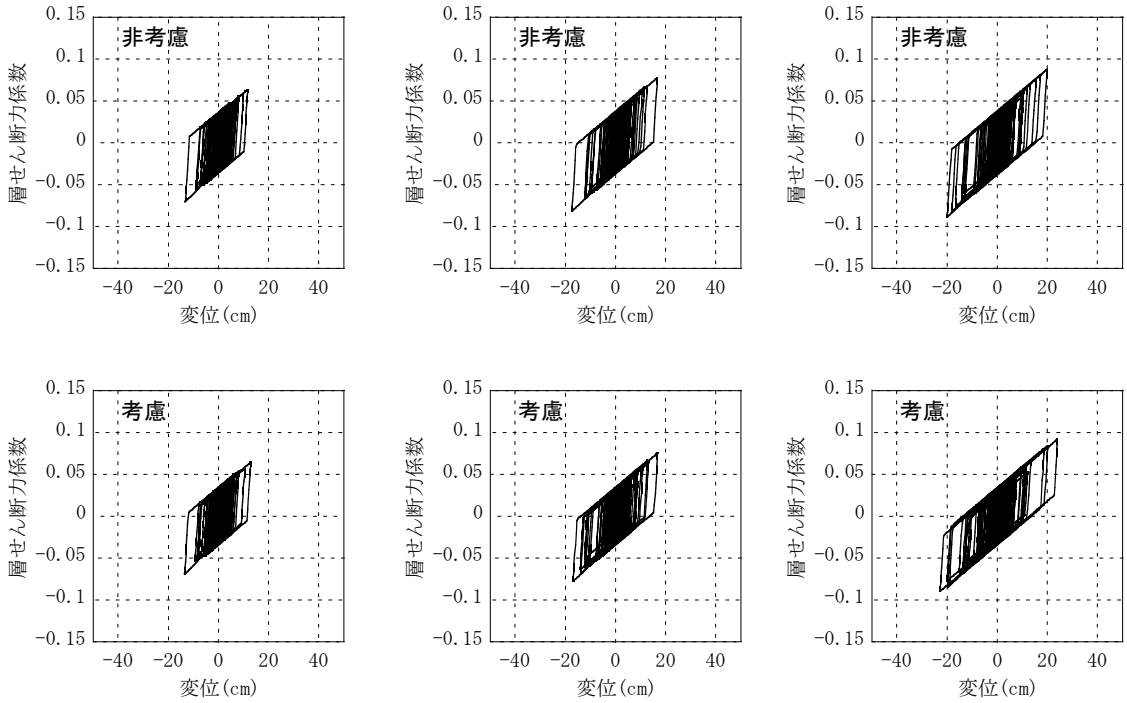
入力地震動	入力倍率	免震層累積変形量(m)			免震層累積エネルギー速度換算値(cm/s)		
		繰返し非考慮	繰返し考慮	考慮/非考慮	繰返し非考慮	繰返し考慮	考慮/非考慮
OSKH02_AV	1.00	8.5	9.3	1.097	180.1	186.7	1.037
	1.25	11.8	13.3	1.121	234.5	246.3	1.050
	1.50	15.4	18.5	1.205	288.7	304.9	1.056
AIC003_AV	1.00	11.9	11.6	0.974	185.5	185.9	1.002
	1.25	14.9	14.3	0.964	224.6	226.4	1.008
	1.50	17.7	17.0	0.962	262.7	267.8	1.019
SZO024_AV	1.00	10.5	11.3	1.071	225.2	229.8	1.021
	1.25	14.1	15.4	1.088	279.4	277.3	0.992
	1.50	17.9	19.4	1.086	325.2	317.7	0.977
KGIN_AV	1.00	10.4	10.4	1.000	40.0	40.0	1.000
	1.25	10.2	10.2	1.000	51.8	51.8	1.000
	1.50	10.2	10.2	1.000	67.6	67.6	1.000

図 3.3.4-17 に免震層のせん断力係数と水平変位の関係を示す。KGIN を除いて繰返し考慮時の履歴形状は非考慮に対して変形量が大きくなる傾向がわかる。免震層変位、累積変形量および吸収エネルギーの時刻歴を図 3.3.4-18 に示す。免震層変位の振幅が大きな区間では、累積変形量、吸収エネルギーの時間あたりの上昇量は大きい。吸収エネルギーは振幅が大きい区間を過ぎると、ほとんど変化が見られなくなるのに対し、累積変形量は解析終了まで漸増する。



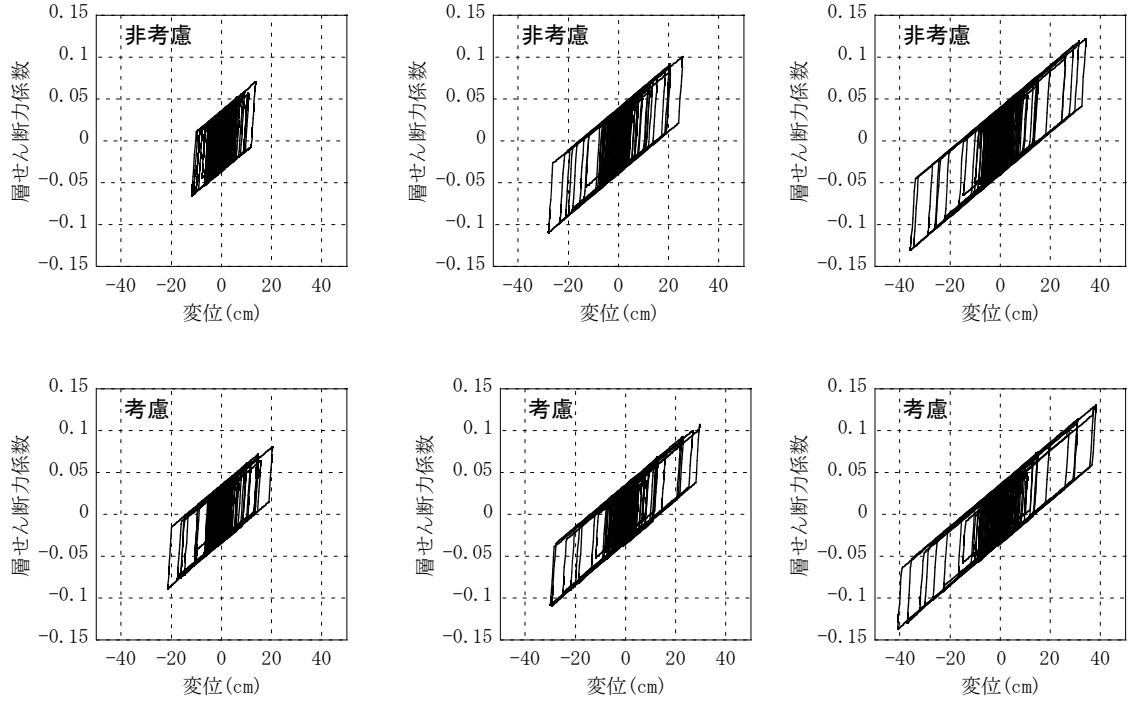
(a)1.0 倍入力　　(b)1.25 倍入力　　(c)1.5 倍入力

図 3.3.4-17(a) OSKH02 入力時　免震層せん断力係数－免震層変位関係



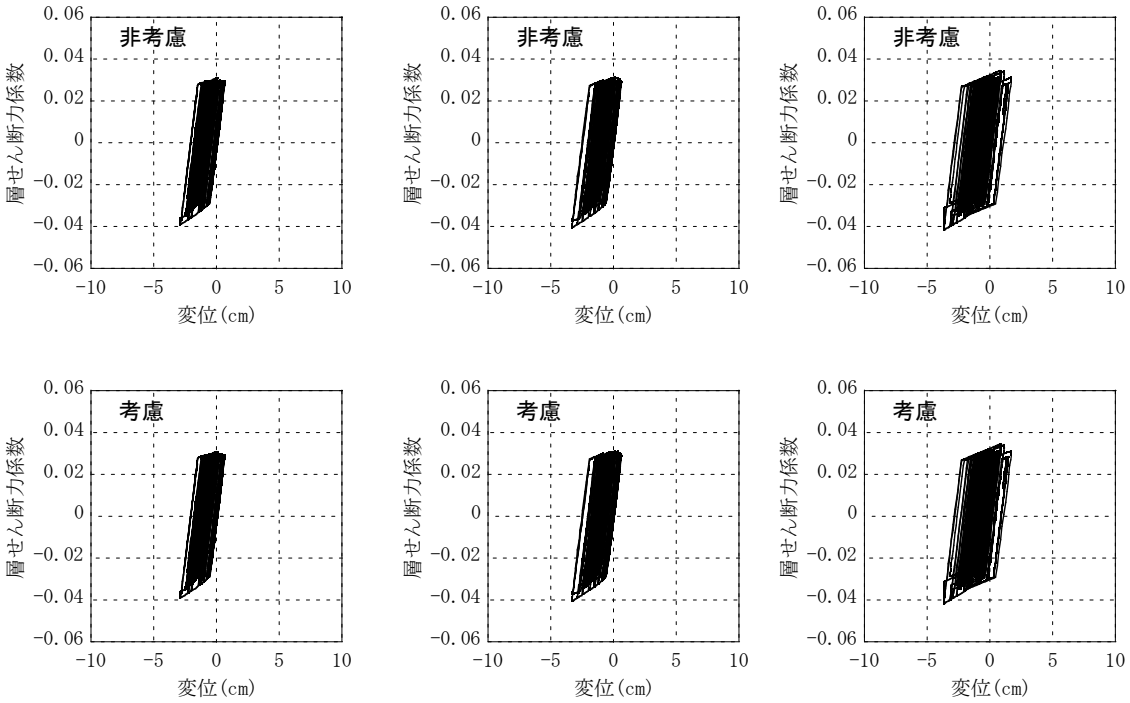
(a)1.0 倍入力　　(b)1.25 倍入力　　(c)1.5 倍入力

図 3.3.4-17(b) AIC003 入力時　免震層せん断力係数－免震層変位関係



(a)1.0 倍入力　　(b)1.25 倍入力　　(c)1.5 倍入力

図 3.3.4-17(c) SZO024 入力時　免震層せん断力係数－免震層変位関係



(a)1.0 倍入力　　(b)1.25 倍入力　　(c)1.5 倍入力

図 3.3.4-17(d) KGIN 入力時　免震層せん断力係数－免震層変位関係

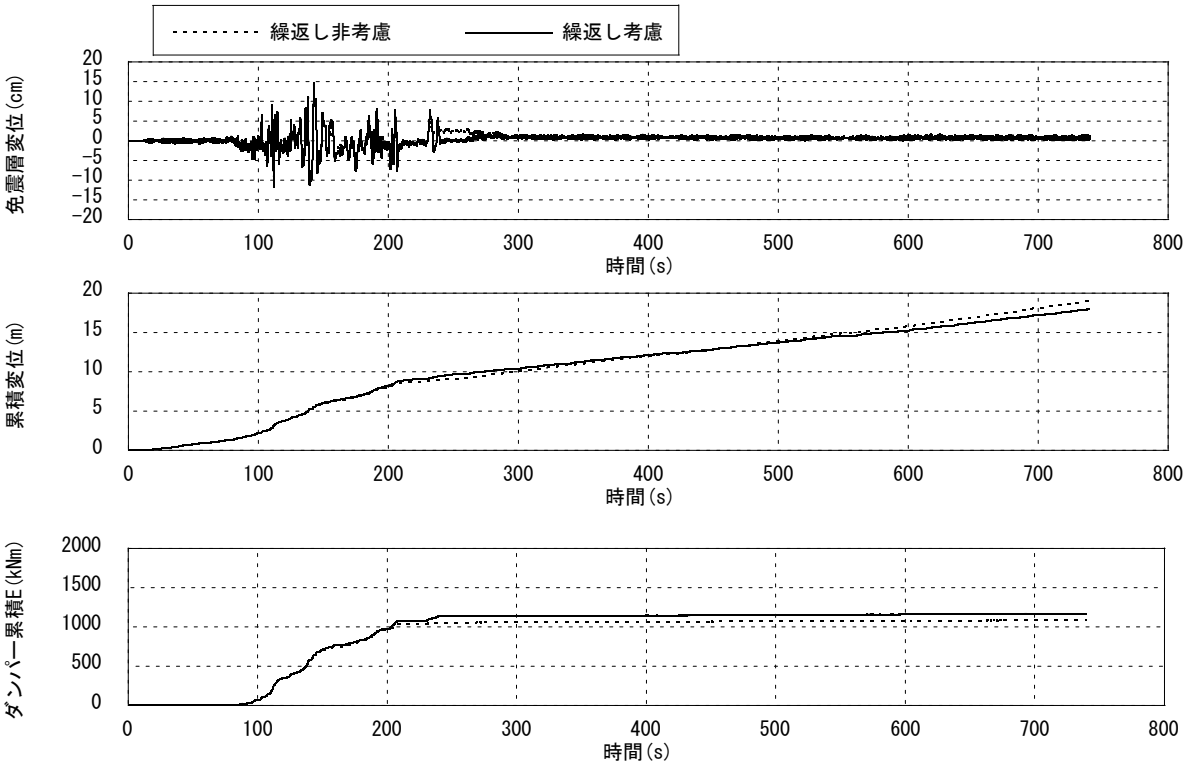


図 3.3.4-18(a) OSKH02 入力倍率 1.0　時刻歴応答

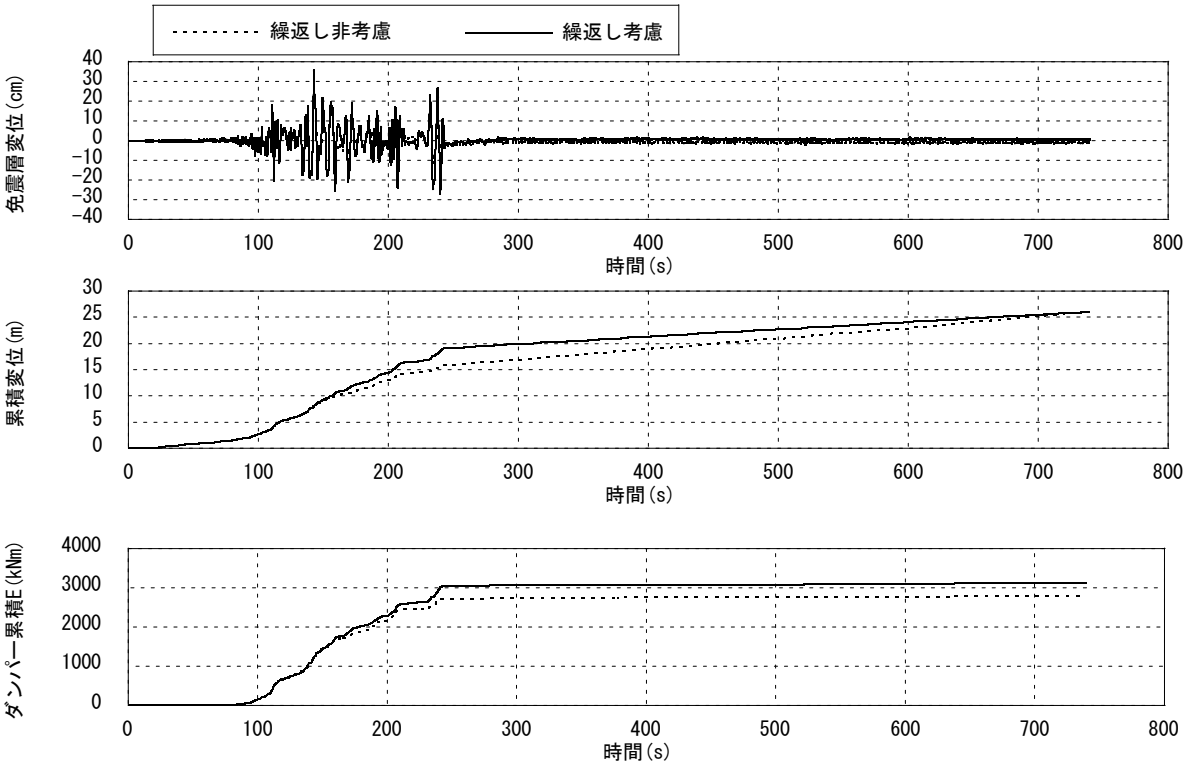


図 3.3.4-18(b) OSKH02 入力倍率 1.5　時刻歴応答

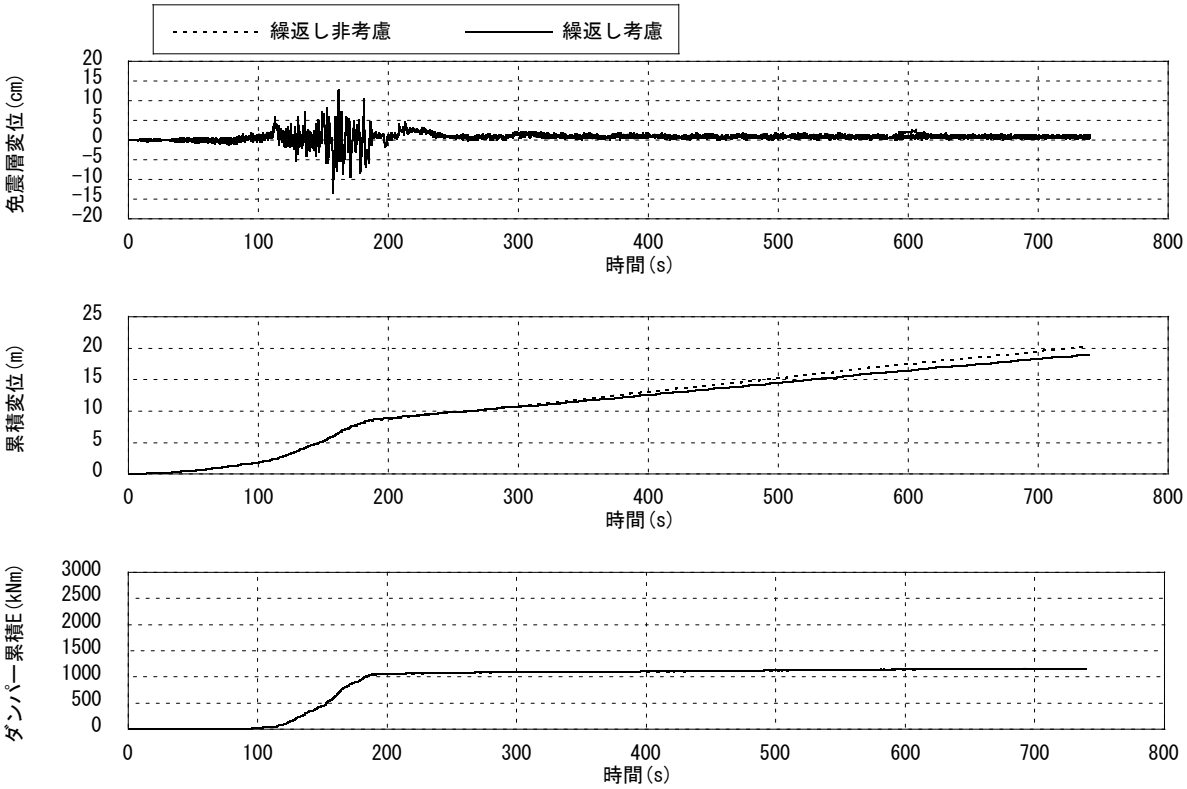


図 3.3.4-18(c) AIC003 入力倍率 1.0　時刻歴応答

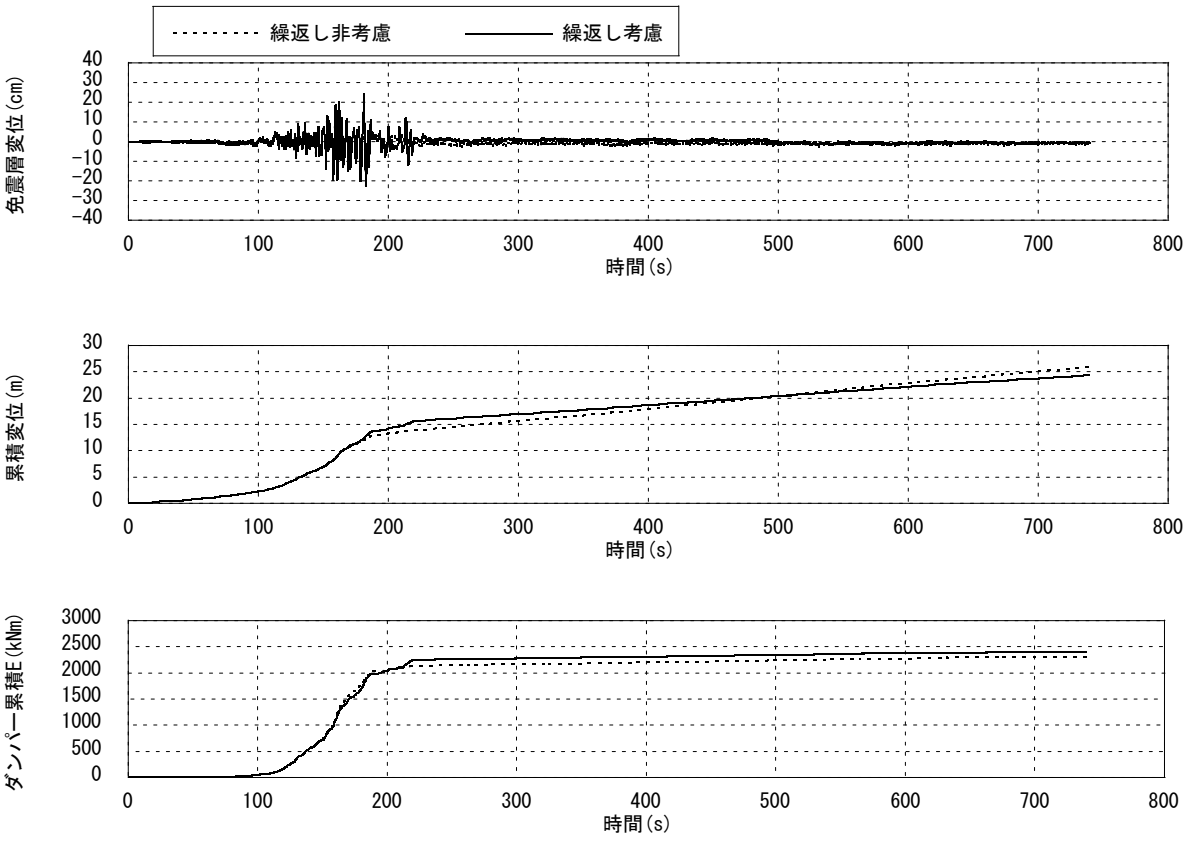


図 3.3.4-18(d) AIC003 入力倍率 1.5　時刻歴応答

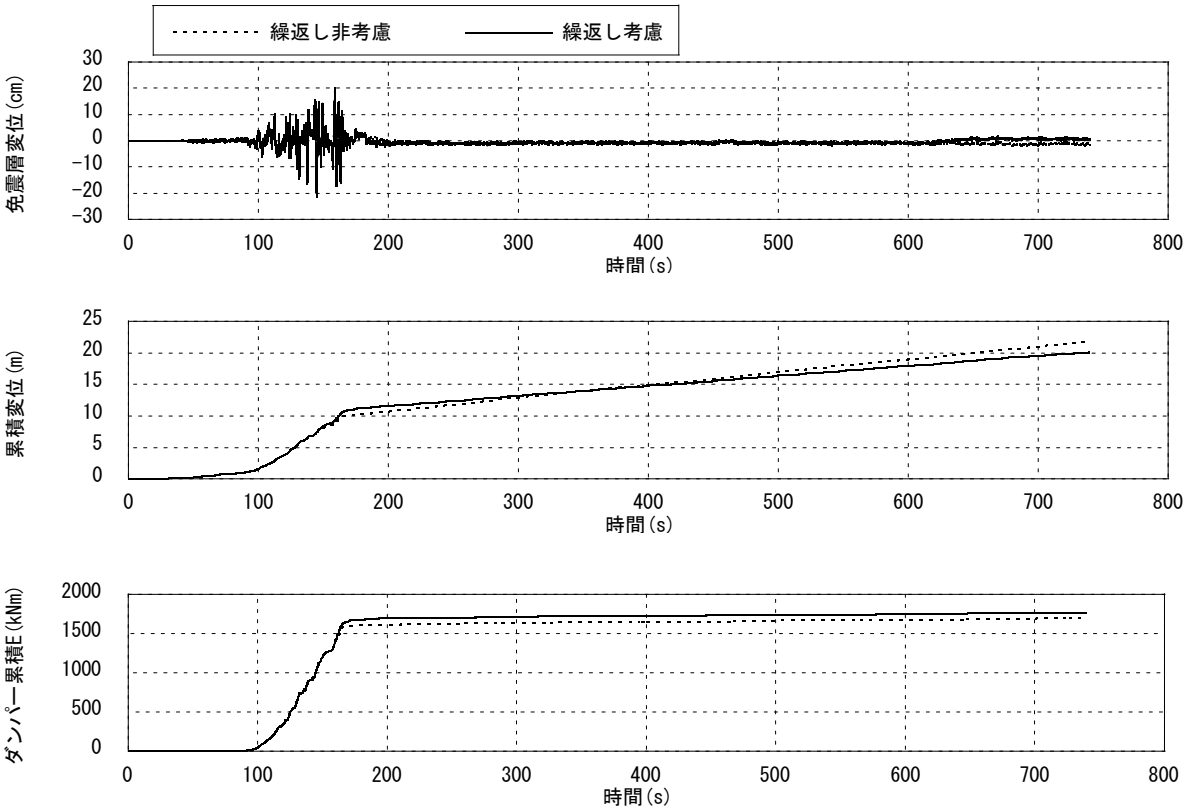


図 3.3.4-18(e) SZO024 入力倍率 1.0　時刻歴応答

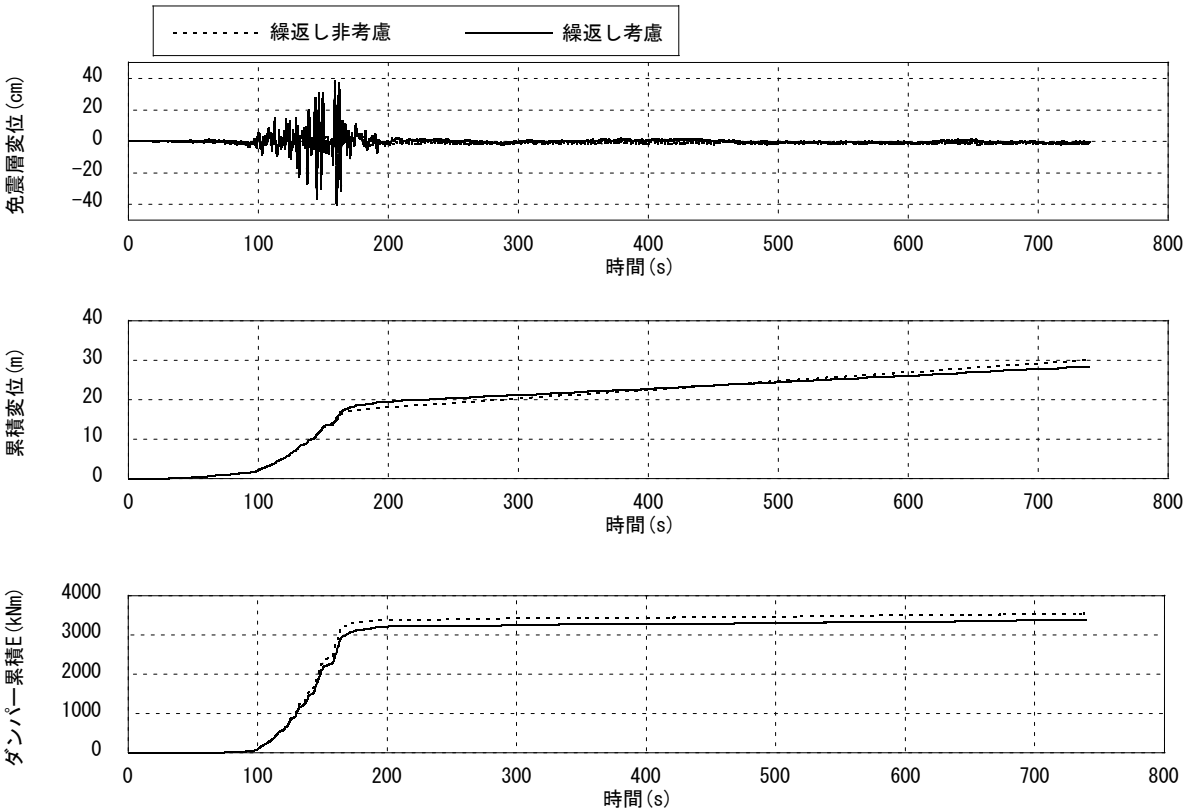


図 3.3.4-18(f) SZO024 入力倍率 1.5　時刻歴応答

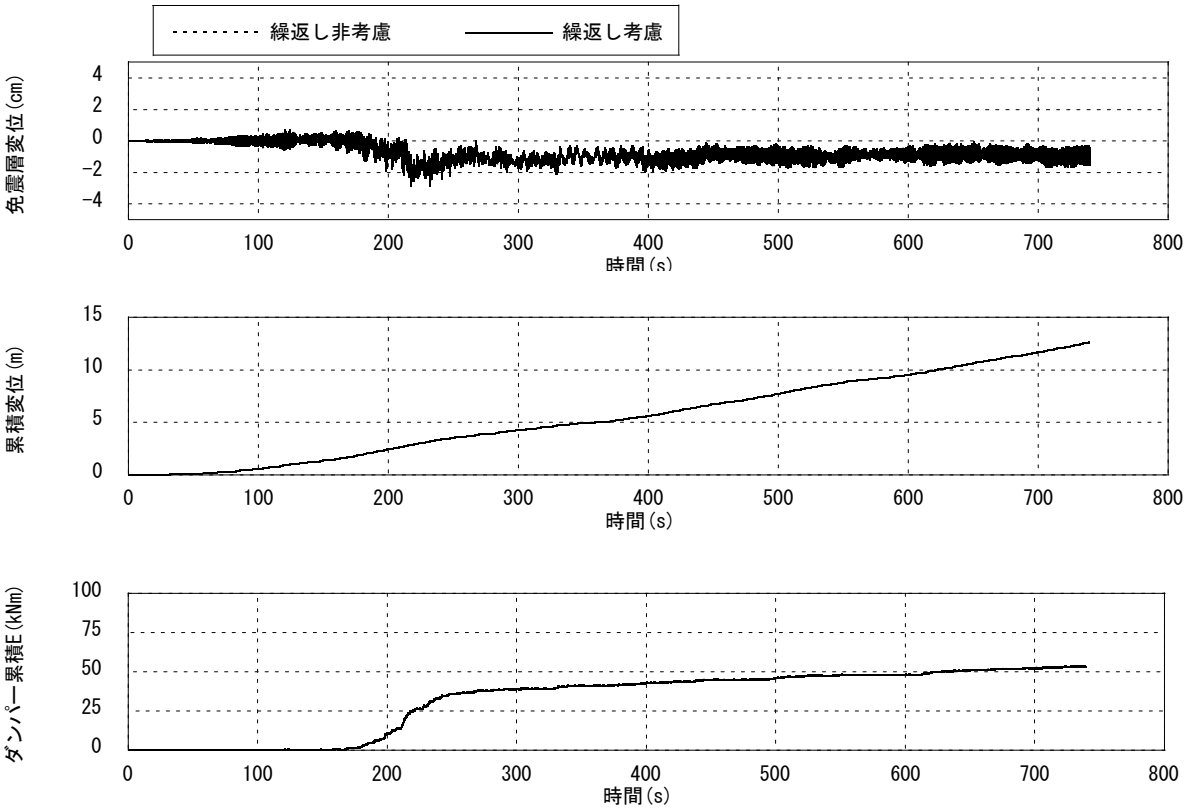


図 3.3.4-18(g) KGIN 入力倍率 1.0　時刻歴応答

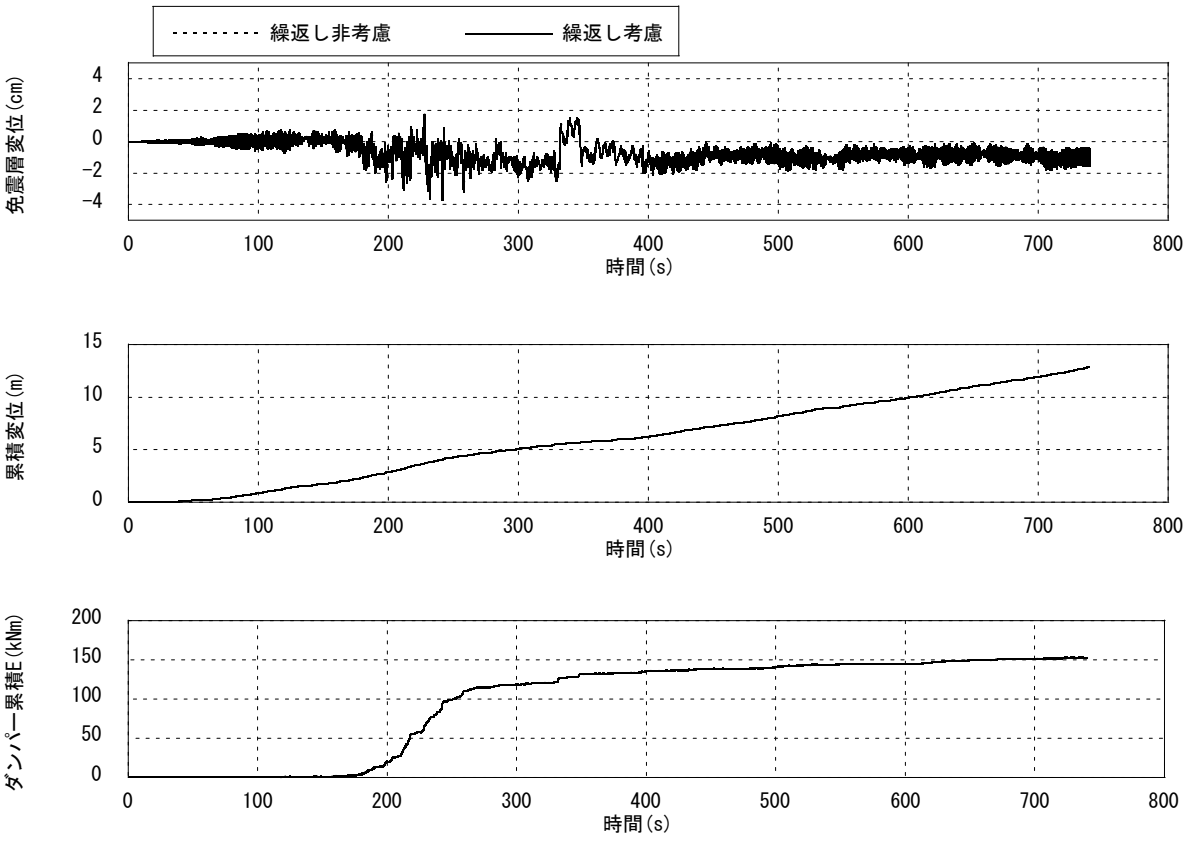


図 3.3.4-18(h) KGIN 入力倍率 1.5　時刻歴応答

鉛ダンパーの繰返し加力時の特性として、破断前に亀裂が発生することが報告されている。様々な振幅にて実験的に確認された鉛ダンパーの亀裂発生および破断時繰返し回数の関係を図3.3.4-19に示す[3.3.4-2)]。亀裂や破断に対する鉛ダンパーの疲労損傷評価法としては、鋼材ダンパーと同様にMiner則を用いた検討が実施されている。地震応答解析結果に対してMiner則による累積損傷度評価を実施した。

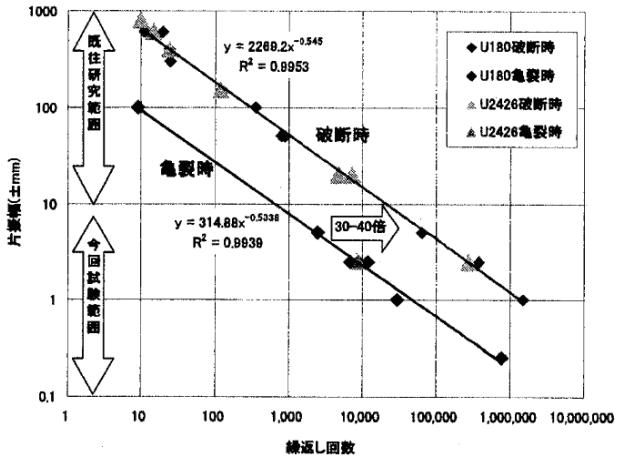


図 3.3.4-19 鉛ダンパーの振幅と亀裂発生および破断時繰返し回数の関係[3.3.4-2)]

変位振幅δと亀裂発生時繰返し数N_c、破断時繰返し数N_dの関係は以下の式で表される。

$$N_c = 4.69\times10^4\ \delta^{-1.87} \tag{3.3.4-9}$$

$$N_d = 1.38\times10^6\ \delta^{-1.83} \tag{3.3.4-10}$$

δ： 片振幅(mm)

地震応答解析結果より鉛ダンパーの疲労損傷評価を行うため、レインフロー法により免震層水平変位波形の振幅と繰返し数n_iとの関係を求めた。亀裂および破断に対する累積疲労損傷度D_c、D_dを式(3.3.4-11)にて評価する。Miner則では損傷度D=1（100%）で亀裂および破断が生じるものとする。

$$D_c = \sum_i \frac{n_i}{N_{ci}},\ D_d = \sum_i \frac{n_i}{N_{di}} \tag{3.3.4-11}$$

D_c： 亀裂に対する累積損傷度

D_d： 破断に対する累積損傷度

n_i： i番目の振幅の繰返し数

N_{ci}： i番目の振幅の亀裂発生繰返し数

N_{di}： i番目の振幅の破断時繰返し数

地震応答解析結果に対する累積損傷度評価を表3.3.4-6に示す。OSKH02、AIC003およびSZO024の入力倍率1.00で亀裂に対しての累積損傷度D_cが100%を超えており、本評価法では亀裂発生の可能性が高いと判断される。OSKH02、AIC003およびSZO024の入力倍率1.50において破断に対する累積損傷度D_dは100%を下回った。SZO024の1.5倍入力時においてD_dは最大の23%となり、

破断に対して 4 倍程度の余裕がある。KGIN では 1.5 倍入力時でも亀裂に対しての累積損傷度D_cが 30%となり、本評価法では亀裂は発生しない。

疲労損傷度の繰返し考慮時と非考慮時の比を表中右に示す。KGIN を除き、繰返し考慮時では非考慮時に対して疲労損傷度が増加した。増加率は入力波の種類、入力倍率により異なる。OSKH02 の入力倍率 1.5 倍では、考慮時の疲労損傷度は非考慮に対して 1.5 倍となった。

表 3.3.4-6 鉛ダンパーの累積損傷度

入力地震動	入力倍率	繰返し非考慮			繰返し考慮			疲労損傷度 繰返し考慮/非考慮	
		免震層最大変位 (cm)	疲労損傷度		免震層最大変位 (cm)	疲労損傷度			
			亀裂D_c	破断D_d		亀裂D_c	破断D_d	亀裂	破断
OSKH02	1.00	13.61	130.9%	3.9%	14.75	143.9%	4.2%	1.10	1.09
	1.25	22.43	253.1%	7.3%	24.93	337.5%	9.6%	1.33	1.31
	1.50	32.58	465.5%	13.1%	35.76	690.2%	19.2%	1.48	1.46
AIC003	1.00	13.18	129.7%	3.8%	13.47	132.4%	3.9%	1.02	1.01
	1.25	17.39	209.8%	6.1%	16.93	226.8%	6.5%	1.08	1.07
	1.50	19.90	315.4%	9.0%	24.17	393.3%	11.1%	1.25	1.23
SZO024	1.00	20.26	228.7%	6.6%	21.42	274.1%	7.8%	1.20	1.18
	1.25	27.95	441.1%	12.4%	29.92	521.4%	14.5%	1.18	1.17
	1.50	35.73	719.8%	19.9%	40.89	832.8%	22.9%	1.16	1.15
KGIN	1.00	2.86	26.2%	0.8%	2.86	26.2%	0.8%	1.00	1.00
	1.25	3.29	27.2%	0.9%	3.29	27.2%	0.9%	1.00	1.00
	1.50	3.69	30.1%	0.9%	3.69	30.1%	0.9%	1.00	1.00

3) 繰返し考慮モデルと一般的なバイリニアモデルとの応答結果比較

骨格曲線がバイリニアであり、繰返しによる影響を考慮しない通常の地震応答解析で用いられるバイリニアモデル（一般モデル）と実験結果を模擬するために繰返しの影響を考慮した前述の解析モデル（繰返し考慮モデル）との応答結果を比較した。各々の解析モデルの履歴性状を図 3.3.4-21 に示す。繰返し考慮モデル復元力作成時に参照した実験における鉛ダンパーの初期温度は約 10℃であったため、一般モデルの降伏荷重 Q_d および 1 次剛性 K_1 は、図 3.3.4-2 に示す温度依存性に基づき 20℃時の 1.035 倍

表 3.3.4-7 鉛ダンパーの復元力モデル

モデル名	骨格曲線	1 次剛性 K_1	繰返しの影響	備考
一般 モデル	バイリニア Q_d=20×1.035kN 一定	30,000× 1.035 kN/m	非考慮	初期温度 10℃ (20℃の Q_d,K_1 を 1.035 倍)
繰返し 考慮モデル	曲線モデル	30,000kN/m	考慮	平成 22 年度の実験結果を模擬 実験時雰囲気温度　10℃

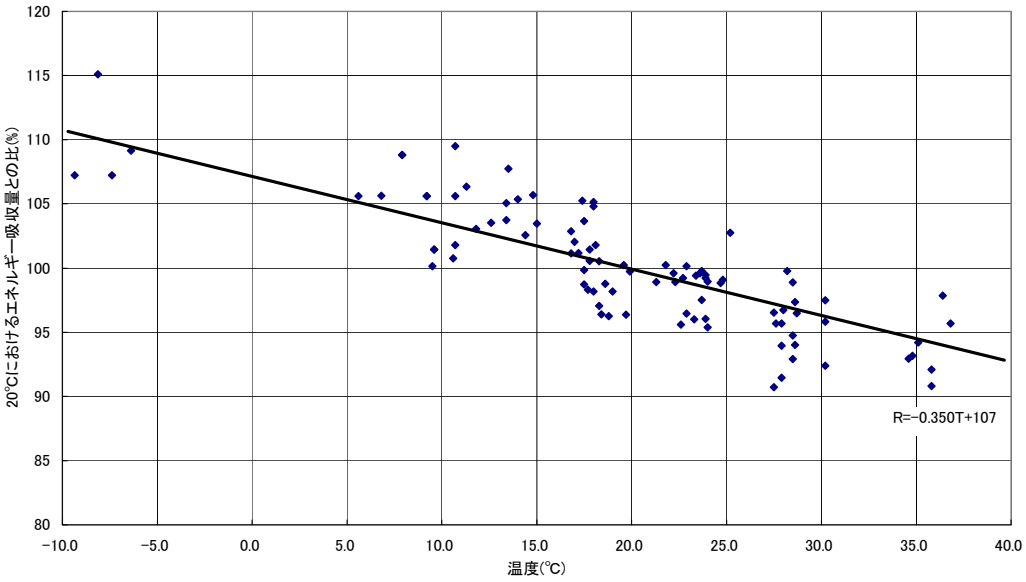


図 3.3.4-20 鉛ダンパーの温度依存性

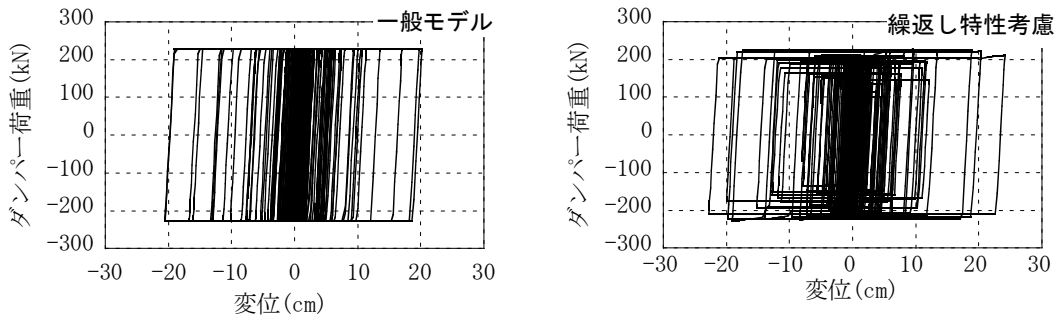


図 3.3.4-21 一般モデルと繰返し考慮モデルの復元力特性（AIC003、入力倍率 1.50）

とし、両モデルの環境温度条件を同一とした。

応答解析結果を表 3.3.4-8 に示す。一般モデルに対する繰返し考慮モデルの最大変形比を求めると、0.98～1.40 となり、繰返し考慮モデルによる応答が一般モデルよりも総じて大きくなった。ただし、変形が 10cm 以下となる KGIN のケースを除くと、0.98～1.18 となっており、2 割程度の増幅率であった。最大変位の違いは KGIN と AIC003 の場合で比較的大きく表れた。一方、OSKH02 と SZO024 における増幅率は 1.00～1.06 となり、KGIN と AIC003 ほどの変化は見られなかった。

応答最大加速度および免震層最大せん断力係数において、(繰返し考慮モデル)／(一般モデル)の値は 0.97～1.08 であった。OSKH02、AIC003、SZO024 では、繰返し考慮モデルの場合が一般モデルの値より大きくなるが、免震層変位の小さい KGIN の場合では、一般モデルの値の方が繰返し考慮モデルよりも大きくなった。これは、両モデルの骨格曲線の違いによるものと考えられる。ダンパー 1 台あたりの累積吸収エネルギーは、OSKH02、AIC003、SZO024 で（繰返し考慮モデル）／（一般モデル）の値は 0.96～1.15、免震層累積変形量では 0.93～1.18、免震層累積エネルギーの速度変換値で 0.98～1.08 となった。

表 3.3.4-8(a) 応答解析結果（免震層最大水平変位、応答最大加速度）

入力地震動	入力倍率	免震層最大水平変位（cm）			応答最大加速度（cm/s^2）		
		一般モデル	繰返し考慮	考慮/一般	一般モデル	繰返し考慮	考慮/一般
OSKH02_AV	1.00	14.32	14.75	1.030	69.3	71.0	1.024
	1.25	24.45	24.93	1.019	94.3	97.9	1.038
	1.50	35.46	35.76	1.008	121.5	125.9	1.037
AIC003_AV	1.00	12.56	13.47	1.072	64.9	67.6	1.041
	1.25	17.27	16.93	0.981	76.6	76.3	0.997
	1.50	20.53	24.17	1.177	84.6	91.2	1.078
SZO024_AV	1.00	20.36	21.42	1.052	84.2	87.6	1.040
	1.25	29.34	29.92	1.020	106.3	107.9	1.015
	1.50	39.59	40.89	1.033	131.6	134.7	1.023
KGIN_AV	1.00	2.13	2.86	1.344	39.2	38.2	0.973
	1.25	2.69	3.29	1.226	40.6	39.7	0.977
	1.50	2.98	3.69	1.240	41.3	41.0	0.992

表 3.3.4-8(b) 応答解析結果（応答せん断力係数、ダンパーの累積吸収エネルギー）

入力地震動	入力倍率	免震層応答最大せん断力係数			ダンパー1台あたりの累積吸収エネルギー(kNm)		
		一般モデル	繰返し考慮	考慮/一般	一般モデル	繰返し考慮	考慮/一般
OSKH02_AV	1.00	0.071	0.072	1.024	1020.2	1167.6	1.144
	1.25	0.096	0.100	1.038	1819.9	2033.3	1.117
	1.50	0.124	0.128	1.037	2793.1	3114.1	1.115
AIC003_AV	1.00	0.066	0.069	1.041	1174.8	1158.0	0.986
	1.25	0.078	0.078	0.997	1729.0	1717.7	0.993
	1.50	0.086	0.093	1.078	2323.3	2403.3	1.034
SZO024_AV	1.00	0.086	0.089	1.040	1756.0	1769.5	1.008
	1.25	0.108	0.110	1.015	2636.8	2575.9	0.977
	1.50	0.134	0.137	1.023	3513.3	3381.8	0.963
KGIN_AV	1.00	0.040	0.039	0.973	40.4	53.5	1.323
	1.25	0.041	0.040	0.977	66.7	90.0	1.348
	1.50	0.042	0.042	0.992	107.1	153.2	1.431

表 3.3.4-8 (c) 応答解析結果（免震層累積変形量、累積吸収エネルギー速度換算値）

入力地震動	入力倍率	免震層累積変形量(m)			免震層累積エネルギー速度換算値(cm/s)		
		一般モデル	繰返し考慮	考慮/一般	一般モデル	繰返し考慮	考慮/一般
OSKH02_AV	1.00	8.1	9.3	1.146	174.5	186.7	1.070
	1.25	11.8	13.3	1.125	233.1	246.3	1.057
	1.50	15.7	18.5	1.176	288.7	304.9	1.056
AIC003_AV	1.00	12.4	11.6	0.937	187.2	185.9	0.993
	1.25	15.1	14.3	0.947	227.2	226.4	0.997
	1.50	18.0	17.0	0.945	263.3	267.8	1.017
SZO024_AV	1.00	10.6	11.3	1.068	228.9	229.8	1.004
	1.25	14.6	15.4	1.052	280.5	277.3	0.988
	1.50	18.4	19.4	1.053	323.8	317.7	0.981
KGIN_AV	1.00	4.9	10.4	2.125	34.7	40.0	1.150
	1.25	5.7	10.2	1.784	44.6	51.8	1.161
	1.50	8.1	10.2	1.258	56.5	67.6	1.196

4) まとめ

平成 22 年度の実験結果を元に構築した鉛ダンパーの繰返しによる耐力劣化を考慮しうる解析モデルを含めた種々のモデルを用いて、鉛ダンパーと天然ゴム系積層ゴムからなる免震層をもつ１質点系に長周期地震動を入力波とした応答解析を実施した。本解析結果より以下のことが確認された。

a) 最大変形

同一入力倍率時の入力地震波による最大変形は、KGIN＜AIC003<OSKH02<SZO024 の順であった。SZO024 の入力倍率 1.5 時では繰返し考慮時に 40.9cm であった。KGIN 波では入力倍率を 1.5 としても 5cm 以下となった。KGIN を除くと、入力倍率が 1.0 の最大変形は、12cm～20cm 程度、入力倍率 1.5 では、20～40cm であった。鉛ダンパーの繰返し特性考慮の場合、非考慮時に対して 0.97～1.21 倍に変化した。また一般的なバイリニアモデルに対して変形が 10cm 以下となる KGIN のケースを除くと、0.98～1.18 となっており、2 割程度の増幅率であった。

b) 最大層せん断力

同一入力倍率時の入力地震波による最大応答せん断力係数は、最大変形と同様に KGIN＜AIC003<OSKH02<SZO024 の順に大きくなった。入力倍率が 1.0 の最大層せん断力係数は、0.04～0.09、入力倍率 1.5 では、0.04～0.14 となった。鉛ダンパーの繰返し特性考慮の場合、非考慮時に対して 0.95～1.05 であった。また繰返し劣化考慮モデルと一般的なバイリニアモデルとの最大応答せん断力係数の比は、0. 97～1. 08 となった。

c) 最大応答加速度

繰返し特性考慮モデルにおいて、入力倍率が 1.0 の最大応答加速度は、38～88 cm/s^2、入力倍率 1.5 で 41～135 cm/s^2 であった。

d) 累積変形

入力倍率 1.0 において各波の累積変形は 9～12m となっている。KGIN 以外の入力波において入力倍率 1.5 の累積変形は 17m～19m であった。鉛ダンパーの繰返し特性考慮の場合、非考慮時に対して 0.96～1.21 であった。また繰返し劣化考慮モデルと一般的なバイリニアモデルとの累積変形の比は、0. 93～1. 18 となった。

e) エネルギー吸収量

鉛ダンパー1 台あたりの累積吸収エネルギーは、最大で約 3,500kNm であった。正弦波±400mm 時加振時の最終エネルギー吸収量は 8,850kNm であり、いずれの入力地震波においてもこの値を下回った。ダンパー1 台あたりの累積吸収エネルギーは、繰返しによる劣化考慮モデルは非考慮時に対して 0.95～1.12 倍になった。

f) 累積損傷度

OSKH02、AIC003 および SZO024 の入力倍率 1.00 で亀裂に対しての累積損傷度 D_c が 100%を超えており、本評価法では亀裂発生の可能性が高いと判断される。OSKH02、AIC003 および SZO024 の入力倍率 1.50 において破断に対する累積損傷度 D_d は 100%を下回った。SZO024 の 1.5 倍入力時において D_d は最大の 23%となり、破断に対して 4 倍程度の余裕がある。KGIN を除き、繰返し考慮モデル時では非考慮モデル時に対して疲労損傷度が増加した。増加率は入力波の種類、入力倍率により異なる。OSKH02 の入力倍率 1.5 倍では、考慮時の疲労損傷度は非考慮に対して 1.5 倍となった。

今後の課題として、低層および中高層といった種々の免震建物モデルに対して、建物応答の観

点を加味した検討を実施するとともに、免震部材特性のばらつきを考慮した場合における応答特性を把握する必要があると考えられる。

参考文献

3.3.4-1)　日本免震構造協会：免震部材部会ダンパー小委員会活動報告，2007.3

3.3.4-2)　安永亨、高山峯夫、森田慶子、安藤勝利：鉛ダンパーの風応答に関する研究（その 2）微小変位での高サイクル疲労特性、日本建築学会大会学術梗概集、B-II、pp.289-290、2010.8

3.3.5　天然ゴム系積層ゴム＋弾性すべり支承（高摩擦）

(1) 免震部材実験結果に基づく弾性すべり支承（高摩擦）摩擦特性のモデル化

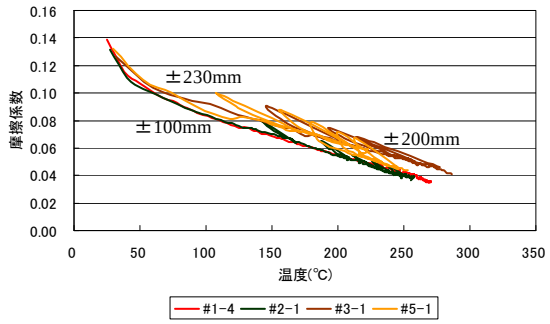
第Ⅲ部 1.3.4 φ300 試験体の実験により、累積変形 100m 相当までの範囲で、温度上昇に伴う摩擦係数の低下傾向、インターバル加振時の摩擦の復元などが確認された。温度や累積変形量に対する摩擦係数の変化傾向を分析し、摩擦特性モデルに取り込んで同モデルの適用範囲拡大を図る。

○多数回繰り返し実験結果の分析

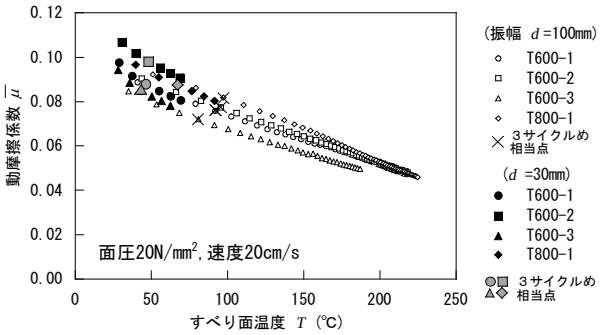
すべり板温度、累積吸収エネルギー、累積変位量に対する摩擦係数の変化傾向を把握するため、各パラメータに関する単回帰分析を実施し、各パラメータに対する依存性を定式化した。

分析対象ケースは、インターバル無しで連続で行った限界試験（試験体#1-4、面圧 20N/mm^2、変位振幅±100mm、連続 250 回載荷、累積変形 100m）とした。既往の知見により、摩擦係数の変化にはすべり面の温度影響が大きいと考えられるので、累積変位量としては摩擦発熱量との関連付けが容易な累積すべり変位量を採用した。図 3.3.5-1～3 に実験結果および既往の評価結果と回帰結果を示す。

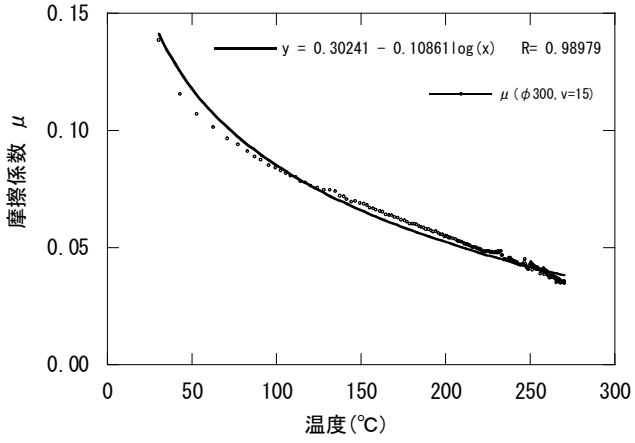
各パラメータに対する摩擦傾向の減少傾向は、いずれも対数近似により良好に回帰されている。



(a) 実験結果



(b) 既往の評価結果（φ600, φ800）3.3.5-1)



(c) 実験結果の回帰（#1-4 限界試験）

図 3.3.5-1　摩擦係数－すべり板温度関係

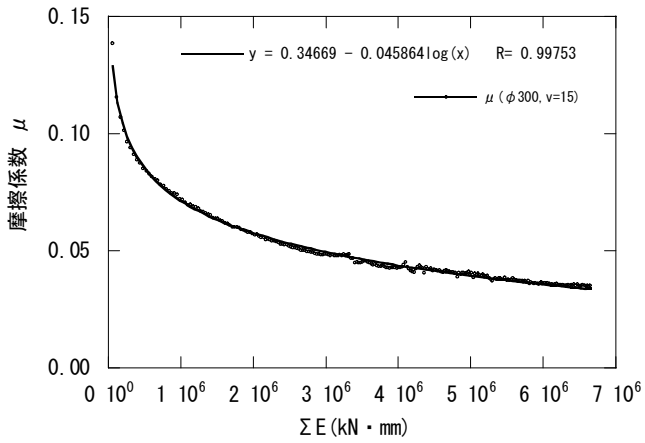
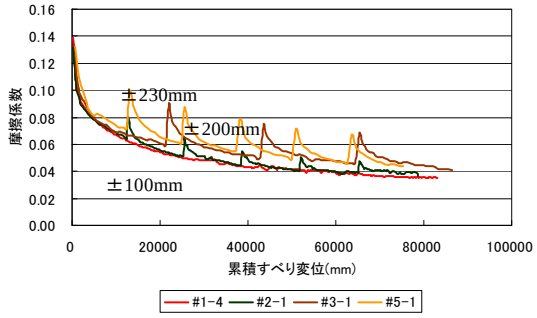
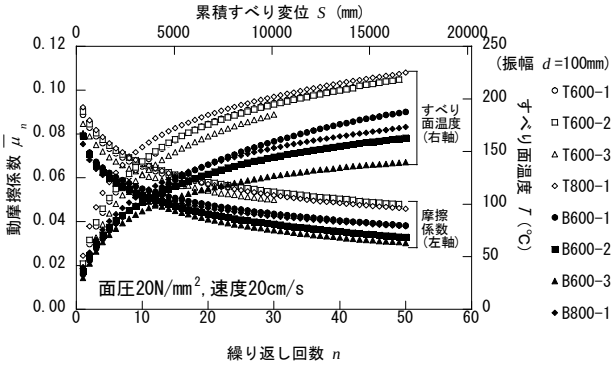


図 3.3.5-2　摩擦係数－累積吸収ｴﾈﾙｷﾞｰ関係（実験結果）

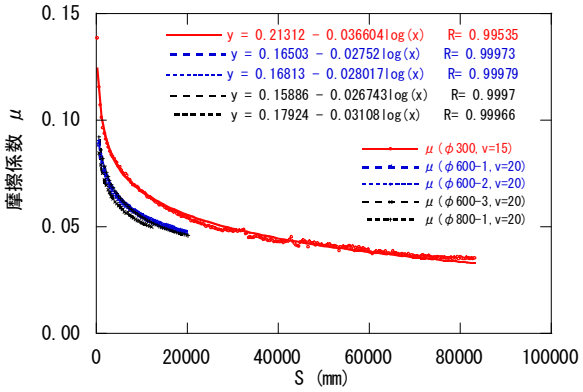


(a) 実験結果

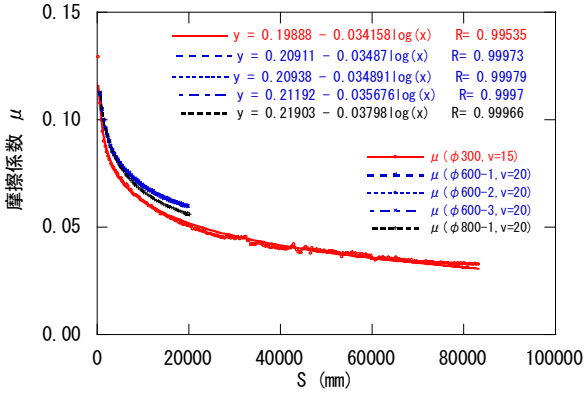


(b) 既往の評価結果（φ600, φ800）3.3.5-1)

（σ=20N/mm², v=20cm/s）



(c) 実験結果の回帰（#1-4 限界試験）



(d) 3 サイクルめで基準化

図 3.3.5-3　摩擦係数－累積すべり変位関係

○復元力特性モデルの作成

長周期地震動に対する免震建築物の応答特性把握に供するための、支承の多数回繰り返し特性を表現するパラメータを選定し、修正復元力特性モデルを作成する。

前述のように、多数回繰り返し特性を表す指標として、すべり板温度、累積吸収エネルギー、累積すべり変位量などを用いることが可能であることが示された。特に累積吸収エネルギーまたは累積すべり変位を用いると、摩擦係数の低下傾向が対数近似により良好に回帰できることを確認できた。両パラメータは、地震応答解析による応答値により摩擦係数を決定できるので、熱伝導解析を介することなく応答解析が行える利点がある。

以下では、摩擦係数 μ の速度 v、累積吸収エネルギーE（または累積すべり変位 S の両パラメータに関する依存性を表現する以下の関数型を用いた重回帰分析を行う。

$$\mu(t) = a \cdot (\log v(t) - \log v_0) \cdot (\log E(t) - \log E_0) + b \qquad (3.3.5\text{-}1)$$

$$\mu(t) = a \cdot (\log v(t) - \log v_0) \cdot (\log S(t) - \log S_0) + b \qquad (3.3.5\text{-}2)$$

ここに a 、b は回帰係数である。例として図 3.3.5-4 に v、S 軸を対数軸として、式(3.3.5-2)で表される曲面を３次元座標空間に表現したものを示す。式(3.3.5-1), (3.3.5-2)の定数 v_0、S_0 は、μ が一定値 b となる速度、累積吸収エネルギー、累積すべり変位を表す。表 3.3.5-1 に、実験により得られた回帰結果を既往の評価結果と併せて示す。また、実験結果による回帰曲面を図 3.3.5-5 に示す。

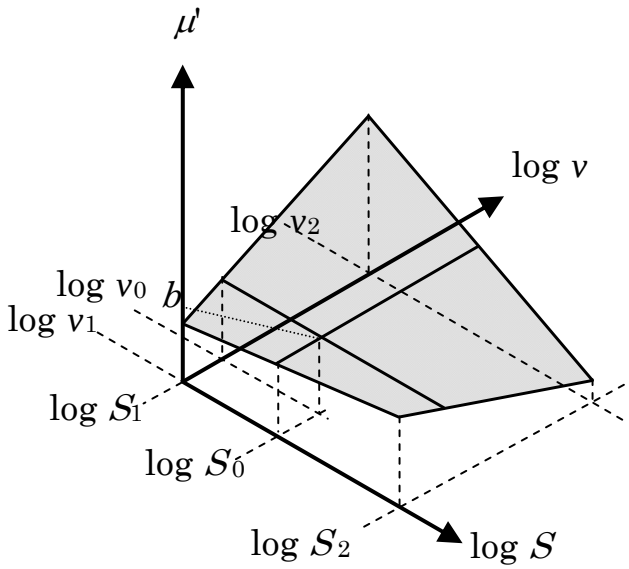


図 3.3.5-4　速度・すべり変位依存性の面回帰モデル

表 3.3.5-1　回帰結果一覧

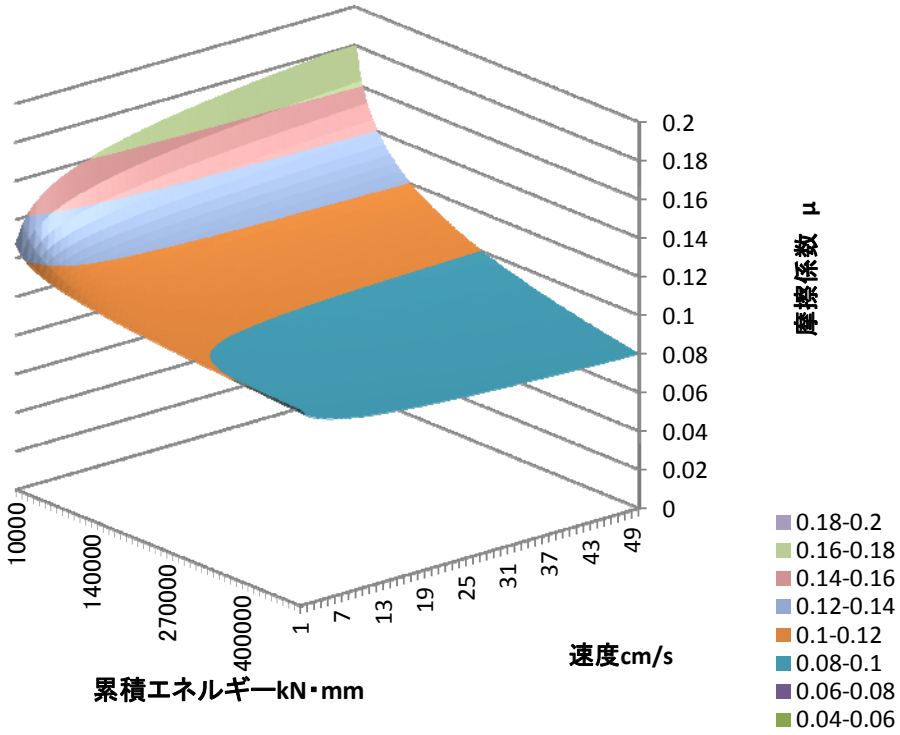
(b)累積吸収エネルギー依存

	面圧 σ (N/mm^2)	使用データ範囲				使用データ範囲			
		a	b	v_0 (cm/s)	$*E_0$ (mm)	v (cm/s)		E (mm)	
						下限 v_1	上限 v_2	下限 $*E_1$	上限 $*E_2$
実験結果（変位 ±100mm）	20	−2.575E−02	1.086E−01	2.546E−01	1.638E+05	15	37	7.600E+02	6.643E+06

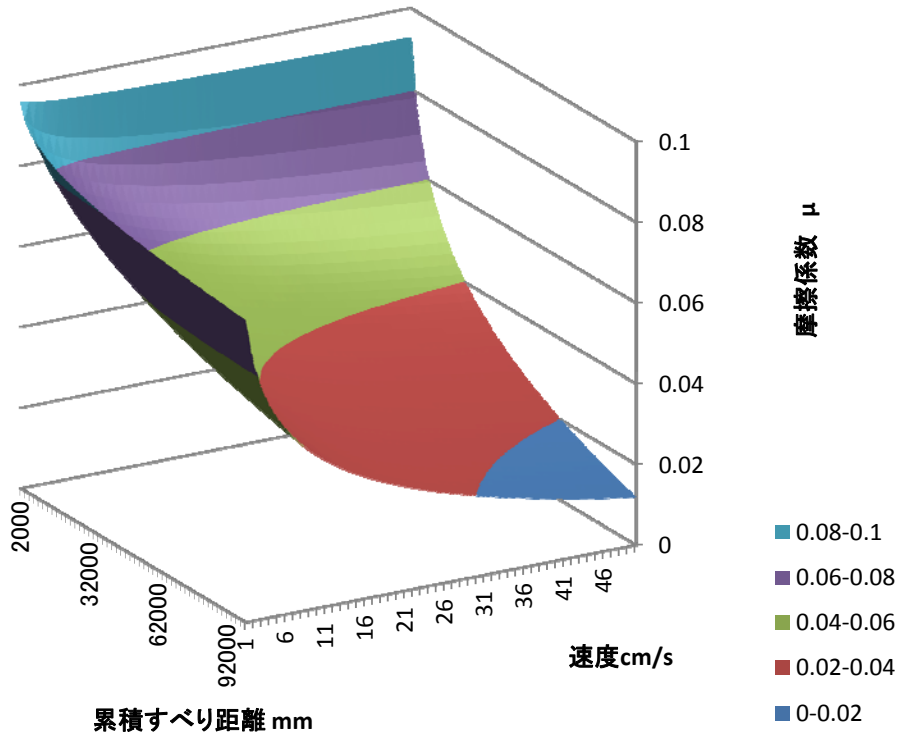
*注：φ300、面圧 20mm^2 の値であり、免震層ですべりが負担する軸力の比率で係数倍して用いる。

(b)累積すべり変位依存

	面圧 σ (N/mm^2)	使用データ範囲				使用データ範囲			
		a	b	v_0 (cm/s)	S_0 (mm)	v (cm/s)		S (mm)	
						下限 v_1	上限 v_2	下限 S_1	上限 S_2
実験結果（変位 ±100mm）	20	−2.079E−02	9.684E−02	2.545E−01	1.638E+03	15	37	257	83155
参考）既往評価結果（φ600,800）	10	−2.070E−02	9.010E−02	1.412E+00	1.470E+03	0.4	60	110	2050
	20	−1.310E−02	7.120E−02	2.546E−01	1.638E+03	0.4	60	112	2048



(a) 累積吸収エネルギー依存

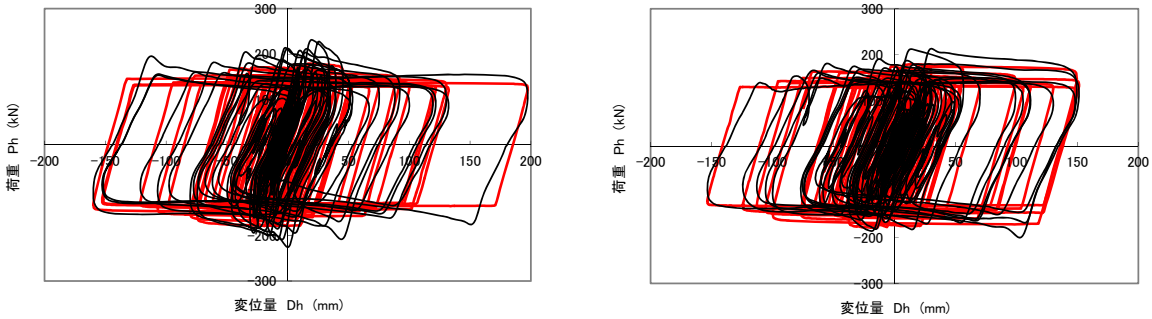


(b) 累積すべり変位依存

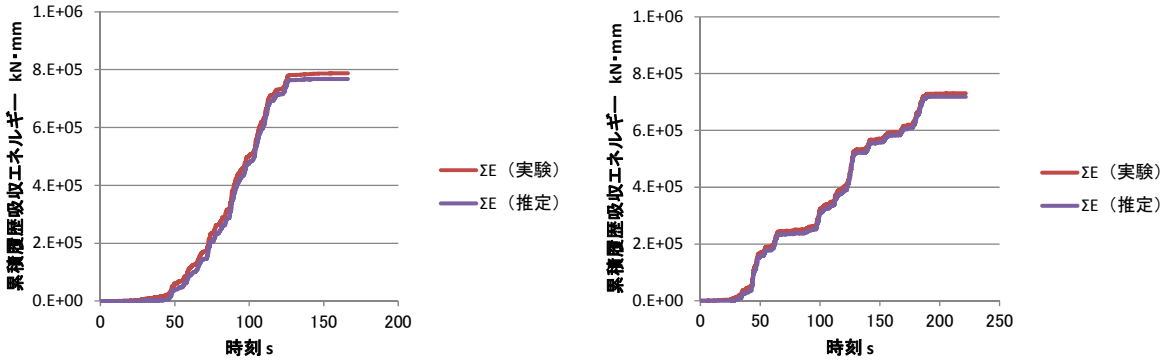
図 3.3.5-5　重回帰分析結果（変位±100mm、σ=20N/mm^2）

○復元力モデルの再現性確認

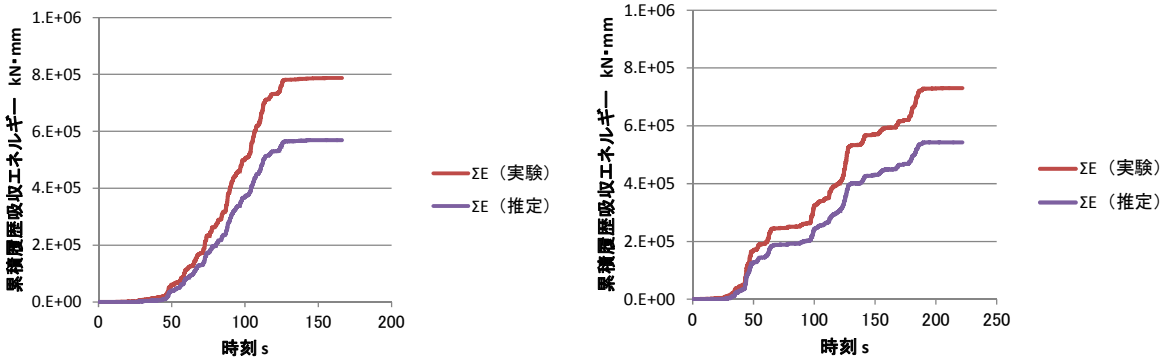
前項に示した摩擦係数の繰り返し依存モデルにより、実験で実施した地震応答波加振による履歴の再現を試みる。地震波加振の 2 ケース（aic003 、oskh02）について、ステップ毎の摩擦係数を式(3.3.5-2)により評価し、荷重－変位関係を実験結果と比較した。図 3.3.5-6 に評価結果を示す。評価では積層ゴム部の 1 次剛性を 9.0kN/mm, 累積すべり変位の初期値 $S_{initial}$ = 257mm とした。地震波加振は非連続すべり状態となるため S の低減係数を 0.08 とした。



（黒：実験結果、赤：推定結果）



（参考： S の低減係数 1.0 の場合）

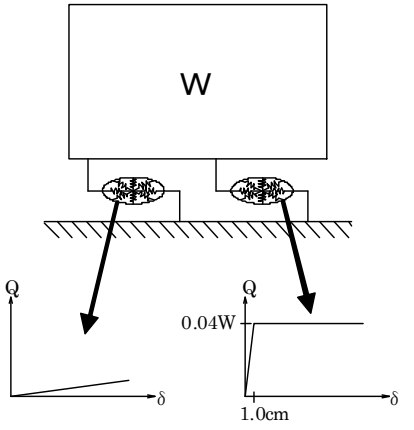


(a) aic003　　(a) oskh02

図 3.3.5-6　荷重－変位関係および累積履歴吸収エネルギーの推移の比較

(2) 解析条件

本検討では、長周期地震動に対する摩擦係数の累積吸収エネルギー依存性を確認することを目的とする。解析モデルを図 3.3.5-7 に示す上部構造を剛体とした 1 質点系モデルとする。また、2 方向入力を考慮して免震支承は塑性論モデルとする。(本検討では 1 方向入力のみ)



積層ゴム支承　　弾性すべり支承

T_1=1.0s，T_2=4.0s

建物重量	W=51,453.9kN
弾性すべり支承負担軸力	Ns=20,920.1kN
基準摩擦係数	μ =0.098
弾性すべり支承水平耐力	Qy= 2,058.0kN
	(Ci=0.04)
弾性すべり支承平均面圧	σ =8.04N/mm^2
考慮する依存性	累積吸収エネルギー
	累積すべり変位

図 3.3.5-7 解析モデル

(3) 解析結果

OSKH02(此花),AIC003(津島),SZO024(浜松),KGIN(新宿)入力における、入力倍率を 1.00 倍，1.25 倍，1.50 倍としたときの最大応答値一覧を表 3.3.5-2 に、図 3.3.5-8～10 に免震層の荷重-変形履歴図を示す。また、各ケースの最大値比較を図 3.3.5-11、累積吸収エネルギー時刻歴波形，累積すべり変位時刻歴波形を図 3.3.5-12,13 に、免震層応答変位時刻歴波形を図 3.3.5-14 に、累積すべり変位-累積吸収エネルギー関係を図 3.3.5-15 に示す。

ここで、　CASE-0：依存性無視モデル

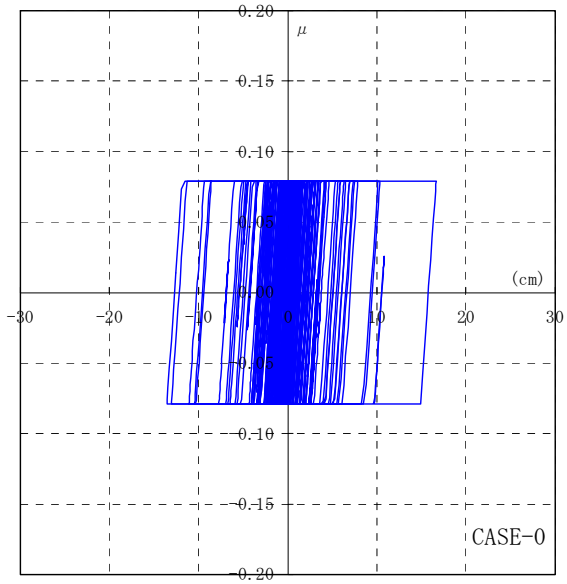
CASE-1：摩擦係数の累積吸収エネルギー依存性考慮モデル

CASE-2：摩擦係数の累積すべり変位依存性考慮モデル

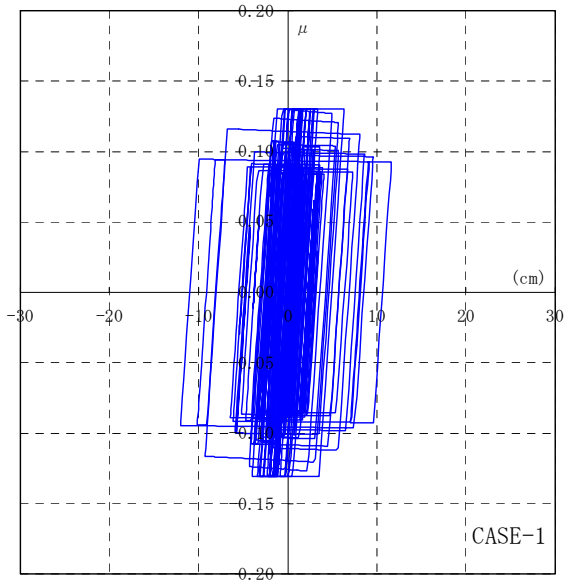
なお、何れのモデルにおいても、静摩擦係数，面圧依存性，速度依存性は考慮していない。

表 3.3.5-2　最大応答値一覧

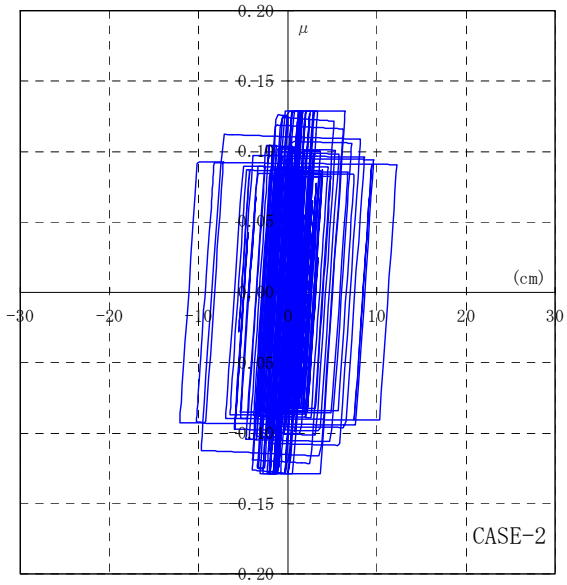
入力地震波	入力倍率	入力波最大加速度 (cm/s^2)	最大応答加速度 (cm/s^2)			最大応答変位 (cm)			ベースシア係数			累積すべり変位 (cm)			累積吸収エネルギーの速度換算値V_E(cm/s)		
			CASE-0	CASE-1	CASE-2	CASE-0	CASE-1	CASE-2	CASE-0	CASE-1	CASE-2	CASE-0	CASE-1	CASE-2	CASE-0	CASE-1	CASE-2
OSKH02 (此花波)	1.00	98.49	72.65	69.17	68.71	16.64	12.01	12.12	0.074	0.071	0.070	503.5	376.8	397.7	178.38	173.58	175.92
	1.25	123.11	100.42	96.65	97.28	27.89	25.54	25.99	0.102	0.099	0.099	868.5	846.4	867.5	234.29	241.67	242.28
	1.50	147.73	126.35	126.32	126.65	38.40	38.49	38.80	0.129	0.129	0.129	1331.5	1541.4	1569.6	290.09	306.30	306.26
AIC003 (津島波)	1.00	199.40	64.85	64.47	63.60	13.47	11.17	11.26	0.066	0.066	0.065	553.5	501.3	508.7	187.04	195.34	194.88
	1.25	249.25	74.80	77.67	77.23	17.52	17.73	17.73	0.076	0.079	0.079	783.0	786.1	794.5	222.45	234.58	233.83
	1.50	299.10	86.46	92.74	93.96	22.23	26.48	27.10	0.088	0.095	0.096	1071.5	1142.9	1155.2	260.23	272.38	271.60
SZO024 (浜松波)	1.00	576.78	86.30	85.85	85.96	22.17	21.84	21.84	0.088	0.088	0.088	818.4	818.2	828.5	227.42	238.39	237.83
	1.25	720.98	108.05	110.80	111.13	30.99	34.04	34.33	0.110	0.113	0.113	1195.2	1262.5	1272.2	274.84	283.29	282.14
	1.50	865.17	134.21	140.40	140.98	41.58	46.93	47.32	0.137	0.143	0.144	1579.7	1697.7	1711.6	315.97	318.00	316.70
KGIN (新宿波)	1.00	42.11	38.74	58.29	57.42	2.89	2.57	2.51	0.040	0.059	0.059	16.2	10.0	10.2	32.04	32.27	32.31
	1.25	52.64	39.76	61.51	60.90	3.31	3.87	3.93	0.041	0.063	0.062	29.9	15.5	15.6	43.48	40.08	40.00
	1.50	63.17	39.85	63.55	62.68	3.34	4.70	4.65	0.041	0.065	0.064	54.7	22.0	22.4	58.81	47.85	47.86



弾性すべり支承 μ－δ 履歴（依存性無視）

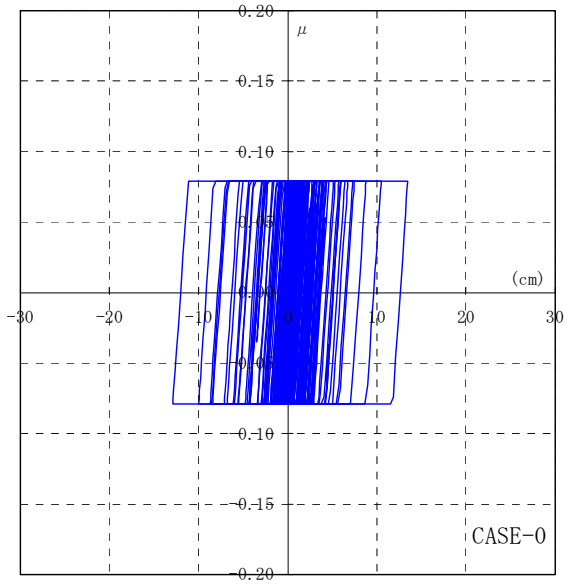


弾性すべり支承 μ－δ 履歴（累積吸収エネルギー依存： β=1.00）

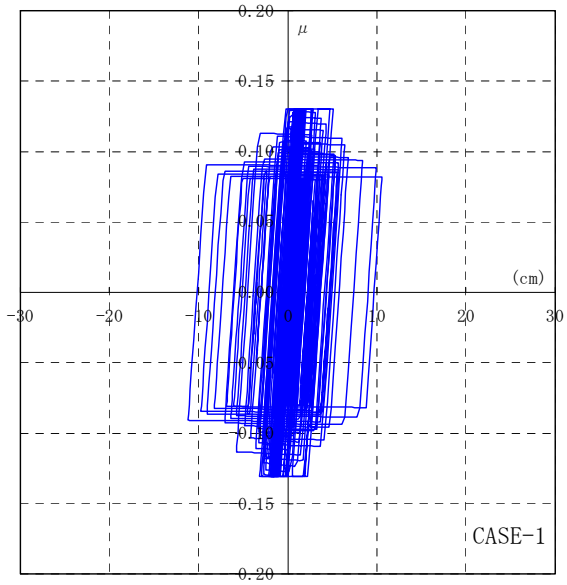


弾性すべり支承 μ－δ 履歴（累積すべり変位依存： β=1.00）

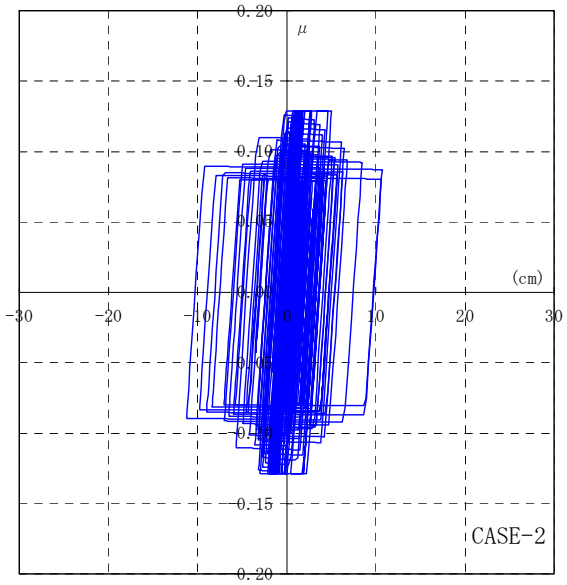
図 3.3.5-8(a)　免震層荷重-変形関係(OSKH02：1.00 倍)



弾性すべり支承 μ－δ 履歴（依存性無視）

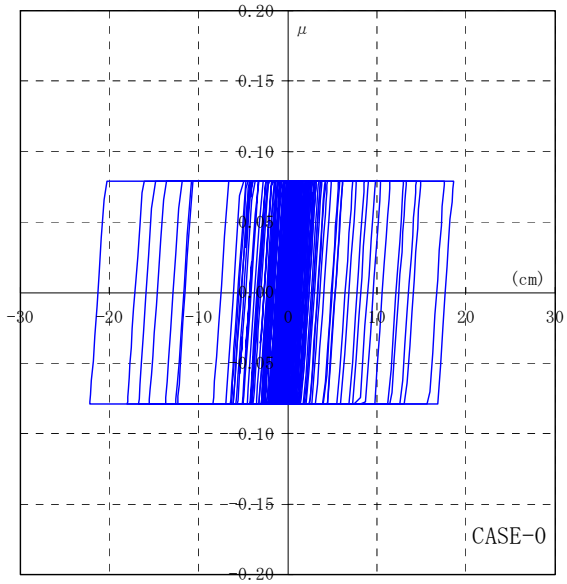


弾性すべり支承 μ－δ 履歴（累積吸収エネルギー依存： β=1.00）

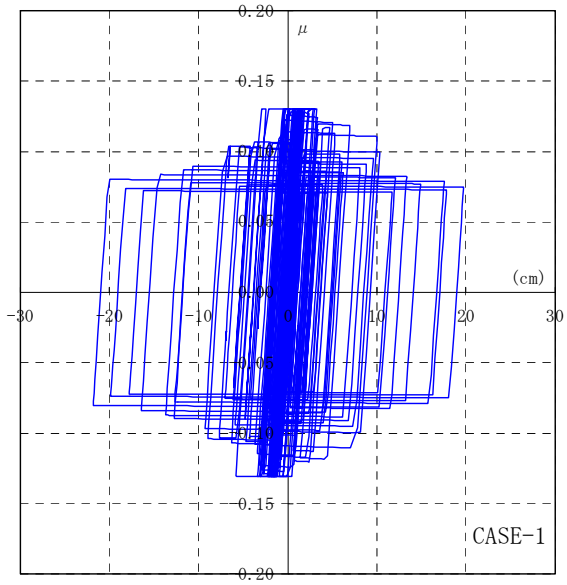


弾性すべり支承 μ－δ 履歴（累積すべり変位依存： β=1.00）

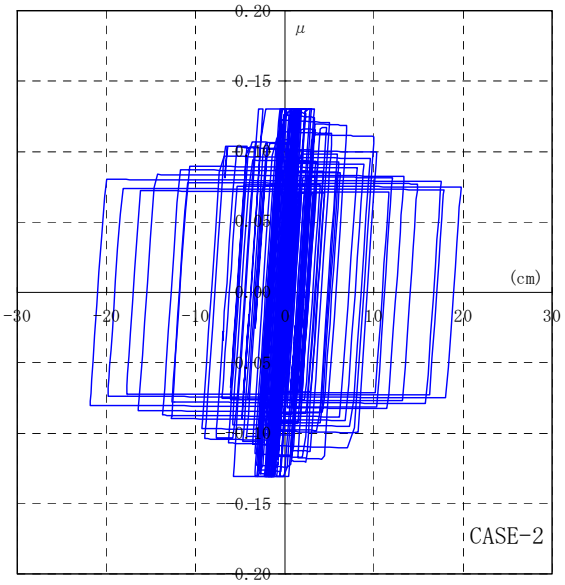
図 3.3.5-8(b)　免震層荷重-変形関係(AIC003：1.00 倍)



弾性すべり支承 μ－δ 履歴（依存性無視）

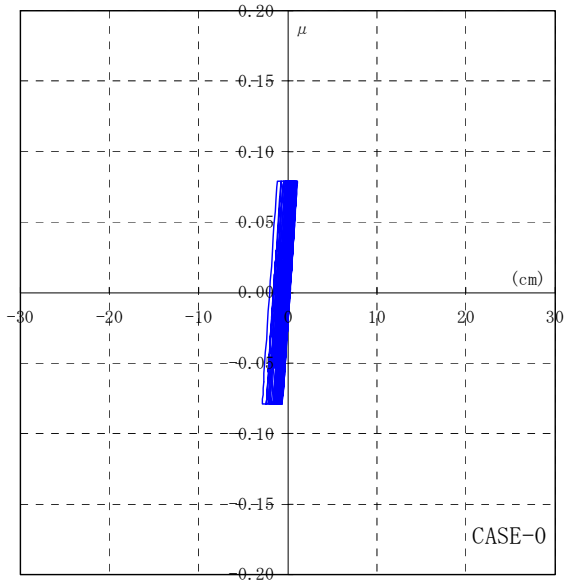


弾性すべり支承 μ－δ 履歴（累積吸収エネルギー依存： β=1.00）

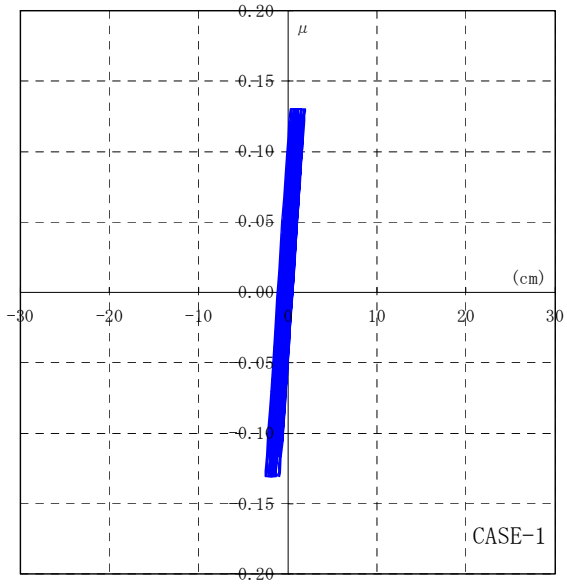


弾性すべり支承 μ－δ 履歴（累積すべり変位依存： β=1.00）

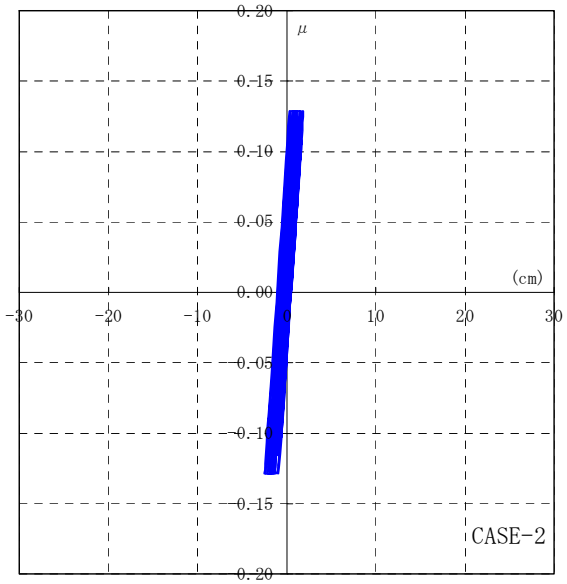
図 3.3.5-8(c)　免震層荷重-変形関係(SZO024：1.00 倍)



弾性すべり支承 μ－δ 履歴（依存性無視）

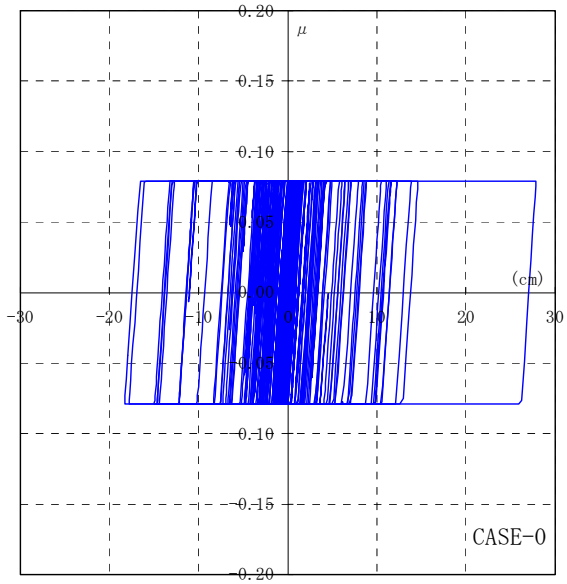


弾性すべり支承 μ－δ 履歴（累積吸収エネルギー依存： β=1.00）

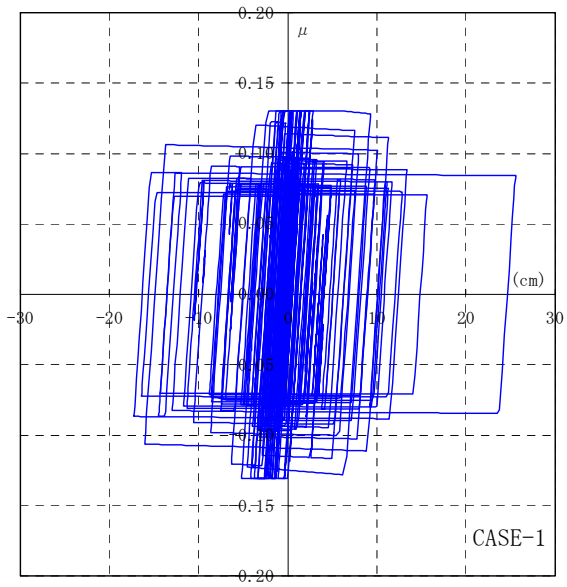


弾性すべり支承 μ－δ 履歴（累積すべり変位依存： β=1.00）

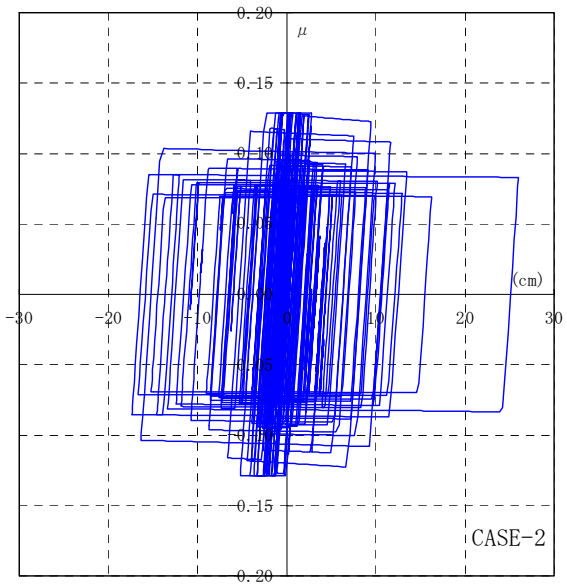
図 3.3.5-8(d)　免震層荷重-変形関係(KGIN：1.00 倍)



弾性すべり支承 μ－δ 履歴（依存性無視）

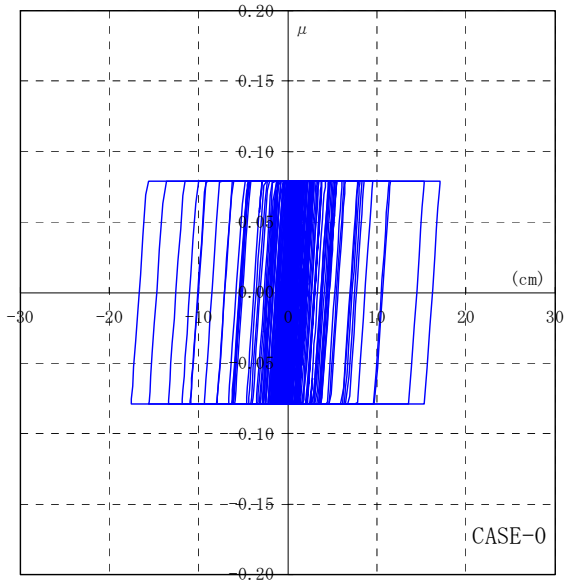


弾性すべり支承 μ－δ 履歴（累積吸収エネルギー依存： β=1.00）

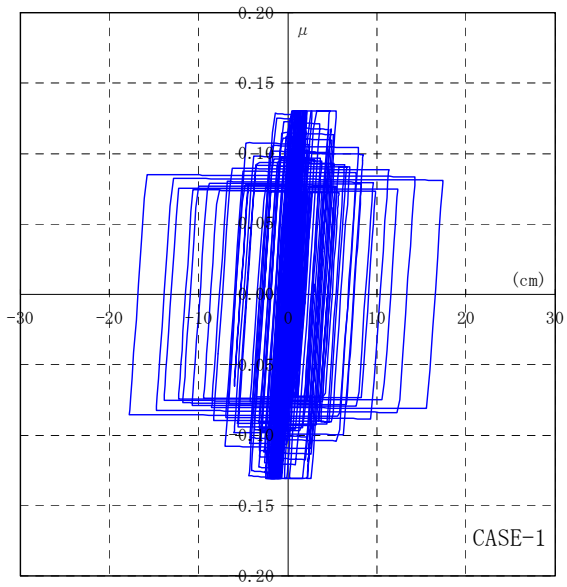


弾性すべり支承 μ－δ 履歴（累積すべり変位依存： β=1.00）

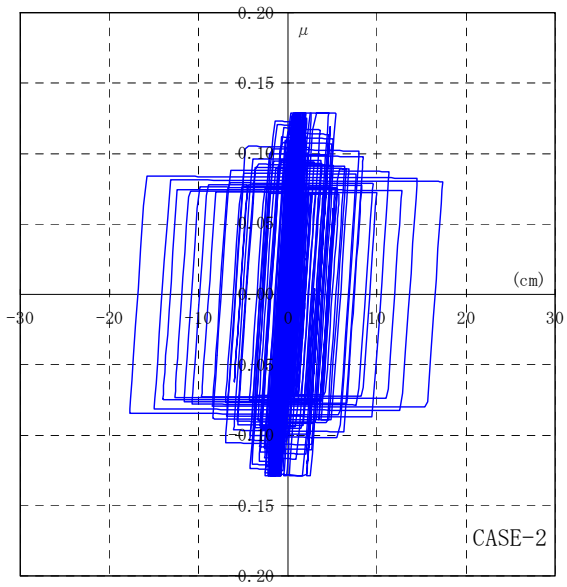
図 3.3.5-9(a)　免震層荷重-変形関係(OSKH02：1.25 倍)



弾性すべり支承 μ－δ 履歴（依存性無視）

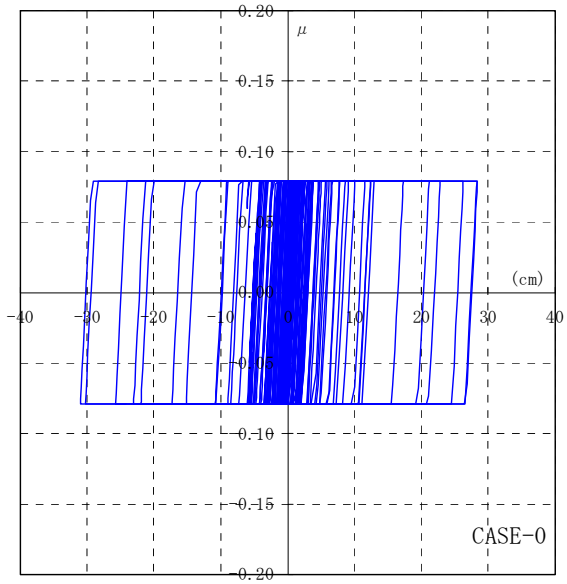


弾性すべり支承 μ－δ 履歴（累積吸収エネルギー依存： β=1.00）

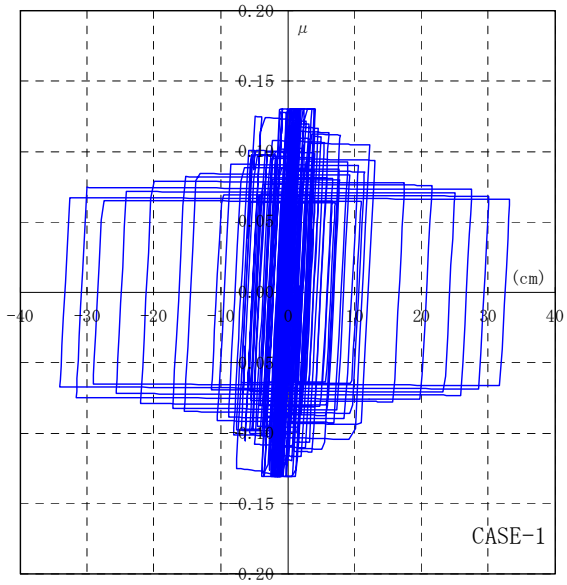


弾性すべり支承 μ－δ 履歴（累積すべり変位依存： β=1.00）

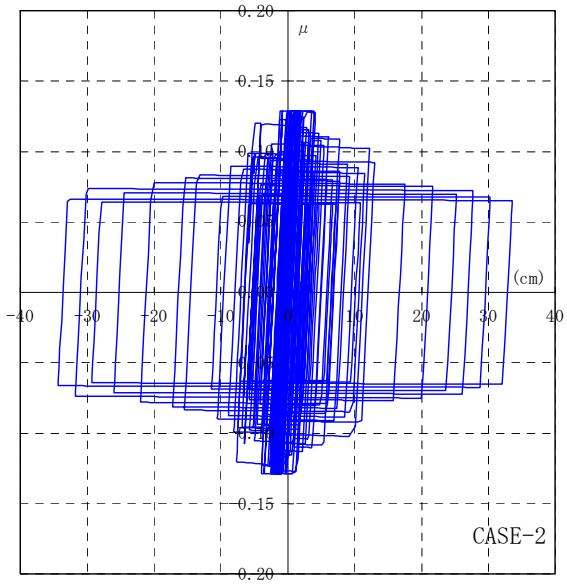
図 3.3.5-9(b)　免震層荷重-変形関係(AIC003：1.25 倍)



弾性すべり支承 μ－δ 履歴（依存性無視）

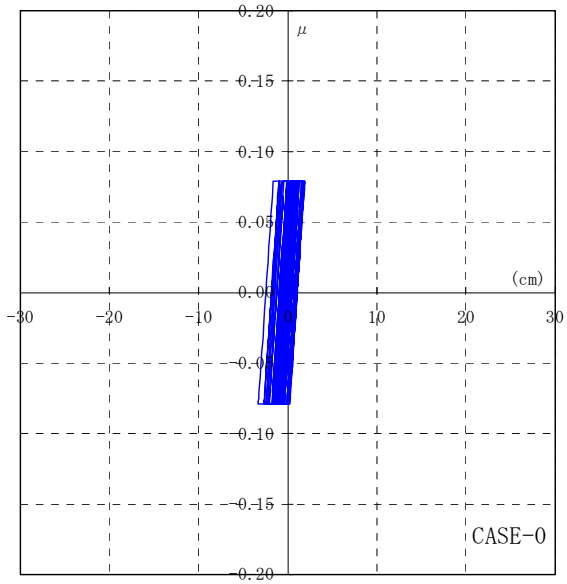


弾性すべり支承 μ－δ 履歴（累積吸収エネルギー依存： β=1.00）

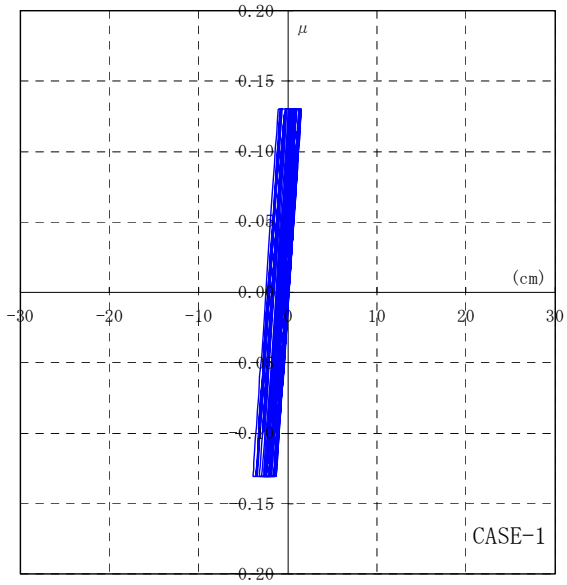


弾性すべり支承 μ－δ 履歴（累積すべり変位依存： β=1.00）

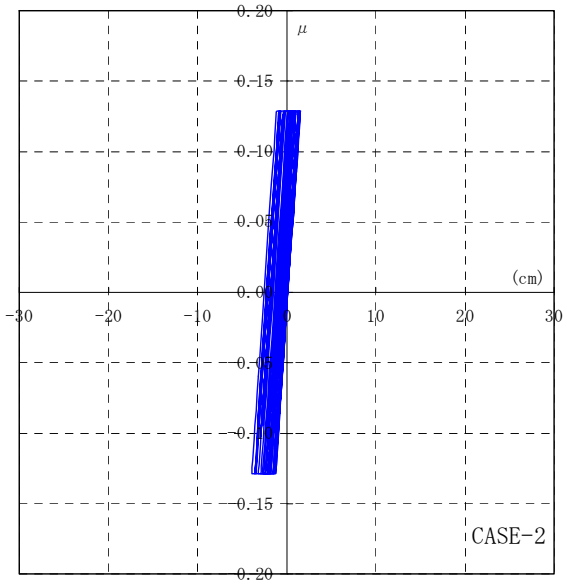
図 3.3.5-9(c)　免震層荷重-変形関係(SZO024：1.25 倍)



弾性すべり支承 μ－δ 履歴（依存性無視）

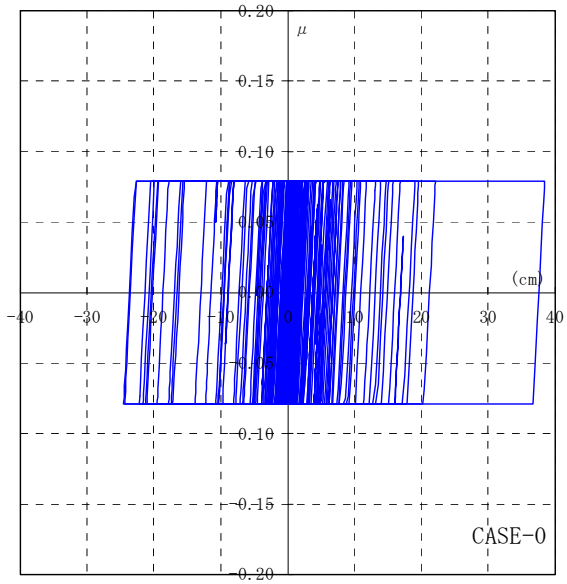


弾性すべり支承 μ－δ 履歴（累積吸収エネルギー依存： β=1.00）

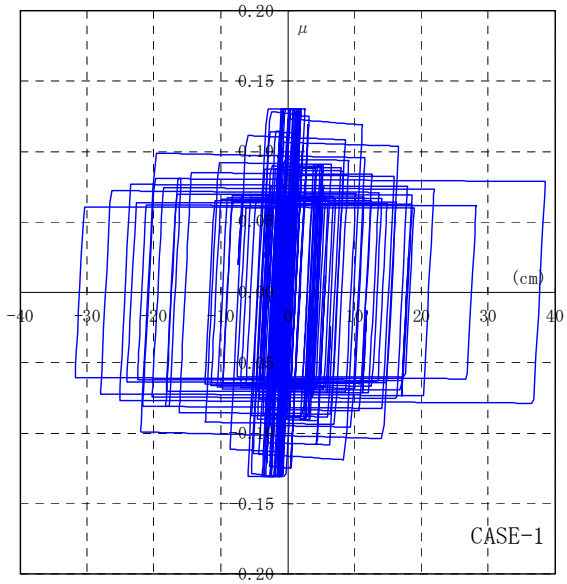


弾性すべり支承 μ－δ 履歴（累積すべり変位依存： β=1.00）

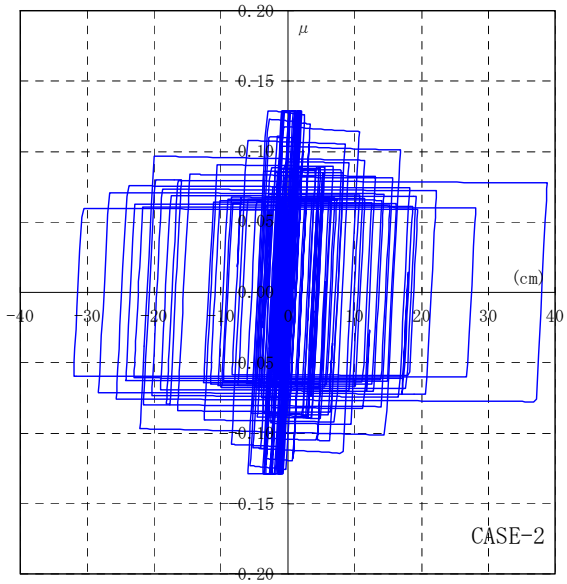
図 3.3.5-9(d)　免震層荷重-変形関係(KGIN：1.25 倍)



弾性すべり支承 μ－δ 履歴（依存性無視）

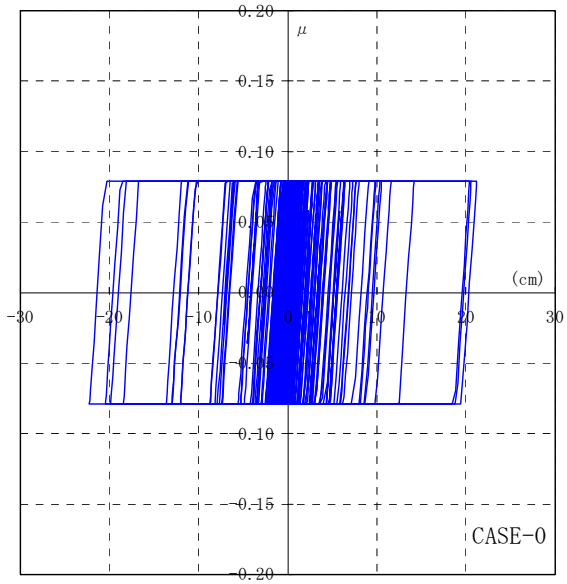


弾性すべり支承 μ－δ 履歴（累積吸収エネルギー依存： β=1.00）

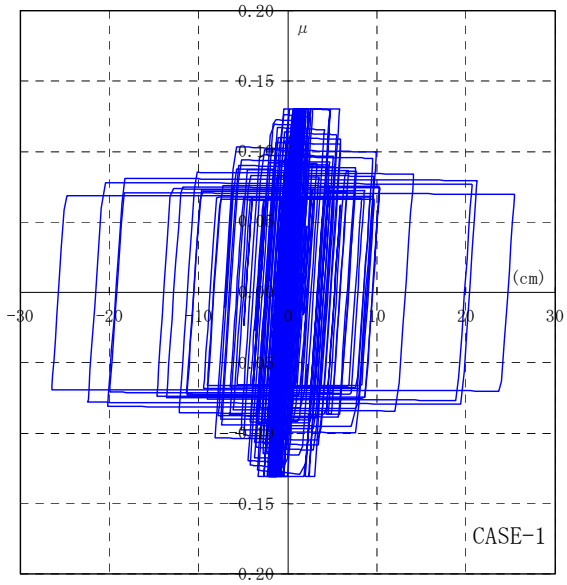


弾性すべり支承 μ－δ 履歴（累積すべり変位依存： β=1.00）

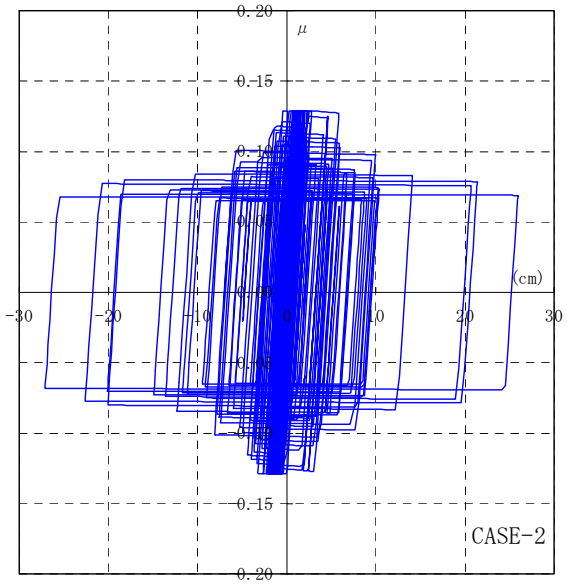
図 3.3.5-10(a)　免震層荷重-変形関係(OSKH02：1.50 倍)



弾性すべり支承 μ－δ 履歴（依存性無視）

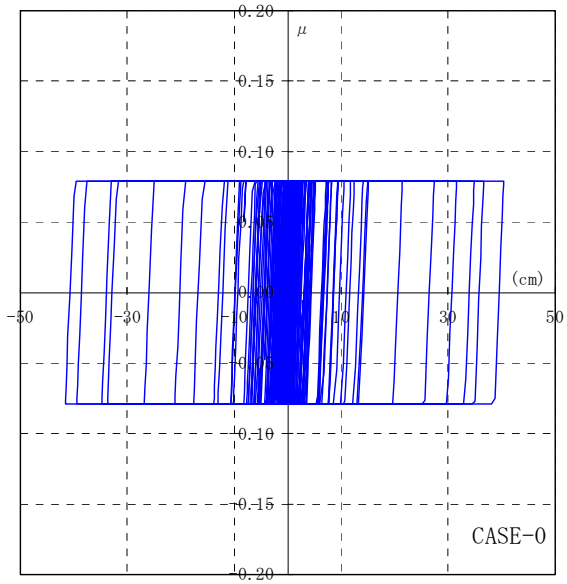


弾性すべり支承 μ－δ 履歴（累積吸収エネルギー依存： β=1.00）

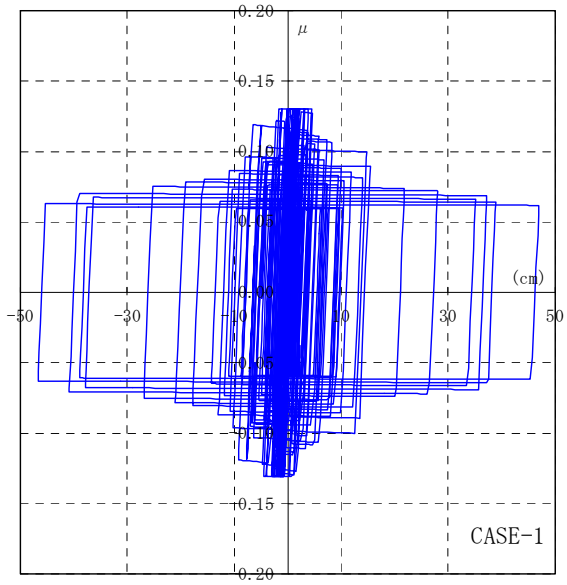


弾性すべり支承 μ－δ 履歴（累積すべり変位依存： β=1.00）

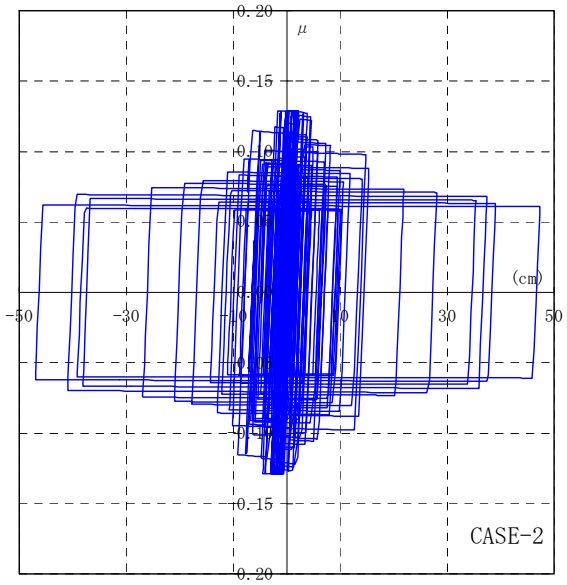
図 3.3.5-10(b)　免震層荷重-変形関係(AIC003：1.50 倍)



弾性すべり支承 μ－δ 履歴（依存性無視）

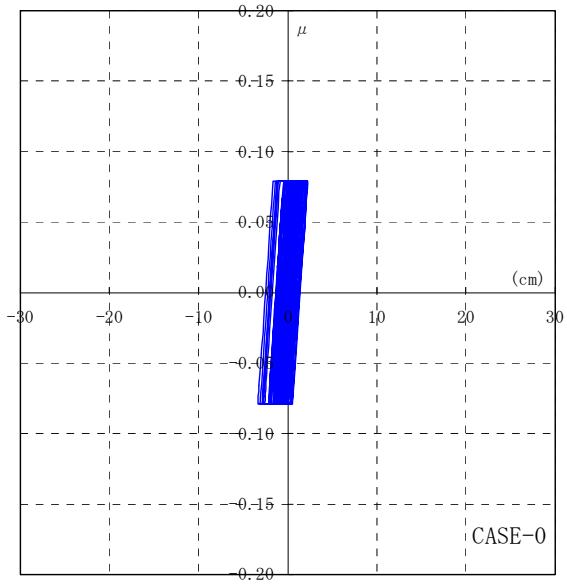


弾性すべり支承 μ－δ 履歴（累積吸収エネルギー依存： β=1.00）

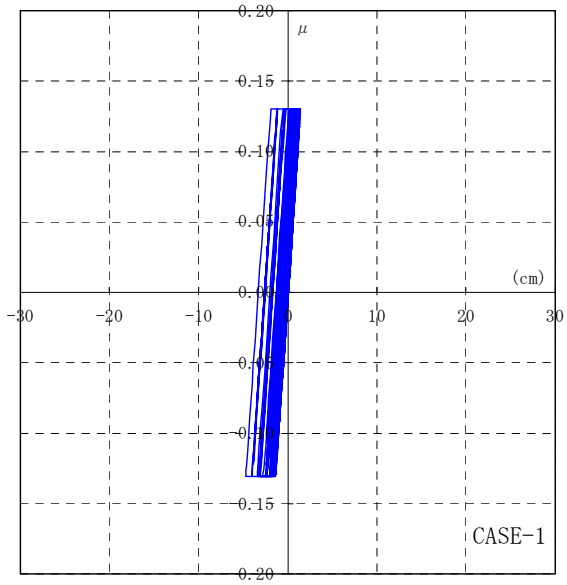


弾性すべり支承 μ－δ 履歴（累積すべり変位依存： β=1.00）

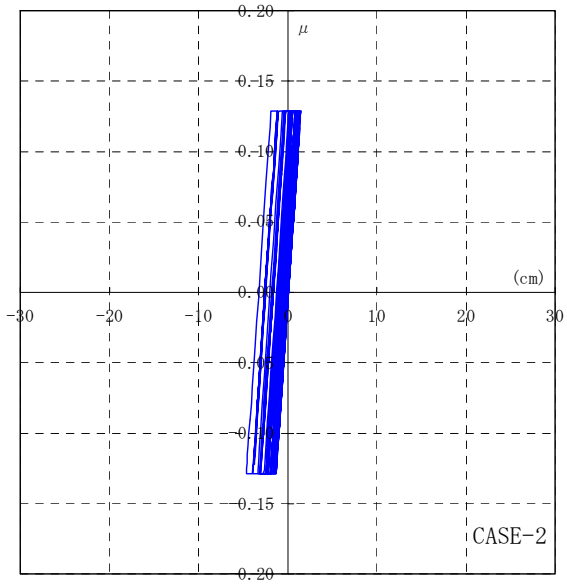
図 3.3.5-10(c)　免震層荷重-変形関係(SZO024：1.50 倍)



弾性すべり支承 μ－δ 履歴（依存性無視）



弾性すべり支承 μ－δ 履歴（累積吸収エネルギー依存： β=1.00）



弾性すべり支承 μ－δ 履歴（累積すべり変位依存： β=1.00）

図 3.3.5-10(d)　免震層荷重-変形関係(KGIN：1.50 倍)

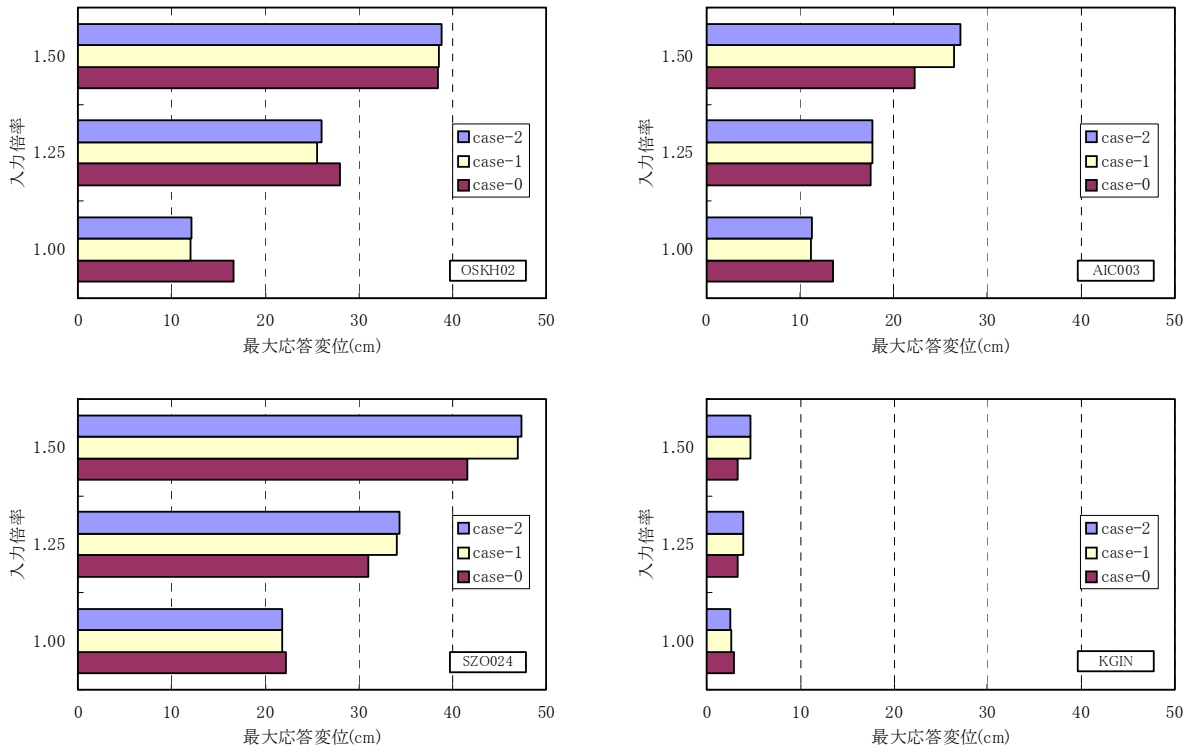


図 3.3.5-11(a)　最大応答値比較(最大応答変位)

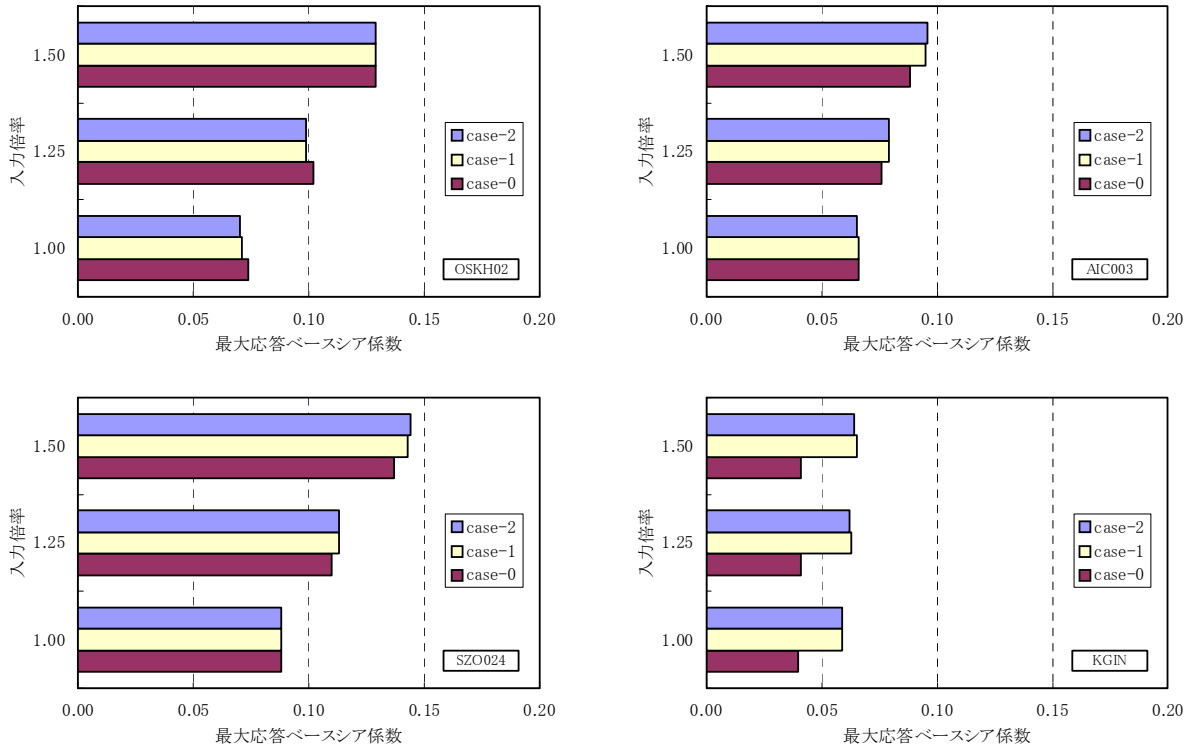


図 3.3.5-11(b)　最大応答値比較(最大応答ベースシア係数)

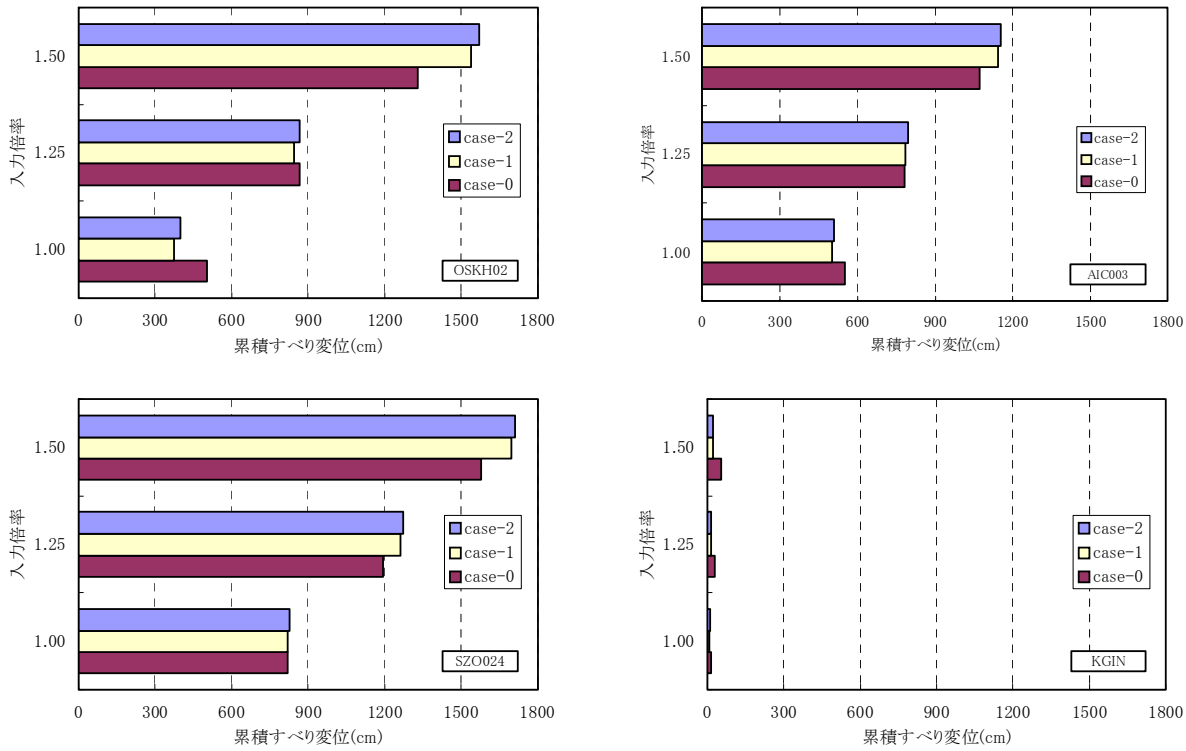


図 3.3.5-11(c)　最大応答値比較(累積すべり変位)

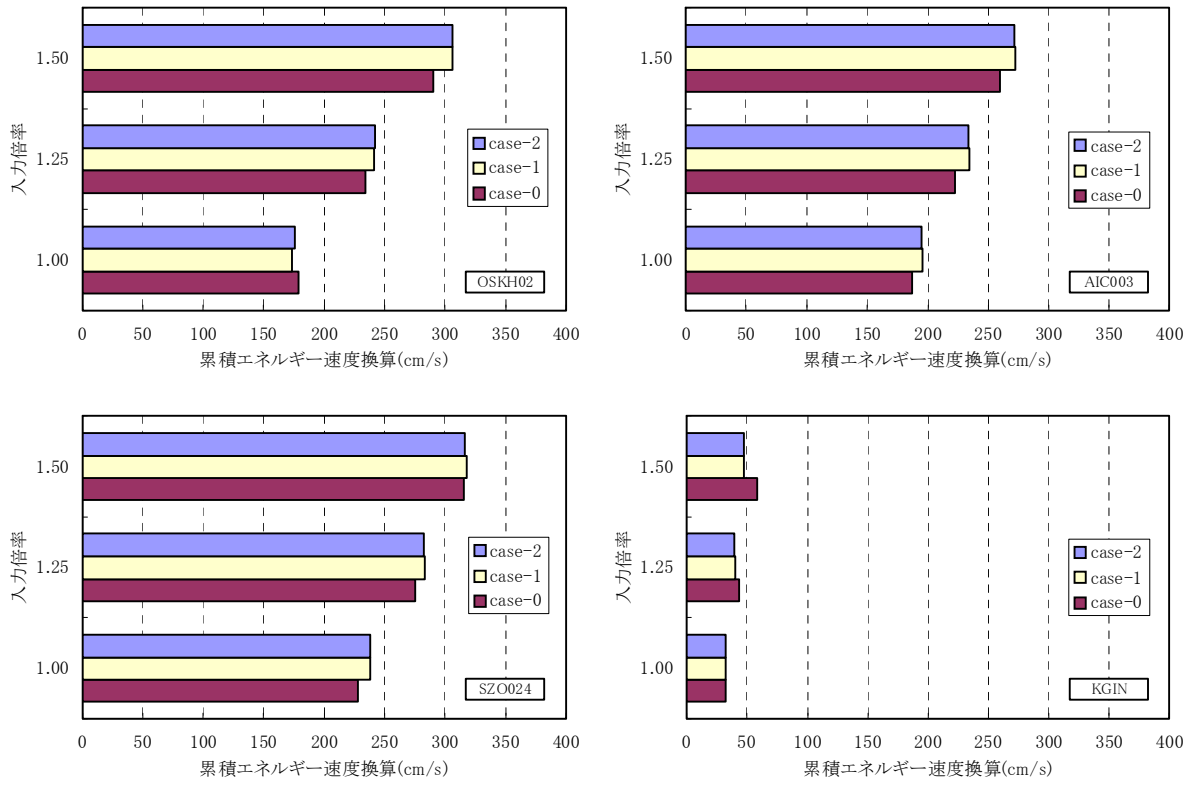


図 3.3.5-11(d)　最大応答値比較(累積吸収エネルギー)

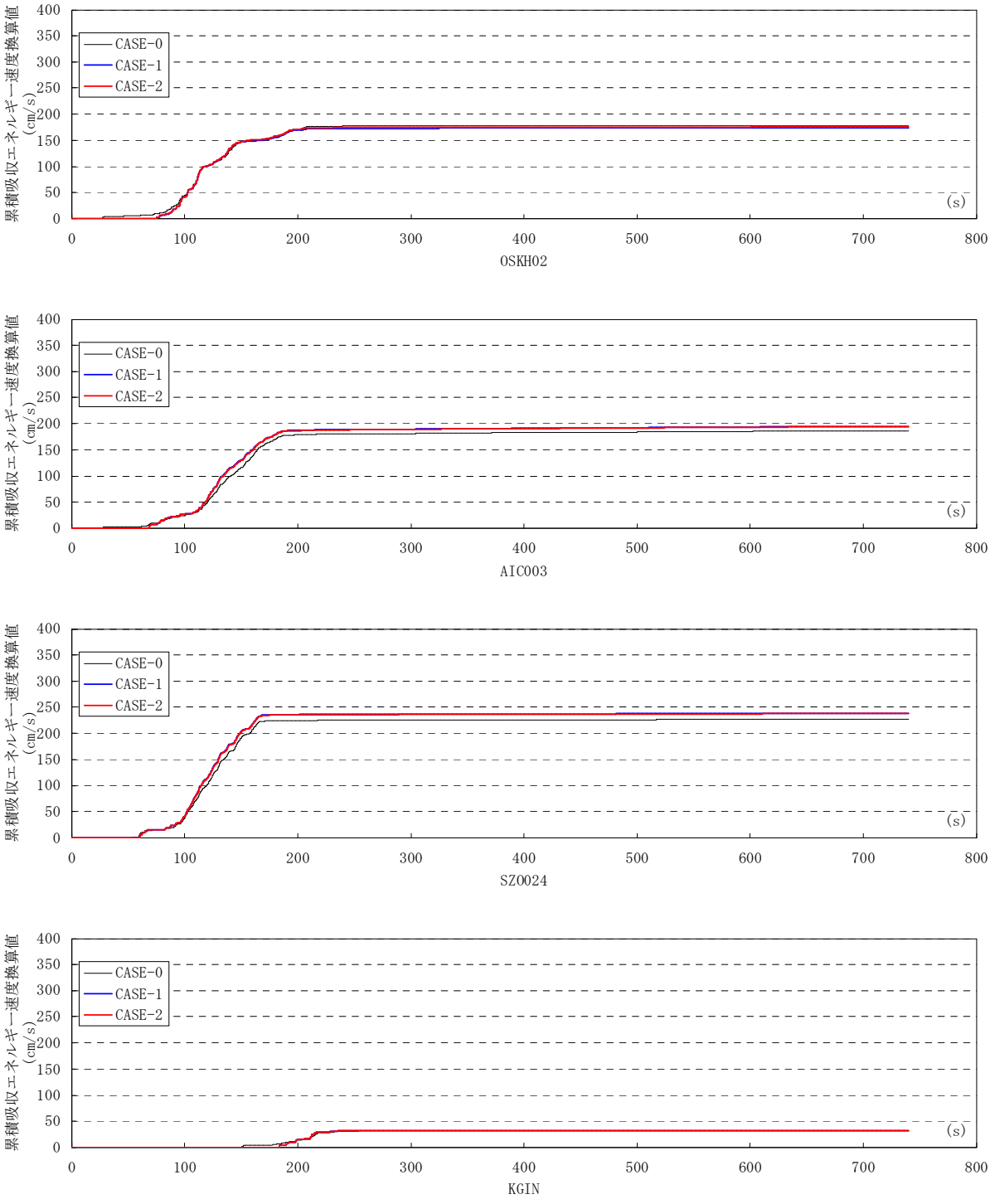


図 3.3.5-12(a)　累積吸収エネルギー速度換算値時刻歴波形(入力×1.00 倍)

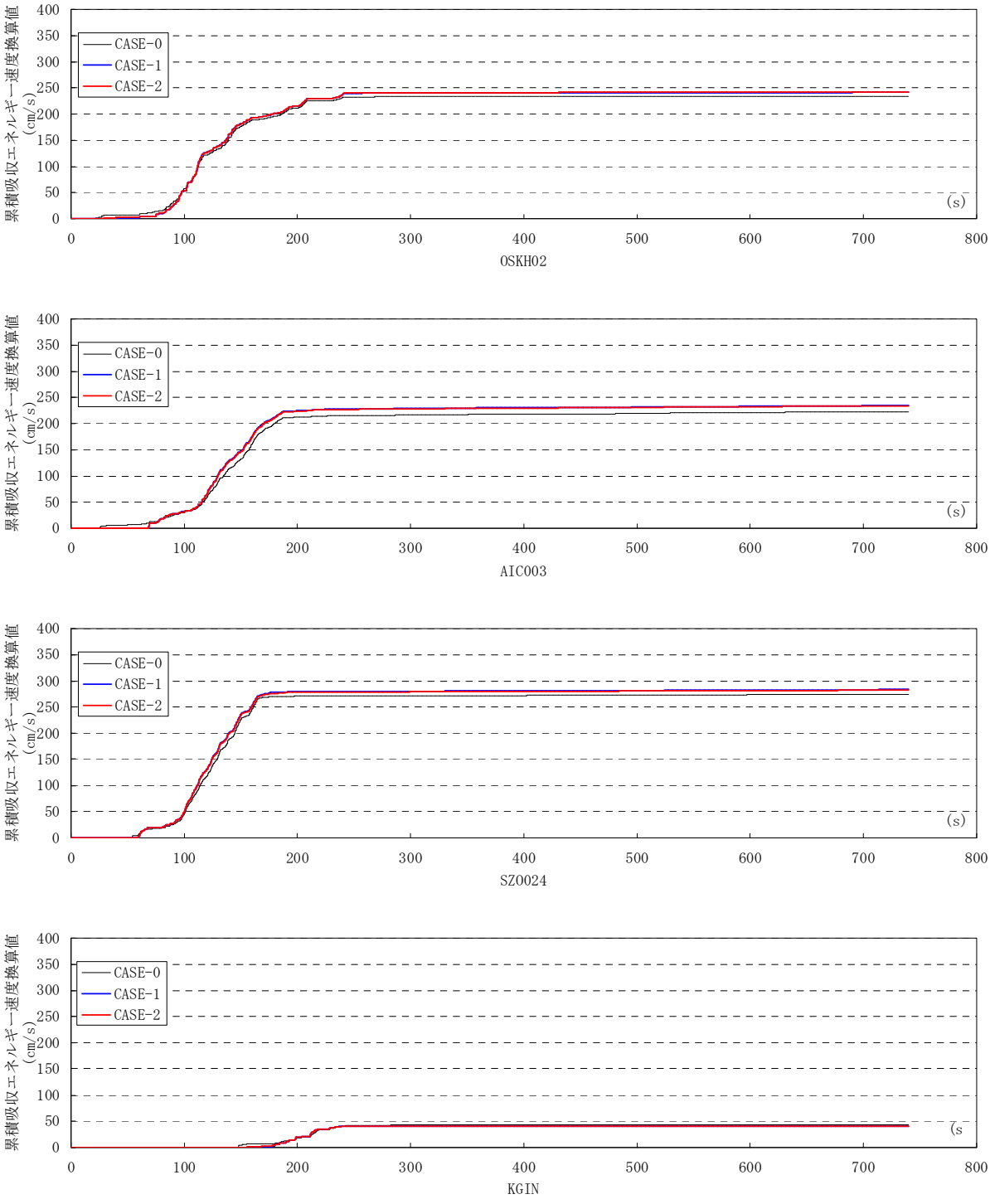


図 3.3.5-12(b)　累積吸収エネルギー速度換算値時刻歴波形(入力×1.25 倍)

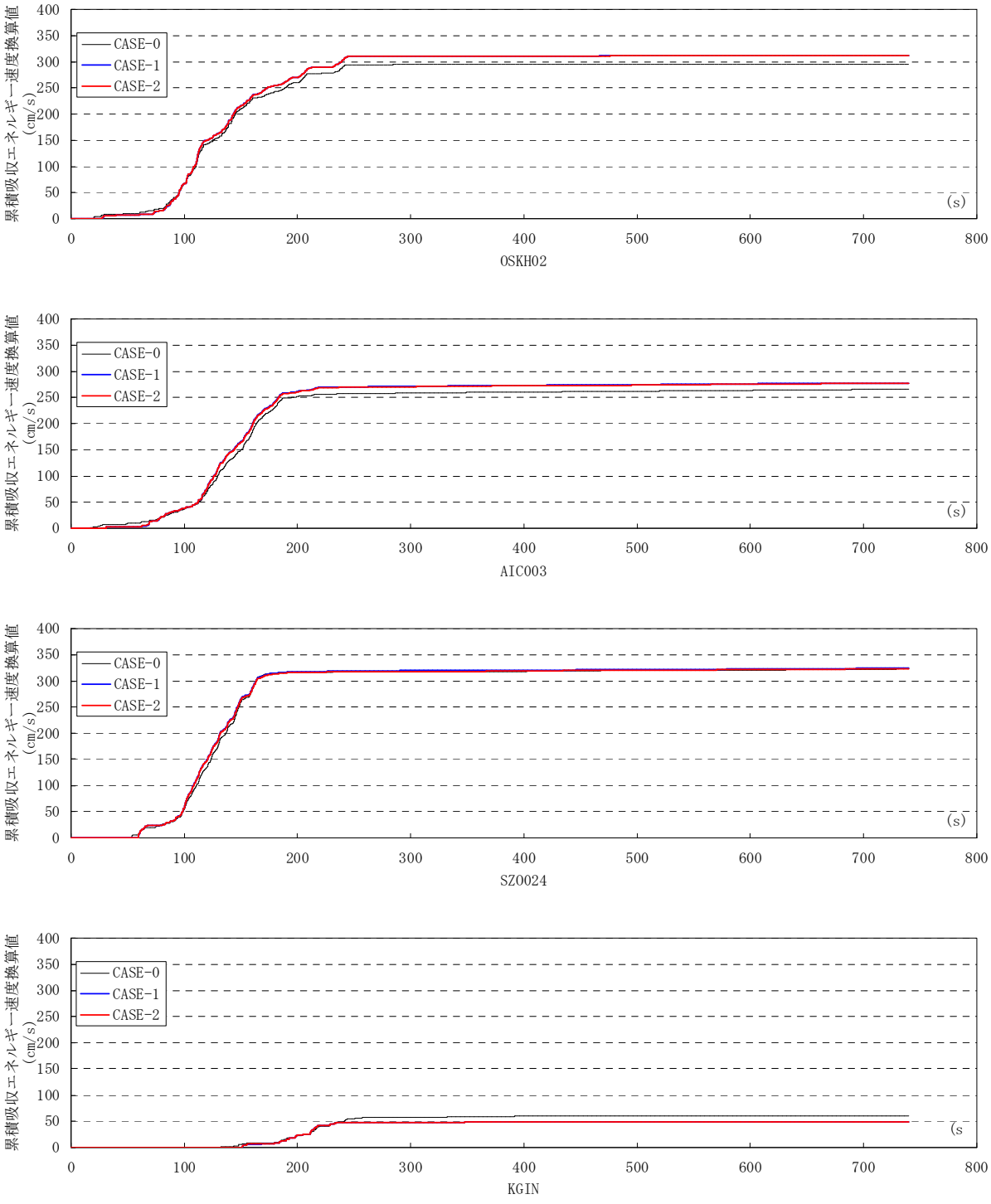


図 3.3.5-12(c)　累積吸収エネルギー速度換算値時刻歴波形(入力×1.50 倍)

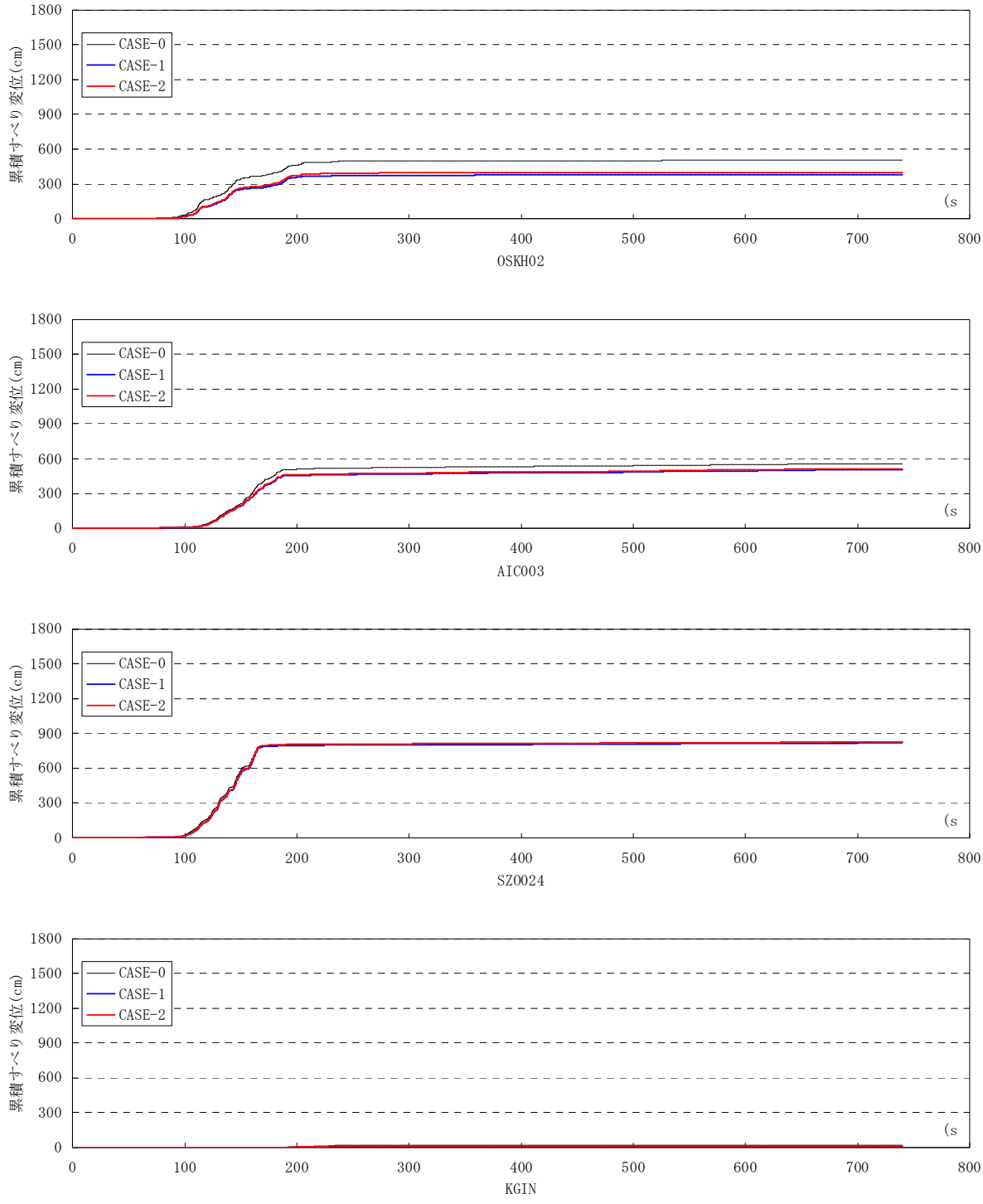


図 3.3.5-13(a)　累積すべり変位時刻歴波形(入力×1.00 倍)

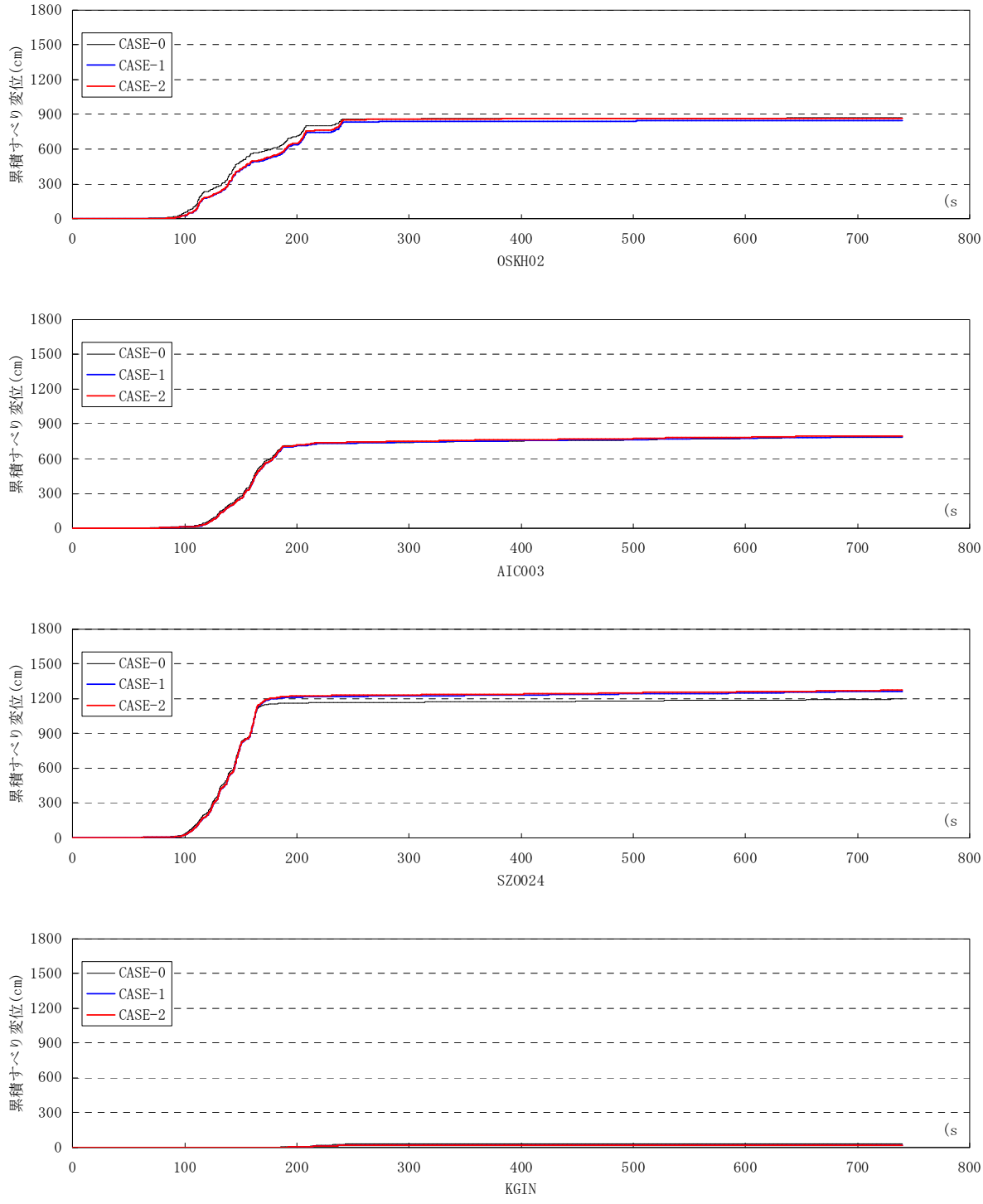


図 3.3.5-13(b)　累積すべり変位時刻歴波形(入力×1.25 倍)

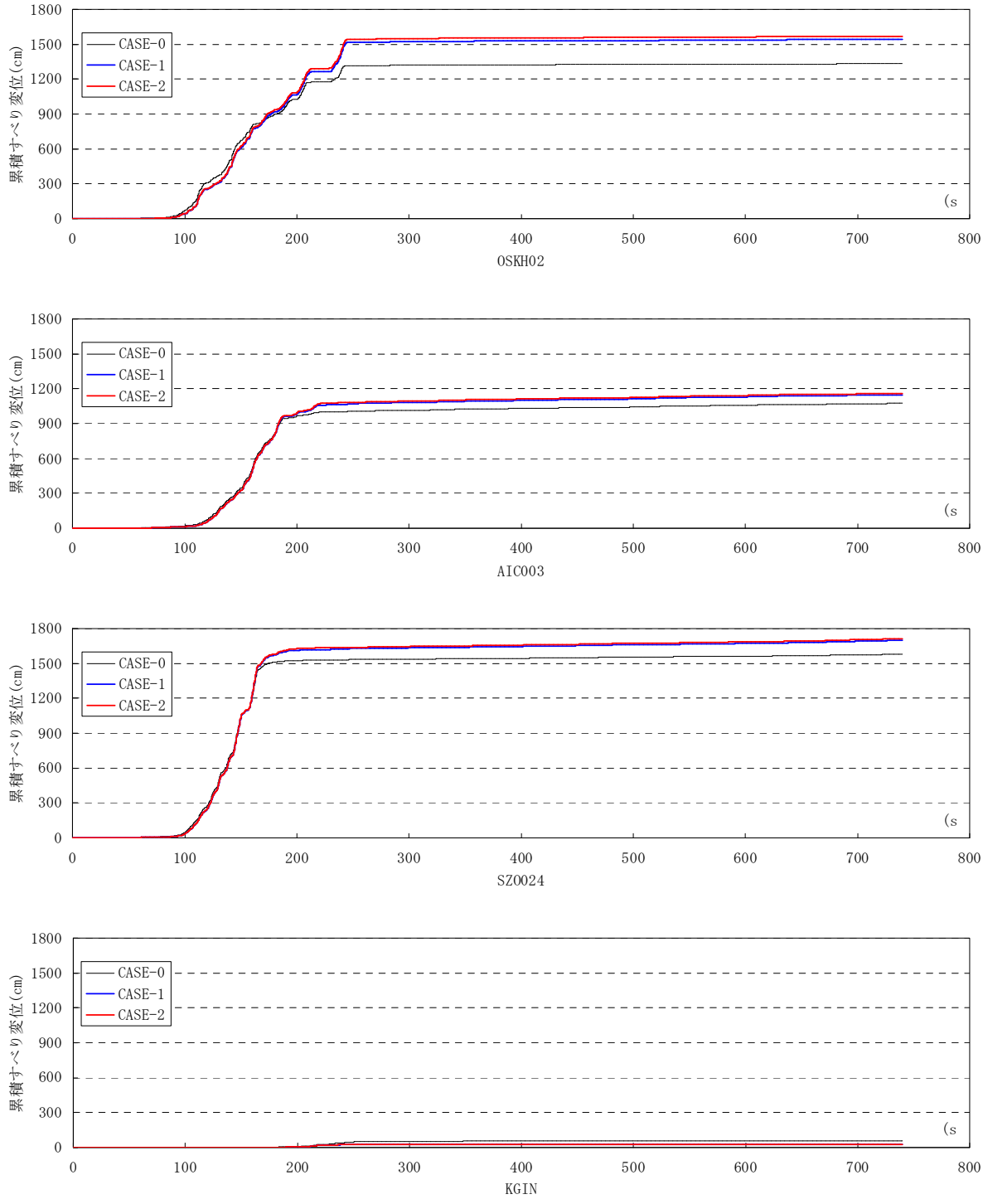


図 3.3.5-13(c)　累積すべり変位時刻歴波形(入力×1.50 倍)

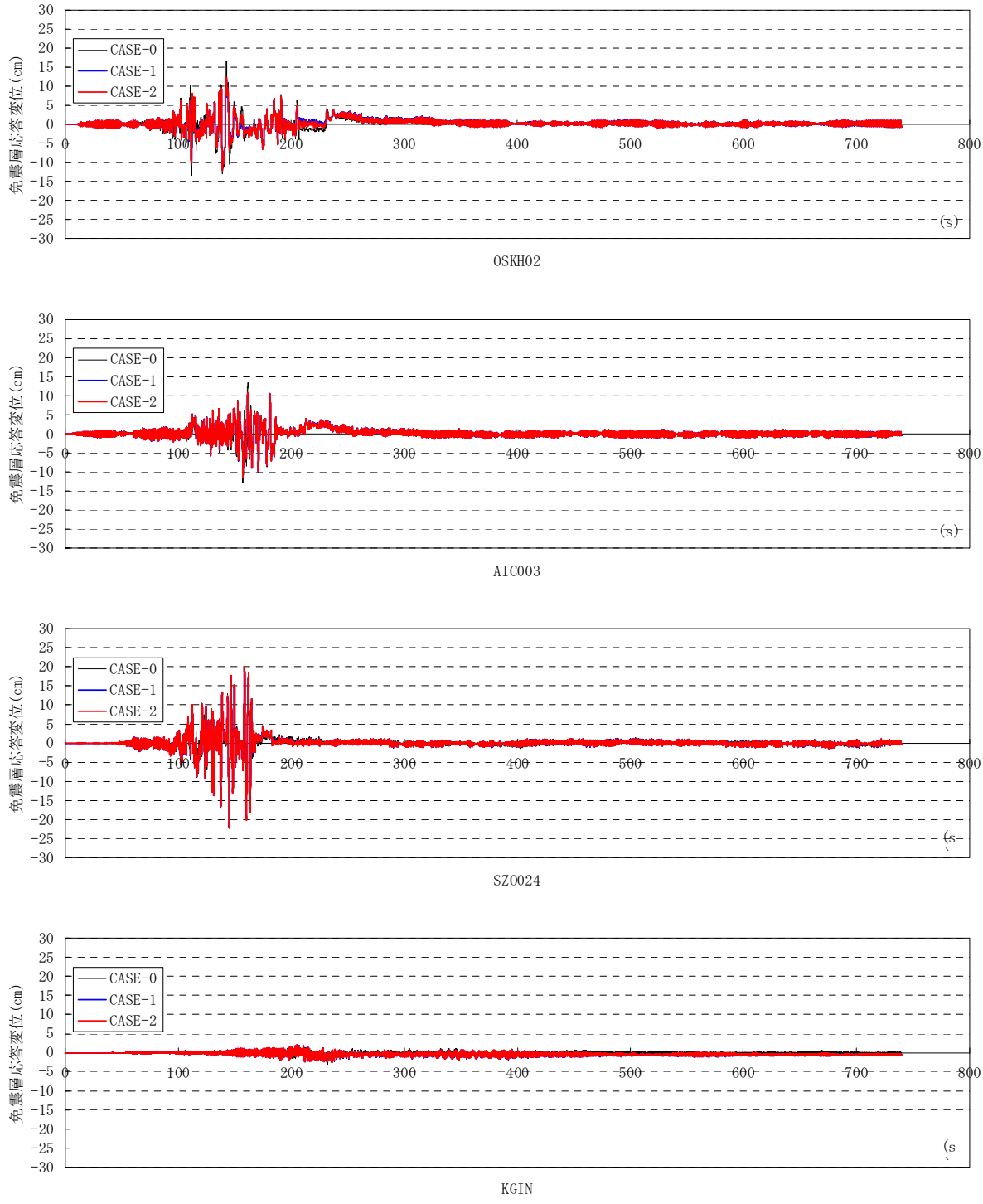


図 3.3.5-14(a)　免震層応答変位時刻歴波形(入力×1.00 倍)

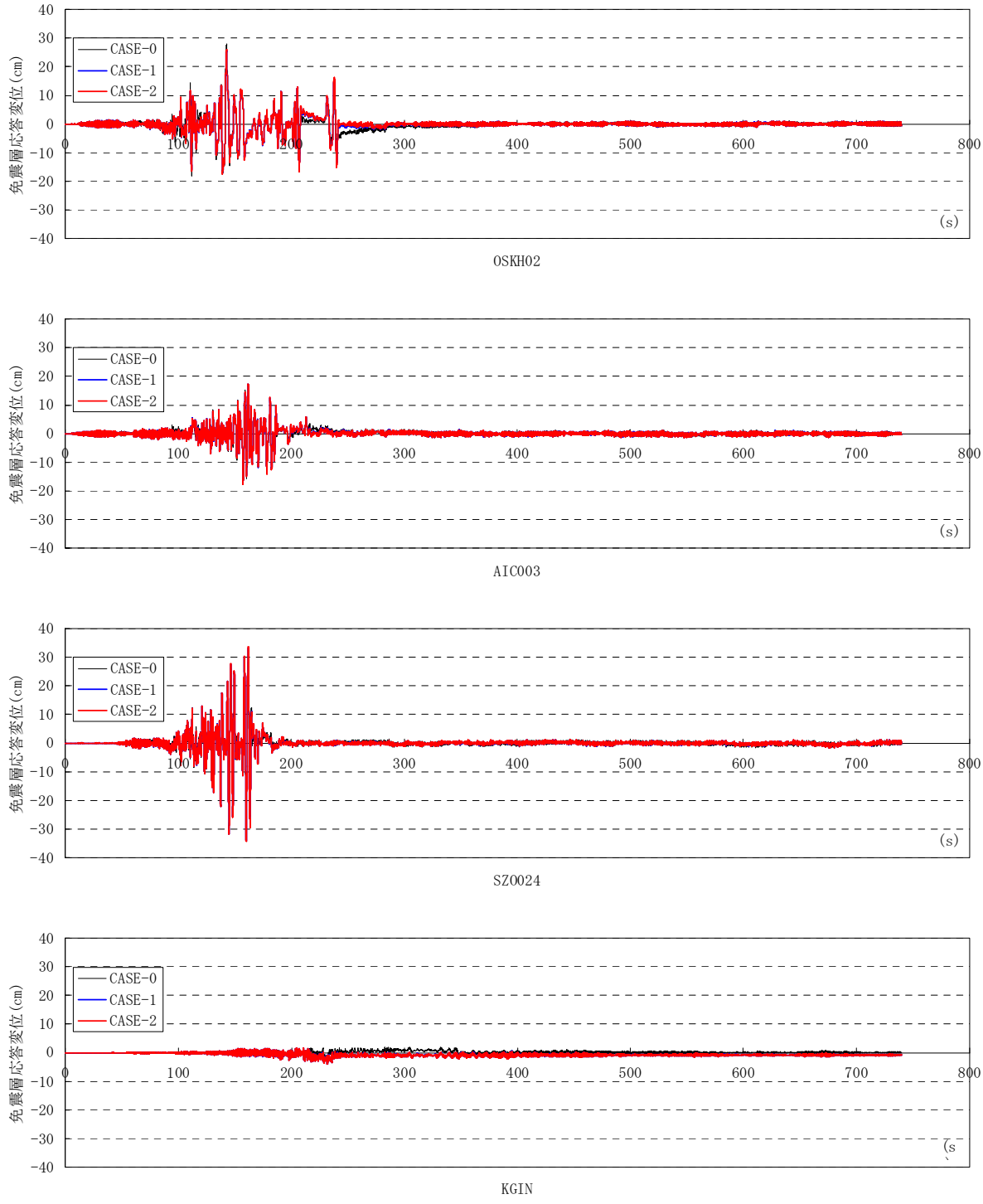


図 3.3.5-14(b)　免震層応答変位時刻歴波形(入力×1.25 倍)

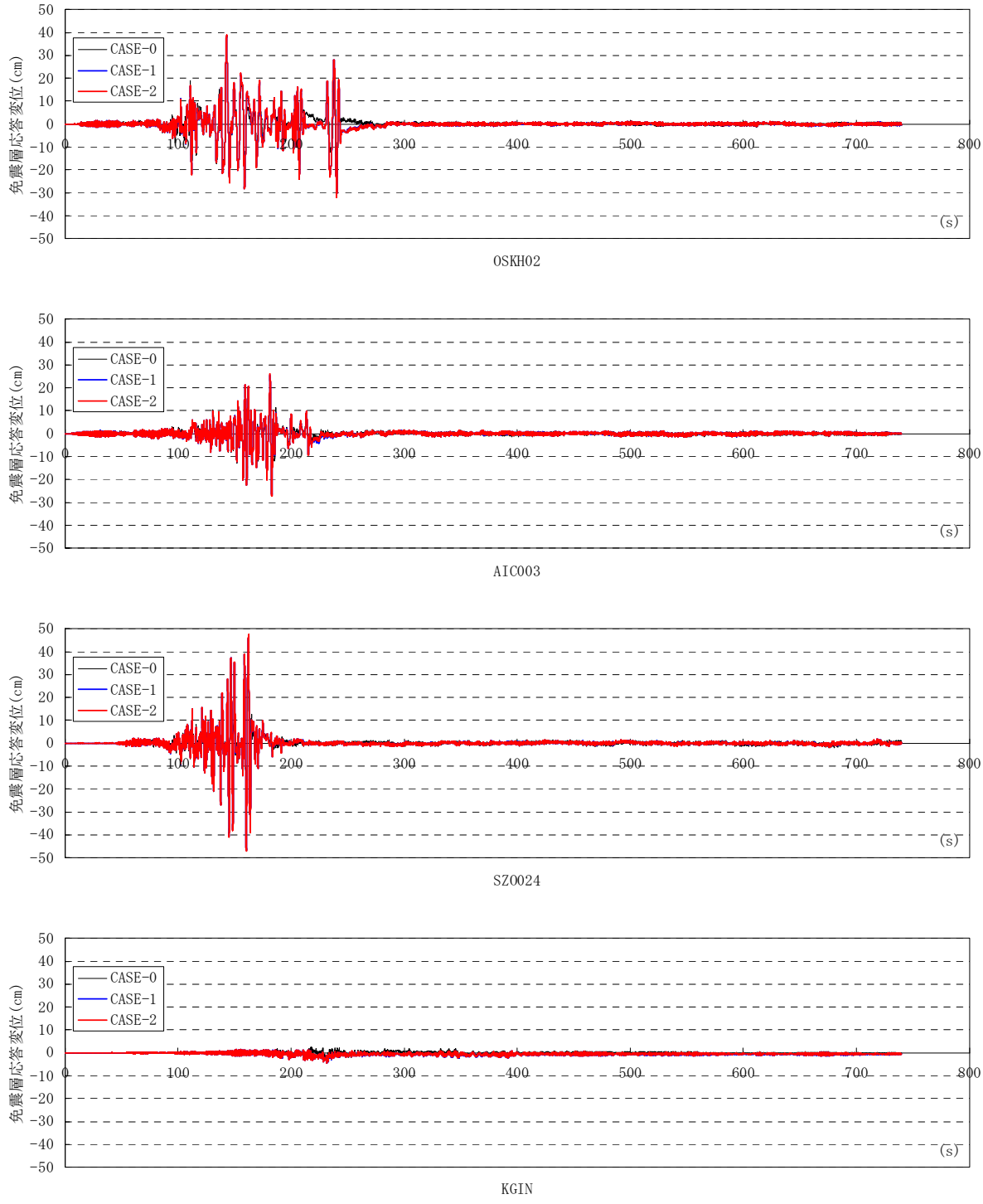
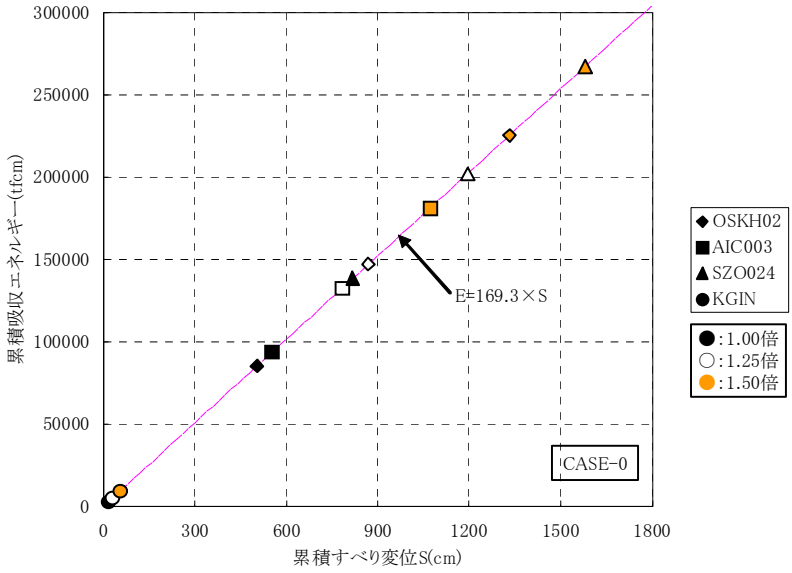
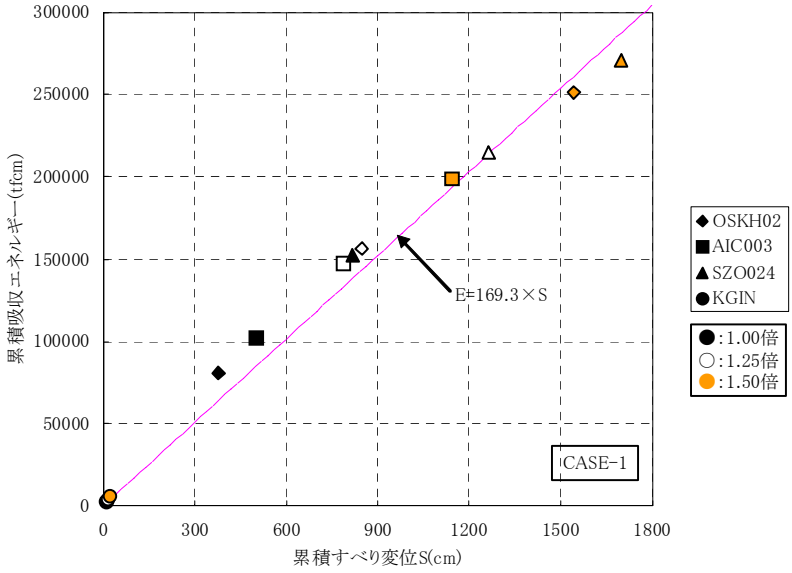


図 3.3.5-14(c)　免震層応答変位時刻歴波形(入力×1.50 倍)





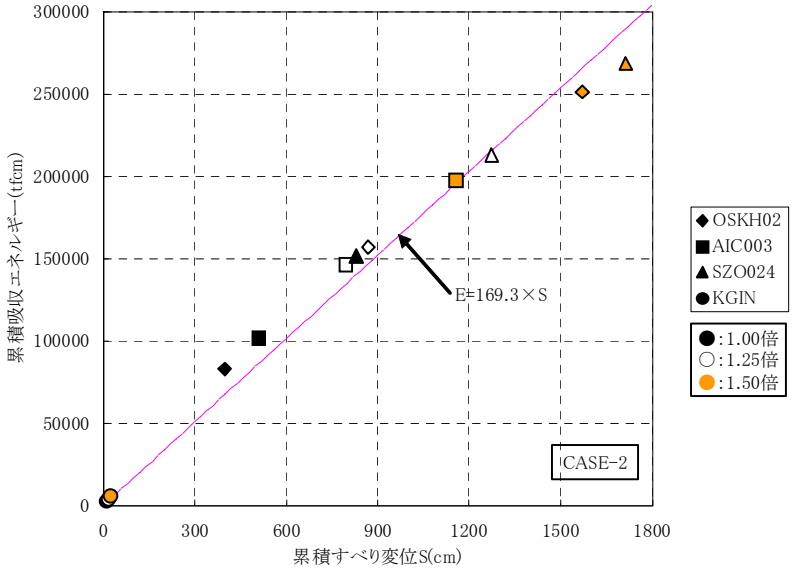


図 3.3.5-15　累積すべり変位-累積吸収エネルギー関係

(4) まとめ

以上の検討より以下の知見を得た。

- 摩擦係数の累積吸収エネルギー依存性を考慮することにより、繰り返し荷重により摩擦係数が低下し、応答変位が大きくなることが確認された。
- 累積吸収エネルギー依存性を考慮した応答結果と、累積すべり変位依存性を考慮した応答結果の比較では、最大応答値はほぼ同値、応答時刻歴波形や免震層の荷重-変形関係図もほぼ同一形状となっていることが確認された。
- 依存性を無視した標準モデルと、依存性を考慮したモデルとでは、初期の摩擦係数が依存性考慮モデルの方が高く出ているため、パラメータの見直しが必要である。
- 入力地震動のレベルにも依るが、累積吸収エネルギーまたは累積すべり変位依存性を考慮すると、標準モデルに比べて最大応答変位が 1 割程度大きくなることが確認できるので、実施設計においては、その分の余裕を見込んでおく必要があるのではないか。

参考文献

3.3.5-1) 日比野浩、高木政美、勝田庄二：実大弾性すべり支承の載荷実験に基づく摩擦特性のモデル化、日本建築学会構造系論文集、第 574 号、pp.45-52、2003.12

3.3.6　天然ゴム系積層ゴム＋弾性すべり支承（低摩擦）＋粘性ダンパー

(1) 免震部材実験結果に基づくモデル化

1) 弾性すべり支承(低摩擦)

承(低摩擦)については、第Ⅲ部 1.3.5 の記述において、累積変形量・温度および吸吸収エネルギー量に依存性が見られた。

以下では、まず試験の概要を示し、続けて試験結果から得られた依存性を考慮できる評価式の提案を行う。最後に部材試験とシミュレーションの比較を行い、評価式の妥当性を確認する。

a) 試験体及び実験内容の概要

試験体、試験装置、計測項目と計測方法、実験方法および実験ケースについては、第Ⅲ部第 1 章 1.3.5 項に示した内容と同様であるため、それぞれの記述は割愛する。第Ⅲ部 1.3.5 項を参照してほしい。

b) 試験結果を用いた評価式の改善

①材料認定書の評価式

材料認定書 [3.3.6-1)]に記載されている低摩擦すべり支承の既往評価式は、式(3.3.6-1)となる。式(3.3.6-1)では、面圧および速度依存性が考慮されているが、繰り返しによる依存性は考慮されていない。

$$\mu(\sigma_s, V) = (0.0355 - 0.0093 \cdot exp(-0.1 \cdot V)) \cdot \sigma_s^{-0.44} \qquad (3.3.6\text{-}1)$$

ここに、σ_s は面圧(N/mm^2)、V は水平速度(mm/sec)を示す。

②累積変形量と摩擦係数

図 3.3.6-1 に#1～#4 各試験体の累積変形量に対する摩擦係数の変動を示す。摩擦係数は面圧 20MPa、速度 15mm/s に補正して表示した。累積変形量は全体変形を積算して求めた。図中には比較のため、メーカー提供の既往評価データを示した。

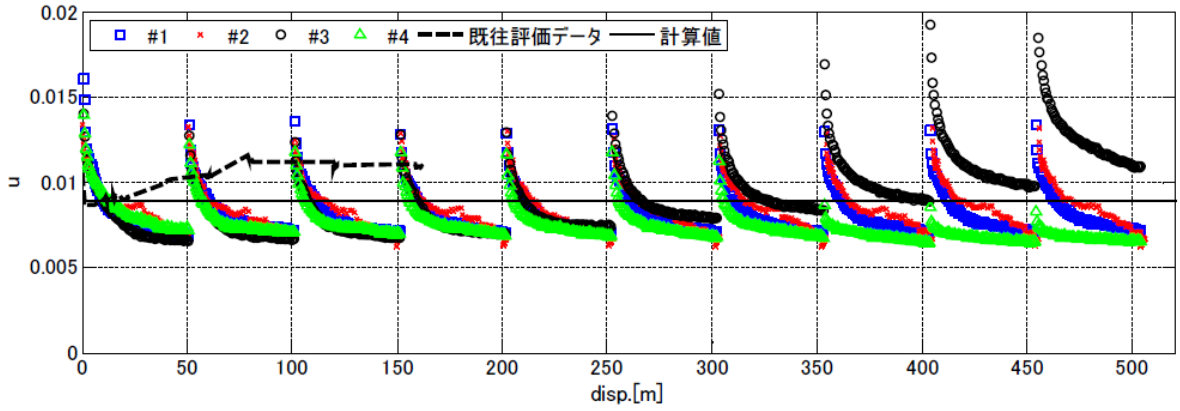


図 3.3.6-1 累積変形量と摩擦係数

本調査においては、長周期地震動 1 波分の応答を想定したセット毎に摩擦係数の有意な低下が見られ、インターバル時間を挟んだ次セットの開始時には摩擦係数の復帰が見られるのが特徴である。また、本調査におけるセット間の相対的な変化はあまり見られない。

特徴的な傾向として、面圧 30MPa の#3 試験体では、累積変形量 200m(5 セット目)程度から摩擦係数の上昇傾向が観察される。350m(8 セット目)以降、上昇傾向は顕著となる。面圧が 20MPa を超える場合には、この累積変形量領域における摩擦係数変動を考慮する必要がある。

③温度と摩擦係数

図 3.3.6-2 および図 3.3.6-3 に温度に対する摩擦係数の変動を示す。図 3.3.6-2 は縦軸に摩擦係数を採り、横軸にはすべり板中央(計測点④)温度を採った。図 3.3.6-3 は縦軸に各セット開始時の摩擦係数に対する各サイクルの摩擦係数の低下分(以下、摩擦係数低下量)を採り、横軸には、すべり板中央(計測点④)温度の各セット開始時点からの上昇分(以下単に、温度上昇)を採った。図は、摩擦係数の顕著な上昇が見られた#3 試験体の 7 セット目以降と、インターバルが短く各セット開始時点の温度が高温状態となった#4 試験体の 8 セット目以降を除く、4 試験体の全セットについて重ね書きした。

図 3.3.6-2 からは、本実験においては、セット開始直後の急激な低下を除けば、摩擦係数の変動とすべり板中央(計測点④)温度 T_4 が比較的ばらつきの少ない関係を有していることがわかる。

セット開始時(1 サイクル目)の摩擦係数 μ_0(各セットの最大動摩擦係数)と温度 T_4 の関係は式(3.3.6-2)で表現できる。

図 3.3.6-3 からは、#1 試験体の 1 セット目を除くと、本実験においては、摩擦係数低下量とすべり板温度上昇の間に一定の関係を見出すことができる。ここでは図 3.3.6-3 より、摩擦係数低下量$\Delta\mu$ と計測点④の温度上昇ΔT_4 の関係を式(3.3.6-3)で近似できる。

$$\mu_0 = -7.5\times10^{-5}\cdot T_4 + 0.0145 \qquad (3.3.6\text{-}2)$$

$$\Delta\mu = 0.03\cdot(\Delta T_4 + 1)^{-0.06} - 0.03 \qquad (3.3.6\text{-}3)$$

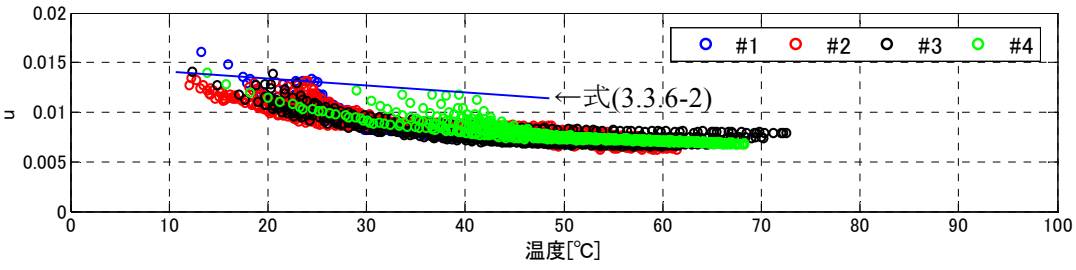


図 3.3.6-2 温度に対する摩擦係数の変動(計測点④)

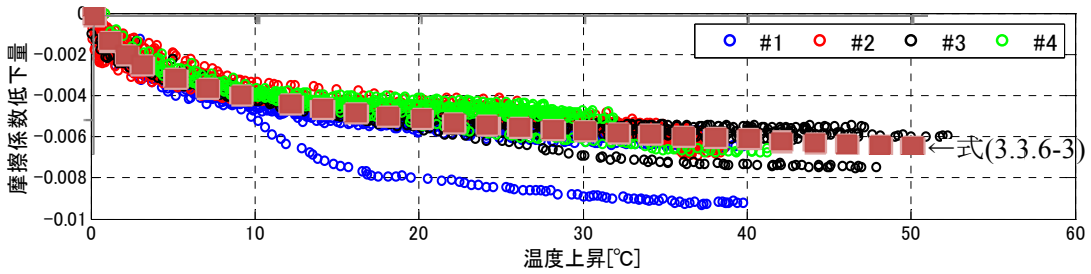


図 3.3.6-3 すべり板温度変動に対する摩擦係数の変動(計測点④)

-

④吸収エネルギーと温度上昇の相関

図 3.3.6-4 に各セットにおける吸収エネルギーと温度上昇の相関を示す。図 3.3.6-4 より各セットにおける吸収エネルギーE_d と計測点④の温度上昇ΔT_4 の関係は式(3.3.6-4)で表すことができる。

$$\Delta T_4 = 0.00019 \cdot E_d{}^{0.9} \tag{3.3.6-4}$$

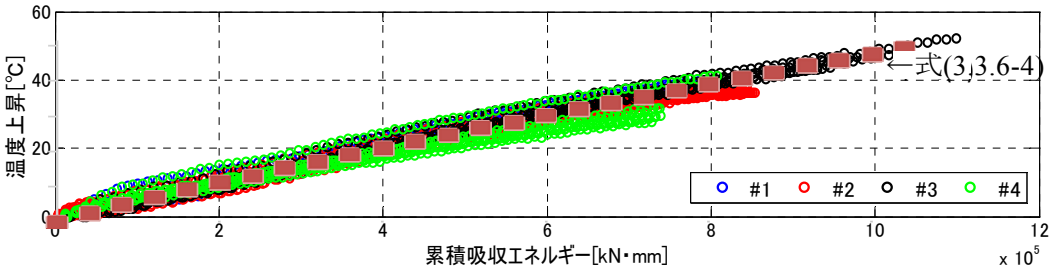


図 3.3.6-4 累積吸収エネルギーとすべり板温度上昇(計測点④)

摩擦係数と温度の関係を式(3.3.6-2)および式(3.3.6-3)の組合せで表現することにし、式(3.3.6-4)で加振中の温度上昇を累積吸収エネルギーに置き換えると、高面圧の繰り返しに伴う摩擦係数の顕著な上昇が生じたケース(#3 試験体の 7 セット目以降)と、すべり板温度が高温状態から加振が開始されたケース(#4 試験体の 8 セット目以降)を除く、本調査の実験結果を対象とした動摩擦係数 μ の繰り返し特性依存式が式(3.3.6-5)のように提示できる。式中 T は初期のすべり板温度であり、環境温度に代表される。

$$\left.\begin{aligned} \mu &= \mu_0 + \Delta\mu \\ \mu_0 &= -7.5\times10^{-5}\cdot T + 0.0145 \\ \Delta\mu &= 0.03\cdot(0.00019\cdot E_d{}^{0.9}+1)^{-0.06} - 0.03 \end{aligned}\right\} \tag{3.3.6-5}$$

設計ツールとして用いる地震応答解析には、温度評価を介在させるよりも吸収エネルギーを用いた方が汎用性が高いことなどを考慮して式(3.3.6-5)の形式を採った。

⑤#3 試験体における摺動距離と摩擦係数の相関

図 3.3.6-5 に#3 試験体の各セット開始時の動摩擦係数と式(3.3.6-5)・第 2 式との偏差(以下、初

期値偏差)を累積摺動距離 *Ds* との関係で示す。また、図 3.3.6-6 に#3 試験体のセット毎の動摩擦係数の低下量を式(3.3.6-5)・第 3 式に対する比(以下、低下量比)として累積摺動距離 *Ds* との関係で示す。

初期値偏差、低下量比とも *Ds* が 200m を超えると増加する傾向にある。ここでは、すべり材面圧 σ_p が 20MPa を超え、かつ累積摺動距離 *Ds* が 200m を上回る場合の初期動摩擦係数 μ_0 と繰り返しによる摩擦係数低下量$\Delta\mu$ の補正項 μ_{0_col}、$\Delta\mu_{\_col}$ として両図より式(3.3.6-6)を導く。

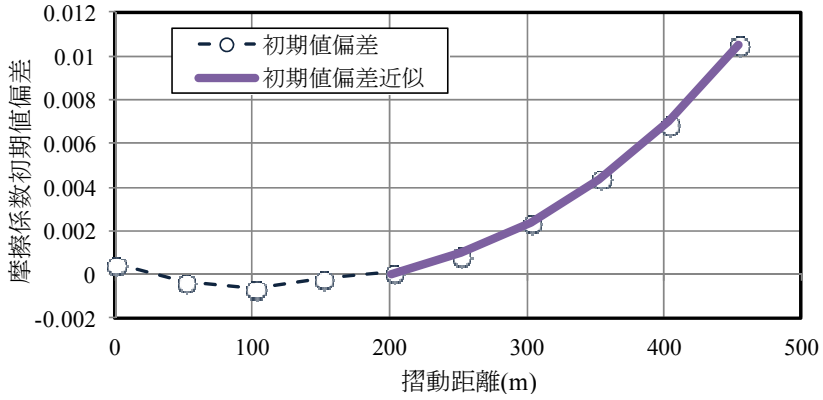


図 3.3.6-5　#3 試験体　動摩擦係数初期値偏差と摺動距離の関係

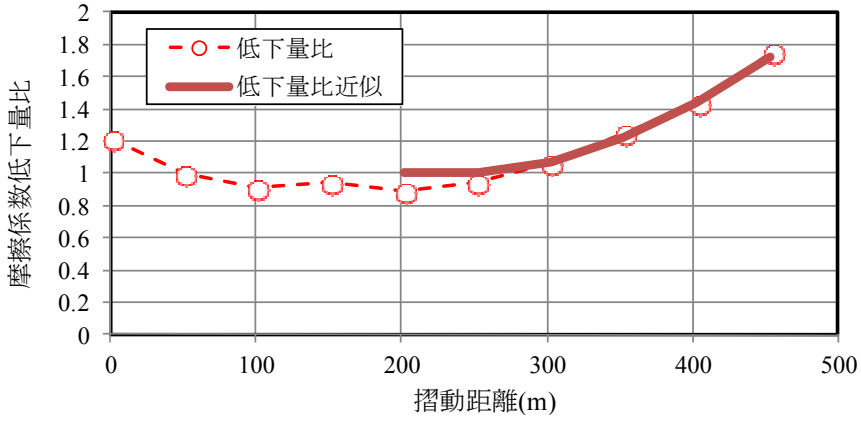


図 3.3.6-6　#3 試験体　動摩擦係数低下量比と摺動距離の関係

$$\mu_{0\_col}=\begin{cases}0 & (\sigma_p=20MPa)\\ 1.8\times10^{-10}\cdot {D_{S2}}^3+5.5\times10^{-8}\cdot {D_{S2}}^2+1.6\times10^{-5}\cdot D_{S2} & (\sigma_p=30MPa)\end{cases}$$

$$\Delta\mu_{\_col}=\begin{cases}1 & (\sigma_p=20MPa)\\ -2.8\times10^{-9}\cdot {D_{S2}}^3+1.5\times10^{-5}\cdot {D_{S2}}^2-7.9\times10^{-4}\cdot D_{S2}+1 & (\sigma_p=30MPa)\end{cases} \quad (3.3.6\text{-}6)$$

$$\text{ここで、}\ D_{S2}=\begin{cases}D_S-200\,(\mathrm{Ds}\geq 200)\\ 0(\mathrm{Ds}<200)\end{cases}$$

⑥繰り返し依存特性評価式の提示

上述の式(3.3.6-5)および式(3.3.6-6)を組み合わせることにより、本調査の実験結果を対象とし

た動摩擦係数 μ の繰り返し特性依存式を評価する。ただし、式(3.3.6-5)および式(3.3.6-6)では既往評価式である式(3.3.6-1)で考慮されている速度・面圧依存性が考慮されない。

式(3.3.6-1)の摩擦係数は、面圧 20MPa、速度 400mm/sec の際に摩擦係数が 0.00950 となる式となっている。そこで、式(3.3.6-5)および式(3.3.6-6)から得られる摩擦係数に、式(3.3.6-1)を使って求められる摩擦係数を 0.00950 で除した値を乗じて、繰り返し依存性に加えて面圧・速度依存性を考慮した式(3.3.6-7)を提示する。

$$\mu = \mu(E_d, Ds) \cdot \frac{\mu(\sigma_s, V)}{0.0095} \tag{3.3.6-7}$$

ここで

$$\mu(E_d, Ds) = \mu_0 + \mu_{0\_col} + \Delta\mu \cdot \Delta\mu_{\_col}$$

$$\mu_0 = -7.5\times10^{-5} \cdot T + 0.0145$$

$$\Delta\mu = 0.03 \cdot (0.00019 \cdot E_d{}^{0.9} + 1)^{-0.06} - 0.03$$

$$\mu_{0\_col} = \begin{cases} 0 & (\sigma_p = 20MPa) \\ 1.8\times10^{-10} \cdot D_{S2}{}^3 + 5.5\times10^{-8} \cdot D_{S2}{}^2 + 1.6\times10^{-5} \cdot D_{S2} & (\sigma_p = 30MPa) \end{cases}$$

$$\Delta\mu_{\_col} = \begin{cases} 1 & (\sigma_p = 20MPa) \\ -2.8\times10^{-9} \cdot D_{S2}{}^3 + 1.5\times10^{-5} \cdot D_{S2}{}^2 - 7.9\times10^{-4} \cdot D_{S2} + 1 & (\sigma_p = 30MPa) \end{cases}$$

$$D_{S2} = \begin{cases} D_S - 200 (Ds \geq 200) \\ 0 (Ds < 200) \end{cases}$$

c) 部材試験結果と解析の比較

対象とする部材試験は、面圧 20MPa(#1 試験体)、および面圧 30MPa(#3 試験体)による多数回繰り返し試験とした。各試験体に対して 10 セットの加振が実施されているが、解析では第Ⅲ部 1.3.5 に示している 1，3，6，10 セット目を対象とした。

部材試験結果を反映させた本節提案の評価手法に加え、繰り返し依存性を考慮しない場合の既往評価による解析を実施し比較を行う。

表 3.3.6-1 および表 3.3.6-2 に主要応答値を示し、図 3.3.6-7~図 3.3.6-14 に各解析の応答を実験結果と比較して示す。なお、図中では試験結果を OBS、解析結果を ANA としている。

全体として、本節提案の評価式による解析結果は吸収エネルギーおよび摩擦係数ともに部材試験の結果を良好に再現できていると言える。また、#3 試験体の 6 セット目以降における摩擦係数の増加についても良好にモデル化できている。

一方、繰り返しを考慮しない場合の解析結果は、#3 試験体の 6 セット目以降の摩擦係数の増加は考慮できないため、特に 10 セット目での差異が大きい。また多くのケースにおいて加振後半に吸収エネルギーが実験値を大きく上回る結果となっているが、150 秒(累積距離で 20m 程度)付近までは、実験値を若干下回る程度の結果であると言える。

表 3.3.6-1　#1 試験体(20MPa)の主要応答結果比較

#1 試験体	累積吸収エネルギー (J)			84 サイクル時の摩擦係数		
	実験	繰り返し考慮	繰り返し非考慮	実験	繰り返し考慮	繰り返し非考慮
1 セット	7.914E5	7.881E5 (1.00)	8.784E5 (1.11)	0.00638	0.00715 (1.12)	0.00914 (1.43)
3 セット	7.810E5	7.881E5 (1.01)	8.784E5 (1.12)	0.00677	0.00715 (1.06)	0.00914 (1.35)
6 セット	7.843E5	7.881E5 (1.00)	8.784E5 (1.12)	0.00681	0.00715 (1.05)	0.00914 (1.34)
10 セット	8.080E5	7.881E5 (0.98)	8.784E5 (1.09)	0.00706	0.00715 (1.01)	0.00914 (1.29)

※3、6、10 セット目の累積吸収エネルギーは、そのセット中に吸収したエネルギーとする

※( )内の数値は実験値との比率を示す

※20MPa の解析結果は、摺動距離による影響を受けないため、各セットで同じ結果となる

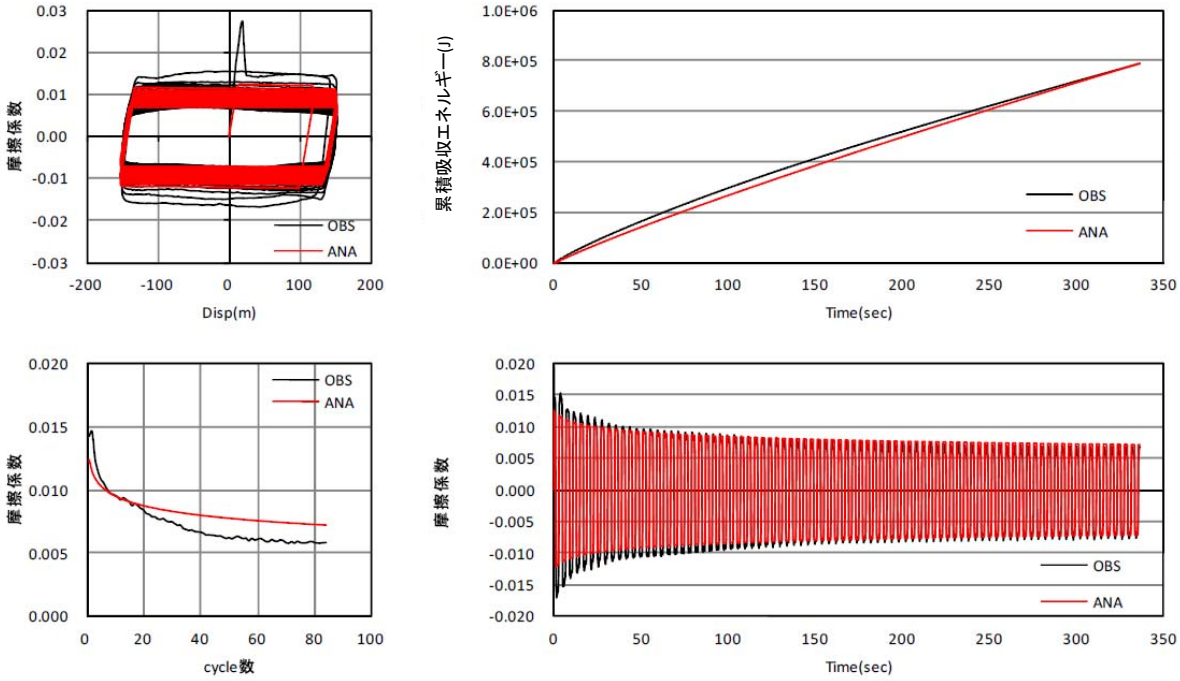
表 3.3.6-2　#3 試験体(30MPa)の主要応答結果比較

#3 試験体	累積吸収エネルギー (J)			84 サイクル時の摩擦係数		
	実験	繰り返し考慮	繰り返し非考慮	実験	繰り返し考慮	繰り返し非考慮
1 セット	9.580E5	9.531E5 (0.99)	1.089E6 (1.14)	0.00570	0.00580 (1.02)	0.00765 (1.34)
3 セット	9.404E5	9.531E5 (1.01)	1.089E6 (1.16)	0.00552	0.00580 (1.05)	0.00765 (1.39)
6 セット	1.093E6	1.093E6 (1.00)	1.089E6 (1.00)	0.00657	0.00714 (1.09)	0.00765 (1.16)
10 セット	1.513E6	1.492E6 (0.99)	1.089E6 (0.72)	0.00894	0.00979 (1.10)	0.00765 (0.86)

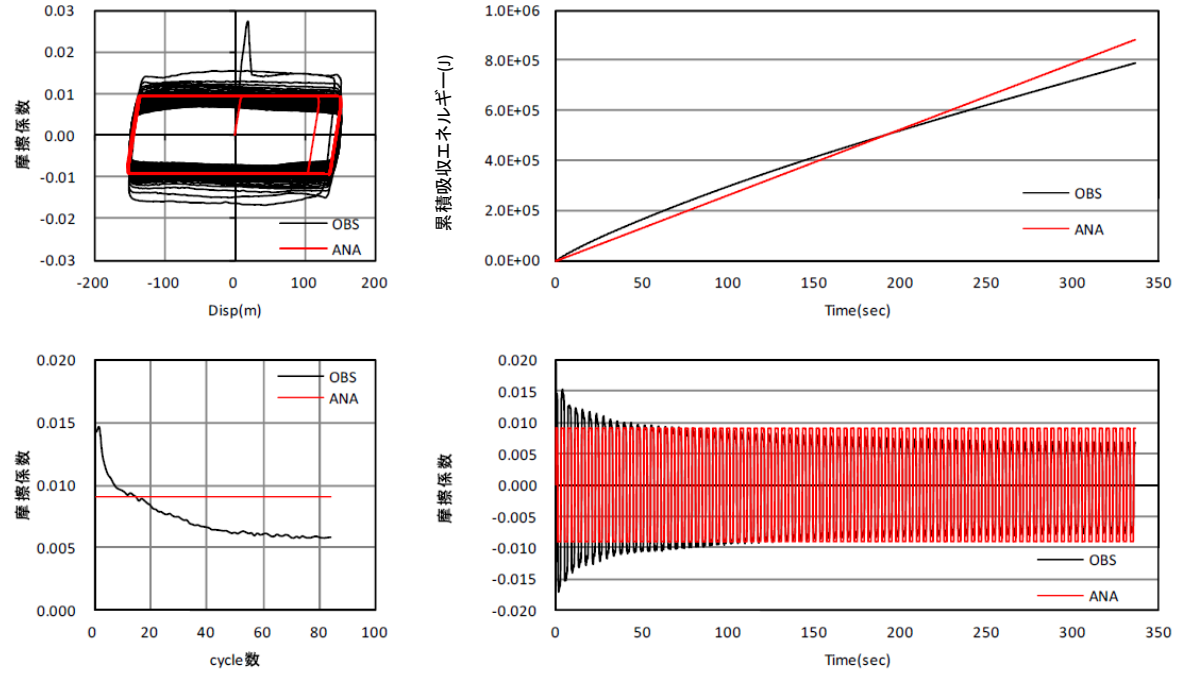
※3、6、10 セット目の累積吸収エネルギーは、そのセット中に吸収したエネルギーとする

※( )内の数値は実験値との比率を示す

※繰り返し非考慮については、摺動距離の影響を受けないため、各セットで同じ結果となる

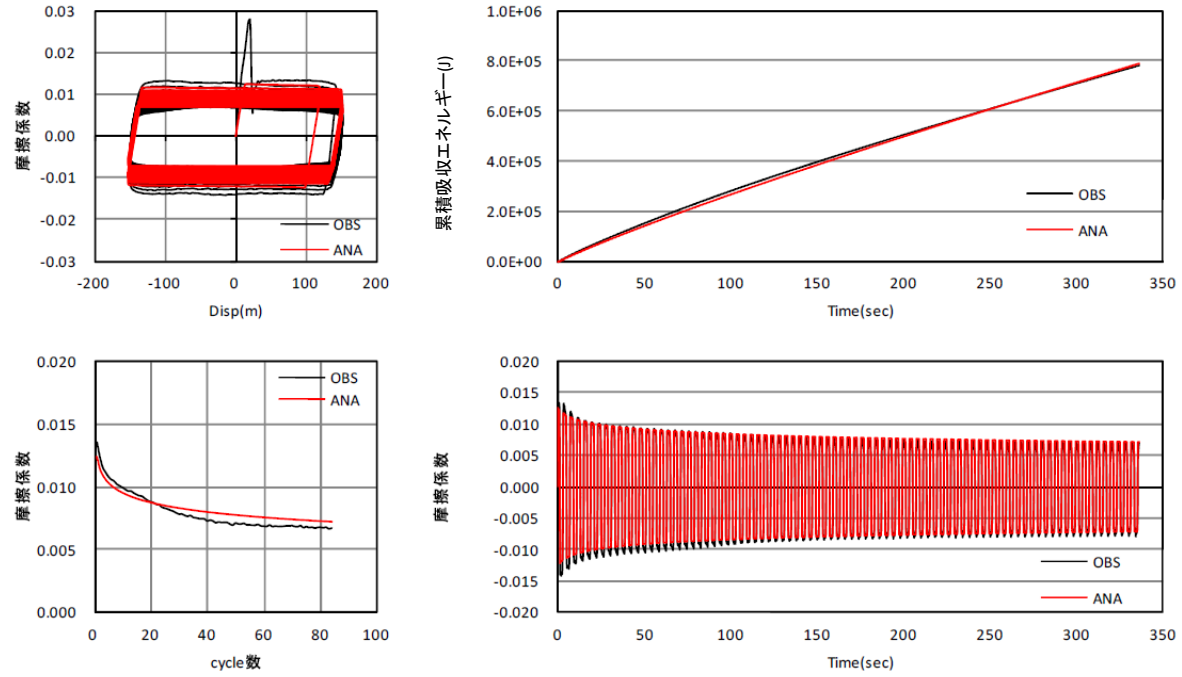


(a) 繰り返し依存性考慮

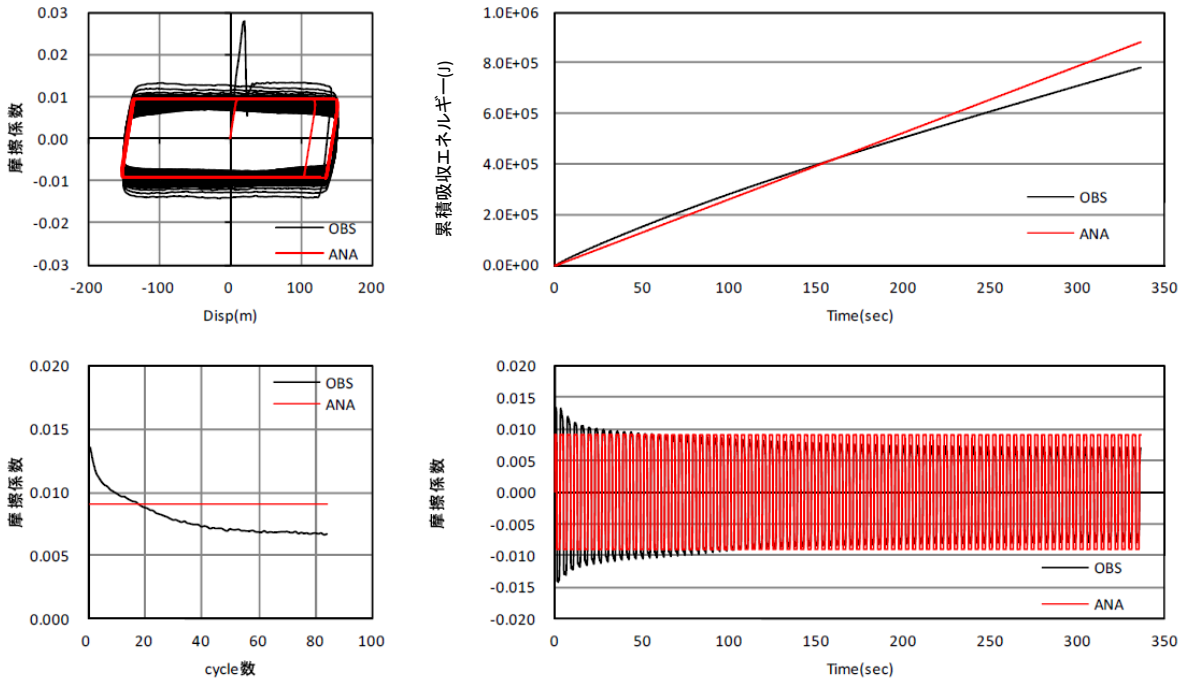


(b) 繰り返し依存性非考慮

図 3.3.6-7　#1 試験体(面圧 20MPa)　1 セット目　実験結果と解析結果の比較

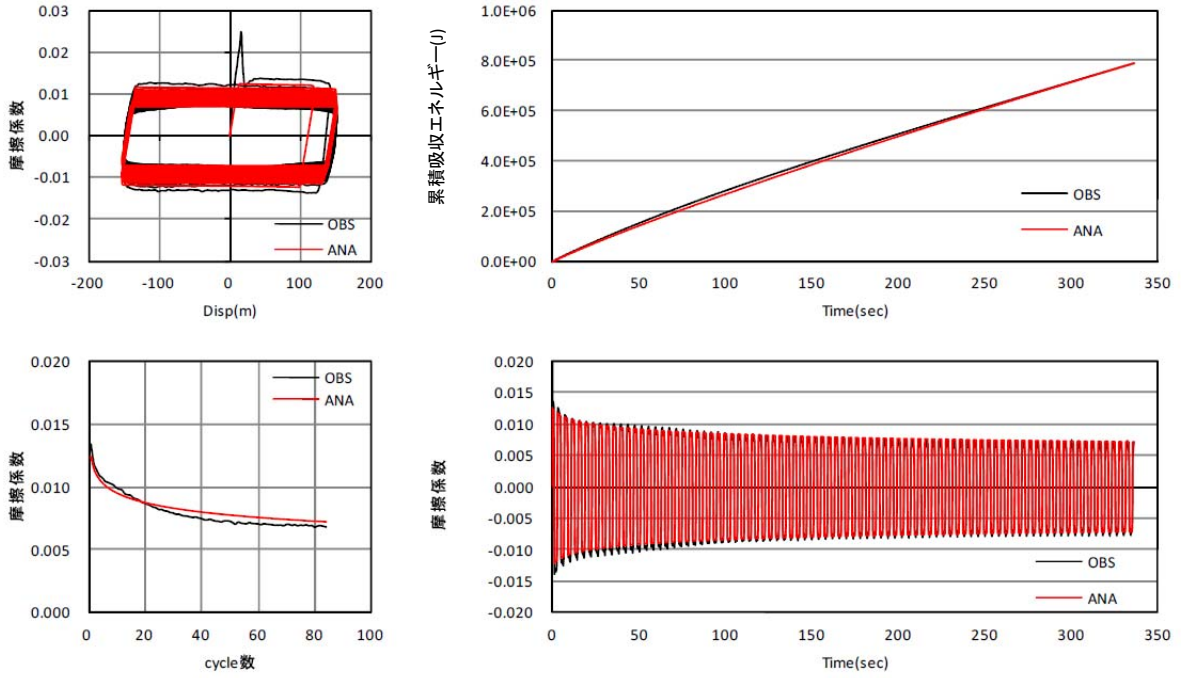


(a) 繰り返し依存性考慮

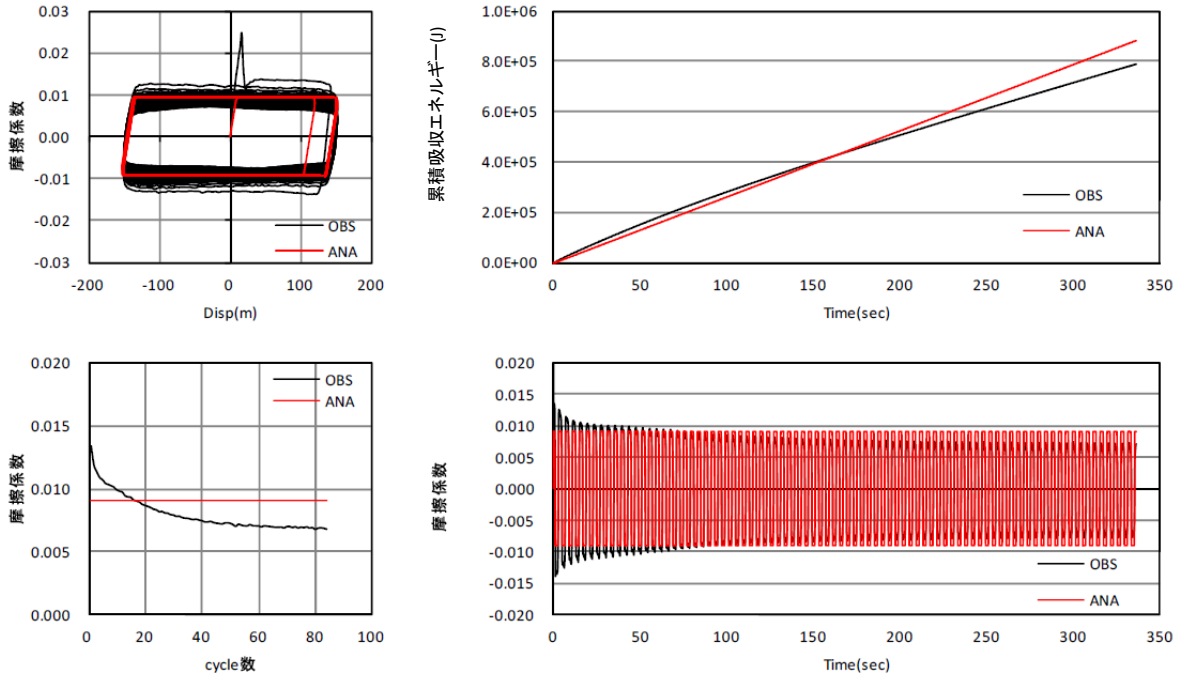


(b) 繰り返し依存性非考慮

図 3.3.6-8　#1 試験体(面圧 20MPa)　3 セット目　実験結果と解析結果の比較

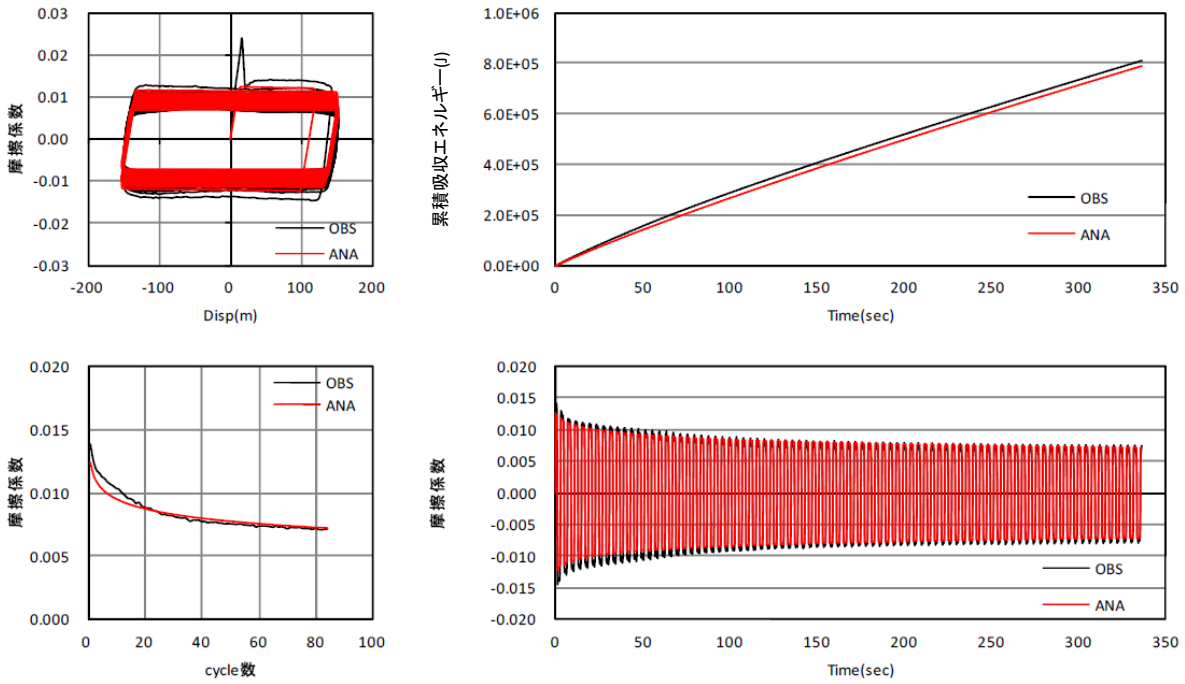


(a) 繰り返し依存性考慮

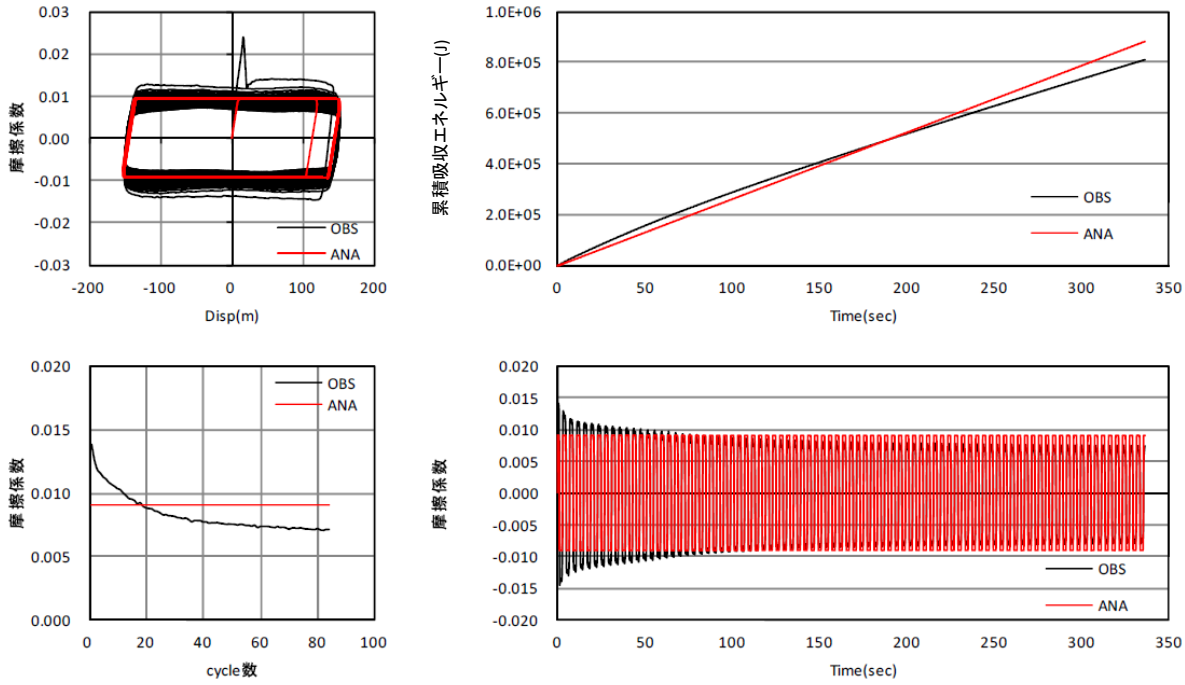


(b) 繰り返し依存性非考慮

図 3.3.6-9　#1 試験体(面圧 20MPa)　6 セット目　実験結果と解析結果の比較

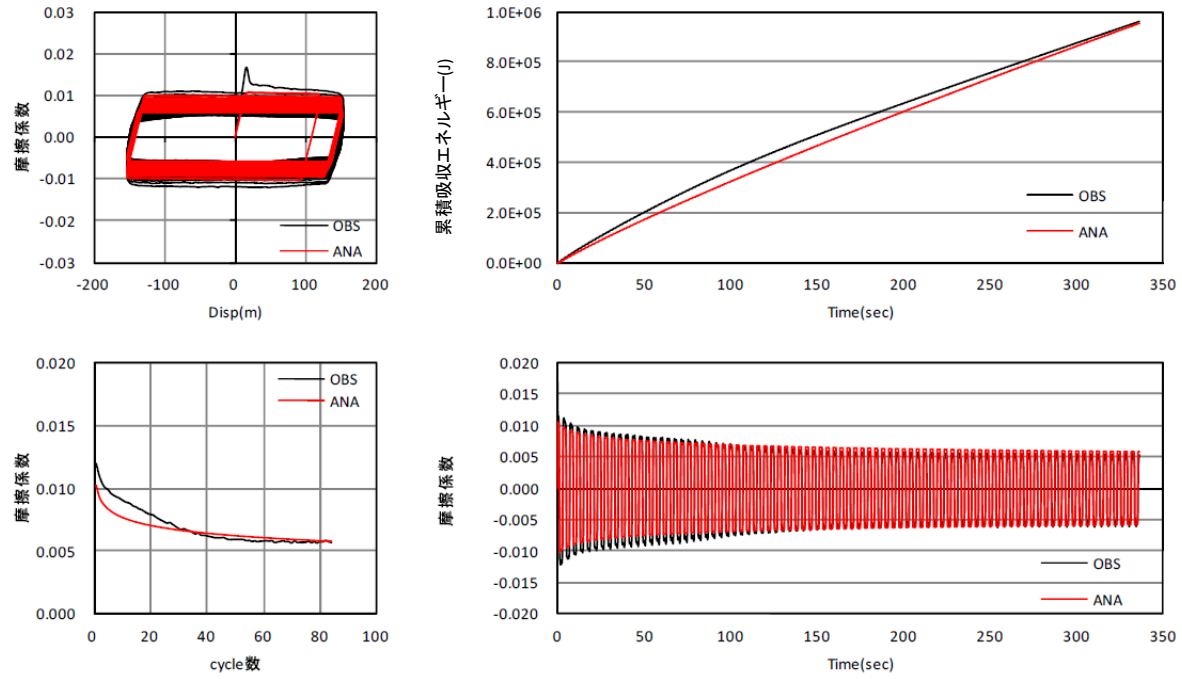


(a) 繰り返し依存性考慮

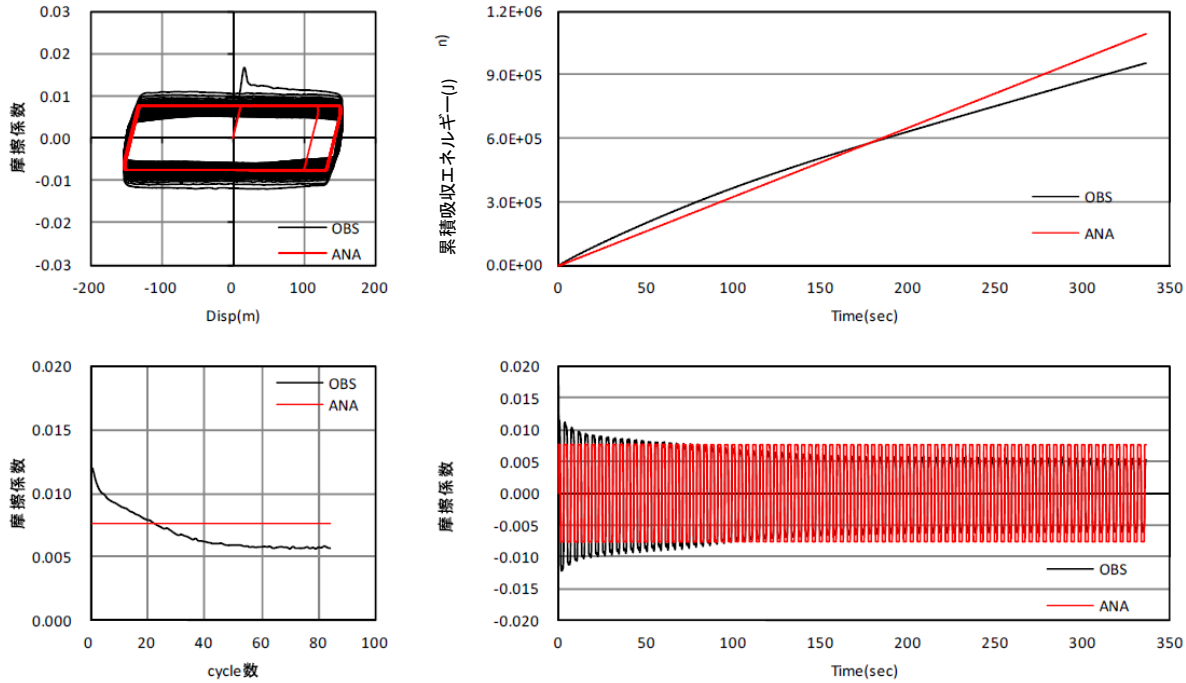


(b) 繰り返し依存性非考慮

図 3.3.6-10　#1 試験体(面圧 20MPa)　10 セット目　実験結果と解析結果の比較

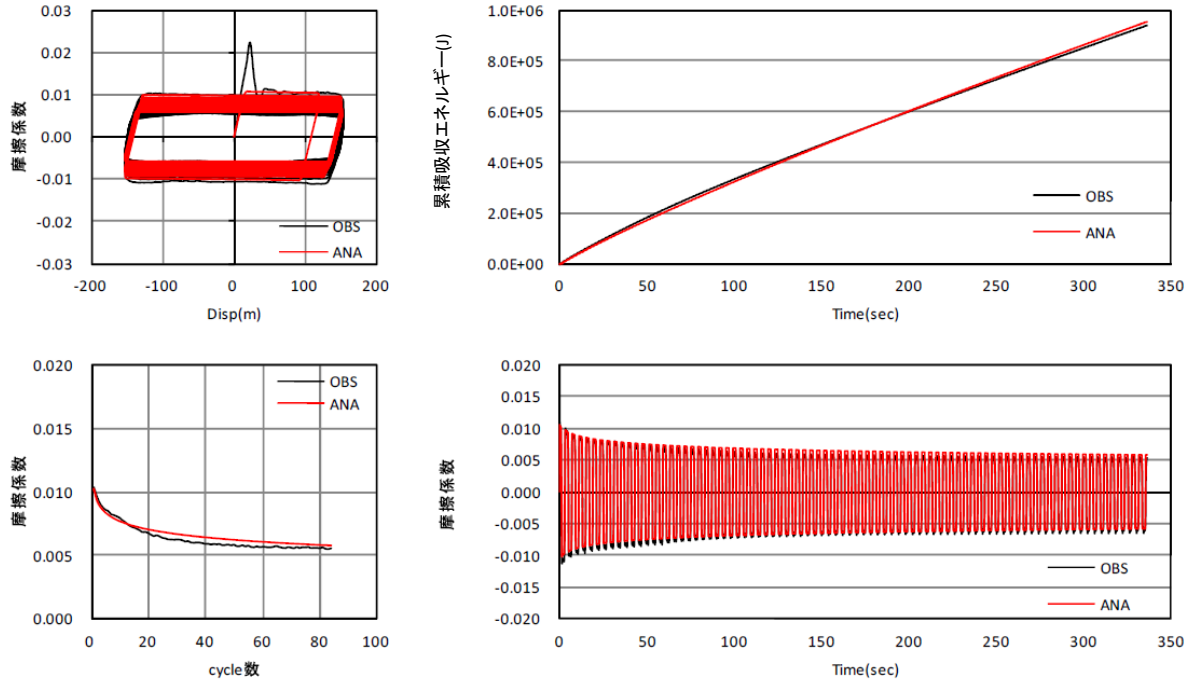


(a) 繰り返し依存性考慮

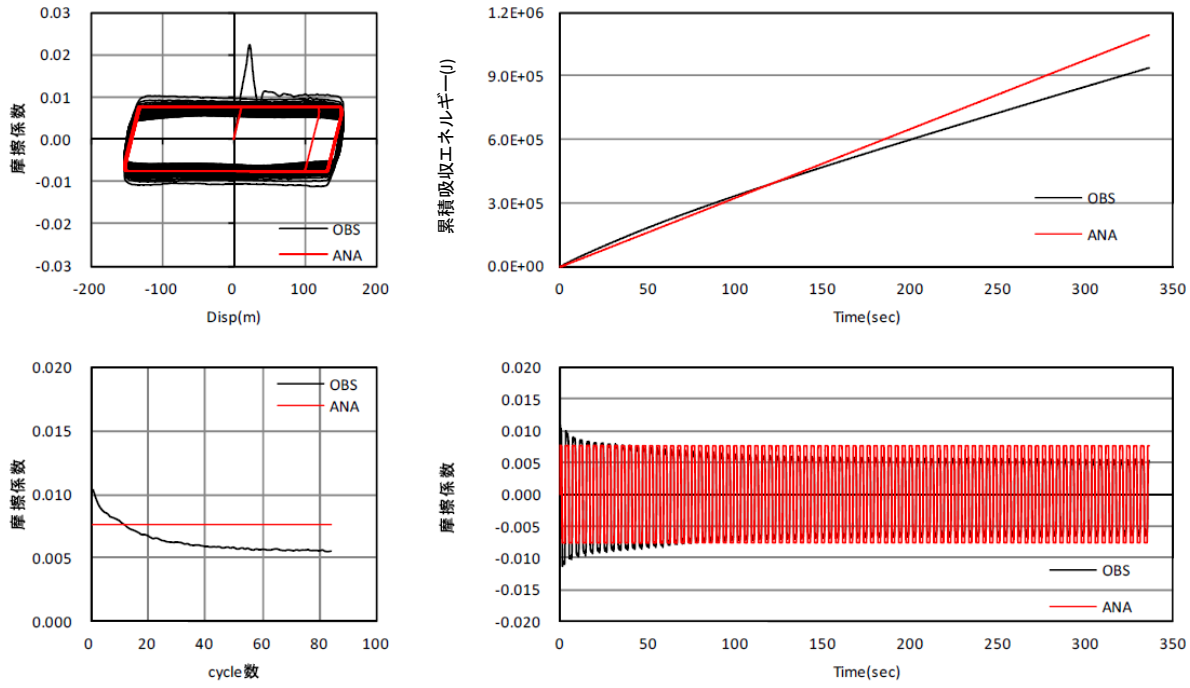


(b) 繰り返し依存性非考慮

図 3.3.6-11　#3 試験体(面圧 30MPa)　1 セット目　実験結果と解析結果の比較

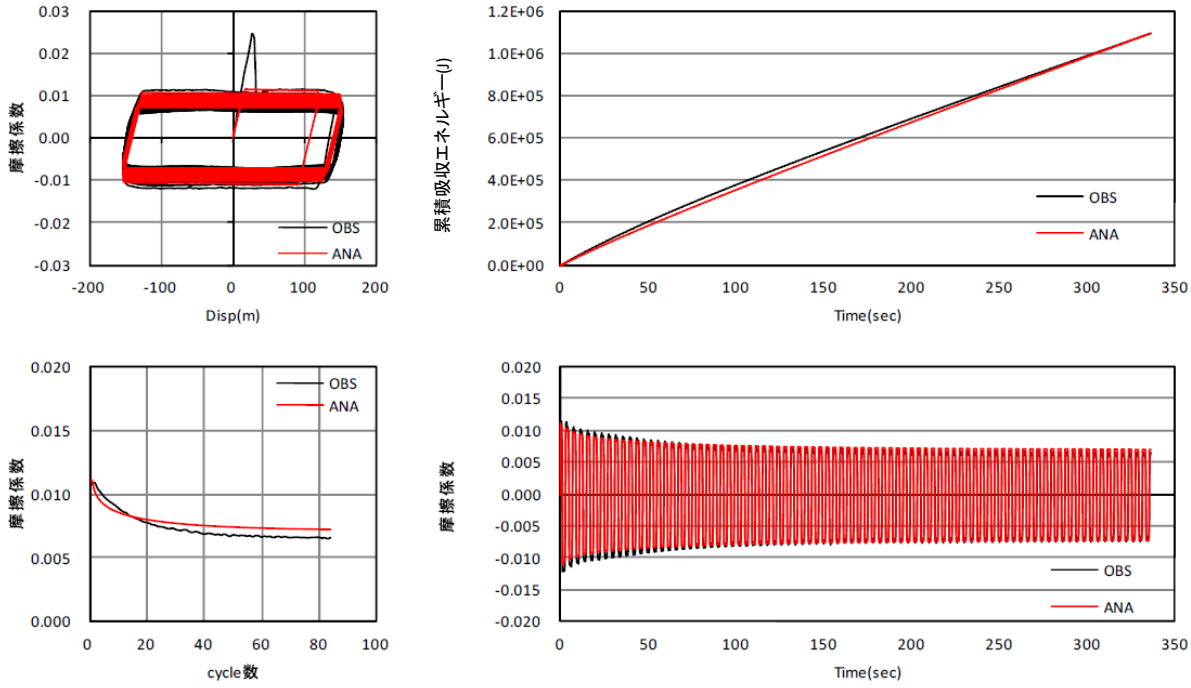


(a) 繰り返し依存性考慮

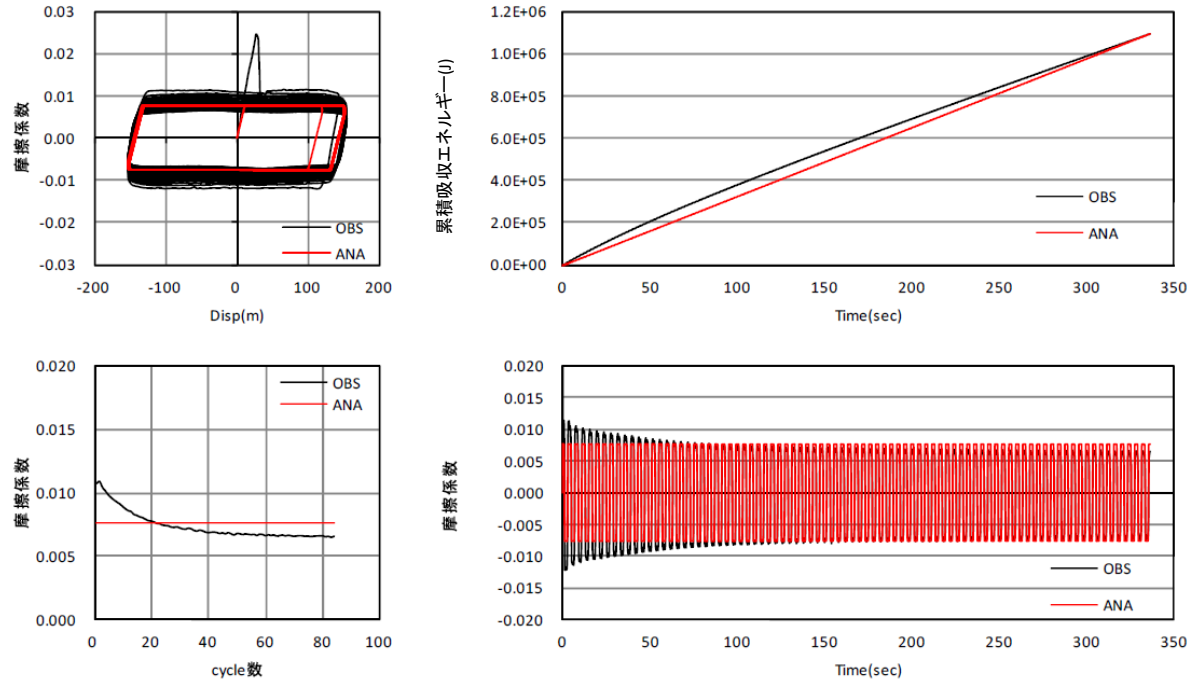


(b) 繰り返し依存性非考慮

図 3.3.6-12　#3 試験体(面圧 30MPa)　3 セット目　実験結果と解析結果の比較

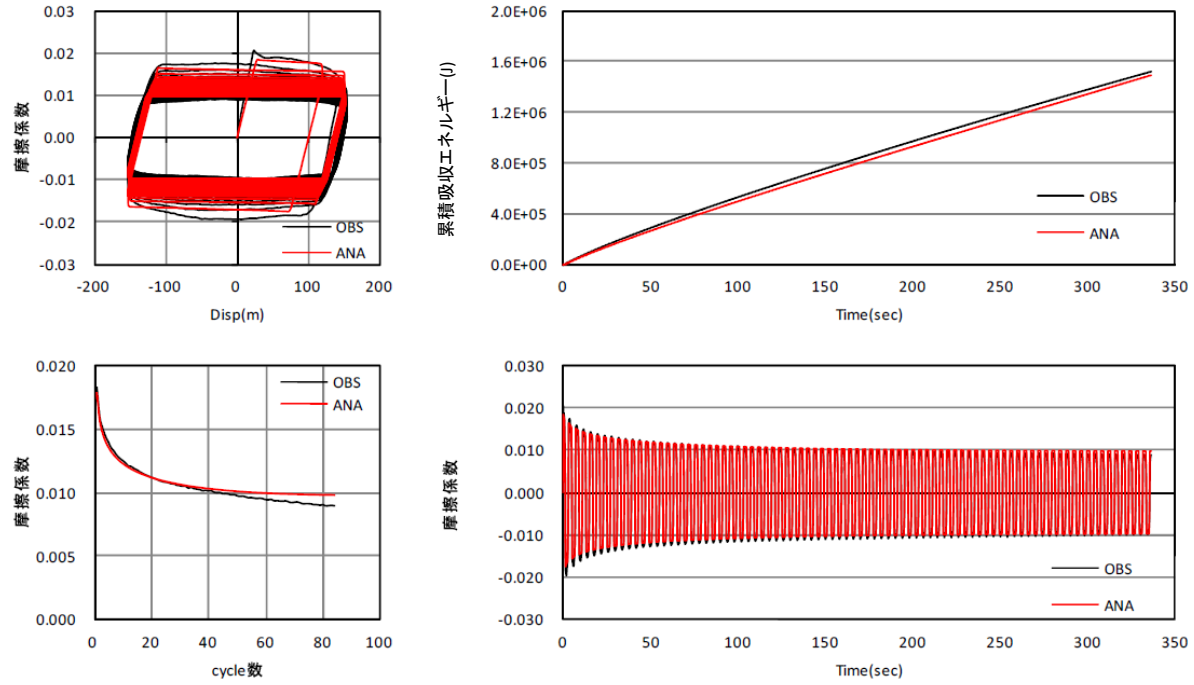


(a) 繰り返し依存性考慮

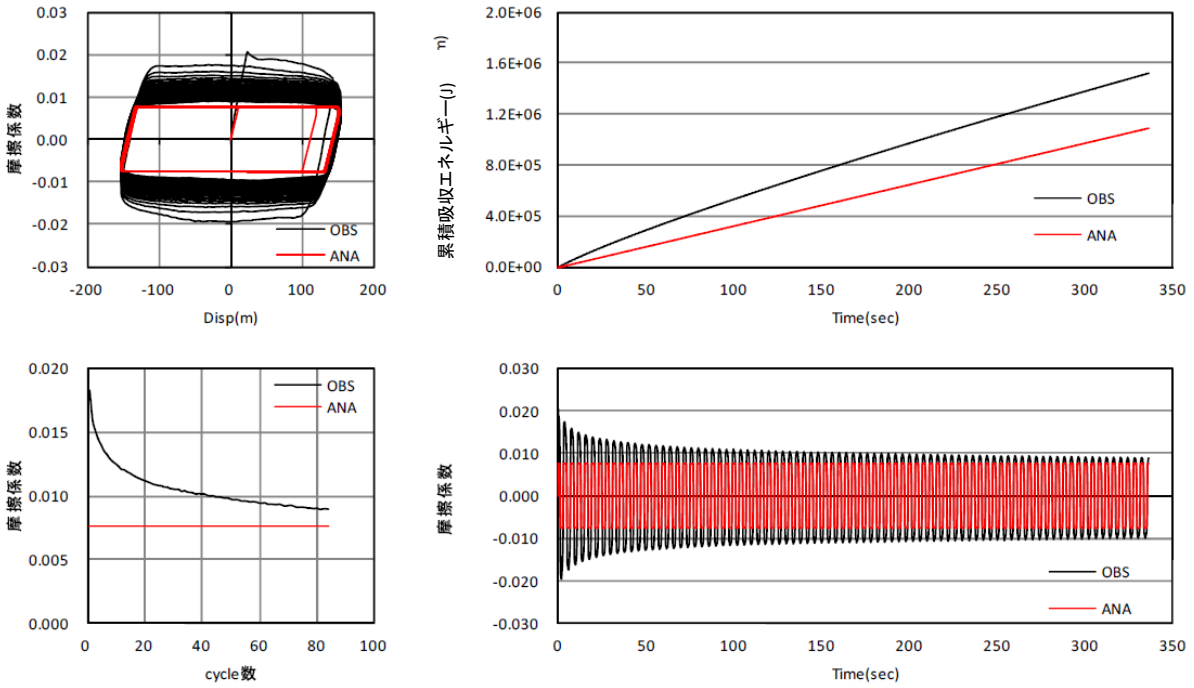


(b) 繰り返し依存性非考慮

図 3.3.6-13　#3 試験体(面圧 30MPa)　6 セット目　実験結果と解析結果の比較



(a) 繰り返し依存性考慮



(b) 繰り返し依存性非考慮

図 3.3.6-14　#3 試験体(面圧 30MPa)　10 セット目　実験結果と解析結果の比較

2) 粘性ダンパー

粘性ダンパーについては、第Ⅲ部 1.3.9 記述の部材試験結果において、吸収エネルギー量と繰り返し依存性に相関が見られた。すべり支承同様、まず試験の概要を示し、次に評価式の提案を行う。最後に部材試験とシミュレーションの比較を行い、モデル化の妥当性を確認する。

a) 試験体及び実験内容の概要

試験体、試験装置、計測項目と計測方法および多数回高速繰り返し手法については、第Ⅲ部第 1 章 1.3.9 項に示した内容と同様であるため、それぞれの記述は割愛する。第Ⅲ部 1.3.9 項を参照してほしい。

b) 試験結果を用いた評価式の改善

部材試験結果を受けて、本項で評価式の改善を検討する。

①材料認定書の評価式

材料認定書 3.3.6-2)~ 3.3.6-4)に記載されている粘性ダンパーの既往評価式では、軸減衰力 P_n は式(3.3.6-8)で与えられる。

$$P_n = a \times (\alpha \cdot Q_V + b) \tag{3.3.6-8}$$

ここに、α は繰り返し依存係数、Q_V は粘性抵抗力(kN)を示す。式(3.3.6-8)内の係数 a および b は粘性ダンパーの種類によって決まり、表 3.3.6-3 にその値を示す。

表 3.3.6-3 軸減衰力基準式の係数 a および b について

デバイスタイプ	係数 a	係数 b
Short タイプ	1.16	2.2
動粘度 10 万 cst タイプ	1.03	2.7
動粘度 30 万 cst タイプ (減衰力 30ton~60ton)	1.06	8.1
動粘度 30 万 cst タイプ (減衰力 70ton~140ton)	1.15	11.5

なお、基準値を算定する際の繰り返し依存係数 α は 0.85 を使用する。また、認定書 3.3.6-2)~ 3.3.6-4)に精算法として与えられている繰り返し依存係数 α の計算式は、式(3.3.6-9)となる。

$$\left.\begin{aligned} &\alpha = 1/(1 + c \cdot (Ev / Vv))^d \\ &c = \begin{cases} 0.0016 \cdot Ln(f) + 0.011 \text{ (short タイプ 、 動粘度 } 10 \text{万 cst タイプ)} \\ 0.0014 \cdot Ln(f) + 0.009 \text{ (動粘度 } 30 \text{万 cst タイプ)} \end{cases} \\ &d = 0.394 \cdot f^{0.087} \end{aligned}\right\} \tag{3.3.6-9}$$

ここに、Ev は粘性抵抗力($=\alpha \cdot Q_V$)による累積吸収エネルギー量(J)、Vv は充填されている粘性体の容積(cc)、f は定常波の振動数あるいは建屋の 1 次固有振動数(Hz)を示す。

ただし、第Ⅲ部 1.3.9 に記述される通り、認定書に示された繰り返し試験における吸収エネルギーは、長周期地震動による応答解析の結果、既存の試験によって確認されている上限値を大きく超える結果となっている。

また、既往の評価では、繰り返し依存性と温度依存性が、それぞれ単位体積エネルギーと粘性体温度の関数として与えられており、評価の際にはそれらを組み合わせる必要がある。ところが、地震応答解析と熱伝導解析を組み合わせるには相当の困難が予想される。そこで、本調査においては、実験結果として得られた減衰力変動を、グロスで単位体積エネルギーの関数として表現することを原則とする。なお、既往評価式では単位体積エネルギーには粘性吸収エネルギーEv のみが評価されているが、ここでは簡便さを考慮して全吸収エネルギーEd を用いて、Ed/Vv を単位体積エネルギーと呼ぶ。また、必要に応じ、単位体積エネルギーの時間勾配$\Delta Ed/Vv$ を評価関数として導入する。粘性ダンパーは、そのタイプによって性状が異なるため、②~④では、試験体毎に個別に評価式を示す。

②RDT8 試験体

図 3.3.6-15 に実験結果で得られた減衰力 Q (0 変位切片荷重)と初期条件の減衰力基準値 Q_0 の差分を、水準毎に単位体積エネルギーEd/Vv との相関で示す。減衰力基準値 Q_0 は表 3.3.6-4 に示すとおりである。ここで、実験中に減衰力の上昇が見られた水準 0 の 3 セット目、水準 1 の 2 セット目後半と 3 セット目は評価対象から省いた。

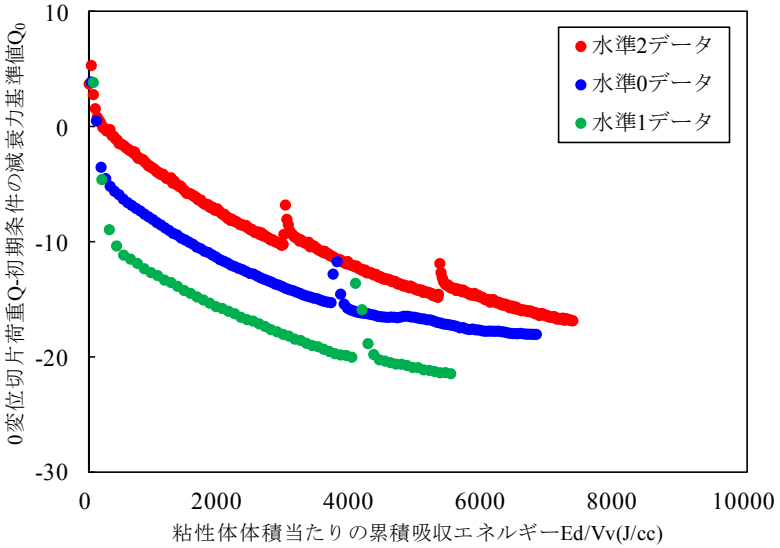


図 3.3.6-15　RDT8 試験体　減衰力低下量と単位体積エネルギーとの相関

表 3.3.6-4 RDT8 試験体　減衰力基準値 Q_0

水準	初期温度	速度	初期温度時の減衰力基準値
	℃	cm/s	kN
0	13.5	31.4	50.9
1	13.3	47.1	58.9
2	12.6	15.7	38.5

セット間のインターバル直後の数サイクルを除いて、各水準についてほぼ連続的な変化が生じていると解釈できる。実験条件のように 10 分程度のインターバルで長周期地震動が連続することを評価対象とすることは原則としてあり得ず、また、仮にあり得たとしても減衰力評価においては安全側の評価となることから、この部分的な不連続は評価式策定の対象から省き、一連の連続関数として評価する。

次に、3 水準の減衰力変動の差が、温度上昇の程度など吸収エネルギーの時間勾配に支配される要因に基づくと考えると、各水準の差は粘性体体積当たりの吸収エネルギーの時間勾配 $\Delta E_d / V_v$ の項が評価式に必要となる。

また、E_d / V_v が 200(J/cc)までと 300(J/cc)以降では、減衰力変動の傾向が大きく異なる。そのため、全区間で分割することは近似の精度が落ちると考え、区間を分割して近似することとする。

$Q-Q_0$ を E_d / V_v、$\Delta E_d / V_v$ の関数で近似して評価すると式(3.3.6-10)で表わされる。式(3.3.6-10)の係数については、表 3.3.6-5 に示すとおりである。なお、200(J/cc)と 300(J/cc)の間については、両側の近似式から得られる値の平均値となるように評価している($(Q - Q_0)_2$ の式)。また、図 3.3.6-16 に、評価式と実験値の関係を示す。

なお、動的解析における減衰力基準値は、式(3.3.6-8)で繰り返し依存係数 α を 1.0 とした場合の軸減衰力を時々刻々与える。

$$(Q-Q_0)_i = a + b\cdot\left(E_d / V_v\right) + c\cdot\left(\Delta E_d / V_v\right) + d\cdot\left(\Delta E_d / V_v\right)^2 + e\cdot\left(E_d / V_v\right)^{0.5}\cdot\left(\Delta E_d / V_v\right)^{0.5}$$

$$(Q-Q_0)_2 = \left\{\left(E_d / V_v - 200\right)\times(Q-Q_0)_3 + \left(300 - E_d / V_v\right)\times(Q-Q_0)_1\right\}/100$$

$$(200 < \left(E_d / V_v\right) < 300) \qquad (3.3.6\text{-}10)$$

表 3.3.6-5 式(3.3.6-10)の係数について

	a	*b*	*c*	*d*	*e*	備考
i=1	2.30	0.0769	2.23	-0.0350	-0.834	$E_d/V_v \leqq 200$
i=3	1.22	-0.00262	-0.224	-0.00508	-0.0121	$E_d/V_v \geqq 300$

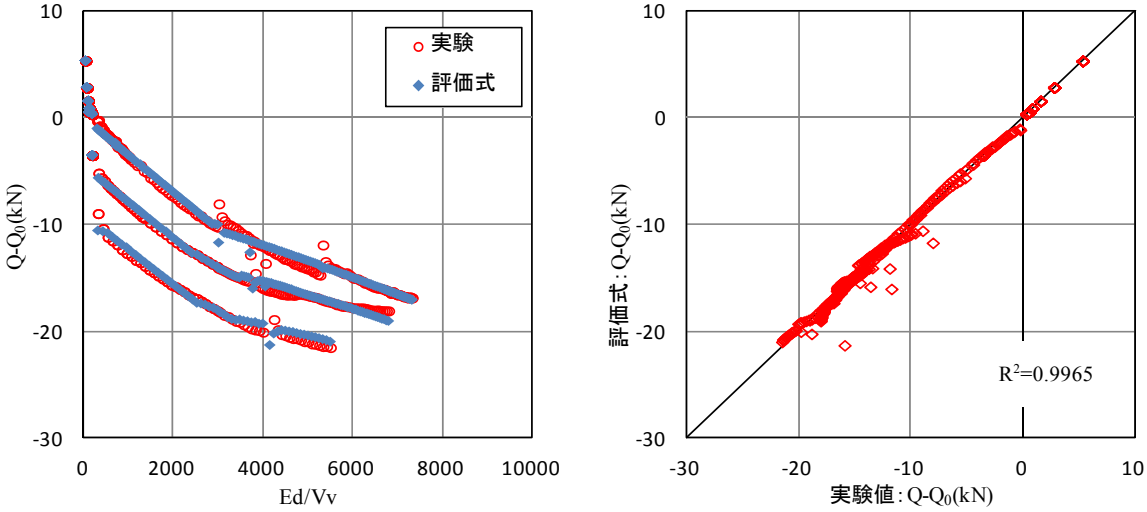


図 3.3.6-16　RDT8 試験体の評価式による Q-Q_0 と実験値の関係

③RDT16 試験体

図 3.3.6-17 に実験結果で得られた減衰力 Q(0 変位切片荷重)と初期条件の減衰力の基準値 Q_0 の差分を、水準毎に単位体積エネルギーEd/Vv との相関で示す。RDT16 試験体の減衰力の基準値 Q_0 は表 3.3.6-6 に示すとおりである。各水準とも全セットを評価対象とした。

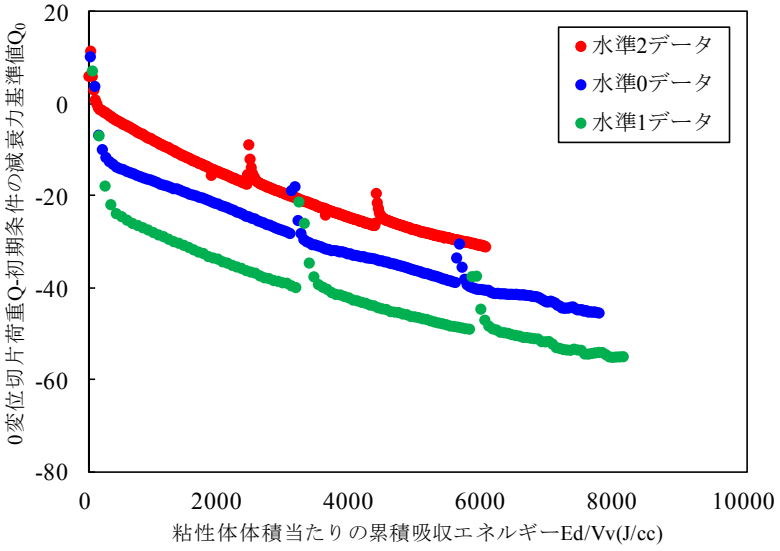


図 3.3.6-17　RDT16 試験体　減衰力低下量と単位体積エネルギーとの相関

表 3.3.6-6　RDT16 試験体　減衰力基準値 Q_0

水準	初期温度	速度	初期温度時の減衰力基準値
	℃	cm/s	kN
0	12.7	31.4	100.0
1	15.7	47.1	113.6
2	13.1	15.7	73.6

RDT8 試験体と同様に、3 水準の試験結果から $Q-Q_0$ を Ed/Vv、$\Delta Ed/Vv$ の関数で近似して評価する。RDT16 試験体の場合、区間分割の閾値は 150(J/cc)と 200(J/cc)としている。式(3.3.6-11)に RDT16 試験体の評価式を示す。式(3.3.6-11)の係数は表 3.3.6-7 に示すとおりである。また、図 3.3.6-18 に評価式と実験値の関係を示す。

$$(Q-Q_0)_i = a + b\cdot(E_d/V_v) + c\cdot(\Delta E_d/V_v) + d\cdot(\Delta E_d/V_v)^2 + e\cdot(E_d/V_v)^{0.5}\cdot(\Delta E_d/V_v)^{0.5}$$

$$(Q-Q_0)_2 = \{(E_d/V_v - 150)\times(Q-Q_0)_3 + (200-E_d/V_v)\times(Q-Q_0)_1\}/50$$

$$(150 < (E_d/V_v) < 200)$$

(3.3.6-11)

表 3.3.6-7　式(3.3.6-11)の係数について

	a	*b*	*c*	*d*	*e*	備考
i=1	6.99	0.178	5.44	-0.0877	-2.16	$Ed/Vv \leqq 150$
i=3	0.134	-0.00345	0.395	-0.0572	-0.0914	$Ed/Vv \geqq 200$

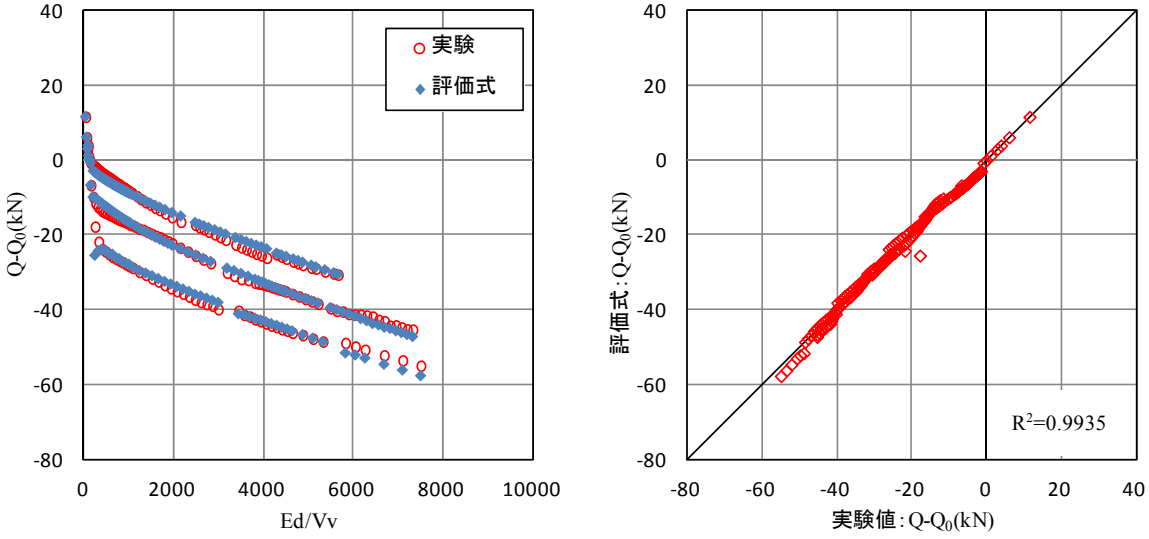


図 3.3.6-18 RDT16 試験体の評価式による Q-Q_0 と実験値の関係

④RDT30 試験体

図 3.3.6-19 に実験結果で得られた減衰力 Q(0 変位切片荷重)と初期条件の減衰力基準値 Q_0 の差分を、水準毎に単位体積エネルギーEd/Vv との相関で示す。減衰力基準値 Q_0 は表 3.3.6-8 に示すとおりである。水準 0 の 3 セット目後半、水準 1 の 2 セット目後半と 3 セット目は評価対象から省いた。

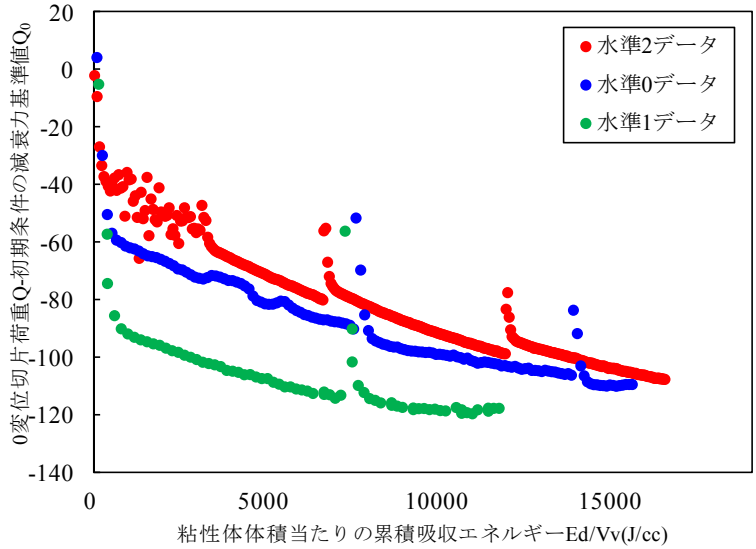


図 3.3.6-19 RDT30 試験体　減衰力低下量と単位体積エネルギーとの相関

表 3.3.6-8　RDT30 試験体　減衰力基準値 Q

水準	初期温度	速度	初期温度時の減衰力基準値
	℃	cm/s	kN
0	13.1	31.4	233.8
1	10.6	47.1	255.0
2	12.2	15.7	201.7

他の試験体と同様に、3 水準の試験結果から $Q-Q_0$ を Ed/Vv、$\Delta Ed/Vv$ の関数で近似して評価する。RDT30 試験体の場合、区間分割の閾値は 600(J/cc)と 1000(J/cc)としている。式(3.3.6-12)に RDT30 試験体の評価式を示す。式(3.3.6-12)の係数は表 3.3.6-9 に示すとおりである。また、図 3.3.6-1520 に評価式と実験値の関係を示す。

$$(Q-Q_0)_i = a + b\cdot(E_d/V_v) + c\cdot(\Delta E_d/V_v) + d\cdot(\Delta E_d/V_v)^2 + e\cdot(E_d/V_v)^{0.5}\cdot(\Delta E_d/V_v)^{0.5}$$

$$(Q-Q_0)_2 = \{(E_d/V_v-600)\times(Q-Q_0)_3 + (1000-E_d/V_v)\times(Q-Q_0)_1\}/400$$
$$(600<(E_d/V_v)<1000)$$

(3.3.6-12)

表 3.3.6-9 式(3.3.6-12)の係数について

	a	*b*	*c*	*d*	*e*	備考
i=1	-25.5	0.0762	3.60	-0.0288	-1.15	E_d/V_v≦600
i=3	-68.2	-0.00186	2.81	-0.0630	-0.0758	E_d/V_v≧1000

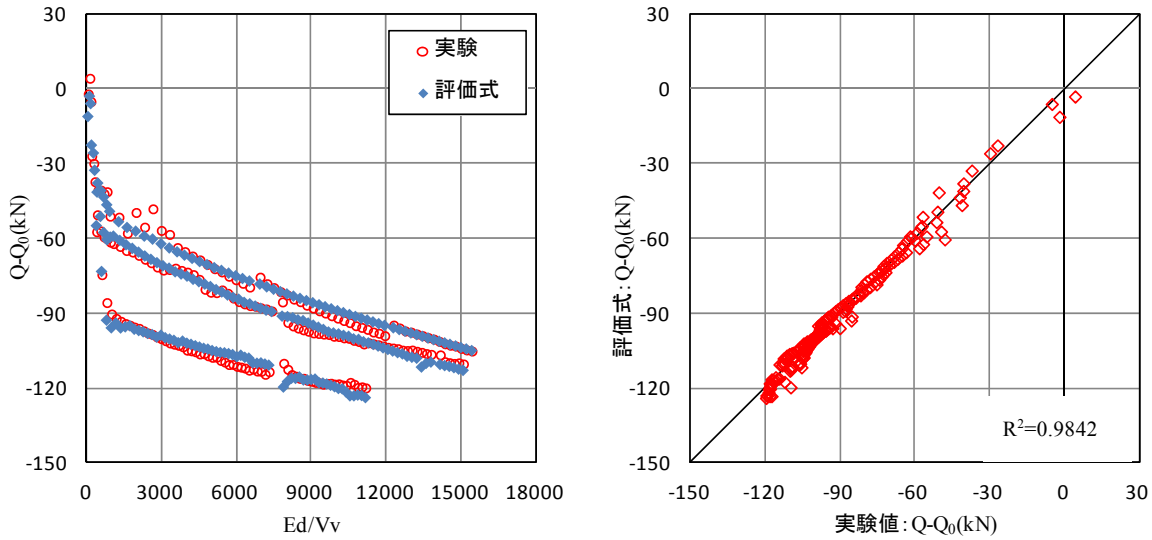


図 3.3.6-150 RDT30 試験体の評価式による $Q-Q_0$ と実験値の関係

式(3.3.6-10)、(3.3.6-11)、(3.3.6-12)は、当該試験体に関する評価式である。調査対象とならなかった製品についても同形式の実験式を求めることができると考えられるが、その係数は当該製品における粘性体の熱容量、粘性体に接する鉄部の有効体積などの構成に依存するものと考えられる。

c) 部材試験結果と解析の比較

解析の対象とする部材試験は、各部材に実施された多数回繰り返し試験とする。各試験体に対して 3 セットの加振が実施されているが、セットによる差異は小さいことから 1 セット目を比較対象としている。

解析は部材試験結果を反映させた本節提案の評価手法に加え、繰り返し依存性非考慮による解析を実施し比較を行う。表 3.3.6-30~表 3.3.6-52 に主要応答値を示し、図 3.3.6-161~図 3.3.6-29 に各解析の応答を実験結果と比較して示す。なお、図中では試験結果を OBS、解析結果を ANA としている。

全体として、すべり支承同様、本節提案の評価式による解析結果は吸収エネルギーおよび切片荷重ともに部材試験の結果を良好に再現できていると言える。

一方、繰り返し依存性を考慮しない場合、試験開始時の抵抗力を除き、解析値が実験値を大きく上回る結果となり、その差異は特に RDT30 試験体で大きい。

表 3.3.6-30　RDT8 の主要応答結果比較

RDT8	累積吸収エネルギー (J)			63 サイクル時の切片荷重 (kN)		
	実験	繰り返し考慮	繰り返し非考慮	実験	繰り返し考慮	繰り返し非考慮
水準 0	1.734E6	1.844E6 (1.06)	2.380E6 (1.37)	35.78	36.56 (1.02)	52.67 (1.47)
水準 1	1.914E6	1.998E6 (1.04)	2.801E6 (1.46)	38.68	38.97 (1.01)	60.46 (1.56)
水準 2	1.378E6	1.436E6 (1.04)	1.715E6 (1.24)	28.63	29.77 (1.04)	39.73 (1.39)

※( )内の数値は実験値との比率を示す

表 3.3.6-4　RDT16 の主要応答結果比較

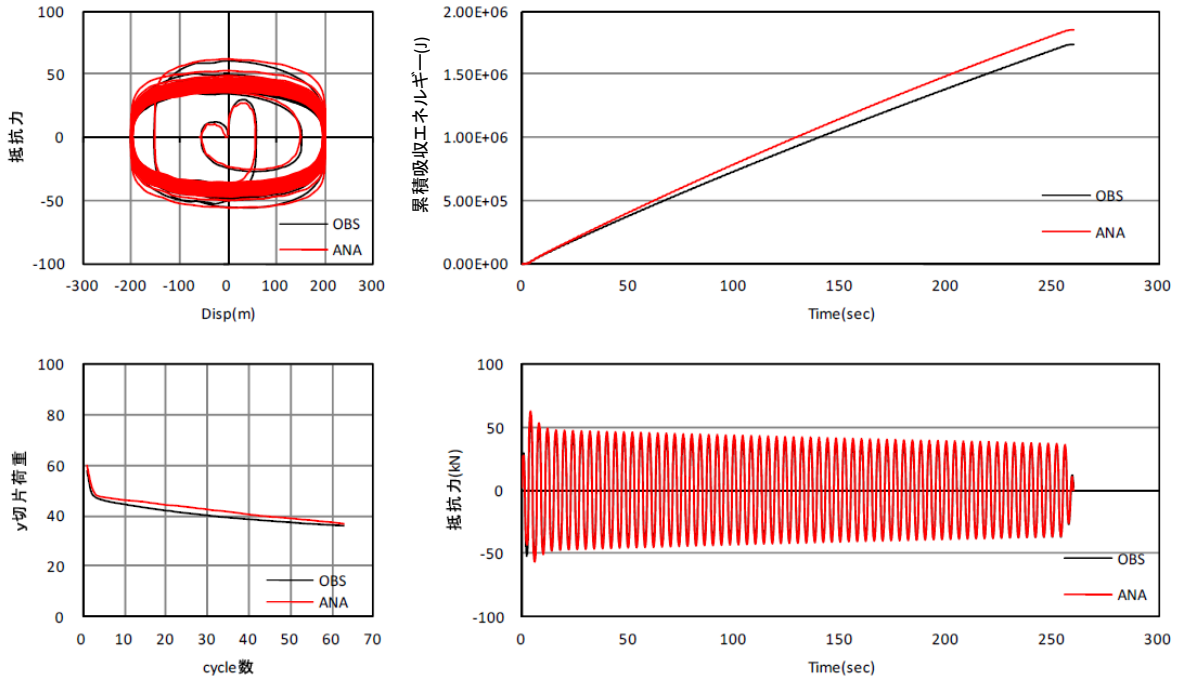
RDT16	累積吸収エネルギー (J)			42 サイクル時の切片荷重 (kN)		
	実験	繰り返し考慮	繰り返し非考慮	実験	繰り返し考慮	繰り返し非考慮
水準 0	3.440E6	3.331E6 (0.97)	4.549E6 (1.32)	71.67	67.20 (0.94)	101.3 (1.41)
水準 1	3.572E6	3.545E6 (0.99)	5.395E6 (1.51)	73.37	70.76 (0.96)	117.3 (1.60)
水準 2	2.680E6	2.589E6 (0.97)	3.222E6 (1.20)	56.19	55.30 (0.98)	75.25 (1.34)

※( )内の数値は実験値との比率を示す

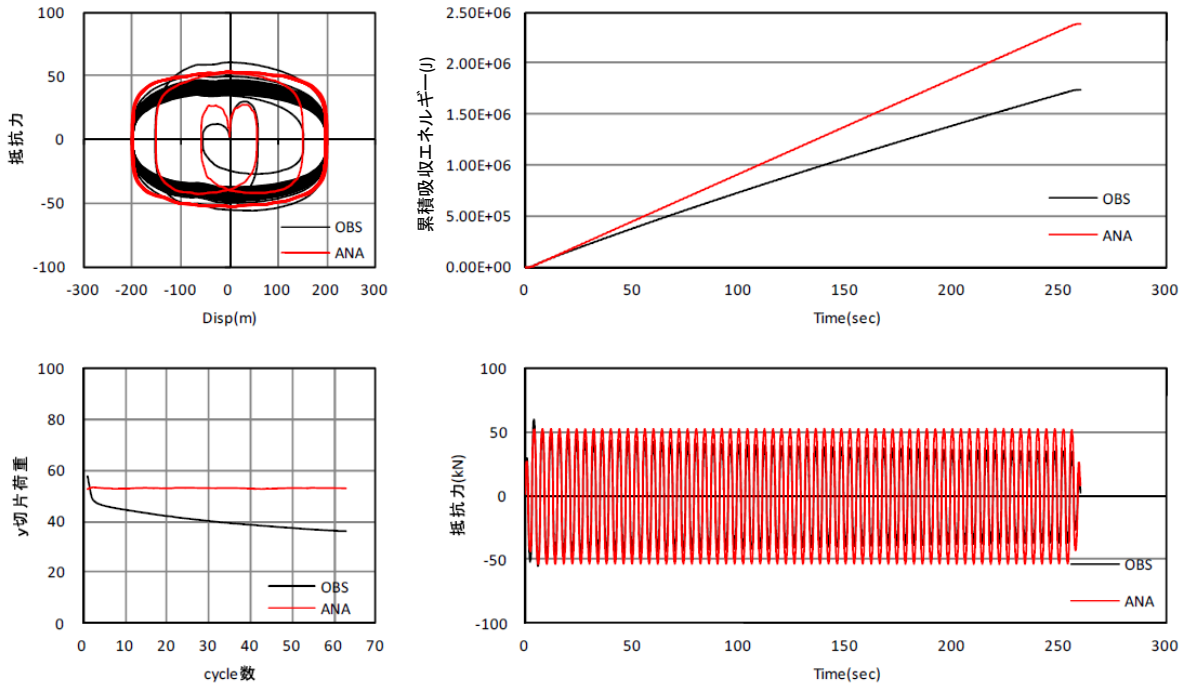
表 3.3.6-52　RDT30 の主要応答結果比較

RDT30	累積吸収エネルギー (J)			125 サイクル時の切片荷重 (kN)		
	実験	繰り返し考慮	繰り返し非考慮	実験	繰り返し考慮	繰り返し非考慮
水準 0	7.010E6	7.444E6 (1.06)	1.111E7 (1.58)	143.2	144.9 (1.01)	234.5 (1.64)
水準 1	6.878E6	7.137E6 (1.04)	1.220E7 (1.77)	143.2	140.8 (0.98)	255.3 (1.78)
水準 2	6.113E6	6.035E6 (0.99)	9.131E6 (1.49)	122.3	124.0 (1.01)	200.9 (1.64)

※( )内の数値は実験値との比率を示す

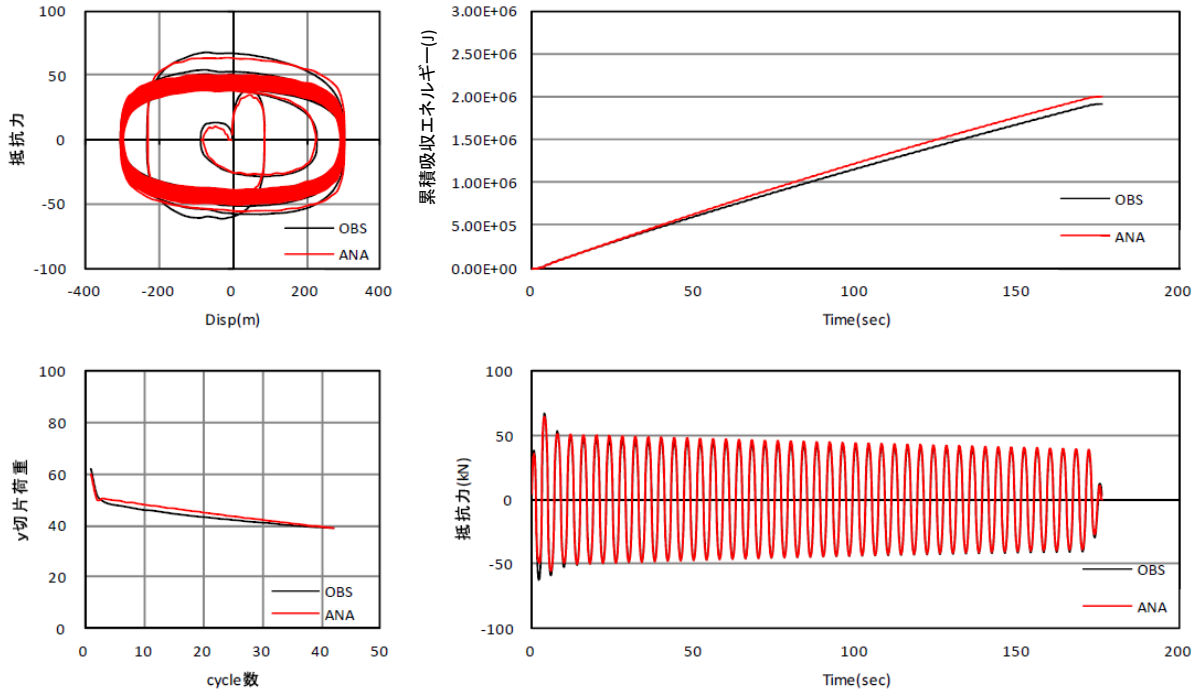


(a) 繰り返し依存性考慮

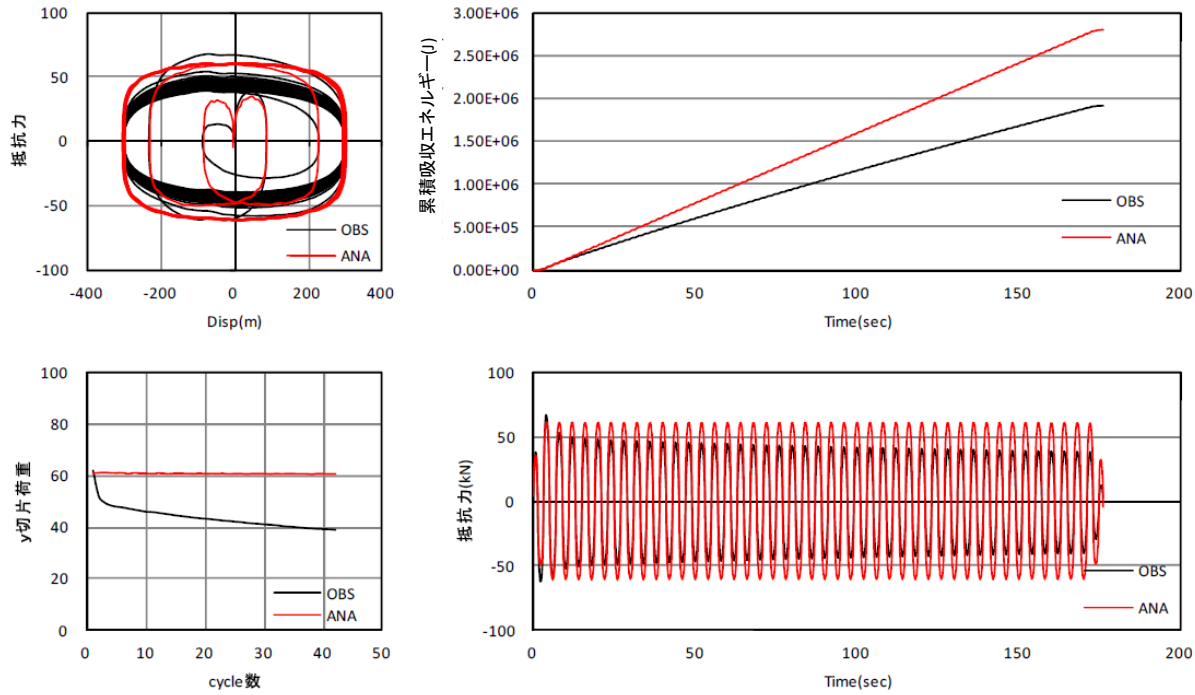


(b) 繰り返し依存性非考慮

図 3.3.6-161　RDT8 試験体　水準 0　実験結果と解析結果の比較

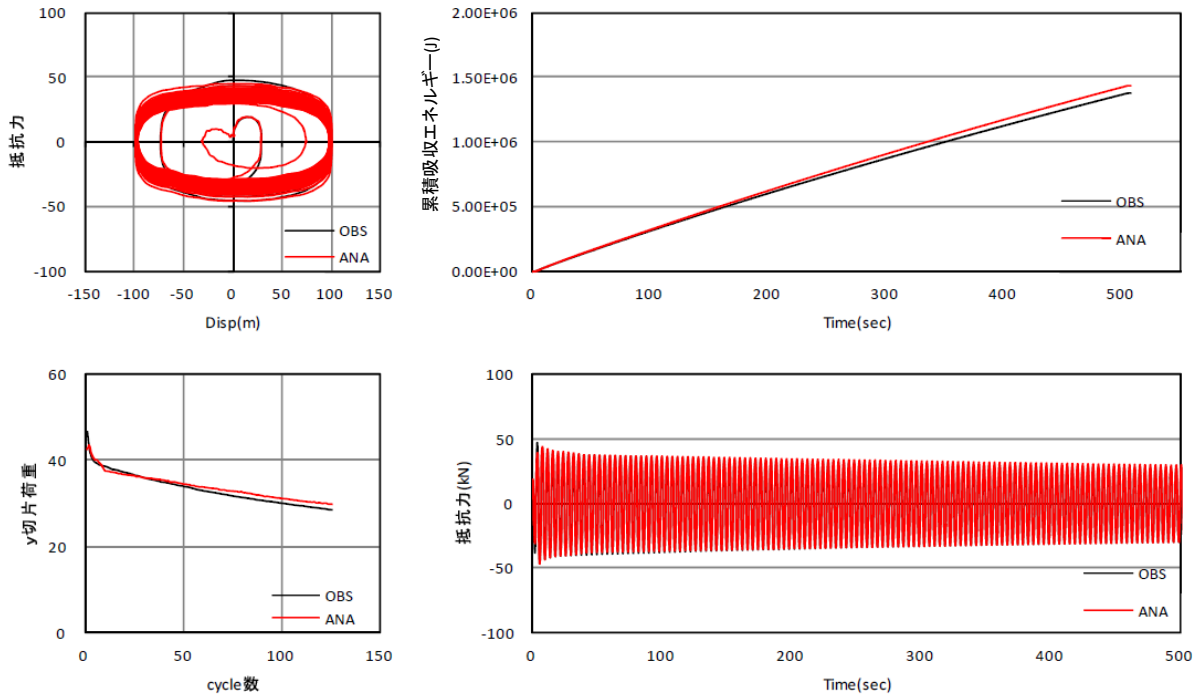


(a) 繰り返し依存性考慮

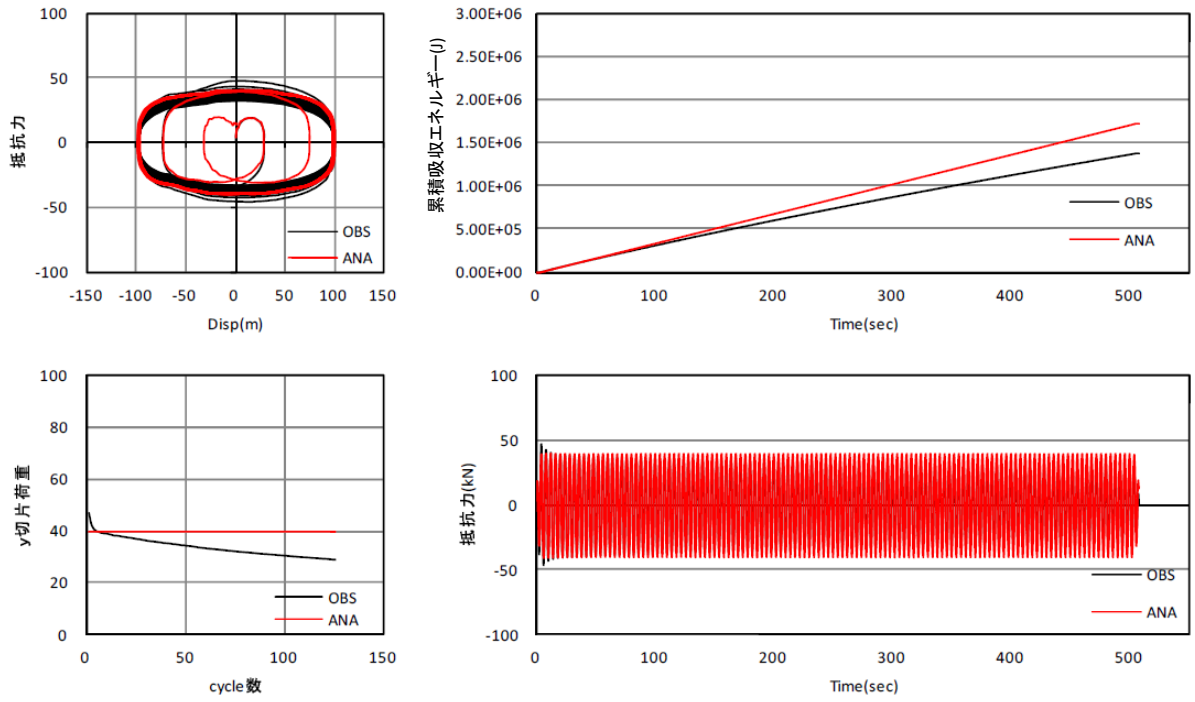


(b) 繰り返し依存性非考慮

図 3.3.6-22　RDT8 試験体　水準 1　実験結果と解析結果の比較

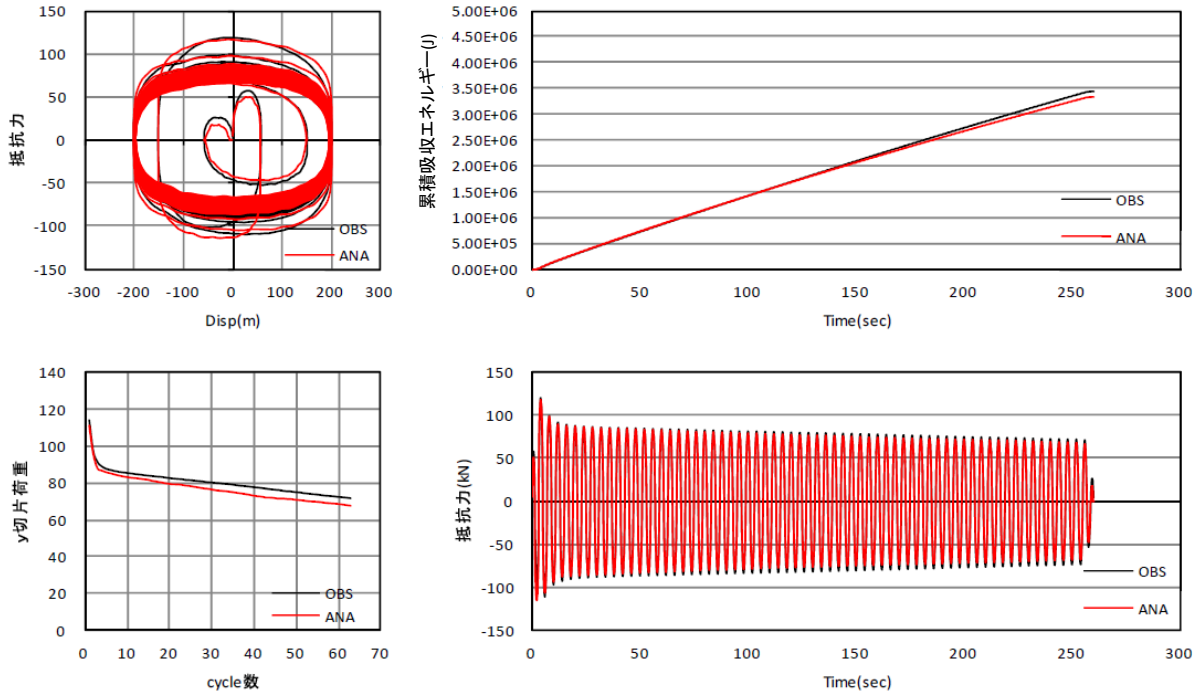


(a) 繰り返し依存性考慮

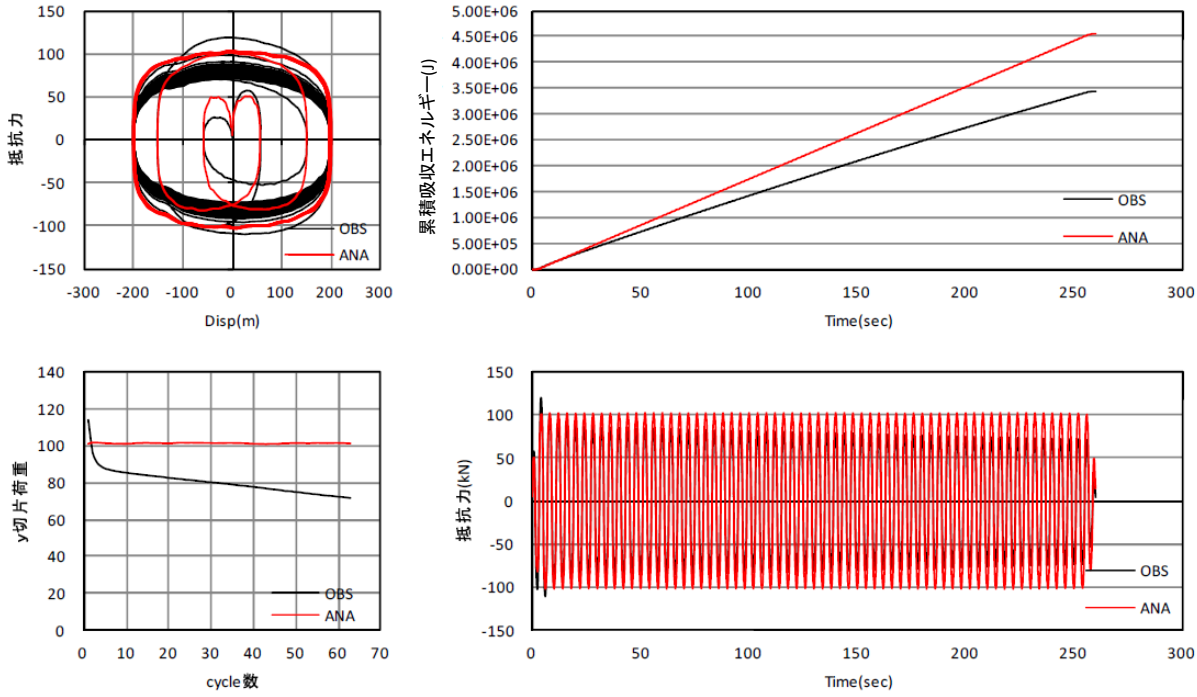


(b) 繰り返し依存性非考慮

図 3.3.6-23　RDT8 試験体　水準 2　実験結果と解析結果の比較

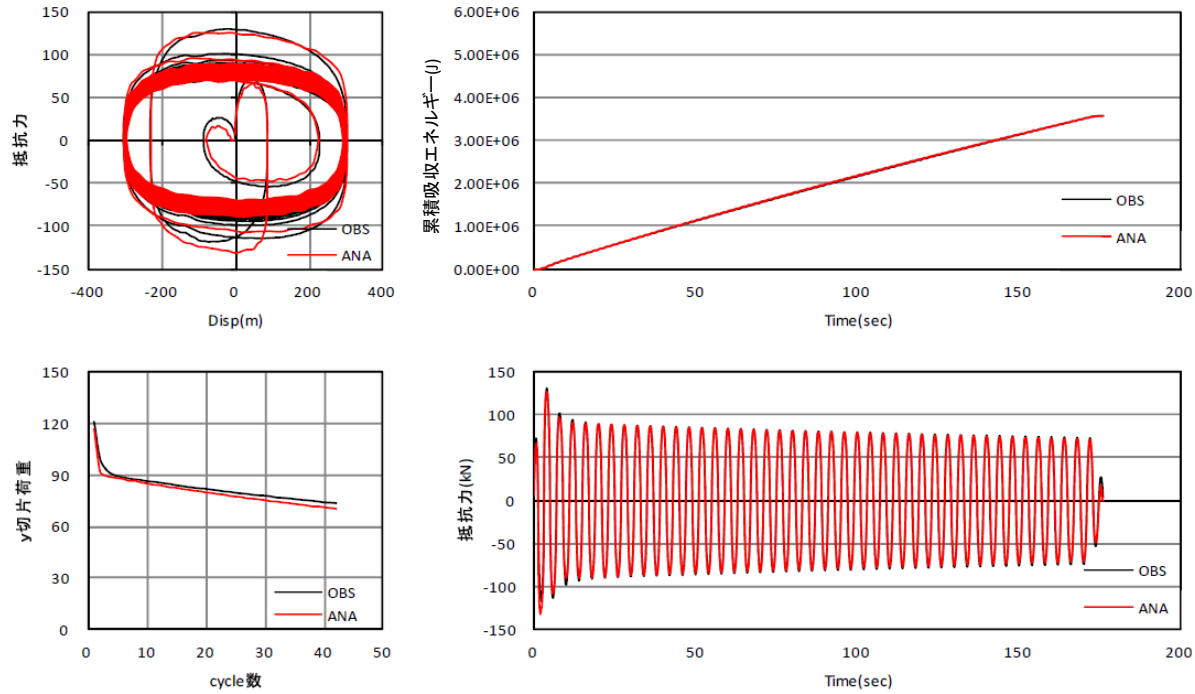


(a) 繰り返し依存性考慮

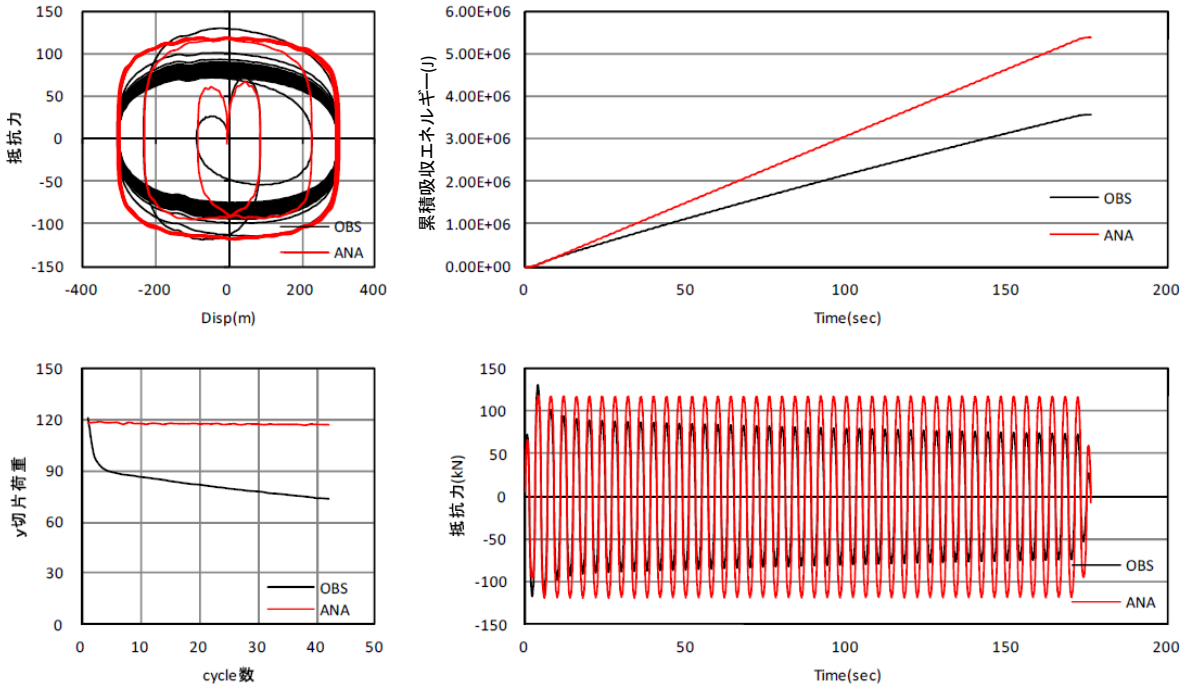


(b) 繰り返し依存性非考慮

図 3.3.6-24　RDT16 試験体　水準 0　実験結果と解析結果の比較

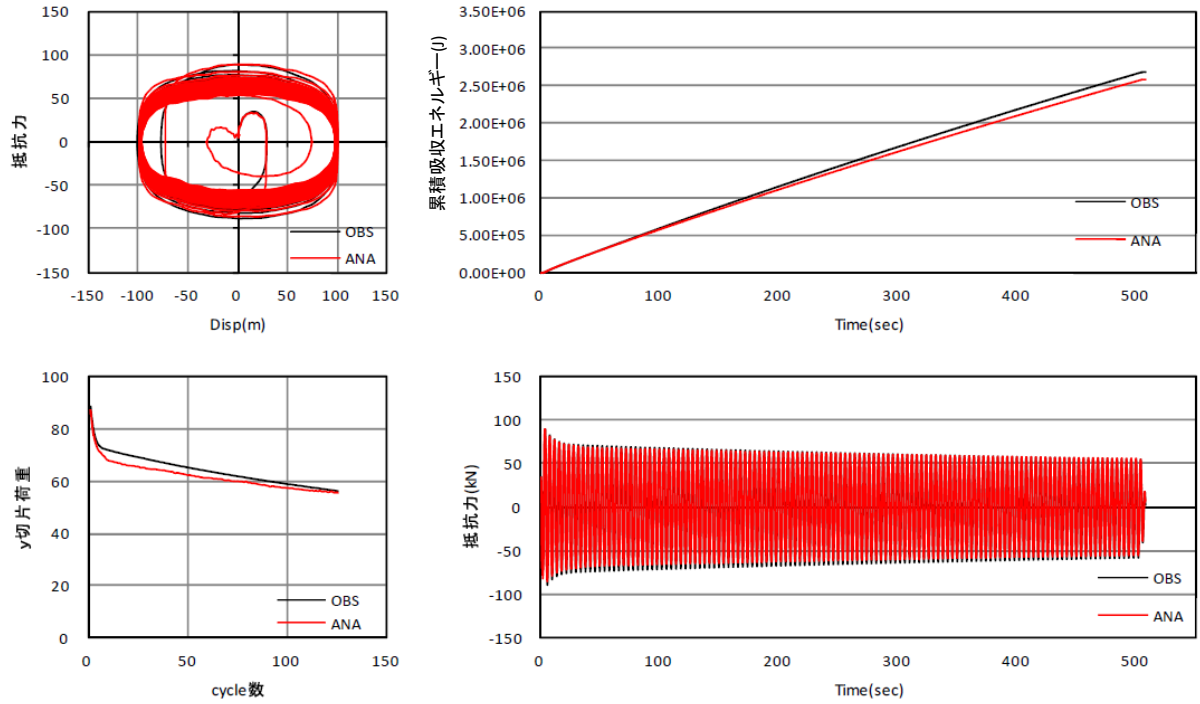


(a) 繰り返し依存性考慮

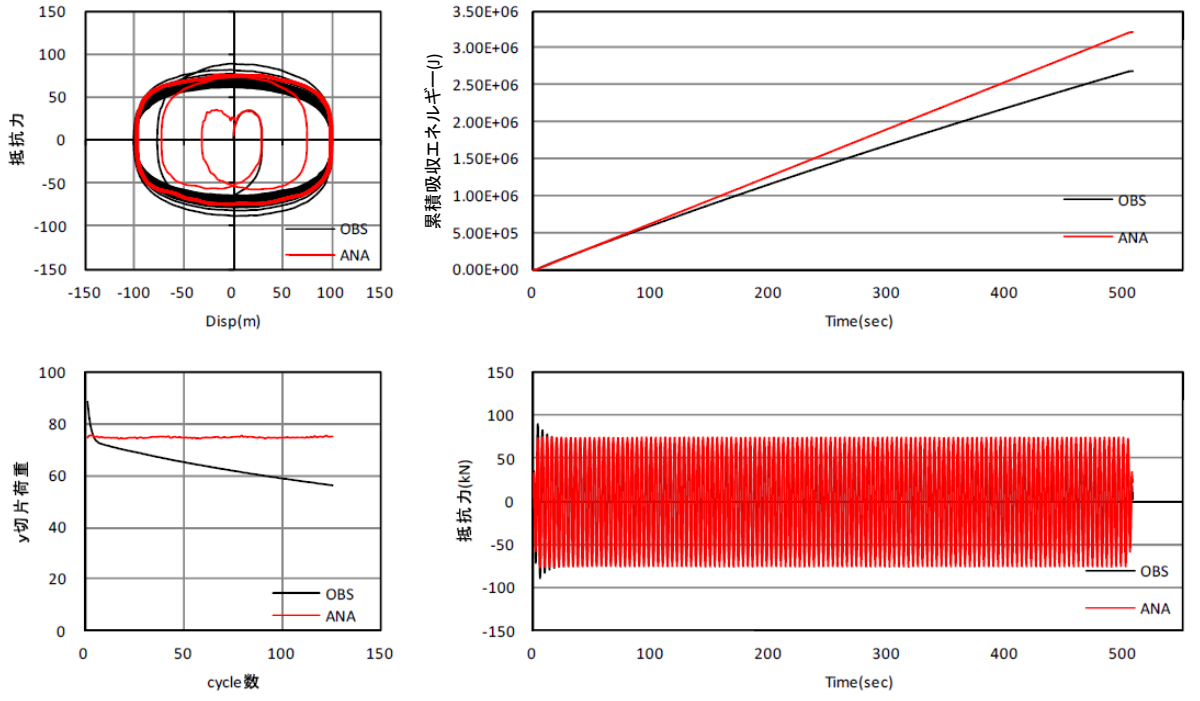


(b) 繰り返し依存性非考慮

図 3.3.6-25　RDT16 試験体　水準 1　実験結果と解析結果の比較

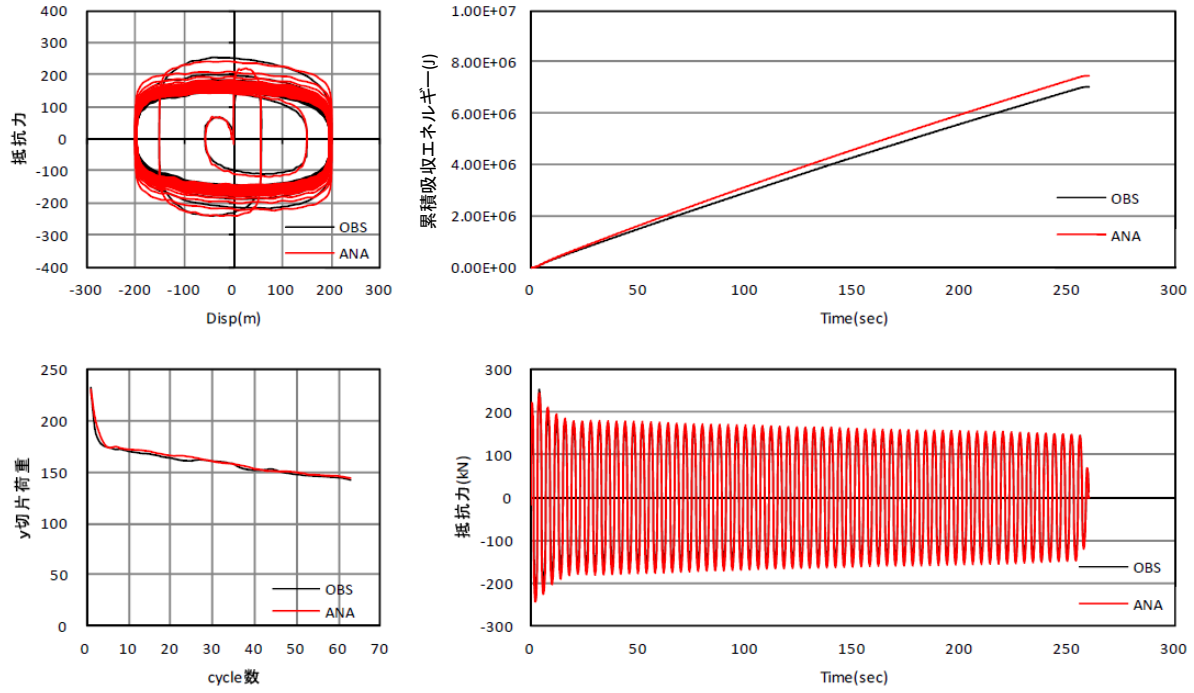


(a) 繰り返し依存性考慮

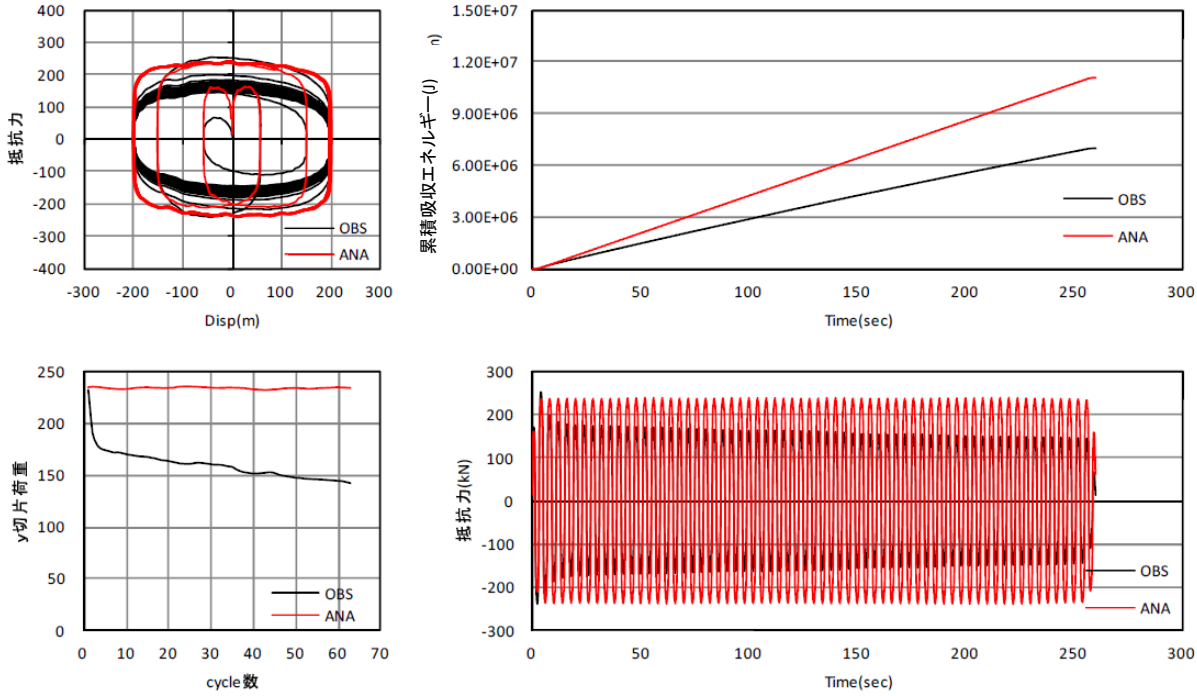


(b) 繰り返し依存性非考慮

図 3.3.6-26　RDT16 試験体　水準 2　実験結果と解析結果の比較

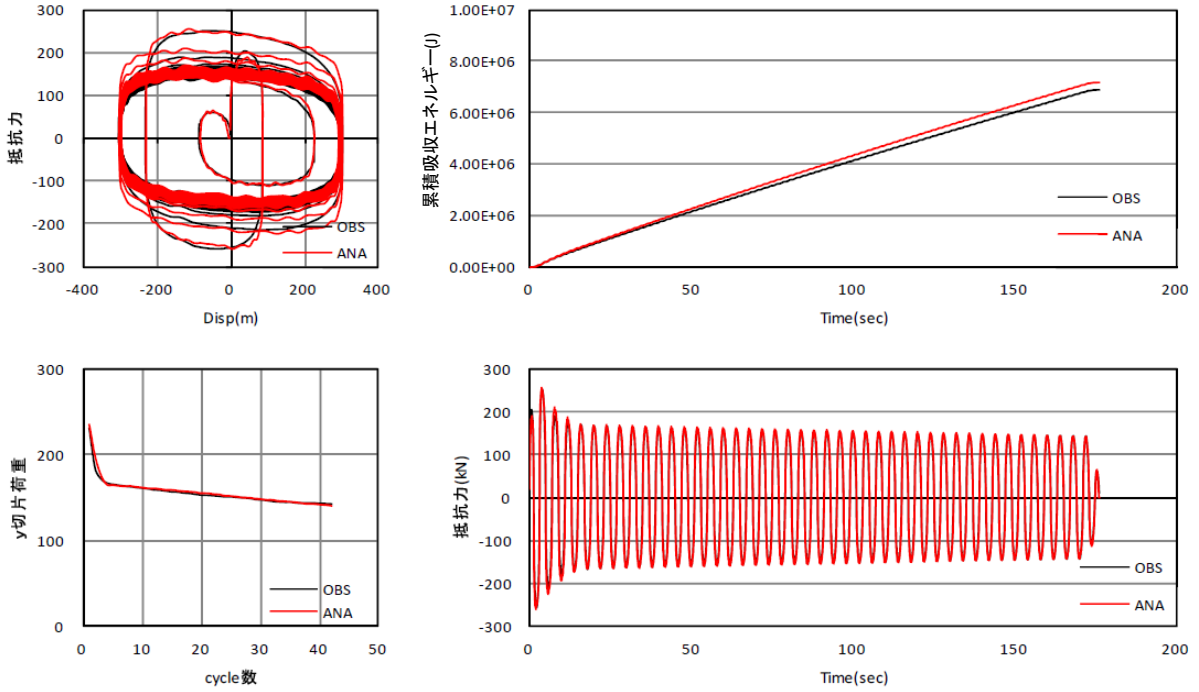


(a) 繰り返し依存性考慮

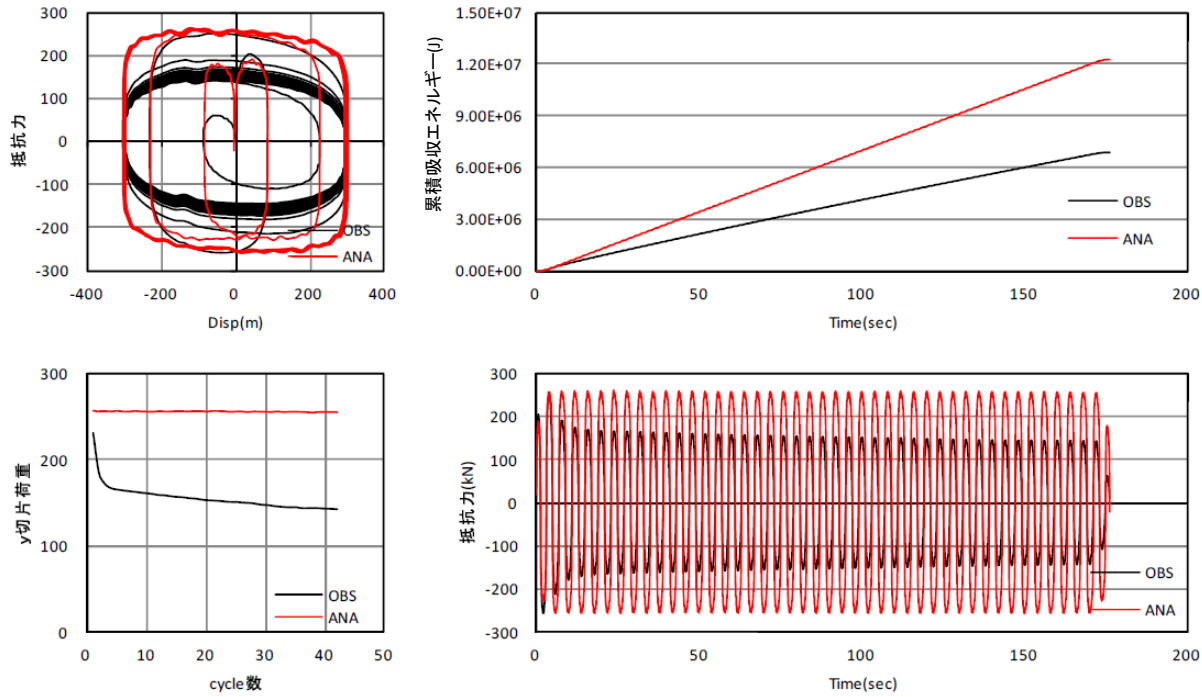


(b) 繰り返し依存性非考慮

図 3.3.6-27　RDT30 試験体　水準 0　実験結果と解析結果の比較

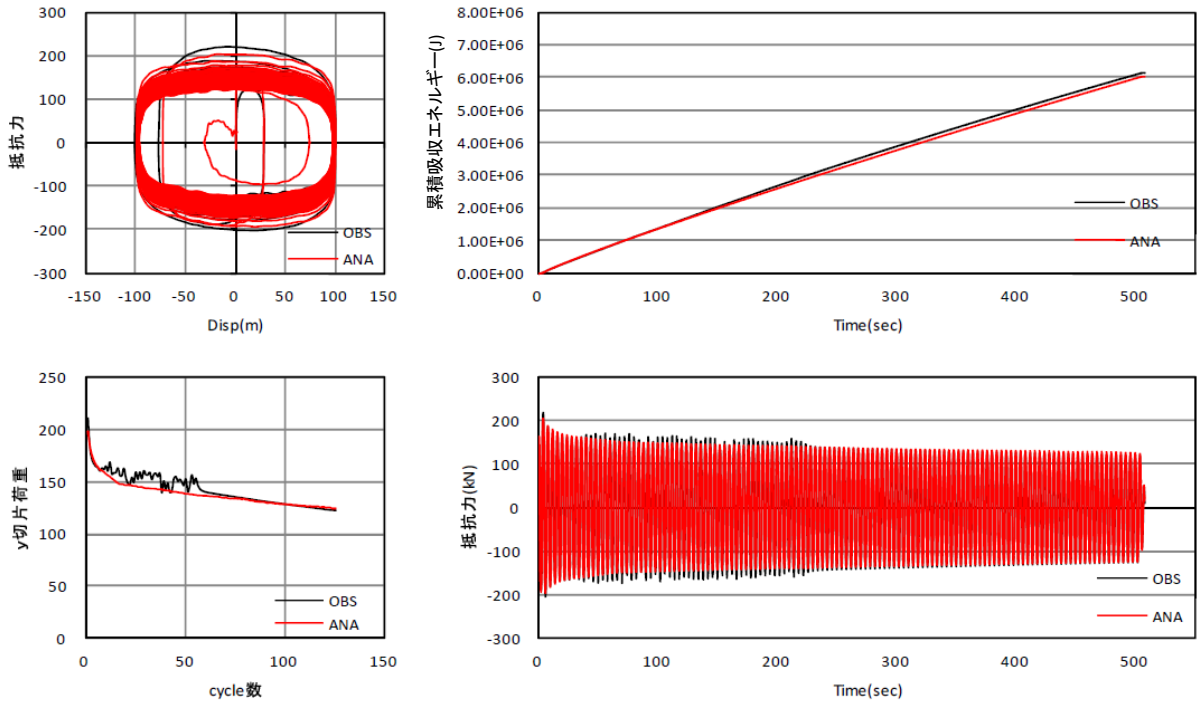


(a) 繰り返し依存性考慮

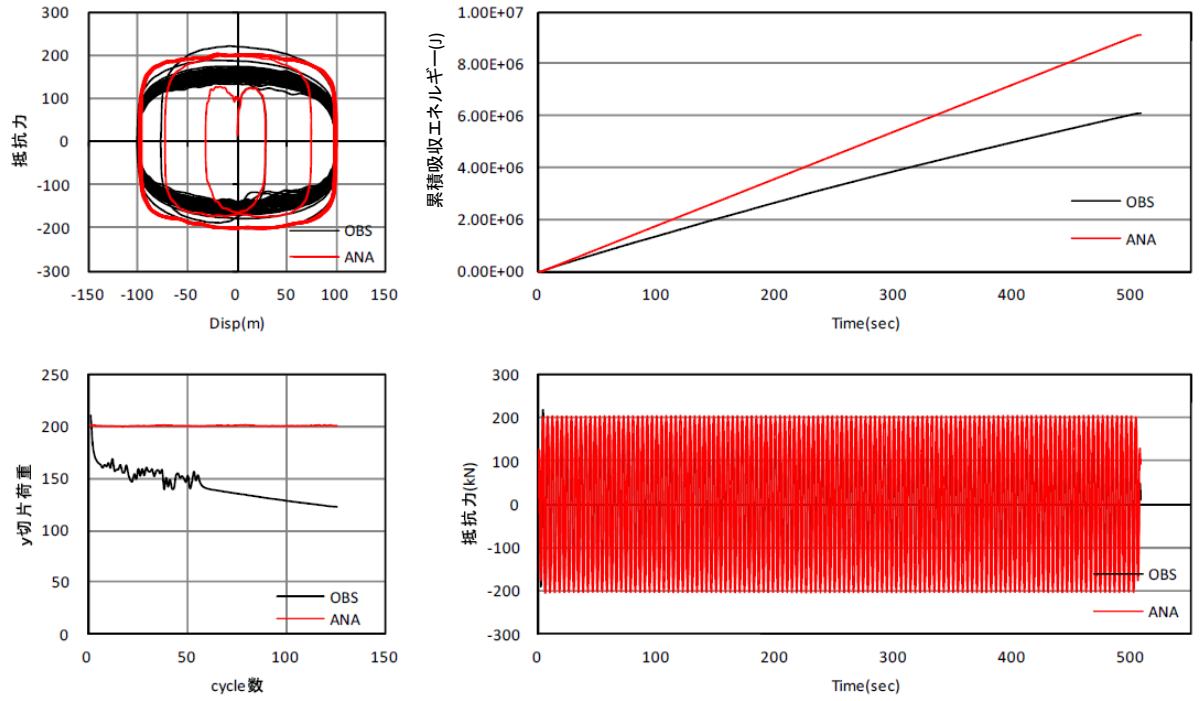


(b) 繰り返し依存性非考慮

図 3.3.6-28　RDT30 試験体　水準 1　実験結果と解析結果の比較



(a) 繰り返し依存性考慮



(b) 繰り返し依存性非考慮

図 3.3.6-29 RDT30 試験体　水準 2　実験結果と解析結果の比較

(2) 解析条件

想定する建物は 30m×30m の平面形状を持つ RC 造の 9 層建物とする。建物の総重量は 100,000kN とする。免震周期、ダンパーの諸条件は以下の通りとした。

・建物の免震周期は 4 秒程度
・免震層の最大応答変位は 250mm 程度
・ダンパーの負担層せん断力係数は 3.0%~3.5%程度

免震部材の配置状況を図 3.3.6-45 に示す。配置する免震部材は天然ゴム系積層ゴム、弾性すべり支承(低摩擦)および粘性ダンパーとする。解析では建物を 1 質点剛体でモデル化し、水平 1 方向入力とする。そのため粘性ダンパーについては加振方向に平行に配置された 4 基をモデル化する(図 3.3.6-46)。

なお、地震応答解析でモデル化する粘性ダンパーは、RDT100 を想定しており、装置の能力は RDT100 をモデル化するが、繰り返し依存特性については RDT30 の結果を準用する。その他、建物モデルの詳細については、第Ⅲ部 2.3.7 と同様とする。

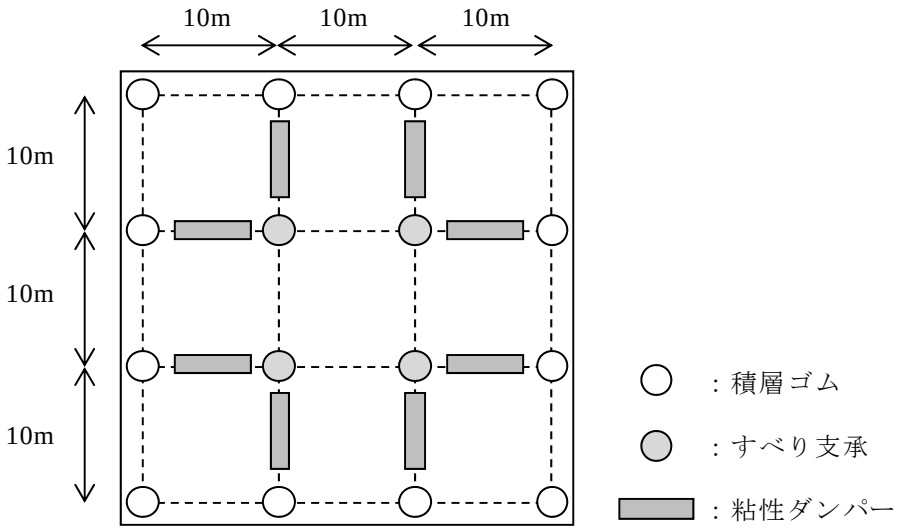


図 3.3.6-45 想定する建物モデルの平面形状

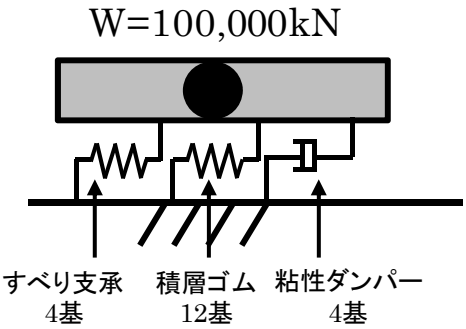


図 3.3.6-46 解析モデル(1 質点系剛体モデル・1 方向入力)

(3) 解析結果

前述の解析モデルに対して、長周期地震動 4 波による地震応答解析を実施する。解析では入力地震動を 1.25 倍、1.5 倍に係数倍した場合の解析についても実施している。

比較する応答結果は免震層の最大応答変形および加速度、せん断力係数 *Ci*、累積変形量、等価エネルギー速度 V_E、免震部材の荷重変形関係および累積値の時刻歴とする。

表 3.3.6-21~ 表 3.3.6-24 に免震層の主要応答の一覧を示す。図 3.3.6-59 ~図 3.3.6-62 に各免震部材の荷重変形関係を、図 3.3.6-47 ~図 3.3.6-58 には、累積変位および免震部材の累積エネルギーの時刻歴を示す。なお、荷重変形関係の縦軸については、部材ごとに合計したものとする。

表 3.3.6-21~ 表 3.3.6-24 より、繰り返し依存性を考慮した本節の評価モデルと繰り返し非考慮の既往評価モデルの差異は概ね 0～30%程度の範囲で、繰り返し依存性を考慮した評価モデルの応答値が大きくなる傾向があった。ただし、AIC003 の応答変位（最大で 53%）のほか、入力が小さい KGIN 波の 1 倍入力の累積変位量（-33%）など一部で傾向が異なった。なお、KGIN 波では、両モデルによる差異が比較的小さい結果となっている。

両モデルの吸収エネルギー量の差異は、概ね最大変位および加速度を示した時刻(OSKH02 では 142 秒付近、AIC003 では 181 秒付近、SZO024 では 145 秒および 160 秒付近、KGIN では 348 秒付近)以降で生じているが、全体のエネルギー量から見ると変化が小さく、応答にあまり反映されなかったと考えられる。

繰り返しの影響を考慮したモデルによる最大応答変位は、1 倍入力で 21.99cm(OSKH002)、1.25 倍入力で 31.20cm(OSKH002)、1.5 倍入力で 41.06cm(SZO024)であった。また、累積変位では、1 倍入力で 10.32m(SZO024)、1.25 倍入力で 14.53m(OSKH002)、1.5 倍入力で 19.44m(OSKH002)であった。

なお、本応答解析で生じた最大累積変形距離および各免震部材の吸収エネルギーは、すべり支承および粘性ダンパーの部材試験で確認された累積量に対して、適用範囲内であった。

表 3.3.6-21 免震層の応答結果一覧(OSKH02)

入力地震		OSKH02					
		1 倍入力		1.25 倍入力		1.5 倍入力	
繰り返し依存性		考慮	非考慮	考慮	非考慮	考慮	非考慮
最大応答変位 (cm)	値	21.99 (1.23)	17.85	31.20 (1.20)	26.10	39.07 (1.13)	34.69
	発生時刻	142.68	142.64	142.68	142.68	142.72	142.68
最大応答加速度(cm/s^2)	値	72.76 (1.06)	68.61	94.95 (1.05)	90.13	115.31 (1.03)	112.18
	発生時刻	142.48	142.44	142.52	142.48	142.56	142.52
せん断力係数 *Ci*		0.07420 (1.06)	0.06996	0.09683 (1.05)	0.09191	0.11759 (1.03)	0.11439
累積変位量 (m)		10.08 (1.42)	7.10	14.53 (1.38)	10.51	19.44 (1.35)	14.45
等価エネルギー速度 V_E(m/s)		1.918 (1.09)	1.756	2.412 (1.06)	2.278	2.880 (1.03)	2.791

・( )の数値は依存性考慮モデルと依存性非考慮モデルの比率を示す

・累積値については、累積吸収エネルギーが総吸収エネルギーの 95%に達した時の累積変位量とする

表 3.3.6-22 免震層の応答結果一覧(AIC003)

入力地震		AIC003					
		1 倍入力		1.25 倍入力		1.5 倍入力	
繰り返し依存性		考慮	非考慮	考慮	非考慮	考慮	非考慮
最大応答変位 (cm)	値	15.67 (1.53)	10.27	22.96 (1.48)	15.56	32.30 (1.47)	21.97
	発生時刻	181.16	181.16	181.16	181.20	181.16	181.20
最大応答加速度(cm/s^2)	値	54.30 (1.12)	48.63	73.51 (1.17)	62.56	97.32 (1.23)	79.34
	発生時刻	180.92	180.92	181.00	181.00	181.00	181.04
せん断力係数 *Ci*		0.05537 (1.12)	0.04959	0.07496 (1.17)	0.06380	0.09924 (1.23)	0.08090
累積変位量 (m)		8.05 (1.33)	6.04	11.09 (1.31)	8.44	14.57 (1.31)	11.11
等価エネルギー速度 V_E(m/s)		1.699 (1.06)	1.600	2.081 (1.04)	2.000	2.464 (1.03)	2.392

・( )の数値は依存性考慮モデルと依存性非考慮モデルの比率を示す

・累積値については、累積吸収エネルギーが総吸収エネルギーの 95%に達した時の累積変位量とする

表 3.3.6-23 免震層の応答結果一覧(SZO024)

入力地震		SZO024					
		1 倍入力		1.25 倍入力		1.5 倍入力	
繰り返し依存性		考慮	非考慮	考慮	非考慮	考慮	非考慮
最大応答変位 (cm)	値	21.30 (1.25)	17.04	30.94 (1.27)	24.28	41.06 (1.25)	32.73
	発生時刻	160.40	144.88	160.44	144.92	160.44	160.40
最大応答加速度(cm/s^2)	値	68.64 (1.04)	66.17	94.07 (1.10)	85.55	120.04 (1.12)	107.00
	発生時刻	160.20	144.72	160.28	144.80	160.32	160.24
せん断力係数 *Ci*		0.06999 (1.04)	0.06747	0.09593 (1.10)	0.08724	0.12241 (1.12)	0.10911
累積変位量 (m)		10.32 (1.21)	8.56	13.86 (1.17)	11.82	17.59 (1.15)	15.32
等価エネルギー速度 V_E(m/s)		2.084 (0.99)	2.096	2.489 (0.97)	2.572	2.870 (0.95)	3.017

・( )の数値は依存性考慮モデルと依存性非考慮モデルの比率を示す

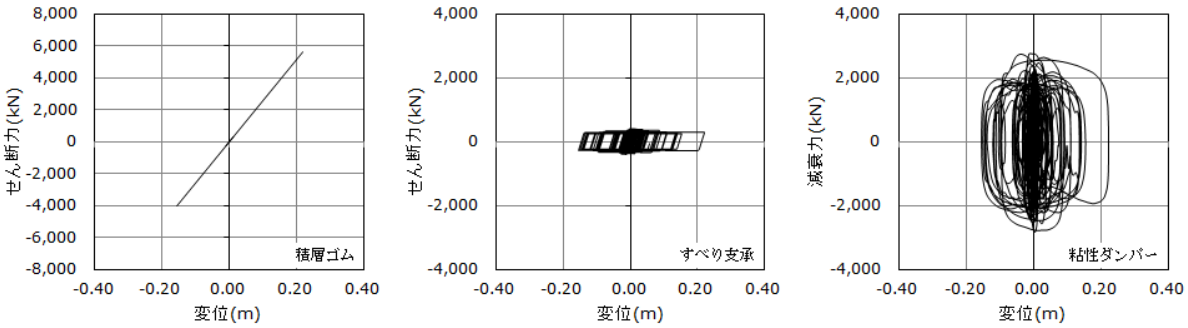
・累積値については、累積吸収エネルギーが総吸収エネルギーの 95%に達した時の累積変位量とする

表 3.3.6-24 免震層の応答結果一覧(KGIN)

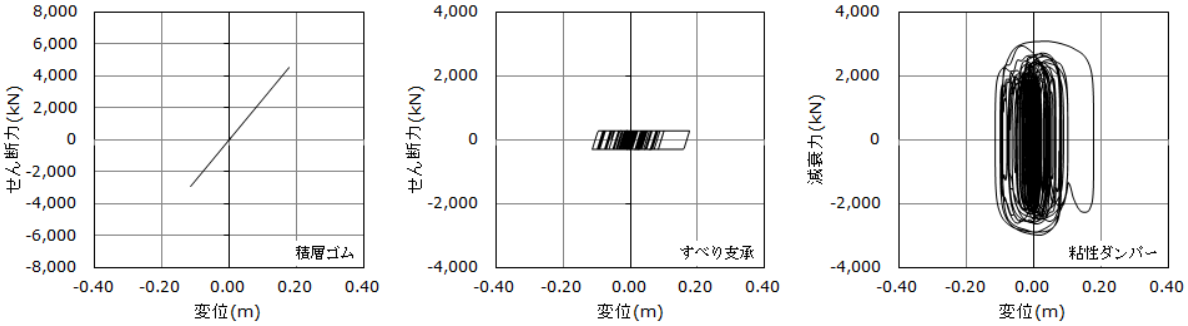
入力地震		KGIN					
		1 倍入力		1.25 倍入力		1.5 倍入力	
繰り返し依存性		考慮	非考慮	考慮	非考慮	考慮	非考慮
最大応答変位 (cm)	値	2.90 (0.82)	3.55	5.98 (1.09)	5.46	10.36 (1.31)	7.91
	発生時刻	349.20	349.20	349.20	349.20	349.04	349.16
最大応答加速度(cm/s^2)	値	23.31 (0.98)	23.79	30.97 (1.01)	30.72	41.11 (1.07)	38.47
	発生時刻	348.52	348.56	348.56	348.56	348.60	348.60
せん断力係数 *Ci*		0.02377 (0.98)	0.02426	0.03158 (1.01)	0.03133	0.04192 (1.07)	0.03923
累積変位量 (m)		1.68 (0.67)	2.49	3.28 (0.96)	3.41	5.58 (1.24)	4.50
等価エネルギー速度 V_E(m/s)		0.571 (0.86)	0.662	0.859 (0.98)	0.873	1.197 (1.08)	1.106

・( )の数値は依存性考慮モデルと依存性非考慮モデルの比率を示す

・累積値については、累積吸収エネルギーが総吸収エネルギーの 95%に達した時の累積変位量とする

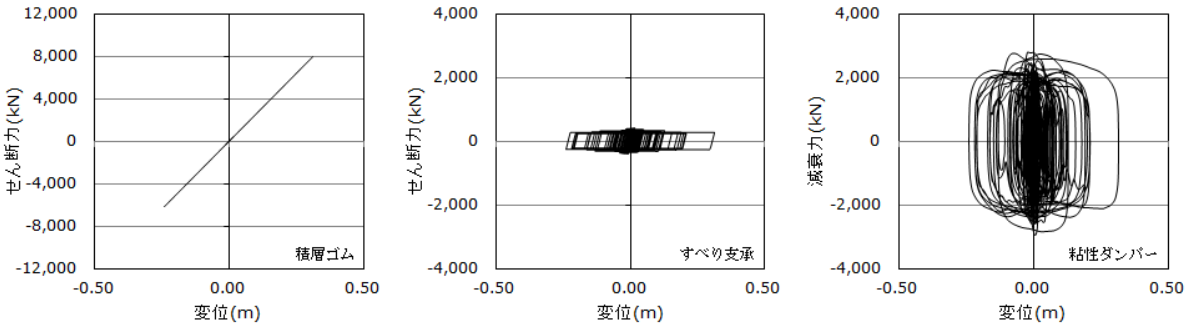


(a) 繰り返し依存性考慮

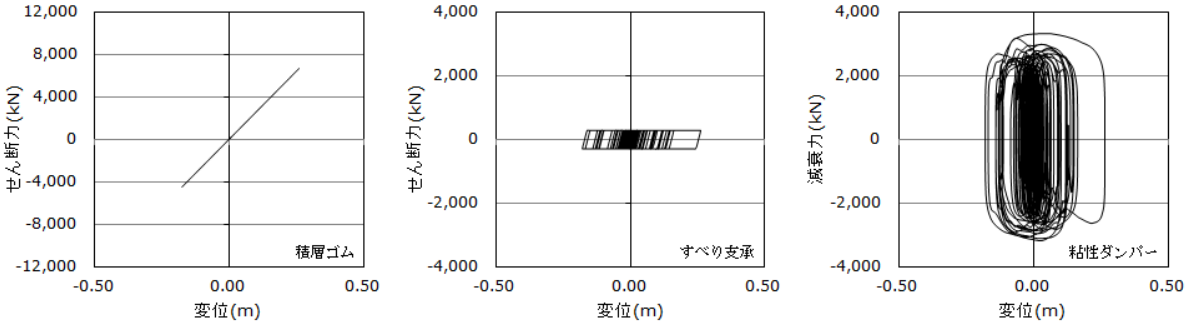


(b) 繰り返し依存性非考慮

図 3.3.6-47 免震層の荷重変形関係(OSKH02・1.0 倍入力)

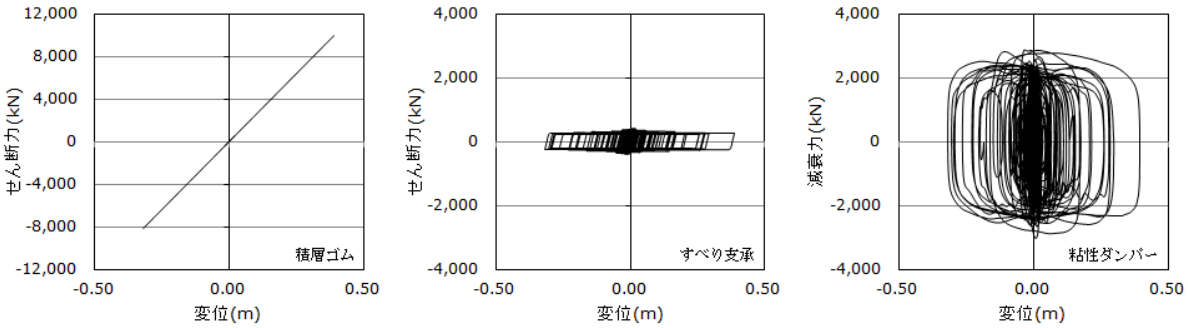


(a) 繰り返し依存性考慮

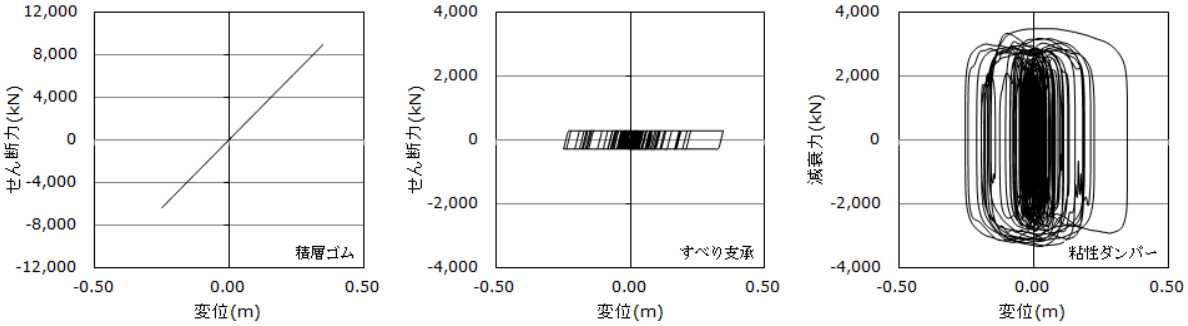


(b) 繰り返し依存性非考慮

図 3.3.6-48 免震層の荷重変形関係(OSKH02・1.25 倍入力)

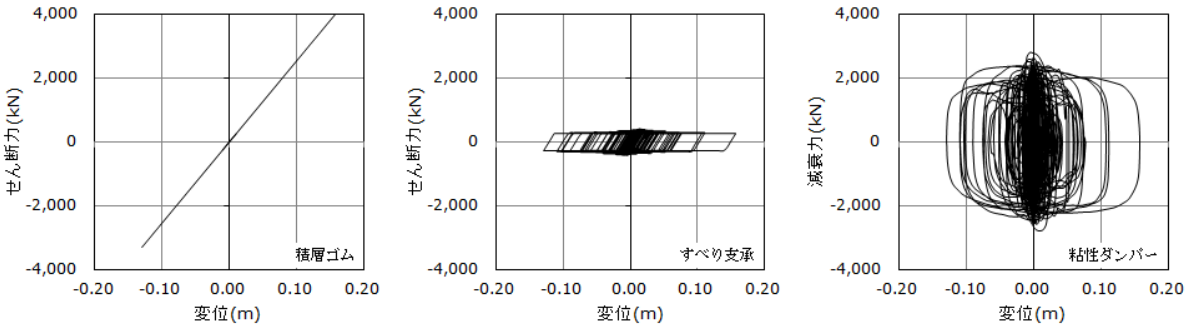


(a) 繰り返し依存性考慮

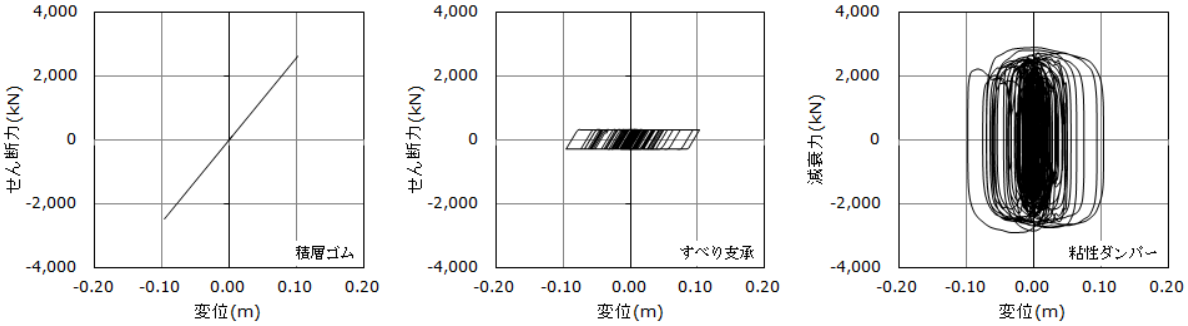


(b) 繰り返し依存性非考慮

図 3.3.6-49 免震層の荷重変形関係(OSKH02・1.5 倍入力)

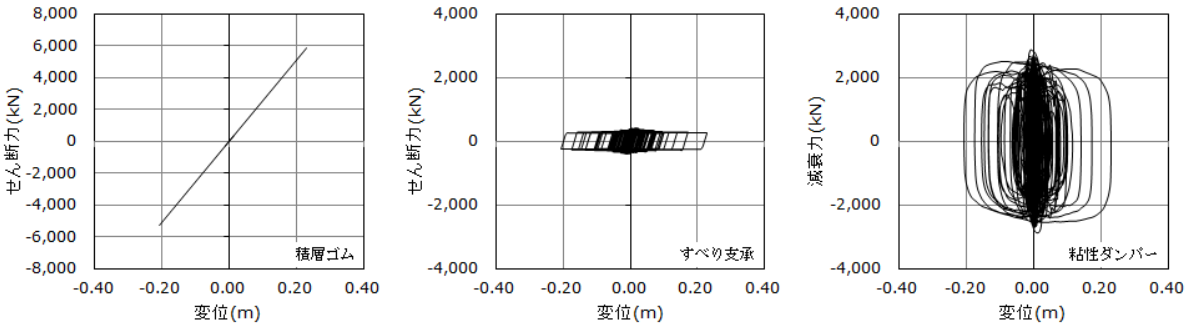


(a) 繰り返し依存性考慮

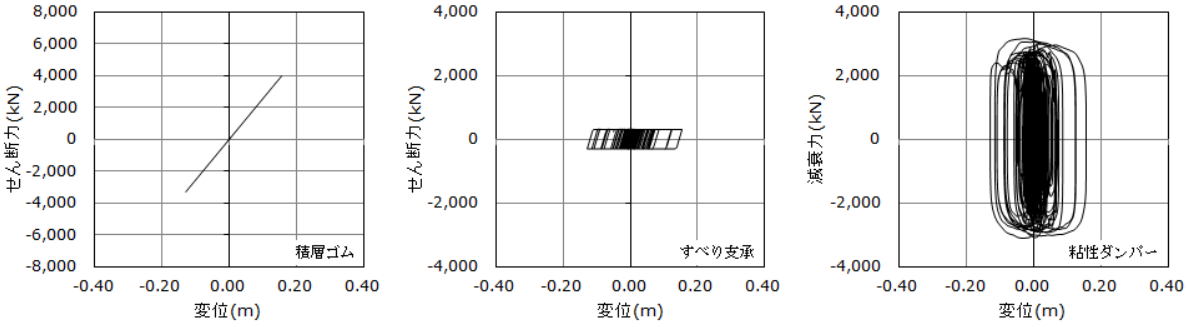


(b) 繰り返し依存性非考慮

図 3.3.6-50 免震層の荷重変形関係(AIC003・1.0 倍入力)

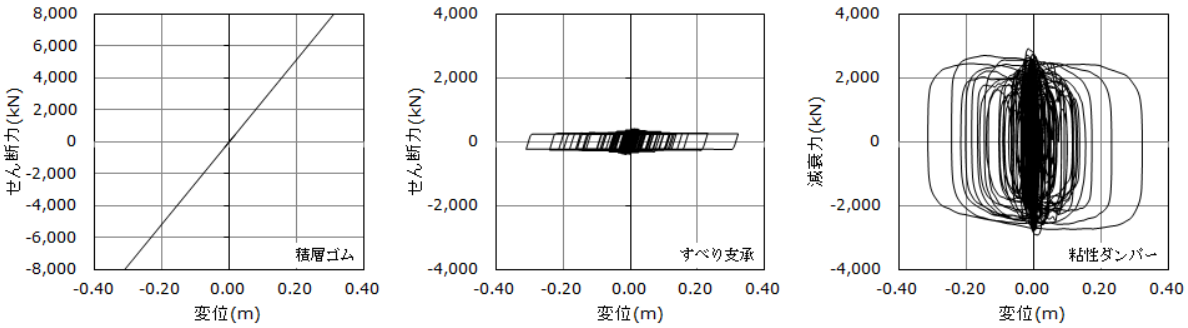


(a) 繰り返し依存性考慮

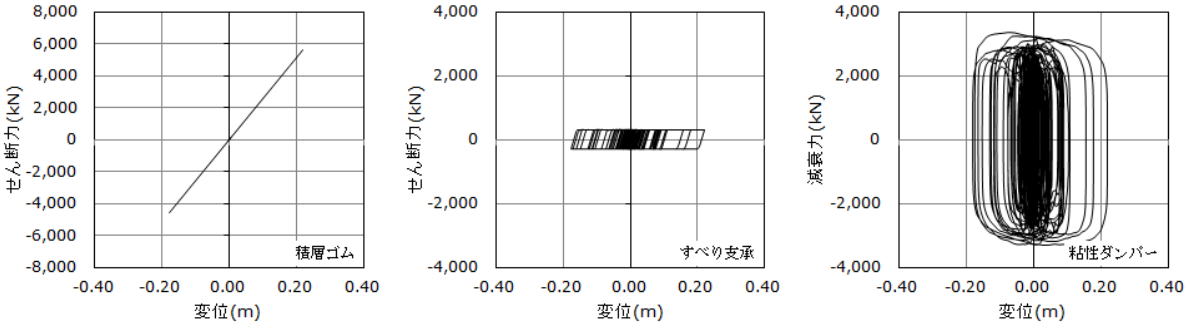


(b) 繰り返し依存性非考慮

図 3.3.6-51 免震層の荷重変形関係(AIC003・1.25 倍入力)

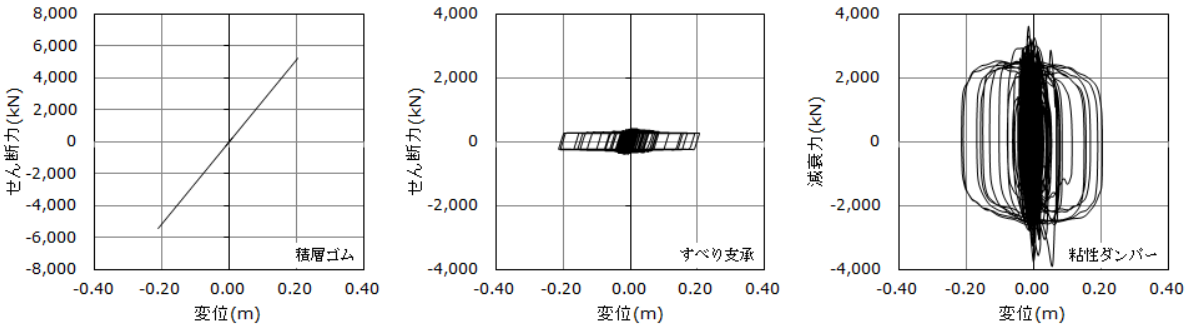


(a) 繰り返し依存性考慮

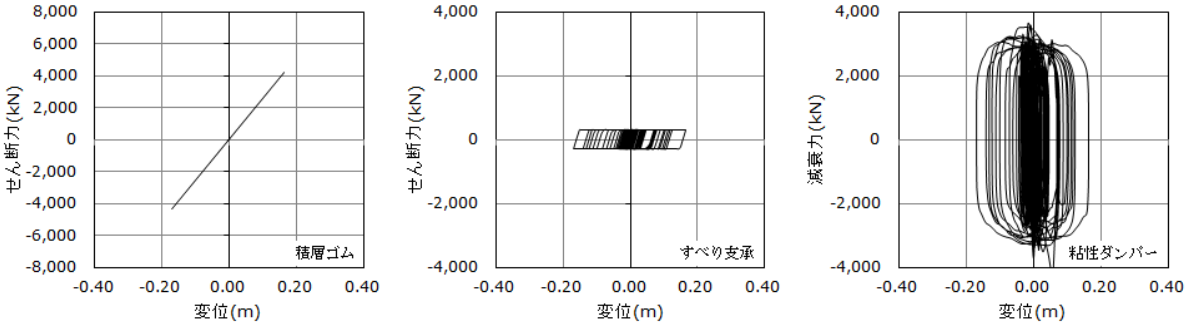


(b) 繰り返し依存性非考慮

図 3.3.6-52 免震層の荷重変形関係(AIC003・1.5 倍入力)

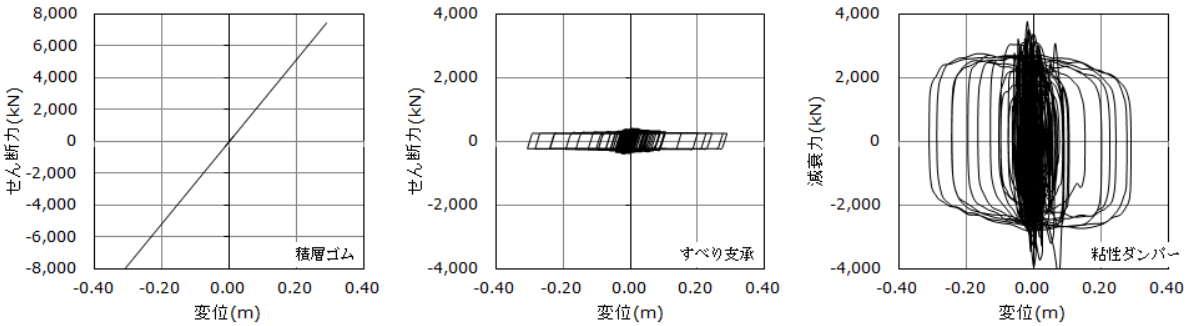


(a) 繰り返し依存性考慮

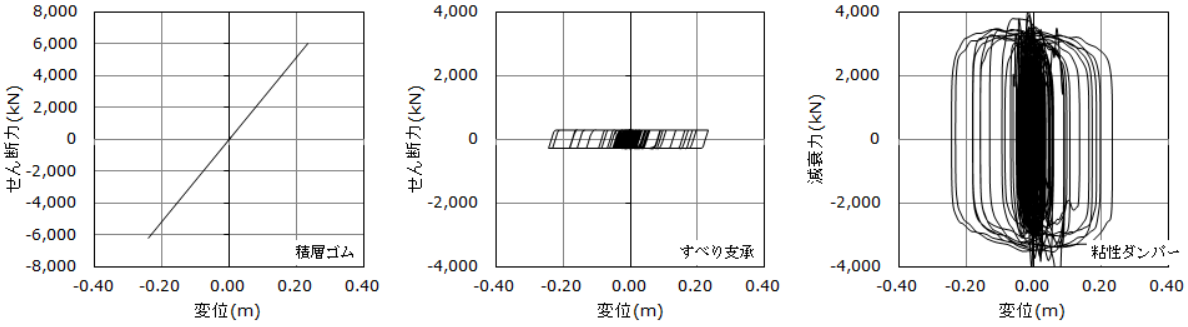


(b) 繰り返し依存性非考慮

図 3.3.6-53 免震層の荷重変形関係(SZO024・1.0 倍入力)

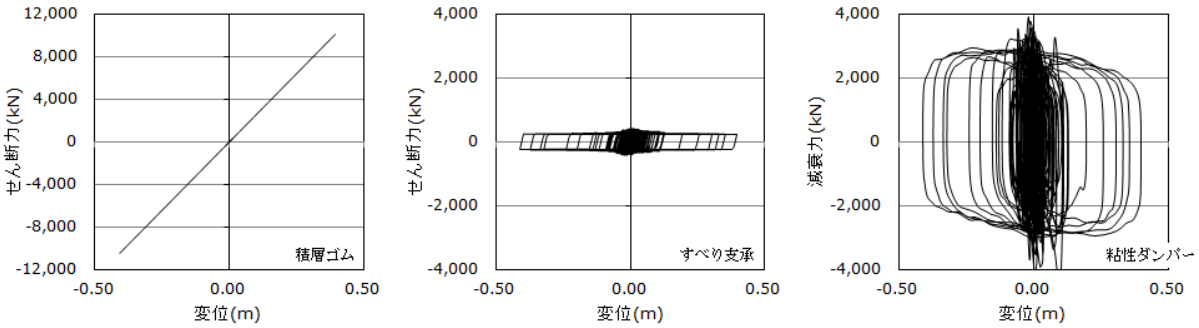


(a) 繰り返し依存性考慮

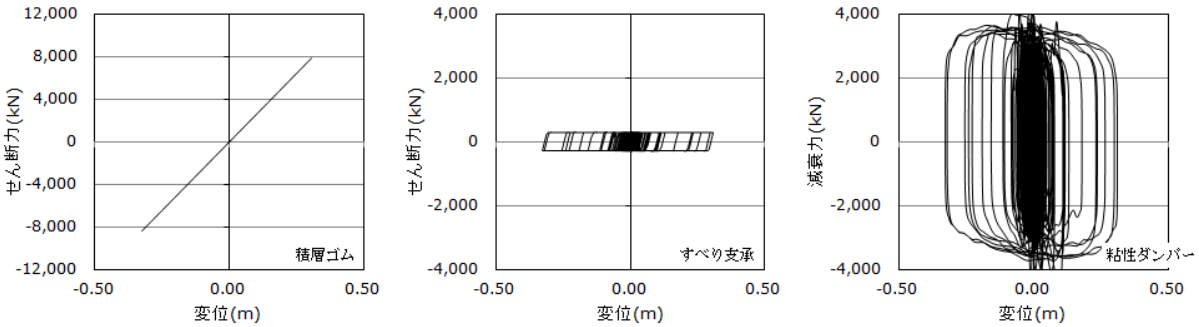


(b) 繰り返し依存性非考慮

図 3.3.6-54 免震層の荷重変形関係(SZO024・1.25 倍入力)

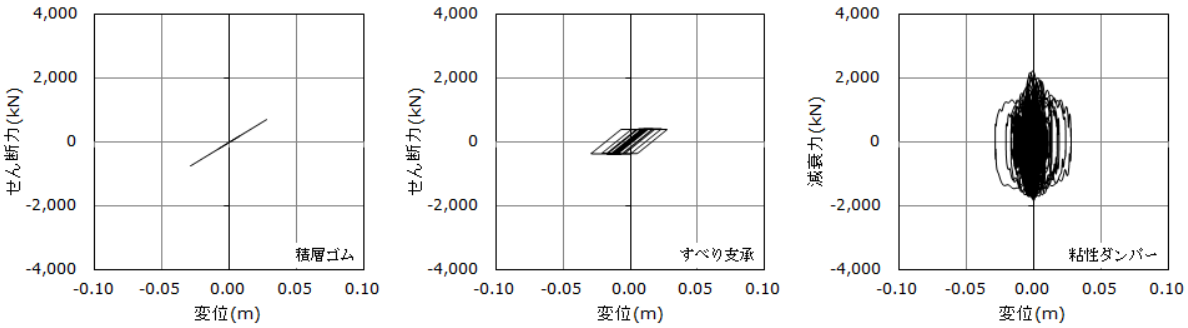


(a) 繰り返し依存性考慮

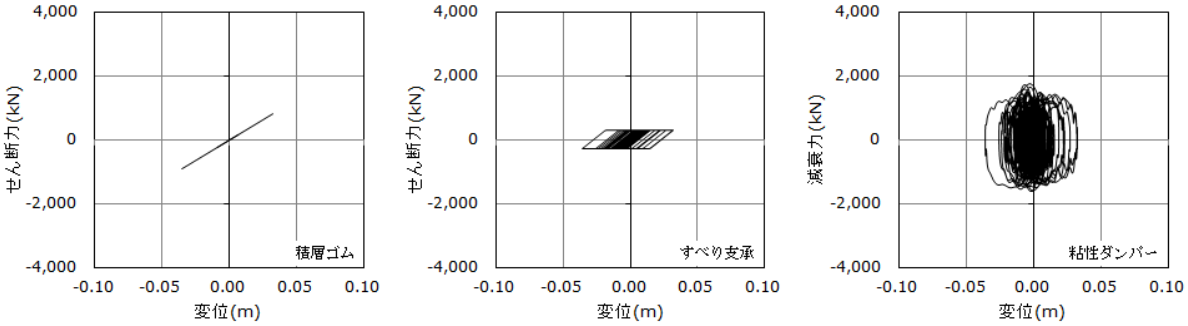


(b) 繰り返し依存性非考慮

図 3.3.6-55 免震層の荷重変形関係(SZO024・1.5 倍入力)

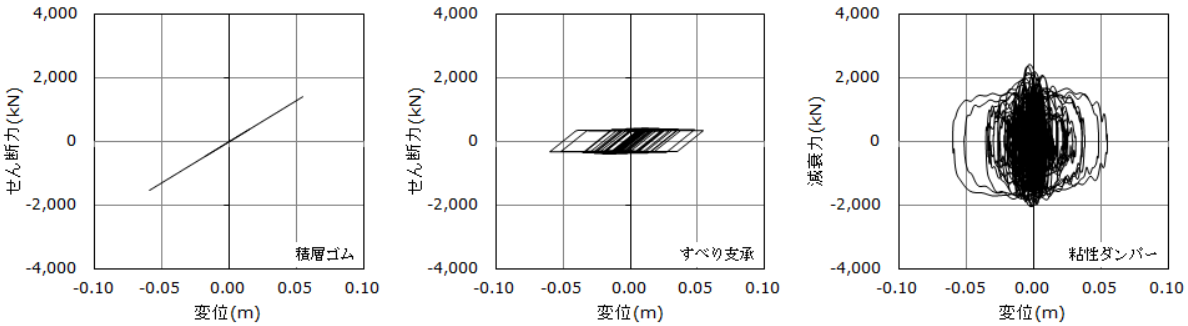


(a) 繰り返し依存性考慮

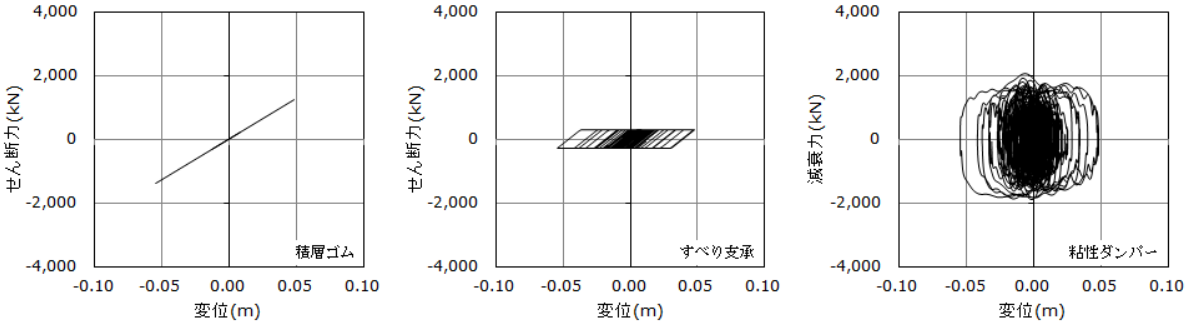


(b) 繰り返し依存性非考慮

図 3.3.6-56 免震層の荷重変形関係(KGIN・1.0 倍入力)

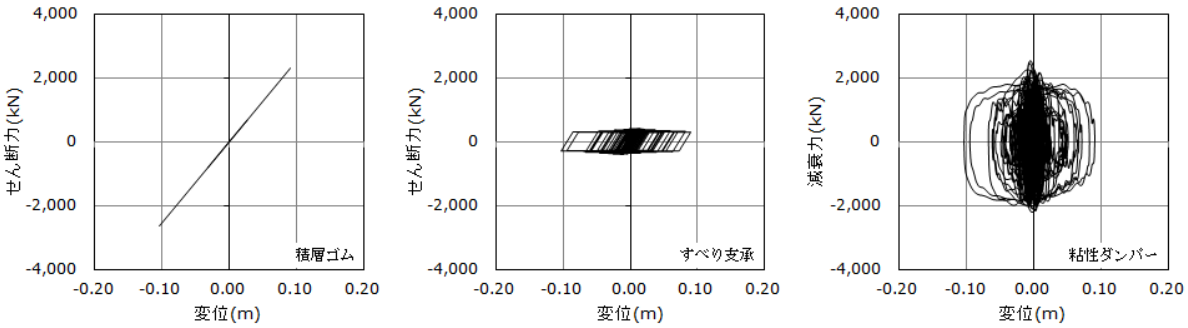


(a) 繰り返し依存性考慮

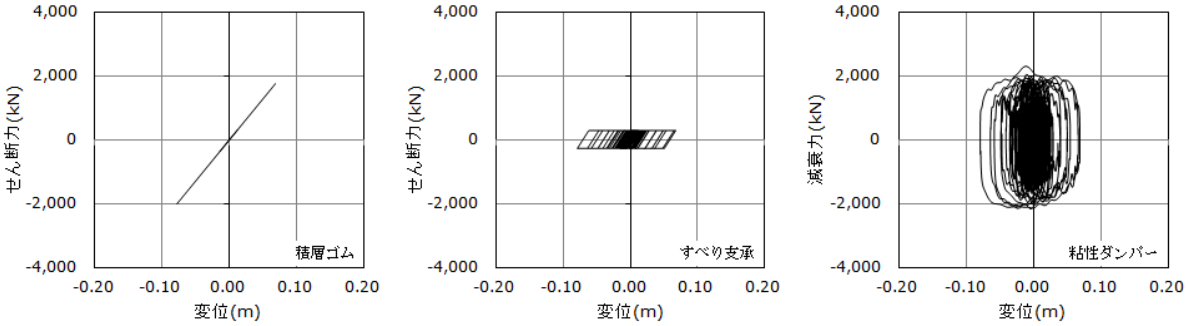


(b) 繰り返し依存性非考慮

図 3.3.6-57 免震層の荷重変形関係(KGIN・1.25 倍入力)

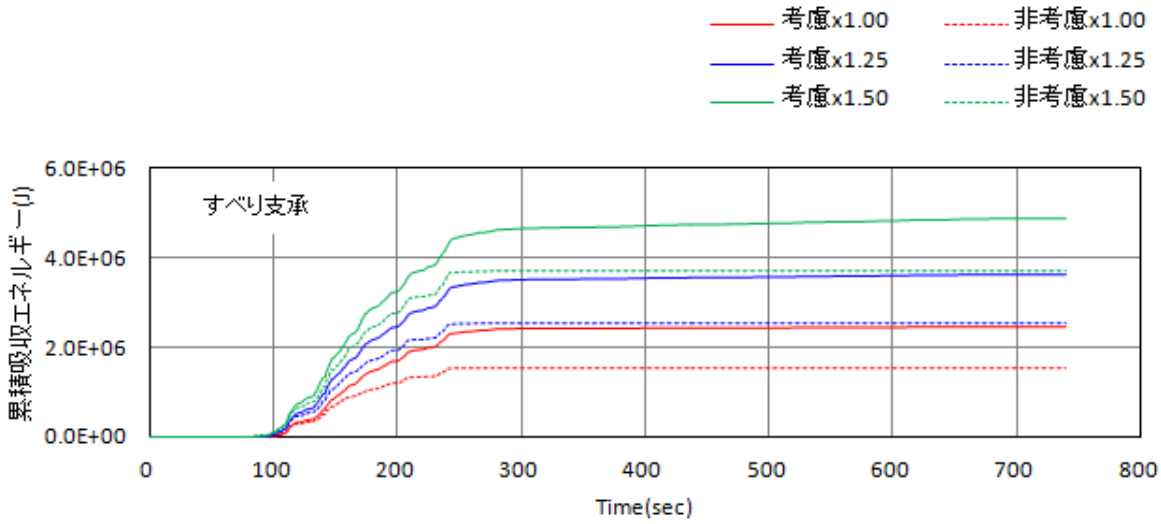


(a) 繰り返し依存性考慮

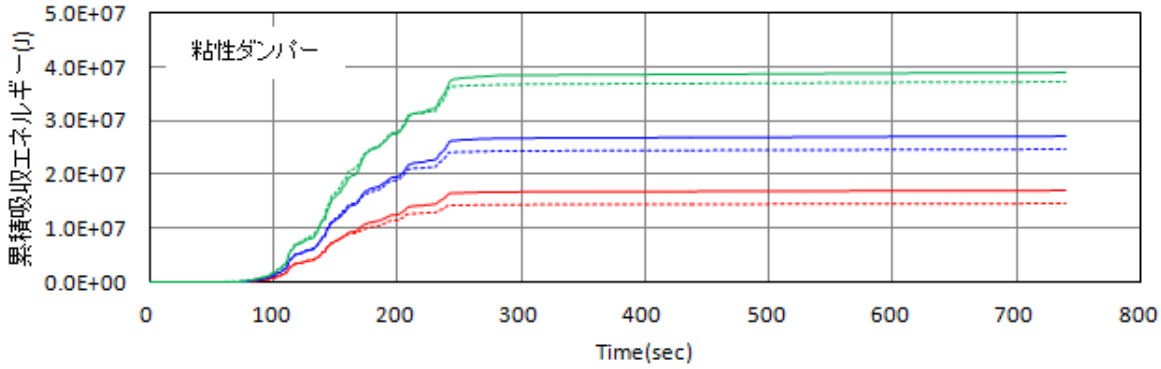


(b) 繰り返し依存性非考慮

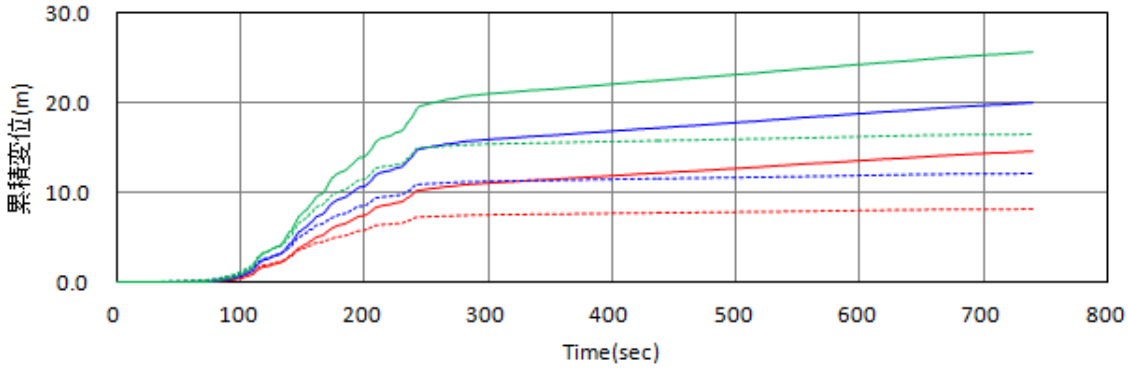
図 3.3.6-58 免震層の荷重変形関係(KGIN・1.5 倍入力)



(a) すべり支承の吸収エネルギー時刻歴

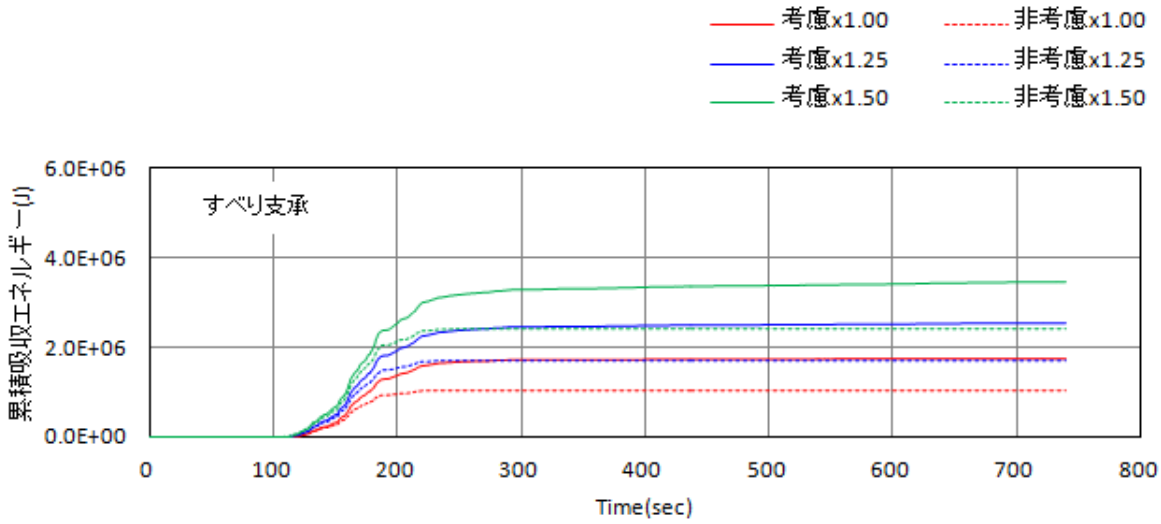


(b) 粘性ダンパーの吸収エネルギー時刻歴

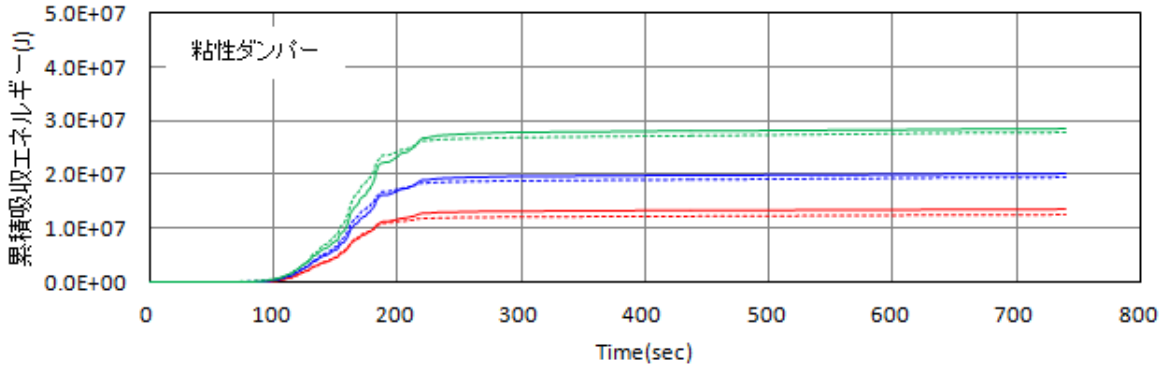


(c) 免震層の累積変位時刻歴

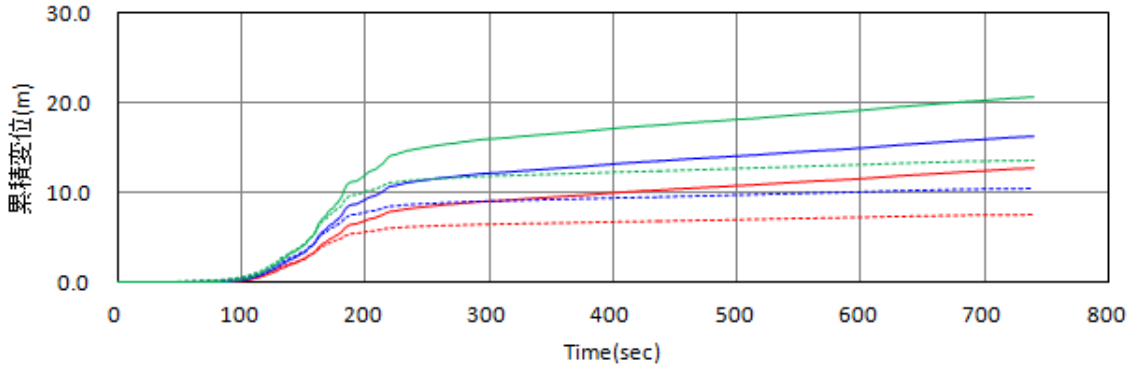
図 3.3.6-59 免震層の累積吸収エネルギーおよび累積変位の時刻歴(OSKH02)



(a) すべり支承の吸収エネルギー時刻歴

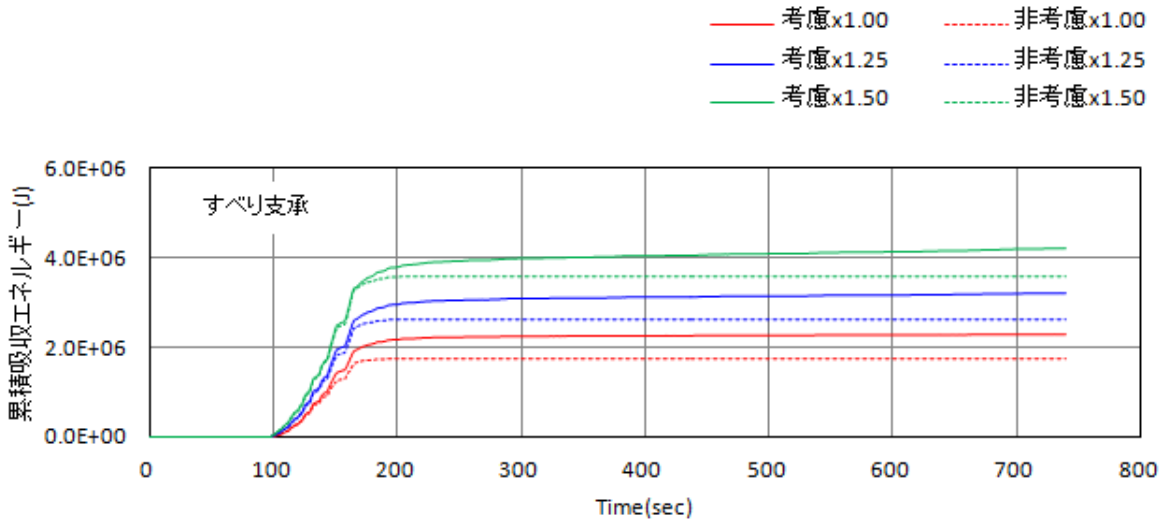


(b) 粘性ダンパーの吸収エネルギー時刻歴

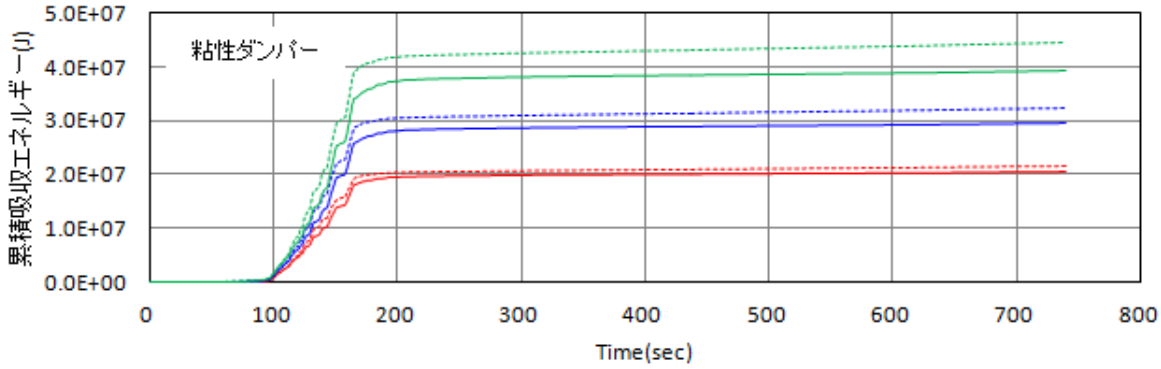


(c) 免震層の累積変位時刻歴

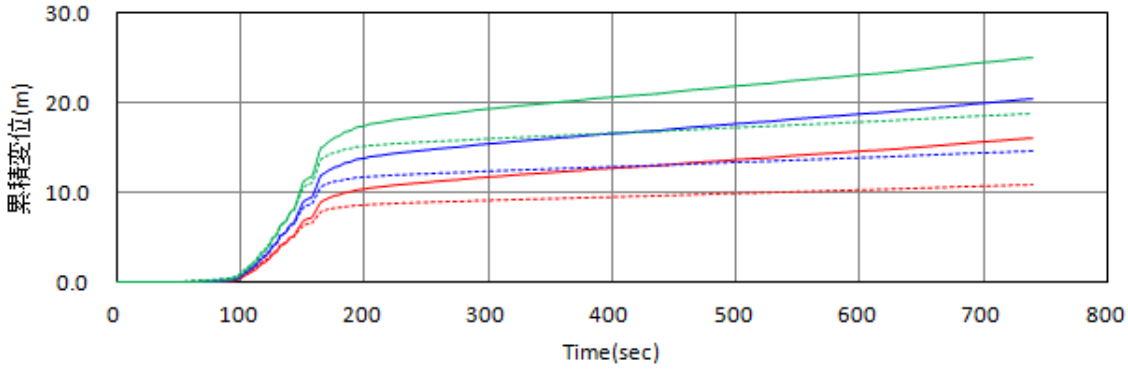
図 3.3.6-60 免震層の累積吸収エネルギーおよび累積変位の時刻歴(AIC003)



(a) すべり支承の吸収エネルギー時刻歴

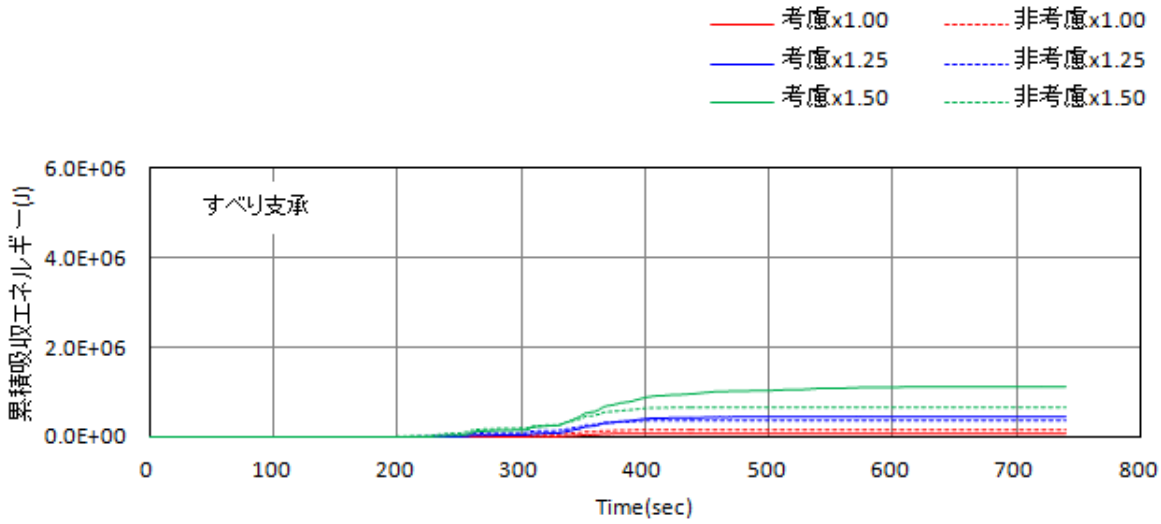


(b) 粘性ダンパーの吸収エネルギー時刻歴

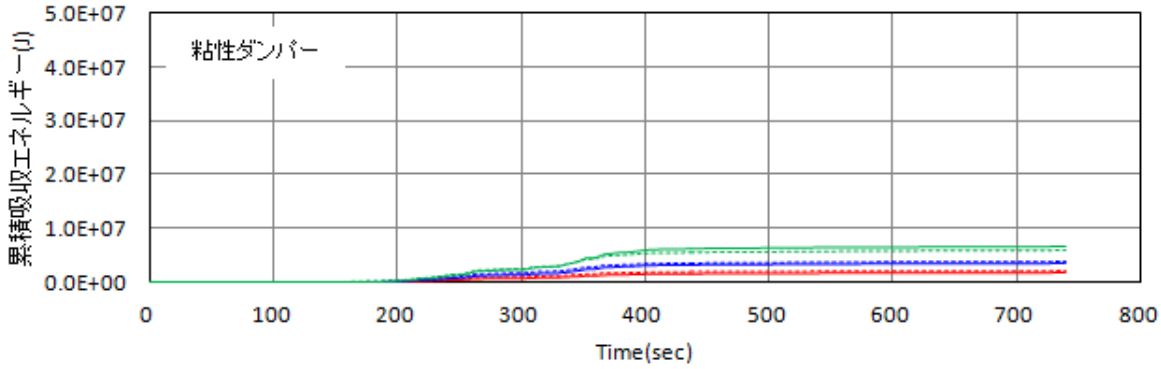


(c) 免震層の累積変位時刻歴

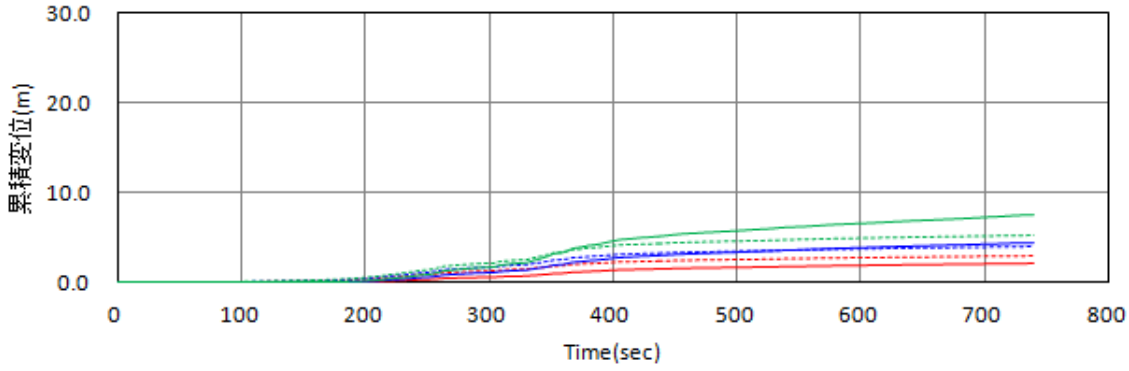
図 3.3.6-61 免震層の累積吸収エネルギーおよび累積変位の時刻歴(SZO024)



(a) すべり支承の吸収エネルギー時刻歴



(b) 粘性ダンパーの吸収エネルギー時刻歴



(c) 免震層の累積変位時刻歴

図 3.3.6-62 免震層の累積吸収エネルギーおよび累積変位の時刻歴(KGIN)

(4) まとめ

すべり支承(低摩擦)および粘性ダンパーの部材試験結果から、繰り返し依存性を評価した免震部材のモデル化を行った。

次にモデル化したすべり支承および粘性ダンパーを用いた 1 質点系剛体モデルを作成し、長周期地震動による地震応答解析を実施した。

以下に、本検討のまとめを部材試験解析および地震応答解析に分けて示す。

1) 部材試験解析

① すべり支承は、累積変位・温度および累積吸収エネルギーに依存性が見られた。モデル化では、解析とのなじみの良さから累積変位と吸収エネルギーに依存する式として評価し、試験結果と解析は良好な対応を示した。

② 繰り返しを考慮しない場合のすべり支承の部材試験解析の結果は、#3 試験体の 6 セット目以降に見られた摩擦係数の増加を考慮できない。そのため、特に 10 セット目の差異は大きい。また、多くの解析ケースにおいて加振後半に吸収エネルギー量が実験値を大きく上回る結果となったが、150 秒(累積距離で 20m 程度)付近までは、実験値を若干下回る程度の結果であった。

③ 粘性ダンパーは、累積吸収エネルギーに依存性が見られた。既往の精算法において、温度依存性についても粘性体温度の関数として評価していたが、本検討のモデル化では、試験結果から得られた減衰力の変動を、グロスで単位体積エネルギーの関数として評価した。すべり支承同様、解析は部材試験結果と良好に対応する結果を示した。

④ 粘性ダンパーの場合、繰り返し依存性を考慮しない場合、試験開始時の抵抗力を除き、解析値が実験値を大きく上回る結果となり、その差異は特に RDT30 試験体で大きい。

2) 地震応答解析

① 繰り返し依存性を考慮した評価モデルと繰り返し非考慮の既往評価モデルの差異は概ね 0～30%程度の範囲で、繰り返し依存性を考慮した評価モデルの応答値が大きくなる傾向があった。ただし、AIC002 の応答変位（最大で 53%）のほか、入力が小さい KGIN 波の 1 倍入力の累積変位量（-33%）など一部で傾向が異なった。

② 最も応答が小さかった KGIN 波では、両モデルの差異が比較的小さい結果となった。

③ 両モデルの吸収エネルギー量の差異は、概ね最大変位および加速度を示した時刻以降で生じているが、全体のエネルギー量から見ると変化が小さく、応答にあまり反映されなかったと考えられる。

④ 繰り返し依存性を考慮した評価モデルによる最大応答変位は、1 倍入力で 21.99cm(OSKH002)、1.25 倍入力で 31.20cm(OSKH002)、1.5 倍入力で 41.06cm(SZO024)であった。また、累積変位では、1 倍入力で 10.32m(SZO024)、1.25 倍入力で 14.53m(OSKH002)、1.5 倍入力で 19.44m(OSKH002)であった。

⑤ 地震応答解析で生じた最大累積変形距離および各免震部材の吸収エネルギーは、すべり支承および粘性ダンパーの部材試験で確認された累積量に対して、適用範囲内であった。

参考文献

3.3.6-1) 国土交通省：オイレス式弾性すべり支承、 建築材料認定書（認定番号MVBR-0377）別表、2008.6

3.3.6-2) 国土交通省： AT 式増幅機構付き減衰装‐減衰こま（Rotary Damping Tube）RDT-AT-Short、建築材料認定書（認定番号MVBR-0220）別表、2004.4

3.3.6-3) 国土交通省：AT 式増幅機構付き減衰装‐減衰こま（Rotary Damping Tube）RDT-AT-10 cst、建築材料認定書（認定番号MVBR-0221）別表、2004.4

3.3.6-4) 国土交通省：AT 式増幅機構付き減衰装‐減衰こま（Rotary Damping Tube）RDT-AT-30 cst、建築材料認定書（認定番号MVBR-0222）別表、2004.4

3.4 まとめ

第Ⅲ部第 1 章の免震部材実験結果を基にした詳細なモデル化をプログラムに反映し、多数回繰り返し特性を考慮した長周期地震動に対する 1 質点モデルの応答解析を実施し、応答評価を行った。

詳細なモデル化を行えるよう各社が独自にプログラムを改良し、繰り返し依存性を考慮できる解析プログラムを整備した。

各免震部材の繰り返し依存性がどのように応答に影響するかを考察し、繰り返し依存性を考慮した場合としない場合の比較から抽出した、まとめと今後の課題は以下の通りである。

・鉛プラグ入り積層ゴム

鉛プラグ入り積層ゴムの繰り返し特性を考慮した解析手法として熱伝導解析と温度上昇による力学的特性変化を考慮した手法について、第Ⅱ部 1.3.2 の正弦波繰返加力実験のシミュレーション解析を実施することによりその妥当性を確認した。

繰り返しによる鉛プラグの温度上昇の影響を考慮しないケースと考慮したケースとを比較した場合に、地震動の入力倍率が 1.0 倍の場合に変位増大率は 1.04～1.06 倍である。AIC003_AV 地震動の入力倍率 1.5 倍の場合に変位増大率が 1.83 倍となるケースがあるものの、積層ゴムのせん断ひずみは最大でもγ=250%（水平変位 50cm）以内である。なお、OSKH02 の入力倍率 1.5 倍、温度上昇を考慮した場合には応答変位及び鉛平均温度が解析の適用範囲を越えた。

今後の課題として、鉛プラグ入り積層ゴムについて免震部材及び免震建築物の応答に及ぼす温度上昇の影響を時刻歴応答解析によらずに簡易的に評価できる手法についての検討が望まれている。

・高減衰ゴム系積層ゴム

繰り返し特性を考慮した復元力モデルとして、積層ゴムの代表温度を評価指標として復元力特性値を変化させる解析モデルを作成した。

作成した復元力モデルは、縮小試験体の多数回繰り返し実験結果を良好に再現し、その妥当性を確認した。

本検討で用いた 4 波の入力地震動に対しては、1.5 倍まで係数倍した入力においても、高減衰ゴム系積層ゴムの温度上昇は最大で 6℃程度､繰り返しによる特性変化は 1 割以下に留まり、温度による特性変化を考慮した解析結果、および考慮しない解析結果ともほぼ同様の応答値を示した。従って、今回検討の地震動については、高減衰ゴム系積層ゴムの繰り返し特性は、建物応答にほとんど影響を与えないことを確認した。

ただし、今回検討に使用した高減衰ゴム系積層ゴムの解析モデルは、縮小試験体の実験結果を基に作成したものであり、実大サイズにおいてはゴム体積が大きくなるために放熱しにくい等、放熱特性が変わる可能性があり、特性変化が大きくなると考えられる。

・鋼材ダンパー

鋼材ダンパーのモデル化について検討を行い、履歴モデルを第Ⅲ部 2.3.3 の応答評価に用い

た設計モデル（バイリニア）によるものと、トリリニアモデルとしたものの比較を行った。その結果、概ね応答値の差は小さいものの、入力波および倍率によっては最大水平変形で 2 割程度差が生じることを確認した。

鋼材ダンパーの疲労損傷度は設計モデルによる評価時には入力倍率が 1.0 倍の場合には SZO024 の場合に 0.26 であるが、その他の地震動では 0.2 以下である。入力倍率が 1.5 倍の場合に SZO024 で破断に対する疲労損傷度が 0.43 となる。

今後の課題として、鋼材ダンパーについては大地震時だけでなく、風外乱や中小地震時にも疲労損傷が蓄積することから大地震時の疲労損傷度のクライテリアをどの程度にするかが今後の課題である。

・鉛ダンパー

振幅および繰り返しによるエネルギー吸収量に応じてダンパーの耐力を変化させる解析モデルを用いると、第Ⅲ部 1.3.7 の免震部材実験結果の力学特性を適用範囲の中では精度よく表現できることを確認した。

長周期地震動に対する 1 質点モデルの応答解析では､鉛ダンパーの繰り返し特性考慮の場合、非考慮に対して最大変形が 2 割程度の増幅率であった。

OSKH02、AIC003 および SZO024 の入力倍率 1.00 で亀裂に対しての累積損傷度が 100%を超えており、本評価法では亀裂発生の可能性が高いと判断される。OSKH02、AIC003 および SZO024 の入力倍率 1.50 において破断に対する累積損傷度は 100%を下回った。SZO024 の 1.5 倍入力時において累積損傷度は最大の 23%となり､破断に対して 4 倍程度の余裕がある。KGIN を除き、繰り返し考慮モデル時では非考慮モデル時に対して疲労損傷度が増加した。増加率は入力波の種類、入力倍率により異なる。OSKH02 の入力倍率 1.5 倍では、考慮時の疲労損傷度は非考慮に対して 1.5 倍となった。

今後は、提案した解析モデルの適用範囲の拡大と、免震部材特性のばらつきを考慮した場合における応答特性を把握する必要があると考えられる。

・弾性すべり支承（高摩擦）

摩擦係数の累積吸収エネルギー依存性を考慮することにより、繰り返し荷重により摩擦係数が低下し、応答変位が大きくなることが確認された。

累積吸収エネルギー依存性を考慮した応答結果と、累積すべり変位依存性を考慮した応答結果の比較では、最大応答値はほぼ同値、応答時刻歴波形や免震層の荷重-変形関係図もほぼ同一形状となっていることが確認された。

依存性を無視した標準モデルと、依存性を考慮したモデルとでは、初期の摩擦係数が依存性考慮モデルの方が高く出ているため、パラメータの見直しが必要である。

入力地震動のレベルにも依るが、累積吸収エネルギーまたは累積すべり変位依存性を考慮すると、標準モデルに比べて最大応答変位が 1 割程度大きくなることが確認できるので、実際の設計においては、その分の余裕を見込んでおく必要があるのではないか。

・弾性すべり支承（低摩擦）

第Ⅲ部 1.3.5 の免震部材実験では累積変位・温度および累積吸収エネルギーに依存性が見ら

れた。モデル化では、解析とのなじみの良さから累積変位と吸収エネルギーに依存する式として評価し、試験結果と解析は良好な対応を示した。

応答解析で生じた最大累積変位および累積吸収エネルギーは、すべり支承の部材試験で確認された累積量に対して、適用範囲内であった。

・粘性ダンパー（減衰こま）

累積吸収エネルギーに依存性が見られた。既往の精算法において、温度依存性についても粘性体温度の関数として評価していたが、本検討のモデル化では、試験結果から得られた減衰力の変動を、グロスで単位体積エネルギーの関数として評価し、試験結果と解析は良好な対応を示した。

応答解析で生じた累積吸収エネルギーは、部材試験で確認された累積量に対して、適用範囲内であった。

以上より、長周期地震動に対する免震建築物の応答評価における今後の課題は、実大免震部材実験結果に対する評価を実施し、現状の評価手法の検証と見直しをすることである。また、免震装置および免震建築物応答に及ぼす繰り返し依存性の影響を簡易的に評価できる手法の検討が望まれる。

第Ⅳ部

長周期地震動に対する実大免震部材の特性評価（1）

第1章　震動台を用いた実大免震部材の構造実験（その１）

1.1 目的

長周期地震動に対する免震建築物の安全性照査のクライテリア設定へ向けて、多数回繰り返し加力実験に基づく実大免震部材の特性評価を行うことを目的とする。実大免震部材の動的・多数繰回返し加振実験は、試験装置能力の制約により従来殆ど実施されておらず、本実験により実大免震部材のエネルギー吸収性能を把握することは、長周期地震動に対する免震建築物の安全性向上に大きく寄与することが期待される。

本章では、縮小試験体の多数回繰り返し実験の条件を踏まえて作成した、実大試験体の多数回繰り返し実験及び実大試験体の破断相当歪（±90cm、450%）までの実験実施計画について示すとともに、実大免震部材（弾性すべり支承（高摩擦）およびオイルダンパー）の動的加振実験結果および実大免震部材（鉛プラグ入り積層ゴム）の静的加振実験結果を示す。

1.2 実験手法の提案

1.2.1 実験条件の設定

過去に実施された実大実験の実験条件を考慮して、それらと同等以上の実大実験の免震部材を使用することとし、積層ゴム支承はφ1000、弾性すべり支承はφ800の大きさを想定する。弾性すべり支承は、積層ゴム支承よりも基準面圧が大きく、せん断力（摩擦力）が軸力に依存して変動するため、一定以上のせん断力を確保するため直径を小さめに設定する。

実大実験に関する議論を踏まえ、実験条件には以下の優先順位を付ける。

1）長時間・大振幅動的繰り返し加力

2）鉛直載荷

3）水平2方向加力

4）破断実験

1）の長時間・大振幅繰り返し加力については、加振振幅は、φ1000の積層ゴム支承で、±40cm（せん断歪200%）程度とし、加振時間は、4秒周期で30回～60回（累積変形で50m～100m）程度とする。これらの条件は、第Ⅲ部第1章に記載した実施した縮小免震部材の試験条件と整合させる。

2）鉛直載荷については、実面圧相当を目標とするが、ロードセルが許容荷重を越えない範囲で5000kNに設定した（参考資料 2.5.4）。面圧変動の許容値は、目標としては±20%程度を目指すこととするが、震動台の制御精度を予備加振により確認し、実現可能な精度で最終的に決定する。

FEM解析結果（参考資料2.5.4）によれば、当初計画の上部鋼板100mmでは10000kNの鉛直載荷時に中央部ロードセル荷重が許容荷重の２倍程度に達する。許容荷重を越えないようにするには、上部鋼板を200mmに厚くした上で、中央付近のロードセルを油圧ジャッキに置き換える必要がある。

油圧ジャッキを使用することにより10000kN載荷は可能ではあるが、軸力が何らかの理由で解放された時に、ロードセルに許容値以上の引張荷重が作用する可能性がある。従って、長時間・繰り返し実験には適用出来る可能性があるが、破断実験には採用出来ない。

油圧ジャッキ無しで可能な範囲をＦＥM解析と実際の予備加振により見極めて、加振条件を設定することとする。長時間・繰り返し実験について、可能であれば油圧ジャッキによる加振も試験的に行うこととする。

3）の水平2方向加力については、高減衰ゴム系積層ゴム支承では、1方向加力と2方向加力では特性に差があることが知られているため、2方向加力が行えるようにする。

4）破断実験については、±90cm程度まで漸増加振を行うこととし、破断しない場合はそれ以上の振幅増加はさせないこととする。積層ゴムの破断せん断力として6000kN程度が想定される。

以上の実験条件を整理して、表1.2-1に示す。

表 1.2-1 実験条件の設定

実験条件	目標値	留意点
試験体寸法	・積層ゴム：φ1000 ・弾性すべり支承：φ800	・弾性すべり支承は、積層ゴムよりも基準面圧が大きいため、直径を小さく設定。
長時間・大振幅動的繰り返し加力	正弦波加振： ・±40cm ・4 秒周期で 30 回～60 回（累積変形で 50m～100m） 地震波加振： ・長周期地震動模擬波に対する免震建築物応答波を使用する。	・φ1000 積層ゴムでせん断歪 200%相当。 ・主梁方向を基本とする。 ・必要に応じて高次振動数成分をフィルター処理する。
鉛直載荷	・最大 5000kN*	・面圧変動の許容値は±20%程度を目標とするが、震動台の制御精度により決定する。
水平 2 方向加力	・円軌道で円周 160cm	・正弦波は、円軌道とする。 ・地震波は、2 方向応答波を使用する。
破断実験	・±90cm（せん断歪 450%）まで漸増加振（破断時の荷重は 6000kN、衝撃力 9000kN 程度）	・受け梁方向に加振する。 ・破断に至らない場合、それ以上振幅を増加させない。

*ロードセルの許容荷重を考慮して設定する。予備解析として鉛直加力時及び鉛直加力＋水平加力時のロードセルにかかる荷重分布を 3 次元 FEM 解析で検討し（参考資料 2.5.4 参照）、載荷可能な鉛直軸力を設定し、実際の加振時に検証を行った。

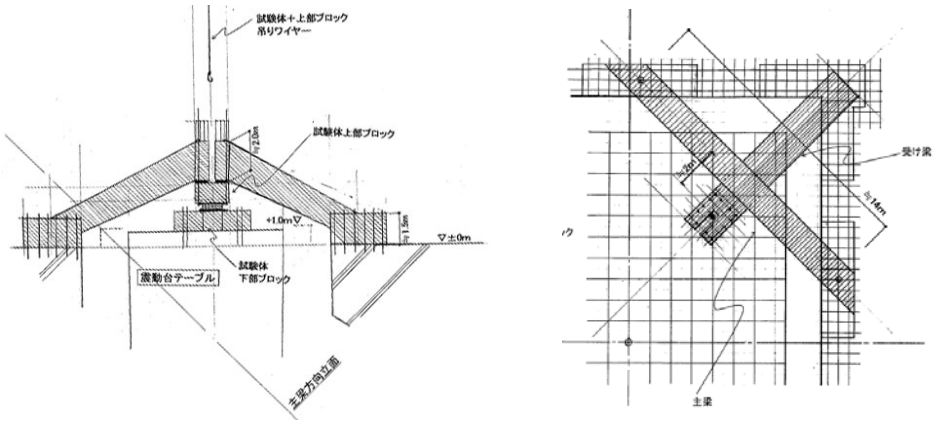
1.2.2 実験手法の選定

（1）実験手法の案

1.2.1 で設定した実験条件を実現するために、以下に示す 4 種類の実験手法のアイデアについて検討を行った。

（A 案）上部反力梁方式

震動台上部に反力梁を架設し、震動台を上昇させて反力梁の間に免震支承を挟んで鉛直軸力を導入した上で、水平方向に加力する。震動台中央部に梁を架設するとスパンが長くなりすぎるため、コーナー部に斜め方向に梁を架設する。上部反力方式のイメージを図 1.2.2-1 に示す。

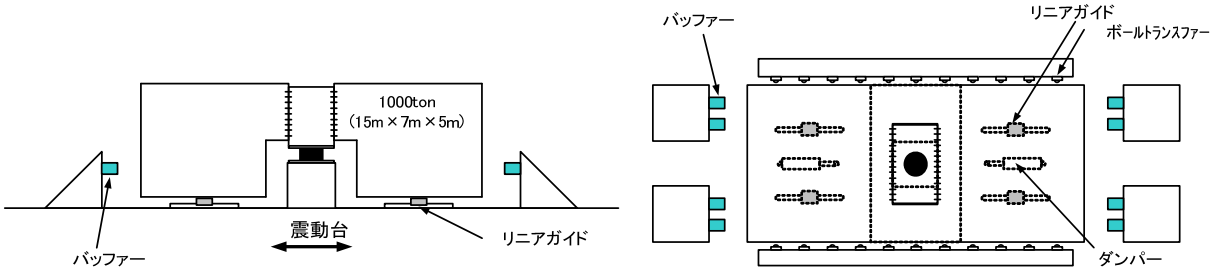


(a)立面図　　(b)平面図

図 1.2.2-1　上部反力梁方式

（B 案）慣性マス方式

震動台中央部に免震支承を設置し、免震支承上に重錘を積載して、震動台による加振を行う。重錘に生じるロッキング動を極力低減させるため、免震支承の中心の高さが重錘慣性力の作用高さと一致するように配慮する。震動台加振時の重錘のロッキング動を受けるため、周辺 4 箇所に補助支承を設ける。慣性マス方式のイメージを図 1.2.2-2 に示す。

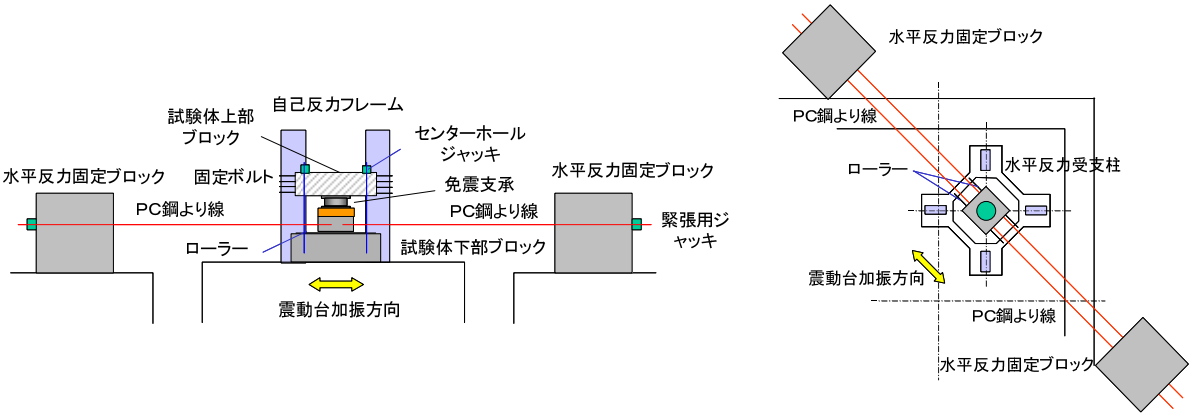


(a)立面図　　(b)断面図

図 1.2.2-2　慣性マス方式

（C 案）外部水平反力方式

震動台上部に自己反力式の鉛直加力フレームを設置して、ローラー支承上に設置した免震支承に油圧ジャッキで鉛直軸力を導入し、免震支承は震動台周辺に設置した水平反力ブロックと PC 鋼棒（或いは PC より線）で緊結する。震動台を水平方向に加振して、免震支承に水平方向の加力を行う。外部水平反力方式のイメージを図 1.2.2-3 に示す。

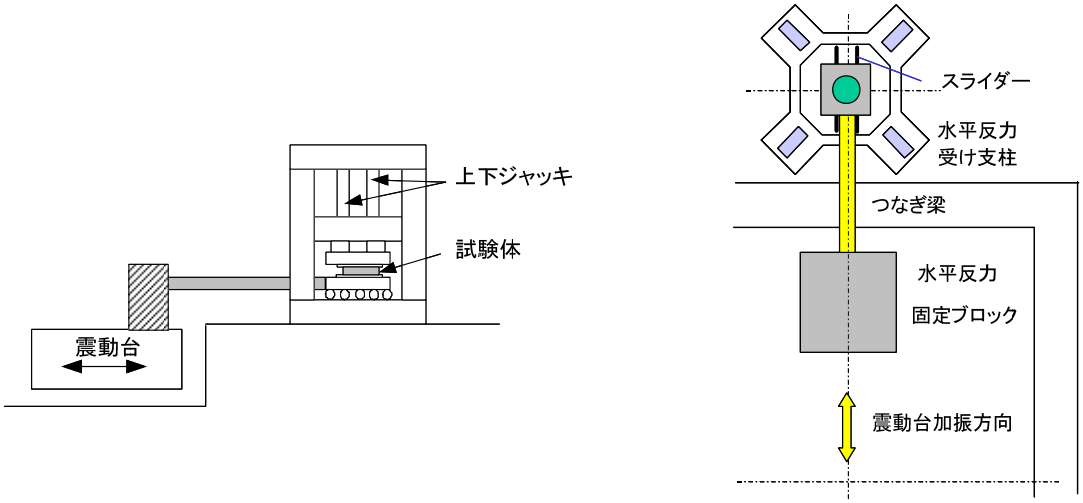


(a)断面図　　(b)平面図

図 1.2.2-3　外部水平反力方式

（C2 案）外部設置方式

震動台周辺の反力床上に自己反力式の鉛直加力フレームを設置して、ローラー支承上に設置した免震支承に油圧ジャッキで鉛直軸力を導入する。この機構は（C 案）と同様であるが、設置位置が異なる。震動台と免震支承をつなぎ梁で接続し、震動台を加振することによりつなぎ梁を介して免震支承を水平方向加力する。外部設置方式のイメージを図 1.2.2-4 に示す。



(a)断面図　　(b)平面図

図 1.2.2-4　外部設置方式

（2）実験手法の比較検討

実験手法を選定するにあたっては、先ず 1.2.1 に示した 4 つの実験条件（長時間・大振幅動的繰り返し加力、鉛直載荷、水平 2 方向加力、破断実験）を実現出来ることが、重要な選定基準となる。

1）長時間・大振幅動的繰り返し加力について

全ての実験手法で実現可能である。ただし、（B 案）の場合は免震部材の減衰性能の差などにより加振応答に差が生じるため、異なった免震部材に対して同じ実験条件で実験を実施するには手間がかかると考えられる。

2）鉛直載荷

全ての実験手法で実現可能である。ただし、（A 案）では震動台を変位制御で上昇させて、免震支承を反力梁に押付けるため、初期軸力は精度良く設定可能と考えられるが、水平加力時には振動台の上下変位に伴い、免震支承に軸力変動が生じることが予想される。また、（B 案）では、加振中に周辺部の補助支承に荷重が分散するため、この場合も軸力変動が生じることが予想される。（C 案）と（C2 案）については、初期軸力は精度良く設定可能であるが、加振時の免震支承の上下変形により軸力変動が生じることが予想される。

積層ゴム支承については、軸力変動がある程度生じても構わないと思われるが、すべり支承については、摩擦力が軸力に依存するため、軸力が小さくなり過ぎないようにする必要がある。

3）水平 2 方向加力

（A 案）は水平 2 方向加力が可能である。（B 案）は 2 方向用補助支承を使用し、バッファを 2 方向に配置することで技術的には実現可能であるが、中央 1 点で重錘をバランスさせて安定して加振するのは困難と思われる。（C 案）は、水平 2 方向加力は実現出来ない。（C2 案）については、つなぎ梁を 2 本に増やして免震支承と水平反力固定ブロックを側面から挟むように固定する等の工夫をすることで、技術的には実現可能と思われる。

4）破断実験

（A 案）は破断実験が可能である。（B 案）は震動台の加振性能の制約から、破断実験は実現困難である。（C 案）、（C2 案）については、反力フレームに大がかりな補強が必要になり、破断実験は実現困難と考えられる。

以上より、4 つの実験条件全てを実施可能なのは（A 案）のみである。実験手法と実験条件の関係を整理して、表 1.2.2-1 に示す。

表 1.2.2-1　実験手法の比較

実験手法	A案 上部反力梁 方式	B 案 慣性マス 方式	C 案 外部水平反力 方式	C2 案 外部設置 方式
1）長時間・大振幅動的 繰り返し加力	○	○	○	○
2）鉛直載荷	○	△	○	○
3）水平 2 方向加力	○	△	×	△
4）破断実験	○	×	×	×

実験手法の選定に関しては、実験条件の実現可能性の他に、以下の事項についても検討する必要がある。

5）震動台実験設備への負荷
　鉛直載荷位置の偏心の影響、破断実験時の衝撃力の影響

6）実験の手間
　実験装置の設置・調整の手間、実験実施の手間

7）実験の安全性
　実験準備から実験実施までの作業安全性、震動台異常モード時の安全性

第Ⅳ部第 1 章における検討では、実験条件全てを実施可能な（A 案）を第一候補とし、それらの実験条件がある程度の精度で実現出来る見込みが得られれば、（A 案）を進める事で合意した。

2010 年 10 月 5 日に E-ディフェンスを訪問し、実験条件の実施可能性について議論させて頂いた結果をまとめると、以下の通りである。

1）時間・大振幅動的繰り返し加力については、震動台が一度に連続して加振出来るのは累積変形で 15m 程度である（参考資料 2.5.2 参照）。従って、50m から 100m程度の累積変形を実現するには、3 回～6 回程度に加振分割して、合間に油を補給して加振する必要がある。ただし、油の補給は、5 分程度で完了する。WG としては長時間加振の条件として容認出来ると判断した。

2）鉛直載荷については、水平方向加振時の震動台鉛直方向の変動変位が、10mm 程度生じることが見込まれる（参考資料 2.5.1 の負荷が軽い場合の実測データから推定）。しかし、変動変位の逆位相波を用いた補償加振により 3～4mm 程度に変動変位が抑制出来る見込みがある。WG として、面圧変動の目標許容範囲を±20%程度と想定している。鉛直載荷時の反力梁の弾性変形を 40mm 程度に設定すれば、軸力変動を目標範囲に抑制できる事が期待される。

3）水平 2 方向加力については、問題なく加振が可能である。ただし、加振時間は１～２割短くなる。

4）破断実験については、震動台は変位制御で加振するので、破断時に 6000kN 程度の急激な荷重変動が生じても、震動台に対して障害が生じることは無いと判断される。反力梁が破断時の衝撃力に対して安全性を確保出来るように設計する必要がある。

上記判断を踏まえ、(A 案)により実験条件を実現することは可能であると判断し、(A 案)を進めることとし、更に 5)～7)の事項をクリアするべく調査・検討を進めた。

5) 震動台実験設備への負荷

- 鉛直載荷位置の偏心の影響は問題にならないと考えられる。ただし、集中して 10000kN の荷重をかけるので、震動台の構造への影響を確認しておく必要がある。
- 実験破断時の衝撃力の影響については、4)で述べた通り震動台は水平方向のアクチュエータ容量(22500kN/5 台)で変位制御加振を行うので、破断時に 6000kN 程度の急激な荷重変動が生じても、加振制御上問題が起きる可能性は低いと判断される。

6) 実験の手間

- 反力梁を震動台の外部で出来るだけ組み立てた後、震動台上部へ架設することにより、震動台の専有期間を極力短縮することが可能である。一度実験装置を設置すれば他の(B 案)、(C 案)、(C2 案)に比べて実験装置を設置する手間は少なくて済む。
- 実験では、10000kN の鉛直荷重を作用させて、免震支承と反力梁を固定した上で、水平方向に加振する。予め水平方向加振をして鉛直方向変位(軸力変動を生じる)を実測した上で、鉛直方向変位をキャンセルする補償波(逆位相波)を作成して、補償加振を行う必要がある。補償加振には手間がかかると考えられるが、一度補償波を作成すればその後の加振は円滑に実施できると考えられる。
- 10000kN の鉛直荷重を作用させて、免震支承と反力梁を固定する必要がある。PC 鋼棒で両者を固定するにはかなりの手間がかかり、かつ震動台稼動状態で固定する必要があるため、安全面でも特別な配慮が必要となる。

7) 実験の安全性

- 反力梁の架設や、試験体の震動台上への設置、計測器の設置については、全て震動台停止時に行うため、安全に留意して作業を行えば問題はないと考えられる。
- 特別な配慮が必要なのは、震動台稼動状態で免震支承と反力梁を固定する作業である。この問題は、後述する遠隔固定法を考案することで、人が震動台上へ行かずに短時間で固定出来るような工夫をする。
- 破断実験時には、震動台への影響は問題ないと考えられるが、反力梁は衝撃荷重(破断時荷重 6000kN に対して 1.5 倍で､9000kN を想定)に対して安全に設計する必要がある。
- 破断時には、免震部材の破片が周辺に飛散するのを防ぐため、ポリカーボネード等のボードで囲う必要がある。
- 震動台異常停止には、以下のモードが想定されている。
  - i) レベル B 停止：震動台は中立位置に移動する。異常停止時に中立位置に居ない場合は、2 秒後に中立位置に移動する。
  - ii) レベル C 停止：着座位置(中立位置-530mm)に移動する。異常停止時に中立位置に居ない場合は、中立位置まで 2 秒間で戻り、続いて着座位置まで 15 秒間(133 秒まで変更可能)で戻る。その後、油圧源が順次自動停止。
  - iii) レベル D 停止：着座位置までレベル C と同様の動作で戻る。ただし油圧源が即時一斉停止。
  - iv) レベル E 停止：緊急遮断弁が閉じて、5 Hz 程度の振動数で 3 方向に 2 G 前後の最大

加速度を保持して震動台が動き（３波程度の継続)、その後加振機から徐々に油圧が抜け、非制御状態で震動台が徐々に落下し、着座装置が受け止める。

震動台異常停止時には、積層ゴム部で破断させることを想定している。天然ゴム系積層ゴムの鉛直方向の破断応力は約 0.25～0.3 kN/cm^2 と見込まれているので、φ1000 支承の有効断面積を 7850cm^2 とすると破断時の荷重は 1963kN～2355 kN 程度と想定される。また、破断時の鉛直歪みは 200%を越える事が想定される。震動台異常停止時には積層ゴム部が破断することで、震動台の動きを阻害する可能性は低いと考えられる。

第 2 章　多数回繰り返し荷重を受ける実大免震部材の構造実験（その 1）

2.1 実験計画

実大免震部材の動的・多数回繰返し加振実験を実施し、免震部材の特性変化を実測する。ここでは、天然ゴム系積層ゴム、弾性すべり支承（高摩擦）、オイルダンパーを想定する。尚、天然ゴム系積層ゴムについては、第Ⅲ部第 1 章の縮小試験体の実験結果からも多数回繰り返し荷重による温度上昇や部材特性の変化が少ない事が明らかとなったため、動的加力実験データの重要度が低いことも判明した。そこで、動的・多数回繰り返し加振実験では弾性すべり支承の実験を集中して実施することとし、天然ゴム系積層ゴムについては静的加力実験を実施することとした。

2.1.1 試験体

① 天然ゴム系積層ゴム

φ1000 の試験体を参考資料 2.5.5 に示す。

② 弾性すべり支承（高摩擦）

φ800 の試験体を参考資料 2.5.5 に示す。

③ オイルダンパー

1000kN タイプ試験体（BM250-4C）の図面を参考資料 2.5.5 に示す。

2.1.2 加力治具と試験体設置

(1) 試験体下部ブロックの設置

① 震動台上に試験体下部ブロックを設置（図 2.1-1)。

留意事項：

- 支承に作用する鉛直軸力を分散させて震動台テーブルへ伝えるため、試験体下部ブロックから震動台へ伝わる荷重が、1000kN/m^2 以下になるように下部ブロックの大きさを設定した。
- 下部ブロック上に、荷重を計測するロードセル架台を介して、積層ゴム支承或いは弾性すべり支承を設置する。
- 固定には M48 ボルト（S45C）を使用し、1 箇所あたり 450kN 程度の締付け力を導入し、加振時にブロックに滑りが生じないようにする。

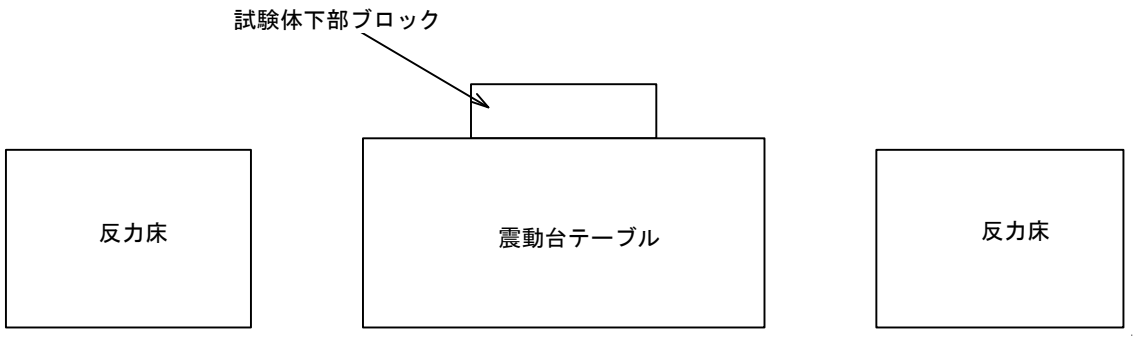


図 2.1-1　試験体下部ブロックの設置

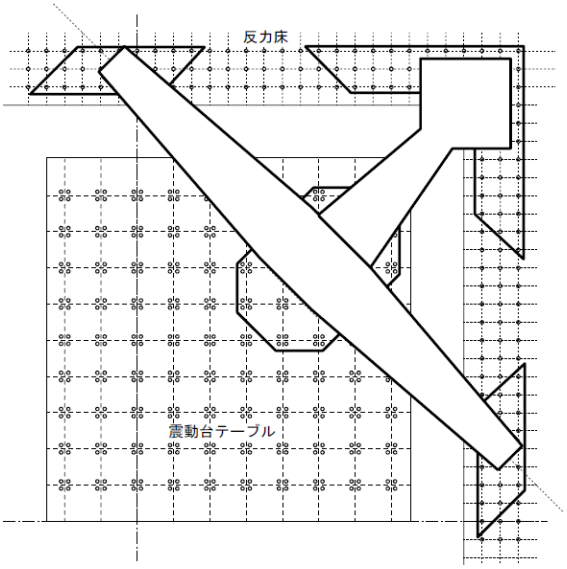
(2) 反力梁の設置

② 主梁と受け梁を架設。

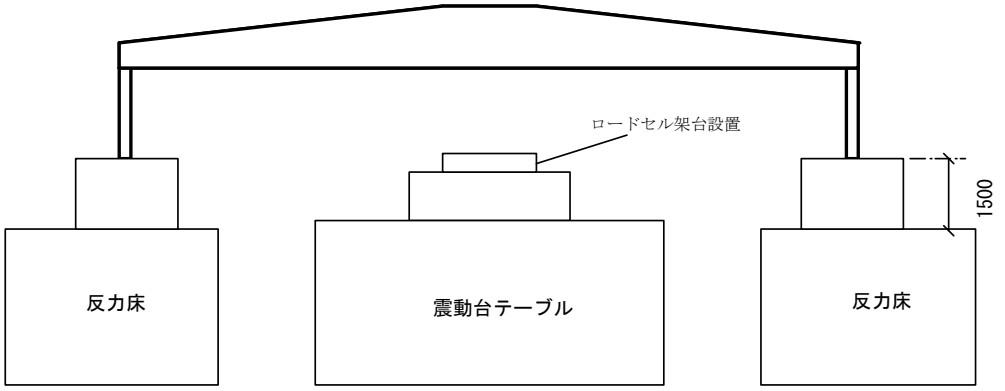
- 主梁と受け梁は固定用ブロックで反力床上に設置する（図 2.1-2)。

留意事項：固定には M48 ボルト（S45C）を使用し、1 箇所あたり 450kN 程度の締付力を導入し、多数繰り返し加振時にブロックに滑りが生じないようにする。

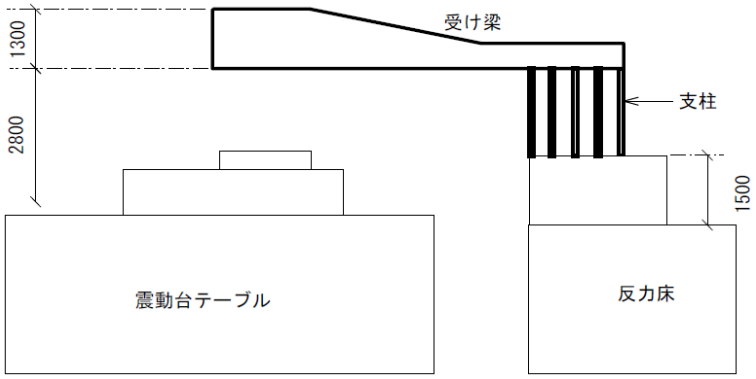
- 試験体下部ブロック上にロードセル架台を設置する。



(a)反力梁平面図



(b)反力梁（主梁方向）



(c)反力梁（受け梁方向）

図 2.1-2　反力梁の設置

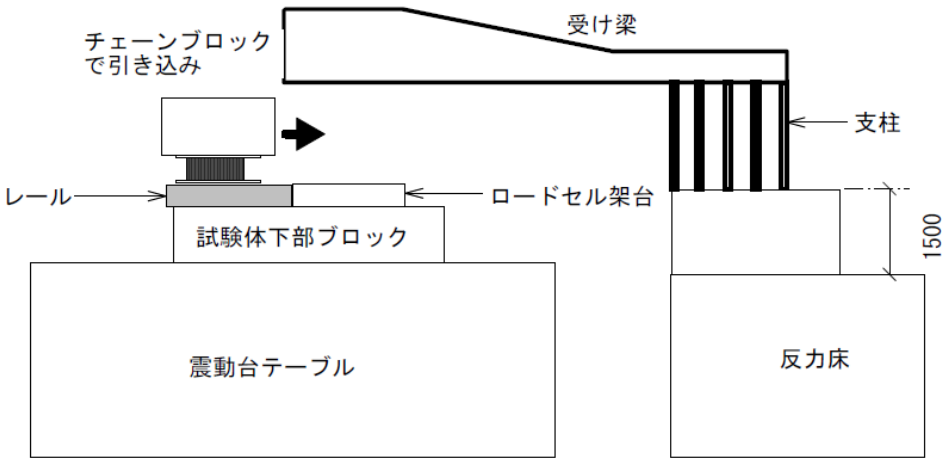
(3) 試験体の設置

③ 試験体下部ブロック上に支承を設置。

支承は予め試験体上部ブロックと固定しておき，クレーンで吊って試験体下部ブロック上へ降ろす．その後，チェーンブロックで反力梁下の所定の位置へ引き込み，試験体下部ブロックのロードセル架台上に固定する（図 2.1-3）。

留意事項：

・ 支承は震動台コーナー部の 3m×2.5m の位置に中心が来るように設置する。



(a) 試験体の引き込み

図 2.1-3　試験体下部ブロック上への支承設置

2.1.3 加力計画

① 震動台を起動し、ならし運転を行う。

・ 試験体上部ブロックと主梁が接触しないように、ならしの変位量とオフセット位置を設定する。震動台は、通常の運用では着座状態から一旦 540mm 上昇させて中立軸位置へセットする必要がある。本実験の加振は、震動台のこの運用に対応するため、オイルダンパー加振時にはロードセル架台を撤去して、加振高さを調整することとした。

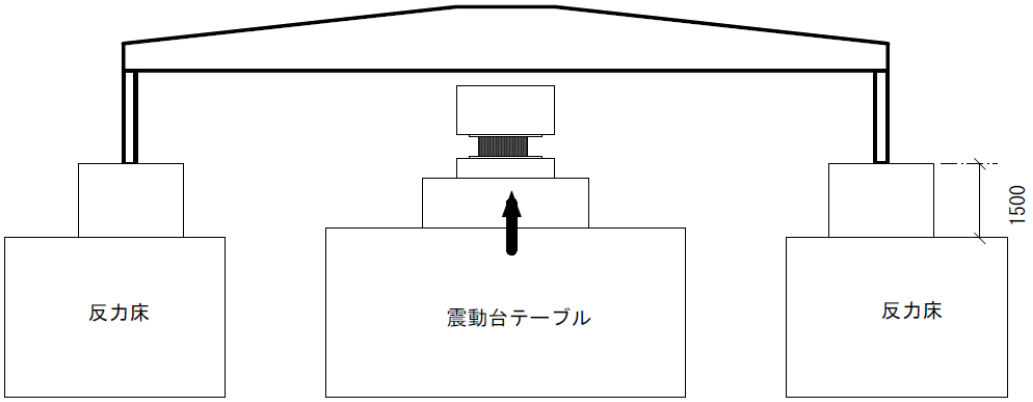
② 震動台をマニュアルで微調整しながら試験体上部ブロックと主梁を密着させる。

・ 震動台を所定の平面位置へ移動後，試験体上部ブロックと主梁が接触する直前位置まで上昇させる（図 2.1-4）。次に、微調整により試験体上部ブロックと主梁下部が密着するまで上昇させる。

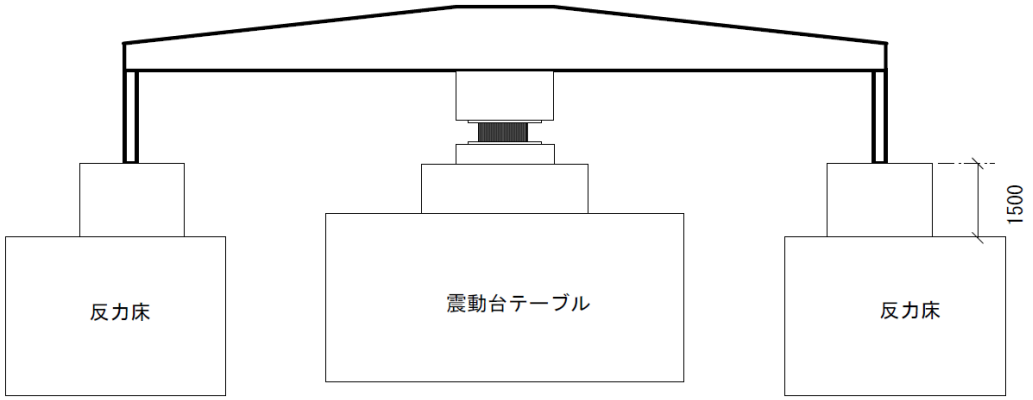
・ 試験体上部ブロックと主梁下部にはコッターを予め溶接しておき、コッター部で密着させる（図 2.1-5(b)）。震動台の平面位置をコッターに対して 2mm 程度以内に納めることを目標とする。

・ 試験体上部ブロックと主梁下部がコッタ―で密着した時点で、押し引き両用の油圧ジャッキにより固定金具を締付けて固定する（図 2.1-5(c)）。加力荷重が大きい受け梁方向から固定金具で固定する（図 2.1-6）。（参考資料 2.5.6）

・ 震動台に過大な傾斜角が生じないように留意する。

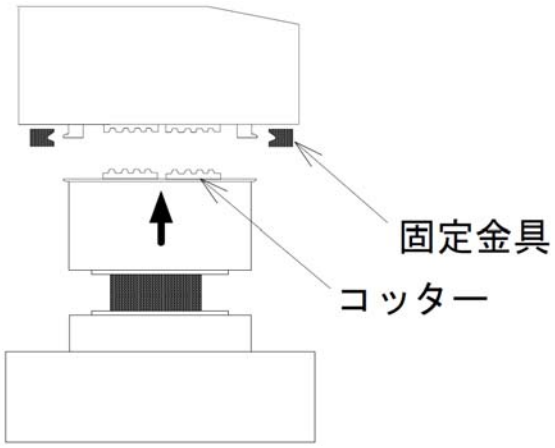


(a) 震動台中立位置

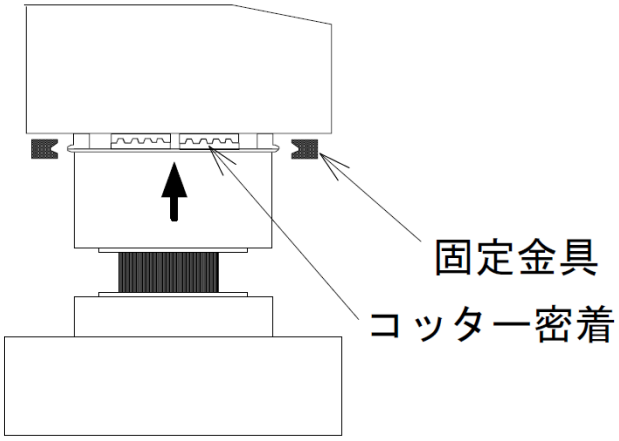


(b) 震動台上昇，コッター部密着

図 2.1-4　震動台の変位制御（試験体下部ブロックと主梁を密着させる）



(a) コッターと固定金具



(b) 震動台上昇とコッター密着

図 2.1-5　試験体下部ブロックと主梁の密着

③ 震動台を上昇させて支承に所定の鉛直軸力を導入する。

留意事項：

- 反力梁の主梁は、5000kN の鉛直軸力を導入した時点で 1/350 程度の傾きが生じることが予測される。このため、震動台を上昇させながら傾斜させるように制御して、固定金具とコッターの密着を保持する。
- 10000kN の鉛直荷重に対して 1.5 倍の安全率を考慮して、主梁は 15000kN 作用時程度まで降伏しないように設計している。ただし、震動台の加振性能としてはこれ以上の荷重が作用する可能性があるので、安全監視レベルを軸力導入前の位置から 50mm 程度以下に設定しておくこととする。

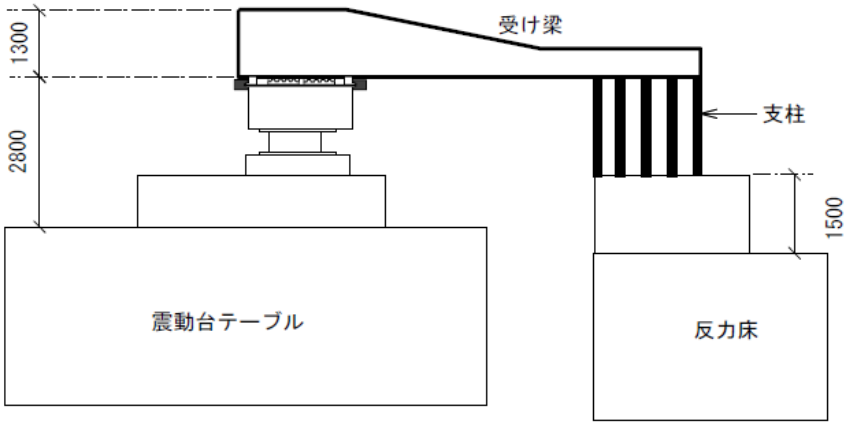


図 2.1-6　固定金具による固定（油圧ジャッキによる遠隔操作）

・ 各試験体が実験できるように加力時の震動台高さを設定する。ダンパーも積層ゴムと同じ固定金具を用いて固定し、加力する。（参考資料 2.5.6）
・ 固定金具や反力梁の損傷を防ぐため、震動台変位の安全監視レベルを適切に設定することとする。
・ 震動台異常停止時には、固定金具を開放することを原則とする。震動台から固定金具の油圧ジャッキの操作盤に信号を送って、弁を開放する。同時に手動によりジャッキの開放動作を開始する。弾性すべり支承の場合は、弾性すべり支承とすべり板の間で縁が切れているため、固定金具の開放は行わないこととする。

④ 弾性すべり支承に所定の鉛直軸力を導入した状態で，水平方向に加振する。

・ 水平方向加振時の震動台の鉛直方向変位を調べるため、無負荷状態、2000kN、5000kN、と必要なステップを踏んで鉛直荷重を増やした場合の影響を最初に調べる。
・ 主梁方向の水平 1 方向正弦波加振を優先する。
・ 2 方向加振は、円軌道で設定する。
・ 長周期地震動模擬波による免震建築物応答波についても加振を行う。

⑤ 試験体入替え作業

・ 主梁と試験体上部ブロックの固定金具を取外す（遠隔操作）。
・ 震動台を徐々に下降させて停止させる。
・ 試験体とロードセル架台の固定を解除し，試験体をチェーンブロックにより下部試験体ブロック上を引張り移動させて，クレーンにより撤去する。

2.1.4 安全上の留意点整理

表 2.1-1 に安全に関わる事項のまとめを示す。

表 2.1-1 に安全に関わる事項のまとめ

作業手順	作業内容	留意点	対応
（1）試験体下部ブロックの設置	① 震動台上への試験体下部ブロック設置	・震動台テーブルへの過大な集中荷重。 ・試験体の滑り。	・試験体下部ブロックと締付けボルト本数を適切に設定。 ・加力時に滑りが生じないようにボルト締付け力と本数を設定。
（2）反力梁の設置	②主梁と受け梁の架設	・加振時の滑り.	・加振時に滑りが生じないようにボルト締付け力と本数を設定。 鉛直軸力10000kN導入時に、反力梁の柱が若干滑る可能性あり。
（3）試験体の設置	③試験体下部ブロック上に支承を設置	・震動台コーナー部の上下加力性能.	・支承は震動台コーナー部の3m×2.5mの位置に中心が来るように設置。
（4）加振準備（震動台起動）	④震動台の起動時ならし運転	・反力との接触。	・ならしの変位量と中立点を適切に設定（上下は着座位置から最低30mm以上）。
	⑤震動台を変位制御して、試験体上部ブロックと主梁を密着	・震動台上昇時の異常。	・震動台変位の安全監視レベルを水平方向は試験体上部ブロックと固定金具が接触しない範囲に設定。上下方向は、試験体上部ブロックが主梁に密着後、60mm程度になるよう設定。 （10000kN作用時に40mm程度変形するように主梁を設計） ・10000kNの鉛直荷重に対して、主梁は15000kN作用時程度まで降伏しないように設計する。 ・震動台に過大な傾斜角が生じないように留意。
	⑥震動台を上昇させて支承に所定の鉛直軸力を導入。	・震動台の異常。	・コッター部が外れて震動台が下降。
	⑦主梁と試験体上部ブロックの固定（遠隔作業）	・震動台の異常。 ・アクチュエータの油漏れ。	・油圧ジャッキにより固定金具を遠隔固定。（震動台に異常が発生して下降した際は、積層ゴム部分で引張り破断させる。積層ゴムの引張り破断荷重は2355kN程度と想定される） ・水平方向の油圧アクチュエータが設置されていない側に試験体を設置。
（5）震動台加振	⑨ 震動台による水平加振	・繰返し加振時の震動台異常モード ・繰返し加振時の上下変位変動	・水平2方向動的加振振幅は，X，Y各方向±40cm（せん断歪で200%）程度以下に設定。 ・震動台変位の安全監視レベルを適切に設定。 ・予備加振を行い、水平加振に伴う上下方向変位の変動を測定し、必要に応じて上下方向変位の変動をキャンセルするための補償波加振を行う。
		・破断試験時の試験体破断	・破断時の震動台への作用力を評価しておく。 ・水平方向の安全監視レベルを通常加振時用に設定し、受け梁方向（主梁と直交方向）に±90cm程度の漸増加振を行う。 ・試験体の破片が周囲に飛散するのを防ぐため，防護パネルを試験体周囲に設置。
（6）試験体入替え作業	⑩ 主梁と試験体上部ブロックの固定金具解除（遠隔作業）	・固定金具が外れない	・押し引き両用ジャッキを使用する。 ・万一に備えて、震動台外から金具を引張れるような手段（チェーンブロック等）も検討する。
	⑪ 震動台を徐々に下降させて停止		
	⑫ 試験体とロードセル架台の固定を解除。クレーンにより撤去		

2.1.5　計測計画

試験体、加力治具、震動台について、変位、加速度、荷重、歪み、温度のデータを計測する。E-ディフェンスの収録システムと、一部のデータについては、別系統のシステムで収録する（合計 286ch.)。別系統のシステムでは計測データのリアルタイムのモニタリングを行い、加力準備時の震動台変位制御の判断に使用し、加振中の試験体応答が把握出来るように配慮する。図 2.1-7 にデータ収録系統図を示す（参考資料 2.5.7)。

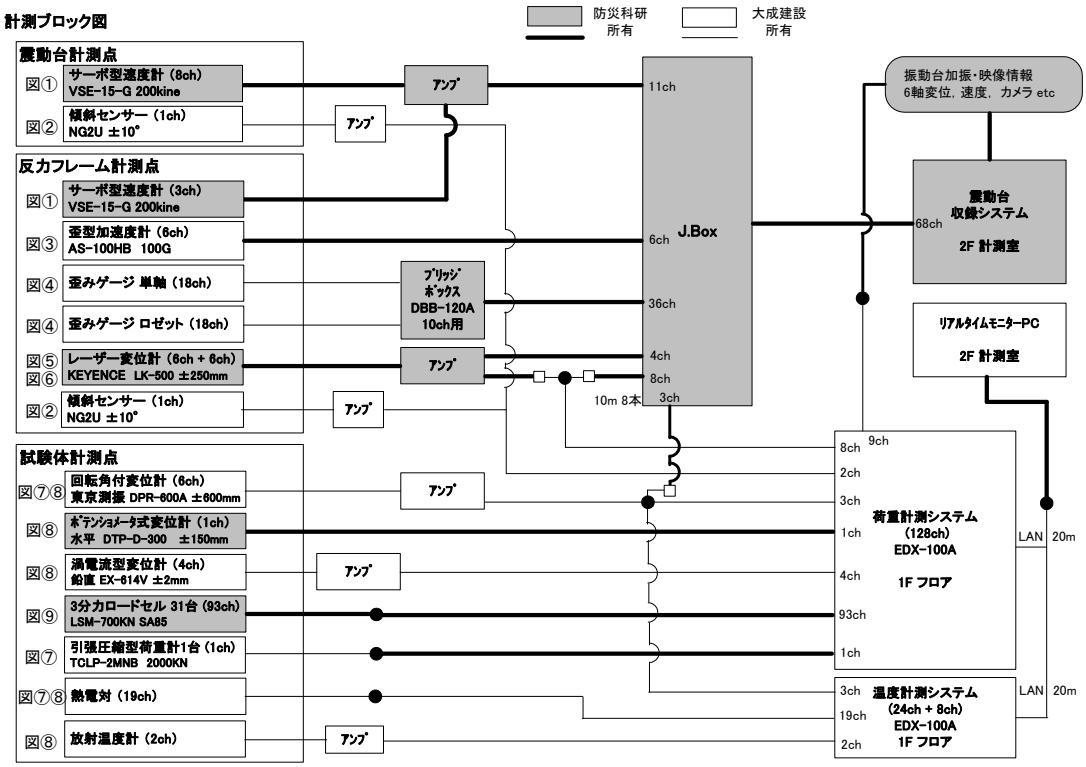


図 2.1-7 震動台収録システム系統図

2.1.6　防護計画

試験体の破断に備えて、計測と固定金具用の油圧ジャッキ制御を行う場所と震動台間をポリカーボネード製の防護壁で遮る計画とする。

2.1.7 実験方法

軸力変動を出来るだけ小さくするため、震動台水平加力時の上下変位をキャンセルするように加振波を作成する。実際には、無負荷時に震動台を水平方向に加振し、その時に生じた震動台上下変位を計測し、計測変位波形を逆位相で作用させるようにして補償波を作成した。

震動台の加振波は、震動台中央上面位置の運動で定義されている。加振波は、支承中心位置における（震動台コーナー部の 3m×2.5m の位置に中心が来るように設置）運動で定義する。従って、支承に対する加振波を作成し、震動台を剛体と仮定して支承中心位置の加振波を震動台中央事情面位置における加振波へ座標変換する。座標変換の基礎式を参考資料 2.5.8 に、補償波の作成例を参考資料 2.5.9 に示す。

１）弾性すべり支承（高摩擦）

試験項目は基本特性試験および多数回繰り返し加振試験（長周期 3A）、地震応答波加振試験の 3 項目である。基本特性試験では、出荷検査と同等の条件で、試験前の「前基本特性」、多数回繰り返し直後の「直後基本特性」、冷却後の「後基本特性」を実施する。

多数回繰り返し加振試験は、正弦波（周期 4 秒）の連続加振とすることが目標であるが、予め無負荷状態で確認された震動台の連続加振能力の制約（振幅±40cm の場合で 5 サイクル）から、正弦波 5 サイクル毎にアキュムレータ蓄圧のためのインターバル（所用時間約 2 分）を設ける。すなわち、長周期 3A（累積変形 50m）条件では、5 サイクル×7 セットの加振を実施する。

支承は、高温用断熱板（ｔ＝10mm，日本 D.M.E 製）を介して、加力治具の試験体固定ブロックに取り付ける。

表 2.1-2 に試験条件の詳細と試験ケースを示す。

２）オイルダンパー

試験項目は基本特性試験および多数回繰り返し加振試験（長周期 3A）、大速度試験の 3 項目である。基本特性試験では、出荷検査と同等の条件で、試験前の「前基本特性」、多数回繰り返し直後の「直後基本特性」、冷却後の「後基本特性」を実施する。

多数回繰り返し加振試験は、正弦波（周期 4 秒）の連続加振とすることが目標であるが、予め無負荷状態で確認された震動台の連続加振能力の制約（振幅±40cm の場合で 5 サイクル）から、正弦波 5 サイクル毎にアキュムレータ蓄圧のためのインターバル（所用時間約 2 分）を設ける。すなわち、長周期 3A（累積変形 50m）条件では、4 サイクル×8 セットの加振を実施する。

ダンパーは、高温用断熱板（ｔ＝10mm，日本 D.M.E 製）を介して、加力治具の試験体固定ブロックに取り付ける。

表 2.1-3 に試験条件の詳細と試験ケースを示す。

表 2.1-2　試験条件と試験ケース：弾性すべり支承（高摩擦）

実施日.	ｹｰｽ	試験条件	面圧 (N/mm^2)	周期 (s)	変位 (mm)	ｻｲｸﾙ (回)	ｲﾝﾀｰﾊﾞﾙ (回)	累積変形 (m)	備考（加振波名称）
1 月 31 日		(前)基本特性	10	4	u:100	4	-	1.6	初期基本特性の確認 U1-SL4Z
		地震応答（1 方向）－１		-	u:110	-	-	13.0	U1-E-aic003L
		地震応答（1 方向）－２			u:191			13.2	U1-E-szo024L
	3A	**長周期（1 方向）**		**4**	**u: 400**	**35(5×7)**	**6**	**56.0**	U1-SL5Z
		(直後)基本特性		4	u:100	4	-	1.6	繰返し直後の基本特性の確認 U1-SL4Z
		冷却							
2 月 1 日		(前)基本特性	10	4	u: 100	4	-	1.6	冷却後基本特性の確認 U1-SL4Z
		地震応答（２方向）		-	u [EW]: 102 v [NS]: 85	-	-	1.7	UV1-E-aiL
	3A’	**長周期（２方向）－１**		**4**	**u:255** **v: 255**	**35(5×7)**	**6**	**56.0**	UV1-SL5M π/2 位相差（円軌道）
	3A’	**長周期（２方向）－２**		**4**	**u:255** **v: 255**	**35(5×7)**	**6**	**56.0**	UV1-SL5M π/2 位相差（円軌道）
		(直後)基本特性		4	u:100	4	-	1.6	繰返し直後の基本特性の確認 U1-SL4Z
		(後)基本特性		4	u:100	4	-	1.6	U1-SL4Z

表 2.1-3　試験条件と試験ケース：オイルダンパー

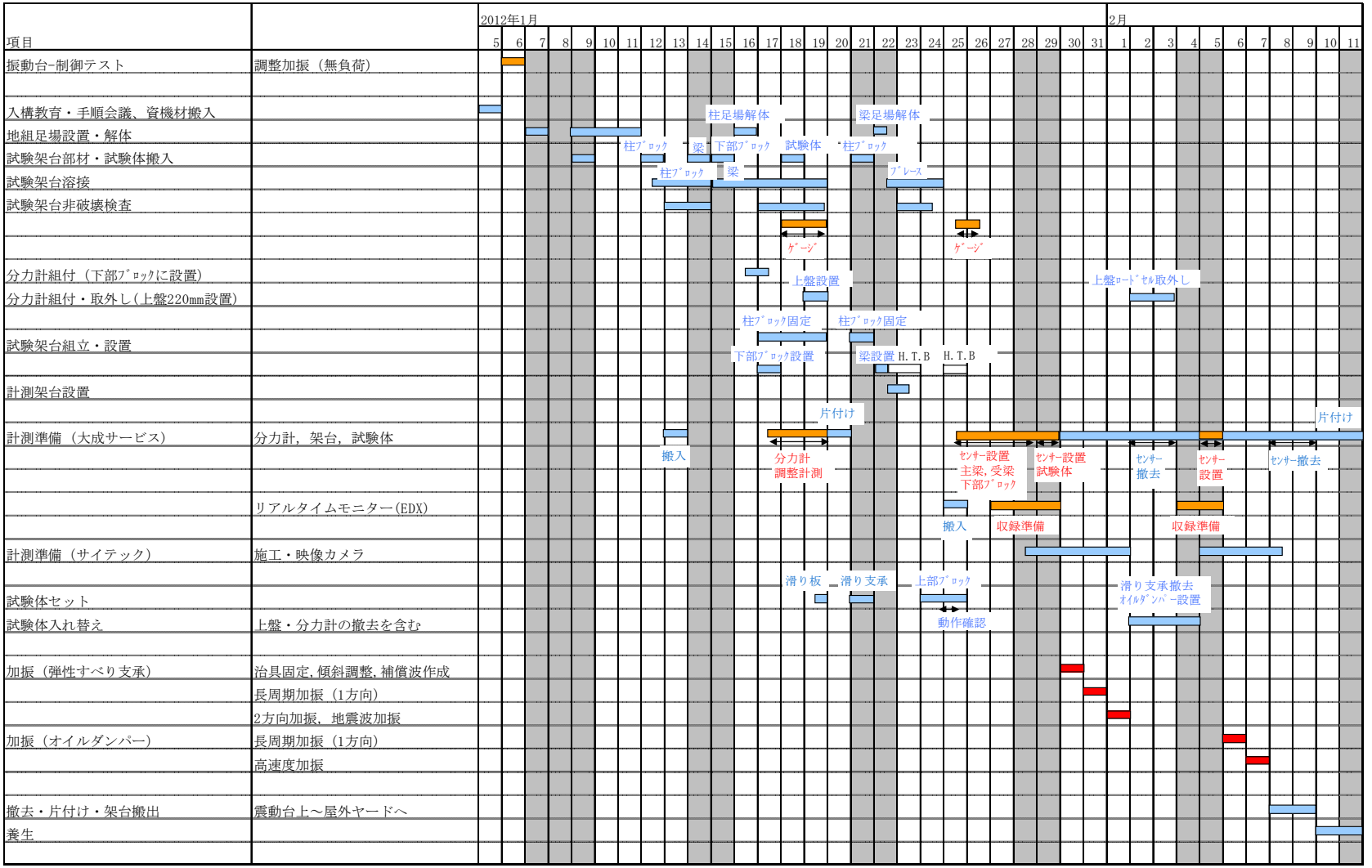
	ｹｰｽ	試験項目	周期 (s)	変位 (mm)	速度 (cm/s)	ｻｲｸﾙ （回）	ｲﾝﾀｰﾊﾞﾙ (回)	累積変形 (m)	備考
2 月 6 日		(前)基本特性	4	159	25	2	-	1.3	初期基本特性の確認 V0-SL2
	3A	**長周期（1 方向）－1**	**4**	**400**	**62.8**	**32(4×8)** *2	**7**	**51.2***2	V0-SL4M
	3A	**長周期（1 方向）－2**	**4**	**400**	**62.8**	**32(4×8)** *2	**7**	**51.2***2	V0-SL4M
		(直後)基本特性	4	159	25	2	-	1.3	繰返し直後の基本特性の確認 V0-SL2
		冷却							
2 月 7 日		(前)基本特性	4	159	25	2	-	1.3	冷却後基本特性の確認 V0-SL2
		地震応答（1 方向）－１		u:110	-		-	13.0	U1-E-aic003L
		地震応答（1 方向）－２		u:191			-	13.2	U1-E-szo024L
	4	**大速度試験－1**	**2.5**	**300**	**75**	**2**	**-**	1.2	V0-SR2M（50.0%）
	4	**大速度試験－2**	**2.5**	**400**	**100**	**2**	**-**	1.6	V0-SR2M（66.6%）
	4	**大速度試験－3**	**2.5**	**500**	**125**	**2**	**-**	2.0	V0-SR2M（83.3%）
	4	**大速度試験－4**	**2.5**	**600**	**150**	**2**	**-**	2.4	V0-SR2M（100.0%）
		(直後)基本特性	4	159	25	2	-	1.3	大速度直後の基本特性の確認 V0-SL2

*1　Δt=0.01s（他ケースは全て 0.02s）、*2　オイルダンパーについては，油温が 100℃を超えた（限界状態に達した）場合，加振を終了する

2.1.8 実験スケジュール

表 2.1-4 に E-ディフェンスでの実験スケジュールを示す。

表 2.1-4　E-ディフェンスでの実験スケジュール



2.2 実験手法の検証

2.2.1 免震部材への鉛直軸力導入

本実験では、各ロードセルに加わる荷重が許容荷重（700kN）を越えないようにするため、ロードセル取付時の初期荷重分布を静歪として計測しておき、加力時の軸力とせん断力は動歪として計測した。加力時にロードセルに加わる荷重が許容値を越えていないことの確認は、静歪と動歪の和から評価した。

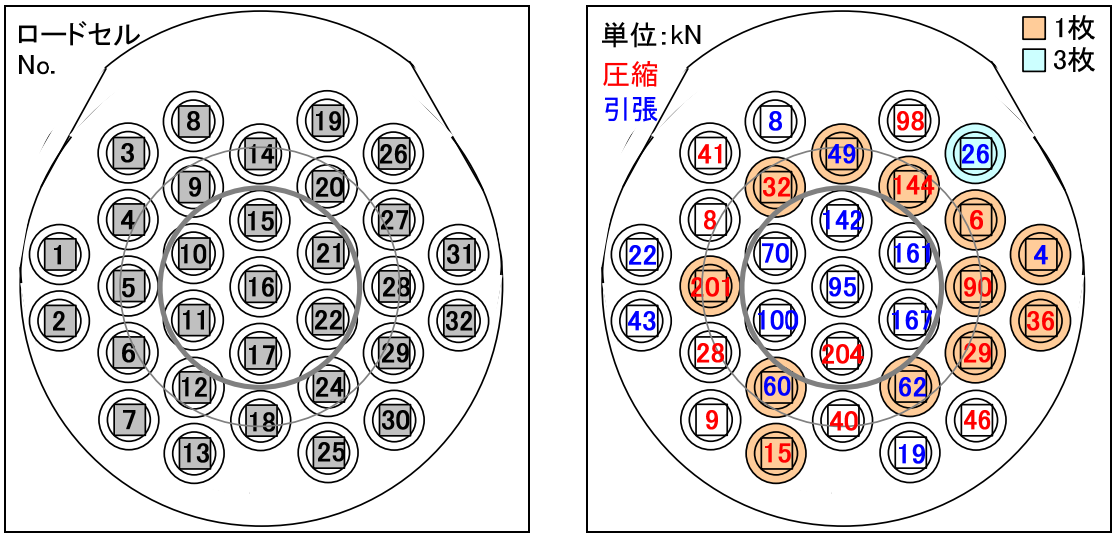
(1)初期荷重分布の計測

以下の手順でロードセルを取付けて、静歪を計測した。

① ロードセルを下部ブロックに締付け
② 静歪の計測
③ 感圧紙をロードセル上に設置。
④ 上部ブロックの設置と静歪の計測。感圧紙の色変化確認。
⑤ トレッシングペーパー（0.02mm）設置による荷重分担の調整。
⑥ 上部ブロックの締付けと静歪の計測

初期軸力の計測結果を図 2.2-1 に示す。ロードセルに 700kN の鉛直載荷をした時の変形はメーカー規格によれば 0.05mm であり、0.02mm のトレッシングペーパーを置くことでロードセルの荷重分布が、実際に変化することを確認した。上部ブロックを締付ける前に出来るだけロードセルの静歪分布にばらつきが生じないように調整したが、上部ブロックを締付けると上部ブロックの 220mm 鋼板の弾性変形によりロードセルの荷重分布にばらつきが生じた。

図 2.1.1 に示す通り、圧縮最大荷重は No.17 のロードセルで 204kN、引張最大荷重は No.15 のロードセルで 142kN となった。



(a)ロードセル配置　　(b)取付完了時の荷重分布

図 2.2-1　初期軸力の計測結果

(2)軸力導入時と水平加力時の計測

以下の手順で軸力を導入して、水平加力を行った。軸力導入前にロードセルのバランスを取り、以後の軸力とせん断力を動歪として計測した。

① 震動台着座状態から中立軸位置（+540mm）へ上昇
② 震動台降下（+350mm）、ならし加振（水平±500mm、上下 50mm）
③ 中立軸位置へ上昇。以後、ここを原点（0、0、0）として震動台変位を制御。
④ 震動台水平位置の修正（X：35mm、Y：22mm）
⑤ コッター噛合い位置まで上昇
⑥ コッター密着レベルまで小刻みに上昇
⑦ コッター密着をロードセル荷重変化で確認。ジャッキで遠隔固定。
⑧ 水平加力

震動台を上昇させて免震部材に所定の軸力が入っている事と、ロードセルの許容荷重を越えていない事を、図 2.1-7 に示したリアルタイムモニターで載荷中のロードセル荷重をモニターした。リアルタイムモニターによる確認状況の例を写真 2.2-1 に示す。

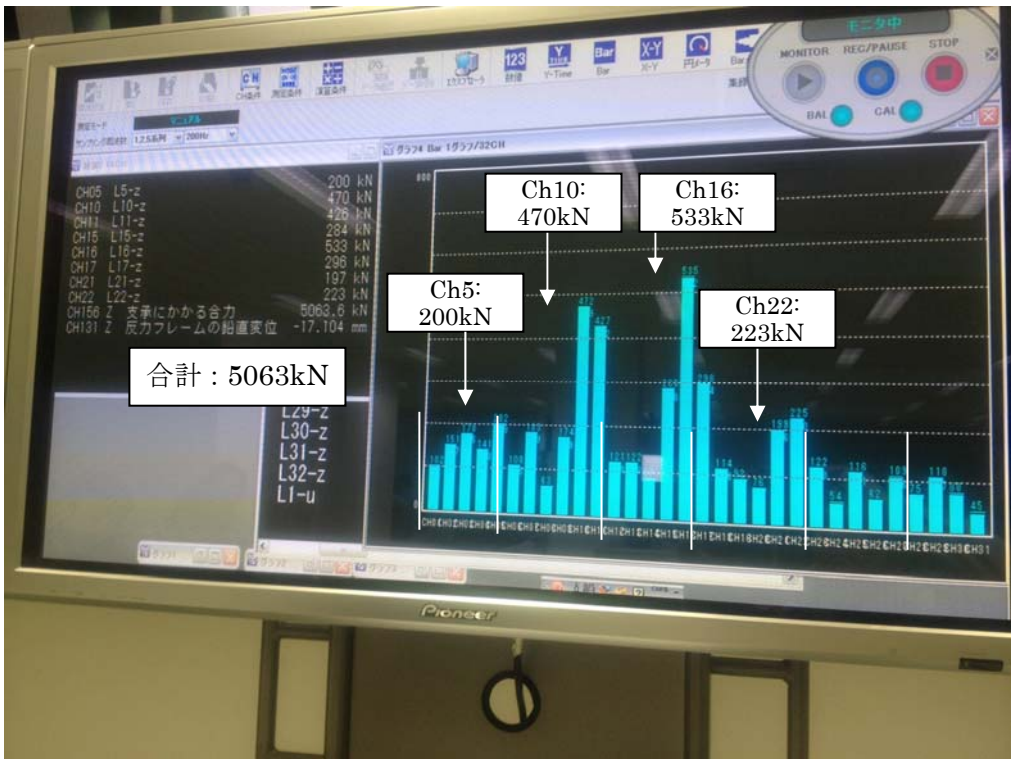
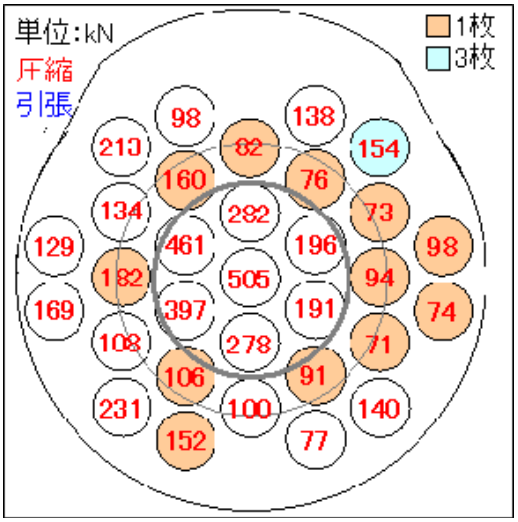
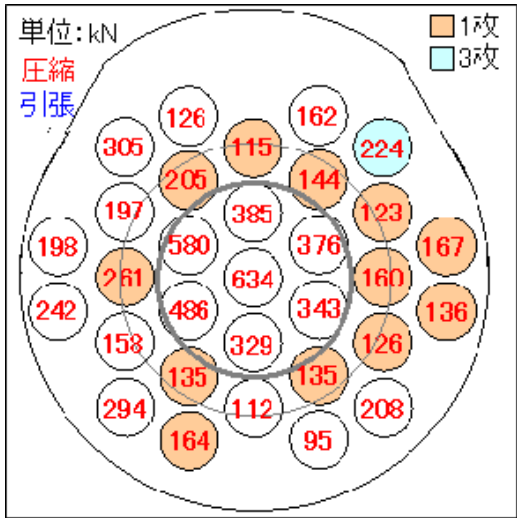


写真 2.2-1　5000kN 軸力導入時のリアルタイムモニター確認状況

5000kN 軸力導入時と主梁方向水平加力時（±400mm）のロードセルの荷重分布を図 2.2-2 に示す。中央部の No.16 のロードセルに最も大きな荷重が作用している。No.17 のロードセルの荷重が先行して増大することが懸念されたが、対称な位置にある No.17 と No.15 のロードセル荷重はほぼ同じ大きさで増加している。ロードセルを上部ブロックにしっかりと締付けて固定すると、場所により圧縮と引張が発生したが、ロードセルが一様に荷重分担していると考えて載荷時の荷重増分を考えることが出来るようである。



(c)5000kN 軸力導入時の荷重分布



(d)水平加力時の最大荷重

図 2.2-2　5000kN 軸力導入時と主梁方向水平加力時（±400mm）のロードセルの荷重分布

(3)軸力解放の手順は以下の通りである。

① ロードセル荷重が解放されるコッター密着レベルまで震動台を降下。

② ジャッキ解放。

③ 震動台を中立位置へ降下。

④ 着座状態へ。震動台停止。

2.2.2 加力波形と加力精度

2.2.2.1 加力波形の作成

2.1.7 でも触れた通り、震動台は震動台上面中央位置の 6 自由度変位（x、y、z、θ_x、θ_y、θ_z）で制御される。一方、試験体の加力は、震動台コーナー部から 3.5m×2ｍの設置位置において実施される。そこで、試験体への加力波形を試験体設置位置において作成し、震動台を剛体とみなした座標変換により震動台上面中央位置における加力波形を作成して震動台の目標加力波形とした。

震動台を上昇させて免震部材に軸力を導入すると、受梁方向に傾斜するため、震動台を傾斜させて免震部材に加わる面圧を均一化する必要がある。主梁方向に加力する場合は、震動台の鉛直位置を保った状態で傾斜角と直交方向に加力を行えば良いが、受梁方向に加力する場合は傾斜面に沿って震動台変位を制御する必要がある。

加力波形の作成にあたっては、先ず無負荷時に目標加力波形を用いた加振を行い、目標加力波形に対する震動台応答波形の誤差を評価して、誤差が小さくなるように補償波を作成した。補償波の作成方法としては、目標波形と応答波形の逆伝達関数を用いる震動台の入力補償機能を利用する方法と、誤差波形の逆位相波を用いて誤差のキャンセルを試みる方法と、２種類の方法を試した。逆位相波形を用いる方法が簡便かつ有効であることが判明したので、この方法を採用することにした。

水平方向の加振波形については、目標加力波形と応答波形には殆ど誤差が見られなかったので、上下方向加力波形について逆位相波による補償を行った。

2.2.2.2　加力波形の精度

図 2.2-3 に周期 4 秒で試験体位置での主梁方向振幅が±400mm の正弦波を目標波形とした場合について、無負荷時の震動台応答波形（0MN 補償無）と、上下方向逆位相波による補償時震動台応答波形（0MN 補償有）、及び無負荷時に作成した補償波による 5MN 軸力導入時の震動台応答波形（5MN 補償有）を目標波形と比較して示す。

水平方向については、目標波形と応答波形は最初に若干の時間ずれが見られるがほぼ一致している。上下方向については、無負荷時に水平方向加振周期の 1/2 の周期の誤差成分が見られる。誤差振幅は最大で 2.2mm 程度である。逆位相波による補償時の震動台応答波形では、初期の誤差振幅は 1.4mm 程度に、それ以後の誤差振幅は 0.5mm 程度に抑制されており逆位相波形による補償が有効であることがわかる。更に、無負荷時に作成した補償波形を用いて 5MN 軸力導入時に加力を行ったが、上下方向の誤差振幅は無負荷時とほぼ同等であった。無負荷時に補償波形を作成して、軸力導入時に用いる方法が有効であることがわかる。

図 2.2-4 に試験体位置における震動台上下変位とそれに伴うフレーム変位と軸力変動を示す。5000kN の軸力に対して加力初期に 500kN 程度の変動が見られるが、それ以後は 200kN 程度以内の軸力変動に収まっており、精度の高い加振が実現出来ている。

図 2.2-5 に試験体位置における、震動台の主梁方向加力変位と、フレーム変位及び U 方向のせん断荷重を示す。フレーム変形も小さく、目標通り主梁方向に±400mm の加力が実現出来ている。

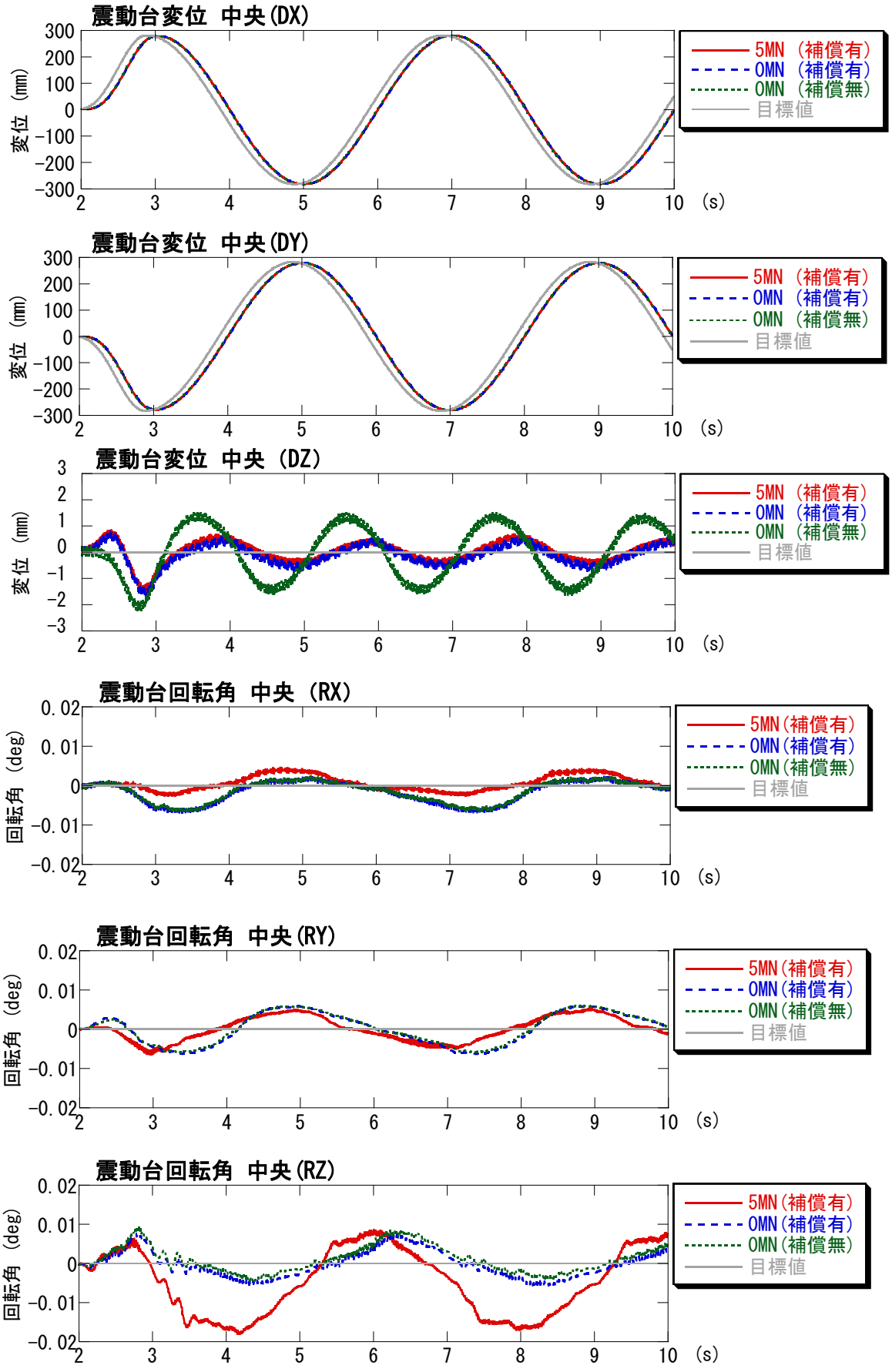


図 2.2-3　震動台応答波の比較（震動台中央位置）

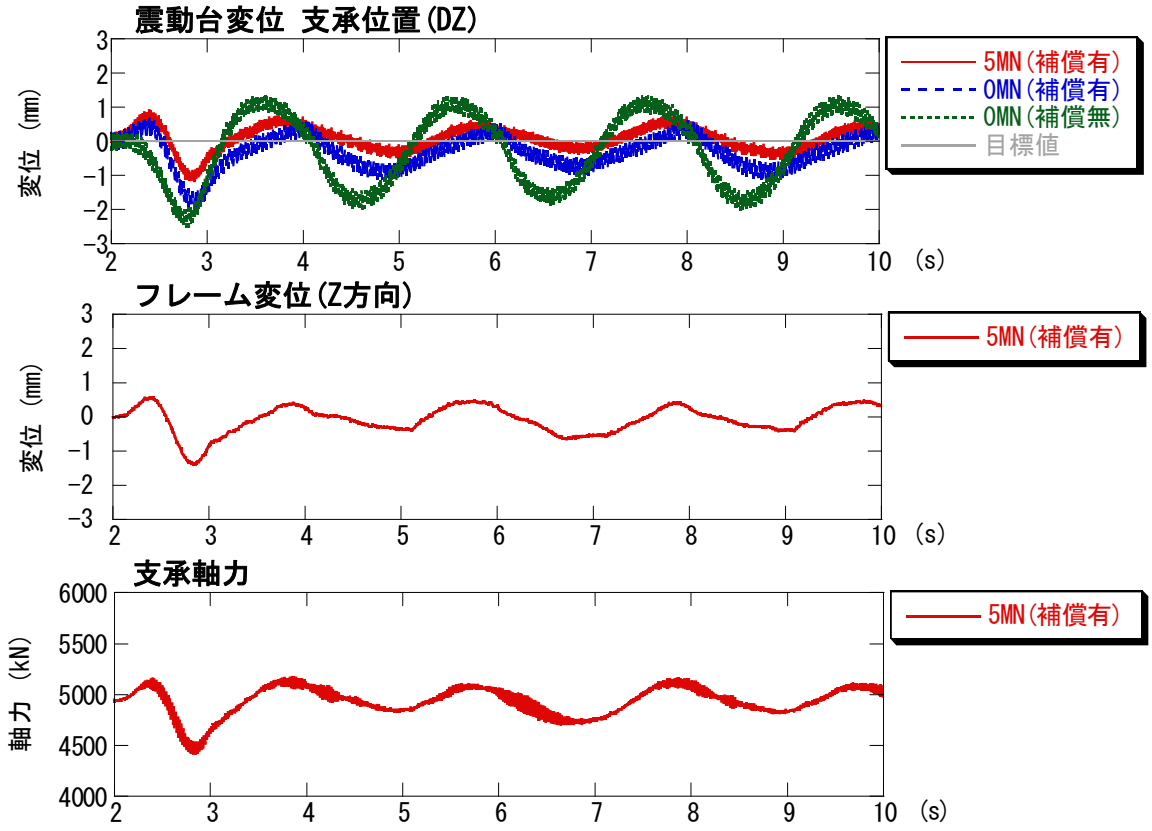


図 2.2-4　支承設置位置の波形比較（Z 方向）

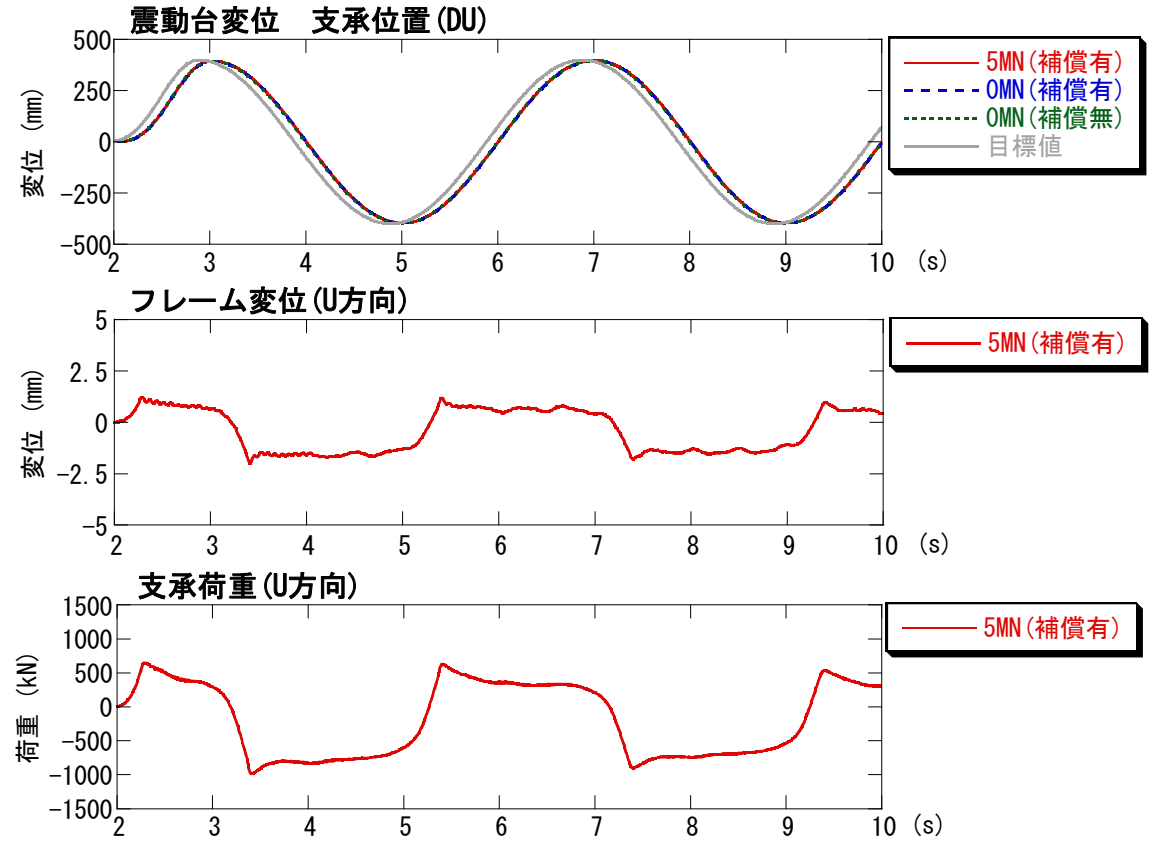


図 2.2-5　支承位置の波形比較（U 方向）

2.2.3 加力治具の性能

加力実験時の震動台傾斜角と、反力フレームの変形・傾斜角、及び主梁脚部固定ブロックの変位をまとめて、軸力導入時の結果を表 2.2-1 に、水平加力時の結果を表 2.2-2 に示す。

表 2.2-1 に示す通り、5MN 軸力導入時の主梁フレームの上下変形は 17.4mm、受梁方向（主梁 U 軸回り）の傾斜角は 1/588 であった。この時に、震動台の U 軸回りの傾斜を 1/769 に制御して支承面圧の均一化を行った。受梁軸回りには殆ど回転していない。主梁脚部固定ブロックは、片側ブロックが最大で 5.4mm 程度変位した。これは、固定ブロックを反力床に固定する際に、反力床の固定ボルト用穴位置が一部ずれていたためにボルト固定が出来ず固定度が低かったためと思われる。

表 2.2-2 には、弾性すべり支承の主梁（U）方向の長周期繰り返し加振、同じく２方向（UV）長周期繰り返し加振、オイルダンパーの長周期繰り返し加振時の結果を示している。変動成分は小さく、反力フレームとして充分な性能を発揮していることがわかる。

参考資料 2.5.10 に、実験時の反力フレーム各部に取付けた歪ゲージ(参考資料 2.5.7 参照)から、応力を評価した結果を示す。主梁方向の長周期繰り返し加振時に主梁端部で最大の応力が発生しているが、長期許容応力に対する比率は 0.73 であり、反力フレームは充分な性能を有していることがわかる。

表 2.2-1 軸力導入時の加力治具変形

載荷ケース	フレーム			柱ブロック		震動台	
	Z方向変位(mm)	U軸廻り傾斜	V軸廻り傾斜	Block1 U方向変位(mm)	Block2 U方向変位(mm)	U軸廻り傾斜	V軸廻り傾斜
1MN鉛直載荷	3.1	1/2491	1/10409	0.1	0.0	1/205541	1/398486
2MN鉛直載荷	6.4	1/1426	1/6639	0.6	0.1	1/62598	1/793273
3MN鉛直載荷	9.9	1/1085	1/7149	2.6	0.1	1/476554	1/353082
4MN鉛直載荷	14.4	1/714	1/4900	4.9	0.1	1/3121	1/264964
5MN鉛直載荷	17.4	1/588	1/3504	5.4	0.2	1/769	1/242412

表 2.2-2 水平加力時の加力治具変形（変動成分）

加振ケース	フレーム					ブロック			
	Z方向変位(mm)	U方向変位(mm)	V方向変位(mm)	U軸まわり傾き	V軸まわり傾き	1-U方向変位(mm)	2-U方向変位(mm)	3-X方向変位(mm)	3-Y方向変位(mm)
5MN鉛直載荷＋長周期繰り返し加振（U方向1MN）	0.8	1.2	0.3	1/7524	1/3773	0.1	0.1	0.0	0.0
5MN鉛直載荷＋長周期繰り返し加振（UV方向0.75MN）	0.6	1.3	0.8	1/3075	1/5574	0.1	0.1	0.1	0.1
オイル長周期繰り返し加振（V方向１MN）	0.4	0.1	0.9	1/3690	1/7662	0.0	0.0	0.0	0.2

2.3 実験結果

2.3.1 弾性すべり支承（高摩擦）

(1) はじめに

第Ⅲ部 1.3.4 において実施した、弾性すべり支承（高摩擦）の縮小試験体（Φ300）による長振幅高速繰り返し試験では、累積変形 100m までの多数回繰り返しに対する載荷試験を通じて、繰り返しによる摩擦特性の低下傾向やインターバル時の摩擦係数の復帰傾向がみられること、摩擦による発熱ですべり面を中心に温度が 280℃程度まで上昇することが確認された。

本章では、すべりに伴う発熱・放熱環境や累積エネルギーの上昇速度をより現実に近い状態で再現し、摩擦特性の変化や温度上昇、スケール効果を把握することを目的として、Eーディフェンスの大型震動台を用いて実大試験体（Φ800）の長振幅高速繰り返し試験を実施した結果を示す。

試験で確認する項目は以下の通りである。

① 多数回繰り返しに対する摩擦特性の変化
② 多数回繰り返しに対する試験体の温度変化
③ 多数回繰り返しに対する耐久性能

試験日時：

2012 年 1 月 30 日：軸力導入テスト、加振テスト
2012 年 1 月 31 日：地震応答波試験（1 方向）、長周期（1 方向）（累積変形 50m）試験
2012 年 2 月 1 日：地震応答波試験（2 方向）、長周期（2 方向）（累積変形 50m×2）試験

試験場所：

独立行政法人　防災科学研究所　兵庫耐震工学研究センター（E ディフェンス）

(2) 試験体

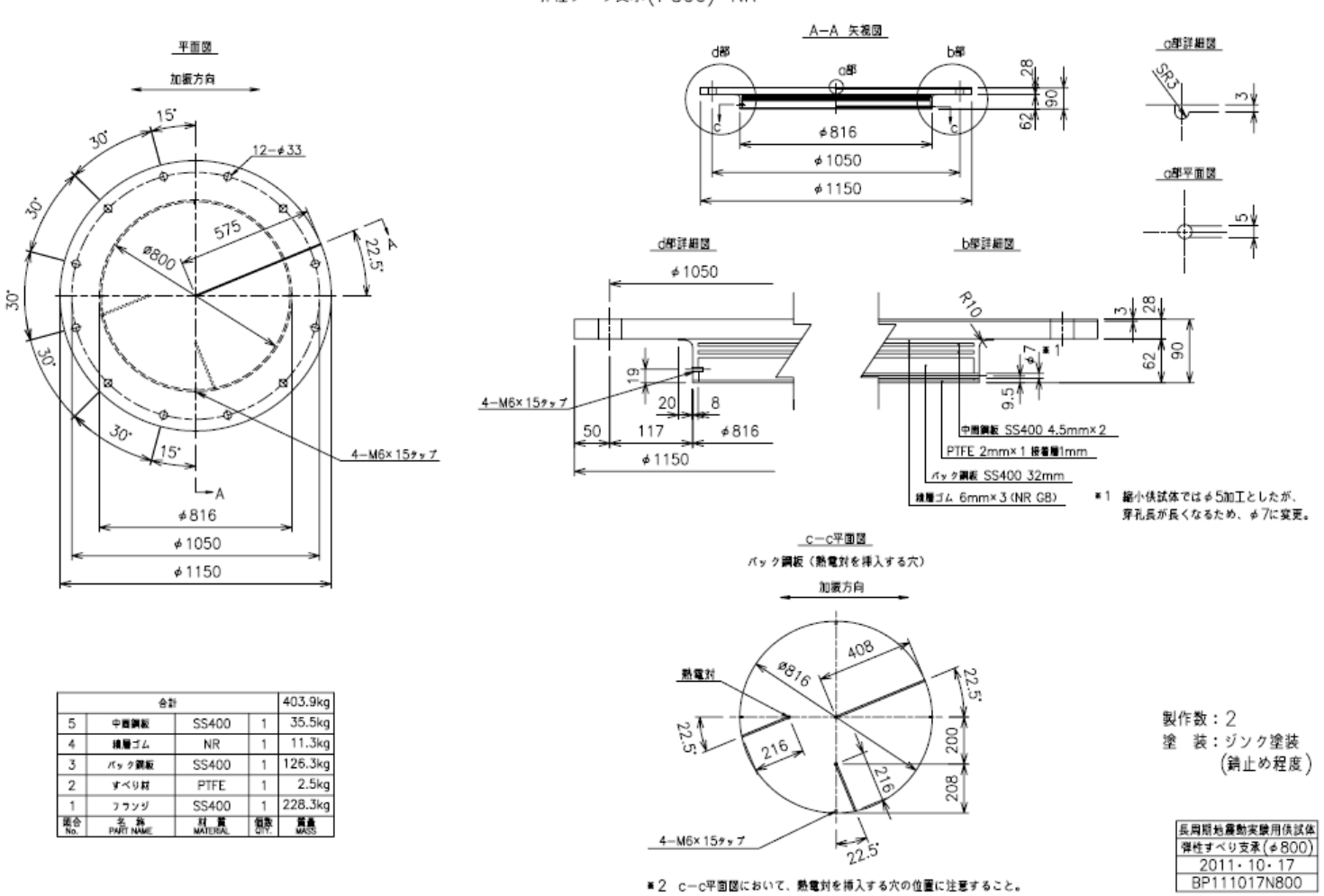
支承は実大サイズとして、外径Φ800（NR ゴム、東京ﾌｧﾌﾞﾘｯｸ製）の支承を 2 体（予備 1 体を含む）、すべり板を 1 枚製作した。

弾性すべり支承のゴム層厚は 2.5mm、ゴム層数は 3 層、基準面圧は 20N/mm^2 である。バック鋼板部とフランジ上面には、温度計測用の熱電対を配線するための溝が設けられている。

すべり板は、6mm 厚の SUS 板（SUS304 製）が母材となる 25mm 厚の鋼材（SS400 製）に周辺部の固定ボルトにより固定されている。母材の鋼材には、裏面温度計測用の熱電対を配線するための溝が、温度計測点部分では板厚方向の貫通穴が設けられており、SUS 板の温度を裏面から直接測定できる構造となっている。

試験体の設置状況を写真 2.3.1-1 に、弾性すべり支承試験体およびすべり板の図面を図 2.3.1-1、図 2.3.1-2 に、試験体諸元を表 2.3.1-1 に示す。

なお、断熱材として標準高温用断熱板（D-M-E 双葉、10mm 厚）を用い、試験体固定プレートと支承フランジの間、すべり板と上部ブロックの間に設置した。断熱板の仕様を表 2.3.1-2 に示す。



合計				403.9kg
5	中間鋼板	SS400	1	35.5kg
4	積層ゴム	NR	1	11.3kg
3	バック鋼板	SS400	1	126.3kg
2	すべり材	PTFE	1	2.5kg
1	フランジ	SS400	1	228.3kg
図番 No.	名称 PART NAME	材質 MATERIAL	個数 QTY.	質量 MASS

図 2.3.1-1　弾性すべり支承（高摩擦）φ８００

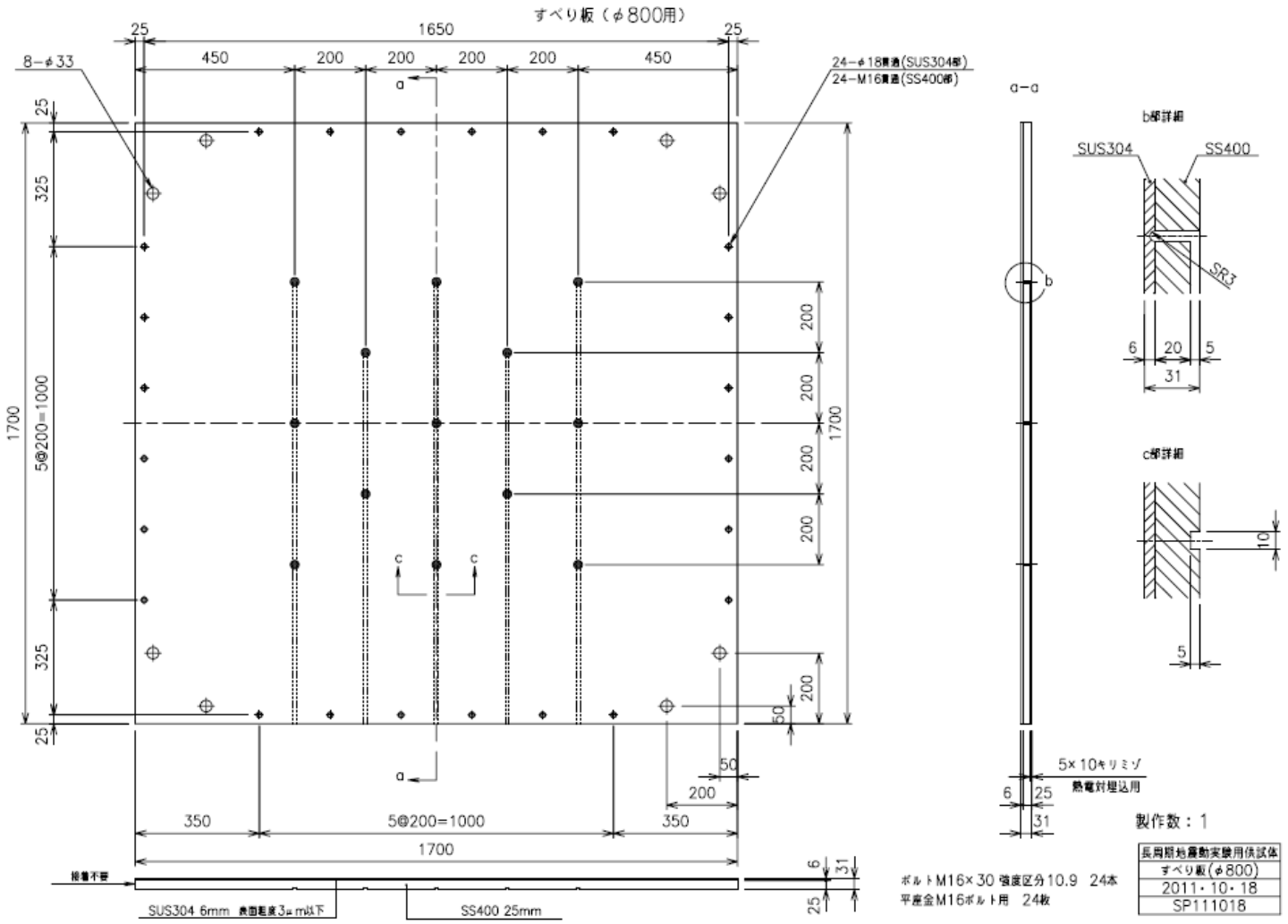

すべり板（φ800用）
25
1650
25
450
200
200
200
200
450
8−φ33
24−φ18貫通(SUS304部)
24−M16貫通(SS400部)
a
a
25
325
5@200=1000
325
25
1700
200
200
200
200
200
50
50
200
c
c
350
5@200=1000
350
1700
接着不要
SUS304 6mm 表面粗度3μm以下
SS400 25mm
6
31
25
a−a
b
b部詳細
SUS304
SS400
SR3
6
20
5
31
c部詳細
10
5
5×10キリミゾ
熱電対埋込用
6
25
31
製作数：1
ボルトM16×30 強度区分10.9 24本
平座金M16ボルト用 24枚
長周期地震動実験用供試体
すべり板(φ800)
2011・10・18
SP111018

図 2.3.1-2　すべり板

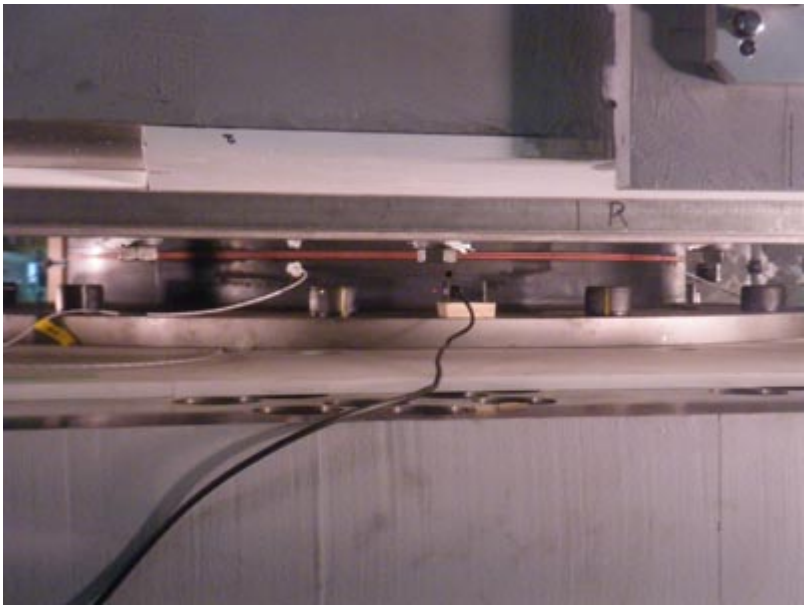


写真 2.3.1-1　試験体の設置状況

表 2.3.1-1　試験体緒元

型式	HMH80N-6-3	
項目	単位	諸元
支承径	mm	φ800
ゴム一層厚	mm	6
積層数	層	3
PTFE	mm	2 (+接着層 1)
一次形状係数	－	33.3
二次形状係数	－	44.4
鉛直剛性	kN/mm	24133
水平剛性	kN/mm	22.3
摩擦係数	－	0.100
試験体数	－	NR　2 体

表 2.3.1-2 断熱板の仕様

圧縮強度	338(N/mm^2)　(24℃の場合) 103(N/mm^2)　(285℃の場合)
吸水性	0.06%
熱伝導率	0.274W/(m・k)　(24℃の場合) 0.303W/(m・k)　(220℃の場合)
難燃性	94V－0(自己消化性)
最高使用温度	285℃
材質	アルミニュームカーボネート＋グラスファイバー＋ 不飽和ポリエステル

(3) 計測項目と計測方法

計測項目は、水平変位（支承とすべり板の相対変位、積層ゴム部の弾性変形)、鉛直変位（積層ゴム高さ)、水平荷重、鉛直荷重、温度（試験体内部・表面、室温）とした。また、試験後に膜厚計により PTFE の厚さを測定し、予備試験体の測定結果と比較した。

支承とすべり板の相対変位は回転角付変位計（東京測振 DPR-600A）により、積層ゴム部の弾性変形はポテンショメータ式変位計（共和電業 DTP-D-300）により、鉛直変位は渦電流型変位計（キーエンス EX-614V）により計測した。また、水平荷重および鉛直荷重は下部ブロックと試験体固定プレート下部の間に固定された 31 台の３分力計ロードセル（共和電業 LSM-700KM）により測定してリアルタイムモニターで合算し、水平方向は u,v 方向成分に変換した。温度計測は、すべり板（SUS 裏面）13 点、ゴム表面 2 点、PTFE 裏（バック鋼板部）3 点、フランジ上面 1 点の計 19 点を設置した。温度計測は、ゴム表面部の 2 点では非接触型の放射温度計（キーエンス FT-H50）を用い、他の計測点は熱電対（K-H-φ0.32）を使用した。

試験体周りの計測位置を図 2.3.1-3 に、分力計の配置を図 2.3.1-4 に示す。

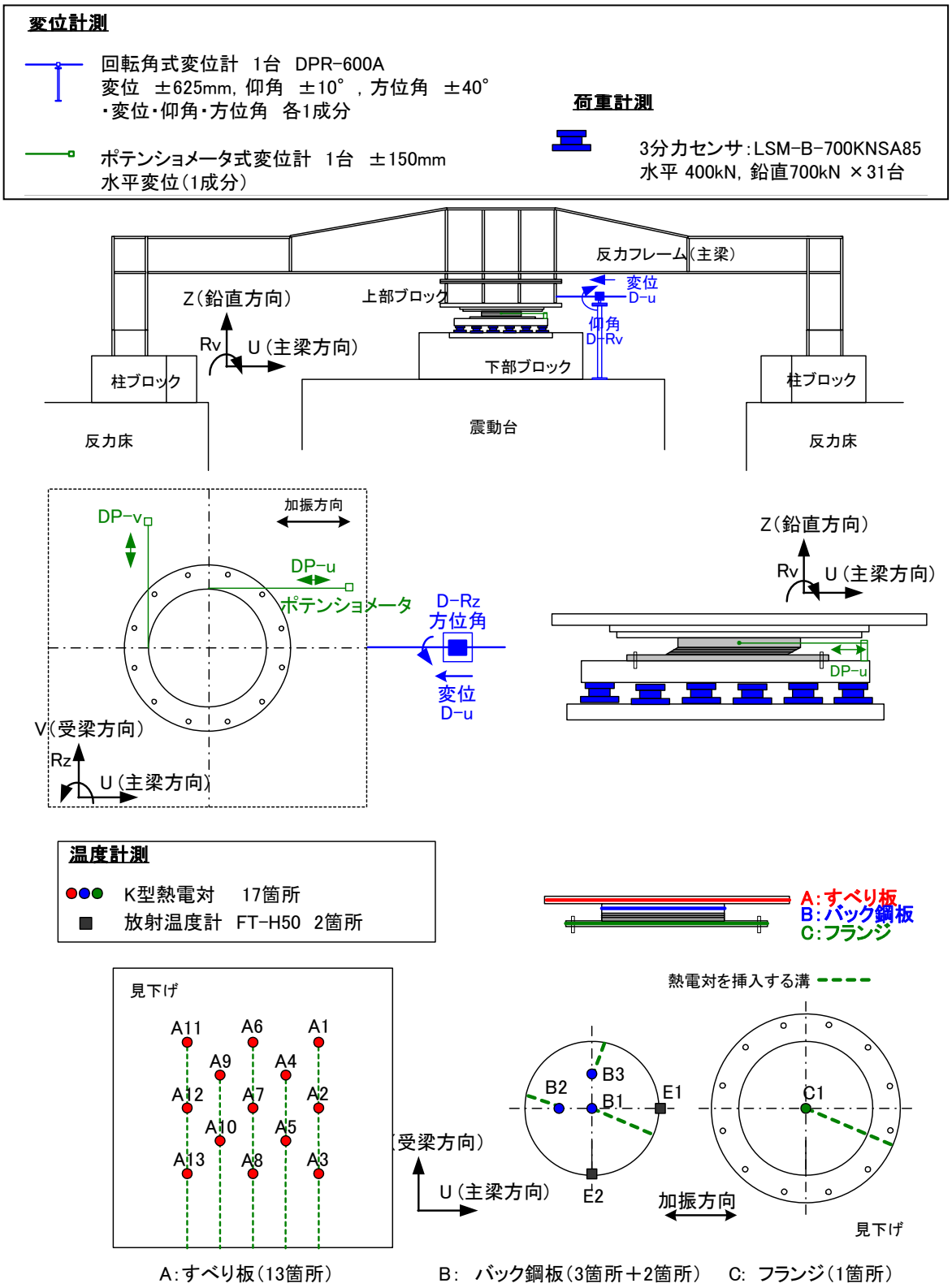


図 2.3.1-3　測定点図（温度、変位、荷重）

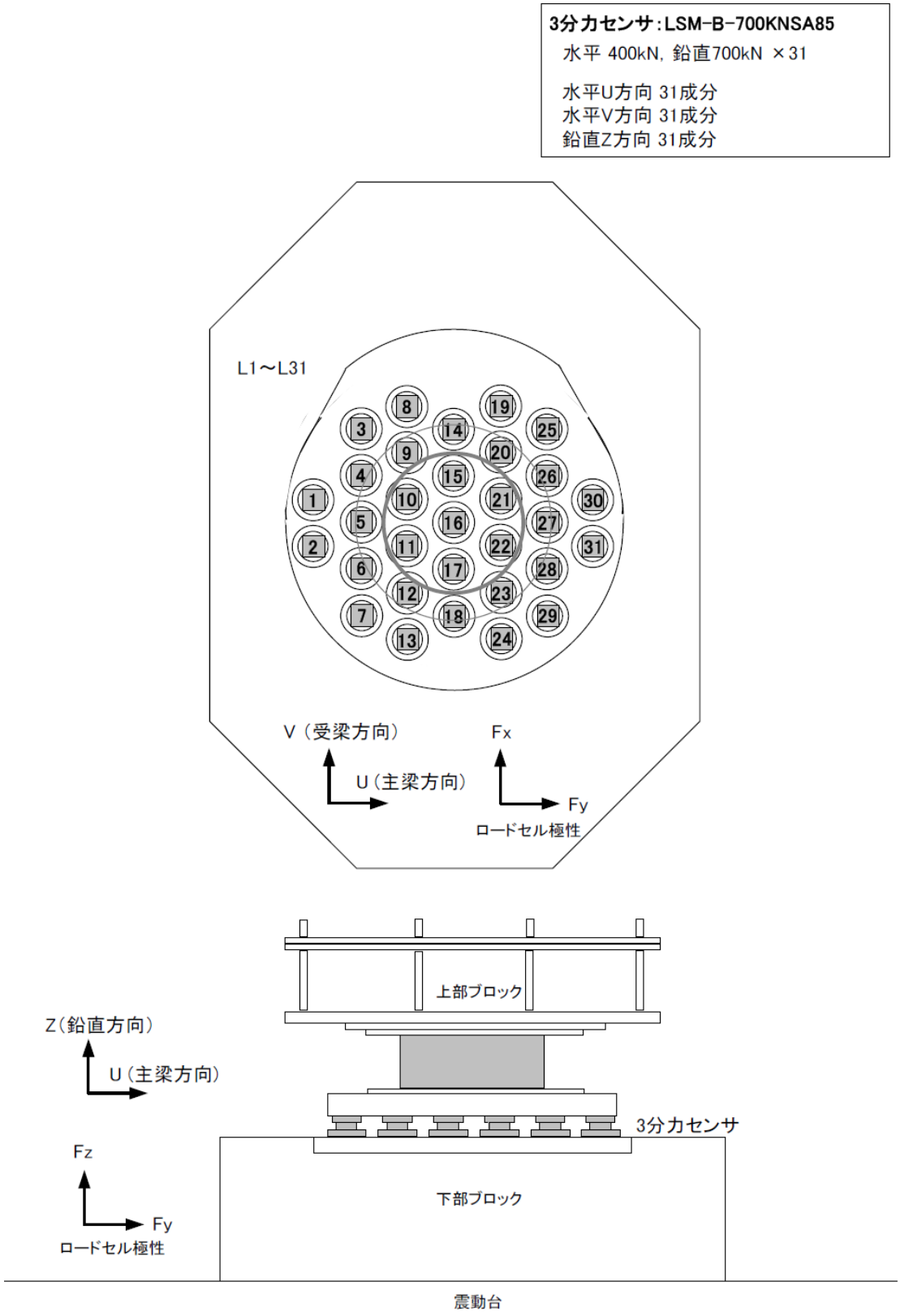


図 2.3.1-4　測定点図（分力計）

(4) 加振制御方法と実験ケース

震動台の上昇により、面圧(10N/mm^2)を載荷した状態で正弦波により水平 1 方向（u 方向）または 2 方向（u,v 方向）に加振させるすべり試験を行なった。各試験は初期温度を管理温度（30℃程度）以下で実施することを目標とした。試験は正弦波による多数回繰り返し試験、地震応答波試験からなり、各試験の前後に基本特性試験（4 サイクル）を実施した。(前)基本特性試験は常温で行うため、長周期試験後は試験体の冷却を行った。表 2.3.1-3 に実験ケース一覧を示す。

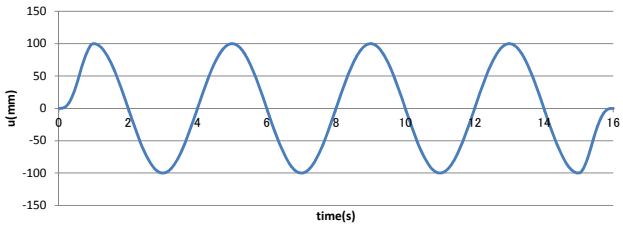
長周期試験では 5 サイクルを 1 セットとして、震動台のアキュムレータ蓄圧および加振準備のため 4 サイクル毎に約 1 分（計 6 回）のインターバル時間をとった。

基本特性試験と長周期試験（1 方向）で用いた加振波には、u 方向成分として初頭部と末尾部の 1 秒分に cos 型のテーパ処理を加えた正弦波を、z 方向成分として倍調波（周期 2 秒）の正弦波をそれぞれ用いた。z 方向成分波は、本試験と同一条件での震動台単独の事前加振で得られた鉛直変位計測結果に基づき、振幅を基本特性で 0.4mm、長周期試験で 1.2mm とした。長周期試験（2 方向）では、水平面内で円形軌道を描く 5 サイクル分の加振波とし、初頭部には原点からの、末尾部には原点への移動波形を付加した。付加分の累積変形は有効累積変形には算入しないものとし、円形軌道の半径は累積変形が 1 方向と等しくなる条件で定めた。

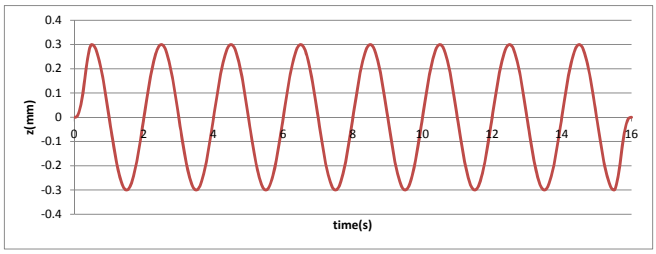
地震応答波試験では、免震周期 4 秒、降伏せん断力係数を 0.03、上部構造を剛体とした 1 質点モデルを用い、 1 方向加振用には検討波として提供された AIC003 波（愛知・津島　平均）および SZO024 波（静岡・浜松　平均）を、 2 方向加振用には東海・東南海・南海３連動地震の FEM 解析結果による名古屋市役所地点の想定地震波（ai_nag）を入力して得られた応答変位波形を用いた。試験では応答変位波形のうち主要動部付近の約 5 分間を抜き出して用いた。図 2.3.1-5、図 2.3.1-6 に載荷に用いた変位波形を示す。

表 2.3.1-3　弾性すべり支承（高摩擦）　試験ケース

実施日	ｹｰｽ	試験条件	面圧 (N/mm^2)	周期 (s)	変位 (mm)	ｻｲｸﾙ (回)	ｲﾝﾀｰﾊﾞﾙ (回)	累積変形 (m)	備考（加振波名称）
1月31日		(前)基本特性－1	10	4	u:100	4	-	1.6	初期基本特性の確認 U1-SL4Z
		地震応答（1 方向）－1		-	u:110	-	-	13.0	U1-E-aic003L
		地震応答（1 方向）－2			u:191			13.2	U1-E-szo024L
	3A	**長周期（1 方向）**		**4**	**u: 400**	**35 (5×7)**	**6**	**56.0**	U1-SL5Z
		(直後)基本特性－1		4	u:100	4	-	1.6	繰返し直後の基本特性の確認 U1-SL4Z
2 月 1 日		(前)基本特性－2	10	4	u: 100	4	-	1.6	冷却後基本特性の確認 U1-SL4Z
		地震応答（2 方向）		-	u [EW]: 102 v [NS]: 85	-	-	1.7	UV1-E-aiL
	3A'	**長周期（2 方向）－1**		**4**	**u:255 v: 255**	**35 (5×7)**	**6**	**56.0**	UV1-SL5M π/2 位相差（円軌道）
	3A'	**長周期（2 方向）－2**		**4**	**u:255 v: 255**	**35 (5×7)**	**6**	**56.0**	UV1-SL5M π/2 位相差（円軌道）
		(直後)基本特性－2		4	u:100	4	-	1.6	繰返し直後の基本特性の確認 U1-SL4Z
		(後)基本特性		4	u:100	4	-	1.6	U1-SL4Z

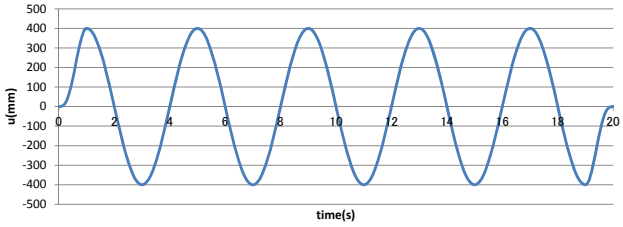


u 成分

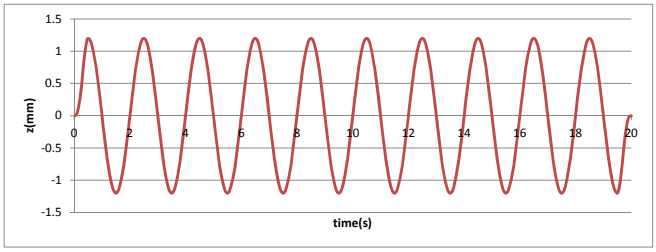


z 成分

(1) 基本特性 U1-SL4Z

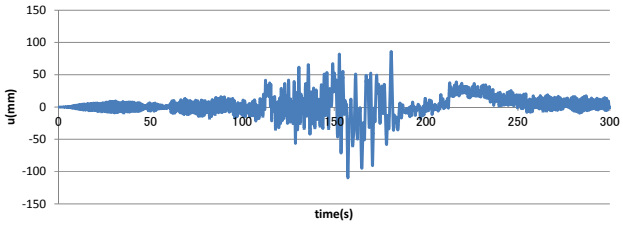


u 成分



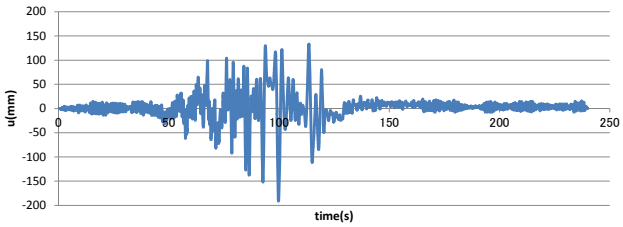
z 成分

(2) 長周期 U1-SL5Z



u 成分

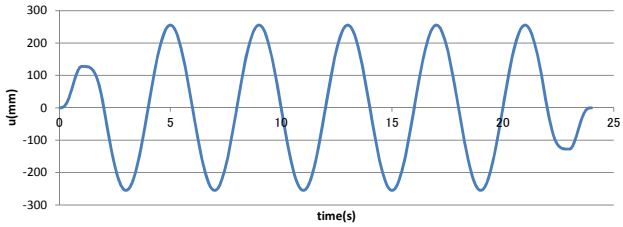
(3) 地震応答 U1-E-aic003L



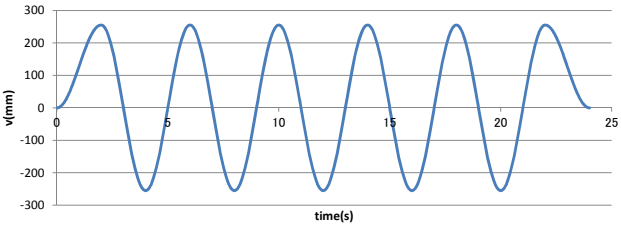
u 成分

(4) 地震応答 U1-E-szo024L

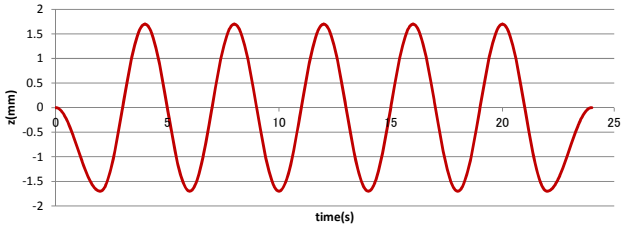
図 2.3.1-5 加振変位波形（1 方向）



u 成分

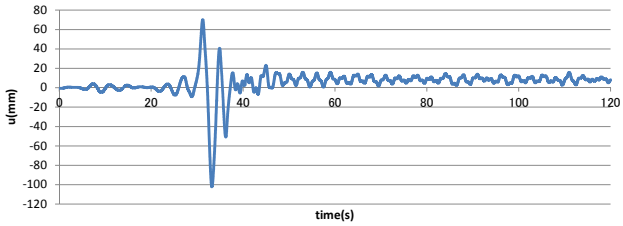


v 成分

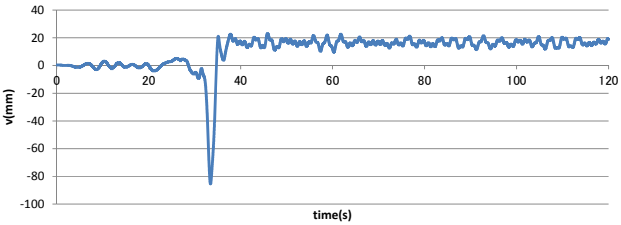


z 成分

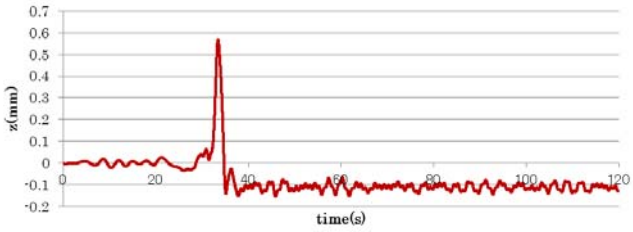
(1) 長周期 UV1-SL5M



u 成分



v 成分



z 成分

(2) 地震応答 U1-E-aic003L

図 2.3.1-6　加振変位波形（２方向）

(5) 実験結果

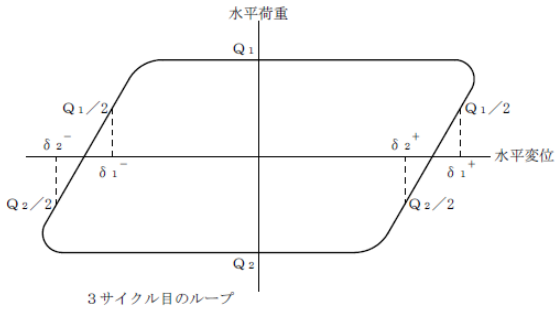
1) 特性値の評価方法

免震部材の水平剛性、摩擦係数は以下の方法により求める。評価方法は、参考文献[2.3.1-1)]をもとに定義する。

特性値の評価対象は原則として載荷３サイクルめの荷重－変形関係とする。長周期、限界試験では繰り返し特性を評価するため、各載荷ケースでサイクル毎の荷重－変形関係特性値を読み取ることとする。

a) 水平剛性

荷重－変形関係において、正負の切片荷重の 1/2 の点を結ぶ直線の勾配を読み取り、水平変位の正側と負側で剛性 *Kh1*，*Kh2* を求め、その平均値を水平剛性 *Kh* とする（図 2.3.1-7, 式(2.3.1-1)～(2.3.1-3)）。



$$Kh_1 = \left(\frac{Q_1}{2} - \frac{Q_2}{2}\right) \Big/ \left(\delta_1^{+} - \delta_2^{+}\right) \qquad (2.3.1\text{-}1)$$

$$Kh_2 = \left(\frac{Q_1}{2} - \frac{Q_2}{2}\right) \Big/ \left(\delta_1^{-} - \delta_2^{-}\right) \qquad (2.3.1\text{-}2)$$

$$Kh = \frac{Kh_1 + Kh_2}{2} \qquad (2.3.1\text{-}3)$$

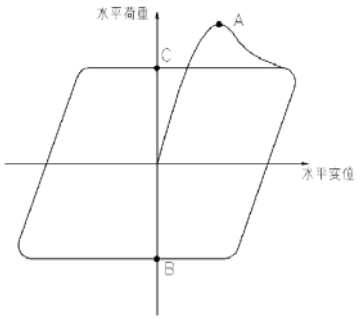
Q_1：＋側の切片荷重の絶対値

Q_2：－側の切片荷重の絶対値

図 2.3.1-7 水平剛性 *Kh* の算出方法

b) 摩擦係数

荷重－変形関係において、１波目については最大値 A 点(＋側)と B 点(－側)の水平荷重を、２波目以降は水平変位が 0 のときの水平荷重(B 点、C 点) を読み取り、正側と負側で摩擦係数 $\mu 1$, $\mu 2$ を求め、その平均値を摩擦係数 μ とする（図 2.3.1-8, 式(2.3.1-4)～(2.3.1-6)）。



$\mu 1 = Q1/N1$　　Q1：＋側の切片荷重の絶対値　(2.3.1-4)

$\mu 2 = Q2/N2$　　N1：Q1 時の鉛直荷重
Q2：－側の切片荷重の絶対値　(2.3.1-5)

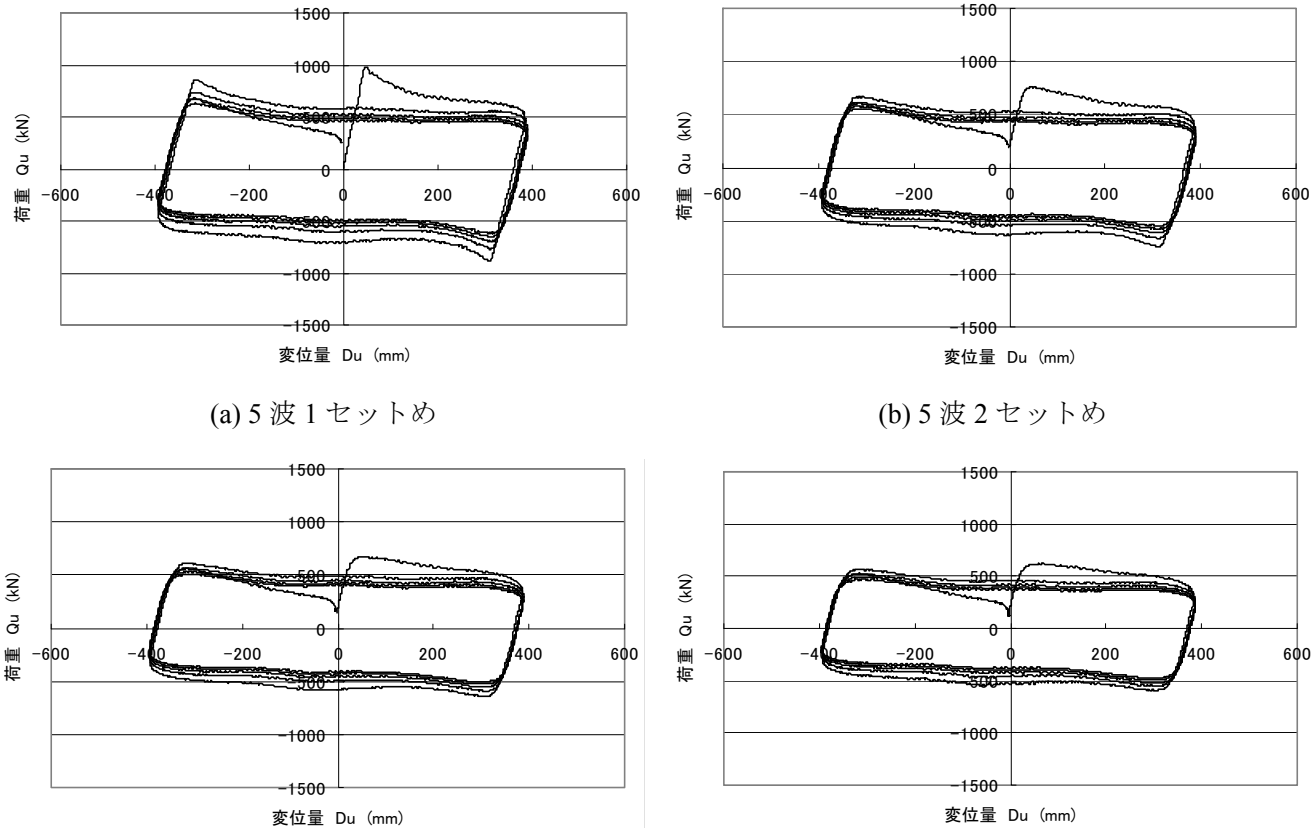
$$\mu = \frac{\mu 1 + \mu 2}{2}$$　　N2：Q2 時の鉛直荷重　(2.3.1-6)

図 2.3.1-8 摩擦係数 μ の算出方法

2) 荷重－変位関係

1 方向の試験ケースの荷重－変位関係を、長周期試験について図 2.3.1-9 に、基本特性試験について図 2.3.1-10 にそれぞれ示す。

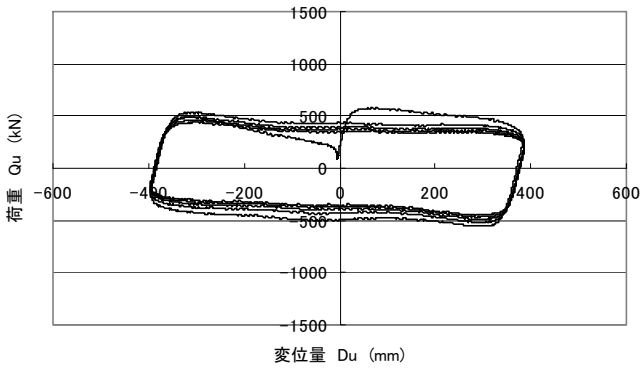
荷重－変位関係において、(前)基本特性試験および長周期試験繰り返しの初期段階では摩擦係数の低下傾向が大きいためにすべり部分で右下がりの勾配を示す（図 2.3.1-10(a)、図 2.3.1-9(a)）が、繰り返しに伴い勾配は緩やかとなり（図 2.3.1-9(b)～(g)）、(直後)基本特性試験では弾塑性型に近い履歴形状を示している（図 2.3.1-10(b)）。(前)基本特性試験と(直後)基本特性試験の比較（図 2.3.1-10(a), (b)）によれば、長周期試験の経験後は履歴形状は扁平に変化しており、履歴面積すなわち 1 サイクルあたりの吸収エネルギーも 1/2 程度以下まで低下している。



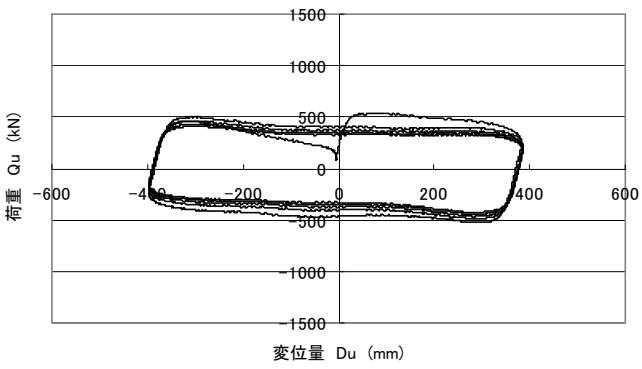
(a) 5 波 1 セットめ　　(b) 5 波 2 セットめ

(c) 5 波 3 セットめ　　(d) 5 波 4 セットめ

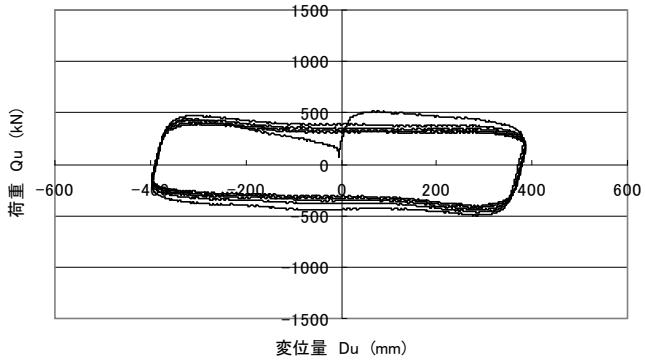
図 2.3.1-9(1)　荷重－変位関係（長周期（1 方向）：U1-SL5Z）



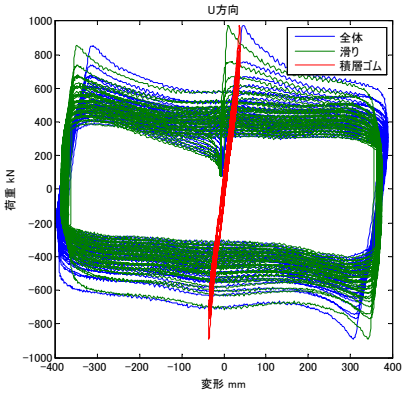
(e) 5 波 5 セットめ



(f) 5 波 6 セットめ

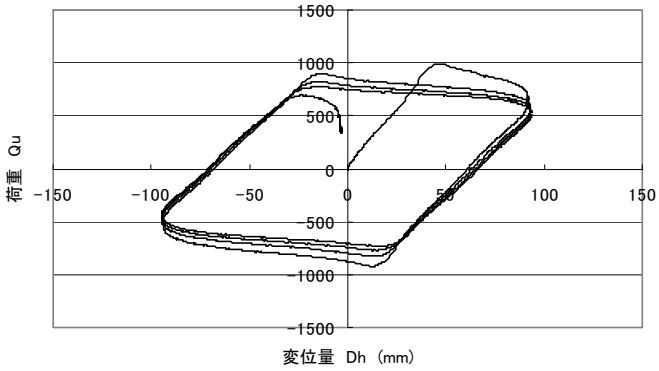


(g) 5 波 7 セットめ

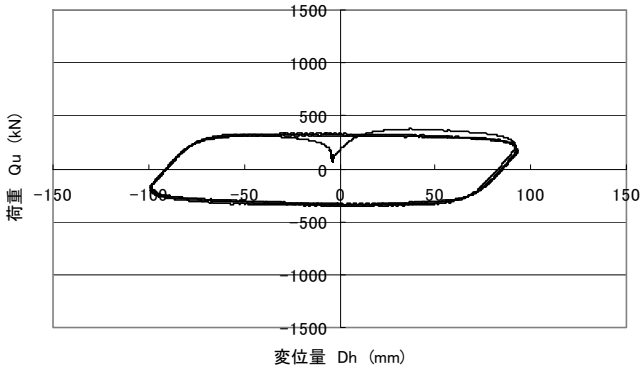


(h) 全体

図 2.3.1-9(2)　荷重－変位関係（長周期（1 方向）：U1-SL5Z）



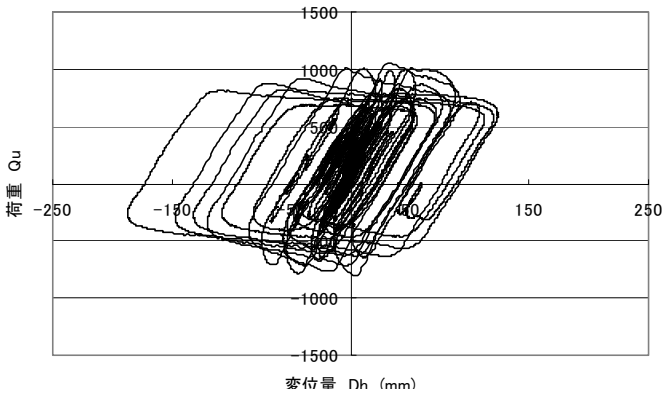
(a) (前)基本特性-1　[1 方向試験前]



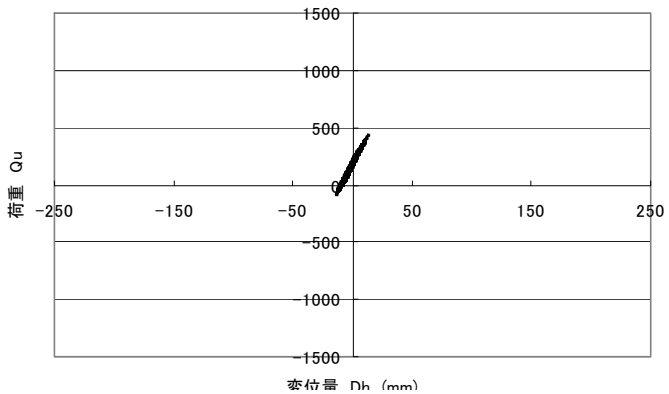
(b) (直後)基本特性

図 2.3.1-10 荷重－変位関係（基本特性：U1-SL4Z）

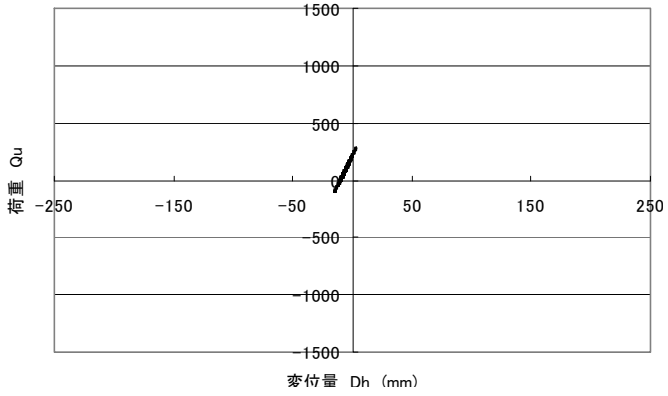
地震波加振（１方向）の荷重－変位関係のうち、U1-E-szo024L のケースについて図 2.3.1-11 に示す。図 2.3.1-5(4)に示すとおり同地震応答波の主要動部分は時刻 50 秒から 130 秒の間にあり、対応する図 2.3.1-11(a)ですべりを生じていることが解る。同図では、載荷が進むにつれて降伏荷重が低下する様子が確認できるが、その低下量は(前)基本特性と同程度である。時刻 150 秒以降では弾性変形のみですべりは生じていない。



(a) 0～150 秒



(b) 150～300 秒



(c) 300～344 秒

図 2.3.1-11 荷重－変位関係（地震応答（1 方向）：U1-E-szo024L）

3) 鉛直荷重変動

図 2.3.1-12 に長周期（1 方向）のケースの鉛直荷重変動波形を示す。

全ケースを通じて鉛直荷重の下限目標を 5000kN として軸力を導入した。各セットの頭部および終部のスパイクを除き、水平方向の載荷中は鉛直荷重は中央値に対して±5%程度変動しているが、おおむね 5000kN 以上の軸力を確保している。

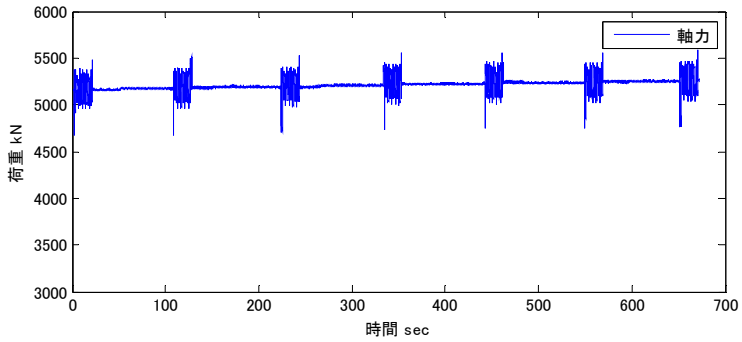


図 2.3.1-12 軸力変動（長周期（1 方向）：U1-SL5Z）

4) 摩擦係数

a) 基本特性試験

基本特性試験の摩擦係数の結果を表 2.3.1-4 に示す。

基本特性試験の摩擦係数 μ_0 は 3 サイクル目を評価した。(前)基本特性の値は設計値に比べて約 1.5 倍となっている。その理由は、設計値は支承の標準面圧（20N/mm^2）で設定しているのに対して実験の実施面圧は 10N/mm^2 であり、面圧依存性により摩擦係数が大きな値を示しているものとみられる。

累積変形 50m の長周期試験を経験する前後で繰り返しによる影響を見ると、摩擦係数が 0.147 から 0.062 と初期の 42%程度にまで低下している。

表 2.3.1-4 摩擦係数結果（基本特性試験）

試験	基本特性試験の摩擦係数 μ_0
(前)基本特性－1	0.147
(直後)基本特性－1	0.062

b) 長周期試験

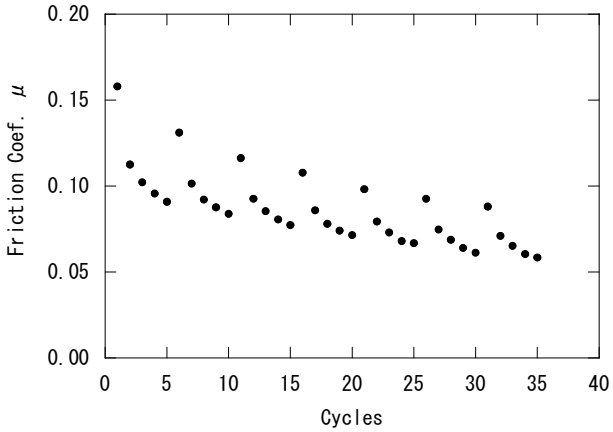


図 2.3.1-13 摩擦係数の変化（長周期（1 方向））

図 2.3.1-13 に長周期試験（1 方向）における摩擦係数の変化を示す。各セットとも 1 サイクルめで大きな値を示しているが、これは図 2.3.1-8 に示すように、摩擦係数の算定において 1 サイクルめのみ静摩擦の影響を含むためである。各セットと毎に繰り返しに伴って摩擦係数が低下する傾向が見られ、セット間のインターバルでは摩擦係数が回復（上昇）する傾向が確認できる。表 2.3.1-5 に長周期試験（1 方向）の結果一覧を示す。

表 2.3.1-5　長周期（1 方向）試験　試験結果一覧

試験番号	回数	時間 (sec)	Q_3		Q_4		摩擦係数			累積	セット累積	セット累積	累積	温度
			鉛直荷重	水平荷重	鉛直荷重	水平荷重	Q_3	Q_4	平均	エネルギー	エネルギー	すべり量	すべり量	T
			(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	係数	係数	係数	ΣE(kN・mm)	(kN・mm)	(mm)	(mm)	(℃)
B5MU5_7set	1	4	5306.56	975.59	5290.47	700.82	0.184	0.132	0.158	975681	975681	1295	1295	31
−1	2	8	5201.61	575.75	5301.50	606.50	0.111	0.114	0.113	1830917	1830917	2662	2662	57
	3	12	5265.33	526.93	5293.29	552.71	0.100	0.104	0.102	2622366	2622366	4043	4043	67
	4	16	5225.29	482.14	5286.53	525.65	0.092	0.099	0.096	3373237	3373237	5426	5426	68
	5	20	5203.81	460.68	5290.94	494.50	0.089	0.093	0.091	4092165	4092165	6805	6805	74
B5MU5_7set	6	24	5342.90	759.73	5285.00	634.28	0.142	0.120	0.131	4964814	872649	1337	8142	79
−2	7	28	5241.97	525.24	5286.85	544.52	0.100	0.103	0.102	5738328	1646163	2723	9528	96
	8	32	5256.26	481.32	5343.51	497.82	0.092	0.093	0.092	6460469	2368304	4114	10919	105
	9	36	5265.57	454.00	5283.11	471.89	0.086	0.089	0.088	7148271	3056106	5508	12314	113
	10	40	5259.56	441.54	5339.74	447.70	0.084	0.084	0.084	7802246	3710081	6886	13691	121
B5MU5_7set	11	44	5352.68	671.37	5354.60	573.43	0.125	0.107	0.116	8615302	813056	1358	15049	109
−3	12	48	5235.98	483.52	5325.57	496.89	0.092	0.093	0.093	9335398	1533152	2755	16446	126
	13	52	5243.05	447.34	5321.53	456.45	0.085	0.086	0.086	10007195	2204950	4155	17846	134
	14	56	5251.89	419.93	5307.12	431.32	0.080	0.081	0.081	10646497	2844251	5558	19249	140
	15	60	5241.46	405.00	5303.20	410.88	0.077	0.077	0.077	11249803	3447557	6932	20623	143
B5MU5_7set	16	64	5418.51	621.68	5345.22	539.01	0.115	0.101	0.108	12012532	762729	1366	21989	134
−4	17	68	5267.08	454.79	5345.55	458.83	0.086	0.086	0.086	12685946	1436143	2762	23384	149
	18	72	5277.01	414.90	5379.46	418.75	0.079	0.078	0.078	13314303	2064500	4164	24787	157
	19	76	5275.15	387.73	5339.74	399.14	0.074	0.075	0.074	13911908	2662105	5569	26192	162
	20	80	5280.10	372.74	5334.28	386.97	0.071	0.073	0.072	14480634	3230831	6956	27578	166
B5MU5_7set	21	84	5436.95	580.53	5421.52	487.43	0.107	0.090	0.098	15201244	720610	1373	28951	153
−5	22	88	5309.39	424.82	5407.63	426.12	0.080	0.079	0.079	15837019	1356385	2779	30357	167
	23	92	5292.73	395.16	5411.86	387.39	0.075	0.072	0.073	16426766	1946132	4179	31758	174
	24	96	5308.03	362.41	5413.48	368.94	0.068	0.068	0.068	16989455	2508821	5588	33166	181
	25	100	5301.45	355.14	5358.55	358.40	0.067	0.067	0.067	17527051	3046417	6985	34563	184
B5MU5_7set	26	104	5437.33	544.00	5394.27	461.02	0.100	0.085	0.093	18220377	693326	1366	35928	170
−6	27	108	5294.88	397.61	5393.52	403.84	0.075	0.075	0.075	18816324	1289274	2759	37322	182
	28	112	5286.45	365.03	5378.44	368.30	0.069	0.068	0.069	19374745	1847695	4162	38725	190
	29	116	5308.48	337.35	5384.80	347.71	0.064	0.065	0.064	19907539	2380488	5576	40139	196
	30	120	5278.58	321.39	5387.87	332.38	0.061	0.062	0.061	20412991	2885940	6964	41527	197
B5MU5_7set	31	124	5450.19	516.41	5389.33	440.09	0.095	0.082	0.088	21053056	640064	1366	42893	183
−7	32	128	5305.07	378.70	5401.49	382.25	0.071	0.071	0.071	21635788	1222797	2805	44332	195
	33	132	5297.40	344.36	5406.28	355.05	0.065	0.066	0.065	22169663	1756672	4221	45748	202
	34	136	5324.18	323.29	5405.65	327.13	0.061	0.061	0.061	22675529	2262538	5636	47163	207
	35	140	5324.09	306.27	5416.46	322.31	0.058	0.060	0.059	23155738	2742746	7033	48560	207

IV-2.3.1-17

5) 温度特性

a) 最大温度

各測定点における最大温度を表 2.3.1-6 に、長周期試験（1 方向）における試験体温度の時間変化を図 2.3.1-14 に示す。

表 2.3.1-6、図 2.3.1-14 より、7 セット終了後のすべり板温度は、長周期試験（1 方向）で 204℃、長周期試験（2 方向）-1 で 220℃、長周期試験（2 方向）-2 で 260℃まで、それぞれ上昇した。

本実験の試験体に用いている PTFE 材料の材料特性表によれば、使用温度範囲は－240℃～260℃、融点は 320℃以上であり、長周期試験（2 方向）-2 直後のすべり板中央部の温度は材料の軟化が始まる 260℃に辛うじて達している。すべり板内の温度分布を図 2.3.1-11 に示す長周期試験（1 方向）のケースでみると、中央部の A7 に加えて A9, A10, A12 の 4 点がほぼ同様の温度変化を見せており、摩擦熱発生領域の中心がこれら 4 点の付近にあったものと推定できる。同じケースの分力計による軸力計測結果においても、軸力中心が支承中心よりも－u 側にややずれていた傾向が確認されている。

ＰＴＦＥ裏のバック鋼板部の温度上昇はすべり板に比べて上昇速度は緩やかであるものの、インターバルの影響もなく上昇が続き、加振後も温度上昇が続く傾向があった。

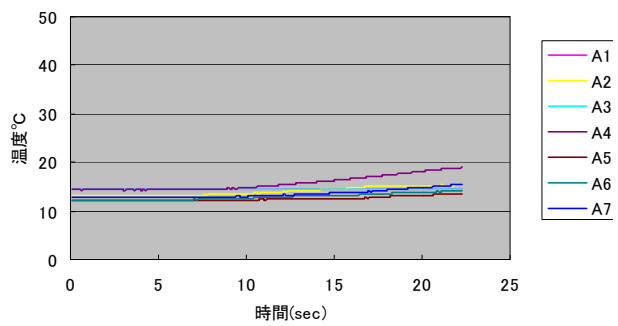
なお、地震応答波試験では、すべり板の温度は 70℃前後まで上昇するが載荷直後のゴム表面は 30℃前後までの上昇にとどまり、常温に近い状態であった。

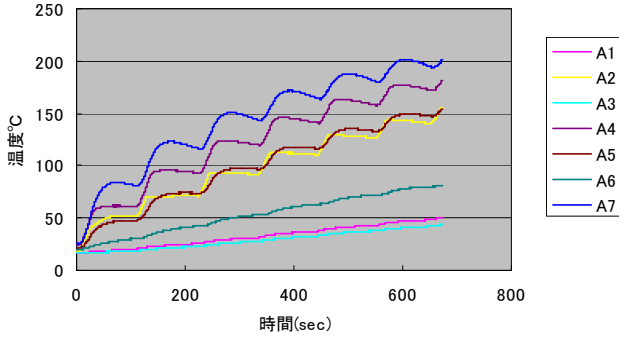
フランジ部の温度はすべてのケースにおいて 12～20℃で推移しており、断熱板により熱の伝達が遮断されていたことが確認できる。

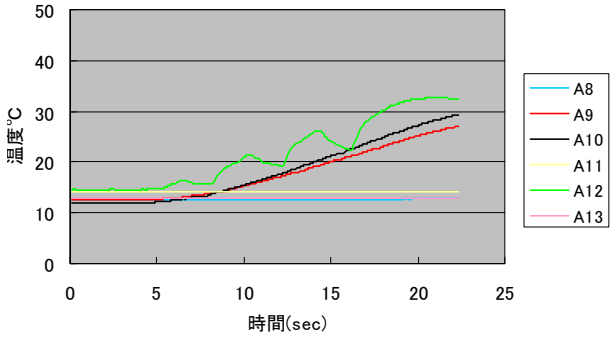
表 2.3.1-6 温度計測結果（最大温度、単位℃）

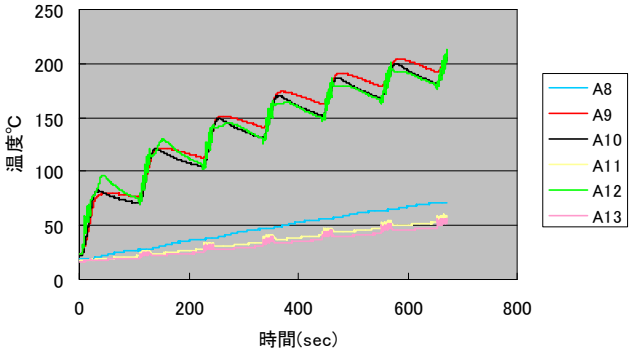
試験 No.	01 室温	A7 すべり板 （中央部）	B1 PTFE 裏 ﾊﾞｯｸ鋼板 （中央部）	E2 ゴム表面	C1 フランジ
(前)基本特性－1	14.1→14.2	12.8→15.5	13.5→13.6	14.6→14.6	12.8→12.9
地震応答 （1 方向）－2	14.6→14.6	22.2→40.8	19.8→25.3	16.7→19.9	13.9→14.6
長周期（1 方向）	14.8→14.9	25.3→201.2	26.9→76.5	19.1→28.3	15.3→15.9
(直後)基本特性－1	14.2→14.9	15.5→203.8	13.6→83.9	14.6→26.2	12.9→16.0

注：加振前→加振後



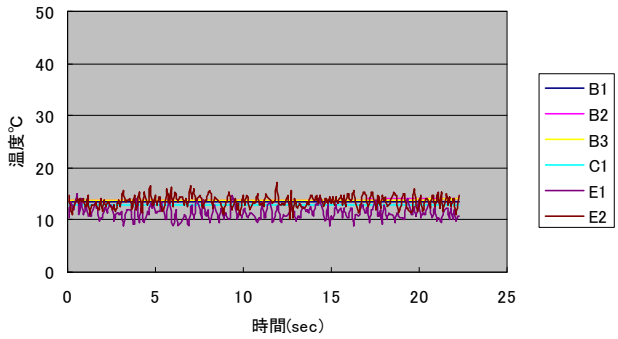


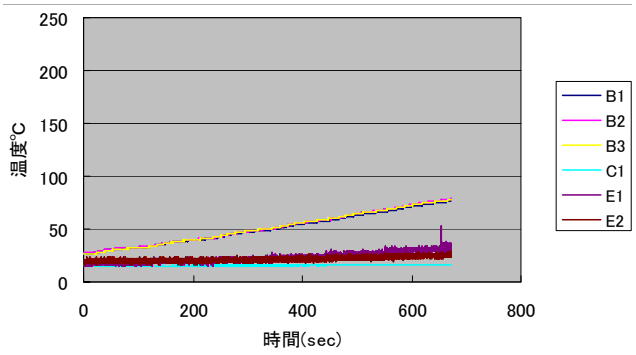




(a) すべり板

(a) すべり板





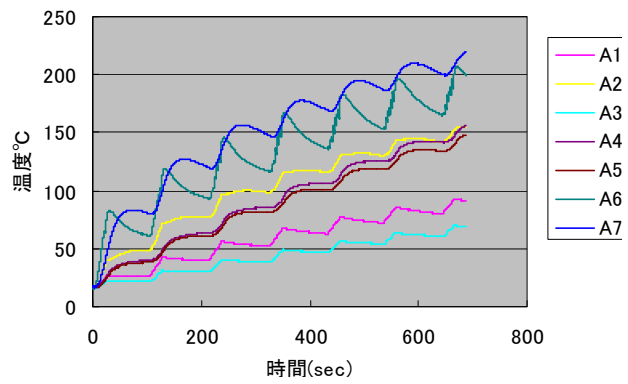
(b) 支承

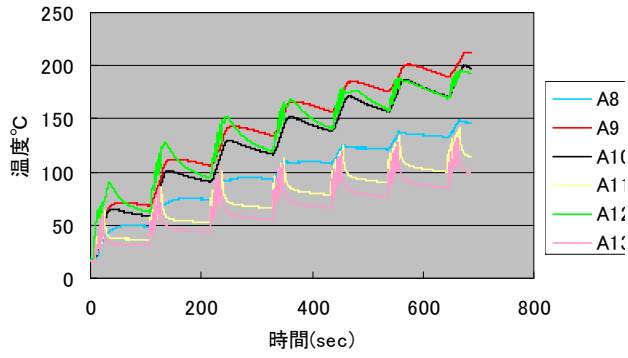
(b) 支承

(1) (前)基本特性試験

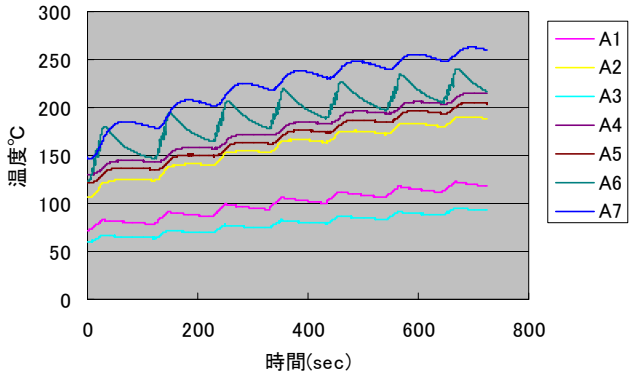
(2) 長周期（1 方向）

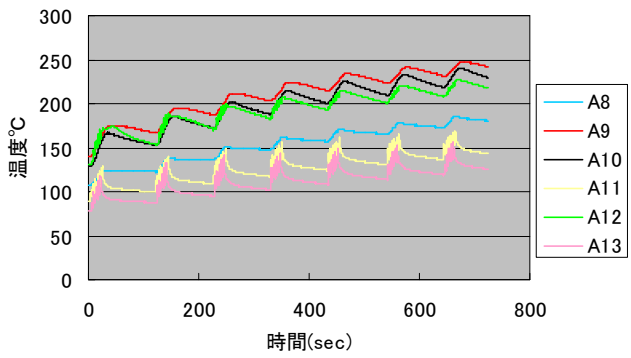
図 2.3.1-14(1)　試験体の温度変化



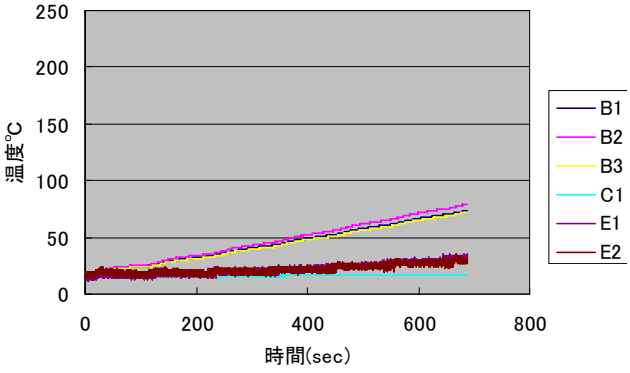


(a) すべり板



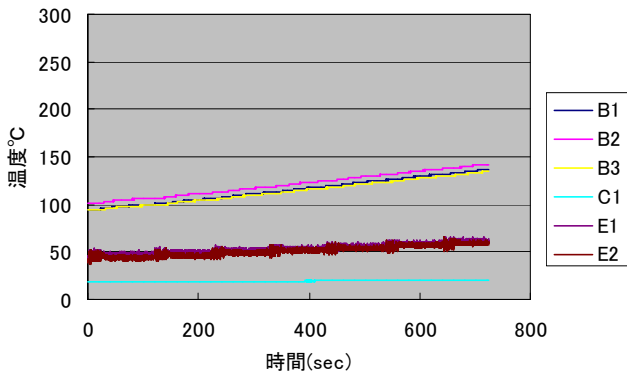


(a) すべり板



(b) 支承

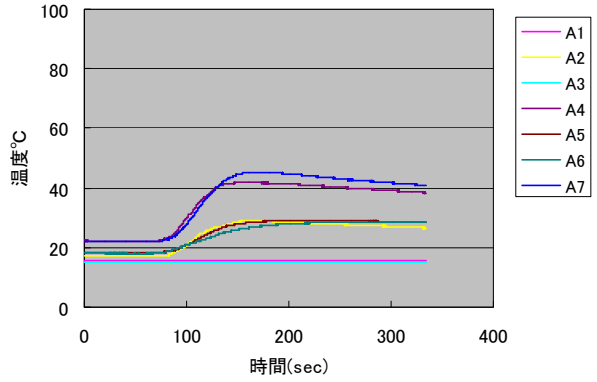
(3) 長周期（2 方向）-1

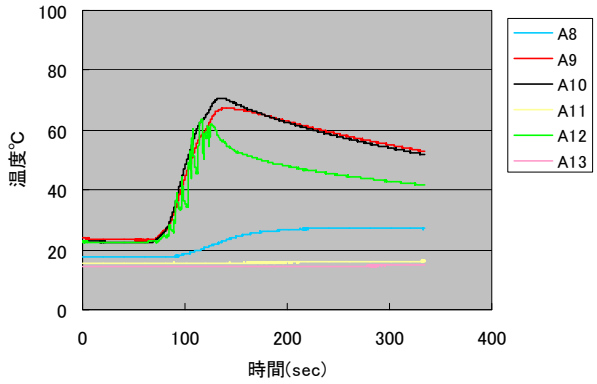


(b) 支承

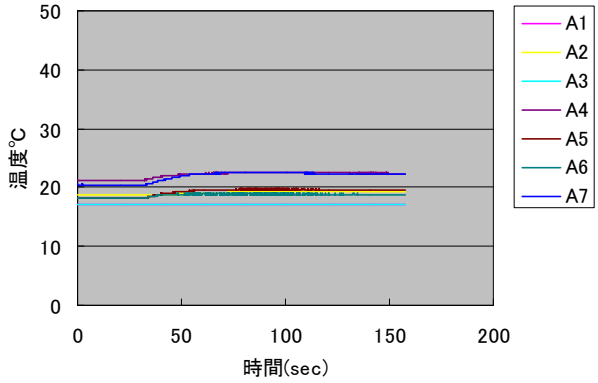
(4) 長周期（2 方向）-2

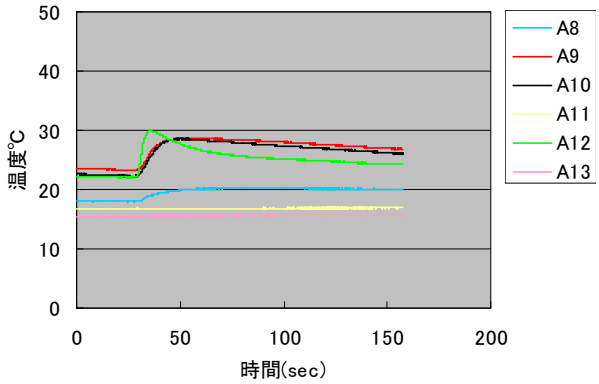
図 2.3.1-14(2)　試験体の温度変化



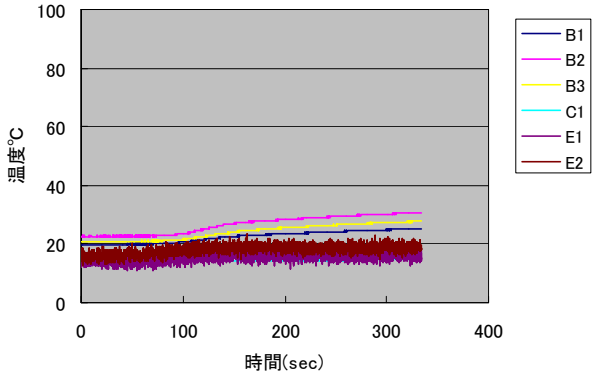


(a) すべり板



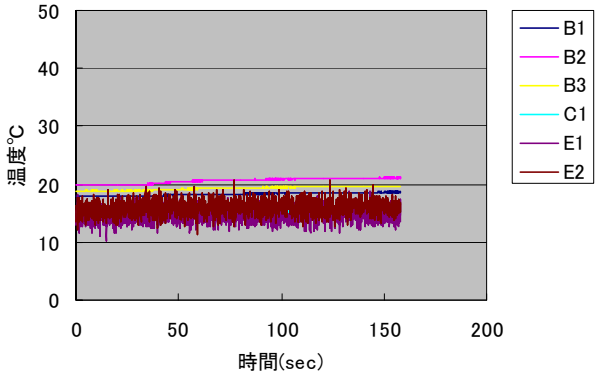


(a) すべり板



(b) 支承

(5) 地震応答（1 方向）-2：U1-E-szo024L



(b) 支承

(6) 地震応答（2 方向）：UV1-E-aiL

図 2.3.1-14(3)　試験体の温度変化

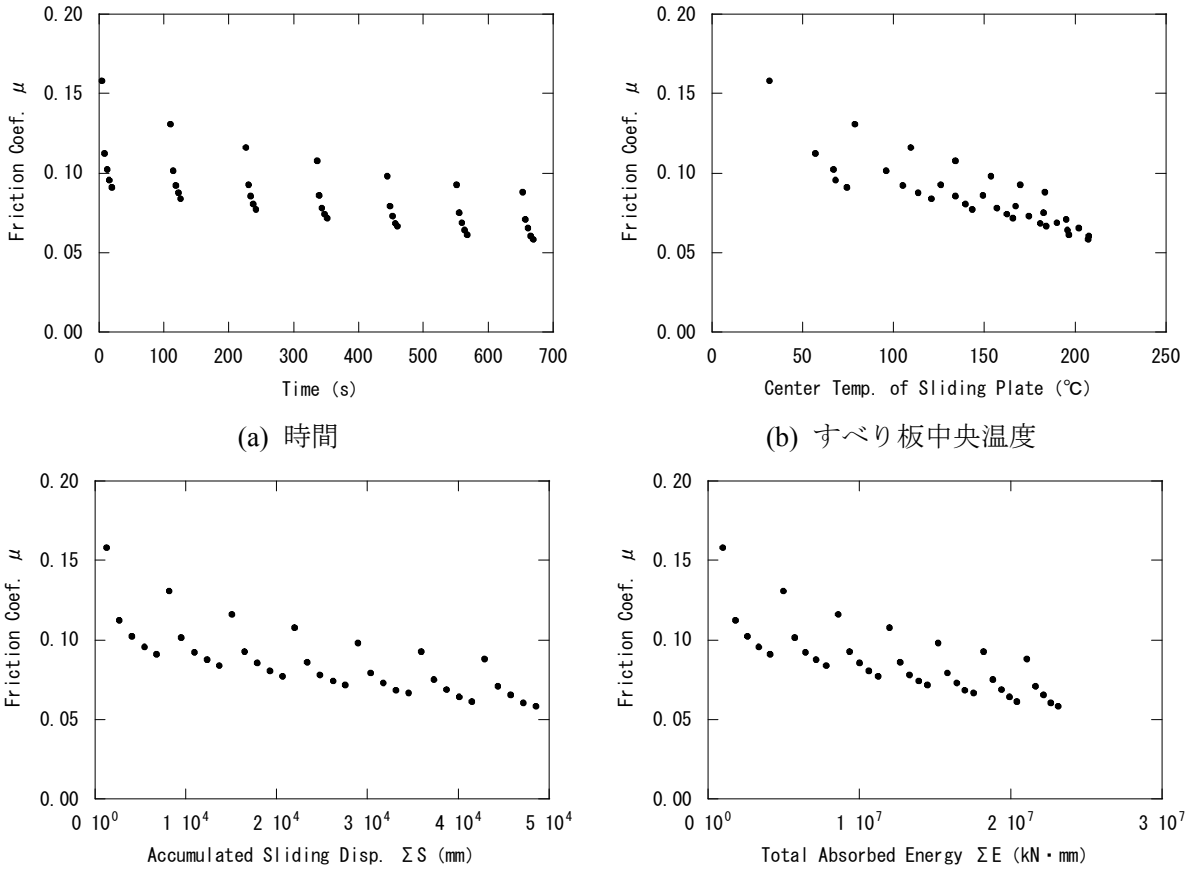
6) 摩擦係数と繰り返しパラメーターとの関係

繰り返しを表現するパラメーター（時間、すべり板中央温度、累積すべり変位、累積吸収エネルギー）と摩擦係数の関係を図 2.3.1-15 に示す。

各パラメーターとも連続載荷状態にある各セット内では摩擦係数が堅調に低下するが、インターバルを挟むことで摩擦係数が回復（上昇）する傾向があり、いずれのパラメーターも連続加振状態と加振休止状態を統一的に表現することは難しいと思われる。

繰り返しによる摩擦係数が低下する要因は、すべり面の摺動によって熱エネルギーが投入されすべり材およびすべり面の温度が上昇するため、インターバルによる摩擦係数の回復は放熱によってすべり材およびすべり面の温度が低下するためと考えられる。以上より、すべり面温度は摩擦係数を規定するパラメータとして直接的であるが、すべり板の温度が均一でないすべり開始直後の状態では、摩擦係数を精度よく推定するためのパラメータとして最適とは言い難い。また、応答解析において摩擦係数の変動を追うためには、ステップ毎に熱収支解析を連動させてすべり面およびすべり材の温度分布を推定する必要があり、解析が複雑化することになる。

一方、投入エネルギーから逸散エネルギーを差し引いたエネルギー収支をパラメータとして繰り返しに伴う摩擦係数の変動を表現すれば、インターバルによる熱エネルギー逸散の影響を取り込むことも可能となり定式化もし易くなると考えられる。

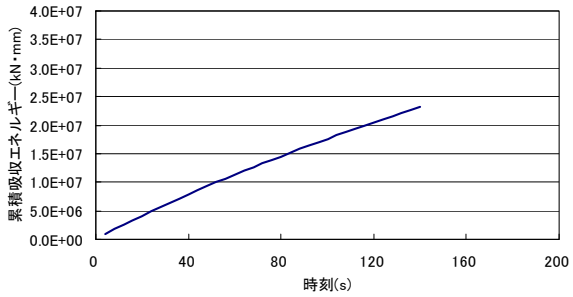


(a) 時間　(b) すべり板中央温度

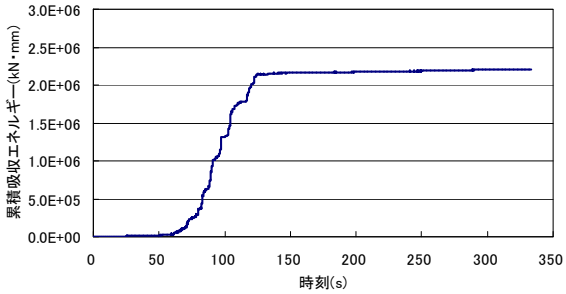
(c) 累積すべり変位　(d) 累積吸収エネルギー

図 2.3.1-15　摩擦係数の繰り返し依存性（長周期（1 方向））

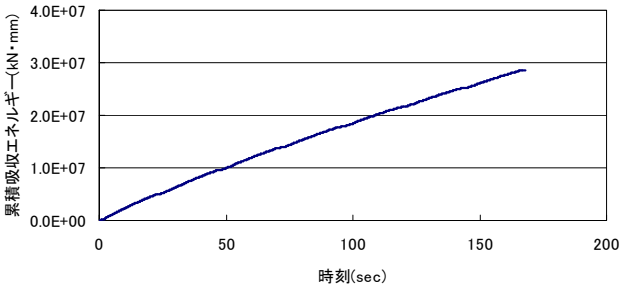
図 2.3.1-16 に累積吸収エネルギーの時間変化を示す。累積吸収エネルギーは、長周期試験では 1 方向、2 方向とも共通で載荷に伴って堅調に増加する一方、地震応答波試験では主要動付近のみで増加している。添付資料に示す長周期試験（1 方向）の結果によれば、図 2.3.1-16(b)に示す地震応答波試験-2 の累積吸収エネルギーは長周期試験の 3 サイクル相当以下である。同図(d)でも確認できるように、地震応答波試験の主要動付近（50 秒間）の累積吸収エネルギーの増加量は、長周期試験の 3 サイクル（12 秒間）相当に達しておらず、最終的な累積吸収エネルギー量は長周期試験の 1/10 以下となっている。言い換えれば、長周期試験は地震応答波試験の 10 倍相当以上の累積吸収エネルギーを確保したことになる。



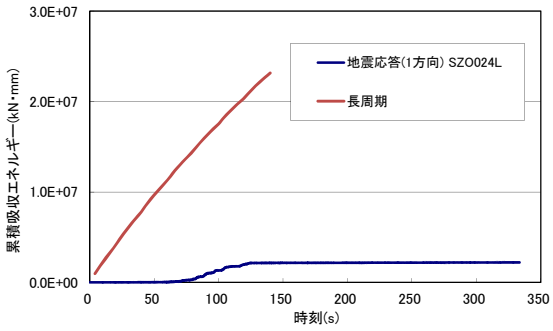
(a) 長周期（1 方向）



(b) 地震応答（1 方向）－2



(c) 長周期（2 方向）



(d) 長周期（1 方向）と
地震応答（1 方向）－2 の比較

図 2.3.1-16　累積吸収エネルギーの時間変化

7) 外観および膜厚の変化

写真 2.3.1-2 に全ケース試験後の試験体の外観を示す。すべり支承試験体は長周期および限界試験を経験しているにもかかわらず、すべり面の PTFE に損傷は見られず健全な状態を保っていた。第Ⅲ部 1.3.4 に記載した縮小試験体では面圧 40N/mm^2 までの試験を実施したため、すべり面の温度上昇に伴い PTFE が軟化する現象が見られたが、今回の試験では面圧が低いことも有り同様の現象は確認されなかった。

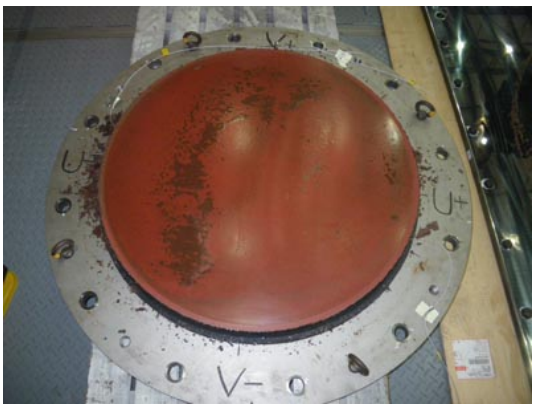
ただし、写真 2.3.1-3(b)に示すとおり、試験体の取り外し後にすべり板のバック鋼板部と SUS 製のすべり板のボルト結合部付近（u－側の中央部）で SUS 板中央部のむくりが確認された。時間

を追って鋼材と SUS 材の隙間を確認すると、試験直後（写真 2.3.1-3(a)）では 2mm 程度の隙間がみられる程度であるが、試験後 3 日経過後（写真 2.3.1-3(b)）では 10mm 程度まで隙間が広がっている。

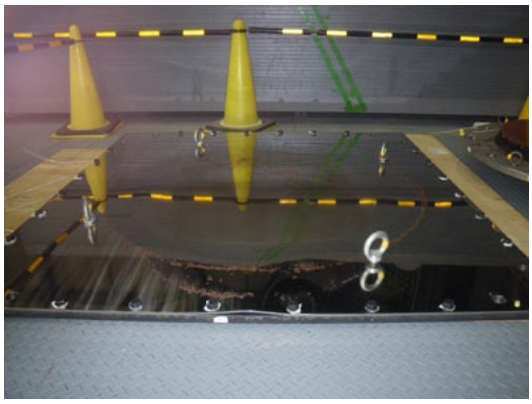
図 2.3.1-17 に示した長周期試験のすべり板温度分布をみると、中央より u+側の A4,A5 点よりも u－側の A9, A10 点の方が温度が高い傾向にあり、温度による熱膨張の影響が u－側に表れたものと推察できる。すべり板のある部位が初期の 15℃から 260℃まで上昇する場合、線膨張係数を 17.3 μ／℃（SUS304）として、該当部分のひずみ ε は以下のとおりとなる。

$$\varepsilon = 17.3 \times 10^{-6}\ [/℃] \times (260-15)\ [℃] = 4238.5 \times 10^{-6}$$

試験後に隙間が広がったことから、摩擦熱による熱膨張により支承との接触部付近で SUS 板が塑性化し、その後の冷却により板の中央付近が収縮するに伴って SUS 板の周囲部分では圧縮力が加わったことが原因として考えられる。



(a) 弾性すべり支承 (No.1)
(写真右方：+u 方向)



(b) すべり板
(写真上方： u+方向)

写真 2.3.1-2 試験実施後の試験体の状況

(a) 試験 3 日め終了直後
（2/1, 16:26）

(b) 試験後 3 日経過
（2/4,13:03）

写真 2.3.1-3 すべり板 SUS 材のむくり（u-側）

また、全ケース試験後の弾性すべり支承試験体について PTFE 材の膜厚を測定した。試験で使用した支承(No.1)では事前に膜厚測定ができなかったので、未使用の予備試験体(No.2)について測定して比較した。

膜厚測定は PTFE 面表面からバック鋼板までの厚みを計測するので、計測値は PTFE 厚（規格値 2mm）と接着層厚（同 1mm）の合計厚さとなる。図 2.3.1-17 に膜厚測定位置を、表 2.3.1-7 に膜厚測定結果を示す。

13 点の平均値で比較すると膜厚は 0.054mm の減少となっており、2mm の PTFE 膜厚に比べて変化量は 3%未満と小さい。

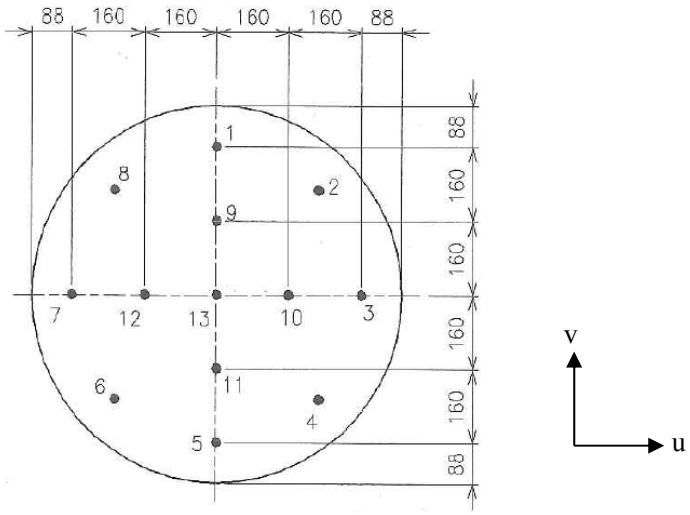


図 2.3.1-17　膜厚測定位置

表 2.3.1-7　膜厚測定結果

単位：mm

測定点	No.1 本試験体（試験後）	No.2 予備試験体（未使用）	測定点	No.1 本試験体（試験後）	No.2 予備試験体（未使用）
1	3.30	3.28	8	3.19	3.38
2	3.35	3.29	9	3.41	3.42
3	3.37	3.42	10	3.45	3.48
4	3.40	3.47	11	3.40	3.45
5	3.38	3.29	12	3.35	3.40
6	3.32	3.21	13	3.43	3.98
7	3.22	3.26	全点平均	3.356	3.410

7)　まとめと今後の課題

すべりに伴う発熱・放熱環境や累積エネルギーの上昇速度をより現実に近い状態で再現し、摩擦特性の変化や温度上昇、スケール効果を把握することを目的として、E－ディフェンスの大型震動台を用いて実大試験体（Φ800）の長振幅高速繰り返し試験を実施した。以下に、本実験から得られた知見をまとめて示す。

(1) 多数回繰り返しに対する摩擦特性の変化

累積変形 50m の長周期試験を経験する前後で繰り返しによる影響を見ると、摩擦係数が 0.147 から 0.062 と初期の 42%程度にまで低下している。各セット毎に繰り返しに伴って摩擦係数が低下する傾向が見られ、セット間のインターバルでは摩擦係数が回復（上昇）する傾向が確認できる。

(2) 多数回繰り返しに対する試験体の温度変化

長周期試験終了後のすべり板温度は、長周期試験（1 方向）で 204℃、長周期試験（2 方向）-1 で 220℃、長周期試験（2 方向）-2 で 260℃まで、それぞれ上昇した。長周期試験（2 方向）-2 直後のすべり板中央部の温度は材料の軟化が始まる 260℃に辛うじて達している。PTFE 裏のバック鋼板部の温度上昇はすべり板に比べて上昇速度は緩やかであるものの、インターバルの影響もなく上昇が続き、加振後も温度上昇が続く傾向があった。

(3) 多数回繰り返しに対する耐久性能

長周期および限界試験を経験したすべり支承試験体は、すべり面の PTFE に損傷は見られず健全な状態を保っていた。今回の試験では面圧が 10N/mm^2 と低いことも有り、すべり面の温度上昇に伴う PTFE の軟化現象などは確認されなかった。なお、今回の試験条件では、長周期試験は地震応答波試験の 10 倍相当以上の累積吸収エネルギーを確保することを確認した。

今後の課題として、縮小試験体との比較によるスケール効果の確認、インターバルによる放熱の影響の定量化、2 方向載荷の影響の把握、これらの要因の摩擦特性モデルへの反映などがあげられる。

参考文献

2.3.1-1)　社団法人日本免震構造協会：免震部材 JSSI 規格, 2000

2.3.2 オイルダンパー

(1) はじめに

長周期地震動を想定した多数回繰り返し加振に対するエネルギー吸収性能の把握を目的に行った評価実験（第Ⅲ部 1.3.8）では、メーカーの 2000kN 動的試験機を用いて、実大の免震構造用オイルダンパーに対して、条件 2B（周期 4 秒、変位±200mm、速度±0.314m/s、累積変形 100m 相当）の多数回繰り返し加振試験を実施し、油温で 100℃まで温度上昇に伴うエネルギー吸収性能の変化が小さく、作動油の滲みだしが生じないことを確認した。しかし、試験機の制約から加振振幅が±200mm に制限され、また、正弦波 6 サイクル毎にアキュムレータ蓄圧のためのインターバル（約 5 分）を設ける必要があったため、累積変形 100m の加振を行うための試験に約 90 分（6 サイクル×21 セット）の時間を要していた。

そこで、本実験では E ディフェンスの震動台を用いて、条件 3B（周期 4 秒、変位±400mm、速度±0.628m/s、累積変形 100m 相当）の加振を実施し、第Ⅲ部 1.3.8 の実験に比べて大振幅且つ短時間（約 1/3 の時間）でエネルギーを入力した場合の、エネルギー吸収性能の変化と限繰り返し界状態の発生の有無を把握する。また、参考試験として、大変形・大速度加振（周期 2.5 秒、変位±600mm、速度±1.50cm/s）を実施し、エネルギー吸収性能を把握する。

試験日時：

2012 年 2 月 6 日：限界 3B（累積変形 100m）加振

2012 年 2 月 7 日：地震波加振、大変形・大速度加振

試験場所：

独立行政法人　防災科学研究所　兵庫耐震工学研究センター（E ディフェンス）

(2) 試験体

日立オートモティブシステムズ（株）製の免震構造用オイルダンパー（形式 BM250-4C 型：最大減衰力 1000kN、ストローク±700mm、速度-減衰力：バイリニア型）1 体を試験体として用いる。試験体は、第Ⅲ部 1.3.8 の加振実験でも用いた（試験体 No1）である。オイルダンパー試験体の諸元を表 2.3.2-1 に、オイルダンパーの形状及び寸法を図 2.3.2-1 に示す。

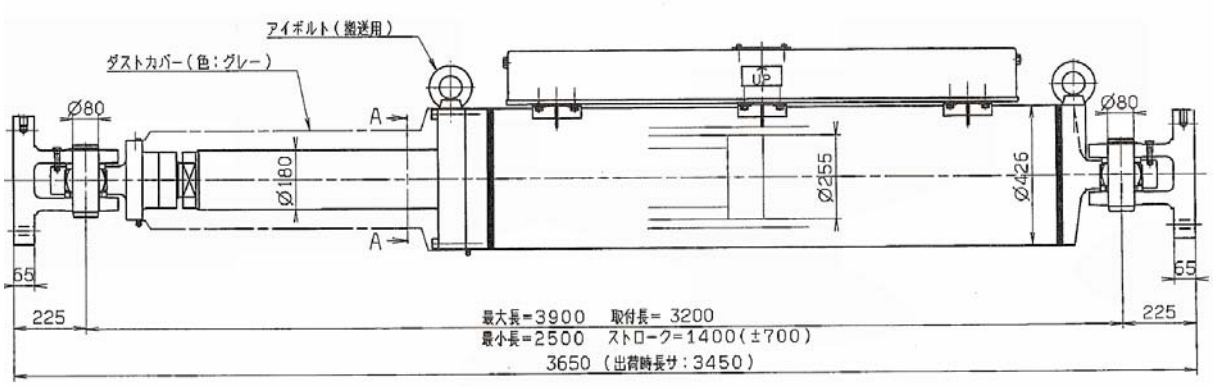


図 2.3.2-1 オイルダンパー形状寸法

表 2.3.2-1 試験体特性

	試験体 1 (大臣認定品)
オイルダンパー形式	BM250-4C
減衰力タイプ	バイリニア
1 次減衰係数(C1)　MN･s/m	2.50
2 次減衰係数(C2)　MN･s/m	0.1695
リリーフ速度　m/s	0.320
リリーフ減衰力　kN	800
最大速度　m/s	1.50
最大減衰力　kN	1000
ストローク　mm	±700

(3) 計測項目と計測方法

計測項目は、ダンパー減衰力、ダンパー変位、ダンパー各部の温度および室温を計測する。ダンパー減衰力は 2000kN の圧縮・引張型ロードセル（東京測器 TCLP-2MNB）で計測し、ダンパー変位は震動台のストロークを変位計で計測する。また、ダンパー各部の温度及び室温は K 型熱電対を用いて計測する。温度計測点の位置と試験体の設置状況を図 2.3.2-2、写真 2.3.2-1 および 2.3.2-2 に示す。油温は、試験体上部のリザーバータンク上面孔から熱電対をタンク内部に挿入して計測する。なお、データ収録のサンプリングは、200 回/秒（サンプリング周期 0.005 秒）とする。

計測項目

(1) ダンパー減衰力

(2) ダンパー変位

(3) 温　度　：タンク内油温 1 箇所，本体（ベースシェル）表面 3 箇所、ベースシェル端部表面 1 箇所、ロッド端部表面 1 箇所（図 2.3.2-2 参照）

(4) 室　温(雰囲気温度)

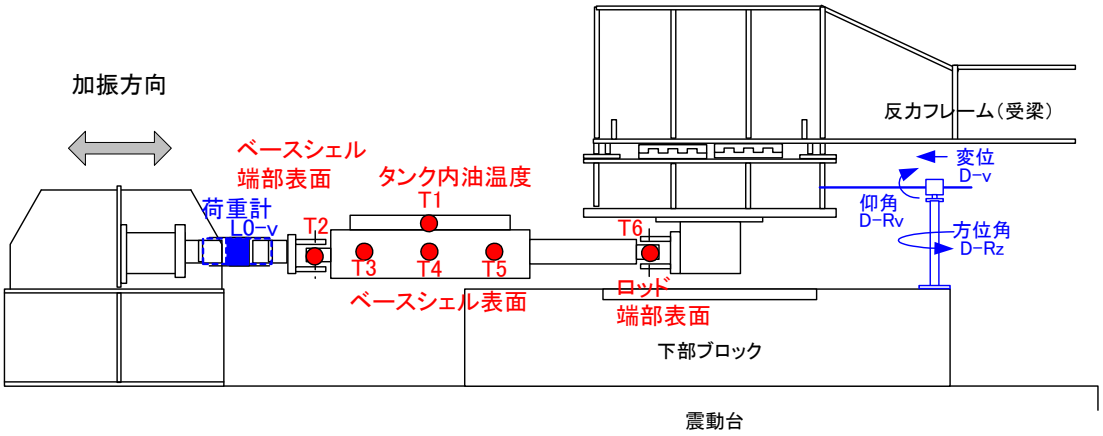


図 2.3.2-2 温度計測点の位置

写真 2.3.2-1 試験体のセット状況

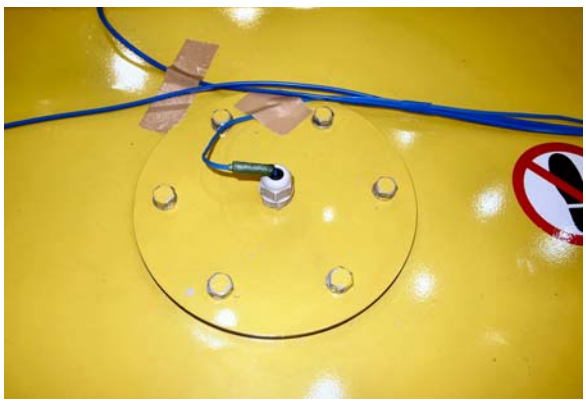


写真 2.3.2-2 油温計測用熱電対のセット状況

(4) 加振制御方法と実験ケース

試験項目は、以下に示す a)多数回繰り返し加振試験（限界 3B）、b)基本特性試験、c)地震応答波加振試験（aic003、szo024）、及び d)大変形・大速度特性試験の 4 項目である。試験条件の詳細は次頁の a)～d)に記す。試験では、①震動台を上昇させて接続ブロックのコッターを反力フレームに密着させ、②ジャッキーで固定した後、③震動台を下降させオイルダンパーの水平レベルを確保し、その後、④震動台の水平 2 方向（X・Y 方向）の変位加振（同位相）により、オイルダンパーの設置軸（V 方向）に対して 1 方向の動的加振を行う。

多数回繰り返し加振試験は、震動台の連続加振能力の制約（振幅±400mm の場合で 4 サイクル）から、正弦波 4 サイクル毎にアキュムレータ蓄圧のためのインターバル（所用時間約 1 分）を設けた。その結果、限界 3B 条件（累積変形 100m）の加振は、4 サイクル×16 セット（インターバル 15 回）で、試験時間は約 30 分となった。なお、震動台の加振波は、図 2.3.2-3 に示すように、1 秒間のテーパー波で変位を増加させ、所定の変位振幅で 4 サイクルの加振を行い、1 秒間のテーパー波で変位を減少させて停止する波形とする。テーパー部を含む累積変形量は 115.2m である。また、多数回繰り返し加振試験の前後と冷却後に基本特性試験を実施し、初期性能に対する最大減衰力およびエネルギー吸収量の変化状況を確認する。

また、大変形・大速度特性試験では、最大変位±600mm、最大速度±1.50m/s の正弦波 2 サイクルの加振を実施し、大変形・大速度加振時のオイルダンパーのエネルギー吸収性能を把握する。なお、第Ⅲ部 1.3.8 のメーカー試験機による試験は、加振力の制約から、本体側を固定し、ロッド側を駆動させる方法で行ったが、E ディフェンスでは、免震建築物でのダンパー設置状態により近づけるため、ロッド側を固定し、本体側を震動台で駆動させる方法（本体側オイルに慣性力が作用する状態）としている。ダンパーは、高温用断熱板（ｔ＝10mm，日本 D.M.E 製）を介して試験機に取り付ける。表 2.3.2-2 に試験ケース一覧を示す。

試験項目

a) 限界加振（±400mm、±0.628m/s、累積変形 100m）による多数回繰り返し加振試験
b) 基本特性試験（±159mm、±0.25m/s）　（限界 3B）
c) 大変形・大速度特性試験（±600mm、±1.5m/s）
d) 地震応答波加振試験（aic003、szo024）

表 2.3.2-2 試験ケース一覧

試験項目	周期 (s)	変位 (mm)	速度 (cm/s)	ｻｲｸﾙ (回)	ｲﾝﾀｰﾊﾞﾙ (回)	備考
(前)基本特性	4	159	25	2	－	常温時の基本特性
限界(3B)	**4**	**400**	**62.8**	**64**	**15**	多数回繰返し(累積変形100m)
(直後)基本特性1	4	159	25	2	－	温度上昇後の基本特性
冷却						
(冷却後)基本特性	4	159	25	2	－	冷却後の基本特性
応答波加振	－ －	107 188	25.7 45.5	－ －	－ －	AIC003(東海・東南海・南海) SZO024(東海・東南海・南海)
大変形・大速度特性試験	2.5 2.5 2.5 2.5	300 400 500 600	75 100 125 150	2 2 2 2	－ － － －	大変形大速度加振時の特性
(直後)基本特性2	4	159	25	2	－	大変形大速度加振後の基本特性

a）限界加振条件（限界 3B）による多数回繰り返し加振の試験方法

表 2.3.2-3 に示す限界加振条件でオイルダンパーを加振し、油温温度と最大減衰力、吸収エネルギー、履歴ループの関係を求める。図 2.3.2-3 に加振波形 1 セット分を示す。

表 2.3.2-3 限界加振条件 [3B]

加振波形	周期 (s)	変位 (cm)	速度 (cm/s)	減衰力 (kN)	加振ｻｲｸﾙ (回)	ｲﾝﾀｰﾊﾞﾙ (回)	累積変形 (m)	吸収ｴﾈﾙｷﾞｰ (kN･m)	温度上昇予想値 (℃)
正弦波	4.0	40.0	62.8	852.3	64	15	102.4	81478	98

注）累積変形、計画エネルギーは加振波形のうち、図 2.3.2-3 に示す評価区間部分の合計を表す。テーパー分を含む累積変形量は 115.2m である。

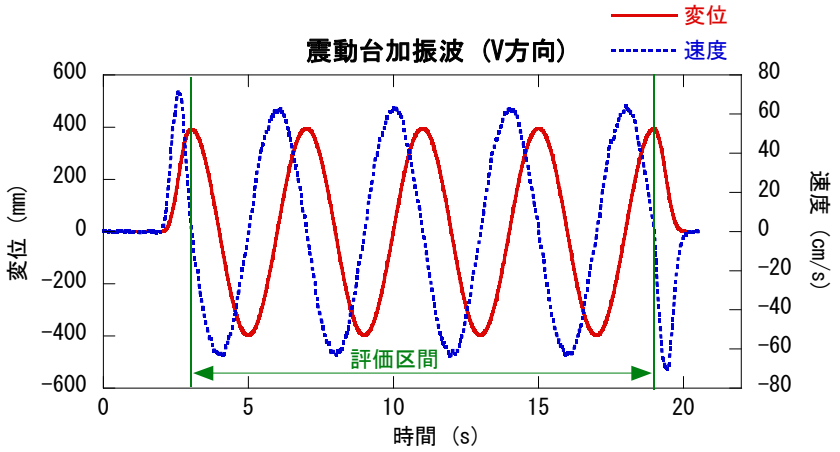


図 2.3.2-3 震動台の正弦波加振波形 (多数回繰り返し試験[3B]の場合)

b）基本特性試験の試験方法

表 2.3.2-4 に示す加振条件でオイルダンパーを加振し、最大減衰力、吸収エネルギー量および履歴ループを求める。図 2.3.2-4 に加振波形を示す。

表 2.3.2-4 基本性能試験の加振条件

加振波形	周期 (s)	変位 (cm)	ｻｲｸﾙ数（回）	速度 (cm/s)	減衰力規格±15% (kN)
正弦波	4.0	15.9	2	25.0	625.0±93.8

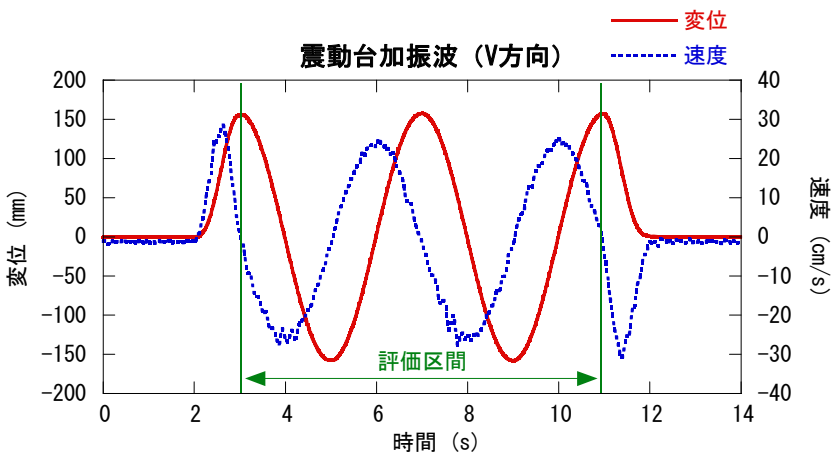


図 2.3.2-4 震動台の正弦波加振波形 (基本特性試験の場合)

c） 大変形・大速度特性試験の試験方法

表 2.3.2-5 に示す加振条件でオイルダンパーを加振し、最大減衰力、吸収エネルギー量および履歴ループを求める。図 2.3.2-5 に加振波形を示す。

表 2.3.2-5 大変形・大速度特性試験の加振条件

加振 波形	周期 (s)	変位 (mm)	ｻｲｸﾙ数 （回）	速度 (cm/s)	減衰力規格±15% (kN)
正弦波	2.5	300	2	75.0	872.9±130.9
		400		100.0	915.3±137.3
		500		125.0	957.6±143.6
		600		150.0	1000.0±150.0

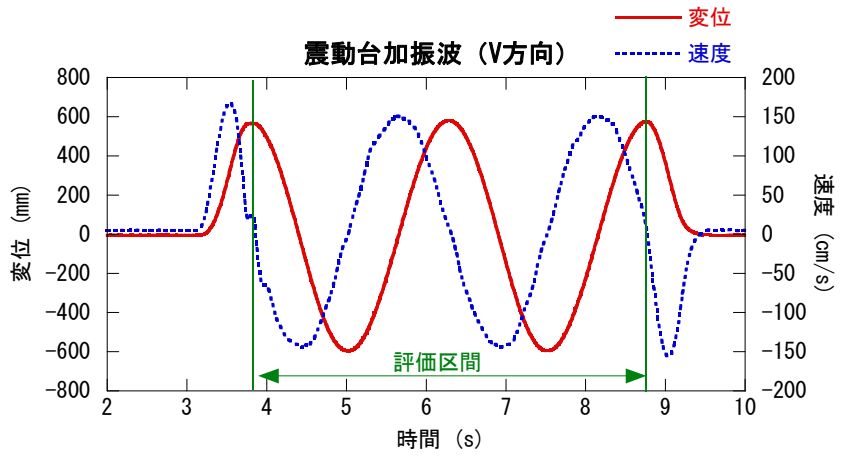


図 2.3.2-5 震動台の正弦波加振波形 (大変形・大速度特性試験の場合)

d）地震応答波加振試験の試験方法

表 2.3.2-6 に示す加振条件の地震応答波でオイルダンパーを加振した際の減衰力、吸収エネルギーを計測する。地震応答波は，東海・東南海・南海地震が連続して発生すると想定して作成した愛知県津島市の地震動（平均：AIC003-av）と静岡県浜松市の地震動（平均：SZO024-av）による、1 質点系地震応答解析から得られた変位応答波を入力する。なお、免震建築物の条件としては、固有周期 4 秒の天然ゴム支承＋高摩擦すべり支承の複合免震建築物を想定した。モデル重量に対する滑り荷重の比率は 0.04 である。図 2.3.2-6 及び図 2.3.2-7 に変位応答波形を示す。

表 2.3.2-6 地震応答波試験の加振条件

加振波形	地震応答波名	変位(mm)	速度(cm/s)	継続時間(s)
地震応答波	AIC003（津島）	106.9	25.7	325.0
	SZO024（浜松）	188.4	45.5	325.0

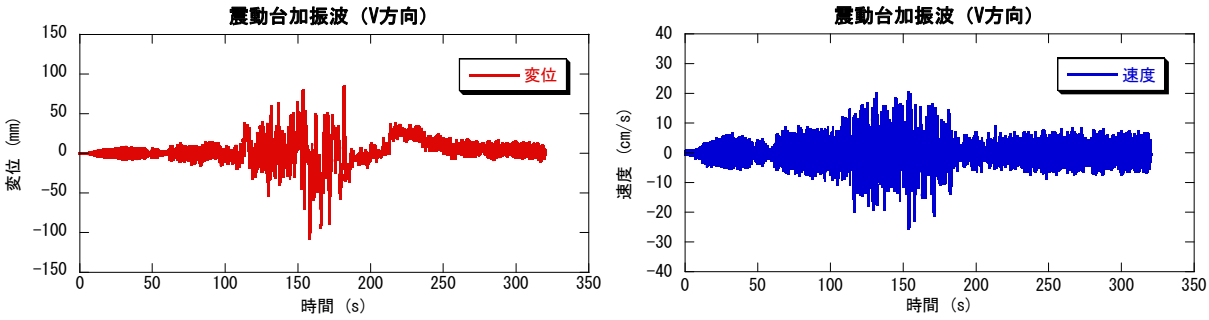


図 2.3.2-6 震動台の地震応答波加振波形（AIC003-av）

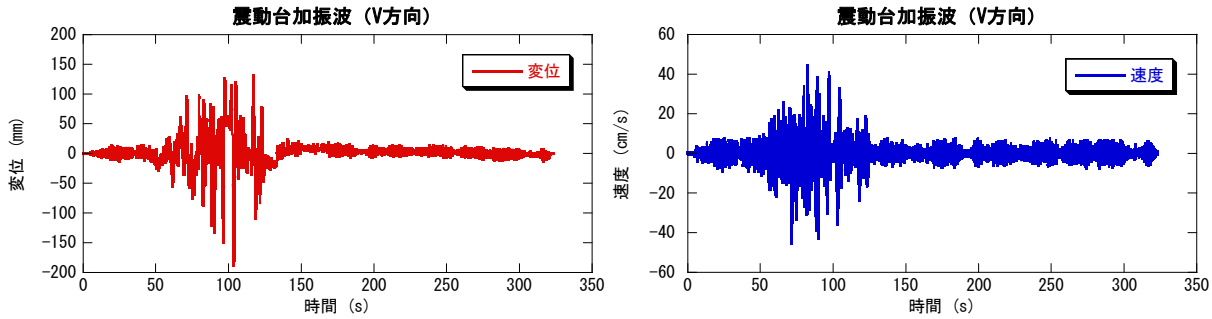


図 2.3.2-7 震動台の地震応答波加振波形（SZO024-av）

(5) 実験結果

a) 限界加振条件[3B]における履歴曲線、温度時歴とエネルギー吸収性能の関係

図 2.3.2-8 に表 2.3.2-3 の条件で加振した 4 波×16 セットの減衰力－変位曲線を重ねて示す。図 2.3.2-9 に加振時の各部温度の時刻歴波形を示す。表 2.3.2-7 に各加振セットにおける吸収エネルギー、最大減衰力、油温上昇量と、吸収エネルギーをオイルダンパーの熱容量（作動油+接液部鋼材）で除して求めた油温上昇予想値を示す。また、図 2.3.2-10 に限界加振試験後の温度推移の時刻歴を示す。

油温は 93.6℃上昇して 108.2℃となったが、履歴曲線の変化は小さく、エネルギー吸収量の低下率は 5%程度、最大減衰力の低下率も 4%程度であった。また、本体（ベースシェル）表面温度も、ロッド側の測点（T5）で 102.1℃となったが、油漏れは生じなかった。本体表面からの空気中への放熱量は少なく、入力エネルギーの大半が油温の温度上昇に反映されているため、累積吸収エネルギーを作動油+接液部鋼材の熱容量で除した油温上昇量の予測（放熱無し）でも実験結果と良い対応が得られている。なお、加振後、油温が 30℃以下まで低下するのに、約 12 時間の時間を要した。

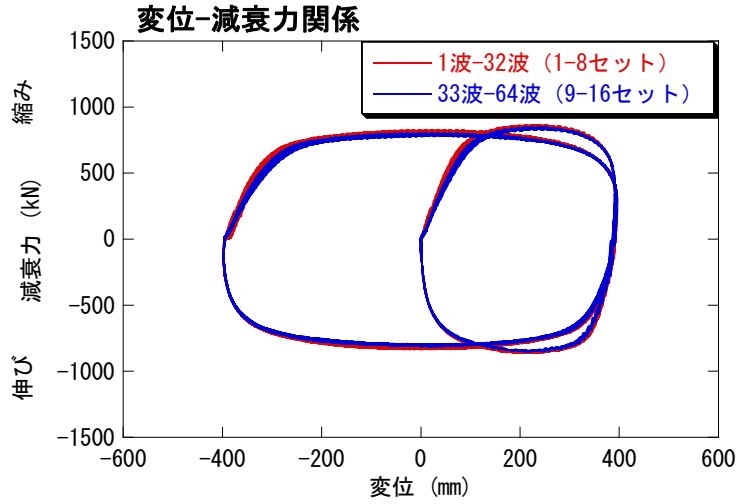


図 2.3.2-8　減衰力－変位曲線（4 波×16 セット）

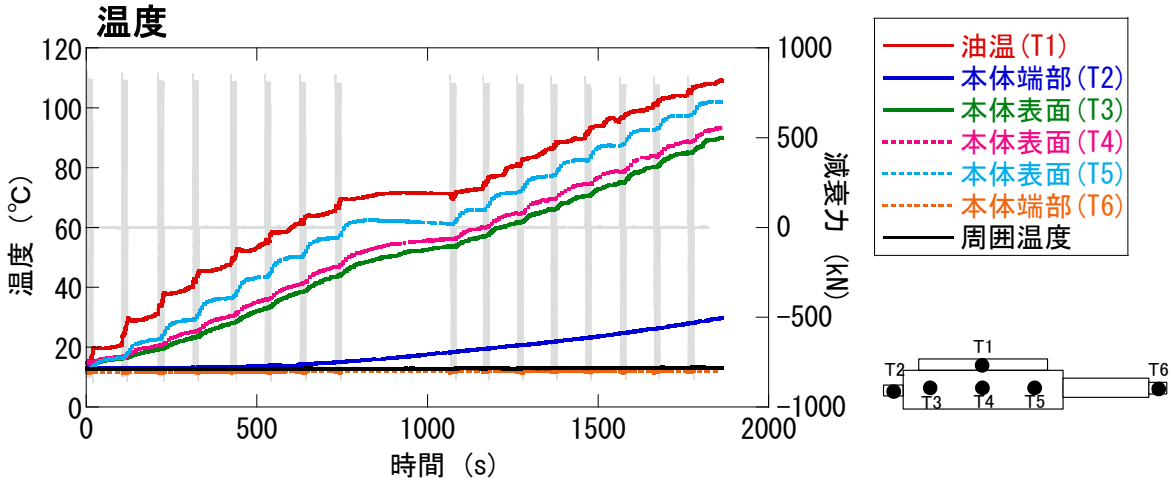


図 2.3.2-9　各部温度の時刻歴波形

表 2.3.2-7　各セットにおける吸収エネルギー、最大減衰力の推移と温度上昇量

周囲温度 12.7℃

ｾｯﾄ	累積変形(m)	吸収ｴﾈﾙｷﾞｰ(kN-m=kJ) *1			最大減衰力(kN)				油温上昇量（℃）		
		累積	個別	(低下率)	圧縮側	(低下率)	伸長側	(低下率)	試験値	予測値*2 放熱無し	予測値 放熱考慮
1	7.2	5154	5154	(1.00)	824.4	(1.00)	-832.3	(1.00)	6.0	6.2	6.0
2	14.4	10276	5122	(0.99)	819.1	(0.99)	-826.7	(0.99)	16.6	12.4	12.0
3	21.6	15385	5109	(0.99)	816.0	(0.99)	-823.1	(0.99)	25.7	18.5	17.9
4	28.8	20478	5093	(0.99)	815.2	(0.99)	-819.4	(0.98)	32.9	24.6	23.8
5	36.0	25555	5077	(0.99)	810.8	(0.98)	-816.9	(0.98)	40.0	30.7	29.7
6	43.2	30616	5060	(0.98)	807.2	(0.98)	-815.6	(0.98)	46.6	36.8	35.5
7	50.4	35656	5040	(0.98)	804.1	(0.98)	-810.8	(0.97)	50.9	42.9	41.3
8	57.6	40683	5028	(0.98)	802.2	(0.97)	-810.2	(0.97)	56.7	48.9	47.1
9	64.8	45709	5026	(0.98)	800.3	(0.97)	-810.1	(0.97)	58.6	54.9	52.8
10	72.0	50709	5001	(0.97)	797.3	(0.97)	-807.5	(0.97)	66.2	60.9	58.5
11	79.2	55697	4988	(0.97)	796.5	(0.97)	-806.8	(0.97)	71.4	66.9	64.2
12	86.4	60668	4971	(0.96)	795.5	(0.96)	-806.8	(0.97)	75.2	72.9	69.8
13	93.6	65631	4963	(0.96)	795.1	(0.96)	-805.9	(0.97)	80.9	78.9	75.1
14	100.8	70575	4944	(0.96)	792.9	(0.96)	-804.7	(0.97)	85.7	84.8	81.0
15	108.0	75509	4934	(0.96)	791.3	(0.96)	-801.3	(0.96)	89.6	90.8	86.5
16	115.2	80428	4919	(0.95)	789.4	(0.96)	-799.6	(0.96)	93.6	96.7	92.0

*1 吸収エネルギーは、テーパー部を含めて算出した数値である

*2 油温上昇の予測値は、吸収エネルギーを作動油+接液部鋼材の熱容量832kJ/℃で除した数値である

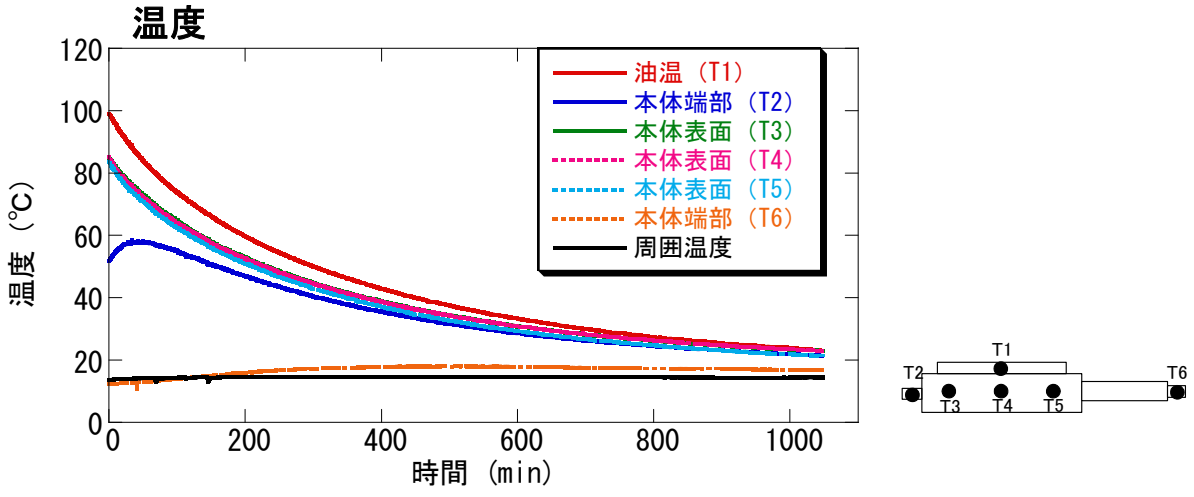


図 2.3.2-10 加振後の温度の降下推移（限界試験 3B 後）

b）限界加振試験[3B]、大変形・大速度試験前後の基本特性の比較

限界加振試験前の常温状態で実施した（前基本特性試験）と、限界試験直後の高温状態で実施した（直後基本特性試験 1）と、冷却後の常温状態で実施した（冷却後基本特性試験）の結果を比較して以下に示す。また、大変形・大速度加振試験直後に実施した（直後基本特性試験 2）の結果についても示す。図 2.3.2-11 に所定振幅 2 ループ目の減衰力－変位曲線を比較して示す。また、表 2.3.2-8 に所定振幅 2 ループ目の減衰力－変位曲線を用いて評価した、吸収エネルギーおよび最大減衰力を比較して示す。

限界試験直後の高温状態（油温約 110℃）における基本特性の変化は小さく、常温下（油温約 12℃）の初期状態に対する吸収エネルギーの低下率は約 6%、最大減衰力の低下率は約 3%であった。冷却後は、吸収エネルギーと最大減衰力ともに、ほぼ初期状態に復帰した。また、大変形・大速度試験直後（油温約 49℃）における基本特性の変化は、多数回繰り返しの限界試験による低下率に比べて、小さな値であった。

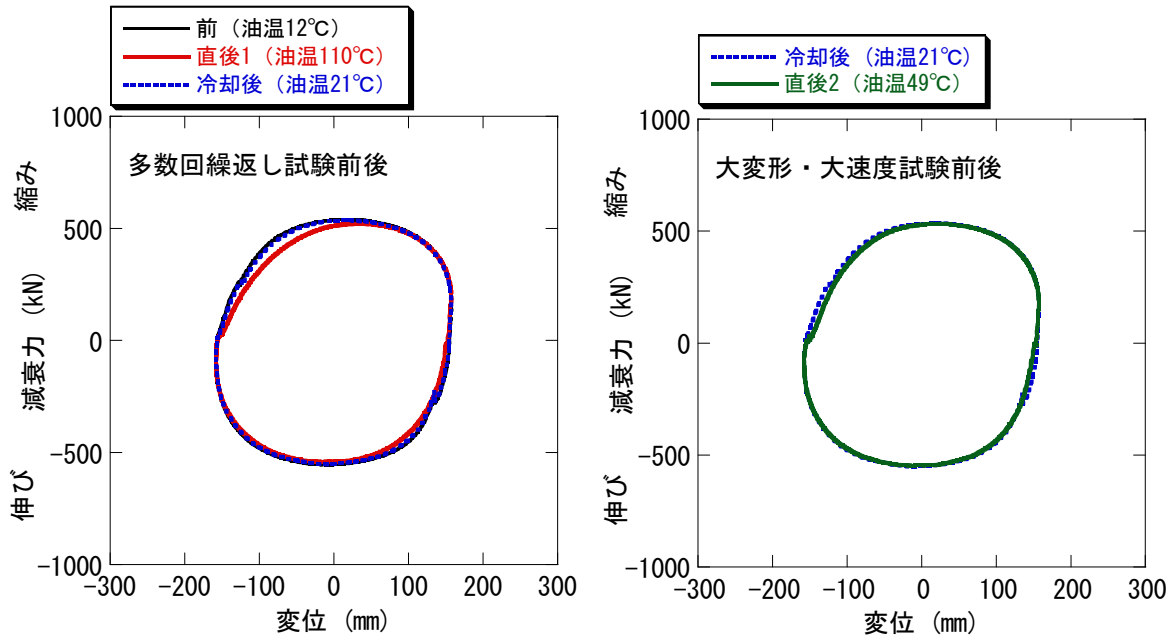


図 2.3.2-11　基本特性試験の減衰力－変位曲線の比較

表 2.3.2-8 限界加振試験、大変形・大速度試験前後の吸収エネルギー、最大減衰力の比較

加振ケース	油温（℃）	吸収ｴﾈﾙｷﾞｰ(kJ)		最大減衰力(kN)			
			(低下率)	圧縮側	(低下率)	伸長側	(低下率)
(前)基本特性	12.3	286.3	(1.00)	540.9	(1.00)	-556.5	(1.00)
多数回繰返し加振試験（限界3B）							
(直後)基本特性1	110.0	268.5	(0.94)	522.4	(0.97)	-541.9	(0.97)
冷却							
(冷却後)基本特性	20.7	281.5	(0.98)	536.6	(0.99)	-552.7	(0.99)
大変形・大速度加振試験							
(直後)基本特性2	49.3	275.2	(0.96)	534.1	(0.99)	-547.1	(0.98)

注1）吸収エネルギーと最大減衰力は、所定振幅2ループ目の履歴ループから算出した数値である
注2）低下率は、(前)基本特性の値に対する比として定義する

c） 大変形・大速度特性試験結果

図 2.3.2-12 に各加振速度における減衰力－変位曲線の 1 波目と 2 波目を重ねて示す。表 2.3.2-9 に吸収エネルギー、最大減衰力および、圧縮側減衰力に生じる立ち上り遅れの量（無効ストローク量）を、1 波目と 2 波目で比較して示す。また、図 2.3.2-13 に試験結果の最大減衰力を速度-減衰力の規格値と比較して示す。なお、図中には、事前に実施した工場試験（ロッド側加振）の結果も合わせて示している。本試験では、加振中にロードセル取り付けねじの回転に起因して、加振終了後にダンパー本体が約 17.6° 傾いていた。写真 2.3.2-3 および写真 2.3.2-4 に傾きの状況を示す。

各加振の 1 波目では正常な減衰力-変位特性が得られているが、2 波目では圧縮側の減衰力に立ち上がり遅れ（無効ストローク）が発生している。無効ストロークの量は、75cm/s 加振時は約 10mm、100cm/s 加振時は約 20mm、125cm/s 加振時は約 70mm、150cm/s 加振時は約 200mm であり、加振速度が大きくなるにつれて無効ストロークの量が大きくなっている。2 波目の圧縮側には減衰力の立ち上がり遅れがあるものの、最大減衰力は 1 波目と比べてほとんど変化が見られなかった。また、1 波目に対する吸収エネルギー量の低下率も、75cm/s および 100cm/s 加振時は約 1%、125cm/s 加振時も約 2%と小さく、150cm/s 加振時も約 8%の低下率であった。2 波目の伸長側に無効ストロークが見られないこと、また、数分のインターバルを設けて実施した次の加振の 1 波目では、正常な減衰力-変位特性が得られることから、リザーバータンク内の空気が作動油へ混入した可能性は低く、また、調圧弁・リリーフ弁の作動遅れの可能性も低い。

今回の加振実験においては、ダンパー本体側を加振したため、ダンパー本体に繰り返しの慣性力が作用することにより、2 波目のロッド伸長時にリザーバータンク室側から内シリンダー側への作動油の吸い込み不足が発生し、これに起因して圧縮側の減衰力の立ち上がりに遅れが発生した可能性が挙げられる。

なお、最大減衰力は、速度 150cm/s において、規格値よりもやや大きくなるが、他の速度では規格値内であった。

表 2.3.2-9 吸収エネルギー、最大減衰力および無効ストローク量の比較

速度 (cm/s)	変位 (mm)	加速度 (Gal)	ｻｲｸﾙ	油温 (℃)	吸収ｴﾈﾙｷﾞｰ(kJ)		最大減衰力(kN)				圧縮側の立上り遅れ
						(低下率)	圧縮側	(低下率)	伸長側	(低下率)	無効ｽﾄﾛｰｸ(mm)
75	300	189	1波目	26.2	884	(1.00)	862.3	(1.00)	-870.8	(1.00)	無し
			2波目	26.2	877	(0.99)	862.7	(1.00)	-869.8	(1.00)	10
100	400	253	1波目	30.8	1324	(1.00)	974.0	(1.00)	-978.2	(1.00)	無し
			2波目	30.8	1315	(0.99)	972.5	(1.00)	-974.5	(1.00)	20
125	500	316	1波目	35.8	1829	(1.00)	1085.9	(1.00)	-1091.4	(1.00)	無し
			2波目	35.8	1786	(0.98)	1083.8	(1.00)	-1086.0	(1.00)	70
150	600	379	1波目	49.3	2424	(1.00)	1217.2	(1.00)	-1230.1	(1.00)	無し
			2波目	49.3	2229	(0.92)	1210.6	(0.99)	-1222.0	(0.99)	200

注）低下率は、1波目の値に対する比として定義する

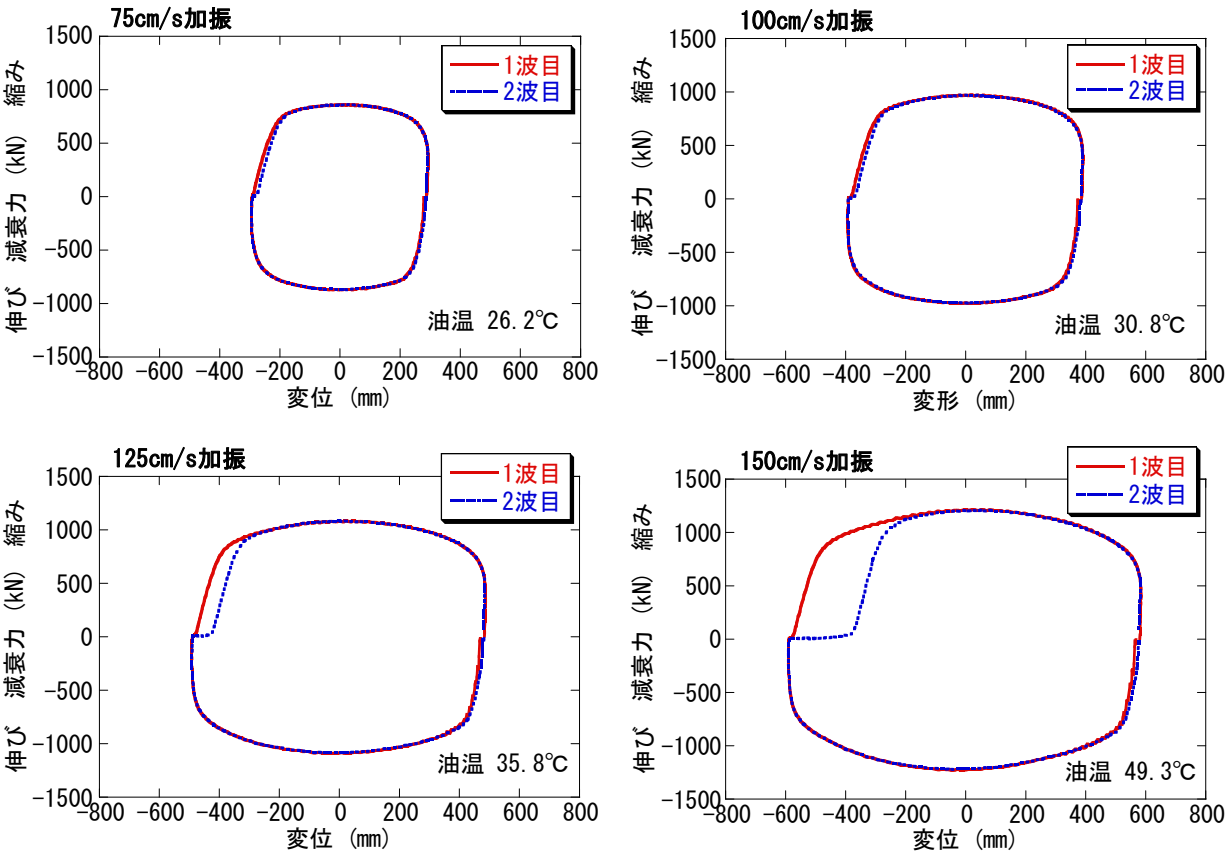


図 2.3.2-12　大変位・大速度特性試験時の減衰力－変位曲線（1 波目と 2 波目の比較）

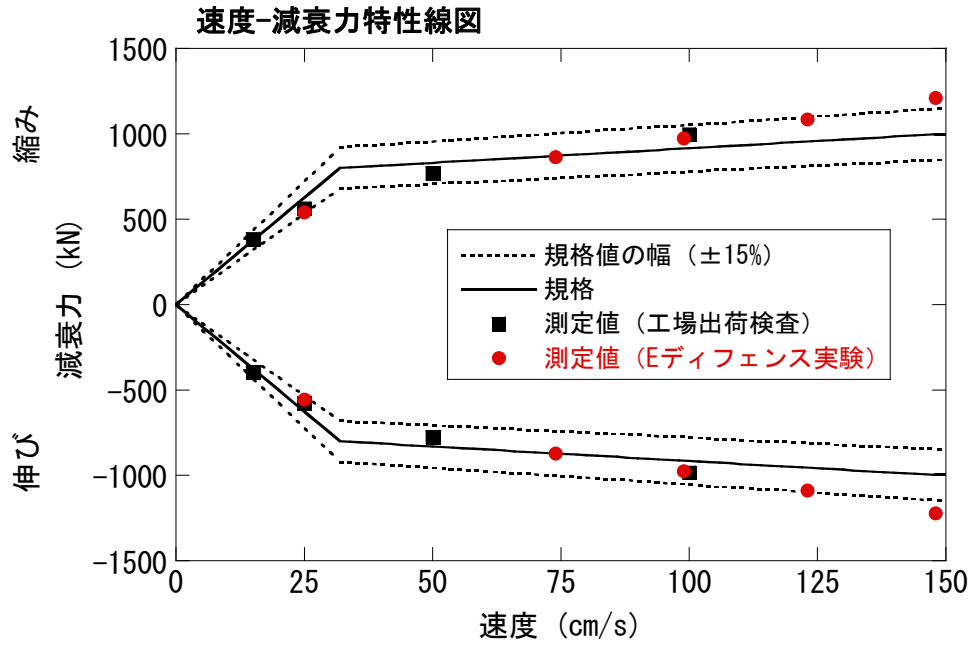


図 2.3.2-13 速度-減衰力関係の規格値との比較

写真 2.3.2-3 ダンパー傾きの状況

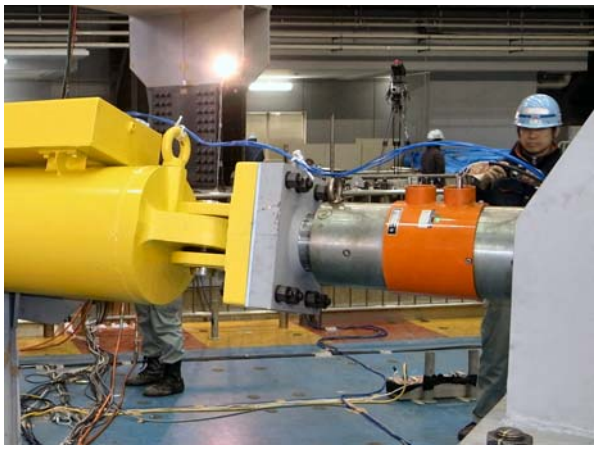


写真 2.3.2-4 ロードセル取り付けネジの回転

d) 地震応答波加振結果

図 2.3.2-14 および図 2.3.2-15 に地震応答波（AIC003-av）加振時の減衰力－変位曲線と、減衰力、吸収エネルギーおよび、温度の時刻歴波形を示す。

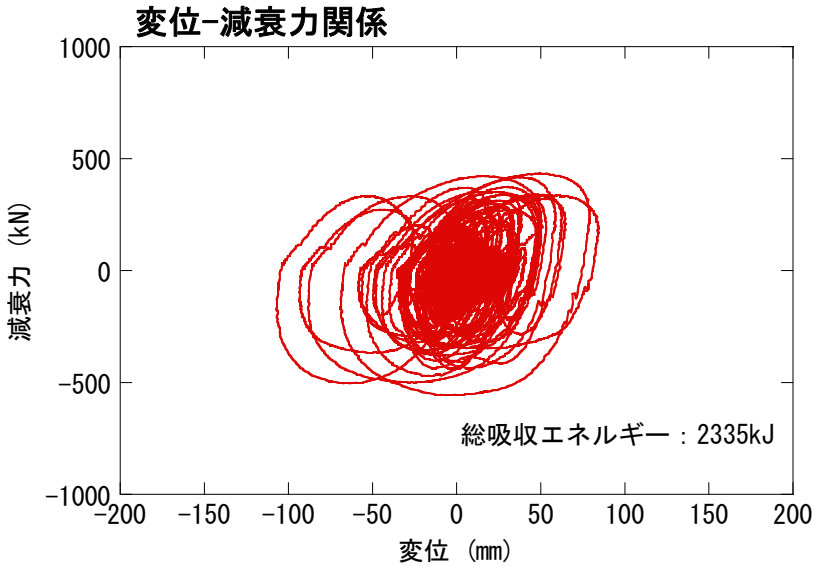


図 2.3.2-14　減衰力－変位曲線　（地震応答波　AIC003-av）

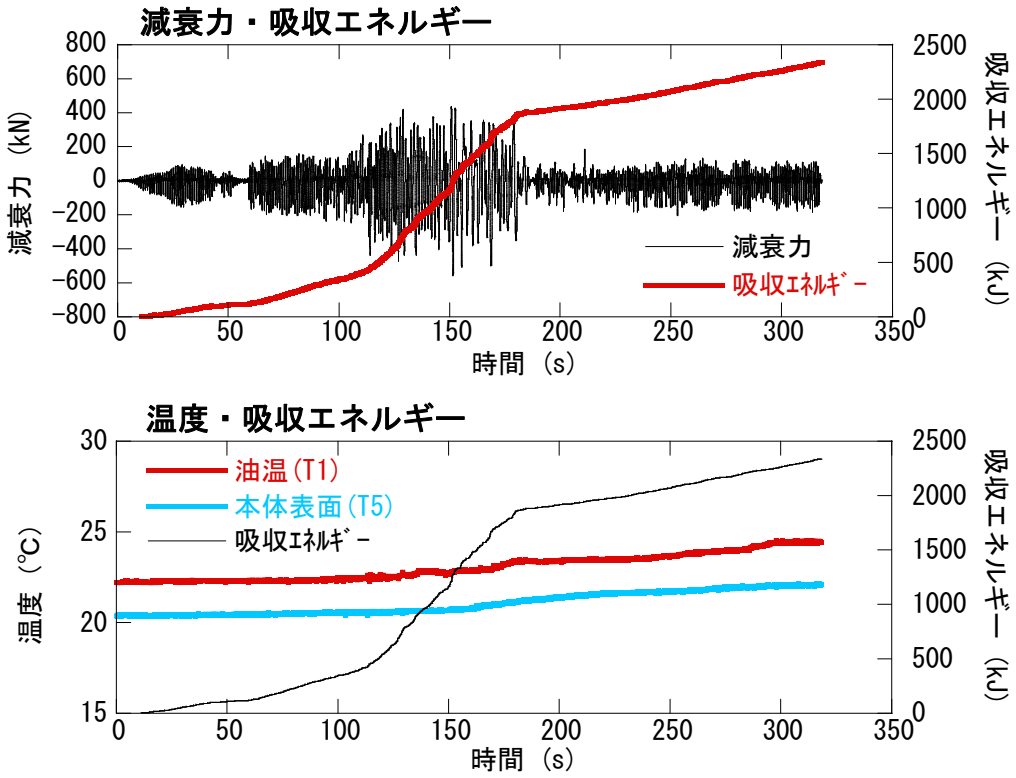


図 2.3.2-15 減衰力、吸収エネルギー、温度上昇の時刻歴波形（地震応答波 AIC003-av）

図 2.3.2-16 および図 2.3.2-17 に地震応答波（SZO029-av）加振時の減衰力－変位曲線と、減衰力、吸収エネルギーおよび、温度の時刻歴波形を示す。

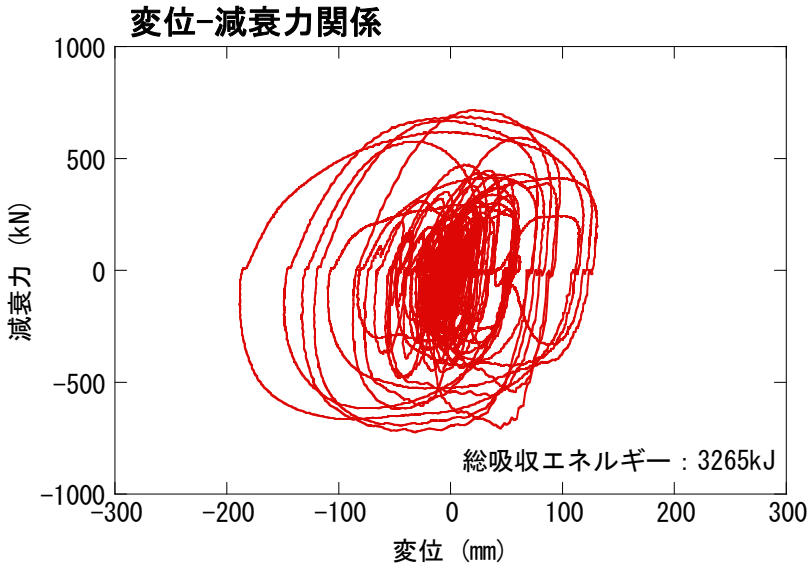


図 2.3.2-16　減衰力－変位曲線　（地震応答波 SZO029-av）

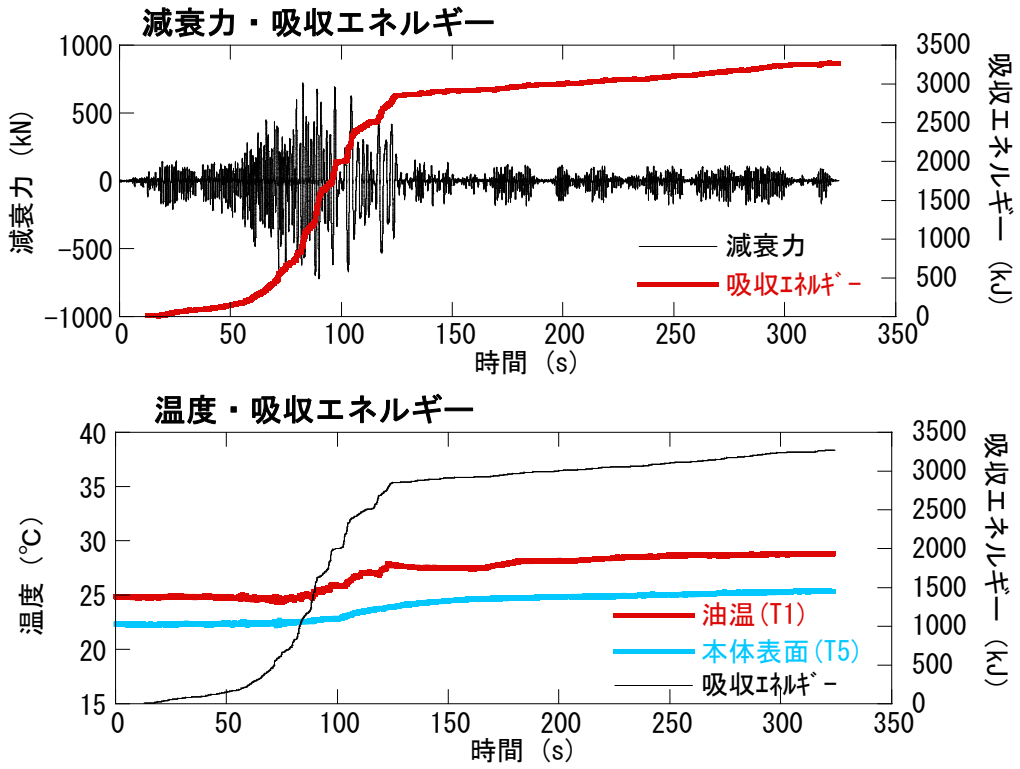


図 2.3.2-17　減衰力、吸収エネルギー、温度上昇の時刻歴波形（地震応答波 SZO029-av）

(6) まとめ

① 多数回繰り返し特性

図 2.3.2-18 に多数回繰り返し試験（3B）の結果について、加振時間と累積吸収エネルギー（加振前後のテーパを含む）および油温上昇量の関係を、第Ⅲ部 1.3.8 の試験結果（2A、2B）と比較して示す。また、図 2.3.2-19 に累積吸収エネルギーと油温上昇量の関係をまとめて示す。また、図 2.3.2-20 および図 2.3.2-21 に油温と最大減衰力・吸収エネルギーの低下率の関係をまとめて示す。これらの結果より、得られた知見は以下である。

・本試験（3B）は、メーカー試験機を用いた第Ⅲ部 1.3.8 の試験（2A、2B）の約 1/3 の加振時間で、目標とする累積変形量の加振が実施できた。
・限界加振条件 3B（所定振幅加振部分の累積変形量が約 100m、テーパー部を含む累積変形量が約 115.2m）の加振による油温上昇量は 93.6℃（油温 14.6℃→108.2℃）であった。本体（ベースシェル）表面温度も、ロッド側の測点（T5）で 102.1℃となったが、履歴性状の変化は小さく、また、シール部から作動油の滲みだしは見られなかった。
・試験体表面からの空気中への放熱量は少なく、入力エネルギーの大半が油温の温度上昇に反映されているため、累積吸収エネルギー量と油温上昇量の相関は高い。累積吸収エネルギーを作動油+接液部鋼材の熱容量で除した油温上昇量の予測（放熱無し）でも実験結果と良い対応が得られた。なお、インターバルによる放熱の影響を評価するため、放熱を考慮した油温上昇量の予測値と放熱無しの予測値を比較したところ、加振 30 分間の本実験の放熱量は 4.7℃であり、第Ⅲ部 1.3.8 の加振 90 分間の放熱量の 11.5℃に比べて小さいことがわかる。
・多数繰り返し加振による油温の上昇に伴い、最大減衰力と吸収エネルギー量は僅かに低下する傾向が見られる。常温（20℃）に対する最大減衰力の低下率は、油温（108℃）においても伸び側・縮み側共に約 4%であった。また、エネルギー吸収量の低下率は、油温（108℃）においても約 5%の低下であった。

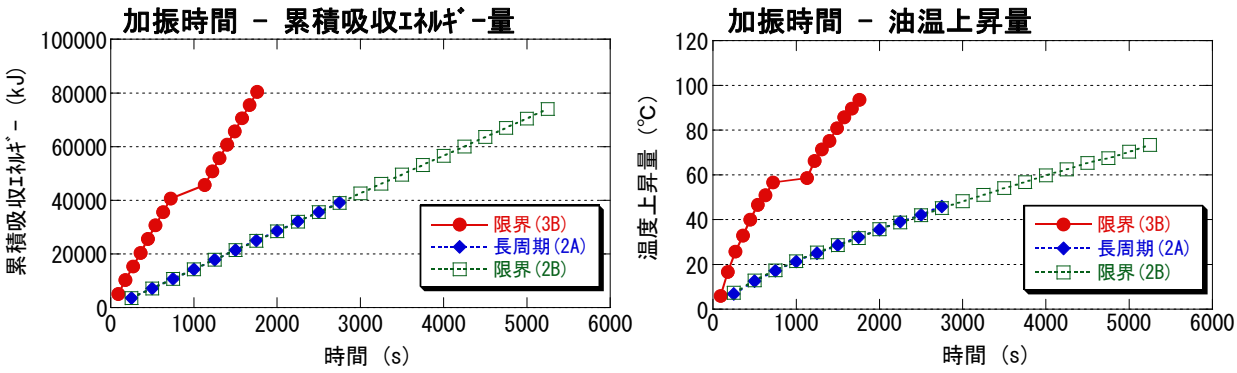


図 2.3.2-18 多数回繰り返し試験結果（加振時間と累積吸収エネルギー及び油温上昇量の関係）

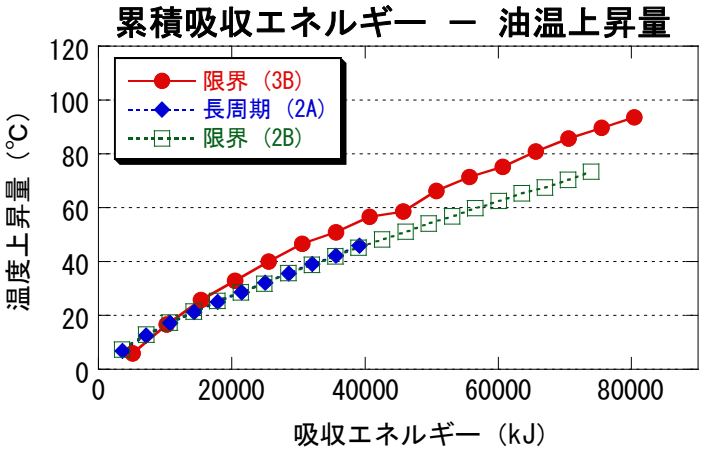


図 2.3.2-19 多数回繰り返し試験結果（累積吸収エネルギーと油温上昇量の関係）

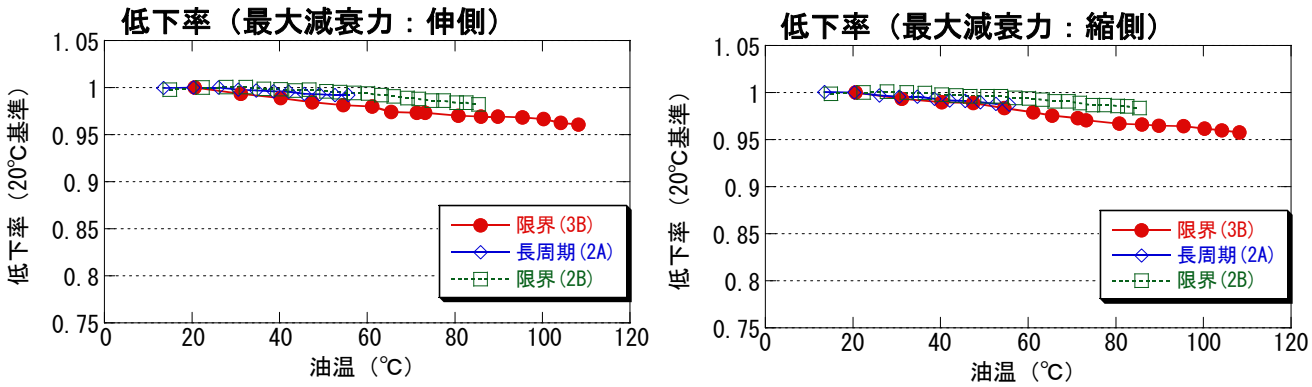


図 2.3.2-20　多数回繰り返し試験結果（油温と最大減衰力の低下率の関係）

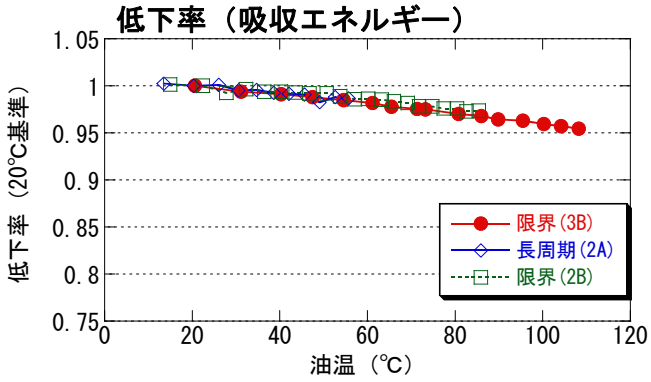


図 2.3.2-21　多数回繰り返し試験結果（油温と吸収エネルギーの低下率の関係）

②多数回繰り返し前後の基本特性の変化および大変形・大速度特性

図 2.3.2-22 に多数回繰り返し試験結果前後および冷却後に実施した基本特性試験について、初期特性に対する最大減衰力および吸収エネルギーの変化率をまとめて示す。また、加振 2 波目において圧縮側の減衰力に立ち上がり遅れ（無効ストローク）が発生した大変形・大速度特性試験について、最大減衰力および吸収エネルギーの 1 波目に対する 2 波目の低下率を図 2.3.2-23 にまとめて示す。図 2.3.2-24 に試験結果の最大減衰力を速度-減衰力の規格値と比較して示す。これらの結果より、得られた知見は以下である。

・多数繰り返し加振直後の高温状態（油温約 110℃）における基本特性の変化は小さく、常温化（油温約 12℃）の初期状態に比べ、吸収エネルギーは約 6%、最大減衰力は約 3%の低下率であった。また、油温が常温状態に戻ると、基本特性は、ほぼ初期状態に復元した。
・大変形・大速度試験では、各加振の 1 波目では正常な減衰力-変位特性が得られたが、2 波目では圧縮側の減衰力に立ち上がり遅れ（無効ストローク）が発生した。無効ストローク量は、75cm/s 時は約 10mm、100cm/s 時は約 20mm、125cm/s 時は約 70mm、150cm/s 時は約 200mm であり、加振速度が大きくなるにつれて無効ストロークの量が大きくなった。
・2 波目の圧縮側には減衰力の立ち上がり遅れがあるものの、最大減衰力は 1 波目とほぼ同じ値であった。一方、吸収エネルギー量は、75cm/s および 100cm/s 時は約 1%、125cm/s 時は約 2%、150cm/s 時は約 8%の低下率であった。減衰力の立ち上がり遅れが発生しても、数分のインターバルを設けて実施した次の加振の 1 波目では、正常な減衰力-変位特性が得られた。
・最大減衰力は、速度 150cm/s において、規格値よりもやや大きくなるが、他の速度では規格値内であった。

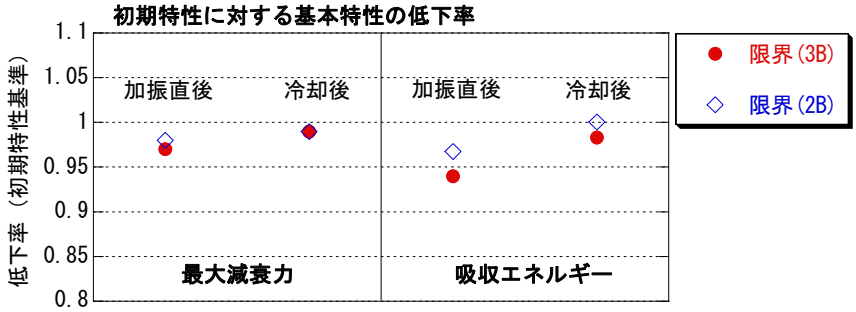


図 2.3.2-22 多数回加振後および冷却後の初期特性に対する基本特性の変動

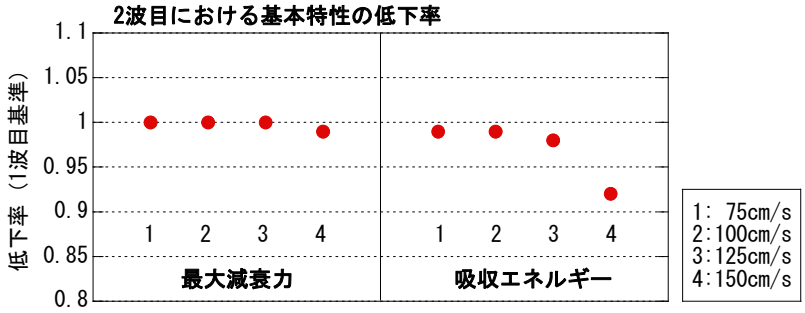


図 2.3.2-23 履歴 2 波目おける基本特性の変化率（大変形・大速度試験）

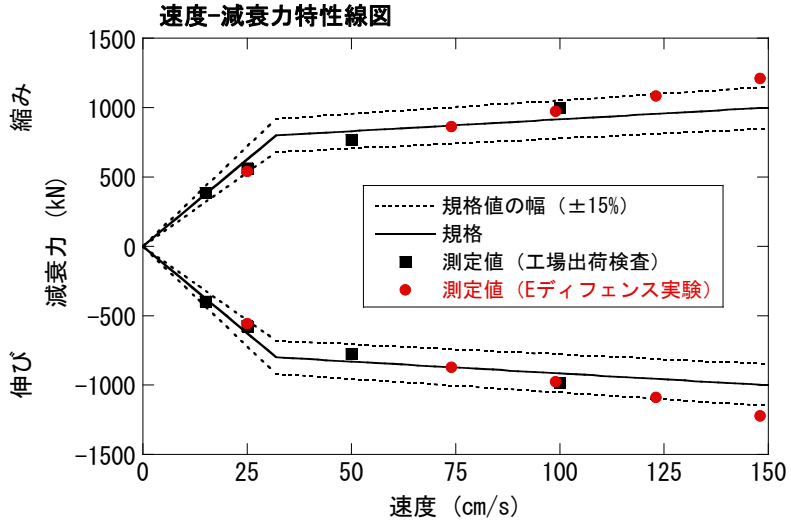


図 2.3.2-24 速度-減衰力関係の規格値との比較

③今後の課題

多数回繰り返し（限界）試験については、オイルシールとしてフッ素系樹脂よりも限界温度が低いニトリルゴムを用いたダンパーについても、試験を実施するのが望ましい。

大変形・大速度試験については、2 波目の圧縮側で減衰力に立ち上がり遅れ（無効ストローク）が発生した。2 波目の伸長側に無効ストロークが見られないこと、また、数分のインターバルを設けて実施した次の加振の 1 波目では、正常な減衰力-変位特性が得られることから、リザーバータンク内の空気が作動油へ混入した可能性は低く、また、調圧弁・リリーフ弁の作動遅れの可能性も低い。よって、圧縮側減衰力の立ち上がり遅れが発生した原因としては、ダンパー本体側を加振したことによって、リザーバータンク内の作動油に繰り返しの慣性力が作用し、2 波目のロッド伸長時にリザーバータンク室側から内シリンダー側への作動油の吸い込み不足が発生した可能性が挙げられる。しかし、本実大試験体については、試験機の加振能力の制約により、メーカー試験機でのロッド側加振による比較データ（大変形・大速度データ）がないため、推論の域をでない。以上より、メーカーの試験機で、縮小試験体によるロッド側加振および本体側加振の比較実験を実施し、リザーバータンク内の作動油に慣性力が作用した場合の影響を把握する必要がある。また、他のメーカーの実大オイルダンパーについても、同様の大変形・大速度加振を実施することが望ましい。

2.3.3 天然ゴム系積層ゴム（静加力試験）

(1) はじめに

天然ゴム系積層ゴムの実大試験体（φ1000）については、Eーディフェンスでの実験を予定し試験体を製作したが、震動台の制御上の理由により同施設での実施が困難であることが判明したため、これに変えてメーカーの試験機で静的条件で多数回繰返し試験を行うこととした。試験の概要は以下のとおりである。

試験日時：

2012 年 3 月 1 日：長周期（累積変形 50m）、限界（累積変形 100m）加振

試験場所：

(株)ブリヂストン　横浜工場　2MN 出庫試験機

鉛直最大 2MN、最大速度 7mm/s、ストローク±500mm

(2) 試験体

支承は外径Φ1000（ゴム種 G4、ブリヂストン製）の実大試験体。ゴム層厚は 6.7mm、ゴム層数は 30 層、内部鋼板厚は 4.4mm、S1=37.3、S2=5.0、基準面圧は 15N/mm^2 である。

試験体の外観図を図 2.3.3-1 に示す。

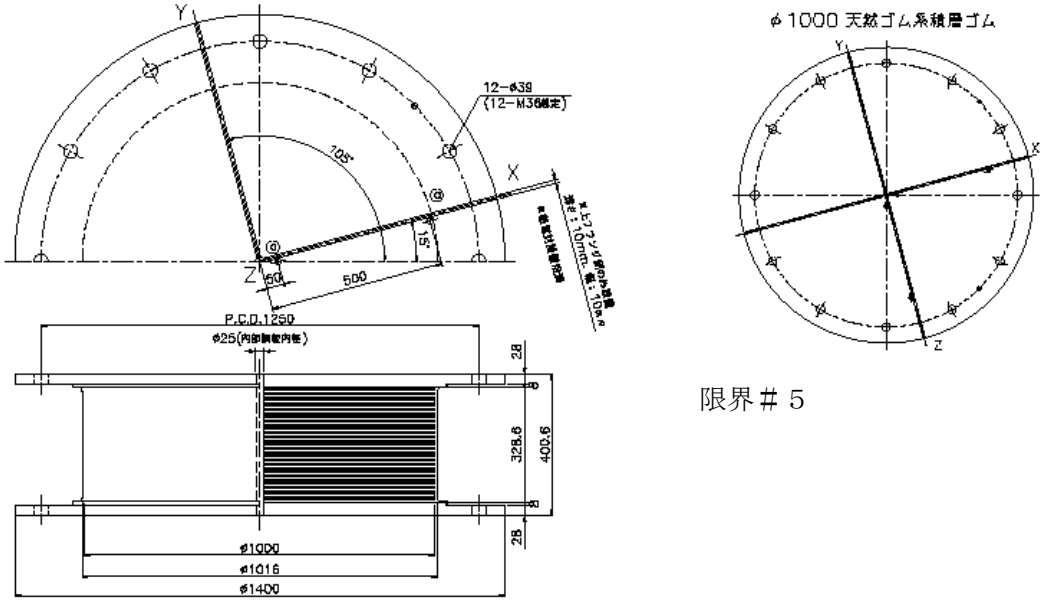


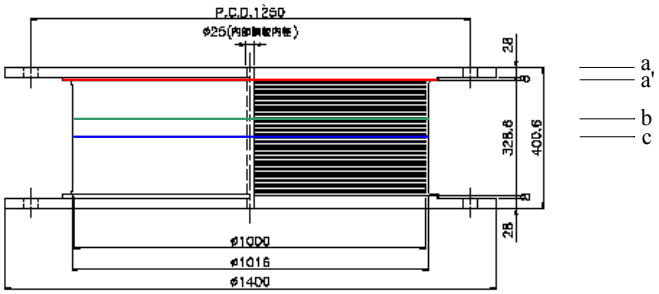
図 2.3.3-1 試験体外観（天然ゴム系積層ゴム支承）

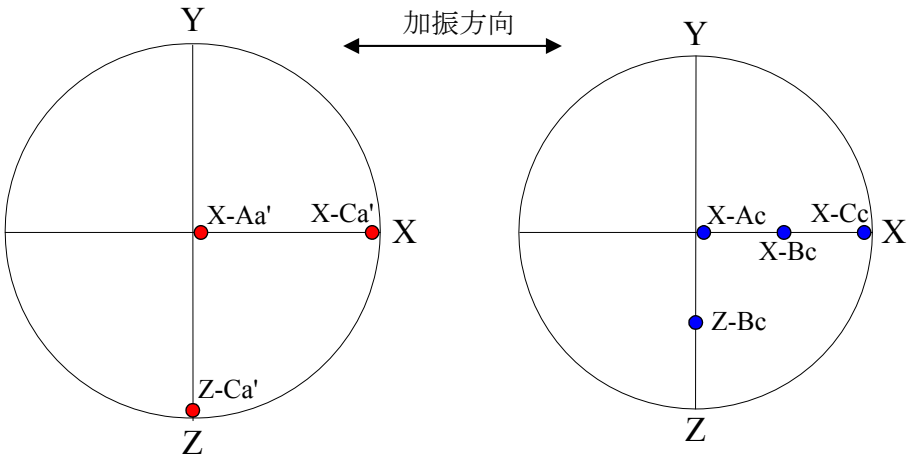
(3) 計測項目

計測項目は、試験機の測定装置による水平変位、水平荷重、鉛直荷重、温度（試験体内部・表面、室温）とした。

温度計測は、ゴム内部および上フランジ下面に計 7 点の熱電対と、外気温計測用に外部に 1 点の熱電対を設置した。

温度計測点を図 2.3.3-2 に示す。





a'：上フランジ境界面　　b：1/2ゴム高さ

図 2.3.3-2 温度計測点

(4) 実験ケース

実験ケース一覧を表 2.3.3-1 に示す。加振波には三角波を用い、基本特性試験は振幅 201mm、速度 6.67mm/s（周期 120.5 秒）、長周期および限界特性試験は振幅 402mm、速度 6.67mm/s（周期 241 秒）の条件とした。長周期および限界特性試験は、10 サイクルを 1 セットとし、セット間に油温低下のためのインターバル時間をとった。

表 2.3.3-1 実験ケース一覧

ケース	セット	ｻｲｸﾙ数	変位 ±mm	速度 cm/s	加振周期 s	時間 s	累積変形 m
基本特性		3	201	6.67	120.5	362	2.4
長周期	#1	10	402	6.67	241	2411	16.1
	#2	10	402	6.67	241	2411	16.1
	#3	12	402	6.67	241	2892	19.3
	計	32					51.5
直後基本特性(1)		3	201	6.67	120.5	362	2.4
限界	#1	10	402	6.67	241	2411	16.1
	#2	10	402	6.67	241	2411	16.1
	#3	10	402	6.67	241	2411	16.1
	#4	10	402	6.67	241	2411	16.1
	#5	10	402	6.67	241	2411	16.1
	#6	10	402	6.67	241	2411	16.1
	#7	4	402	6.67	241	964	6.4
	計	64					102.9
直後基本特性(2)		3	201	6.67	120.5	362	2.4

(5) 実験結果

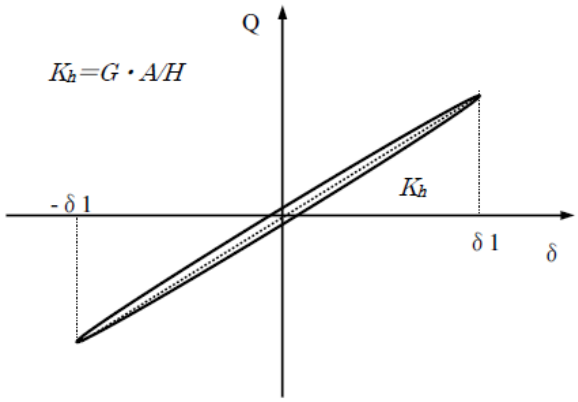
1) 特性値の評価方法

免震部材の水平剛性、等価粘性減衰定数は以下の方法により求める。評価方法は、参考文献[2.3.3-1)]をもとに定義する。

特性値の評価対象は原則として載荷３サイクルめの荷重－変形関係とする。長周期、限界試験では繰り返し特性を評価するため、各載荷ケースでサイクル毎の荷重－変形関係特性値を読み取ることとする。

(a) 水平剛性

荷重－変形関係において、原点と最大荷重点を結ぶ直線の勾配の正負平均値を水平剛性 *Kh* とする（図 2.3.3-3,式(2.3.3-1)）。



$$K_h=G\cdot A/H \qquad (2.3.3\text{-}1)$$

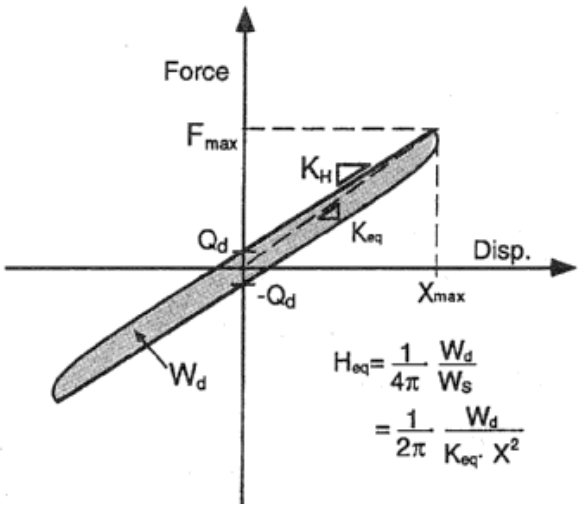
ここで、
G:ゴムのせん断弾性係数
A:積層ゴムの有効断面積(mm²)
H:ゴム層総厚さ(mm)

G=0.392N/mm²
（G4, 規定ひずみγ=100%時）

図 2.3.3-3 水平剛性 *Kh* の算出方法

(b) 減衰特性値

履歴の面積と前述の水平剛性 *Kh* から等価粘性減衰定数 *heq* を求める（図 2.3.3-4）。



$$H_{eq}=\frac{1}{4\pi}\frac{W_d}{W_s}=\frac{1}{2\pi}\frac{W_d}{K_{eq}\cdot X^2} \qquad (2.3.3\text{-}2)$$

図 2.3.3-4 等価粘性減衰 *heq* の算出方法

2) 荷重-変位関係

各試験の荷重-変位関係を図 2.3.3-5~6（図番号に記号 a を付す）に示す。荷重データは試験機面板の摩擦力分を除去した値を用いている。

荷重-変位関係における履歴形状について見てみると、γ=100%の振幅範囲で行った基本特性試験では１サイクル目の剛性がやや高めになっているが２サイクル目と３サイクル目はほぼ重なっており、線形に近い安定した履歴ループを描いている。γ=200%の振幅範囲で行った長周期試験でも同様に基本特性試験と同様に１サイクル目の剛性がやや高めとなっているが、2 サイクル目以降の履歴形状は、サイクルごとにごく僅かな剛性の低下があるものの、サイクルを重ねるごとにより安定した履歴ループを描いている。また γ=200%の長周期試験では若干のハードニング傾向が見られる。長周期試験の続きで行った限界試験についても、安定した履歴ループを描いており、長周期試験とほぼ同様の結果となっている。

3) 温度変化

長周期試験の温度変化を図 2.3.3-5（図番号に記号 b を付す）に示す。

本試験は載荷速度が 6.67mm/s と遅いため本試験による試験体の温度変化はほとんど見られず、試験体上フランジ(a’面)では 7℃前後、試験体中央面(c 面)では 12.5℃前後と安定していた。

4) 試験前後の荷重-変位関係の変化

長周期または限界試験の前後に行った基本特性試験で得られた荷重-変位関係の比較を図 2.3.3-7 に示す。長周期試験後の基本特性は試験前より剛性がやや低くなっているが、その後の限界試験前と限界試験後の基本特性との差はごく僅かなものであった。

5) *Kh*、*Heq* の変化

長周期・限界試験の *Kh* および *Heq* の変化を図 2.3.3-8 に示す。初期のサイクルで *Kh*、*Heq* の値が急に低下し、その後はサイクルを重ねるごとに変化の割合は小さくなる傾向にある。また *Kh* はサイクルを重ねるごとに低下する傾向にあり、それとは逆に *Heq* は上昇する傾向にあったが、いずれも 3 サイクルめ以降の変化はごく緩やかなものであった。

各ケースの 3 サイクルめで評価された *Kh*、*Heq* の一覧を表 2.3.3-2 に示す。比率欄は最初に実施した基本特性試験の値に対する比率を表している。長周期・限界試験の各ケースを比較すると、サイクルを重ねるごとに *Kh* が低下し *Heq* が上昇する傾向が確認できる。長周期・限界試験の前後における基本特性試験の値を比較すると、*Kh* は長周期試験後約 9%低下し、限界試験後さらに 1%程度低下している。*Heq* については長周期試験後 30%ほど上昇し、限界試験後さらに 12%ほど上昇した。

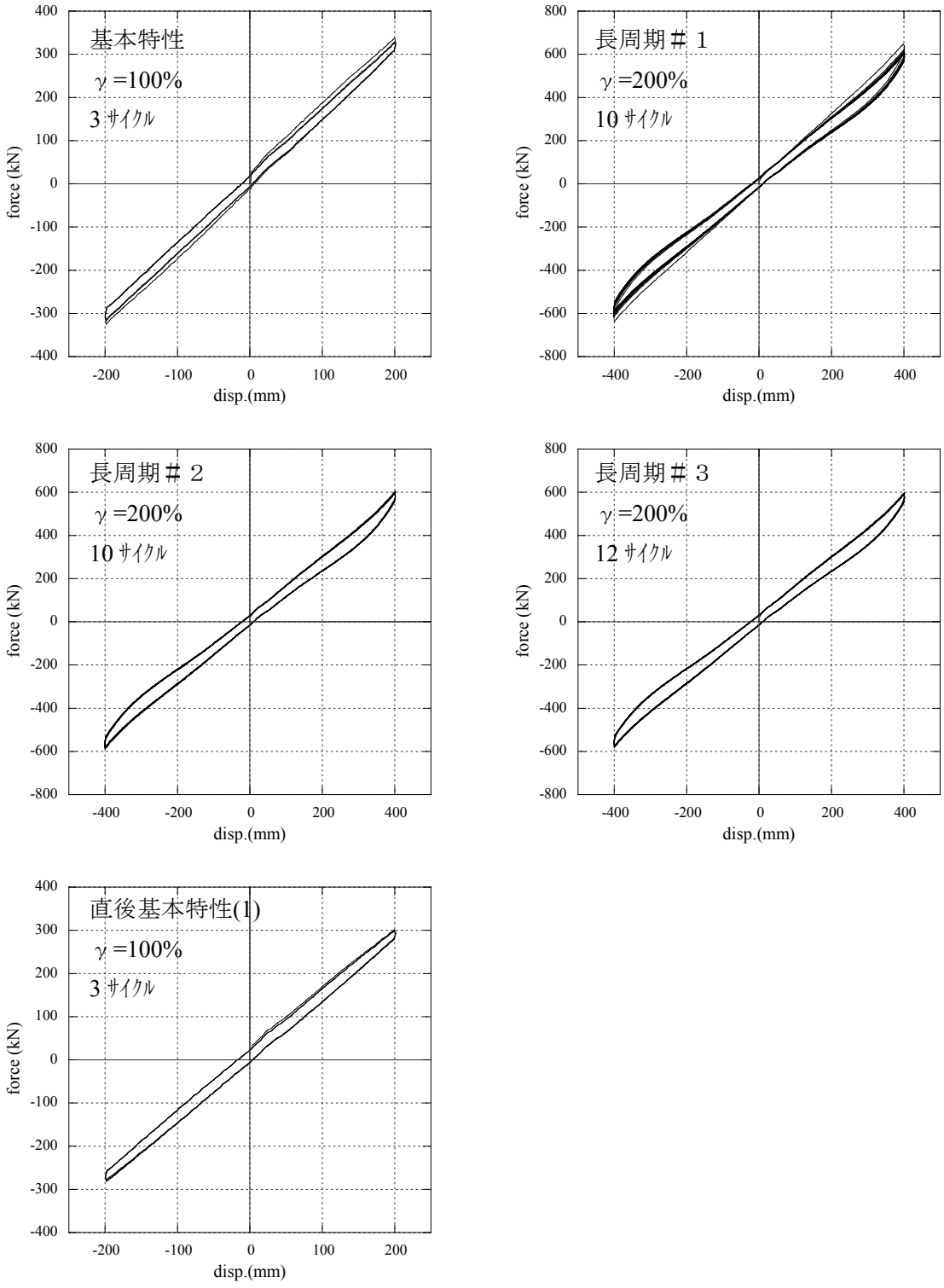
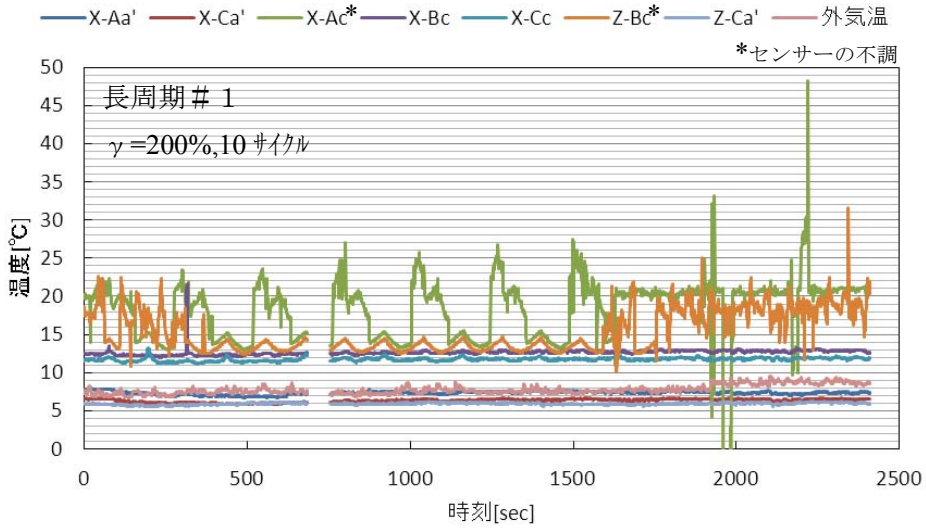
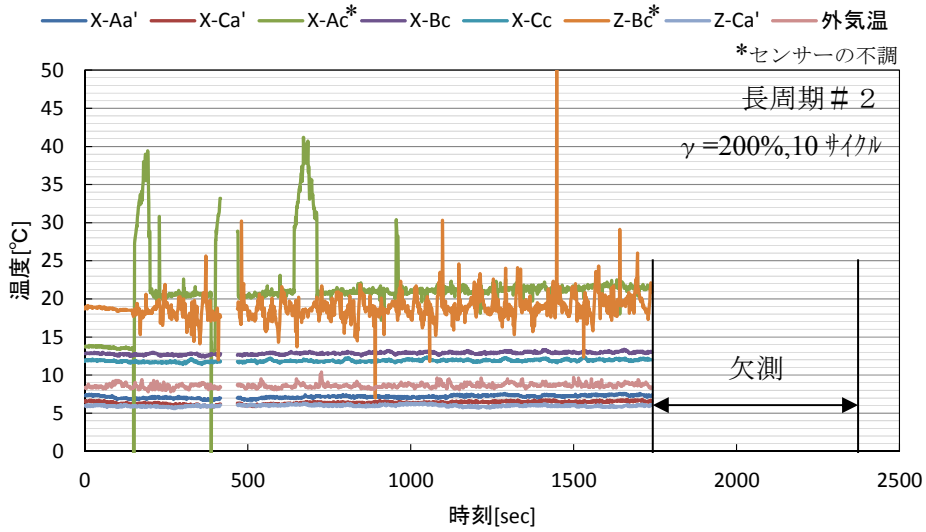


図 2.3.3-5a 荷重-変位関係（長周期特性：累積変形 50m） γ=200%（±402mm）





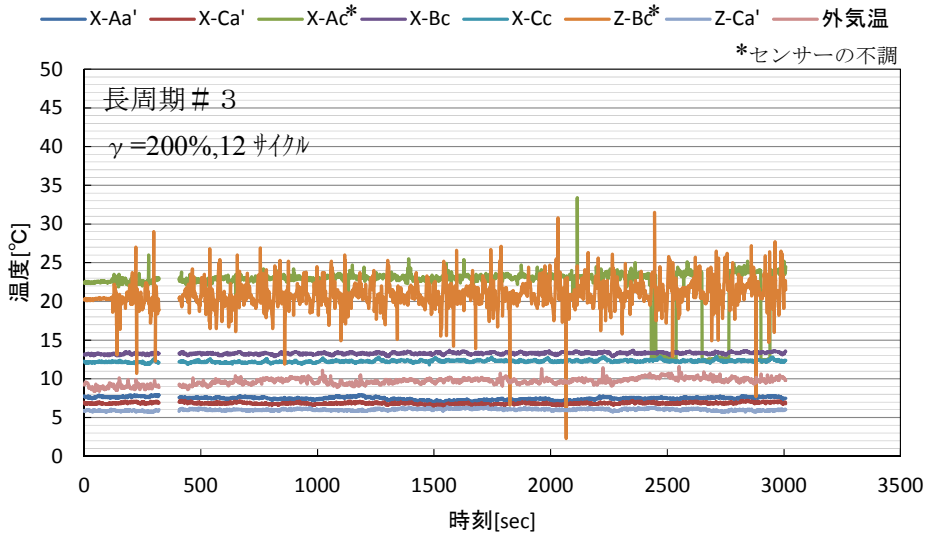


図 2.3.3-5b 温度変化（長周期） γ=200%（±402mm）

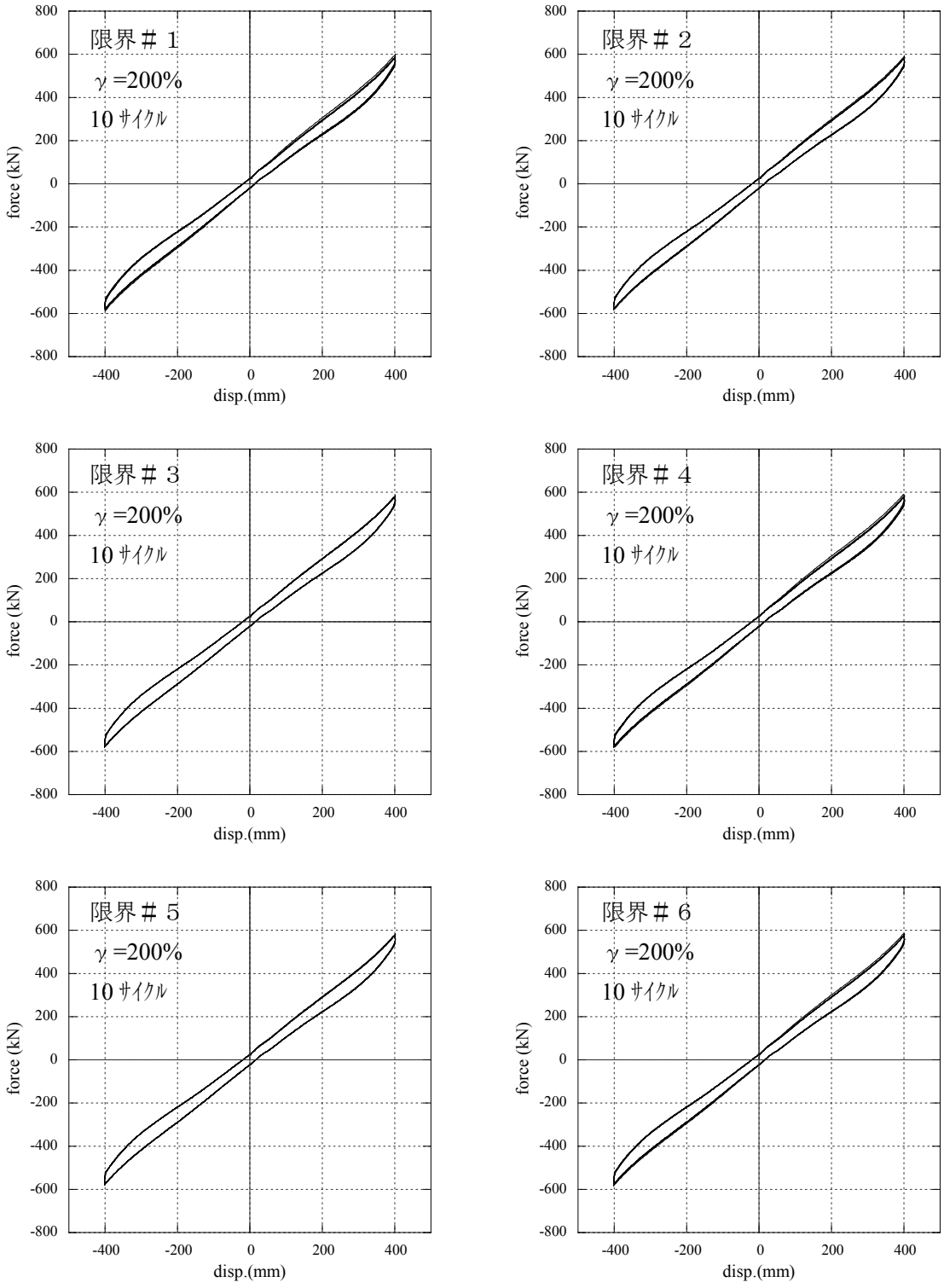


図 2.3.3-6 荷重-変位関係（限界特性：累積変形 100m） γ=200%（±402mm）

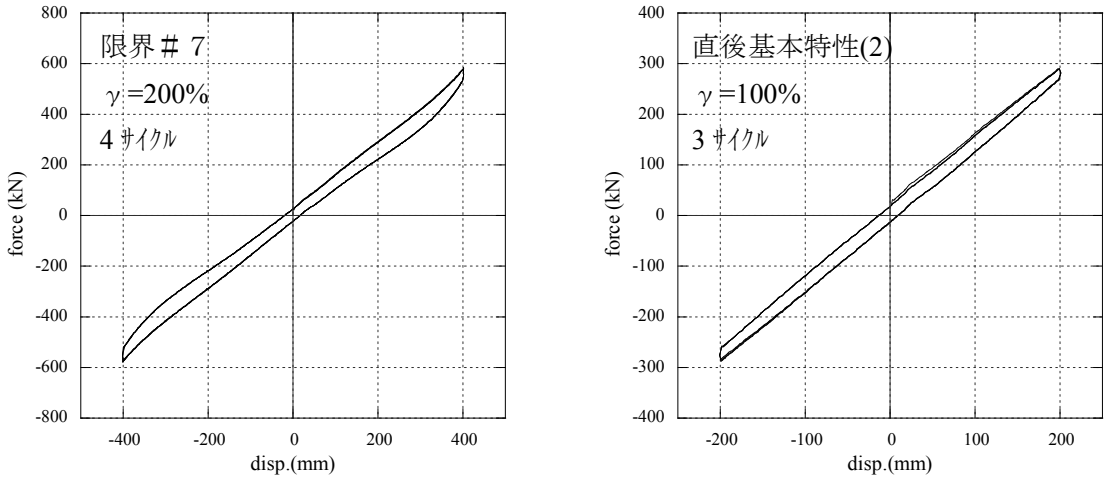


図 2.3.3-6 荷重-変位関係（限界特性：累積変形 100m） γ=200%（±402mm）(続き)

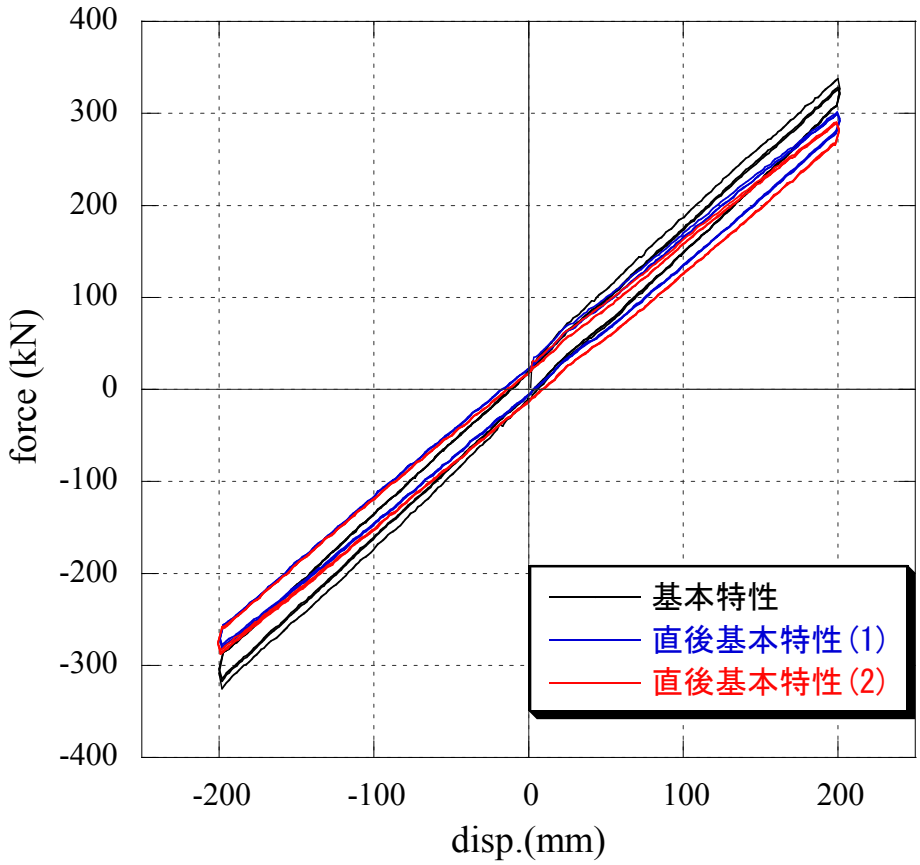


図 2.3.3-7 荷重-変位関係（基本特性の変化）

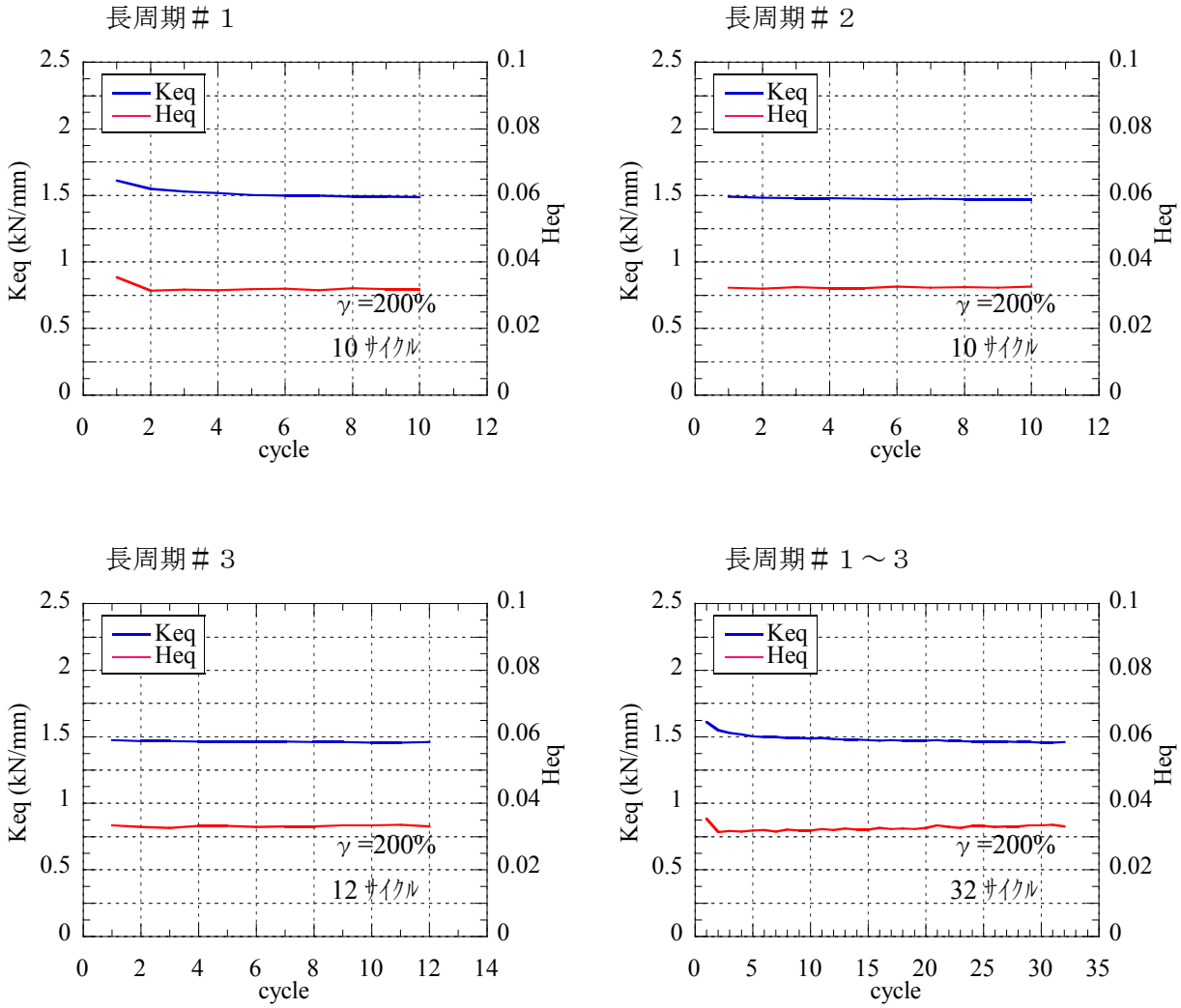


図 2.3.3-8 *Kh*、*Heq* の変化（長周期特性、γ=200%）

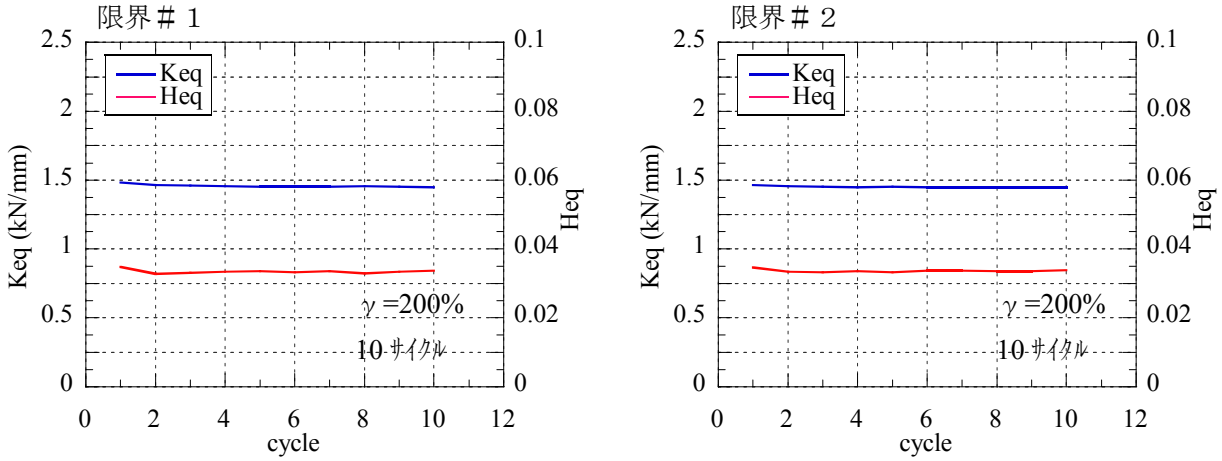


図 2.3.3-8 *Kh*、*Heq* の変化（限界特性、γ=200%）

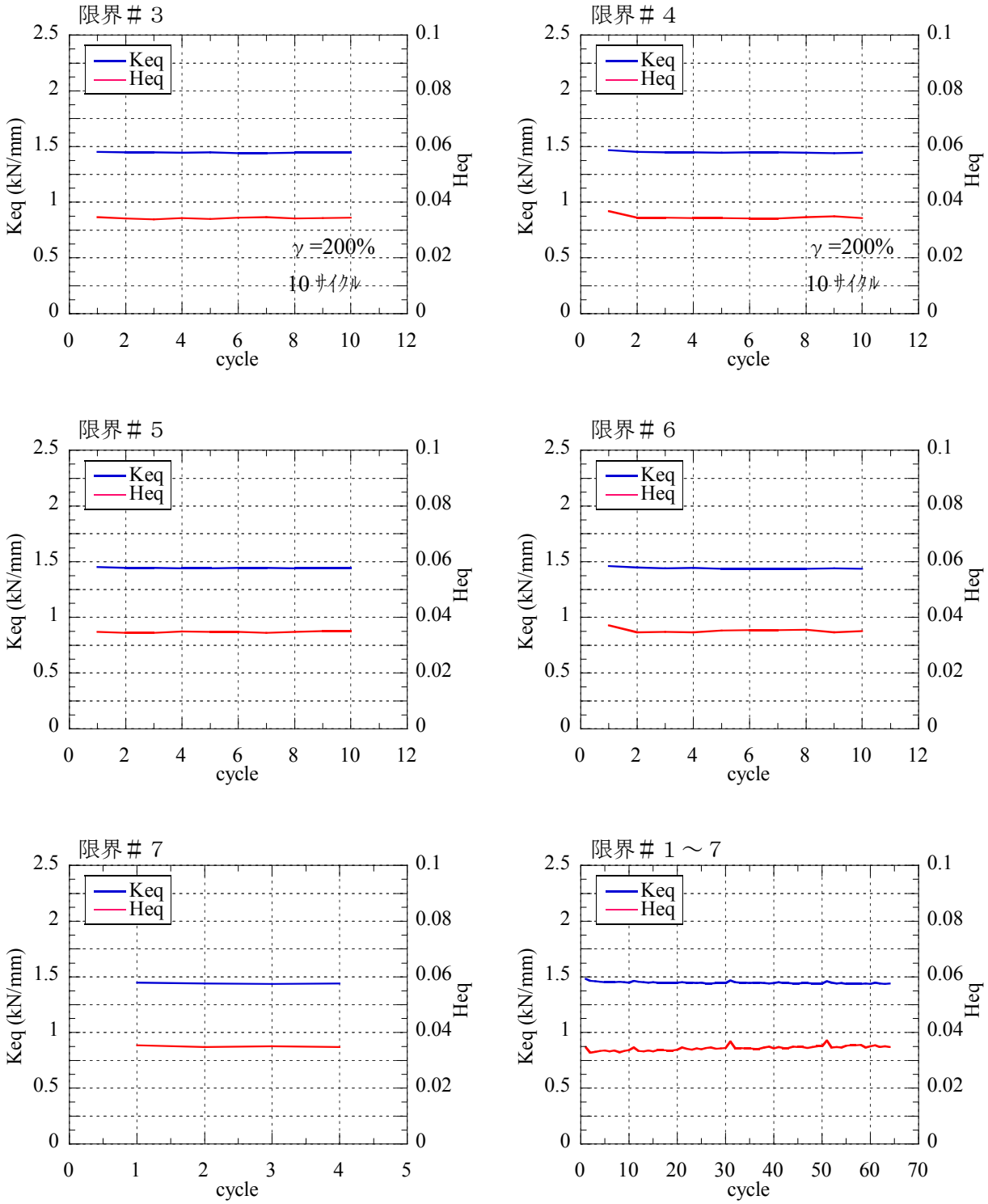


図 2.3.3-8 *Kh*、*Heq* の変化（限界特性、γ=200%）(続き)

表 2.3.3-2 *Kh*、*Heq* 一覧

ケースNo.	試験条件	サイクル数	*Kh* (kN/mm)		*Heq*	
			3サイクルめ	比率	3サイクルめ	比率
1	基本特性	3	1.609	1.000	0.0239	1.000
2	長周期特性#1	10	1.529	0.951	0.0316	1.323
	長周期特性#2	10	1.479	0.920	0.0325	1.357
	長周期特性#3	12	1.468	0.912	0.0327	1.367
3	直後基本特性(1)	3	1.460	0.908	0.0311	1.299
4	限界特性#1	10	1.461	0.908	0.0330	1.381
	限界特性#2	10	1.454	0.904	0.0332	1.388
	限界特性#3	10	1.448	0.900	0.0338	1.413
	限界特性#4	10	1.447	0.899	0.0345	1.442
	限界特性#5	10	1.444	0.898	0.0345	1.441
	限界特性#6	10	1.441	0.896	0.0349	1.457
	限界特性#7	4	1.438	0.894	0.0352	1.470
5	直後基本特性(2)	3	1.447	0.900	0.0341	1.425

6) まとめ

天然ゴム系積層ゴムの実大試験体を用いて、静的条件で多数回繰返し試験を行った。長周期試験（50m)、限界試験（100m）のいずれの条件とも、荷重-変位関係は 1 サイクル目の剛性がやや高めとなるものの、2 サイクル目以降は安定したループを描いており、各ケース 3 サイクル目の *Kh* の値を比較しても、最初の基本特性試験と限界試験後の *Kh* の値は 1 割ほどであった。また *Heq* の値は、*Kh* の値が低下するのに対して、逆に上昇する傾向にあった。本試験において室温の温度管理は特におこなっていなかったが、支承の温度はどの部分も安定しており、加振による温度変化およびそれに伴う履歴形状の変化は確認されなかった。

参考文献

2.3.3-1) 社団法人日本ゴム協会：免震用積層ゴム委員会技術報告, 2006

2.4 まとめと課題

2.4.1 まとめ

長周期地震動に対する免震建築物の安全性照査のクライテリア設定へ向けて、多数繰り返し加力実験に基づく実大免震部材の特性評価を行うことを目的として、実大弾性すべり支承（直径80cm）と、オイルダンパー（最大減衰力 1000kN）の動的・多数繰り返し加振実験を実施した。本実験で得られた知見は、以下の通りまとめられる。

（1） 実験手法について

・震動台稼動時には、震動台周辺に人が近づくことが出来ないため、震動台から離れた位置から加力実験を行う必要がある。遠隔操作の油圧ジャッキにより試験体と反力フレームを固定し、コッター―でせん断力を伝達する機構を開発した。開発した機構は設計通りに機能し、震動台に人が近づかずに加力実験を実施することが出来た。

・加力波形の作成にあたっては、無負荷時に試加振を行い目標加力波形に対する震動台応答波形の誤差を評価して、誤差波形の逆位相波を用いて補償波を作成する方法が有効であった。水平方向の加振波形については、目標加力波形と震動台応答波形に殆ど誤差が見られなかったので、上下方向加力波形についてのみ逆位相波による補償を行った。

・上下方向の誤差振幅は最大で 2.2mm 程度であった。逆位相波による補償時の震動台応答波形では、初期の誤差振幅は 1.4mm 程度に、それ以後の誤差振幅は 0.5mm 程度に抑制されており逆位相波形による補償が有効であった。更に、無負荷時に作成した補償波形を用いて 5MN 軸力導入時に加力を行ったが、上下方向の誤差振幅は無負荷時とほぼ同等であった。無負荷時に補償波形を作成して、軸力導入時に用いる方法が有効であることがわかった。

・5000kN 軸力導入時の主梁フレームの上下変形は 17.4mm、受梁方向（主梁 U 軸回り）の傾斜角は 1/588 であった。この時に、震動台の U 軸回りの傾斜を 1/769 に制御して支承面圧の均一化を行った。受梁軸回りには殆ど回転していない。5000kN の導入軸力に対して水平方向加力初期に 500kN 程度の変動が見られるが、それ以後は 200kN 程度以内の軸力変動に収まっており、精度の高い加振が実現出来ている。反力フレームの変形も小さく、目標通り主梁方向に±400mm の加力が実現出来ている。

・反力フレーム各部に取付けた歪ゲージから、加力実験時の応力を評価した結果、主梁方向の長周期繰り返し加振時に主梁端部で最大の応力が発生しているが、長期許容応力に対する比率は 0.73 であり、反力フレームは充分な性能を有していることを確認した。

（2） 弾性すべり支承の加力実験

・累積変形 50m の長周期試験を経験する前後で繰り返しによる影響を見ると、摩擦係数が 0.147 から 0.062 と初期の 42%程度にまで低下した。各セット毎に繰り返しに伴って摩擦係数が低下する傾向が見られ、セット間のインターバルでは摩擦係数が回復（上昇）する傾向を確認した。

・長周期試験終了後のすべり板温度は、長周期試験（1 方向）で 204℃、長周期試験（2 方向）-1 で 220℃、長周期試験（2 方向）-2 で 260℃まで、それぞれ上昇した。PTFE 裏のバック鋼板部の温度上昇はすべり板に比べて上昇速度は緩やかであるものの、インターバルの影響もなく上昇が続き、加振後も温度上昇が続く傾向があった。

・長周期および限界試験を経験したすべり支承試験体は、すべり面の PTFE に損傷は見られず健全な状態を保っていた。今回の試験では面圧が 10N/mm^2 と低いことも有り、すべり面の温度上昇に伴う PTFE の軟化現象などは確認されなかった。なお、今回の試験条件では、長周期試験は地震応答波試験の 10 倍相当以上の累積吸収エネルギーを確保することを確認した。

（３） オイルダンパーの加力実験

・限界加振条件 3B（累積変形量約 100m）の加振による油温上昇量は 93.6℃（油温 14.6℃→108.2℃）であった。本体（ベースシェル）表面温度も、ロッド側の測点（T5）で 102.1℃となったが、履歴性状の変化は小さく、また、シール部から作動油の滲みだしは見られなかった。

・多数繰り返し加振による油温の上昇に伴い、最大減衰力と吸収エネルギー量は僅かに低下する傾向が見られる。常温（20℃）に対する最大減衰力の低下率は、油温（108℃）においても伸び側・縮み側共に約 4%であった。また、エネルギー吸収量の低下率は、油温（108℃）においても約 5%の低下であった。

・大変形・大速度試験では、各加振の 1 波目では正常な減衰力-変位特性が得られたが、2 波目では圧縮側の減衰力に立ち上がり遅れ（無効ストローク）が発生した。

2.4.2 課題

・実験手法については、充分な精度で免震部材の加力実験が実施出来ることが判明したが、ロードセルの許容荷重の制約から導入軸力は 5000kN が限界と考えられる。10000kN の軸力を導入するためには耐荷重の大きいロードセルを製作する必要がある。

・実大免震支承の軸力作用時の動的加振や、実大免震部材（支承及びダンパー）の大振幅・大速度加振は E-ディフェンス震動台でのみ実施可能である。第Ⅳ部 2.3.2 に示したオイルダンパーの実験では、大振幅・大速度加振時に減衰性能に一部低下が見られた。このような従来は充分検証されていない試験条件での免震部材性能を把握することが、安全性検証の上で極めて重要であることが再確認された。

・今後、E-ディフェンス震動台での性能把握が期待される実大免震部材と試験条件を表 2.4.1 に示す。高減衰ゴム系積層ゴムはメーカーにより材料特性が異なっており、オイルダンパーもメーカーにより作動油タンク室の構成方法等のメカニズムが異なっているため、検証が必要と考えられる。本検討では代表的な実大免震部材について必須項目（◎）を中心に実験を実施している。限られた期間内では、下表に示す全ての実大免震部材の必須項目（◎）と重要項目（○）を検証することは出来ないため、今後も引き続き検証実験を計画・実施することが望まれる。

表 2.4-1 免震部材試験条件

免震部材			試験条件							
			メーカー試験機	E-ディフェンス震動台						
			長時間・多数回繰返し動的加振（累積変形50m～100m）				大振幅（450%程度）	大速度（～150kine）	地震波（高振動数）	上下動（引張）
			1方向	1方向	1方向	2方向	1方向	1方向	1方向＋2方向	1方向
			縮小	実大						
積層ゴム支承	天然ゴム系積層ゴム		○				○		○	○
	鉛プラグ入り積層ゴム	丸型	○		◎	○	◎		○	○
		角型			◎	◎	◎		○	○
	錫プラグ入り積層ゴム				◎	○	◎		○	○
	高減衰積層ゴム	B社	○		◎	◎	◎		○	○
		N社			◎	◎	◎		○	○
		T社			◎	◎	◎		○	○
		Y社			◎	◎	◎		○	○
すべり支承	弾性すべり支承	高摩擦	○		◎	◎	○	○	○	
	弾性すべり支承	低摩擦	○		○	○	○	○	○	
履歴系ダンパー	鋼材ダンパー				○	○	○		○	
	鉛ダンパー			○	○	◎	○		○	
粘性ダンパー	オイルダンパー	H社		○	○		◎		○	
		K社			○		◎		○	
		S社			○		◎		○	
	減衰こま			○	○		◎		◎	

◎ ：必須項目
○ ：重要項目

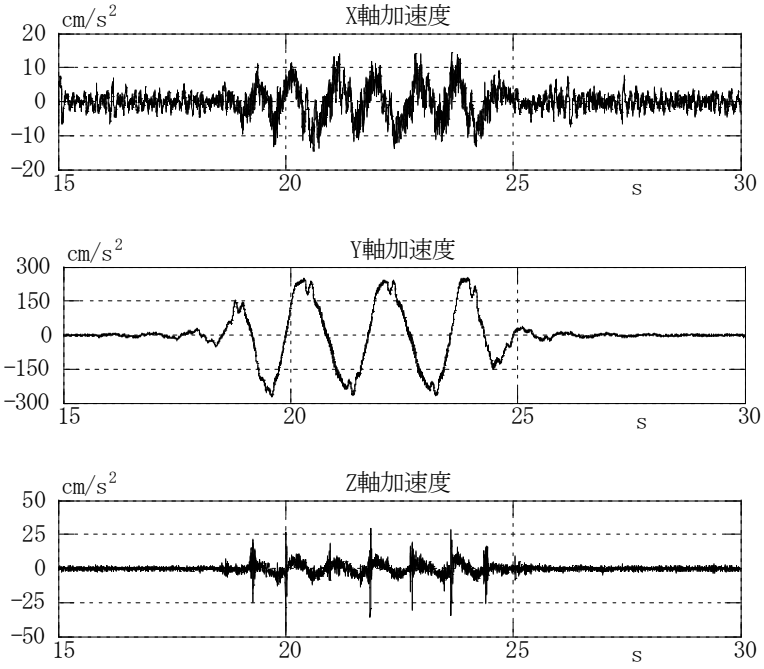
：H22年度実施済　（第Ⅲ部第１章）
：H23年度実施済　（第Ⅳ部第２章）
：H24年度実施予定　（第Ⅴ部第２章）

2.5 参考資料

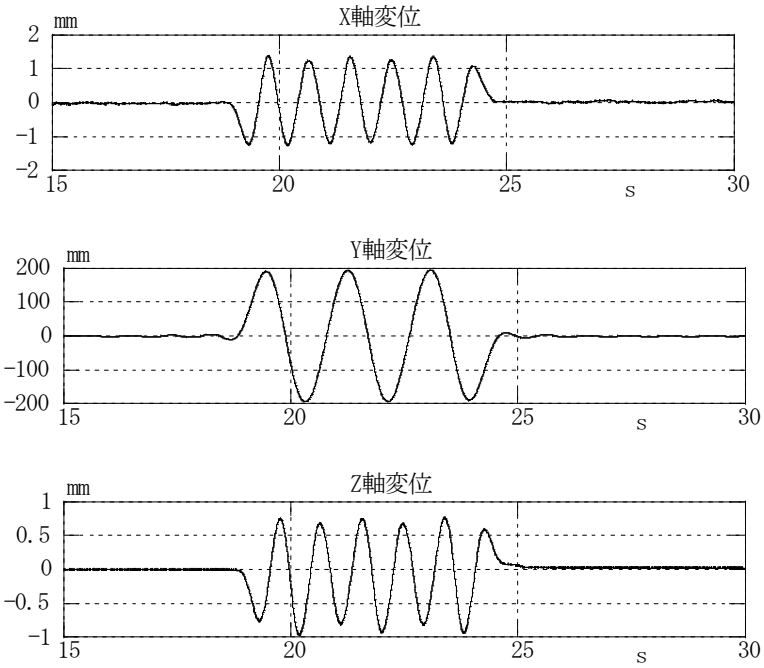
2.5.1　参考資料　E-ディフェンス震動台実験データに基づく変位制御の精度検討

（１）変位制御加振実験（スロッシング実験）

30t の試験体を搭載して、加振振幅を±200mm（振動数 0.55Hz）と±450mm（振動数 0.54Hz）に変えて、水平方向に変位制御正弦波加振実験を実施した場合の震動台応答実測例を図 1 と図 2 に示す。Z 軸（上下方向）には水平方向に対して倍の振動数の応答が生じ、加振振幅が±450mm の場合には上下方向に 4mm 程度の変位が生じている。

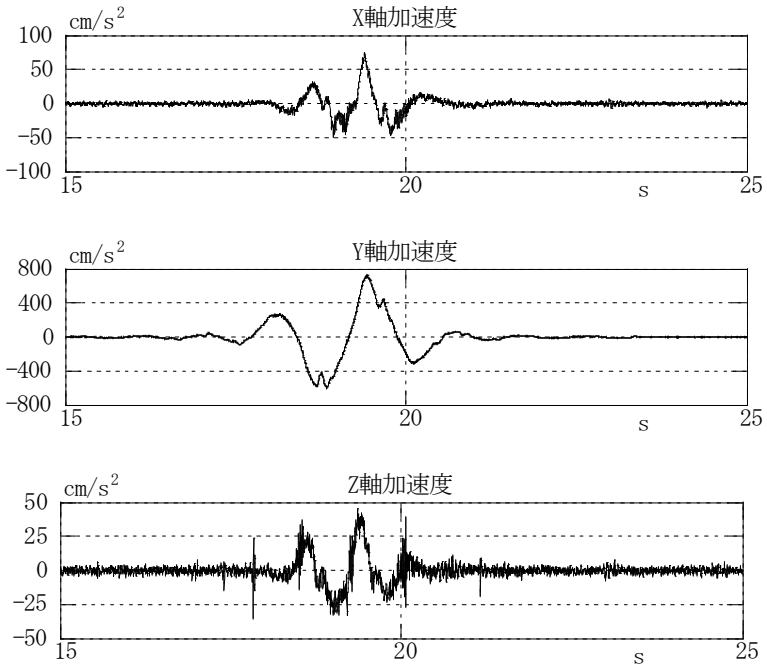


(a)加速度波形

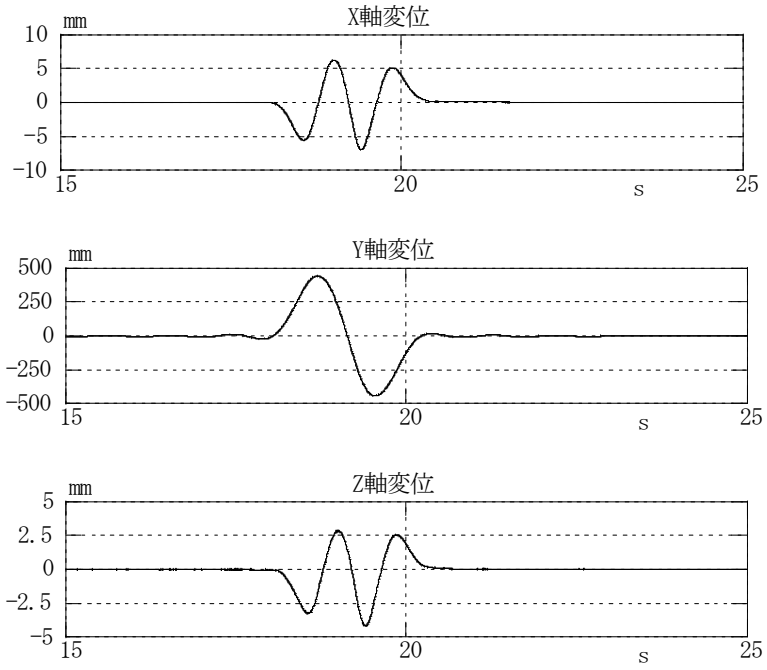


(b)変位波形

図 1　Y 方向変位制御正弦波加振（振幅±200mm）時の震動台応答



(a)加速度波形

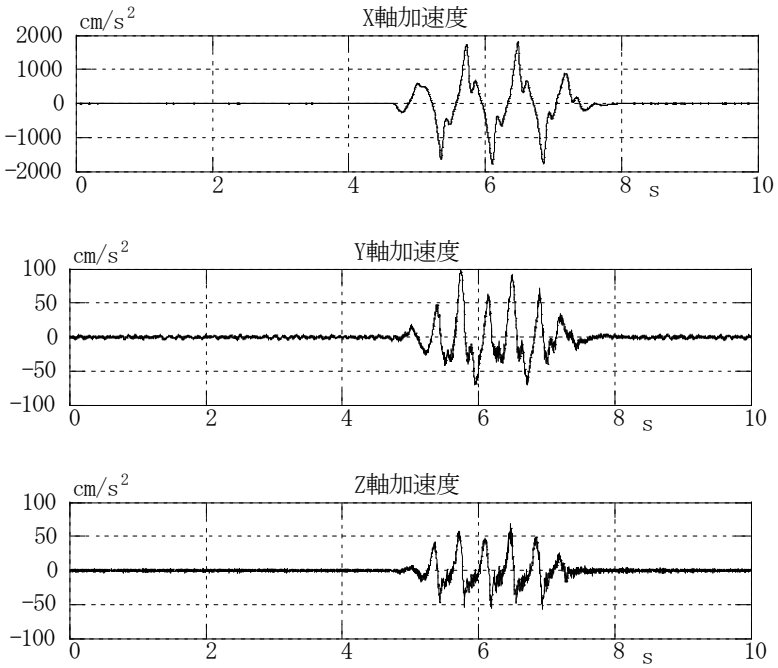


(b)変位波形

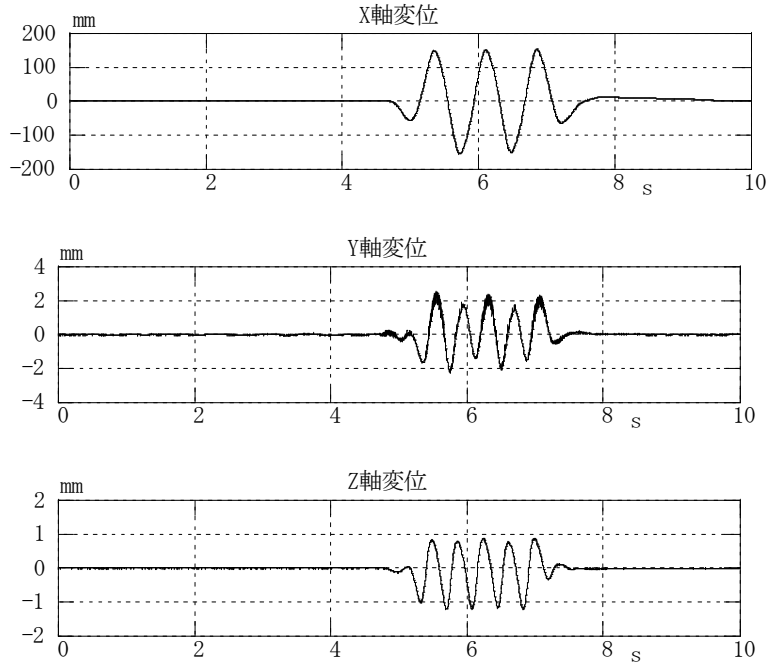
図 2　Y 方向変位制御正弦波加振（振幅±450mm）時の震動台応答

（２）無負荷時の加速度制御加振実験

無負荷で、水平方向に加速度制御正弦波加振実験を実施した場合の震動台応答実測例を図 3 に示す。Z 軸（上下方向）には水平方向に対して倍の振動数の応答が生じ、上下方向に 1mm 程度の変位が生じている。



(a)加速度波形



(b)変位波形

図 2　X 方向加速度制御正弦波加振時の震動台応答

2.5.2　参考資料　震動台の加振継続時間について

水平加振時の加振速度と加振可能時間の関係を図 1 に示す。震動台の加振可能時間は、加振速度に関係する。実大実験では、振幅 40cm、周期 4 秒の正弦波加振を行うので、最大速度は約 60cm/s となり、対応する加振可能時間は約 30 秒である。この時の累積変形は、40cm×4×(30÷4)=1,200cm となる。

実際には、余裕を考慮して 15m 程度の累積変形は可能と見込まれる。

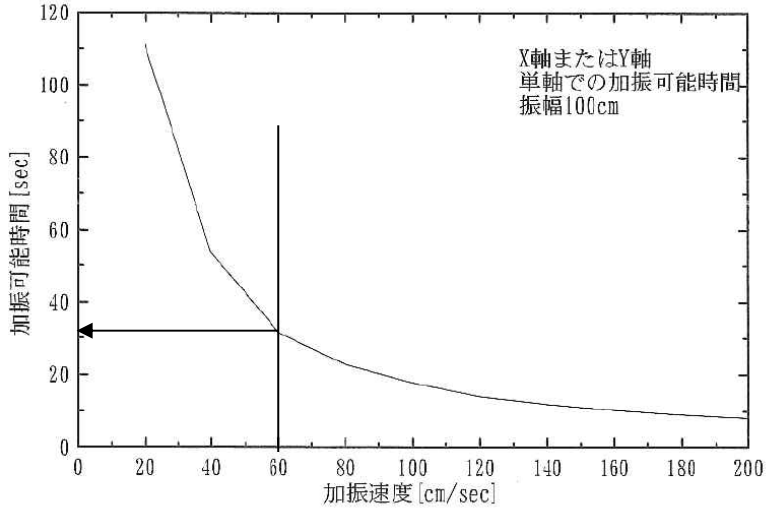


図 1　水平加振時の加振継続時間　―実大実験計画 WG 資料（防災科研）より―

2.5.3　参考資料　実験治具計算書

１．検討方針

免震部材の動的大変形試験を行うための治具としての性能を満足することを確認するため。大変形時の大加力に対して構造体が安全化であるか、また変形量が所定の値程度となっているかについて確認する。

冶具の構造体としての安全性は以下とする。

・大変形時の加力に対して構造体の鋼材に生じる応力度が、ほぼ長期許容応力度以内であるものとする。
・破断実験時の水平力については衝撃係数１．５倍を考慮し、構造体が上記性能を満足するものとする。

冶具に要求される変形量は以下とする。

・免震部材に生じる圧縮力（max１０００ｋＮ）時の鉛直変形はほぼ４０ｍｍ程度とする。

２．検討ケース

検討は冶具に加わる鉛直力・水平力が最大となると想定される積層ゴムアイソレーターを試験体とした場合について行う。

想定する積層ゴムアイソレーターは１０００φとし、２次形状係数は５とし、主梁方向にはせん断変形２５０%、受け梁方向には破断変形である４５０%変形させるものものとする。

この際の圧縮力は１０００ｋN、水平力は２５０%時に２０００ｋN、４５０%時には６０００ｋNとする。

なお、破断変形である４５０%時の水平力は衝撃係数 1.5 を考慮して、

６０００ｋN×１．５＝９０００ｋN　として検討を行う。

以上より、冶具の構造体の安全性を確認するための荷重ケースは以下とする。

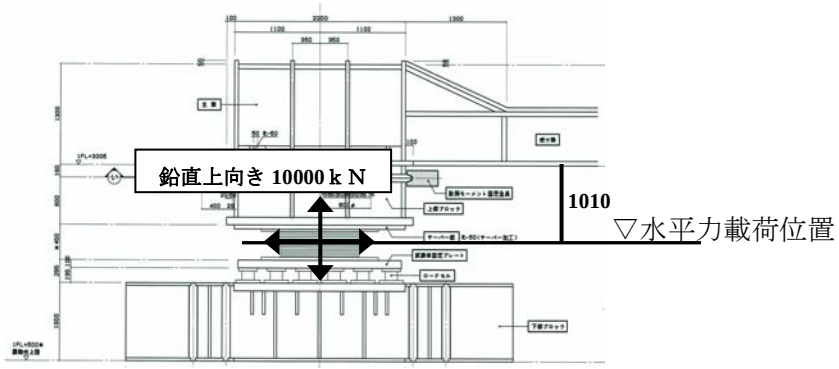
ＣＡＳＥ１　鉛直荷重（１００００ｋN 上向き）

ＣＡＳＥ２　鉛直荷重（１００００ｋN 上向き）＋水平荷重（２０００ｋN 主梁軸方向）

ＣＡＳＥ３　鉛直荷重（１００００ｋN 上向き）＋水平荷重（９０００ｋN 受け梁軸方向）

なお、次具の自重については試験体位置に加わる鉛直上向き荷重に比べ十分に小さく、逆向きのため、考慮しないものとする。

上記の水平荷重は、下図に示す積層ゴムアイソレーターの高さ中央部に生じるものとする。



また、ＣＡＳＥ２とＣＡＳＥ３における鉛直荷重は、次頁に示すように積層ゴムアイソレーターの変形量の 1/2 の位置に加えるものとする。

ＣＡＳＥ２　積層ゴムアイソレーター変形量

せん断変形２５０%　ゴム総厚 1000mm／5＝200mm

200mm×250%＝500mm

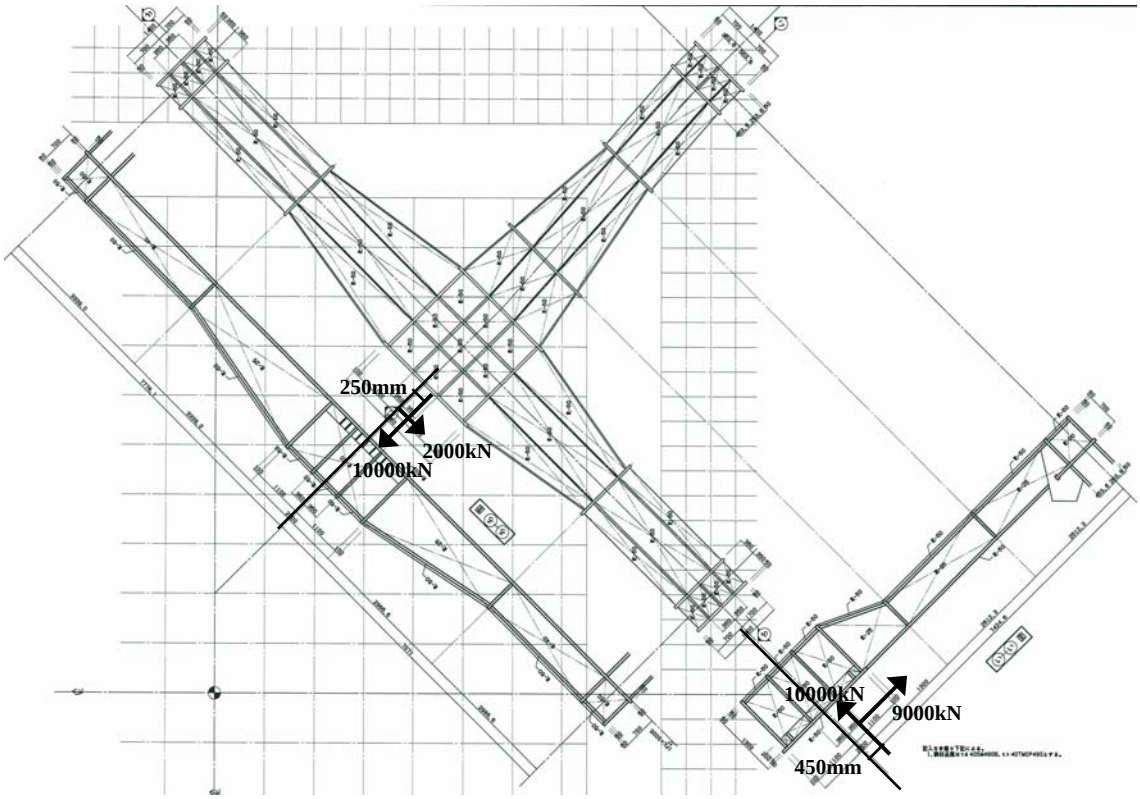
鉛直荷重載荷位置　500mm／2＝250mm

ＣＡＳＥ３　積層ゴムアイソレーター変形量

せん断変形４５０%　ゴム総厚 1000mm／5＝200mm

200mm×450%＝900mm

鉛直荷重載荷位置　900mm／2＝450mm



ＣＡＳＥ２とＣＡＳＥ３における荷重載荷位置

３．解析モデルおよび解析結果

□ 解析モデル概要

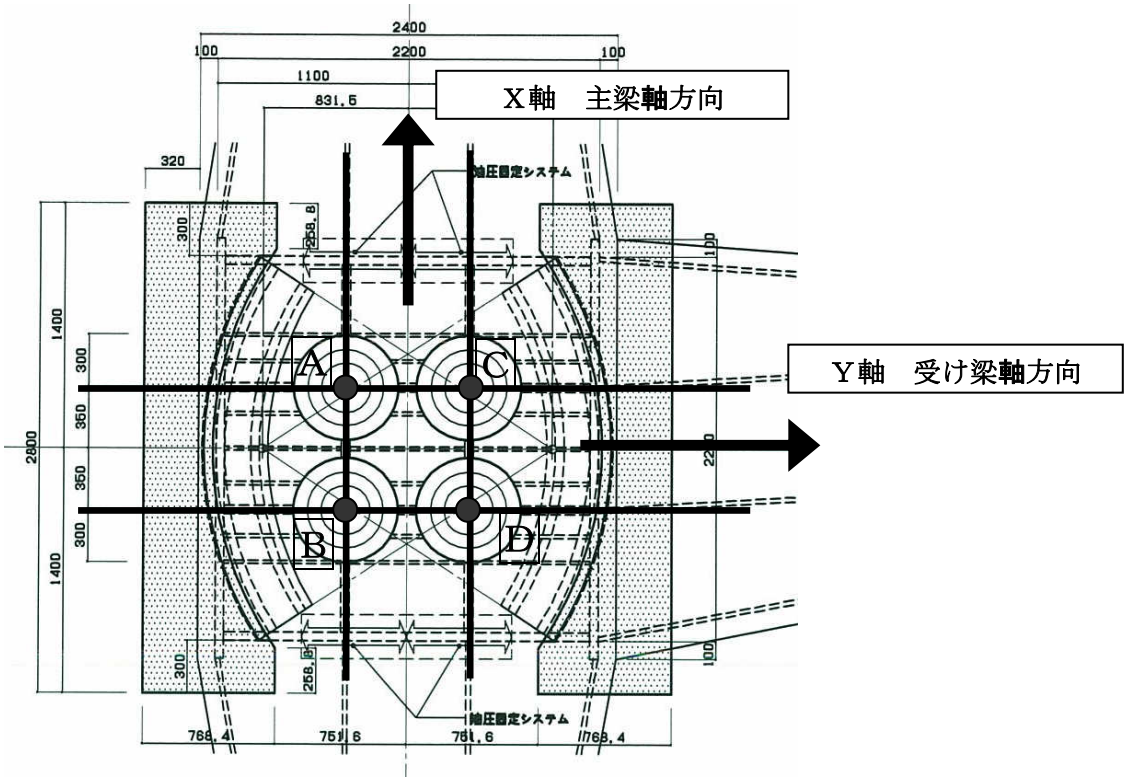
解析モデルは、線材置換モデルとした。部材の内、主梁・受け梁のウエブが４枚の位置については、ねじれの影響を考慮するため２本の梁とし、それぞれの梁をねじれについて拘束するための剛な梁で繋いだモデルとした。

柱脚部は、固定ブロックが非常に大きな剛性を持つため、固定ブロック上面で変位・回転を固定とした。

解析においては、軸方向剛性・曲げ剛性・せん断剛性ならびにねじれ剛性を考慮した。

解析は弾性解析とし、日建設計保有の解析プログラム「Super Dynamics」を使用した。

□ 試験体直上での治具変形量



次頁にＡ・Ｂ・Ｃ・Ｄ位置の各方向の各ＣＡＳＥにおける変形量を示す。

（単位ｍｍ）

		X方向 主梁軸 方向	Y方向 受け梁 軸方向	Z方向 鉛直方 向	Z方向 CASE1 との差	X軸廻り回転
CASE1	A	0.3	2.4	41.4		1／　174
	B	0.4	2.4	41.1		
	C	0.3	2.4	37.4		
	D	0.3	2.5	37.0		
CASE2	A	3.9	2.5	40.9	−0.5	1／　175
	B	3.9	2.7	41.3	0.2	
	C	3.7	2.5	36.9	−0.4	
	D	3.7	2.7	37.3	0.2	
CASE3	A	1.0	7.7	36.2	−5.2	1／　519
	B	1.0	7.7	36.0	−5.1	
	C	0.9	7.6	34.9	−2.5	
	D	1.0	7.6	34.6	−2.4	

ＣＡＳＥ１（鉛直１００００ｋN時）における鉛直変位は、目標としていた約４０ｍｍとなっている。

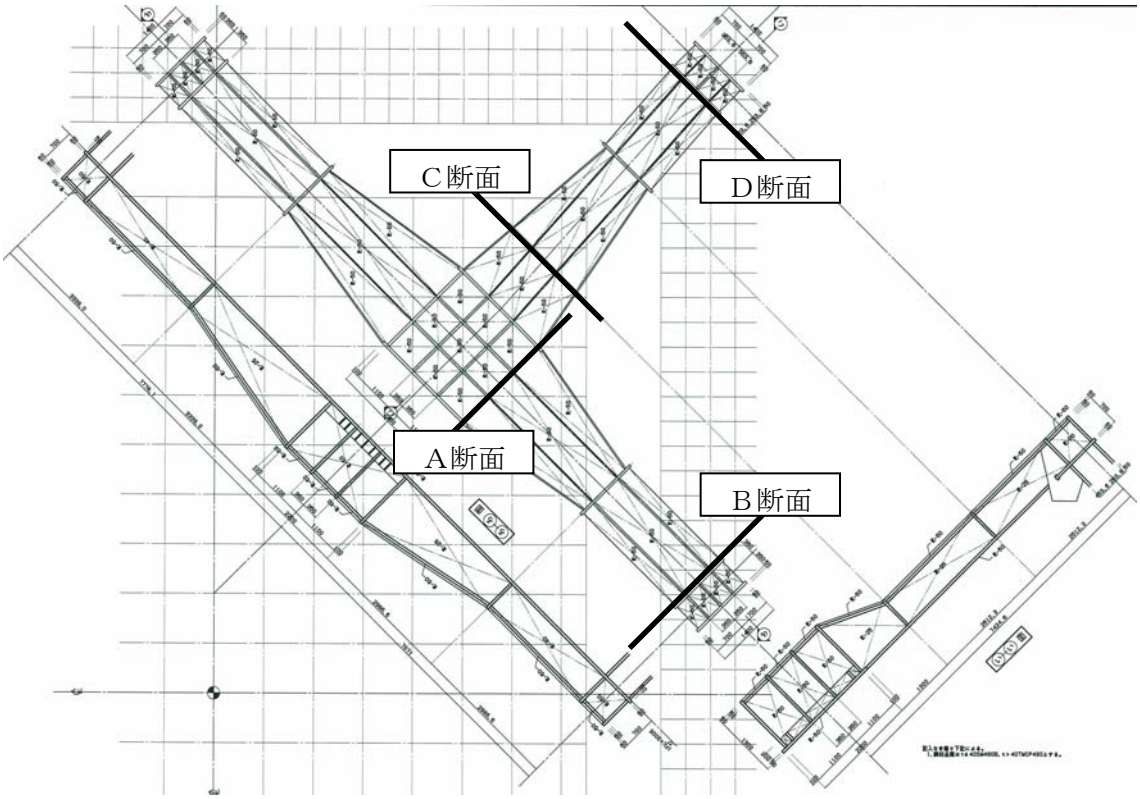
このとき、受け梁の勾配により、試験体取り付け位置直上では治具が、全頁Ｘ軸廻りに１／１７４回転することが確認された。

ＣＡＳＥ２（主梁方向に２０００ｋＮ）においては、主梁軸方向に約３．５ｍｍ程度変形するものの、鉛直変位についてはＣＡＳＥ１との変化は少ないことが確認された。

ＣＡＳＥ３（受け梁方向に９０００ｋＮ）においては、受け梁方向に約５ｍｍ程度変形し、水平力により受け梁が曲げ変形するため、Ａ・Ｂ点位置が５ｍｍ下降し、Ｃ・Ｄ点位置でも２．５ｍｍ下降することが確認された。

４．各部検討

□ 主梁・受け梁の検討



鋼材 TMCP490　F 値 325N/mm^2 長期許容応力度 軸曲げ 21.6kN/cm^2 せん断 12.5 kN/cm^2

・A断面

解析結果より応力は以下となっている。

ＣＡＳＥ２

Ｎ＝３１０４ｋＮ　Ｍ＝２０８６４ｋＮｍ　Ｑ＝４７０７ｋＮ

断面性能　ＢＸ－１３００×２２００×２５(４枚)×５０

Ａ＝３４００ｃｍ^2　　Ａｓ＝１２００ｃｍ^2　　Ｚ＝１５４４３５ｃｍ^3

σ＝３１０４／３４００＋２０８６４／１５４４３５×１００＝１４．４ｋＮ／ｃｍ^2

τ＝４７０７／１２００＝３．９ｋＮ／ｃｍ^2

・B断面

解析結果より応力は以下となっている。

ＣＡＳＥ２

Ｎ＝３１０４ｋＮ　Ｍ＝８１６７ｋＮｍ　Ｑ＝４７０７ｋＮ

フェイスモーメント

M’＝８１６７－４７０７×０．３５m＝６５２０ｋNm

断面性能　ＢＸ－７００×１３００×４０(２枚)×５０

Ａ＝１７８０ｃm^2　　Ａｓ＝４８０ｃm^2　　Ｚ＝４３４２３ｃm^3

σ＝３１０４／１７８０＋６５２０／４３４２３×１００＝１６．８ｋＮ／ｃm^2

τ＝４７０７／４８０＝９．８ｋＮ／ｃm^2

・Ｃ断面

解析結果より応力は以下となっている。

ＣＡＳＥ３

Ｎ＝８６５１ｋＮ　Ｍ＝４２８４ｋNm　Ｑ＝１６４５ｋＮ

断面性能　ＢＸ－７００×１９００×２５(４枚)×５０

Ａ＝２５００ｃm^2　　Ａｓ＝６００ｃm^2　　Ｚ＝６２５９５ｃm^3

σ＝８６５１／２５００＋４２８４／６２５９５×１００＝１０．３ｋＮ／ｃm^2

τ＝１６４５／６００＝２．７ｋＮ／ｃm^2

・Ｄ断面

解析結果より応力は以下となっている。

ＣＡＳＥ３

Ｎ＝８６５１ｋＮ　Ｍ＝４１５６ｋNm　Ｑ＝１６４５ｋＮ

フェイスモーメント

M’＝ ４１５６－１６４５×０．３５m＝３５８０ｋNm

断面性能　ＢＸ－７００×１３００×２５(２枚)×５０

Ａ＝１６００ｃm^2　　Ａｓ＝３００ｃm^2　　Ｚ＝４１８８０ｃm^3

σ＝８６５１／１６００＋３５８０／４１８８０×１００＝１４．０ｋＮ／ｃm^2

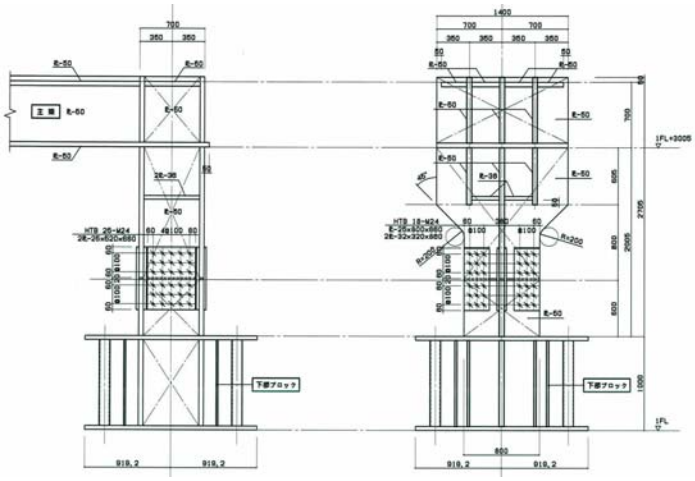
τ＝１６４５／３００＝５．５ｋＮ／ｃm^2

□ 主梁支持柱の検討

鋼材 TMCP490　F 値 325N/mm^2 長期許容応力度 軸曲げ 21.6kN/cm^2 せん断 12.5 kN/cm^2

・柱上部

解析結果より応力は以下となっている。



ＣＡＳＥ２

Ｎ＝４２７０ｋＮ

Ｍ＝９３４４ｋＮｍ

Ｑ＝４５２８ｋＮ

フェイスモーメント

Ｍ’＝９３４４

－４５２８×０．３５ｍ

＝７７５９ｋＮｍ

断面性能　Ｈ－７００×１４００×５０(３枚)×５０

Ａ＝２３００ｃｍ^2　　Ａｓ＝９００ｃｍ^2　　Ｚ＝５００４７ｃｍ^3

σ＝４２７０／２３００＋７７５９／５００４７×１００＝１７．４ｋＮ／ｃｍ^2

τ＝４５２８／９００＝５．０ｋＮ／ｃｍ^2

・柱下部

解析結果より応力は以下となっている。

ＣＡＳＥ２

Ｎ＝４９９３ｋＮ　　Ｍ＝５６６６ｋＮｍ　　Ｑ＝４５２８ｋＮ

断面性能　Ｈ－７００×８００×５０×５０

Ａ＝１１００ｃｍ^2　　Ａｓ＝３００ｃｍ^2　　Ｚ＝２６７６１ｃｍ^3

σ＝４９９３／１１００＋５６６６／２６７６１×１００＝２５．７ｋＮ／ｃｍ^2

τ＝４５２８／３００＝１５．１ｋＮ／ｃｍ^2

若干長期許容応力度を越える結果となっている。

□ 受け梁支持柱の検討

鋼材 TMCP490　F 値 325N/mm^2 長期許容応力度 軸曲げ 21.6kN/cm^2 せん断 12.5 kN/cm^2

・柱上部

解析結果より応力は以下となっている。

ＣＡＳＥ３

Ｎ＝５７５６ｋＮ

Ｍ＝４１５３ｋＮｍ

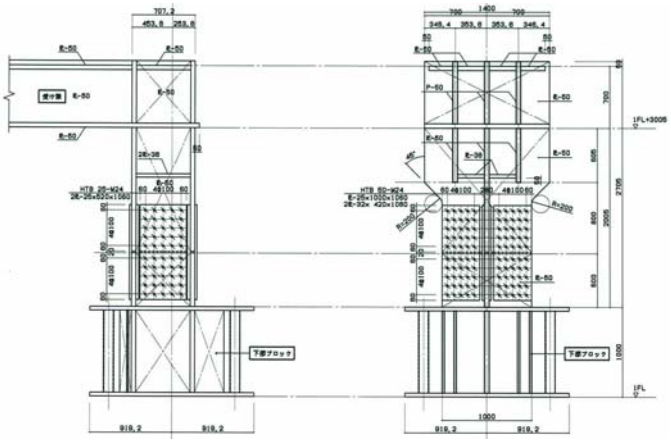
Ｑ＝７１１ｋＮ

フェイスモーメント

M'＝ ４１５３

　　－７１１×０．３５ｍ

　＝３９０４ｋＮｍ



断面性能　Ｈ－７０７×１４００×５０(３枚)×５０

Ａ＝２３１１ｃｍ^2　　Ａｓ＝９１１ｃｍ^2　　Ｚ＝４２８２０ｃｍ^3

σ＝５７５６／２３１１＋３９０４／４２８２０×１００＝１１．６ｋＮ／ｃｍ^2

τ＝７１１／９１１＝０．８ｋＮ／ｃｍ^2

・柱下部

解析結果より応力は以下となっている。

ＣＡＳＥ２

Ｎ＝５７５６ｋＮ　　Ｍ＝３４７３ｋＮｍ　　Ｑ＝７１１ｋＮ

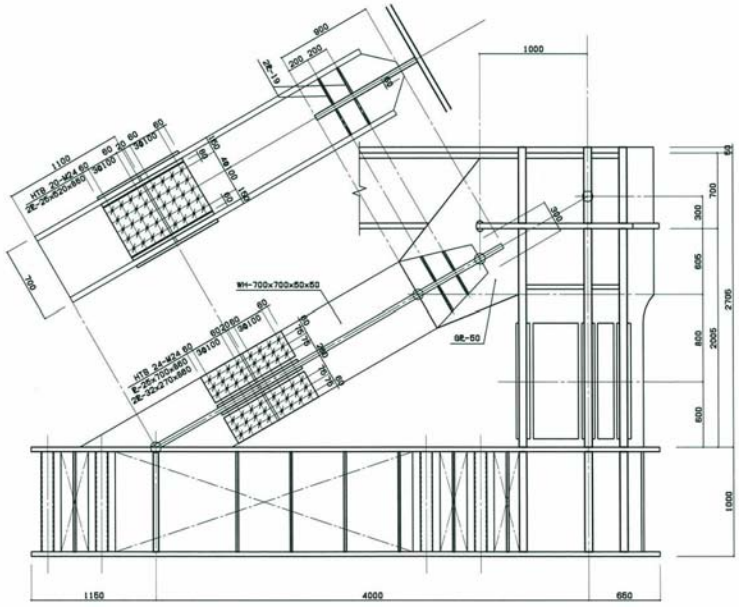
断面性能　Ｈ－７０７×１０００×５０×５０

Ａ＝１３０４ｃｍ^2　　Ａｓ＝３０４ｃｍ^2　　Ｚ＝３３２２１ｃｍ^3

σ＝５７５６／１３０４＋３４７３／３３２２１×１００＝１４．９ｋＮ／ｃｍ^2

τ＝７１１／３０４＝２．３ｋＮ／ｃｍ^2

□ 受け梁支持ブレースの検討



解析結果より応力は以下となっている。

ＣＡＳＥ３

Ｎ＝７７９１ｋＮ　Ｍｙ＝３７８ｋＮｍ　Ｑ＝６６ｋＮ

断面性能　Ｈ－７００×７００×５０×５０

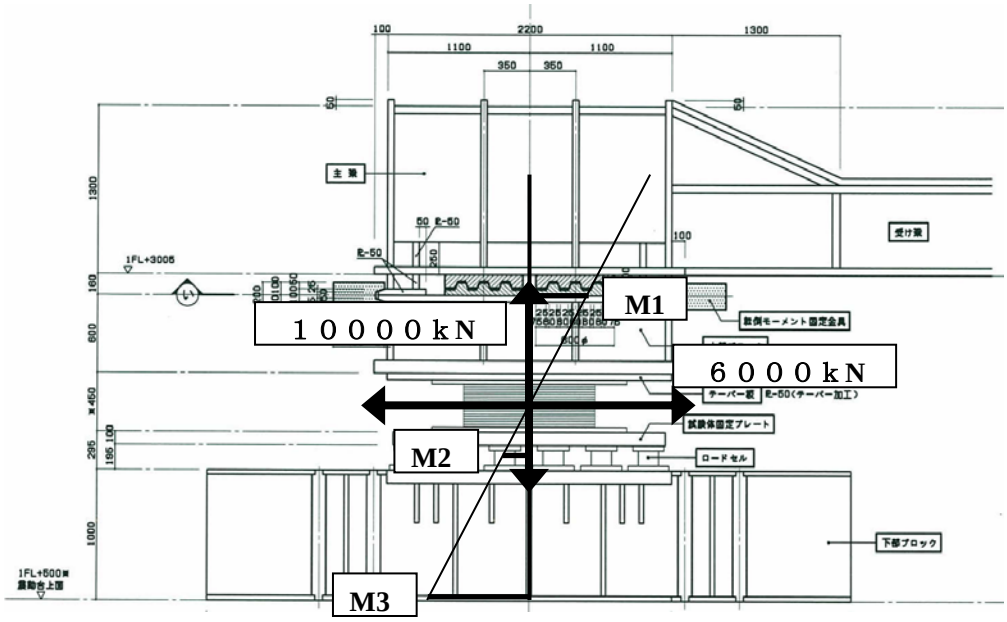
Ａ＝１０００ｃｍ^2　　Ｚｙ＝８４１６ｃｍ^3

σ＝７７９１／１０００＋３７８／８４１６×１００＝１２．３ｋＮ／ｃｍ^2

τは検討を省略

□ 上部ブロックの検討

加力時に試験体廻りに生じる応力に対して上部ブロックおよび転倒モーメント固定金具等が安全であることを確認する。



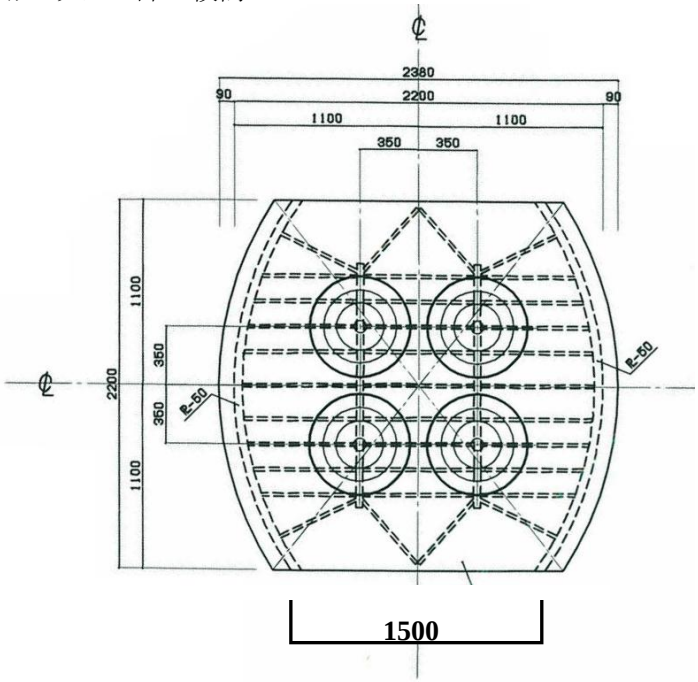
M1＝６０００ｋN×（４００mm／２＋５０mm＋６００mm）／１０００
　＝５１００ｋNm　（上部ブロック上面位置）
M2＝６０００ｋN×（４００mm／２＋１００mm＋１９５mm／２）／１０００
　＝２３８５ｋNm　（ロードセル高さ中央位置）
M3＝６０００ｋN×（４００mm／２＋１００mm＋１９５mm＋１０００mm）
　／１０００＝８９７０ｋNm　（下部ブロック下面位置）

（水平力６０００ｋNに衝撃係数１．５を考慮した場合）

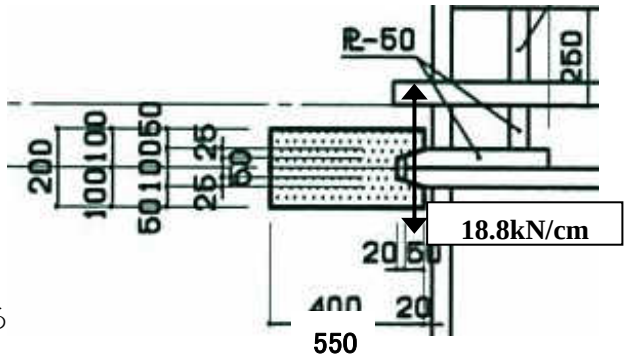
M1＝６０００ｋN×1.5×（４００mm／２＋５０mm＋６００mm）／１０００
　＝７６５０ｋNm　（上部ブロック上面位置）
M2＝６０００ｋN×1.5×（４００mm／２＋１００mm＋１９５mm／２）／１０００
　＝３５７８ｋNm　（ロードセル高さ中央位置）
M3＝６０００ｋN×1.5×（４００mm／２＋１００mm＋１９５mm＋１０００mm）
　／１０００＝１３４５５ｋNm　（下部ブロック下面位置）

・上部ブロック上部の転倒モーメント固定用コッター部の検討

転倒モーメントＭ１をコッター
平均幅の１８５０ｍｍで割ると
　７６５０ｋＮｍ／１．８５ｍ
　＝４１３５ｋＮ（衝撃係数考慮）
となり、コッター１ｃｍ幅あたり
では
　４２３５ｋＮ／２２０ｃｍ
　＝１８．８ｋＮ／ｃｍ
となる。（衝撃係数考慮）

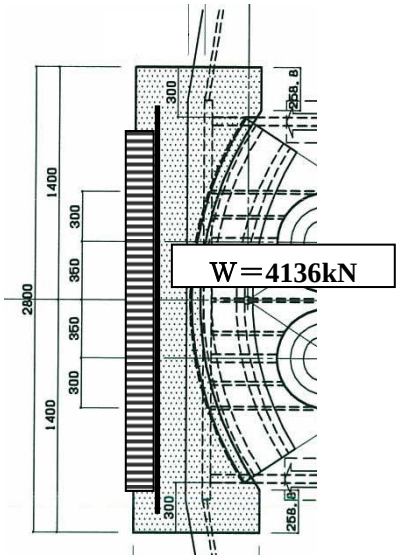


コッター部の曲げは
　Ｍ＝１８．８×０．０４５ｍ
　　＝０．８４６ｋＮｍ／ｃｍ
　Ｚ＝４．１７ｃｍ^3　より
　σ＝０．８４６／４．１７×１００
　　＝２０．３ｋＮ／ｃｍ^2（衝撃係数考慮）



コッター部は２５ｍｍ／５０ｍｍの
１／２勾配のため
水平方向には
　１８．８／２＝９．４ｋＮ／ｃｍ
の力が働く
この水平力は上下のコッターに作用する
ため全体では
　９．４×２×２２０ｃｍ＝４１３６ｋＮ
となる。（衝撃係数考慮）

転倒モーメント固定金具には、右図のように
上記荷重が作用する。
　Ｍ（中央）＝４１３６／２×１．２５ｍ
　　－４１３６／２×０．５５ｍ
　　＝１４４８ｋＮｍ
転倒モーメント固定金具の曲げ耐力は
５５０ｍｍ×１００ｍｍ
Ｚ＝５０４２ｃｍ^3　より
σ＝１４４８／５０４２×１００
　＝２８．７ｋＮ／ｃｍ^2（衝撃係数考慮）



□ 固定プレート・ロードセルの検討

ロードセル　３１台
許容荷重　Fxy400kN/台（水平）　Fz700kN/台（鉛直）

全鉛直荷重　１００００ｋＮ
全水平力　　６０００ｋＮ　（９０００ｋＮｍ　衝撃係数考慮）
転倒モーメント（M3）　２３８５ｋＮｍ　（３５７８ｋＮｍ　衝撃係数考慮）

平均鉛直力　１００００ｋＮ／３１＝３２２．６ｋＮ／台
平均水平力　６０００ｋＮ／３１＝１９３．５ｋＮ／台
　　（９０００ｋＮ／３１＝２９０．３ｋＮ／台　衝撃係数考慮）

ロードセルが２１００ｍｍφの試験体固定プレートに均等に配置されているものとし、転倒モーメントが作用した際の最大鉛直力を以下に算定する。

２１００ｍｍφのＡおよびＺは、

$A=\pi D^2/4=3.14\times2.1^2/4=3.462m^2$

$Z=\pi D^3/32=3.14\times2.1^3/32=0.9087m^3$

転倒モーメントによる付加鉛直応力度は

$W=2385kNm/0.9087m^3=2625kN/m^2$

（$W=3578kNm/0.9087m^3=3937kN/m^2$　衝撃係数考慮）

ロードセル１台あたりの最大鉛直力は

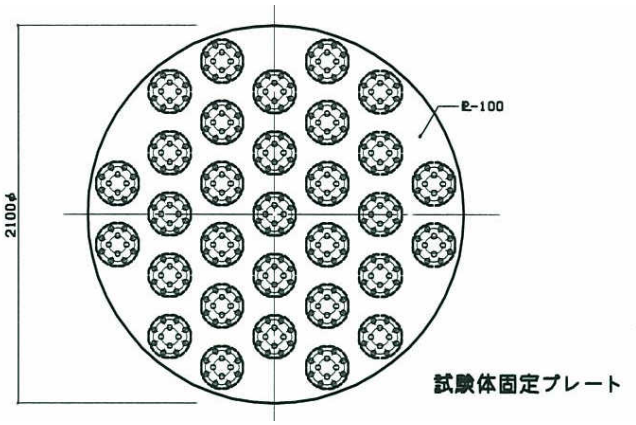
$322.6kN+2625kN/m^2\times3.462m^2/31台=615.8kN$

$322.6kN-2625kN/m^2\times3.462m^2/31台=29.4kN$

（衝撃係数考慮時）

$322.6kN+3937kN/m^2\times3.462m^2/31台=762.3kN$

$322.6kN-3937kN/m^2\times3.462m^2/31台=-117.1kN$



□ 固定ブロック・下部ブロックの固定の検討

解析結果における固定ブロックに加わる曲げ・軸力に対して、固定ブロックの固定ボルト張力（４５０ｋN）にて固定されていることを確認する。

・主梁両端柱下部固定ブロック

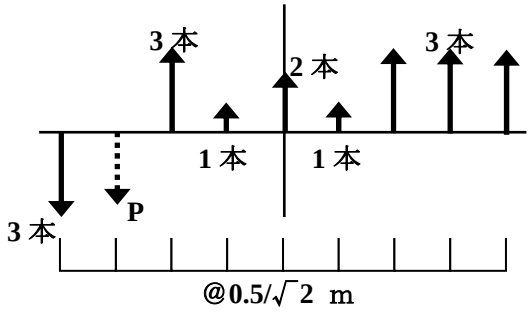
解析結果より固定ブロックに加わる曲げ・軸力は

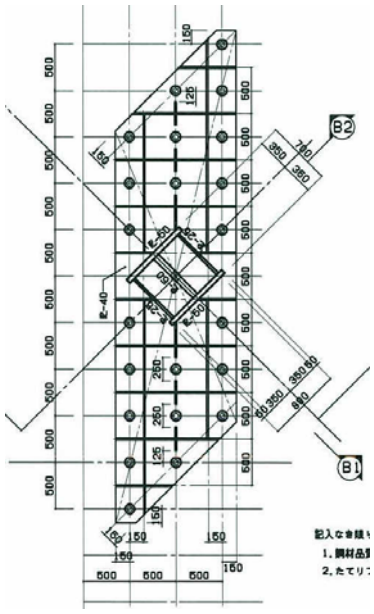
ＣＡＳＥ２

Ｍ＝３５８５＋４５２８×０．５ｍ

＝５８４９ｋNm（固定ブロック下面）

Ｎ＝４２６９ｋN（上向き）





上図のように各ボルト位置にて４５０ｋN／本で押さえ

こむと想定すると、

破線部のボルト位置に位置作用する力は、軸力との釣り合いより、

Ｐ＝４５０×（３＋１＋２＋１＋３－３）－４２６９＝－１１１９ｋN

このとき発生する転倒に対する抵抗モーメントは

Ｍ＝４５０×（３×2.0/√2＋３×1.5/√2＋３×1.0/√2＋１×0.5/√2－１×0.5/√2－３

×1.0/√2＋３×2.0/√2）＋１１１９ｋN×1.5/√2

＝６４３７ｋNm

となり、固定ブロック下面に作用する曲げを上回っている。

・主梁両端柱下部固定ブロック

ブレースより作用する引き抜き力は、

ＣＡＳＥ３　　Ｎ＝７７９１ｋNから

Ｐ＝７７９１ｋN×2.305m

／√（2.305m2＋4.0m2）

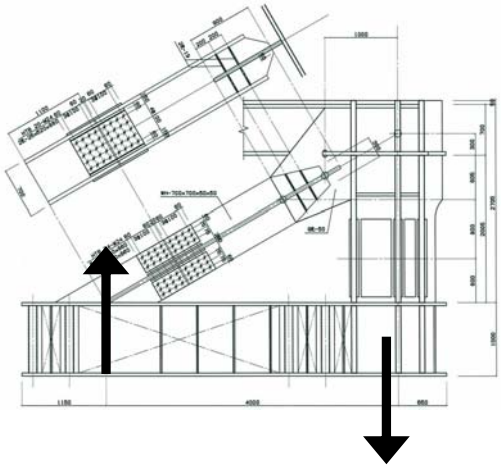
＝３８９０ｋN

次頁の図より、ブレース周囲の固定ボルトは

１２本　４５０ｋN／本

より引抜に対する対抗は

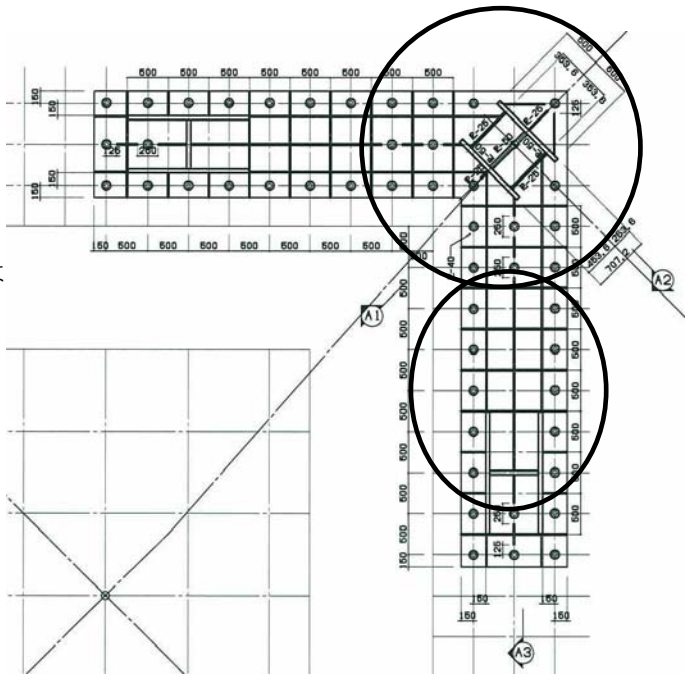
１２×４５０＝５４００ｋN



となり、引き抜き力を上回っている。

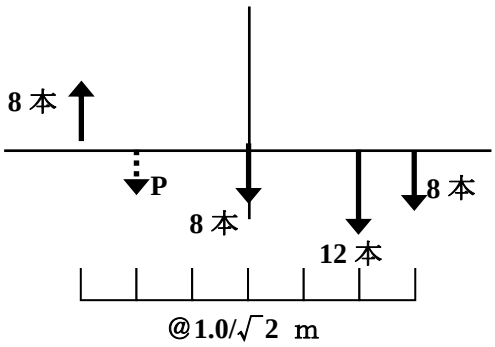
受け梁支持柱より作用する圧縮力は、
ＣＡＳＥ３　　Ｎ＝５７５６ｋＮ

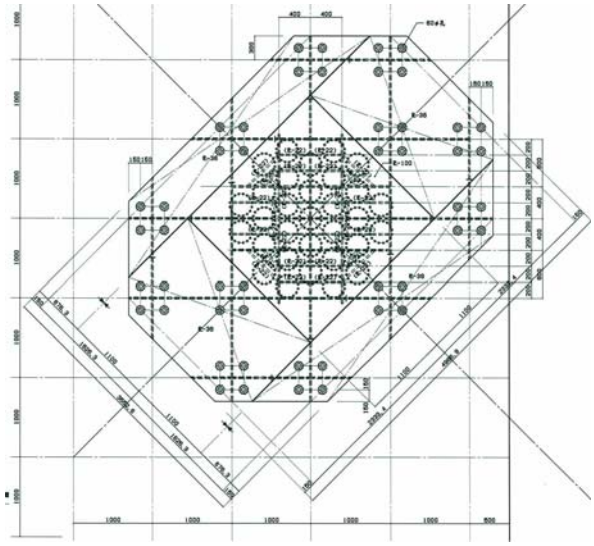
右図より、ブレース周囲の固定ボルトは
１６本　４５０ｋＮ／本
より、ボルト１箇所あたりに相当する
圧縮力は
５７５６ｋＮ／１６＝３６０ｋＮ
となり、安全である。



・下部ブロック

下部ブロックに加わる曲げ・軸力は
Ｍ＝８９７０ｋＮｍ
　＝１３４５５ｋＮｍ（衝撃係数考慮）
Ｎ＝１００００ｋＮ（下向き）





上図のように各ボルト位置にて４５０ｋＮ／本で押さえ
こむと想定すると、
破線部のボルト位置に位置作用する力は、軸力との釣り合いより、
Ｐ＝４５０×（８＋１２＋８－８）－１００００＝－１０００ｋＮ

このとき発生する転倒に対する抵抗モーメントは
Ｍ＝４５０×（８×3.0/√2＋１２×2.0/√2＋８×3.0/√2）＋１０００ｋＮ×2.0/√2
　＝２４３２４ｋＮｍ
となり、下部ブロック下面に作用する曲げを上回っている。

□ 固定ブロック・下部ブロック水平すべりの検討

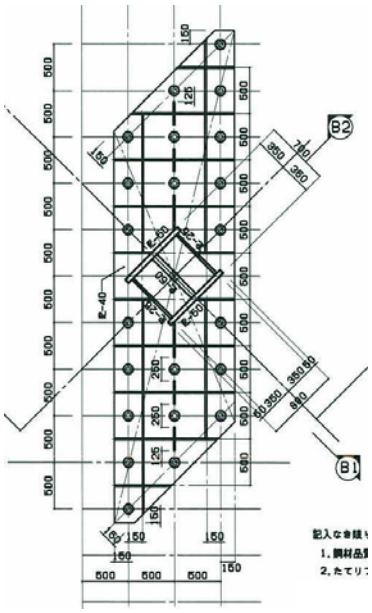
解析結果における固定ブロックに加わる水平力が、固定ブロック下面が固定ボルト張力（４５０ｋN）に摩擦係数を０．３とした場合の摩擦力に対してどのような値となっているかを確認する。

・主梁両端柱下部固定ブロック

解析結果より固定ブロックに加わる水平力は

ＣＡＳＥ１　　ｍａｘ３５９７ｋN

ＣＡＳＥ２　　ｍａｘ４５２８ｋN



固定ボルト本数　２２本

摩擦力＝２２×４５０ｋN×０．３

＝２９７０ｋN

ボルト１本あたりの水平力

ＣＡＳＥ１　　ｍａｘ１６３．５ｋN

ＣＡＳＥ２　　ｍａｘ２０５．８ｋN

ボルトのせん断応力度　（Ｍ４８　１４．７ｃｍ^2）

ＣＡＳＥ１　　ｍａｘ１１．１２ｋN／ｃｍ^2

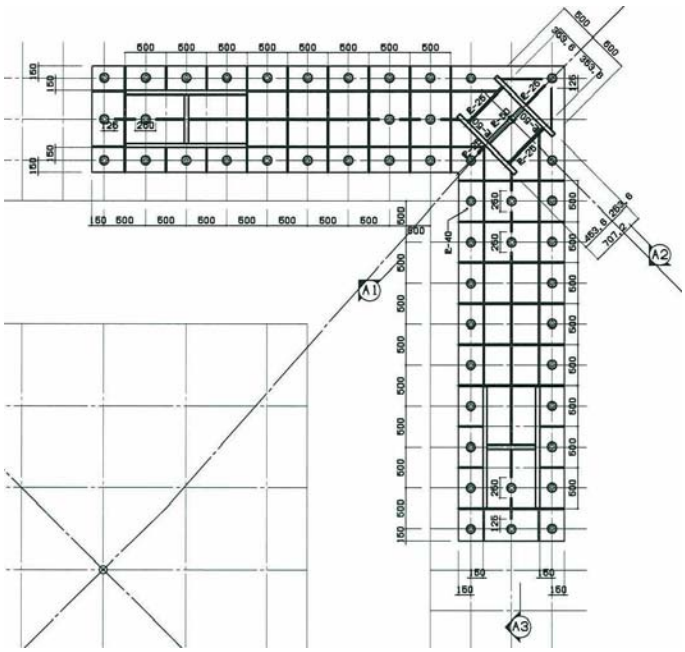
ＣＡＳＥ２　　ｍａｘ１４．００ｋN／ｃｍ^2

・主梁両端柱下部固定ブロック

解析結果より固定ブロックに加わる水平力は

ＣＡＳＥ３　ｍａｘ８６５１ｋN

（ＣＡＳＥ３は衝撃係数１．５を考慮）



固定ボルト本数　４８本

摩擦力＝４８×４５０ｋN×０．３

＝６４８０ｋN

ボルト１本あたりの水平力

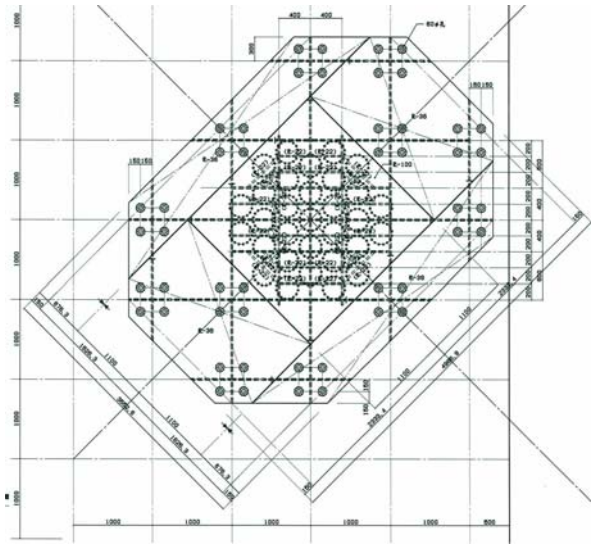
ＣＡＳＥ３　ｍａｘ１８０．２ｋN

ボルトのせん断応力度

（Ｍ４８　１４．７ｃｍ^2）

ＣＡＳＥ１　　ｍａｘ１２．２５ｋN／ｃｍ^2

・下部ブロック



下部ブロックに加わる水平力は
ｍａｘ６０００ｋＮ
衝撃係数 1.5 の場合　ｍａｘ９０００ｋＮ

固定ボルト本数　４８本
摩擦力＝４８×４５０ｋＮ×０．３
　　＝６４８０ｋＮ

ボルト１本あたりの水平力
ｍａｘ１２５．０ｋＮ
ｍａｘ１８７．５ｋＮ（衝撃係数 1.5 を考慮）

ボルトのせん断応力度　（Ｍ４８　１４．７ｃｍ^2）
ｍａｘ　８．５０ｋＮ／ｃｍ^2
ｍａｘ１２．７６ｋＮ／ｃｍ^2（衝撃係数 1.5 を考慮）

2.5.4　参考資料

水平･鉛直 2 軸載荷時の分力計荷重分布に関する FEM 解析結果（弾性すべり支承の場合）

水平・鉛直載荷時の分力計荷重分布を検討するため、３次元 FEM 解析を実施した。次頁以後に、下表の条件における弾性すべり支承の解析結果例を示す。解析結果は、各ロードセルの軸力分布と弾性すべり支承の面圧分布を表示している。

表

ケース	鉛直軸力	受梁傾斜	主梁傾斜	水平加力 受梁方向	水平加力 主梁方向	ジャッキ
1	5MN	0	0	―	―	―
2	5MN	1/250	0	―	―	―
3	5MN	1/750+1/1000	0	○	―	―
4	7MN	1/750+1/1000	0	○	―	―
5	7MN	1/750+1/1000	0	○	―	1.5MN
6	0	0	0	―	―	1.5MN
7	7MN	0	0	―	○	―
8	7MN	0	1/1500	―	○	―

ロードセルの圧縮許容軸力は 700kN であり、この数値は解析結果の-140 に相当する。
ロードセルの限界圧縮軸力は 770kN であり、この数値は解析結果の-154 に相当する。
ロードセルの引張許容軸力は 500kN であり、この数値は解析結果の 100 に相当する。

ケース１
5MN 鉛直載荷した場合で、反力梁に傾斜が無い場合の解析結果である。ロードセル荷重は圧縮許容軸力内に収まっている。

ケース２
5MN 鉛直載荷した場合で、反力梁の受梁方向に 1/250 傾斜が生じた場合の解析結果である。受梁は片持ち梁なので必ず傾斜が生じる。ロードセル荷重は圧縮許容軸力内に収まっている。

ケース３
5MN 鉛直載荷した場合で、反力梁の受梁方向に 1/750+1/1000 傾斜が生じた場合の受梁方向水平加力時の解析結果である。ロードセル荷重は圧縮許容軸力内に収まっている。1/750 の傾斜角は、別途実施した反力梁の加力解析結果から評価しており、誤差として 1/1000 を加えている。

ケース４
7MN 鉛直載荷した場合で、反力梁の受梁方向に 1/750+1/1000 傾斜が生じた場合の受梁方向水平加力時の解析結果である。ロードセル荷重は圧縮許容軸力内に収まっている。

ケース５
7MN 鉛直載荷した場合で、反力梁の受梁方向に 1/750+1/1000 傾斜が生じた場合の受梁方向水平加力時の解析結果である。中央部のロードセルをジャッキに置換して 1.5MN の軸力を導入している。ロードセル荷重は圧縮許容軸力内にまっている。

ケース６
中央部のロードセルをジャッキに置換して 1.5MN の軸力を導入した場合に、震動台の異常停止等により鉛直軸力が 0 になった場合の解析結果である。ロードセル荷重は圧縮許容軸力内にまっている。

ケース７
7MN 鉛直載荷した場合で、反力梁に傾斜が無い場合の主梁方向水平加力時の解析結果である。ロードセル荷重は圧縮許容軸力内にまっている。

ケース８
7MN 鉛直載荷した場合で、主梁方向水平加力時の解析結果である。反力梁の主梁方向に 1/1500 の傾斜を想定しているが、この場合もロードセル荷重は圧縮許容軸力内にまっている。

(1) 軸力導入時における反力梁の傾斜の影響

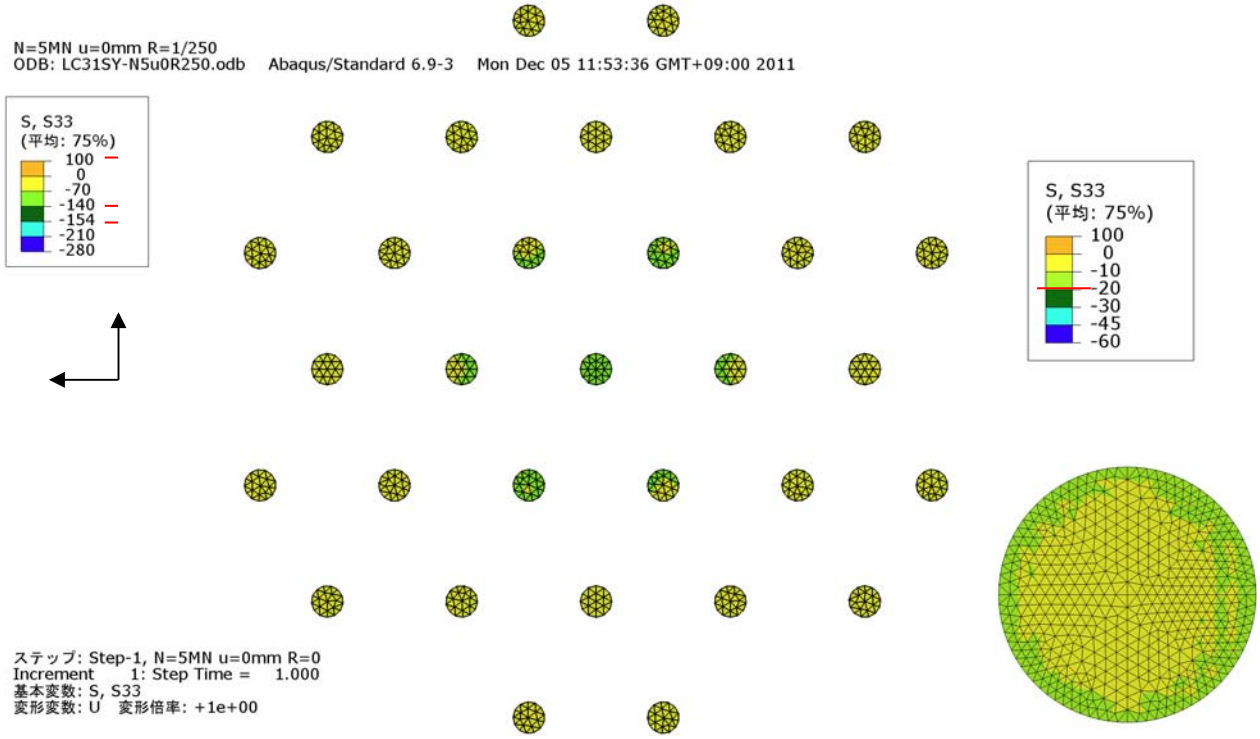


図 1 ロードセル応力分布および接触面面圧分布(軸力 5MN,初期位置,相対傾斜無)

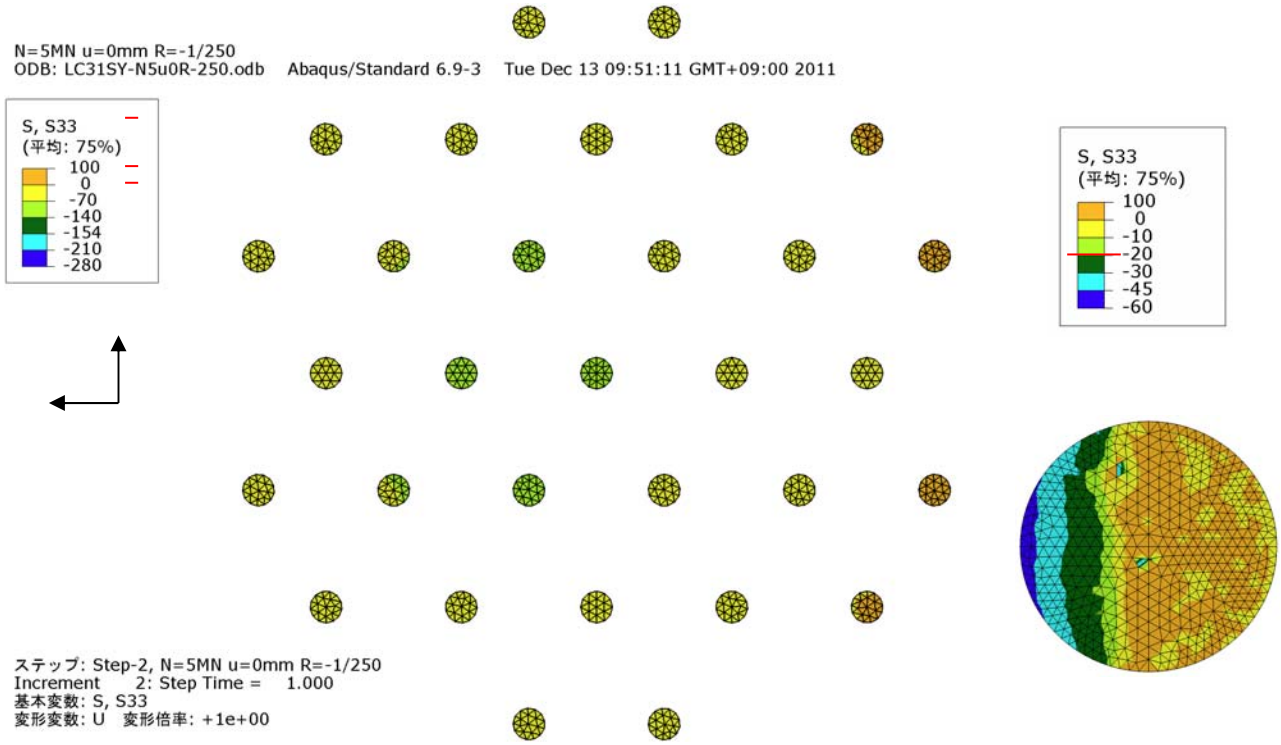


図 2 ロードセル応力分布および接触面面圧分布(軸力 5MN,初期位置,相対傾斜 1/250)

(2) 受梁方向載荷時の反力梁傾斜の影響

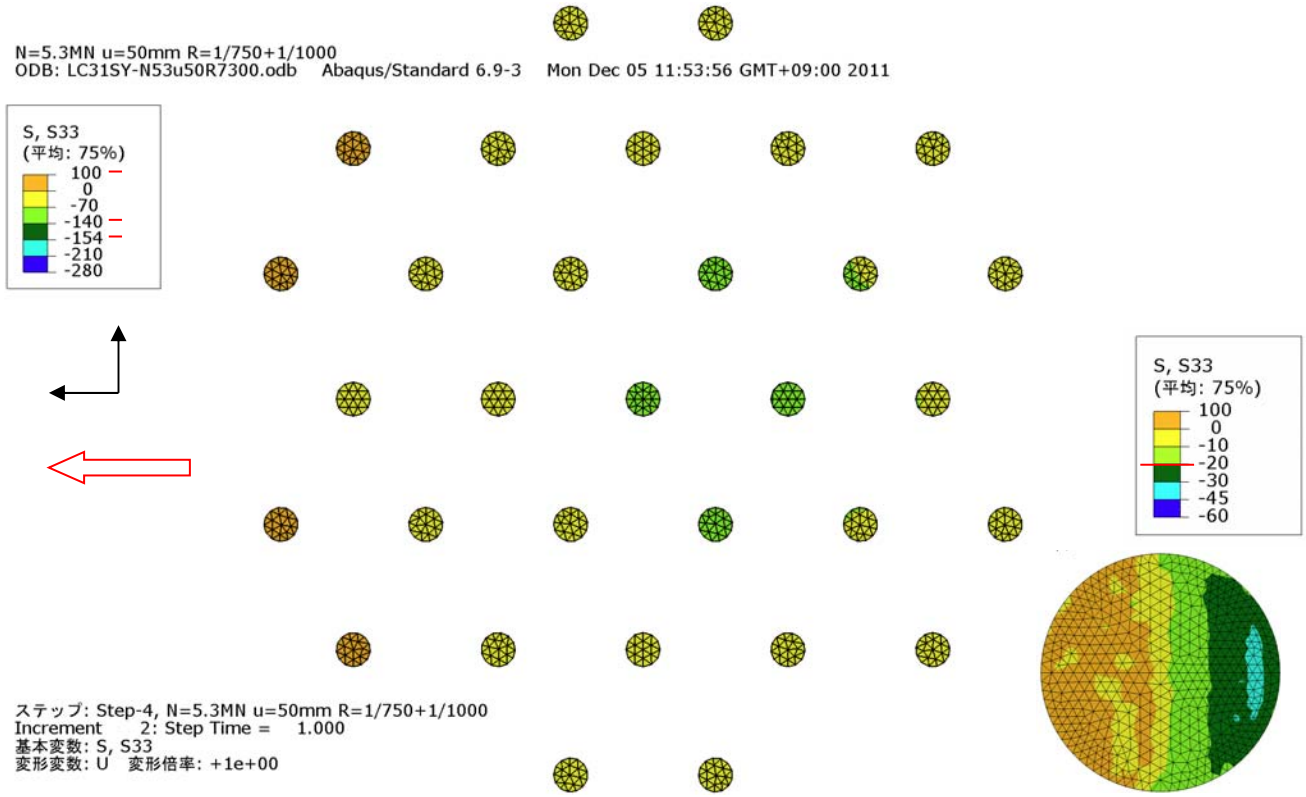


図 3 ロードセル応力分布および接触面面圧分布(初期導入軸力 5MN,滑り領域)

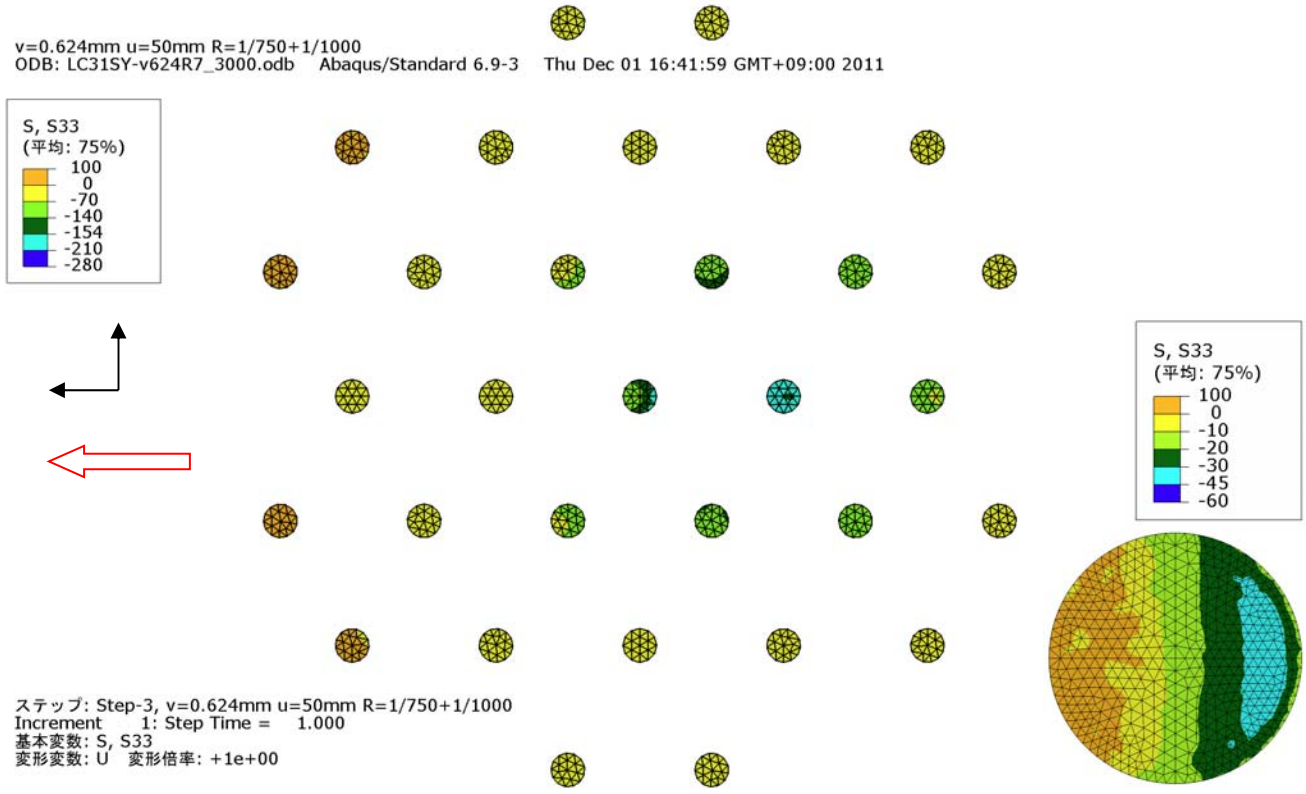


図 4 ロードセル応力分布および接触面面圧分布(初期導入軸力 7MN,滑り領域)

(3) ロードセル 1 台をジャッキに代替した場合

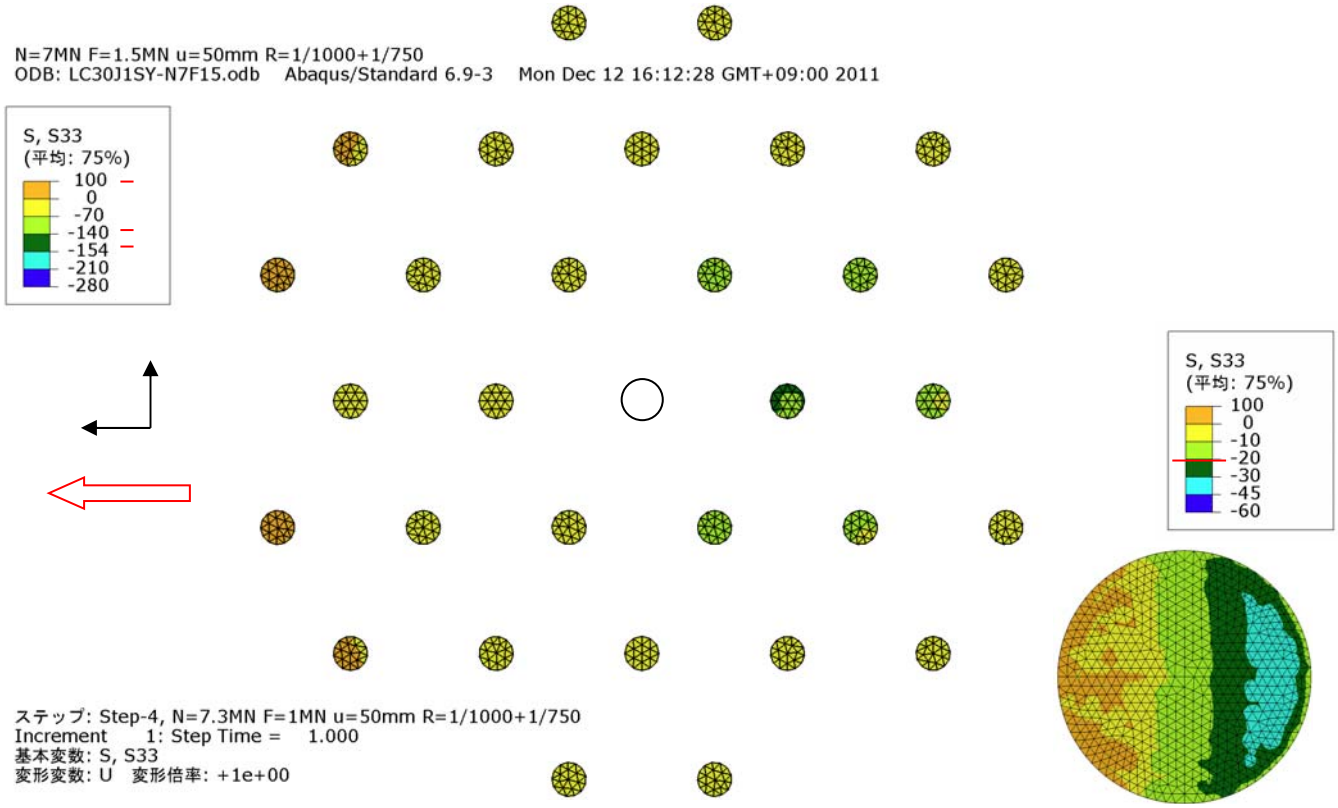


図 5 ロードセル応力分布および接触面面圧分布(初期導入軸力 7MN,ジャッキ軸力 1.5MN)

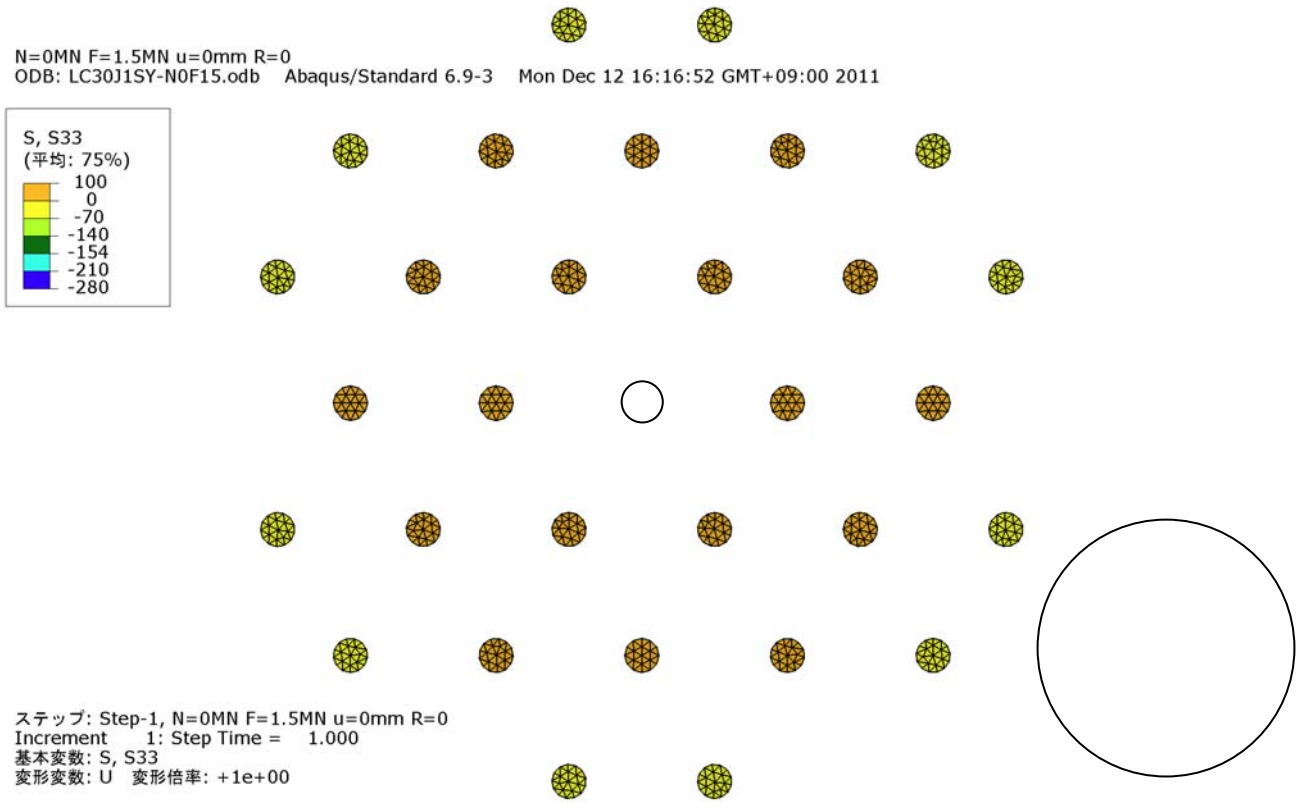


図 6 ロードセル応力分布（軸力 0N,ジャッキ軸力 1.5MN,緊急停止時）

(4) 主梁方向載荷時の反力梁傾斜の影響

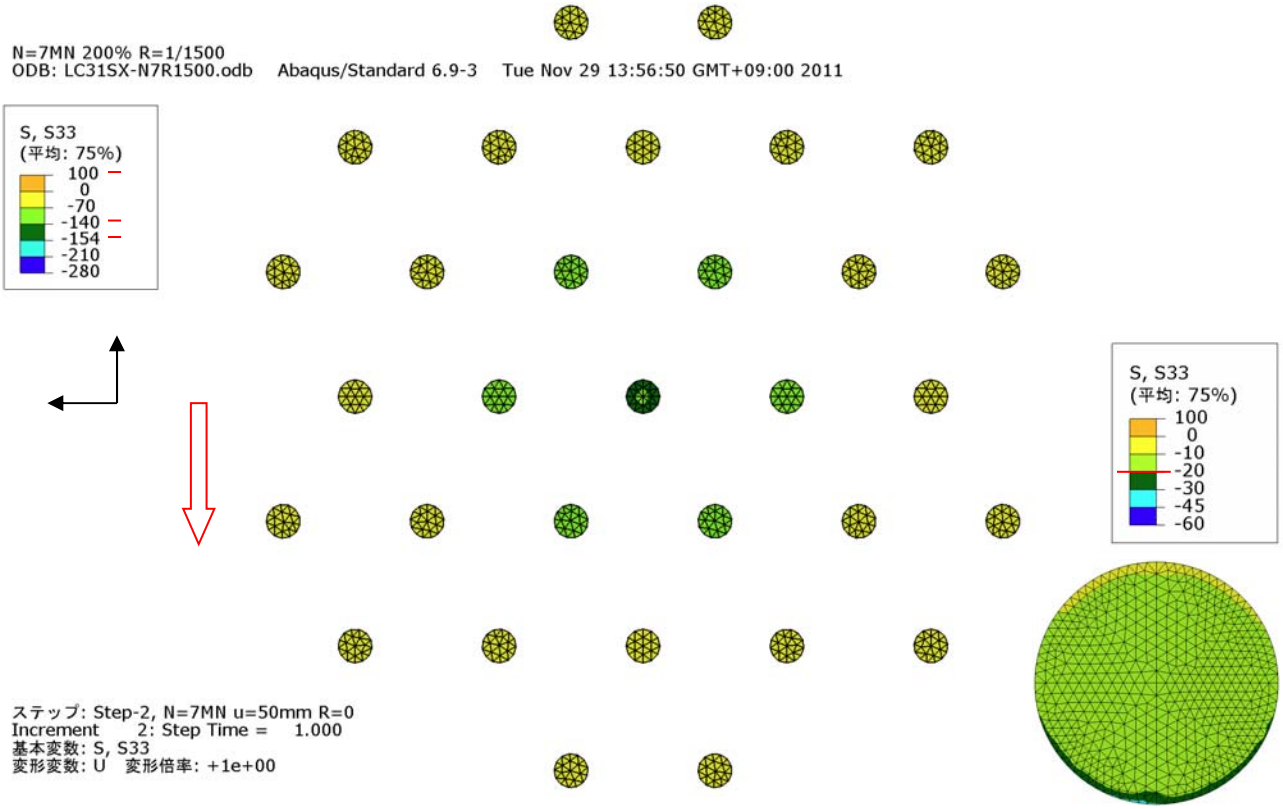


図 7 ロードセル応力分布および接触面面圧分布(初期導入軸力 7MN,滑り領域,相対傾斜無)

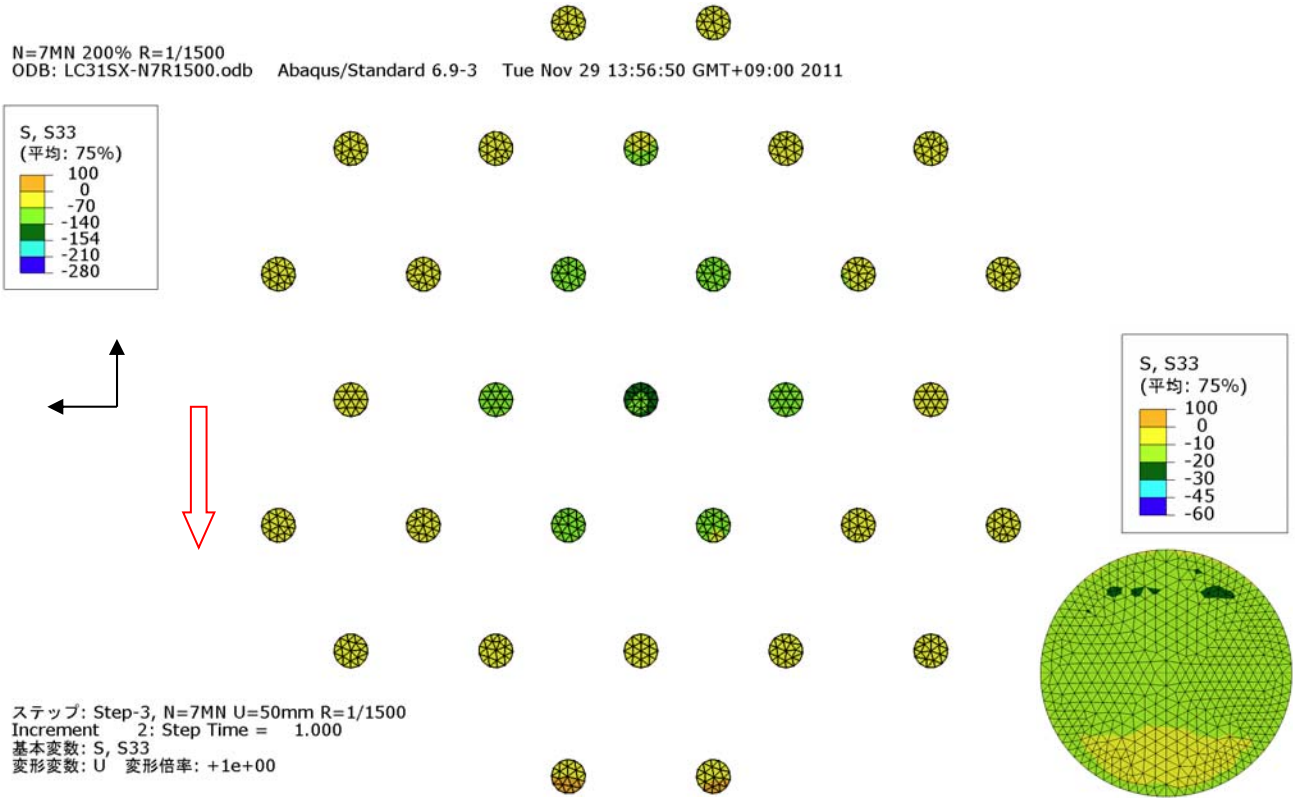
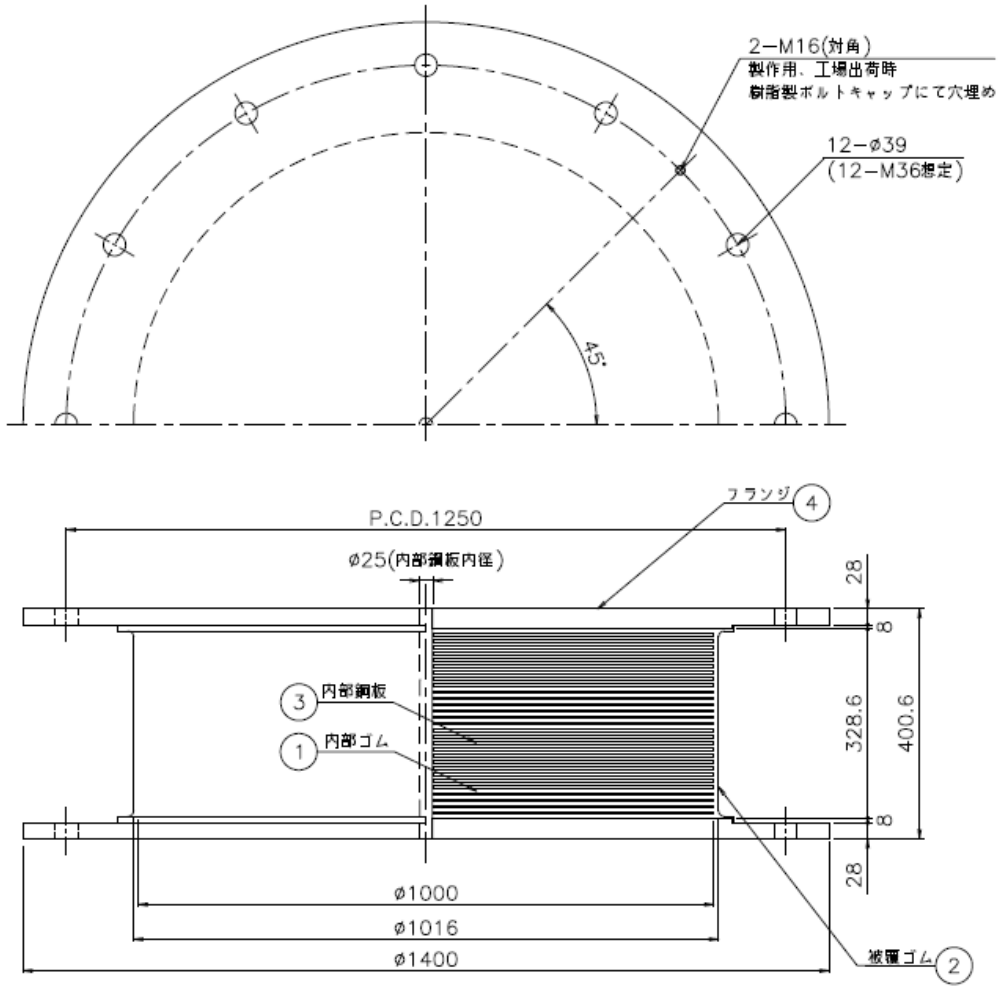
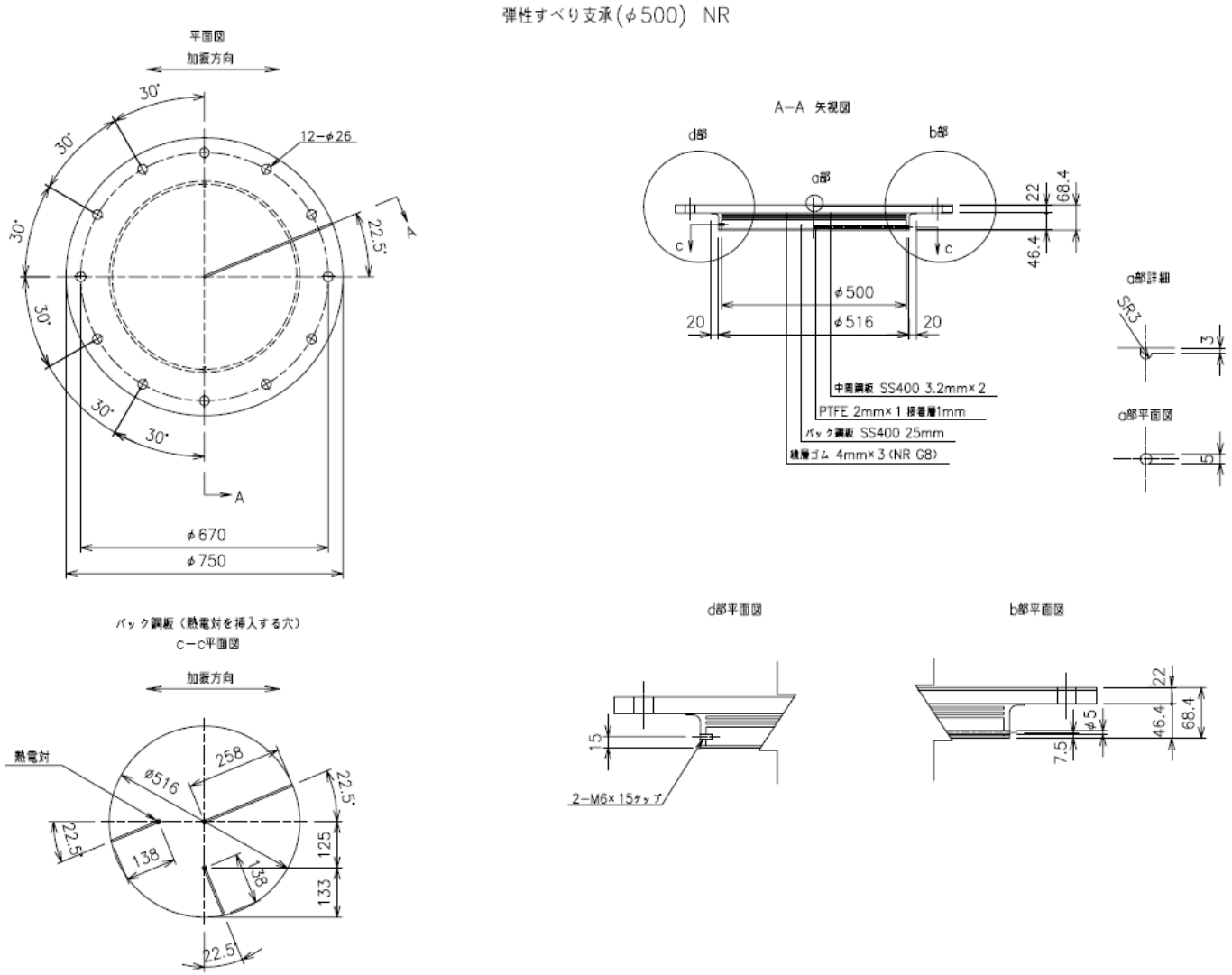


図 8 ロードセル応力分布および接触面面圧分布(初期導入軸力 7MN,滑り領域,相対傾斜 1/1500)

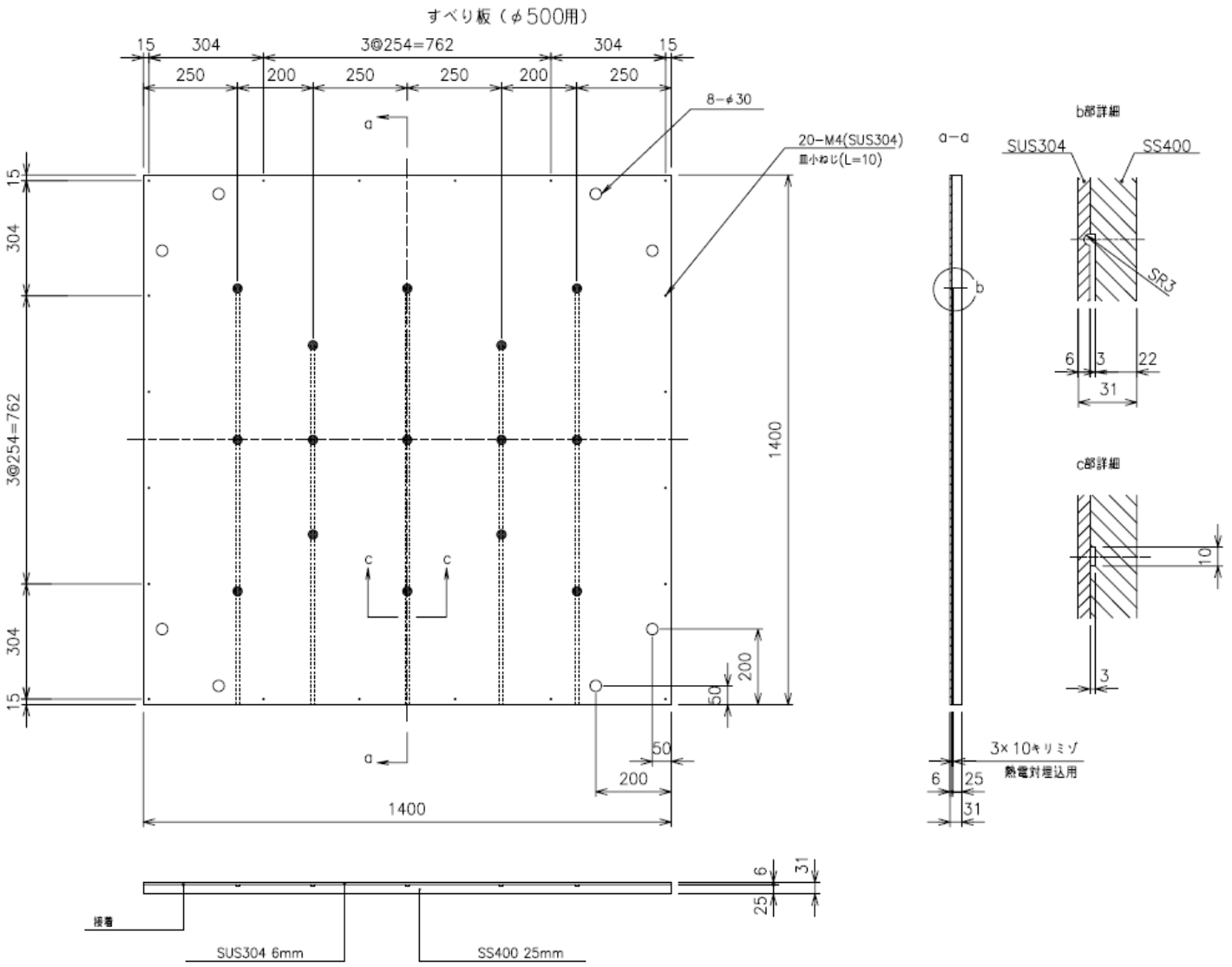
2.5.5　参考資料　試験体図面



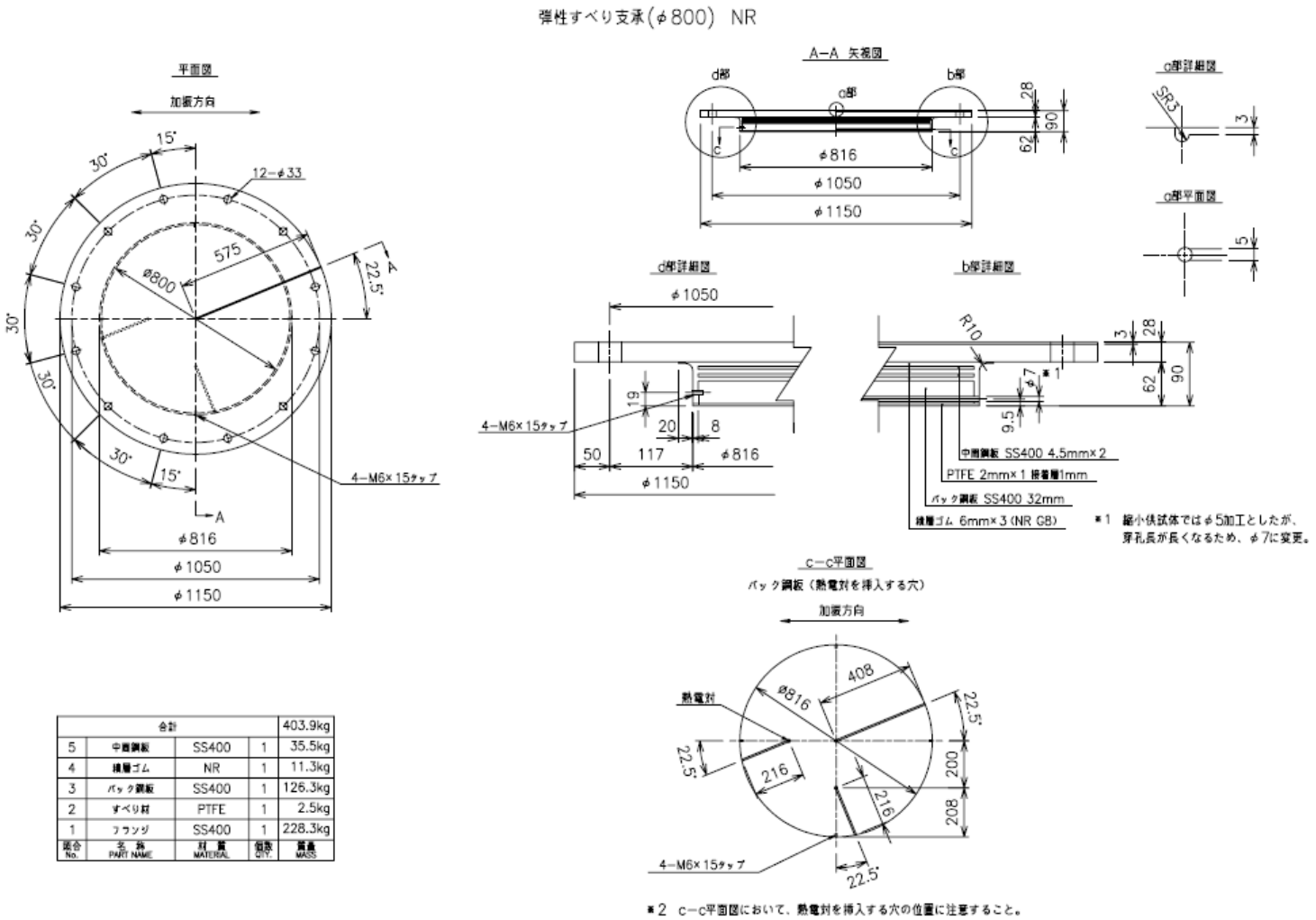
(1) 天然ゴム系積層ゴム



(2a) 弾性すべり支承（高摩擦）　φ５００

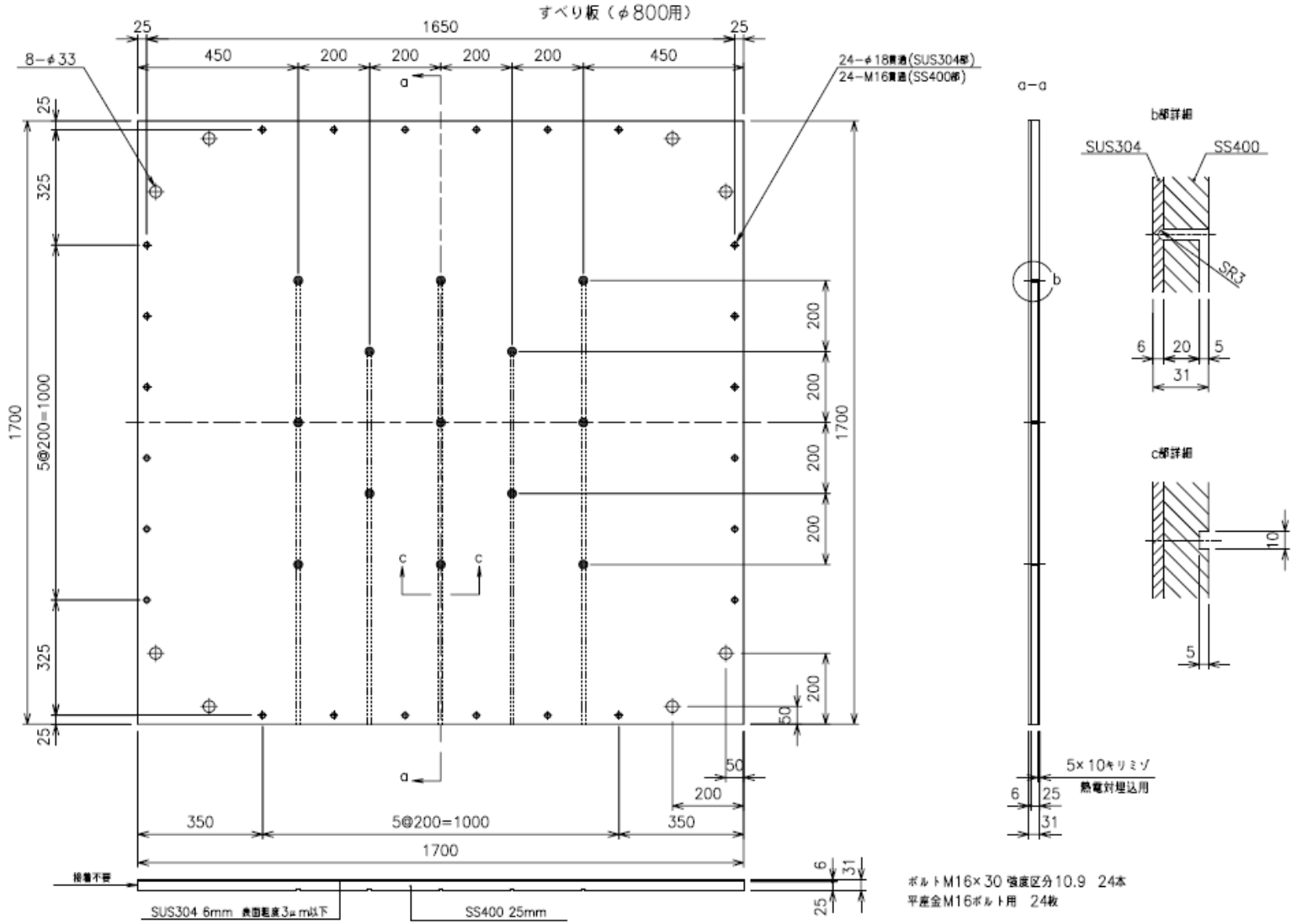


(2 b) すべり板　φ５００用

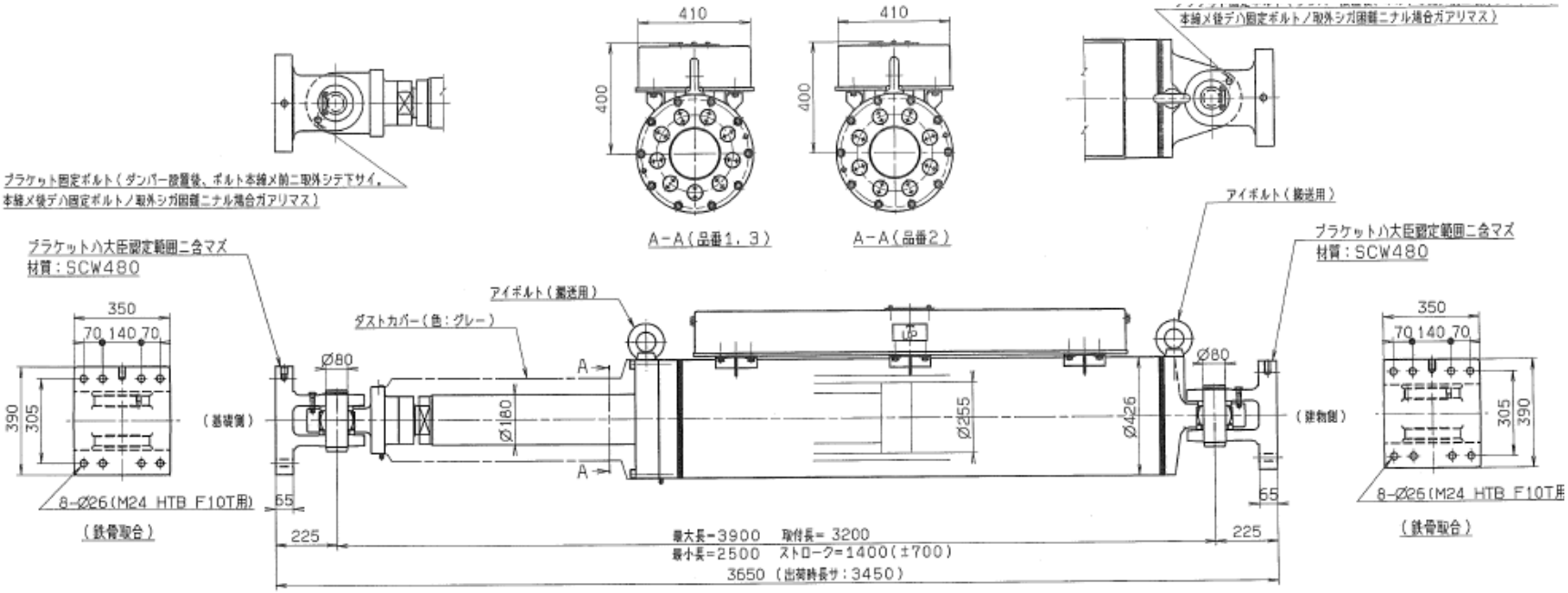


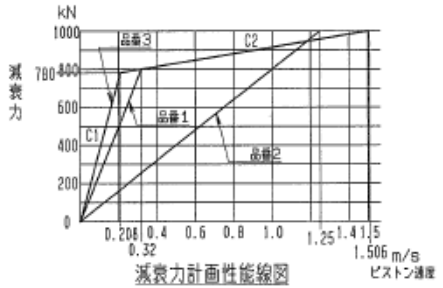
合計				403.9kg
5	中間調板	SS400	1	35.5kg
4	積層ゴム	NR	1	11.3kg
3	バック調板	SS400	1	126.3kg
2	すべり材	PTFE	1	2.5kg
1	フランジ	SS400	1	228.3kg
図番 No.	名 称 PART NAME	材 質 MATERIAL	個数 QTY.	質量 MASS

(3a) 弾性すべり支承（高摩擦）　φ８００



(3 b) すべり板　φ８００用





減衰力計画性能線図

1．仕様

品　番	1	2	3
形　式	BM250-4C	BM250-5C	BM250
減衰力タイプ	バイリニア	リニア	バイリニア
1次減衰係数（C1） MN・s/m	2.5	0.8	3.75
2次減衰係数（C2） MN・s/m	0.1695	-	0.1695
リリーフ速度 m/s	0.32	-	0.208
リリーフ減衰力 kN	800	-	780
最大速度 m/s	1.50	1.25	1.506
最大減衰力 kN	1000	1000	1000

2．外装　：下塗　JIS K5674　鉛・クロムフリーサビ止メペイント　1回塗リ
　　：上塗　JIS K5572　フタル酸樹脂エナメル　1回塗リ

注記

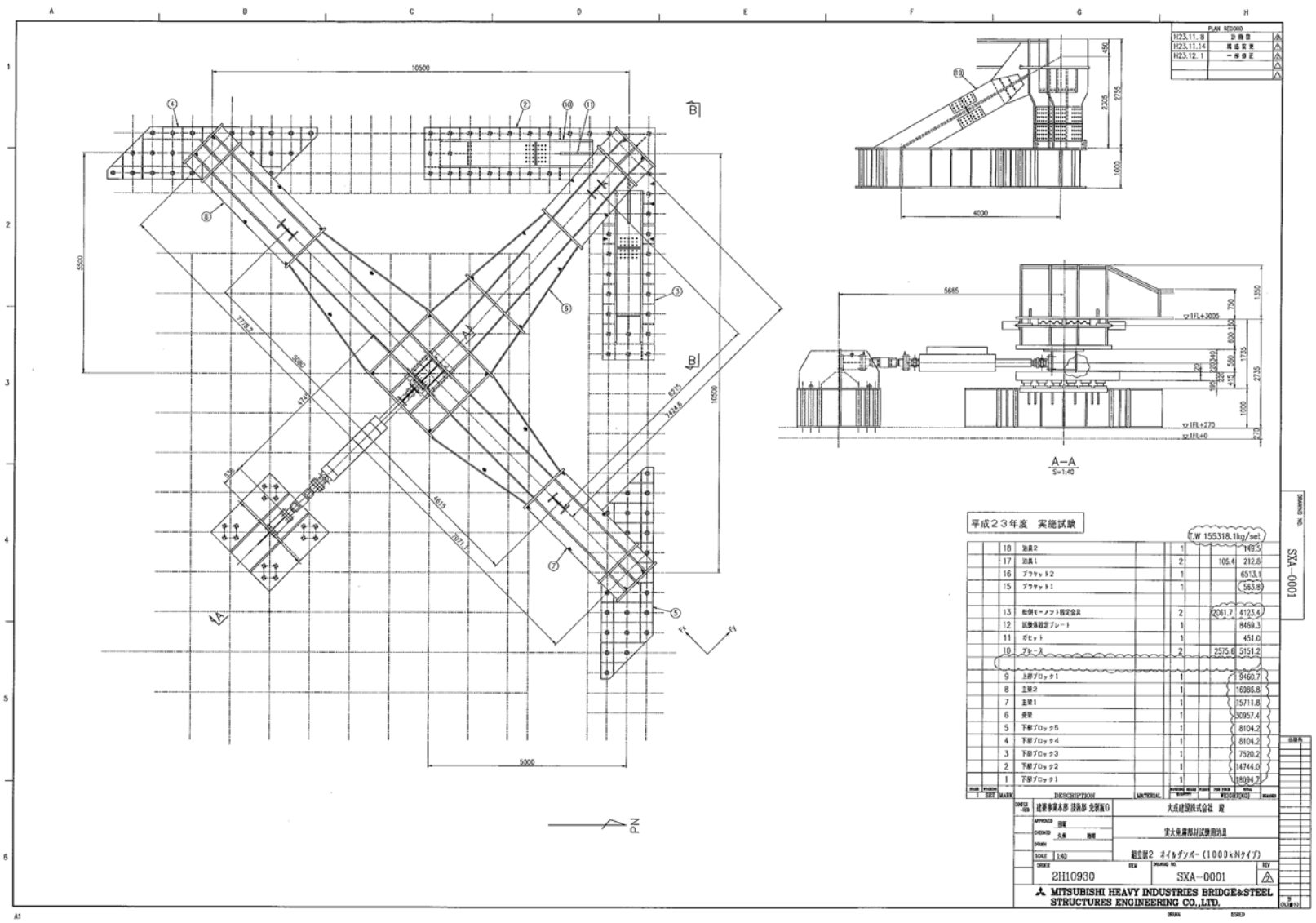
1．本オイルダンパーハタンクヲ上側ニシテ取付ケノコト．

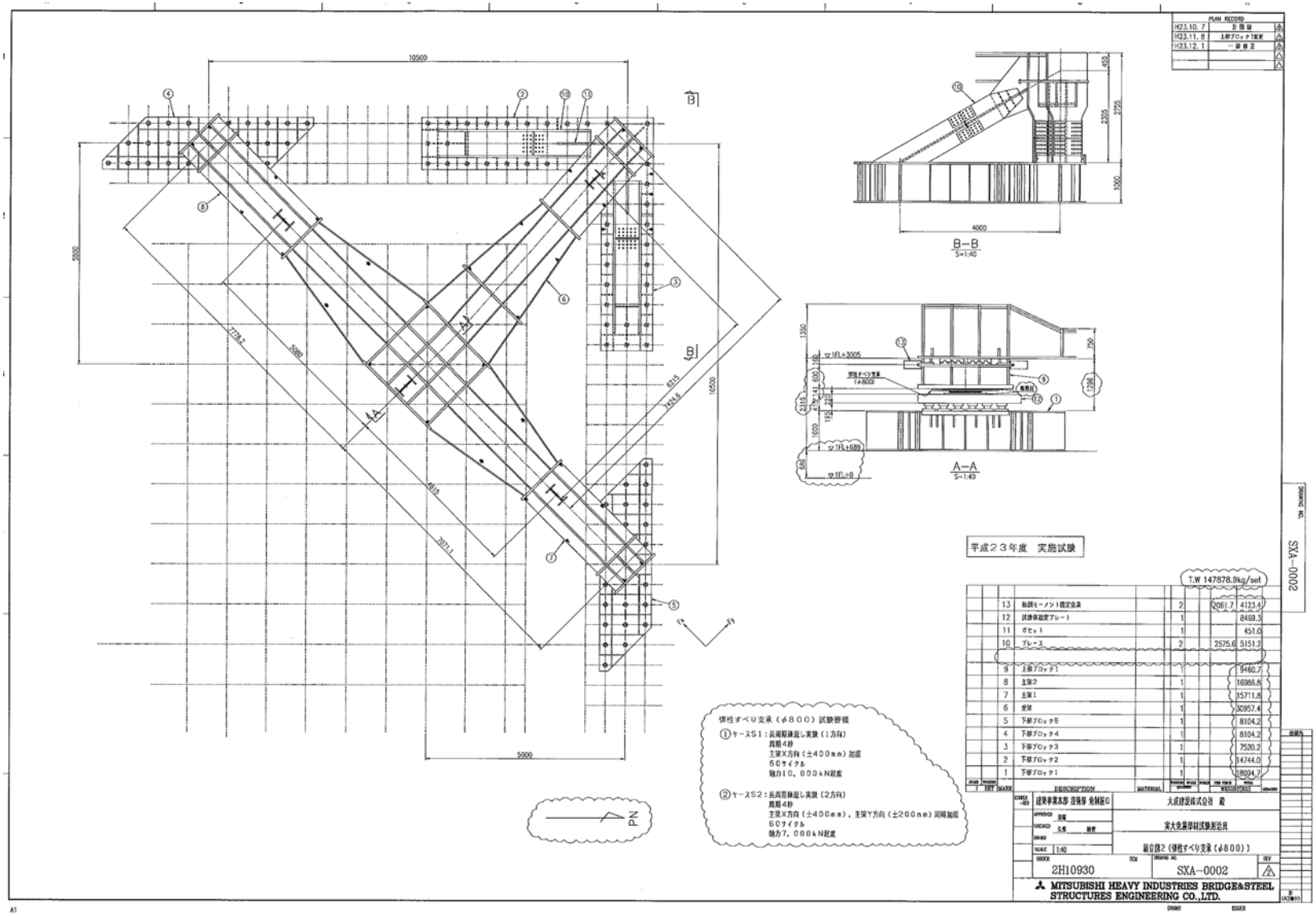
2．オイルダンパーラストッパトシテ使用セヌコト．

3．本オイルダンパーノ外形部ハ，強度上有害トナラヌ範囲デ黒皮
　マタハ素材素地面トシ，塗正ナ塗装ヲ行ウ．

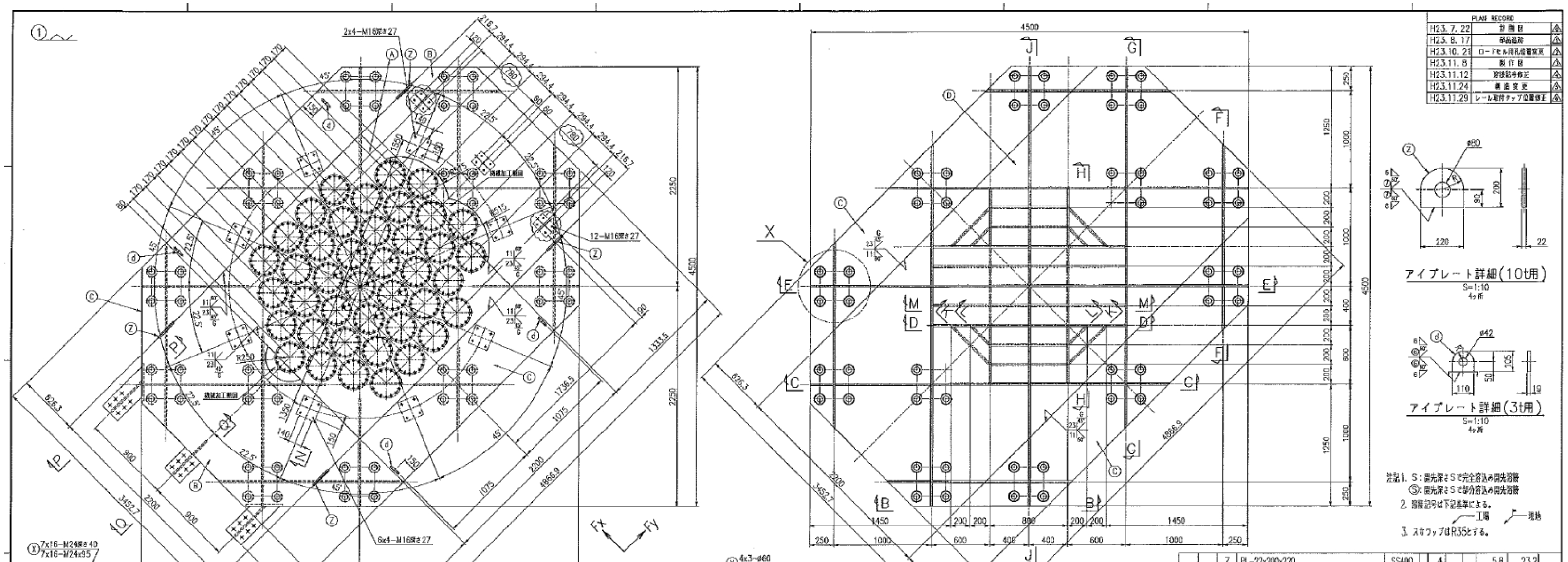
(4) オイルダンパー

2.5.6　参考資料　試験架台図および試験体取付図

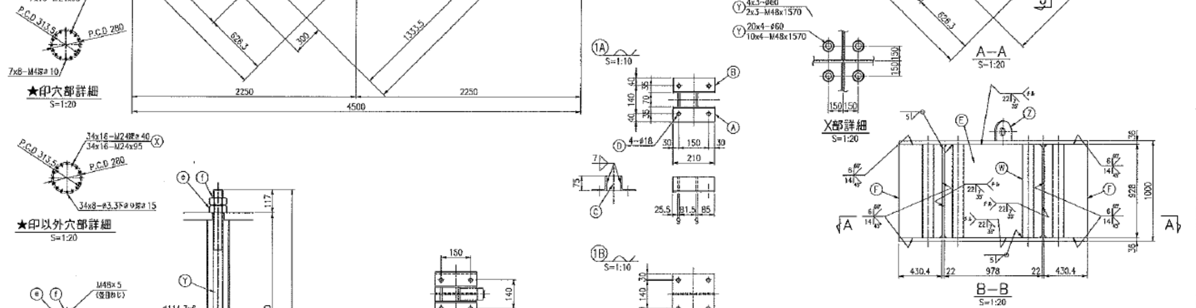


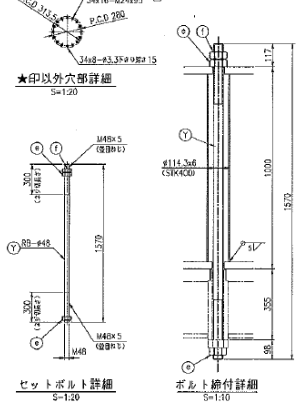


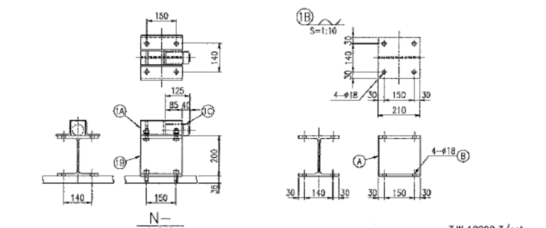
NO.	DESCRIPTION	MATERIAL	QTY	UNIT WEIGHT	TOTAL WEIGHT
13	転倒モーメント測定金具		2	2061.7	4123.4
12	試験体固定プレート		1		8469.3
11	ボセット		1		451.0
10	プレート		2	2575.6	5151.2
9	上部ブロック1		1		9460.7
8	主梁2		1		16986.8
7	主梁1		1		15711.8
6	梁架		1		30957.4
5	下部ブロック5		1		8104.2
4	下部ブロック4		1		8104.2
3	下部ブロック3		1		7520.2
2	下部ブロック2		1		14744.0
1	下部ブロック1		1		18094.7



PLAN RECORD		
H23. 7. 22	計画図	△0
H23. 8. 17	部品追加	△1
H23.10. 21	ロードセル用孔位置変更	△2
H23.11. 8	製作図	△3
H23.11.12	溶接記号修正	△4
H23.11.24	構造変更	△5
H23.11.29	レール取付タップ位置修正	△6







T.W 18228.3/set

MARK	DESCRIPTION	MATERIAL	QUANTITY	PER PIECE WEIGHT(KG)	TOTAL WEIGHT(KG)	REMARKS
1C	単動式パワージャッキ　E10S5		8	2.6	20.8	
B	M16x35 六角穴付B		32			
A	H-200x200x8x12x210	SS400	8	10.5	84.0	
1B	ジャッキ受け架台2		8	10.5	84.0	

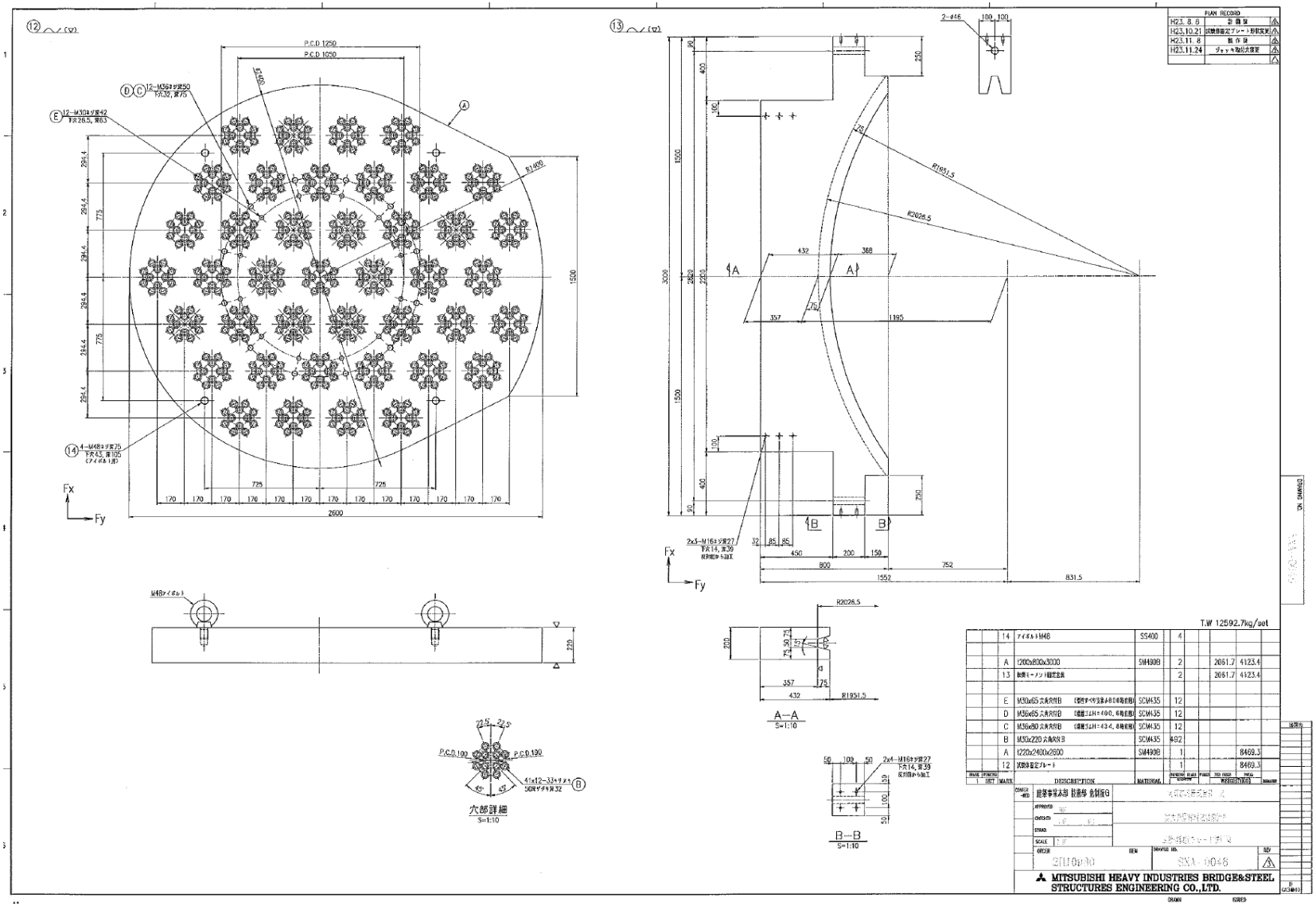
MARK	DESCRIPTION	MATERIAL	QUANTITY	PER PIECE WEIGHT(KG)	TOTAL WEIGHT(KG)	REMARKS
D	M16x50 六角B, N, W-2, SW-1		32			
C	PL-9x70x75	SS400	16	0.4	6.4	
B	L-75x75x6x210	SS400	8	1.4	11.2	
A	L-75x75x6x210	SS400	8	1.4	11.2	
1A	ジャッキ受け架台1		8	3.6	28.8	
ia(ib)	PL-22x160x230	SS400	各1	4.6	9.2	
ha(hb)	PL-22x200x230	SS400	各1	5.6	11.2	
ga(gb)	PL-36x220x561.5	SS400	各1	28.1	56.2	
f	M48 六角N2種　(Eディフェンス備品)		46			
e	M48 六角N1種　(Eディフェンス備品)		92			
d	PL-19x105x110	SS400	4	1.2	4.8	
c	PL-22x200x480	SS400	1		14.3	
b	PL-22x200x420.5	SS400	2	12.2	24.4	
a	PL-36x220x300	SS400	1		18.6	

SET	MARK	DESCRIPTION	MATERIAL	QUANTITY	PER PIECE WEIGHT(KG)	TOTAL WEIGHT(KG)	REMARKS
	Z	PL-22x200x220	SS400	4	5.8	23.2	
	Y	セットボルトM48x1570　(Eディフェンス備品)	S45C	46			
	X	M24x95 六角穴付B,SW	SCM435	656			
	W	ø114.3x6x928	STK400	48	14.8	710.4	
	V	PL-22x178x300	SM490B	8	9.2	73.6	
	U	PL-22x300x978	SM490B	4	50.7	202.8	
	T	PL-22x274x300	SM490B	4	14.2	56.8	
	S	PL-22x300x557	SM490B	4	28.9	115.6	
	R	PL-22x300x378	SM490B	8	19.6	156.8	
	Q	PL-22x928x2239	SM490B	2	341.8	683.6	
	P	PL-22x578x864	SM490B	4	86.2	344.8	
	N	PL-22x928x1431	SM490B	2	223.2	446.4	
	M	PL-22x928x2239	SM490B	2	352.8	705.6	
	L	PL-22x928x1431	SM490B	2	229.3	458.6	
	K	PL-22x928x4500	SM490B	1		686.8	
	J	PL-22x864x978	SM490B	4	145.9	583.6	
	H	PL-22x239x928	SM490B	2	38.3	76.6	
	G	PL-22x928x978	SM490B	4	150.7	602.8	
	F	PL-22x431x928	SM490B	8	69.1	552.8	
	E	PL-22x928x978	SM490B	4	156.7	626.8	
	D	PL-36x2200x4867	SM490B	1		2956.0	
	C	PL-36x627x4164	SM490B	4	626.2	2504.8	
	B	PL-36x1334x2200	SM490B	2	794.1	1588.2	
	A	PL-100x2200x2200	SM490B	1		3799.4	
1	1	下部ブロック1				18094.7	

CONTER-RED	建築事業本部 技術部 免制震G
	大成建設株式会社　殿
APPROVED	田阪
CHECKED	久保　勝呂
DRAWN	
SCALE	1:20
	実大免震部材試験用治具
	部品下部ブロック1　その1
ORDER	2H10930
ITEM	
DRAWING NO.	SXA－0031
REV	△6

MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES BRIDGE&STEEL STRUCTURES ENGINEERING CO.,LTD.

DRAWING NO. SXA－0031



PLAN RECORD
H23. 8. 8 新 画 図
H23.10.21 試験体固定プレート形状変更
H23.11. 8 製 作 図
H23.11.24 ジャッキ取付穴変更
P.C.D 1250
P.C.D 1050
12-M36ネジ深50 下穴32, 深75
12-M30ネジ深42 下穴26.5, 深63
4-M48ネジ深75 下穴43, 深105 (アイボルト用)
R1400
2600
Fx
Fy
M48アイボルト
2-φ46
R1951.5
R2026.5
2x3-M16ネジ深27 下穴14, 深39 反対面から加工
A-A
S=1:10
B-B
S=1:10
P.C.D.100
P.C.D.190
41x12-33ネジ深 50深サグリ深32
穴部詳細
S=1:10
T.W 12592.7kg/set
14 アイボルトM48 SS400 4
A 1200x800x3000 SM490B 2 2061.7 4123.4
13 軸受モーメント固定金具 2 2061.7 4123.4
E M30x65 穴角穴付B (間隔すべり支承φ800取付用) SCM435 12
D M36x65 穴角穴付B (間隔ゴムH=400, 6取付用) SCM435 12
C M36x80 穴角穴付B (間隔ゴムH=434, 8取付用) SCM435 12
B M30x220 穴角穴付B SCM435 492
A 1220x2400x2600 SM490B 1 8469.3
12 試験体固定プレート 1 8469.3
MARK DESCRIPTION MATERIAL
DESIGNED 建築事業本部 技術部 免制振G
APPROVED
CHECKED
DRAWN
SCALE
ORDER
DRAWING NO. SNA-0048
REV
MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES BRIDGE&STEEL STRUCTURES ENGINEERING CO.,LTD.
DRAWN
ISSUED

2.5.7　参考資料　計測計画詳細

表 2.A7-1　計測チャンネル表（震動台収録システム：弾性すべり支承試験体）

ch	物理量	測点位置	測点名称	方向	センサー名		
1	速度	震動台	VTC-x	X	サーボ型速度計	VSE-15-G 200kine	図①
2	速度	震動台	VTC-y	Y	サーボ型速度計	VSE-15-G 200kine	
3	速度	震動台	VTC-z	Z	サーボ型速度計	VSE-15-G 200kine	
4	速度	震動台	VTN-z	Z	サーボ型速度計	VSE-15-G 200kine	
5	速度	震動台	VTW-z	Z	サーボ型速度計	VSE-15-G 200kine	
6	速度	下部ブロック	VBO-u	U	サーボ型速度計	VSE-15-G 200kine	
7	速度	下部ブロック	VBO-v	V	サーボ型速度計	VSE-15-G 200kine	
8	速度	下部ブロック	VBO-z	Z	サーボ型速度計	VSE-15-G 200kine	
9	速度	反力フレーム　主梁	VGO-u	U	サーボ型速度計	VSE-15-G 200kine	
10	速度	反力フレーム　主梁	VGO-v	V	サーボ型速度計	VSE-15-G 200kine	
11	速度	反力フレーム　主梁	VGO-z	Z	サーボ型速度計	VSE-15-G 200kine	
12	加速度	反力フレーム　主梁	AGO-u	U	歪型加速度計	AS-100HB 100G	図③
13	加速度	反力フレーム　主梁	AGO-v	V	歪型加速度計	AS-100HB 100G	
14	加速度	反力フレーム　主梁	AGO-z	Z	歪型加速度計	AS-100HB 100G	
15	加速度	反力フレーム　主梁	AG1-z	Z	歪型加速度計	AS-100HB 100G	
16	加速度	反力フレーム　主梁	AG2-z	Z	歪型加速度計	AS-100HB 100G	
17	加速度	反力フレーム　受梁	AG3-z	Z	歪型加速度計	AS-100HB 100G	
18	ひずみ	反力フレーム　主梁柱	SC1a-z	Z	歪ゲージ　単軸		図④
19	ひずみ	反力フレーム　主梁柱	SC1b-z	Z	歪ゲージ　単軸		
20	ひずみ	反力フレーム　主梁柱	SC2a-z	Z	歪ゲージ　単軸		
21	ひずみ	反力フレーム　主梁柱	SC2b-z	Z	歪ゲージ　単軸		
22	ひずみ	反力フレーム　受梁柱	SC3a-z	Z	歪ゲージ　単軸		
23	ひずみ	反力フレーム　受梁柱	SC3b-z	Z	歪ゲージ　単軸		
24	ひずみ	反力フレーム　主梁	SG1a-u	U	歪ゲージ　単軸		
25	ひずみ	反力フレーム　主梁	SG1b-u	U	歪ゲージ　単軸		
26	ひずみ	反力フレーム　主梁	SG1c-u	U	歪ゲージ　単軸		
27	ひずみ	反力フレーム　主梁	SG1d-u	U	歪ゲージ　単軸		
28	ひずみ	反力フレーム　主梁	SG2a-u	U	歪ゲージ　単軸		
29	ひずみ	反力フレーム　主梁	SG2b-u	U	歪ゲージ　単軸		
30	ひずみ	反力フレーム　主梁	SG2c-u	U	歪ゲージ　単軸		
31	ひずみ	反力フレーム　主梁	SG2d-u	U	歪ゲージ　単軸		
32	ひずみ	反力フレーム　受梁	SG3a-v	V	歪ゲージ　単軸		
33	ひずみ	反力フレーム　受梁	SG3b-v	V	歪ゲージ　単軸		
34	ひずみ	反力フレーム　受梁	SB3c-v	V	歪ゲージ　単軸		
35	ひずみ	反力フレーム　受梁	SG3d-v	V	歪ゲージ　単軸		
36	ひずみ	反力フレーム　主梁柱	RC1	1	歪ゲージ　ロゼット		
37	ひずみ	反力フレーム　主梁柱	RC1	2	歪ゲージ　ロゼット		
38	ひずみ	反力フレーム　主梁柱	RC1	3	歪ゲージ　ロゼット		
39	ひずみ	反力フレーム　主梁	RC2	1	歪ゲージ　ロゼット		
40	ひずみ	反力フレーム　主梁	RC2	2	歪ゲージ　ロゼット		
41	ひずみ	反力フレーム　主梁	RC2	3	歪ゲージ　ロゼット		
42	ひずみ	反力フレーム　主梁柱	RC3	1	歪ゲージ　ロゼット		
43	ひずみ	反力フレーム　主梁柱	RC3	2	歪ゲージ　ロゼット		
44	ひずみ	反力フレーム　主梁柱	RC3	3	歪ゲージ　ロゼット		
45	ひずみ	反力フレーム　主梁	RG1	1	歪ゲージ　ロゼット		
46	ひずみ	反力フレーム　主梁	RG1	2	歪ゲージ　ロゼット		
47	ひずみ	反力フレーム　主梁	RG1	3	歪ゲージ　ロゼット		
48	ひずみ	反力フレーム　受梁柱	RG2	1	歪ゲージ　ロゼット		
49	ひずみ	反力フレーム　受梁柱	RG2	2	歪ゲージ　ロゼット		
50	ひずみ	反力フレーム　受梁柱	RG2	3	歪ゲージ　ロゼット		
51	ひずみ	反力フレーム　受梁柱	RG3	1	歪ゲージ　ロゼット		
52	ひずみ	反力フレーム　受梁柱	RG3	2	歪ゲージ　ロゼット		
53	ひずみ	反力フレーム　受梁柱	RG3	3	歪ゲージ　ロゼット		

ch	物理量	測点位置	測点名称	方向	センサー名		
54	変位	反力フレーム　主梁	DGO-u	U	レーザー変位計	LK-500(±250mm)	図⑤
55	変位	反力フレーム　主梁	DGO-v	V	レーザー変位計	LK-500(±250mm)	
56	変位	反力フレーム　主梁	DG1W-z	Z	レーザー変位計	LK-500(±250mm)	
57	変位	反力フレーム　主梁	DG1E-z	Z	レーザー変位計	LK-500(±250mm)	
58	変位	反力フレーム　主梁	DG2W-z	Z	レーザー変位計	LK-500(±250mm)	
59	変位	反力フレーム　主梁	DG2E-z	Z	レーザー変位計	LK-500(±250mm)	
60	変位	柱ブロック	DB1a-u	U	レーザー変位計	LK-500(±250mm)	図⑥
61	変位	柱ブロック	DB1b-u	U	レーザー変位計	LK-500(±250mm)	
62	変位	柱ブロック	DB2a-u	U	レーザー変位計	LK-500(±250mm)	
63	変位	柱ブロック	DB2b-u	U	レーザー変位計	LK-500(±250mm)	
64	変位	柱ブロック	DB3-x	X	レーザー変位計	LK-500(±250mm)	
65	変位	柱ブロック	DB3-y	Y	レーザー変位計	LK-500(±250mm)	
66	変位	支承	D-u	U	回転角付変位計	DPR-600A(±625mm)	図⑧
67	角度	支承（仰角）	D-Ru	Ru	回転角付変位計	DPR-600A(±10°)	
68	角度	支承（方位角）	D-Rz	Rz	回転角付変位計	DPR-600A(±40°)	
69	変位	震動台		X			
70	変位	震動台		Y			
71	変位	震動台		Z			
72	変位	震動台		Rx			
73	変位	震動台		Ry			
74	変位	震動台		Rz			
75	速度	震動台		X			
76	速度	震動台		Y			
77	速度	震動台		Z			
78	速度	震動台		Rx			
79	速度	震動台		Ry			
80	速度	震動台		Rz			
81	加速度	震動台		X			
82	加速度	震動台		Y			
83	加速度	震動台		Z			
84	加速度	震動台		Rx			
85	加速度	震動台		Ry			
86	加速度	震動台		Rz			
87	変位	震動台　入力		X			
88	変位	震動台　入力		Y			
89	変位	震動台　入力		Z			
90	変位	震動台　入力		Rx			
91	変位	震動台　入力		Ry			
92	変位	震動台　入力		Rz			

表 2.A7-2　計測チャンネル表（荷重計測システム：弾性すべり支承試験体）

ch	物理量	測点位置	測点名称	方向	センサー名		
1	荷重	支承下部　1	L1-z	Z	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	図⑨
2	荷重	支承下部　2	L2-z	Z	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
3	荷重	支承下部　3	L3-z	Z	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
4	荷重	支承下部　4	L4-z	Z	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
5	荷重	支承下部　5	L5-z	Z	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
6	荷重	支承下部　6	L6-z	Z	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
7	荷重	支承下部　7	L7-z	Z	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
8	荷重	支承下部　8	L8-z	Z	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
9	荷重	支承下部　9	L9-z	Z	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
10	荷重	支承下部　10	L10-z	Z	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
11	荷重	支承下部　11	L11-z	Z	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
12	荷重	支承下部　12	L12-z	Z	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
13	荷重	支承下部　13	L13-z	Z	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
14	荷重	支承下部　14	L14-z	Z	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
15	荷重	支承下部　15	L15-z	Z	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
16	荷重	支承下部　16	L16-z	Z	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
17	荷重	支承下部　17	L17-z	Z	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
18	荷重	支承下部　18	L18-z	Z	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
19	荷重	支承下部　19	L19-z	Z	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
20	荷重	支承下部　20	L20-z	Z	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
21	荷重	支承下部　21	L21-z	Z	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
22	荷重	支承下部　22	L22-z	Z	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
23	荷重	支承下部　23	L23-z	Z	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
24	荷重	支承下部　24	L24-z	Z	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
25	荷重	支承下部　25	L25-z	Z	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
26	荷重	支承下部　26	L26-z	Z	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
27	荷重	支承下部　27	L27-z	Z	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
28	荷重	支承下部　28	L28-z	Z	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
29	荷重	支承下部　29	L29-z	Z	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
30	荷重	支承下部　30	L30-z	Z	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
31	荷重	支承下部　31	L31-z	Z	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
32	荷重	支承下部　1	L1-u	U	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
33	荷重	支承下部　2	L2-u	U	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
34	荷重	支承下部　3	L3-u	U	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
35	荷重	支承下部　4	L4-u	U	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
36	荷重	支承下部　5	L5-u	U	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
37	荷重	支承下部　6	L6-u	U	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
38	荷重	支承下部　7	L7-u	U	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
39	荷重	支承下部　8	L8-u	U	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
40	荷重	支承下部　9	L9-u	U	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
41	荷重	支承下部　10	L10-u	U	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
42	荷重	支承下部　11	L11-u	U	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
43	荷重	支承下部　12	L12-u	U	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
44	荷重	支承下部　13	L13-u	U	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
45	荷重	支承下部　14	L14-u	U	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
46	荷重	支承下部　15	L15-u	U	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
47	荷重	支承下部　16	L16-u	U	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
48	荷重	支承下部　17	L17-u	U	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
49	荷重	支承下部　18	L18-u	U	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
50	荷重	支承下部　19	L19-u	U	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
51	荷重	支承下部　20	L20-u	U	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
52	荷重	支承下部　21	L21-u	U	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
53	荷重	支承下部　22	L22-u	U	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
54	荷重	支承下部　23	L23-u	U	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
55	荷重	支承下部　24	L24-u	U	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
56	荷重	支承下部　25	L25-u	U	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
57	荷重	支承下部　26	L26-u	U	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
58	荷重	支承下部　27	L27-u	U	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
59	荷重	支承下部　28	L28-u	U	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
60	荷重	支承下部　29	L29-u	U	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
61	荷重	支承下部　30	L30-u	U	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
62	荷重	支承下部　31	L31-u	U	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	

ch	物理量	測点位置	測点名称	方向	センサー名		
63	荷重	支承下部　1	L1-v	V	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	図⑨
64	荷重	支承下部　2	L2-v	V	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
65	荷重	支承下部　3	L3-v	V	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
66	荷重	支承下部　4	L4-v	V	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
67	荷重	支承下部　5	L5-v	V	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
68	荷重	支承下部　6	L6-v	V	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
69	荷重	支承下部　7	L7-v	V	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
70	荷重	支承下部　8	L8-v	V	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
71	荷重	支承下部　9	L9-v	V	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
72	荷重	支承下部　10	L10-v	V	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
73	荷重	支承下部　11	L11-v	V	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
74	荷重	支承下部　12	L12-v	V	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
75	荷重	支承下部　13	L13-v	V	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
76	荷重	支承下部　14	L14-v	V	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
77	荷重	支承下部　15	L15-v	V	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
78	荷重	支承下部　16	L16-v	V	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
79	荷重	支承下部　17	L17-v	V	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
80	荷重	支承下部　18	L18-v	V	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
81	荷重	支承下部　19	L19-v	V	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
82	荷重	支承下部　20	L20-v	V	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
83	荷重	支承下部　21	L21-v	V	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
84	荷重	支承下部　22	L22-v	V	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
85	荷重	支承下部　23	L23-v	V	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
86	荷重	支承下部　24	L24-v	V	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
87	荷重	支承下部　25	L25-v	V	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
88	荷重	支承下部　26	L26-v	V	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
89	荷重	支承下部　27	L27-v	V	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
90	荷重	支承下部　28	L28-v	V	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
91	荷重	支承下部　29	L29-v	V	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
92	荷重	支承下部　30	L30-v	V	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
93	荷重	支承下部　31	L31-v	V	3分力ロードセル	LSM-700kN SA85	
94	傾斜角	震動台	HG-Ru	Ru	傾斜計	NG2U　±10°	図②
95	傾斜角	反力フレーム　主梁	HT-Ru	Ru	傾斜計	NG2U　±10°	
96	変位	反力フレーム　主梁	DG0-u	U	レーザー変位計	LK-500(±250mm)	図⑤
97	変位	反力フレーム　主梁	DG0-v	V	レーザー変位計	LK-500(±250mm)	
98	変位	反力フレーム　主梁	DG1W-z	Z	レーザー変位計	LK-500(±250mm)	
99	変位	反力フレーム　主梁	DG1E-z	Z	レーザー変位計	LK-500(±250mm)	
100	変位	反力フレーム　主梁	DG2W-z	Z	レーザー変位計	LK-500(±250mm)	
101	変位	反力フレーム　主梁	DG2E-z	Z	レーザー変位計	LK-500(±250mm)	
102	変位	柱ブロック	DB1a-u	U	レーザー変位計	LK-500(±250mm)	図⑥
103	変位	柱ブロック	DB2a-u	V	レーザー変位計	LK-500(±250mm)	
104	変位	支承	D-u	U	回転角付変位計	DPR-600A(±625mm)	図⑧
105	角度	支承（仰角）	D-Ru	Ru	回転角付変位計	DPR-600A(±10°)	
106	角度	支承（方位角）	D-Rz	Rz	回転角付変位計	DPR-600A(±40°)	
107	変位	支承	D1W-z	Z	渦電流式変位計		図⑧
108	変位	支承	D1E-z	Z	渦電流式変位計		
109	変位	支承	D2W-z	Z	渦電流式変位計		
110	変位	支承	D2E-z	Z	渦電流式変位計		
111	変位	支承	DP-u	U	ポテンショメータ式変位計	DTP-D-300	図⑧
112	－	－			－		
113	変位	震動台		X			
114	変位	震動台		Y			
115	変位	震動台		Z			
116	変位	震動台		Rx			
117	変位	震動台		Ry			
118	変位	震動台		Rz			
119	速度	震動台		X			
120	速度	震動台		Y			
121	速度	震動台		Z			

表 2.A7-3　計測チャンネル表（温度計測システム：弾性すべり支承試験体）

ch	物理量	測点位置置	測点名称	方向	センサー名		
1	変位	支承	D-u	U	回転角付変位計	DPR-600A(±625mm)	図⑧
2	角度	支承（仰角）	D-Ru	Ru	回転角付変位計	DPR-600A(±10°)	
3	角度	支承（方位角）	D-Rz	Rz	回転角付変位計	DPR-600A(±40°)	
4	温度	バック鋼板	E1	－	放射温度計	FT-H50	
5	温度	バック鋼板	E2	－	放射温度計	FT-H50	
6	変位	震動台		X			
7	変位	震動台		Y			
8	変位	震動台		Z			
9	温度	震動台上　気温	O1	－	K型熱電対		図⑧
10	温度	周囲　気温	O2	－	K型熱電対		
11	温度	すべり板	A1	－	K型熱電対		
12	温度	すべり板	A2	－	K型熱電対		
13	温度	すべり板	A3	－	K型熱電対		
14	温度	すべり板	A4	－	K型熱電対		
15	温度	すべり板	A5	－	K型熱電対		
16	温度	すべり板	A6	－	K型熱電対		
17	温度	すべり板	A7	－	K型熱電対		
18	温度	すべり板	A8	－	K型熱電対		
19	温度	すべり板	A9	－	K型熱電対		
20	温度	すべり板	A10	－	K型熱電対		
21	温度	すべり板	A11	－	K型熱電対		
22	温度	すべり板	A12	－	K型熱電対		
23	温度	すべり板	A13	－	K型熱電対		
24	温度	バック鋼板	B1	－	K型熱電対		
25	温度	バック鋼板	B2	－	K型熱電対		
26	温度	バック鋼板	B3	－	K型熱電対		
27	温度	フランジ	C1	－	K型熱電対		

表 2.A7-4　計測チャンネル表（震動台収録システム：オイルダンパー試験体）

ch	物理量	測点位置	測点名称	方向	センサー名		
1	速度	震動台	VTC-x	X	サーボ型速度計	VSE-15-G 200kine	図①
2	速度	震動台	VTC-y	Y	サーボ型速度計	VSE-15-G 200kine	
3	速度	震動台	VTC-z	Z	サーボ型速度計	VSE-15-G 200kine	
4	速度	震動台	VTN-z	Z	サーボ型速度計	VSE-15-G 200kine	
5	速度	震動台	VTW-z	Z	サーボ型速度計	VSE-15-G 200kine	
6	速度	下部ブロック	VBO-u	U	サーボ型速度計	VSE-15-G 200kine	
7	速度	下部ブロック	VBO-v	V	サーボ型速度計	VSE-15-G 200kine	
8	速度	下部ブロック	VBO-z	Z	サーボ型速度計	VSE-15-G 200kine	
9	速度	反力フレーム　主梁	VGO-u	U	サーボ型速度計	VSE-15-G 200kine	
10	速度	反力フレーム　主梁	VGO-v	V	サーボ型速度計	VSE-15-G 200kine	
11	速度	反力フレーム　主梁	VGO-z	Z	サーボ型速度計	VSE-15-G 200kine	
12	加速度	反力フレーム　主梁	AGO-u	U	歪型加速度計	AS-100HB 100G	図③
13	加速度	反力フレーム　主梁	AGO-v	V	歪型加速度計	AS-100HB 100G	
14	加速度	反力フレーム　主梁	AGO-z	Z	歪型加速度計	AS-100HB 100G	
15	加速度	反力フレーム　主梁	AG1-z	Z	歪型加速度計	AS-100HB 100G	
16	加速度	反力フレーム　主梁	AG2-z	Z	歪型加速度計	AS-100HB 100G	
17	加速度	反力フレーム　受梁	AG3-z	Z	歪型加速度計	AS-100HB 100G	
18	ひずみ	反力フレーム　主梁柱	SC1a-z	Z	歪ゲージ　単軸		図④
19	ひずみ	反力フレーム　主梁柱	SC1b-z	Z	歪ゲージ　単軸		
20	ひずみ	反力フレーム　主梁柱	SC2a-z	Z	歪ゲージ　単軸		
21	ひずみ	反力フレーム　主梁柱	SC2b-z	Z	歪ゲージ　単軸		
22	ひずみ	反力フレーム　受梁柱	SC3a-z	Z	歪ゲージ　単軸		
23	ひずみ	反力フレーム　受梁柱	SC3b-z	Z	歪ゲージ　単軸		
24	ひずみ	反力フレーム　主梁	SG1a-u	U	歪ゲージ　単軸		
25	ひずみ	反力フレーム　主梁	SG1b-u	U	歪ゲージ　単軸		
26	ひずみ	反力フレーム　主梁	SG1c-u	U	歪ゲージ　単軸		
27	ひずみ	反力フレーム　主梁	SG1d-u	U	歪ゲージ　単軸		
28	ひずみ	反力フレーム　主梁	SG2a-u	U	歪ゲージ　単軸		
29	ひずみ	反力フレーム　主梁	SG2b-u	U	歪ゲージ　単軸		
30	ひずみ	反力フレーム　主梁	SG2c-u	U	歪ゲージ　単軸		
31	ひずみ	反力フレーム　主梁	SG2d-u	U	歪ゲージ　単軸		
32	ひずみ	反力フレーム　受梁	SG3a-v	V	歪ゲージ　単軸		
33	ひずみ	反力フレーム　受梁	SG3b-v	V	歪ゲージ　単軸		
34	ひずみ	反力フレーム　受梁	SB3c-v	V	歪ゲージ　単軸		
35	ひずみ	反力フレーム　受梁	SG3d-v	V	歪ゲージ　単軸		
36	ひずみ	反力フレーム　主梁柱	RC1	1	歪ゲージ　ロゼット		
37	ひずみ	反力フレーム　主梁柱	RC1	2	歪ゲージ　ロゼット		
38	ひずみ	反力フレーム　主梁柱	RC1	3	歪ゲージ　ロゼット		
39	ひずみ	反力フレーム　主梁	RC2	1	歪ゲージ　ロゼット		
40	ひずみ	反力フレーム　主梁	RC2	2	歪ゲージ　ロゼット		
41	ひずみ	反力フレーム　主梁	RC2	3	歪ゲージ　ロゼット		
42	ひずみ	反力フレーム　主梁柱	RC3	1	歪ゲージ　ロゼット		
43	ひずみ	反力フレーム　主梁柱	RC3	2	歪ゲージ　ロゼット		
44	ひずみ	反力フレーム　主梁柱	RC3	3	歪ゲージ　ロゼット		
45	ひずみ	反力フレーム　主梁	RG1	1	歪ゲージ　ロゼット		
46	ひずみ	反力フレーム　主梁	RG1	2	歪ゲージ　ロゼット		
47	ひずみ	反力フレーム　主梁	RG1	3	歪ゲージ　ロゼット		
48	ひずみ	反力フレーム　受梁柱	RG2	1	歪ゲージ　ロゼット		
49	ひずみ	反力フレーム　受梁柱	RG2	2	歪ゲージ　ロゼット		
50	ひずみ	反力フレーム　受梁柱	RG2	3	歪ゲージ　ロゼット		
51	ひずみ	反力フレーム　受梁柱	RG3	1	歪ゲージ　ロゼット		
52	ひずみ	反力フレーム　受梁柱	RG3	2	歪ゲージ　ロゼット		
53	ひずみ	反力フレーム　受梁柱	RG3	3	歪ゲージ　ロゼット		

ch	物理量	測点位置	測点名称	方向	センサー名		
54	変位	反力フレーム　主梁	DGO-u	U	レーザー変位計	LK-500(±250mm)	図⑤
55	変位	反力フレーム　主梁	DGO-v	V	レーザー変位計	LK-500(±250mm)	
56	変位	反力フレーム　主梁	DG1W-z	Z	レーザー変位計	LK-500(±250mm)	
57	変位	反力フレーム　主梁	DG1E-z	Z	レーザー変位計	LK-500(±250mm)	
58	変位	反力フレーム　主梁	DG2W-z	Z	レーザー変位計	LK-500(±250mm)	
59	変位	反力フレーム　主梁	DG2E-z	Z	レーザー変位計	LK-500(±250mm)	
60	変位	柱ブロック	DB1a-u	U	レーザー変位計	LK-500(±250mm)	図⑥
61	変位	柱ブロック	DB1b-u	U	レーザー変位計	LK-500(±250mm)	
62	変位	柱ブロック	DB2a-u	U	レーザー変位計	LK-500(±250mm)	
63	変位	柱ブロック	DB2b-u	U	レーザー変位計	LK-500(±250mm)	
64	変位	柱ブロック	DB3-x	X	レーザー変位計	LK-500(±250mm)	
65	変位	柱ブロック	DB3-y	Y	レーザー変位計	LK-500(±250mm)	
66	変位	オイルダンパー	D-v	V	回転角付変位計	DPR-600A(±625mm)	図⑦
67	角度	支承（仰角）	D-Rv	Rv	回転角付変位計	DPR-600A(±10°)	
68	角度	支承（方位角）	D-Rz	Rz	回転角付変位計	DPR-600A(±40°)	
69	変位	震動台		X			
70	変位	震動台		Y			
71	変位	震動台		Z			
72	変位	震動台		Rx			
73	変位	震動台		Ry			
74	変位	震動台		Rz			
75	速度	震動台		X			
76	速度	震動台		Y			
77	速度	震動台		Z			
78	速度	震動台		Rx			
79	速度	震動台		Ry			
80	速度	震動台		Rz			
81	加速度	震動台		X			
82	加速度	震動台		Y			
83	加速度	震動台		Z			
84	加速度	震動台		Rx			
85	加速度	震動台		Ry			
86	加速度	震動台		Rz			
87	変位	震動台　入力		X			
88	変位	震動台　入力		Y			
89	変位	震動台　入力		Z			
90	変位	震動台　入力		Rx			
91	変位	震動台　入力		Ry			
92	変位	震動台　入力		Rz			

表 2.A7-5　計測チャンネル表（荷重・温度計測システム：オイルダンパー試験体）

荷重計測システム

ch	物理量	測点位置	測点名称	方向	センサー名	
94	傾斜角	震動台	HG	Ru	傾斜計	NG2U　±10°
95	傾斜角	反力フレーム　主梁	HT	Ru	傾斜計	NG2U　±10°
96	変位	反力フレーム　主梁	DGO-u	U	レーザー変位計	LK-500(±250mm)
97	変位	反力フレーム　主梁	DGO-v	V	レーザー変位計	LK-500(±250mm)
98	変位	反力フレーム　主梁	DG1W-z	Z	レーザー変位計	LK-500(±250mm)
99	変位	反力フレーム　主梁	DG1E-z	Z	レーザー変位計	LK-500(±250mm)
100	変位	反力フレーム　主梁	DG2W-z	Z	レーザー変位計	LK-500(±250mm)
101	変位	反力フレーム　主梁	DG2E-z	Z	レーザー変位計	LK-500(±250mm)
102	変位	柱ブロック	DB1a-u	U	レーザー変位計	LK-500(±250mm)
103	変位	柱ブロック	DB2a-u	V	レーザー変位計	LK-500(±250mm)
104	変位	オイルダンパー	D-v	V	回転角付変位計	DPR-600A(±625mm)
105	角度	支承（仰角）	D-Rv	Rv	回転角付変位計	DPR-600A(±10°)
106	角度	支承（方位角）	D-Rz	Rz	回転角付変位計	DPR-600A(±40°)
107	－	－			－	
108	－	－			－	
109	－	－			－	
110	－	－			－	
111	－	－			－	
112	荷重	オイルダンパー	LO-u	U	ロードセル	TCLP-2MNB 2000kN
113	変位	震動台		X		
114	変位	震動台		Y		
115	変位	震動台		Z		
116	変位	震動台		Rx		
117	変位	震動台		Ry		
118	変位	震動台		Rz		
119	速度	震動台		X		
120	速度	震動台		Y		
121	速度	震動台		Z		

温度計測システム

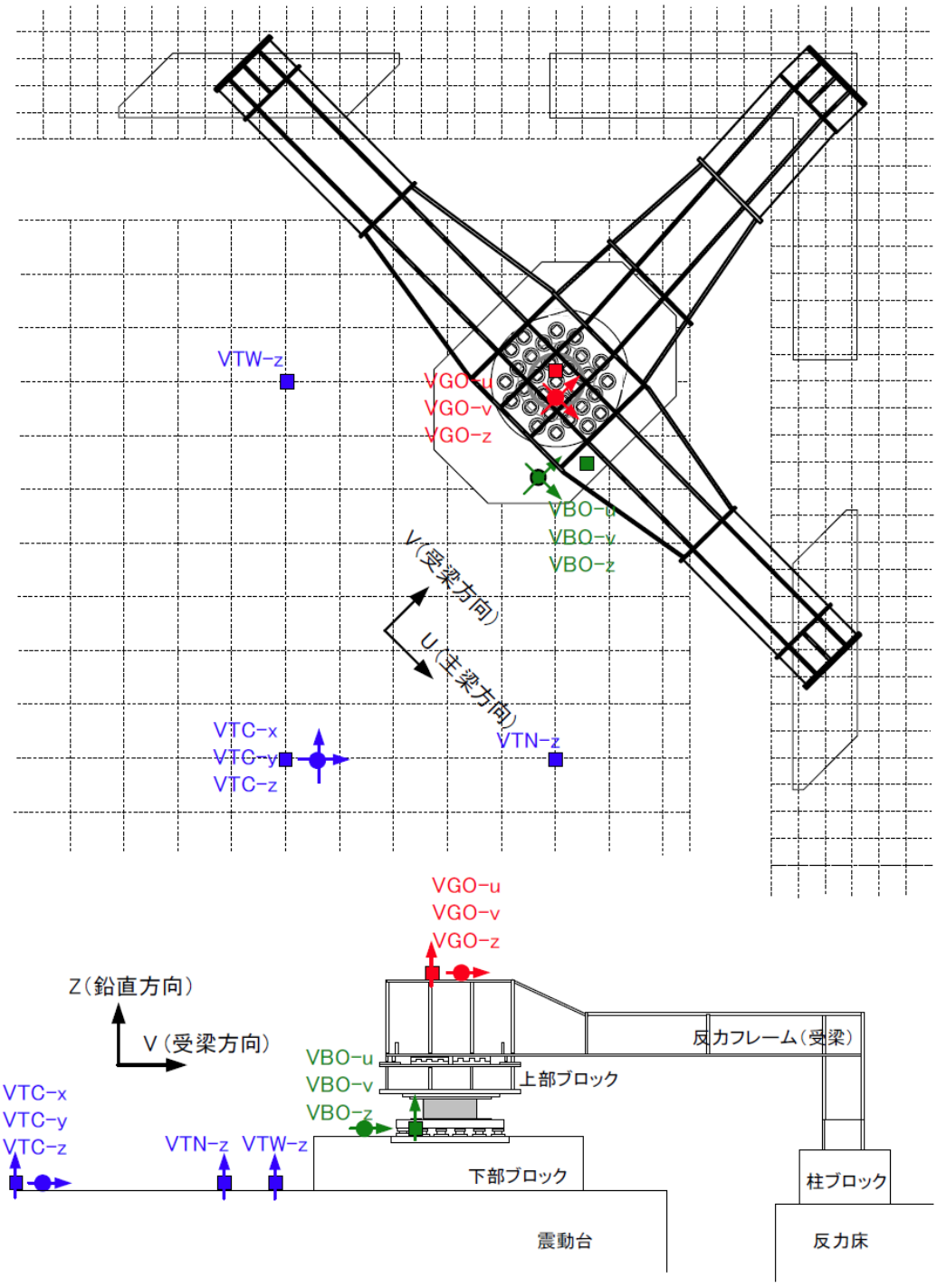
ch	物理量	測点位置	測点名称	方向	センサー名		
1	変位	オイルダンパー	D-v	V	回転角付変位計	DPR-600A(±625mm)	図⑦
2	角度	支承（仰角）	D-Rv	Rv	回転角付変位計	DPR-600A(±10°)	
3	角度	支承（方位角）	D-Rz	Rz	回転角付変位計	DPR-600A(±40°)	
4	－	－			－	－	
5	－	－			－	－	
6	変位	震動台		X			
7	変位	震動台		Y			
8	変位	震動台		Z			
9	温度	震動台上　気温	01	－	K型熱電対		図⑦
10	温度	周囲　気温	02	－	K型熱電対		
11	温度	タンク内油温度	T1	－	K型熱電対		
12	温度	ベースシェル端部表面	T2	－	K型熱電対		
13	温度	ベースシェル表面	T3	－	K型熱電対		
14	温度	ベースシェル表面	T4	－	K型熱電対		
15	温度	ロッド端部表面	T5	－	K型熱電対		

① 震動台・反力フレーム速度計

サーボ型速度計：VSE15G 200kine

水平×6　鉛直×5

震動台：水平2成分，鉛直3成分
下部ブロック：水平2成分，鉛直1成分
主梁：水平2成分，鉛直1成分



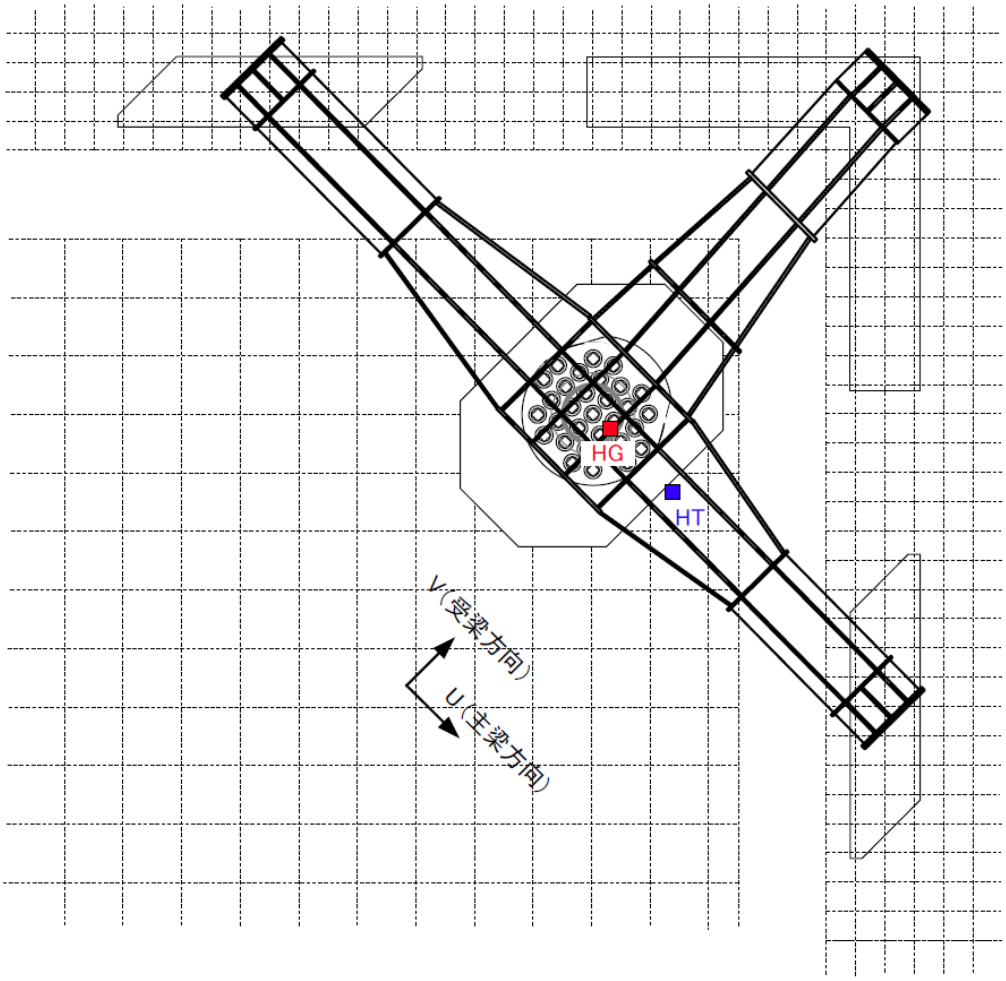
測定点図①（震動台・反力フレーム速度）

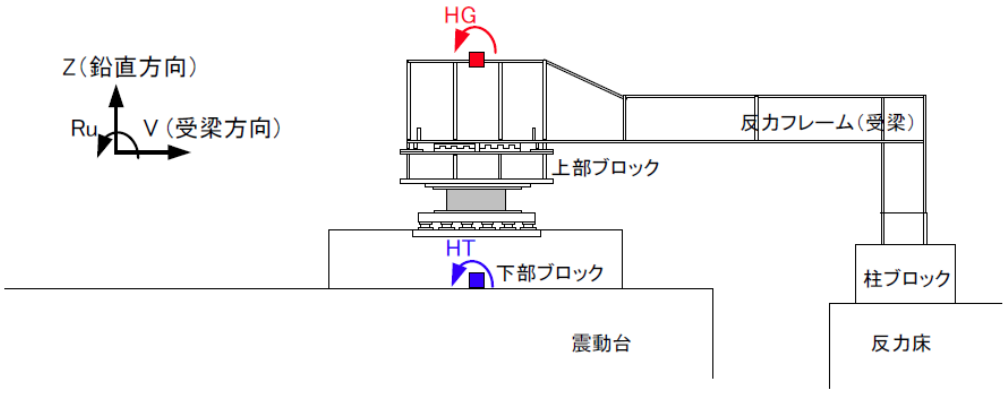
② 震動台・反力フレーム傾斜計

静電容量型傾斜計：NG2U ±10°

■ U軸廻り傾斜角 ×2

震動台：U軸廻り傾斜 1成分
主梁：U軸廻り傾斜 1成分

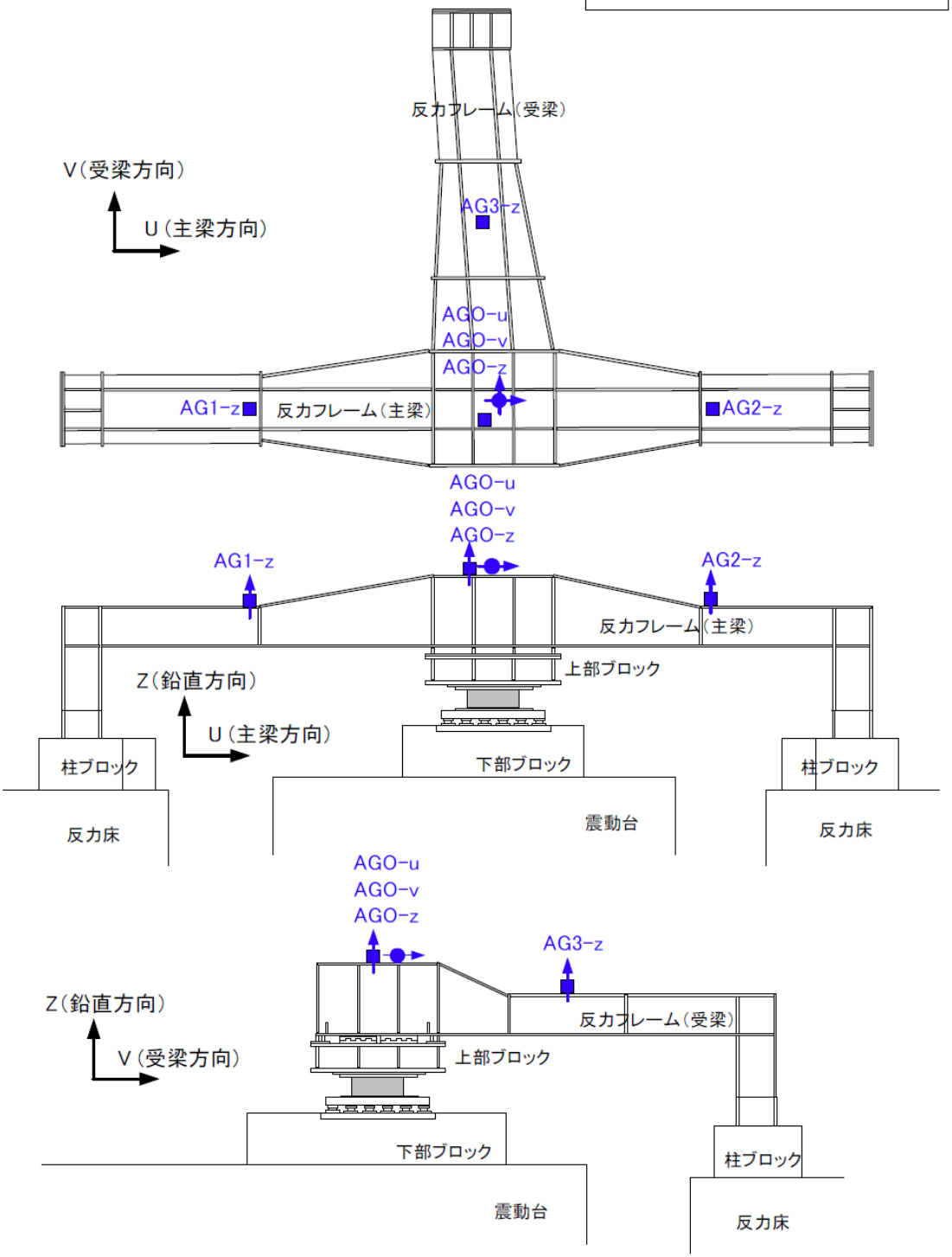




測定点図②（震動台・反力フレーム傾斜）

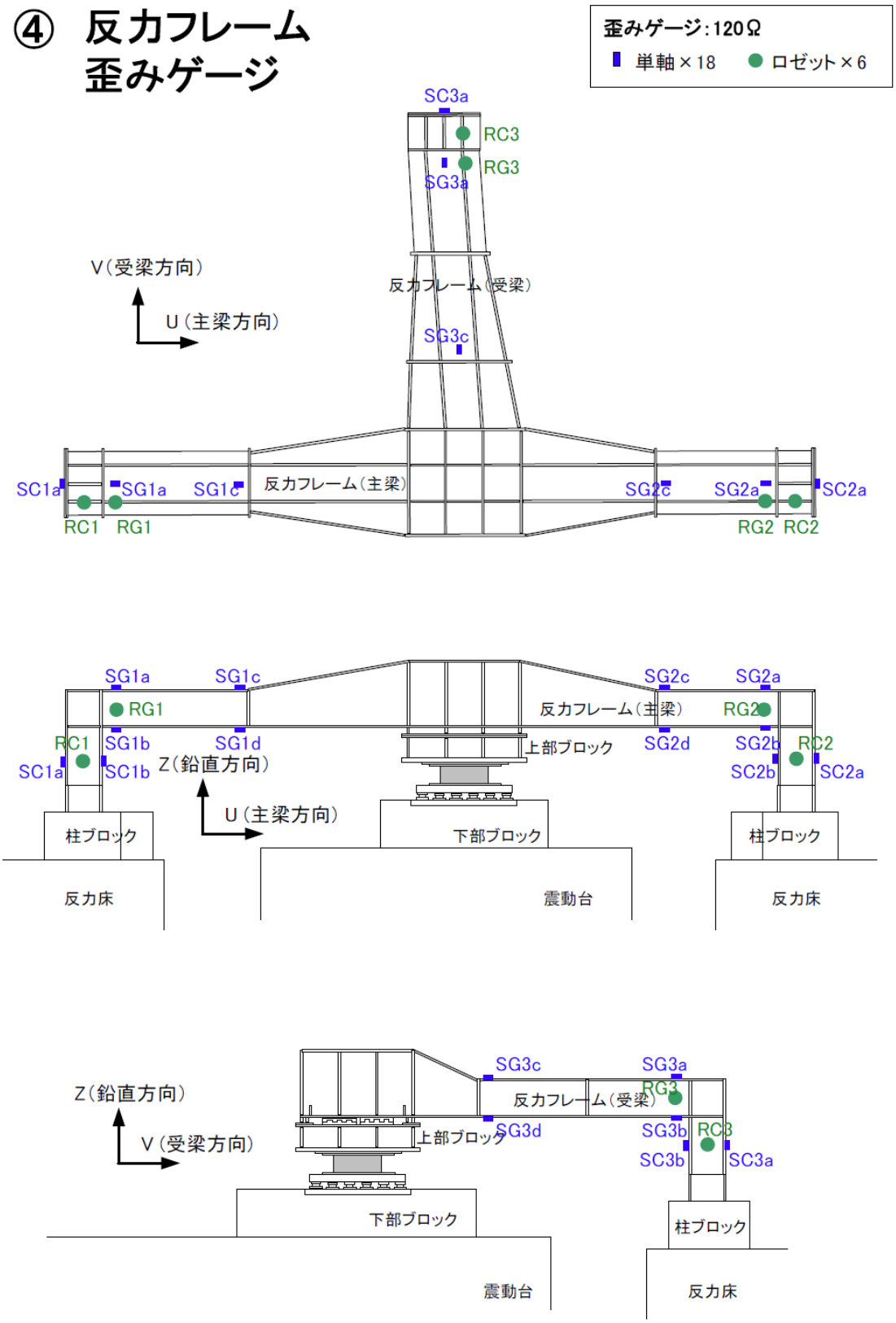
③ 反力フレーム 加速度計

歪型加速度:AS100GHB　100G
水平×2　　鉛直×4
主梁:水平2成分，鉛直3成分
受梁:鉛直1成分



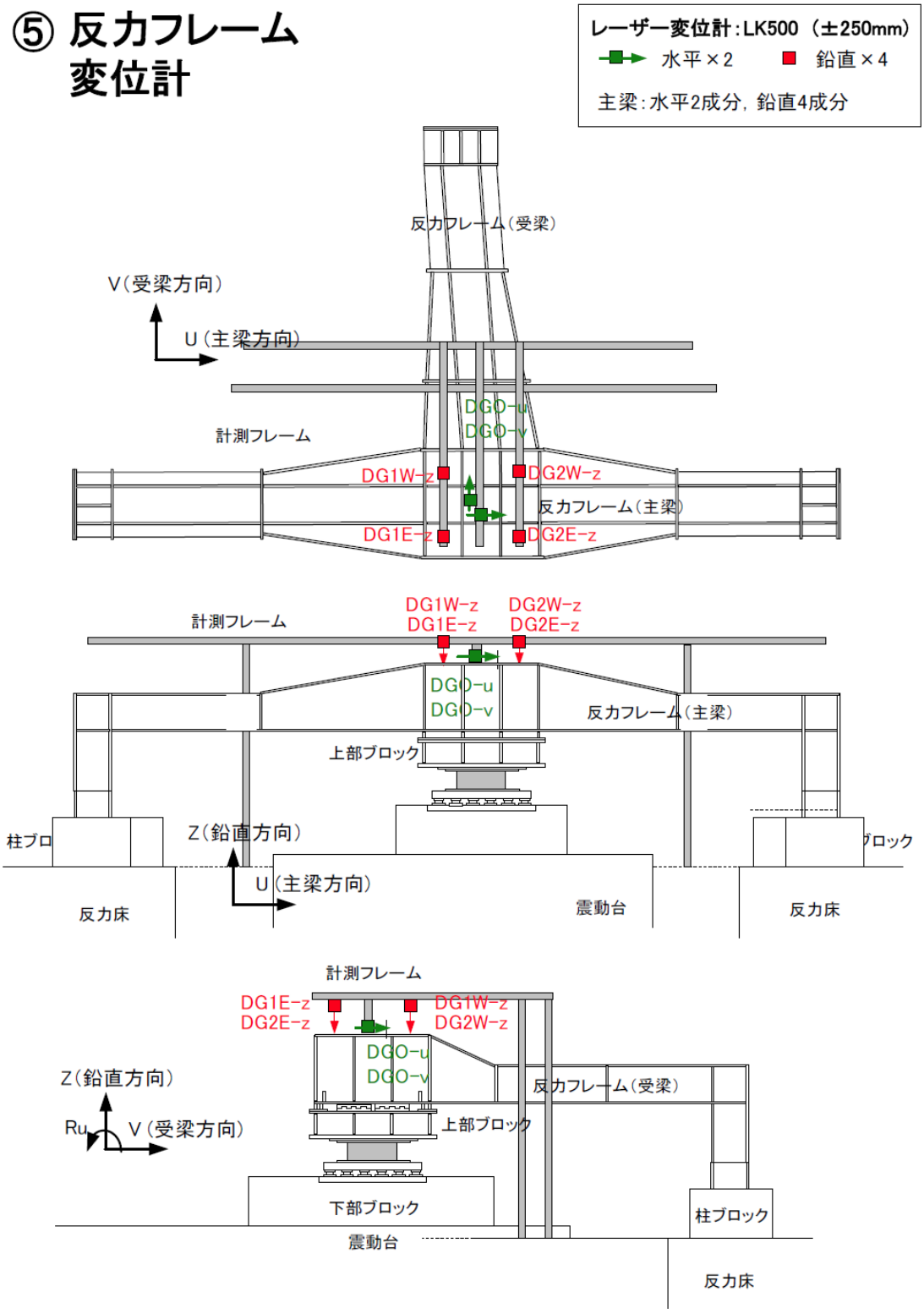
測定点図③（反力フレーム加速度）

④ 反力フレーム 歪みゲージ



測定点図④（反力フレーム歪みゲージ）

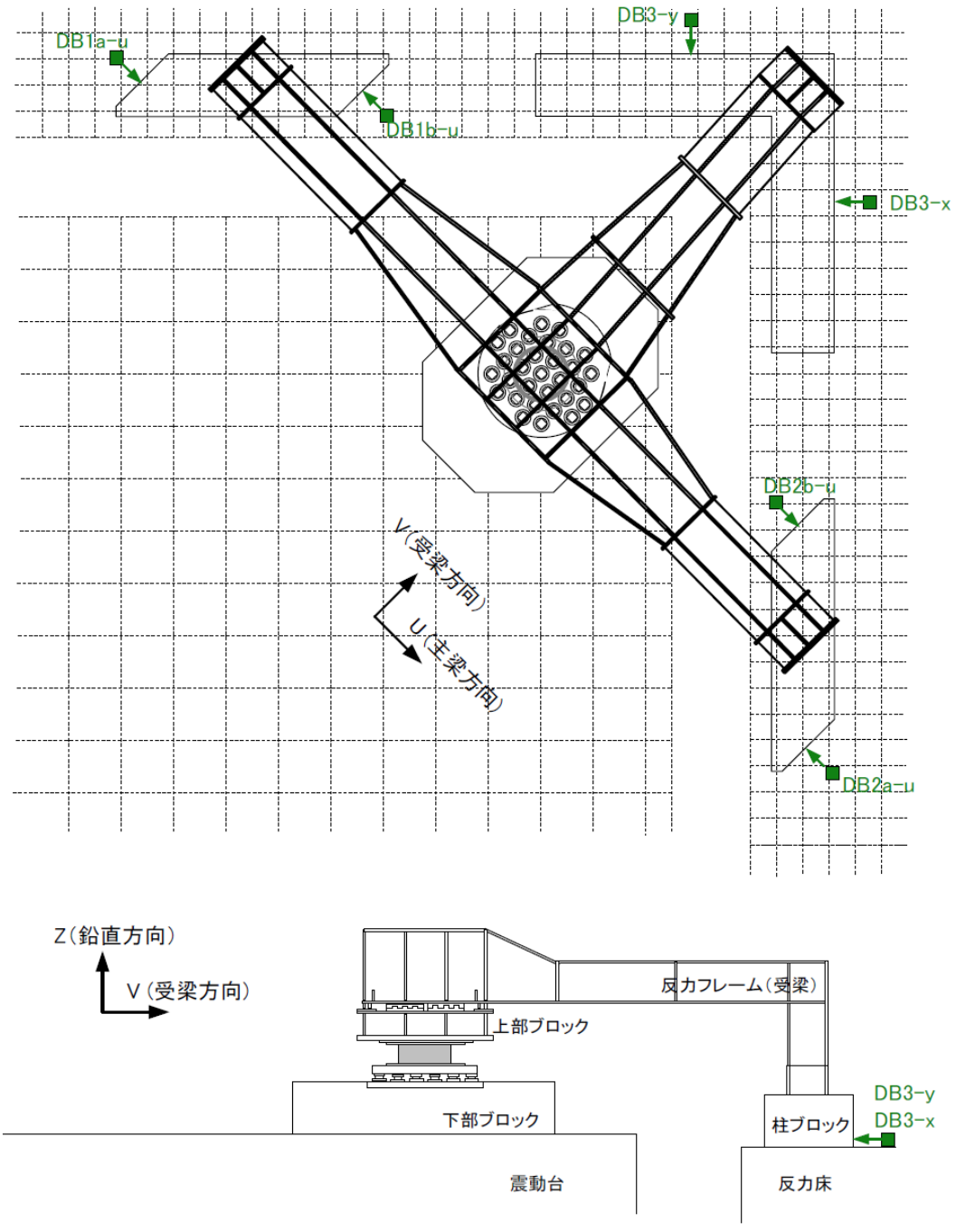
⑤ 反力フレーム変位計



測定点図⑤（反力フレーム変位）

⑥ 反力フレーム柱ブロック変位計

レーザー変位計：LK500（±250mm）
水平×6
柱ブロック：水平6成分



測定点図⑥（反力フレーム柱ブロック変位）

⑦ オイルダンパー
温度・変位・荷重計測

温度計測

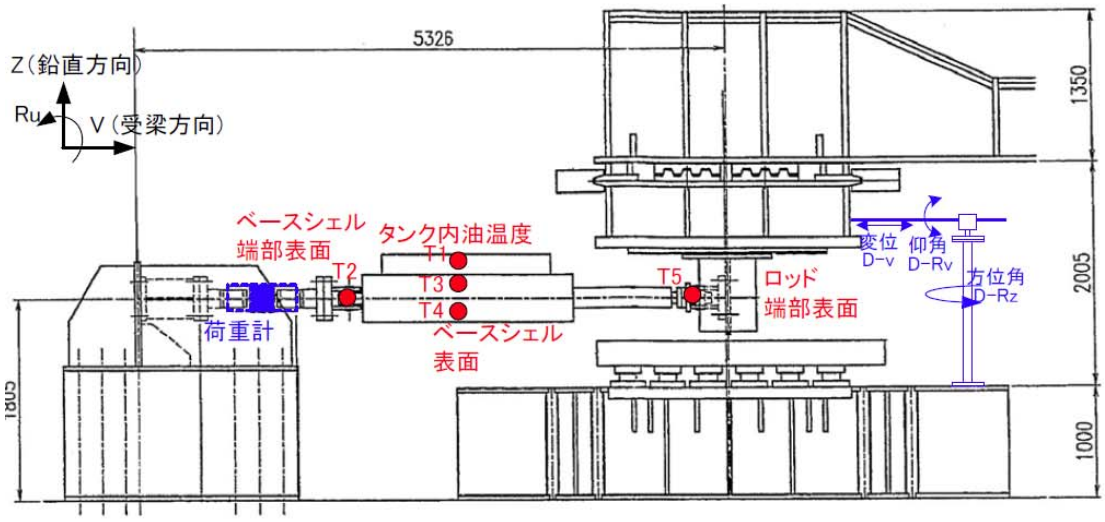
● K型熱電対　5箇所

荷重計測

▭ 引張圧縮型荷重計　1台　TCLP-2MNB　2000kN

変位計測

回転角式変位計　1台　DPR-600A
変位　±625mm，仰角　±10°，方位角　±40°
・変位・仰角・方位角　各1成分



測定点図⑦（オイルダンパー温度・変位・荷重）

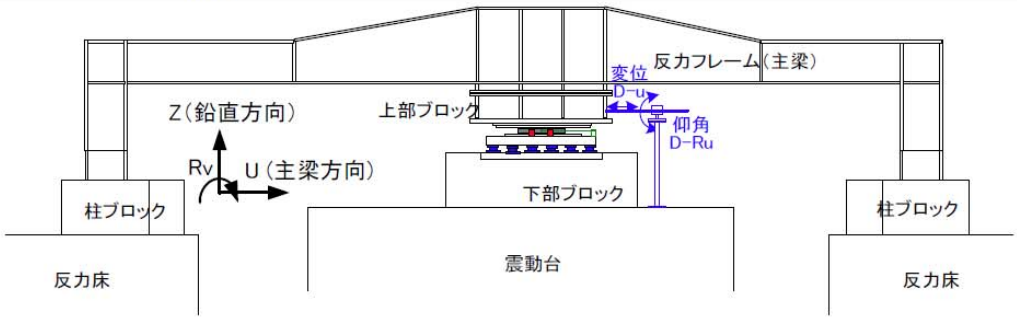
⑧ すべり支承
温度・変位・荷重計測

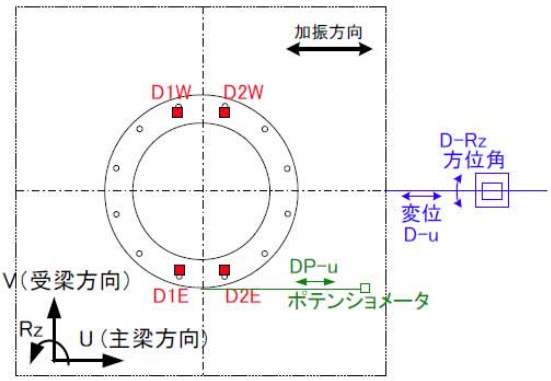
変位計測

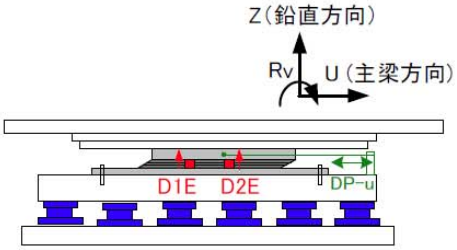
- 渦電流式変位計　±2mm
  鉛直 × 4（4成分）
- 回転角式変位計　1台　DPR-600A
  変位　±625mm，仰角　±10°，方位角　±40°
  ・変位・仰角・方位角　各1成分
- ポテンショメータ式変位計　1台　±150mm
  水平変位（1成分）

荷重計測

3分力センサ：LSM-B-700KNSA85
水平 400kN，鉛直700kN ×31台

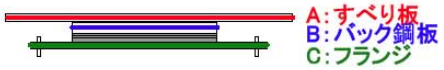


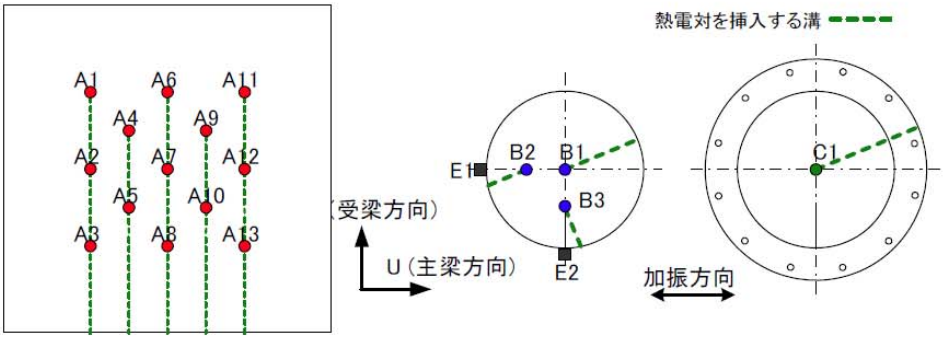




温度計測

- K型熱電対　17箇所
- 放射温度計　FT-H50　2箇所





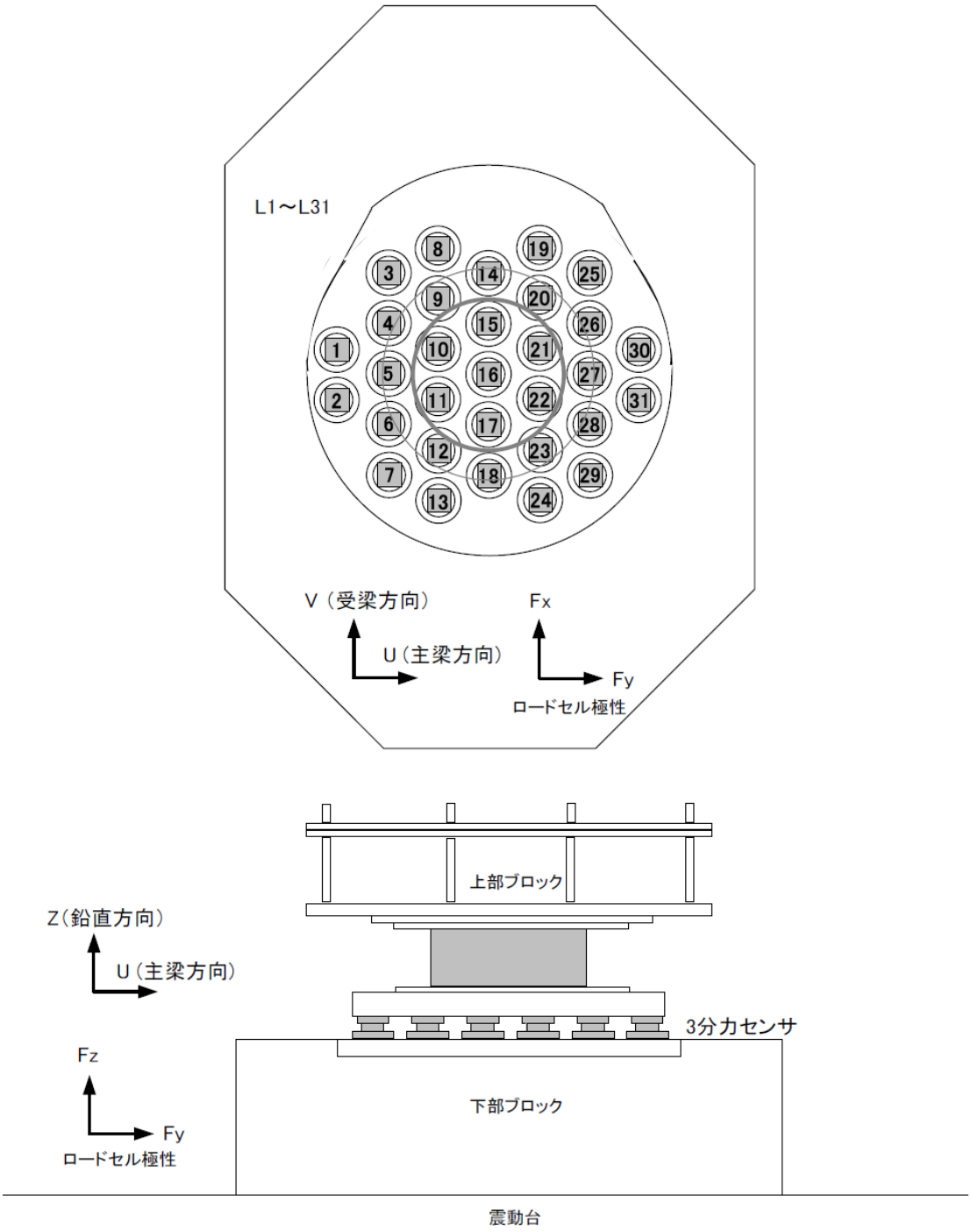
A:すべり板（13箇所）　B:　バック鋼板（3箇所＋2箇所）　C:　フランジ（1箇所）

測定点図⑧（オイルダンパー温度・変位・荷重）

⑨ 試験体
3分力荷重計

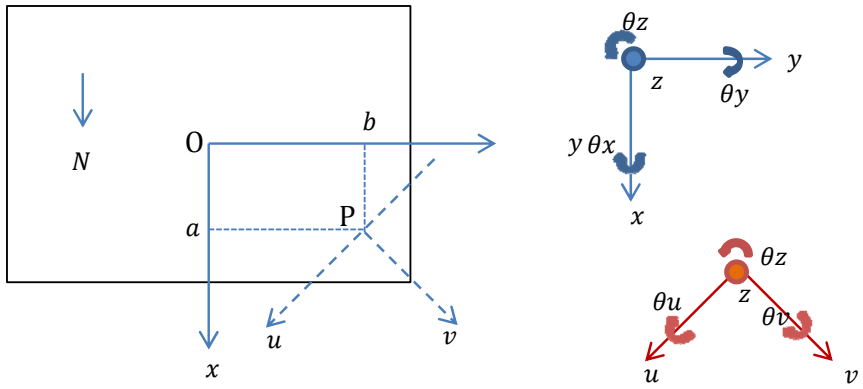
3分力センサ：LSM-B-700KNSA85
水平 400kN，鉛直700kN ×31

水平U方向 31成分
水平V方向 31成分
鉛直Z方向 31成分



測定点図⑨（オイルダンパー温度・変位・荷重）

2.5.8　参考資料 座標変換の基礎式



座標系を以下のように定義する。

震動台中央（O 点）水平面内：$(x_0, y_0, z_0, \theta x_0, \theta y_0, \theta z_0)$
支承位置（P 点）水平面内　：$(u_P, v_P, z_P, \theta u_P, \theta v_P, \theta z_P)$
支承位置（P 点）震動台面内：$(U_P, V_P, Z_P, \theta u_P, \theta v_P, \theta z_P)$

$$\begin{pmatrix} x_P \\ y_P \\ z_P \\ \theta x_P \\ \theta y_P \\ \theta z_P \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & & & & & -b \\ & 1 & & & & a \\ & & 1 & b & -a & \\ & & & 1 & & \\ & & & & 1 & \\ & & & & & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ \theta x_0 \\ \theta y_0 \\ \theta z_0 \end{pmatrix} \tag{2.5.8-1}$$

$$\begin{pmatrix} u_P \\ v_P \end{pmatrix} = \sqrt{2}/2 \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x_P \\ y_P \end{pmatrix} \tag{2.5.8-2},$$

$$\begin{pmatrix} \theta u_P \\ \theta v_P \end{pmatrix} = \sqrt{2}/2 \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \theta x_P \\ \theta y_P \end{pmatrix} \tag{2.5.8-3}$$

(2.5.8-1)～(2.5.8-3)より、

$$\begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ \theta x_0 \\ \theta y_0 \\ \theta z_0 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{2}/2 & \sqrt{2}/2 & & & & b \\ -\sqrt{2}/2 & \sqrt{2}/2 & & & & -a \\ & & 1 & -\sqrt{2}/2(a+b) & \sqrt{2}/2(a-b) & \\ & & & \sqrt{2}/2 & \sqrt{2}/2 & \\ & & & -\sqrt{2}/2 & \sqrt{2}/2 & \\ & & & & & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u_P \\ v_P \\ z_P \\ \theta u_P \\ \theta v_P \\ \theta z_P \end{pmatrix} \tag{2.5.8-4}$$

水平面内と震動台面内の座標系には以下の関係がある。

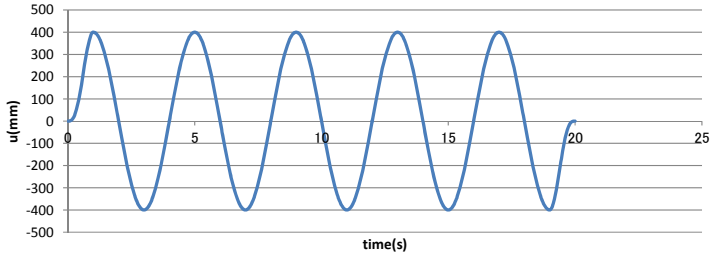
$$\begin{pmatrix} u_P \\ v_P \\ z_P \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta v_P & & \\ & \cos\theta u_P & \\ -\sin\theta v_P & \sin\theta u_P & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} U_P \\ V_P \\ Z_P \end{pmatrix} \tag{2.5.8-5}$$

したがって、(2.5.8-4)～(2.5.8-5)より、

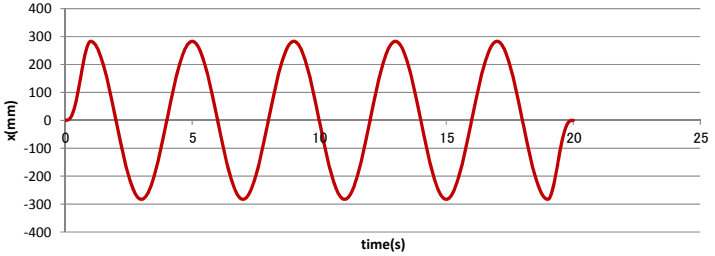
$$\begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ \theta x_0 \\ \theta y_0 \\ \theta z_0 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{2}/2\cos\theta v_P & \sqrt{2}/2\cos\theta u_P & & & & b \\ -\sqrt{2}/2\cos\theta v_P & \sqrt{2}/2\cos\theta u_P & & & & -a \\ -\sin\theta v_P & \sin\theta u_P & 1 & -\sqrt{2}/2(a+b) & \sqrt{2}/2(a-b) & \\ & & & \sqrt{2}/2 & \sqrt{2}/2 & \\ & & & -\sqrt{2}/2 & \sqrt{2}/2 & \\ & & & & & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} U_P \\ V_P \\ Z_P \\ \theta u_P \\ \theta v_P \\ \theta z_P \end{pmatrix} \tag{2.5.8-6}$$

2.5.9　参考資料 加振波の例

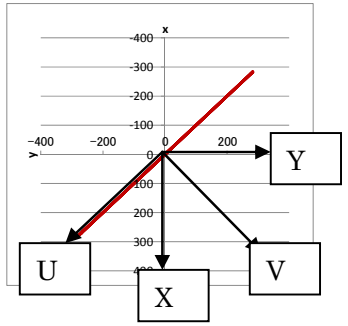
補償波の作成例（U1-SL5Z：長周期（1 方向）、u 方向: 振幅 400mm、周期 4 秒）

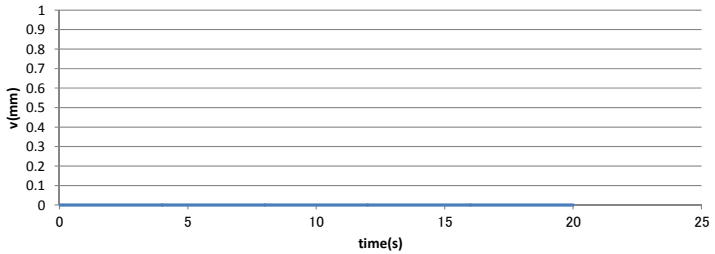


U 成分

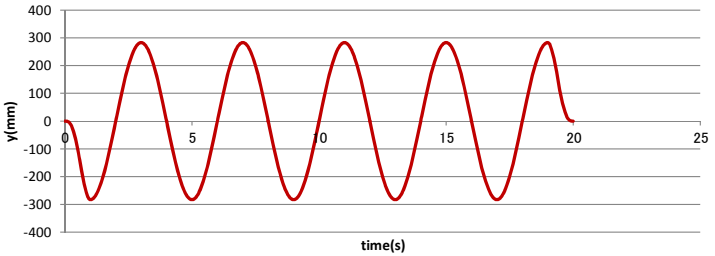


X 成分

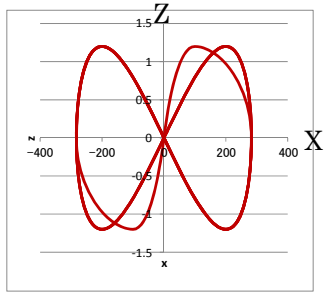


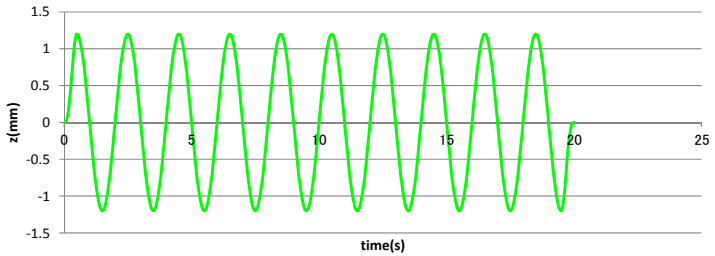


V 成分

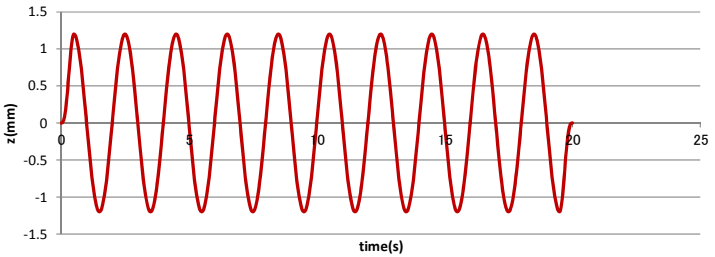


Y 成分

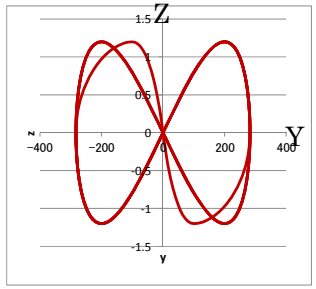




Z 成分



Z 成分



2.5.10　参考資料 フレーム応力度

5MN 鉛直載荷

		応力度(N/mm^2)				許容応力度比(長期)	
		軸	曲げ	軸+曲げ	せん断	軸+曲げ	せん断
柱	C1	14.2	60.1	73.9	27.0	0.34	0.22
	C2	25.7	59.9	73.3	30.6	0.34	0.24
	C3	3.2	26.5	28.7	12.6	0.13	0.10
梁	G1	22.5	104.2	126.8	41.2	0.59	0.33
	G2	24.3	107.2	131.2	42.7	0.61	0.34
	G3	2.3	36.6	39.0	14.4	0.18	0.12

5MN 鉛直載荷＋長周期繰返し加振（U方向1MN）

		応力度(N/mm^2)				許容応力度比(長期)	
		軸	曲げ	軸+曲げ	せん断	軸+曲げ	せん断
柱	C1	16.1	65.5	80.7	40.4	0.37	0.32
	C2	29.4	64.4	79.3	42.4	0.37	0.34
	C3	3.5	28.0	30.1	13.8	0.14	0.11
梁	G1	29.2	129.0	158.2	45.0	0.73	0.36
	G2	30.2	128.9	159.1	46.1	0.73	0.37
	G3	3.0	38.5	41.0	18.0	0.19	0.14

5MN 鉛直載荷＋長周期繰返し加振（UV方向0.75MN）

		応力度(N/mm^2)				許容応力度比(長期)	
		軸	曲げ	軸+曲げ	せん断	軸+曲げ	せん断
柱	C1	15.6	60.3	76.9	37.6	0.35	0.30
	C2	27.6	61.0	75.0	40.0	0.35	0.32
	C3	4.0	29.3	31.5	17.2	0.15	0.14
梁	G1	26.8	120.2	147.1	45.8	0.68	0.37
	G2	28.4	122.7	151.3	43.7	0.70	0.35
	G3	4.9	41.9	42.8	22.5	0.20	0.18

オイル長周期繰返し加振（V方向1MN）

		応力度(N/mm^2)				許容応力度比(長期)	
		軸	曲げ	軸+曲げ	せん断	軸+曲げ	せん断
柱	C1	0.5	2.6	3.2	1.1	0.01	0.01
	C2	0.9	2.1	2.7	1.1	0.01	0.01
	C3	1.8	1.3	2.8	1.8	0.01	0.01
梁	G1	0.5	2.1	2.2	4.9	0.01	0.04
	G2	0.9	4.0	5.0	4.6	0.02	0.04
	G3	3.3	4.6	8.4	5.9	0.04	0.05

第Ⅴ部

長周期地震動に対する実大免震部材の特性評価(2)

第１章　震動台を用いた実大免震部材の構造実験（その２）

1.1 目的

長周期地震動に対する免震建築物の安全性照査のクライテリア設定へ向けて、多数回繰り返し加振実験に基づく実大免震部材の特性評価を行うことを目的とする。実大免震部材の動的・多数回繰返し加振実験は、試験装置能力の制約により従来殆ど実施されておらず、本実験により実大免震部材のエネルギー吸収性能を把握することは、長周期地震動に対する免震建築物の安全性向上に大きく寄与することが期待される。

第Ⅳ部第２章では、第Ⅲ部第１章に示した縮小試験体の多数回繰り返し実験の条件を踏まえて、実大試験体の多数回繰り返し実験及び実大試験体の破断相当歪（±90cm、450%）までの実験実施計画を作成し、実大免震部材（弾性すべり支承（高摩擦）およびオイルダンパー）の加振実験結果を示した。本章では、新たに積層ゴム系実大支承（鉛プラグ入り積層ゴムおよび高減衰積層ゴム）を対象として、多数回繰返し実験を実施した結果を示す。

1.2 実験条件の設定

過去に実施された実大実験の実験条件を考慮して、それらと同等以上の実大実験の免震部材を使用することとし、鉛プラグ入り積層ゴム支承および高減衰積層ゴム支承はφ1000 の大きさを想定する。

第Ⅳ部第 1 章ならびに第 2 章に示した議論を踏まえて、実験条件には以下の優先順位を付ける。

1）長時間動的繰返し加振
2）鉛直載荷
3）水平 2 方向加振
4）破断実験

1）の長時間繰返し加力については、加振振幅は、φ1000 の積層ゴム支承で、±40cm（せん断歪 200%）程度とし、加振時間は、4 秒周期で 30 回～60 回（累積変形で 50m～100m）程度とする。これらの条件は、第Ⅲ部第 1 章に示した縮小免震部材の試験条件と整合させる。

2）鉛直載荷については、実面圧相当を目標とするが、ロードセルが許容荷重を越えない範囲で最大荷重を 5000kN に設定した（第Ⅳ部 2.5.4 参照）。面圧変動の許容値は、目標としては±20％程度を目指すこととするが、震動台の制御精度を予備加振により確認し、実現可能な精度で最終的に決定する。

FEM 解析結果（第Ⅳ部 2.5.4 参照）によれば、当初計画の上部鋼板 100mm では 10000kN の鉛直載荷時に中央部ロードセル荷重が許容荷重の２倍程度に達する。許容荷重を越えないようにするには、上部鋼板を 200mm に厚くした上で、中央付近のロードセルを油圧ジャッキに置き換える必要がある。

油圧ジャッキを使用することにより 10000kN 載荷は可能ではあるが、軸力が何らかの理由で解放された時に、ロードセルに許容値以上の引張荷重が作用する可能性がある。従って、長時間・繰返し実験には適用出来る可能性があるが、破断実験には採用出来ない。

油圧ジャッキ無しで可能な範囲をＦＥM解析と実際の予備加振により見極めて、加振条件を設定することとする。長時間・繰返し実験について、可能であれば油圧ジャッキによる加振も試験的に行うこととする。

3）の水平 2 方向加力については、高減衰積層ゴム支承では、1 方向加力と 2 方向加力では特性に差があることが知られているため、2 方向加力が行えるようにする。

4）破断実験については、±90cm 程度まで漸増加振を行うこととし、破断しない場合はそれ以上の振幅増加はさせないこととする。積層ゴムの破断せん断力として 6000kN 程度が想定される。

以上の実験条件を整理して、表 1.2.1 に示す。

表 1.2-1 実験条件の設定

実験条件	目標値	留意点
試験体寸法	・積層ゴム：φ1000	
長時間・動的繰返し加振	正弦波加振： ・±40cm ・4 秒周期で 30 回～60 回（累積変形で 50m～100m） 地震波加振： ・長周期地震動模擬波に対する免震建物応答波を使用する。	・φ1000 積層ゴムでせん断歪 200%相当。 ・主梁方向を基本とする。 ・必要に応じて高次振動数成分をフィルター処理する。
鉛直載荷	・最大 5000kN*	・面圧変動の許容値は±20%程度を目標とするが、震動台の制御精度により決定する。
水平 2 方向加振	・各方向とも±40cm（せん断歪 200%）以下程度	・正弦波は、円軌道または楕円軌道とする。 ・地震波は、2 方向応答波を使用する。
破断実験（大振幅加振）	・±90cm（せん断歪 450%）まで段階的に加振（破断時の荷重は 6000kN、衝撃力 9000kN 程度）	・受け梁方向に加振する。 ・破断に至らない場合、それ以上振幅を増加させない。

*ロードセルの許容荷重を考慮して設定する。予備解析として鉛直加力時及び鉛直加力＋水平加力時のロードセルにかかる荷重分布を 3 次元 FEM 解析で検討し、載荷可能な鉛直軸力を設定し、実際の加振時に検証を行った。

第２章　多数回繰返し荷重を受ける免震部材の構造実験（その２）

2.1 全体実験計画

実大免震部材の動的・多数回繰返し加振実験を実施し、免震部材の特性変化を実測する。ここでは、鉛プラグ入り積層ゴムおよび高減衰積層ゴムを想定する。破断に至る大振幅加振も併せて実施する。試験体、計測方法、実験方法（加振波作成、加振ケース）の詳細については、後述の「2.2.1 鉛プラグ入り積層ゴム」及び「2.2.2 高減衰積層ゴム」を参照されたい。

2.1.1 加力計画、計測計画、加振計画および安全対策

加力治具・試験体の設置、加振計画、安全上の留意点及び計測計画については、第Ⅳ部 2.1.2 項に示した内容と同様の部分の記述は割愛する。第Ⅳ部 2.1.2 項を参照してほしい。

① 試験体設置における震動台の調整

・本実験では積層ゴム試験体の高さを考慮して中立軸位置を着座状態から 240mm に変更して使用した。新中立位置への変更運用にあたっては、事前に非積載状態における震動台の試運転により問題を生じないことを確認した。

② 支承の鉛直軸力の導入と水平加振

・水平方向加振時の震動台の鉛直方向変位を調べるため、例えば無負荷状態、2000kN、4000kN、と必要なステップを踏んで鉛直荷重を増やした場合の影響を調べる。

・主梁方向の水平 1 方向正弦波加振とし、2 方向加振は円軌道または楕円軌道で設定する。

・長周期地震動模擬波による免震建物応答波についても加振を行う。

2.1.2　防護計画

試験体の破断に備えて、試験体の周囲（下部ブロック上面の外縁部）をポリカーボネード製の防護壁（図 2.1-1）で遮る計画とする。

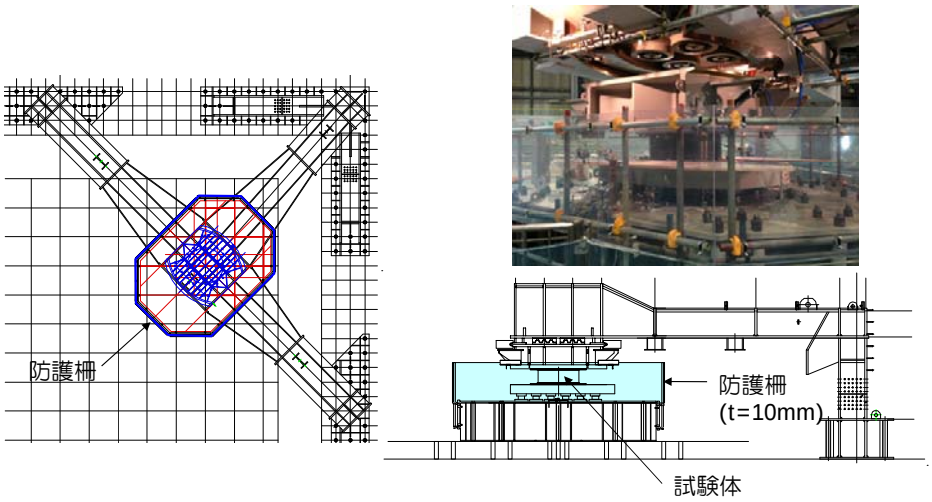
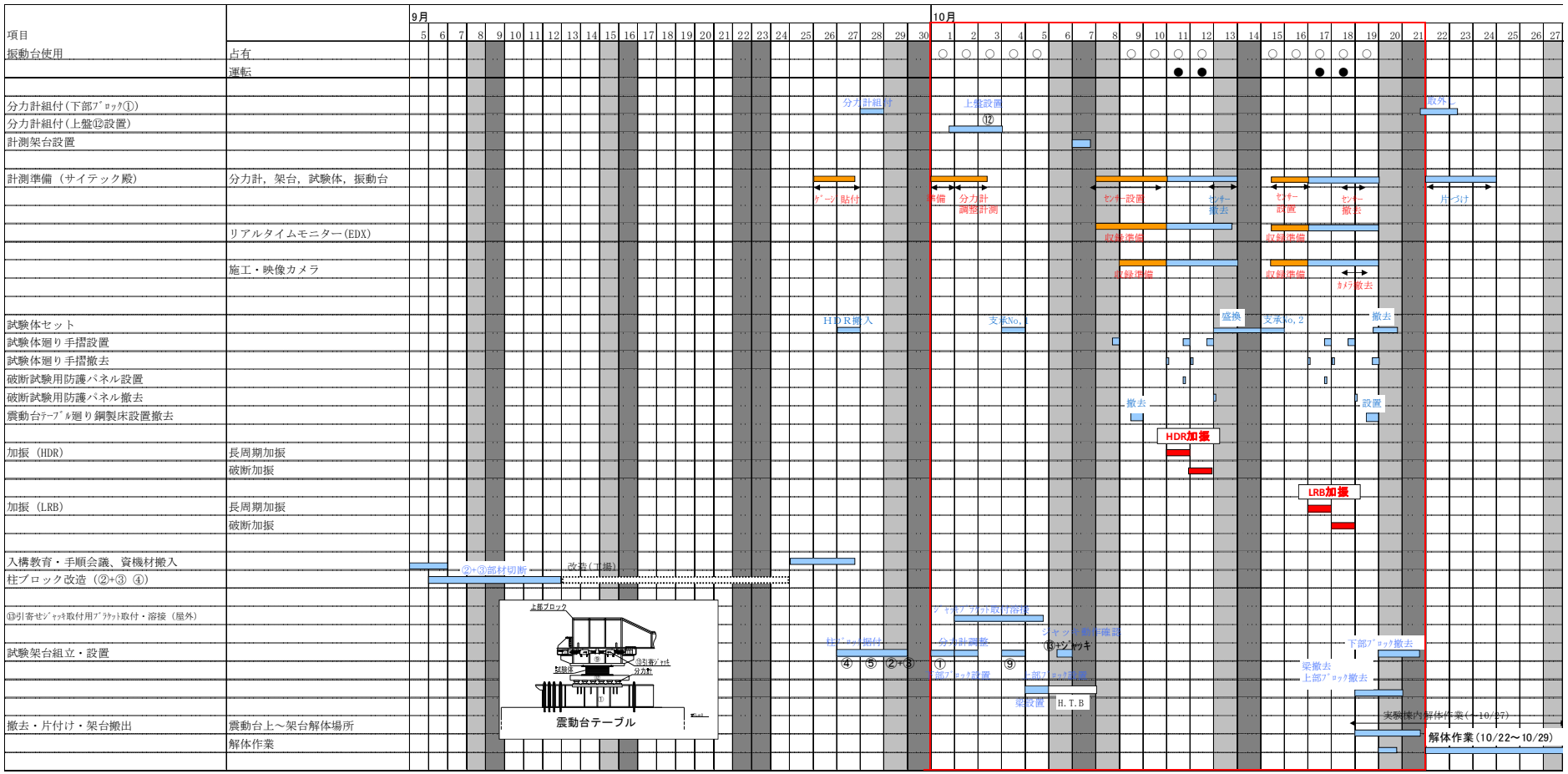


図 2.1-1　防護壁の設置

2.1.3 実験スケジュール

表 2.1-1 に、E-ディフェンスでの実験スケジュールを示す。

表 2.1-1　E-ディフェンスでの実験スケジュール



2.1.4 実験手法の検証

本実験では、各ロードセルに加わる荷重が許容荷重（700kN）を越えないようにするため、ロードセル取付け時の初期荷重分布を静歪として計測しておき、加力時の軸力とせん断力は動歪として計測した。加力時にロードセルに加わる荷重が許容値を越えていないことの確認は、静歪と動歪の和から評価した。

(1) 初期荷重分布の計測

以下の手順でロードセルを取付けて、静歪を計測した。

① ロードセルを下部ブロックに締付け
② 静歪の計測
③ 感圧紙をロードセル上に設置。
④ 上部ブロックの設置と静歪の計測。感圧紙の色変化確認。
⑤ トレッシングペーパー（0.02mm）設置による荷重分担の調整。
⑥ 上部ブロックの締付けと静歪の計測

(2) 軸力導入時と水平加力時の計測

以下の手順で軸力を導入して、水平加力を行った。軸力導入前にロードセルのバランスを取り、以後の軸力とせん断力を動歪として計測した。

① 震動台着座状態から新中立軸位置（+240mm）へ上昇
② 震動台降下（鉛入り+70mm、高減衰+100mm）、ならし加振（水平±500mm、上下 50mm）
③ 中立軸位置へ上昇。以後、ここを原点（0、0、0）として震動台変位を制御。
④ 震動台水平位置の修正（X：35mm、Y：28mm）
⑤ コッター噛合い位置まで上昇
⑥ コッター密着レベルまで小刻みに上昇
⑦ コッター密着をロードセル荷重変化で確認。ジャッキで遠隔固定。
⑧ 水平加力

震動台を上昇させて免震部材に所定の軸力が入っている事と、ロードセルの許容荷重を越えていない事を、リアルタイムモニターにより、載荷中のロードセル荷重をモニターした。

(3) 軸力解放の手順は以下の通りである。

① ロードセル荷重が解放されるコッター密着レベルまで震動台を降下。
② ジャッキ解放。
③ 震動台を中立位置へ降下。
④ 着座状態へ。震動台停止。

2.2 実大部材実験の実施

2.2.1 鉛プラグ入り積層ゴム

(1) はじめに

実大鉛プラグ入り積層ゴム多数回繰り返し加力実験により、繰り返し変形による温度上昇と履歴特性変動について把握し、これらを考慮した解析モデルの開発に寄与するデータを取得することを目的とする。本実験では、従来の試験で実施してきた水平 1 方向だけではなく、水平 2 方向加振の繰返し特性、および、破断性状の確認も行う。また、平成 22 年度に実施した 1/2 縮尺の鉛プラグ入り積層ゴムの多数回繰返し試験結果と比較することで、縮小試験体の力学特性の実大試験体への適用性を検討する。

試験実施日時と場所は以下の通りである。

・試験日時

2012 年 10 月 17 日：

正弦波 1 方向多数回繰返し加振、地震応答波加振、正弦波 2 方向（楕円）多数回繰返し加振

2012 年 10 月 18 日：

正弦波 2 方向（楕円）多数回繰返し加振、正弦波 1 方向大振幅加振（破断）

・試験場所

独立行政法人　防災科学技術研究所　兵庫県耐震工学研究センター（E-Defense）

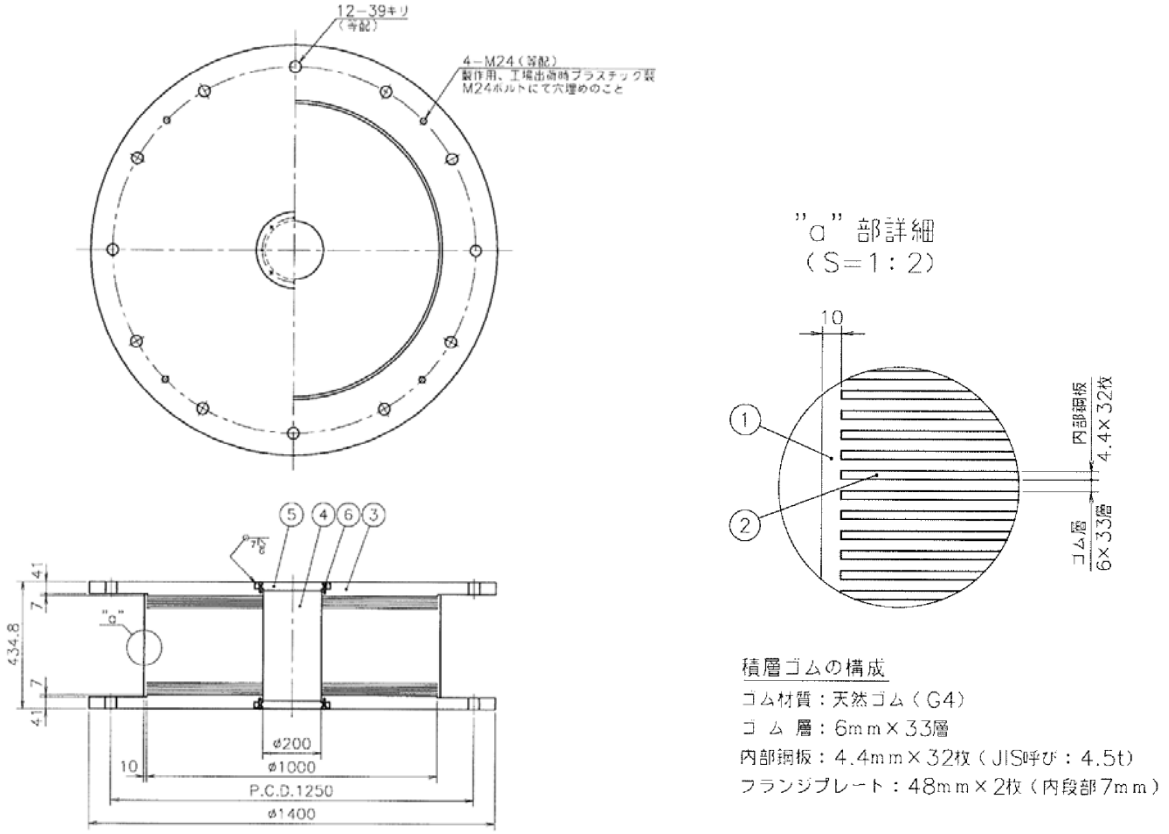
(2) 試験体

1) 試験体諸元

試験体は表 2.2.1-1 に示す、外径φ1,000、鉛プラグ径がφ200 の鉛プラグ入り積層ゴム 1 体である。試験体図面を図 2.2.1-1 に試験体全景写真を写真 3.4.1-1 に示す。

表 2.2.1-1　試験体諸元

外径 (mm)	鉛プラグ径 (mm)	ゴム層厚	内部鋼板厚 (mm)	S_1	S_2
1,000	200	6mm×33 層=198mm	4.4	41.7	5.1



材 料 表　　製作数量：＊基

番号	名称	材質	個数	重量	備考
1	外部被覆及び内部ゴム	NR	−	176.5	G4
2	内部鋼板	SPHC相当品	32	833.4	SPHCもしくはSS400
③	フランジプレート	SS400	2	1036.1	
4	鉛プラグ	Pb	1	134.2	純度：99.99%以上
5	キャッププレート	SS400	2	21.6	
6	キャップ固定ボルト	強度区分：12.9	16	−	六角穴付ボルト M8×25
7	穴埋め用ボルト	−	8	−	プラスチックボルト
総 重 量：2201.8 kg					

防錆処理仕様
○印：エポキシ樹脂系塗装(三層塗り 合計膜厚170μm以上)
□印：ジンクリッチペイント

図 2.2.1-1 試験体（LRB1000）

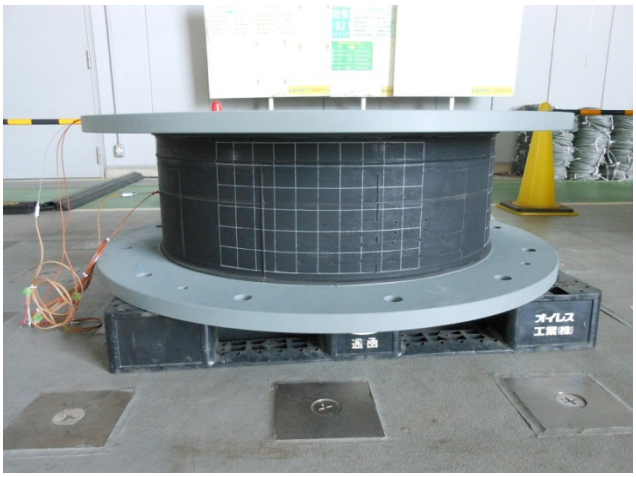


写真 2.2.1-1 試験体写真

2) 熱電対設置位置

実験中の試験体温度を計測するため、試験体に熱電対を設置した。破断試験結果への影響を小さくするため、ゴム部を配線が通過するのは 1 本のみに限定し、鉛プラグ中央部の温度を計測するものとした。これに追加して、鉛上部とフランジ部および被覆ゴム内部に熱電対を配置した。なお加力治具と積層ゴムフランジ間には厚さ 10mm の高温用断熱板（D.M.E 双葉製）を挟むものとする。表 2.2.1-2 に使用熱電対の一覧を、写真 2.2.1-2、写真 2.2.1-3 に熱電対の設置状況を示す。

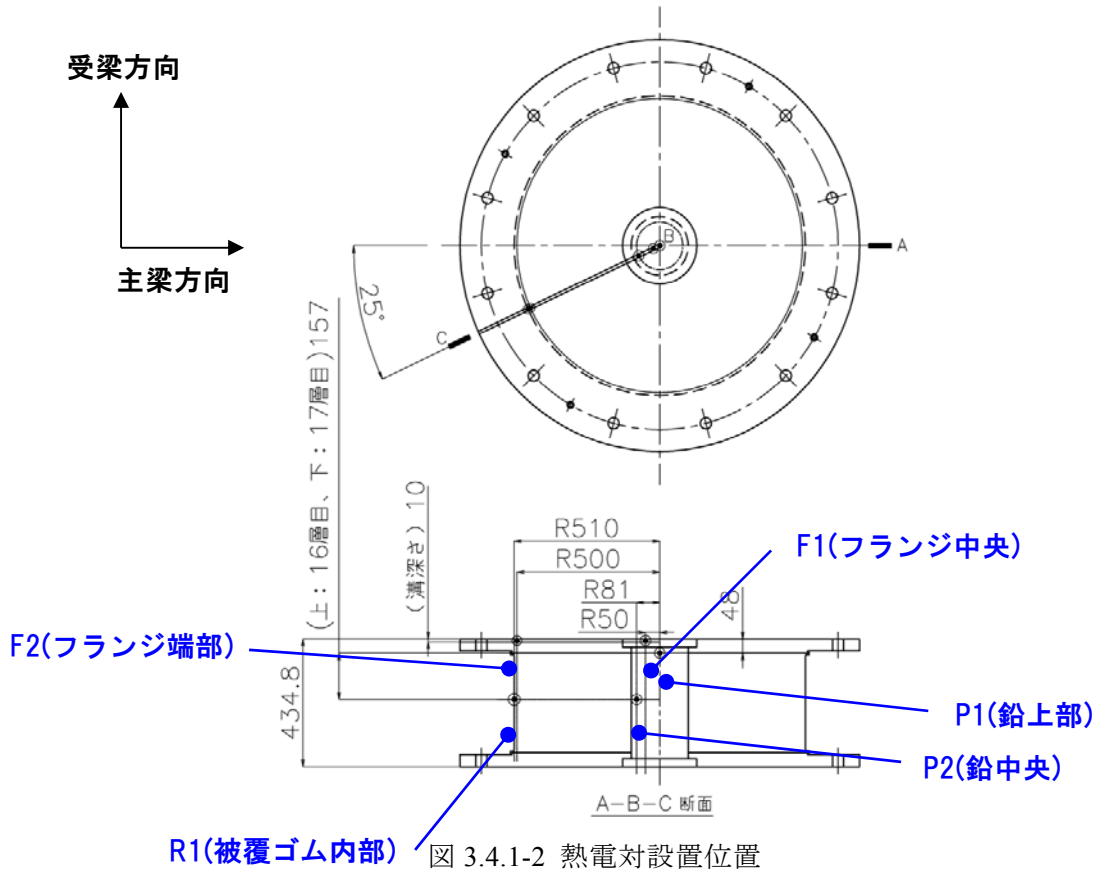


図 3.4.1-2 熱電対設置位置

表 2.2.1-2 使用熱電対一覧

計測位置	記号	熱電対種類
鉛上部	P1	T 型シース熱電対、シース径 φ1.6
鉛中央	P2	T 型シース熱電対、シース径 φ3.2
フランジ中央	F1	T 型被覆熱電対
フランジ端部	F2	T 型被覆熱電対
被覆ゴム内部	R1	T 型被覆熱電対

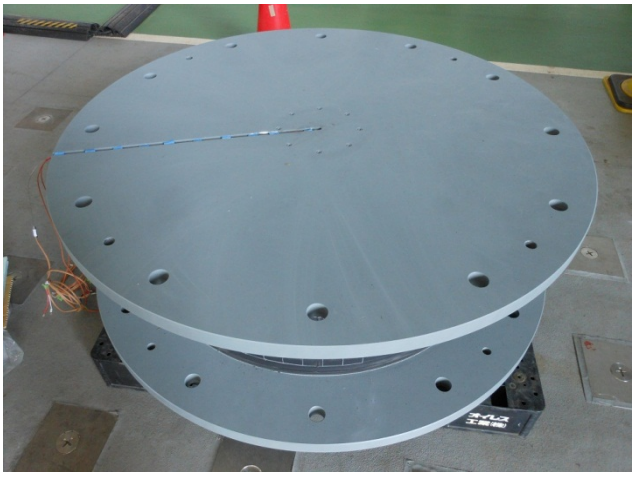


写真 2.2.1-2 フランジ・鉛上部の熱電対設置状況

写真 2.2.1-3 被覆ゴム内部、鉛中央部の熱電対設置状況

(3) 計測項目と計測方法

1) 計測項目

計測項目は、水平荷重、水平変位、鉛直荷重、鉛直変形、温度である。また、試験体ゴム部の 3 側面に幅 50mm、水平方向×鉛直方向＝10 マス×6 マスのメッシュを描き、ビデオカメラにて、加振中・加振後に試験体のねじれの有無を確認した。

支承の水平変形は、主梁方向、受梁方向にレーザー変位計を 2 台ずつ設置し、その平均値から求めた。鉛直変形は、上下フランジ間にレーザー変位計を 4 台設置した。また、固定プレートが鉛直方向に変形していないか確認するため、歪ゲージ型変位計を下部ブロックと試験体固定プレート間に 4 台設置した。水平荷重および鉛直荷重は、下部ブロックと試験体固定プレート下部の間に固定された 31 台の 3 分力計ロードセルにより測定した。31 台分のデータをリアルタイムで合算し、水平は主梁（u 方向)、受梁（v 方向）成分にそれぞれ変換した。温度計測は、表 3.4.1-2 に示した熱電対を用いて、試験体内部（鉛中央、鉛上部、フランジ中央、フランジ端部、被覆ゴム内部）を計測した。さらに、非接触型の放射温度計（HIOKI3444）で試験体表面温度を、T 型被覆熱電対で外気温度を計測した。使用センサー一覧を表 2.2.1-3 に、表 2.2.1-4 に試験体上下フランジと加力治具の間に断熱板の仕様を示す。

表 2.2.1-3 使用センサー（加力フレーム計測用は除く）

センサー種類	台数	計測方向	ch 名称	計測箇所	性能
レーザー変位計 IL-2000 （KEYENCE）	4	水平	LRB-Hu1、2 （主梁） LRB-Hv1、2 （受梁）	水平主梁方向、 受梁方向に 各 2 台	－1000mm～+1500mm （基準距離 2000mm）
レーザー変位計 LK-500 （KEYENCE）	4	鉛直	LRB-v1～v4	上フランジと 下フランジ間	±250mm （基準距離 500mm）
歪ゲージ型変位計 CDP-10 （東京測器）	4	鉛直	LRB-v5～v8	下部ブロックと 試験体固定 プレート間	±5mm
3 分力計ロードセル LSM-700KN （共和電業）	31	水平 鉛直		下部ブロックと 試験体固定 プレート間	

表 2.2.1-4 断熱板の仕様

圧縮強度	338(N/mm2)　(24℃の場合) 103(N/mm2)　(285℃の場合)
吸水性	0.06%
熱伝導率	0.274W/(m・k)　(24℃の場合) 0.303W/(m・k)　(220℃の場合)
難燃性	94V－0(自己消化性)
最高使用温度	285℃
材質	アルミニュームカーボネート＋グラスファイバー＋不飽和ポリエステル

2) 計測位置

図 2.2.1-3 に荷重、変形、温度の測定点図を、図 2.2.1-4 に 3 分力計の配置図を示す。

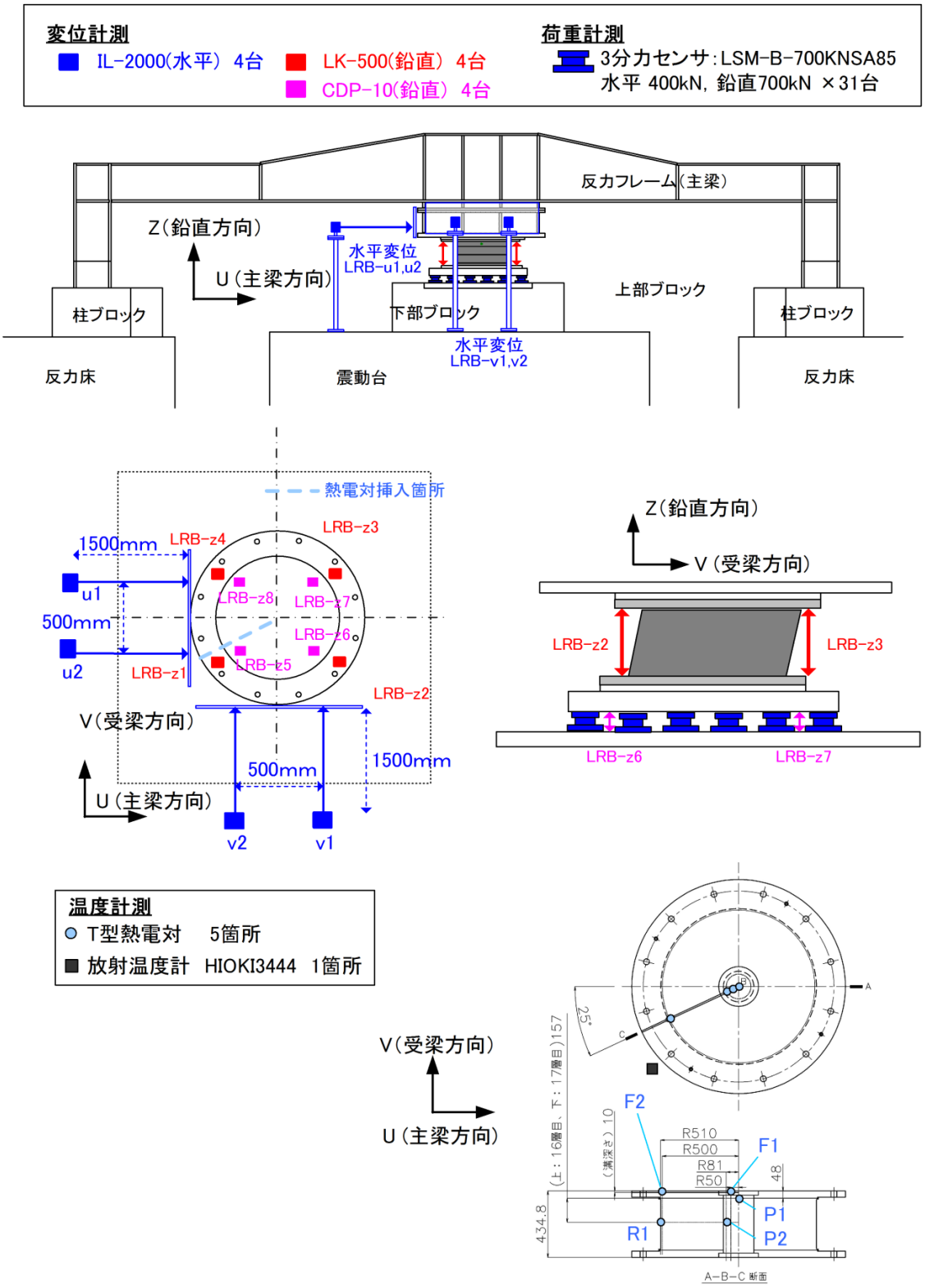


図 2.2.1-3 測定点図（荷重、変形、温度）

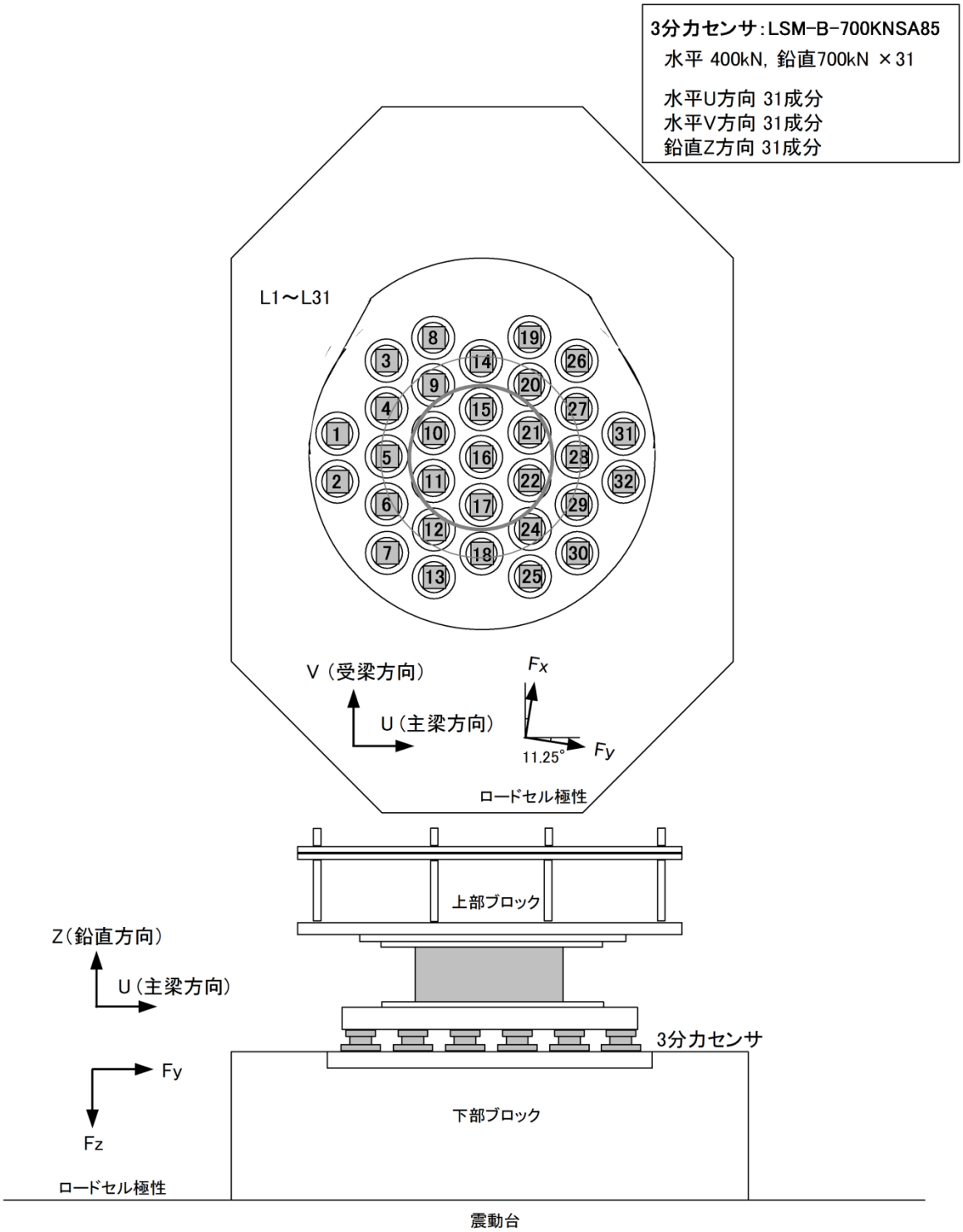


図 2.2.1-4　3 分力計配置図

(4) 加振方法と実験ケース

1) 加振方法

震動台の上昇により、面圧 5N/mm^2（約 3,800kN）を載荷した状態で、せん断ひずみ 100%～400%までの正弦波および地震応答波により水平 1 方向または 2 方向に加振を行った。震動台を上昇させることで、加力フレームが傾斜するため、その分震動台を傾斜させて加振を実施した。また、本実験では鉛直荷重も変位制御にて実施するため、水平変形を与えた場合の試験体の圧縮沈み込み変形を逆位相で試験体に与えることとした。なお、加力フレームの剛性≪積層ゴムの鉛直剛性であることを考慮し、鉛直沈み込み量が比較的小さいせん断ひずみ 200%までの範囲では、鉛直方向の制御は実施しないこととした。

実験では、震動台のアキュムレータ蓄圧および加振準備のため、インターバルを取りながら加振を実施した。

2) 実験ケース

実験ケース詳細を下記 a)～e)に記す。また、図 2.2.1-5 に加振に用いた変位波形および変位軌跡を、表 2.2.1-5 に本実験における加振実績を示す。

a) 基本特性試験

各試験の前後に、試験体の基本特性を確認するため、面圧を 5N/mm^2 で一定とし、せん断ひずみ±100%、周期 80 秒の正弦波加振を 4 サイクル実施した。なお予備実験として、試験体出庫時の製品検査では、標準的な出荷試験（面圧 15N/mm^2）に加えて実験面圧である面圧 5N/mm^2 における試験を実施した。加力方向は主梁方向である。

b) 正弦波 1 方向多数回繰返し加振

積層ゴムサイズの違いによるスケール効果を確認するため、第Ⅲ部第 1 章に示した縮小試験体実験における 3A 長周期に対応する加振として、γ＝200%（400mm）、周期 4 秒、35 サイクル（累積水平変形約 56m）の正弦波加振を実施した。

c) 地震応答波加振

長周期地震動に対する応答変位波形を想定した、地震応答波加振を実施するものとする。1 方向加振と 2 方向加振を実施する。ランダム波加振による積層ゴムの損傷を評価するため、正弦波加振と同等の累積変形に達するまで（約 100m）地震応答波加振を繰り返し実施する。

実験で用いる地震応答波は、第Ⅲ部第 2 章で検討した 2 方向入力地震動による応答解析結果（温度上昇非考慮）を用いた。入力地震動として、竹中工務店作成の Wave-Tk を用いた。Wave-Tk は、大阪堺における東南海、南海連動地震の予測波である。応答解析は上部建物（積層ゴム 1 台当たりの重量 : 7,477kN）を 1 質点としてモデル化したもので、免震層は鉛プラグ入り積層ゴムのみで構成されるものとした。鉛プラグ入り積層ゴムのゴム種は G4、外形φ1,000、鉛径 200mm、ゴム総厚 200mm とし、積層ゴムのゴム剛性による周期が 4.5 秒、鉛降伏せん断力係数αs＝0.035 となるよう設定されたものである。

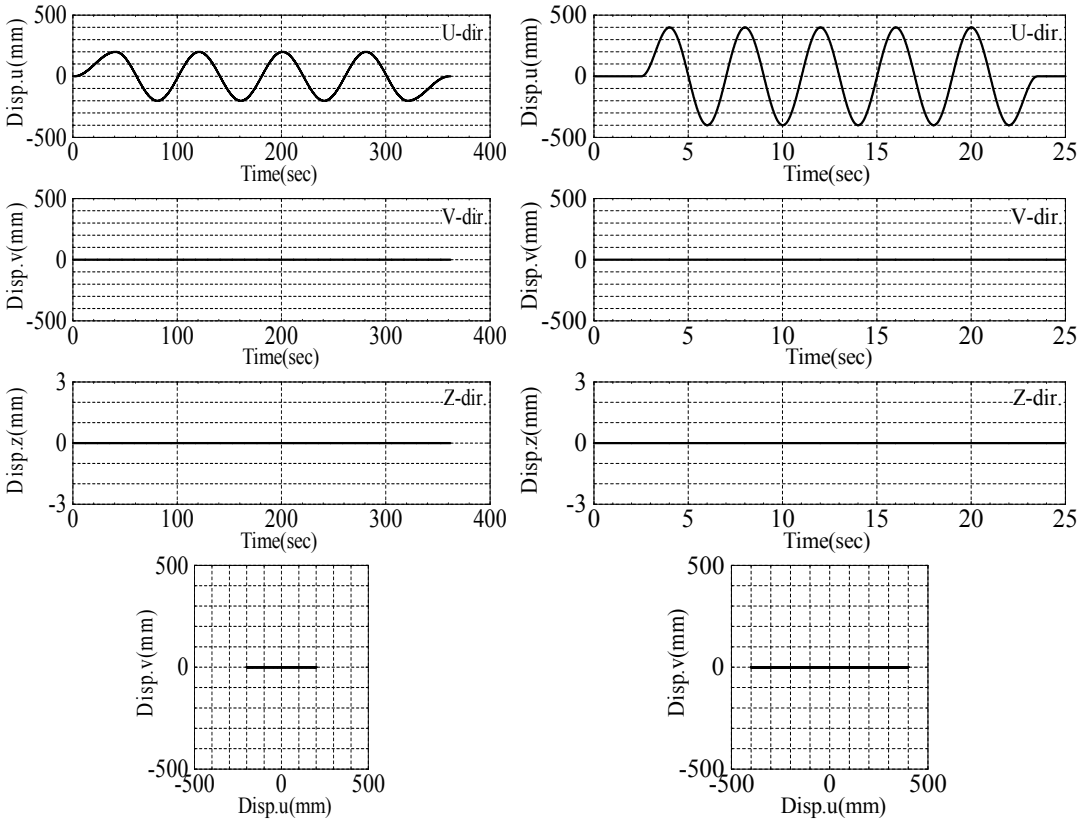
1 方向加振では、Wave-Tk（EW）を主梁方向に入力する。2 方向加振では、Wave-Tk（EW）を主梁方向に Wave-Tk（NS）を受梁方向に入力する。最大せん断ひずみは、EW 方向が 108%、NS 方向が 69%である。

d) 正弦波 2 方向多数回繰返し加振

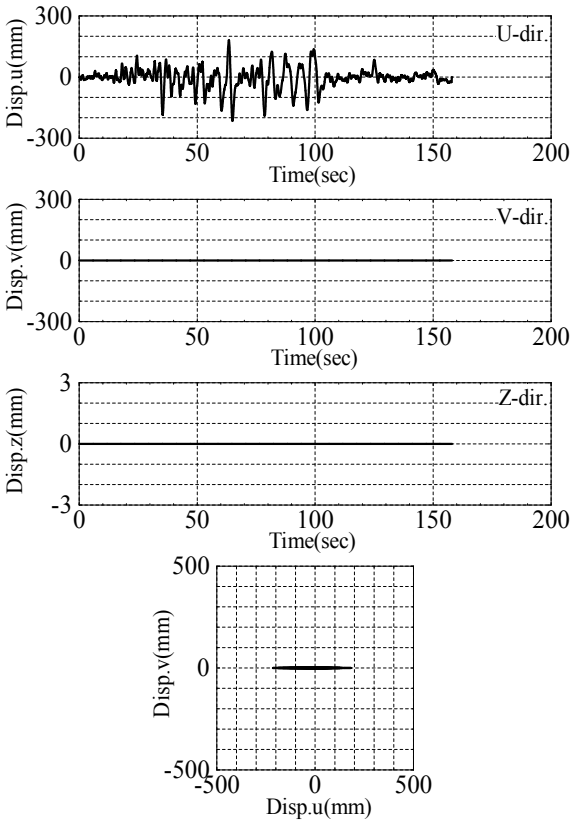
第Ⅲ部第 1 章に示したの縮小試験体実験における 3B 限界に対応する試験として、累積水平変形約 100m 超となる加振を行なうものとする。併せて水平 1 方向加振との比較を行い、直交方向の影響を確認する。最大水平振幅γ＝200％（400mm 主梁方向）、100％（200mm 受梁方向）、加振周期 4 秒の楕円加振とした。また、直交方向の変位振幅による比較を行うため、最大水平振幅γ＝200％（400mm 主梁方向）、200％（400mm 受梁方向）、加振周期 4 秒の真円加振を実施した。真円加振の累積変形は 3A 長周期に対応し約 50m とした。

e) 正弦波 1 方向大振幅加振

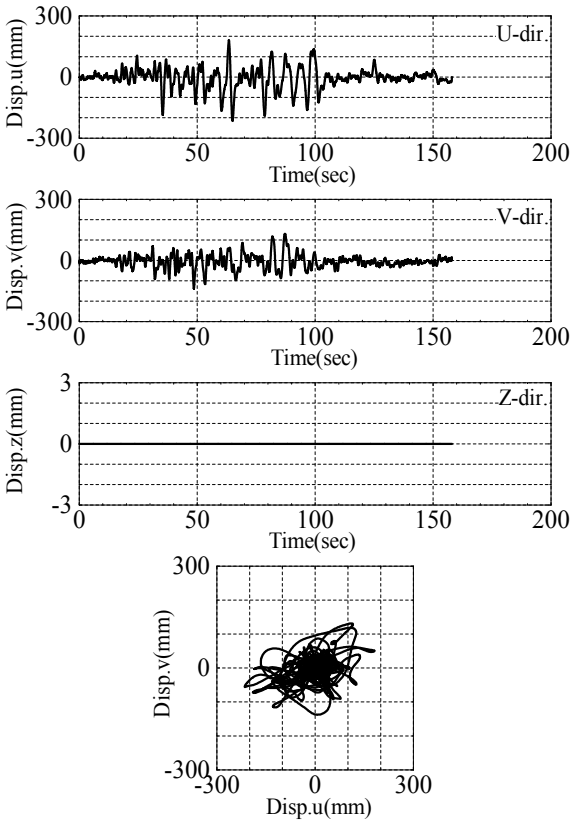
周期 4 秒、最大水平振幅γ＝300％（600mm）、350％（700mm）、および 400％（800mm）の正弦波加振を実施した。震動台アキュムレータ性能の都合により、γ＝300％では 3 サイクル、γ＝350％および 400％では 2 サイクルの加振を実施した。加振方向は受梁方向である。



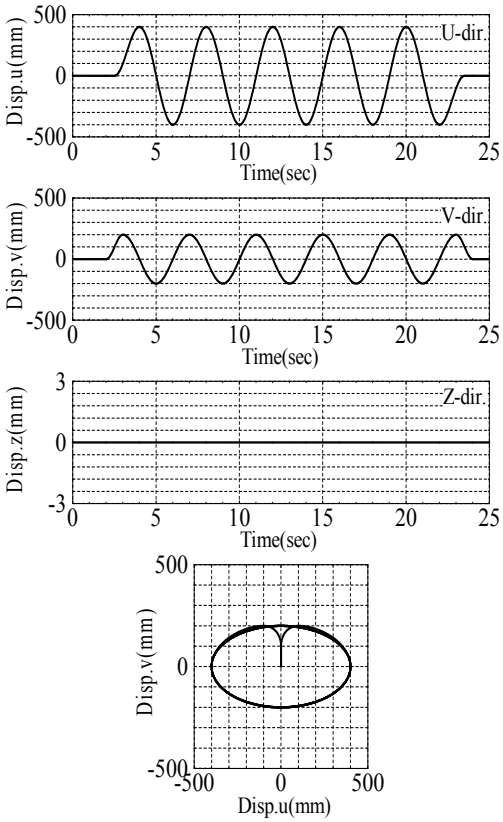
(a)基本特性試験　　(b)正弦波 1 方向多数回繰返し（7 回繰返し）



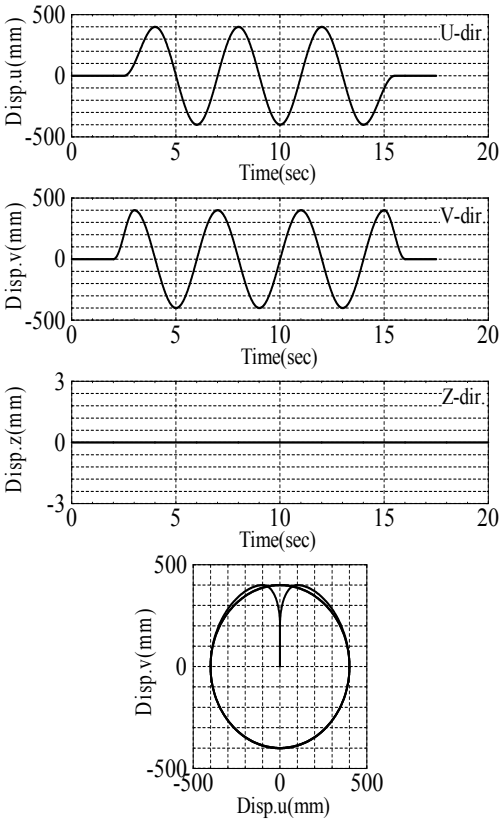
(c)地震応答波 1 方向



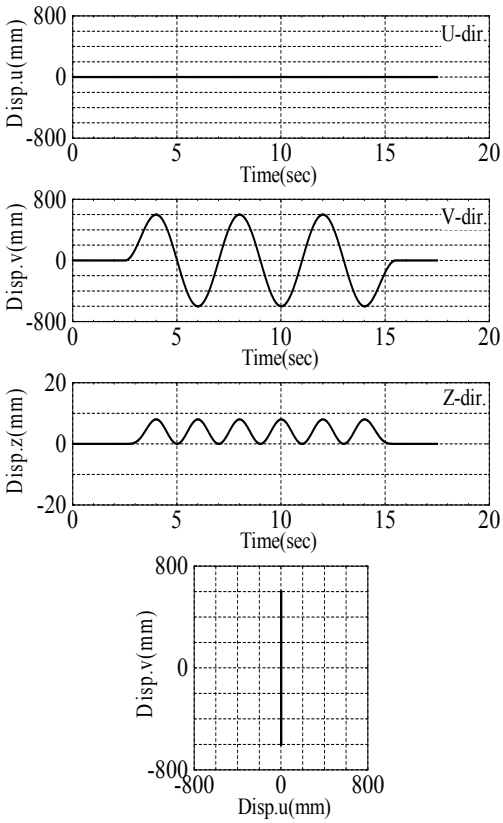
(d)地震応答波 2 方向（6 回繰返し）



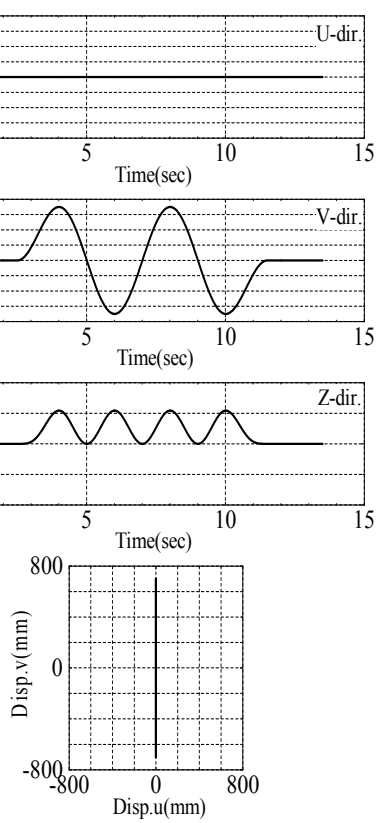
(e)楕円加振（12 回繰返し）



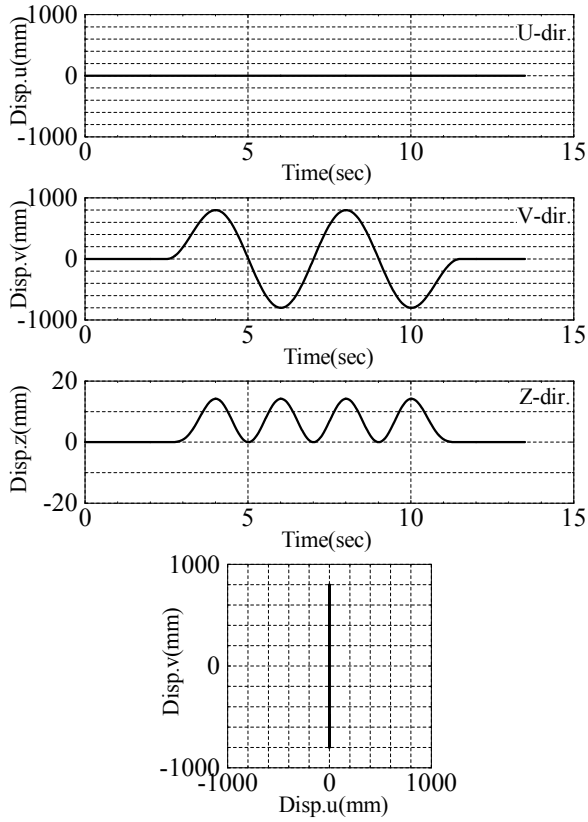
(f) 真円加振（7 回繰返し）



(g)正弦波 1 方向大振幅（γ＝300％）



(h) 正弦波 1 方向大振幅（γ＝350％）



(i) 正弦波 1 方向大振幅（γ＝400％）

図 2.2.1-5　加振変位波形および変位軌跡

表 2.2.1-5 加振実績

No.	実施日	試験条件	加振方向	レベル	面圧（MPa）	加振周期(秒)
1	10/17	基本特性 1	u	γ100％×4cyc.	5	80
2		正弦波 1 方向	u	γ200％×5cyc.×7 回 （累積変形 55m）	5	4
3		基本特性 2	u	γ100％×4cyc.	5	80
-		試験体冷却				
4		地震応答波 1 方向	u	γ109％ 継続時間 160 秒×1 回 （累積変形 10.1m）	5	-
5		地震応答波 2 方向	u+v	u 方向：γ109％、v 方向：γ70％ 継続時間 160 秒×6 回 （累積変形 89.8m）	5	-
6		基本特性 3	u	γ100％×4cyc.	5	80
-		試験体冷却				
7		基本特性 4	u	γ100％×4cyc.	5	80
8		正弦波 2 方向楕円加振	u+v	u 方向：γ200％、v 方向：γ100％ ×5cyc.×12 回 （累積変形約 119.4m）	5	4
9		基本特性 5	u	γ100％×4cyc.	5	80
-		試験体冷却				
10	10/18	基本特性 6	u	γ100％×4cyc.	5	80
11		正弦波 2 方向真円加振	u+v	u 方向：γ200％、v 方向：γ200％ ×3cyc.×7 回 （累積変形 57.4m）	5	4
12		基本特性 7	u	γ100％×4cyc.	5	80
-		試験体冷却				
13		正弦波 1 方向大振幅	v	γ300％×3cyc.	5	4
14		正弦波 1 方向大振幅	v	γ350％×2cyc.	5	4
15		正弦波 1 方向大振幅	v	γ400％×2cyc.	5	4

(5) 実験結果

1) 力学特性値の算出方法

実験における鉛プラグ入り積層ゴムの特性値である降伏荷重 Qd、降伏後剛性 Kd、等価減衰定数 Heq および履歴吸収エネルギーΔW は、図 2.2.1-6 および式(2.2.1-1)～(2.2.1-3)に基づき算定する。

降伏荷重 Qd は、荷重変形関係において正負の切片荷重の絶対値平均で評価する。また、荷重変形関係において、各加力試験における変位が、せん断ひずみ振幅：±γ max の 1/2 ひずみ時の点を結ぶ直線の傾きをその荷重変形関係における降伏後剛性とし、荷重変形関係の上側と下側の降伏後剛性（K_{du}, K_{dd}）の平均を、その荷重変形関係における降伏後剛性 Kd とする。なお、Qd、Kd の時刻歴結果は、3 サイクル目の値で除した変化率で評価する。各サイクルの荷重変形関係の描く面積を履歴吸収エネルギーを ΔW とし、各加振ケースの履歴面積の累積値を累積履歴吸収エネルギーΣΔW とする。

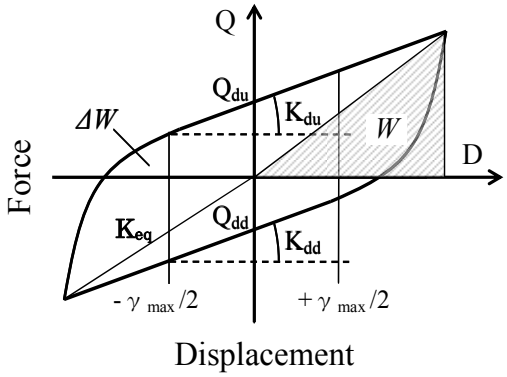


図 2.2.1-6 力学特性値算出の定義

降伏荷重　$Q_d = \dfrac{|Q_{du}| + |Q_{dd}|}{2}$　（2.2.1-1）

降伏後剛性　$K_d = \dfrac{|K_{du}| + |K_{dd}|}{2}$　（2.2.1-2）

等価減衰定数　$H_{eq} = \dfrac{1}{4\pi} \cdot \dfrac{\Delta W}{W}$　（2.2.1-3）

2) 出庫試験

図 2.2.1-7 に、出庫試験における荷重変形関係を示す。試験条件は、通常面圧である 15N/mm^2、および本実験における試験面圧である 5N/mm^2 の 2 水準とし、せん断ひずみ±100%、周期 80 秒の正弦波加振を実施した。表 2.2.1-6 に設計値と出庫試験結果の比較を示す。これより、3 サイクル目の降伏荷重 Qd は面圧 15N/mm^2 で 223.3kN であり、設計値に対して-11%となり、検収条件を満たしている。一方、面圧 5N/mm^2 における 3 サイクル目の Qd は 201.4kN であった。

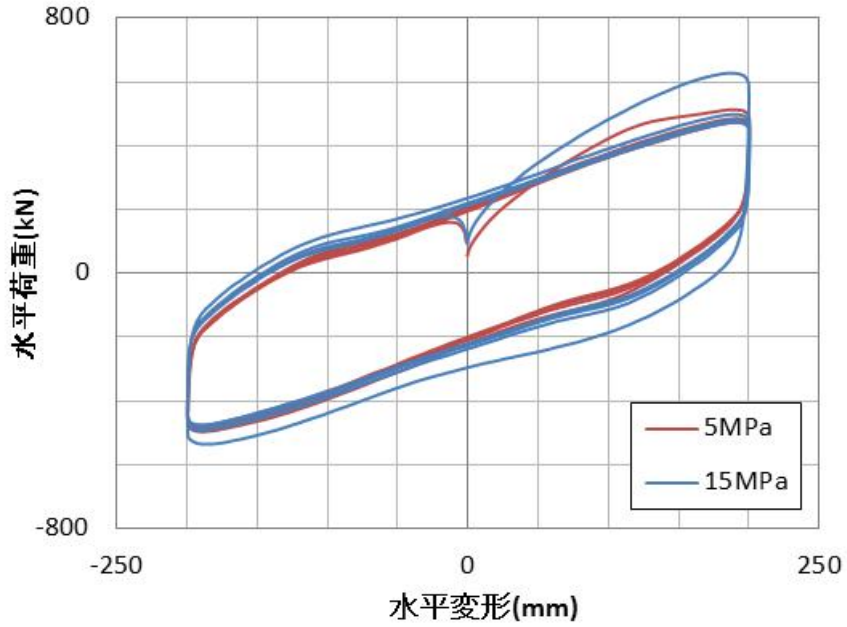


図 2.2.1-7 出庫試験の荷重変形関係(面圧 15N/mm^2、5N/mm^2)

表 2.2.1-6 設計値と出庫試験結果の比較

	面圧 (N/mm^2)	降伏荷重 Qd(kN)	等価剛性 Keq(kN/mm)	降伏後剛性 Kd(kN/mm)	等価減衰定数 Heq(%)
設計値	15	250.4	2.83	-	26.5
出庫試験 15MPa	15	223.3	2.56	1.428	27.4
出庫試験 5MPa	5	201.4	2.58	1.570	24.7

3) 基本特性試験

図 2.2.1-8 に出庫試験と加振前の基本特性試験（基本特性 1）の結果をあわせて示す。試験面圧は双方とも 5N/mm^2、周期は 80 秒である。なお、水平荷重は試験体温度 20℃で温度補正をしたものとする。荷重変形関係は概ね一致しているものの、基本特性 1 の温度補正後の 3 サイクル目の降伏荷重 Qd は 212.0kN であり、出庫試験の 201.4kN よりやや大きい。これは、試験機の違いや面圧の微小な変動等による影響と考えられる。

図 2.2.1-9 に各基本特性試験の荷重変形関係を開始時のフランジ温度とあわせて示す。試験体温度の上昇とともに履歴ループが小さくなるが、温度低下に伴い、履歴ループも回復している。

図 2.2.1-10 に、基本特性試験における 3 サイクル目の Qd と加振開始時のフランジ温度の関係を示す。図中には、1 日目の結果の近似曲線をあわせて示している。これより、真円加振後に実施した基本特性試験 7 回目の結果は、近似曲線を大きく下回っていることがわかる。また、図 2.2.1-11 にフランジ温度を 20℃で補正した降伏荷重を示す。図より、真円加振直後の力学性能が他に比べ低下していることは明らかである。以上より、真円加振中に試験体に何らかの損傷が生じた可能性が考えられる。

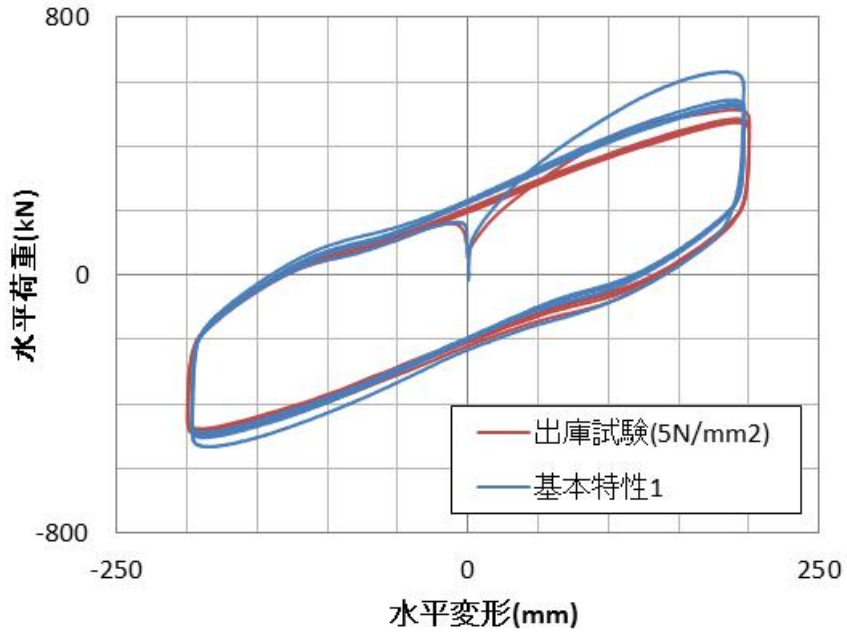
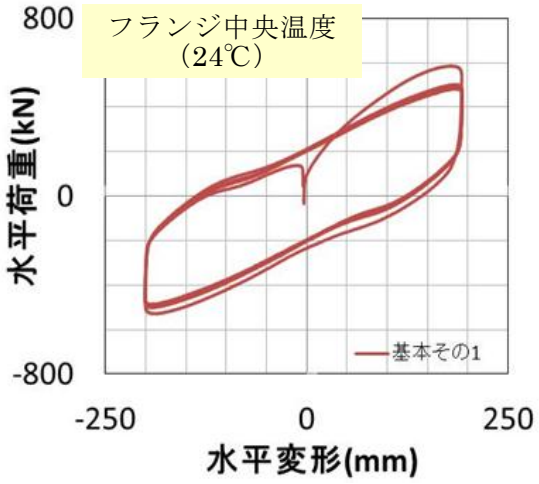
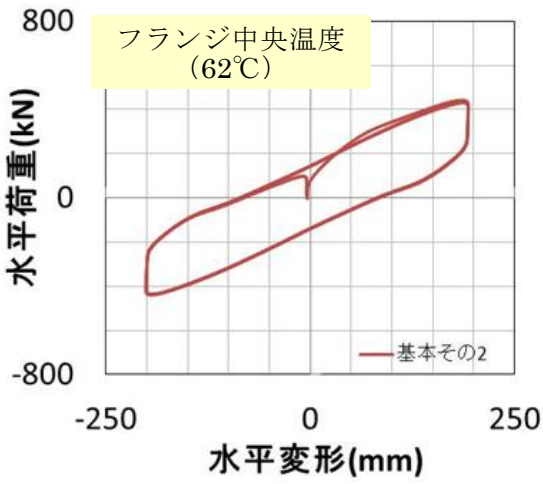


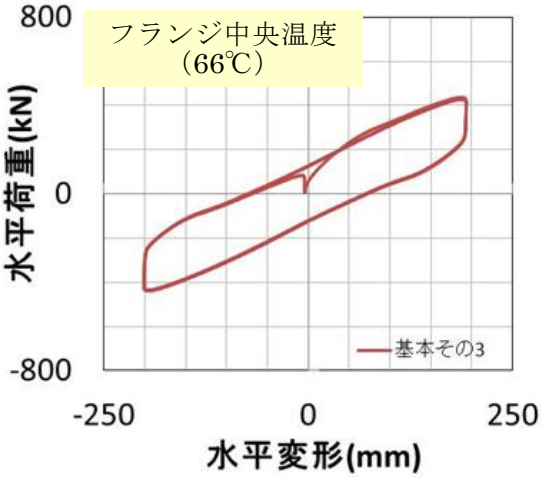
図 2.2.1-8 出庫試験と基本特性試験の比較



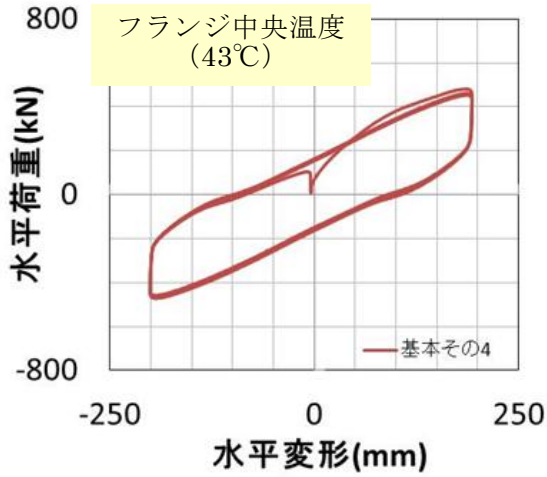
(1) 基本特性 1：実験前／1 日目



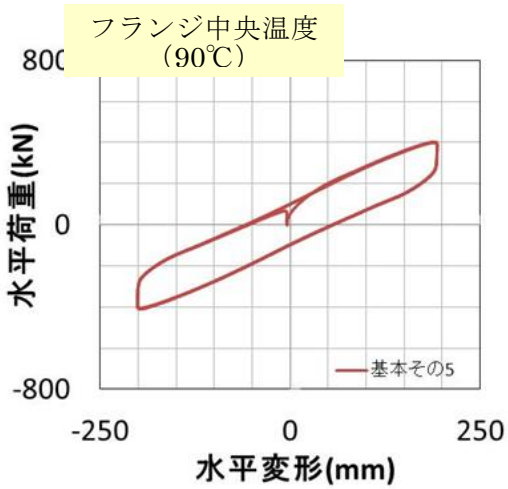
(2) 基本特性 2：正弦波 1 方向直後／1 日目



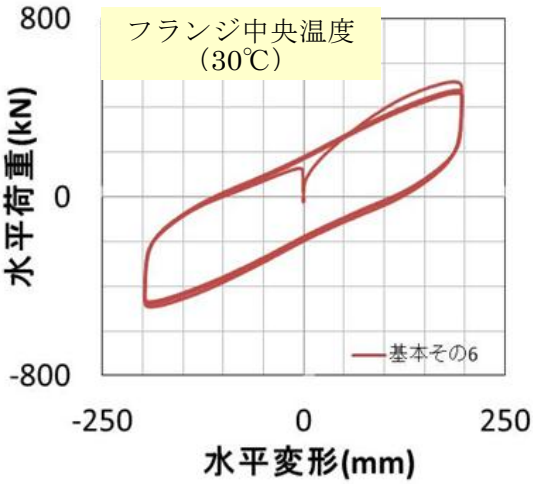
(3) 基本特性 3：地震応答波加振直後／1 日目



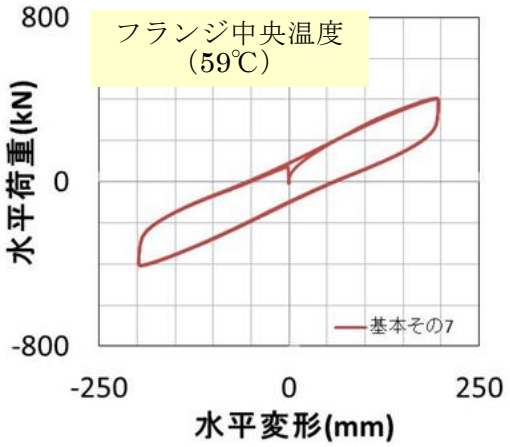
(4) 基本特性 4：楕円加振直前／1 日目



(5) 基本特性 5：楕円加振直後／1 日目



(6) 基本特性 6：真円加振直前／2 日目



(7) 基本特性 7：真円加振直後／2 日目

図 2.2.1-9 基本特性の変化

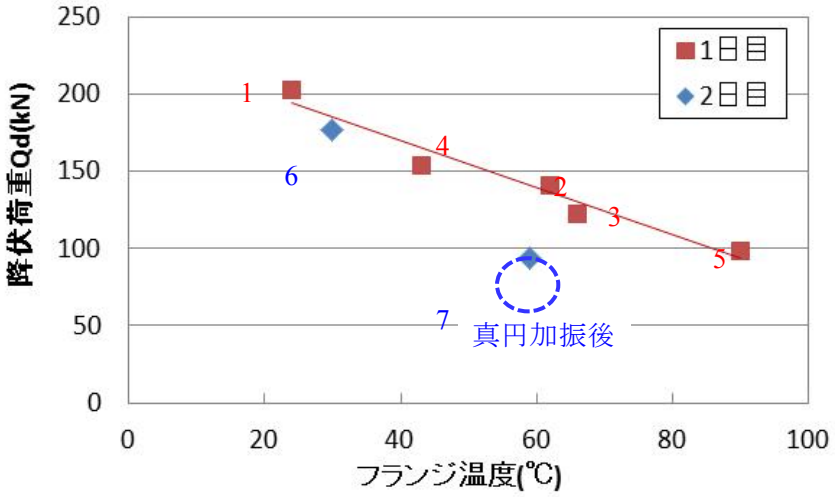


図 2.2.1-10 フランジ温度と降伏荷重の関係

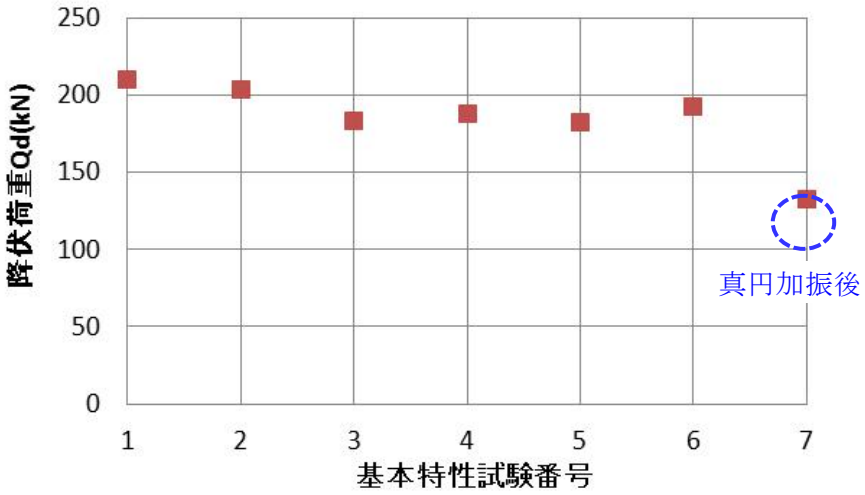


図 2.2.1-11 温度補正後の降伏荷重

4) 正弦波 1 方向多数回繰返し加振

写真 2.2.1-4 に 400 ㎜変形（せん断ひずみ 200%）時の試験体写真を示す。図 2.2.1-12 に正弦波 1 方向多数回繰返し試験の荷重変形関係を示す。繰り返し回数が増すごとに降伏荷重が低下し履歴ループが小さくなっているものの、安定したループを描いている。

図 2.2.1-13 に降伏荷重 Qd および降伏後剛性 Kd の変化を示す。なお、3 サイクル目の値を 1 として基準化している。Qd は、震動台性能により 5 サイクル毎にインターバルがある都合上、インターバル毎に回復しているが、初期サイクルで Qd が急激に低下し、それ以降の低下は緩やかである傾向が見られる。Qd は最終サイクルで 55%まで低下した。Kd の変化は Qd に比べ小さい。

写真 2.2.1-4　400mm 変形時の試験体

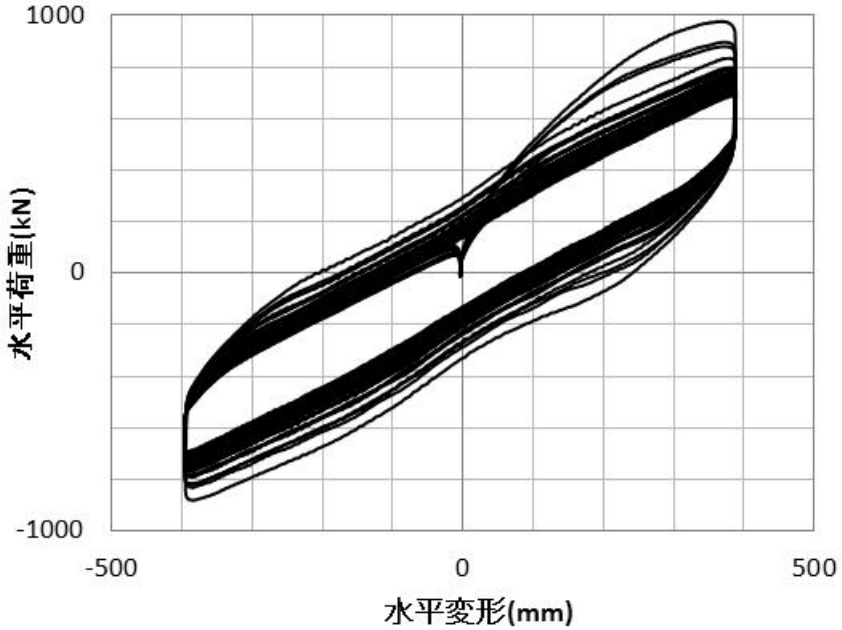
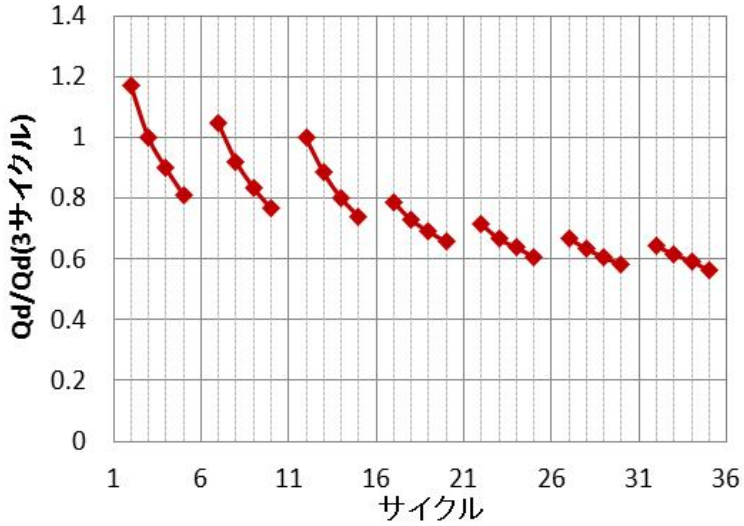
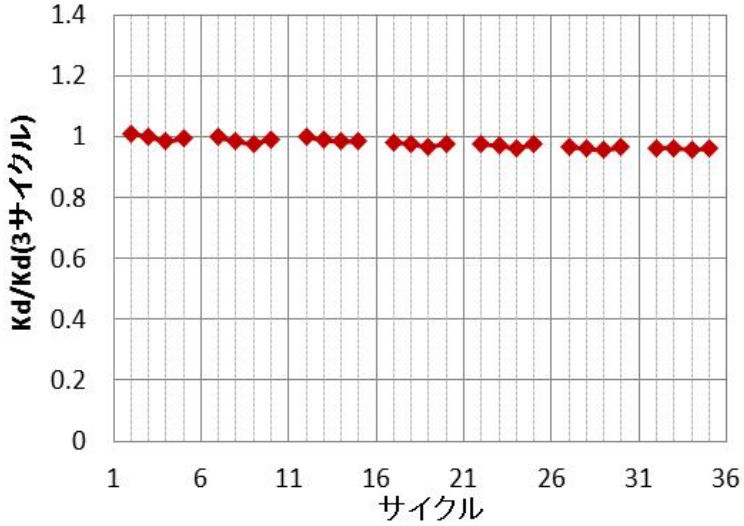


図 2.2.1-12 正弦波 1 方向多数回繰返し試験の荷重－変形関係
（周期 4 秒、せん断ひずみ±200%、35 サイクル）



(a) 降伏荷重 Qd



(b)降伏後剛性 Kd

図 2.2.1-13　力学特性値の変化

（正弦波 1 方向多数回繰返し加振、せん断ひずみ 200%）

図 2.2.1-14 に降伏荷重 Qd を鉛プラグの断面積で除した降伏せん断応力 τy と鉛プラグ単位体積当たりの累積エネルギーE/V（＝履歴吸収エネルギーΔW／鉛プラグ体積）の関係を示す。降伏せん断応力については加振初期では設計で用いられる 8.33N/mm^2 よりも大きいが、徐々に低下し、加振終了時には 4N/mm^2 程度に至っている。

図 2.2.1-15 に正弦波 1 方向加振時の温度計測結果を示す。これより、鉛中央温度は加振開始と同時に急上昇し、加振が終了すると直ちに温度が低下し始めていることがわかる。これに対し、鉛上部やフランジ中央の温度上昇は緩やかで、加振終了後も温度が上昇し続けている。鉛中央で発生した熱が、徐々に鉛上部やフランジに熱伝導されているためと推察される。なお、フランジ端部や被覆ゴム内部の温度はほとんど上昇しなかった。

正弦波 1 方向加振では、加振中に鉛上部の熱電対が断線し、鉛中央の熱電対の抜け出しが確認されたため、以降のケースについてはこの 2 計測点は参考値とする。

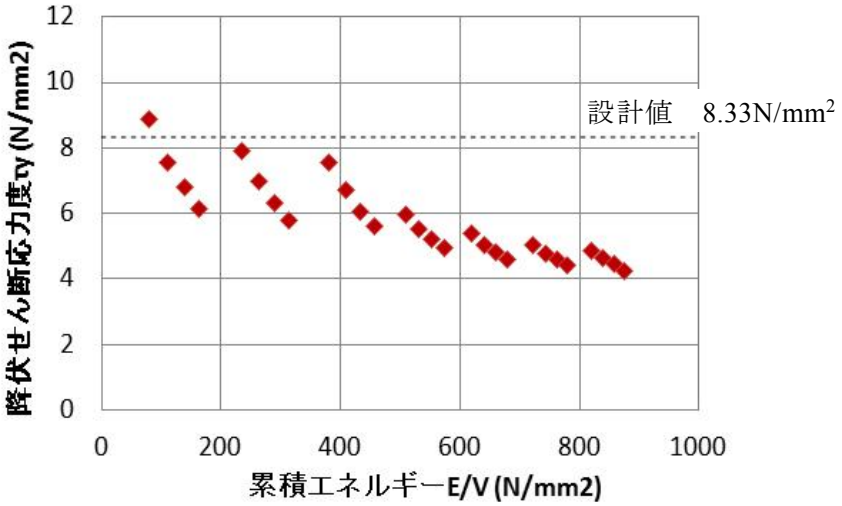


図 2.2.1-14 降伏せん断応力度τy と鉛プラグ単位体積当たりの累積エネルギーE/V 関係

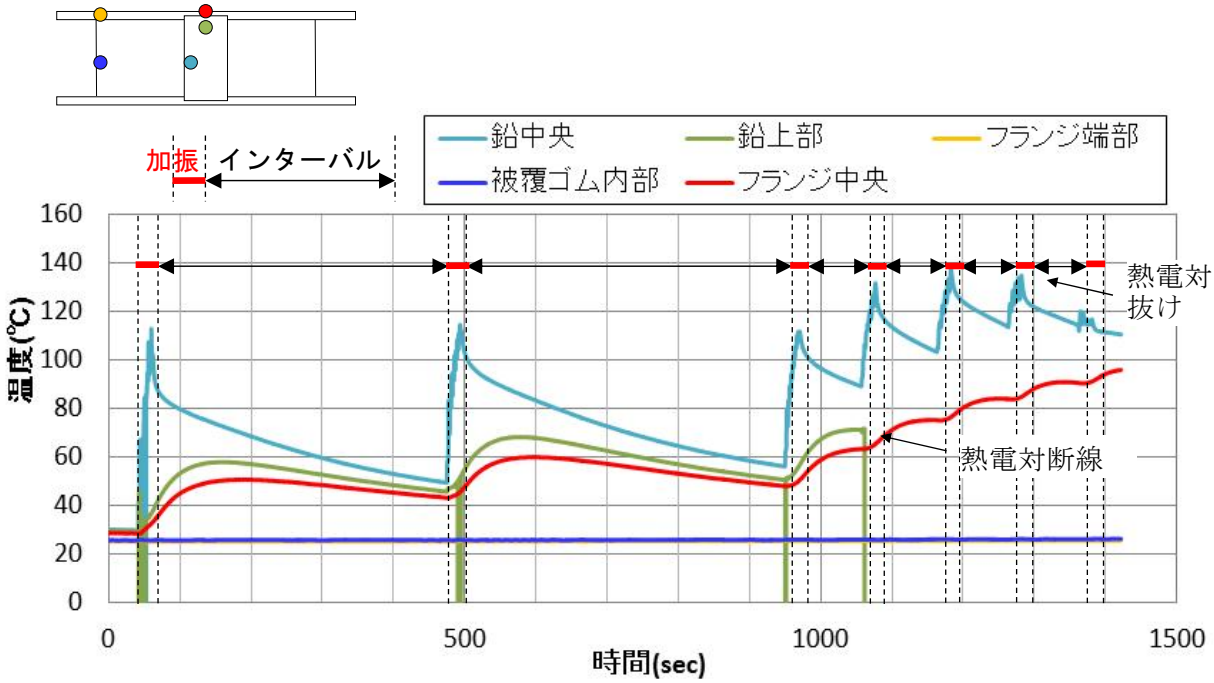
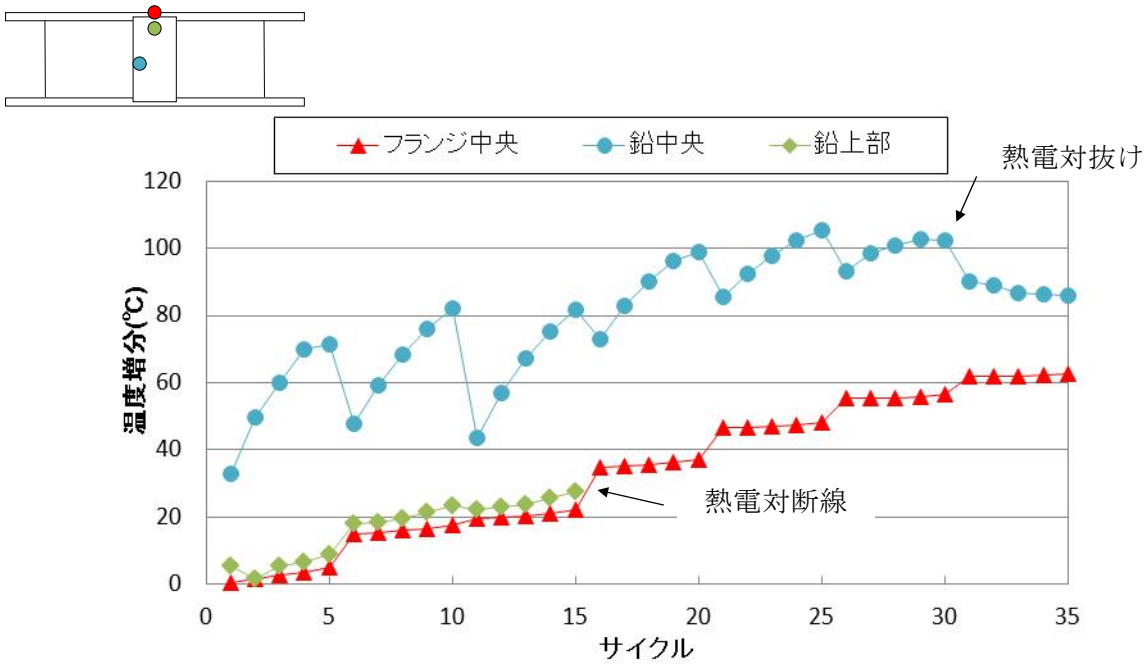
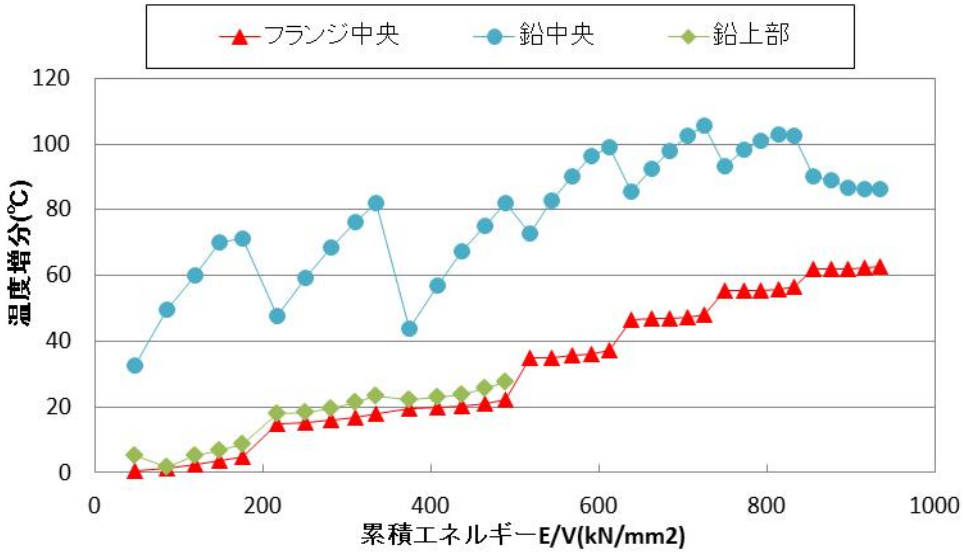


図 2.2.1-15 温度の推移
（正弦波 1 方向多数回繰り返し）

図 2.2.1-16 に加振サイクル、鉛プラグ単位体積当たりの累積エネルギーE/V と試験体温度の関係を示す。これより、加振サイクルと E/V 値の関係は概ね同等である。鉛中央は加振インターバルにより温度低下するが、鉛上部とフランジ中央はサイクル数、累積エネルギーに比例して温度が上昇している。



(a)加振サイクルと温度増分関係



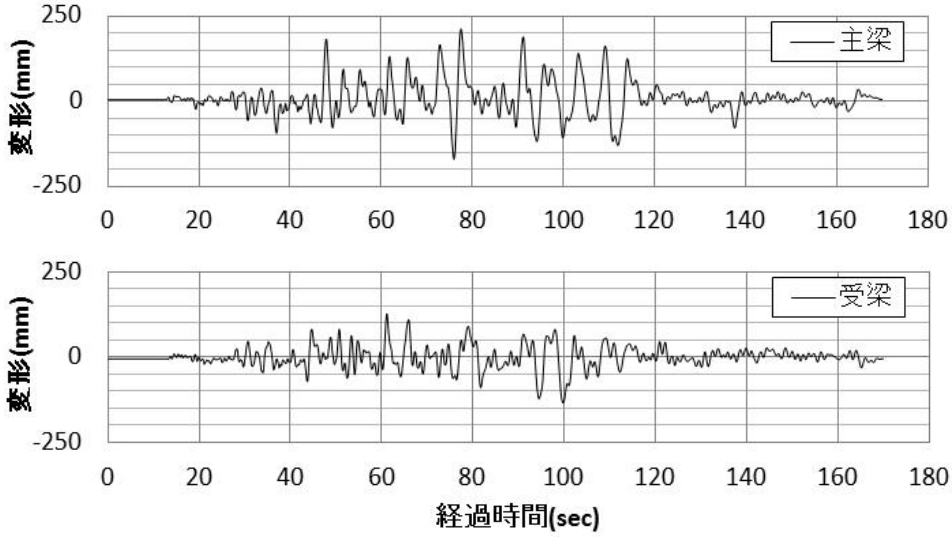
(b)累積エネルギーE/V と温度増分関係

図 2.2.1-16 加振サイクル、累積エネルギーE/V と試験体温度の関係

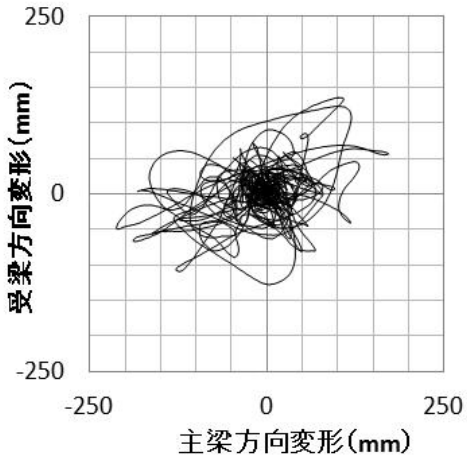
5) 地震応答波加振

図 2.2.1-17 に地震応答波加振の変位時刻歴波形および 2 方向加振の変位軌跡を示す。図 2.2.1-18 に地震応答波 1 方向加振および 2 方向加振(1 回目)の主梁方向における荷重変形関係、図 2.2.1-19 に変位振幅がせん断ひずみ 50%を超えたサイクルにおける降伏荷重 Qd を、図 2.2.1-20 に累積履歴吸収エネルギーΣΔW を示す。なお、1 方向加振時の加振開始時フランジ中央温度は 33.4℃、2 方向加振では 42.6℃である。

図 2.2.1-18 および図 2.2.1-19 より、直交方向振幅および温度上昇の影響により、主梁方向の荷重変形関係は 2 方向加振の方が小さくなっていることがわかる。同じ変位振幅における 1 方向加振と 2 方向加振の Qd の差は、2 方向加振の受梁方向の変位振幅が比較的大きい 50 秒～100 秒の間で顕著であり、温度上昇だけでなく、直交方向の変位振幅が Qd に与える影響は大きいと言える。1 加振の累積履歴吸収エネルギーΣΔW は、1 方向加振では 1.6×10^6(kN*mm)、2 方向加振では 2.2×10^6(kN*mm)であった。

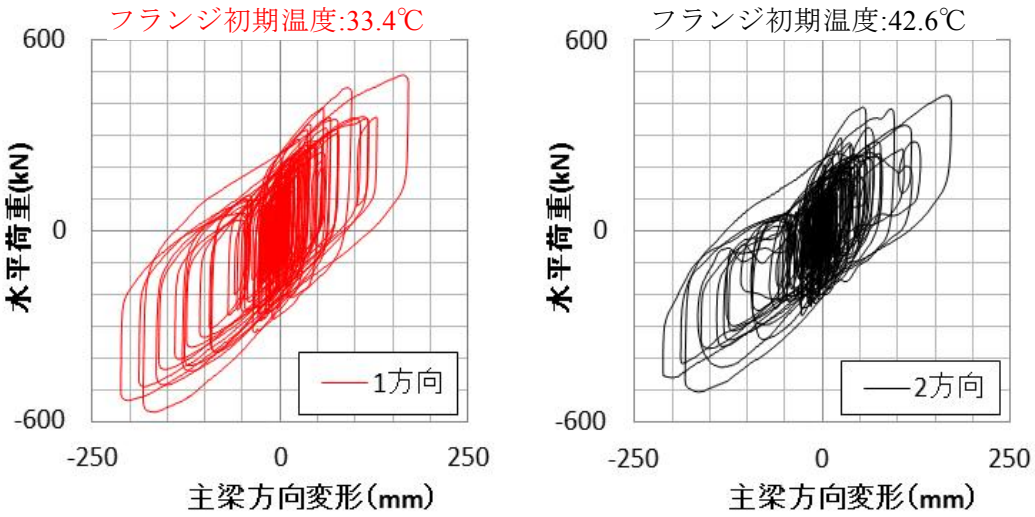


(a)時刻歴波形



(b)変位軌跡（2 方向加振）

図 2.2.1-17 地震応答波加振の時刻歴波形



(a)1 方向加振　主梁方向　　(b)2 方向加振　主梁方向

図 2.2.1-18 地震応答波 1 方向および 2 方向加振の荷重-変形関係

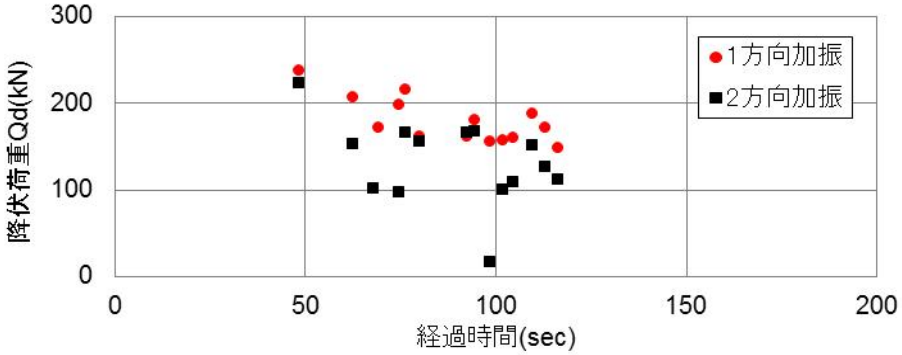


図 2.2.1-19 地震応答波加振の降伏荷重 Qd の推移

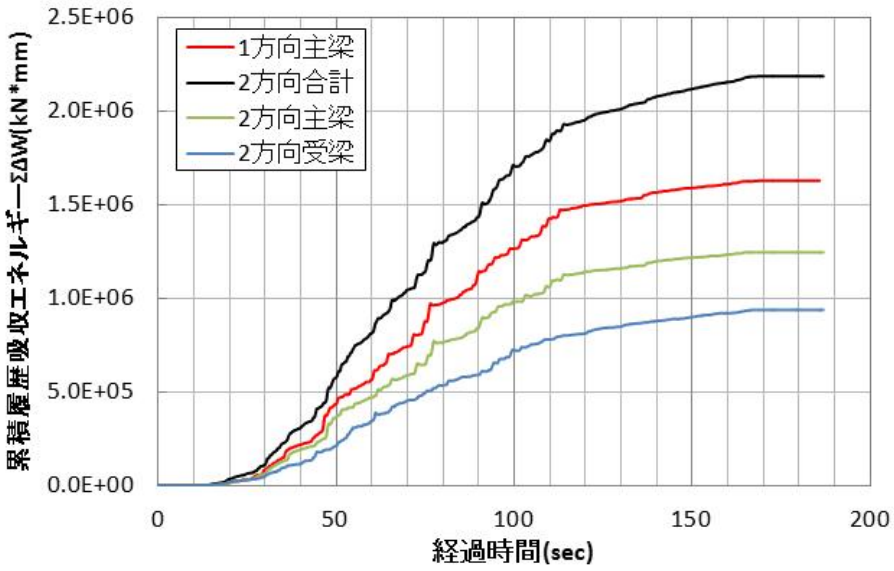
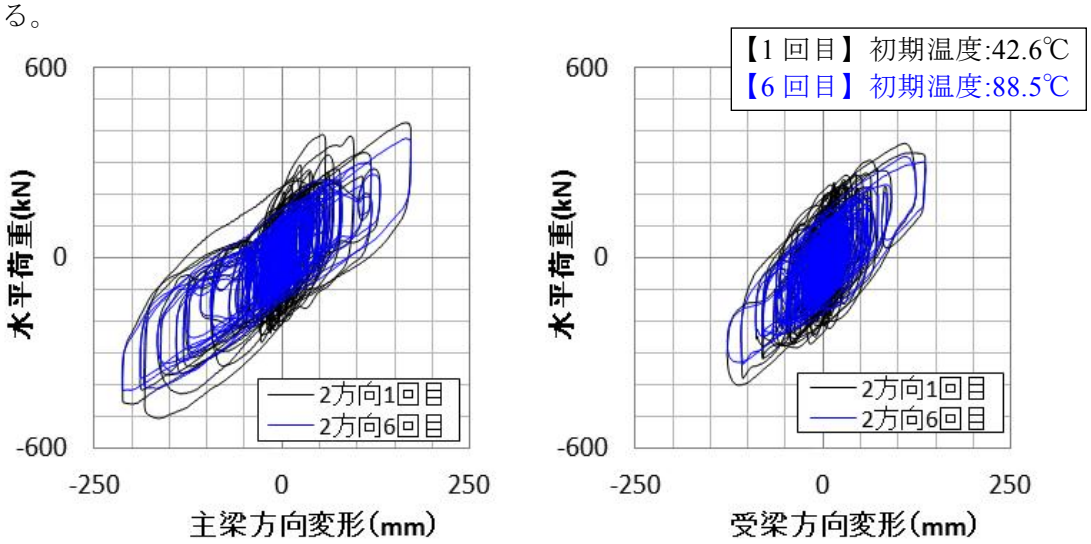


図 2.2.1-20 累積履歴吸収エネルギーΣΔW（1 加振分）

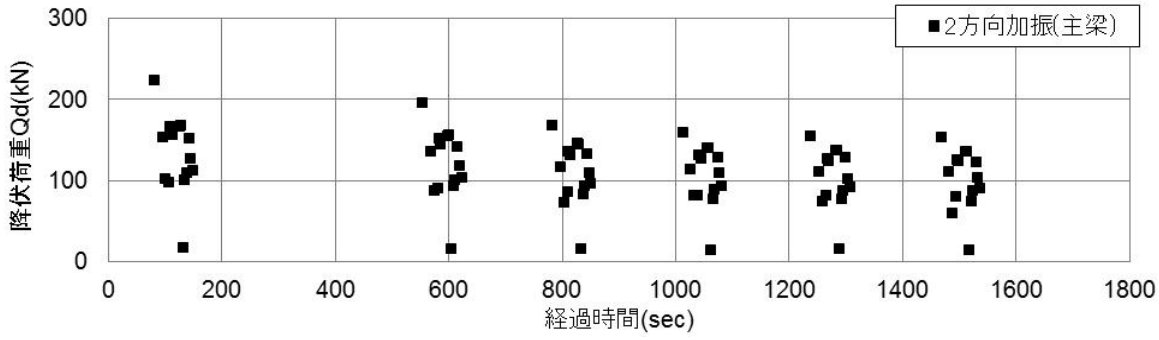
図 2.2.1-21 に 2 方向加振の初回（1 回目）と最終回（6 回目）の荷重-変形関係をあわせて示す。また、図 2.2.1-22 には変位振幅がせん断ひずみ 50%を超えたサイクルにおける Qd を示す。なお、加振開始時のフランジ中央温度は初回が 42.6℃、最終回が 88.5℃である。

荷重変形関係の 6 回目の比較から、繰り返しによる荷重の低下が認められる。Qd は主梁方向受梁方向ともに加振回数とともに低下しているが、初期の回数における低下に比べ、後半の低下は緩やかであることがわかる。この傾向は、正弦波 1 方向多数回繰返し加振でも見られた傾向である。

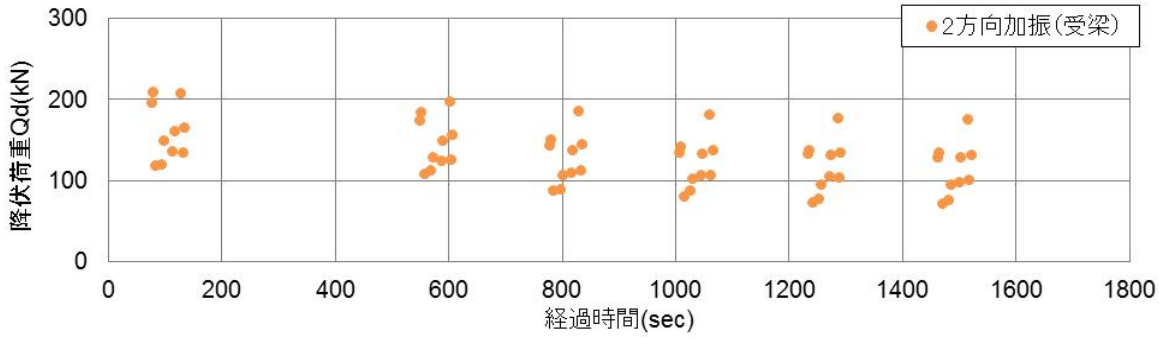


(a)2 方向加振　主梁方向　　(b)　2 方向加振　受梁方向

図 2.2.1-21 地震応答波 2 方向加振の荷重-変形関係



(a)　主梁方向



(b)受梁方向

図 2.2.1-22 地震応答波 2 方向加振の Qd の推移

図 2.2.1-23、2.2-1-24 に地震応答波 1 方向加振および 2 方向加振における試験体の温度計測結果を示す。なお、鉛中央の温度については、熱電対の抜け出しによる位置ずれが確認されていることから、参考値とする。試験体の温度は、振幅が大きくなる 50 秒～120 秒で上昇するが、その他の部分では大きな温度上昇はない。フランジ中央温度は、1 方向加振で 33.4℃から 49.8℃（温度増分 16.4℃）に上昇し、2 方向加振（1 回目）では 42.6℃から 64.4℃（温度増分 21.8℃）上昇した。鉛中央温度は、熱電対の位置ずれにより鉛プラグ付近のゴム温度を計測していると考えられるが、フランジ温度よりも 10℃程度温度が高い。

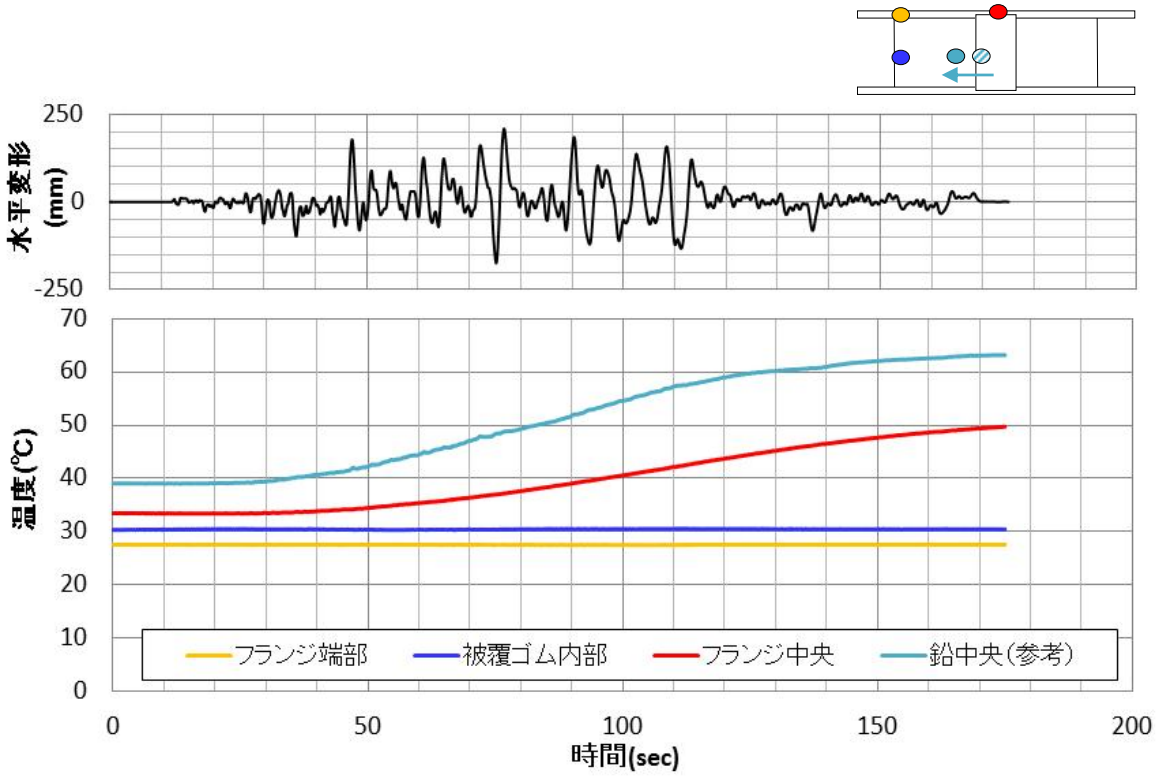


図 2.2.1-23 地震応答波 1 方向加振における温度の推移

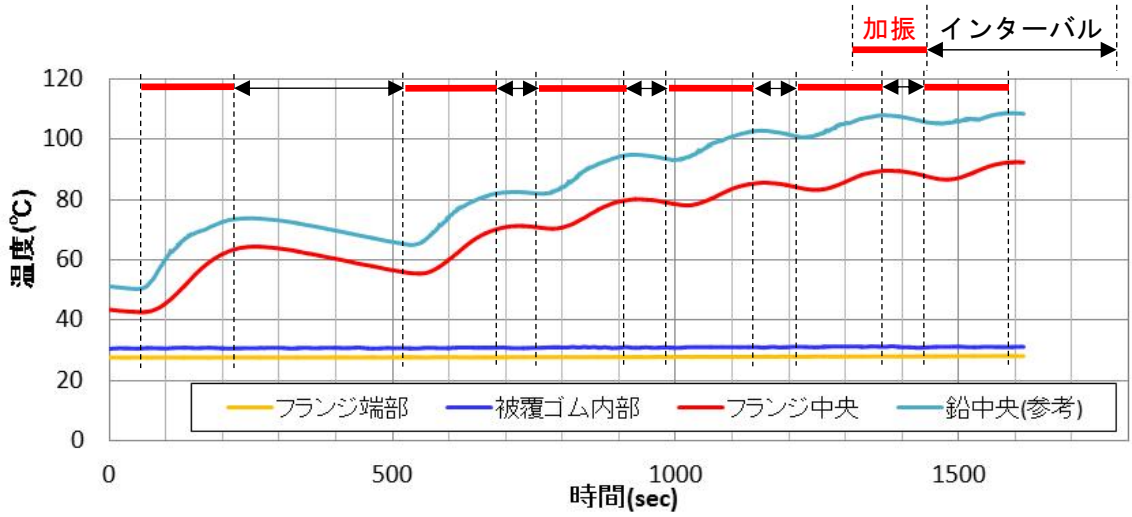
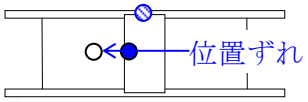


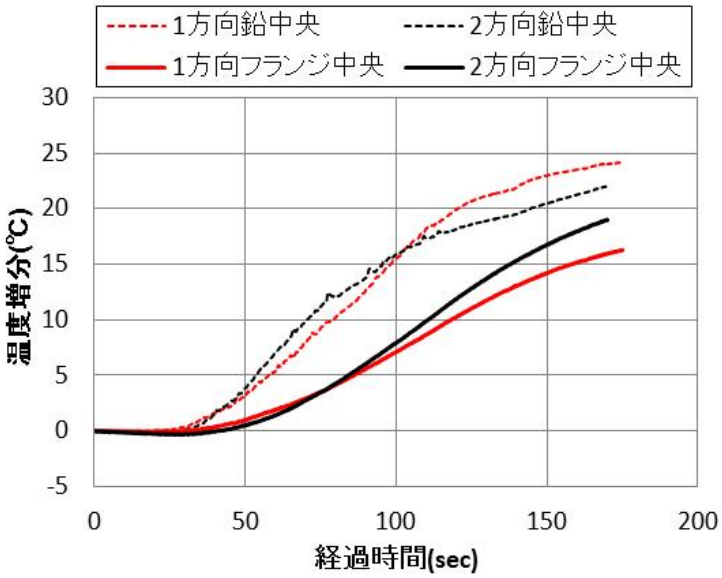
図 2.2.1-24 地震応答波 2 方向加振における温度の推移

図 2.2.1-25 に地震応答 1 方向加振と 2 方向加振の試験体温度と経過時間・累積変形量・鉛プラグ単位体積当たりの累積エネルギーE/V の関係を比較して示す。なお、鉛中央の温度については、熱電対の位置ずれが確認されていることから、参考値とする。

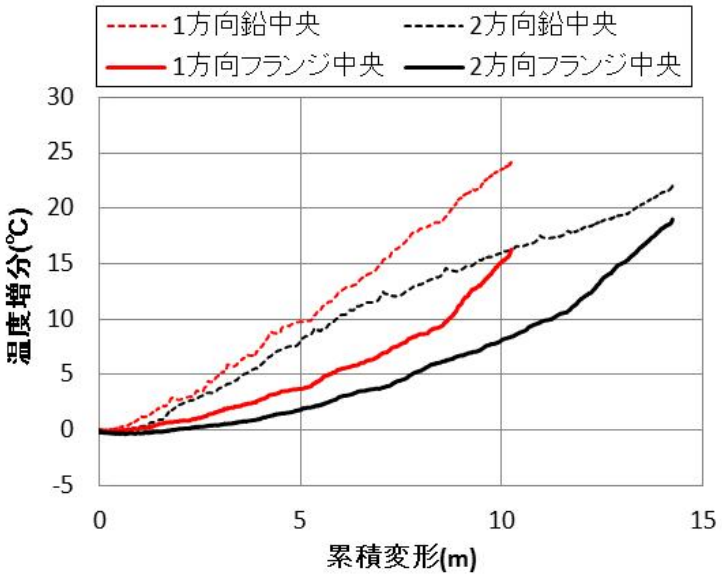
図(a)より、加振振幅が大きい 50～120 秒の間に温度が急増する傾向は 1 方向・2 方向で共通して見られる。図(b)(c)から、同じ累積変形および鉛プラグ単位体積当たりの累積エネルギーE/V における温度増分は 1 方向加振のほうが大きいが、2 方向加振の初期温度が高いことも一因と推察される。本加振は、2 方向加振の受梁方向のせん断ひずみが最大で 70%程度で、2 方向加振が試験体の温度上昇に与える影響は小さかったと考えられる。

1 方向加振	初期温度…鉛中央	39.0℃、フランジ中央 33.4℃
2 方向加振	初期温度…	50.6℃、 42.6℃

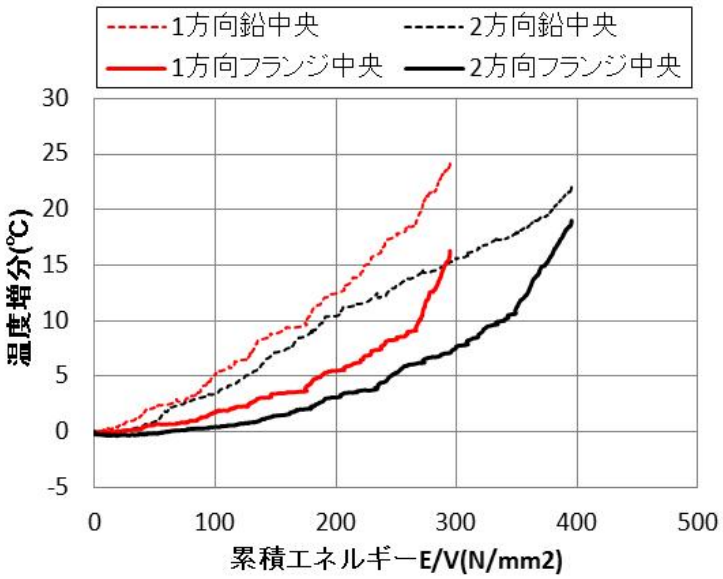




(a)経過時間との関係



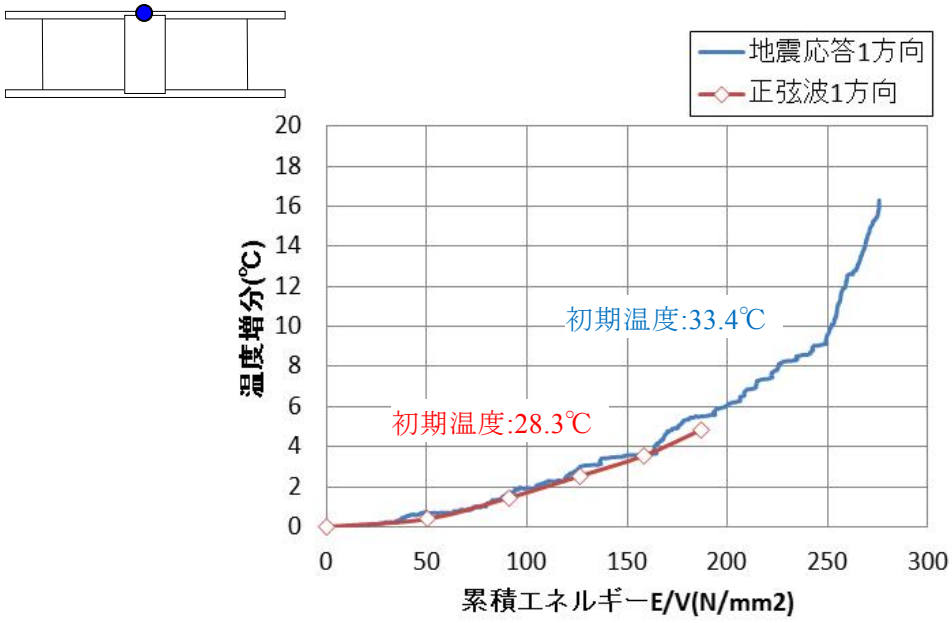
(b)累積変形との関係



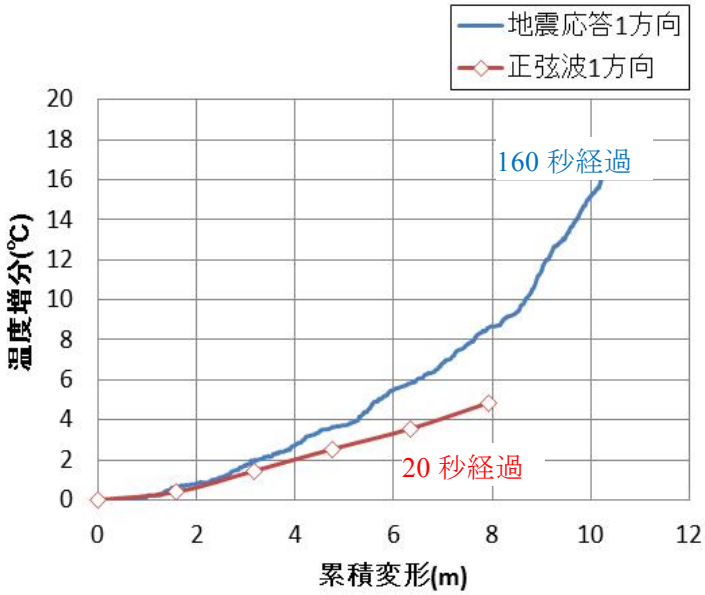
(c)累積エネルギーE/V との関係

図 2.2.1-25 温度増分の比較(地震応答波 1 方向・2 方向)

図 2.2.1-26 に地震応答波 1 方向加振における累積変形・鉛プラグ単位体積当たりの累積エネルギーE/V と温度上昇の関係を正弦波 1 方向加振（1 回目）と比較して示す。累積エネルギーでの比較では温度増分は同等であるが、同じ累積変形における温度増分は正弦波加振が小さい傾向が見られる。これは、同じ累積変形に達する時間が地震応答波加振よりも短いため、加振直後では鉛中央で発生した熱がフランジ上部まで伝達されていないためと考えられる。



(a)累積エネルギーとの関係



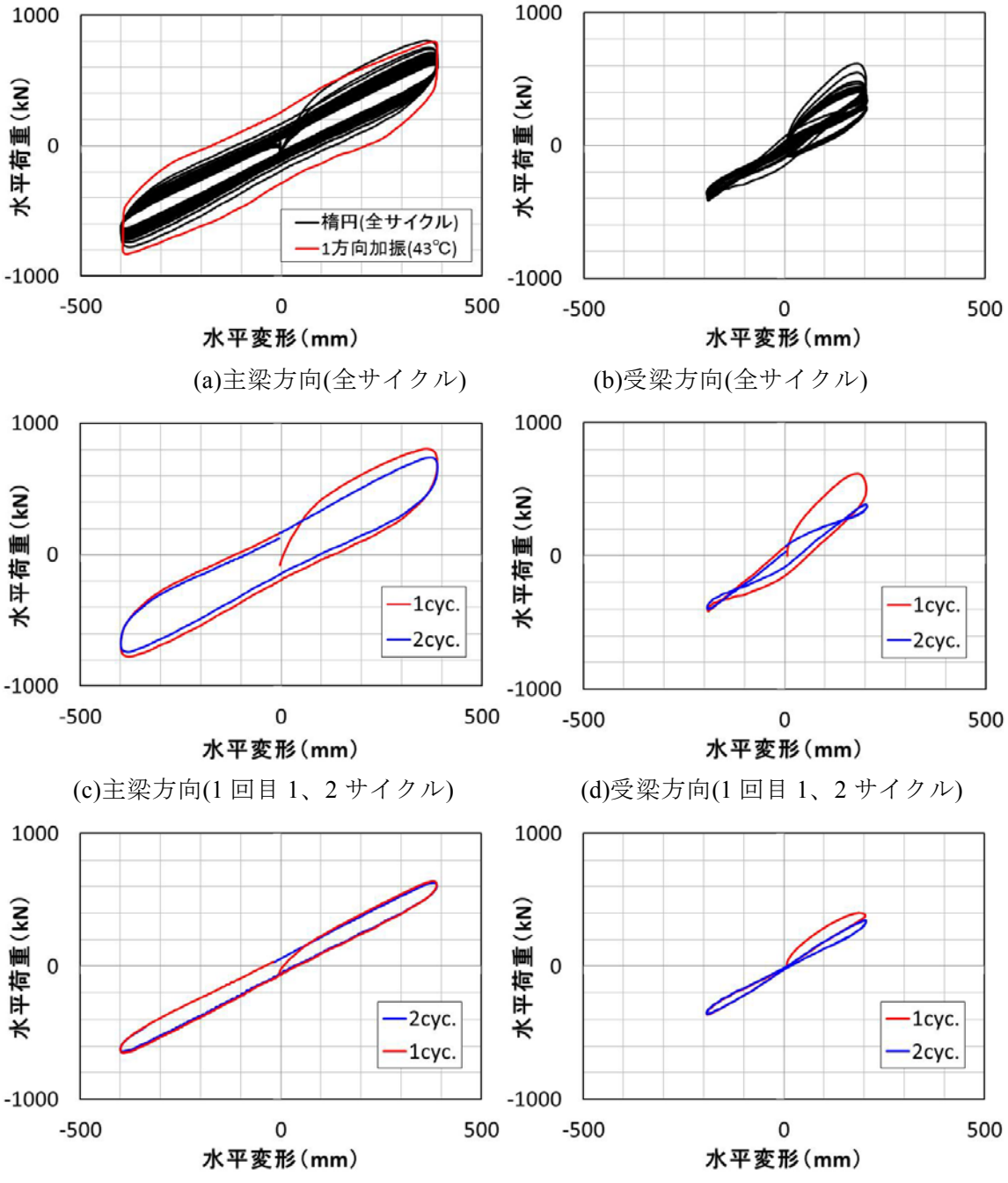
(b)累積変形との関係

図 2.2.1-26 地震応答 1 方向加振と正弦波 1 方向加振のフランジ中央温度増分の比較

6) 正弦波 2 方向多数回繰り返し加振

a) 楕円加振

図 2.2.1-27 に楕円加振における荷重-変形関係を示す。主梁方向の荷重変形関係は安定した履歴ループを描いている。楕円加振は、フランジ中央の温度が 43℃の状態で加振を開始している。そこで、主梁方向の荷重変形関係（図(a)）に、正弦波 1 方向加振においてフランジ中央温度が約 43℃の時のサイクルの荷重変形関係をあわせて示した。これより、正弦波 1 方向加振に比べ履歴面積が小さくなっており、楕円加振における直交方向振幅の影響が確認できる。図(d)(f)より、受梁方向の荷重変形関係はループが交差しており、一時的に負減衰となっていたと考えられる。



(a)主梁方向(全サイクル)　(b)受梁方向(全サイクル)

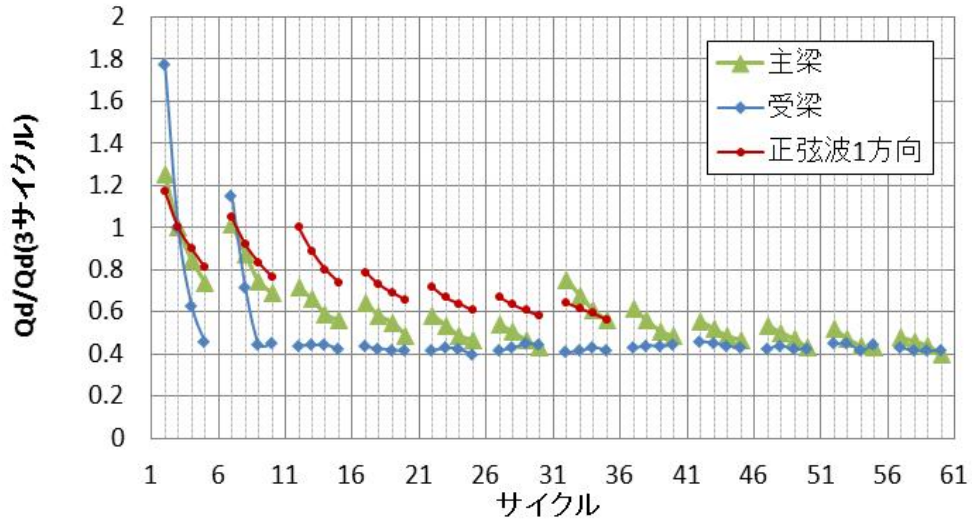
(c)主梁方向(1 回目 1、2 サイクル)　(d)受梁方向(1 回目 1、2 サイクル)

(e)主梁方向(12 回目 1、2 サイクル)　(f)受梁方向(12 回目 1、2 サイクル)

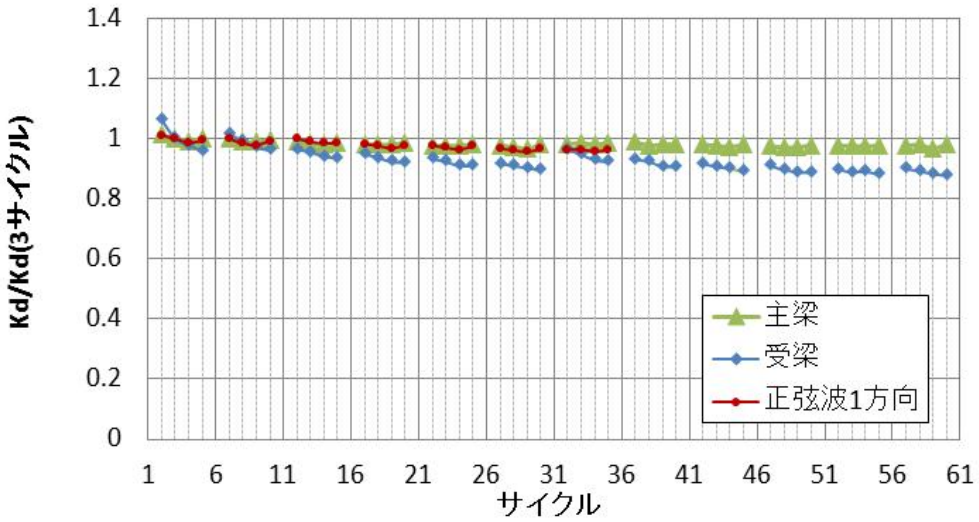
図 2.2.1-27 楕円加振の荷重変形関係

図 2.2.1-28 に楕円加振における加振サイクルと降伏荷重 Qd、降伏後剛性 Kd、等価減衰定数 Heq、履歴吸収エネルギーΔW の関係を示す。図には正弦波 1 方向加振の結果もあわせて示す。

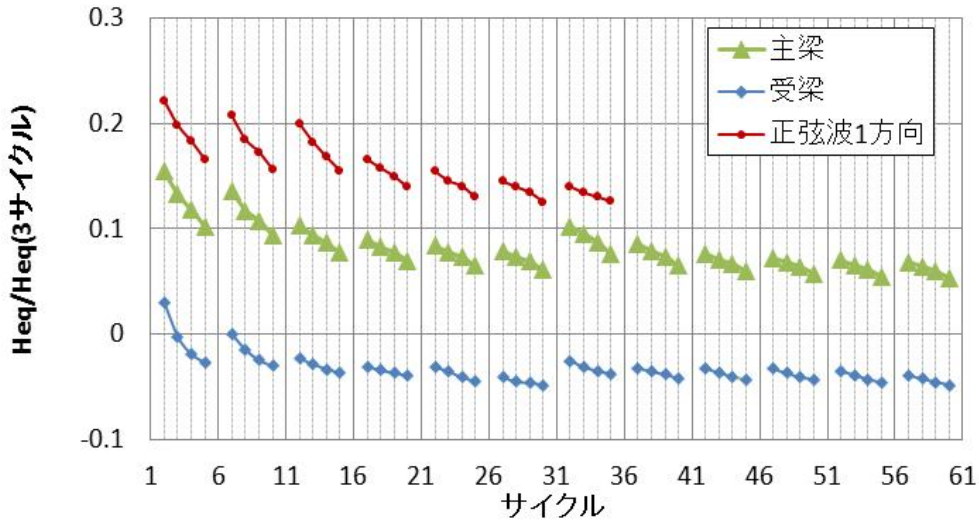
図(a)より、主梁の Qd の変化は初期サイクルでは大きく、それ以降は緩やかである傾向は正弦波加振と同様である。しかし、Qd の低下は正弦波加振よりも大きく、温度上昇や 2 方向加振の影響が伺える。受梁方向の Qd は 2 回目の加振で加振 1 回目の 3 サイクル目に対して 40%近くまで激減したが、それ以降の変化は小さい。主梁方向、受梁方向ともに、最終サイクルまでに Qd は 40%程度まで低下した。図(b)より、主梁方向の Kd は全サイクルに渡り大きく変化していないが、受梁方向はわずかに Kd が低下していることがわかる。図(c)より、正弦波加振における Heq は 13～22%程度であるのに対し、楕円加振の主梁方向の Heq は 5～15%と小さい。また、前述の通り、受梁方向の Heq は負となっており、2 方向加振における減衰定数の評価方法も含め、今後さらなる検討の必要がある。



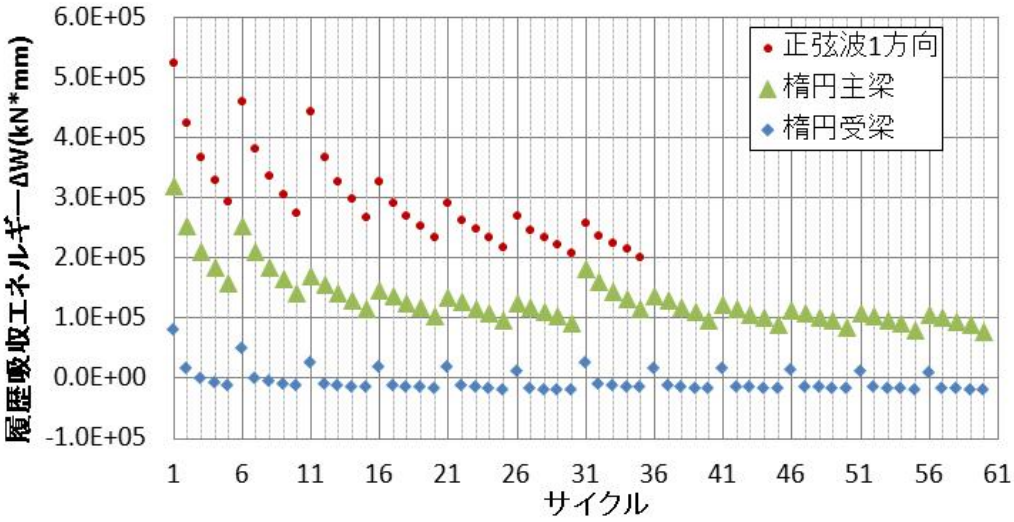
(a) 降伏荷重 Qd



(b)降伏後剛性 Kd



(c)等価減衰定数 Heq



(d)履歴吸収エネルギーΔW

図 2.2.1-28　力学特性値の変化

（楕円加振、せん断ひずみ主梁：200%、受梁 100%）

図 2.2.1-29 に楕円加振における温度計測結果を示す。フランジ端部および被覆ゴム内部は温度上昇は見られないが、フランジ中央温度は加振開始直後に上昇し始め、加振終了も上昇し続けていることがわかる。楕円加振開始時のフランジ中央温度は 43.0℃で最高温度は 121.4℃であった（温度増分 78.4℃）。楕円加振全サイクルの累積履歴吸収エネルギー $\Sigma \Delta W$ は 7.4×10^6(kN*mm)であり、これを鉛プラグ熱容量で除した値は 429.2℃となる。

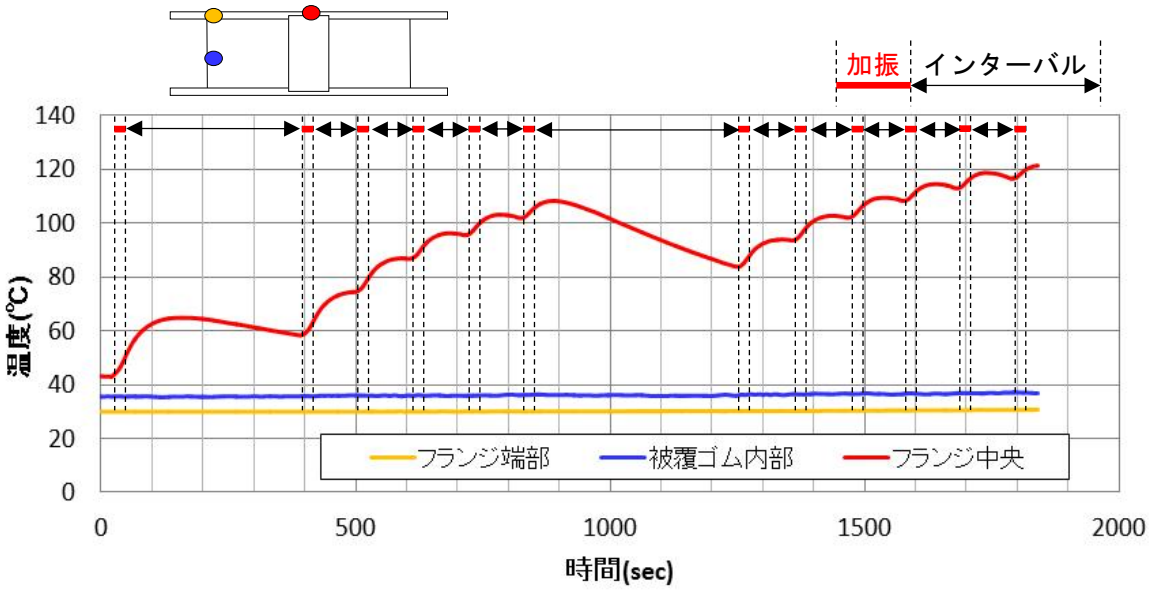
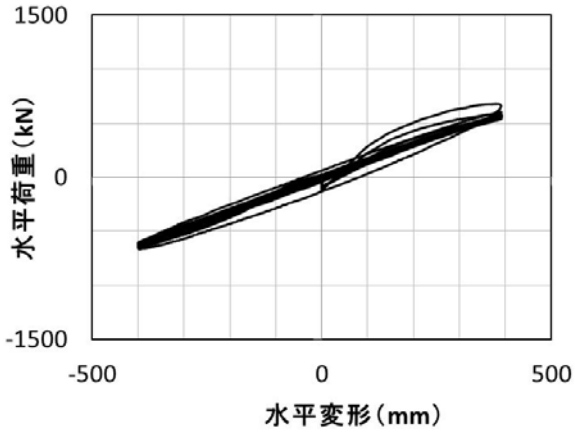


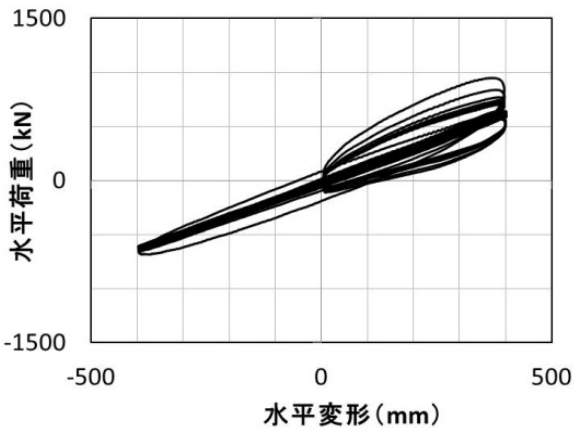
図 2.2.1-29 楕円加振における温度の推移

b) 真円加振

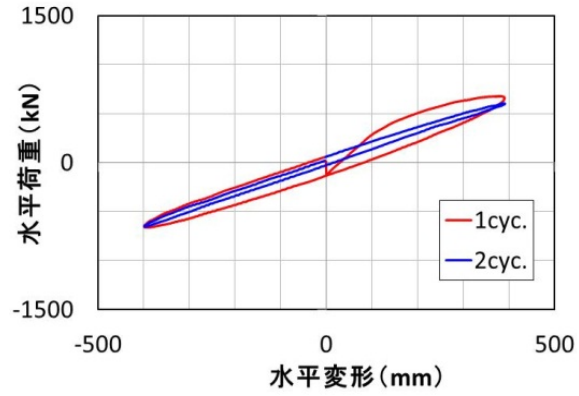
図 2.2.1-30 に真円加振の荷重変形関係を、図 2.2.1-31 に真円加振における加振サイクルと降伏荷重 Qd、降伏後剛性 Kd、等価減衰定数 Heq、履歴吸収エネルギーΔW の関係を示す。真円加振では、主梁方向・受梁方向ともに履歴面積の殆どない荷重変形関係が得られた。また、Qd は他の加振ケースとは異なり、サイクルによる増減が大きい。サイクルによっては、前サイクルよりも Qd が大きくなるケースが見られる。受梁方向のΔW、Heq については、楕円加振と同様に負の値となる傾向が見られる。



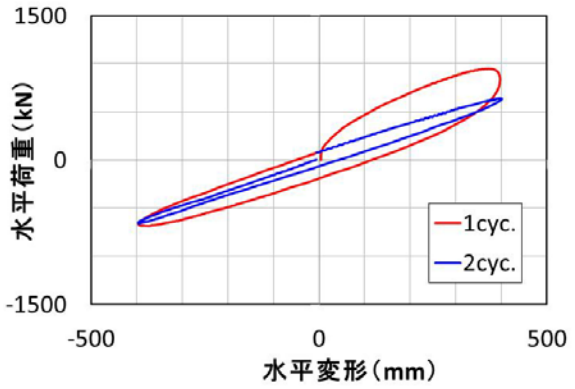
(a)主梁方向(全サイクル)



(b)受梁方向(全サイクル)

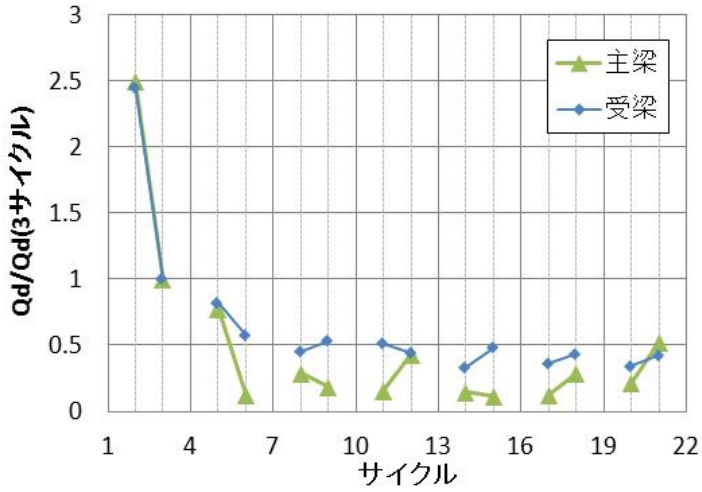


(c)主梁方向(1、2 サイクル)

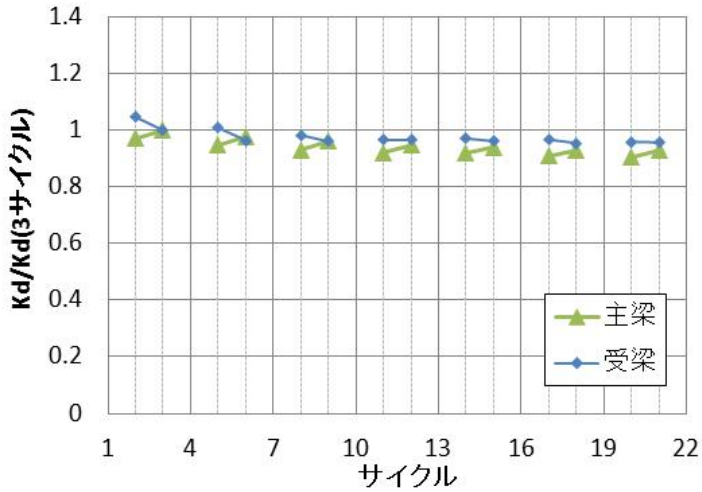


(d)受梁方向(1、2 サイクル)

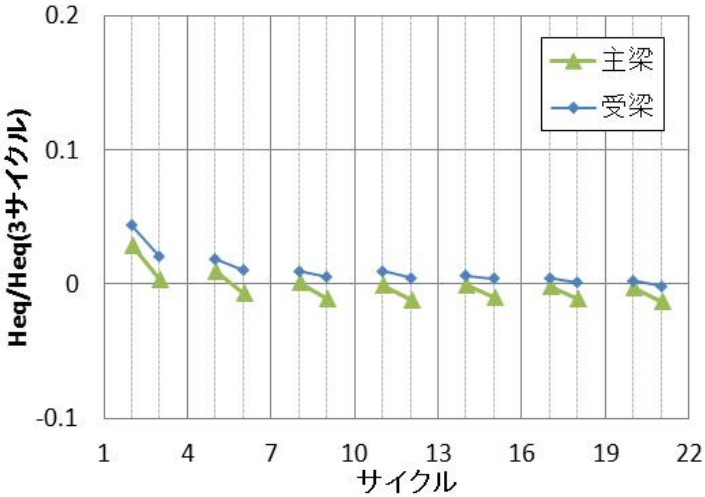
図 2.2.1-30 真円加振の荷重変形関係



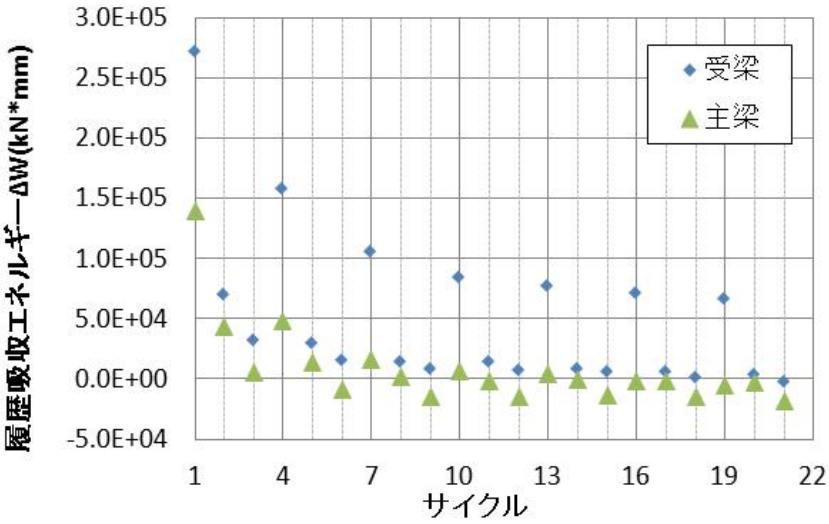
(a) 降伏荷重 Qd



(b)降伏後剛性 Kd



(c)等価減衰定数 Heq



(d)履歴吸収エネルギーΔW

図 2.2.1-31 力学特性値の変化

（真円加振、せん断ひずみ主梁：200%、受梁 200%）

図 2.2.1-32 に真円加振における温度計測結果を示す。フランジ端部および被覆ゴム内部では温度は上昇していないが、フランジ中央温度は加振開始直後に上昇し始め、加振終了も上昇し続けていることがわかる。真円加振開始時のフランジ中央温度は 31.0℃で最高温度は 70.1℃であった（温度増分 39.1℃）。真円加振全サイクルの累積履歴吸収エネルギーΣΔW は 1.2×10^6(kN*mm)であり、これを鉛プラグ熱容量で除した値は 71.5℃である。

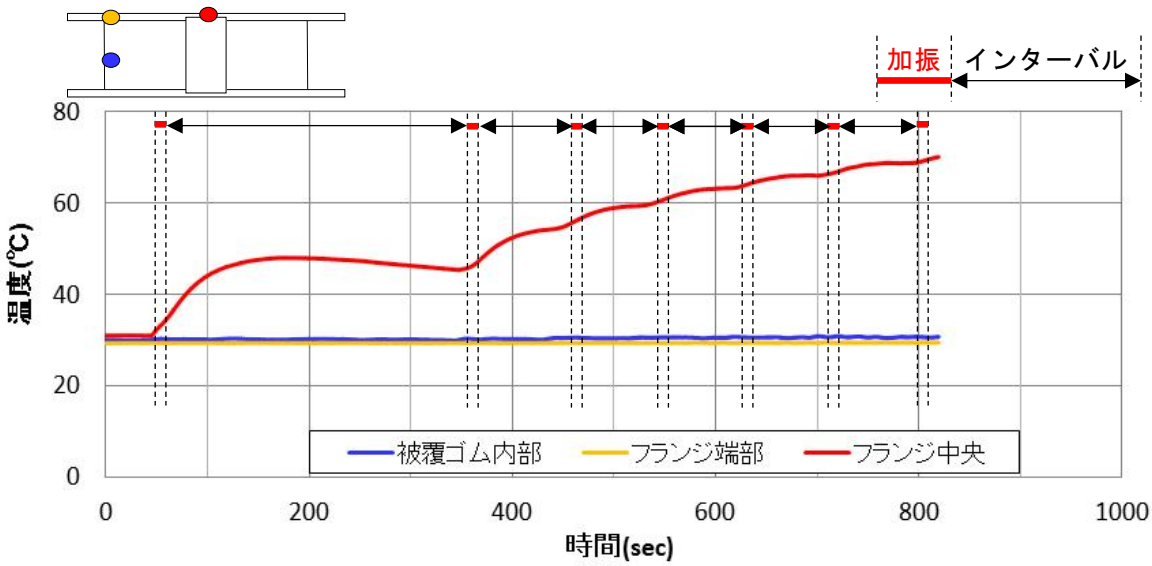


図 2.2.1-32 真円加振における温度の推移

7) 正弦波 1 方向大振幅加振

図 2.2.1-33 に荷重変形関係を、図 2.2.1-34 に鉛直沈み込み量を示す。また、写真 2.2.1-5～7 に、試験体の破断状況写真を示す。図 2.2.1-33 より、変形約 500mm（せん断ひずみγ＝約 250%）まで荷重-変形関係は概ね線形であるが、それ以降はハードニングが顕著になっている。鉛直方向の沈み込み量は、γ＝300%で最大 1.3mm、γ＝350%で 2.8mm、γ＝400%で 4.7mm であった。

γ＝300%、350%では、試験体に異常は認められず、安定した履歴を描いている。γ＝400%では、+400%を経験後、-399%で積層ゴムが破断した。破断時の水平荷重は 1614kN であった。なお、破断箇所は上から 4 層目のゴムである。

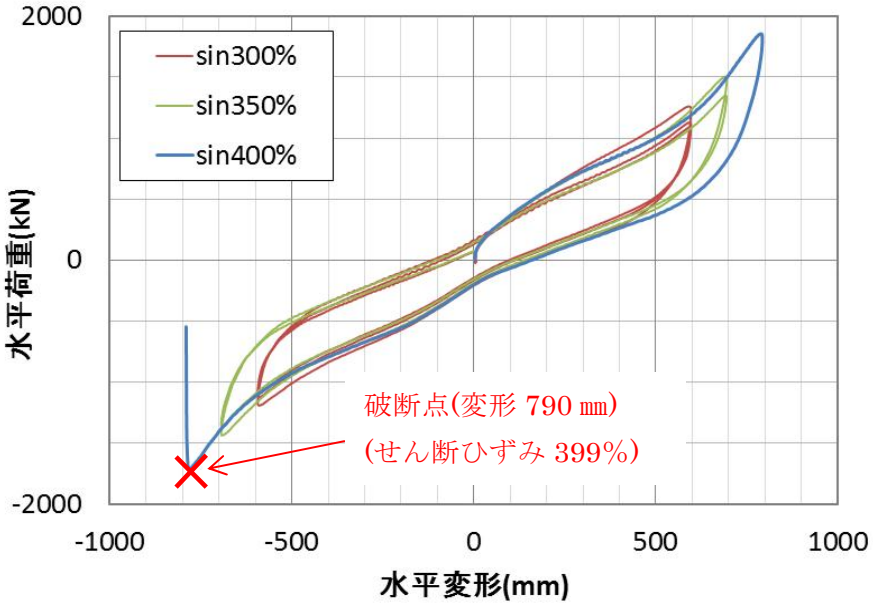


図 2.2.1-33 正弦波 1 方向大振幅加振の荷重－変形関係

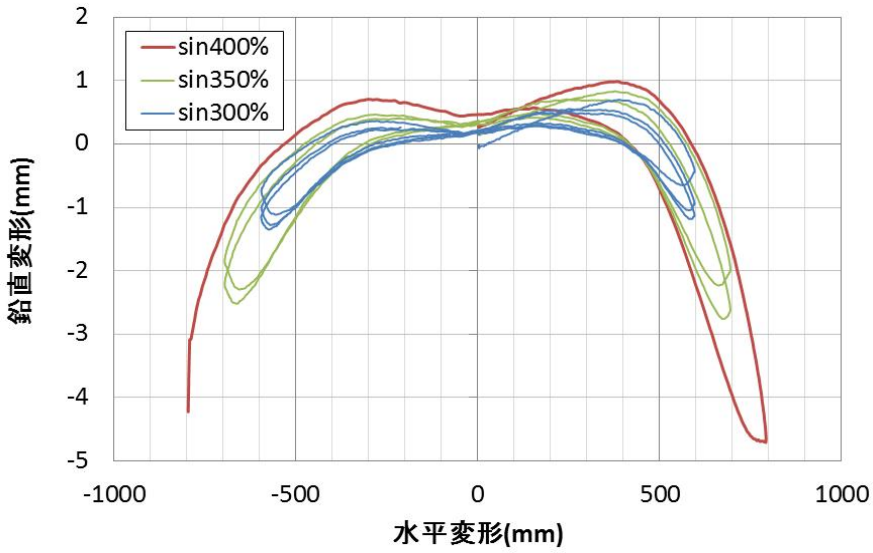


図 2.2.1-34 正弦波 1 方向大振幅加振における試験体の鉛直変形

写真 2.2.1-5 破断後の試験体（下側）

写真 2.2.1-6 破断後の試験体（上側）

写真 2.2.1-7 飛散した鋼板と鉛プラグ

(6) 実験結果のシミュレーション解析

1) 検討内容

熱伝導および温度変化に伴う力学的特性変化を考慮した手法[2.2.1-1)]により、実験結果についてのシミュレーション解析を実施する。

2) 解析手法

シミュレーション解析手法は、実験時の水平変位を与えることにより修正バイリニアモデルに基づく荷重変形関係を求め、履歴吸収エネルギーが鉛部分の熱エネルギーに変換されるとし、熱伝導解析により得られた鉛温度と設定した鉛温度～降伏荷重関係に基づき降伏荷重を時々刻々修正しているものである。

鉛プラグ入り積層ゴム（以下 LRB）における熱伝導解析差分法モデルは、前進差分法による LRB を要素分割した差分法モデルとする。履歴吸収エネルギーはすべて鉛プラグでの発熱となると仮定し、モデル化範囲には断熱材および取り付け部も含めることによって、鉛プラグから積層ゴム、フランジ等への熱エネルギー拡散を考慮する。

鉛温度-降伏荷重関係は、式(2.2.1-4)の提案式に基づくものとする。本式は、鉛プラグが約 200℃まで上昇した実験ケースを含む鉛プラグ入り積層ゴム加振実験結果の分析により得られた実験式である[1)]。

$$\tau = \tau_o \left\{ 1-(T/T_L)^{\alpha_T} \right\},\ \alpha_T = 0.4+0.25\cdot(T/T_L) \qquad (2.2.1\text{-}4)$$
$$\tau_o = 15.0(N/mm^2),\ T_L = 327.5(℃)$$

ここに、τ ：鉛降伏応力、　　τ_0：0℃での鉛降伏応力

T ：鉛プラグ平均温度、T_L ：鉛融点

なお、２方向加力に対するシミュレーションでは、積層ゴムの解析モデルを MSS モデルとして評価を行なう。

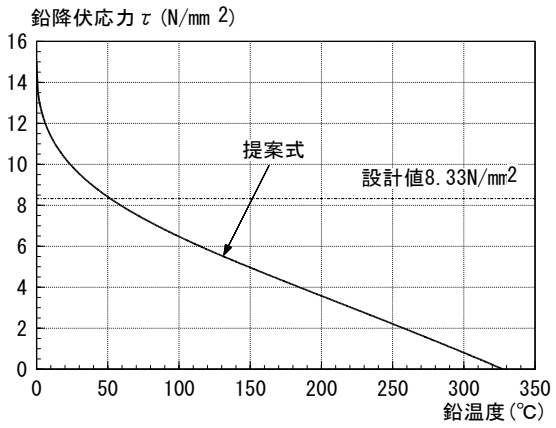


図 2.2.1-35 鉛温度～降伏荷重関係

3) 解析条件

実験結果のシミュレーションのうち熱伝導解析においては、LRB の軸対称性および上下対称性を考慮し、鉛プラグ部分 6 要素（①,②,⑧,⑨,⑮,⑯）、積層ゴム部分 10 要素（③～⑦,⑩～⑭）、取り付け鋼板部分 6 要素（A～F）、断熱材部分 4 要素（C'～F'）、取り付けブロック部分 4 要素（C''～F''）の計 30 の要素に分割したモデルを対象とする。図 2.2.1-36 に要素分割図を示す。解析で用いた熱伝導・比熱などの諸定数を表 2.2.1-7 に示す。なお、断熱材部分についてはコンクリートの値を仮定した

表 2.2.1-7 各材料の諸定数

	熱伝導率 W/cm℃	比熱 J/g℃	比重 g/cm^3
鉛	3.52×10^{-1}	0.126	11.34
ゴム	1.30×10^{-3}	1.500	1.10
鉄	6.05×10^{-1}	0.435	7.85
断熱材	1.00×10^{-2}	0.880	2.30

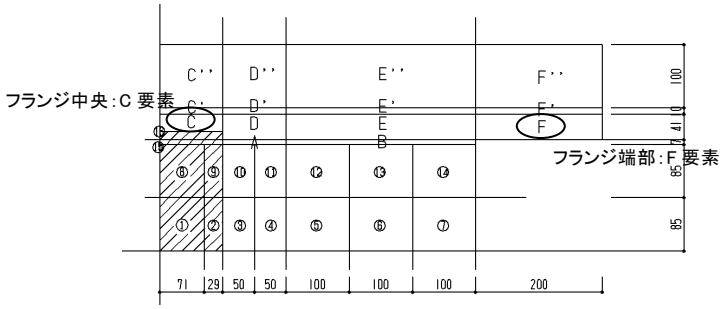


図 2.2.1-36 鉛プラグ入り積層ゴム要素分割

解析開始時の初期温度については、実験結果の荷重変形関係から得られる履歴エネルギーを直接入力し、冷却時間などインターバルを適宜考慮した熱伝導解析結果に基づき設定している。解析の時間刻みは 0.05 秒とする。表 2.2.1-8 に各ケースの初期温度設定値を示す。

表 2.2.1-8 初期温度設置値（℃）

CASE	鉛部	ゴム部	鉛直上の フランジ部	その他 (取付鋼板など)
正弦波 1 方向	30	30	30	25
地震応答波 1 方向	40	40	33.5	27.5
地震応答波 2 方向	60	45	45	27.5
楕円	63	53	46	30
真円	30	30	30	30

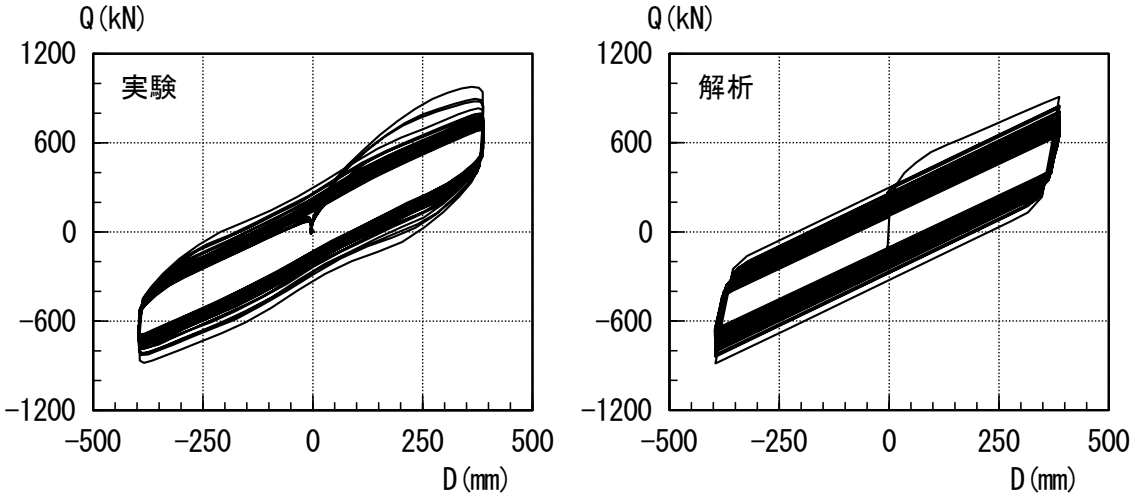
4) 解析結果

図 2.2.1-37～図 2.2.1-49 に各実験ケースに対するシミュレーション結果を示す。各図ついて、ⅰ)～ⅵ)は荷重変形関係、a)は各部温度時刻歴、b)は履歴吸収エネルギー時刻歴、c,d)は降伏荷重時刻歴である。

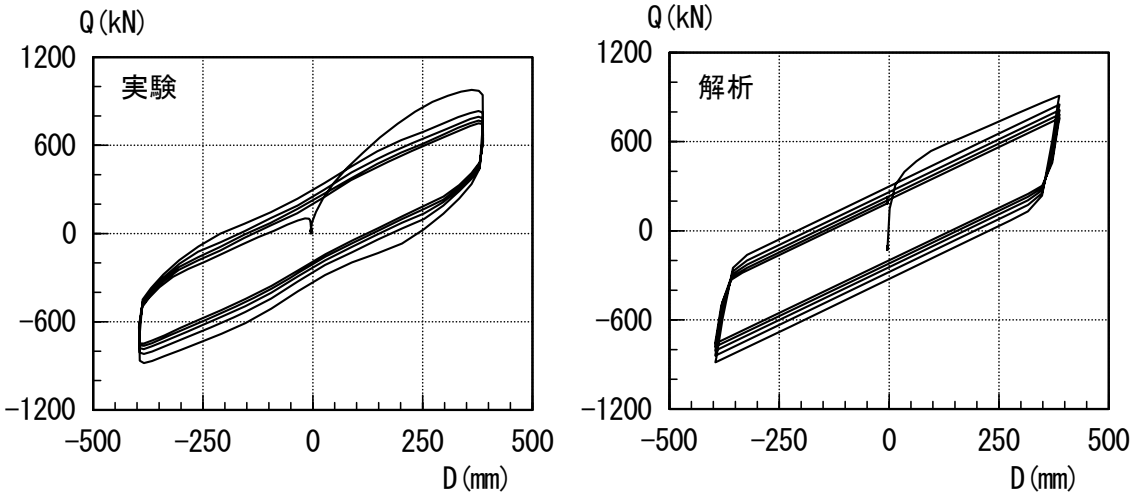
正弦波 1 方向加振、地震波 1 方向加振、地震波 2 方向加振のケースについては、温度や履歴エネルギー、降伏荷重と、概ね実験結果をシミュレートできている。

正弦波 2 方向加振（楕円、真円）のケースについては、履歴エネルギーの大幅な減少や負の履歴エネルギーの発生などの実験結果に対して、対応する解析結果は得られない結果となった。

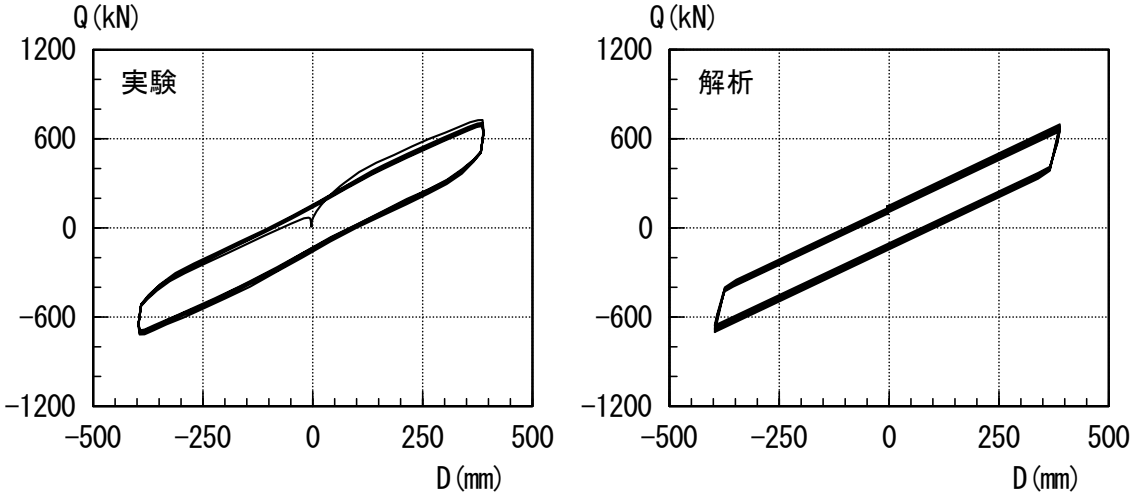
a) 正弦波 1 方向加振



ⅰ) 加振全体

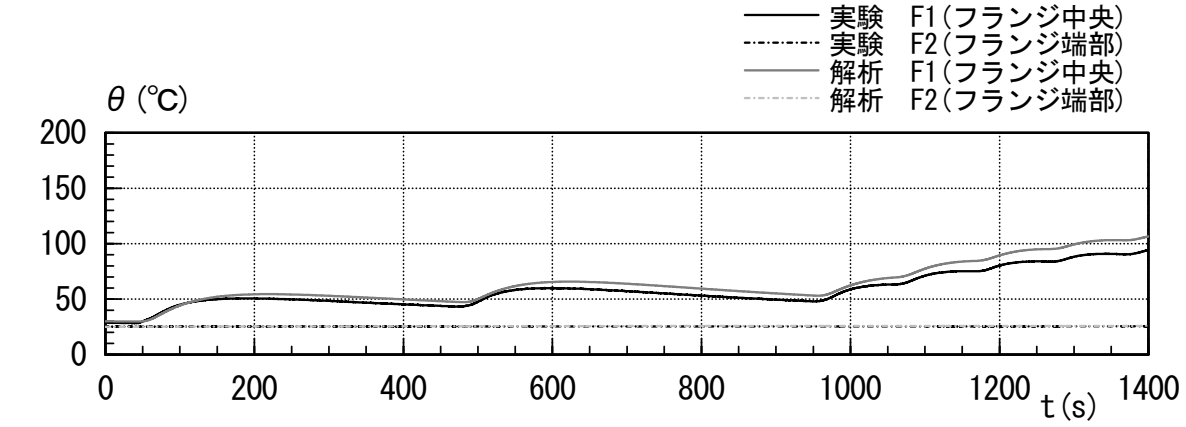


ⅱ) 加振 1 回目

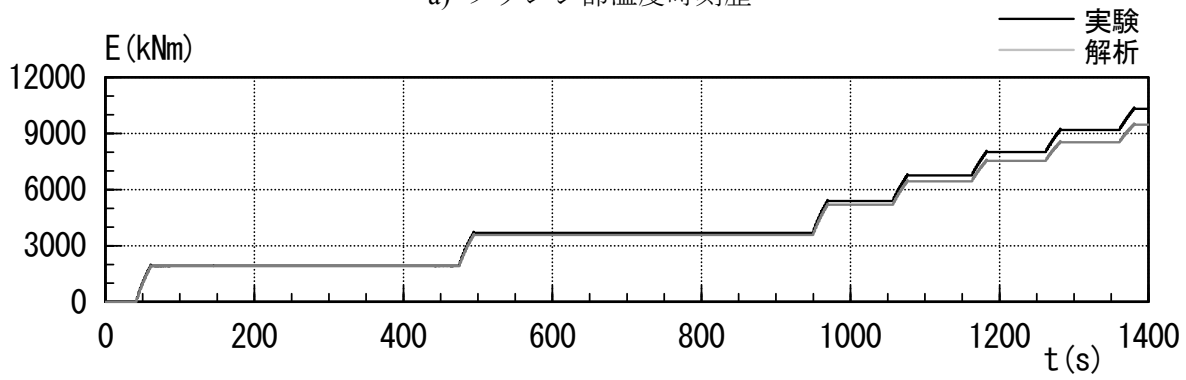


ⅲ) 加振 7 回目

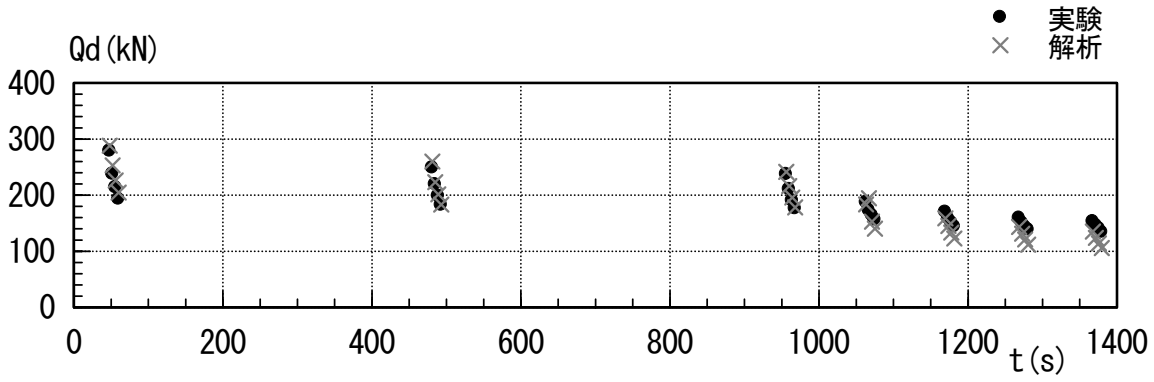
図 2.2.1-37 【正弦波 1 方向加振】実験・解析の比較（荷重変形関係）



a) フランジ部温度時刻歴



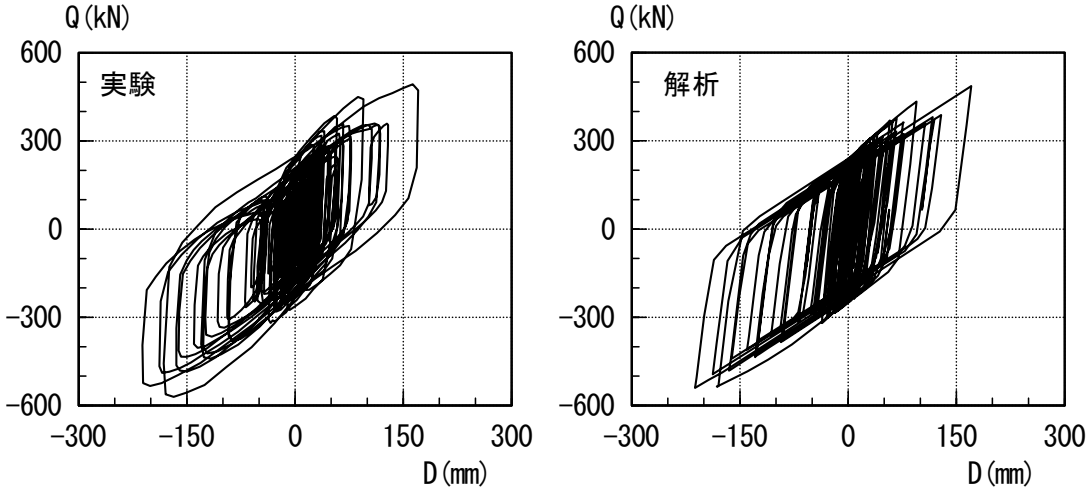
b) 履歴吸収エネルギー時刻歴



c) 降伏荷重時刻歴

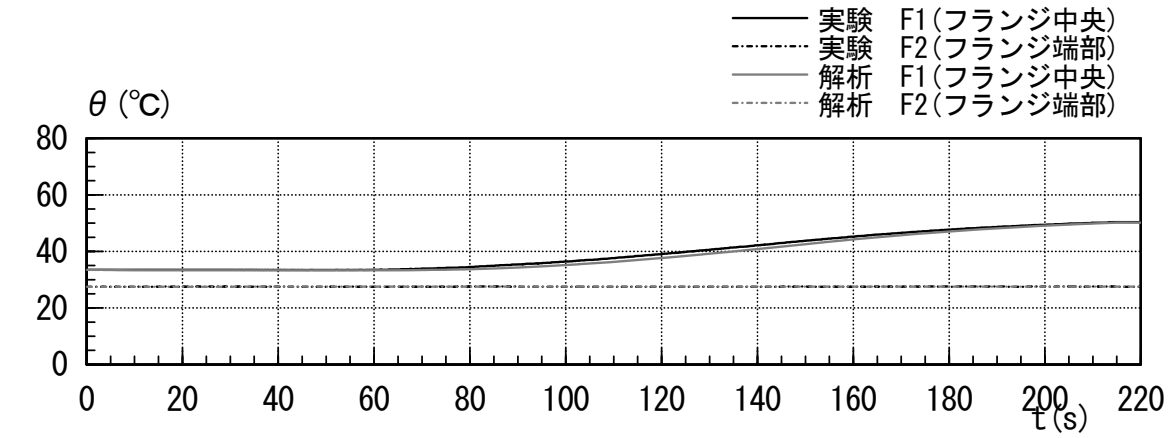
図 2.2.1-38 【正弦波 1 方向加振】実験・解析の比較
（フランジ部温度、履歴吸収エネルギー、降伏荷重）

b) 地震応答波 1 方向加振

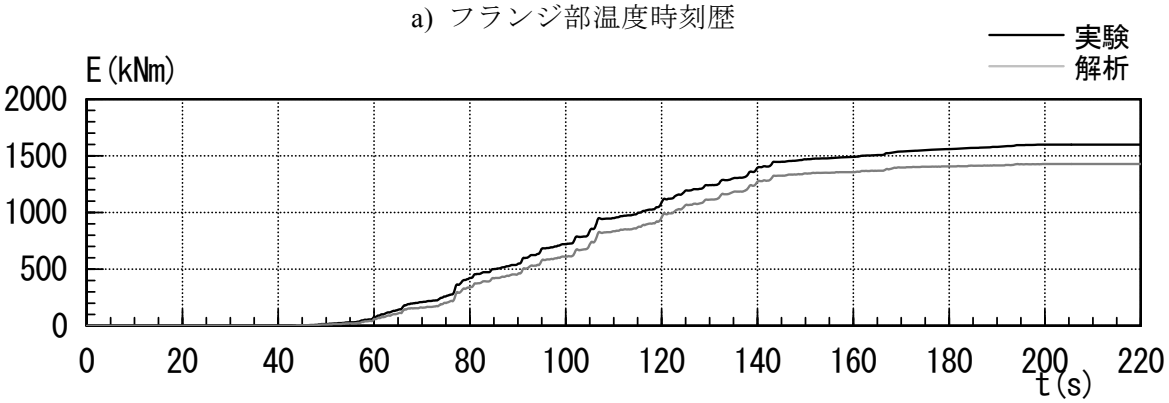


i) 加振全体

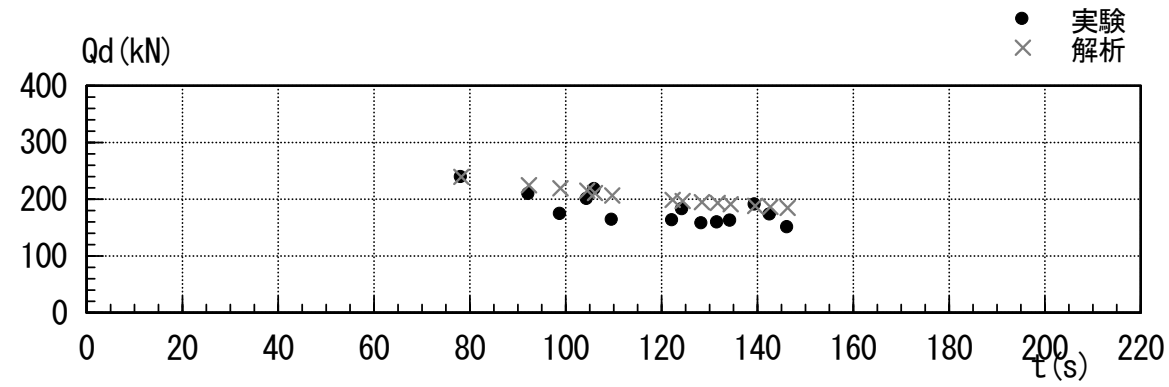
図 2.2.1-39 【地震応答波 1 方向加振】実験・解析の比較（荷重変形関係）



a) フランジ部温度時刻歴



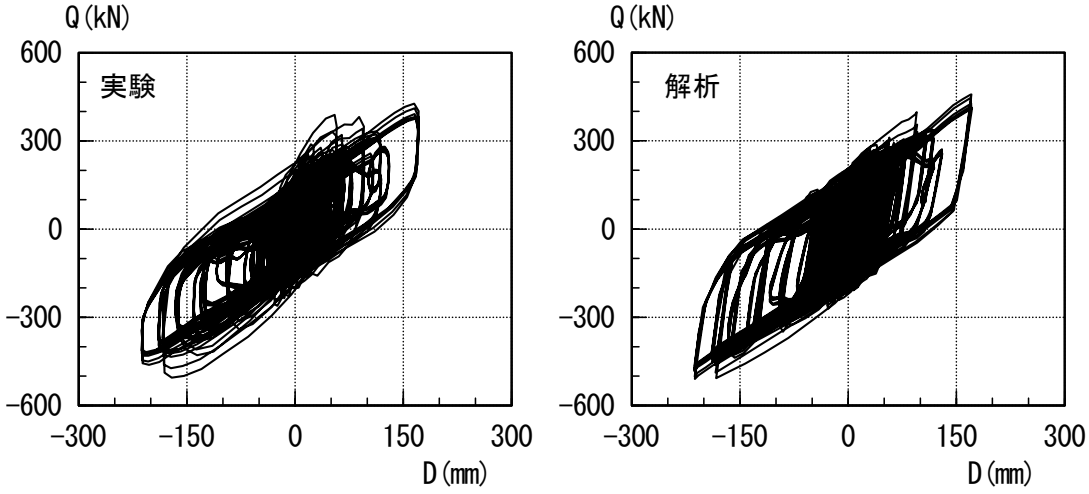
b) 履歴吸収エネルギー時刻歴



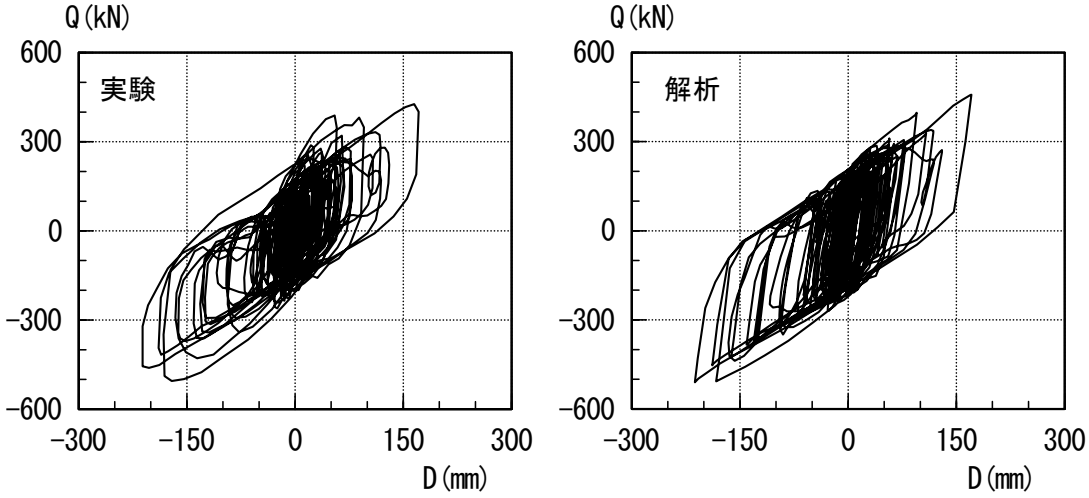
c) 降伏荷重時刻歴

図 2.2.1-40 【地震応答波 1 方向加振】実験・解析の比較
（フランジ部温度、履歴吸収エネルギー、降伏荷重）

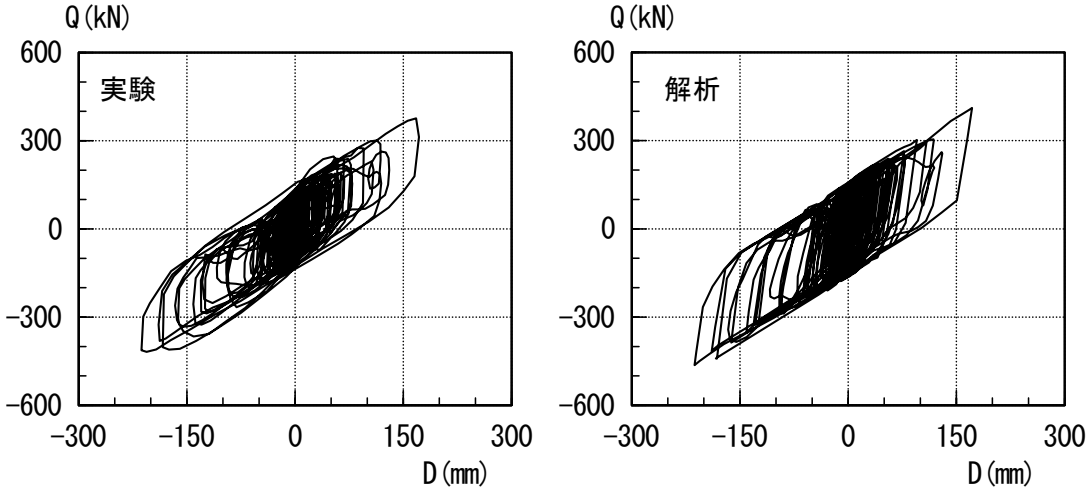
c) 地震応答波 2 方向加振



ⅰ) 加振全体

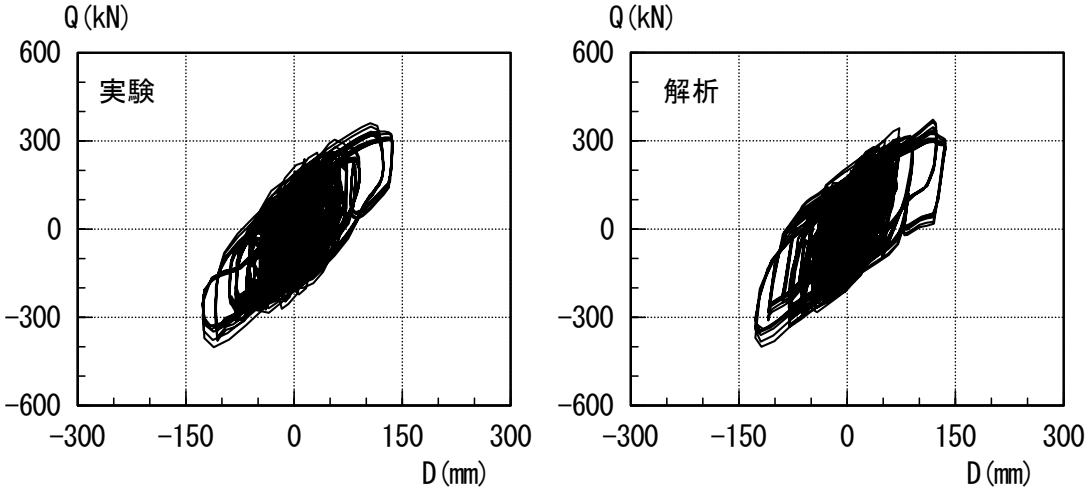


ⅱ) 加振 1 回目

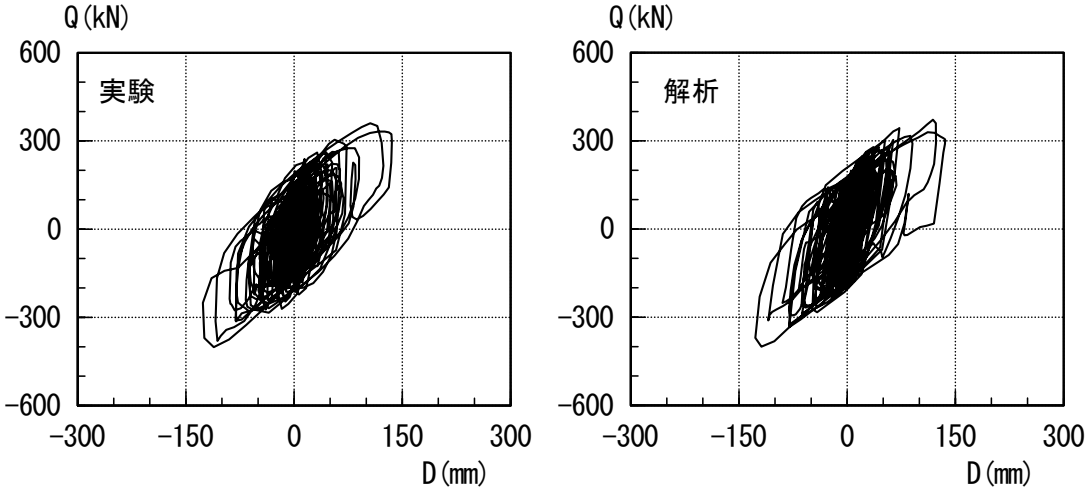


ⅲ) 加振 12 回目

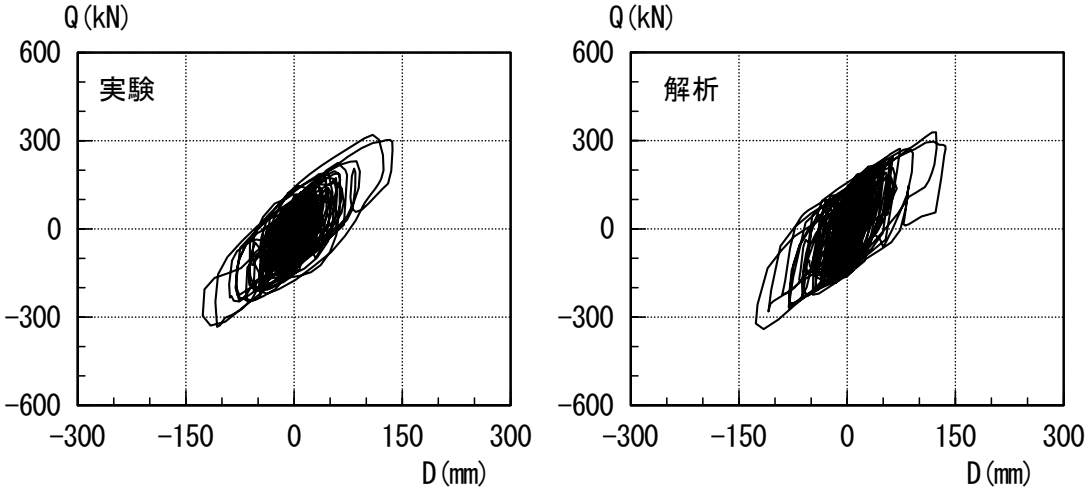
図 2.2.1-41 【地震応答波 2 方向加振】実験・解析の比較（主梁方向 荷重変形関係）



iv) 加振全体

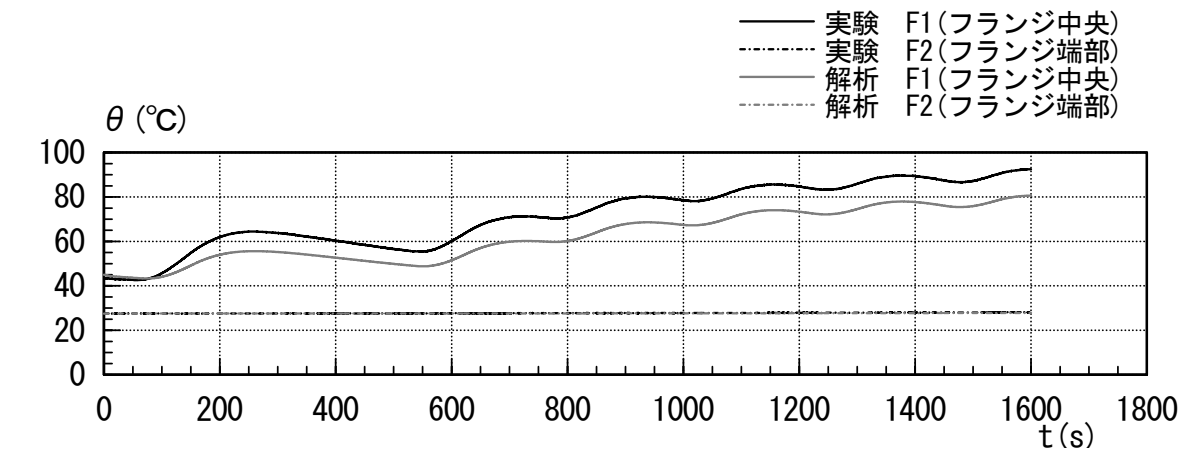


v) 加振 1 回目

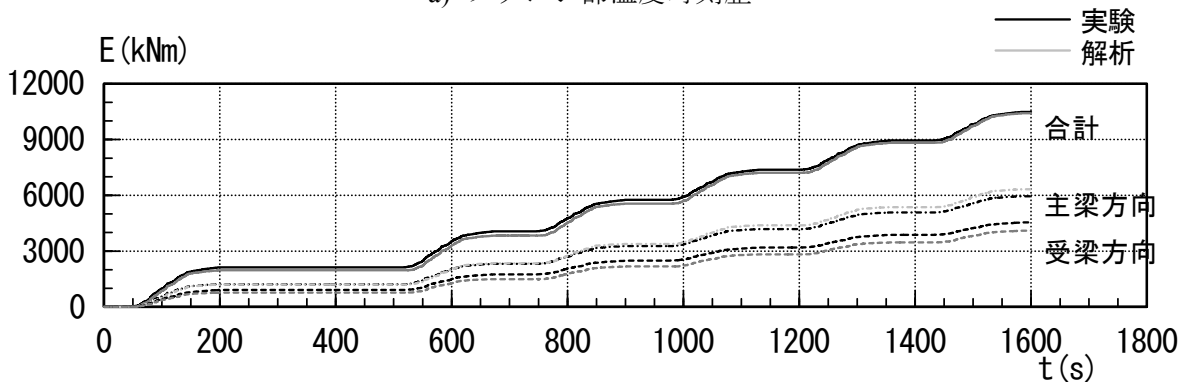


vi) 加振 6 回目

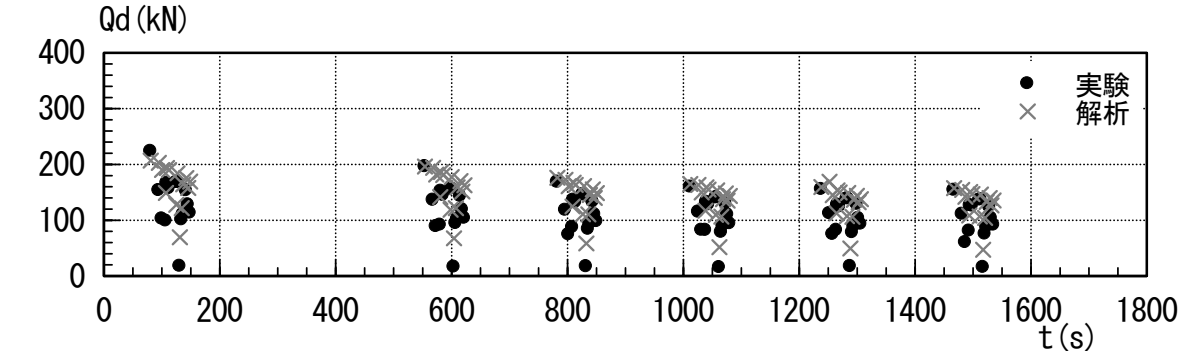
図 2.2.1-42 【地震応答波 2 方向加振】実験・解析の比較（受梁方向 荷重変形関係）



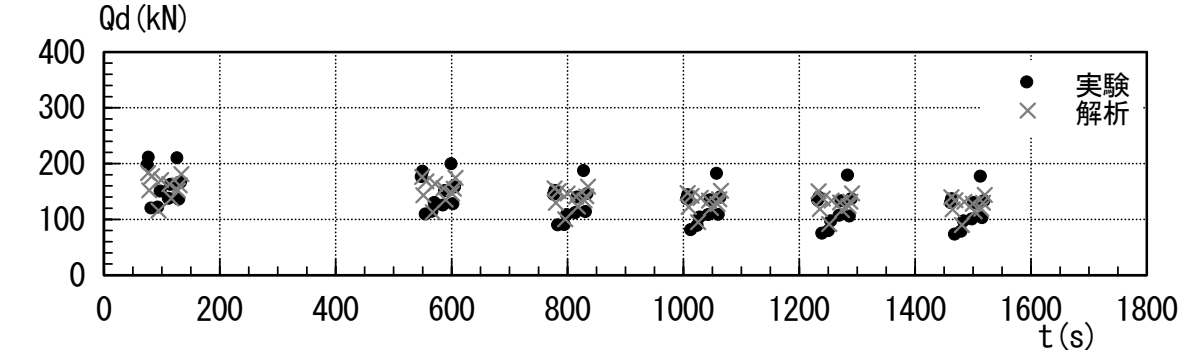
a) フランジ部温度時刻歴



b) 履歴吸収エネルギー時刻歴



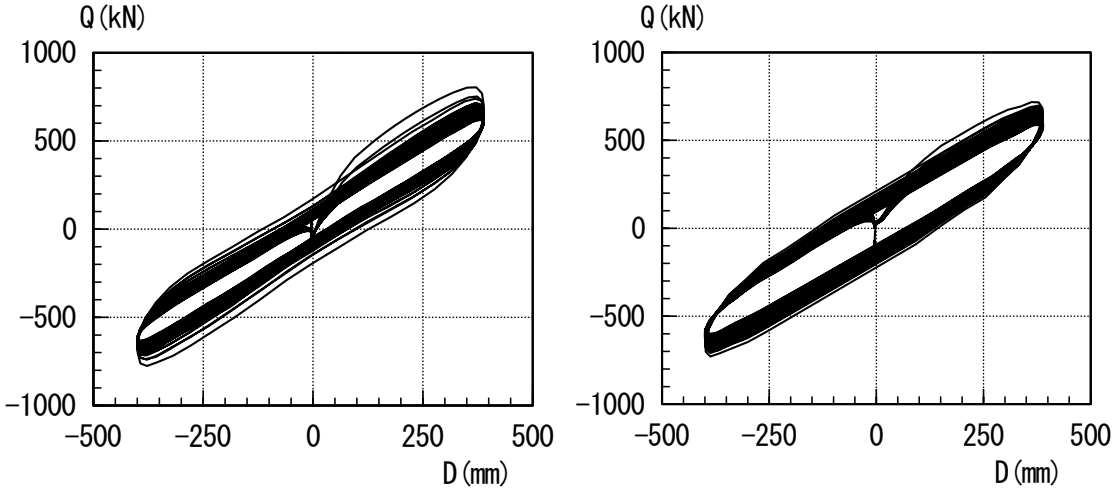
c) 降伏荷重時刻歴（主梁方向）



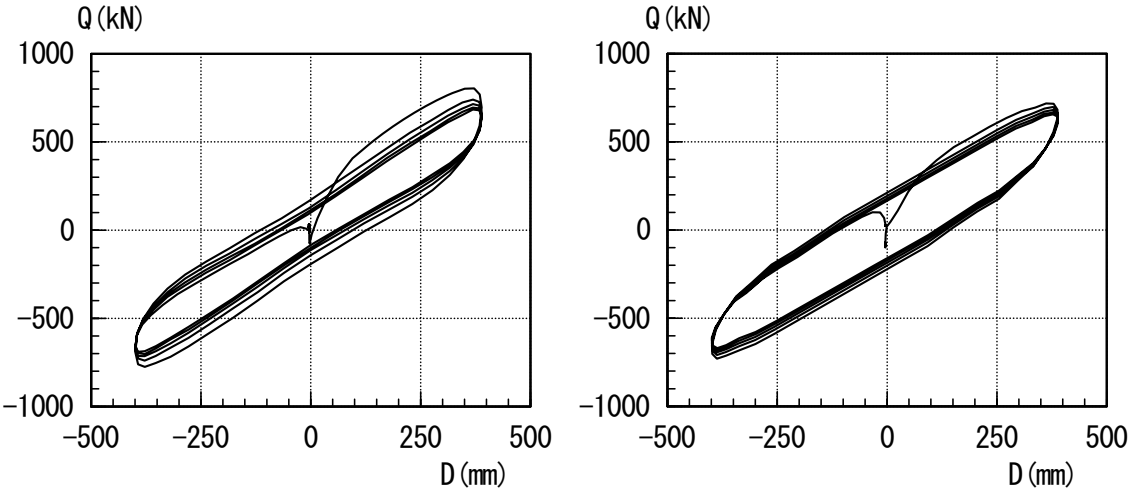
d) 降伏荷重時刻歴（受梁方向）

図 2.2.1-43 【地震応答波 2 方向加振】実験・解析の比較
（フランジ部温度、履歴吸収エネルギー、降伏荷重）

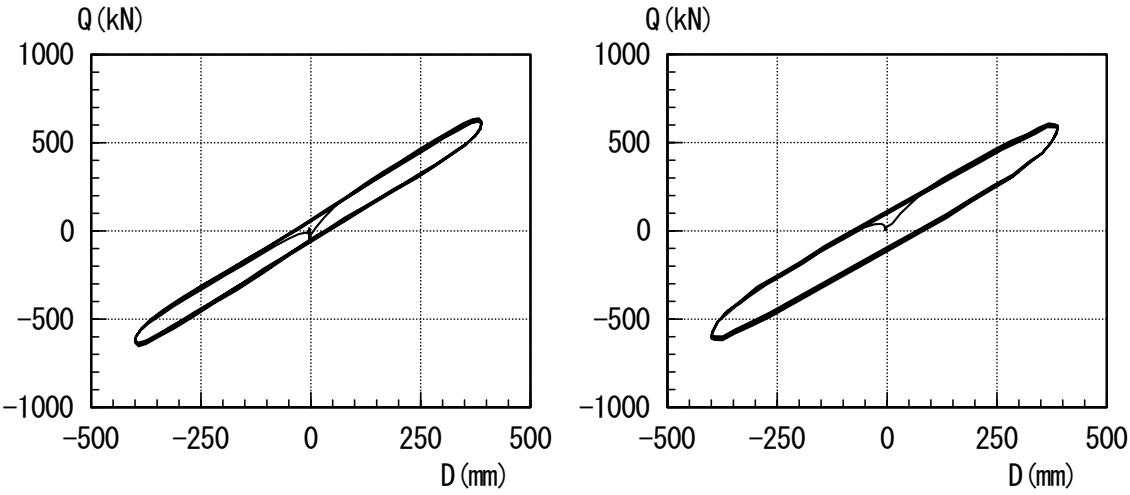
d) 楕円加振



ⅰ) 加振全体

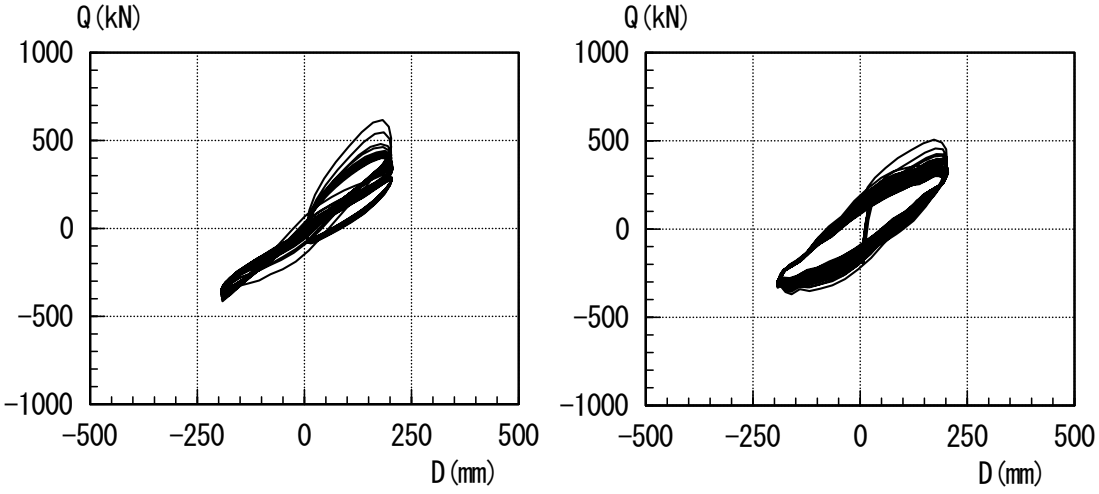


ⅱ) 加振 1 回目

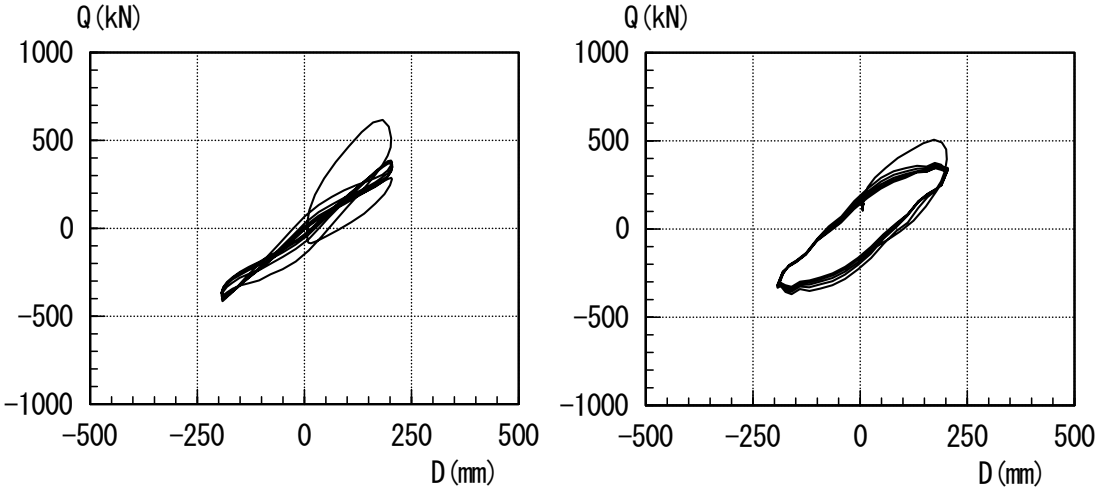


ⅲ) 加振 12 回目

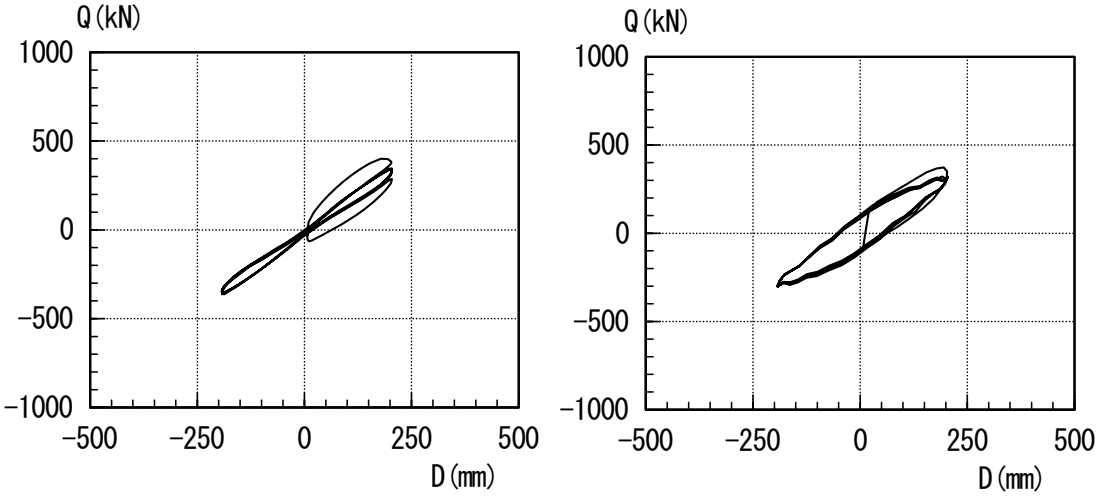
図 2.2.1-44 【楕円加振】実験・解析の比較（主梁方向 荷重変形関係）



iv) 加振全体

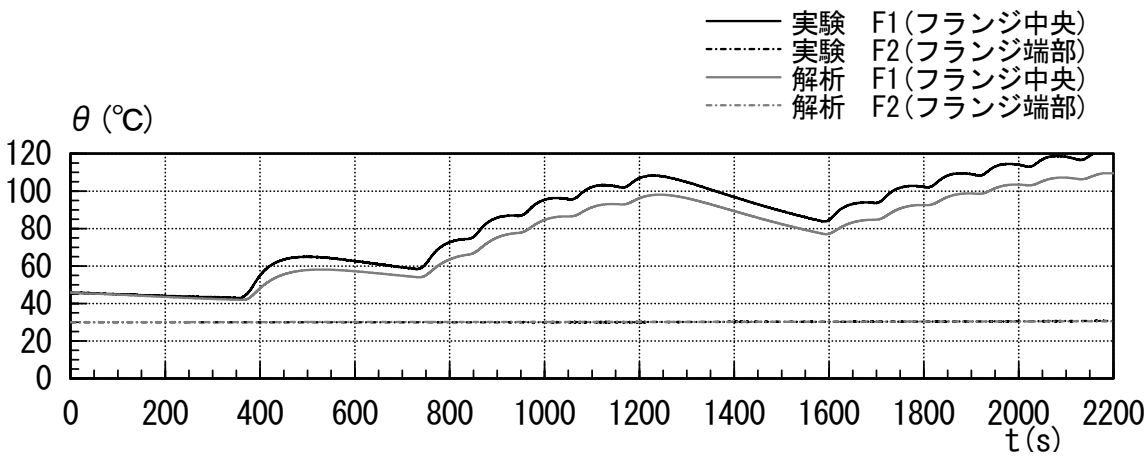


v) 加振 1 回目

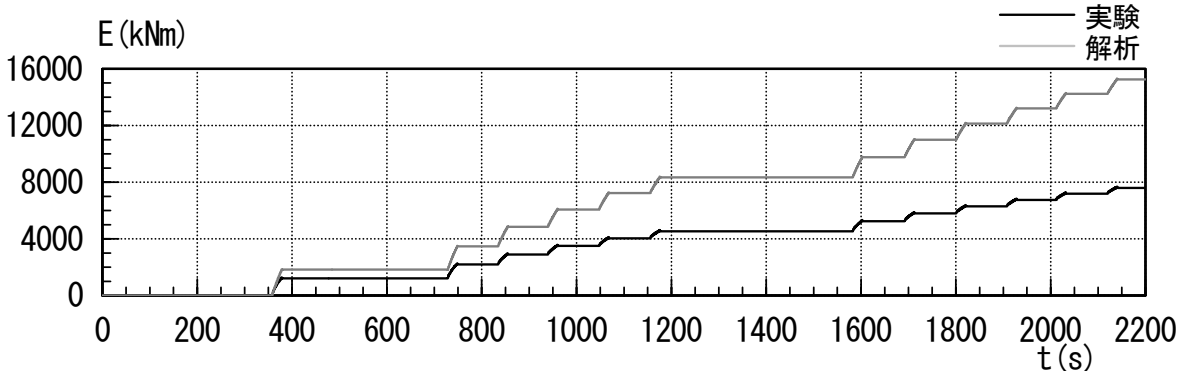


vi) 加振 12 回目

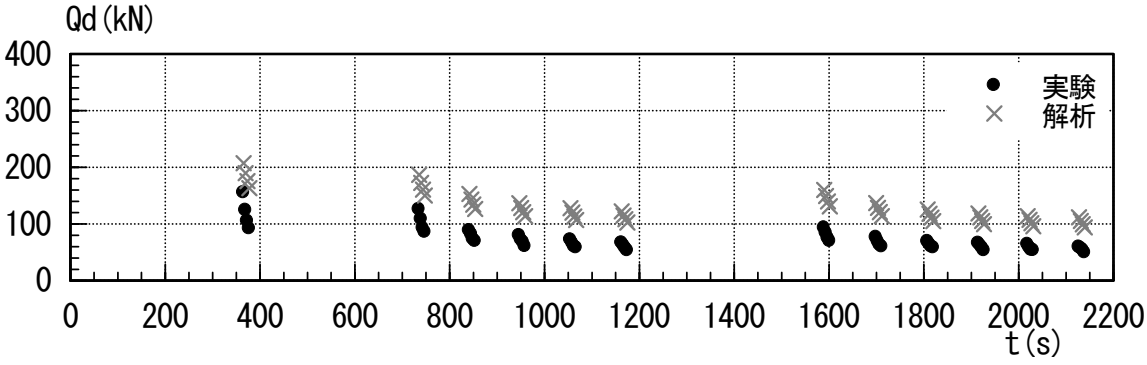
図 2.2.1-45 【楕円加振】実験・解析の比較（受梁方向 荷重変形関係）



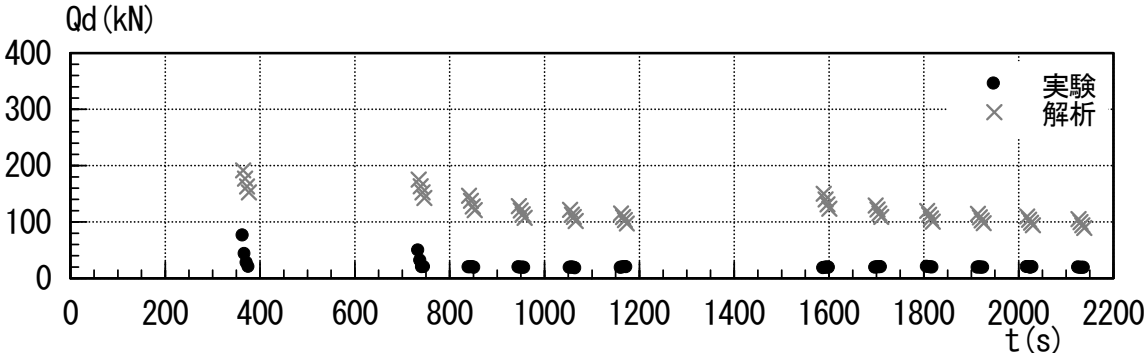
a) フランジ部温度時刻歴



b) 履歴吸収エネルギー時刻歴



c) 降伏荷重時刻歴（主梁方向）

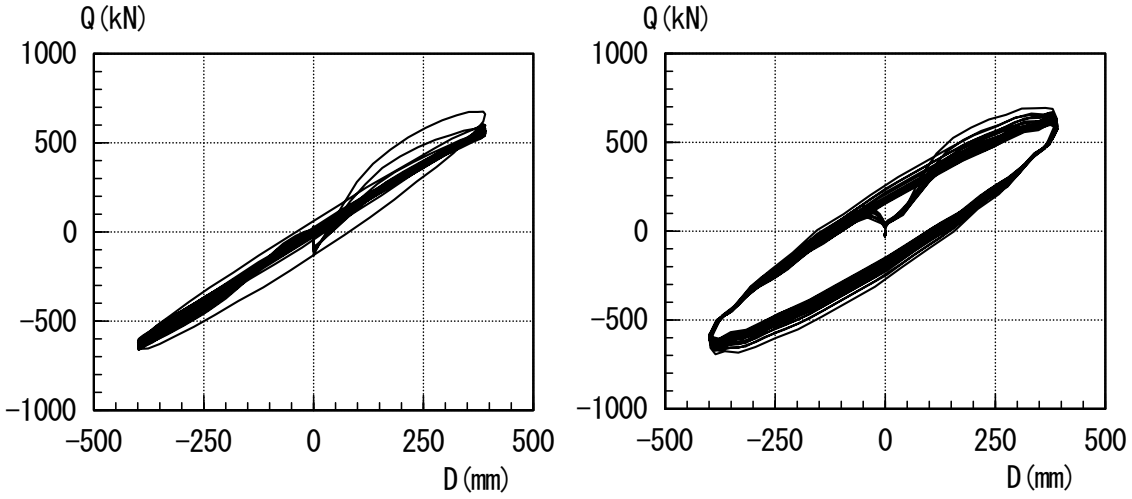


d) 降伏荷重時刻歴（受梁方向）

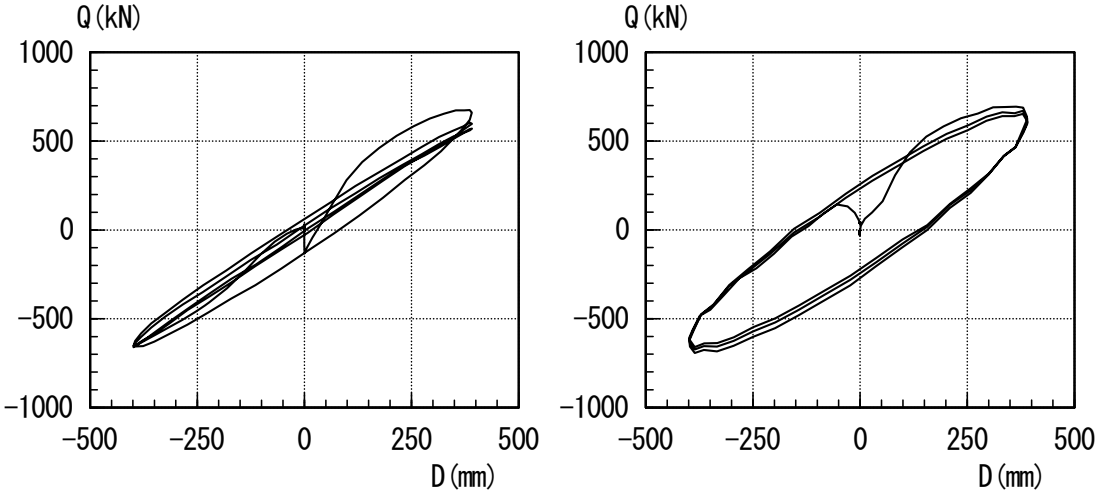
図 2.2.1-46 【楕円加振】実験・解析の比較

（フランジ部温度、履歴吸収エネルギー、降伏荷重）

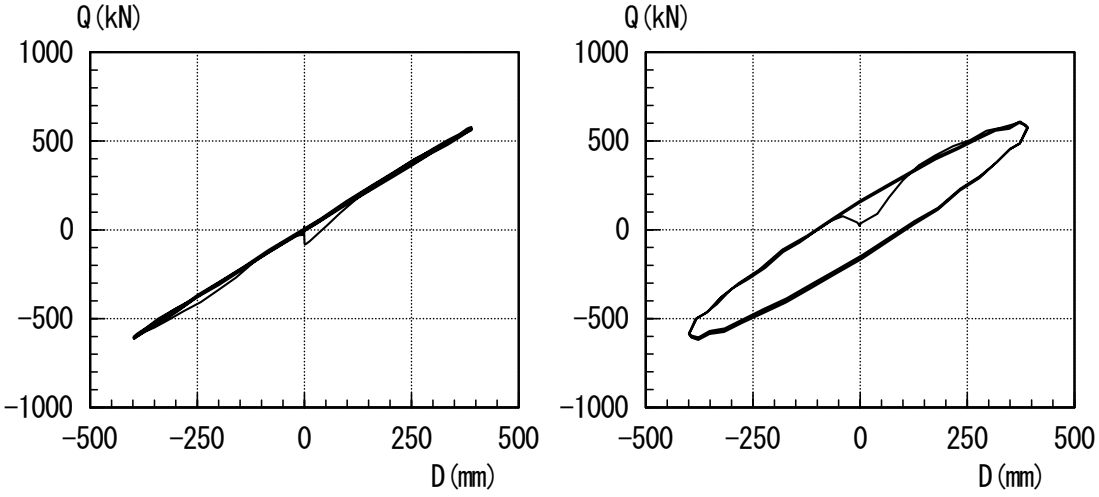
e) 真円加振



ⅰ) 加振全体

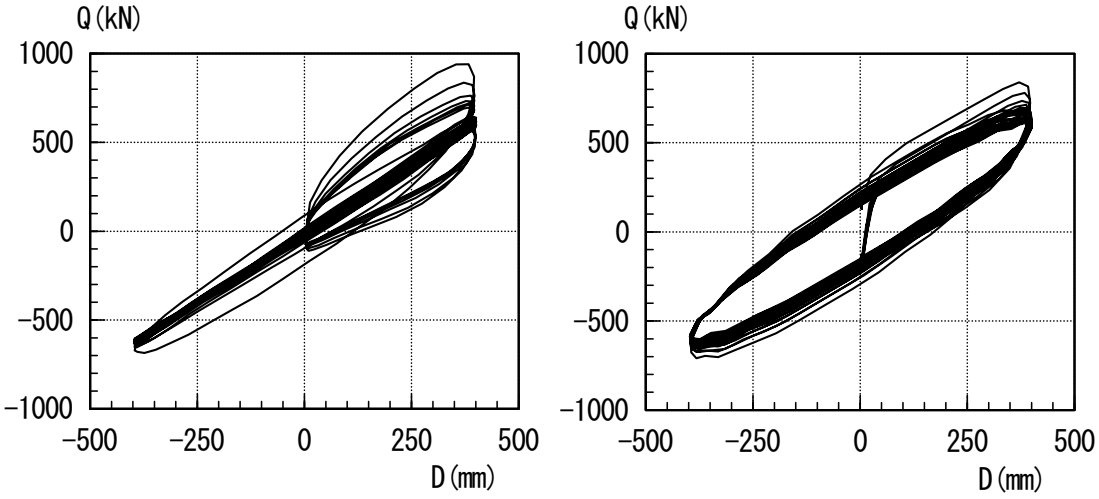


ⅱ) 加振 1 回目

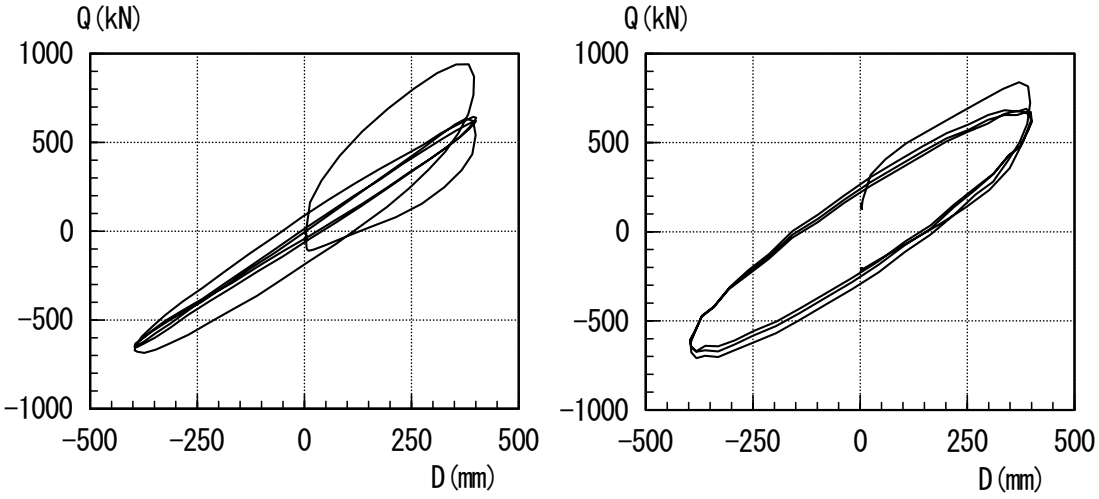


ⅲ) 加振 7 回目

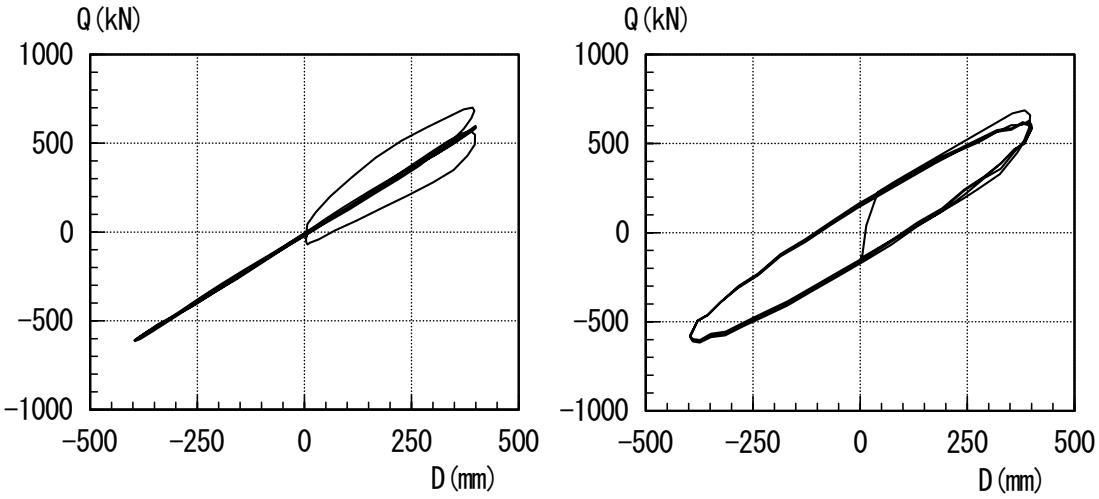
図 2.2.1-47 【真円加振】実験・解析の比較（主梁方向 荷重変形関係）



iv) 加振全体

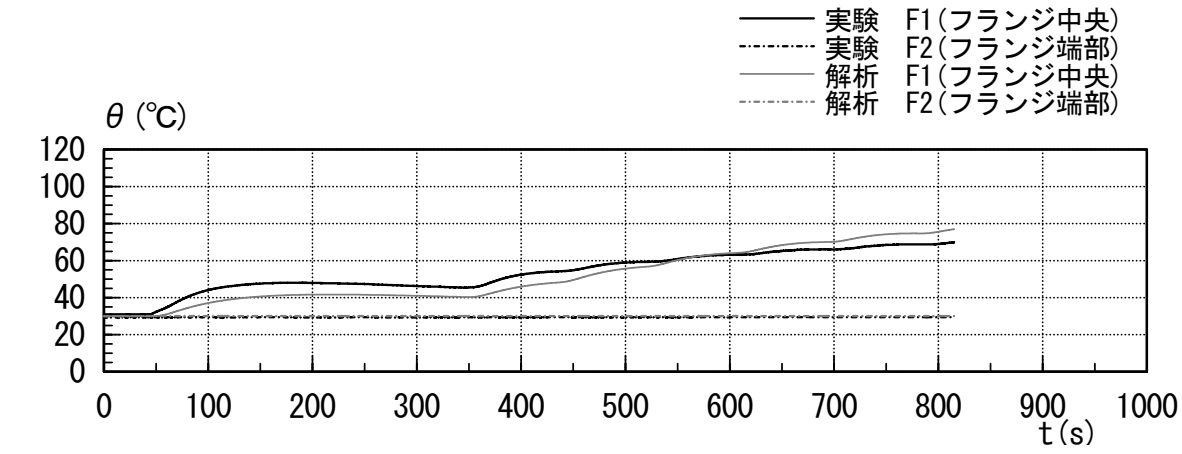


v) 加振 1 回目

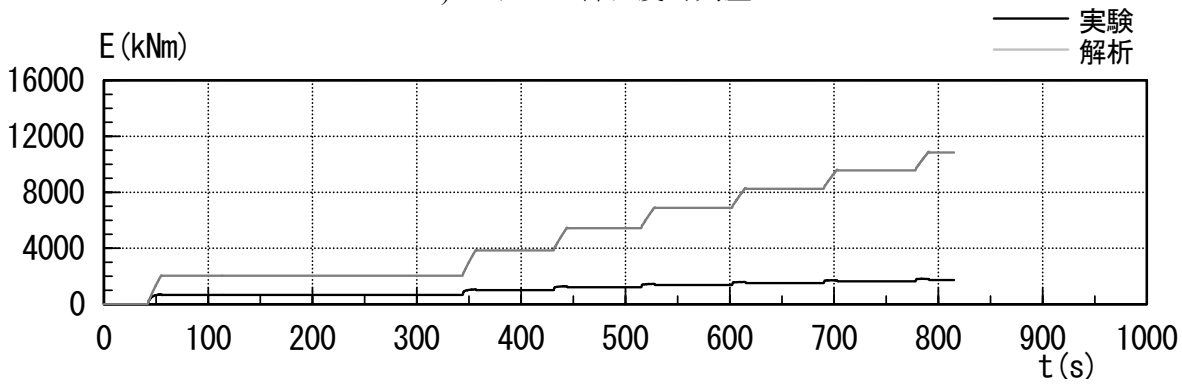


vi) 加振 7 回目

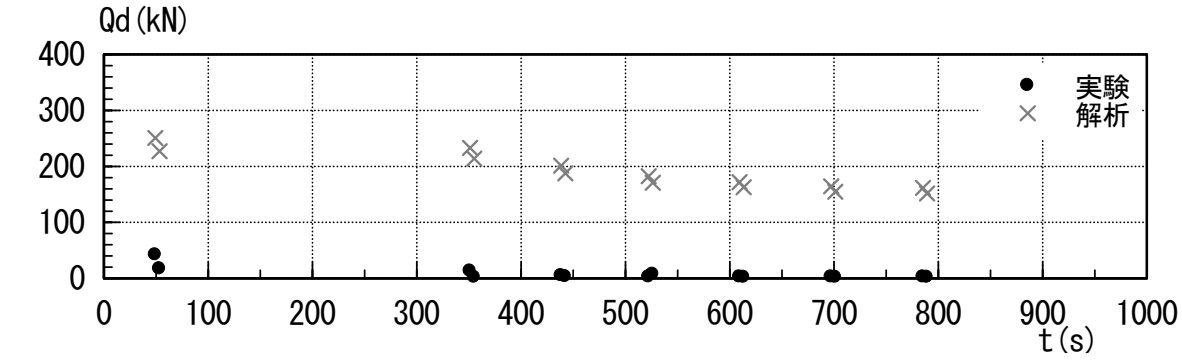
図 2.2.1-48 【真円加振】実験・解析の比較（受梁方向 荷重変形関係）



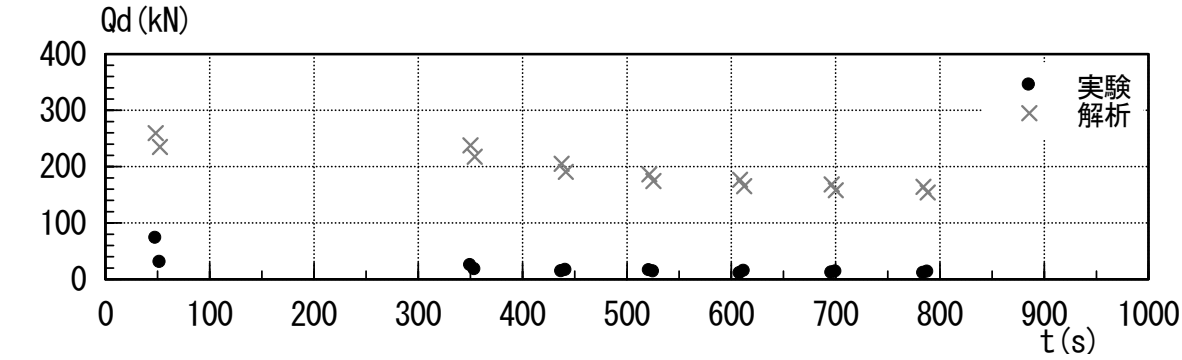
a) フランジ部温度時刻歴



b) 履歴吸収エネルギー時刻歴



c) 降伏荷重時刻歴（受梁方向）



d) 降伏荷重時刻歴（受梁方向）

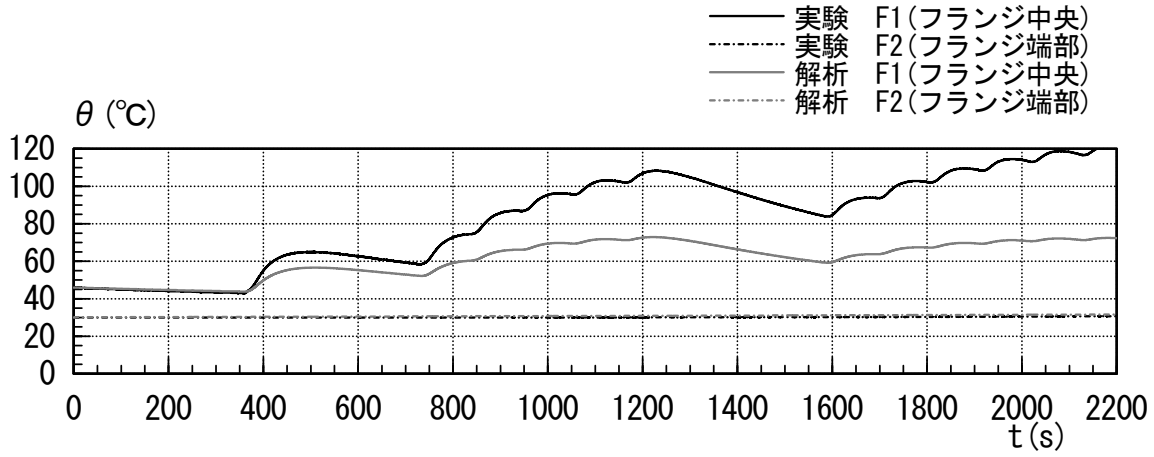
図 2.2.1-49 【真円加振】実験・解析の比較
（フランジ部温度、履歴吸収エネルギー、降伏荷重）

5) 正弦波２方向加振における分析と考察

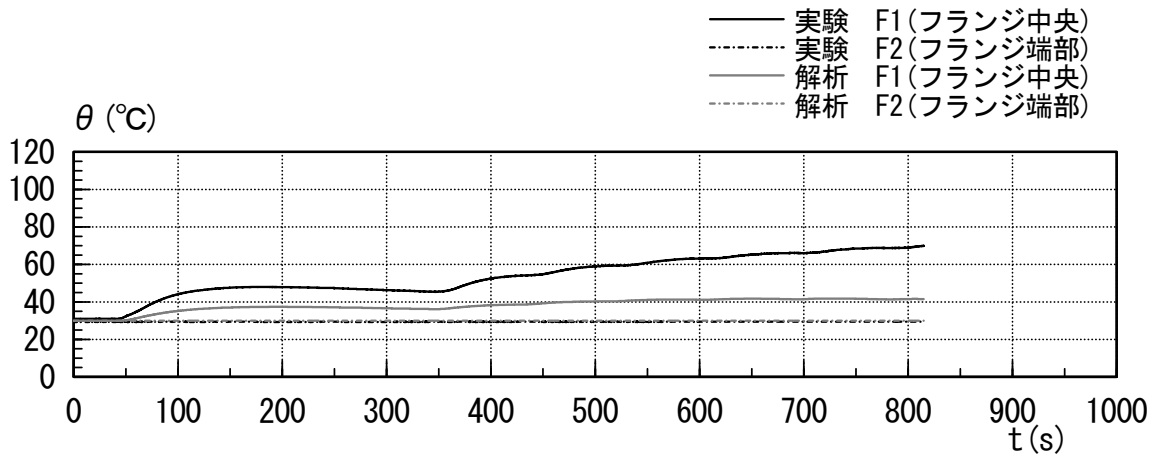
正弦波２方向加振（楕円加振、真円加振）時には、楕円加振時においても履歴ループ面積が小さく、真円加振時には、履歴ループ面積の殆どない履歴曲線が得られた。これらの実験加振前後の基本特性試験（１方向加振、γ＝100%）では、このような顕著な履歴ループ面積の低下は生じていない。

図 2.2.1-50 に楕円加振、真円加振時の荷重変形関係から鉛プラグ入り積層ゴムの履歴吸収エネルギーを求め、そのエネルギーが全て鉛プラグの温度上昇に費やされると仮定し、熱伝導解析によりフランジ中央部、フランジ端部の温度を求めた結果を示す。結果には実験結果も示している。

熱伝導解析により求めたフランジ中央部の温度は実験結果との乖離が大きい。実験結果ではフランジ温度は 120℃程度まで上昇しており、この温度上昇をもたらした理由は不明である。考えられる点としては鉛プラグ上部と取り付け鋼板部での摩擦により発熱したことや、後述するように実験後の積層ゴムの切断により鉛プラグに割れが生じていたことからエネルギー吸収による発熱が鉛プラグ全体でなされず、割れた一部分の鉛プラグでなされたことなどが挙げられる。



a) 楕円加振時



b) 真円加振時

図 2.2.1-50 フランジ部温度時刻歴

6) シミュレーション解析のまとめ

実大鉛プラグ入り積層ゴム（φ1,000）の実験結果のシミュレーション解析として、各加振ケースでの荷重変形関係、降伏荷重特性値 Qd の低下及び積層ゴム内部温度等に着目した評価を行った。

シミュレーション解析結果より、１方向加振結果については、正弦波加振、地震応答波加振ともに、積層ゴムの内部温度や荷重変形関係、降伏荷重特性値の変化について実験結果と解析結果とでよく一致した。２方向加振結果については地震応答波加振のケースでは積層ゴムの内部温度や荷重変形関係、降伏荷重特性値の変化について実験結果と解析結果とがよく一致したものの、正弦波楕円加振、真円加振については実験結果と解析結果とで乖離が見られた。実験時に見られた荷重変形関係の履歴面積が小さくなる現象のシミュレーション解析については今後の要検討項目である。

(7) 楕円・真円加振に関する検討

1) 2 方向加振時の試験体ねじれ変形

2 方向加振時の試験体のねじれ変形について検討するため、最も条件が過酷であった真円加振の最終回について、ねじれひずみを算出した。ねじれ変形は、試験体ゴム部の 3 側面に幅 50mm、水平方向×鉛直方向＝10 マス×6 マスのメッシュを描き、ビデオ画像により判定した。なお、ビデオ画像の解像度の都合上、主梁方向せん断ひずみ＝0%、受梁方向せん断ひずみ＝200%の位置におけるねじれ変形を算出している。

表 2.2.1-9 に最大ねじれ変形と最大ねじれひずみを、図 2.2.1-51 にメッシュ中央列のねじれ変形図およびねじれ状況写真を示す。ねじれひずみ γ_ϕ は、ねじれ変形の分布を 2 字曲線で回帰し、下式(2.2.1-5)～(2.2.1-7)により求める。

高さ方向のねじれ変形角度分布 θ (x)

$$\theta(x) = a \cdot x^2 + a \cdot R \cdot x + b \qquad (2.2.1\text{-}5)$$

$$\gamma_{\varphi ap} = a \cdot R \cdot H \qquad (2.2.1\text{-}6)$$

$$\gamma_\varphi = \lambda \cdot \gamma_{\varphi ap} \qquad (2.2.1\text{-}7)$$

ここで、

θ (x)：高さ方向のねじれ変形角度分布

x：計測高さ

a、b：回帰定数

$\gamma_{\phi ap}$：見かけのねじれによる最大せん断ひずみ

R：有効半径

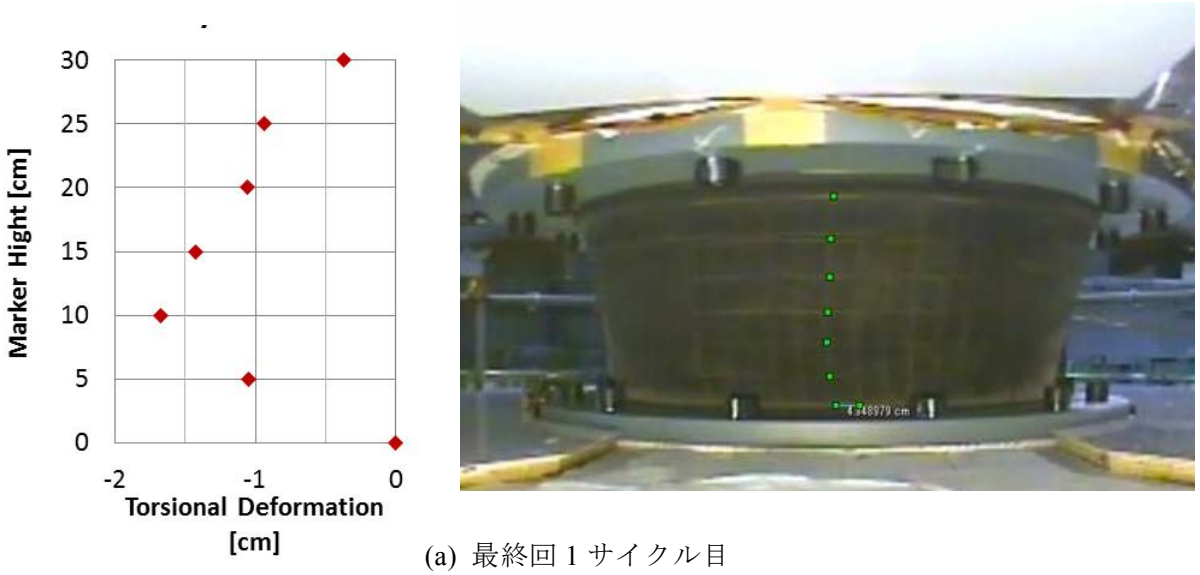
H：LRB のフランジおよび連結鋼板を除いた高さ

λ ：内部鋼板に関する補正係数（=2.41）

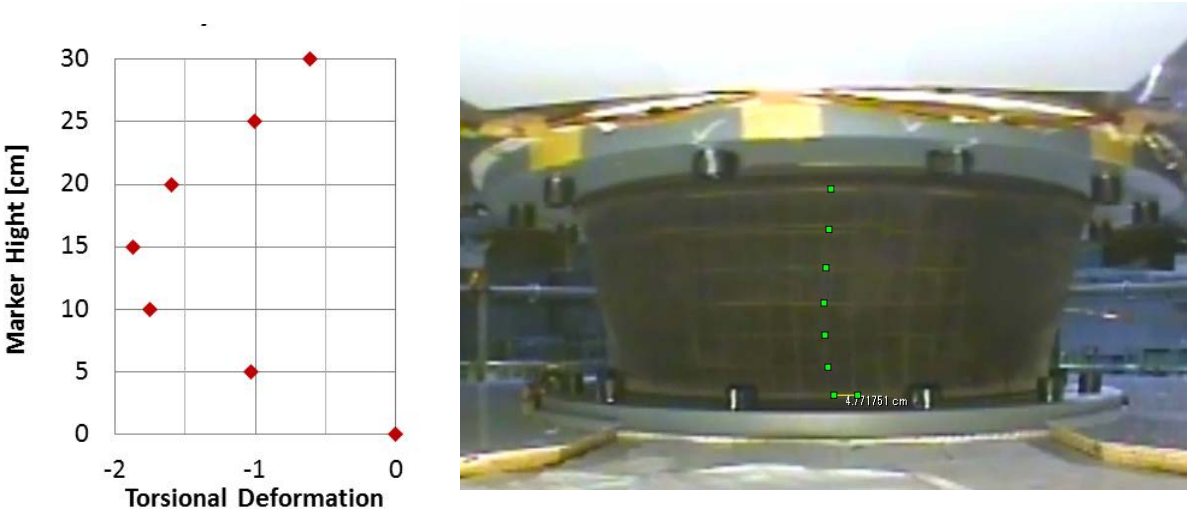
以上より、ねじれ変形は最大で 1.87cm で、その際のねじれひずみは 52%である。なお、加振前後には試験体にはねじれが発生していないことが確認されており、ねじれひずみは加振中にのみ発生し、終了後の残留ひずみはないと言える。

表 2.2.1-9 最大ねじれ変形（真円加振、最終回）

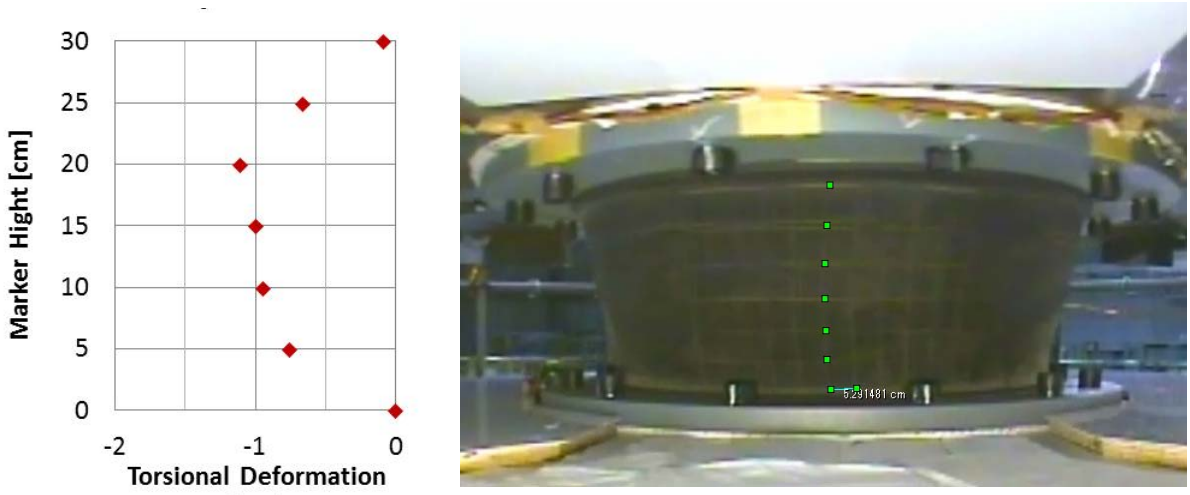
サイクル	ねじれ変形	ねじれひずみ
1	1.68cm	41%
2	1.87cm	52%
3	1.11cm	33%



(a) 最終回 1 サイクル目



(b) 最終回 2 サイクル目



(c) 最終回 3 サイクル目

図 2.2.1-51 真円加振におけるねじれ変形

2) 正弦波 2 方向加振における履歴特性の分析と考察

a) 実験結果履歴特性の分析

真円加振時の鉛プラグ入り積層ゴム（LRB）は、履歴ループ面積の殆どない荷重変形関係が得られた。楕円加振時においても履歴ループ面積は小さい。これらの実験加振前後の基本特性試験（1 方向加振、γ＝100%）では、このような顕著な履歴ループ面積の低下は生じておらず、これらの現象は鉛プラグの温度上昇だけでは説明できない。そこで、実験結果の分析などによりこれらの現象の原因について考察する。

- 図 2.2.1-52(a)に真円加振の 1 回目の 2 方向の変形 Du、Dv および応力 Qu、Qv の軌跡と U、V 方向の履歴ループを示した。
- 図 2.2.1-52(b)に、同実験における変形 Du、Dv を極座標系におけるもの Dr、D_θ に変換してその時刻歴波形を示した。

$$Dr = \sqrt{Du^2 + Dv^2} \qquad (2.2.1\text{-}8)$$

$$D_\theta = \tan^{-1}\left(Dv / Du\right) \qquad (2.2.1\text{-}9)$$

次に、同実験における変形 Qu、Quv からそれぞれによるゴム応力を減算して、2 乗和平方根をとった降伏荷重値 Qdr を算定しその時刻歴波形を示すと共に、Dr の単位時間変化率 ΔDr／Δt の絶対値を重ね書いて時刻歴波形も示した。

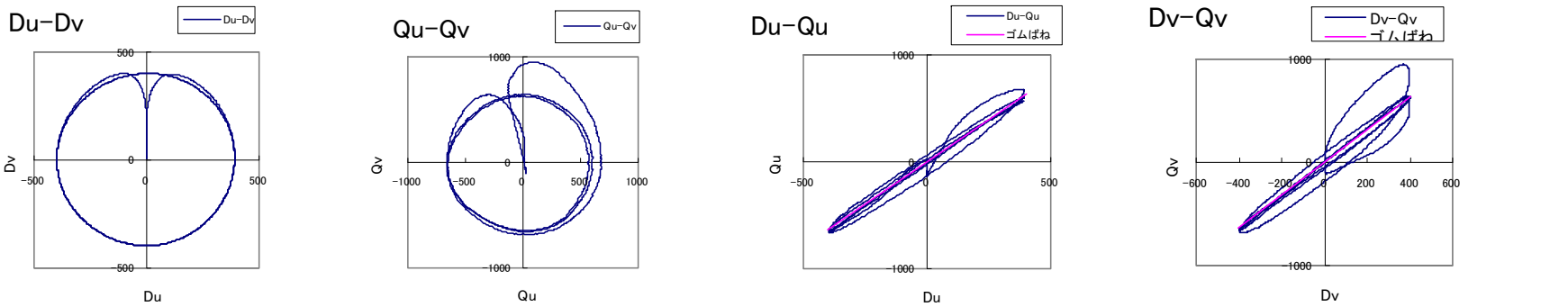
$$Qdr = \sqrt{\left(Qu - KrDu\right)^2 + \left(Qv - KrDv\right)^2} \qquad (2.2.1\text{-}10)$$

Qdr の時刻歴波形をみると、加振初期と加振終了直前のみ降伏荷重が大きな値をもち、ΔDr／Δt の絶対値との相関が高い。ただし、ΔDr／Δt がゼロになっても Qdr が十分小さくなるには若干時間がかかるようである。

- 図 2.2.1-53 に、真円加振（2～5 回目）における変形・応力の軌跡と各種時刻歴波形を示した。本加振においても、Qdr と ΔDr／Δt の絶対値との相関が高いことが分かる。

- 図 2.2.1-54 に楕円加振（1 回目）におけるものを図 2.2.1-52 と同様に示す。ここでも Qdr と ΔDr／Δt の相関がみられる。しかしながら ΔDr／Δt がゼロになっても Qdr の激減はみられない。円加振のように ΔDr／Δt がゼロになるのは長継続時間にわたってではないことと関係があるのではないかと考えられる。

以上から、真円加振において降伏荷重ひいては履歴面積が激減するのは、原点からの変形量（ベクトル長さ）Dr が一定の際であり、真円加振初期および終了前、基本特性試験のように Dr が変化する間はそれなりの降伏荷重および履歴面積が出ている。



ゴム剛性 Kr=1.6kN/mm を仮定

図 2.2.1-52(a) 真円加振（1 回目）の変形・応力の軌跡と履歴曲線

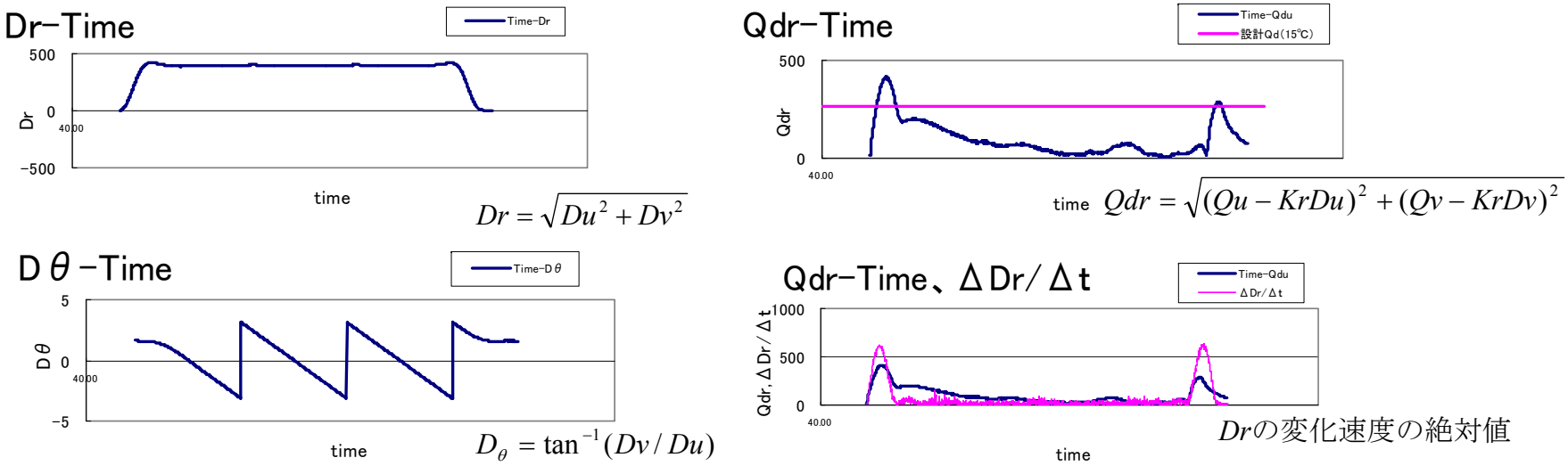
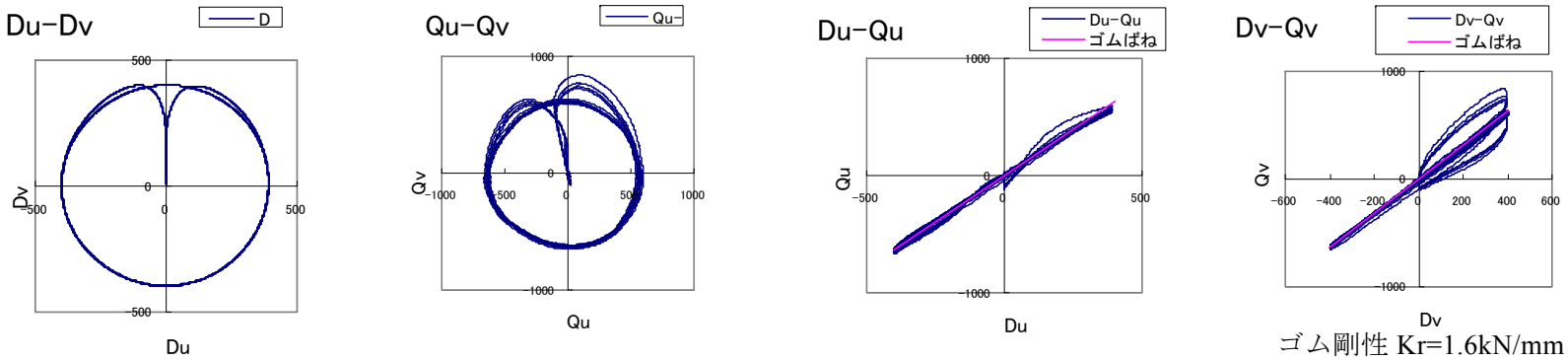


図 2.2.1-52(b) 真円加振（1 回目）の変形および降伏荷重などの時刻歴波形



ゴム剛性 Kr=1.6kN/mm を仮定

図 2.2.1-53(a)真円加振（2～5 回目）の変形・応力の軌跡と履歴曲線

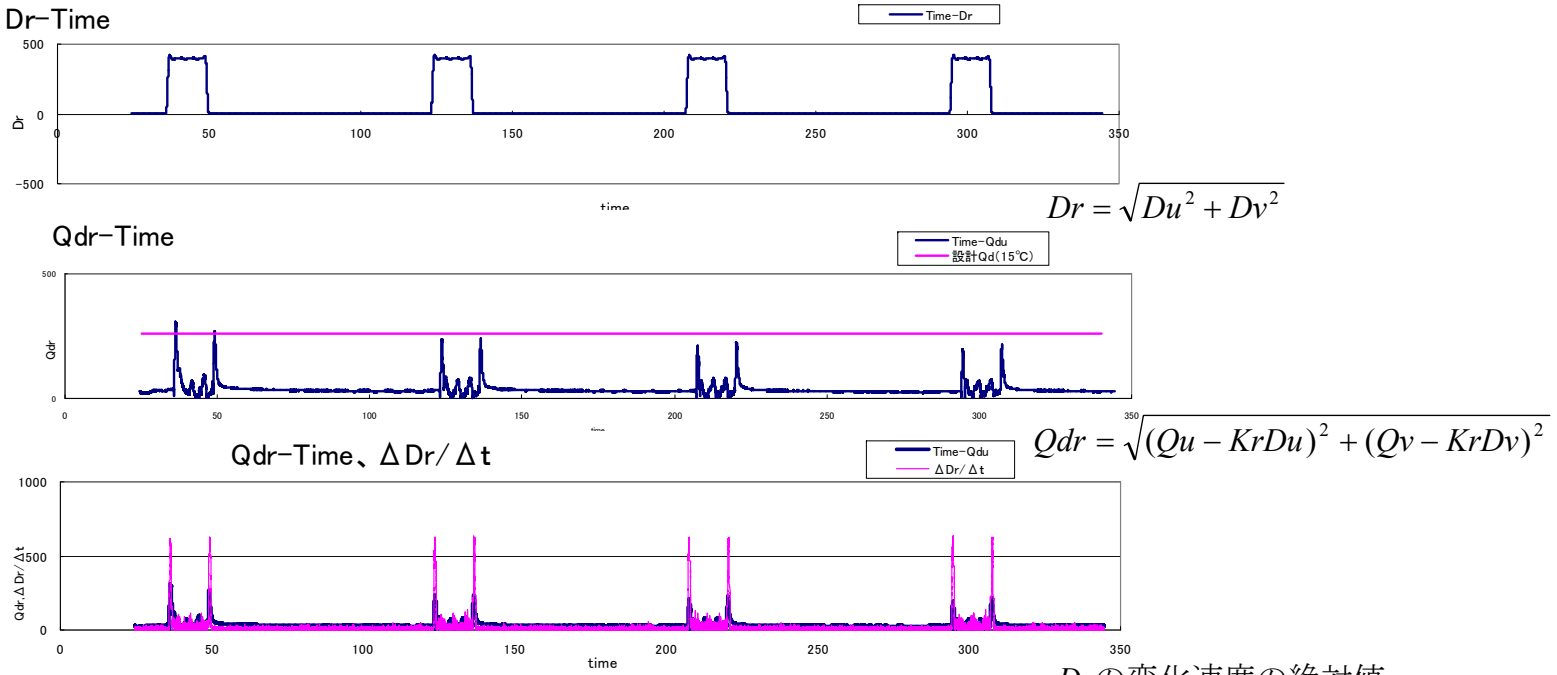
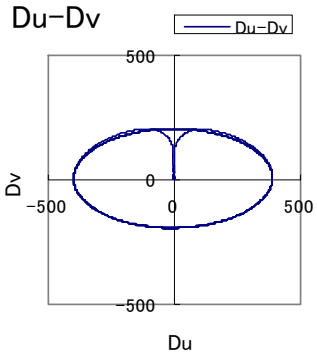
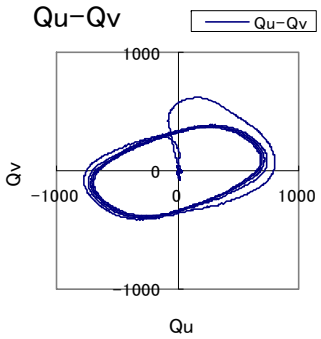
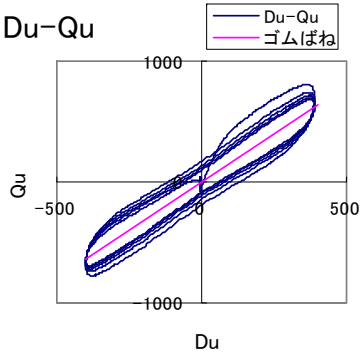
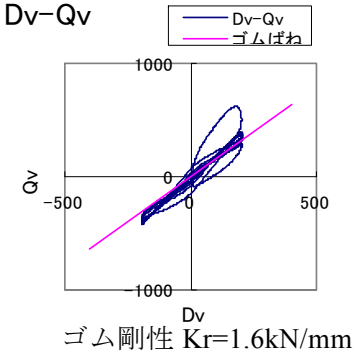


図 2.2.1-53(b)真円加振（2～5 回目）の変形および降伏荷重などの時刻歴波形



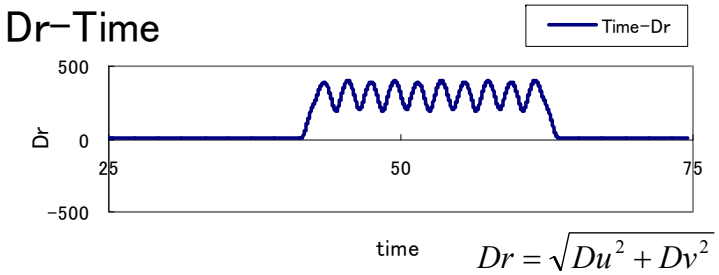




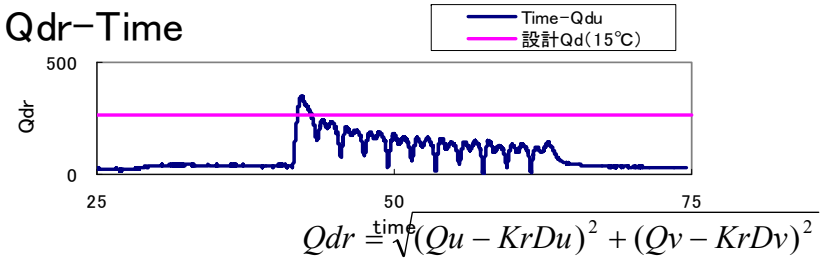


ゴム剛性 Kr=1.6kN/mm を仮定

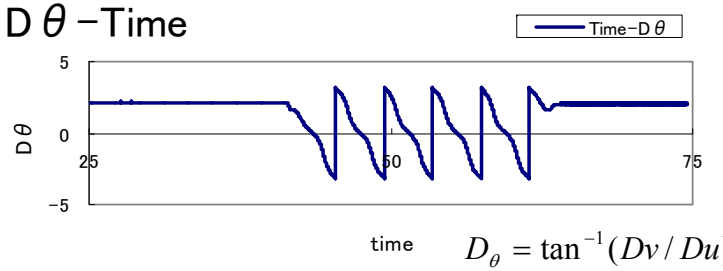
図 2.2.1-54(a)楕円加振（１回目）の変形・応力の軌跡と履歴曲線



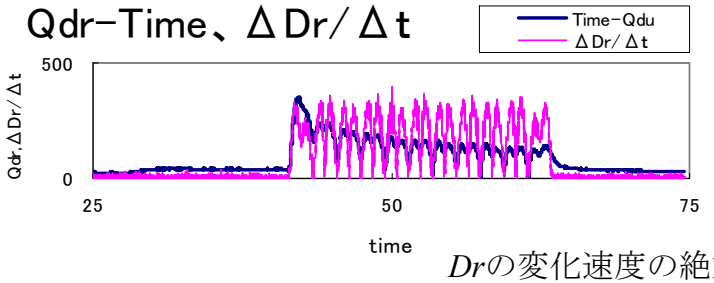
$$Dr = \sqrt{Du^2 + Dv^2}$$



$$Qdr = \sqrt{(Qu - KrDu)^2 + (Qv - KrDv)^2}$$



$$D_\theta = \tan^{-1}(Dv / Du)$$



*Dr*の変化速度の絶対値

図 2.2.1-54(b)楕円加振（１回目）の変形および降伏荷重などの時刻歴波形

b) 既往実験に基づく考察

既往の LRB2 方向円加振実験 2 例と今回の実験結果の概要の比較を表 2.2.1-10 に示す。既往研究 2 例はあまり大きくない試験体を加振した結果であるが、大振幅や低面圧のものが含まれており、今回の実験で計測されたような荷重変形関係における履歴面積・降伏荷重の急激な低下は見られず、また 2 軸非線形を表すための MSS モデルによる解析により精度良く実験結果が再現されている。これらの実験との実験条件の差は、それほど大きくなく、強いて挙げれば、試験体の大きさ、温度上昇の量が既往に比べて極めて高い可能性があることであるが、原因を特定できる知見は既往実験からは得られなかった。

c) 本現象の原因に関する考察

先述の「真円加振において降伏荷重ひいては荷重変形関係における履歴面積が激減するのは、原点からの変形量（ベクトル長さ）Dr が一定の際であり、真円加振初期および終了前、基本特性試験のように Dr が変化する間はそれなりの降伏荷重および荷重変形関係における履歴面積が出ている。」ことを考えると、可能性のある原因として円加振時には鉛プラグが塑性変形せず、すなわち、鉛直軸回りに鉛プラグが回転することによって形状変化が生じない現象が生じていることが考えられる。図 2.2.1-55 に示すように 1 方向加振の場合には鉛プラグの形状変化が必ず生じるが、円加振の定常状態では、鉛プラグと周辺の積層ゴム部や鋼製フランジとの干渉がなければ鉛直軸回りに鉛プラグが回転するだけで、形状変化、塑性変形を受ける必要はない。しかしながらこのような現象は上述のように既往実験では見られないものであり、考えられる原因の一つにしか過ぎない。しかしこれ以外の考えられる原因は現在見当たらない。今回の実験と既往実験の大きな差は、温度上昇の差であり、熱膨張率の高い周辺部のゴム（線膨張率 110×10^{-6}/K）が膨張し、熱膨張率が相対的に低い鉛（線膨張率 29×10^{-6}/K）との間に空隙が生じ始めたためとの推測することも可能であるが、限られた実験結果であり原因は特定できず、今後の研究が必要である。

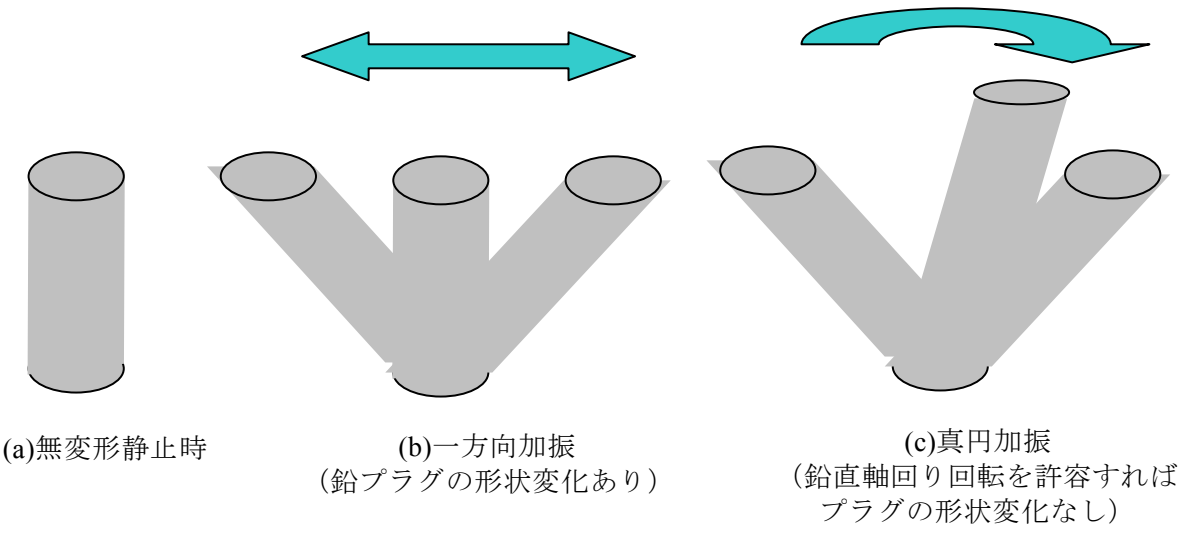
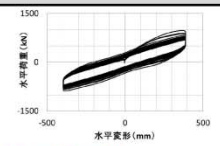
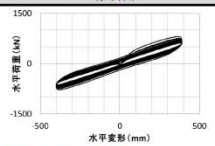
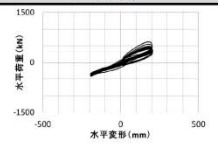
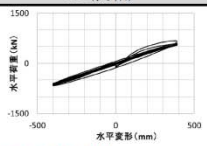
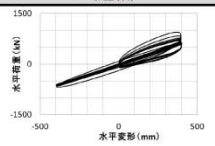
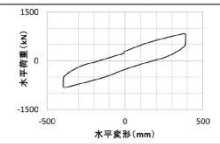
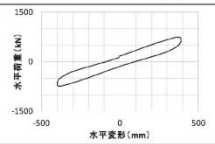
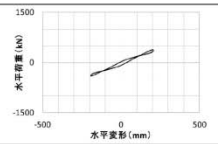
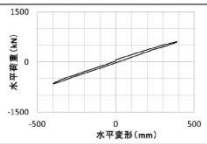
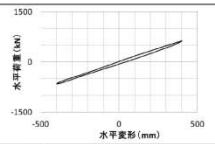
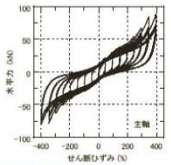
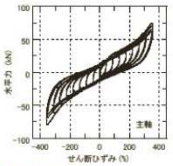
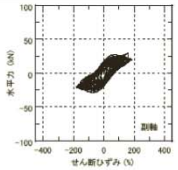
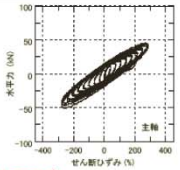
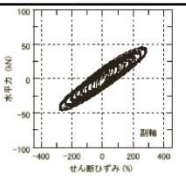
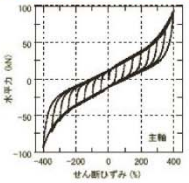
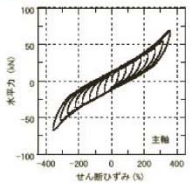
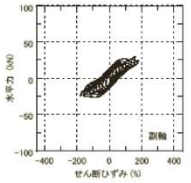
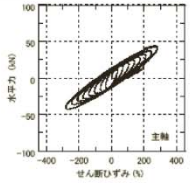
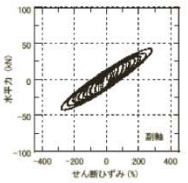
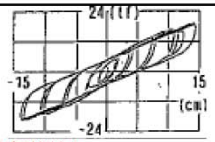
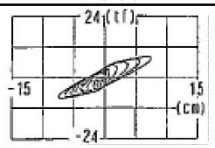
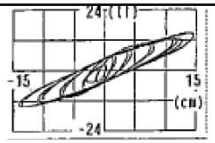
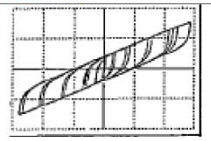
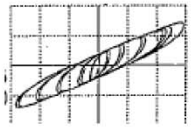
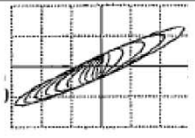


図 2.2.1-55 鉛プラグの形状変化の模式図

表 2.2.1-10 鉛プラグ入り積層ゴムの既往２方向加振実験結果との比較

	試験体	実験加振条件	実験	1 方向加振	楕円加振		円加振	
					X（長軸）	Y（短軸）	X（長軸）	Y（短軸）
今回実験	φ1000 鉛プラグ φ200 ゴム層厚さ ＝198 ㎜ S2＝5.1	周期 4 秒 鉛直面圧 ：5MPa γ＝200%(長軸) 1 方向：5cyc×7 楕円:5cyc×12 真円:3cyc×7 ※断熱材あり	実験 全重ねがき	 フランジ中央温度 開始時 28.6℃、終了時 95.8℃ ゴム表面温度 開始時 25.6℃、終了時 26.3℃	 フランジ中央温度 開始時 43.2℃、終了時 121.4℃ ゴム表面温度 開始時 38.9℃、終了時 40.8℃		 フランジ中央温度 開始時 31.0℃、終了時 70.1℃ ゴム表面温度 開始時 31.4℃、終了時 32.2℃	
			実験 2 サイクル目					
仲村ほか 文献 2)	φ225 鉛プラグ φ40 ゴム層厚さ ＝40.6 ㎜ S2＝5.54	加振速度 3cm/s 鉛直面圧 ：10MPa 各振幅 3 サイクル γ＝～400% ※断熱材なし	実験	 ゴム表面温度 開始時 19.7℃、γ=400 時 25.6℃	 ゴム表面温度 開始時 21.0℃、γ=400 時 26.7℃		 ゴム表面温度 開始時 22.1℃、γ=400 時 26.8℃	
			解析					
前田ほか 文献 3)	φ500 鉛プラグ φ80 ゴム層厚さ ＝174 ㎜ S2＝2.9	周期 2 秒 鉛直面圧 ：5MPa 各振幅 4 サイクル γ＝～80% ※断熱材なし	実験	 温度計測なし				
			解析 MSS HD モデル					

(8) 実験後の試験体状況

1) 熱電対の設置状況

1 日目の加振終了後に、鉛中央を計測している熱電対の抜け出しが確認された（写真 2.2.1-8）。抜け出し長さは約 170mm であった。正弦波 1 方向加振で、加振中に鉛中央温度が低下する現象が現れており（図 2.2.1-15 参照）、加振初期から抜け出しが始まっていたと考えられる。

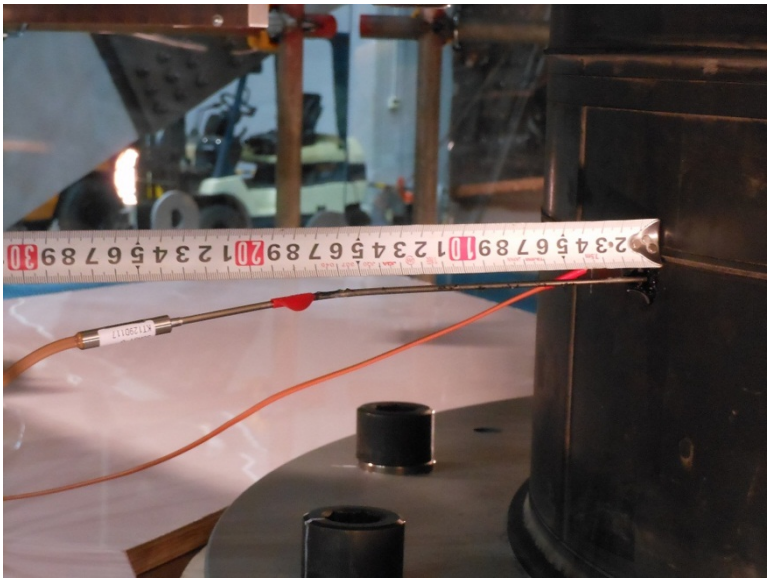
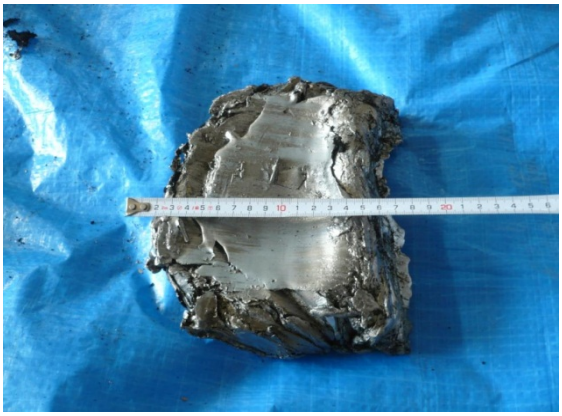


写真 2.2.1-8 鉛中央の熱電対の抜け出し状況（1 日目終了後）

2) 破断後の試験片飛散状況

積層ゴムの破断により、鉛片および内部鋼板が飛散した。飛散した鉛片および鋼板の写真を写真 2.2.1-9 に示す。ビデオによる観察から、試験片は破断後に変形を 0 に戻した際に飛散していることが確認されている。



(a)鉛プラグ

(b)内部鋼板

写真 2.2.1-9 破断後の飛散試験片

3) 実験後の試験体切断状況

試験後の試験体の内部状況を確認するため、試験体の切断を行った。破断試験により破断した試験体の下部側を、半割り体、1/4 割体の 2 つの計 3 体の部分にカットし観察した。カット部位を図 2.2.1-56 に、写真 2.2.1-10～写真 2.2.1-11 にカット後の試験体内部写真を示す。写真 2.2.1-10 より、鉛プラグが 3 層に分断されており、各ブロック間にはゴムを含む薄い層が介在している。この層の存在は破断時に生じたものではなく、真円あるいは、楕円の際の過酷な加振によって生じたものと考えられる。また、写真 2.2.1-11 に見られる最下部の鉛ブロックの上境界面は、先述の鉛プラグの鉛直軸回りの回転が生じやすい半球面になっており、先述の鉛プラグ（ブロック）がほぼ剛体のように回転する現象のようなものが生じて、減衰性の低下を招いた可能性が高いことを示唆している。

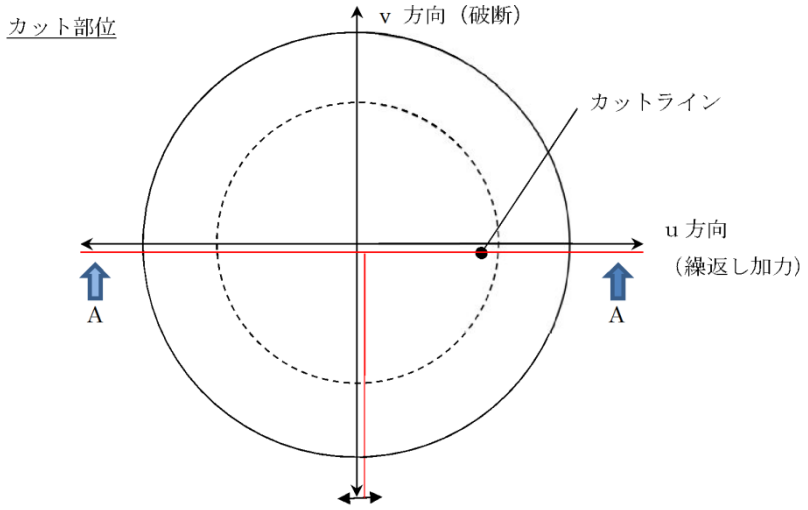


図 2.2.1-56 試験体カット部位

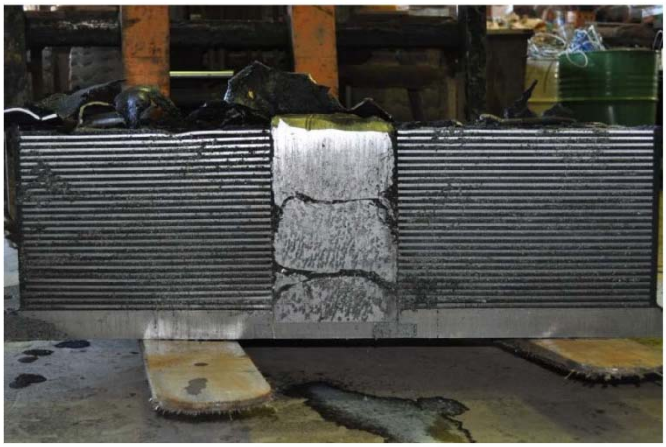


写真 2.2.1-9 半割体写真（A-A 矢視面）

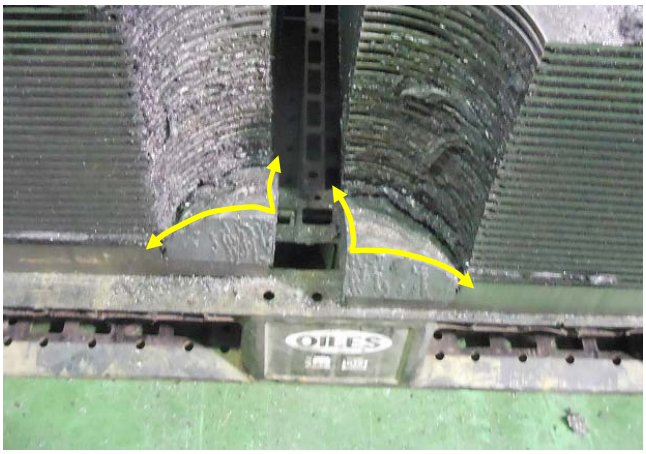


写真 2.2.1-10　1/4 割体 2 体写真（逆 A-A 矢視面）

(9) まとめと今後の課題

長周期地震動に対する鉛プラグ入り積層ゴムの力学特性および性能を把握するため、直径φ1,000 の実大鉛プラグ入り積層ゴムを用いて各種加振実験を実施した。以下に、本実験より得られた知見および今後の課題を記す。

1) 多数回繰り返しによる力学特性値の変化

各加振の前後に実施した基本特性試験より、加振による試験体温度の上昇とともに荷重変形関係における履歴面積が小さくなるが、温度低下に伴い、荷重変形関係も回復することが確認された。しかし、真円加振後に実施した基本特性試験の特性値は、他のケースに比べ低く、何らかの損傷が生じていた可能性が高い。

正弦波 1 方向加振では、繰り返し回数が増すごとに降伏荷重 Qd が低下し履歴ループが小さくなっているものの、安定したループを描いていることが確認された。Qd は初期サイクルで大きく低下する傾向が見られたが、それ以降の低下は緩やかである。正弦波 1 方向多数回繰り返し加振（せん断ひずみ 200%、35 回繰返し、累積変形約 55m）では、Qd は 55%まで低下した。Kd の変化は小さく、変化量は最大で－4%程度であった。

地震応答波 1 方向・2 方向加振の比較では、2 方向加振および温度上昇の影響により、主梁方向の荷重変形関係が 1 方向加振よりも小さくなり、この現象は、受梁方向の振幅が大きいほど顕著であった。2 方向加振では、回数ごとに荷重変形関係における履歴面積が小さくなり、6 回の繰り返しで Qd は初回の約 70%まで低下した。Qd の低下に反比例して温度が上昇しており、正弦波加振と同様に、試験体の温度と Qd の低下には負の相関があることが確認された。

正弦波 2 方向加振の楕円加振における主梁方向の荷重変形関係は、受梁方向の振幅の影響により Qd は小さくなっているものの、安定した荷重変形関係を描いていた。楕円加振では、正弦波 1 方向加振の約 2 倍となる 100m の累積変形を与えたところ、Qd は累積変形 50m 程度で 40%程度まで低下した。しかし、それ以降も Qd は大きく低下することはなかったことから、累積変形が大きくなる場合においても、Qd は際限なく低下することなく、ある一定のところに収束することが明らかとなった。

正弦波 2 方向加振の楕円加振の受梁方向加振、真円加振においては、主梁・受梁方向加振ともに履歴ループ面積の殆どない荷重変形関係が得られた。さらに、荷重変形関係は履歴ループが交差するケースも見られ、履歴吸収エネルギーや等価減衰定数がマイナスとなるサイクルもあった。 試験体をカットした際の内部状況確認により、試験終了後に鉛プラグが 3 層に分断されていたことが確認され、真円加振あるいは楕円加振の過酷な加振によって分断が生じたものと推察されることから、鉛プラグがほぼ剛体のように回転する現象が生じて、減衰性の低下を招いた可能性が高いことを示唆している。

真円加振時に見られる減衰性能の顕著な低下は、過酷な加振によるものと考えられ、初期に実施された 2 方向地震応答波加振結果には見られない現象である。また、真円加振のように一定振幅が長く保たれる場合に生じるものと考えられ、実際の地震動では、本現象が長周期地震動による免震建築物の応答に及ぼす影響は大きくないと考えられる。

2) 多数回繰り返しによる温度上昇

表 2.2.1-11 に各実験における累積履歴吸収エネルギーΣΔW と温度上昇の関係を示す。これより、各加振における累積履歴吸収エネルギーΣΔW は 0.6～11×10^6(kN/mm)で、これを鉛の熱容量で除した値は 32.5～623.4℃である。実際の鉛プラグ部の温度上昇は、フランジ中央温度から推察すると、上記よりも低かったと考えられる。

正弦波 1 方向多数回繰り返し加振では、鉛中央温度は加振開始と同時に急上昇し、加振が終了すると直ちに温度が低下し始めていた。これに対し、鉛上部やフランジ中央の温度上昇は緩やかで、加振終了後も温度が上昇し続けていた。これは、鉛中央で発生した熱が、徐々に鉛内部を通ってフランジに熱伝導されているためである。フランジ端部や被覆ゴム内部の温度はほとんど上昇しなかった。鉛中央の熱電対が加振中に抜け出したため、参考値ではあるが、鉛中央の温度は最大で 30℃から 137℃まで上昇した。

地震応答波 1 方向と 2 方向では、温度上昇に明確な差は現れなかった。2 方向加振開始時の試験体温度が高かったことや、受梁方向のせん断ひずみが 70%程度と小さく温度上昇に寄与しなかったことが原因と推察する。

真円加振では履歴面積の殆どない荷重変形関係が得られており、同等の累積変形を与えたケースと比較して累積履歴吸収エネルギーがかなり小さい。それにも拘わらずフランジの温度は上昇している。この理由としては、真円加振では先述の鉛プラグの分断等の損傷が既に生じて鉛プラグにおける発熱分布や周囲への熱伝導性状が変化していたことが可能性として考えられる。

表 2.2.1-11 累積履歴吸収エネルギーと温度の比較

	累積履歴吸収エネルギーΣΔW			ΣΔW／鉛熱容量	累積変形	フランジ中央温度		
	主梁	受梁	全体			開始時	最高	増分
	(kN*mm)			(℃)	(m)	(℃)	(℃)	(℃)
正弦波 1 方向	-	-	1.0E+07	597.4	55.4	28.3	95.9	67.5
地震応答 1 方向	-	-	1.6E+06	94.2	10.1	33.4	49.8	16.4
地震応答 2 方向 (1 回目)	1.3E+06	9.4E+05	2.2E+06	126.5	15.0	42.6	64.4	21.8
地震応答 2 方向 (1～6 回目)	6.1E+06	4.7E+06	1.1E+07	623.4	92.8	42.6	92.5	49.9
楕円 (1 回目)	1.1E+06	7.1E+04	1.2E+06	69.2	10.0	43.0	64.9	21.9
楕円 (1～12 回目)	7.9E+06	-4.2E+05	7.4E+06	429.2	119.4	43.0	121.4	78.4
真円 (1 回目)	1.9E+05	3.8E+05	5.6E+05	32.5	8.2	31.0	48.0	17.0
真円 (1～7 回目)	1.8E+05	1.1E+06	1.2E+06	71.5	57.7	31.0	70.1	39.1

3) 今後の課題

本実験では、試験体が 1 体であったことや、時間の制約があり試験体の冷却時間が十分に取れなかったことから、想定される長周期地震動をはるかに超える過大な変位履歴を与えることとなった。それにより、円加振では既往研究では見られない現象が生じており、この現象の解明が今後必要である。

実験結果のシミュレーション解析結果では 1 方向加振結果（正弦波加振、地震応答波加振）や 2 方向加振結果のうち地震応答波加振については積層ゴムの内部温度や荷重変形関係、降伏荷重の変化について実験結果と解析結果とでよく一致した。2 方向加振結果のうち楕円加振、真円加振については実験結果と解析結果とで乖離が見られた。実験時に見られた荷重変形関係の履歴面積が小さくなる現象のシミュレーション解析やその特性変化が地震応答に与える影響評価については今後の課題である。

参考文献

2.2.1-1) 竹中康雄､ほか:大振幅繰返し変形を受ける積層ゴム支承の熱･力学的連成挙動に関する研究（その9～その11）；日本建築学会学術講演梗概集（中国）、B-2、pp.397-402、2008.9

2.2.1-2) 仲村崇仁、ほか:鉛プラグ入り積層ゴムの水平２方向復元力特性に関する研究；日本建築学会構造系論文集、第 681 号、2012.11.

2.2.1-3) 前田祥三、ほか:建物の免震防振構法の開発（その 19 鉛コア積層ゴムの水平２軸加力実験とシミュレーション解析)、日本建築学会大会梗概、pp443-444、1989 年 10 月

2.2.2 高減衰ゴム系積層ゴム

(1) はじめに

平成 22 年度に、高減衰ゴム系積層ゴムの縮小試験体(直径 250mm)による長振幅高速繰返し試験を実施した[2.2.2-1)]。この実験結果より、繰返し加振によるゴム温度の上昇、温度変化による積層ゴムの剛性や減衰特性の変動、繰返し加振時の荷重履歴の影響を確認した。ここでは、縮小試験体の実験から得た繰返し特性の実大サイズへの適用性、水平 2 方向加振時の繰返し特性、および破断限界の確認を目的として、実大試験体(直径 1000mm)による長振幅高速繰返し試験を E-ディフェンスの大型震動台を用いて実施した。

(2) 試験日時と試験場所

・試験日時

2012 年 10 月 11 日：地震応答波加振(1 方向、2 方向)、楕円繰返し加振

2012 年 10 月 12 日：1 方向正弦波繰返し加振、真円繰返し加振、1 方向大振幅加振

・試験場所

独立行政法人　防災科学技術研究所　兵庫県耐震工学研究センター(E-ディフェンス)

(3) 試験体

試験体は、直径 1000mm の高減衰ゴム系積層ゴム(ブリヂストン X0.6R[2.2.2-2)])1 体である。表 2.2.2-1 に、試験体の諸元を示す。また、図 2.2.2-1 に試験体形状を示す。試験体の上フランジには、試験体温度計測用の熱電対を配線するために幅・深さとも 10mm の溝が設けられている。また、加振時に試験体に発生する熱が周辺冶具に伝達しないよう、試験体の上下に断熱板を設置した。断熱板には標準高温用断熱板(D-M-E 双葉、厚さ 10mm)を使用した。表 2.2.2-2 に、断熱板の仕様を示す。写真 2.2.2-1 に、試験体の設置状況を示す。

表 2.2.2-1　高減衰ゴム系積層ゴム試験体概要

	外径 (mm)	内径 (mm)	ゴム層厚	内部鋼板厚 (mm)	S1	S2
実大	1000	25	6.7mm×30 層=201mm	4.4	36.4	4.98

G_{eq} (γ=100%時) = 0.620N/mm^2

表 2.2.2-2　断熱板の仕様

圧縮強度	338(N/mm^2)　(24℃の場合) 103(N/mm^2)　(285℃の場合)
吸水性	0.06%
熱伝導率	0.274W/(m・k)　(24℃の場合) 0.303W/(m・k)　(220℃の場合)
難燃性	94V－0(自己消化性)
最高使用温度	285℃
材質	アルミニュームカーボネート＋グラスファイバー＋ 不飽和ポリエステル

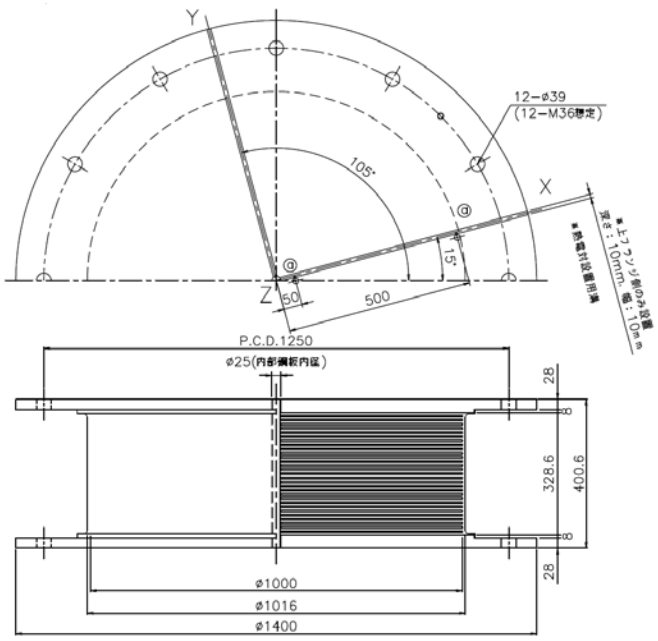


図 2.2.2-1　高減衰ゴム系積層ゴム試験体形状

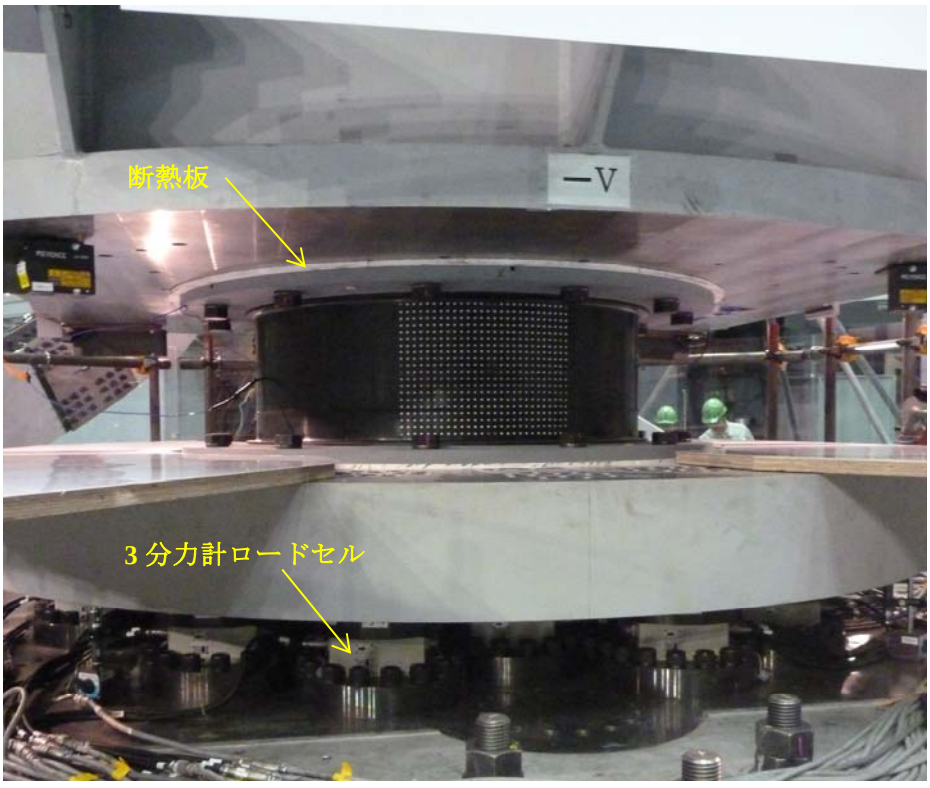


写真 2.2.2-1　高減衰ゴム系積層ゴム試験体設置状況

(4) 計測項目と計測方法

計測項目と各センサーについては、以下の通りである。

・水平・鉛直荷重： 3 分力計ロードセル(共和電業 LSM-700KM) ×31 台

・水平変位： レーザー変位計(IL-2000) ×4 台

・鉛直変位： レーザー変位計(LK-500) ×4 台

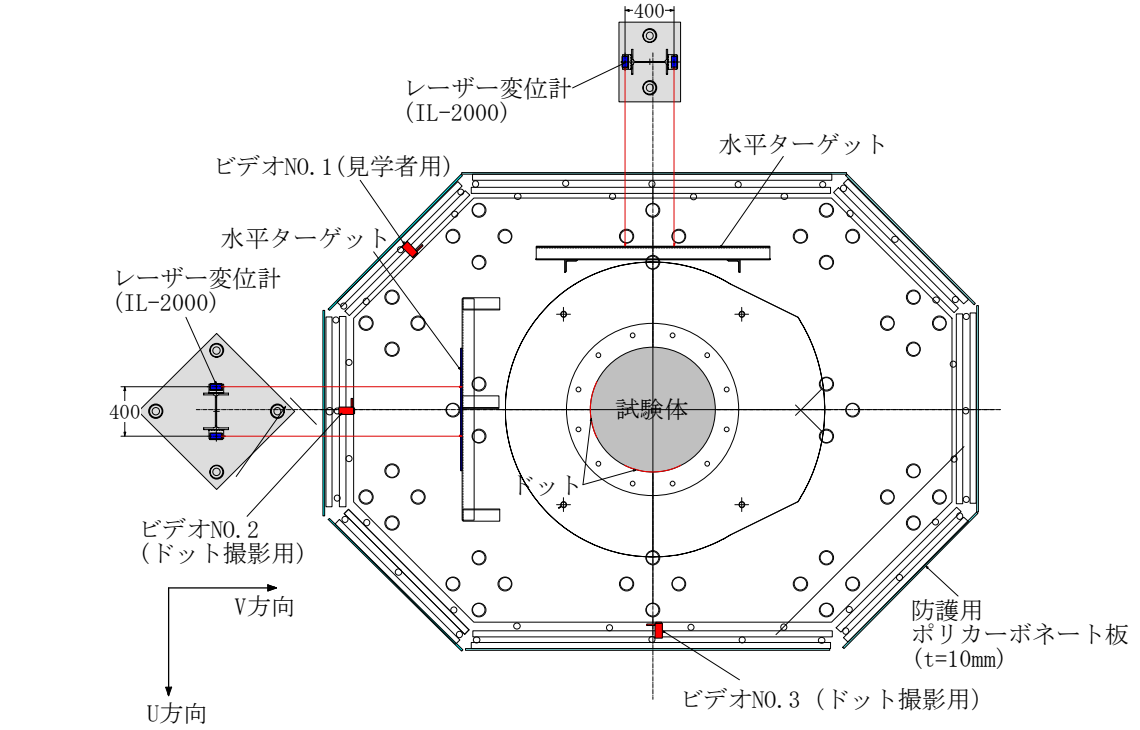
歪ゲージ型変位計(CDP-10) ×4 台

・温度： (試験体) K 型熱電対(DK65T)×14 点、放射温度計(HIOKI3444)×1 点

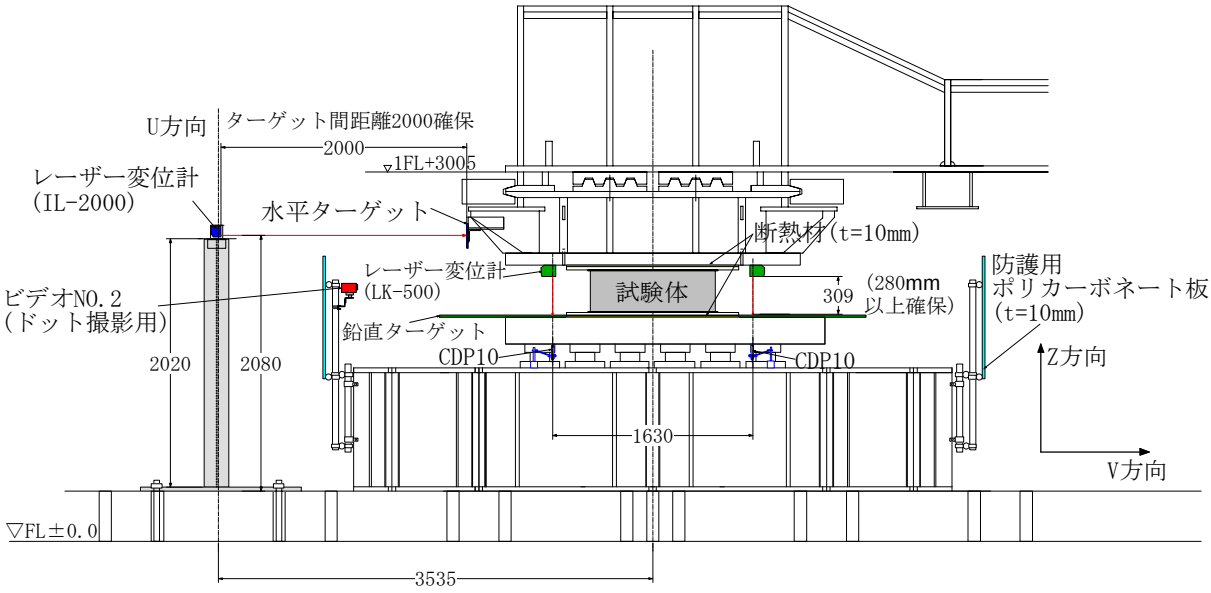
(雰囲気温度) T 型熱電対×1 点

・ねじれ変形： 試験体にドットを描きビデオ撮影(水平 27 点×鉛直 20 点 @15mm)

水平荷重、および鉛直荷重は下部ブロックと試験体固定プレート下部の間に固定された 31 台の 3 分力計ロードセルにより測定して計測値を合算し、水平方向については U、V 方向成分に変換した。水平変位は、U、V 各方向 2 台ずつのレーザー変位計にて測定し、2 台の平均値を試験体の変位とした。鉛直変位は、上部ブロックと試験体固定プレート上部に設置したターゲット板の間の鉛直変位をレーザー変位計にて測定した。また、試験体固定プレートと下部ブロックの間の鉛直変位を歪ゲージ型変位計にて測定して、両者の間に相対変位が生じていないか確認した。試験体温度については、ゴムの高さ中心に 4 点、上フランジの上下面に 5 点ずつ設置した熱電対にてゴム内部とフランジ温度を測定し､放射温度計にてゴム表面温度を測定した。さらに、2 方向加振により発生するねじれひずみを計測するためゴムの表面にドットを描いてビデオ撮影し、画像解析によりねじれひずみの算出を行った。図 2.2.2-2 に試験体周りの計測機の配置図を、図 2.2.2-3 に 3 分力計ロードセルの配置図を、図 2.2.2-3 に試験体の熱電対設置位置を示す。



(a) 計測機器平面配置図



(b) 計測機器立面配置図

図 2.2.2-2　試験体周り計測器配置図

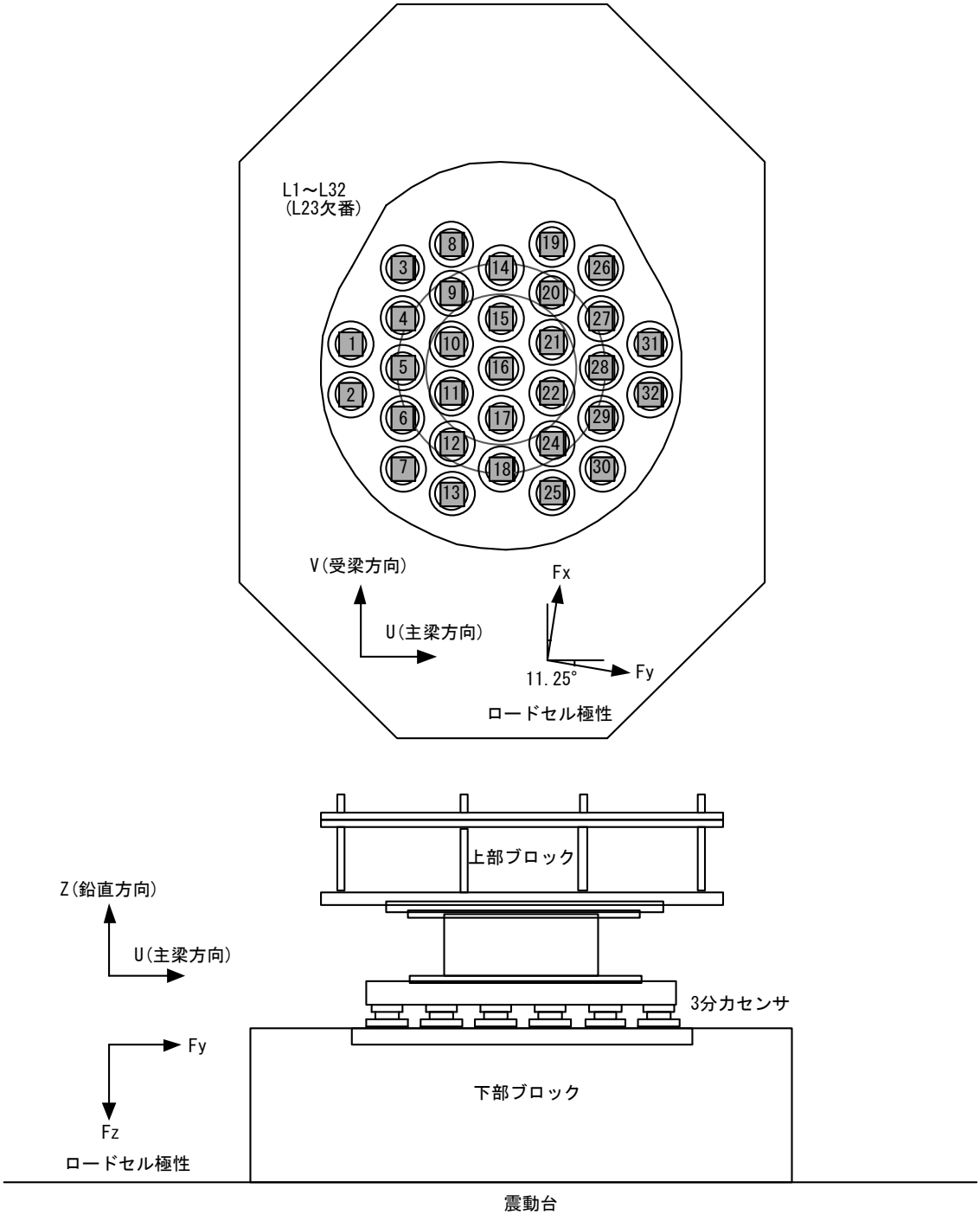


図 2.2.2-3　3 分力計ロードセル配置図

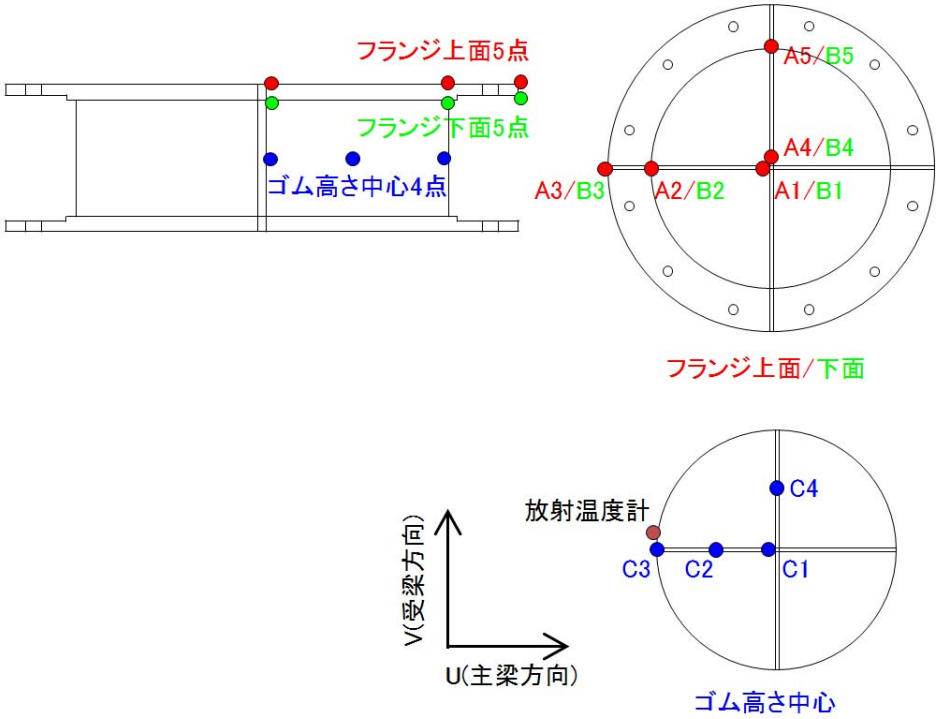


図 2.2.2-4　試験体温度計測点

(5) 加振ケース

加振ケースとして、以下の 4 つのケースを設定した。

(1) 水平 1 方向多数回繰返し加振 (正弦波加振)

積層ゴムサイズの違いによるスケール効果を確認するため、平成 22 年度実施の縮小試験体の実験結果 [2.2.2-1)]と比較できる加振ケースとして、振幅γ=200%で累積変形量 100m まで。

(2) 水平 2 方向多数回繰返し加振 (楕円加振、真円加振)

2 方向加振時の特性把握、および水平 1 方向加振時との履歴特性変化、温度上昇傾向、エネルギー吸収量の違いを把握する。高減衰ゴム系積層ゴムは特に水平 2 方向加振時にねじれひずみが生じることが知られている。多数回繰返し加振時のねじれひずみの影響を確認するため、楕円加振およびねじれの発生が大きい真円加振も実施する。

(3) 地震応答波加振

水平 1 方向、および水平 2 方向の地震応答波加振を実施し、ランダム波による入力エネルギーと特性変動を把握する。また、解析モデルのランダム波への適用性の検証に用いる。

(4) 大振幅加振

実大免震部材の大変形時の履歴ループの確認、および破断挙動を確認する。振幅 700mm(γ=350%)から 50mm ずつ振幅を漸増した正弦波による加振を行い、最大で振幅 900mm(γ=450%)まで加振する。ただし、破断方向を定めるため振幅 850mm 以上は、＋850mm～－800mm、＋900mm～－800mm と片振幅のみ漸増する。

表 2.2.2-3 に、高減衰ゴム系積層ゴム試験体の加振ケース一覧を示す。震動台の上昇により、所定の面圧(5N/mm^2 または 3N/mm^2)を載荷した状態で水平 1 方向、または水平 2 方向の加振を実施した。地震応答波加振、1 方向加振、楕円加振は各ケースで累積変形量が 100m に達するまで繰返し加振を実施し、真円加振については、累積変形量が 50m に達するまで繰返し加振を実施した。ただし、震動台のアキュムレータ蓄圧および加振準備のため、1 方向、楕円加振は 5 サイクル毎、真円加振は 3 サイクル毎に約 1 分間のインターバル時間をはさんだ。大振幅加振は、所定の振幅における 2 サイクルの繰返し加振とした。ただし、大振幅加振については、実験時に大振幅試験の前に行った真円加振により、試験体に内部剥離が確認されたため、大振幅試験は振幅 400mm(γ=200%)から実施し、振幅 500mm(γ=250%)で破断に至ったため、それ以上の振幅の試験は実施していない。また、各加振ケースの間には、加振周期 4.0 秒、振幅 200mm(γ=100%)の基本特性加振を行った。実験全体としては、累積変形量で合計 400m 弱となる非常に厳しい加振ケースとなっている。図 2.2.2-5 に、加振に用いた変位波形を示す。波形は試験体位置における変位波形であり、入力においては震動台中心点の波形に変換して入力した。

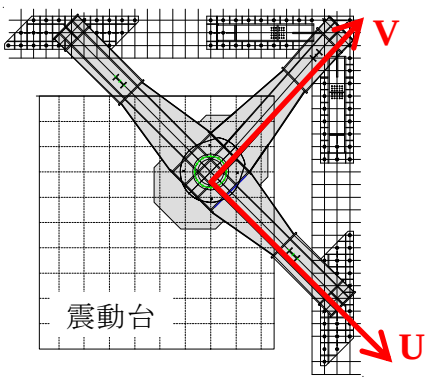
表 2.2.2-3　高減衰ゴム系積層ゴム実験ケース一覧

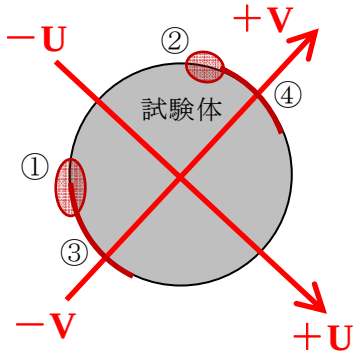
加振日程	試験条件	面圧 (N/mm²)	加振方向	ひずみ (%)	変位 (mm)	換算速度 (cm/s)	サイクル数	累積変形 (m)	損傷状況
10月11日	基本特性①	5.0 (3925kN)	U	100	200	31.4	4	3	
	地震応答波 (1方向)	5.0 (3925kN)	U	Tk-NS (最大変位200mm) × 1回				10.5m	
	地震応答波 (1方向)	5.0 (3925kN)	V	Tk-EW (最大変位268mm) × 1回				14.6m	
	地震応答波 (2方向)	5.0 (3925kN)	U V	Tk-NS (最大変位200mm) × 4回 Tk-EW (最大変位268mm) × 4回				19.2m×4回 =83.2m	
	基本特性②	5.0 (3925kN)	U	100	200	31.4	4	3	
	冷却30分								
	水平2方向繰返し 楕円	5.0 (3925kN)	U V	200 100	400 200	62.8 31.4	60 (5cyc.×12)	116	
	基本特性③	5.0 (3925kN)	U	100	200	31.4	4	3	
	冷却約17時間								
10月12日	基本特性④	5.0 (3925kN)	U	100	200	31.4	4	3	
	水平1方向繰返し 正弦波	5.0 (3925kN)	U	200	400	62.8	60 (5cyc.×12)	96	
	基本特性⑤	5.0 (3925kN)	U	100	200	31.4	4	3	
	冷却100分								
	水平2方向繰返し 真円	5.0 (3925kN)	U V	200 200	400 400	62.8 62.8	21 (3cyc.×7)	53	3回目に上端①に内部剥離の兆候。4回目に上端②に内部剥離の兆候。その後、加振により内部剥離拡大。
	基本特性⑥	5.0 (3925kN)	U	100	200	31.4	4	3	
	冷却60分								
	大振幅	3.0 (2355kN)	V	200	400	62.8	2cyc.	3	ゴムに剥離が発生したため、200%から加振開始。
			V	250	500	78.5	2cyc.	7	上端③および④において、被覆ゴム破裂。
			V	300	600	94.2	2cyc.	12	ゴム破断により実施せず。
			V	350	700	110.0	2cyc.	18	
			V	375	750	117.8	2cyc.	24	
			V	400	800	125.7	2cyc.	30	
			V	425	850	133.5	2cyc.	37	
			V	450	900	141.4	2cyc.	44	

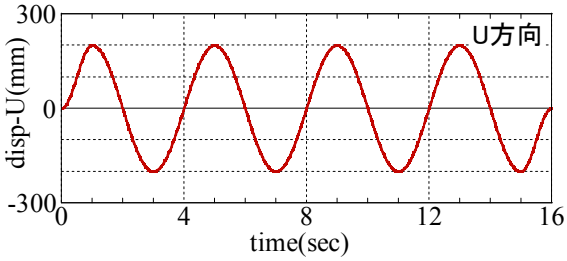
加振周期 4.0 秒

U：主梁方向

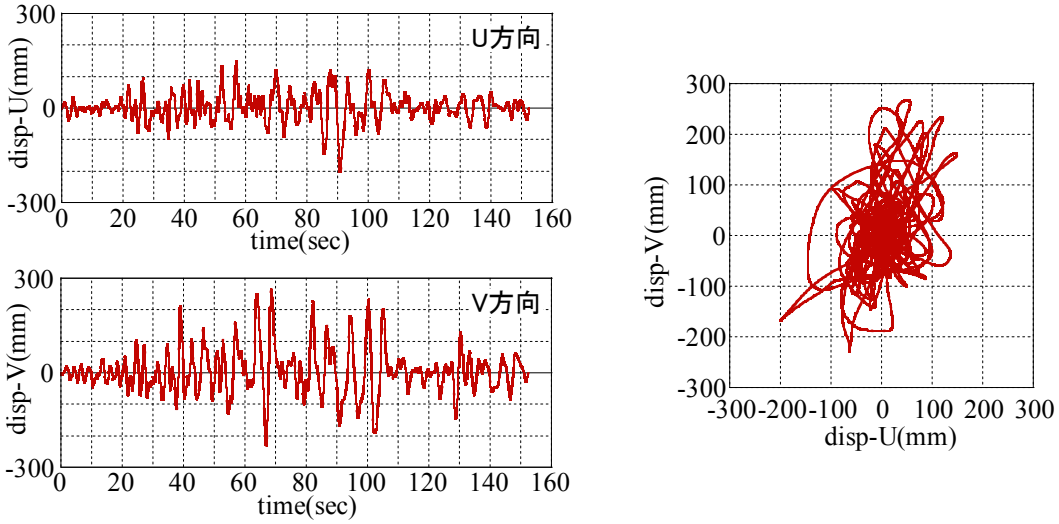
V：受梁方向



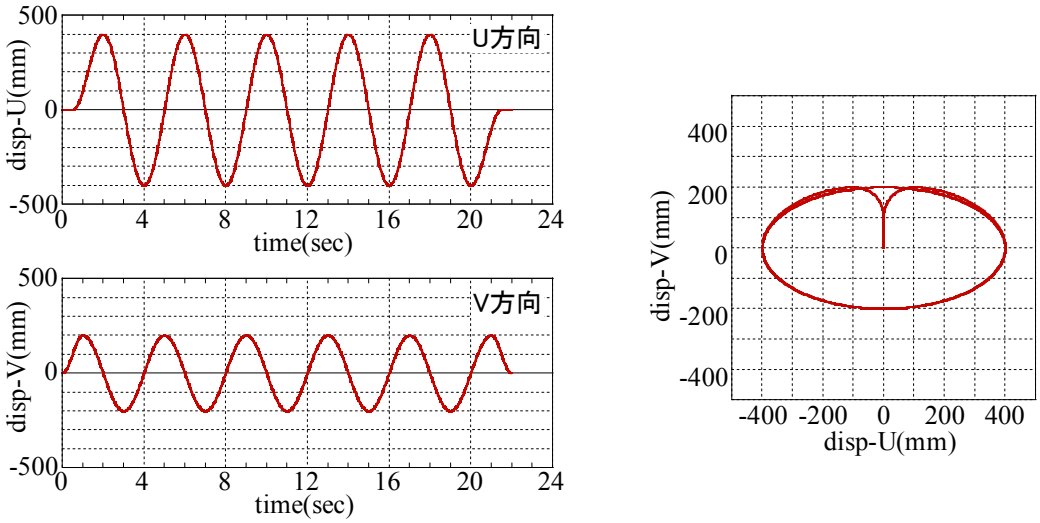




(a) 基本特性の加振波(V,Z 方向はゼロ)

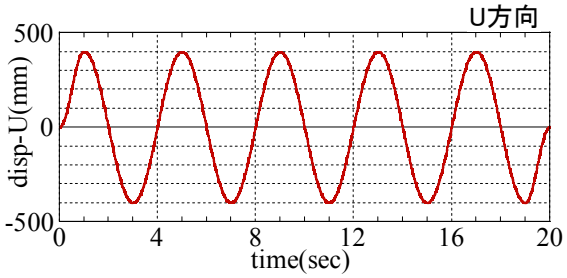


(b) 地震応答波の加振波(Z 方向はゼロ)およびオービット

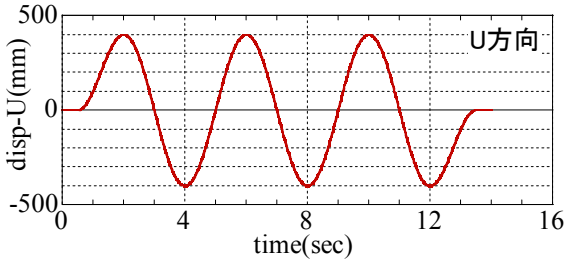


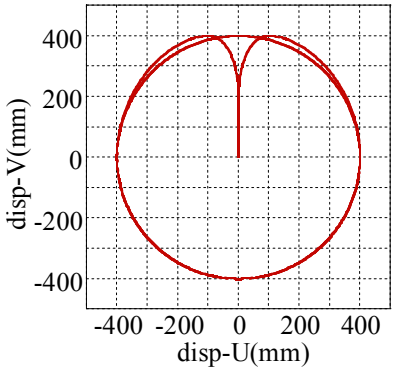
(c) 楕円加振の加振波(Z 方向はゼロ)およびオービット

図 2.2.2-5 加振に用いた変位波形(試験体位置)

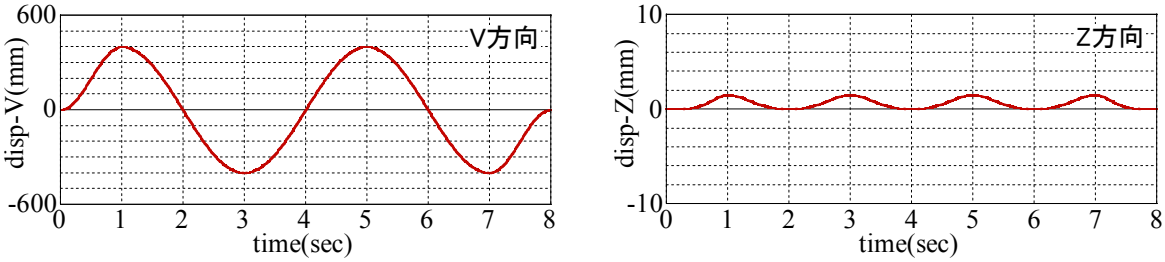


(d) 1 方向加振の加振波(V,Z 方向はゼロ)

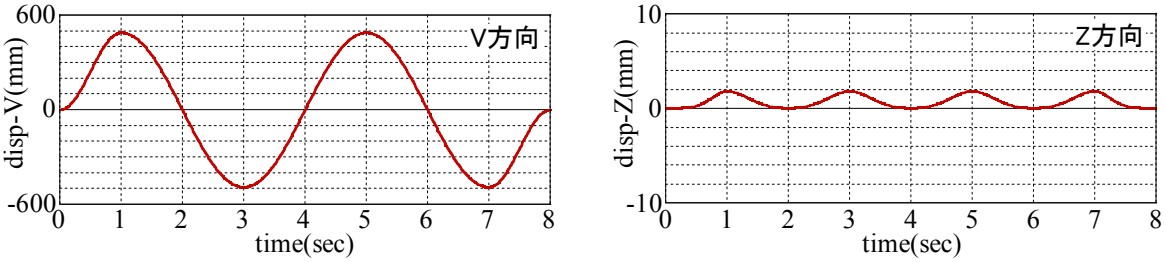




(e) 真円加振の加振波(Z 方向はゼロ)およびオービット



(f) 大振幅加振(±400mm)の加振波(U 方向はゼロ)



(g) 大振幅加振(±500mm)の加振波(U 方向はゼロ)

図 2.2.2-5 加振に用いた変位波形(試験体位置)

(6) 実験結果

6.1) 試験体の損傷状況

表 2.2.2-3 の損傷状況欄に、ビデオ観察による試験体の損傷状況を記す。真円加振の 3 回目(7～9 サイクル目)において、表 2.2.2-3 の試験体図の①位置の上フランジ直下において、内部剥離の兆候が確認された(写真 2.2.2-2(a))。この剥離はその後の真円加振により、③の方向へと拡大している(写真 2.2.2-2(b))。また、真円加振の 4 回目(10～12 サイクル目)において、試験体図の②位置の上フランジ直下において内部剥離の兆候が確認された(写真 2.2.2-3(a))。この剥離兆候はその後の加振で④の方向へやや伸展している(写真 2.2.2-3(b))。その後、せん断ひずみ 250%における大振幅試験において、内部剥離が拡大していた試験体図③、および④位置の上フランジ直下において被覆ゴムが破裂し破断に至った(写真 2.2.2-4)。

本実験においては、試験体が 1 体のみであり、また試験体の冷却に十分な時間をとれなかったことから、試験体に内部剥離の兆候が確認された真円加振時には、試験体は既に 300m 以上の累積変形を経験しており、また、加振開始時の試験体温度もゴム部で 50℃以上と高温であった。従って、本実験における試験体の破断は、高温状態で厳しい加振ケースを繰返したことによる試験体の疲労の影響が大きいと推測され、疲労を蓄積していないバージンな試験体とは破断傾向が異なると考えられる。

(a) 3 サイクル×3 回目(－U 側より)

(b) 3 サイクル×7 回目(－V 側より)

写真 2.2.2-2　真円加振時　試験体－V 側の損傷状況

(a) 3 サイクル×4 回目(＋V 側より)

(b) 3 サイクル×7 回目(＋V 側より)

写真 2.2.2-3　真円加振時　試験体＋V 側の損傷状況

(a) 大振幅±500mm 2 サイクル目
(－V 側より)

(b) 大振幅±500mm 1 サイクル目
(＋V 側より)

写真 2.2.2-4　大振幅±500mm 加振時　試験体の損傷状況

6.2) 荷重変形関係

図 2.2.2-6～2.2.2-10 に、実験結果の荷重変形関係を示す。

図 2.2.2-6 に示す、地震応答波加振の荷重変形関係において、水平 1 方向入力の荷重変形関係と水平 2 方向同時入力時の NS,EW 各成分の荷重変形関係は、おおよそ同様の形状を示している。ただし、1 方向 NS 入力時の荷重変形関係(図 2.2.2-6(a))と、2 方向同時入力時の NS 成分の荷重変形関係(図 2.2.2-6(c))を比較すると、2 方向同時入力時の荷重変形関係において変位ゼロ付近のループがやや膨らんでいることから、2 方向入力の影響がわずかに現れていることが確認できる。

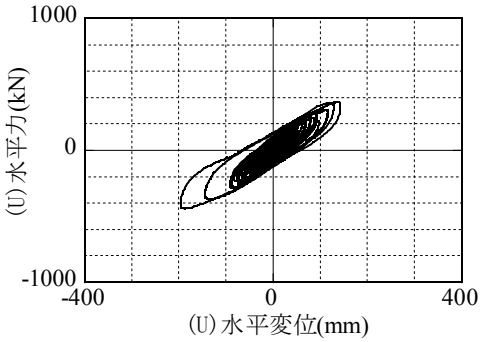
図 2.2.2-7 に示す、楕円加振時の荷重変形関係は、長軸方向については 1 方向加振時の荷重変形関係に近いが、ハードニングをほとんど生じないループとなっている。短軸方向については、変位ゼロ付近でループが膨らむ形状となっており、1 方向加振時のループ形状とは全く異なる。長軸、短軸のループとも、繰返し加振により荷重切片値の低下が明確に現れているが、最大変形時の荷重には大きな低下は生じていない。

図 2.2.2-8 に示す、1 方向正弦波加振時の荷重変形関係は、最大変形の 400mm 付近でややハードニングを生じるループ形状となっている。繰返し加振により、最大変形時の荷重の低下が明確に現れている。

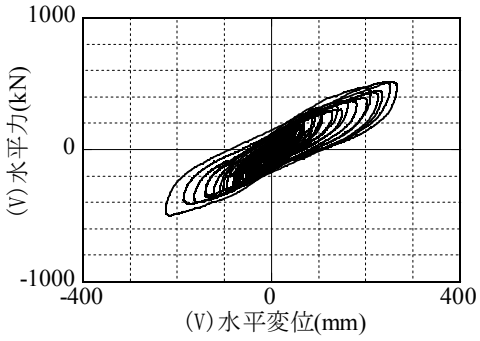
図 2.2.2-9 に示す、真円加振時の荷重変形関係は、U,V 各方向成分とも変位ゼロ付近が膨らんだ紡錘形のループ形状となっている。繰返しにより、荷重切片値が低下しているが、最大変形時の荷重の低下は比較的小さい。また、真円加振の 3 サイクル×3 回目の加振において、試験体に内部剥離の兆候が現れ、加振が進むにつれ剥離が伸展していったが、履歴ループには試験体の損傷の影響は見られず、健全なループ形状を維持している。

図 2.2.2-10 に、大振幅加振の荷重変形関係を示す。大振幅加振は、真円加振により試験体が損傷を受けた後に実施した試験であるが、荷重変形関係は健全なループ形状を維持している。図 2.2.2-10(b)に示す、被覆ゴムの破裂が生じた大振幅±500mm 加振の履歴ループにおいては、破裂による影響は履歴ループ上に明確に現れておらず、安定したループ形状を保ったまま原点に戻っている。

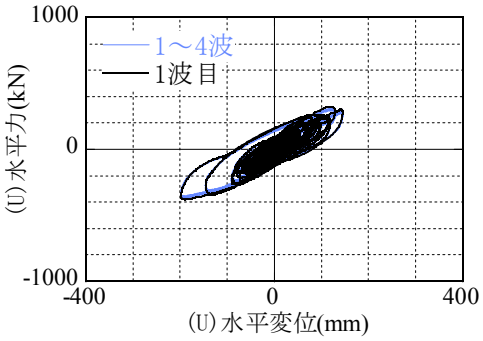
以上より、水平 2 方向加振時には、直交する 2 方向の各成分の荷重変形関係は、直交方向の加力の影響からループ形状が 1 方向加振時とは異なることを確認した。ただし、地震応答波のようなランダム波においては、楕円加振や真円加振に比べて荷重変形関係への 2 方向入力の影響は少なかった。また、試験体に内部剥離が生じても荷重変形関係は安定した履歴ループを維持していたことから、試験体に多少の損傷が生じても、ただちに装置性能を喪失するものではないと言える。



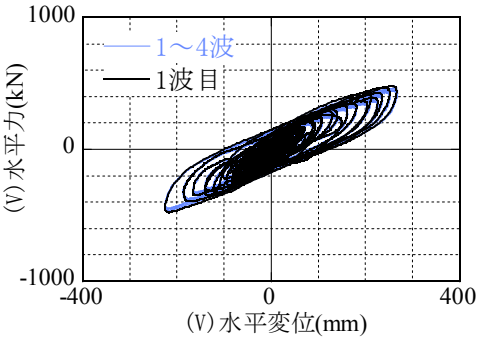
(a) 1 方向 NS 入力



(b) 1 方向 EW 入力

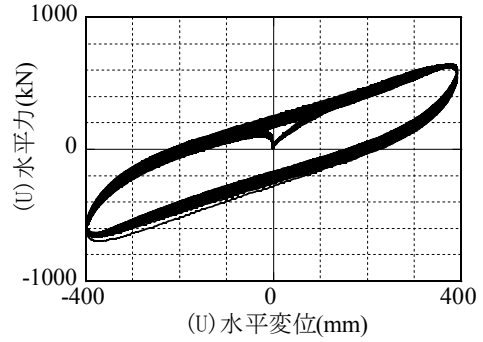


(c) 2 方向同時入力 NS 成分

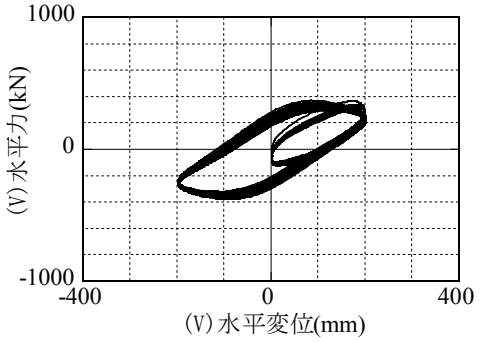


(d) 2 方向同時入力 EW 成分

図 2.2.2-6　地震応答波加振の荷重変形関係



(a) U 方向成分(長軸方向)



(b) V 方向成分(短軸方向)

図 2.2.2-7　楕円加振(5 サイクル×12 回)の荷重変形関係

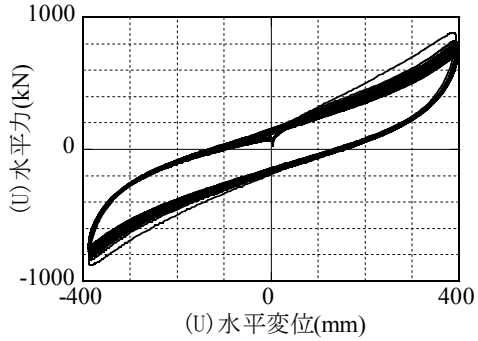
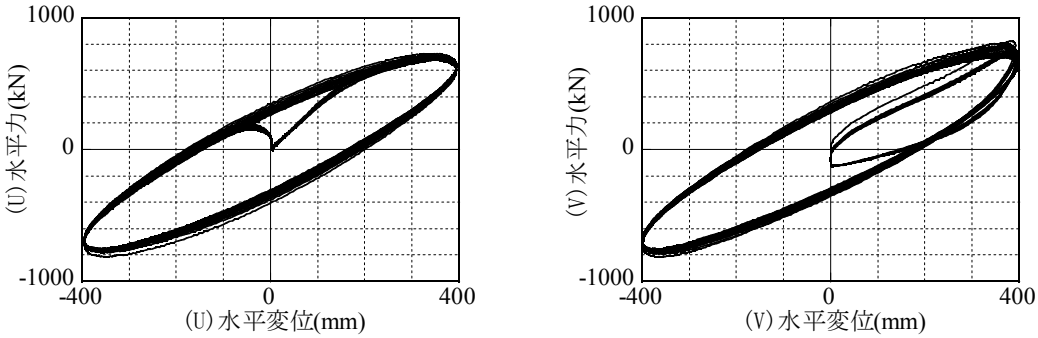
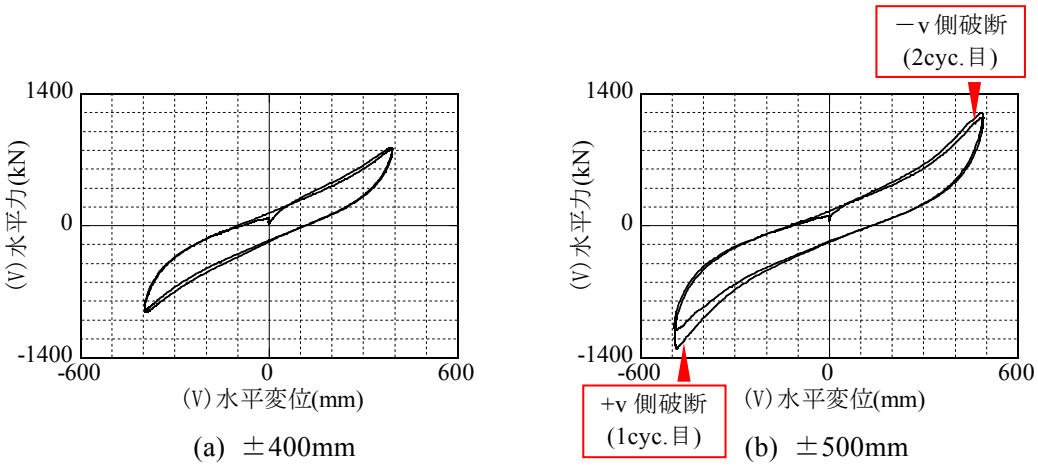


図 2.2.2-8　1 方向正弦波加振(5 サイクル×12 回)の荷重変形関係



(a) U 方向成分　　(b) V 方向成分

図 2.2.2-9　真円加振(3 サイクル×7 回)の荷重変形関係



(a)　±400mm　　(b)　±500mm

図 2.2.2-10　大振幅加振(2 サイクル)の荷重変形関係

6.3) 試験体の温度推移

図 2.2.2-11～2.2.2-16 に、実験時の試験体の温度変化を示す。

図 2.2.2-11 に示す、地震応答波の 1 方向入力時において、試験体のゴム温度は NS 方向入力で 1.3℃、EW 方向入力で 2.7℃上昇した。EW 方向入力時に、試験体中心部のゴム温度を測定する熱電対 C1 が断線し計測不能となった。図 2.2.2-12 に示す、地震応答波の 2 方向同時入力時においては、4 回連続入力の 1 回目の入力で 3.6℃ゴム温度が上昇した。地震応答波 2 方向の 4 回連続入力の 2 回目で、試験体のゴム部分の中心温度を測定する 2 点の熱電対のうちの 1 点である C4 が断線し計測不能となった。地震応答波加振は、1 方向入力と 2 方向入力を合わせて累積変形量 100m に達する加振であるが、この加振によるゴムの温度上昇は約 13℃と比較的小さかった。

図 2.2.2-13 に、楕円加振時の試験体の温度変化を示す。楕円加振時においては、インターバルをはさまない 5 サイクルの加振で 10℃弱ゴム部の中心温度が上昇し、ゴム部中心温度は最高 74℃まで上昇した。ただし、放射温度計によるゴムの表面温度は 52℃であった。フランジは、楕円繰返し加振により中央部の上面、下面で 7℃程度温度が上昇したが、最外端ではほとんど温度変化が生じなかった。楕円加振の 5 サイクル×8 回目の入力において、ゴムの表面温度を測定する熱電対 C3 の値が、これまでほぼ一致していた放射温度計の値よりも小さくなり、加振中においても温度が低下している。このことから、この時に熱電対 C3 が抜け出てしまったと考えられ、値は出ているものの適切に計測できていないと見られる。

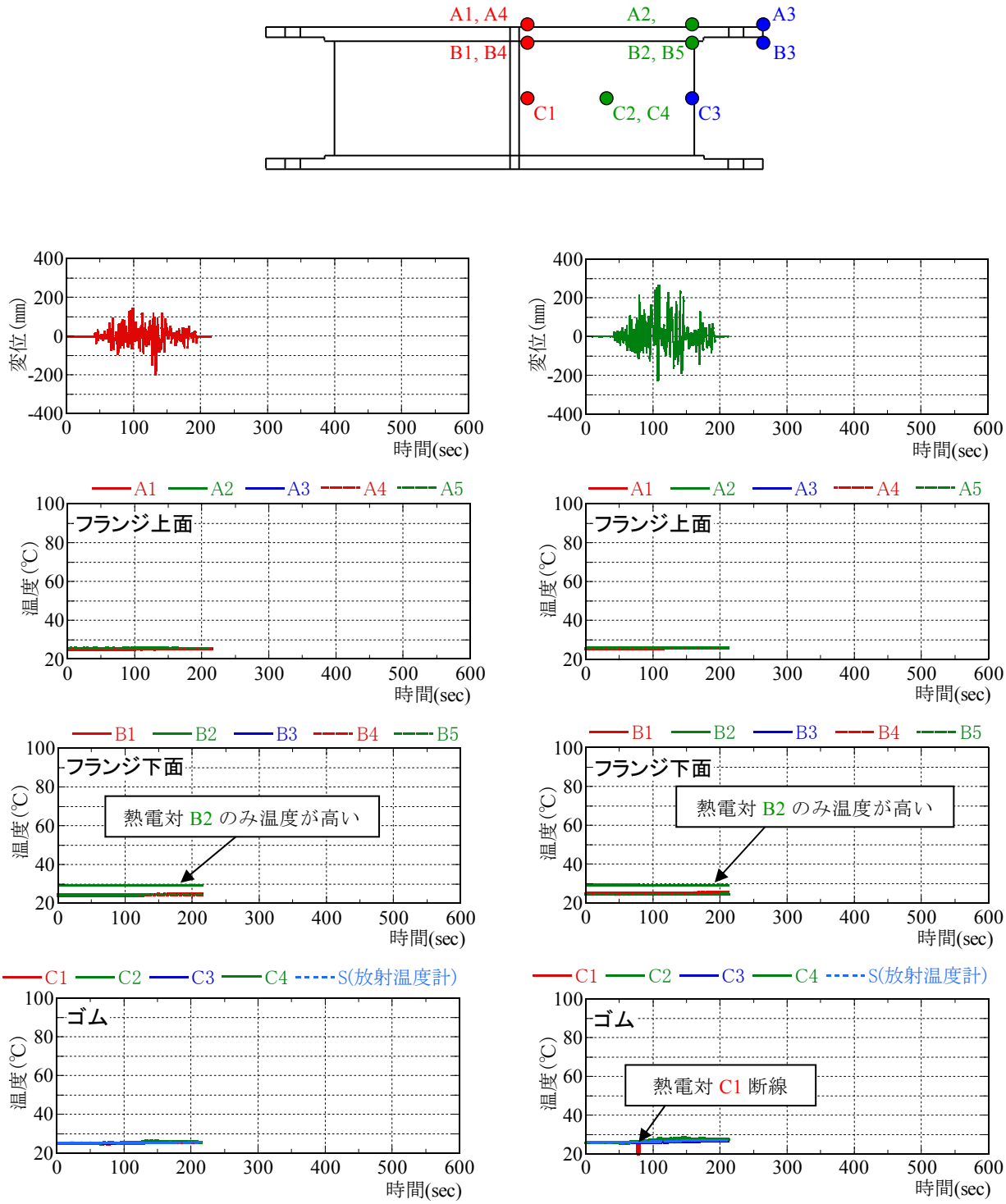
図 2.2.2-14 に、1 日目の加振終了時からの試験体の温度低下を示す。ゴム中心部の温度低下は非常に緩やかで、加振により 70℃程度まで上昇した温度は約 14 時間後においても 40℃程度までしか低下しなかった。

図 2.2.2-15 に示す、1 方向正弦波繰返し加振においては、インターバルをはさまない 5 サイクルの加振で 5℃程度ゴム部の中心温度が上昇し、ゴム部中心温度は最高 59℃まで上昇した。放射温度計によるゴム表面温度は、最高 43℃であった。

図 2.2.2-16 に示す､真円加振においては､インターバルをはさまない 3 サイクルの加振で 10℃強ゴム部の中心温度が上昇し、ゴム部中心温度は最高 86℃まで上昇した。放射温度計によるゴム表面温度は最高 53℃であった。

図 2.2.2-17 に、各加振ケースの単位ゴム体積当たりの累積エネルギーE/V と温度増分の関係を比較して示す。1 方向正弦波加振、楕円加振、真円加振といった正弦波による繰返し加振は累積エネルギーと温度増分の関係がほぼ等しいが、地震応答波加振は正弦波による繰返し加振と比較すると、同じエネルギー量でも温度上昇が小さい。これは、正弦波による繰返し加振は大振幅によるエネルギーが連続的に入力されるのに対し、地震応答波においては、大振幅によるエネルギー入力は数回、断続的に生じるためと考えられる。

以上より、地震応答波による試験体の温度上昇は比較的小さく、1 方向繰返し加振、楕円加振､真円加振といった正弦波の繰返しによる加振はエネルギーが連続的に入力され続けるため、試験体の温度上昇に対して非常に厳しい条件であることがわかる。



(a) 1 方向 NS 入力　　(b) 1 方向 EW 入力

図 2.2.2-11　地震応答波加振(1 方向入力)時の変位時刻歴と試験体の温度推移

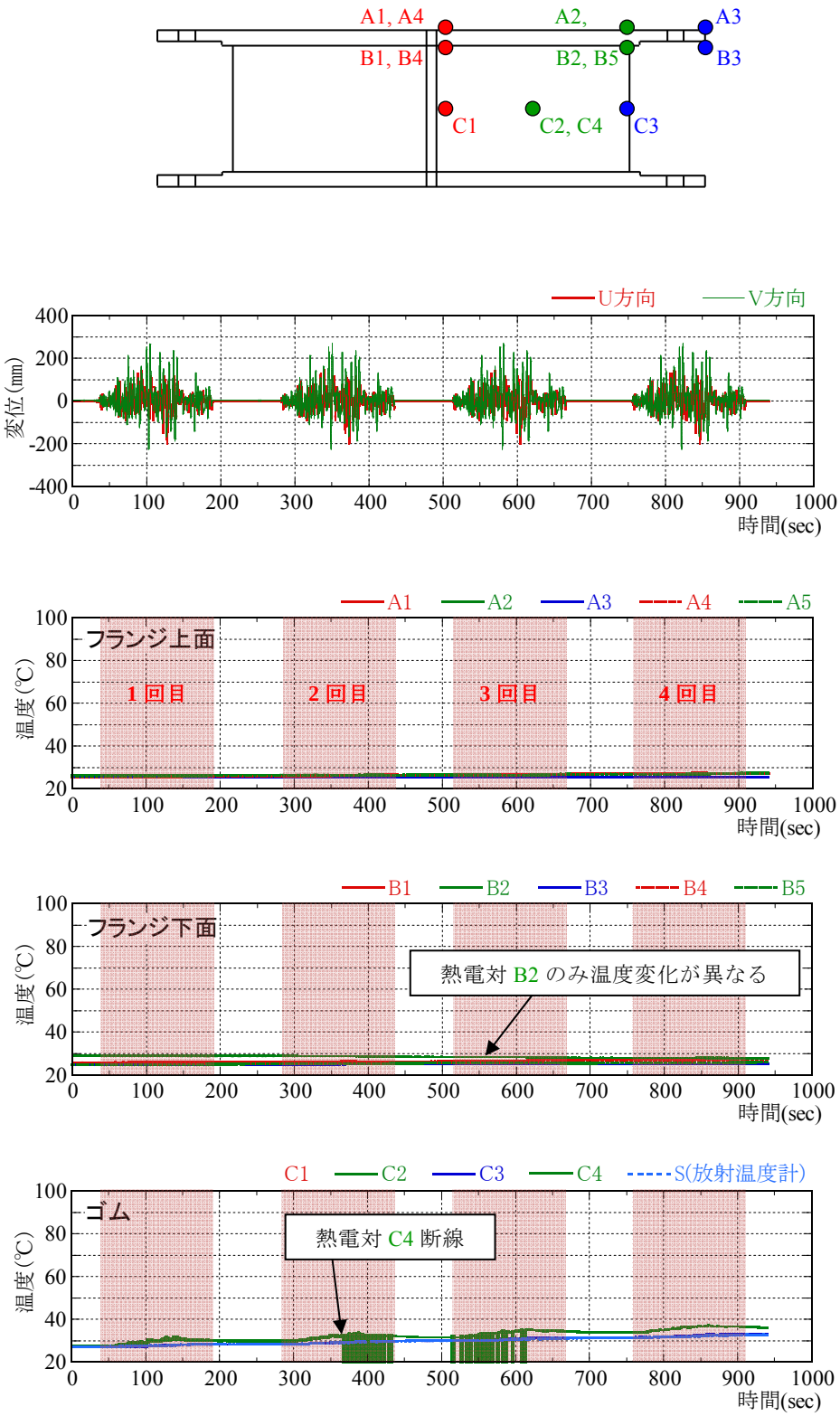
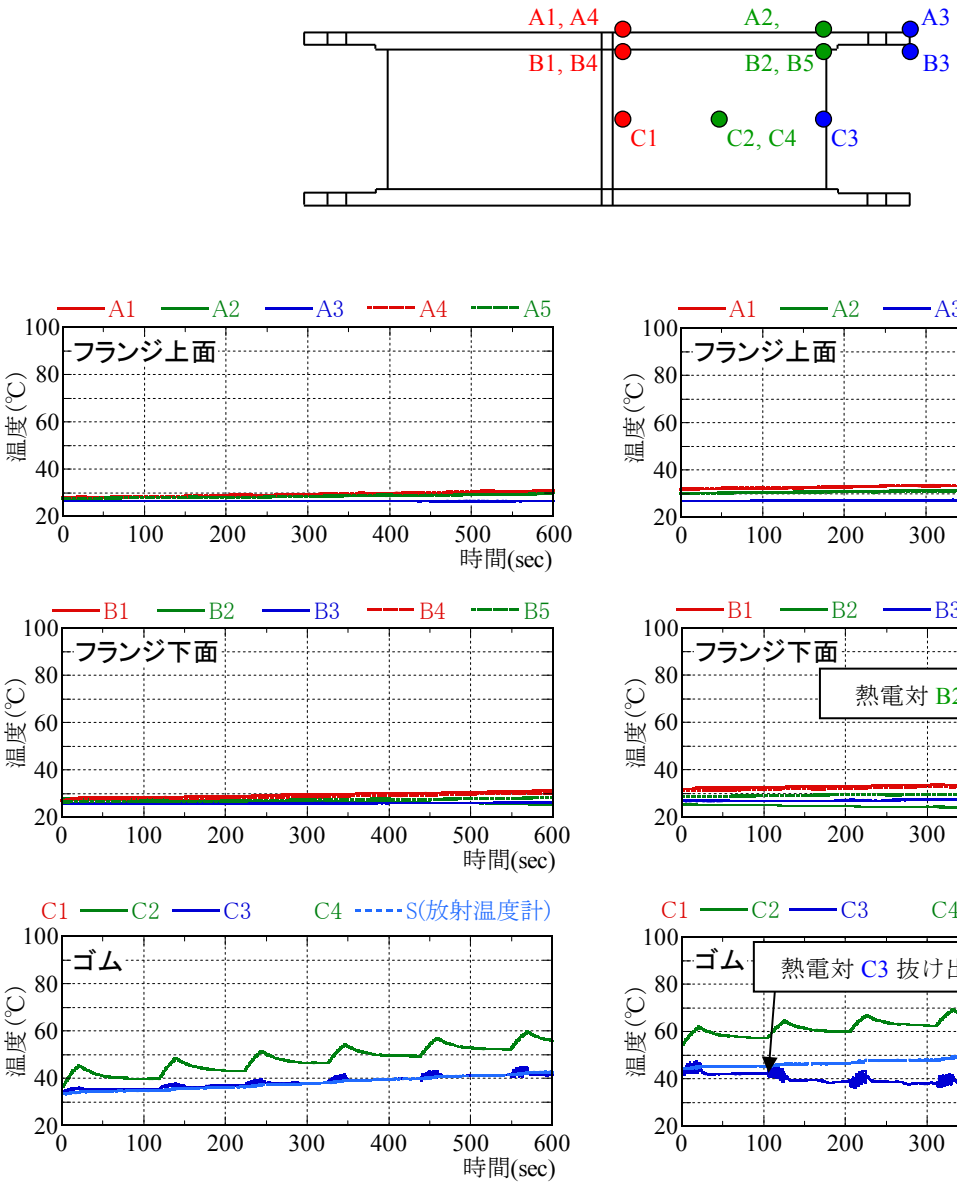


図 2.2.2-12　地震応答波加振(2 方向同時入力)時の変位時刻歴と試験体の温度推移



(a) 5 サイクル×1～6 回目　　(b) 5 サイクル×7～12 回目

図 2.2.2-13　楕円加振時の試験体の温度推移

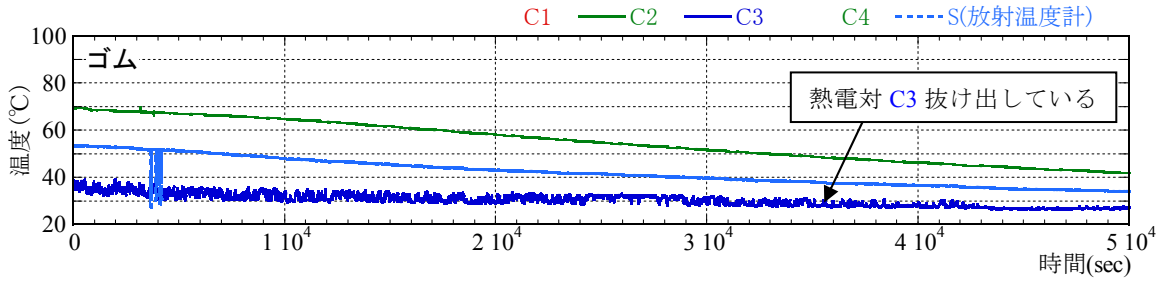
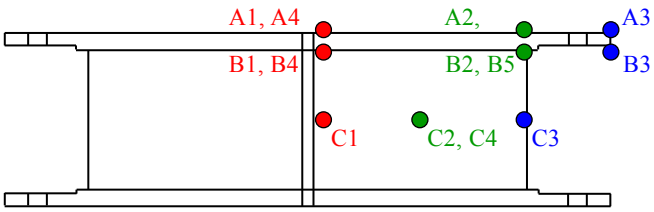
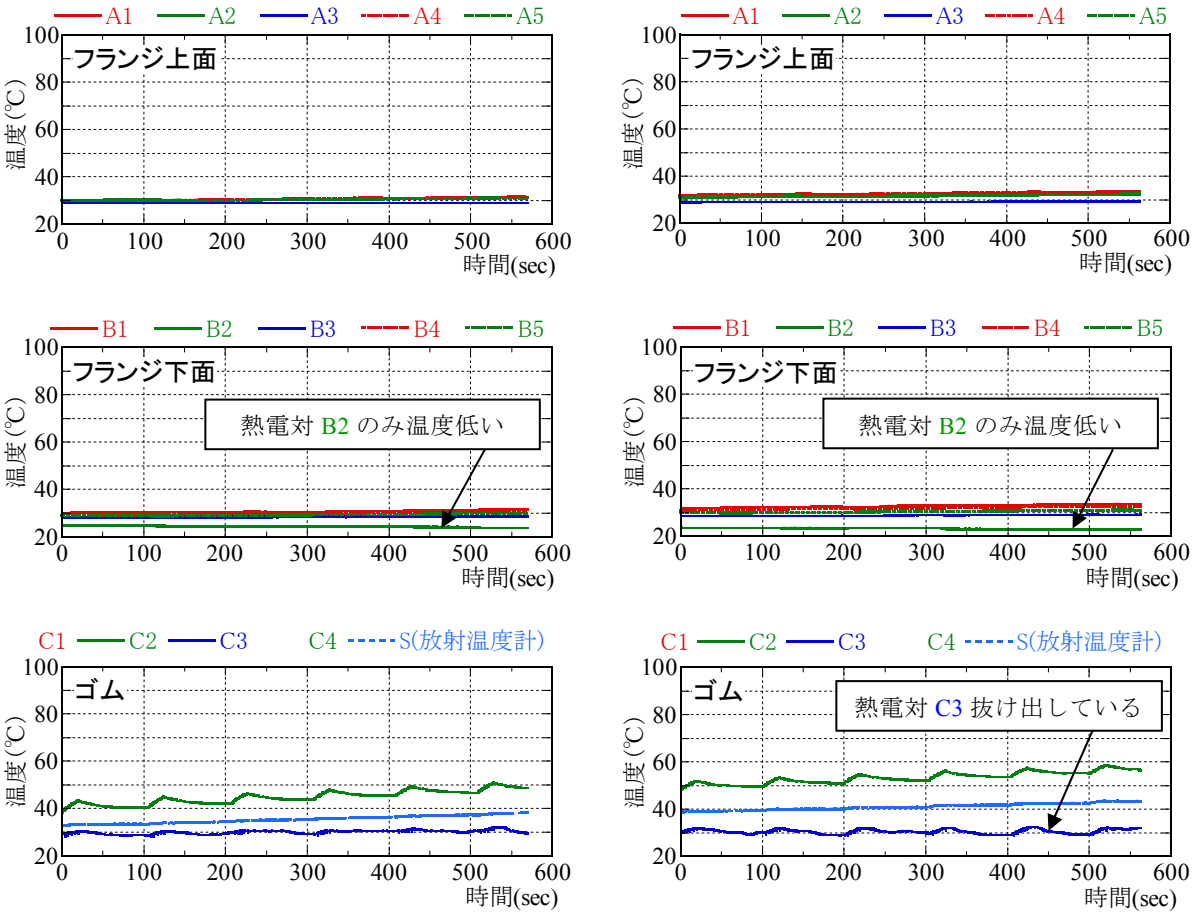


図 2.2.2-14　1 日目加振終了後の試験体の温度低下





(a) 5 サイクル×1～6 回目　　(b) 5 サイクル×7～12 回目

図 2.2.2-15　1 方向正弦波加振時の試験体の温度推移

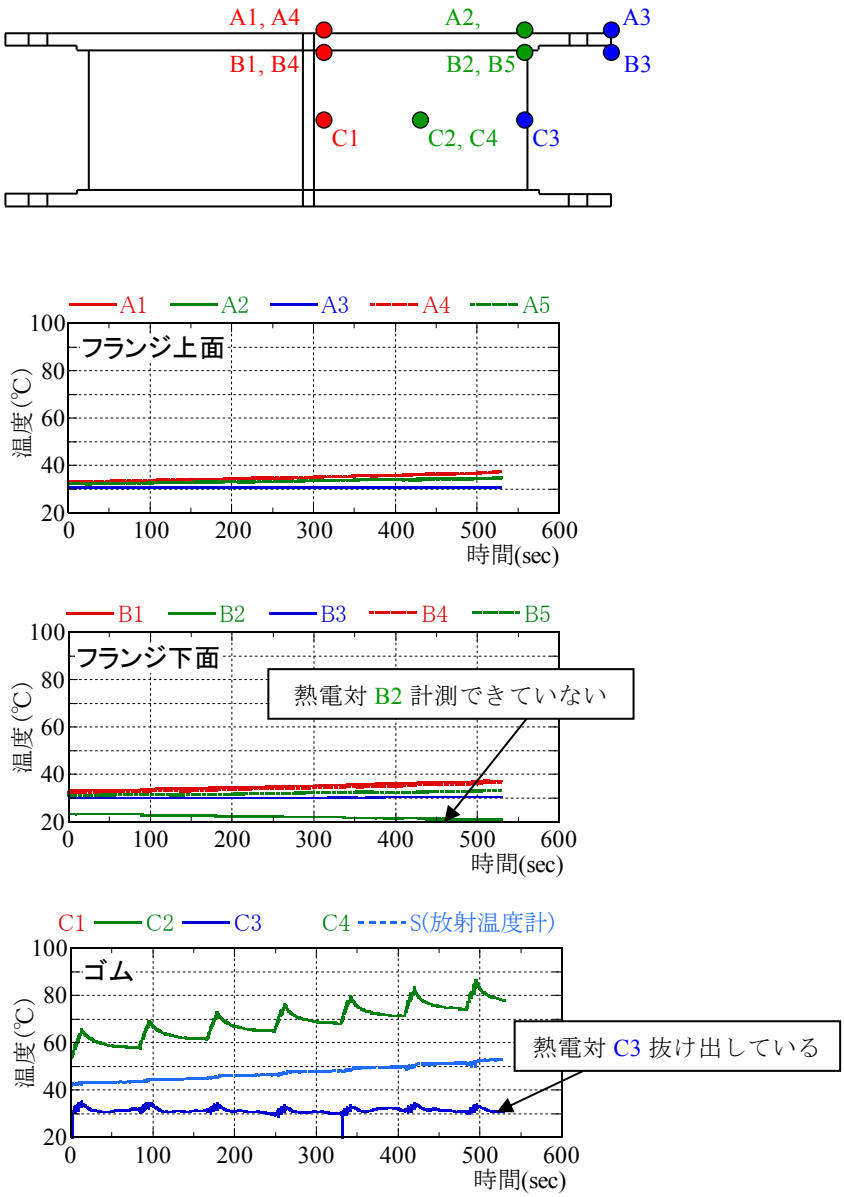


図 2.2.2-16　真円加振時(3 サイクル×7 回)の試験体の温度推移

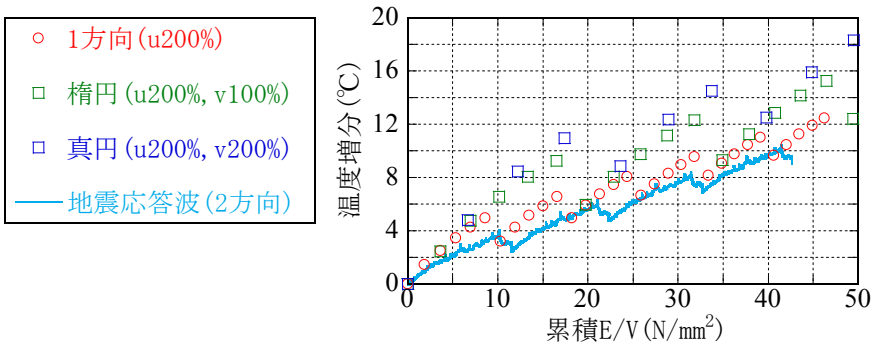


図 2.2.2-17　加振ケースによる温度増分の比較

6.4) 基本特性の変化

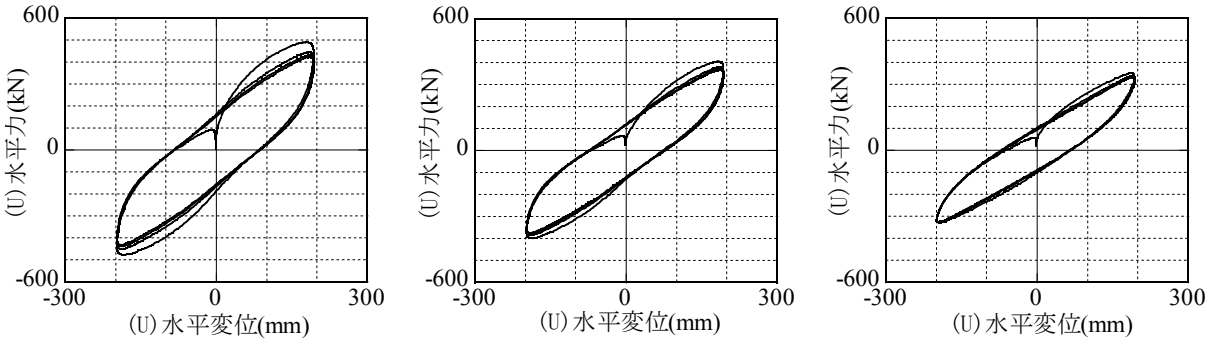
図 2.2.2-18 に、各加振ケース間に実施した基本特性試験の荷重変形関係を示す。1 日目に行った基本特性①～③を比較すると、加振が進むにつれて履歴ループが細くなり、また最大変形時の荷重が小さくなっているのがわかる。1 日目の加振により、試験体のゴム温度は 70℃程度まで上昇した。基本特性③から④の間は約 17 時間の冷却時間をはさんでいるが、試験体の温度は 40℃弱までしか低下せず、履歴ループも基本特性①の状態までは復帰していない。2 日目に行った基本特性④～⑥を比較すると、基本特性⑤、⑥とも④よりもややループが細くなっている。ただし、最大変形時の荷重は⑤よりも⑥の方が大きい。

表 2.2.2-4 に、各基本特性の 3 サイクル目の等価剛性 K_{eq}、等価減衰定数 H_{eq} を示す。表中の温度は、3 サイクル目の加振開始時の温度である。実験値においては、K_{eq}、H_{eq} とも温度が高いほど低下する傾向があるが、基本特性⑥(76℃)においては、基本特性⑤(57℃)よりも K_{eq} が大きい。また、表中には実験値を温度補正して 20℃時の値に換算した温度補正値も示す。試験体温度が技術資料 [2.2.2-2)] の温度補正式の適用範囲(-10℃～40℃)を超えているため、補正には縮小試験体の実験結果を基に平成 23 年度に提案した、以下の実験式 [2.2.2-3)] を用いる。

$$\left.\begin{aligned} K_{eq}' &= C_K \cdot K_{eq} \\ C_K &= 1.288 - 0.0144T \quad (T \le 20℃) \\ C_K &= 1.668 - 0.548\log(T - 3.45) \quad (T > 20℃) \end{aligned}\right\} \tag{2.2.2-1}$$

$$\left.\begin{aligned} H_{eq}' &= C_H \cdot H_{eq} \\ C_H &= (-0.0065T + 1.130) \end{aligned}\right\} \tag{2.2.2-2}$$

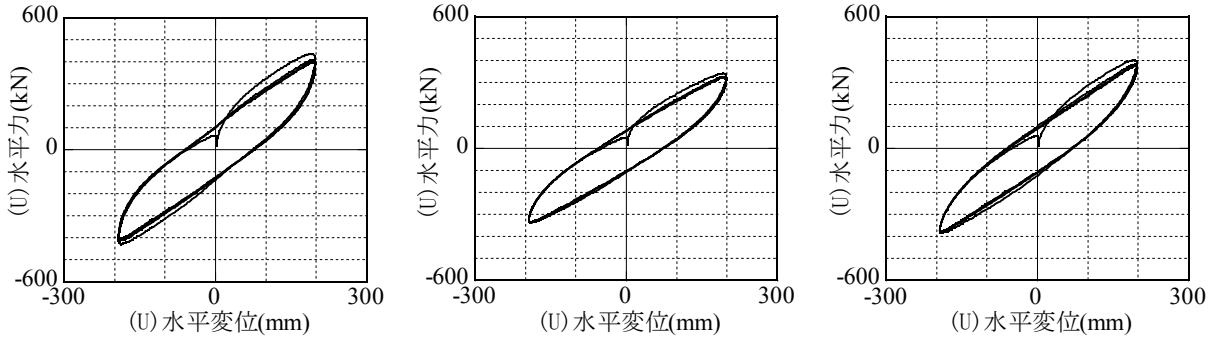
K_{eq}'、H_{eq}'を実験値として、K_{eq}'/C_K、H_{eq}'/C_Hにより 20℃時の K_{eq}、H_{eq} を算出する。温度補正値の K_{eq} は、地震応答波加振後の基本特性②および 1 方向加振後の基本特性⑤の値は、その前の基本特性の値よりも小さくなっている。しかし、楕円加振後の基本特性③および真円加振後の基本特性⑥の値は、その前の基本特性の値よりも大きくなっており、2 方向加振後に等価剛性が大きくなる傾向が見られる。温度補正値の H_{eq} は、1 日目の値(基本特性①～③)に対し、2 日目の値(基本特性④～⑥)の方が平均的にやや小さくなっており、これは 1 日目の加振による疲労の影響と考えられる。



(a) 基本特性①
(1 日目加振前)

(b) 基本特性②
(地震応答波加振後)

(c) 基本特性③
(楕円加振後)



(d) 基本特性④
(2 日目加振前)

(e) 基本特性⑤
(1 方向加振後)

(f) 基本特性⑥
(真円加振後)

図 2.2.2-18　基本特性の荷重変形関係

表 2.2.2-4　基本特性の荷重変形関係の特性値 (3 サイクル目)

	実験値			温度補正値	
加振ケース	C2 温度(℃)	K_{eq} (kN/mm)	H_{eq}	K_{eq} (kN/mm)	H_{eq}
基本特性①	24.9	2.23	0.21	2.38	0.21
基本特性②	36.8	1.92	0.18	2.31	0.21
基本特性③	70.0	1.69	0.15	2.53	0.22
基本特性④	38.9	2.07	0.16	2.53	0.18
基本特性⑤	56.7	1.69	0.15	2.33	0.20
基本特性⑥	76.2	1.94	0.14	2.99	0.22

6.5) 破断面の確認

真円加振において内部剥離、およびその後の大振幅加振において被覆ゴムの破れが生じたので、実験後の試験体を切断し試験体の内部の状態を確認した。図 2.2.2-19 に、切断部位を示す。大振幅加振の加振方向である V 方向に沿って試験体を 2 分割し、その後フランジとゴムが分離していると推定した範囲で試験体を再分割した。

写真 2.2.2-5 に、切断面の様子を示す。剥離が生じたのは上端の第 1 層のみであり、他層は健全な状態を維持していた。

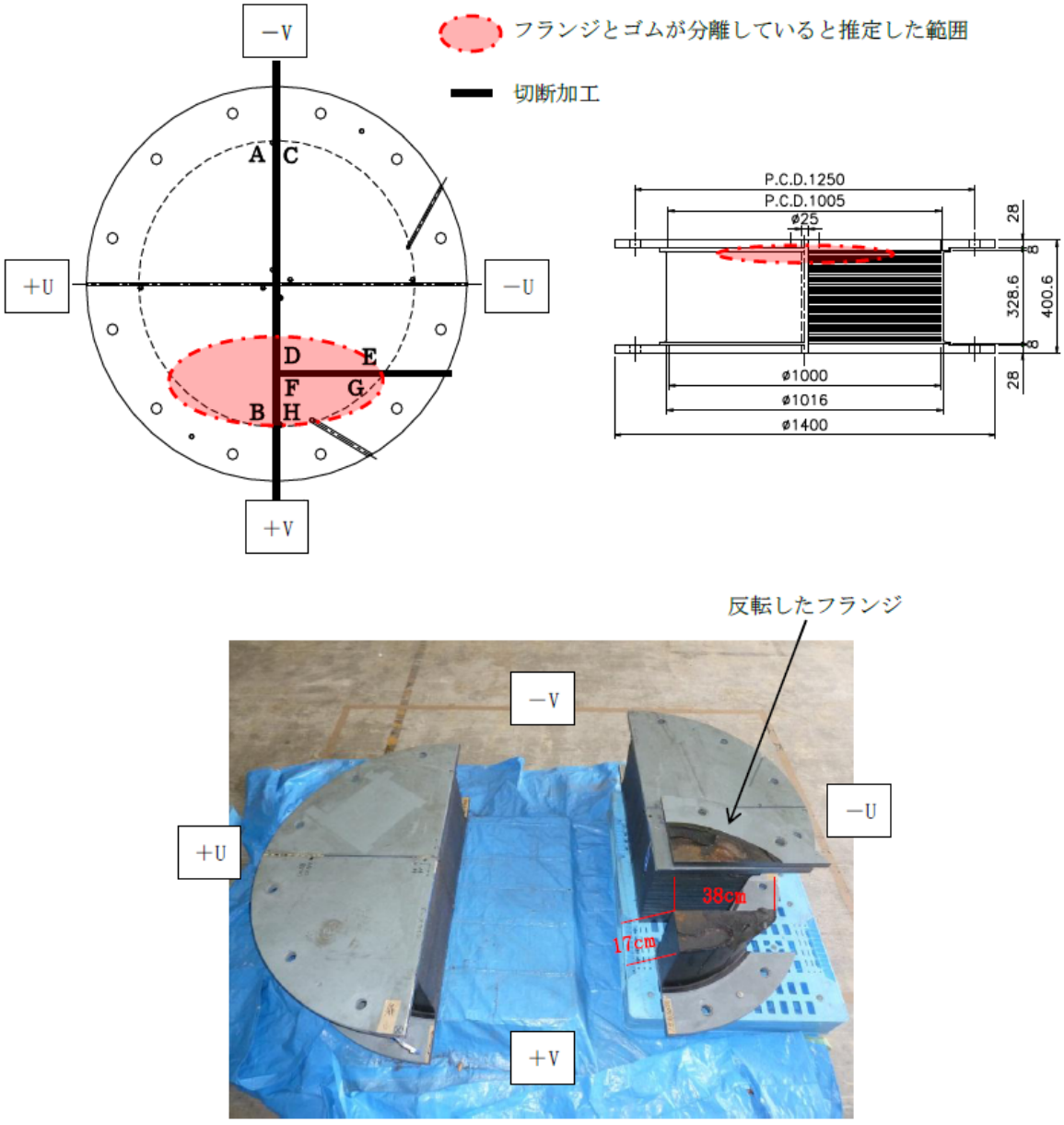
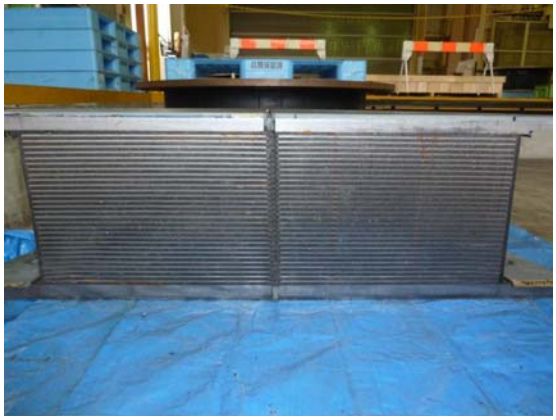
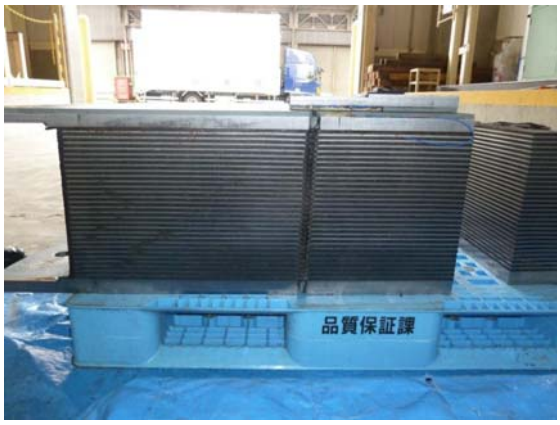


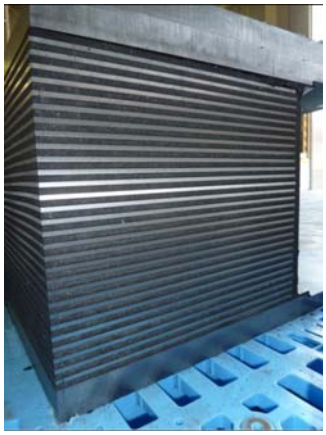
図 2.2.2-19　試験体の切断部位



(a) A-B 断面



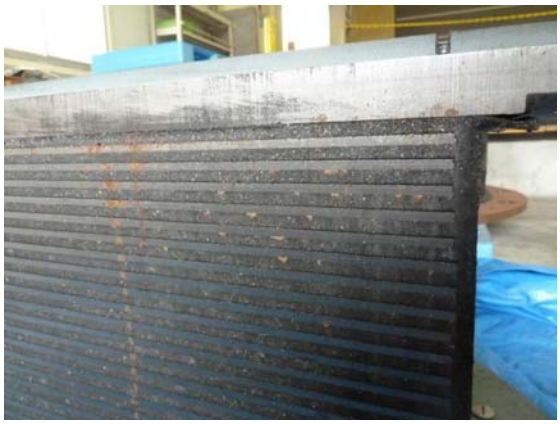
(b) C-D 断面



(c) D-E 断面

(d) F-G 断面

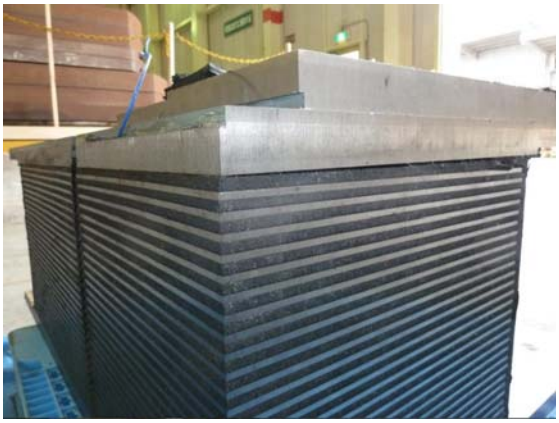
(e) F-H 断面



(f) A 付近拡大

(g) B 付近拡大

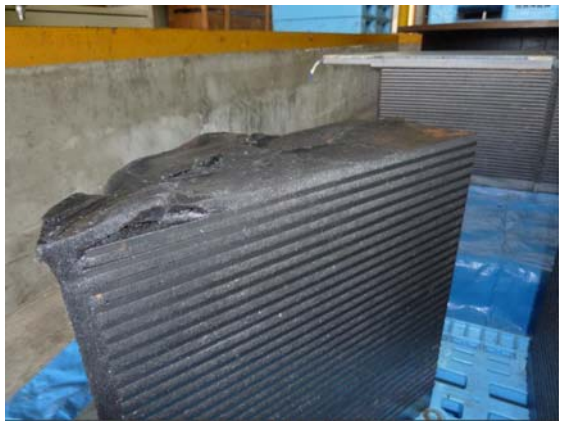
写真 2.2.2-5　実験終了後の試験体の切断面



(h) D 付近拡大

(i) E 付近拡大

(j) F-H 拡大



(k) G 付近拡大

(l) 左：反転したフランジ、右：ゴム破断面
(※オレンジ色の部分は水系切削液により生じた錆)

写真 2.2.2-5　実験終了後の試験体の切断面

(7) 1 方向特性の縮小試験体(250ϕ)と実大試験体(1000ϕ)の比較

平成 22 年度に実施した縮小試験体(250ϕ)の実験結果[2.2.2-1)]と、実大試験体(1000ϕ)の実験結果の 1 方向繰返し特性を比較する。比較には、実大試験体の水平 1 方向繰返し加振(γ=200%, 5cyc. ×12 回)と、縮小試験体の限界 3(γ=200%, 250cyc.)の実験結果を用いる。表 2.2.2-5 に、縮小と実大の試験体諸元を示す。ただし、縮小と実大で実験条件が同一でないため、両者の実験条件を比較し必要な補正を行う。

表 2.2.2-5　高減衰ゴム系積層ゴム試験体概要

	外径 (mm)	内径 (mm)	ゴム層厚	内部鋼板厚 (mm)	S1	S2
縮小	250	10	1.7mm×30 層=51mm	1.2	35.3	4.9
実大	1000	25	6.7mm×30 層=201mm	4.4	36.4	4.98

G_{eq} (γ=100%時) = 0.620N/mm^2

7.1) 実験条件の違いによる補正値の検討

■ 製品ばらつき

縮小試験体と実大試験体の製品検査の結果から、製品ばらつきによる両者の特性値の差を確認する。縮小試験体は計 4 体を実験に使用したが、限界3の試験ケースを実施した試験体 1 について比較を行う。面圧 15N/mm^2、せん断ひずみγ=±100%の製品検査結果を表 2.2.2-6 に示す。表 2.2.2-6 は、技術資料[2.2.2-2)]に基づく温度および速度による補正を行った値である。等価減衰定数 H_{eq} は、両者でほぼ同値である。等価せん断弾性係数 G_{eq} は、縮小が設計値より＋、実大が設計値より－であるため、実大は縮小より 6%小さい値となっている。

表 2.2.2-6　縮小と実大の製品検査結果比較

	K_{eq}(kN/mm^2)	G_{eq}(N/mm^2)	H_{eq}	対設計値 K_{eq}	対設計値 H_{eq}
設計値	(縮) 0.596 (実) 2.420	0.620	0.240	－	－
縮小	0.609	0.633	0.254	＋2.2%	＋5.7%
実大	2.329	0.596	0.253	－3.8%	＋5.4%

■ 実験実施時の基本特性

実験実施時の最初に加振した基本特性(製品検査以外の経験変形なし)の結果を比較し、実験時の加振周期 4.0 秒による基本特性の差を確認する。ただし、縮小と実大で温度および面圧の条件が異なるためこれを補正する。温度の補正については、技術資料[2.2.2-2)]の温度補正式を用いる。面圧の補正については、実大試験体の製品検査時に 3、5、15N/mm^2 の 3 水準の面圧にて実施した結果を用いて、面圧 5N/mm^2 で実施した実大試験体の結果を 15N/mm^2 に補正して縮小試験体と条件を合わせる。表 2.2.2-7 に実大試験体の 3 水準の面圧下の検査結果を示す。面圧

5N/mm^2 と 15N/mm^2 の結果を比較すると、等価剛性はほぼ同じだが、等価減衰定数は面圧 5N/mm^2 時は面圧 15N/mm^2 時よりも 1 割程度小さいため、この差を補正値として補正を行う。また、製品検査結果より縮小と実大の間で等価せん断弾性係数にばらつきが見られたのでこれを補正し、製品ばらつきの影響を除く。以上の補正を行った実験時の最初の基本特性試験について、表 2.2.2-8 に等価せん断弾性係数 G_{eq} の比較を、表 2.2.2-9 に等価減衰定数 H_{eq} の比較を示す。G_{eq} は実大が縮小よりも 6.5%大きく、H_{eq} は実大が縮小よりも 3%小さくなっている。

表 2.2.2-7　実大試験体の製品検査結果

面圧(N/mm^2)	K_{eq}(kN/mm)	$K_{eq}/K_{eq}(15)$	H_{eq}	$H_{eq}/H_{eq}(15)$
3.0	2.265	0.985	0.225	0.974
5.0	2.299	1.000	0.231	1.000
15.0	2.329	1.013	0.253	1.095

表 2.2.2-8　縮小と実大の最初の基本特性の等価せん断弾性係数 G_{eq} 比較

	面圧 (N/mm^2)	温度 (℃)	実験値 (N/mm^2)	製品ばらつき 補正	面圧 補正	温度 補正	補正値 (N/mm^2)
縮小	15	20	0.585	－2.2%	－	0%	0.572
実大	5	25.3	0.571	＋3.8%	－	＋2.9%	0.610

※G_{eq} は面圧依存性なしとする。

表 2.2.2-9　縮小と実大の最初の基本特性の等価減衰定数 H_{eq} 比較

	面圧 (N/mm^2)	温度 (℃)	実験値	製品ばらつき 補正	面圧 補正	温度 補正	補正値
縮小	15	20	0.238	－	－	0%	0.238
実大	5	25.3	0.206	－	＋9.5%	＋2.0%	0.230

※H_{eq} の面圧依存性は、実大の製品検査結果より補正値を設定。

■ 経験変形の違い

表 2.2.2-10 に、縮小試験体と実大試験体が、比較に用いるγ=±200%の加振ケース前に経験した加振ケースと累積変形量を示す（製品検査分は省略）。両者とも 200m 以上の累積変形を経験している。ただし、縮小試験体は水平 1 方向の加振のみであるのに対し、実大試験体は水平 2 方向の地震応答波、および楕円加振を経験している。5.4)の基本特性の変化において、楕円加振や真円加振後には等価剛性が大きくなる傾向が見られたことから、縮小、実大のγ=±200%での 1 方向繰返し加振の直前に実施した基本特性を比較し、経験変形による試験体状態のばらつきを確認する。ただし、温度、面圧の条件が異なるため、実験実施時の基本特性を比較する際

と同様の補正を行って比較する。表 2.2.2-11 に等価せん断弾性係数 G_{eq}、表 2.2.2-12 に等価減衰定数 H_{eq} の実大試験体と縮小試験体の値を比較して示す。G_{eq} は実大が縮小よりも 26%大きく、H_{eq} は実大が縮小よりも 5%小さい。

表 2.2.2-10　縮小と実大の累積経験変形量の比較

縮小試験体		実大試験体	
加振ケース	累積変形量(m)	加振ケース	累積変形量(m)
基本特性 (100%×4cyc.)	0.8	基本特性 (100%×4cyc.)	3.2
限界 1 (50%×1000cyc.)	104.0	地震応答 NS	11.3
(直後)基本特性 (100%×4cyc.)	0.8	地震応答 EW	15.3
(後)基本特性 (100%×4cyc.)	0.8	地震応答 2 方向	83.2
基本特性 (100%×4cyc.)	0.8	基本特性 (100%×4cyc.)	3.2
限界 2 (100%×500cyc.)	102.0	楕円 60cyc.	116.0
(直後)基本特性 (100%×4cyc.)	0.8	基本特性 (100%×4cyc.)	3.2
(後)基本特性 (100%×4cyc.)	0.8	基本特性 (100%×4cyc.)	3.2
基本特性 (100%×4cyc.)	0.8		
計	211.7	計	238.6

表 2.2.2-11　縮小と実大のγ=200%繰返し加振直前の基本特性の等価せん断弾性係数 G_{eq} 比較

	面圧 (N/mm^2)	温度 (℃)	実験値 (N/mm^2)	製品ばらつき補正	面圧補正	温度補正	補正値 (N/mm^2)
縮小	15	23	0.514	－2.2%	－	＋1.6%	0.510
実大	5	39.2	0.530	＋3.8%	－	＋17.0%	0.643

※G_{eq} は面圧依存性なしとする。

表 2.2.2-12　縮小と実大のγ=200%繰返し加振直前の基本特性の等価減衰定数 H_{eq} 比較

	面圧 (N/mm^2)	温度 (℃)	実験値	製品ばらつき補正	面圧補正	温度補正	補正値
縮小	15	23	0.207	－	－	＋1.0%	0.209
実大	5	39.2	0.161	－	＋9.5%	＋13.0%	0.199

※H_{eq} の面圧依存性は、実大の製品検査結果より補正値を設定。

7.2) 実験条件の違いを考慮した縮小と実大の復元力特性値の比較

7.1)より、縮小試験体と実大試験体の実験条件の違いとして、面圧の違い、製品ばらつき、実験実施時の基本特性の違い、経験変形の違いを考慮すると、実大試験体の実験結果に表 2.2.2-13 のような補正が必要と考えられる。図 2.2.2-20 に、γ=±200%による繰返し加振実験結果の K_{eq} と H_{eq} の温度による推移を縮小試験体と実大試験体の結果を比較して示す。実大試験体の結果は、補正前の値と表 2.2.2-13 による補正後の値を両方示す。補正前の実大試験体の結果は縮小試験体の結果と差があるが、補正後の値は縮小試験体の結果におおよそ一致している。

図 2.2.2-21 に、縮小試験体の実験結果を基に提案した [2.2.2-3]、試験体の代表温度による復元力特性値の低下率評価式と、実大実験結果の復元力特性値の低下率を比較して示す。提案評価式を式(2.2.2-1)～式(2.2.2-3)に示す (式(2.2.2-1)と式(2.2.2-2)は再掲))。

$$\left.\begin{aligned} K_{eq}' &= C_K \cdot K_{eq} \\ C_K &= 1.288 - 0.0144T \quad (T \le 20℃) \\ C_K &= 1.668 - 0.548\log(T - 3.45) \quad (T > 20℃) \end{aligned}\right\} \tag{2.2.2-1}$$

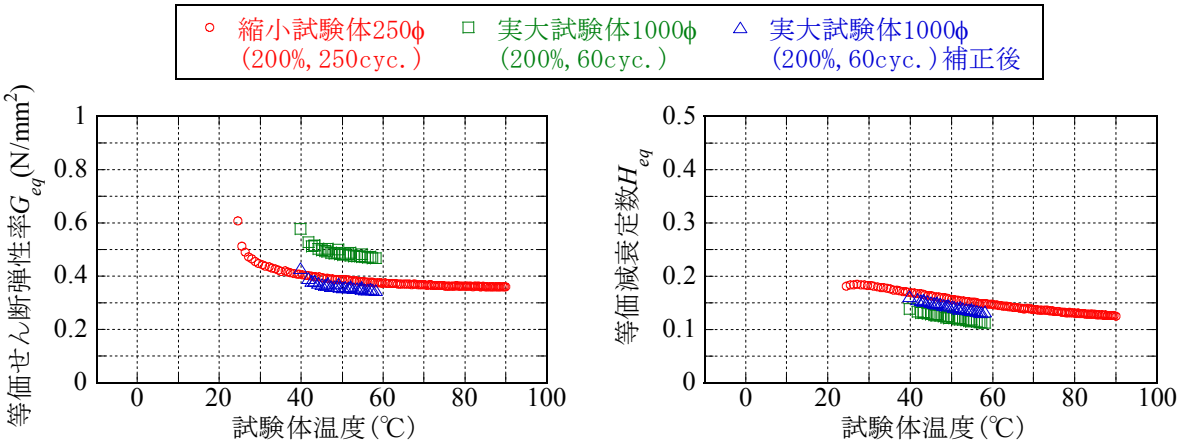
$$\left.\begin{aligned} H_{eq}' &= C_H \cdot H_{eq} \\ C_H &= (-0.0065T + 1.130) \end{aligned}\right\} \tag{2.2.2-2}$$

$$\left.\begin{aligned} u' &= C_u \cdot u \\ C_u &= (-0.0065T + 1.130) \end{aligned}\right\} \tag{2.2.2-3}$$

この時の試験体温度 T は、ゴムの平均温度を代表する値として、ゴム部中心温度(C2)の値を用いている。実大試験体の実験結果は、表 2.2.2-13 に示す補正を行った値である。水平 1 方向繰返し試験の 3 サイクル目の特性値の 20℃換算値を基準値として低下率を算出している。降伏荷重特性係数 u については、H_{eq} と同様の補正値を用いている。提案式は、実大試験体の実験結果とよく一致しており、実大サイズにおいても提案式による復元力特性値の低下率の評価が可能であると確認できる。

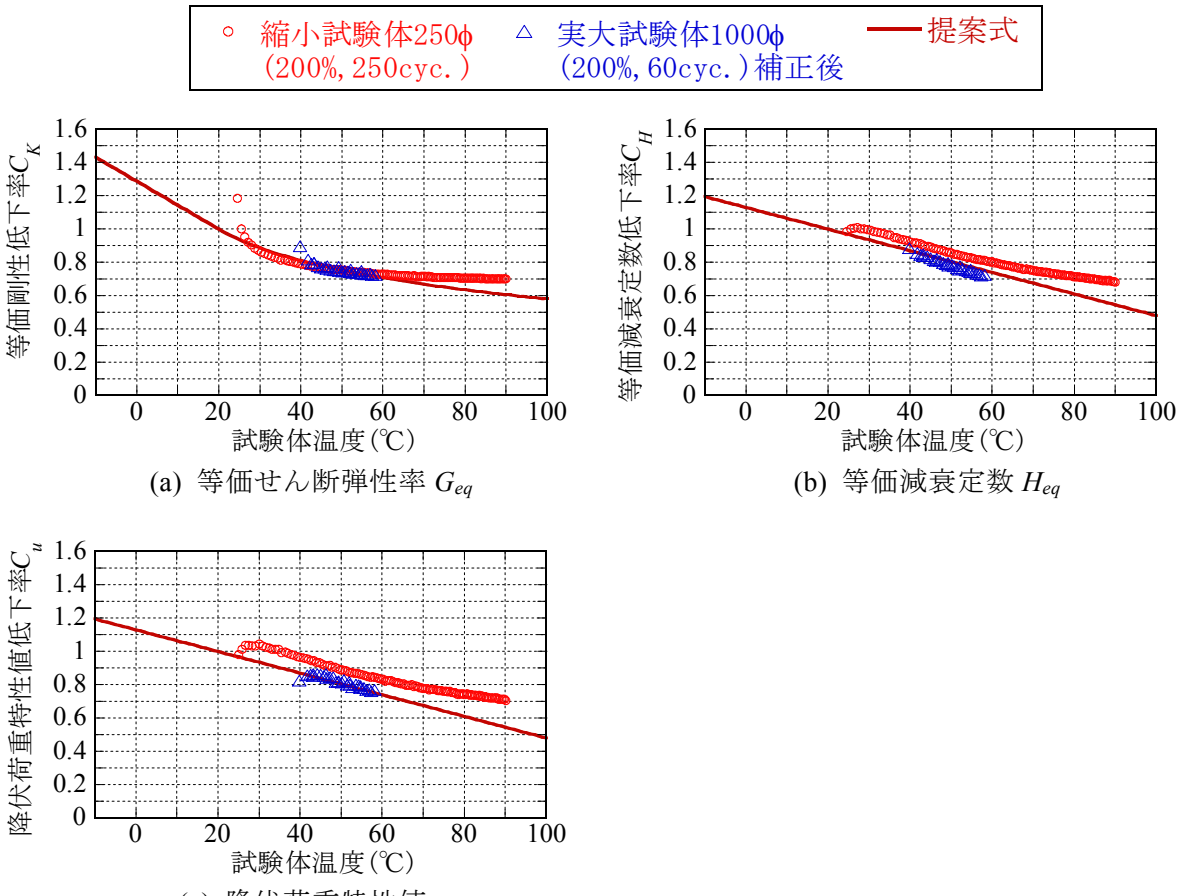
表 2.2.2-13　実験条件による縮小試験体と実大試験体の実験結果の差

	等価せん断弾性係数 G_{eq}	等価減衰定数 H_{eq}
面圧の違い	0%	＋9.5%
製品ばらつき	＋6%	0%
基本特性の違い	－6.5%	＋3.3%
経験変形の違い	－26%	＋5%
計	－25.5%	＋17.8%



(a) 等価せん断弾性率 G_{eq}　　(b) 等価減衰定数 H_{eq}

図 2.2.2-20　γ=200%の繰返し加振による試験体温度と G_{eq}、H_{eq} の関係



(a) 等価せん断弾性率 G_{eq}　　(b) 等価減衰定数 H_{eq}

(c) 降伏荷重特性値 u

図 2.2.2-21　実大試験体の繰返し加振時の試験体温度と復元力特性値の低下率の関係

7.3) 縮小と実大の吸収エネルギーと試験体温度の関係

図 2.2.2-22 に、縮小試験体と実大試験体の 1 方向繰返し加振時のサイクル数と累積吸収エネルギーの関係を示す。累積吸収エネルギーは単位ゴム体積当たりのエネルギー量 *E*/*V* で表している。図 2.2.2-22 中オレンジ色で示す実大試験体(γ=200%,60cyc.加振)の累積吸収エネルギーは、青色で示す縮小試験体のγ=200%による繰返し加振の実験結果よりも小さな値を示している。ただし実験条件の違いから、表 2.2.2-13 に示すように実大試験体の実験値を縮小と比較するには、等価減衰定数で+17.8%の補正が必要であるため、エネルギーについても同様の補正値を用いる。図 2.2.2-22 中ピンク色で示すのが補正を行った実大試験体の値であり、縮小試験体の結果よりもやや小さいが近い値を示している。このことから、加振による単位ゴム体積当たりの累積吸収エネルギーは、加振ひずみ振幅が同じであれば縮小と実大でほぼ同等の値となることが確認できる。

図 2.2.2-23 に、縮小試験体と実大試験体の 1 方向繰返し加振時の累積吸収エネルギー*E*/*V* と試験体の温度上昇の関係を示す。試験体温度は、ゴム部中心(C2)の温度である。縮小試験体の累積 *E*/*V* と温度上昇の関係は、吸収エネルギー全てが温度上昇に寄与すると仮定した場合のゴムと鋼板の熱容量から算出される理論値に近い値を示しているが、実大試験体のインターバルをはさまない連続 5 サイクル加振による温度上昇は、ゴムの熱容量のみから算出される理論値にほぼ一致した上昇を示している。この累積 *E*/*V* と試験体温度上昇の関係の、実大と縮小の間の違いの原因を検討するため、FEM による熱伝導解析を実施した。

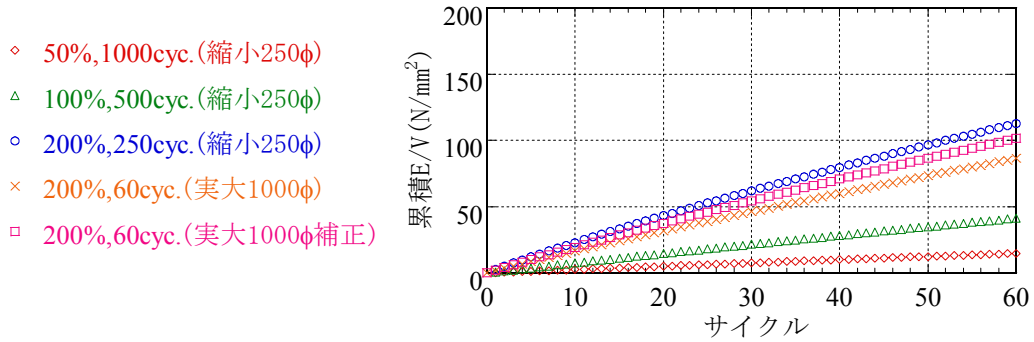


図 2.2.2-22　縮小と実大のサイクル数による累積吸収エネルギー推移の比較

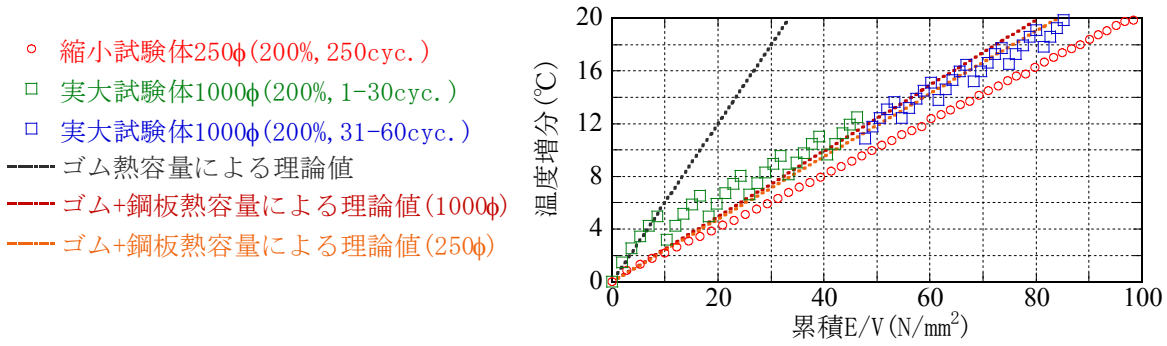
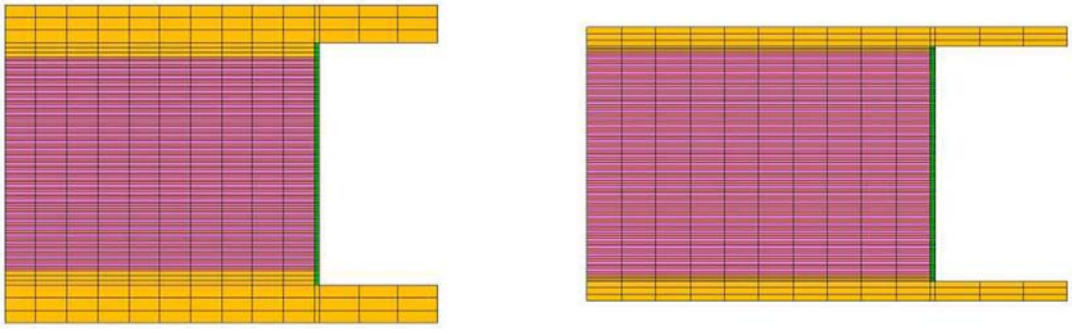


図 2.2.2-23　縮小と実大の累積吸収エネルギーと温度上昇の関係

図 2.2.2-24 に、縮小試験体モデルと実大試験体モデルの解析モデルを示す。また、解析モデルの形状を表 2.2.2-14 に、解析に用いた物性値を表 2.2.2-15 に示す。解析条件は、γ=200%の 1 方向繰返し加振(加振周期 4.0 秒、50 サイクル)を想定し、200 秒間に積層ゴム内部で一様に発熱すると仮定した。発熱量は、高減衰ゴム系積層ゴム(X0.6R)のγ=200%変形時における G_{eq}、H_{eq} の基準値から算出される単位体積当たりのエネルギー吸収量$\Delta W(=2\pi G_{eq}H_{eq})$を用いた。図 2.2.2-25 に、解析結果の試験体温度推移を示す。縮小試験体は、加振中にゴムと鋼板がほぼ同時に温度上昇しているのに対し、実大試験体は鋼板がゴムよりもやや遅れて温度上昇している。図 2.2.2-26 に、解析結果による累積 E/V と温度上昇の関係を示す。縮小試験体は、累積 E/V に対してゴムと鋼板が同等に温度上昇し、ゴムと鋼板の熱容量から算出される理論値にほぼ一致しているが、実大試験体は、鋼板の温度上昇がやや遅れるため加振初期においては理論値よりも大きな温度上昇となっている。

以上より、同じ累積 E/V に対し、実大の実験結果が縮小の実験結果よりも大きな温度上昇を示したのは、実大試験体においては鋼板の温度上昇がゴムの温度上昇よりも遅れるために、加振初期においてはほぼゴムのみの熱容量で温度上昇しているためと考えられる。実大実験は 5 サイクルごとにインターバルをとっているため、実験結果としては加振初期の温度勾配の大きい部分のみが現れていると考えられる。



(a) 縮小試験体モデル(ϕ250)　　(b) 実大試験体モデル(1000ϕ)

図 2.2.2-24　FEM 解析モデル(軸対称モデル)

表 2.2.2-14　解析モデルの形状

	ϕ250	ϕ1000
ゴム外径／内径(mm)	250／0	1000／0
ゴム 1 層厚さ(mm)	1.7	6.7
ゴム積層数	30	30
鋼板厚さ(mm)	1.2	4.4
フランジ中央部厚さ／端部厚さ(mm)	21／15	36／28
フランジ外径(mm)	460	1400
外皮ゴム厚さ(mm)	2	8

表 2.2.2-15　解析に用いた物性値

	密度(kg/m^3)	比熱(J/kg・K)	熱伝導率(W/m・K)
内部ゴム	1.15×10^3	1.45×10^3	0.310
外皮ゴム	1.15×10^3	1.88×10^3	0.289
内部鋼板、フランジ	7.86×10^3	4.73×10^2	51.6

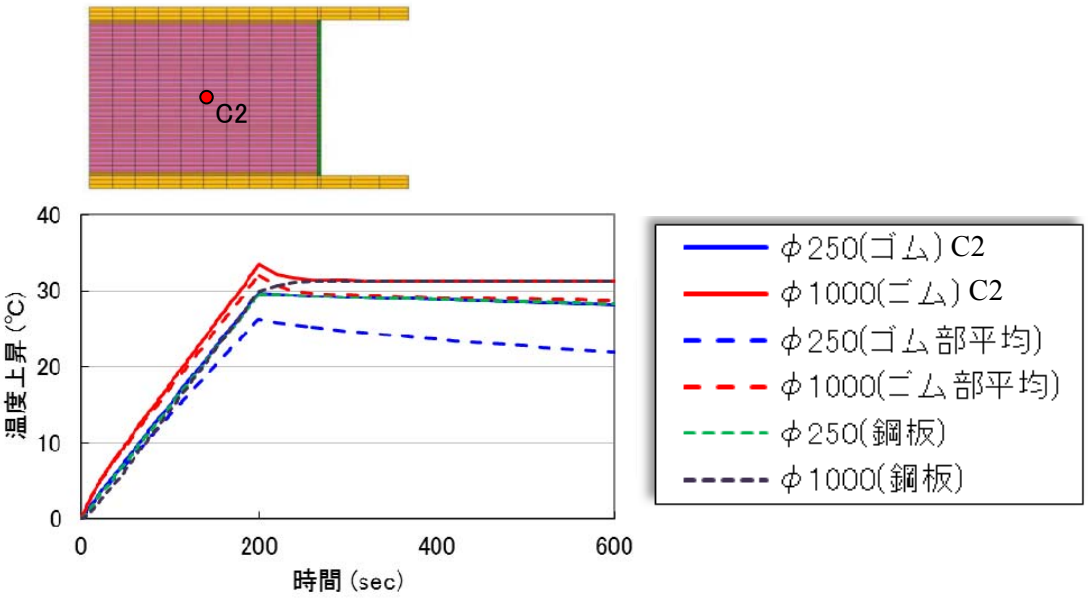


図 2.2.2-25　FEM による熱伝導解析結果の試験体温度推移

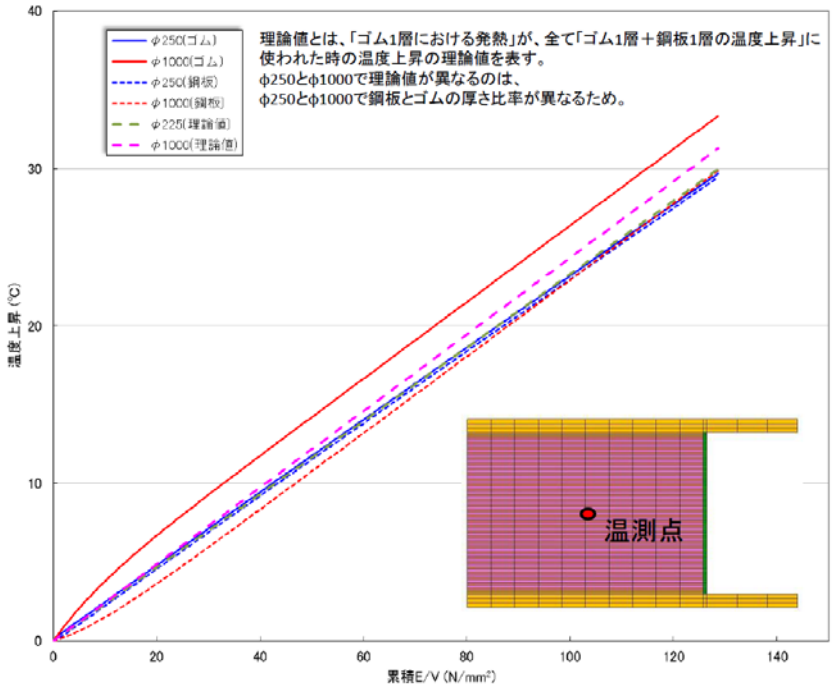


図 2.2.2-26　FEM による熱伝導解析結果の累積 E/V と試験体温度上昇の関係

縮小試験体の実験結果を基に作成した高減衰ゴム系積層ゴムの繰返し特性を考慮した解析モデルは、試験体温度の算出にゴムと鋼板の熱容量の和を用いている。しかし、実大試験体においては加振初期にはほぼゴムのみの熱容量で温度上昇していることが明らかとなった。図 2.2.2-26 より、加振が続き累積エネルギーが大きくなると、実大試験体においても温度上昇はゴムと鋼板の熱容量の和による理論値の勾配に近くなると考えられるが、長周期地震動により入力されるエネルギーは 25N/mm^2 以下の範囲と予測されることから、地震応答を検討する場合に加振初期の影響が大きいと考えられる。ただし、ゴムの熱容量のみで温度を評価するとエネルギー量の大きな加振に対し、温度を過大に評価してしまう。以上より、ゴムと鋼板の温度上昇に差が生じるような実大サイズの高減衰ゴム系積層ゴムに対しては、以下のような 2 折れ線で累積エネルギーと試験体温度の関係を評価する。

$$\left.\begin{aligned} T &= \frac{E_{eff}}{C_R} \qquad (E/V \le 10.0 N/mm^2) \\ T &= \frac{E_{eff}}{(C_R + C_S)} \qquad (E/V > 10.0 N/mm^2) \end{aligned}\right\} \tag{2.2.2-4}$$

ここで、T は試験体温度、E_{eff} はゴムの温度上昇に寄与する有効エネルギー、C_R はゴムの熱容量、C_S は鋼板の熱容量である。図 2.2.2-27 に、式(2.2.2-4)で表される累積エネルギーと試験体温度の関係を実験結果と比較して示す。

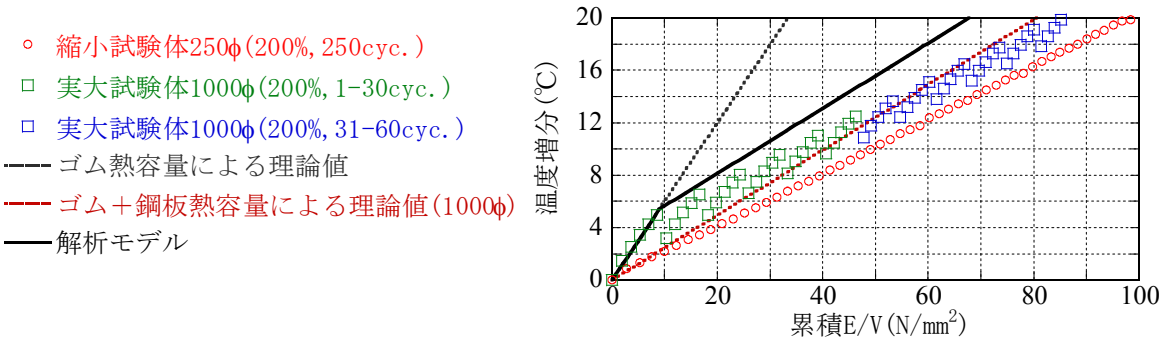


図 2.2.2-27　解析モデルに用いる累積 E/V と試験体温度の関係

7.4) 縮小と実大の放熱特性の比較

図 2.2.2-28 に、縮小試験体と実大試験体の加振終了後のゴム温度の低下を比較して示す。縮小試験体については、実験結果から作成したゴム温度低下の回帰式[2.2.2-3)]である。実大試験体の温度低下は、縮小試験体に比べて非常に緩やかで 3 時間程度経過しても 5℃程度しか温度は低下していない。ここで、同一の材料における熱伝導方程式において、縮尺率の 2 乗が時間の縮尺に比例するとして、実大試験体(1000ϕ)と縮小試験体(250ϕ)の縮尺率 1000/250 = 4.0 → $(4.0)^2$ = 16.0 → 実大試験体の時間軸を 1/16 としてみると、実大試験体の温度低下は縮小試験体の温度低下回帰式とほぼ一致する。従って、放熱については相似則を適用することで試験体のサイズを考慮することが可能であると考えられる。

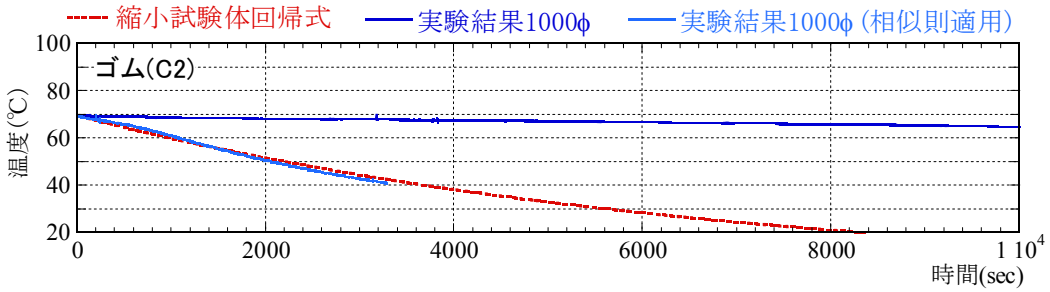
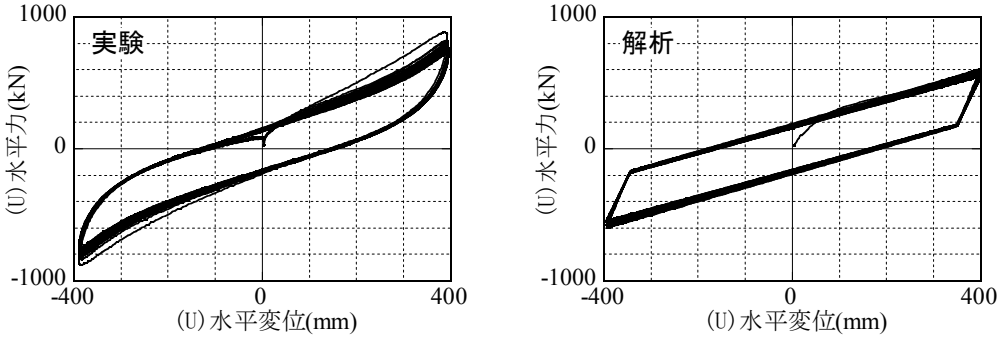


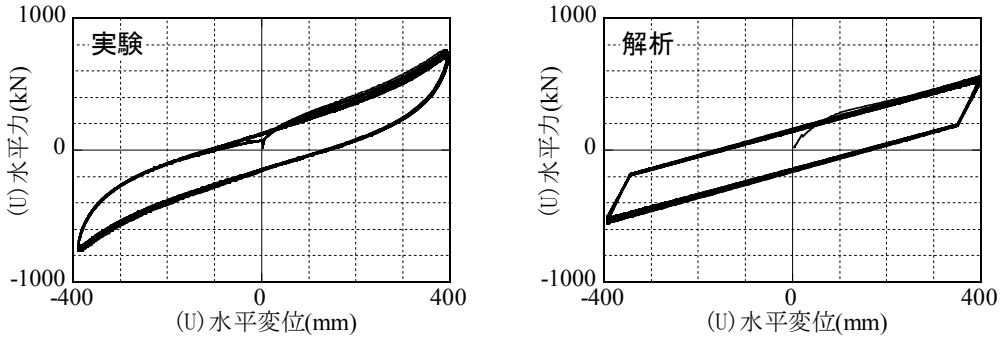
図 2.2.2-28 縮小試験体と実大試験体の加振後の温度低下の比較

(8) 繰返し特性を考慮した解析結果と 1 方向繰返し加振実験結果の比較

図 2.2.2-29 に、1 方向繰返し加振の実験結果と解析結果の荷重変形関係を比較して示す。解析は、縮小試験体の実験結果から作成した解析モデル[2.2.2-3)]を用いた。ただし、有効エネルギーと温度の関係には、式(2.2.2-4)を用いた。解析モデルはハードニングを考慮していないため、解析結果の最大荷重は実験結果よりも小さいが、繰返し加振による最大荷重の低下を表現できている。図 2.2.2-30 に、1 方向繰返し加振の実験結果と解析結果のゴム温度の変化を比較して示す。解析結果は、インターバル時の温度低下が実験結果よりも小さいため、全体的に温度を高めに評価しているが、繰返し加振によるおおよその温度変化を再現できている。

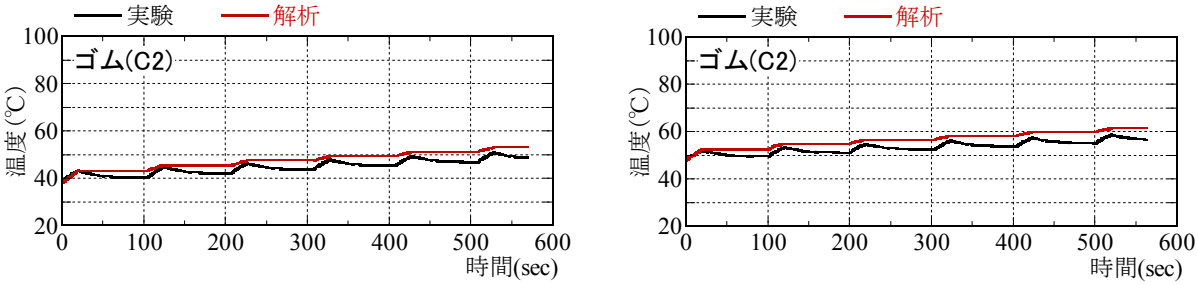


(a) 1 方向繰返し加振 5 サイクル×1～6 回



(b) 1 方向繰返し加振 5 サイクル×7～12 回

図 2.2.2-29　実験結果と解析結果の 1 方向繰返し加振の荷重変形関係の比較



(a) 1 方向繰返し加振 5 サイクル×1～6 回　　(b) 1 方向繰返し加振 5 サイクル×7～12 回

図 2.2.2-30　実験結果と解析結果の 1 方向繰返し加振のゴム温度変化の比較

(9) ねじれひずみの算出

9.1) ねじれひずみの算出方法

試験体に描いたドットを撮影した画像より、楕円加振時、および真円加振時に試験体に生じたねじれひずみの算出を行った。楕円加振については 1/30 秒ごとに画像解析を行い、真円加振については加振速度が速く、動きが大きいために連続的に画像解析を行うことが困難であるため、静止画により 1/3 秒ごとに画像解析を行った。

せん断変形を除いたねじれ変形を、図 2.2.2-31 に示すように高さ z の二次関数で近似し、求めた二次関数を変形量 u で微分する。ねじれひずみは、積層ゴムの上下端($z=\pm H/2$)で最大となり、ねじれひずみの評価にはこの最大値を用いる。式(2.2.2-5)～式(2.2.2-7)に、ねじれひずみの算出式を示す。

$$u = a_2 z^2 + a_0 \tag{2.2.2-5}$$

$$\gamma_s = \frac{du}{dz} = 2a_2 z \tag{2.2.2-6}$$

$$\gamma_s = \alpha a_2 H \tag{2.2.2-7}$$

ここで、u はねじれ変形量、z は高さ方向の位置、γ_s はねじれひずみ、αは補正項(ゴム層総厚に対する積層ゴム高さの比)、H はゴム層厚である。

試験体上のドットの画像は、図 2.2.2-32(a)に示すように、積層ゴムがカメラに近づいた時に上部の数点が画面上から消失してしまう。よって、せん断変形を求めるための最上部の点を使用できない時刻がある。そこで、上部の点が画面上から消失している場合の計測を、図 2.2.2-33 に示す。まず、計測できた一番上部の点(上から 4 つ目)の④点と、それに対応する下から 4 番目の⑰点を直線で結ぶ。せん断変形が線形に変形していると仮定し、先ほどの直線と平行な直線を最下部の⑳点を通るように引く。これをせん断変形として、せん断変形を除いたねじれひずみを、式(2.2.2-5)～式(2.2.2-7)を使用して算出する。画像解析には、図 2.2.2-34 に、赤線で示した二列を使用する。

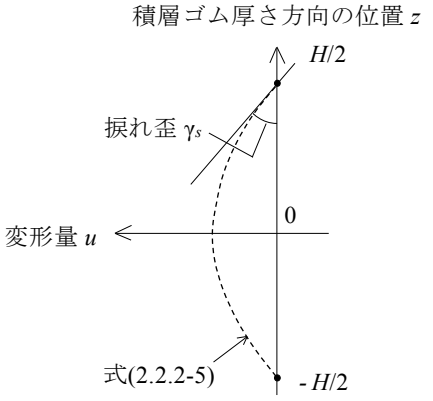
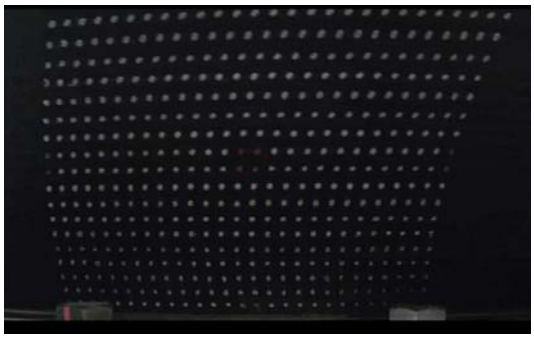


図 2.2.2-31　変形量 u の高さ方向分布



(a) カメラに近い時

(b) カメラから遠い時

図 2.2.2-32　積層ゴム位置による見え方の違い

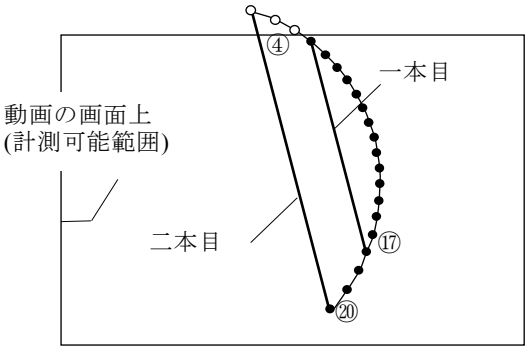


図 2.2.2-33　上部点消失時のせん断変形の算出方法

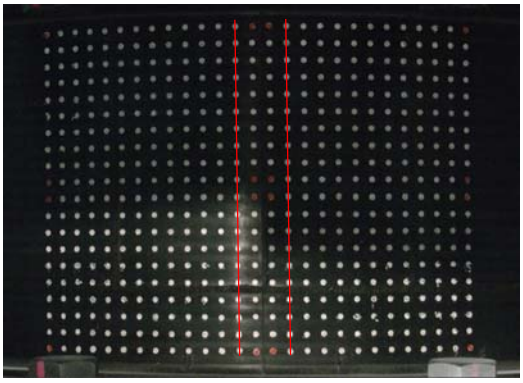


図 2.2.2-34　画像解析に使用する二列

9.2)ねじれひずみの遠近補正

加振中の動画は一方向で撮影しているため、図 2.2.2-32 に示すように、試験体がカメラに近づいた状態(図 2.2.2-32(a))と、カメラから遠ざかった状態(図 2.2.2-32(b))では試験体上部のドットの間隔が大きく異なる。従って、画像解析にあたっては遠近補正を行う必要がある。図 2.2.2-35 に、図 2.2.2-34 に示す二列から算出した楕円加振の 3 回目におけるねじれひずみの時刻歴を比較して示す。図 2.2.2-35 において、左右の列のねじれひずみの時刻歴波形は、ほぼ一致している。また、図 2.2.2-36 に、常に計測できている上から 4 番目の④点と、下から 4 番目の⑰点の高さの時刻歴波形を、左右二列で比較して示す。図 2.2.2-36 より、左右二列とも加振中に高さが正弦波のように変動している。以上より、遠近補正としては横方向については必要ないが、高さ方向について補正が必要であることが確認できる。

図 2.2.2-37 に、遠近補正を考慮したねじれひずみ算出方法を示す。図 2.2.2-37(a)に示すように、試験体の上から 4 点目の④点と、下から 4 点目の⑰点の間の高さを z_a とする。この高さを基準として、図 2.2.2-37(b)に示すように、加振中の各時刻における④点と⑰点の間の高さ z_b の比βをとる(式(2.2.2-8))。横幅は変動せずに高さのみが変動していることから、同じ比βだけ横幅に乗じることにより、実試験体のねじれ変形と割合を同じにする。式(2.2.2-9)～式(2.2.2-11)に、遠近補正を考慮したねじれひずみの算出式を示す。式(2.2.2-5)～式(2.2.2-7)に示すねじれの算出式に、式(2.2.2-8)で算出される補正係数βを乗じることで遠近補正を行う。

$$\beta = z_b / z_a \tag{2.2.2-8}$$

$$u' = \beta u = \beta(a_2 z^2 + a_0) \tag{2.2.2-9}$$

$$\gamma_s = \frac{du'}{dz} = 2\beta a_2 z \tag{2.2.2-10}$$

$$\gamma_s = \alpha\beta a_2 H \tag{2.2.2-11}$$

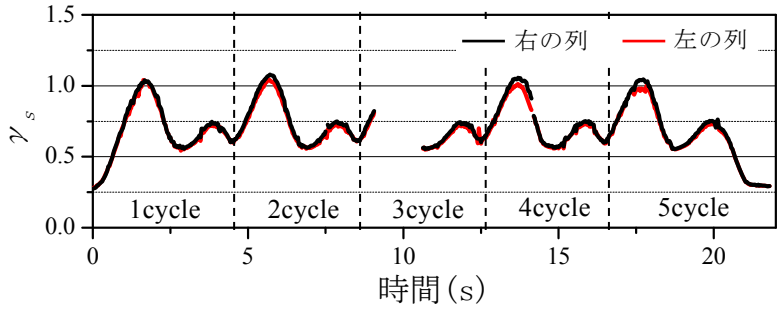


図 2.2.2-35　列ごとのねじれひずみの時刻歴

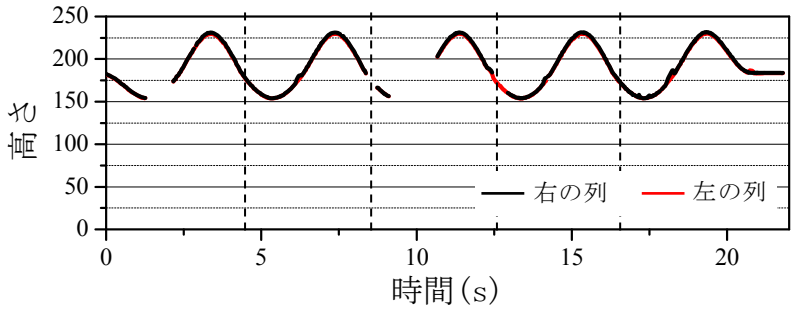
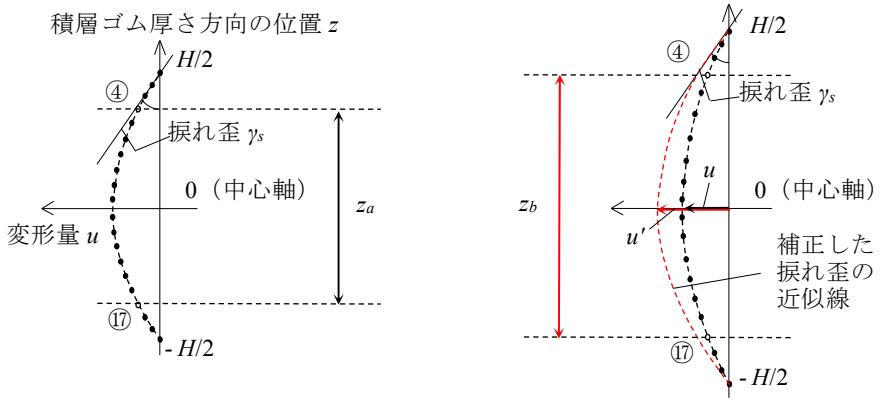


図 2.2.2-36　上から 4 点目と下から 4 点目の間の高さの時刻歴



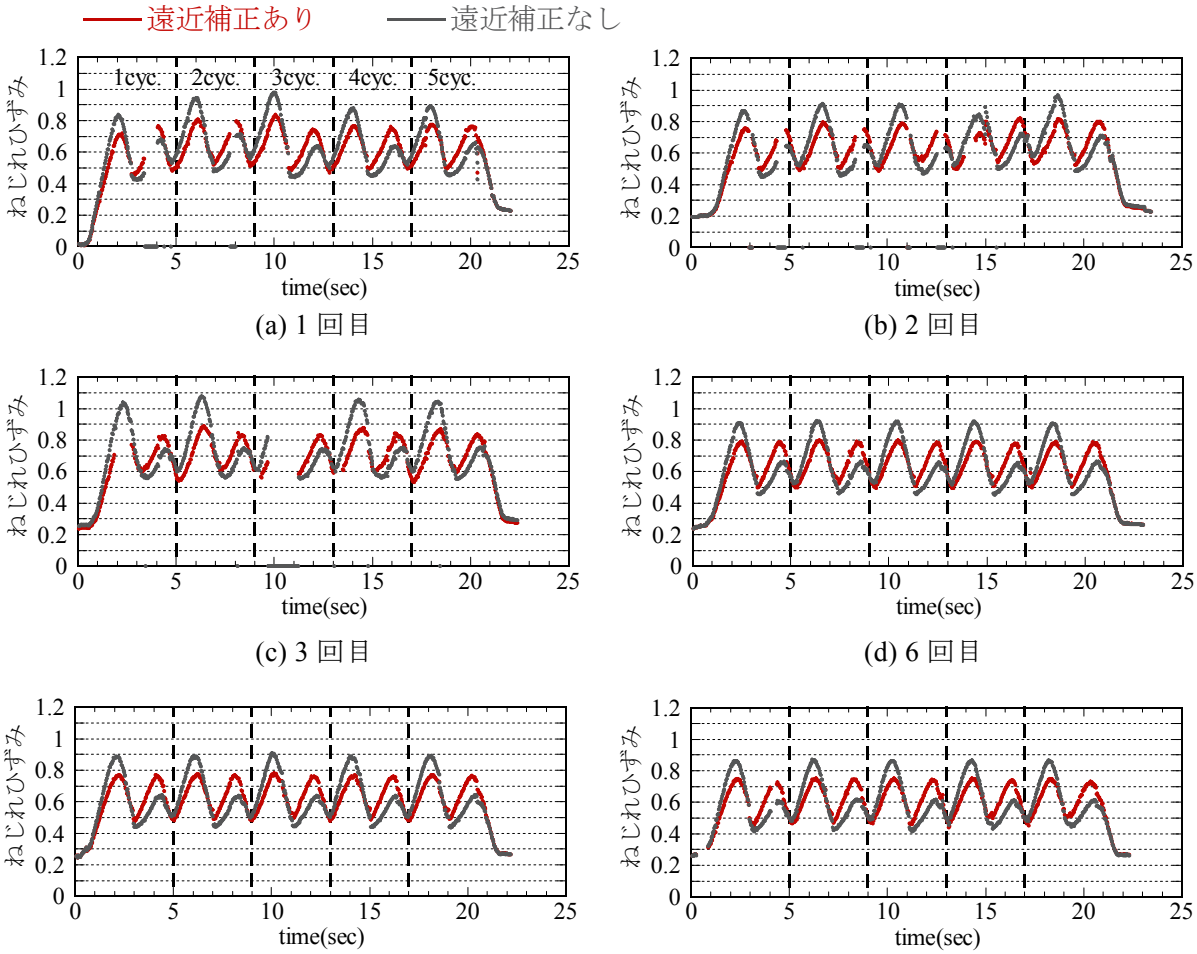
(a) 実試験体の捩れ変形　　(b) 画面上の捩れ変形

図 2.2.2-37　遠近補正を考慮したねじれひずみの算出方法

9.3) 楕円加振および真円加振のねじれひずみ

図 2.2.2-38 に、楕円加振の 1,2,3,6,9,12 回目のねじれひずみの時刻歴を示す。このねじれひずみは、図 2.2.2-34 に示す二列のうち右側の列を使用して算出した値である。また、図 2.2.2-39 に、真円加振の 1,2,4,7 回目のねじれひずみの時刻歴を示す。真円加振では、横方向への移動によりドットが画面上から消失することがあるため、一つの基準列だけで全時刻のねじれひずみを求めることはできない。図 2.2.2-35 より、列ごとにねじれひずみの差があまりないことから、基準列が画面上から消失してしまった場合は、計測できる基準列に一番近い列を使用してねじれひずみを算出している。ねじれひずみは、遠近補正を行ったものと、遠近補正を行わなかったものを比較して示す。図 2.2.2-38 に示す、楕円加振時のねじれひずみにおいては、遠近補正を行わない場合は 1 サイクルにおける二つの極大値の大きさが異なるが、遠近補正を行った場合は 1 サイクルにおける二つの極大値の大きさが近い値を示す。また、図 2.2.2-39 に示す、真円加振時のねじれひずみにおいては、遠近補正を行わない場合は加振中のねじれひずみが正弦波のように変動するが、遠近補正を行った場合は加振中のねじれひずみはほぼ一定値となるフラットな波形を示している。

以降では、遠近補正を行ったねじれひずみを用いて検討を行う。

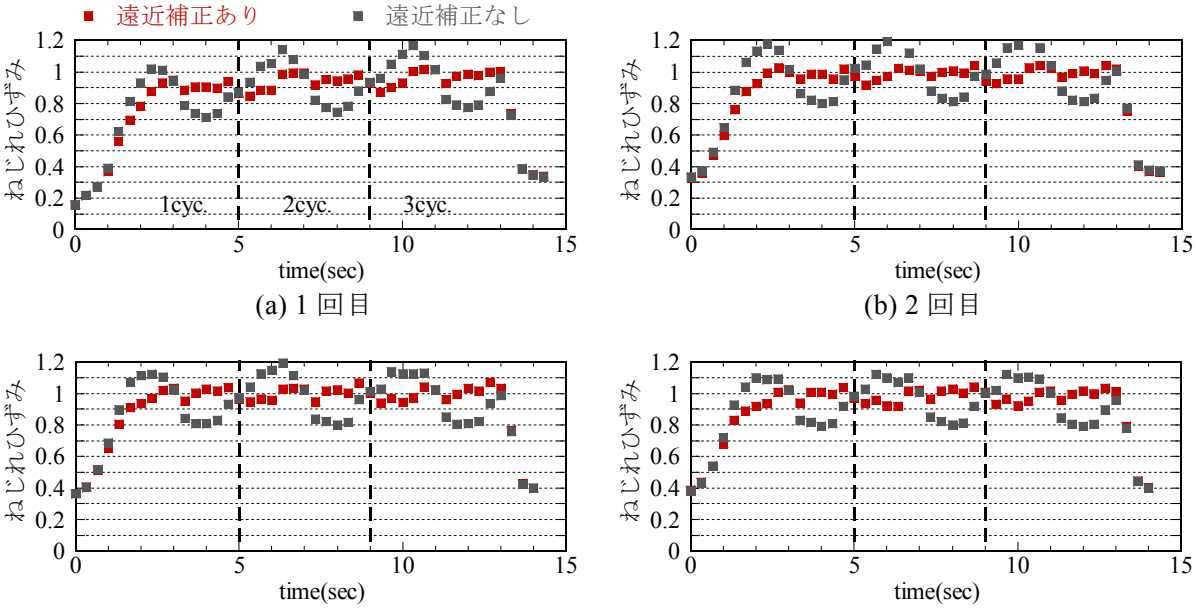


(a) 1 回目　(b) 2 回目

(c) 3 回目　(d) 6 回目

(e) 9 回目　(f) 12 回目

図 2.2.2-38　楕円加振におけるねじれひずみの時刻歴



(a) 1 回目　(b) 2 回目

(c) 4 回目　(d) 7 回目

図 2.2.2-39　真円加振におけるねじれひずみの時刻歴

(10) 加振時の局所的な応力度とひずみ度

加振時に試験体に生じる応力度を以下のように算出する。

■軸方向応力度σ_z

軸応力度　$\sigma_p = P / A$

曲げ応力度　$\sigma_m = M(D/2+\delta/2) / I$

$M = Qh / 2$

軸方向応力度　$\sigma_z = \sigma_p + \sigma_m$

ただし、圧縮荷重の大部分は有効支持部で支持されるため、引張側端部の軸応力度σ_pはゼロと仮定すると、

軸方向応力度　$\sigma_z = \sigma_m$

A：積層ゴム断面積

I：　断面二次モーメント

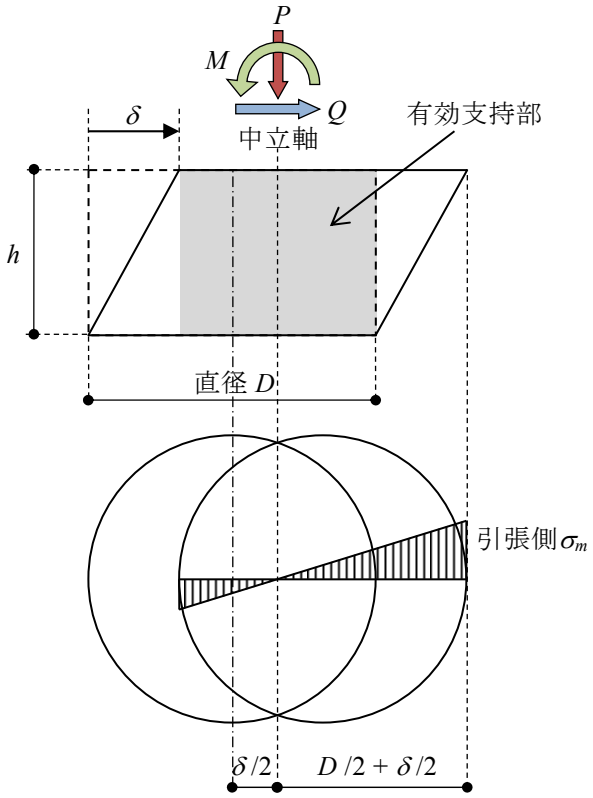


図 2.2.2-40　試験体に生じる軸方向応力度概念図

■せん断応力度τ

せん断力 Q を弾性成分 F_γと減衰成分 F_θに分解する。

せん断応力度　$\tau_\gamma = Q / A$

ねじれ応力度　$\tau_\theta = Mt\ (D/2) / Ip$

$Mt = F_\theta\ \mathrm{sqrt}(\delta_u^2+\delta_v^2) / 2$

せん断応力度とねじれ応力度の方向が一致する最外端で合計のせん断応力度が最大となるので、

せん断応力度　$\tau = \tau_\gamma + \tau_\theta$

Ip：極断面二次モーメント

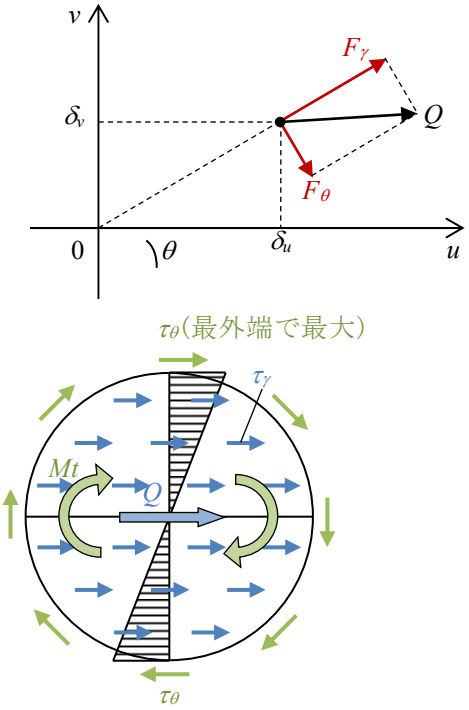


図 2.2.2-41　試験体に生じるせん断応力度概念図

図 2.2.2-42 に、1 方向加振のひずみ、荷重、応力度の時刻歴推移を示す。図 2.2.2-42 は、5 サイクルずつ全 12 回の加振のうち 1 回目の加振の結果である。U 方向への 1 方向加振であるため、ひずみはγ_uのみが±200%の推移を示している。荷重としては、減衰成分F_θが生じないため、ねじれモーメントも生じていない。曲げ応力度による軸方向応力度は、0～2N/mm^{2}の間を推移しており、引張側端部では平均して 1N/mm^{2}程度の引張応力度が作用していると考えられる。

図 2.2.2-43～2.2.2-48 に、楕円加振の 5 サイクルずつ全 12 回の加振のうち、1、2、3、6、9、12 回目のひずみ、荷重、応力度の時刻歴推移を示す。楕円加振はγ_u=±200%、γ_v=±100%で推移しており、γ_uとγ_vの重ね合わせは 100～200%の間の繰返しせん断ひずみとなっている。ねじれひずみは各サイクルの最大時で 80%程度生じており、せん断ひずみとねじれひずみの合計は最大時で約 280%となっている。曲げ応力度による軸方向応力度は、1N/mm^{2}付近で推移している。図 2.2.2-49～2.2.2-51 に、楕円加振のねじれひずみ、ねじれモーメント、水平力の全 12 回の加振による推移を示している。ねじれひずみは 3 回目までは増加傾向を示しているが、6 回目以降は減少傾向に転じている。ねじれモーメントおよび水平力の減衰成分F_θは、加振が進むにつれ減少している。水平力の弾性成分F_γは、全加振にわたりほぼ一定値を保っている。

図 2.2.2-52～2.2.2-55 に、真円加振の 3 サイクルずつ全 7 回の加振のうち、1、2、4、7 回目のひずみ、荷重、応力度の時刻歴推移を示す。真円加振はγ_u=±200%、γ_v=±200%で推移しており、γ_uとγ_vの重ね合わせは 200%の一定ひずみとなっている。ねじれひずみは、加振中約 100%でほぼ一定値を保っており、せん断ひずみとねじれひずみの合計は加振中 300%程度の一定値である。曲げ応力度による軸方向応力度は、2N/mm^{2}弱の一定値を示している。図 2.2.2-56～2.2.2-58 に、真円加振のねじれひずみ、ねじれモーメント、水平力の全 7 回の加振による推移を示している。ねじれひずみは、1 回目よりも 2 回目の方がやや増加しているが、2 回目以降はほぼ一定である。ねじれモーメント、および水平力の減衰成分F_θは加振が進むにつれて減少している。水平力の弾性成分F_γは、全 7 回ともほぼ一定値を保っている。

図 2.2.2-59 に、積層ゴムの破断限界例[2.2.2-4)]を示す。圧縮応力度が作用している状態では、積層ゴムの破断限界はせん断ひずみ 400%より大きいが、引張応力下では破断限界のせん断ひずみは 400%よりも小さくなる。せん断変形時においては有効支持部が軸力の大部分を負担し、引張側端部は軸力をほぼ負担しないことから、軸力による圧縮応力度をゼロと仮定して各加振による引張側端部の局所的な最大応力状態を図 2.2.2-59 中にプロットする。真円加振時における上端部のゴムの剥離は、このような局所的な引張せん断状態が一因と考えられる。ただし、図 2.2.2-59 に示す破断限界は、積層ゴムに一定の引張荷重をかけた状態でせん断変形を与えた場合の、積層ゴムとしての破断限界であるため、今回の加振時とは荷重状態が異なる。また、高減衰ゴム系積層ゴムの種類が今回使用したタイプとは異なることから、比較はあくまで参考程度に留まる。

本実験においては、試験体が 1 体のみであり、試験体の冷却に十分な時間をとれなかったことから、試験体に内部剥離の兆候が確認された真円加振時には、試験体は既に 300m 以上の累積変形を経験しており、また、加振開始時の試験体温度もゴム部で 50℃以上と高温であった。従って、本実験における試験体の損傷には、高温状態で厳しい加振ケースを繰返したことによる試験体の疲労の影響が大きいと推測され、疲労を蓄積していないバージンな試験体とは破断傾向が異なると考えられる。長周期地震動を想定した免震の応答量は累積変形量で 20～30m と

されており、本試験体は楕円加振を含む厳しい加振ケースでその 10 倍の 300m 以上まで損傷を生じず、健全な履歴ループを維持していたことから、長周期地震動に対して十分な繰返し耐久性を保持していると言える。

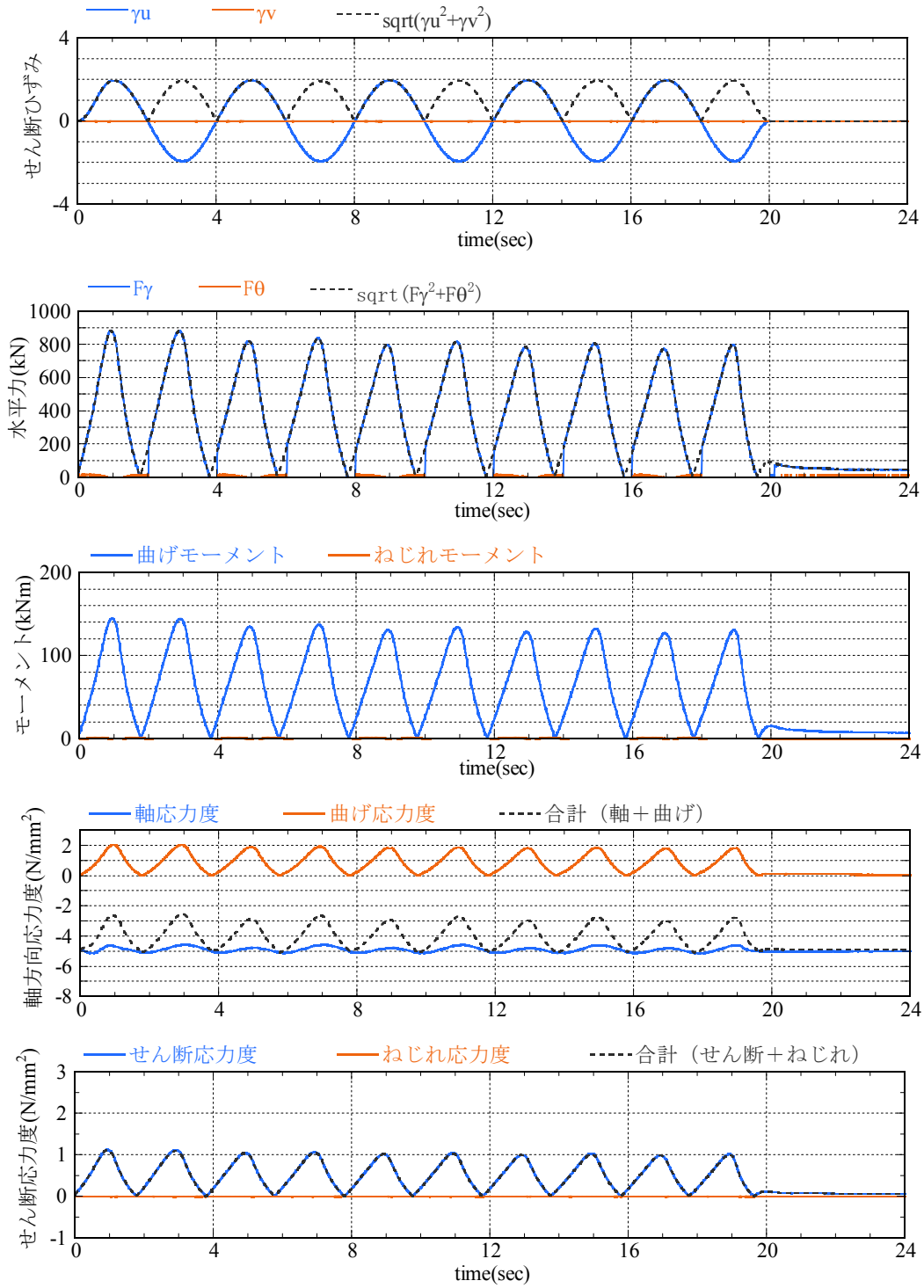


図 2.2.2-42　1 方向加振　±400mm(u)×5 サイクル　1 回目

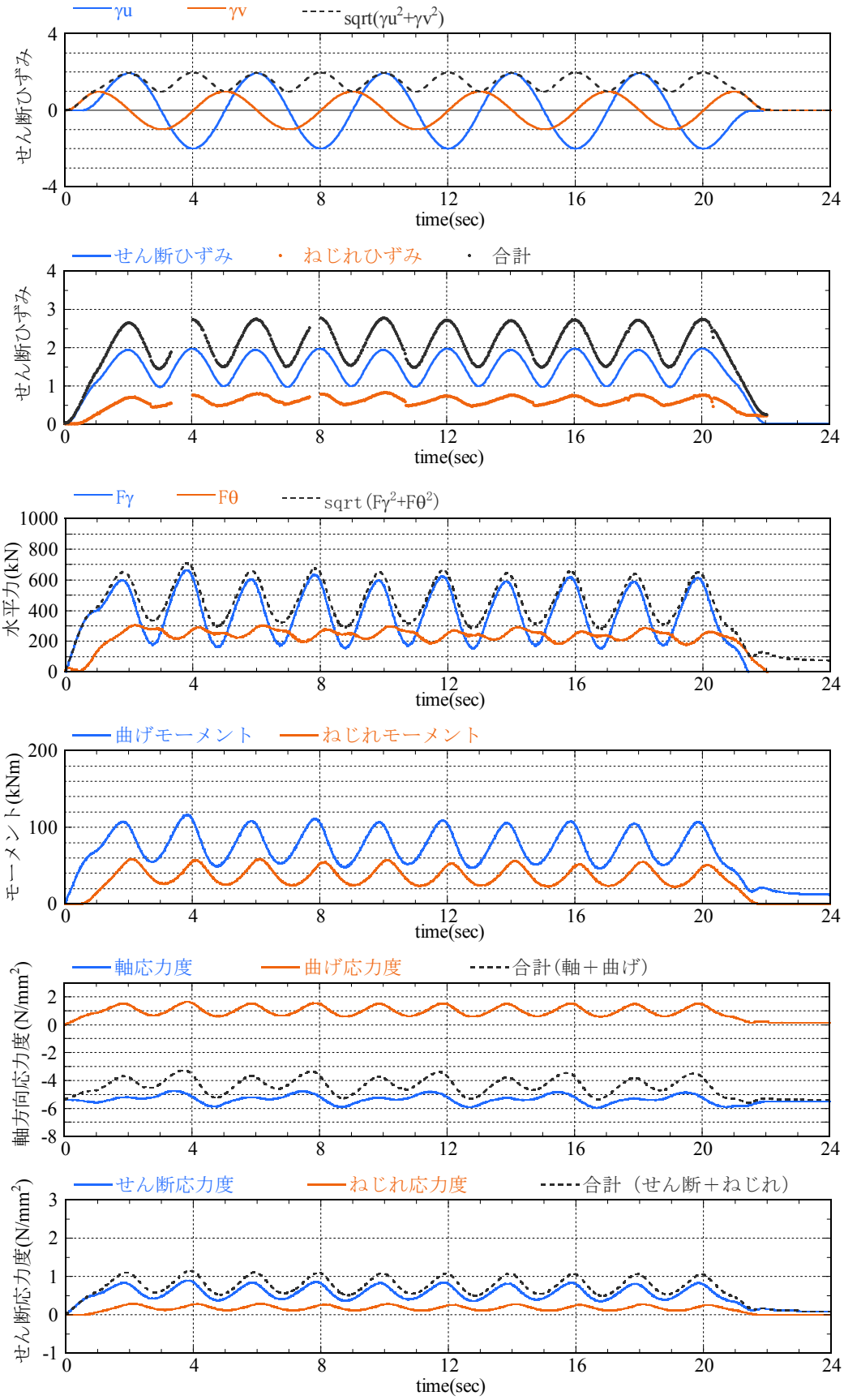


図 2.2.2-43　楕円加振　±400mm(u)／±200mm(v)×5 サイクル　1 回目

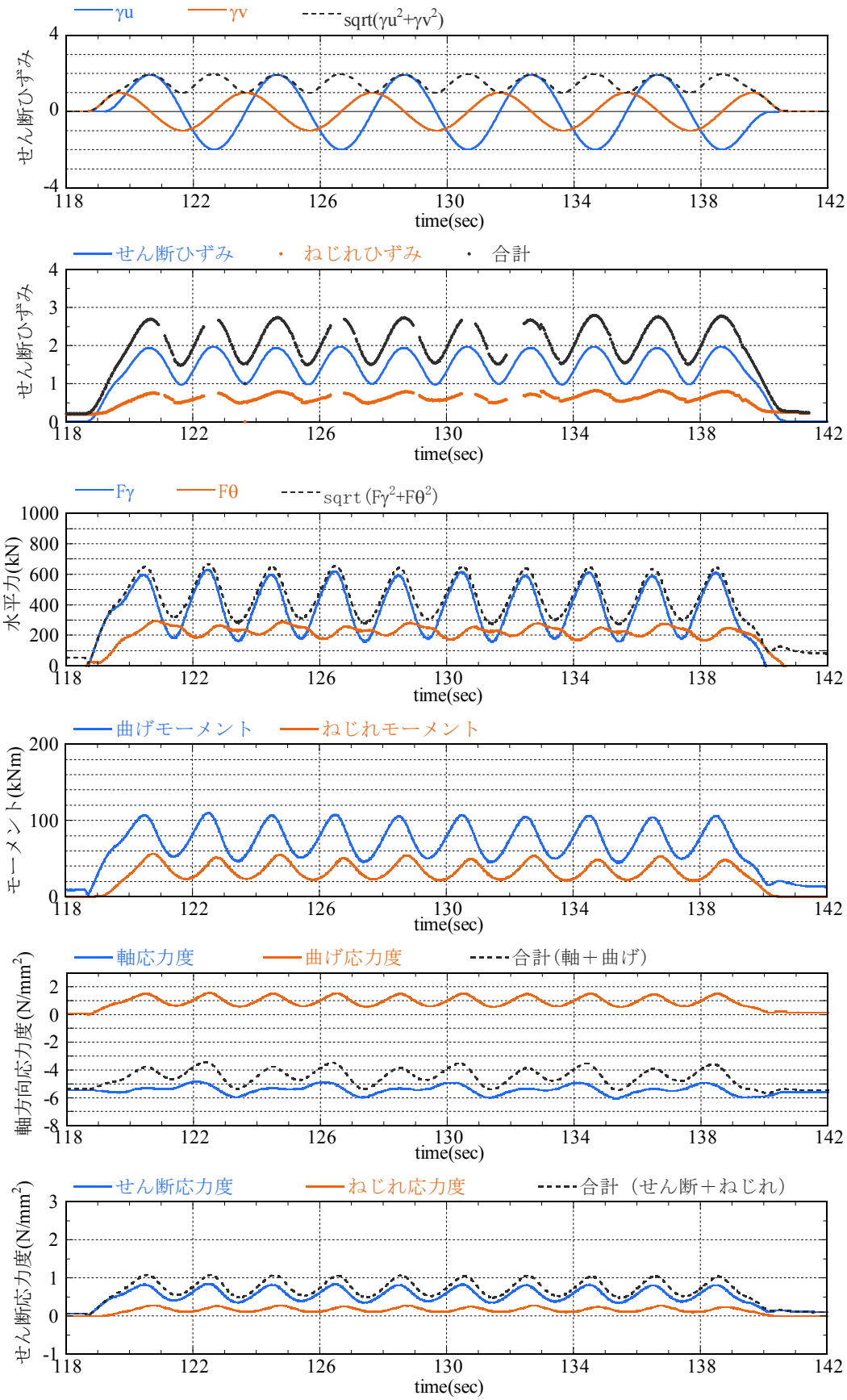


図 2.2.2-44　楕円加振　±400mm(u)／±200mm(v)×5 サイクル　2 回目

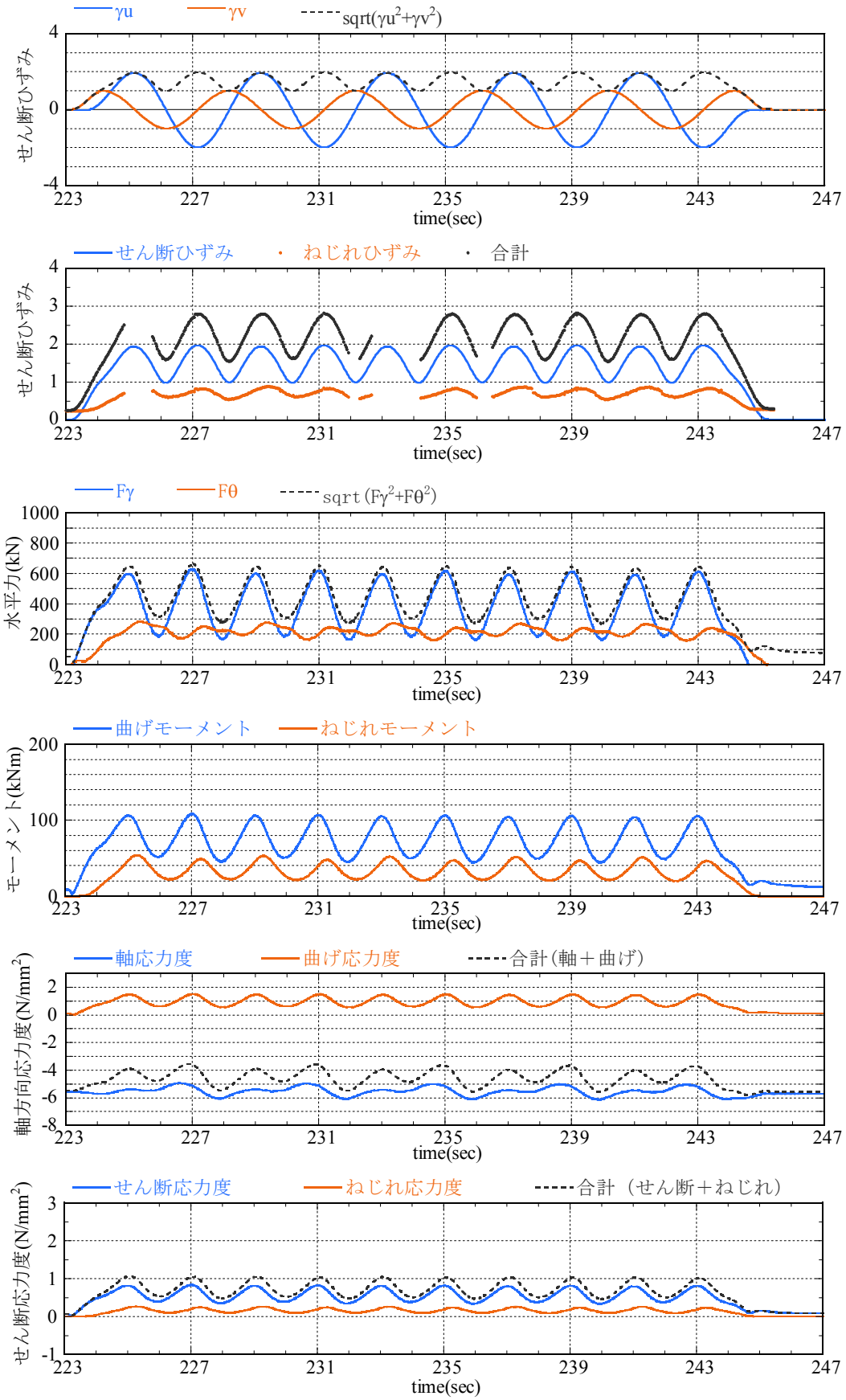


図 2.2.2-45　楕円加振　±400mm(u)／±200mm(v)×5 サイクル　3 回目

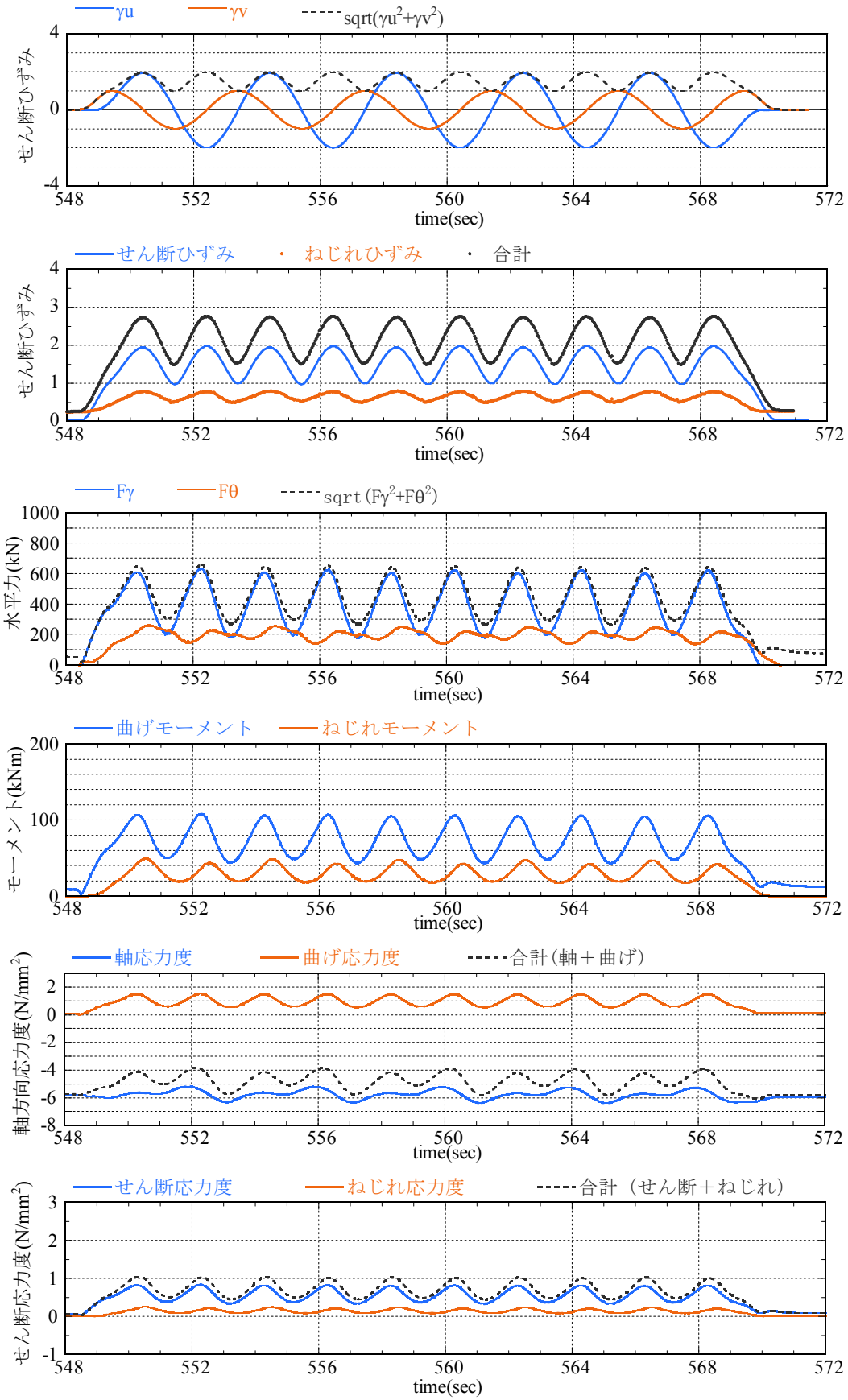


図 2.2.2-46　楕円加振　±400mm(u)／±200mm(v)×5 サイクル　6 回目

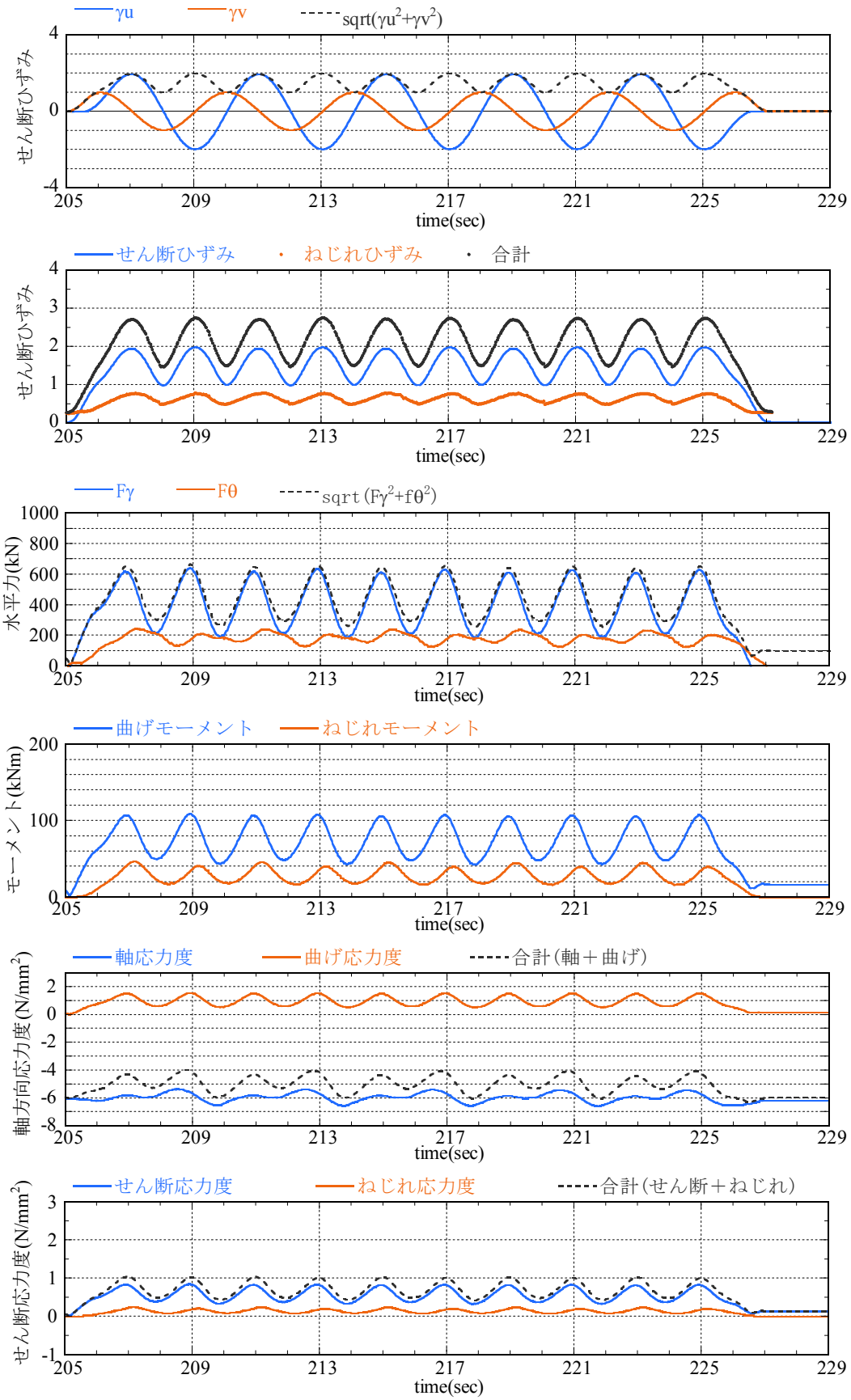


図 2.2.2-47　楕円加振　±400mm(u)／±200mm(v)×5 サイクル　9 回目

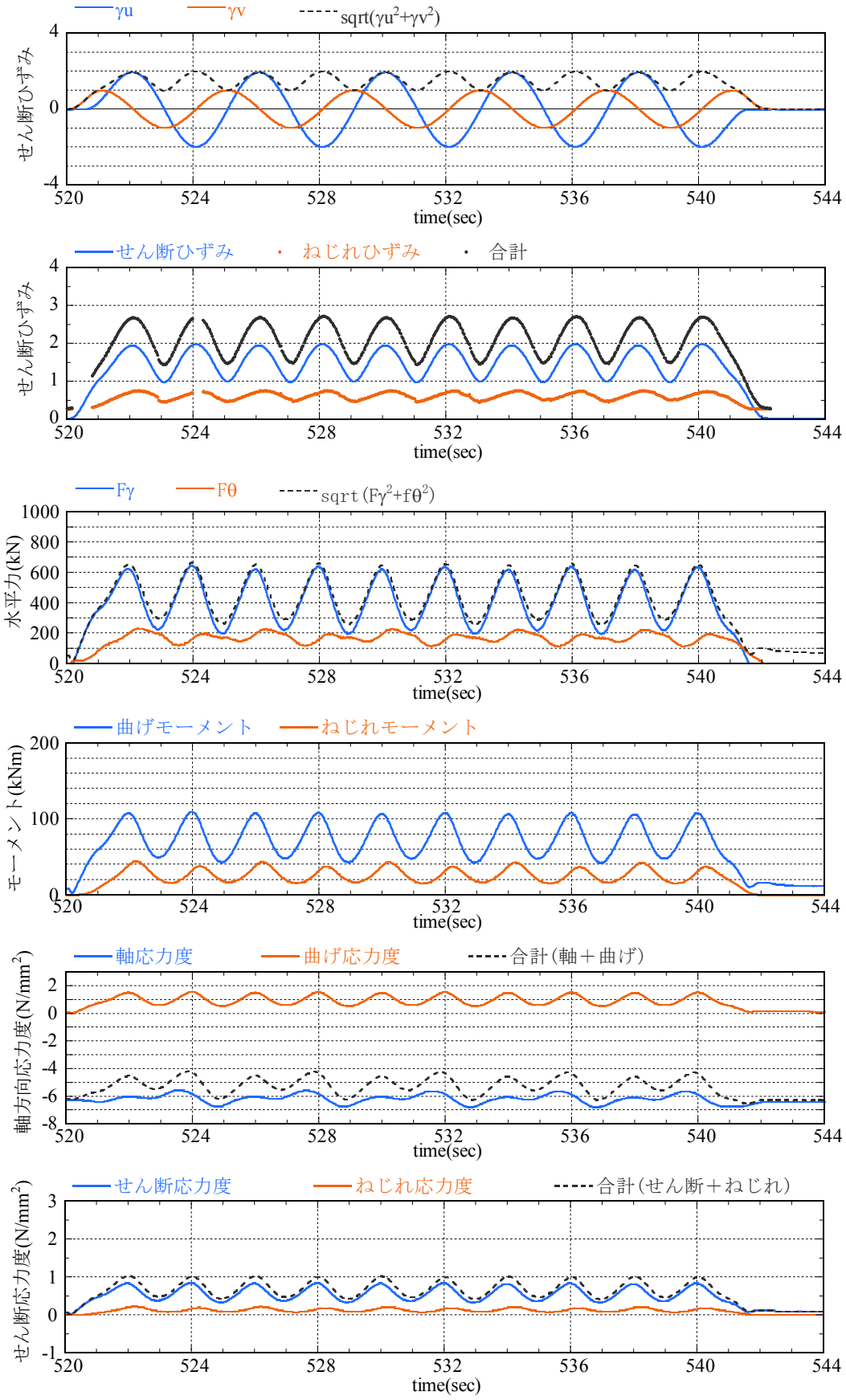


図 2.2.2-48　楕円加振　±400mm(u)／±200mm(v)×5 サイクル　12 回目

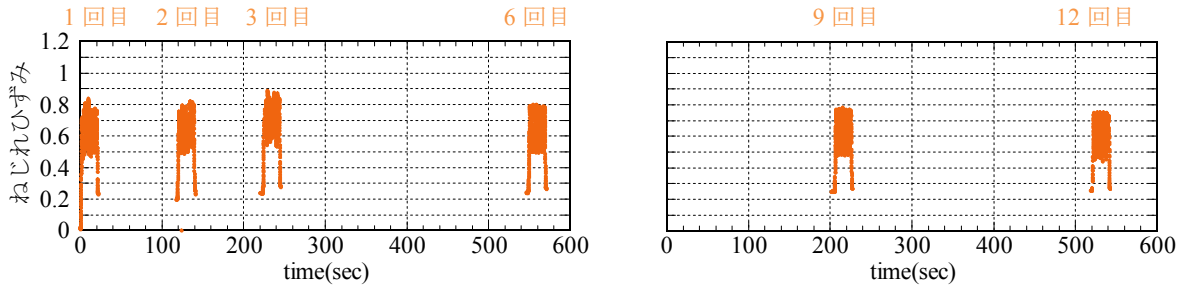


図 2.2.2-49　楕円加振のねじれひずみ推移

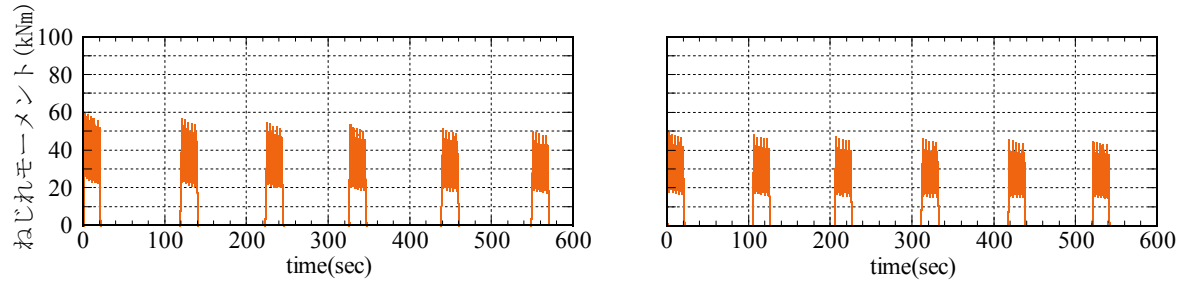


図 2.2.2-50　楕円加振のねじれモーメント推移

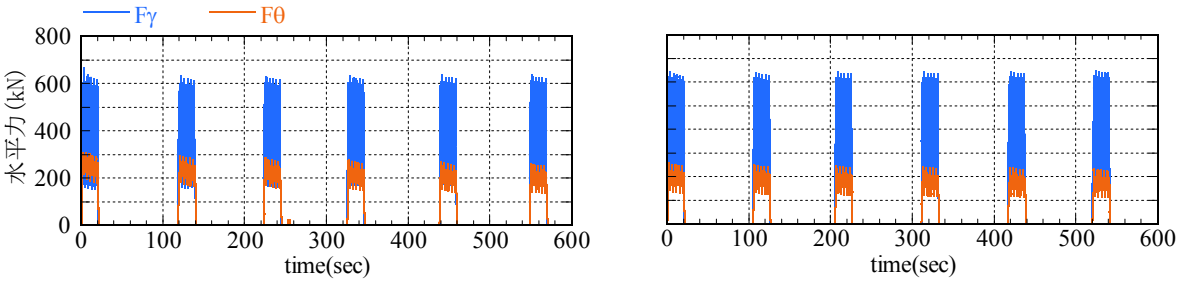


図 2.2.2-51　楕円加振の水平力推移

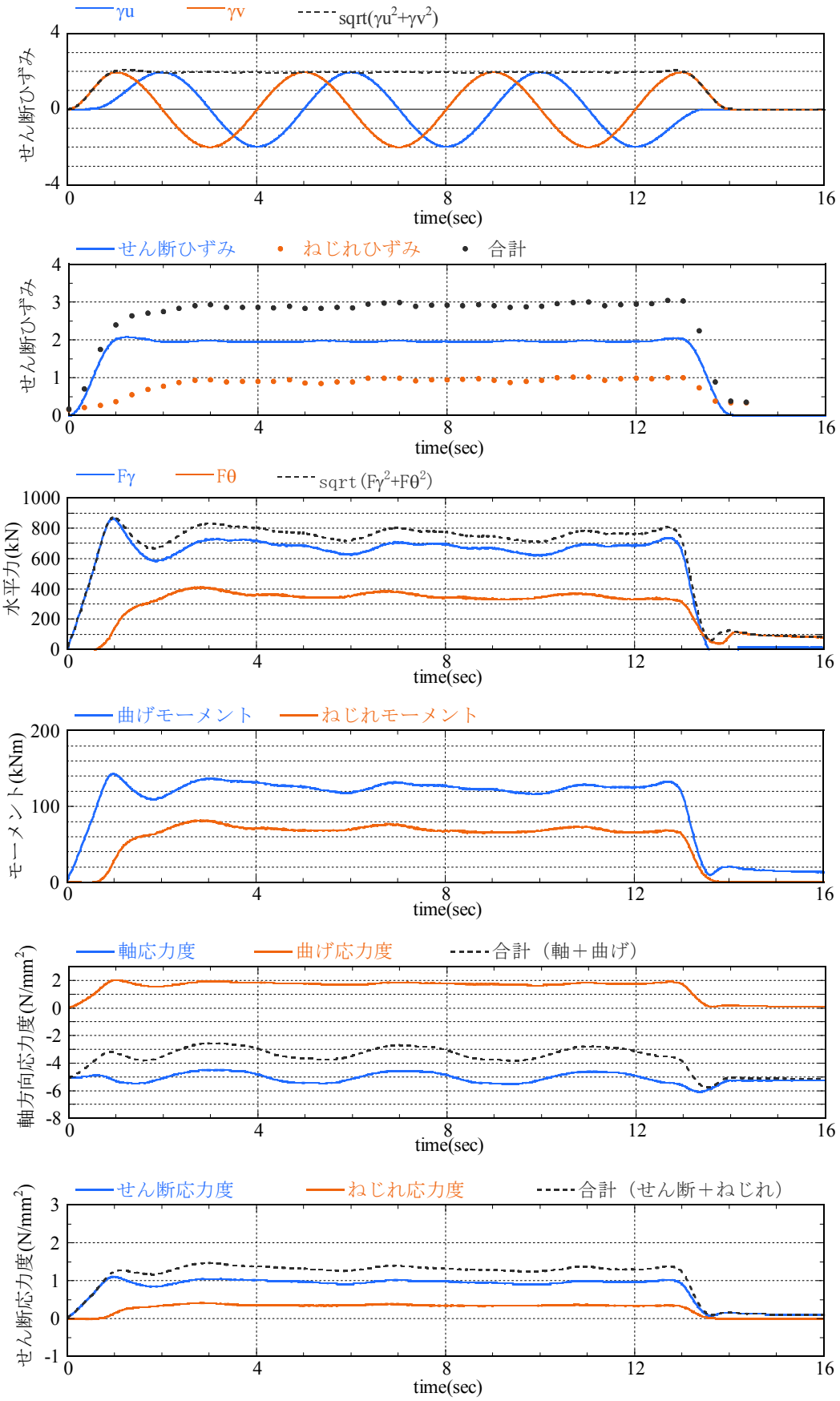


図 2.2.2-52　真円加振　±400mm(u)／±400mm(v)×3 サイクル　1 回目

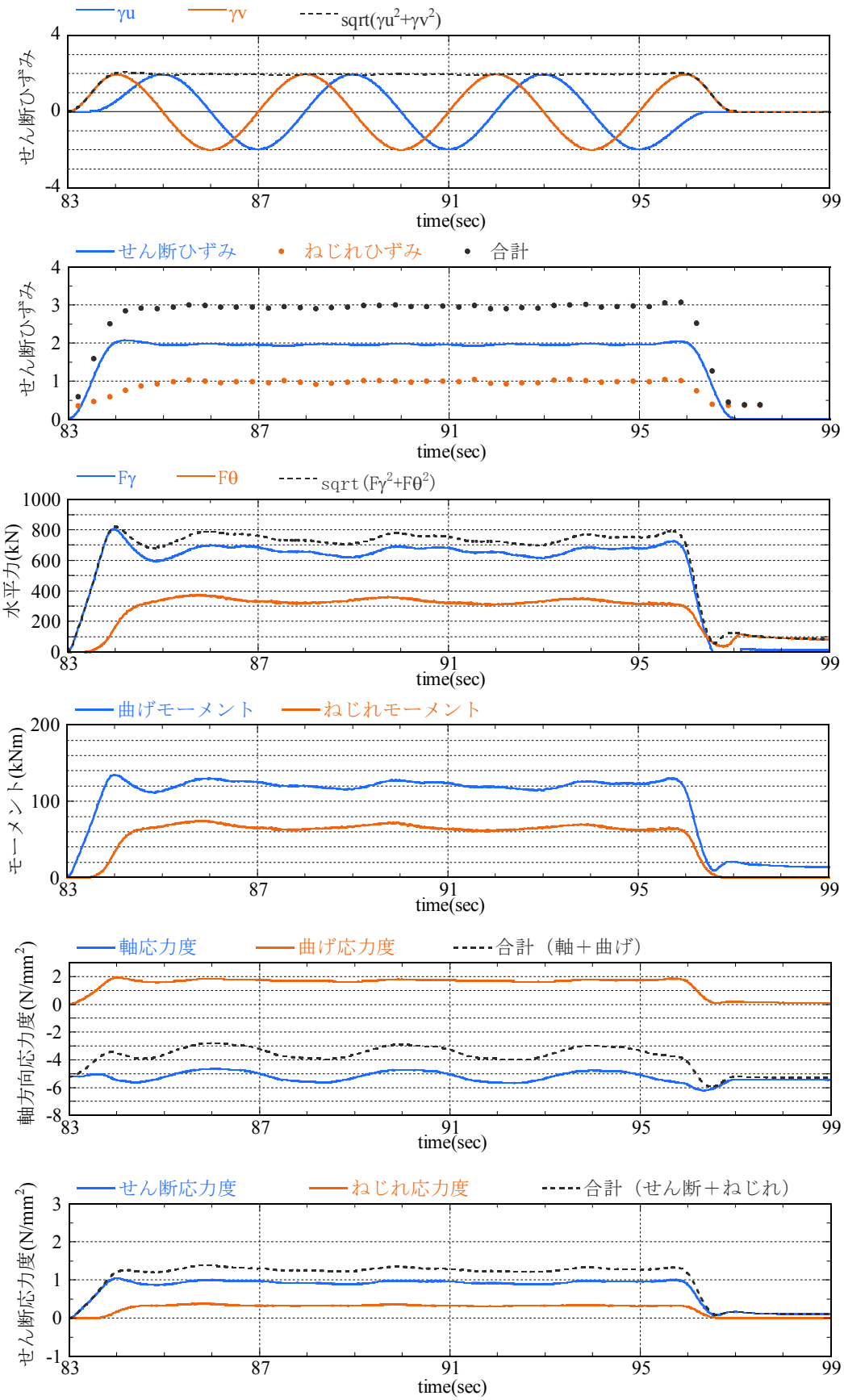


図 2.2.2-53　真円加振　±400mm(u)／±400mm(v)×3 サイクル　2 回目

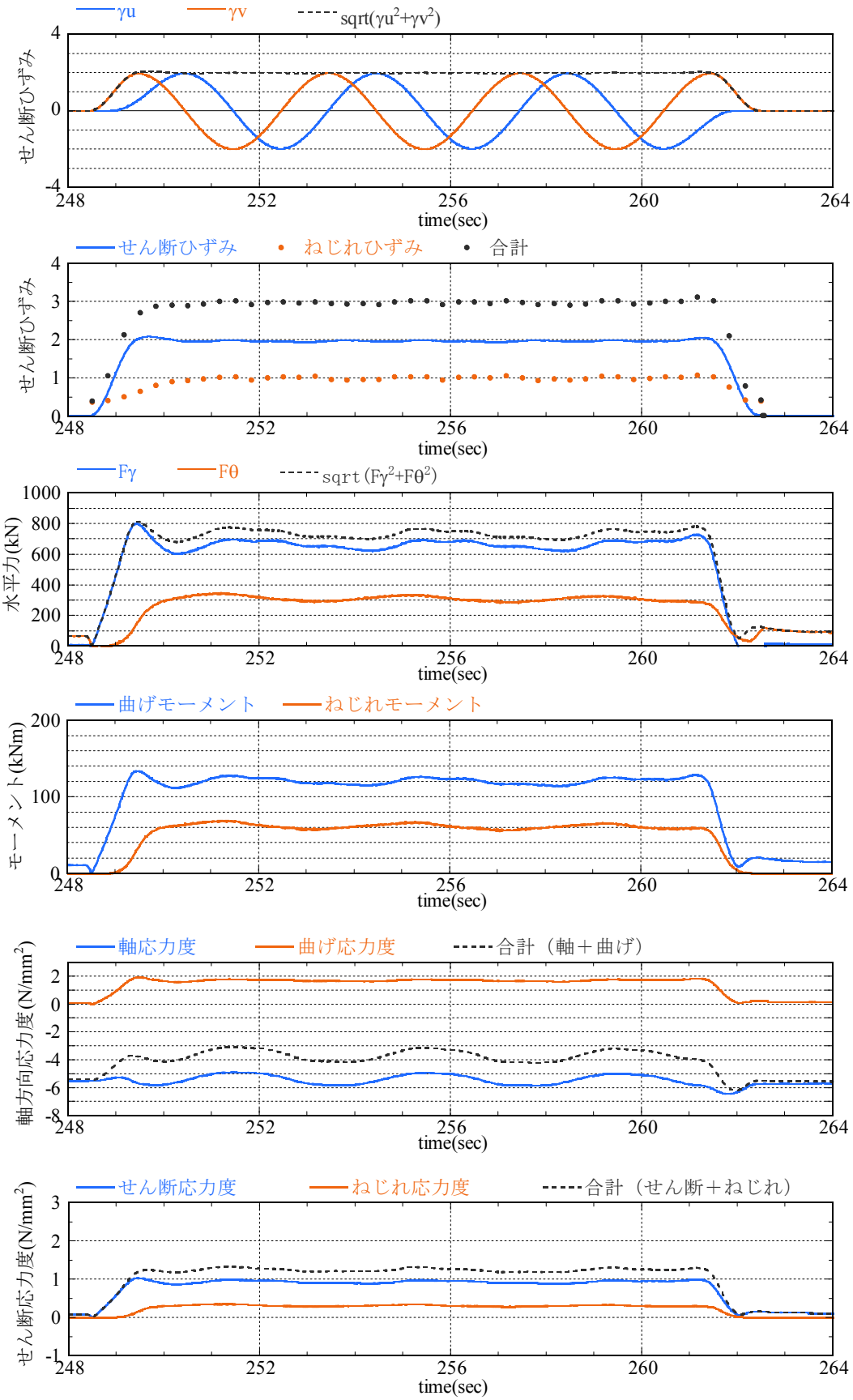


図 2.2.2-54　真円加振　±400mm(u)／±400mm(v)×3 サイクル　4 回目

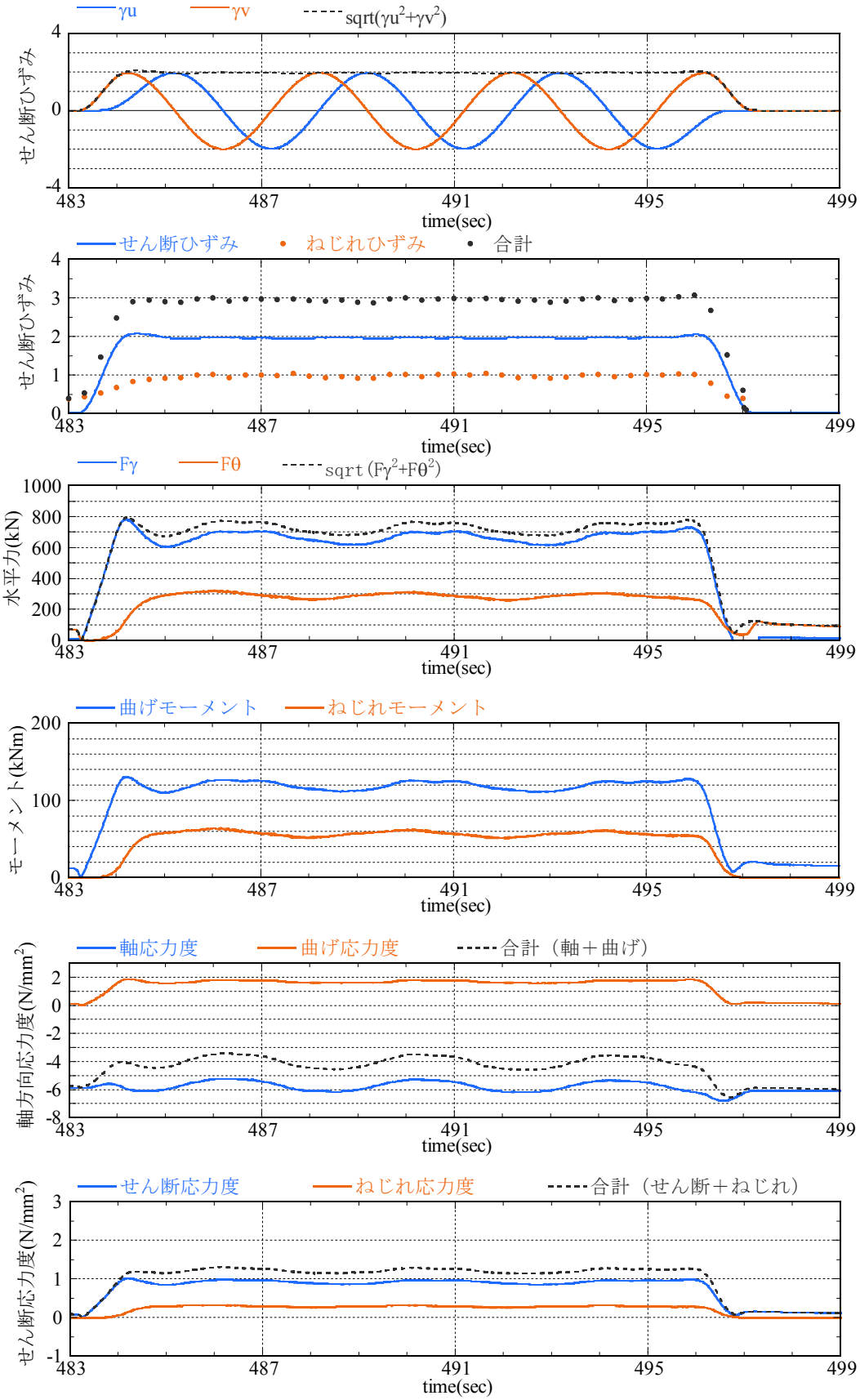


図 2.2.2-55　真円加振　±400mm(u)／±400mm(v)×3 サイクル　7 回目

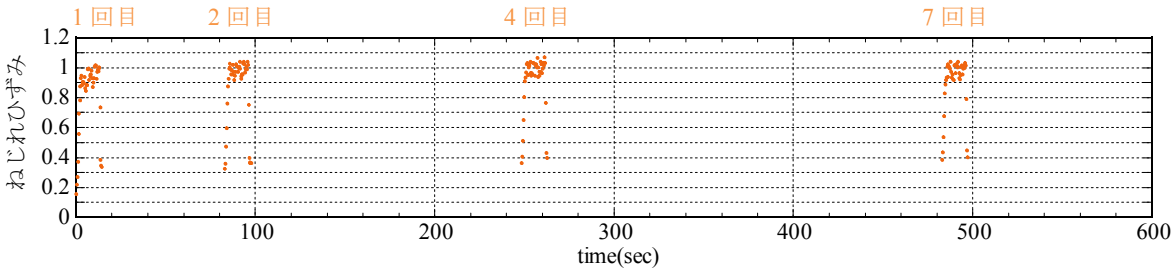


図 2.2.2-56　真円加振のねじれひずみ推移

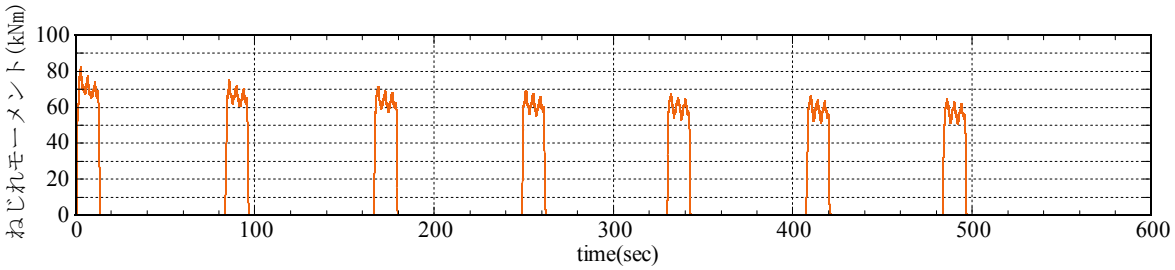


図 2.2.2-57　真円加振のねじれモーメント推移

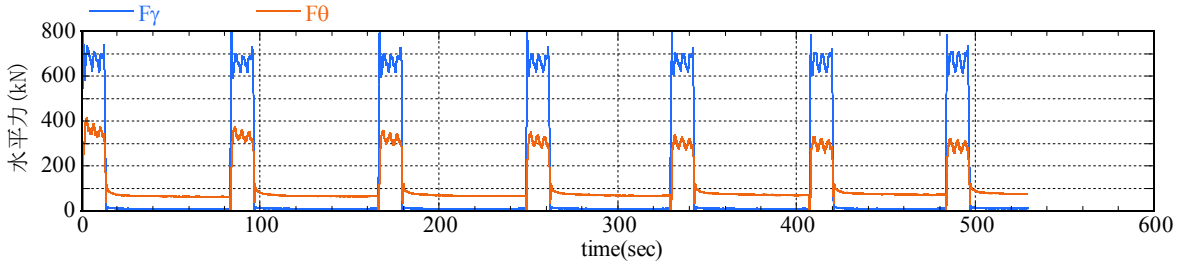
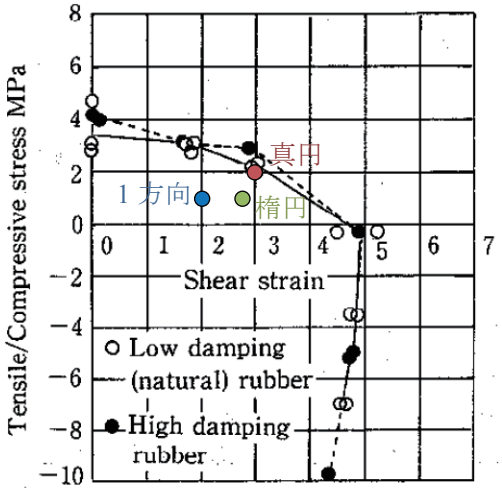


図 2.2.2-58　真円加振の水平力推移



破断限界(高減衰積層ゴムと低減衰積層ゴムの比較)

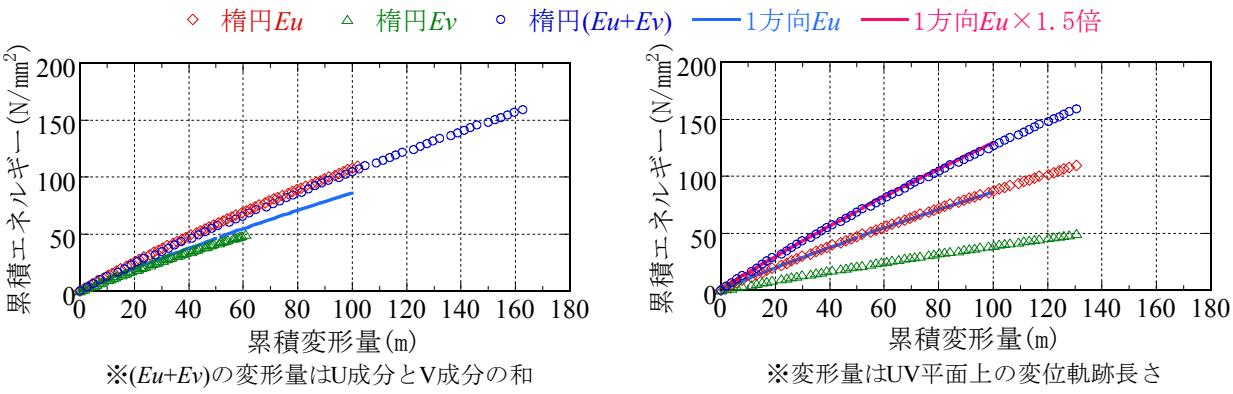
(高減衰：H_S＝60、225-3.0×23、S_1＝18.75、S_2＝3.2)
(低減衰：H_S＝40、240-2.4×27、S_1＝25、S_2＝3.7)

図 2.2.2-59　積層ゴムの破断限界例 [2.2.2-4)]

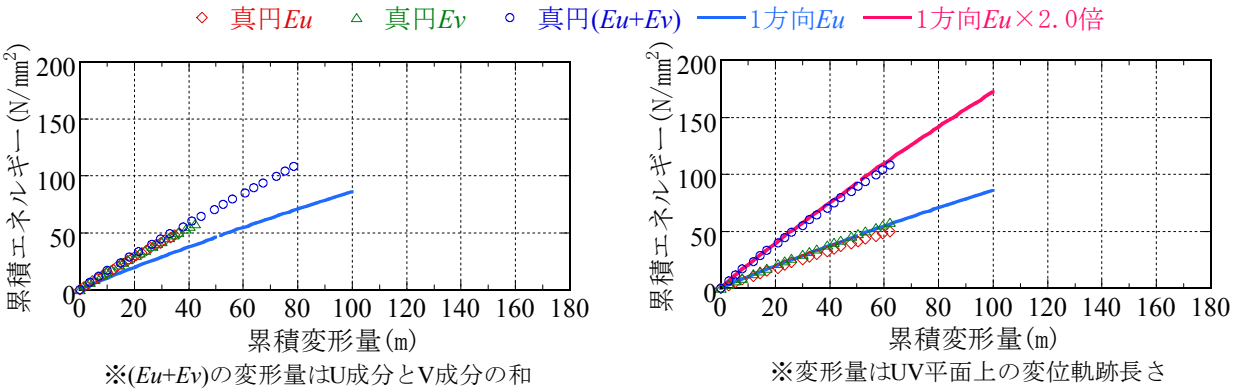
(※図は、一定の引張荷重をかけた状態でせん断変形を与えた時の破断限界であり、本実験とは荷重状態が異なるため、比較はあくまで参考である。)

(11) 1 方向入力と 2 方向入力のエネルギー比較

図 2.2.2-60 に、楕円加振、および真円加振の累積変形量に対する累積エネルギー量を 1 方向加振と比較して示す。楕円、真円加振時には累積変形量を各方向成分の和とした場合も、平面上の変位軌跡の長さとした場合も同じ変形量時の 1 方向加振のエネルギー量よりも大きなエネルギー吸収量となっている。しかし、図 2.2.2-61 に示すように、地震応答波加振においては 2 方向加振時の各方向成分のエネルギー量は 1 方向入力時のエネルギーに一致し、1 方向入力時のエネルギーの和が 2 方向加振時のエネルギーの総和に一致している。これは地震応答波の場合、楕円加振や真円加振のような極端な 2 方向加力状態にならないためと考えられる。図 2.2.2-62 に、各加振ケースの UV 方向成分のループ形状を比較して示す。楕円、真円加振においては直交方向の加振の影響から、ループ形状は 1 方向加振時と異なる形状を示し、ループ面積が増大している。地震応答波加振においては、1 方向入力時と 2 方向入力時の各方向成分はほぼ同様の形状を示し、直交方向の加振の影響が小さい。

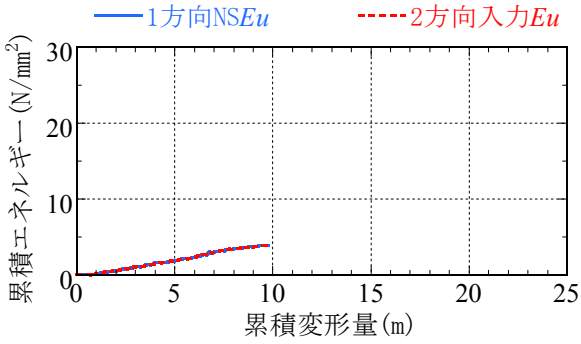


(a) 楕円加振時の累積変形量と累積エネルギー量の関係

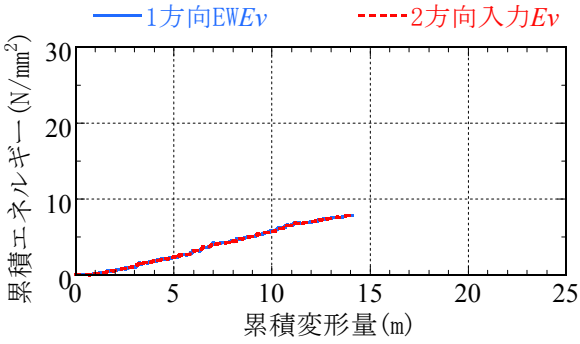


(b) 真円加振時の累積変形量と累積エネルギー量の関係

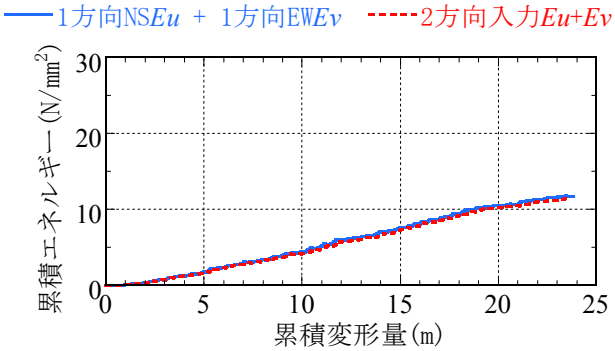
図 2.2.2-60　実大実験の 2 方向加振ケースの累積変形量と累積エネルギーの関係



(a)　地震応答波 U 方向成分比較

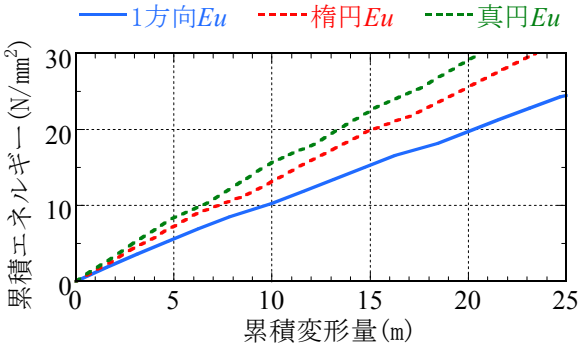


(b)　地震応答波 V 方向成分比較



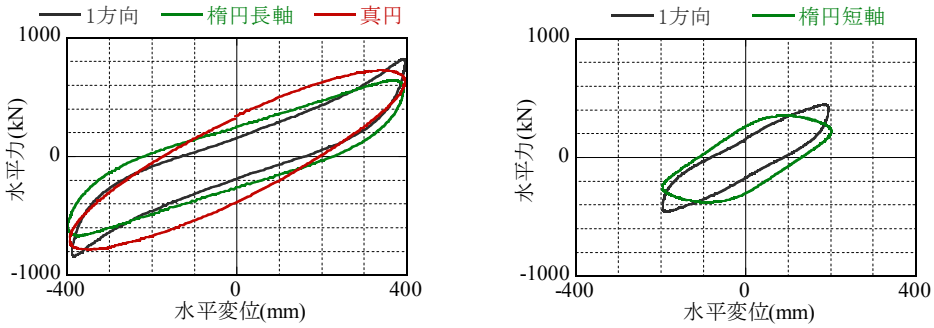
※累積変形量はU成分とV成分の和

(c)　地震応答波 UV 成分の和の比較

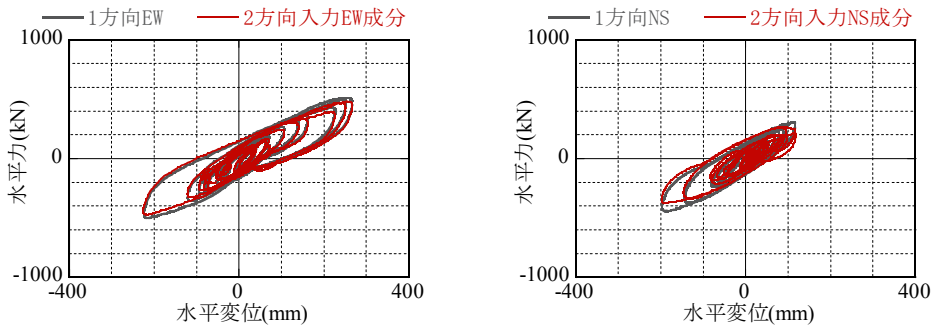


(d)　正弦波繰返し加振 U 方向成分比較

図 2.2.2-61　累積変形量と累積エネルギーの関係の 1 方向入力時と 2 方向入力時の比較



(a) 1 方向、楕円、真円 (2 サイクル目のループ)



(b)　地震応答波加振 (最大変形時を含む 40 秒間)

図 2.2.2-62　各加振ケースの UV 方向成分のループ形状比較

(12) 2 方向加振実験のシミュレーション解析

地震応答波の 2 方向同時入力加振、楕円加振、真円加振について、実験のシミュレーション解析を行う。解析モデルとしては、MSS モデルに漸減荷重を考慮した修正バリニアモデル [2.2.2-3)] を復元力として適用したモデル、および高減衰ゴム系積層ゴムの水平 2 方向変形に対応した解析モデルである変形履歴積分型の復元力モデル [2.2.2-5)] の 2 種類の解析モデルを用いる。ここでは、解析モデルの 2 方向加振時のループ形状の再現性を確認することを目的とするため、解析に用いる両モデルとも繰返し変形による特性変動は考慮しない。ただし、加振により温度が上昇した状態で行った実験結果と解析結果を比較するため、MSS モデルについては加振開始時の温度から式(2.2.2-1)～式(2.2.2-3)を用いて、K_{eq}, H_{eq}, u の温度補正を行い、補正値を用いて解析を行った。表 2.2.2-16 に、MSS モデルによる解析時に用いた K_{eq}, H_{eq}, u の補正値を示す。また、変形履歴積分型の復元力モデルについては、最初に行った基本特性①の実験結果に合うように材料パラメータを設定した。表 2.2.2-17 に、変形履歴積分型復元力モデルによる解析で用いた材料パラメータを示す。

図 2.2.2-63 に、基本特性①の実験結果と 2 種類の解析モデルによる解析結果を比較して示す。MSS モデルによる解析結果は、復元力モデルがバイリニア型であるためループ面積が実験結果よりも大きいが、最大荷重や荷重切片は実験結果と対応している。変形履歴積分型モデルについては、基本特性①のループ形状を精度良く再現している。以上より、1 方向加振については両者とも実験結果を表現可能であることが確認できる。

図 2.2.2-64 に、地震応答波の 2 方向同時加振の実験結果と解析結果を比較して示す。地震応答波は、2 方向加振の履歴ループへの影響が小さく、両解析モデルともループ形状を良く再現できている。図 2.2.2-65 に、楕円加振時の実験結果と解析結果を比較して示す。長軸方向(U 方向)については、両解析モデルとも実験結果を追跡できているが、短軸方向(V 方向)については、変形履歴積分型モデルによる解析は、変位ゼロ付近でのループの膨らみを表現できているが、MSS モデルによる解析は、ループ形状は似ているがループの膨らみを再現できていない。図 2.2.2-66 に、真円加振時の実験結果と解析結果を比較して示す。変形履歴積分型モデルによる解析は、2 方向加振の影響により全体的に膨らんだループを再現している。一方、MSS モデルによる解析は、実験結果の膨らんだループ形状を再現することができていない。

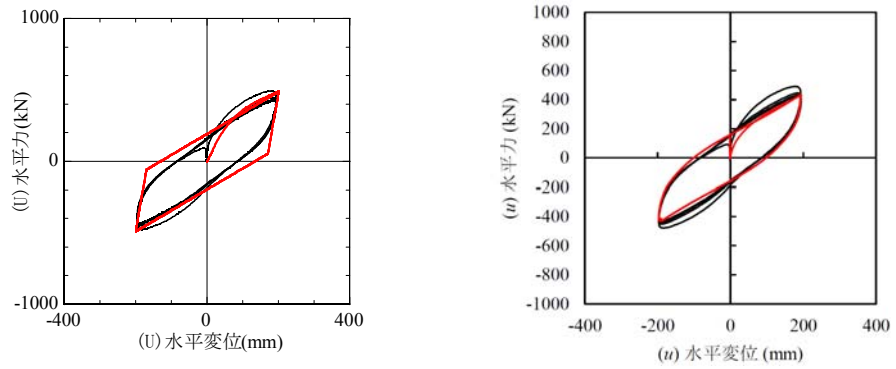
以上より、高減衰ゴム系積層ゴムの 2 方向加振時に、直交方向の加力の影響により変化する履歴ループ形状は、MSS モデルでは再現することができない。高減衰ゴム系積層ゴムの 2 方向加振時の解析には、変形履歴積分型モデル等 2 方向加振に対応した解析モデルを用いる必要がある。

表 2.2.2-16　MSS モデルによる解析で用いた復元力特性値の温度による補正値

	加振開始時温度 (℃)	K_{eq} 補正値	H_{eq} 補正値	u 補正値
(基準温度)	20	1.000	1.000	1.000
基本特性①	24	0.949	0.974	0.974
地震2方向加振	27	0.916	0.955	0.955
楕円加振	36	0.839	0.896	0.896
真円加振	54	0.734	0.779	0.779

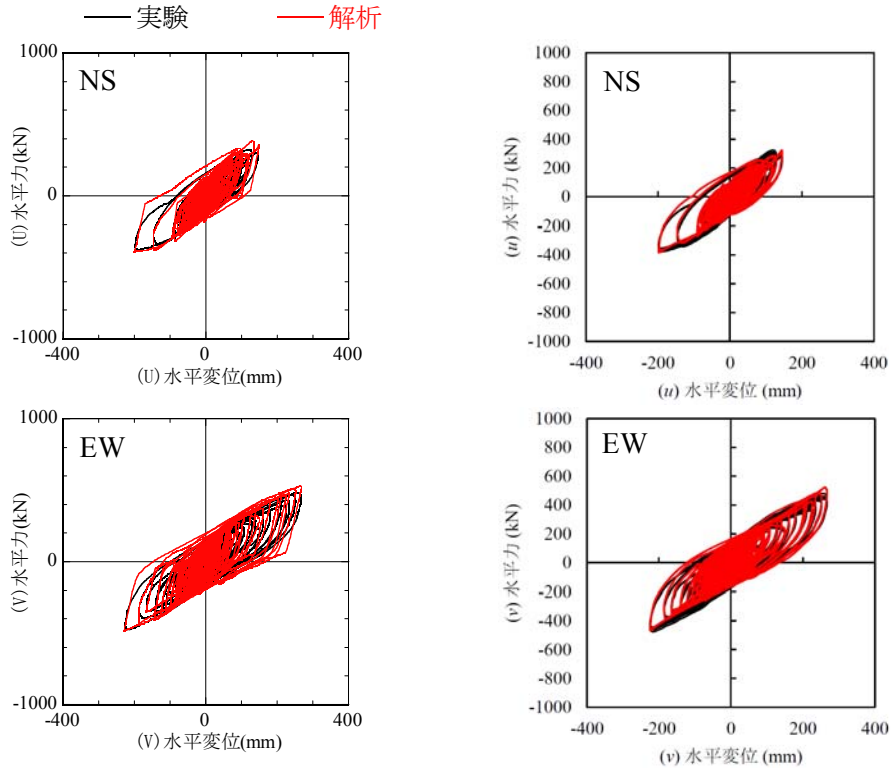
表 2.2.2-17　変形履歴積分型復元力モデルによる解析で用いた材料パラメータ

a (N/mm^2)	b (N/mm^2)	c_1 (N/mm^2)	l_1	c_2 (N/mm^2)	l_2	θ	β
0.7253	0.02820	2.372	0.03006	0.3758	0.3592	0.3696	0.4578



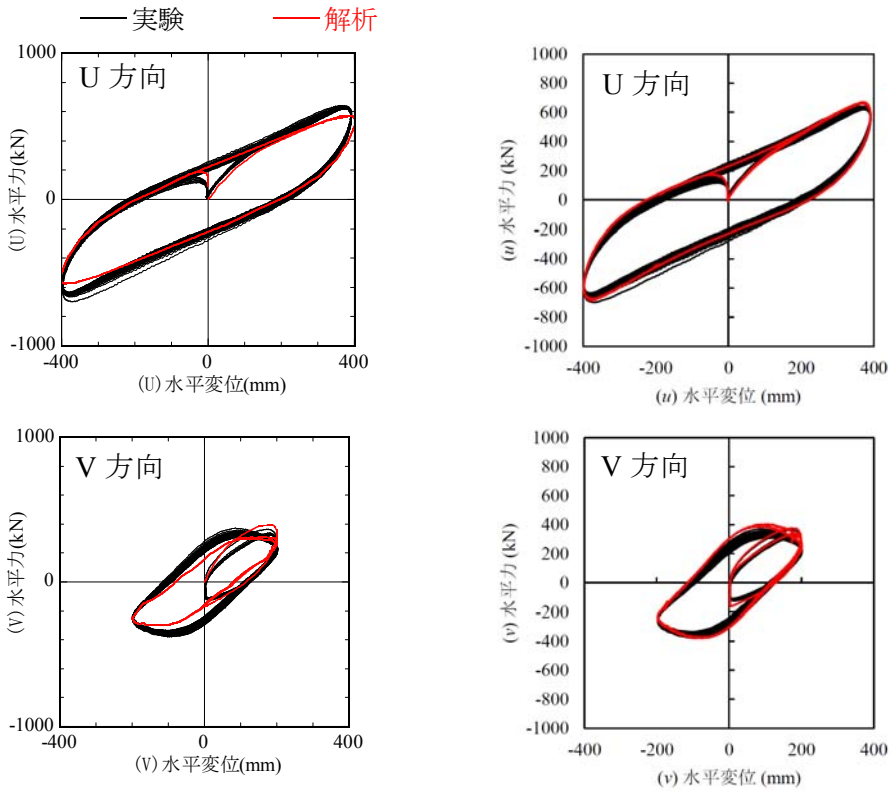
(a) MSS モデルによる解析結果　　(b) 変形履歴積分型モデルによる解析結果

図 2.2.2-63　基本特性①の実験結果と解析結果の比較



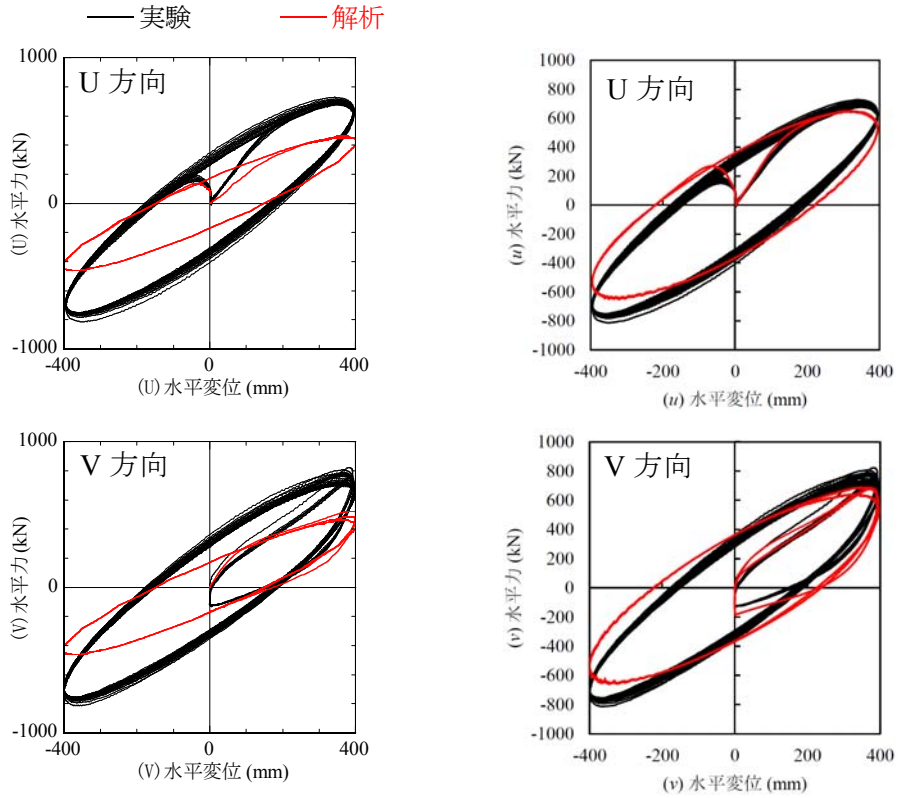
(a) MSS モデルによる解析結果　　(b) 変形履歴積分型モデルによる解析結果

図 2.2.2-64　地震応答波 2 方向入力の実験結果と解析結果の比較



(a) MSS モデルによる解析結果　　(b) 変形履歴積分型モデルによる解析結果

図 2.2.2-65　楕円加振の実験結果と解析結果の比較



(a) MSS モデルによる解析結果　　(b) 変形履歴積分型モデルによる解析結果

図 2.2.2-66　真円加振の実験結果と解析結果の比較

13) まとめ

長周期地震動に対する高減衰ゴム系積層ゴムの力学特性の把握を目的として、直径φ1000 の実大試験体による長振幅高速繰返し試験を E-ディフェンスの大型震動台を用いて実施した。加振ケースとしては、水平 1 方向多数回繰返し加振、水平 2 方向多数回繰返し加振(楕円加振および真円加振)、地震応答波加振(水平 1 方向および 2 方向)、大振幅加振の 4 ケースを実施した。

13.1) 多数回繰返しによる力学特性の変化

水平 1 方向繰返し加振、水平 2 方向繰返し加振とも、加振によるゴム温度の上昇とともに履歴ループが細くなった。1 方向繰返し加振時には、最大変位時の荷重の低下が顕著であるが、2 方向加振時では最大変位時の荷重はあまり低下せず、荷重切片の低下が見られた。2 方向繰返し加振時の水平力の推移においては、弾性成分は全加振にわたりほぼ一定であったが、減衰成分は加振が進むにつれて減少する傾向が見られた。

また、各加振ケースの間に実施した、基本特性試験の履歴ループを比較すると、加振による温度上昇とともに最大荷重の低下とループ面積の減少が見られた。上昇した温度が低下することで、特性の回復が見られたが、加振 1 日目と加振 2 日目の基本特性を比較すると等価減衰定数が 2 日目の方が平均的に小さく、繰返しによる疲労の影響と考えられる。

13.2) 多数回繰返しによる温度上昇

地震応答波の 1 方向入力によるゴム温度(試験体ゴム部中心温度)の上昇は、NS 入力時で 1.3℃、EW 入力時で 2.7℃、2 方向同時入力時で 3.6℃であった。また、地震応答波 2 方向の 4 回連続入力によるゴム温度の上昇は 13℃であり、最高ゴム温度は 37℃であった。水平 1 方向繰返し加振によるゴム温度の上昇は、インターバルをはさまない 5 サイクル加振で 5℃程度であり、5 サイクル×12 回の加振により、ゴム温度は 59℃まで上昇した。楕円加振によるゴム温度の上昇は、インターバルをはさまない 5 サイクル加振で 10℃弱であり、5 サイクル×12 回の加振でゴム温度は 74℃まで上昇した。真円加振によるゴム温度の上昇は、インターバルをはさまない 3 サイクル加振で 10℃強であり、3 サイクル×7 回の加振でゴム温度は 86℃まで上昇した。

1 方向、2 方向入力とも正弦波の繰返し加振は、大振幅によるエネルギーが連続的に入力され続けるため、試験体の温度上昇が大きい。一方、地震応答波は大振幅によるエネルギーの入力は数回、断続的に生じるため試験体の温度上昇は、正弦波に比べると小さい。

13.3) 2 方向加振による影響

楕円加振、真円加振においては、直交方向の加振の影響から、1 方向加振時と比較して履歴ループ形状の顕著な変化が見られた。一方、地震応答波加振においては、1 方向入力時と 2 方向同時入力時の履歴ループ形状の違いはわずかであり、2 方向加振の影響は非常に小さかった。また、楕円加振、真円加振時に見られるループ形状の変化は、MSS モデルでは表現することができない。高減衰ゴム系積層ゴムの 2 方向加振時の解析を行うには、2 方向加振時の復元力特性を考慮した解析モデルを用いる必要がある。

楕円加振、真円加振においては、ねじれひずみの発生が確認され、画像解析による最大ねじれひずみは楕円加振時で約 80%、真円加振時で約 100%であった。また、加振終了後の試験体

においてもねじれひずみの残留が見られた。

13.4) 試験体の損傷状況

本実験においては、真円加振の 3 サイクル×3 回目の加振で上フランジ直下に内部剥離の兆候が見られ、その後の加振により内部剥離の拡大と被覆ゴムの破れが生じた。真円加振による局所的な引張せん断状態が損傷の要因と考えられる。ただし、本実験は試験体が 1 体のみであり、また試験体の冷却に十分な時間を確保できなかったことから、試験体に内部剥離の兆候が確認された真円加振時には、試験体は既に 300m 以上の累積変形を経験しており、加振開始時のゴム温度も 50℃以上と高温であった。従って、本実験における試験体の損傷は、高温状態で厳しい加振ケースを繰り返したことによる試験体の疲労の影響が大きいと推測される。長周期地震動を想定した免震の応答量は累積変形量で 20～30m とされており、本試験体は楕円加振等を含む厳しい加振ケースでその 10 倍の 300m まで損傷を生じなかった。また、内部剥離が生じた後も履歴ループは健全な形状を維持していた。

13.5) 今後の課題

本実験は、試験体 1 体で複数の加振ケースを実施し、また試験体の冷却時間も十分に確保できなかったことから、高温状態において、想定される長周期地震動を大きく超える変位履歴を与えるという、非常に厳しい実験条件となった。そのため、本実験による力学特性および損傷状況には過酷な加振による疲労の影響が多分に含まれていると考えられる。今後は、2 方向加振時の繰返しによる特性変動と限界性能、および疲労の蓄積による特性変動と限界性能を分離して評価できるよう、複数の試験体を用いた検討が必要である。

また、縮小試験体との比較によるスケール効果の確認においても、縮小試験体と実大試験体の実験条件が同一でないことから、比較には実験値に対して様々な補正が必要であった。スケール効果を厳密に確認するためには、縮小試験体と実大試験体でできる限り同条件での実験を実施する必要がある。

高減衰ゴム系積層ゴムの 2 方向加振時の復元力特性を評価するには、直交方向の加振の影響で変化する履歴ループを再現可能な復元力モデルが必要である。2 方向加振時の繰返し依存性を評価するためには、高減衰ゴム系積層ゴムの 2 方向加振時の荷重変形関係を表現可能な復元力モデルを用いて、繰返しによる特性変動を取り入れた解析を行う必要がある。

謝辞

本項「2.2.2 高減衰ゴム系積層ゴム」の執筆にあたりまして、実験データの分析・解析につきまして以下の方々にご助力頂きました。高減衰ゴム系積層ゴムの FEM による熱伝導解析は、株式会社ブリヂストンの森隆浩氏に実施して頂きました。画像解析によるねじれひずみの算出は、東京理科大学の柿沼貴博氏および下薗真志氏に実施して頂きました。変位履歴積分型の復元力モデルを用いた実験のシミュレーション解析は、株式会社ブリヂストンの加藤秀章氏に実施して頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

2.2.2-1) 山本祥江他：長周期地震動に対する免震部材の多数回繰返し実験 その 3：高減衰積層ゴム，日本建築学会学術講演梗概集, 659-660, 2011.08.

2.2.2-2) 株式会社ブリヂストン：高減衰ゴム系積層ゴム支承(X0.6R)技術資料

2.2.2-3) 山本祥江他：長周期地震動に対する免震部材のモデル化と免震建築物の応答評価 その 4：高減衰積層ゴムのモデル化と地震応答解析，日本建築学会学術講演梗概集，381-382, 2012.09.

2.2.2-4) 鈴木重信他：建物免震用の高減衰積層ゴムに関する研究：第 2 報，破断限界，日本機械学会論文集 C 編, Vol. 56, No. 523, pp.667-672, 1990.

2.2.2-5) 加藤秀章他：変形履歴積分型復元力モデルを用いた高減衰積層ゴム免震構造物の地震応答解析，日本建築学会構造工学論文集, Vol.58B, 231-240, 2012.03.

2.3 まとめと課題

2.3.1 まとめ

長周期地震動に対する免震建築物の安全性照査のクライテリア設定へ向けて、多数回繰り返し加力実験に基づく実大免震部材の特性評価を行うことを目的として、積層ゴム系実大支承（鉛プラグ入り積層ゴムおよび高減衰ゴム系積層ゴム）の動的・多数回繰返し加振実験を実施した。本実験で得られた知見は、以下の通りまとめられる。

（1）実験手法について

・先行してＥーディフェンスで実施した実大免震部材加力実験の方法（第Ⅳ部参照）を踏襲することを基本とし、実験条件の優先順位を長時間・大振幅動的繰返し加力、鉛直載荷、水平 2 方向加力、破断実験の順として、試験体や試験条件の先行実験との差異を考慮して実験計画を立案した。

・本実験では、積層ゴム試験体の高さを考慮して中立軸位置を従来の高さ（着座状態から 540mm）から変更（同 240mm）して運用した。新中立位置への変更運用にあたっては、事前に非積載状態における震動台の試加振により震動台が不安定状態になるなどの問題が発生しないことを確認した。

・試験体の破断に備えて、試験体の周囲（下部ブロック上面の外縁部）をポリカーボネード製の防護壁で遮る計画とした。

（2）実大部材実験

長周期地震動に対する積層ゴム系支承の力学特性および性能を把握するため、直径φ1000 の実大試験体を用いて各種加振実験を実施した。以下に、本実験より得られた知見を記す。

1）鉛プラグ入り積層ゴム

・多数回繰返しによる力学特性値の変化

各加振の前後に実施した基本特性試験より、加振による試験体温度の上昇とともに履歴ループが小さくなるが、温度低下に伴い、履歴ループも回復することが確認された。しかし、真円加振後に実施した基本特性試験の特性値は、他のケースに比べ低く、何らかの損傷が生じていた可能性が高い。

正弦波 1 方向加振では、繰返し回数が増すごとに降伏荷重 Qd が低下し履歴ループが小さくなっているものの、安定したループを描いていることが確認された。Qd は初期サイクルで大きく低下する傾向が見られたが、それ以降の低下は緩やかである。正弦波 1 方向多数回繰返し加振（せん断ひずみ 200%、35 回繰返し、累積変形約 55m）では、Qd は 55%まで低下した。２次剛性 Kd の変化は小さく、変化量は最大で－4%程度であった。

地震応答波 1 方向・2 方向加振の比較では、2 方向加振および温度上昇の影響により、主梁方向の履歴曲線が 1 方向加振よりも小さくなり、この現象は、受梁方向の振幅が大きいほど顕著であった。2 方向加振では、回数ごとに履歴曲線が小さくなり、6 回の繰り返しで Qd は初回の約 70%まで低下した。Qd の低下に反比例して温度が上昇しており、正弦波加振と同様に、試験体の温度と Qd の低下には負の相関があることが確認された。

正弦波 2 方向加振の楕円加振における主梁方向の荷重-変形関係は、受梁方向の振幅の影響により Qd は小さくなっているものの、安定した履歴曲線を描いていた。楕円加振では、正弦波 1 方向加振の約 2 倍となる 100m の累積変形を与えたところ、Qd は累積変形 50m 程度で 40%程度まで低下した。しかし、それ以降も Qd は大きく低下することはなかったことから、累積変形が大きくなる場合においても、Qd は際限なく低下することなく、ある一定のところに収束することが明らかとなった。

・２方向加振による影響

正弦波 2 方向加振の楕円加振の受梁方向加振、真円加振においては、主梁・受梁方向加振ともに履歴ループ面積の殆どない履歴曲線が得られた。さらに、荷重-変形関係はループが交差するケースも見られ、履歴吸収エネルギーや等価減衰定数がマイナスとなるサイクルもあった。3.4.1(7)3)章より、試験終了後に鉛プラグが 3 層に分断されていたことが確認され、真円加振あるいは楕円加振の過酷な加振によって分断が生じたものと推察されることから、鉛プラグがほぼ剛体のように回転する現象が生じて、減衰性の低下を招いた可能性が高いことを示唆している。

真円加振時に見られる減衰性能の顕著な低下は、過酷な加振によるものと考えられ、初期に実施された 2 方向地震応答波加振結果には見られない現象である。また、真円加振のように一定振幅が長く保たれる場合に生じるものと考えられ、実際の地震動では、本現象が長周期地震動による免震建物応答に及ぼす影響は大きくないと考えられる。

・多数回繰返しによる温度上昇

各加振における累積履歴吸収エネルギー $\Sigma \Delta W$ は $0.6 \sim 11 \times 10^6$(kN/mm)で、これを鉛の熱容量で除した値は 32.5～623.4℃である。実際の鉛プラグ部の温度上昇は、フランジ中央温度から推察すると、上記よりも低かったと考えられる。

正弦波 1 方向多数回繰返し加振では、鉛中央温度は加振開始と同時に急上昇し、加振が終了すると直ちに温度が低下し始めていた。これに対し、鉛上部やフランジ中央の温度上昇は緩やかで、加振終了後も温度が上昇し続けていた。これは、鉛中央で発生した熱が、徐々に鉛内部を通ってフランジに熱伝導されているためである。フランジ端部や被覆ゴム内部の温度はほとんど上昇しなかった。鉛中央の熱電対が加振中に抜け出したため、参考値ではあるが、鉛中央の温度は最大で 30℃から 137℃まで上昇した。

地震応答波 1 方向と 2 方向では、温度上昇に明確な差は現れなかった。2 方向加振開始時の試験体温度が高かったことや、受梁方向のせん断ひずみが 70%程度と小さく温度上昇に寄与しなかったことが原因と推察する。

真円加振では履歴面積の殆どない履歴曲線が得られており、同等の累積変形を与えたケースと比較して累積履歴吸収エネルギーがかなり小さい。それにも拘わらずフランジの温度は上昇している。この理由としては、真円加振では先述の鉛プラグの分断等の損傷が既に生じて鉛プラグにおける発熱分布や周囲への熱伝達性状が変化していたことが可能性として考えられる。

２）高減衰ゴム系積層ゴム

・多数回繰返しによる力学特性の変化

水平 1 方向繰返し加振、水平 2 方向繰返し加振とも、加振によるゴム温度の上昇とともに履歴ループが細くなった。1 方向繰返し加振時には、最大変位時の荷重の低下が顕著であるが、2 方向

加振時では最大変位時の荷重はあまり低下せず、荷重切片の低下が見られた。2 方向繰返し加振時の水平力の推移においては、弾性成分は全加振にわたりほぼ一定であったが、減衰成分は加振が進むにつれて減少する傾向が見られた。

また、各加振ケースの間に実施した、基本特性試験の履歴ループを比較すると、加振による温度上昇とともに最大荷重の低下とループ面積の減少が見られた。上昇した温度が低下することで、特性の回復が見られたが、加振 1 日目と加振 2 日目の基本特性を比較すると等価減衰定数が 2 日目の方が平均的に小さく、繰返しによる疲労の影響と考えられる。

・多数回繰返しによる温度上昇

地震応答波の 1 方向入力によるゴム温度(試験体ゴム部中心温度)の上昇は、NS 入力時で 1.3℃、EW 入力時で 2.7℃、2 方向同時入力時で 3.6℃であった。また、地震応答波 2 方向の 4 回連続入力によるゴム温度の上昇は 13℃であり、最高ゴム温度は 37℃であった。水平 1 方向繰返し加振によるゴム温度の上昇は、インターバルをはさまない 5 サイクル加振で 5℃程度であり、5 サイクル×12 回の加振により、ゴム温度は 59℃まで上昇した。楕円加振によるゴム温度の上昇は、インターバルをはさまない 5 サイクル加振で 10℃弱であり、5 サイクル×12 回の加振でゴム温度は 74℃まで上昇した。真円加振によるゴム温度の上昇は、インターバルをはさまない 3 サイクル加振で 10℃強であり、3 サイクル×7 回の加振でゴム温度は 86℃まで上昇した。

1 方向、2 方向入力とも正弦波の繰返し加振は、大振幅によるエネルギーが連続的に入力され続けるため、試験体の温度上昇が大きい。一方、地震応答波は大振幅によるエネルギーの入力は数回、断続的に生じるため試験体の温度上昇は、正弦波に比べると小さい。

・2 方向加振による影響

楕円加振、真円加振においては、直交方向の加振の影響から、1 方向加振時と比較して履歴ループ形状の顕著な変化が見られた。一方、地震応答波加振においては、1 方向入力時と 2 方向同時入力時の履歴ループ形状の違いはわずかであり、2 方向加振の影響は非常に小さかった。また、楕円加振、真円加振時に見られるループ形状の変化は、MSS モデルでは表現することができない。高減衰ゴム系積層ゴムの 2 方向加振時の解析を行うには、2 方向加振時の復元力特性を考慮した解析モデルを用いる必要がある。

楕円加振、真円加振においては、ねじれひずみの発生が確認され、画像解析による最大ねじれひずみは楕円加振時で約 80%、真円加振時で約 100%であった。また、加振終了後の試験体においてもねじれひずみの残留が見られた。

・ 試験体の損傷状況

本実験においては、真円加振の 3 サイクル×3 回目の加振で上フランジ直下に内部剥離の兆候が見られ、その後の加振により内部剥離の拡大と被覆ゴムの破れが生じた。真円加振による局所的な引張せん断状態が損傷の要因と考えられる。ただし、本実験は試験体が 1 体のみであり、また試験体の冷却に十分な時間を確保できなかったことから、試験体に内部剥離の兆候が確認された真円加振時には、試験体は既に 300m 以上の累積変形を経験しており、加振開始時のゴム温度も 50℃以上と高温であった。従って、本実験における試験体の損傷は、高温状態で厳しい加振ケースを繰り返したことによる試験体の疲労の影響が大きいと推測される。長周期地震動を想定した免震の応答量は累積変形量で 20～30m とされており、本試験体は楕円加振等を含む厳しい加振ケースでその 10 倍の 300m まで損傷を生じなかった。また、内部剥離が生じた後も履歴ループは

健全な形状を維持していた。

2.3.2 課題

以下に、本実験より得られた実大部材実験に関する課題を記す。

1）鉛プラグ入り積層ゴム

本実験では、試験体が 1 体であったことや、時間の制約があり試験体の冷却時間が十分に取れなかったことから、想定される長周期地震動をはるかに超える過大な変位履歴を与えることとなった。それにより、円加振では既往研究では見られない現象が生じており、この現象の解明が今後必要である。

実験結果のシミュレーション解析結果では 1 方向加振結果（正弦波加振、地震応答波加振）や 2 方向加振結果のうち地震応答波加振については積層ゴムの内部温度や荷重変形関係、降伏荷重の変化について実験結果と解析結果とでよく一致した。2 方向加振結果のうち楕円加振、真円加振については実験結果と解析結果とで乖離が見られた。実験時に見られた荷重変形関係の履歴面積が小さくなる現象のシミュレーション解析やその特性変化が地震応答に与える影響評価については今後の課題である。

2）高減衰ゴム系積層ゴム

本実験は、試験体 1 体で複数の加振ケースを実施し、また試験体の冷却時間も十分に確保できなかったことから、高温状態において、想定される長周期地震動を大きく超える変位履歴を与えるという、非常に厳しい実験条件となった。そのため、本実験による力学特性および損傷状況には過酷な加振による疲労の影響が多分に含まれていると考えられる。今後は、2 方向加振時の繰返しによる特性変動と限界性能、および疲労の蓄積による特性変動と限界性能を分離して評価できるよう、複数の試験体を用いた検討が必要である。

また、縮小試験体との比較によるスケール効果の確認においても、縮小試験体と実大試験体の実験条件が同一でないことから、比較には実験値に対して様々な補正が必要であった。スケール効果を厳密に確認するためには、縮小試験体と実大試験体でできる限り同条件での実験を実施する必要がある。

高減衰ゴム系積層ゴムの 2 方向加振時の復元力特性を評価するには、直交方向の加振の影響で変化する履歴ループを再現可能な復元力モデルが必要である。2 方向加振時の繰返し依存性を評価するためには、高減衰ゴム系積層ゴムの 2 方向加振時の荷重変形関係を表現可能な復元力モデルを用いて、繰返しによる特性変動を取り入れた解析を行う必要がある。

第VI部

繰り返し依存性を簡易的に取り込むための手法の検討

第１章　免震部材特性のモデル化と簡易応答評価手法の検討

1.1　目的

長周期地震動に対する免震建築物の安全性照査のクライテリア設定に向けて、多数回繰り返し時の免震部材の特性評価とモデル化、免震部材の特性を考慮した応答解析に基づく応答評価を実施し、繰り返し依存性を簡易的に取り込むための手法を検討する。

1.2　全体方針

(1) 方針

第Ⅲ部第2章および第3章に示した繰り返し依存性を考慮できる解析プログラムを用い、長周期地震動に対する１質点モデルの応答解析を実施し、繰り返し依存性をどのようにしたら簡易的に評価できるかを応答変形、応答せん断力、入力エネルギー、部材の吸収エネルギー、累積変形、温度上昇などの面から検討する。

検討ケースは以下の通りとする。

① 鉛プラグ入り積層ゴム
② 高減衰ゴム系積層ゴム
③ 天然ゴム系積層ゴム＋鉛ダンパー
④ 天然ゴム系積層ゴム＋弾性すべり支承（高摩擦）
⑤ 天然ゴム系積層ゴム＋弾性すべり支承（低摩擦）＋粘性ダンパー

各支承、ダンパーで何を基準にすれば繰り返し依存性の傾向を表せるのかを分析し、通常使われている設計モデルのパラメータをどのように変更すれば簡易的に評価できるのかを検討する。なお、③、④、⑤については天然ゴム系積層ゴムの繰り返し依存性はないものとして扱い、ダンパーとすべり支承について検討を行う。

検討用長周期地震動は第Ⅲ部 3.1 に示す三連動地震の入力倍率を 1.0 倍、1.25 倍、1.5 倍としたものと、新たに作成された四連動地震の入力倍率を 1.0 倍としたものを用いる。

(2) 解析モデル

解析モデルは上部構造を剛体モデルとした１質点モデルとし、免震層の設定は積層ゴムによる免震周期 4.0 秒程度、ダンパーの負担せん断力係数 3.0～4.0%を標準とし、免震支承毎に設定を行なう。

(3) 入力地震動

検討用入力地震動は、第Ⅲ部 3.1 に示す東海･東南海･南海地震が連続して発生すると想定して作成した三連動地震、新たに作成された M9.0 を想定した四連動地震のそれぞれの 4 地点の地震動の平均波を用いる。

OSKH02　（大阪・此花　平均）
AIC003　（愛知・津島　平均）
SZO024　（静岡・浜松　平均）
KGIN　（東京・新宿　平均）

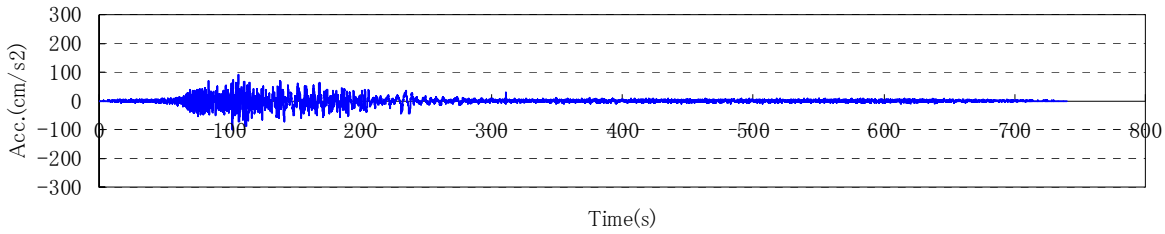
入力地震動の諸元を表 1.2-1 に、加速度時刻歴波形、速度時刻歴波形、変位時刻歴波形を図 1.2-1～3、擬似速度応答スペクトルを図 1.2-4、エネルギースペクトルを図 1.2-5 に示す。

表 1.2-1(a)　入力地震動諸元（三連動地震）（各最大値と継続時間）

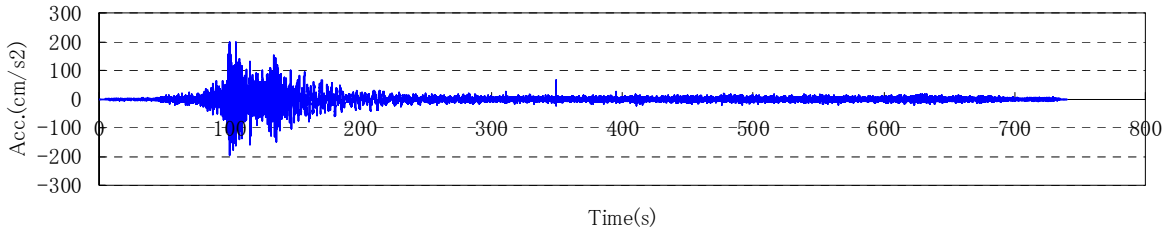
地震波名	三連動地震			
	OSKH02 （此花）	AIC003 （津島）	SZO024 （浜松）	KGIN （新宿）
加速度 (cm/s^2)	98.49	199.4	576.9	42.11
速度 (cm/s)	38.07	26.78	40.08	21.60
変位 (cm)	31.43	21.62	21.13	26.29
継続時間 (s)	739.82	739.82	739.82	739.82

表 1.2-1(b)　入力地震動諸元（四連動地震）（各最大値と継続時間）

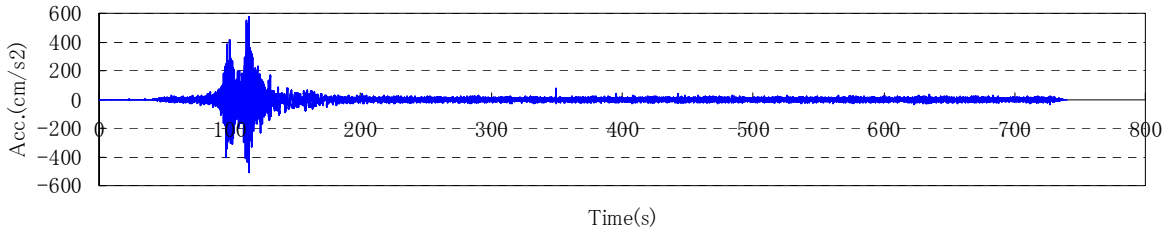
地震波名	四連動地震			
	OSKH02 （此花）	AIC003 （津島）	SZO024 （浜松）	KGIN （新宿）
加速度 (cm/s^2)	133.0	545.4	640.3	55.51
速度 (cm/s)	46.51	67.71	42.57	31.70
変位 (cm)	38.51	43.65	26.99	38.24
継続時間 (s)	655.36	655.36	655.36	655.36



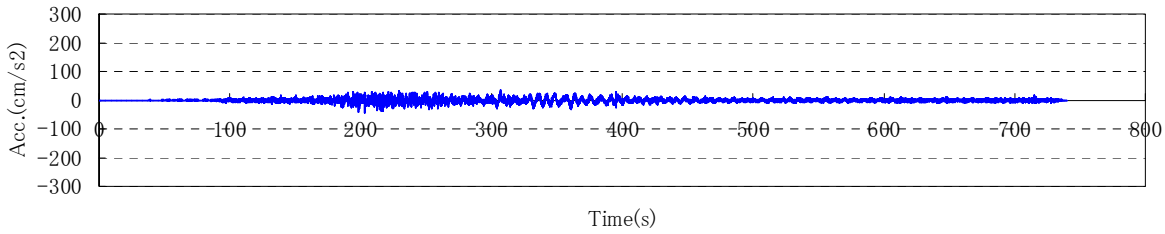
(a) OSKH02



(b) AIC003

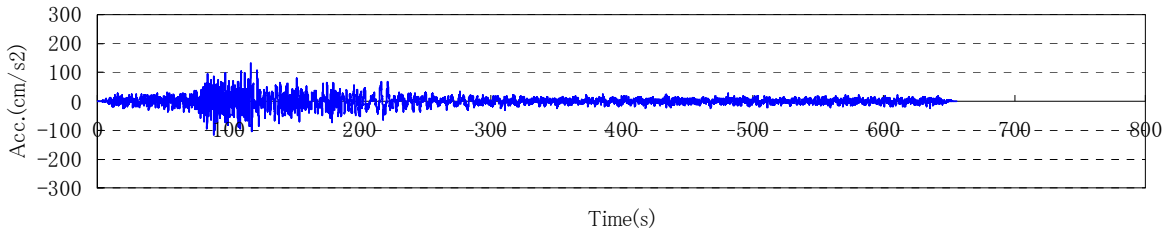


(c) SZO024

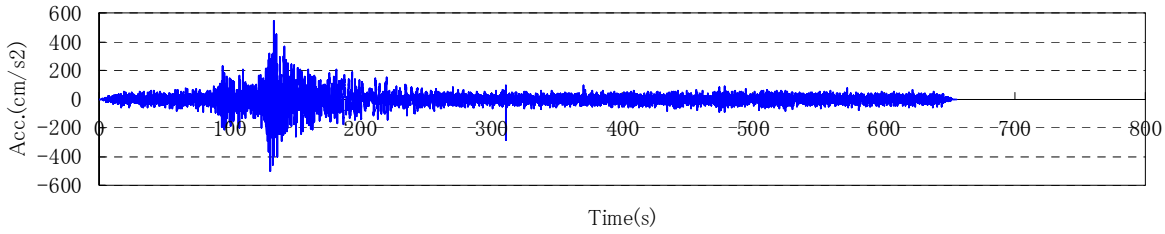


(d) KGIN

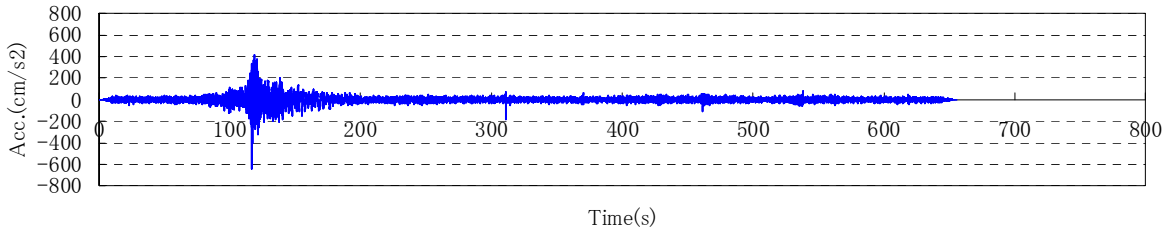
図 1.2-1(a)　入力地震動加速度時刻歴波形（三連動地震）



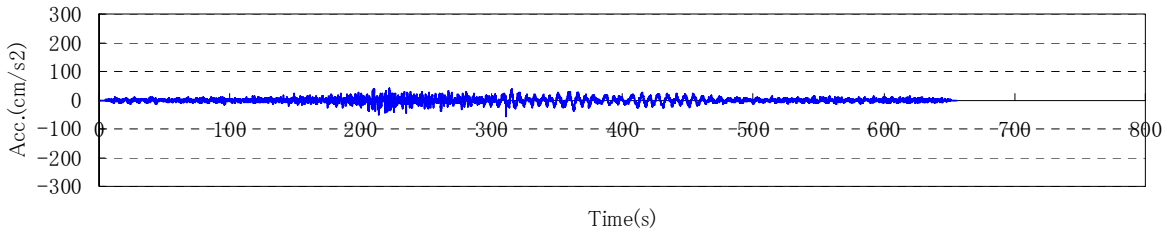
(a) OSKH02



(b) AIC003

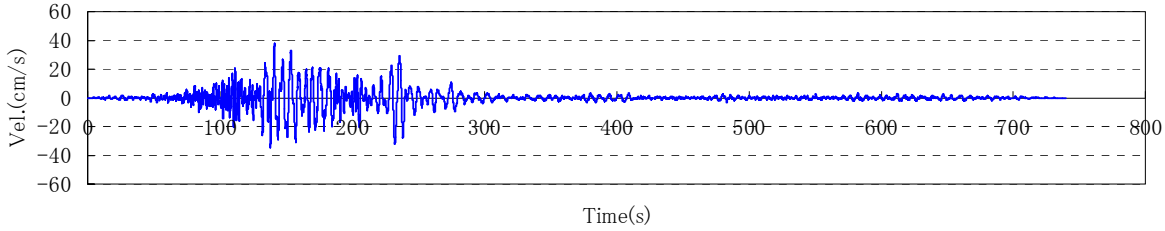


(c) SZO024

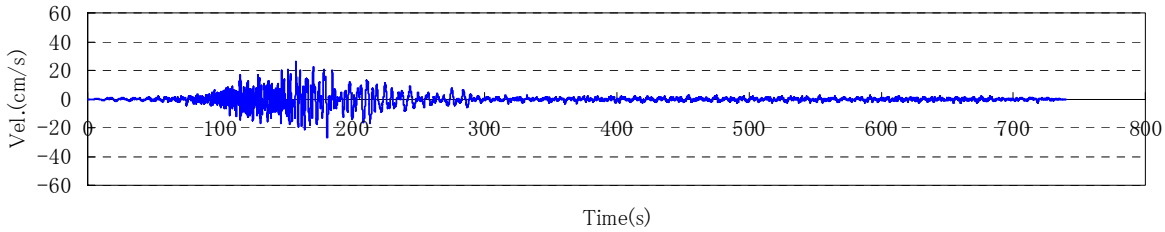


(d) KGIN

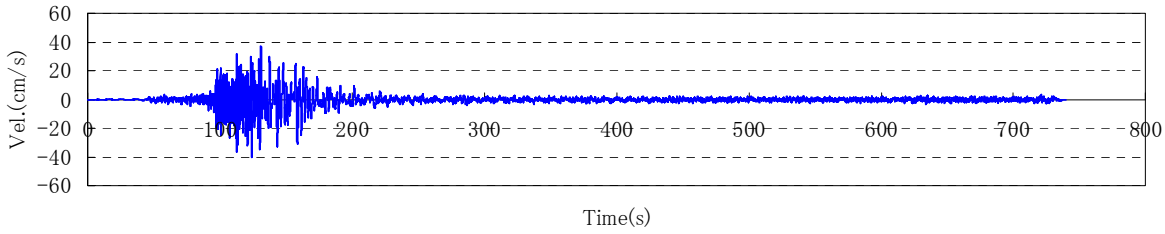
図 1.2-1(b)　入力地震動加速度時刻歴波形（四連動地震）



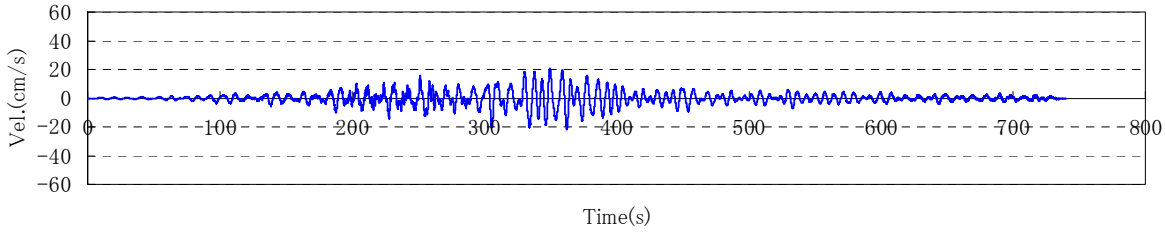
(a) OSKH02



(b) AIC003

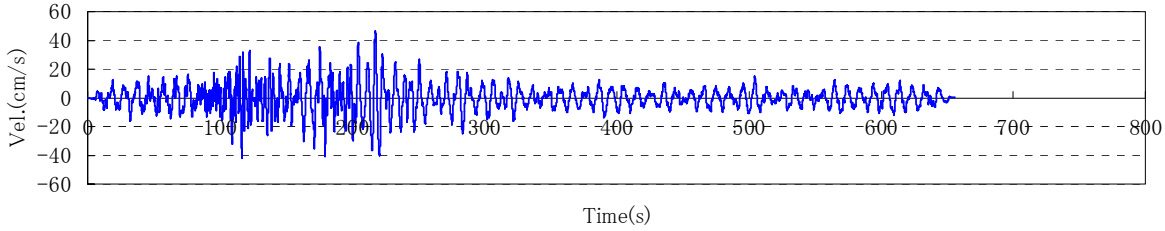


(c) SZO024

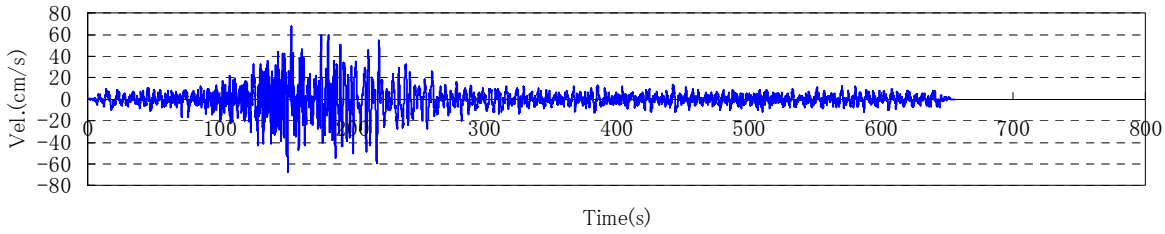


(d) KGIN

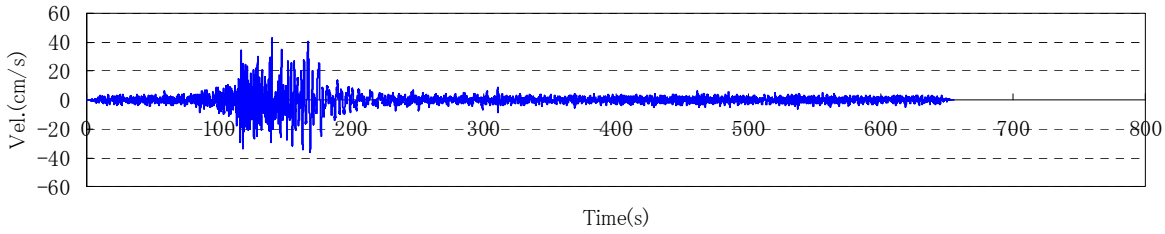
図 1.2-2(a)　入力地震動速度時刻歴波形（三連動地震）



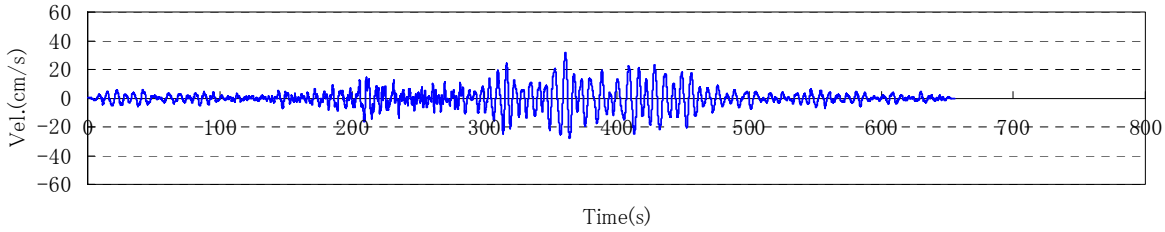
(a) OSKH02



(b) AIC003

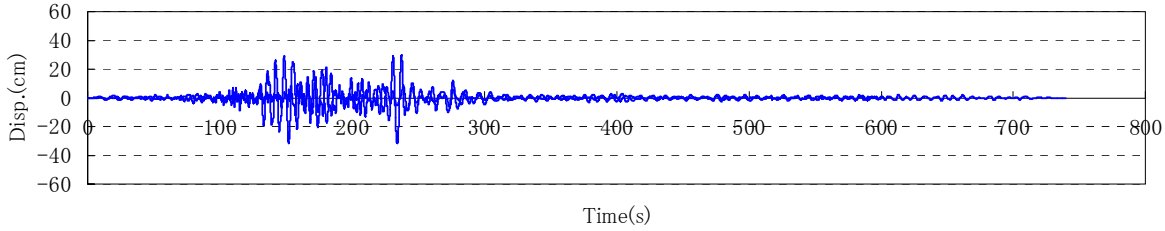


(c) SZO024

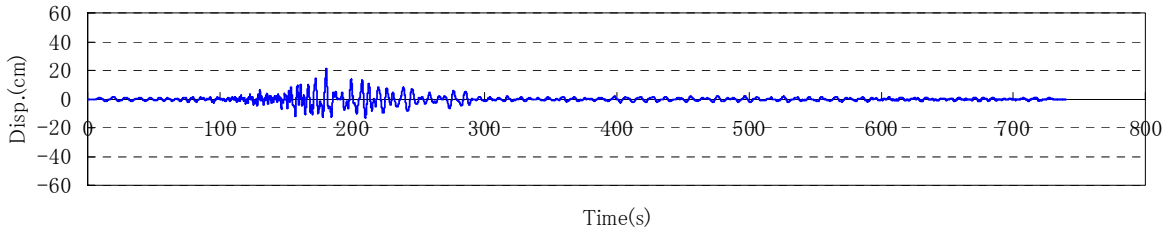


(d) KGIN

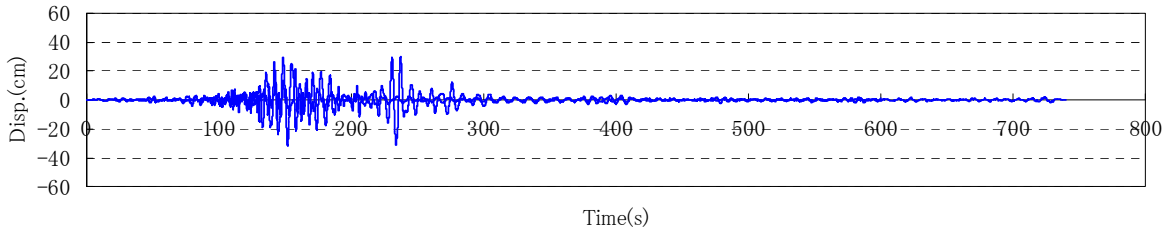
図 1.2-2(b)　入力地震動速度時刻歴波形（四連動地震）



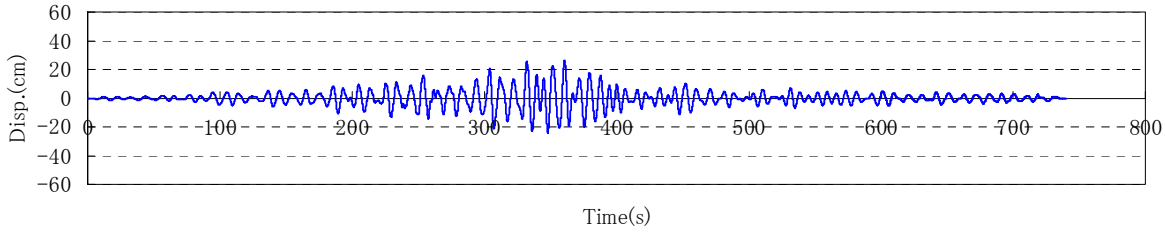
(a) OSKH02



(b) AIC003

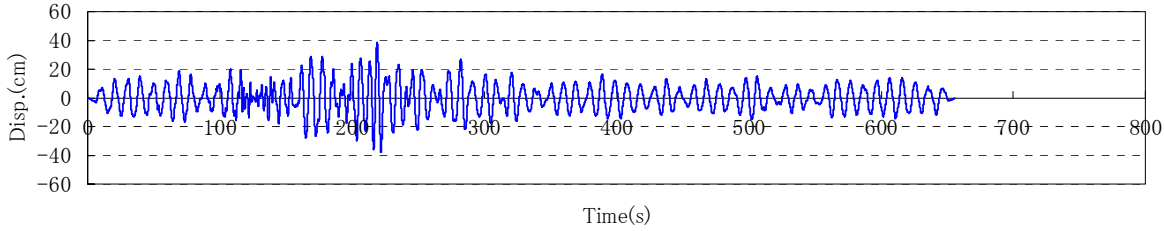


(c) SZO024

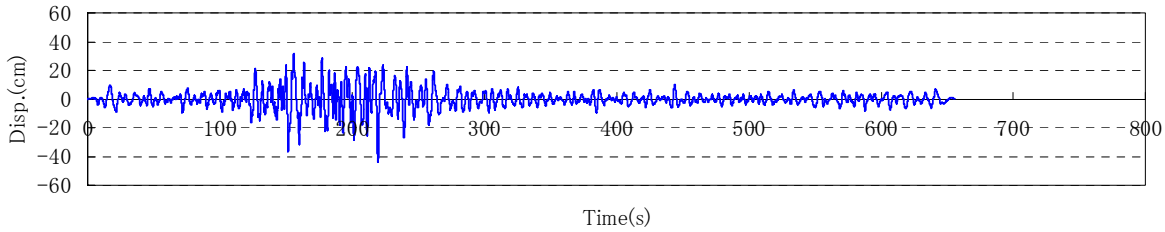


(d) KGIN

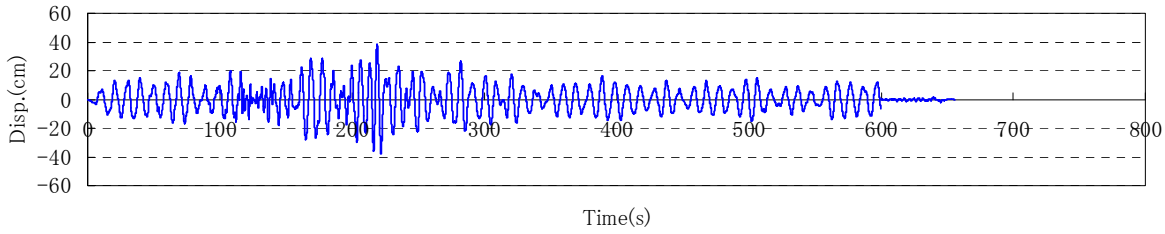
図 1. 2-3(a)　入力地震動変位時刻歴波形（三連動地震）



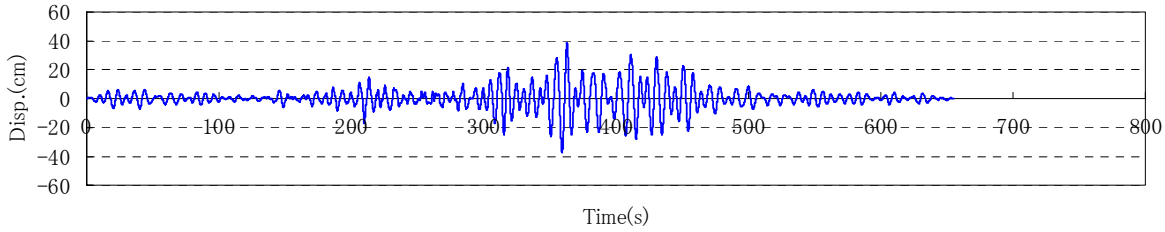
(a) OSKH02



(b) AIC003



(c) SZO024



(d) KGIN

図 1. 2-3(b)　入力地震動変位時刻歴波形（四連動地震）

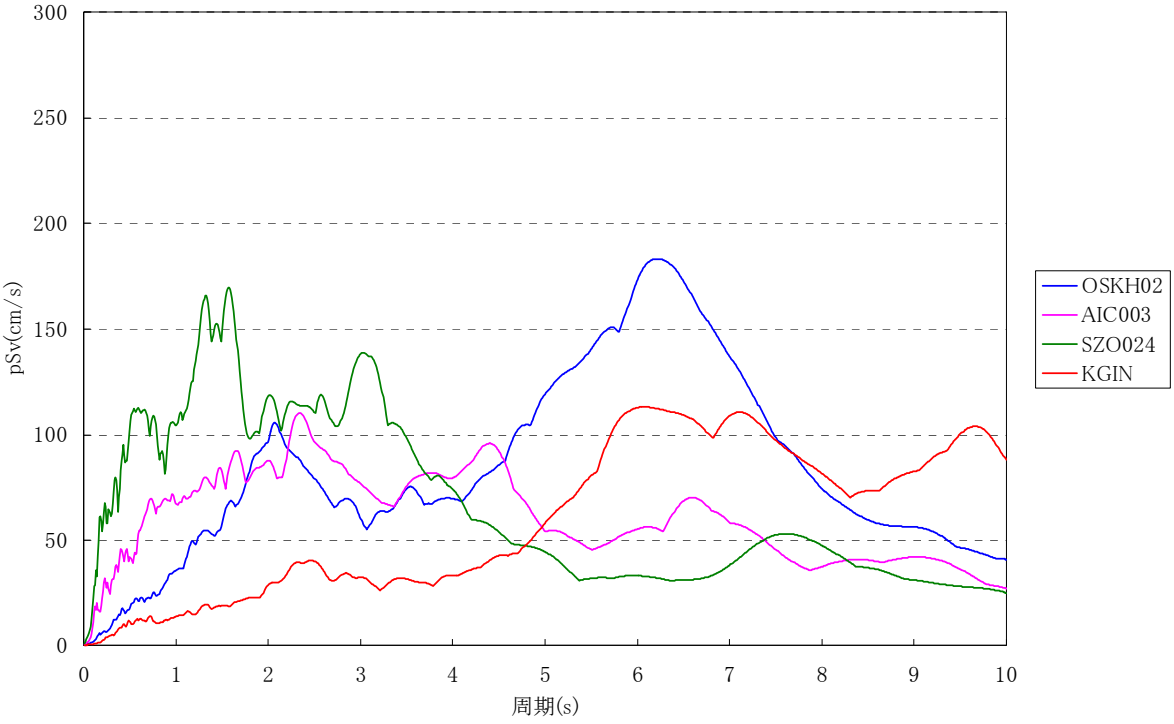


図 1. 2-4(a)　入力地震波擬似速度応答スペクトル(h=0.05)（三連動地震）

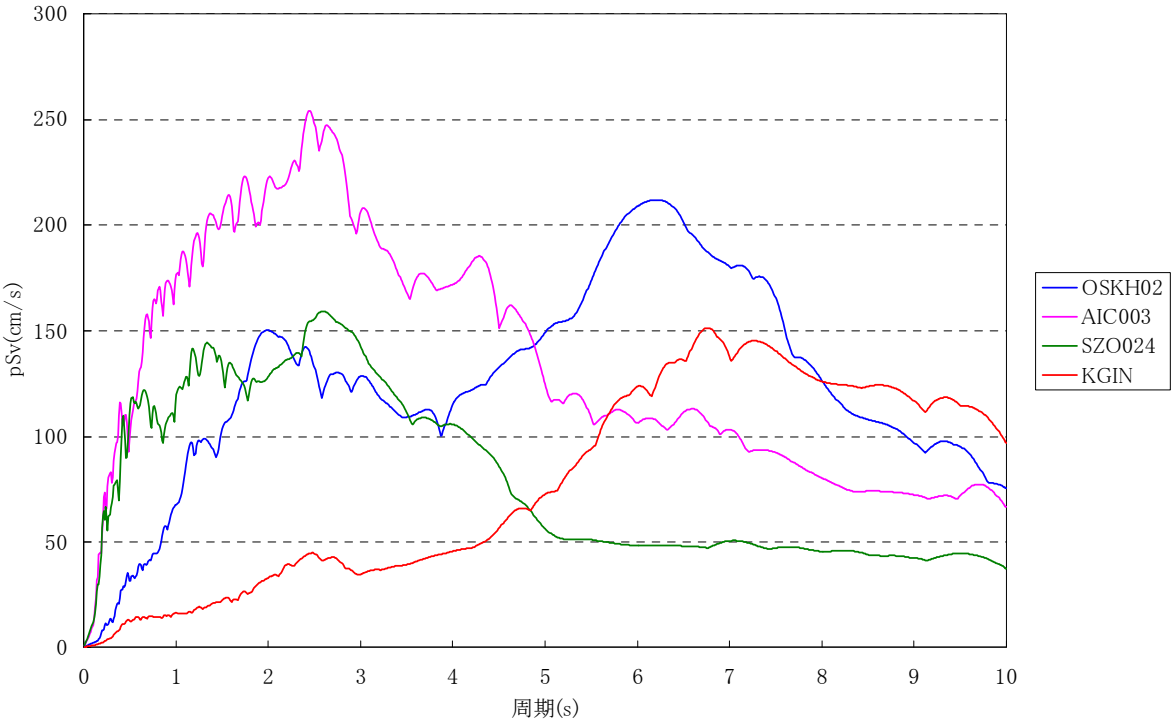


図 1. 2-4(b)　入力地震波擬似速度応答スペクトル(h=0.05)（四連動地震）

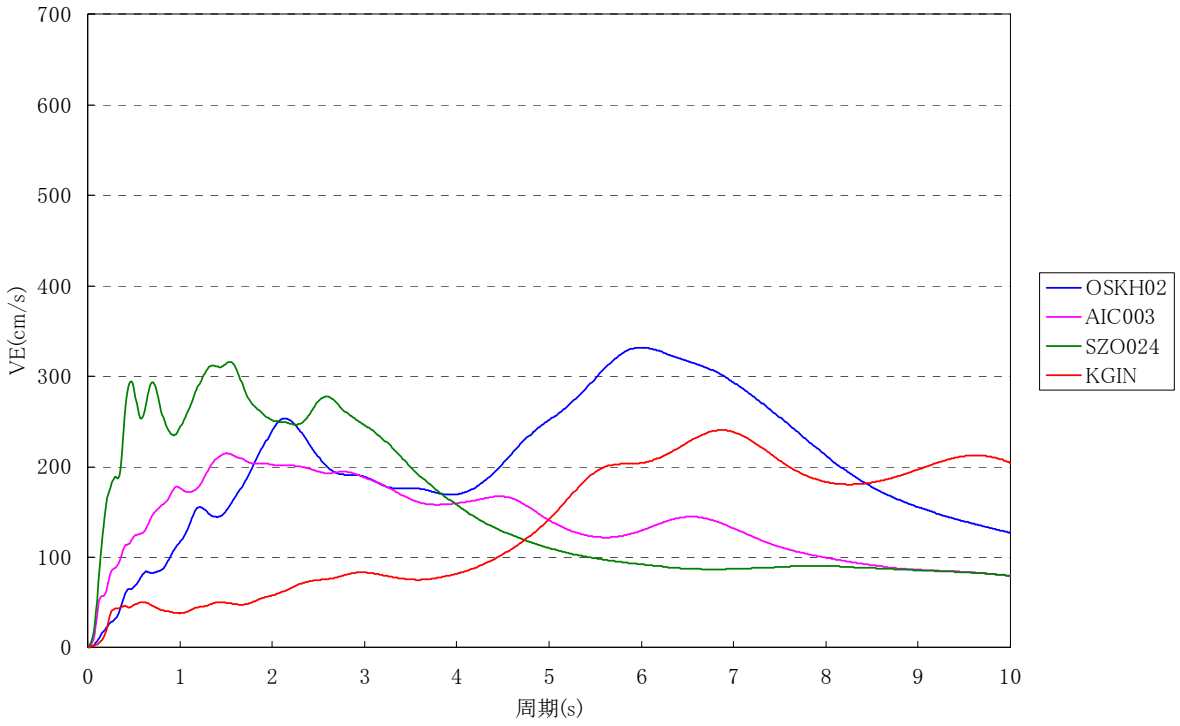


図 1. 2-5(a)　入力地震波エネルギースペクトル(h=0.10)（三連動地震）

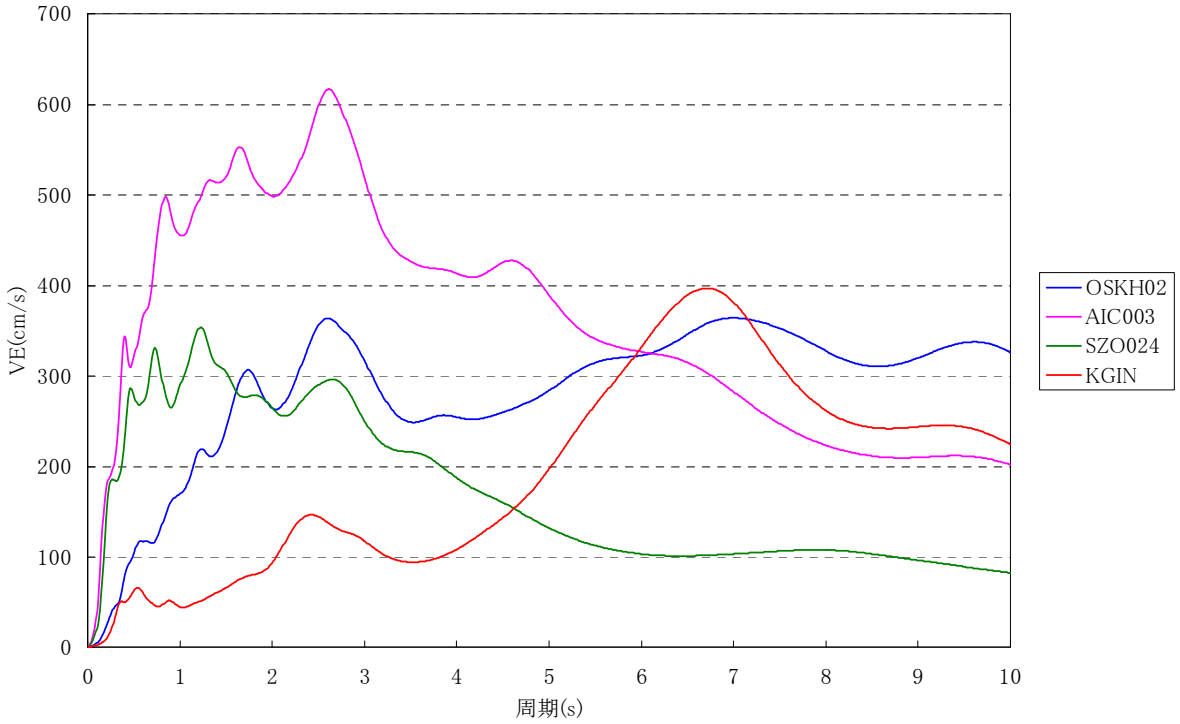


図 1. 2-5(b)　入力地震波エネルギースペクトル(h=0.10)（四連動地震）

1.3　解析結果

1.3.1　鉛プラグ入り積層ゴム

鉛プラグ入り積層ゴムを対象として、繰り返し変形による（鉛プラグの温度上昇による）特性変動を考慮した場合応答評価について、簡易応答評価法による評価結果と詳細応答評価法としての地震応答解析結果との結果を比較し､簡易応答評価法の精度についての検討を実施する。

地震応答解析は免震層の特性を考慮した１質点系モデルにより実施し、繰り返し変形による特性変化（鉛プラグの温度上昇による影響）を考慮した場合の応答評価においては以下に示す手法１、手法２、手法３および手法３’についての検討を実施する。それぞれの手法は熱伝導解析と地震応答解析とを並行して行う手法（手法１：詳細地震応答解析手法）、エネルギーの釣合を基にした包絡解析法による簡易応答評価法について検討を実施する手法（手法２：簡易応答評価法１）、鉛プラグ入り積層ゴムについて、履歴吸収エネルギーより降伏荷重をあらかじめ低下させた場合の応答評価法手法（手法３および３’：簡易応答評価法２）である。

なお、地震応答解析に用いる入力地震動は 1.2 に示される地震動とした。

(1) 建物モデル、免震層特性の設定

免震層の特性を表 1.3.1-1 に示す｡基本ケースを鉛プラグ入り積層ゴム φ1000､ゴム総厚 20cm とし、積層ゴム面圧を 3 ケース設定した。鉛プラグ入り積層ゴムについては形状（径、鉛径など）をパラメータとしている。

なお、解析結果をまとめる際には免震層の水平変形が 80cm（γ=400%）を超えたものは除外した。

表 1.3.1-1　解析ケース

面圧 (N/mm^2)	免震周期[*1] Tf(sec)	αs	積層ゴム径 (mm)	1000			750	1500
			鉛径 (mm)	(1) 200	(2) 250	(3) 150	150	300
7.5	3.9	0.046	解析ケース	○	○	○	○	○
10.0	4.5	0.035		○	○	○	○	○
15.0	5.6	0.023		○	○	○	○	○

*1:免震周期 Tf はφ1000、鉛径標準径の値

解析においては鉛プラグ入り積層ゴムは修正バイリニアモデルによる履歴を考慮し、免震層の履歴減衰のみ考慮した。また、温度上昇を考慮する場合の初期温度は 15℃とした。

(2) 応答評価手法

以下に各評価手法について述べる。

（評価手法１）鉛プラグの温度上昇による特性変化を熱伝導解析と地震応答解析を並行して時刻歴解析を行う手法（詳細応答評価法）

本手法は鉛プラグ入り積層ゴムの熱伝導方程式と免震建物運動方程式を並行して解く、時刻歴応答解析法による手法である。(参考文献 1.3.1-1)。鉛プラグ入り積層ゴムにおける熱伝導解析差分法モデルは、前進差分法による鉛入り積層ゴムを要素分割した差分法モデルとする (図 1.3.1-1 参照)。地震エネルギーの吸収量はすべて鉛プラグ部での発熱となると仮定し、モデル化範囲には取り付け部も含めることによって、鉛プラグから積層ゴム部、フランジ、上下基礎への熱エネルギーの拡散を考慮する。また、鉛プラグの温度-降伏荷重関係は、下記の提案式(1.3.1-1)に基づくものとする。(図 1.3.1-2)。本式は、鉛プラグが約 200℃まで温度上昇した実験ケースを含む鉛プラグ入り積層ゴム加振実験結果の分析により得られた実験式である（参考文献 1.3.1-1)。

$$\tau = \tau_o\left\{1-(T/T_L)^{\alpha_T}\right\},\quad \alpha_T = 0.4+0.25\cdot(T/T_L)$$
$$\tau_o = 15.0(N/mm^2),\quad T_L = 327.5(℃) \qquad (1.3.1\text{-}1)$$

ここに、τ ：鉛降伏応力、τ_0：0℃における鉛降伏応力

T: 鉛プラグ平均温度、T_L：鉛融点

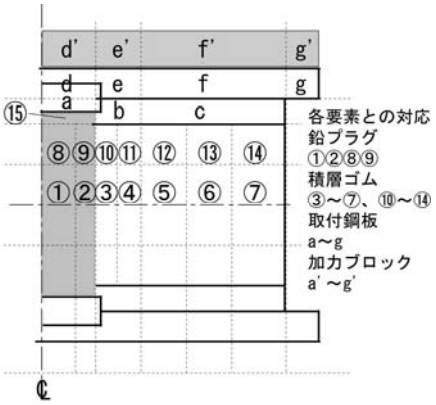


図1.3.1-1　鉛プラグ入り積層ゴムの熱伝導差分法モデルの例

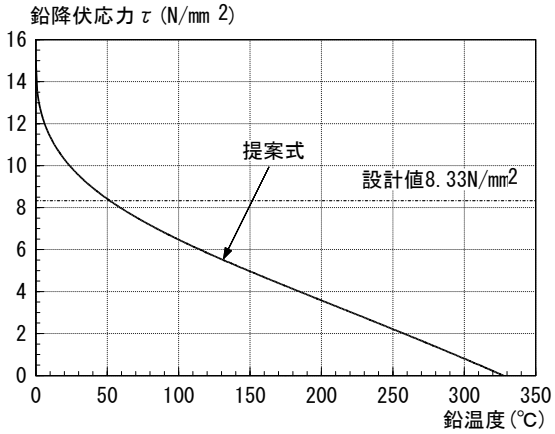


図1.3.1-2　鉛プラグ温度-降伏応力関係

本手法の時刻歴地震応答解析法は、免震建物の運動方程式と鉛プラグ入り積層ゴム熱伝導方程式を並行して時々刻々解く方法によるものである。地震応答解析フローを図 1.3.1-3 に示す。

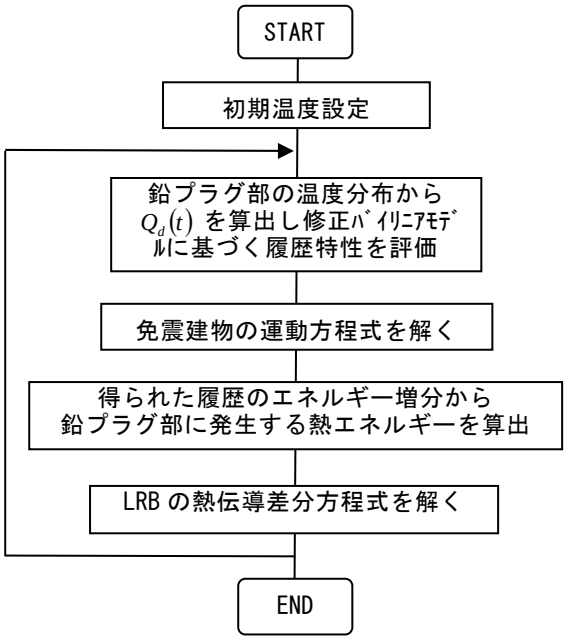


図1.3.1-3　地震応答解析フロー

（評価手法２）エネルギー釣合を基にした包絡解析法による応答予測評価法

（簡易応答評価法１）

温度上昇による鉛プラグ入り積層ゴムの特性変化による影響を考慮した地震応答評価法の一つとして、免震建築物のエネルギーの釣り合いに着目した手法を適用する。本評価法は鉛プラグ入り積層ゴムの温度上昇に伴う降伏荷重の低下を考慮しない従来の解析結果の履歴吸収エネルギーを用いて、温度上昇の影響を考慮した場合の降伏荷重の低下を推定し、さらにエネルギーの釣り合いに基づく応答評価法を適用して、従来の解析結果から温度上昇を考慮した応答値を予測する方法である。

①降伏荷重低下の評価

免震層要素が鉛プラグ入り積層ゴムのみで構成されている場合を想定して、鉛プラグ入り積層ゴムの降伏荷重 Q_d の低下率 ${}_{LRB}k_{\min}$ を下式のように定義する。

$$ {}_{LRB}k_{\min} = \frac{{}_{LRB}Q_d\left(\text{最小値}\right)}{{}_{LRB}Q_d\left(\text{設計値}\right)} \qquad (1.3.1\text{-}2) $$

${}_{LRB}k_{\min}$ は、温度上昇による特性変化を考慮しない解析によって得られた鉛プラグ入り積層ゴムの全履歴吸収エネルギー ${}_{LRB}W_p$ を鉛プラグ体積 V_p で除した ${}_{LRB}W_p/V_p$ を用いて下式のように予測する。

$$ {}_{LRB}k_{\min} = -0.06 + 1.25 \times \exp\left(-\frac{{}_{LRB}W_p}{V_p} \times \frac{1}{360}\right) \qquad (1.3.1\text{-}3) $$

本式は、図 1.3.1-4 に示すように手法１による多くの地震応答解析結果から設定されたものである。（参考文献 1.3.1-2）

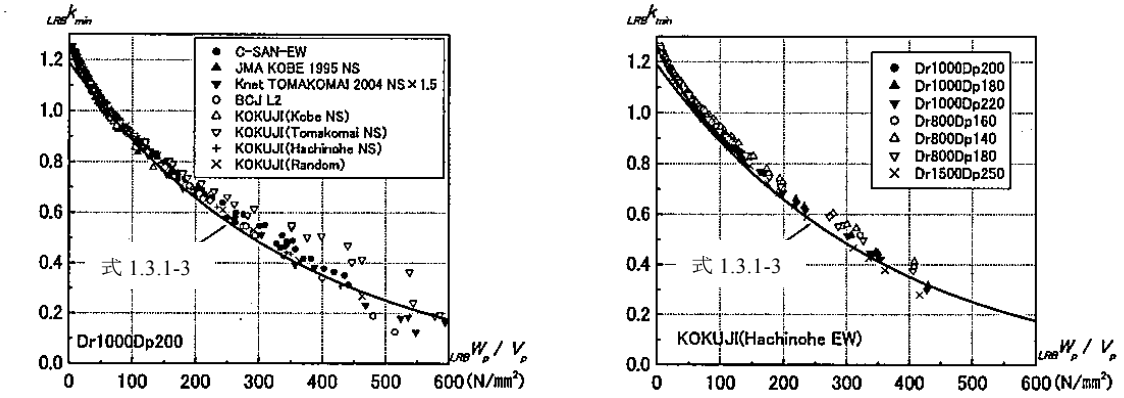


図 1.3.1-4　${}_{LRB}k_{\min}$ と ${}_{LRB}W_p$ の関係 [1.3.1-2)]

②免震層最大応答の評価

免震層最大応答の評価においては鉛プラグ入り積層ゴムの温度上昇を考慮した場合の入力エネルギーと考慮しない場合の入力エネルギーを同量と仮定してエネルギーの釣り合いによる応答評価法を適用して、温度上昇を考慮した場合の免震層最大変形 $\delta'_{\max}$ 及び応答層せん断力 $Q'_{\max}$ を温度上昇による特性変化を考慮しない時刻歴応答解析から得られた免震層最大変形 $\delta_{\max}$ および先の降伏荷重 Q_d の低下率 ${}_{LRB}k_{\min}$ と LRB の全履歴吸収エネルギー ${}_{LRB}W_p$、及び免震層積層ゴムによる剛性 k_f から、次式により予測する（参考文献 1.3.1-2)。

$$\delta'_{\max} = \frac{1}{k_f}\left\{-\frac{\left(1+{}_{LRB}k_{\min}\right){}_{LRB}W_p}{2\delta_{\max}} + \sqrt{\left(\frac{\left(1+{}_{LRB}k_{\min}\right){}_{LRB}W_p}{2\delta_{\max}}\right)^2 + k_f^2\cdot\delta_{\max}^2 + 2k_f\cdot{}_{LRB}W_p}\right\} \quad (1.3.1\text{-}4)$$

$$Q'_{\max} = {}_sQ_y - \frac{\left(1+{}_{LRB}k_{\min}\right){}_{LRB}W_p}{2\delta_{\max}} + \sqrt{\left(\frac{\left(1+{}_{LRB}k_{\min}\right){}_{LRB}W_p}{2\delta_{\max}}\right)^2 + k_f^2\cdot\delta_{\max}^2 + 2k_f\cdot{}_{LRB}W_p} \quad (1.3.1\text{-}5)$$

（評価手法３及び３’）降伏荷重 Q_d をあらかじめ低減させた一定値により地震応答解析を行う応答評価法（簡易応答評価法２）

鉛プラグ入り積層ゴムの温度上昇による影響は主に降伏荷重特性値 Q_d の低下として現れることから、温度上昇を考慮しない通常の地震応答解析結果から上記（評価手法２）の応答予測評価法の式（1.3.1-3）により降伏荷重 Q_d の低下率 ${}_{LRB}k_{\min}$ を評価し、これによりあらかじめ低下させた降伏荷重を、従来の設計降伏荷重の代わりに一定値として考慮した地震応答解析を実施し、温度上昇の影響を評価する手法とする。なお、降伏荷重 Q_d 低下率を求める際の鉛プラグ入り積層ゴムの履歴吸収エネルギー ${}_{LRB}W_p$ としては、手法３では通常の設計値としての Q_d を設定して、温度上昇による特性変化を考慮しない地震応答解析により評価した場合の地震終了時のエネルギーとし、手法３’では免震層の水平変形が最大となった時刻における鉛プラグ入り積層ゴムの履歴吸収エネルギーを用いる。

図 1.3.1-5 に簡易応答評価法の評価フロー図を示す。

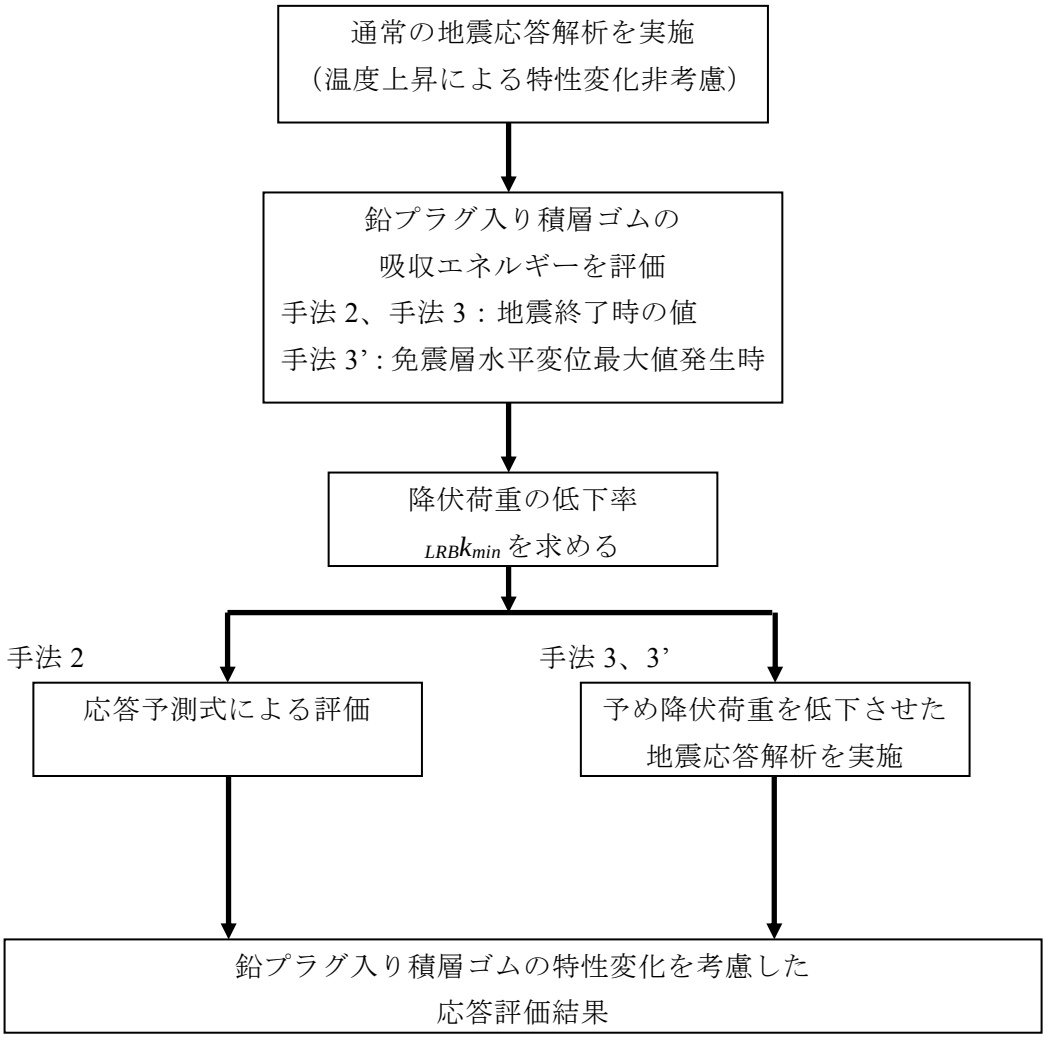


図 1.3.1-5　簡易応答評価法の評価フロー

(2)　応答評価結果

(a) 手法 1 による応答評価結果

図 1.3.1-6 に手法 1 を用いて鉛プラグの温度上昇による特性変化を考慮した場合と考慮しない場合の免震層応答水平変形を比較して示す。免震層の水平変形が 20cm（γ=100%）程度以上となると、温度上昇による特性変化を考慮した場合の変位が考慮しない場合と比較して増大してくることが分かる。

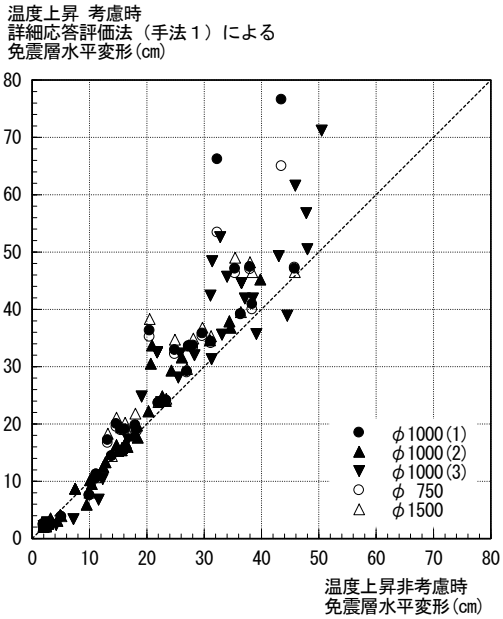


図 1.3.1-6　温度上昇非考慮時と考慮時の水平変形の比較

図 1.3.1-7 に鉛プラグの温度上昇による特性変化非考慮時の水平変形と考慮時の水平変形増大率を示す。水平変形の増大率は概ね 1.0～1.5 倍程度となっている。

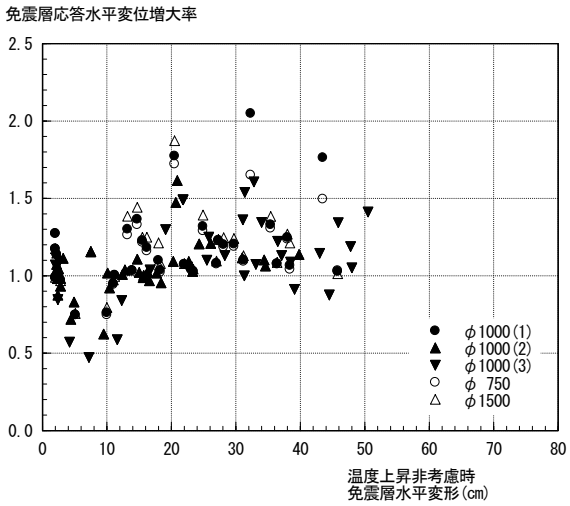


図 1.3.1-7　温度上昇非考慮時の水平変形と考慮時の水平変形増大率

図 1.3.1-8 に手法１を用いて鉛プラグの温度上昇による特性変化を考慮した場合と考慮しない場合の免震層の応答層せん断力係数を比較して示す。免震層の応答層せん断力係数については免震層の応答水平変形と比較して、温度上昇を考慮した場合の増大は少なくなっている。

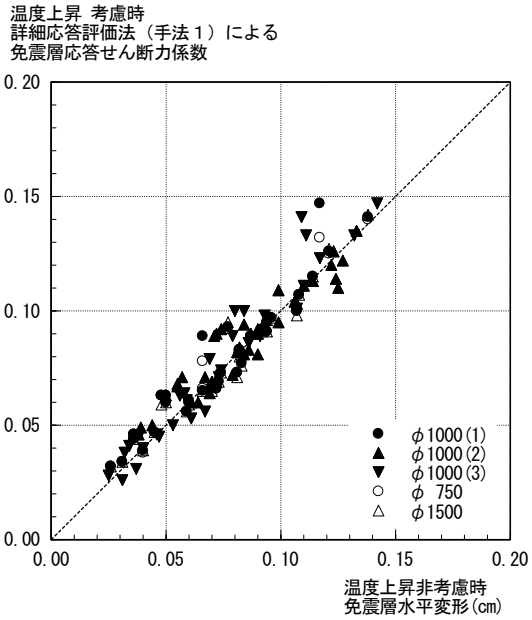


図 1.3.1-8　温度上昇非考慮時と考慮時の免震層応答層せん断力係数の比較

図 1.3.1-9 に鉛プラグの温度上昇による特性変化非考慮時の免震層応答層せん断力係数の増大率を示す。免震層応答層せん断力係数の増大率は概ね 1.0～1.25 倍程度である。

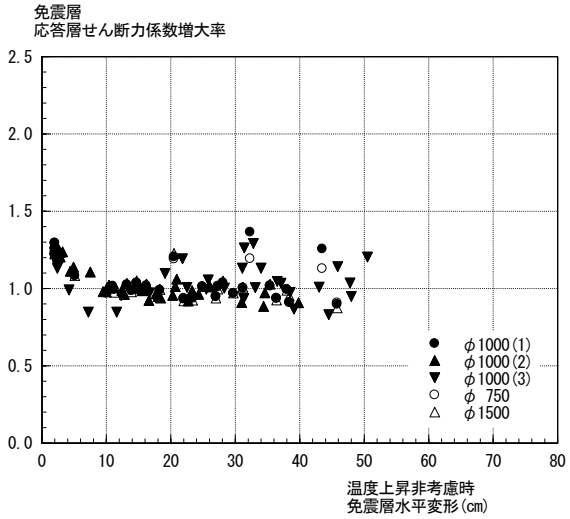


図 1.3.1-9　温度上昇非考慮時の水平変形と考慮時の免震層応答層せん断力係数増大率

図 1.3.1-10 に鉛プラグの温度上昇による特性変化非考慮時と考慮時の免震層の水平変形の増大率と応答層せん断力係数の増大率の関係を示す。温度上昇考慮時には免震層の水平変形が大きく増大するケースがあるものの、それと比較して、免震層の応答層せん断力係数については増大しない結果となっている。

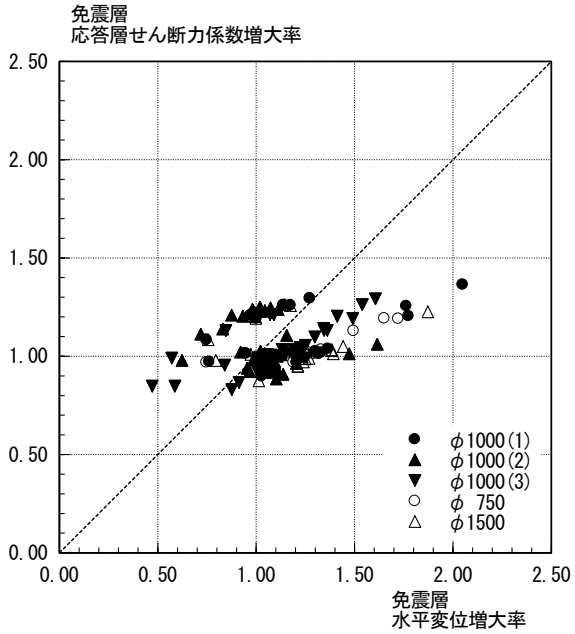


図 1.3.1-10　温度上昇非考慮時、考慮時の応答増大率の関係

(b)　手法２、３による応答評価結果

図 1.3.1-11 に簡易応答評価法（手法２、手法３）の違いによる結果を詳細応答評価法（手法１）による結果と比較して示す。

免震層の水平変形については手法２による簡易応答評価法による結果が詳細応答評価法による解析結果と比較的良い一致を示しているが変形の大きな領域で過小評価しているケースも見られる。手法３については変形の大きな領域で手法１との応答値の差が見られる。免震層の応答層せん断力係数については手法２と手法３による結果に大きな違いが見られないが、手法３による結果が手法１による結果との差が比較的小さくなっている。

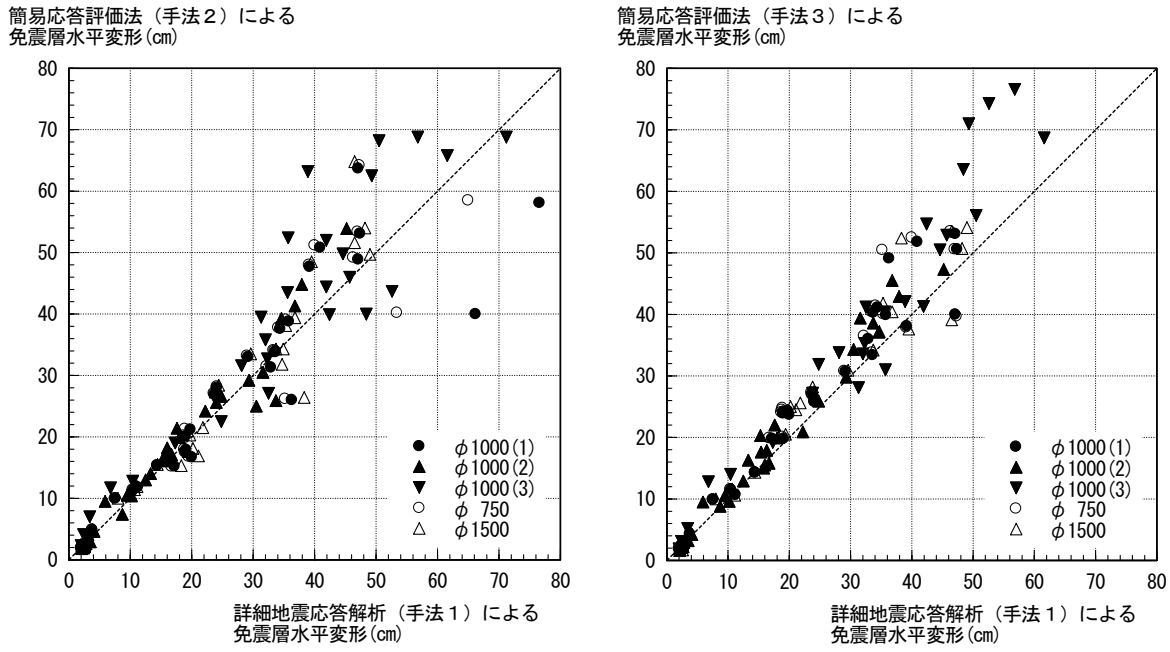


図 1.3.1-11(a) 評価手法の違いによる比較（免震層水平変形）

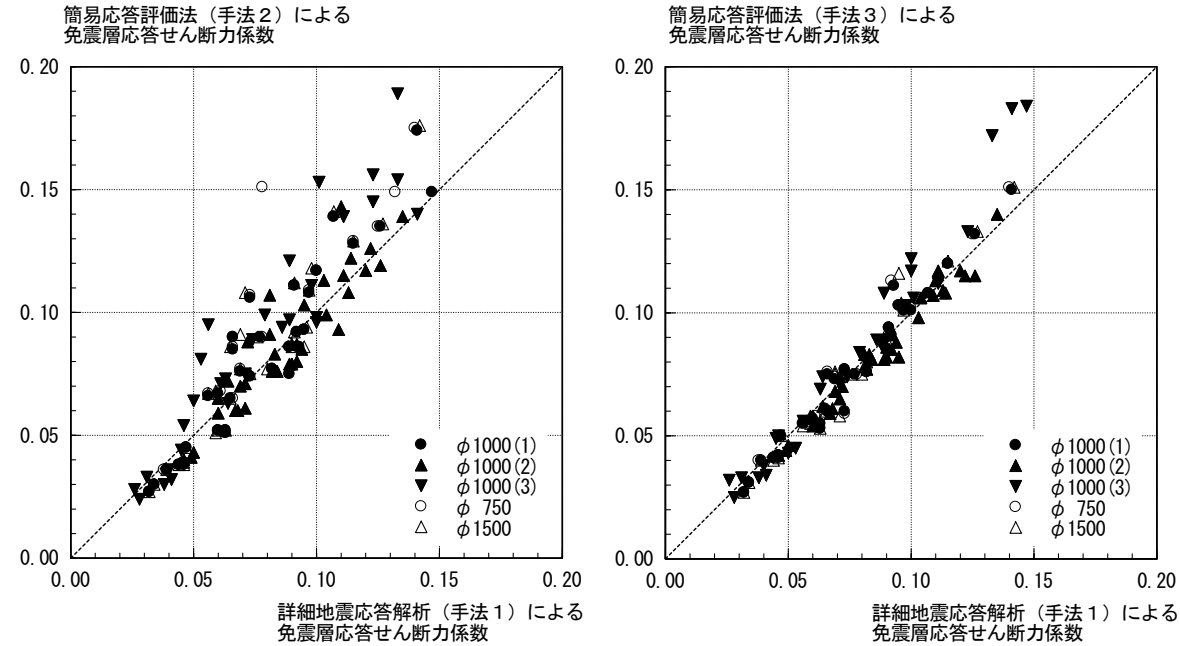
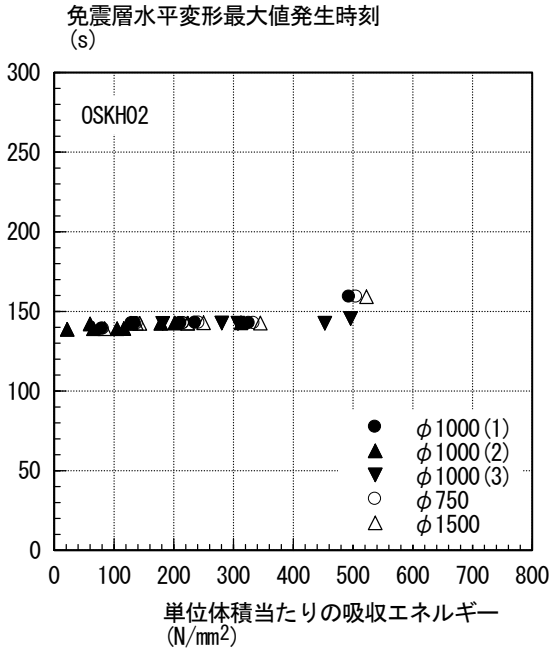


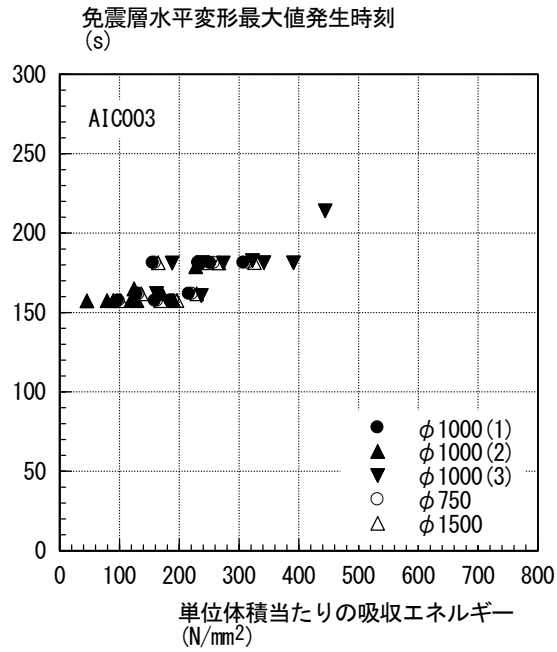
図 1.3.1-11(b) 評価手法の違いによる比較（免震層応答層せん断力係数）

(c)　手法３、３’による応答評価結果

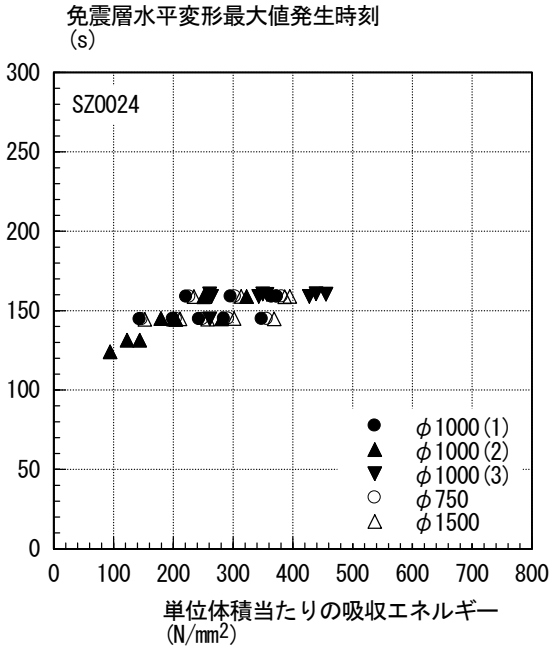
図 1.3.1-12 に簡易応答評価法（手法３’）に関連して、従来の地震応答解析による地震動終了時の鉛プラグ単位体積当たりの吸収エネルギーと免震層水平変形最大値の発生時刻との関係を入力地震波毎に示す。KGIN 波については 150～250 秒程度で免震層の水平変形の最大値が発生し、他の入力地震動については全継続間 740 秒のうち、150 秒程度で免震層の水平変形の最大値が発生する。



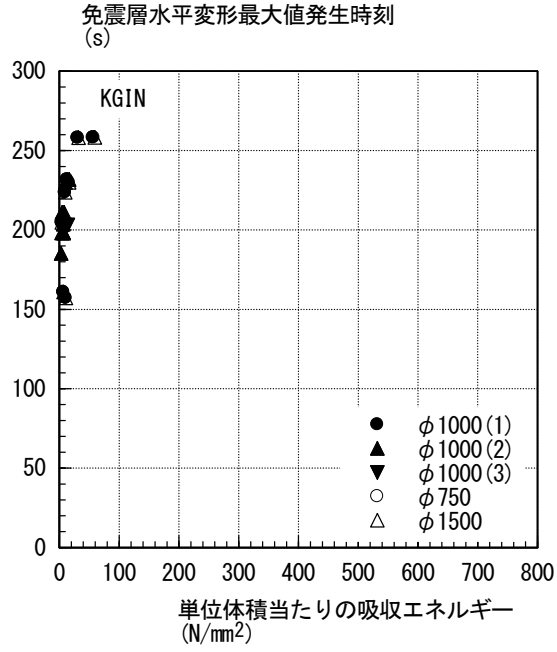
(i) OSKH02



(ⅱ) AIC003



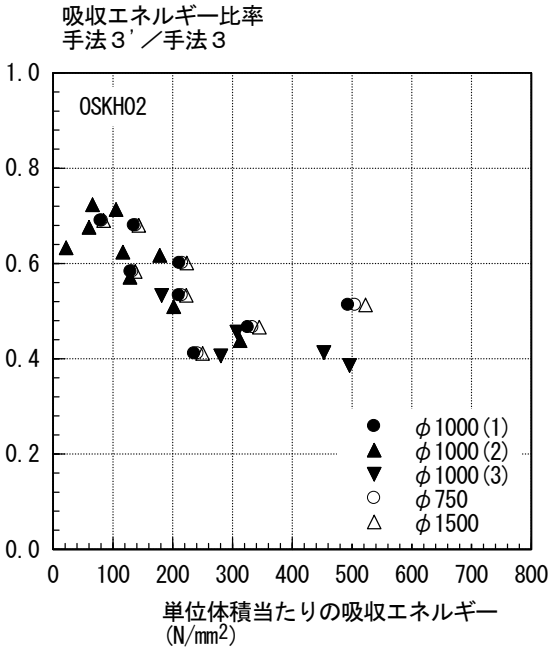
(ⅲ) SZO024



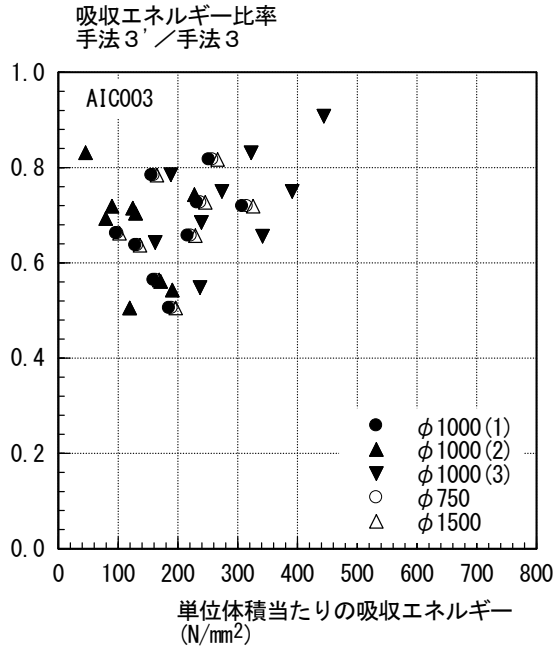
(ⅳ) KGIN

図 1.3.1-12　免震層水平変形最大値発生時刻

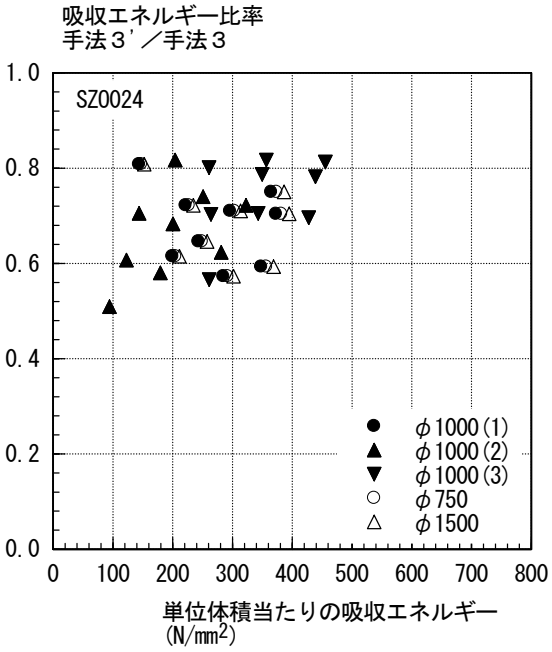
図 1.3.1-13 に吸収エネルギーとして従来の地震応答解析結果の地震終了時の鉛プラグの吸収エネルギー（手法３での応答評価時）と免震層の水平変位の最大値発生時刻における吸収エネルギー（手法３’での応答評価時）の比を入力地震波毎に示す。免震層の水平変形の発生時刻についてはばらつきがあまり大きくない結果であったが吸収エネルギーについては比較的ばらつきの大きい結果となっている。



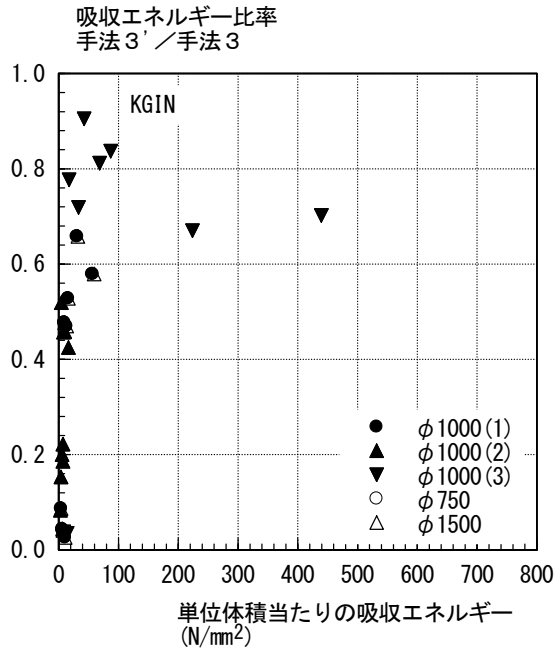
(i) OSKH02



(ⅱ) AIC003



(ⅲ) SZO024



(ⅳ) KGIN

図 1.3.1-13　吸収エネルギー比率

図 1.3.1-14 に簡易応答評価法（手法３、手法３’）の違いによる結果を詳細応答評価法（手法１）による結果と比較して示す。

免震層の水平変形については手法３’による簡易応答評価法による結果が詳細応答評価法による解析結果と比較的良い一致を示している。しかし水平変形が大きい領域では過小評価となるケースも見られる。

免震層の応答層せん断力係数については手法３と手法３’による結果に大きな違いが見られないが、比較的手法３’による結果のばらつきが小さくなっている。

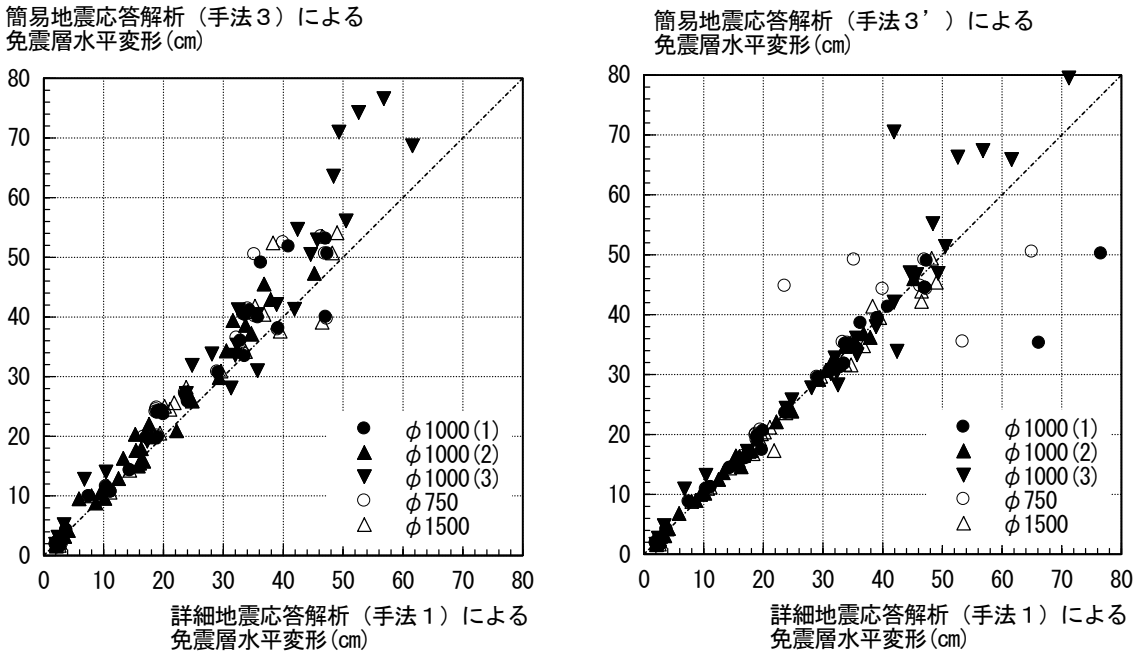


図 1.3.1-14(a) 評価手法の違いによる比較（免震層水平変形）

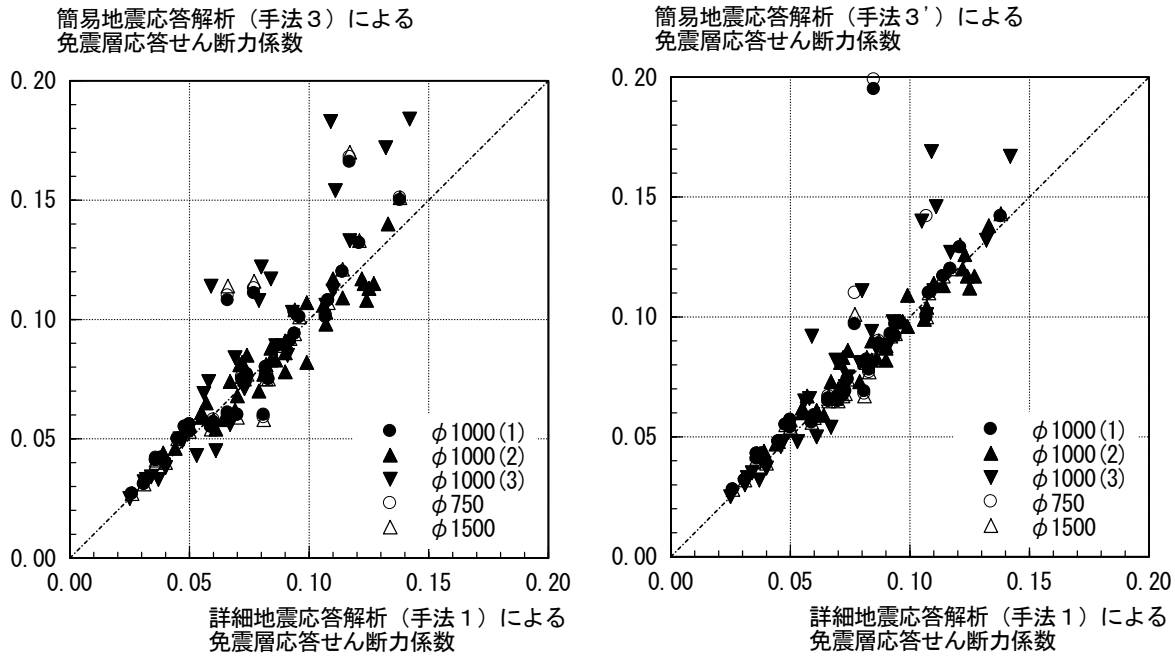


図 1.3.1-14(b) 評価手法の違いによる比較（免震層応答層せん断力係数）

図 1.3.1-15 に簡易応答評価法（手法３、手法３’）の違いによる結果を詳細応答評価法（手法１）による結果との比として示す。

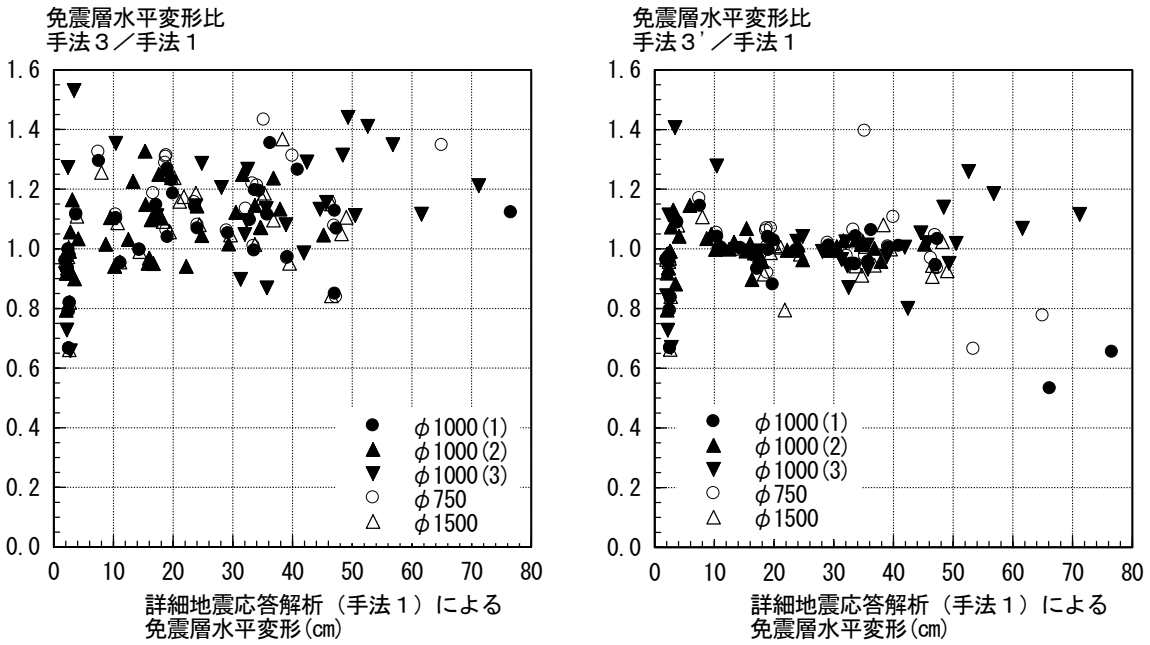


図 1.3.1-15(a) 評価手法の違いによる応答比（免震層水平変形）

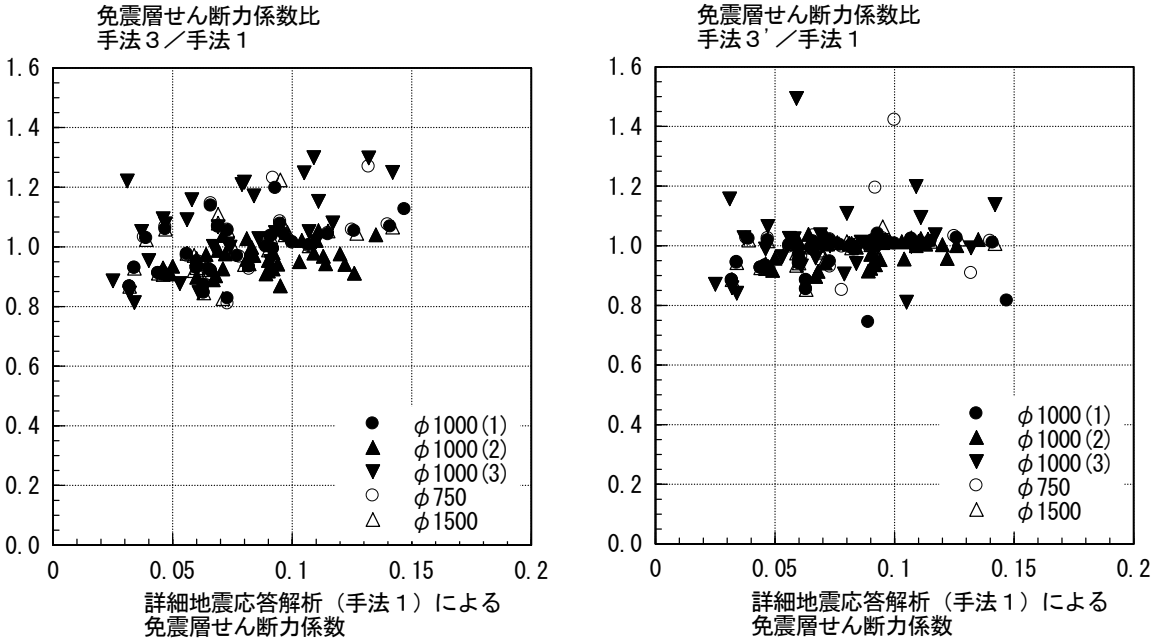


図 1.3.1-15(b) 評価手法の違いによる応答比（免震層応答層せん断力係数）

図 1.3.1-16 に手法１と手法３’による応答評価結果に違いが大きい解析についての結果を示す。解析ケースは以下の通りである。

入力地震動が OSKH02x1.5　積層ゴムφ1000、鉛径φ200、面圧 10N/mm^2

応答解析結果によると手法１と手法３’による免震層応答水平変形の最大値発生時刻が入力地震動の周期特性の影響で大きく異なっている。このため手法３’で鉛プラグ入り積層ゴムの降伏荷重の低下がより小さく（耐力低下があまりない）設定され、その結果として免震層応答水平変形がより小さめに評価される結果となっていると考えられる。

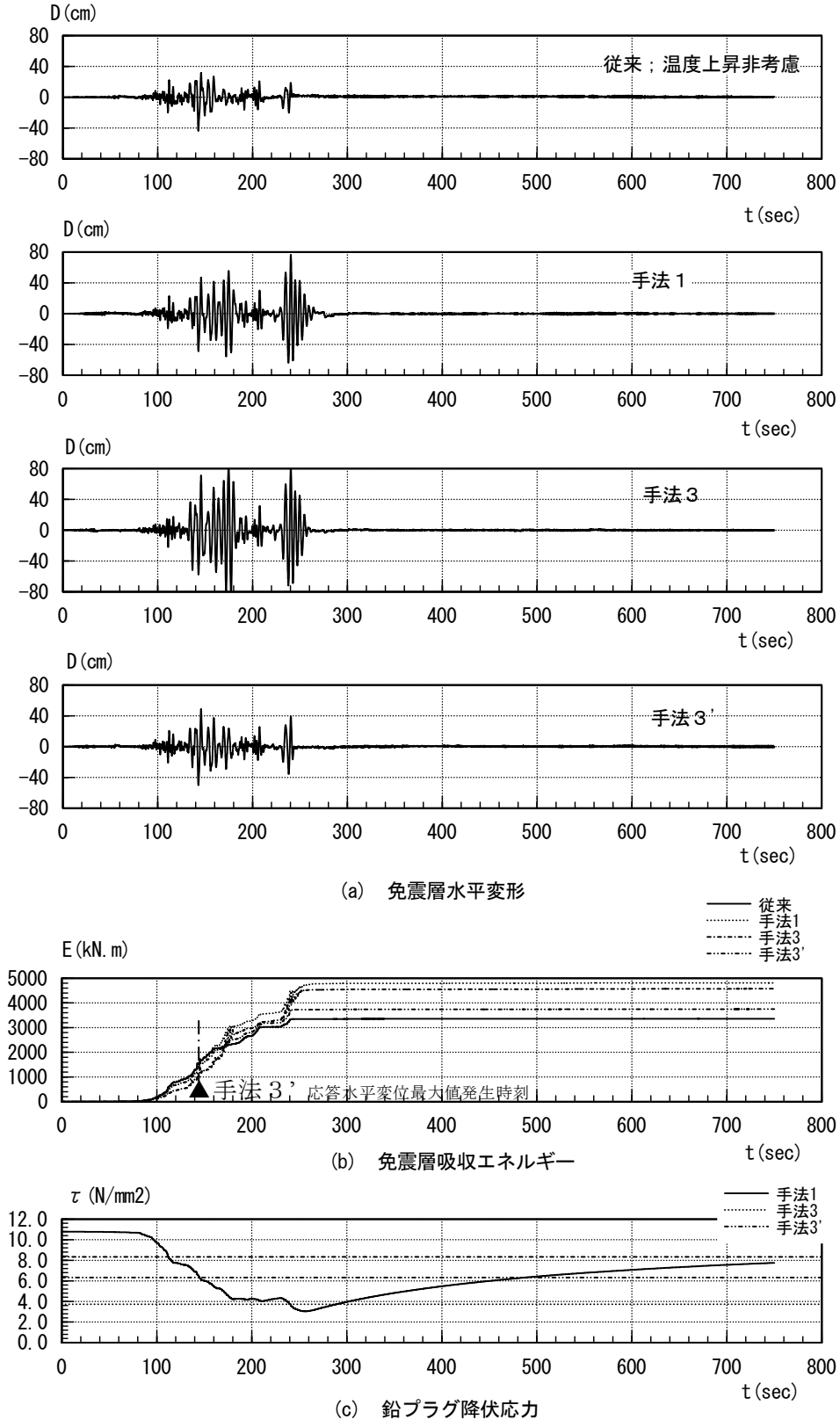


図 1.3.1-16　評価手法の違いによる各応答時刻歴

(4)　４連動地震を入力地震動とした場合の応答評価結果

(a)　解析条件

応答評価を行った建物モデル諸元を表 1.3.1-2 に示す。応答解析は上部建物を 1 質点としてモデル化し実施した。免震層は鉛プラグ入り積層ゴムのみで構成されるものとし、鉛プラグ入り積層ゴムはゴム種 G4、外径 ϕ 1000、鉛径 200mm、ゴム総厚 200mm とし、積層ゴムのゴム剛性による周期 T_f=4.5s、鉛降伏せん断力係数（α s=0.035）となるよう設定した。

表 1.3.1-2　対象建物諸元

上部構造 重量 (積層ゴム 1 基当り) (kN)	LRB 平均面圧 (N/mm^2)	T_f (sec)	α s
7477	9.9	4.5	0.035

T_f: ゴム剛性による免震周期

α s:鉛プラグ降伏せん断力係数

地震応答解析には前述の評価手法 1 である鉛プラグの温度上昇による特性変化を熱伝導解析と地震応答解析を並行して時刻歴解析を行う手法（詳細応答評価法）とした。

(b) 解析結果

表 1.3.1-3 に各入力地震動における解析結果を示す。

表 1.3.1-3(a) 応答解析結果（免震層応答最大水平変位、応答加速度）

平成 24 年度地震動

入力地震動		免震層応答最大水平変位 (cm)			応答最大加速度 (cm/s2)		
	入力倍率	温度上昇 非考慮	温度上昇 考慮	考慮 ／非考慮	温度上昇 非考慮	温度上昇 考慮	考慮 ／非考慮
OSKH02	1.00	25.5	54.2	2.13	85	117	1.36
AIC003	1.00	53.7	－	－	133	－	－
SZO024	1.00	31.0	36.7	1.18	95	93	0.98
KGIN	1.00	4.3	3.6	0.84	44	50	1.13

表中－は応答解析結果が解析適用範囲外となったことを示す。

表 1.3.1-3(b) 応答解析結果（応答最大せん断ひずみ、応答最大せん断力係数）

平成 24 年度地震動

入力地震動		積層ゴム応答最大 せん断ひずみ(%)			免震層応答最大 せん断力係数		
	入力倍率	温度上昇 非考慮	温度上昇 考慮	考慮 ／非考慮	温度上昇 非考慮	温度上昇 考慮	考慮 ／非考慮
OSKH02	1.00	128	271	2.13	0.087	0.119	1.37
AIC003	1.00	269	－	－	0.135	－	－
SZO024	1.00	155	184	1.18	0.097	0.095	0.98
KGIN	1.00	22	18	0.84	0.045	0.051	1.13

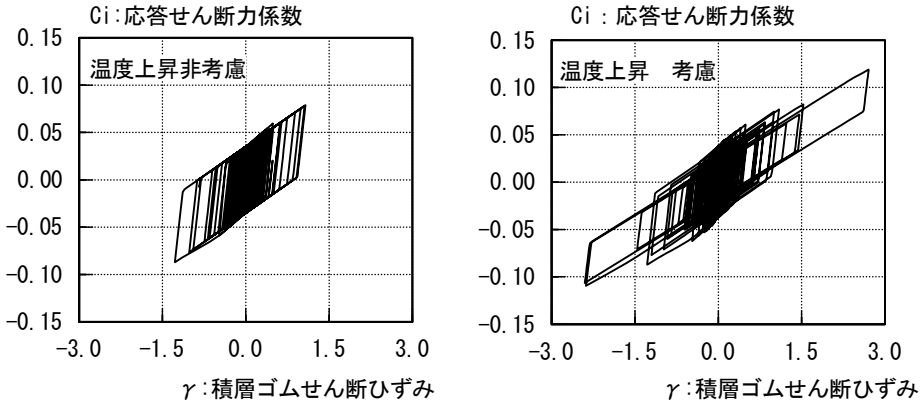
表 1.3.1-3(c) 応答解析結果（累積変位量、吸収エネルギー、鉛平均温度）

平成 24 年度地震動

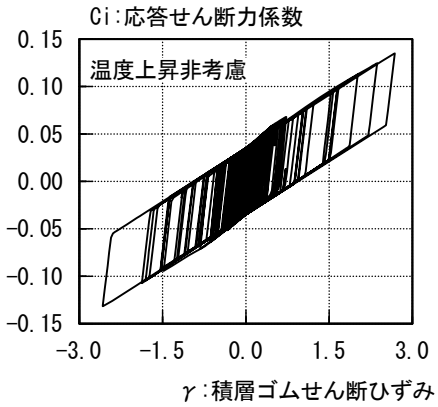
入力地震動		免震層累積 水平変位量 *1 (m)			免震層吸収エネルギ 速度換算値 (cm/s)			最大鉛 平均温度 (℃)
	入力倍率	温度上昇 非考慮	温度上昇 考慮	考慮 ／非考慮	温度上昇 非考慮	温度上昇 考慮	考慮 ／非考慮	温度上昇 考慮
OSKH02	1.00	15.2	21.8	1.43	256.0	296.7	1.16	179.0
AIC003	1.00	35.9	－	－	430.2	－	－	－
SZO024	1.00	25.1	22.4	0.89	263.9	252.5	0.96	140.0
KGIN	1.00	6.9	12.0	1.74	56.9	52.0	0.91	19.5

*1 免震層累積水平変位量については総入力エネルギーに対して、入力エネルギーが 95%となる時刻における値とした。

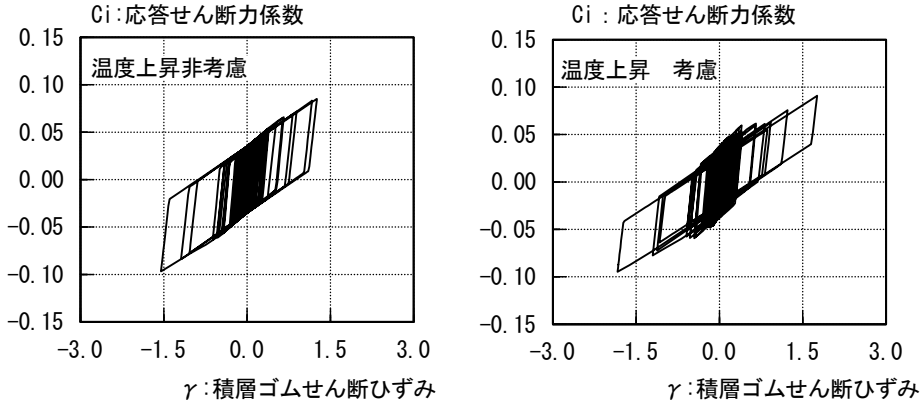
*2 表中－は応答解析結果が解析適用範囲外となったことを示す。



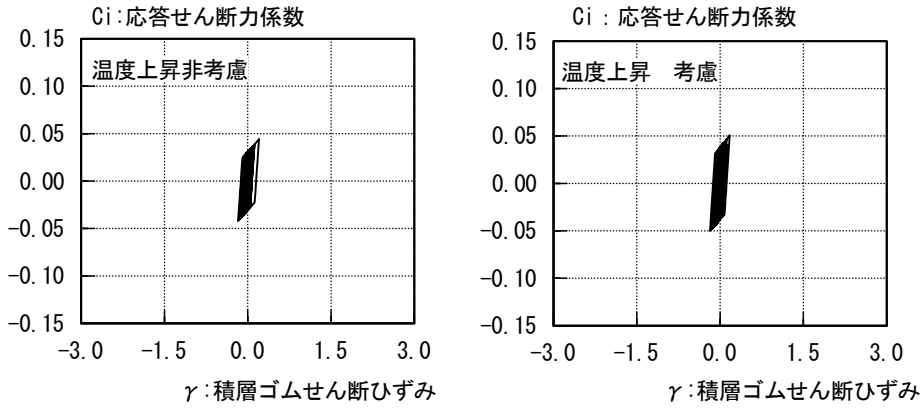
（a）　OSKH02



（b）　AIC003

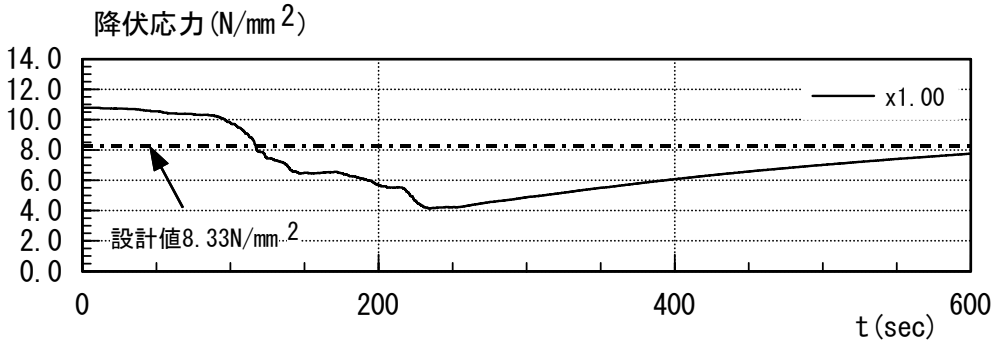


（c）　SZO024

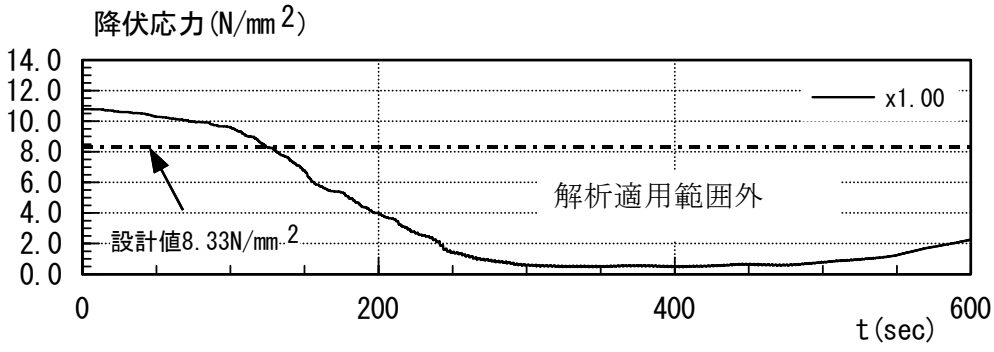


（d）　KGIN

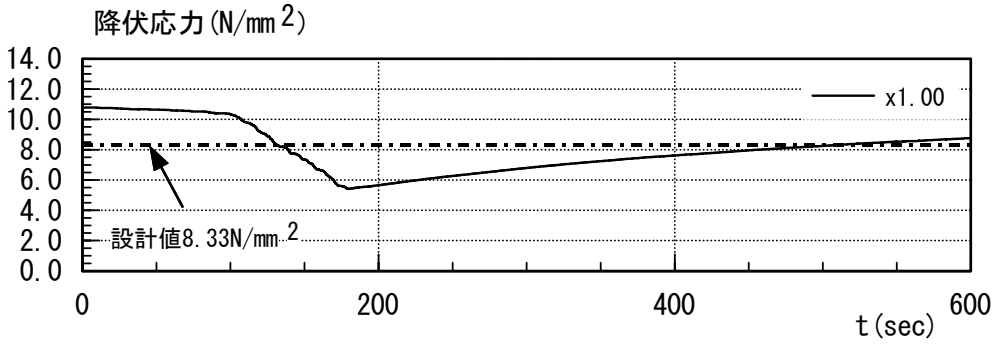
図 1.3.1-17　積層ゴムせん断ひずみ－免震層せん断力係数図



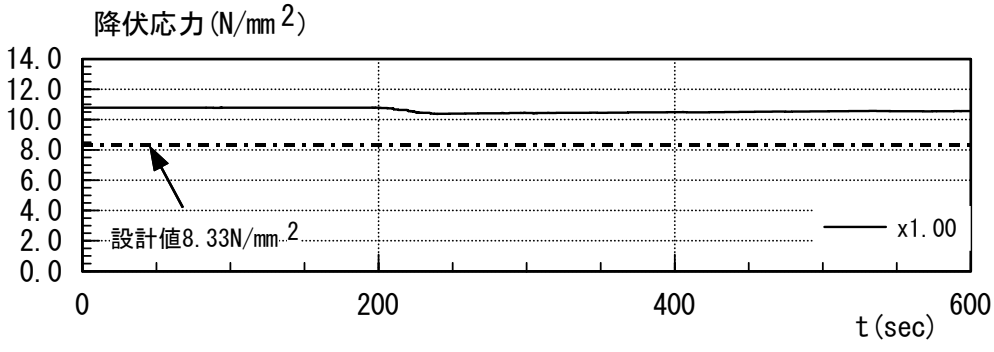
（a） OSKH02



（b） AIC003

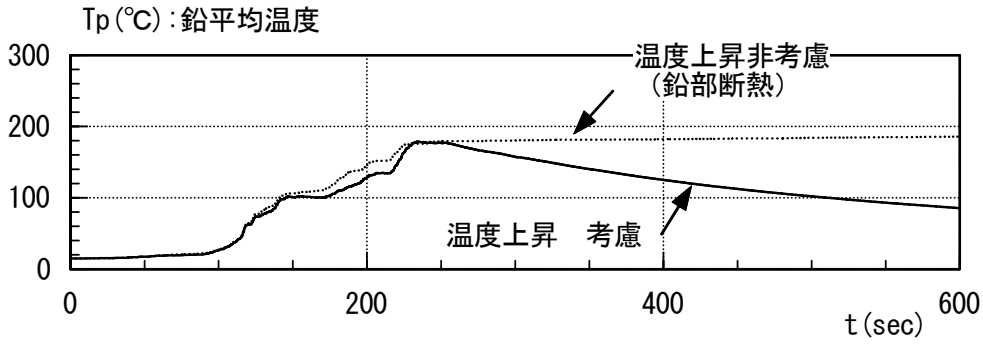


（c） SZO024

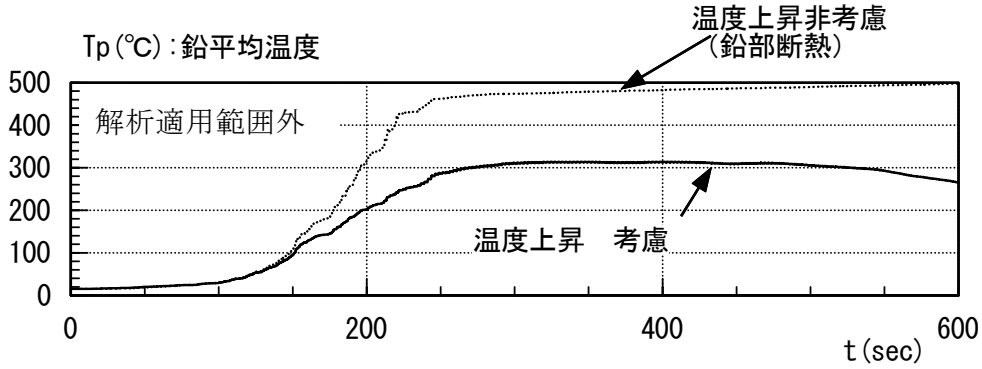


（d） KGIN

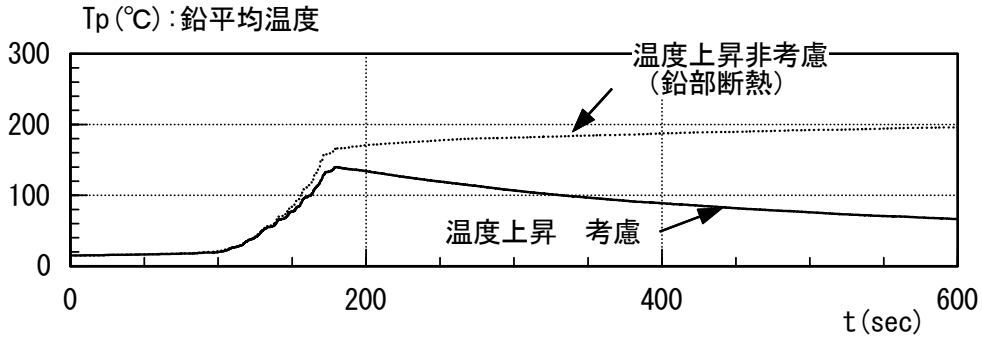
図 1.3.1-18　　降伏応力時刻歴



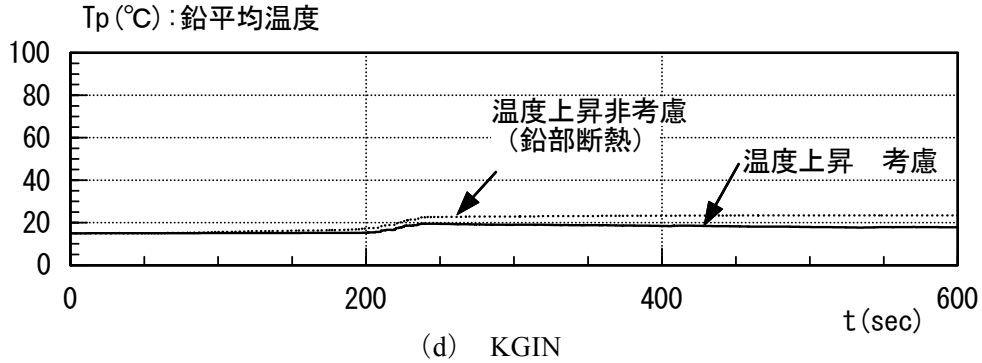
(a)　OSKH02



(b)　AIC003



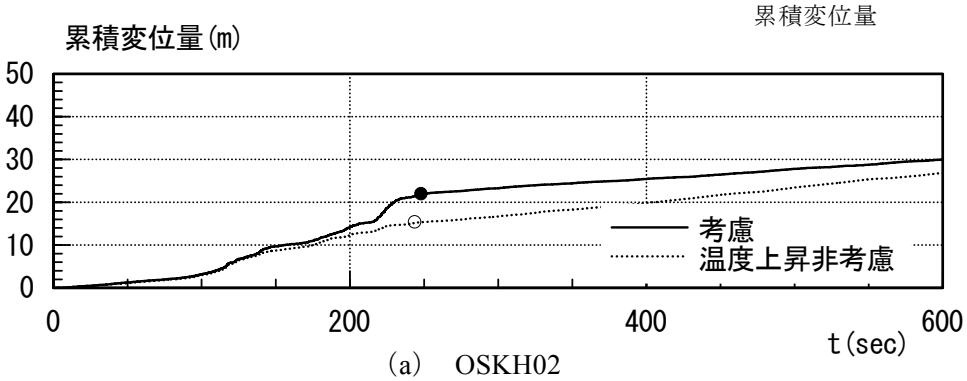
(c)　SZO024



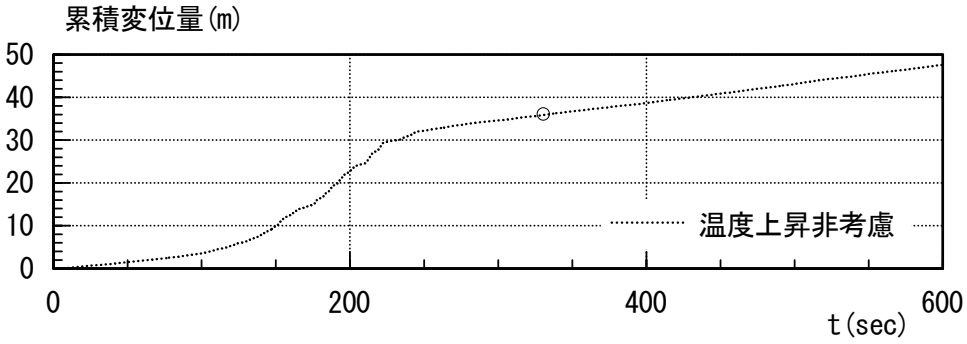
(d)　KGIN

図 1.3.1-19　　鉛部平均温度時刻歴

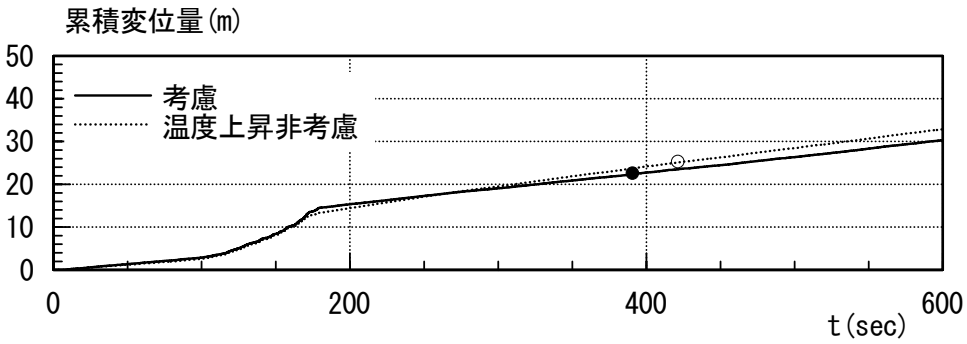
●, ○　総入力エネルギーの 95%時
累積変位量



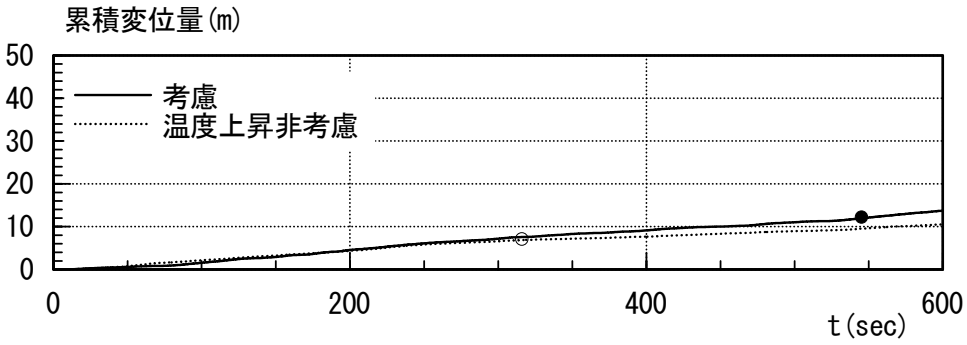
（a）　OSKH02



（b）　AIC003

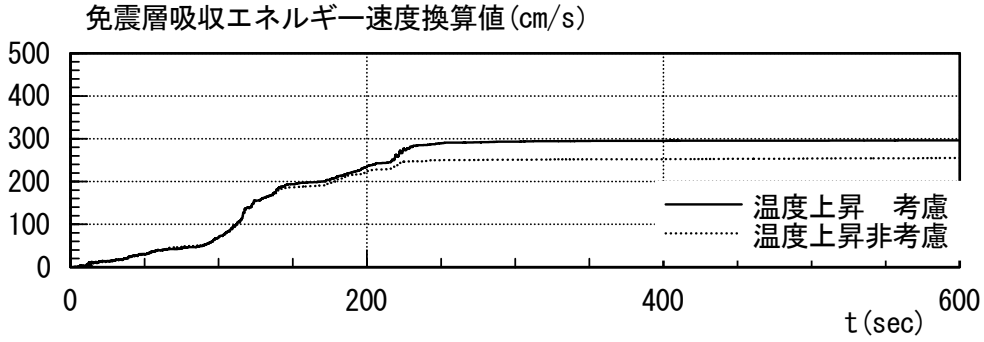


（c）　SZO024

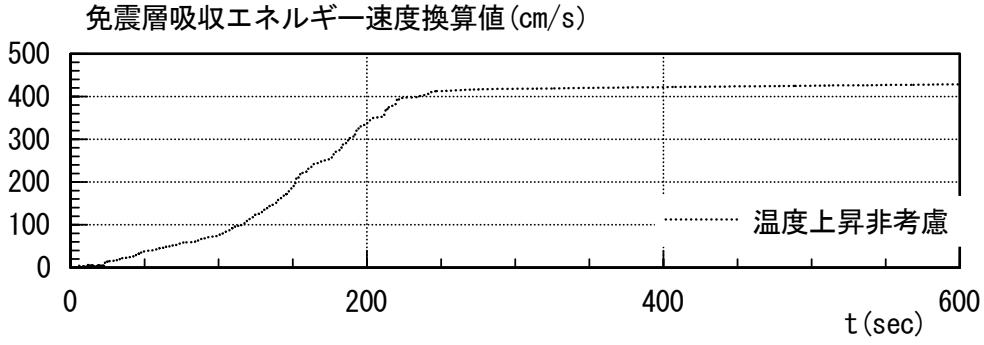


（d）　KGIN

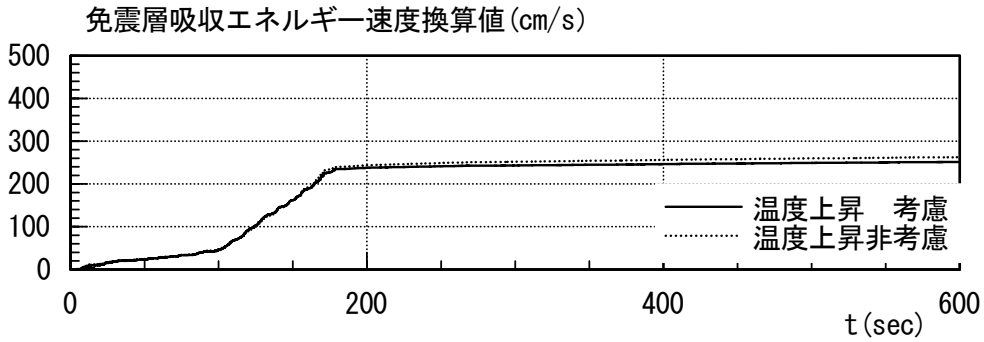
図 1.3.1-20　　免震層累積水平変位量時刻歴



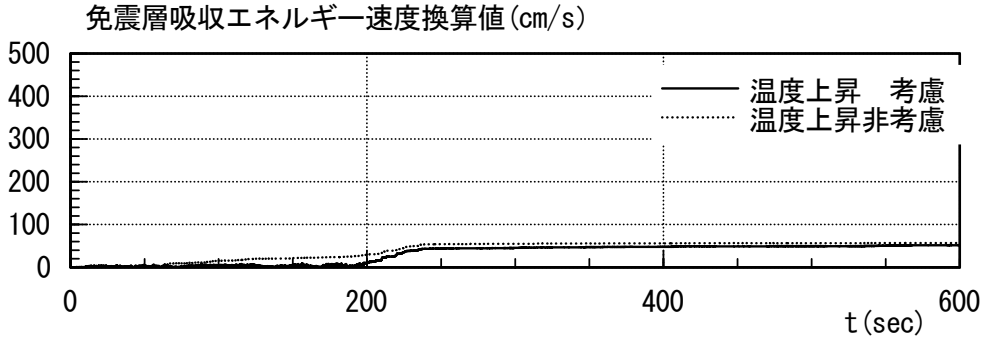
（a）　OSKH02



（b）　AIC003



（c）　SZO024



（d）　KGIN

図 1.3.1-21　　免震層履歴吸収エネルギー速度換算値時刻歴

(c)　簡易応答評価法による評価結果

表 1.3.1-4 に簡易応答評価法により、免震層の応答最大水平変位を評価した結果を、詳細応答解析結果と比較して示す。

簡易応答評価法により免震層の応答最大水平変位を評価した結果、AIC003 は評価適用範囲を超えたが、他の入力地震動では手法 3 による結果が詳細応答評価法の手法 2 と良い一致を示した。手法 3’については静岡（浜松：SZO024）、東京（新宿：KGIN）のケースにおいては手法 2、手法 3 と良い一致を示しているが、大阪（此花：OSKH02）については手法 3 と手法 3’で大きな違いが見られた。これは応答最大水平変位が生じる時刻に差があるため、Qd 低下の指標となる鉛プラグ入り積層ゴムで吸収されるエネルギー量の評価に大きな差があるためであると考えられる。

表 1.3.1-4　簡易応答評価法による免震層応答最大水平変位

入力地震動		温度上昇 非考慮	温度上昇 考慮		
	入力倍率	手法1	手法2	手法3	手法3’
OSKH02	1.00	25.5	54.2	58.6	25.5
AIC003	1.00	53.7	－	－	－
SZO024	1.00	31.0	36.7	40.2	37.6
KGIN	1.00	4.3	3.6	4.1	3.6

表中－は応答解析結果が解析適用範囲外となったことを示す。

(5) まとめ

鉛プラグ入り積層ゴムの鉛プラグの温度上昇による特性変化を考慮した場合の免震建物の応答評価を、熱伝導解析と地震応答解析とを並行して実施する詳細応答評価法（手法１）、エネルギーの釣り合いを基にした包絡解析法による応答予測評価法（手法２）及び降伏荷重をあらかじめ低減させた一定値により地震応答解析を行う応答評価法（手法３、手法３’）の各手法により実施し、それらの結果を比較した。

熱伝導解析と地震応答解析とを並行して実施する詳細応答評価法（手法１）により応答評価した結果、免震層の水平変形が 20cm（γ=100%）程度以上となると、温度上昇による特性変化を考慮した場合の変位が考慮しない場合と比較して増大する。免震層水平変形の増大率は概ね 1.0～1.5 倍程度である。免震層の応答層せん断力係数については免震層の応答水平変形と比較して、温度上昇を考慮した場合の増大は少なく、増大率は概ね 1.0～1.25 倍程度である。

免震層の水平変形についてはエネルギーの釣り合いを基にした包絡解析法による応答予測評価法（手法２）での結果が詳細応答評価法（手法１）による結果と比較的良い一致を示しているが、過小評価となっているケースも見られる。免震層の応答層せん断力係数については手法２と降伏荷重をあらかじめ低減させた一定値により地震応答解析を行う応答評価法（手法３）による結果に大きな違いが見られないが、比較的手法３による結果と詳細応答評価法（手法１）との差が比較的小さくなっている。

手法３については降伏荷重 Q_d の低下率を求める際に用いる鉛プラグ入り積層ゴムの履歴吸収エネルギーについて地震終了時の値を用いる手法３と免震層の水平変形が最大となった時刻における履歴吸収エネルギーを用いる手法３’との評価結果を比較した。免震層の水平変形については手法３’による簡易応答評価法による結果が詳細応答評価法による解析結果と比較的良い一致を示しているが、水平変形が大きい領域では過小評価となるケースも見られる。

平成 24 年度に評価された 4 連動地震を入力した場合の地震応答解析結果は平成 22 年度に評価された３連動地震入力時の結果と比較して大きな応答結果となっている。特に AIC003 地点においてはその差が大きく、鉛プラグの温度上昇による特性変化を考慮した場合には解析の適用範囲（実験で確認された範囲）を超えるレベルであった。

本検討で示した簡易応答評価法（手法２、手法３及び手法３’）による応答評価結果は、詳細応答評価法による応答評価結果と良い一致を示すケースもあるが、地震動の特性によっては過大、過小評価するケースも見られる。簡易応答評価法の適用については解析対象の免震システムと入力地震動の関係によっては応答評価精度が異なる可能性があるため注意が必要である。

参考文献

1.3.1-1) 竹中康雄,近藤明洋他 6 名:大振幅繰返し変形を受ける積層ゴム支承の熱･力学的連成挙動に関する研究（その 9～その 11）、日本建築学会学術講演梗概集（中国）、B-2、pp.397-402、2008.9

1.3.1-2) T. Honma, A. Kondo, Y. Takenaka, H. Kitamura : Seismic Response Prediction Method Considering Heat-Mechanics Interaction Behavior of Lead Rubber Bearing, Proceeding of Fifth World Conference on Structural Control and Monitoring, Tokyo, 2010.7

1.3.2 高減衰ゴム系積層ゴム

(1) 繰返し依存性考慮・非考慮による応答値の違い

高減衰ゴム系積層ゴムは、繰返し変形を受けることにより等価剛性と等価減衰定数の低下が生じる。この繰返し依存性を考慮した場合と、考慮しない場合の建物応答の違いを検討するため、繰返し変形による復元力特性値の変化を時時刻々と反映させた解析モデル(3.4.2 参照)と、繰返しの依存性を考慮しない解析モデルを用いて地震応答解析を実施し、両者の応答値を比較する。解析モデルは、高減衰ゴム系積層ゴムのみで構成される免震層を有する 1 質点剛体モデルとする。免震層は、せん断ひずみ 200%時の等価剛性が約 4.0 秒となるよう設定する。表 1.3.2-1 に、解析モデルの諸元を示す。繰返し依存性の特性変化を考慮する解析は、繰返し変形によるゴムの温度変化をもとに復元力特性値を変動させる。この解析における初期温度は全て 20℃とする。入力地震動は、5.2 に示す検討用長周期地震動を用いる。なお、本解析で用いる解析モデルの適用範囲は、γ=270%(545mm)である。それを超える範囲については、復元力特性値をγ=270%時の値で一定として解析を続行しているが、解析結果は本検討には用いない。

表 1.3.2-2 に、繰返し依存性を考慮した場合と、考慮しない場合の地震応答解析結果の最大応答値を比較して示す。今回実施した解析ケースの中で、OSKH02 の 1.5 倍入力(繰返し考慮)、AIC003 の四連動入力(繰返し非考慮、考慮共)のケースが解析の適用範囲を超えている。解析モデルの適用範囲内の解析結果について、最大応答加速度は繰返し考慮と非考慮の差は最大でも 7%と小さい。免震層変位は、AIC003 および OSKH02 の四連動を入力したケースで、繰返しを考慮した解析結果の方が 10～20%値が大きい。表 1.3.2-3 に、繰返し依存性を考慮した場合と、考慮しない場合の累積値を比較して示す。ここで、累積エネルギーは解析終了時の値の 95%値、累積変形量は累積エネルギーが解析終了時の値の 95%に達した時点の値としている。累積変形量は、OSKH02、AIC003 を入力したケースで考慮と非考慮で 5～10%程度の差が生じている。累積 V_E は、どのケースでも考慮と非考慮の差は 3%以下と小さい。図 1.3.2-1 に、単位ゴム体積当たりの累積吸収エネルギーE/V による繰返し依存性考慮・非考慮の応答値の差を示す。免震層最大変位および累積変形量は、E/V が大きくなるにしたがって繰返し依存性考慮の解析結果の値が大きくなるが、最大応答加速度については明確な傾向は見られない。

以上より、繰返し依存性による高減衰ゴム系積層ゴムの特性変化は、建物応答として免震層変位を増大させる傾向がある。一方、最大応答加速度、累積吸収エネルギー量については、繰返し依存性の影響は小さい。

表 1.3.2-1 解析モデル諸元

想定建物	RC 造、10 階建て、基礎免震
上部構造重量	46,000kN
積層ゴム台数	12 台
積層ゴム直径(内径)	700mm (15mm)
ゴム層総厚	202.1mm
積層ゴム面圧	10.0N/mm2
γ=100%時等価周期	3.6 秒
γ=200%時等価周期	4.1 秒

表 1.3.2-2　繰返し依存性を考慮した場合と考慮しない場合の最大応答値の比較

入力			応答					
地震波	倍率	加速度	質点加速度(Gal)		免震層変位(mm)		せん断力係数	
		(Gal)	非考慮	考慮	非考慮	考慮	非考慮	考慮
OSKH02	1.00	98.49	76.28	75.64	304.64	315.95	0.0778	0.0772
				(0.99)		(1.04)		(0.99)
	1.25	123.11	97.30	95.92	426.45	444.88	0.0993	0.0979
				(0.99)		(1.04)		(0.99)
	1.50	147.73	128.83	―	540.36	545以上	0.1315	―
				(－)		(－)		(－)
AIC003	1.00	199.40	54.82	54.92	153.34	171.43	0.0559	0.0560
				(1.00)		(1.12)		(1.00)
	1.25	249.25	68.43	69.34	255.56	286.80	0.0698	0.0708
				(1.01)		(1.12)		(1.01)
	1.50	299.10	84.38	85.46	352.24	397.01	0.0861	0.0872
				(1.01)		(1.13)		(1.01)
SZO024	1.00	576.78	71.69	69.31	276.65	285.07	0.0732	0.0707
				(0.97)		(1.03)		(0.97)
	1.25	720.98	85.96	82.10	361.47	373.84	0.0877	0.0838
				(0.96)		(1.03)		(0.96)
	1.50	865.17	100.63	94.93	444.24	455.96	0.1027	0.0969
				(0.94)		(1.03)		(0.94)
KGIN1F	1.00	42.11	36.49	36.52	64.15	65.31	0.0372	0.0373
				(1.00)		(1.02)		(1.00)
	1.25	52.64	43.70	43.32	88.87	90.27	0.0446	0.0442
				(0.99)		(1.02)		(0.99)
	1.50	63.17	50.34	50.01	122.26	128.26	0.0514	0.0510
				(0.99)		(1.05)		(0.99)
OSKH02	1.00	133.00	93.81	100.68	406.93	487.77	0.0957	0.1027
（四連動）				(1.07)		(1.20)		(1.07)
AIC003	1.00	545.40	―	―	545以上	545以上	―	―
（四連動）				(－)		(－)		(－)
SZO024	1.00	640.30	92.59	89.26	399.90	413.03	0.0945	0.0911
（四連動）				(0.96)		(1.03)		(0.96)
KGIN1F	1.00	55.51	48.15	48.13	109.75	116.04	0.0491	0.0491
（四連動）				(1.00)		(1.06)		(1.00)

※(　)内は、(考慮／非考慮)の値。

※解析モデルの適用範囲(γ=270%, δ=545mm)を超える解析結果については、本検討に用いない。

(適用範囲を超えるケース：OSKH02 1.5 倍(考慮)、AIC003 四連動(非考慮)、AIC003 四連動(考慮))

表 1.3.2-3　繰返し依存性を考慮した場合と考慮しない場合の累積値の比較

入力			応答				
地震波	倍率	加速度	累積変形量(m)		累積V_E(m/sec)		温度（℃）
		(Gal)	非考慮	考慮	非考慮	考慮	考慮
OSKH02	1.00	98.49	13.20	13.89	1.95	1.98	26.06
				(1.05)		(1.02)	
	1.25	123.11	18.15	19.71	2.54	2.63	27.99
				(1.09)		(1.03)	
	1.50	147.73	23.44	―	3.13	―	30.48
				(―)		(―)	
AIC003	1.00	199.40	12.02	11.74	1.65	1.64	24.22
				(0.98)		(0.99)	
	1.25	249.25	14.27	15.17	1.99	2.01	26.13
				(1.06)		(1.01)	
	1.50	299.10	17.85	18.86	2.36	2.38	27.21
				(1.06)		(1.01)	
SZO024	1.00	576.78	13.15	13.47	1.94	1.91	25.73
				(1.02)		(0.99)	
	1.25	720.98	16.78	16.88	2.30	2.25	26.79
				(1.01)		(0.98)	
	1.50	865.17	20.06	21.28	2.64	2.56	27.79
				(1.06)		(0.97)	
KGIN1F	1.00	42.11	5.18	5.21	0.74	0.75	20.83
				(1.00)		(1.00)	
	1.25	52.64	6.95	7.06	0.99	1.00	21.54
				(1.02)		(1.01)	
	1.50	63.17	8.71	8.86	1.25	1.26	22.46
				(1.02)		(1.01)	
OSKH02	1.00	133.00	22.04	23.80	2.72	2.76	28.48
（四連動）				(1.08)		(1.02)	
AIC003	1.00	545.40	―	―	―	―	―
（四連動）				(―)		(―)	
SZO024	1.00	640.30	17.59	17.56	2.08	2.03	26.19
（四連動）				(1.00)		(0.98)	
KGIN1F	1.00	55.51	8.77	8.84	1.20	1.21	22.28
（四連動）				(1.01)		(1.01)	

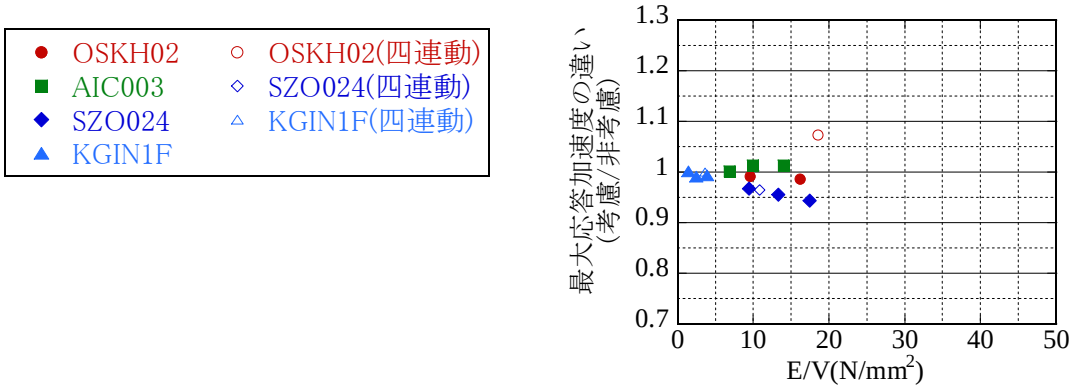
※(　)内は、(考慮／非考慮)の値。

※解析モデルの適用範囲(γ=270%, δ=545mm)を超える解析結果については、本検討に用いない。

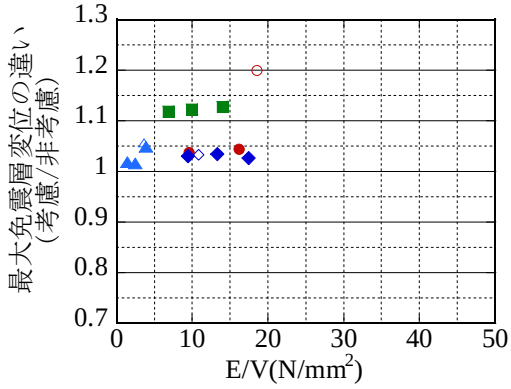
(適用範囲を超えるケース：OSKH02 1.5 倍(考慮)、AIC003 四連動(非考慮)、AIC003 四連動(考慮))

※累積吸収エネルギーは、解析終了時の値の 95%値とする。

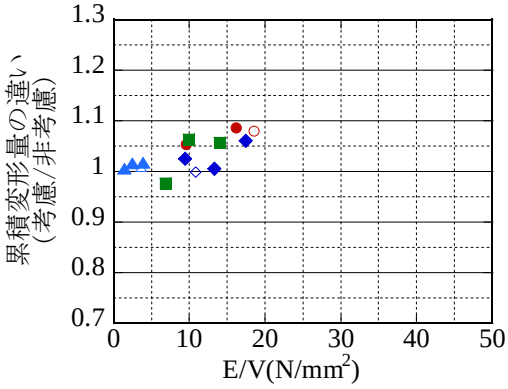
※累積変形量は、累積吸収エネルギーが解析終了時の 95%に達した時点の値とする。



(a) 最大応答加速度



(b) 免震層最大変位



(c) 免震層累積変形量

図 1.3.2-1　累積吸収エネルギーと繰返し依存性考慮・非考慮の応答値差の関係

(※E/V は単位ゴム体積当たりの累積吸収エネルギー量であり、解析終了時の 95%のエネルギー量から算出)

(※解析モデルの適用範囲を超えているケースは除外)

(2) 簡易評価法の検討方針

時刻歴応答解析による建物応答の検討においては、製作ばらつき、環境温度、経年変化による特性変動を考慮し、ゴムが最もやわらかくなるソフトケースと、もっともかたくなるハードケースによる応答値を検討する。表 1.3.2-4 に、高減衰ゴム系積層ゴム X0.6R タイプのばらつき値を示す [1.3.2-1)]。(1)に示す、繰返し依存性考慮・非考慮の解析結果の比較より、高減衰ゴム系積層ゴムの繰返し依存性による特性変化は免震層変位を増大させる傾向がある。従って、ソフト・ハードケースの検討において、繰返し依存性による変動をソフトケースの追加検討事項として加えることにより、高減衰ゴム系積層ゴムの繰返し依存性を簡易的に評価する手法を検討する。

図 1.3.2-1 より、繰返し依存性により応答値に差が生じるのは、単位ゴム体積当たりの累積吸収エネルギー量 E/V が 5N/mm^2 以上の範囲であることから、簡易評価においては E/V が 5N/mm^2 以上の場合に繰返し依存性を考慮する。図 1.3.2-2 に、繰返し依存性を考慮した解析ケースの累積吸収エネルギーと等価剛性、および等価減衰定数の低下率の関係を示す。図は、解析モデルの適用範囲内の解析結果で累積吸収エネルギー量が最も大きくなる OSKH02 を入力したケースの解析結果である。等価剛性は、E/V が 5N/mm^2 で約 5%、20N/mm^2 で約 10%低下している。等価減衰定数は、E/V が 15N/mm^2 で約 5%低下している。この E/V と等価剛性および等価減衰定数の低下率の関係をソフトケースにおけるばらつき値として考慮する。E/V による等価剛性の低下率 C_K、および等価減衰定数の低下率 C_h は、下式で表される。

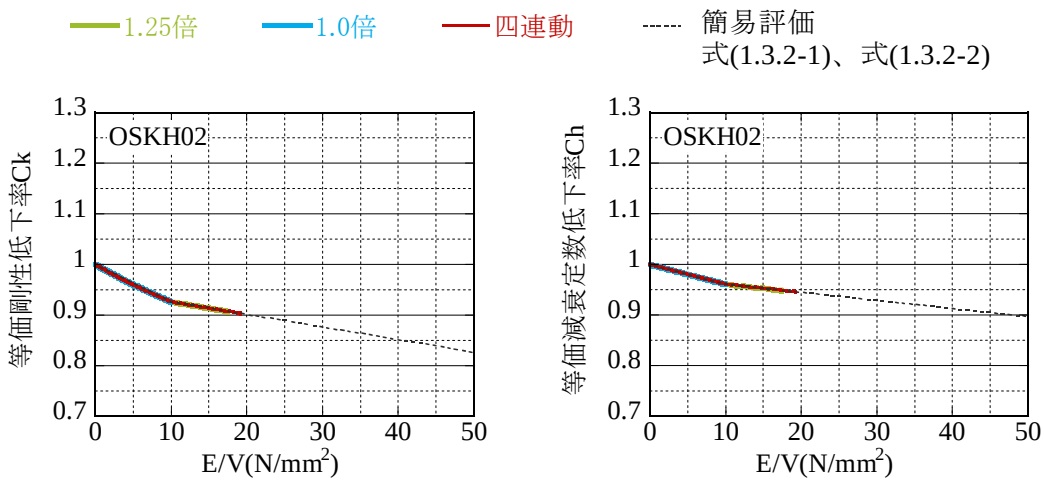
$$\left.\begin{aligned} C_K &= -0.0073\cdot(E/V)+1.0 \quad (E/V \le 10.0\text{N/mm}^2) \\ C_K &= -0.0025\cdot(E/V)+0.952 \quad (E/V > 10.0\text{N/mm}^2) \end{aligned}\right\} \tag{1.3.2-1}$$

$$\left.\begin{aligned} C_h &= -0.0039\cdot(E/V)+1.0 \quad (E/V \le 10.0\text{N/mm}^2) \\ C_h &= -0.0016\cdot(E/V)+0.977 \quad (E/V > 10.0\text{N/mm}^2) \end{aligned}\right\} \tag{1.3.2-2}$$

図 1.3.2-3 に、繰返し依存性の簡易評価法のフローを示す。一度、ばらつきを考慮しないノーマルケースによって時刻歴応答解析を行い、高減衰ゴム系積層ゴムの単位ゴム体積当たりの累積吸収エネルギー量 E/V を算出する。算出した E/V が 5N/mm^2 以上の場合、E/V の値に応じた繰返し依存によるばらつき値を考慮して、ソフトケースの解析を実施する。これにより、高減衰ゴム系積層ゴムの繰返し依存性を簡易的に評価する。

表 1.3.2-4　高減衰ゴム系積層ゴムのばらつきの組合せ例 [1.3.2-1)]

ゴム材料		X0.6R	
		+側	-側
製造ばらつき *1	等価剛性	+10%	-10%
	等価粘性減衰定数	-10%	+10%
経年変化	等価剛性	+10%	0%
	等価粘性減衰定数	-10%	0%
環境温度変化 20℃±20℃	等価剛性	+21%	-16%
	等価粘性減衰定数	+7%	-13%
合　計	等価剛性	+41%	-26%
	等価粘性減衰定数	-13%	-3%



(a) 等価剛性の低下率　　(b) 等価減衰定数の低下率

図 1.3.2-2　累積吸収エネルギーE/V と復元力特性値の低下率の関係

(※E/V は単位ゴム体積当たりの累積吸収エネルギー量)

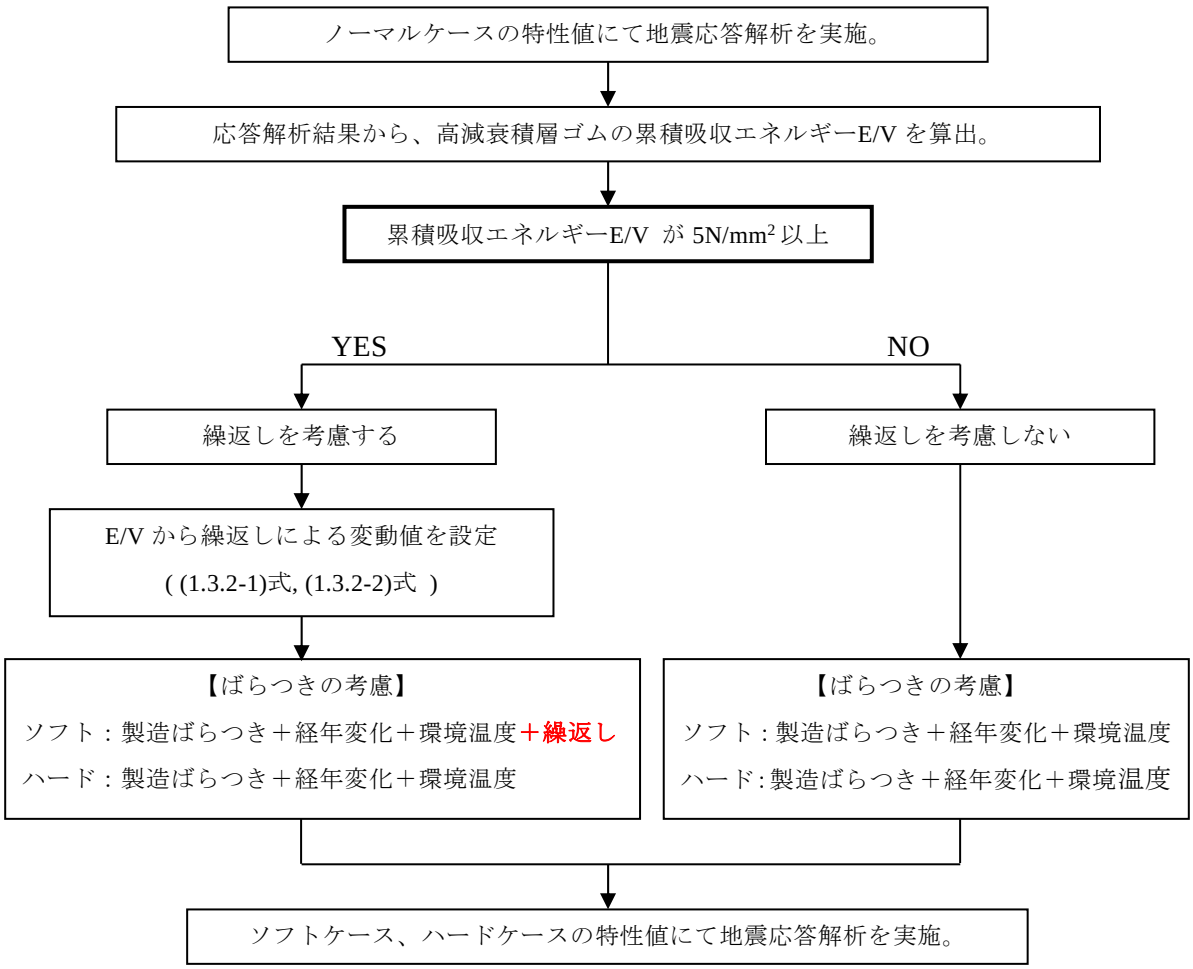


図 1.3.2-3　繰返し依存性の簡易評価法のフロー

(3) 簡易評価法による検討結果

(2)に示す繰返し依存性の簡易評価法と、繰返し依存性を時時刻々と考慮した場合の解析結果を比較し、簡易評価法の妥当性を検証する。表 1.3.2-5 に、式(1.3.2-1)、式(1.3.2-2)により算出した各解析ケースの等価剛性の低下率 C_K、および等価減衰定数の低下率 C_h を示す。E/V が 5N/mm^2 より小さいケースについては、繰返し依存性を考慮しないため C_K、C_h とも 1.0 とする。簡易評価においては、表 1.3.2-5 に示す C_K、C_h を解析の最初から等価剛性、等価減衰定数の低下率として乗じて地震応答解析を行う。

表 1.3.2-6 に、繰返し依存性を考慮しない解析結果(非考慮)、時時刻々と考慮した解析結果(考慮)、表 1.3.2-5 に示す値によって簡易的に考慮した解析結果(簡易)の最大応答値を比較して示す。ただし、免震層変位が解析モデルの適用範囲であるγ=270%(545mm)を超えているケースについては本検討に用いない。三者の最大応答加速度の差はほとんどない。免震層変位については、簡易評価法の方が繰返し依存性を時時刻々と評価した解析結果よりやや値が大きい傾向があるが、その差は 6%以下と小さい。図 1.3.2-4 に、繰返し依存性の評価手法の違いによる応答値を比較して示す。最大応答加速度は、評価手法による明確な差は見られない。免震層変位、累積変形量については、繰返し依存性を考慮した場合に増加する傾向であり、時時刻々と評価した応答値と簡易的に評価した応答値はほぼ同等の結果を示している。

図 1.3.2-5 に、各解析手法による三連動地震の 1.5 倍入力時のせん断応力度－ひずみ関係を、図 1.3.2-6 に四連動地震入力時のせん断応力度－ひずみ関係を示す。ただし、解析モデルの適用範囲を超えているケースは除く。三連動地震の AIC003 1.5 倍入力のケース、四連動地震の OSKH02、SZO024 入力のケースにおいて、繰返し依存性を簡易評価した解析結果は、繰返し依存性を時時刻々と評価した解析結果のループに近い形状を示し、繰返し依存性を考慮しない解析結果よりも最大変位が増大していることがわかる。吸収エネルギー量が小さい三連動の KGIN 1.5 倍入力、四連動の KGIN 入力のケースでは、三者はほぼ同様のループとなっている。

図 1.3.2-7～1.3.2-11 に、三連動地震の 1.5 倍入力、および OSKH02 四連動を入力したケースの免震層変位、免震層の累積変形量、高減衰ゴム系積層ゴムの等価剛性および等価減衰定数の低下率の時刻歴を示す。等価剛性の低下率 C_K、および等価減衰定数の低下率 C_h は、繰返し依存性非考慮の場合は 1.0 のまま一定であり、繰返し依存性を時時刻々と考慮する場合は、累積吸収エネルギーが増加するに従って低下していく。繰返し依存性を簡易的に評価する場合は、依存性を時時刻々と評価する場合の解析における下限値で一定となる。ただし、KGIN 1.5 倍入力のケースでは、累積吸収エネルギーが 5N/mm^2 より小さいため、簡易評価では繰返し依存性による低減を行わないので、等価剛性および等価減衰定数の低下率は 1.0 で一定である。免震層変位の時刻歴波形は、どのケースでも繰返し依存性の評価手法に関わらずほぼ同等の波形を示している。図 1.3.2-7 に示す、OSKH02 1.5 倍入力のケースでは繰返し依存性を簡易評価した解析結果の方が、免震層変位の最大値が繰返し依存性を考慮しない解析結果よりも 4mm 小さい。しかし、免震層変位の時刻歴波形では、繰返し依存性を簡易評価した解析結果の方が繰返し依存性を考慮しない解析結果よりも全体的に変位が増幅し、累積変形量が 1.15 倍となっている。よって、最大変位は繰返しを考慮しないケースよりも小さいが、免震層変位は時刻歴の全域にわたって増大していることから、他のケースと同様に繰返し依存性により免震層変位が増大していることが確認できる。

以上より、図 1.3.2-3 に示す手法により繰返し依存性を簡易的に評価した解析結果は、繰返し

依存性を考慮しない場合よりも免震層変位を増大させ、繰返し依存性を時時刻々と評価した解析結果と近い応答値を示すことを確認した。ただし、簡易評価は復元力特性値の低下率を、繰返し依存性を時時刻々と評価する解析の下限値で一定とするため、免震層の変位をやや大きく評価する傾向がある。

表 1.3.2-5　簡易評価による等価剛性、等価減衰定数の低下率

入力地震動	倍率	E/V (N/mm^2)	C_K	C_h
OSKH02	1.00	9.57	0.930	0.963
	1.25	16.20	0.912	0.951
	1.50	24.61	0.890	0.938
AIC003	1.00	6.87	0.950	0.973
	1.25	9.99	0.927	0.961
	1.50	13.99	0.917	0.955
SZO024	1.00	9.43	0.931	0.963
	1.25	13.33	0.919	0.956
	1.50	17.47	0.908	0.949
KGIN1F	1.00	1.39	1.000	1.000
	1.25	2.48	1.000	1.000
	1.50	3.92	1.000	1.000
OSKH02（四連動）	1.00	18.60	0.906	0.947
AIC003（四連動）	1.00	－	－	－
SZO024（四連動）	1.00	10.83	0.925	0.960
KGIN1F（四連動）	1.00	3.63	1.000	1.000

(※繰返しを考慮しない解析で、解析モデルの適用範囲を超えているケースは除外)

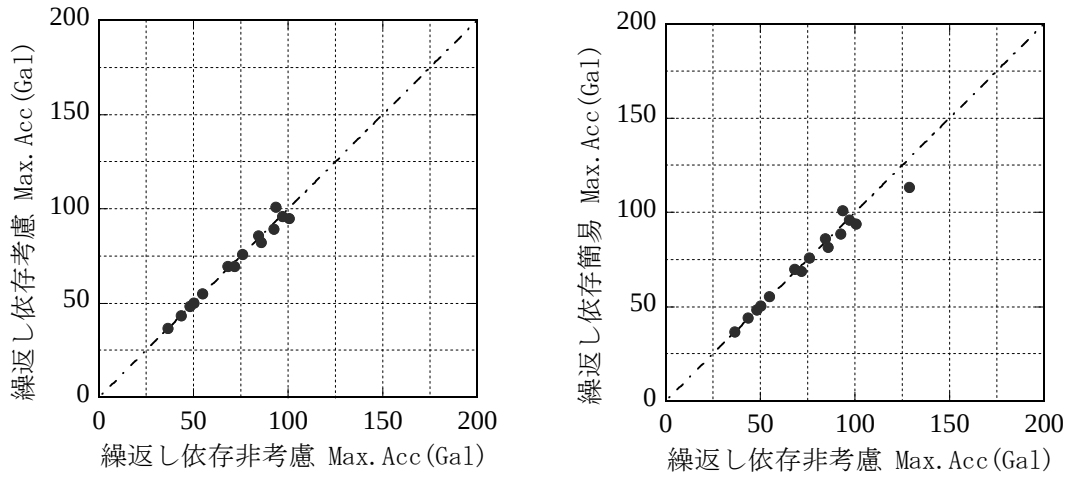
表 1.3.2-6　繰返し依存性の評価手法の違いによる最大応答値比較

入力			応答					
地震波	倍率	加速度	質点加速度(Gal)			免震層変位(mm)		
		(Gal)	非考慮	考慮	簡易	非考慮	考慮	簡易
OSKH02	1.00	98.49	76.28	75.64	75.70	304.64	315.95	334.84
					(1.00)			(1.06)
	1.25	123.11	97.30	95.92	95.81	426.45	444.88	465.73
					(1.00)			(1.05)
	1.50	147.73	128.83	－	112.92	540.36	545以上	536.06
					(－)			(－)
AIC003	1.00	199.40	54.82	54.92	55.30	153.34	171.43	180.09
					(1.01)			(1.05)
	1.25	249.25	68.43	69.34	69.74	255.56	286.80	298.41
					(1.01)			(1.04)
	1.50	299.10	84.38	85.46	86.02	352.24	397.01	406.91
					(1.01)			(1.02)
SZO024	1.00	576.78	71.69	69.31	68.54	276.65	285.07	288.55
					(0.99)			(1.01)
	1.25	720.98	85.96	82.10	81.38	361.47	373.84	376.56
					(0.99)			(1.01)
	1.50	865.17	100.63	94.93	93.83	444.24	455.96	457.66
					(0.99)			(1.00)
KGIN1F	1.00	42.11	36.49	36.52	36.49	64.15	65.31	64.15
					(1.00)			(0.98)
	1.25	52.64	43.70	43.32	43.70	88.87	90.27	88.86
					(1.01)			(0.98)
	1.50	63.17	50.34	50.01	50.34	122.26	128.26	122.26
					(1.01)			(0.95)
OSKH02	1.00	133.00	93.81	100.68	100.90	406.93	487.77	491.58
（四連動）					(1.00)			(1.01)
AIC003	1.00	545.40	－	－	－	545以上	545以上	－
（四連動）					(－)			(－)
SZO024	1.00	640.30	92.59	89.26	88.51	399.90	413.03	417.60
（四連動）					(0.99)			(1.01)
KGIN1F	1.00	55.51	48.15	48.13	48.15	109.75	116.04	109.75
（四連動）					(1.00)			(0.95)

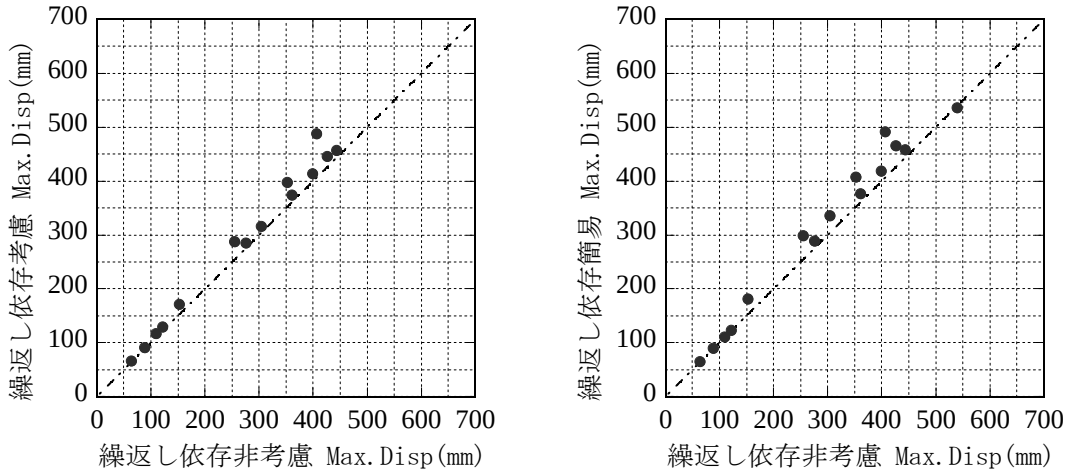
※(　)内は、(簡易／考慮)の値。

※解析モデルの適用範囲(γ=270%, δ=545mm)を超える解析結果については、本検討に用いない。

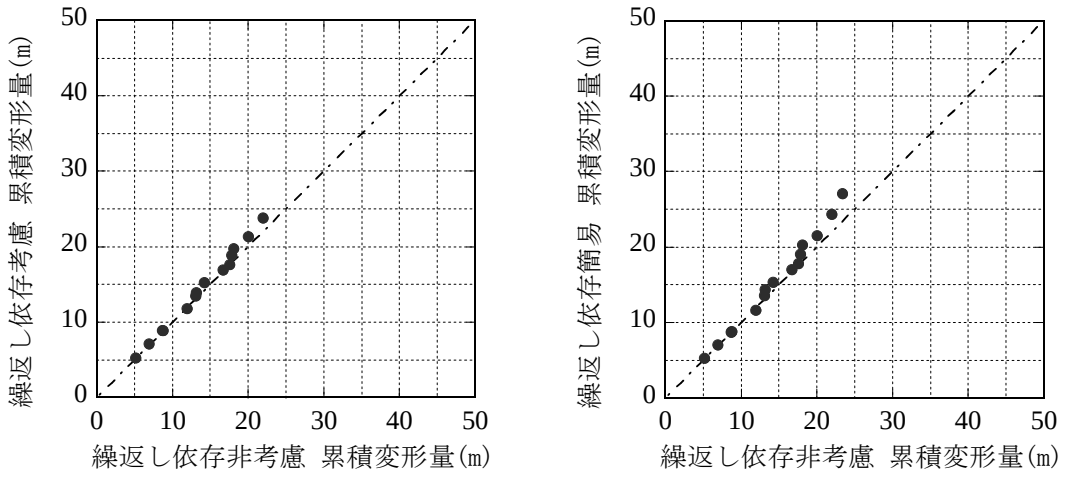
(適用範囲を超えるケース : OSKH02 1.5 倍(考慮)、AIC003 四連動(非考慮)、AIC003 四連動(考慮)、AIC003 四連動(簡易))



(a) 最大応答加速度の比較

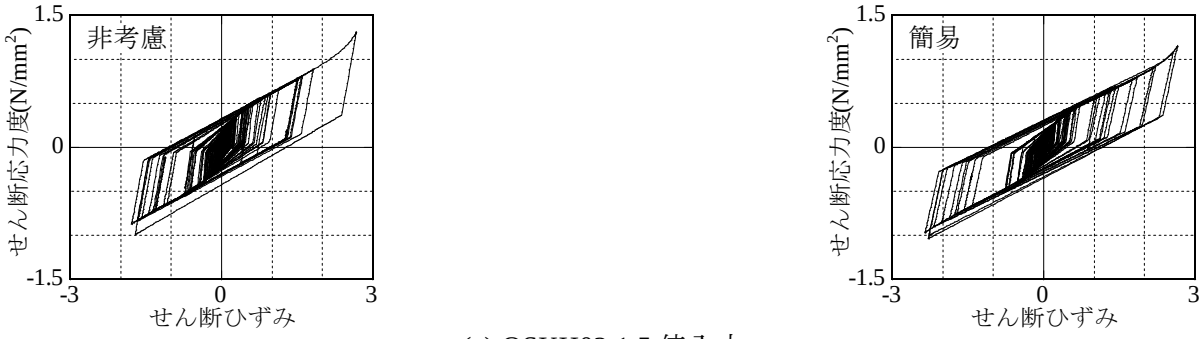


(b) 免震層最大変位の比較

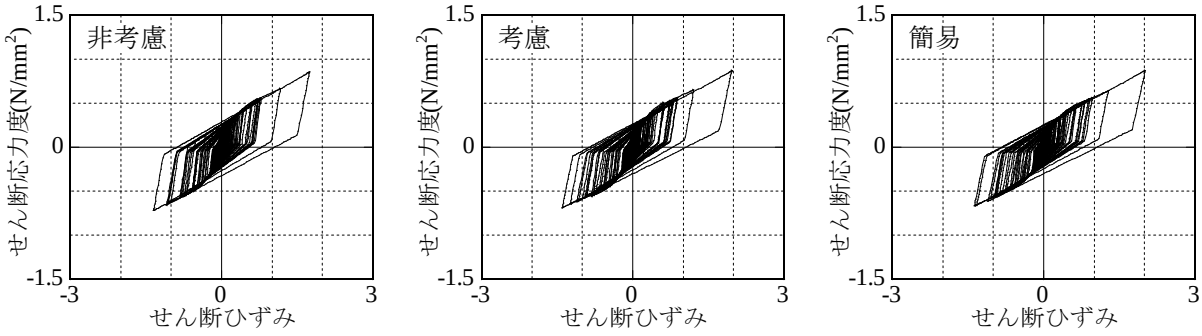


(c) 累積変形量の比較

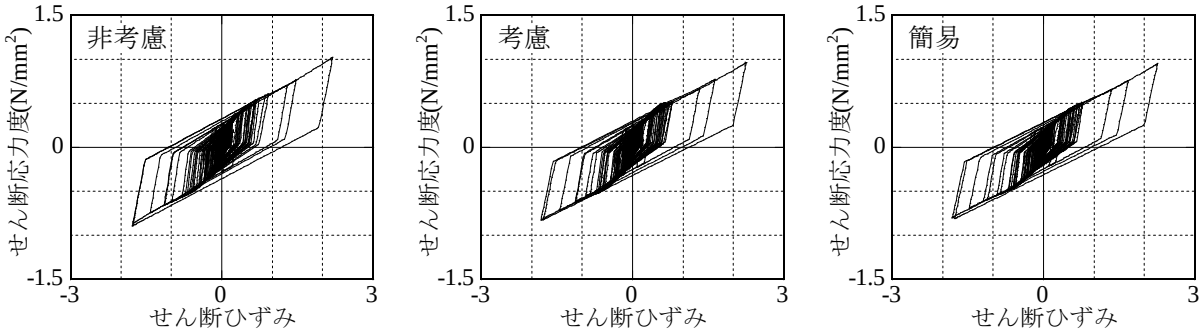
図 1.3.2-4　繰返し依存性の評価手法による応答値の違い



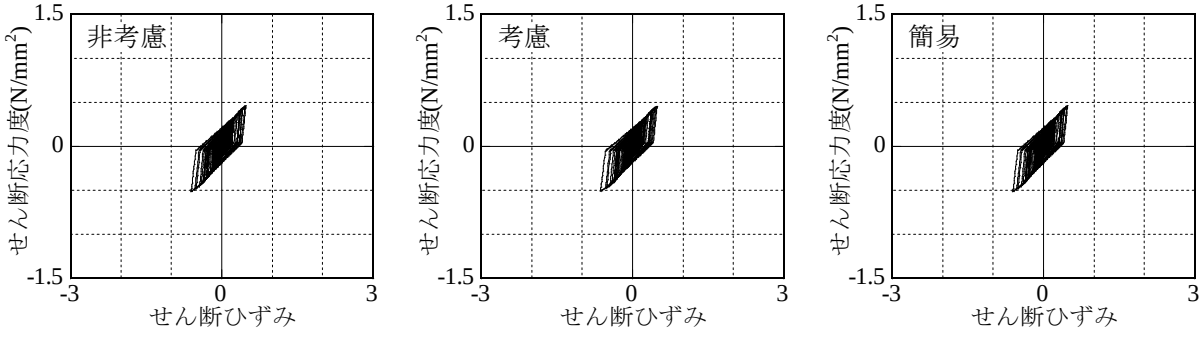
(a) OSKH02 1.5 倍入力



(b) AIC003 1.5 倍入力

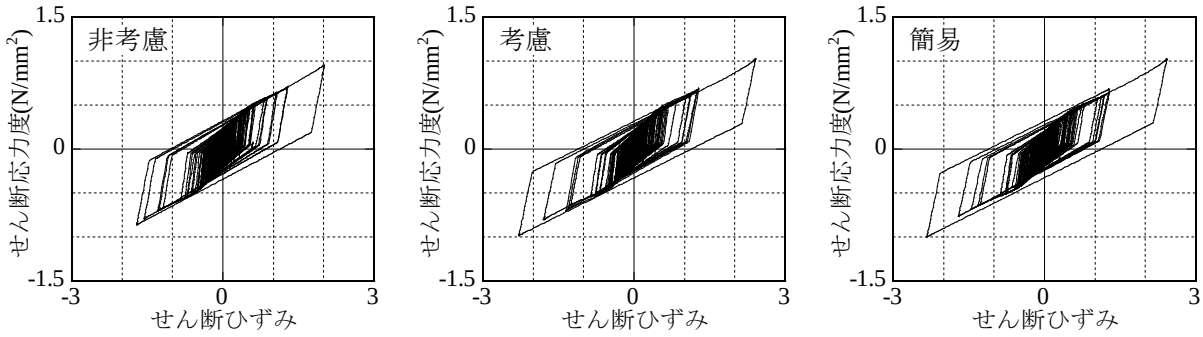


(c) SZO024 1.5 倍入力

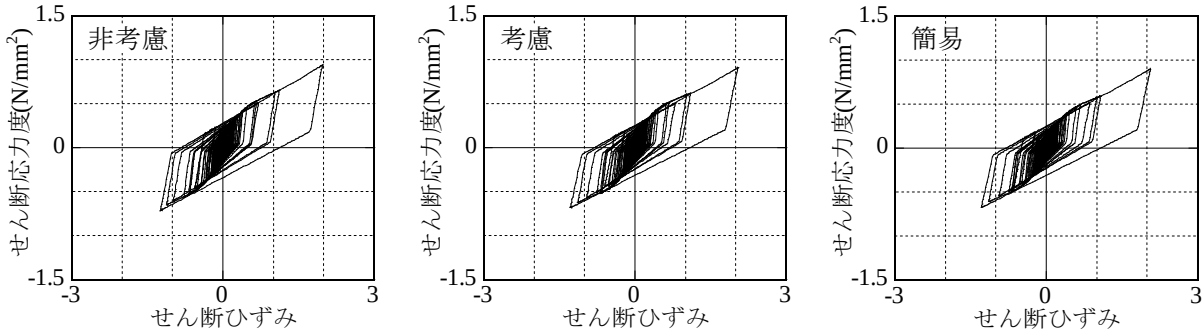


(d) KGIN1F 1.5 倍入力

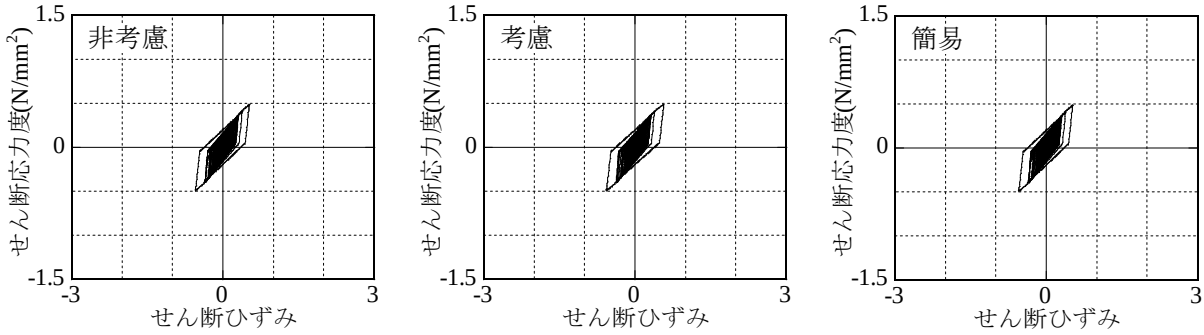
図 1.3.2-5　三連動地震 1.5 倍入力時の解析結果のせん断応力度－ひずみ関係
(OSKH02 1.5 倍入力の繰返し考慮のケースは解析モデル適用範囲外のため省略)



(a) OSKH02 四連動入力



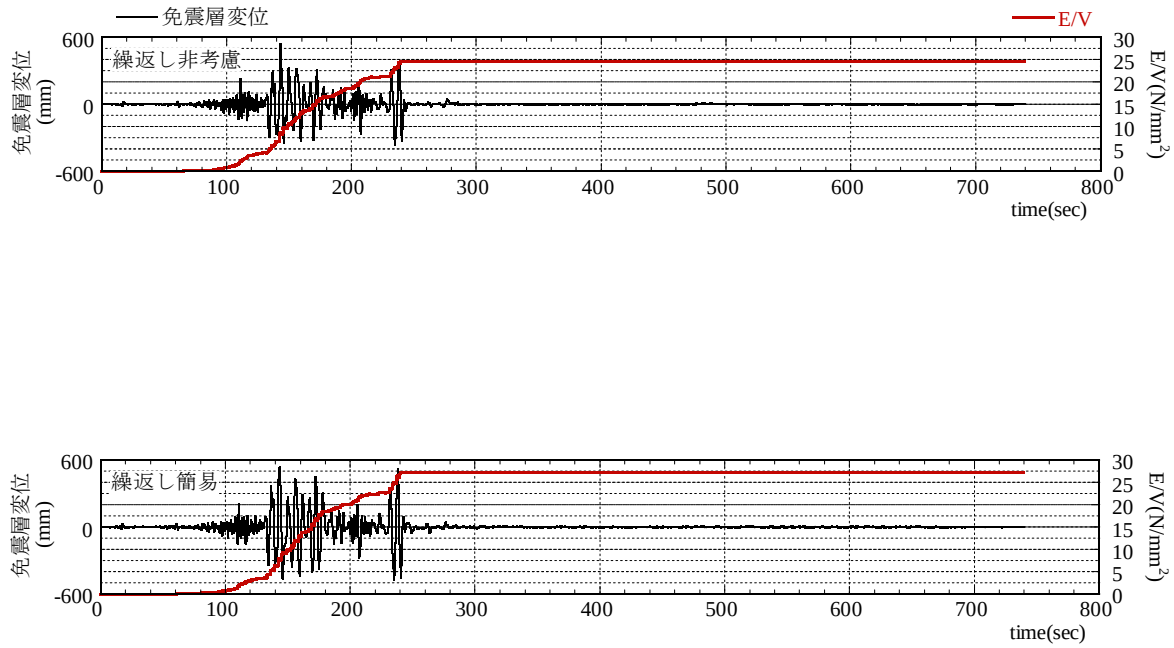
(b) SZO024 四連動入力



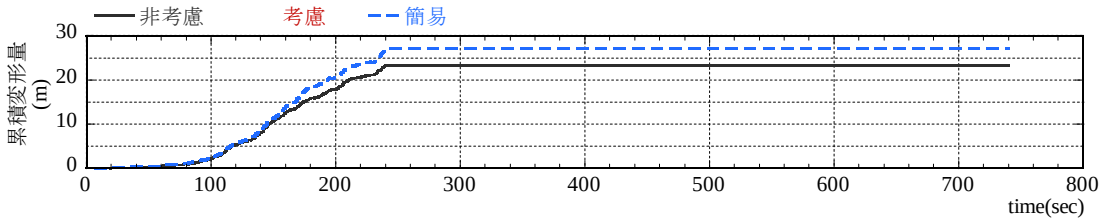
(c) KGIN 四連動入力

図 1.3.2-6　四連動地震入力時の解析結果のせん断応力度－ひずみ関係

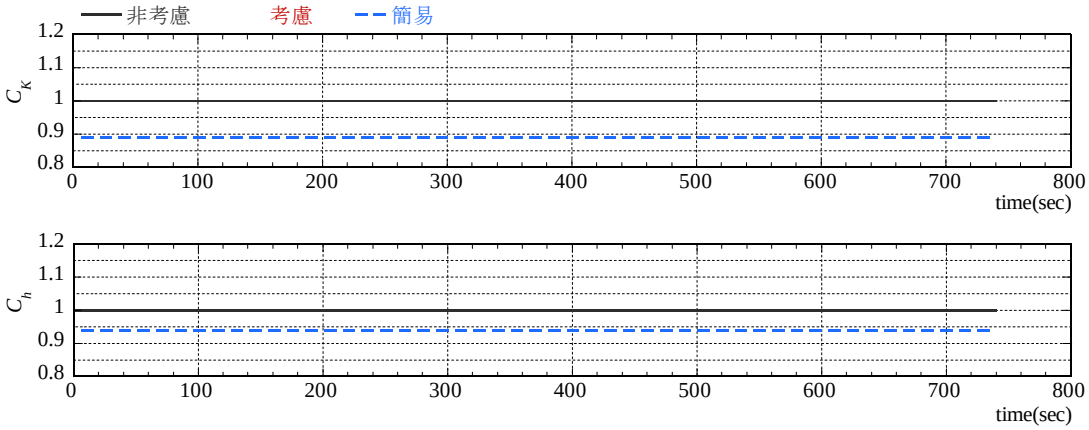
(AIC003 四連動入力のケースは解析モデル適用範囲外のため省略)



(a) 免震層変位および E/V

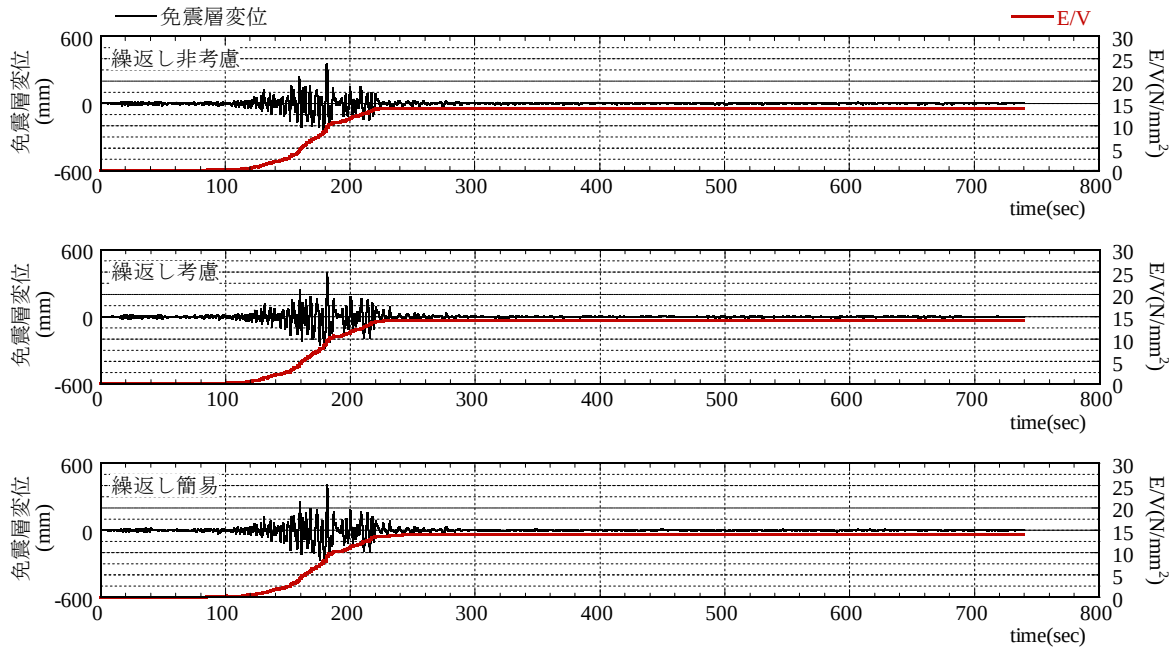


(b) 免震層累積変形量

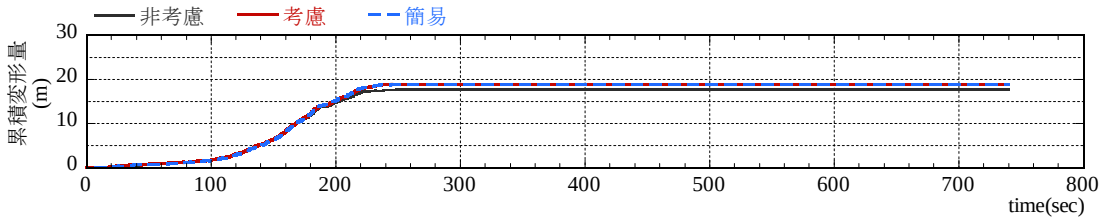


(c) 等価剛性低下率 C_K、等価減衰定数低下率 C_h

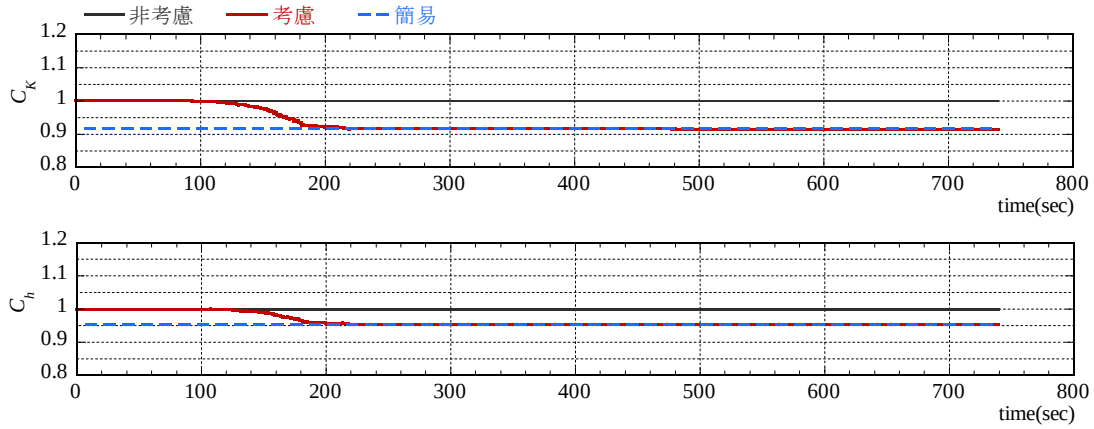
図 1.3.2-7　OSKH02 1.5 倍入力時の評価手法の違いによる各応答時刻歴



(a) 免震層変位および E/V

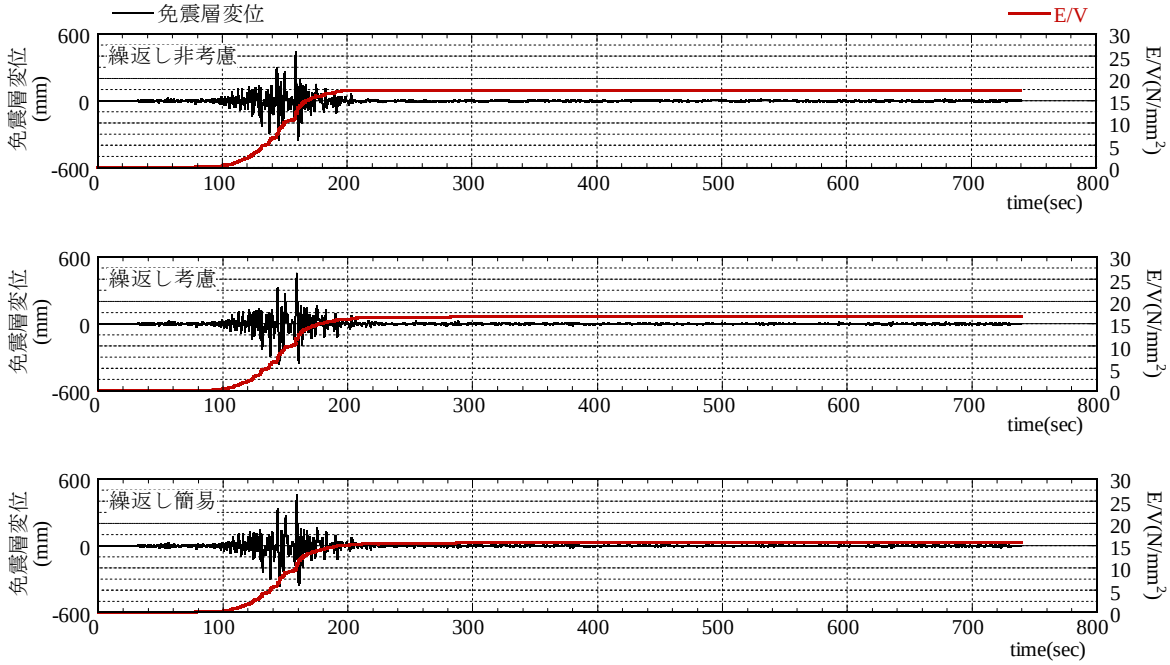


(b) 免震層累積変形量

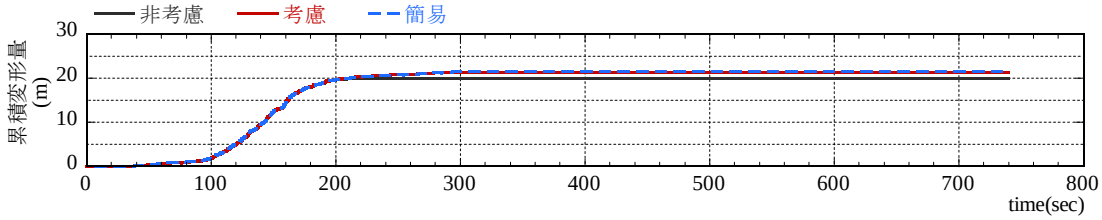


(c) 等価剛性低下率 C_K、等価減衰定数低下率 C_h

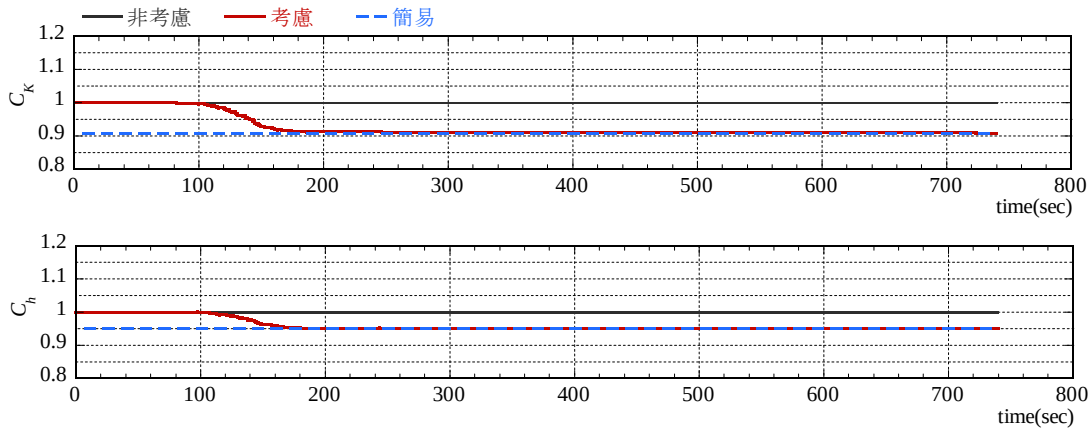
図 1.3.2-8　AIC003 1.5 倍入力時の評価手法の違いによる各応答時刻歴



(a) 免震層変位および E/V

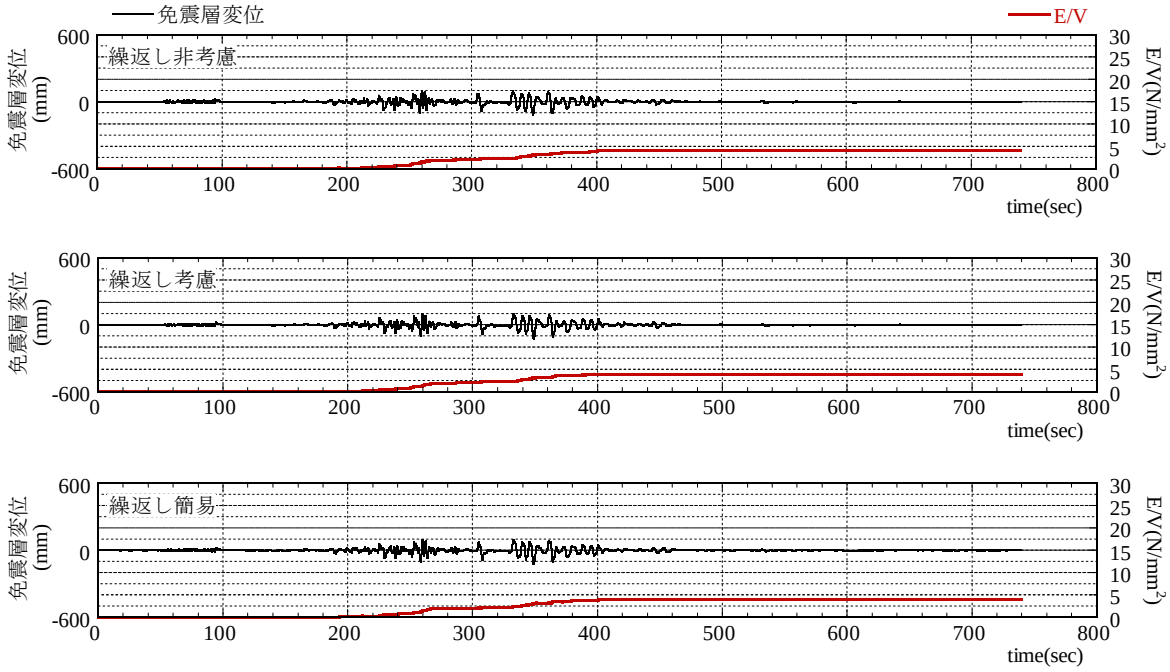


(b) 免震層累積変形量

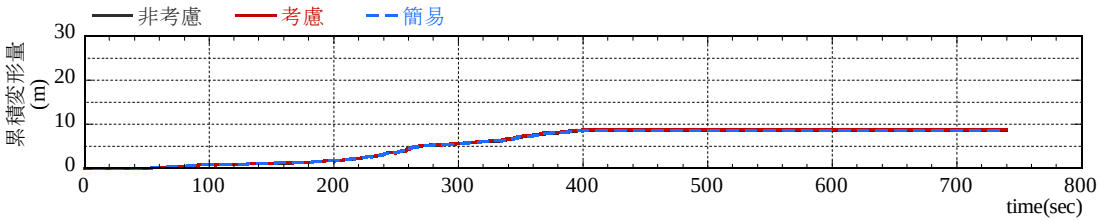


(c) 等価剛性低下率 C_K、等価減衰定数低下率 C_h

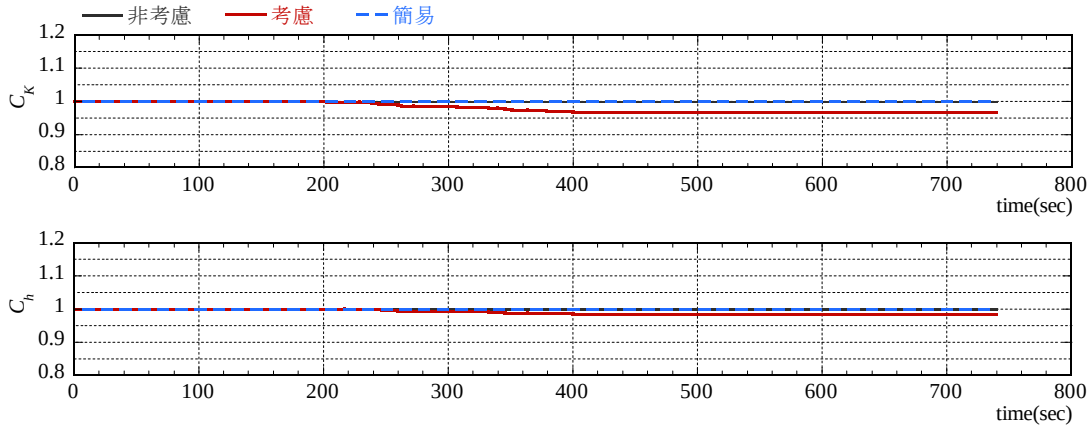
図 1.3.2-9　SZO024 1.5 倍入力時の評価手法の違いによる各応答時刻歴



(a) 免震層変位および E/V

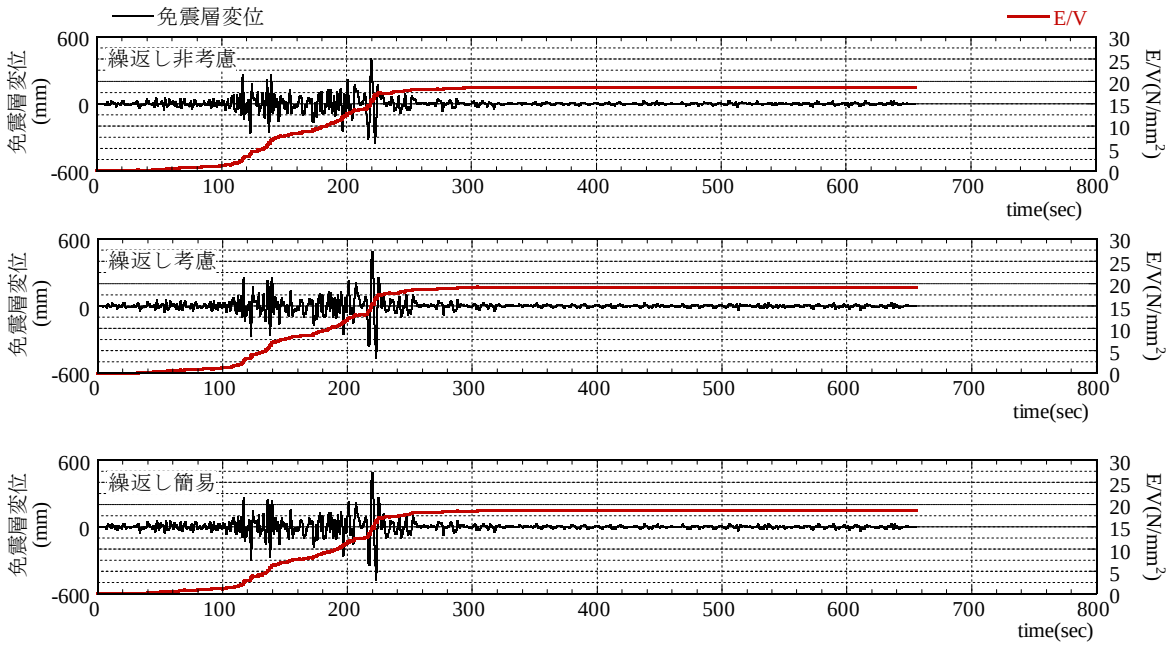


(b) 免震層累積変形量

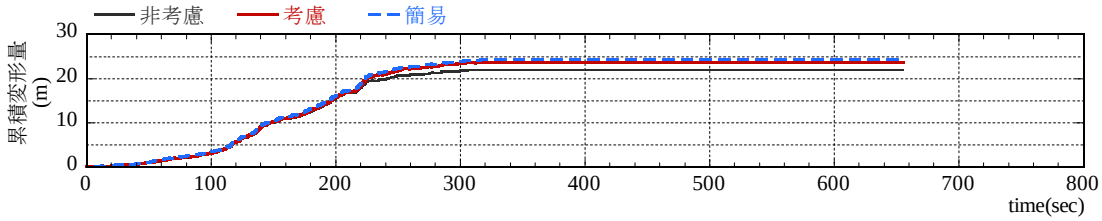


(c) 等価剛性低下率 C_K、等価減衰定数低下率 C_h

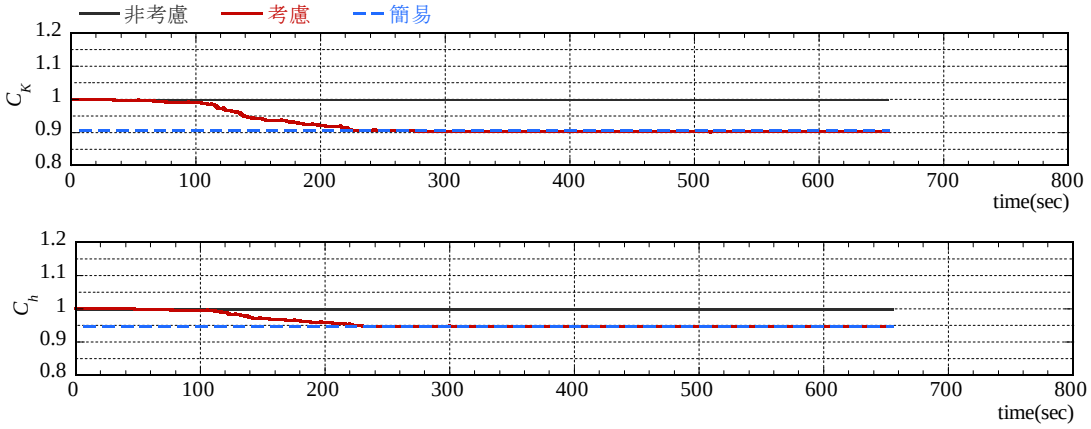
図 1.3.2-10　KGIN 1.5 倍入力時の評価手法の違いによる各応答時刻歴



(a) 免震層変位および E/V



(b) 免震層累積変形量



(c) 等価剛性低下率 C_K、等価減衰定数低下率 C_h

図 1.3.2-11　OSKH02 四連動入力時の評価手法の違いによる各応答時刻歴

(4) まとめ

繰返し依存性による高減衰ゴム系積層ゴムの特性変動を簡易的に評価する手法として、累積吸収エネルギーの値(解析終了時の 95%値)を基に、高減衰ゴム系積層ゴムの等価剛性および等価減衰定数の低下率を設定し、地震応答解析時にソフトケースのばらつきのひとつとして考慮する手法を示した。

簡易評価による解析結果は、繰返し依存性を考慮しない解析結果よりも免震層最大変位と免震層の累積変形量を増大させ、繰返し依存性を時時刻々と考慮する解析結果に近い応答値を与えることを確認した。ただし、簡易評価は繰返し依存性を時時刻々と考慮する場合の等価剛性と等価減衰定数の低下率の下限値を、解析開始時から一定値として用いるため、免震層変位をやや大きめに評価する。

本検討で用いた長周期地震時に予想される高減衰ゴム系積層ゴムの繰返しによる特性変動は、等価剛性で－5%～－10%程度、等価減衰定数で－5%程度と比較的小さいことから、ソフトケースの検討において他のばらつき値(製品ばらつき、経年変化、環境温度)の方が建物応答に大きく影響する可能性が高い。今後は他のばらつき値を考慮したソフトケースにおける繰返し依存性の影響を確認する必要がある。また、今回の検討は 1 質点の剛体モデルにより実施したが、今後は多質点モデルによる検討を追加し、高層建物応答への影響についても確認する必要がある。

参考文献

1.3.2-1) 株式会社ブリヂストン：高減衰ゴム系積層ゴム支承(X0.6R)技術資料

1.3.3 天然ゴム系積層ゴム＋鉛ダンパー

(1) はじめに

第Ⅲ部第 1 章 1.3.7、第 2 章 2.3.4 および第 3 章 3.3.4 の検討では、

1) 実大鉛ダンパーの繰返し加振、地震応答変位加振

2) 実大鉛ダンパーの繰返し依存性評価モデルの構築

3) 繰返しによる特性変化を考慮した長周期地震動応答評価

を行った。

1)の実験より正弦波繰返し加振、地震応答変位加振において加振中の耐力低下が確認された。上記 2)の評価モデルは、実大ダンパーの実験結果に基づき、時々刻々のダンパー累積吸収エネルギーに応じて復元力特性を変化させており、モデルが複雑なものとなっている。本検討では、繰返し依存性による鉛ダンパーの降伏耐力の変化を簡易的に取り込むための検討を行った。

(2) 提案した繰返しによる鉛ダンパーの耐力劣化評価

評価モデルにおける繰返しによる耐力低下は、速度反転時の変形およびダンパーの吸収エネルギー量から、以下のように降伏荷重の変化率 r_Q_d を算出しており、実大鉛ダンパーの正弦波繰返し加振、ならびに地震応答変位加振との整合性を確認している。降伏荷重の変化率の求め方を以下に示す。

降伏荷重の変化率 r_Q_d と吸収エネルギーE の関係を図 1.3.3-1 に示す折れ線にて表現する。折れ点の位置は図中の①～④の位置で水平変形により変化する。折れ線の座標（E,r_Q_d）は式(1.3.3-1)～式(1.3.3-4)にて表現され、水平変形 d(m)をパラメータとして、漸増連続正弦波加振結果に整合するように定めた。

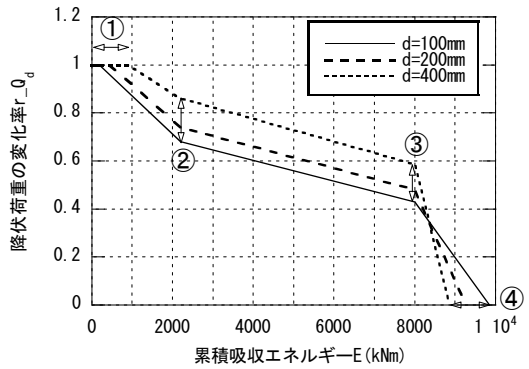


図 1.3.3-1 累積吸収エネルギーと降伏荷重の変化率

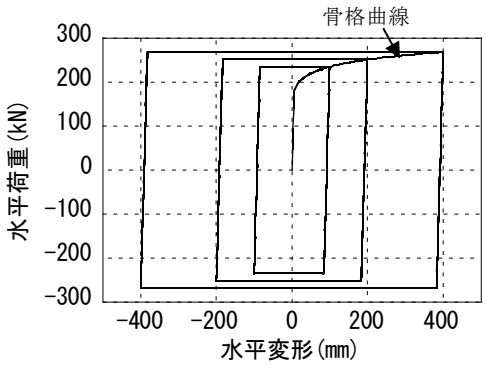


図 1.3.3-2 骨格曲線と履歴形状

①：耐力劣化開始点(E1,r_Q_d1=1.0)

$$E1 = -37 + 2322|d| \quad (0.1 \leqq |d| \leqq 0.4)$$

195（$|d|$<0.1），892（$|d|$>0.4）（単位:kNm） (1.3.3-1)

②：第 2 折れ点(E2=2205(kNm), r_Q_d2)

$$r\_Q_d 2 = 0.62 + 0.60|d| \quad (0.1 \leqq |d| \leqq 0.4)$$

0.680（$|d|$<0.1），0.860（$|d|$>0.4） (1.3.3-2)

③：第 3 折れ点(E3=8000(kNm), r_Q_d3)

$$r\_Q_d 3 = 0.375 + 0.525|d| \quad (0.1 \leqq |d| \leqq 0.4)$$

$$0.428\ (|d|<0.1),\quad 0.585\ (|d|>0.4) \tag{1.3.3-3}$$

④：耐力喪失点($E4$, $r\_Q_d4=0$)

$$E4 = 9683 - 2060|d| \quad (0.15 \leqq |d| \leqq 0.4)$$

$$9{,}854\ (|d|<0.15),\quad 8{,}859\ (|d|>0.4)\ (\text{単位:kNm}) \tag{1.3.3-4}$$

耐力劣化は変形が反転する際に生じ、その時点の水平変形 d および累積吸収エネルギーE により降伏荷重の変化率 r_Q_d を求める。変形反転後の降伏耐力 Q_d'は以下の式(1.3.3-5)とする。

$$Q_d' = Q_d \cdot r\_Q_d \tag{1.3.3-5}$$

また、鉛ダンパーの降伏荷重は、振幅依存性がある [1.3.3-1, 1.3.3-2]。これより、バイリニアモデルの骨格曲線を以下のように与える。

1) 初期は線形とし、剛性は U2426 ダンパーの初期剛性規格値 K_1 (=30,000kN/m)とする。
2) 降伏変形（d_y）を超えると、水平変形 d の n 乗として規定される。

骨格曲線 Q_d は以下の式(1.3.3-6)および式(1.3.3-7)となる。

$$d < d_y(\text{m}) \qquad Q_d = K_1 \cdot d \qquad (\text{kN}) \tag{1.3.3-6}$$

$$d \geqq d_y\ (\text{m}) \qquad Q_d = Q_o \cdot d^n \qquad (\text{kN}) \tag{1.3.3-7}$$

ただし、U2426 鉛ダンパーに対して、パラメータを以下のように設定する。

K_1 ：初期剛性　30,000 (kN/m)
d_y ：降伏変位　5.88×10^{-3} (m)
d ：水平変形(m)
Q_o ：293.1
n ：0.0958

式(1.3.3-7) 中の Q_o、n の算出にあたっては、実大鉛ダンパーの漸増正弦波加振試験結果と整合するように算出した。履歴曲線はバイリニアモデルとし、除荷剛性は常に初期剛性 K_1、二次剛性は 0 とする。骨格曲線と履歴形状を図 1.3.3-2 に示す。

漸増連続加振における解析モデルと実験結果との比較を図 1.3.3-3 に示す。解析モデルによる降伏荷重 Q_d は実験結果とよく整合している。図 1.3.3-4 より振幅±100mm、±200mm の解析モデル荷重変形関係は実験結果とよく整合している。±400mm 時の履歴形状は試験結果のループが変形に対して非対称となっているため、本解析モデルによる表現が難しい。しかし、ループ全体の大きさとしては、図 1.3.3-3 の結果と考え併せて妥当なものと考えられる。地震応答波加振において、実験結果と解析モデルによる荷重値との比較を図 1.3.3-5 に示す。繰返しによる耐力低下を考慮した解析モデル

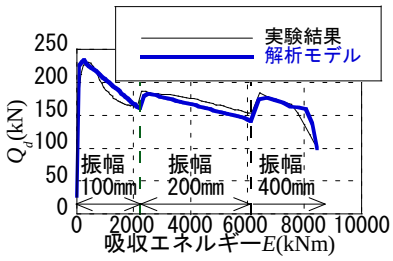


図 1.3.3-3 漸増正弦波加振
解析モデルと実験結果の比較

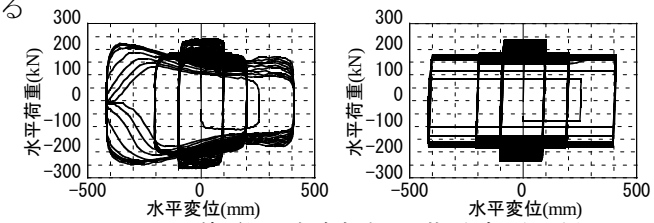


図 1.3.3-4 漸増正弦波加振　荷重変形関係

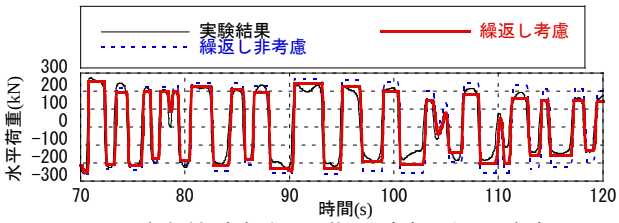


図 1.3.3-5 地震応答波加振　荷重時刻歴(地震波 1 回目)

は実験結果をよく表現できていることがわかる。

次に、天然ゴム系積層ゴムと鉛ダンパーからなる免震層を有する 1 質点系の長周期地震動による応答解析を実施した。天然ゴム系積層ゴムの復元力特性は線形弾性とし、積層ゴムによる免震周期は 4.0 秒とした。鉛ダンパーの負担せん断力係数は 0.033 である。繰返しによる降伏荷重の変化を考慮するモデルを用いた場合と非考慮の場合で応答解析結果を比較した。なお、両モデルとも降伏荷重の振幅依存性は考慮している。入力地震波は 4 波（OSKH02_AV、AIC003_AV、SZO024_AV、KGIN_AV）、入力倍率は 1.0、1.25、1.5 倍とした。

繰返し非考慮および考慮時の免震層最大水平変位および質点の最大加速度を表 1.3.3-1 に示す。繰返しによる降伏荷重の変化を考慮すると、免震層最大変位は非考慮時に対して 0.97～1.21 倍となった SZO024_AV の入力倍率 1.5 で最も大きな変形となり、繰返し考慮時に最大変形が 40.9cm、累積変形量は 19.4m であった。

応答最大加速度は 38～135cm/s^2 であった。繰返し特性考慮時のこれらの値は非考慮時に対して 0.95～1.05 倍であり、最大変位に比べてその変化は小さい。

複数の入力地震動のうち最大変形が最も大きい SZO024_AV 入力倍率 1.5 時の免震層せん断力係数－変形関係を図 1.3.3-6 に、免震層変位および鉛ダンパー1 台あたりの累積吸収エネルギー時刻歴を図 1.3.3-7 に示す。累積吸収エネルギーは、繰返し考慮により非考慮時と比べ 0.95～1.12 倍になった。検討ケースのうち最大は約 3,500kNm であった。正弦波±400mm 時加振時の最終エネルギー吸収量は 8,850kNm であり、いずれの解析ケースもこの値を下回った。

表 1.3.3-1 繰返し考慮および非考慮時の最大応答値

入力地震動	入力倍率	免震層最大水平変位（cm）			応答最大加速度（cm/s^2）		
		繰返し非考慮	繰返し考慮	考慮/非考慮	繰返し非考慮	繰返し考慮	考慮/非考慮
OSKH02_AV	1.00	13.61	14.75	1.084	69.7	71.0	1.018
	1.25	22.43	24.93	1.111	93.3	97.9	1.049
	1.50	32.58	35.76	1.098	119.7	125.9	1.052
AIC003_AV	1.00	13.18	13.47	1.022	68.5	67.6	0.987
	1.25	17.39	16.93	0.973	79.9	76.3	0.955
	1.50	19.90	24.17	1.215	86.6	91.2	1.054
SZO024_AV	1.00	20.26	21.42	1.057	87.5	87.6	1.001
	1.25	27.95	29.92	1.070	107.7	107.9	1.002
	1.50	35.73	40.89	1.145	127.8	134.7	1.054
KGIN_AV	1.00	2.86	2.86	1.000	38.2	38.2	1.000
	1.25	3.29	3.29	1.000	39.7	39.7	1.000
	1.50	3.69	3.69	1.000	41.0	41.0	1.000

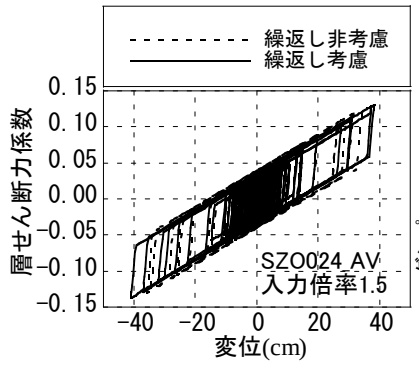


図 5.5.3-6 免震層せん断力係数-変位関係

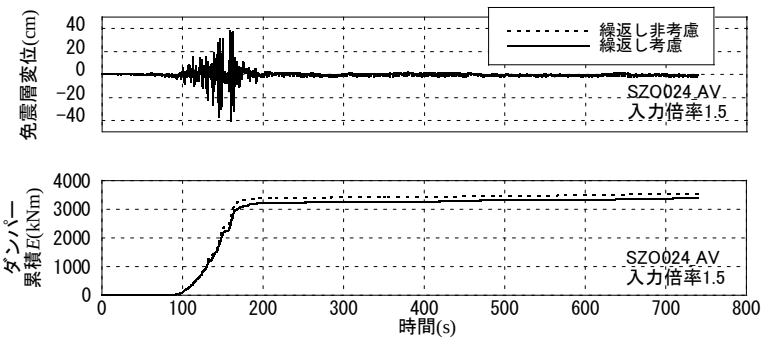


図 5.5.3-7 免震層変位および ダンパー1 台の累積吸収エネルギー

(3) 繰返し依存性を簡易的に取り込む手法

前節で示した繰返しによる耐力劣化を評価するモデルを用いた時刻歴応答解析では、免震層変形が反転する際の変形または累積吸収エネルギーからダンパーの降伏耐力を変化させることが必要となり、解析コードがやや複雑となる。本節では、一般的なダンパーのモデル化方法を考慮し、繰返し依存性を簡易的に取り込む手法の提案を行う。提案する解析手法の手順を以下に示す。

＝鉛ダンパーの繰返し依存性を簡易的に取り込む解析手法＝

ステップ①：繰返しを考慮しないモデルにより時刻歴応答解析を実施する。

ステップ②：①の解析結果より式（1）～(4)を用い、降伏耐力の変化率 r_Q_d を求める。r_Q_d 算出におけるダンパーの変形量 d と累積吸収エネルギーE は以下の 2 ケースが考えられる。

1) 手法 A： ダンパーの変形量 d は最大変形 d_{max}、ダンパーの累積吸収エネルギーE は最大変形発生時刻におけるダンパーの累積吸収エネルギーE_{dmax} とする。

2) 手法 B:： ダンパーの変形量 d は最大変形 d_{max}、ダンパーの累積吸収エネルギーE は解析終了時におけるダンパーの累積吸収エネルギーE_{total} とする。

ステップ③:②で求めた r_Q_d 分を初期状態から低減した降伏荷重により時刻歴応答解析を実施する。

ステップ④：③の解析結果が繰返し依存性を簡易的に取り込んだ応答とする。

繰返し依存性の簡易評価法のフローを図 1.3.3-8 に示す。

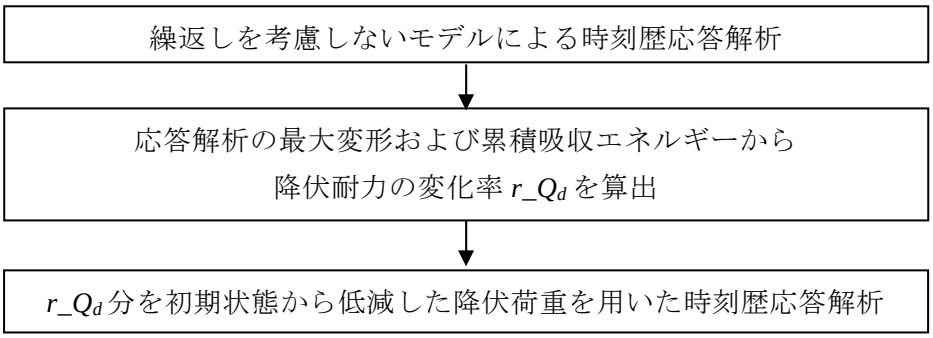


図 1.3.3-8　繰返し依存性の簡易評価法のフロー

(4) 簡易的手法による検討

上記の簡易的な評価手法による応答値を算出し、時々刻々のダンパーの復元力特性変化を表現しうるモデルを用いた場合と比較し、簡易手法の妥当性を検討する。

解析モデルは、1 質点系モデル（図 1.3.3-9）とし、諸元を表 1.3.3-2 に示す。入力地震動は、三連動地震の 4 波（OSKH02_AV、AIC003_AV、SZO024_AV、KGIN_AV）とし、入力倍率は 1.0 倍、1.25 倍、1.5 倍に加えて、四連動地震における 4 波（OSKH02、AIC003、SZO024、KGIN）の検討も実施した。四連動地震の入力倍率は 1.0 とした。

表 1.3.3-2 天然ゴム系積層ゴム＋鉛ダンパー解析モデル

想定建物	RC 造、10 階建て基礎免震
上部構造重量	46,000kN
鉛ダンパー台数	7 台
積層ゴム台数	10 台
積層ゴム直径(内径)	750mm(15mm)
積層ゴム面圧	10.1 N/mm^2
ゴムによる周期	4.0 秒
鉛ダンパー負担 せん断力係数	0.033

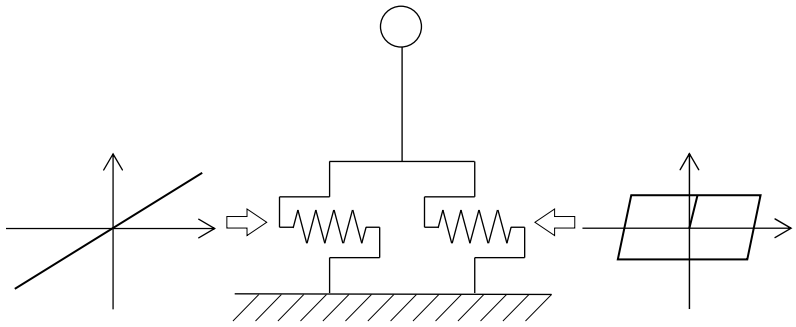


図 1.3.3-9　解析モデル模式図

表 1.3.3-3　簡易的手法のステップ①（繰返し非考慮モデル応答解析結果）と
ステップ②（降伏耐力の変化率 r_Q_d）による計算結果

入力地震動		入力倍率	繰返し非考慮モデルによる解析結果（ステップ①）				r_Q_d（ステップ②）	
			最大変形 d_{max}(cm)	最大変形時のダンパー吸収E E_{dmax}(kNm)	解析終了時のダンパー吸収E E_{total}(kNm)	E_{total}/E_{dmax}	手法A d_{max},E_{dmax} より算出	手法B d_{max},E_{total} より算出
OSKH02	三連動	1.00	13.6	634	1087	1.71	0.945	0.875
		1.25	22.4	920	1843	2.00	0.938	0.806
		1.50	32.6	1222	2793	2.29	0.938	0.788
	四連動	1.00	23.5	475	2148	4.52	1.000	0.769
AIC003	三連動	1.00	13.2	585	1153	1.97	0.951	0.863
		1.25	17.4	794	1690	2.13	0.936	0.802
		1.50	19.9	1267	2313	1.83	0.877	0.735
	四連動	1.00	54.7	5030	7105	1.41	0.726	0.627
SZO024	三連動	1.00	20.3	1030	1699	1.65	0.913	0.815
		1.25	28.0	1435	2616	1.82	0.890	0.769
		1.50	35.7	1837	3524	1.92	0.878	0.772
	四連動	1.00	27.7	1654	2270	1.37	0.860	0.783
KGIN	三連動	1.00	2.9	30	54	1.79	1.000	1.000
		1.25	3.3	48	90	1.87	1.000	1.000
		1.50	3.7	88	153	1.74	1.000	1.000
	四連動	1.00	4.5	35	145	4.17	1.000	1.000

前節で示した簡易的手法のステップ①（繰返し非考慮モデル）における応答解析結果、およびステップ②の 2 つの手法（A,B）で算出した降伏耐力の変化率 r_Q_d を表 1.3.3-3 に示す。

表 1.3.3-3 より、ステップ①における最大変形発生時刻におけるダンパーの累積吸収エネルギーE_{dmax} は 30～5,030 (kNm)であり、四連動地震の AIC003 が最大となった。また 3 連動では SZO024 の 1.5 倍入力時が最大であり、1,837kNm であった。解析終了時におけるダンパーの累積吸収エネルギーE_{total} は、54～7,105（kNm）であり、これも四連動地震の AIC003 が最大となった。また 3 連動では SZO024 の 1.5 倍入力時が最大であり、3,524kNm であった。KGIN の累積吸収エネルギーは他の 3 種類の波形よりも E_{dmax} および E_{total} ともにその値は小さな値となった。三連動地震時において解析終了時の累積吸収エネルギーと最大変形発生時刻の累積吸収エネルギーの比 E_{total}/E_{dmax} は、1.7～2.3 であった。四連動地震において AIC003 と SZO024 とでそれぞれ 1.41、1.37 であり、OSKH02 と KGIN ではそれぞれ 4.52、4.17 となり、解析終了時の累積吸収エネルギーと最大変形発生時刻の累積吸収エネルギーの比は四連動地震において入力波

の種類により異なった値となった。

ステップ①における免震層の最大変形は、四連動地震の AIC003 においては 54.7cm となったが、他のケースでは 36cm 以下の値であった。KGIN を入力とした場合では、三連動地震、四連動地震ともに 3～5cm となっており、累積吸収エネルギーと同様に、他の 3 種類の地震波に対して小さな値であった。

E_{dmax} より算出する手法 A で求めた降伏耐力の変化率 r_Q_d は 0.73～1.0 の値であった。一方、E_{total} より算出する手法 B では 0.63～1.0 となっている。手法 B による r_Q_d は、すべての入力時において手法 A の算出値よりも同等かもしくは小さな値となり、ステップ③における時刻歴応答解析のダンパー降伏耐力は小さく評価されることとなった。KGIN 波では 3 連動、4 連動ともに最大変位が小さくダンパーの累積吸収エネルギーが小さいために、r_Q_d は 1.0 と評価された。

続いて表 1.3.3-3 に示す r_Q_d により、ダンパーの耐力を初期から低減したモデルを用いて時刻歴応答解析を実施した（ステップ③）。結果を表 1.3.3-4～7 に示す。表中には、繰返しの影響を時々刻々考慮するモデル（表中「繰返し考慮」と示す。）を用いた解析結果も併せて示す。表 1.3.3-4 に免震層の最大変形を示す。AIC003 の 4 連動地震動では 70～80cm 程度の大きな最大変形となった。これ以外の入力時では、43cm 以下の最大変形であった。なお、積層ゴムの復元力特性はせん断ひずみが 250%を超えるとハードニング挙動を示し、非線形となる [1.3.3-3)-1.3.3-5)]が、本検討では弾性挙動をするものとして評価した結果である。ゴム厚さ 160mm とした場合、43cm の最大変形はせん断ひずみで 270%程度であり、AIC003 の 4 連動地震動以外の入力における積層ゴムの復元力特性は、弾性挙動から大きく逸脱したものではないと考えられる。繰返し考慮モデルに対して簡略的手法の免震層最大変形は、手法 A においては-18%～+1%の誤差となっており、簡略的手法の結果は繰返しモデルの結果に対してやや過小な値となっている。手法 B では、手法 A および繰返し考慮モデルよりも最大変形は大きく評価されており、繰返し考慮モデルに対して 0%～+19%の誤差であった。全体として手法 B の方が手法 A よりも最大変形は大きな値として評価する傾向にあることがわかる。

表 1.3.3-4　簡略的手法および繰返し評価モデルによる免震層最大変形

入力地震動		入力倍率	最大変位(cm)				
			繰返し考慮	簡略法 手法A	手法A 誤差(%)	簡略法 手法B	手法B 誤差(%)
OSKH02	三連動	1.00	14.7	14.6	-1.2	16.9	14.4
		1.25	24.9	24.7	-0.8	29.7	19.3
		1.50	35.8	35.0	-2.2	40.3	12.7
	四連動	1.00	28.6	23.5	-17.9	29.0	1.2
AIC003	三連動	1.00	13.5	13.5	0.3	14.0	3.8
		1.25	16.9	17.1	1.0	17.1	1.3
		1.50	24.2	20.9	-13.7	28.5	18.0
	四連動	1.00	69.1	70.6	2.3	82.3	19.1
SZO024	三連動	1.00	21.4	21.2	-0.9	22.7	6.0
		1.25	29.9	29.7	-0.7	32.0	7.1
		1.50	40.9	38.6	-5.5	42.6	4.2
	四連動	1.00	32.6	32.2	-1.1	34.3	5.3
KGIN	三連動	1.00	2.9	2.9	0.0	2.9	0.0
		1.25	3.3	3.3	0.0	3.3	0.0
		1.50	3.7	3.7	0.0	3.7	0.0
	四連動	1.00	4.5	4.5	0.0	4.5	0.0

表 1.3.3-5　簡略的手法および繰返し評価モデルによる上部質点最大絶対加速度

入力地震動		入力倍率	絶対加速度(cm/s^2)				
			繰返し考慮	簡略法 手法A	手法A 誤差(%)	簡略法 手法B	手法B 誤差(%)
OSKH02	三連動	1.00	71.0	70.3	-0.9	73.9	4.2
		1.25	97.9	96.9	-1.0	104.8	7.0
		1.50	125.9	123.4	-2.0	131.0	4.0
	四連動	1.00	102.4	96.1	-6.1	101.4	-0.9
AIC003	三連動	1.00	67.6	67.7	0.1	65.7	-2.8
		1.25	76.3	76.7	0.5	71.9	-5.8
		1.50	91.2	84.5	-7.4	98.9	8.4
	四連動	1.00	201.1	204.9	1.9	229.9	14.3
SZO024	三連動	1.00	87.6	86.8	-0.8	87.0	-0.7
		1.25	107.9	108.0	0.1	109.2	1.2
		1.50	134.7	130.4	-3.2	136.2	1.1
	四連動	1.00	115.3	113.2	-1.8	115.5	0.2
KGIN	三連動	1.00	38.2	38.2	0.0	38.2	0.0
		1.25	39.7	39.7	0.0	39.7	0.0
		1.50	41.0	41.0	0.0	41.0	0.0
	四連動	1.00	43.6	43.6	0.0	43.6	0.0

表 1.3.3-6　簡略的手法および繰返し評価モデルによるダンパー1 台の累積吸収エネルギー

入力地震動		入力倍率	ダンパー累積吸収E(kNm)				
			繰返し考慮	簡略法 手法A	手法A 誤差(%)	簡略法 手法B	手法B 誤差(%)
OSKH02	三連動	1.00	1168	1121	-4.0	1174	0.6
		1.25	2033	1864	-8.3	1959	-3.7
		1.50	3114	2881	-7.5	2981	-4.3
	四連動	1.00	2428	2148	-11.5	2372	-2.3
AIC003	三連動	1.00	1158	1178	1.7	1101	-4.9
		1.25	1718	1667	-2.9	1568	-8.7
		1.50	2403	2237	-6.9	2061	-14.3
	四連動	1.00	7007	6499	-7.3	6267	-10.6
SZO024	三連動	1.00	1770	1715	-3.1	1667	-5.8
		1.25	2576	2514	-2.4	2342	-9.1
		1.50	3382	3335	-1.4	3094	-8.5
	四連動	1.00	2252	2151	-4.5	2037	-9.5
KGIN	三連動	1.00	54	54	0.0	54	0.0
		1.25	90	90	0.0	90	0.0
		1.50	153	153	0.0	153	0.0
	四連動	1.00	145	145	0.0	145	0.0

質点の最大絶対加速度を表 1.3.3-5 に示す。四連動の AIC003 入力時では最大加速度が 200cm/s^2 を超えている。ただし、他の入力時では、140 cm/s^2 以下となった。AIC003 四連動を除けば、繰返し考慮モデルに対して簡略法手法 A では-8%～+1%、手法 B では-6%～+8%の誤差となっている。最大変位と同様に全体として手法 B の方が手法 A よりも大きな値として評価する傾向にあることがわかる。

ダンパー1 台あたりの累積吸収エネルギーを表 1.3.3-6 に示す。四連動の AIC003 入力時では約 7,000kNm であり、他の入力時に対して 2 倍以上の値となった。手法 A では繰返し考慮モデルに対し-12%～+2%となり、手法 B では-15%～0%となった。誤差が 1 割を超えるケースは、

表 1.3.3-7　簡略的手法および繰返し評価モデルによるダンパーの累積変形量

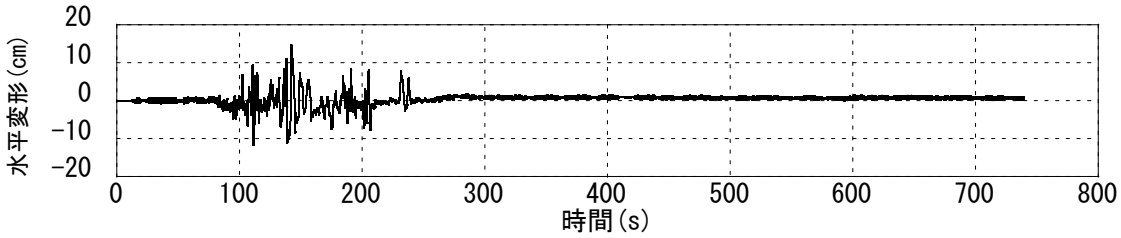
入力地震動		入力倍率	累積変形量(m)				
			繰返し考慮	簡略法 手法A	手法A 誤差(%)	簡略法 手法B	手法B 誤差(%)
OSKH02	三連動	1.00	9.3	9.1	-2.5	9.4	1.5
		1.25	13.3	12.3	-7.2	13.6	2.5
		1.50	18.5	16.4	-11.2	18.6	0.5
	四連動	1.00	16.2	16.2	-0.3	16.7	2.7
AIC003	三連動	1.00	11.6	14.2	21.9	11.5	-1.1
		1.25	14.3	16.1	12.2	12.3	-14.4
		1.50	17.0	17.2	1.0	15.4	-9.4
	四連動	1.00	43.3	42.5	-1.9	45.3	4.5
SZO024	三連動	1.00	11.3	11.0	-2.3	11.4	0.9
		1.25	15.4	14.7	-4.4	15.5	0.4
		1.50	19.4	18.6	-4.2	19.2	-0.9
	四連動	1.00	18.7	19.6	4.6	19.1	2.3
KGIN	三連動	1.00	10.4	10.4	0.0	10.4	0.0
		1.25	10.2	10.2	0.0	10.2	0.0
		1.50	10.2	10.2	0.0	10.2	0.0
	四連動	1.00	9.9	9.9	0.0	9.9	0.0

手法 A では OSKH02 の四連動の場合であり、手法 B では三連動 AIC003×1.5 入力時、および四連動 AIC003 の場合であった。その他のケースで誤差は 1 割以内となっている。全体として、手法 A の方が手法 B に対して累積吸収エネルギーはやや大きめの値として評価する傾向にある。

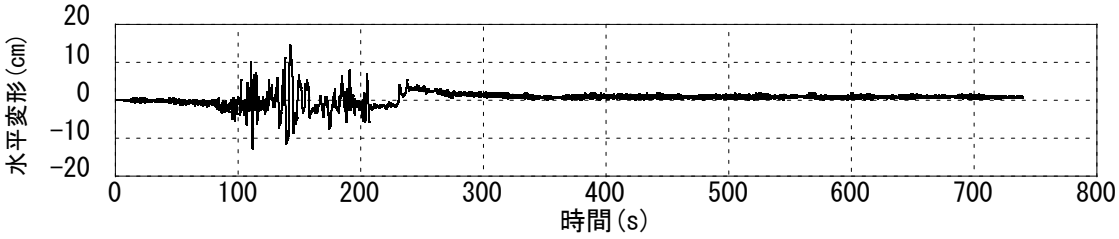
免震層の累積変形量を表 1.3.3-7 に示す。ここでの累積変形量は、免震層の累積吸収エネルギーが最終値の 95%を超えた時点での値である。AIC003 四連動入力以外において累積変形量は 10～20m となっている。AIC003 四連動では 45m 程度であった。手法 A、B ともに簡略的手法で求めた累積変形量は繰返し考慮モデルによる結果に対して 2 割程度のばらつきを有する。入力波形 SZO024 において簡略的手法の結果と繰返し考慮モデルの結果の誤差は、他のケースよりも小さくなっている。

繰返し考慮モデルを用いた解析と簡略的手法による解析との時刻歴波形を図 1.3.3-10～18 に示す。図(a)～(c)に繰り返し考慮モデル、簡略法 A および B を用いた場合の水平変形をそれぞれ示す。三連動の OSKH02、AIC003、SZO024 と四連動の SZO024 において 100s～200s で免震層に大きな変形が生じている。一方、四連動の OSKH02、AIC003 は 100s～250s の 150 秒間に大きな免震層変形が生じていることがわかる。手法 A は、最大変形および最大変形時の吸収エネルギーを基にした降伏荷重の低減率を設定しており、三連動 SZO024 入力時のように最大変形発生時の後に免震層変位が収束する場合には繰り返し考慮モデルとよい対応を示すものと考えられる。一方、手法 B では、OSKH02 の 1.0 倍入力および 1.5 倍入力時において図(e)に示すダンパーの吸収エネルギーでは手法 A よりも最終的な吸収エネルギーは繰返し考慮モデルによる結果に近くなった。ただし、大きな揺れが終了する 230 秒付近まで繰返し考慮時、簡略法 A、B ともにほとんど差異はみられない。

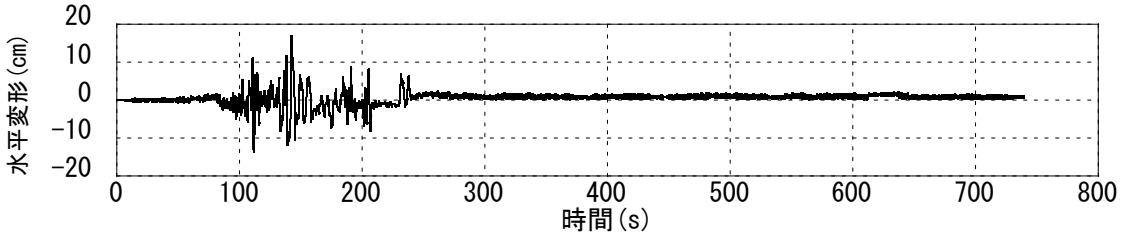
図 1.3.3-19～21 にダンパーの荷重変形関係を示す。履歴形状は概して手法 A の方が繰返し考慮モデルに近い。手法 B は初期状態からの降伏耐力低減量が大きいために、繰返し考慮モデルおよび手法 A よりも荷重値が全体として低い値となっていることがわかる。



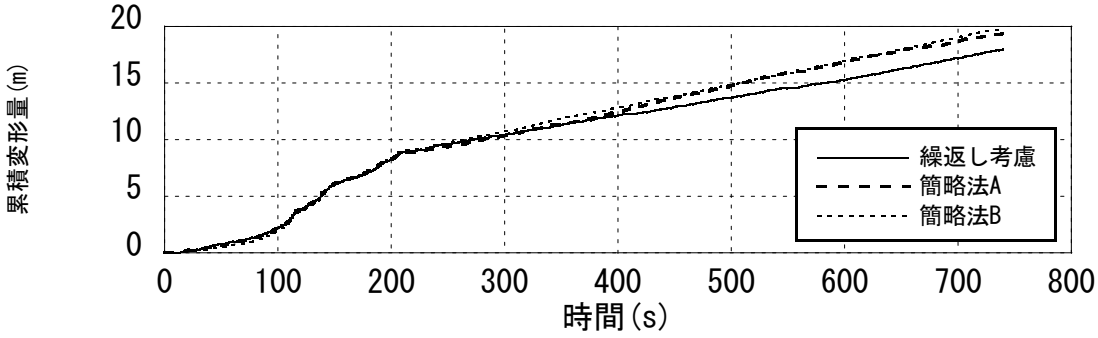
(a)繰返し考慮モデル　水平変位



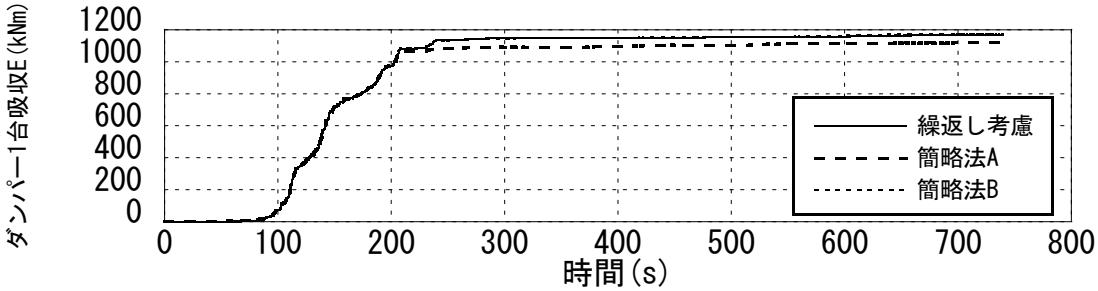
(b)簡略法手法 A　水平変位



(c)簡略法手法 B　水平変位

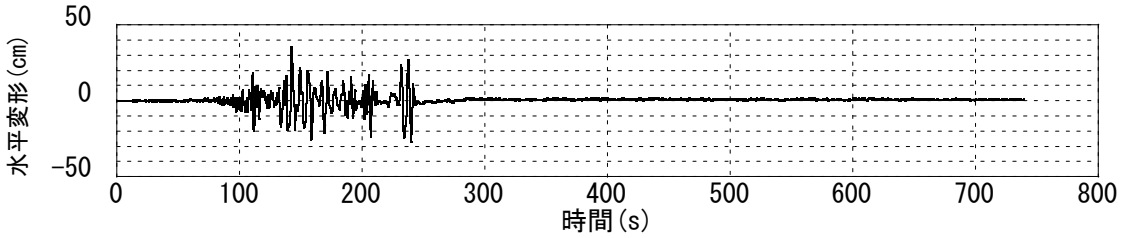


(d)累積変形量

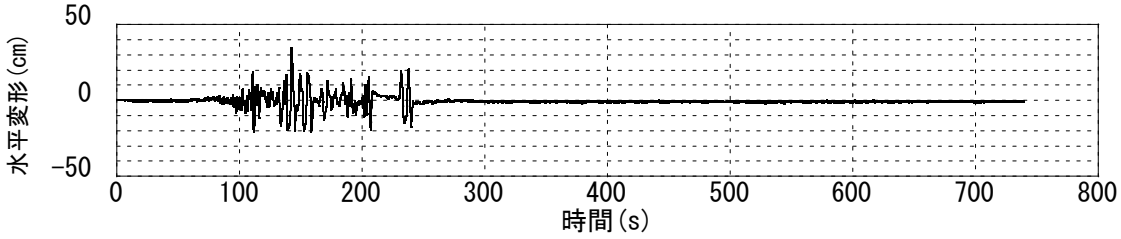


(e)ダンパー1 台当たりの吸収エネルギー

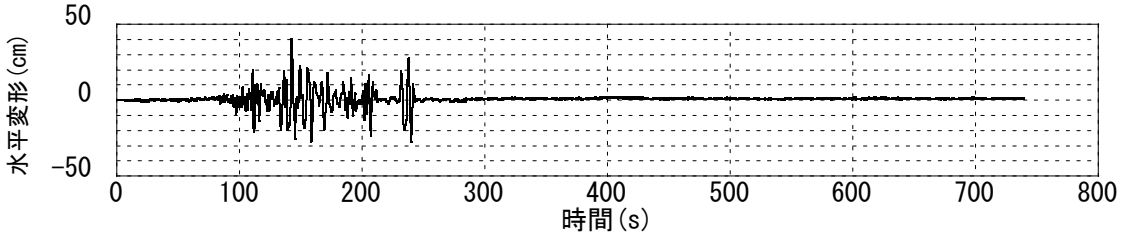
図 1.3.3-10　時刻歴波形　三連動 OSKH02×1.0



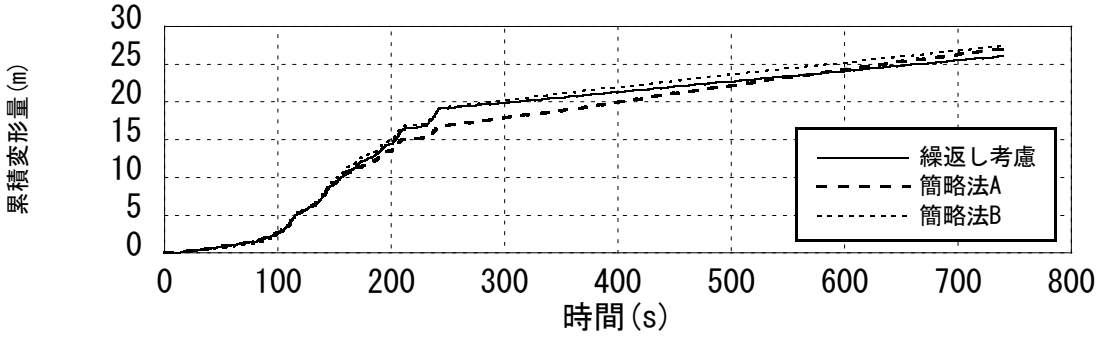
(a)繰返し考慮モデル　水平変位



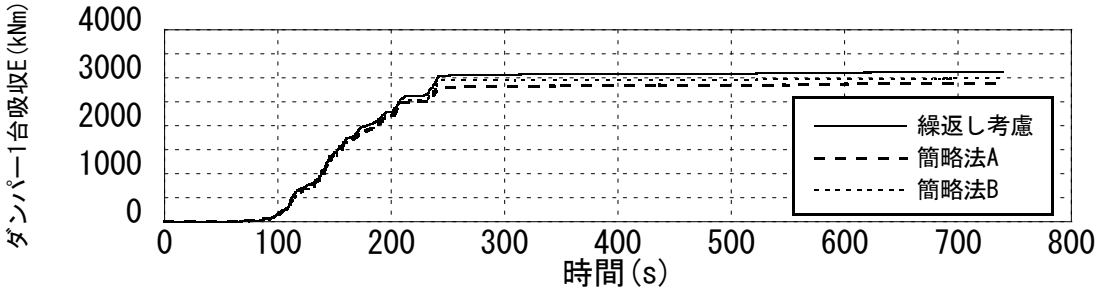
(b)簡略法手法 A　水平変位



(c)簡略法手法 B　水平変位

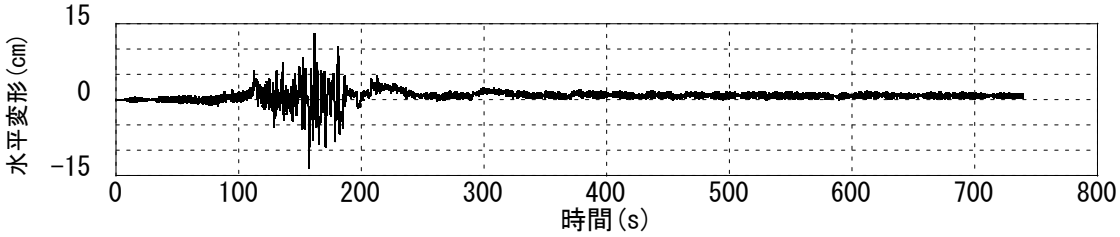


(d)累積変形量

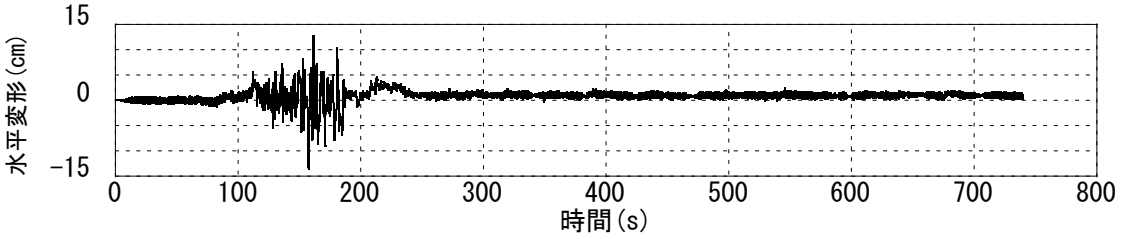


(e)ダンパー1 台当たりの吸収エネルギー

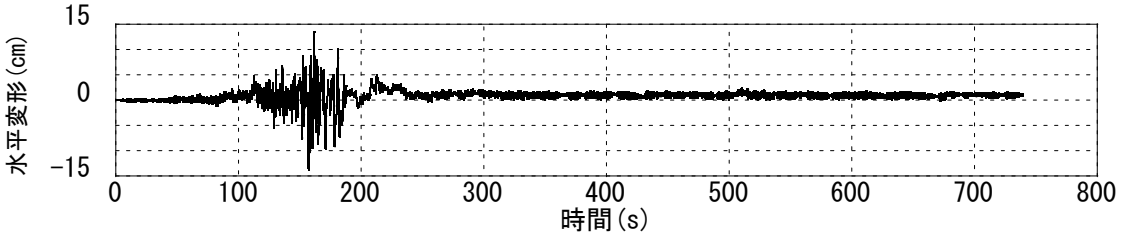
図 1.3.3-11　時刻歴波形　三連動 OSKH02×1.5



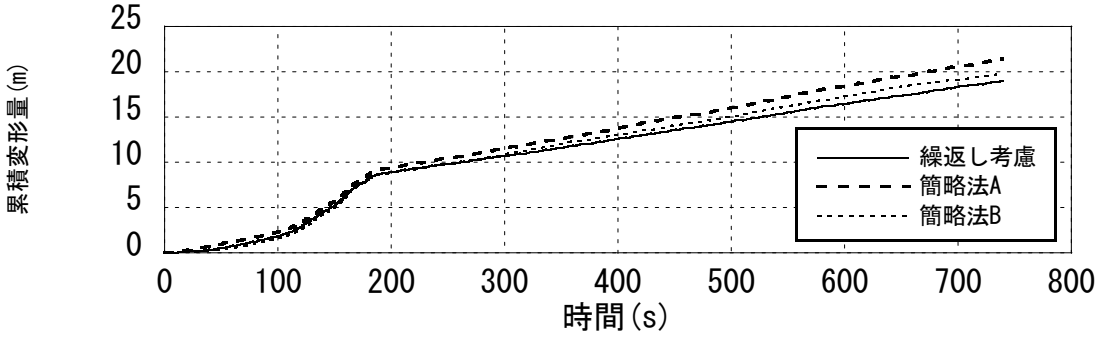
(a)繰返し考慮モデル　水平変位



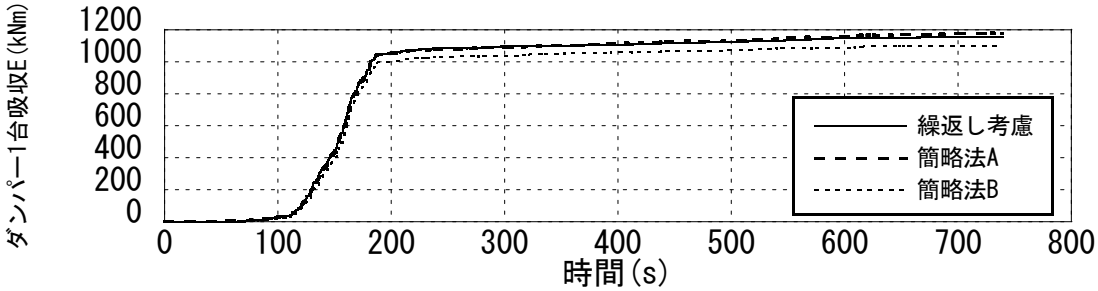
(b)簡略法手法 A　水平変位



(c)簡略法手法 B　水平変位

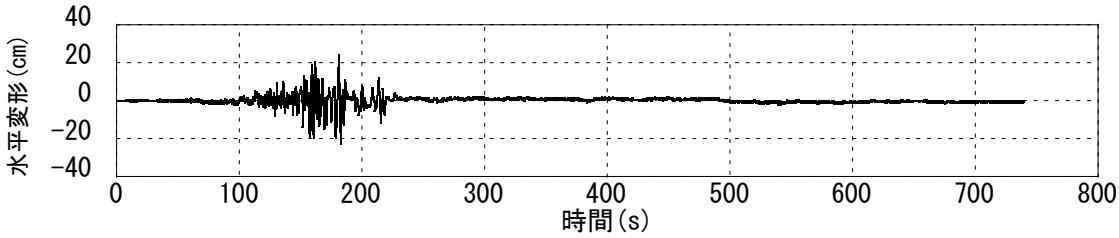


(d)累積変形量

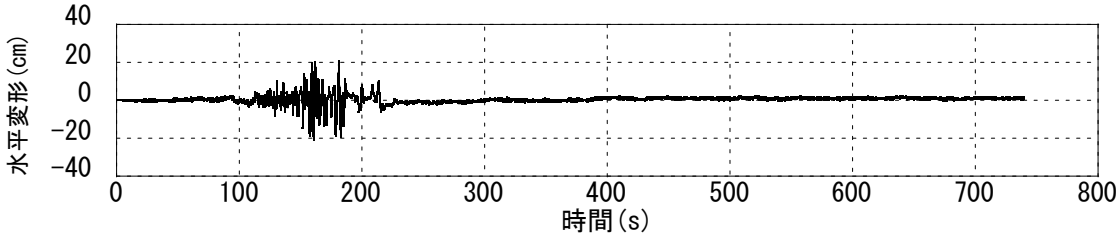


(e)ダンパー1 台当たりの吸収エネルギー

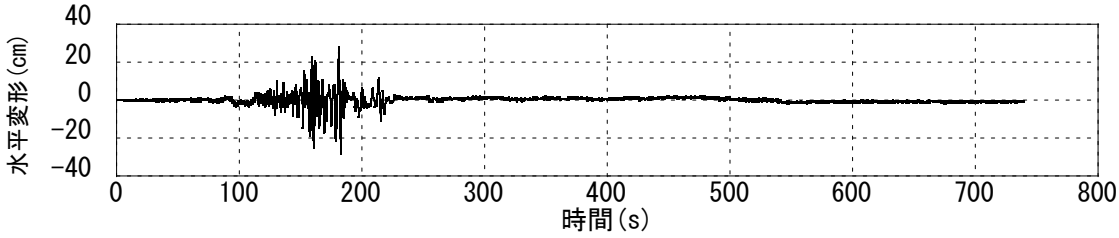
図 1.3.3-12　時刻歴波形　三連動 AIC003×1.0



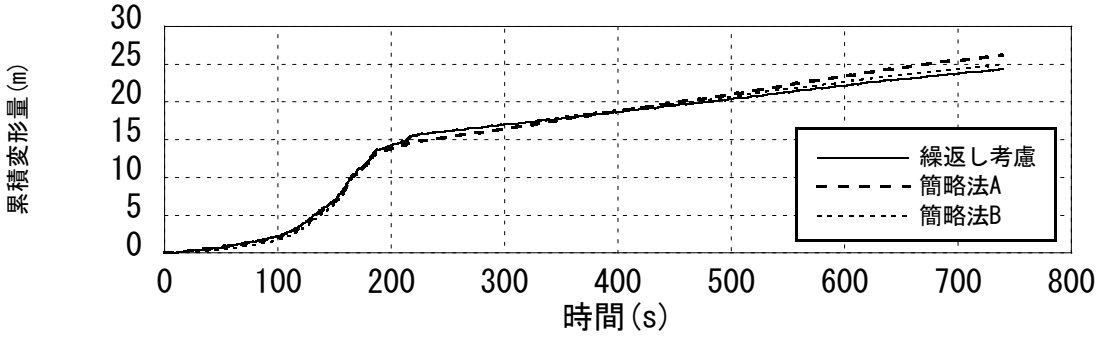
(a)繰返し考慮モデル　水平変位



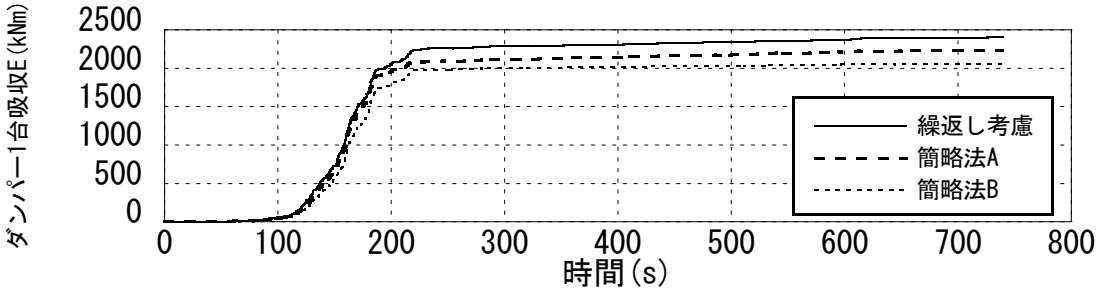
(b)簡略法手法 A　水平変位



(c)簡略法手法 B　水平変位

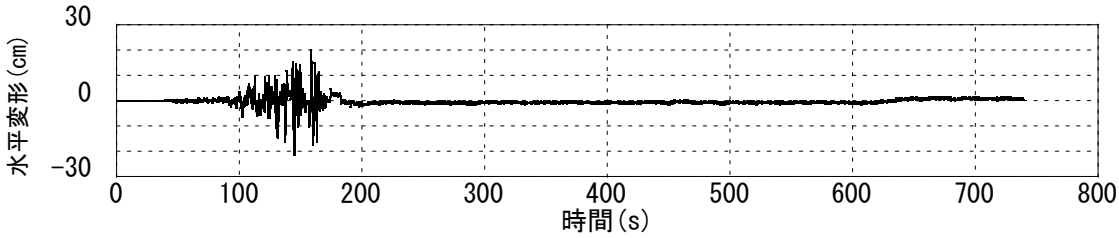


(d)累積変形量

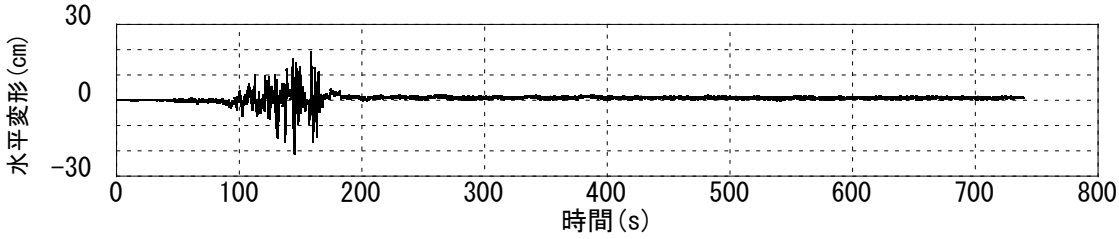


(e)ダンパー1 台当たりの吸収エネルギー

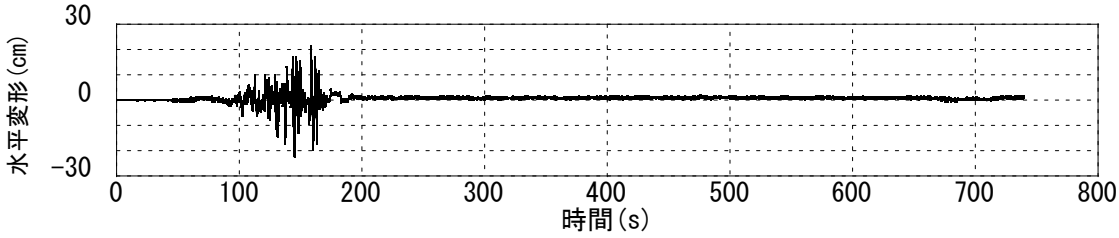
図 1.3.3-13　時刻歴波形　三連動 AIC003×1.5



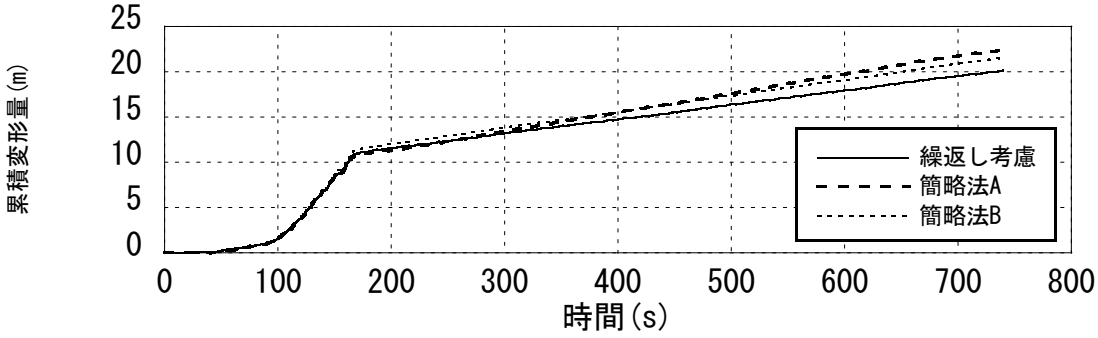
(a)繰返し考慮モデル　水平変位



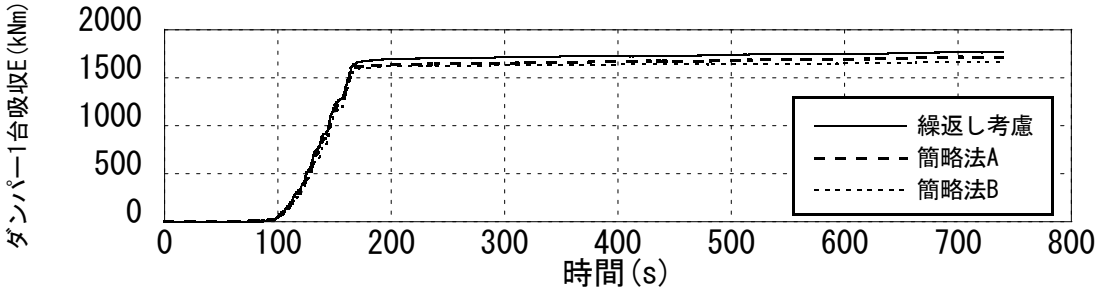
(b)簡略法手法 A　水平変位



(c)簡略法手法 B　水平変位

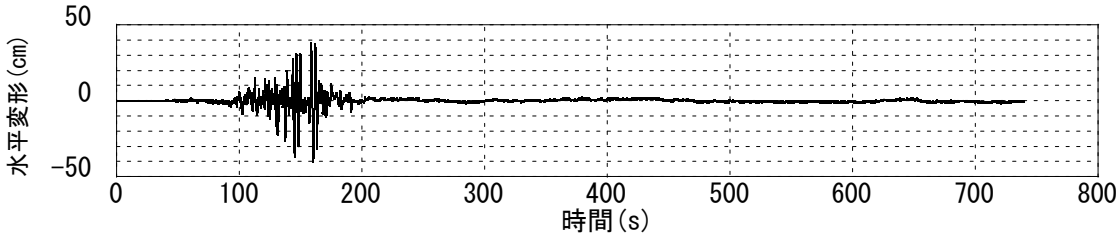


(d)累積変形量

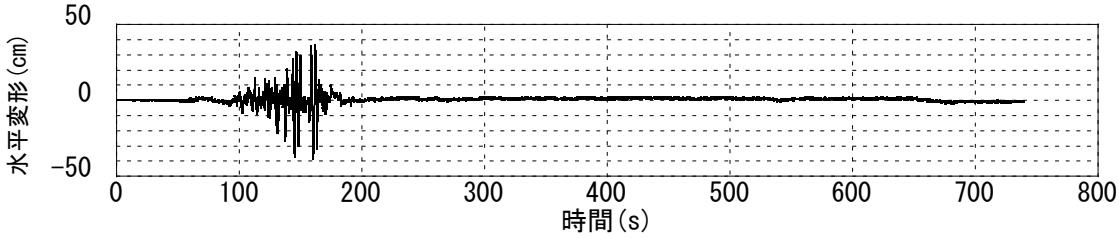


(e)ダンパー1 台当たりの吸収エネルギー

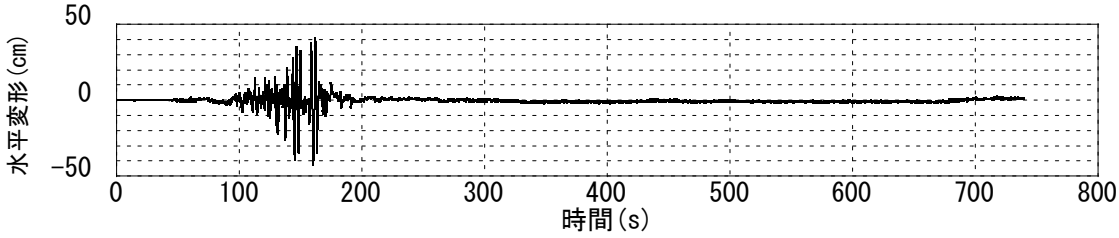
図 1.3.3-14　時刻歴波形　三連動 SZO024×1.0



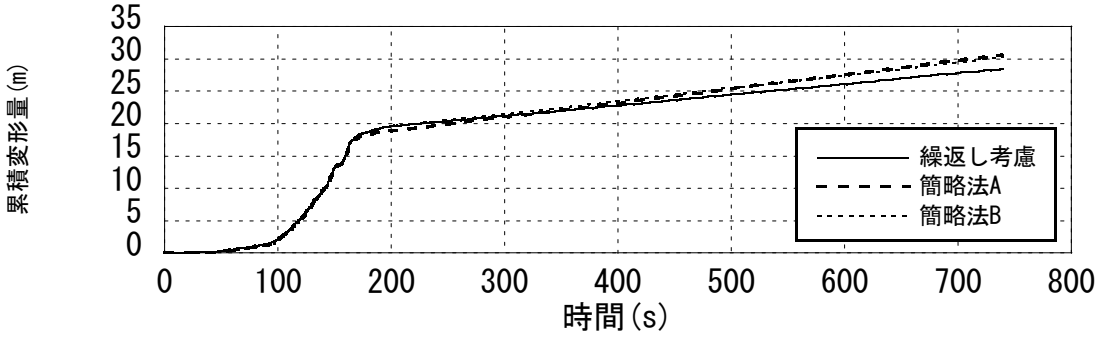
(a)繰返し考慮モデル　水平変位



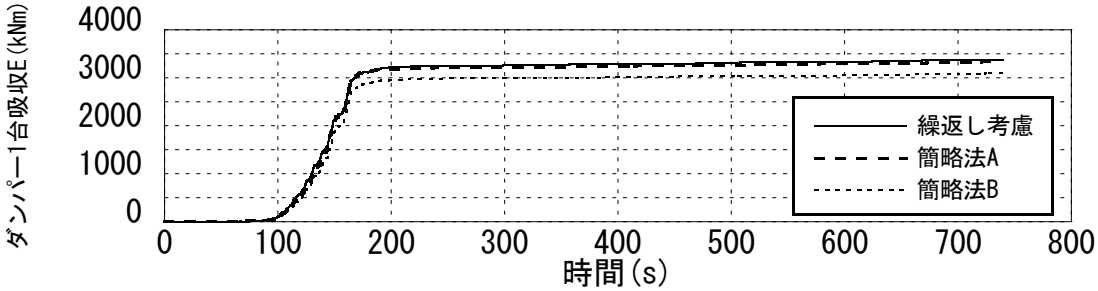
(b)簡略法手法 A　水平変位



(c)簡略法手法 B　水平変位

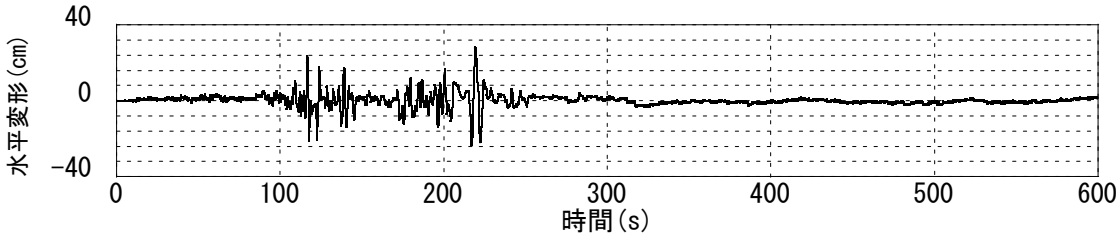


(d)累積変形量

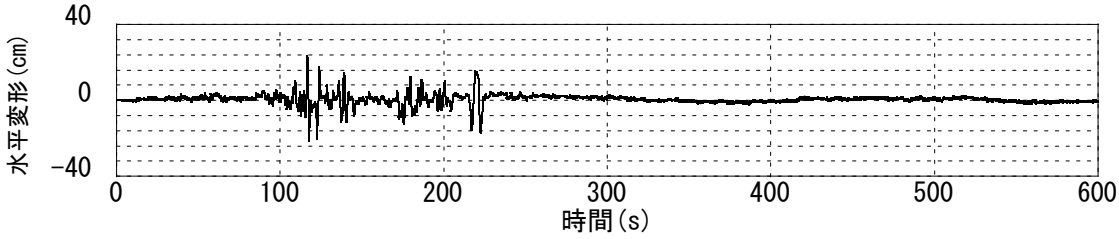


(e)ダンパー1 台当たりの吸収エネルギー

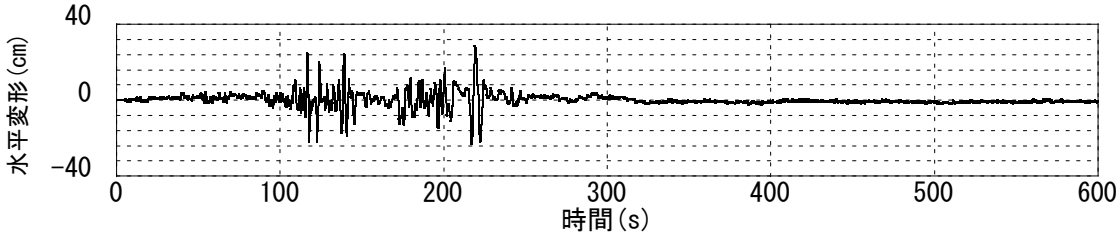
図 1.3.3-15　時刻歴波形　三連動 SZO024×1.5



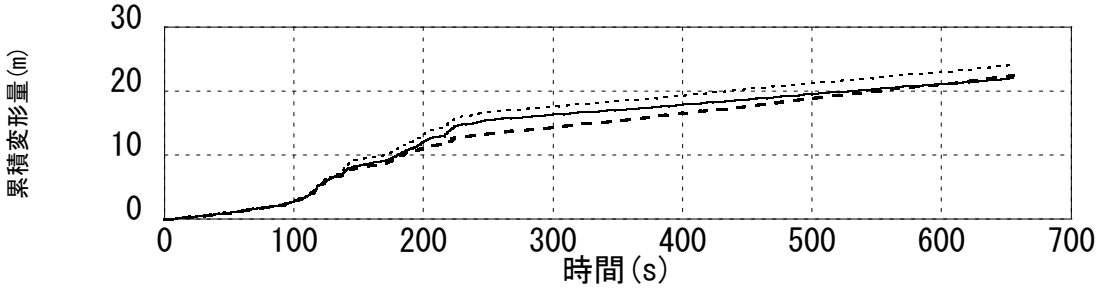
(a)繰返し考慮モデル　水平変位



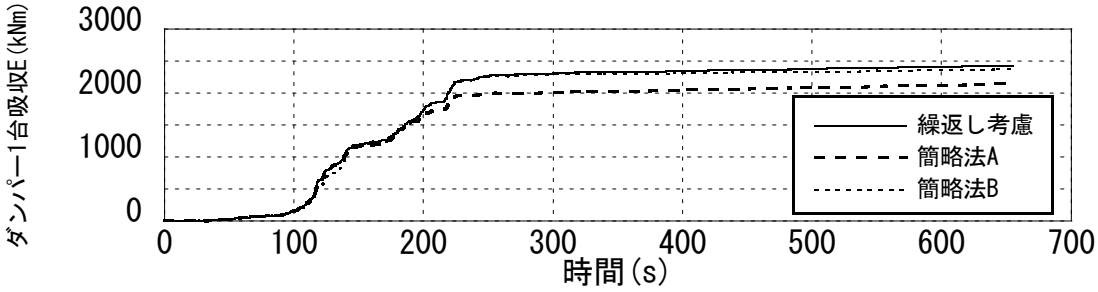
(b)簡略法手法 A　水平変位



(c)簡略法手法 B　水平変位

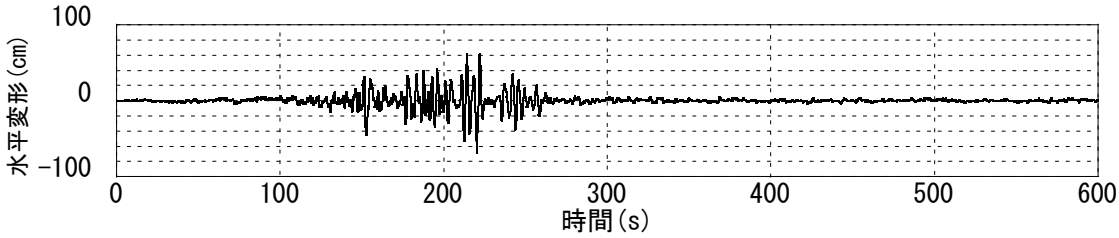


(d)累積変形量

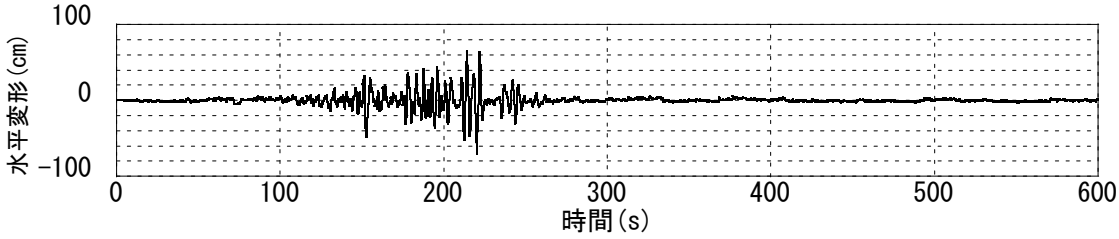


(e)ダンパー1 台当たりの吸収エネルギー

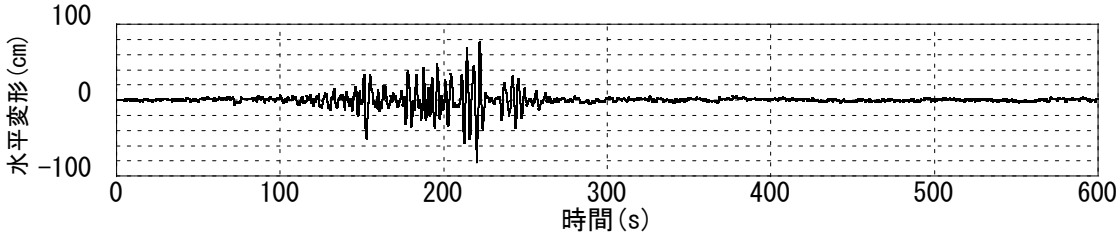
図 1.3.3-16　時刻歴波形　四連動 OSKH02×1.0



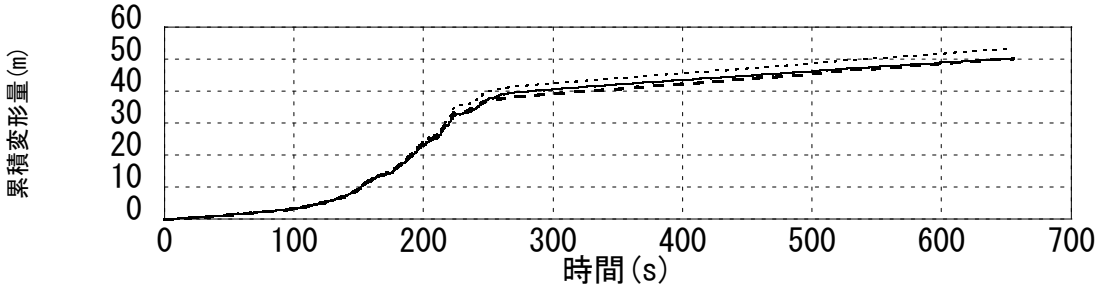
(a)繰返し考慮モデル　水平変位



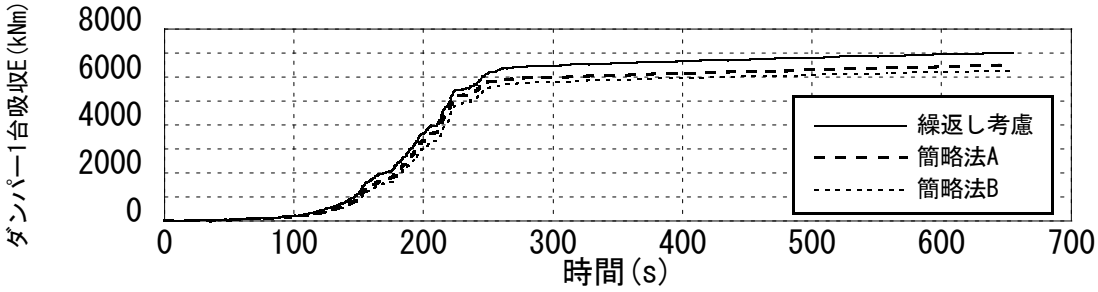
(b)簡略法手法 A　水平変位



(c)簡略法手法 B　水平変位

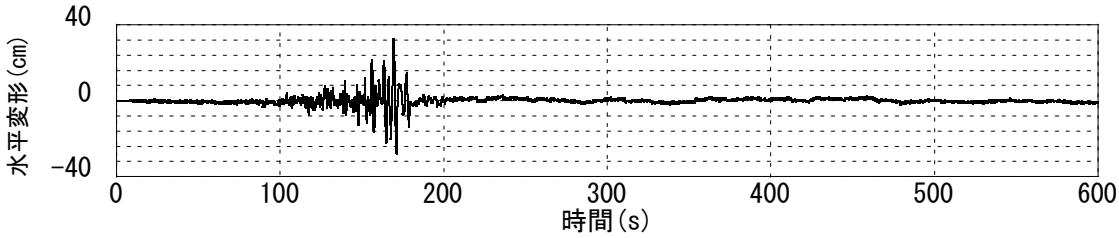


(d)累積変形量

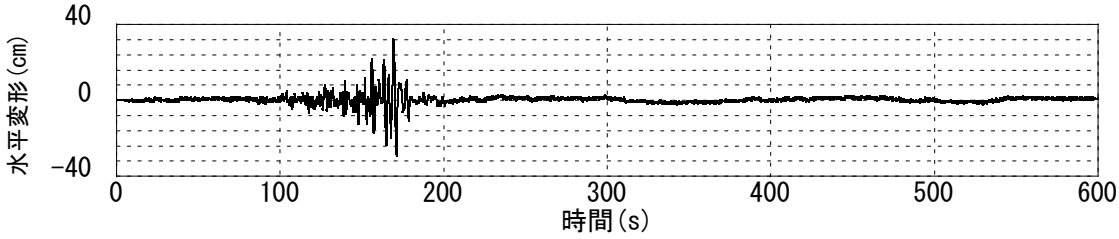


(e)ダンパー1 台当たりの吸収エネルギー

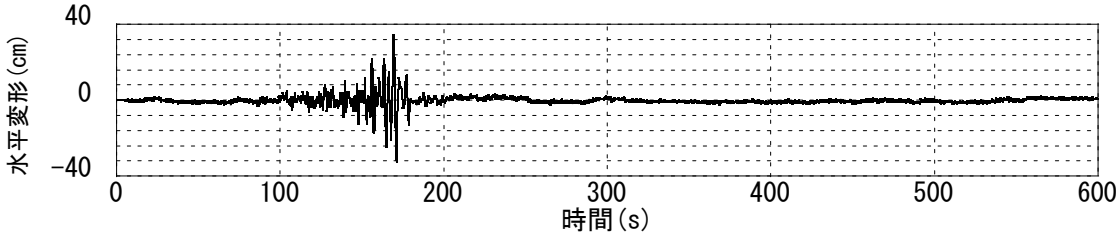
図 1.3.3-17　時刻歴波形　四連動 AIC003×1.0



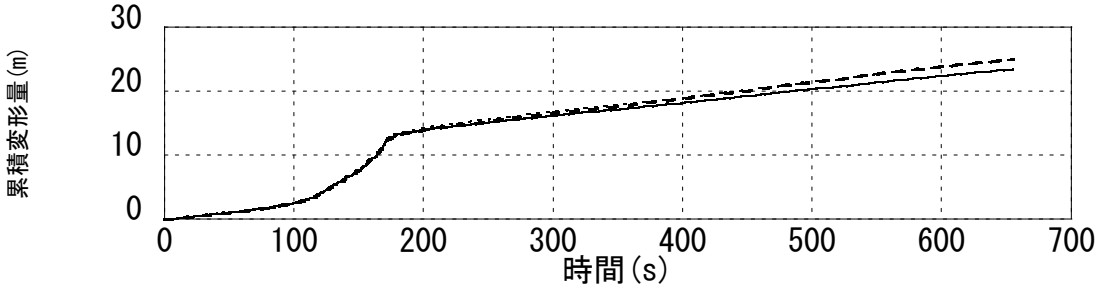
(a)繰返し考慮モデル　水平変位



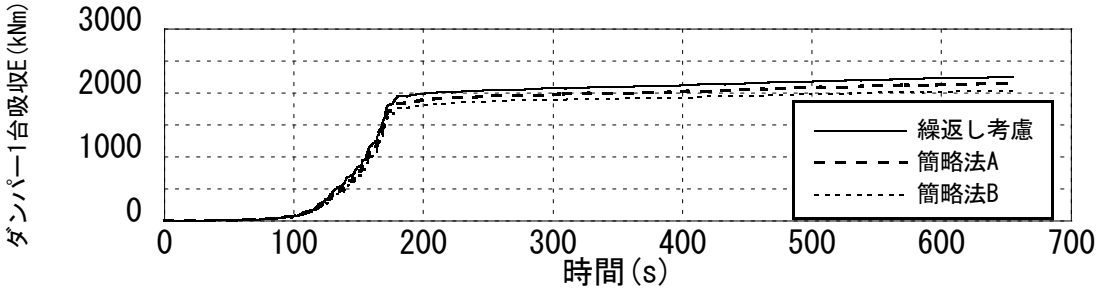
(b)簡略法手法 A　水平変位



(c)簡略法手法 B　水平変位

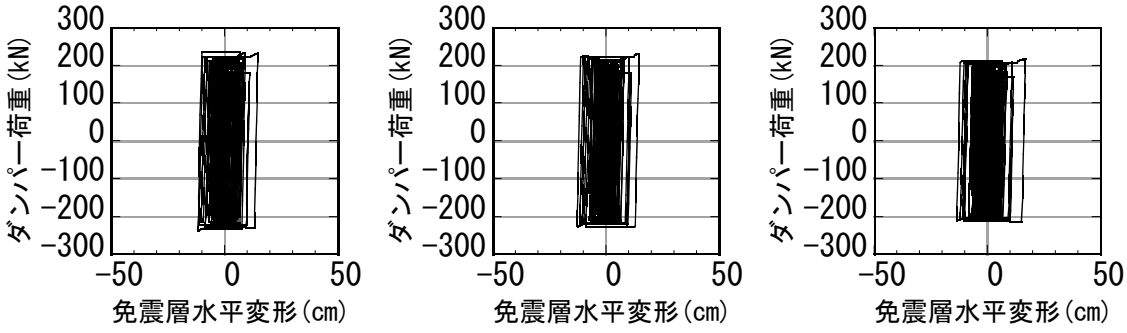


(d)累積変形量

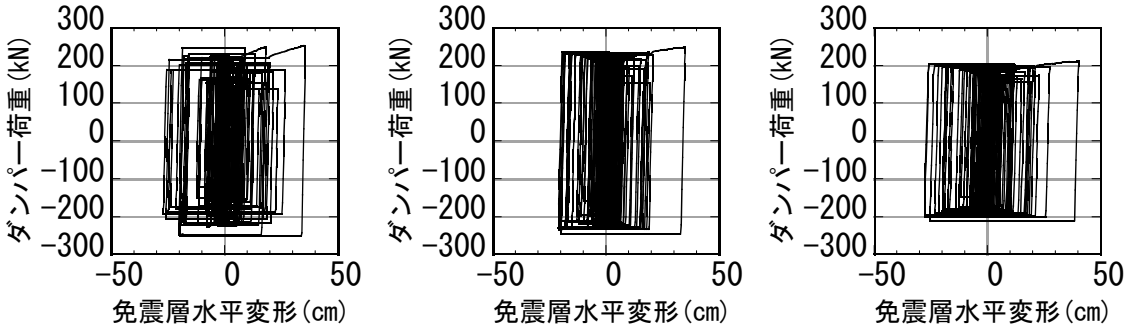


(e)ダンパー1 台当たりの吸収エネルギー

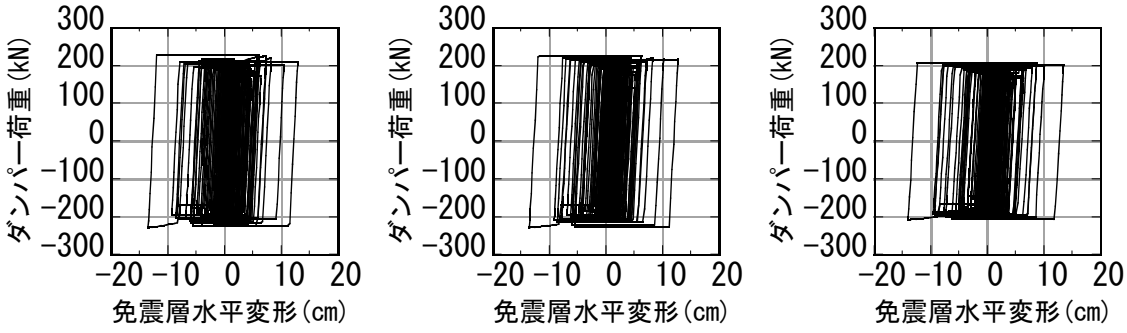
図 1.3.3-18　時刻歴波形　四連動 SZO024×1.0



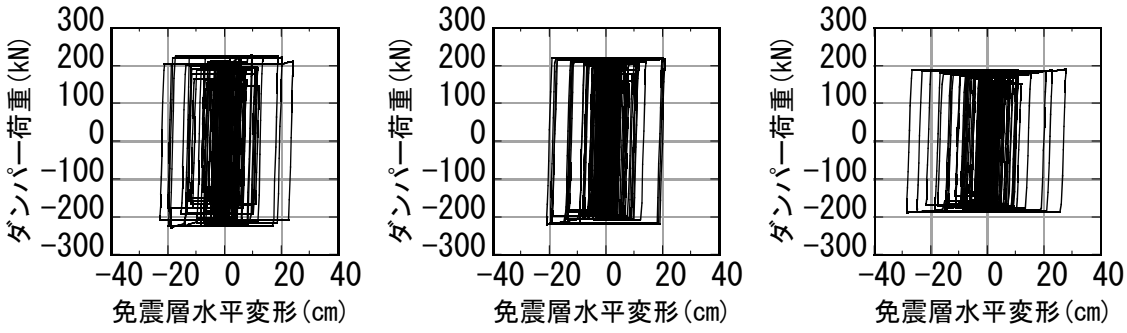
1) 三連動 OSKH02×1.0



2) 三連動 OSKH02×1.5



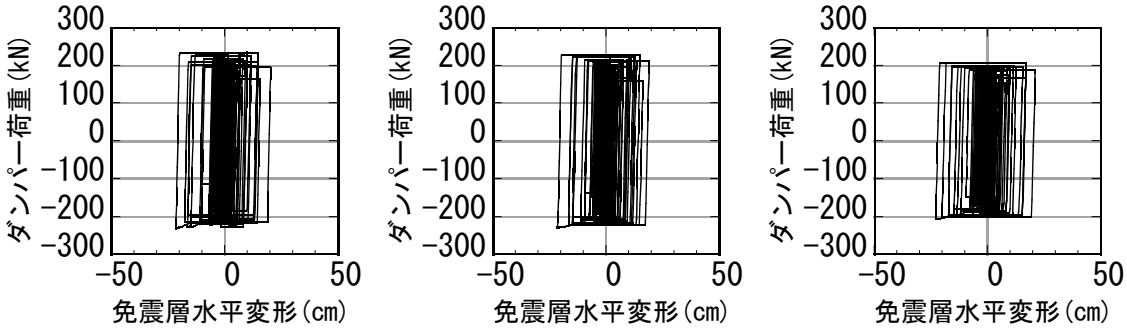
3) 三連動 AIC003×1.0



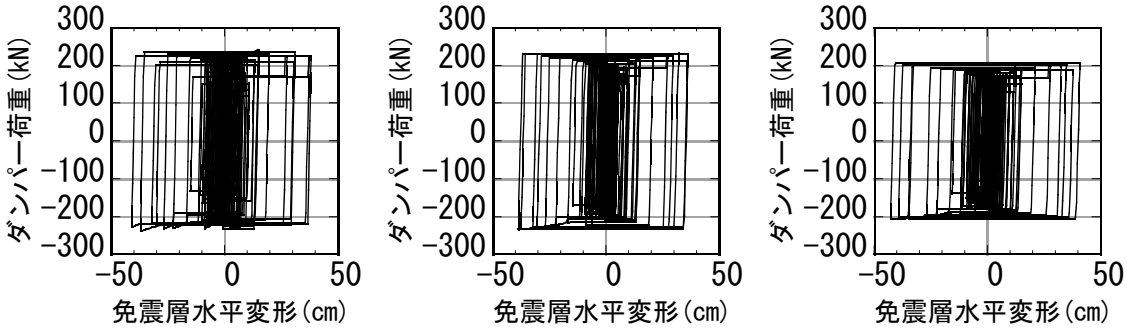
4) 三連動 AIC003×1.5

(a)繰返し考慮モデル　　(b)簡略法手法 A　　(c)簡略法手法 B

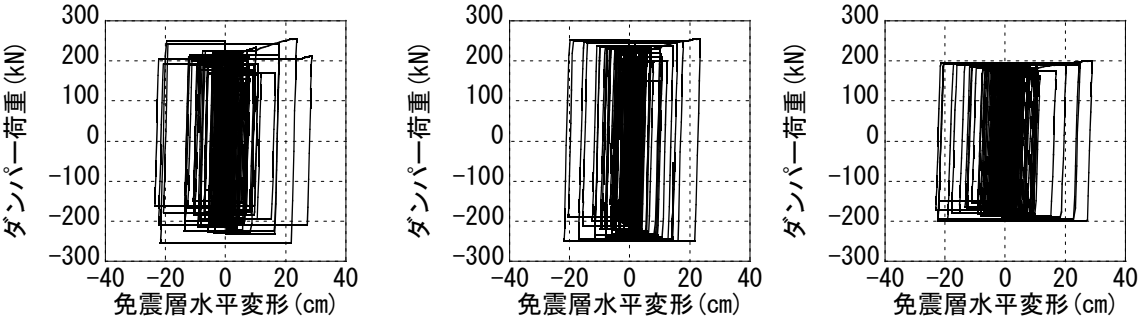
図 1.3.3-19 ダンパーの荷重変形関係（その１）



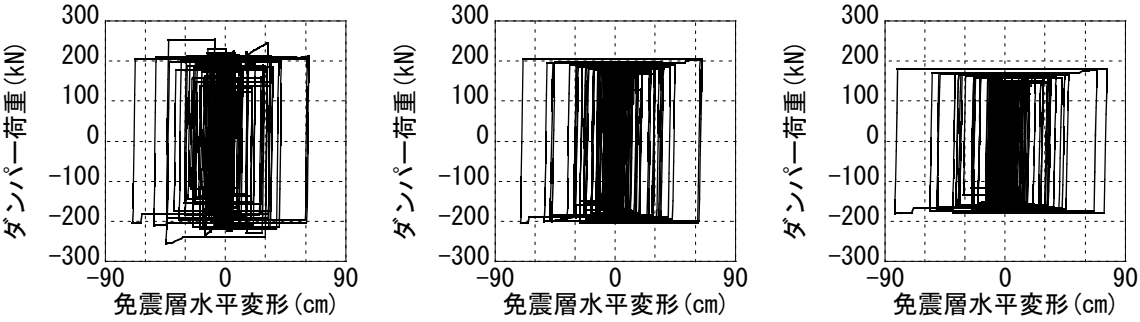
1) 三連動 SZO024×1.0



2) 三連動 SZO024×1.5



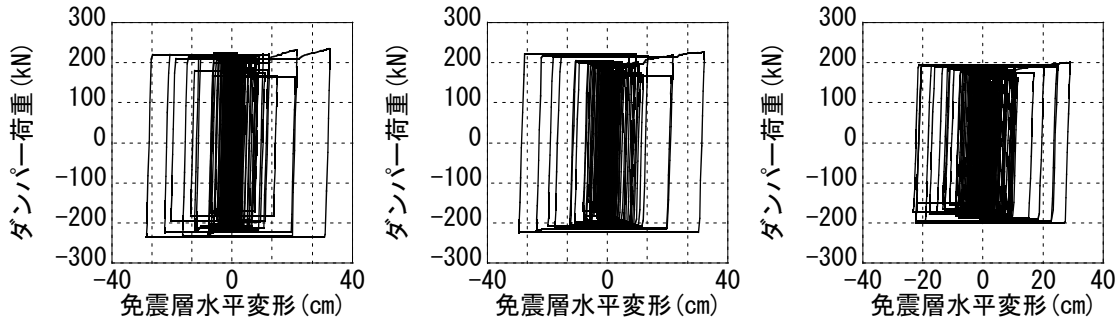
3) 四連動 OSKH02×1.0



4) 四連動 AIC003×1.0

(a)繰返し考慮モデル　　(b)簡略法手法 A　　(c)簡略法手法 B

図 1.3.3-20 ダンパーの荷重変形関係（その２）



1) 四連動 SZO024×1.0

(a)繰返し考慮モデル　　(b)簡略法手法 A　　(c)簡略法手法 B

図 1.3.3-21 ダンパーの荷重変形関係（その３）

表 1.3.3-8　簡略的手法および繰返し評価モデルによる亀裂に対する疲労損傷度

入力地震動		入力倍率	亀裂に対する疲労損傷度				
			繰返し考慮	簡略法 手法A	手法A 誤差(%)	簡略法 手法B	手法B 誤差(%)
OSKH02	三連動	1.00	144%	144%	-0.2	165%	14.6
		1.25	337%	280%	-17.2	378%	12.1
		1.50	690%	536%	-22.3	729%	5.6
	四連動	1.00	408%	292%	-28.6	484%	18.5
AIC003	三連動	1.00	132%	141%	6.8	145%	9.8
		1.25	227%	221%	-2.5	255%	12.4
		1.50	393%	368%	-6.4	446%	13.3
	四連動	1.00	2494%	2448%	-1.9	2962%	18.7
SZO024	三連動	1.00	274%	271%	-1.0	311%	13.5
		1.25	521%	505%	-3.1	583%	11.7
		1.50	833%	812%	-2.5	906%	8.8
	四連動	1.00	373%	380%	2.0	413%	10.9
KGIN	三連動	1.00	26%	26%	0.0	26%	0.0
		1.25	27%	27%	0.0	27%	0.0
		1.50	30%	30%	0.0	30%	0.0
	四連動	1.00	30%	30%	0.0	30%	0.0

表 1.3.3-9　簡略的手法および繰返し評価モデルによる破断に対する疲労損傷度

入力地震動		入力倍率	破断に対する疲労損傷度				
			繰返し考慮	簡略法 手法A	手法A 誤差(%)	簡略法 手法B	手法B 誤差(%)
OSKH02	三連動	1.00	4%	4%	0.2	5%	14.4
		1.25	10%	8%	-16.3	11%	11.8
		1.50	19%	15%	-21.6	20%	5.5
	四連動	1.00	12%	8%	-27.6	14%	18.2
AIC003	三連動	1.00	4%	4%	7.3	4%	9.6
		1.25	7%	6%	-1.9	7%	12.0
		1.50	11%	10%	-5.9	13%	12.7
	四連動	1.00	68%	66%	-2.0	80%	18.0
SZO024	三連動	1.00	8%	8%	-0.5	9%	13.2
		1.25	15%	14%	-2.7	16%	11.5
		1.50	23%	22%	-2.2	25%	8.6
	四連動	1.00	10%	11%	2.3	12%	10.7
KGIN	三連動	1.00	1%	1%	0.0	1%	0.0
		1.25	1%	1%	0.0	1%	0.0
		1.50	1%	1%	0.0	1%	0.0
	四連動	1.00	1%	1%	0.0	1%	0.0

鉛ダンパーの繰返し加力時の特性として、破断前に亀裂が発生することが報告されている。亀裂や破断に対する鉛ダンパーの疲労損傷評価法としては、鋼材ダンパーと同様に Miner 則を用いた検討が実施されている[1.3.3-6)]。変位振幅 δ と亀裂発生時繰返し数 N_c、破断時繰返し数 N_d の関係は以下の式(1.3.3-8)および(1.3.3-9)とした。

$$N_c=4.69\times10^4\,\delta^{-1.87} \qquad (1.3.3\text{-}8)$$

$$N_d=1.38\times10^6\,\delta^{-1.83} \qquad (1.3.3\text{-}9)$$

δ ：片振幅(mm)

地震応答解析結果より鉛ダンパーの疲労損傷評価を行うため、レインフロー法により免震層

水平変位波形の振幅と繰返し数 n_i との関係を求めた。亀裂および破断に対する累積疲労損傷度 D_c、D_d を式(1.3.3-10)および式(1.3.3-11)にて評価する。Miner 則では損傷度 D=1（100%）で亀裂および破断が生じるものとする。

$$D_c = \sum_i \frac{n_i}{N_{ci}} \tag{1.3.3-10}$$

$$D_d = \sum_i \frac{n_i}{N_{di}} \tag{1.3.3-11}$$

D_c：亀裂に対する累積損傷度
D_d：破断に対する累積損傷度
n_i：i 番目の振幅の繰返し数
N_{ci}：i 番目の振幅の亀裂発生繰返し数
N_{di} ：i 番目の振幅の破断時繰返し数

表 1.3.3-8 および表 1.3.3-9 に繰返し考慮モデル、簡略法手法 A および B による解析結果から算出した疲労損傷度を示す。手法 A は、繰返し考慮モデルに対して 2 割以下損傷度を小さく評価する場合があることがわかる。一方、変形が小さな KGIN を除き、手法 B は繰返し考慮モデルよりも大きな値として評価しており、その誤差は 19%未満であった。

(5) まとめ

鉛ダンパーの繰返し依存性を簡略的に評価する方法として、初期から一律にダンパーの降伏耐力を低減する手法を提案した。提案手法は、繰返し考慮なしの地震応答解析を実施したのちに、その応答結果によりダンパー耐力を低減し、再度地震応答解析を実施するものである。ダンパーの耐力低減方法としてここでは 2 通りの手法を用いた。手法 A は、最大変形と最大変形発生時刻におけるダンパーの累積吸収エネルギーを用いるものであり、手法 B は、最大変形と解析終了時におけるダンパーの累積吸収エネルギーを用いるものである。繰返し依存考慮モデルを用いた三連動および四連動の長周期地震動の 1 質点系解析結果との比較から、これらの妥当性を検討した。

手法 B により算出された最大変位は、ほとんどのケースにおいて手法 A および繰返し考慮モデルよりも最大変形は大きく評価されており、繰返し考慮モデルに対して-1%～+19%の誤差であった。

最大絶対加速度は繰返し依存考慮モデルの結果に対して AIC003 四連動を除けば 1 割以内の誤差であり、手法 A、B の大小関係は入力地震動により異なる。

ダンパー1 台あたりの累積吸収エネルギーは、手法 A および B ともに繰返し依存考慮モデルの結果に対して 1 割以内の誤差となった。簡略的手法は、繰返し依存考慮モデルの結果に対して過小評価となる場合があるため、ダンパーの累積吸収エネルギー能力に対する評価において、簡略的手法による解析に基づく場合には、安全率を考慮するなどの配慮が必要である。手法 A、B ともに簡略的手法で求めた累積変形量は繰返し考慮モデルによる結果に対して 2 割以内の誤差となった。

簡略法手法 A よる解析結果から算出した疲労損傷度は、繰返し考慮モデルに対して 2 割以下損傷度を小さく評価する場合があった。一方、手法 B は繰返し考慮モデルよりも大きな値として累積損傷度を評価し、その誤差は 18%未満であった。

以上より、本検討で提案した２つの簡略法のうち、ダンパーの変形量を最大変形時、ダンパーの累積吸収エネルギーE は解析終了時におけるダンパーの累積吸収エネルギーとして、降伏耐力を低減する方法（本検討では「手法 B」）を用いた方が、ダンパーの最大変形量ならびに累積損傷度を繰返し考慮モデルよりも大きな値として評価し、安全側の評価となることがわかった。

なお、本検討では三連動および四連動地震の OSKH02、SZO024 ならびに KGIN の応答では免震層の最大変形は 43cm 以下、ダンパーの破断に対する累積損傷値は 25%以下であり、上記の入力地震動による免震部材の破断の可能性は少ないと考えられる。一方、四連動 AIC003 の場合で最大変形が 70cm を超える結果となった。ただし、本検討の解析モデルは、積層ゴムを線形弾性としており、40～50cm 以上の水平変形時から生じるハードニング挙動を模擬できていないため、最大応答値の評価に注意を要する。より高精度な評価とするためには、上記のような積層ゴムの非線形挙動も模擬しうるモデルにて評価する必要がある。

参考文献

1.3.3-1) 森田慶子ほか：免震構造用鉛ダンパーの実験的研究－別置型鉛ダンパーの復元力モデルと繰返し特性の評価について－，日本建築学会構造系論文集，No.570，pp.53-60，2003.8

1.3.3-2) 日本免震構造協会編：免震部材部会ダンパー小委員会活動報告，2007.3

1.3.3-3) 高山峯夫：免震構造用天然ゴム系積層ゴムアイソレータの限界性能，日本建築学会技術報告集，No.1，pp.160-165，1995.12
1.3.3-4) 矢花修一ほか：積層ゴム免震要素の線形限界に関する検討，日本建築学会大会学術梗概集，B-2 分冊，pp.691-694，1996.9
1.3.3-5) 中澤俊幸ほか：免震構造物における耐震安全性の確率論的評価に関する基礎的研究，日本建築学会構造系論文集，Vol.76，No.662，pp.745-754，2011.4
1.3.3-6) 安永亨ほか：鉛ダンパーの風応答に関する研究 :(その 2)微小変位での高サイクル疲労特性，日本建築学会大会学術梗概集，B-2 分冊，pp.289-290，2010.8

1.3.4　天然ゴム系積層ゴム＋弾性すべり支承（高摩擦）

（１）免震部材実験結果に基づく弾性すべり支承（高摩擦）摩擦特性のモデル化

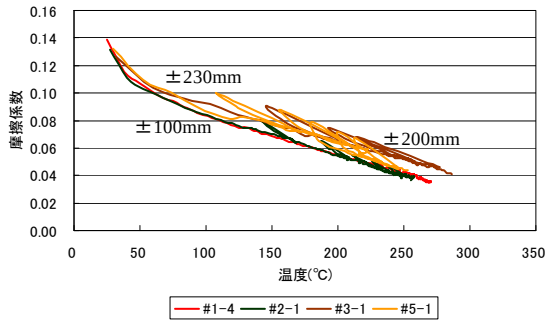
第Ⅲ部第１章 1.3.4 に示したφ300 試験体の実験により、累積変形 100m 相当までの範囲で、温度上昇に伴う摩擦係数の低下傾向、インターバル加振時の摩擦の復元などが確認された。温度や累積変形量に対する摩擦係数の変化傾向を分析し、摩擦特性モデルに取り込んで同モデルの適用範囲拡大を図る。

○多数回繰り返し実験結果の分析

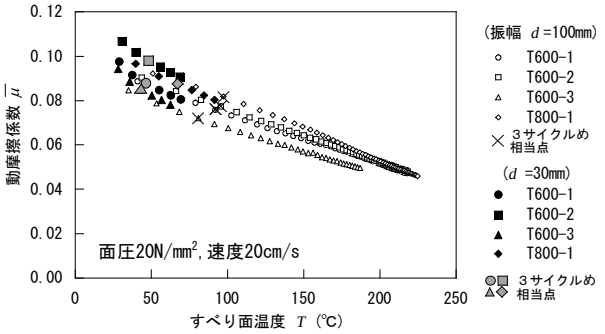
すべり板温度、累積吸収エネルギー、累積変位量に対する摩擦係数の変化傾向を把握するため、各パラメータに関する単回帰分析を実施し、各パラメータに対する依存性を定式化した。

分析対象ケースは、インターバル無しで連続で行った限界試験（試験体#1-4、面圧 20N/mm^2、変位振幅±100mm、連続 250 回載荷、累積変形 100m）とした。既往の知見により、摩擦係数の変化にはすべり面の温度影響が大きいと考えられるので、累積変位量としては摩擦発熱量との関連付けが容易な累積すべり変位量を採用した。図 1.3.4-1～3 に実験結果および既往の評価結果と回帰結果を示す。

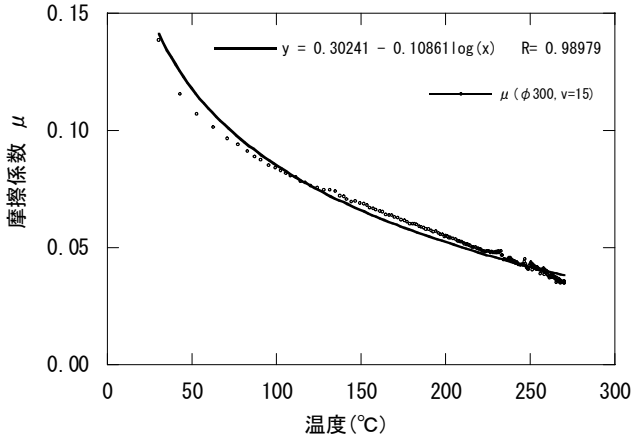
各パラメータに対する摩擦傾向の減少傾向は、いずれも対数近似により良好に回帰されている。



(a) 実験結果



(b) 既往の評価結果*（φ600, φ800）



(c) 実験結果の回帰（#1-4 限界試験）

図 1.3.4-1　摩擦係数－すべり板温度関係

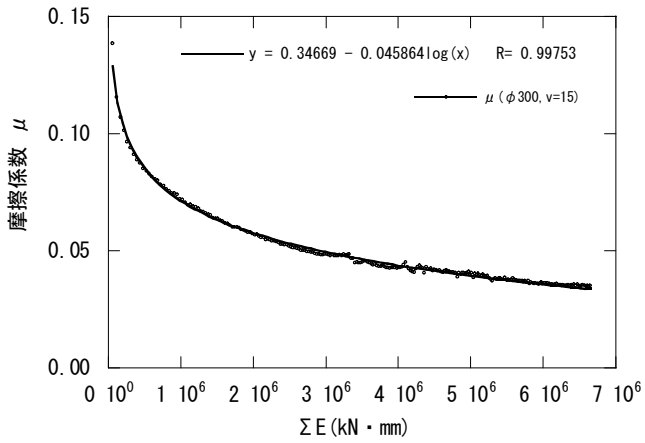
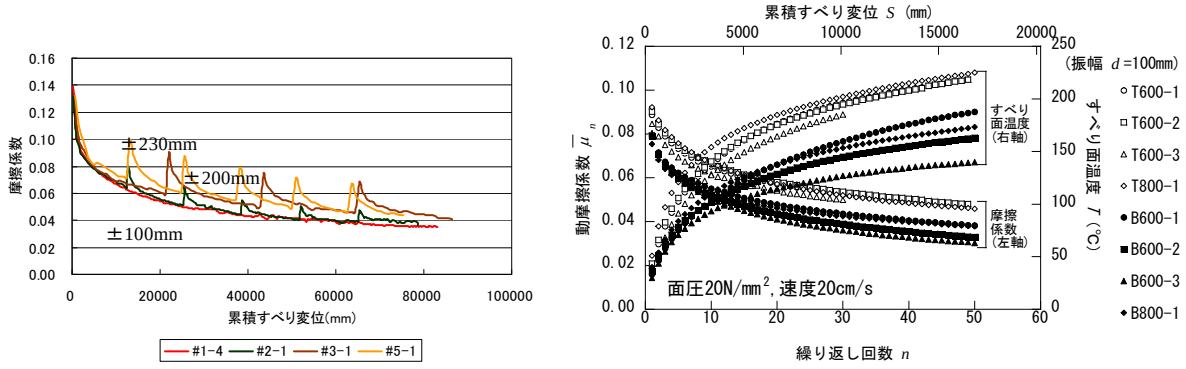


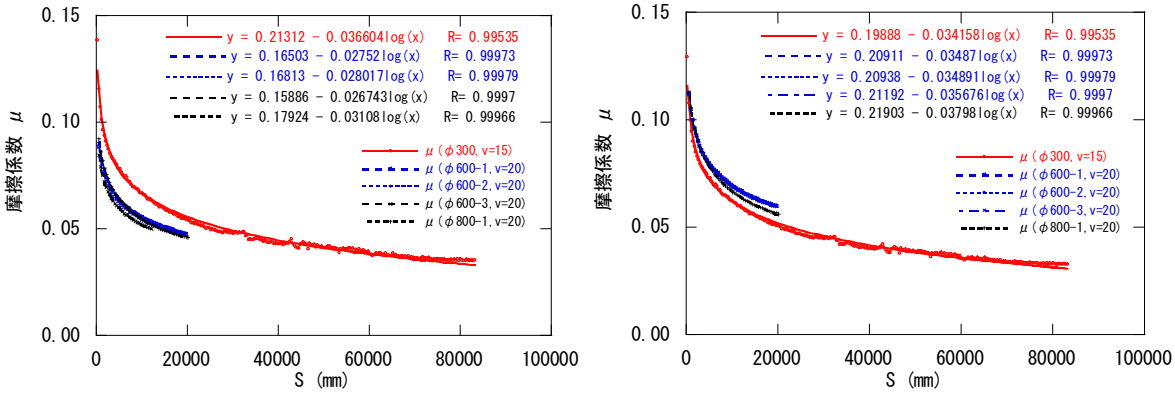
図 1.3.4-2　摩擦係数－累積吸収エネルギー関係（実験結果）



(a) 実験結果

(b) 既往の評価結果*（φ600, φ800）

（σ =20N/mm², v=20cm/s）



(c) 実験結果の回帰（#1-4 限界試験）

(d) 3 サイクルめで基準化

図 1.3.4-3　摩擦係数－累積すべり変位関係

---

*日比野浩、高木政美、勝田庄二：実大弾性すべり支承の載荷実験に基づく摩擦特性のモデル化、日本建築学会構造系論文集、第 574 号、pp.45-52、2003.12

○復元力特性モデルの作成

長周期地震動に対する免震建築物の応答特性把握に供するための、支承の多数回繰り返し特性を表現するパラメータを選定し、修正復元力特性モデルを作成する。

前述のように、多数回繰り返し特性を表す指標として、すべり板温度、累積吸収エネルギー、累積すべり変位量などを用いることが可能であることが示された。特に累積吸収エネルギーまたは累積すべり変位を用いると、摩擦係数の低下傾向が対数近似により良好に回帰できることを確認できた。両パラメータは、地震応答解析による応答値により摩擦係数を決定できるので、熱伝導解析を介することなく応答解析が行える利点がある。

以下では、摩擦係数 μ の速度 v、累積吸収エネルギーE（または累積すべり変位 S の両パラメータに関する依存性を表現する以下の関数型を用いた重回帰分析を行う。

$$\mu(t) = a \cdot (\log v(t) - \log v_0) \cdot (\log E(t) - \log E_0) + b \qquad (1.3.4\text{-}1)$$

$$\mu(t) = a \cdot (\log v(t) - \log v_0) \cdot (\log S(t) - \log S_0) + b \qquad (1.3.4\text{-}2)$$

ここに a 、b は回帰係数である。例として図 1.3.4-4 に v、S 軸を対数軸として、式(1.3.4-2)で表される曲面を３次元座標空間に表現したものを示す。式(1.3.4-1)、式(1.3.4-2)式の定数 v_0、S_0 は、μ が一定値 b となる速度、累積吸収エネルギー、累積すべり変位を表す。表 1.3.4-1 に、実験により得られた回帰結果を既往の評価結果と併せて示す。また、実験結果による回帰曲面を図 1.3.4-5 に示す。

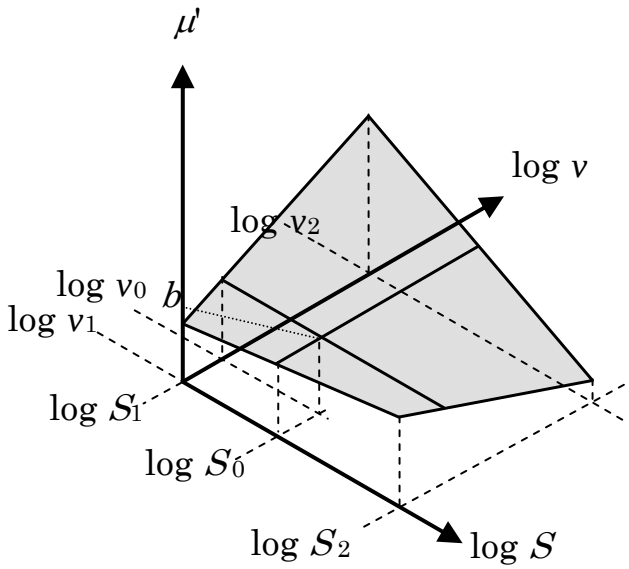


図 1.3.4-4　速度・すべり変位依存性の面回帰モデル

表 1.3.4-1　回帰結果一覧

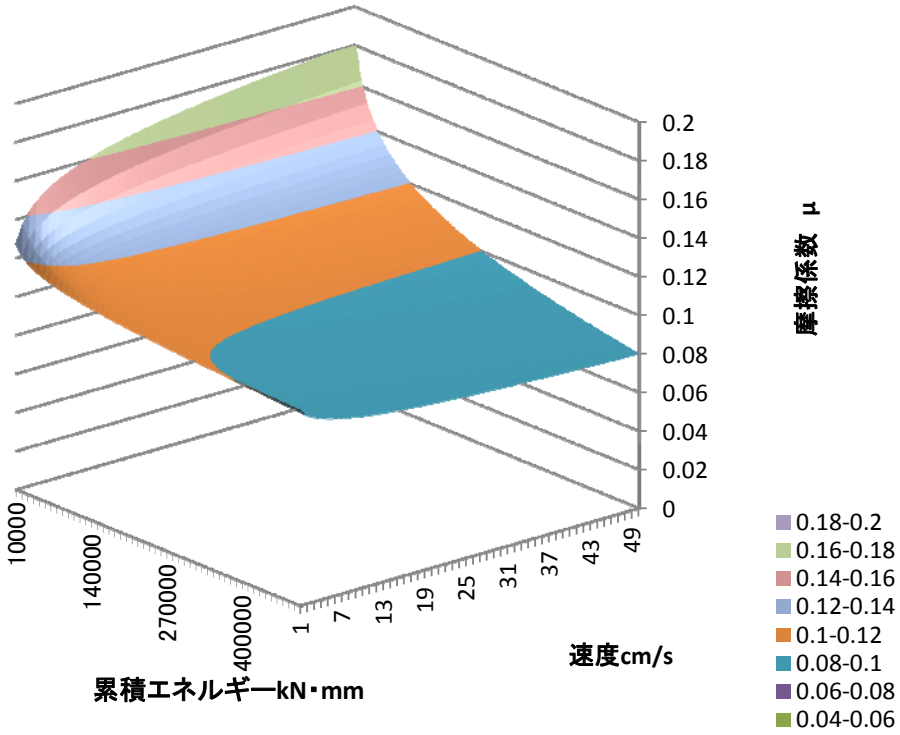
(a)累積吸収エネルギー依存

	面圧 σ (N/mm^2)	使用データ範囲				使用データ範囲			
		a	b	v_0 (cm/s)	$*E_0$ (kN･mm)	v (cm/s)		E (kN･mm)	
						下限 v_1	上限 v_2	下限 $*E_1$	上限 $*E_2$
実験結果（変位 ±100mm）	20	-2.575E-02	1.086E-01	2.546E-01	1.638E+05	15	37	7.600E+02	6.643E+06

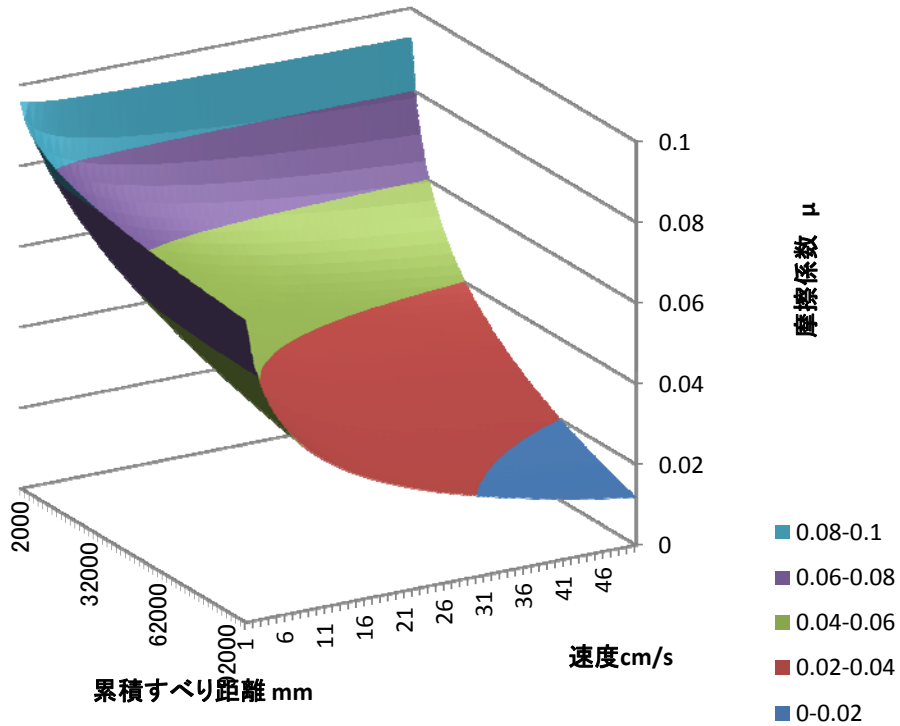
*注：φ300、面圧 20mm^2 の値であり、免震層ですべりが負担する軸力の比率で係数倍して用いる。

(b)累積すべり変位依存

	面圧 σ (N/mm^2)	使用データ範囲				使用データ範囲			
		a	b	v_0 (cm/s)	S_0 (mm)	v (cm/s)		S (mm)	
						下限 v_1	上限 v_2	下限 S_1	上限 S_2
実験結果（変位 ±100mm）	20	-2.079E-02	9.684E-02	2.545E-01	1.638E+03	15	37	257	83155
参考）既往評価結果（φ600,800）	10	-2.070E-02	9.010E-02	1.412E+00	1.470E+03	0.4	60	110	2050
	20	-1.310E-02	7.120E-02	2.546E-01	1.638E+03	0.4	60	112	2048



(a) 累積吸収エネルギー依存

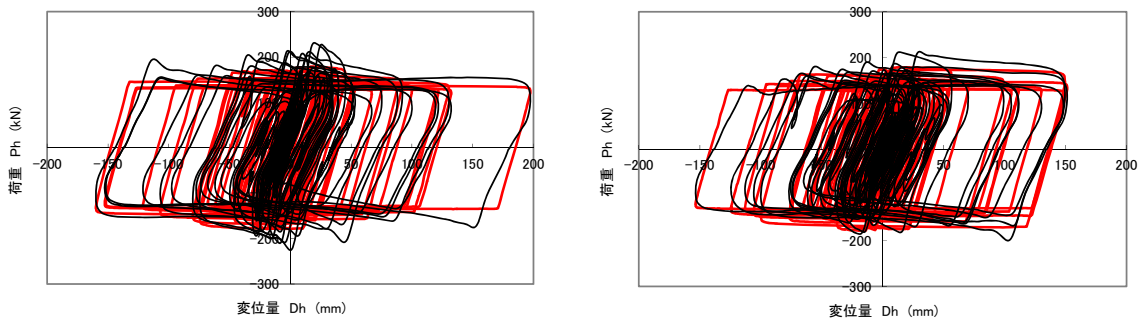


(b) 累積すべり変位依存

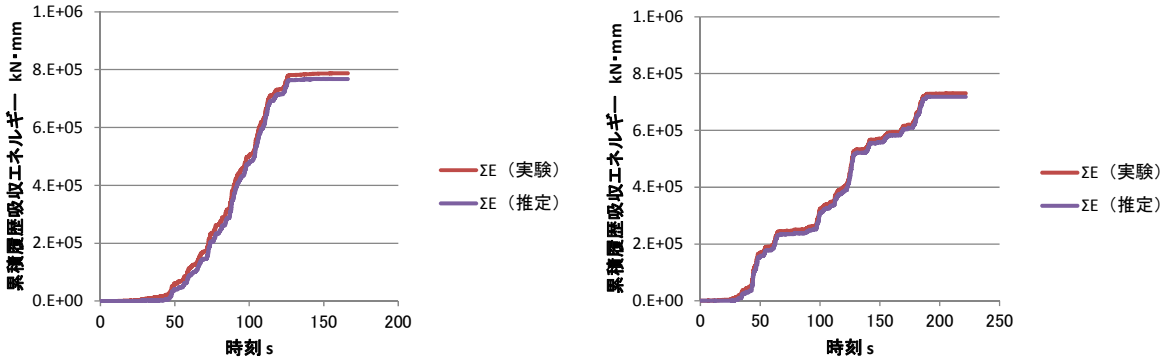
図 1.3.4-5　重回帰分析結果（変位±100mm、σ=20N/mm^2）

○復元力モデルの再現性確認

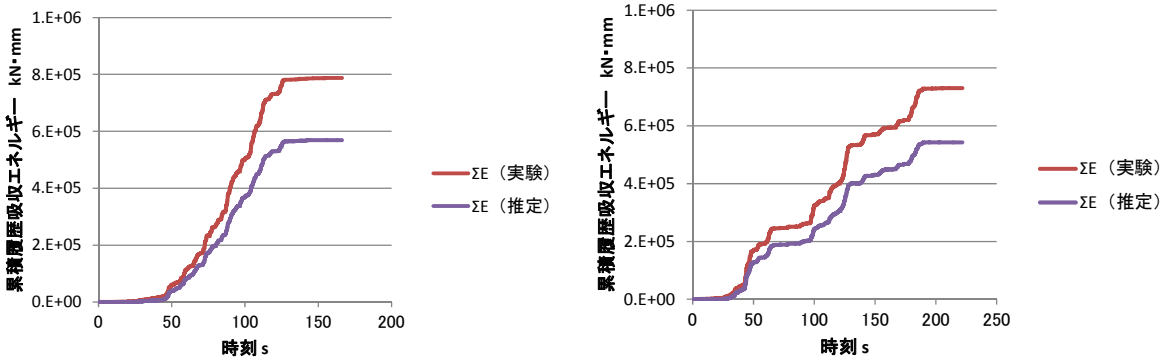
前項に示した摩擦係数の繰り返し依存モデルにより、実験で実施した地震応答波加振による履歴の再現を試みる。地震波加振の 2 ケース（AIC003 、OSKH02）について、ステップ毎の摩擦係数を式(1.3.4-2)により評価し、荷重－変位関係を実験結果と比較した。図 1.3.4-6 に評価結果を示す。評価では積層ゴム部の 1 次剛性を 9.0kN/mm、累積すべり変位の初期値 $S_{initial}$ = 257mm とした。地震波加振は非連続すべり状態となるため S の低減係数を 0.08 とした。



（黒：実験結果、赤：推定結果）



（参考：S の低減係数 1.0 の場合）

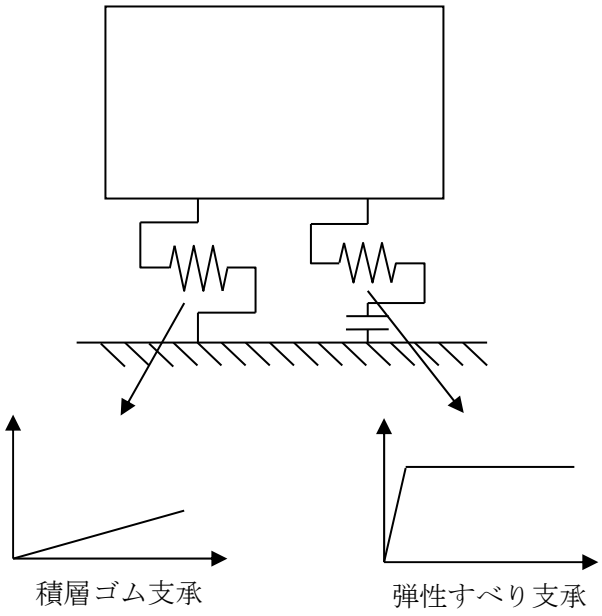


(a) AIC003　　(b) OSKH02

図 1.3.4-6　荷重－変位関係および累積履歴吸収エネルギーの推移の比較

（2）解析条件

本検討では、長周期地震動に対する摩擦係数の累積すべり変位依存性による応答変位の増幅を、簡易的に評価できる手法を提案することを目的とする。解析モデルを図 1.3.4-7 に示す上部構造を剛体とした 1 質点系モデルとする。



モデル諸元

建物重量	W=51453.9kN
弾性すべり支承負担軸力	Ns=20920.1kN
基準摩擦係数μo	μo=0.112
弾性すべり支承水平耐力	Qy=2343.0kN(Ci=0.046)
弾性すべり支承平均面圧	σ=15.0N/mm^2
弾性周期	T1=1.0s
免震周期	T2=4.0s
考慮する依存性	累積すべり変位による摩擦係数

図 1.3.4-7　解析モデル

（３）検討結果

a）設計モデル・依存性モデル応答履歴比較

累積すべり変位・累積吸収エネルギー考慮した摩擦係数低下モデル(以後、依存性モデル)および基準摩擦係数μｏ一定バイリニア型の非線形モデル(以後、設計モデル)、各モデルにおける履歴ループ比較を示す。

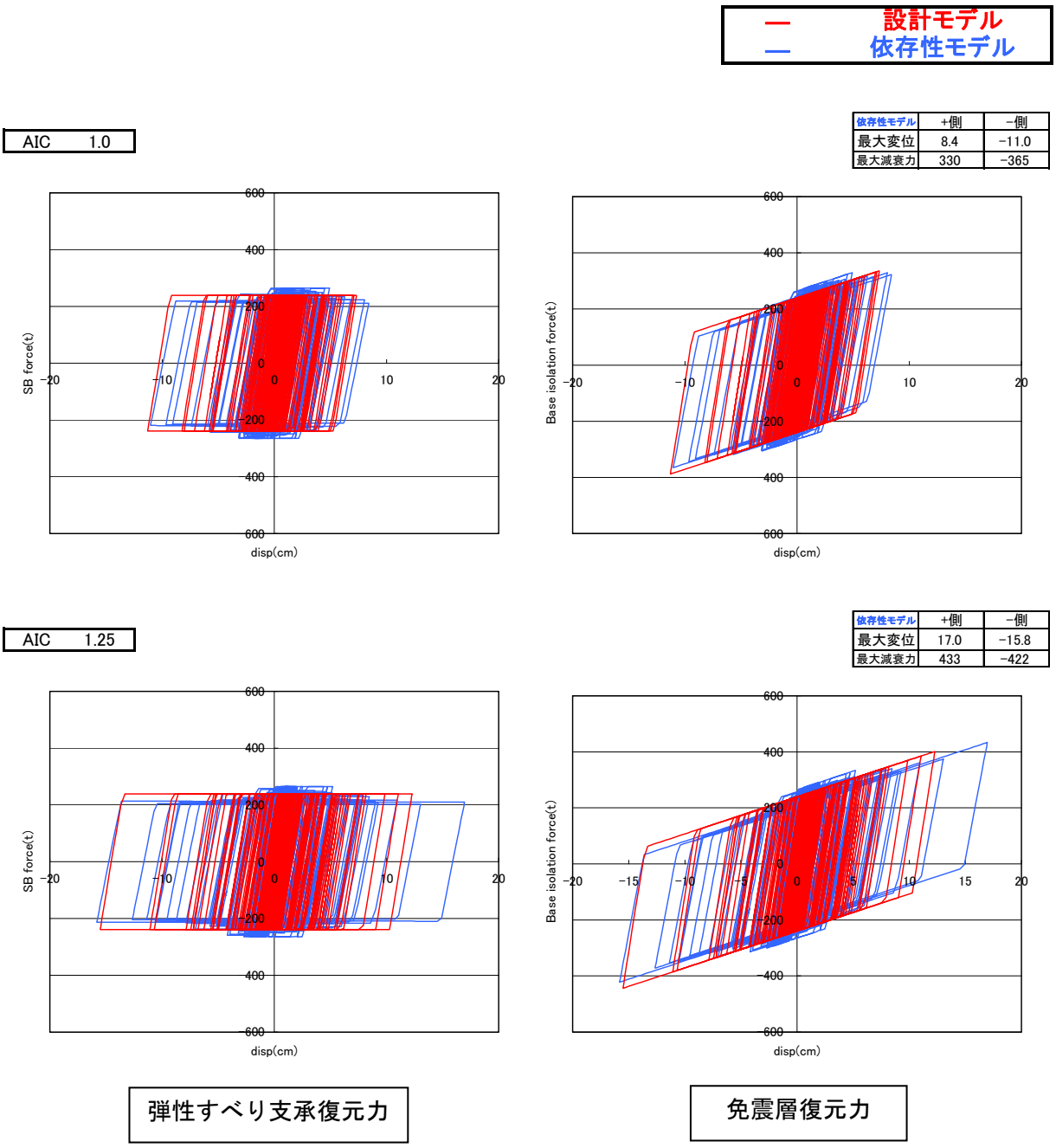


図 1.3.4-8(1)　応答履歴

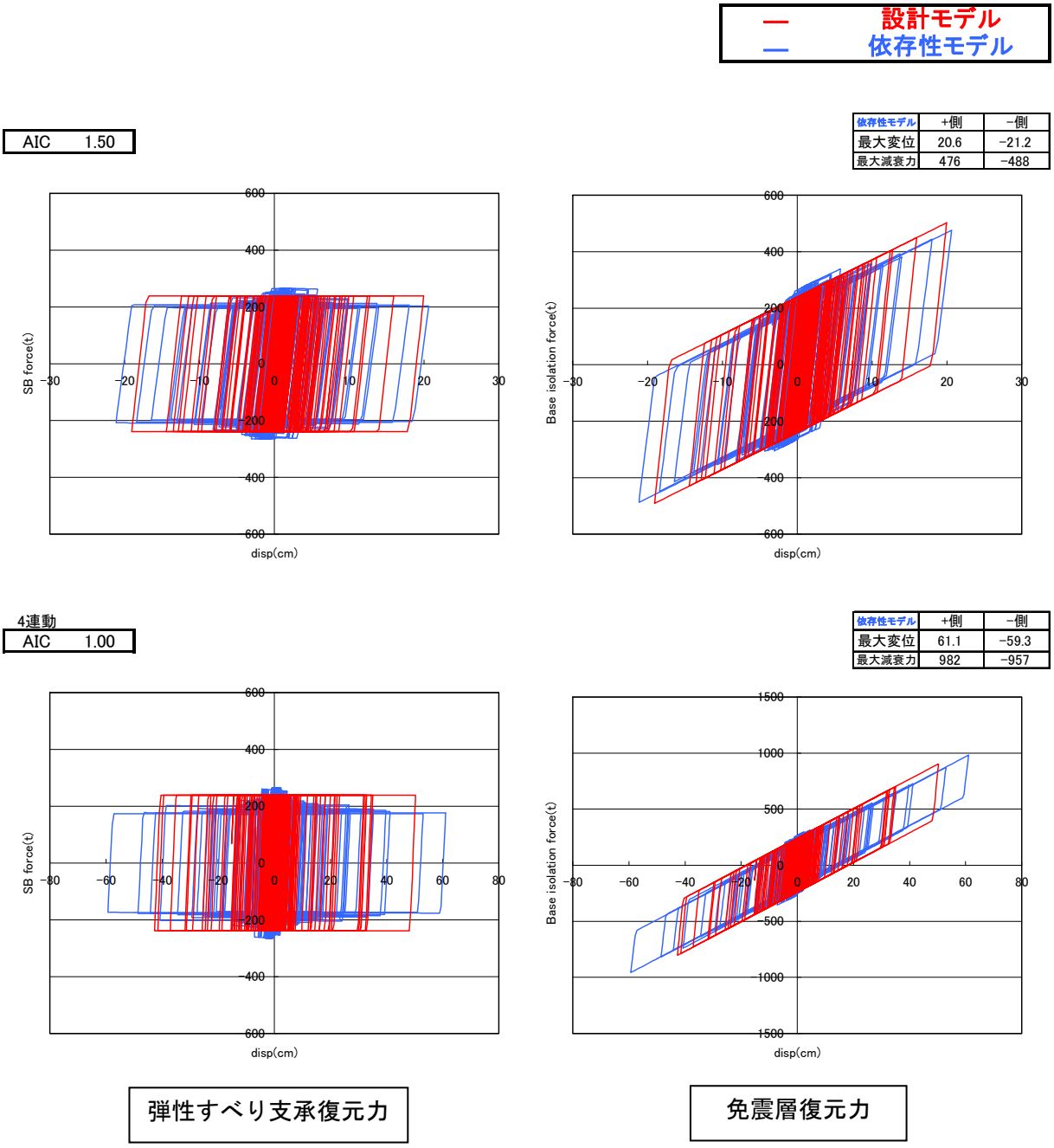

設計モデル
依存性モデル
AIC 1.50
依存性モデル | +側 | −側
最大変位 | 20.6 | −21.2
最大減衰力 | 476 | −488
SB force(t)
disp(cm)
Base isolation force(t)
disp(cm)
4連動
AIC 1.00
依存性モデル | +側 | −側
最大変位 | 61.1 | −59.3
最大減衰力 | 982 | −957
SB force(t)
disp(cm)
Base isolation force(t)
disp(cm)
弾性すべり支承復元力
免震層復元力

図 1.3.4-8(2)　応答履歴

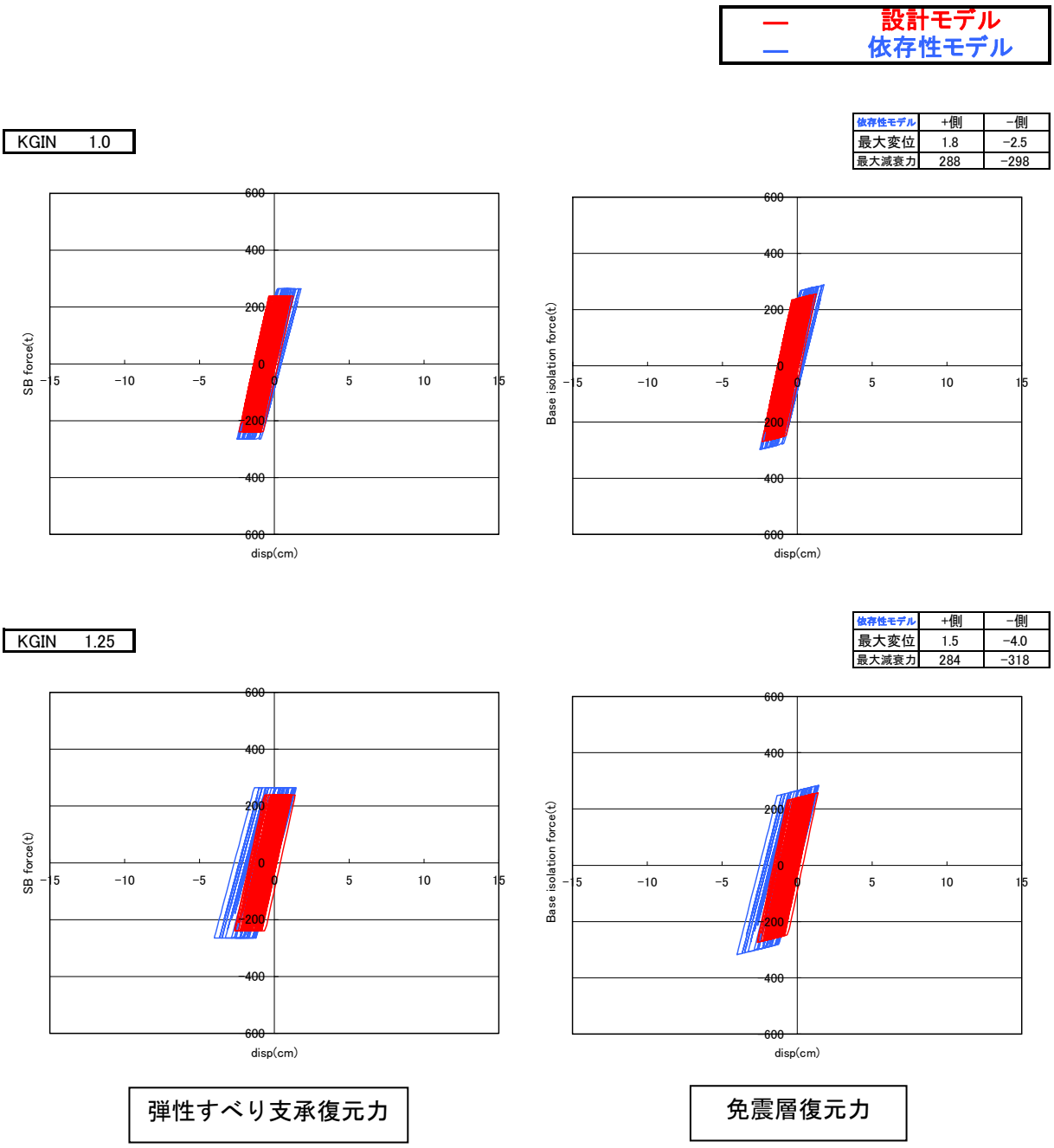

設計モデル
依存性モデル
KGIN 1.0
依存性モデル | +側 | −側
最大変位 | 1.8 | −2.5
最大減衰力 | 288 | −298
SB force(t)
Base isolation force(t)
disp(cm)
KGIN 1.25
依存性モデル | +側 | −側
最大変位 | 1.5 | −4.0
最大減衰力 | 284 | −318
弾性すべり支承復元力
免震層復元力

図 1.3.4-8(3)　応答履歴

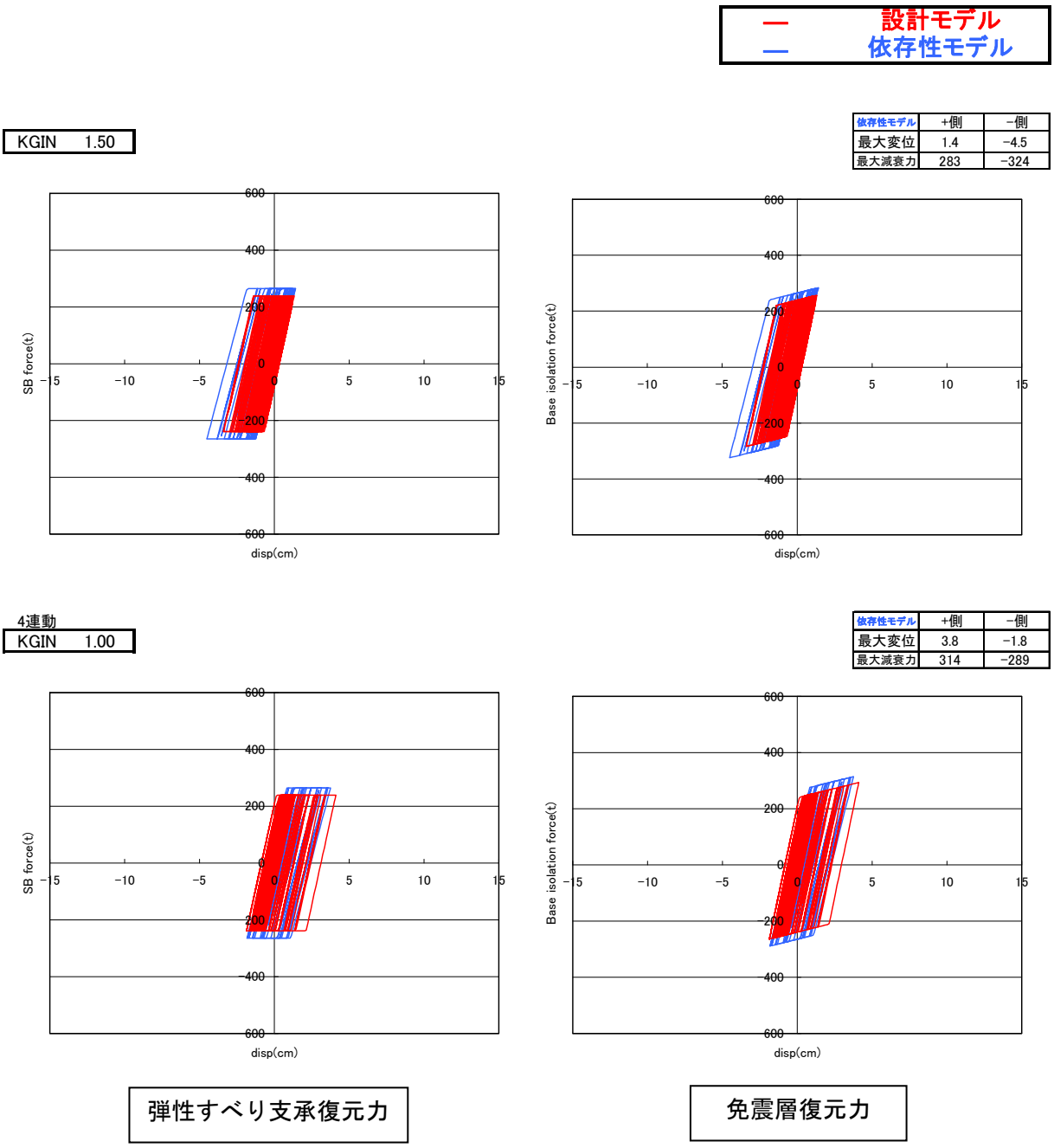

設計モデル
依存性モデル
KGIN 1.50
依存性モデル | +側 | −側
最大変位 | 1.4 | −4.5
最大減衰力 | 283 | −324
SB force(t)
Base isolation force(t)
disp(cm)
4連動
KGIN 1.00
依存性モデル | +側 | −側
最大変位 | 3.8 | −1.8
最大減衰力 | 314 | −289
弾性すべり支承復元力
免震層復元力

図 1.3.4-8(4)　応答履歴

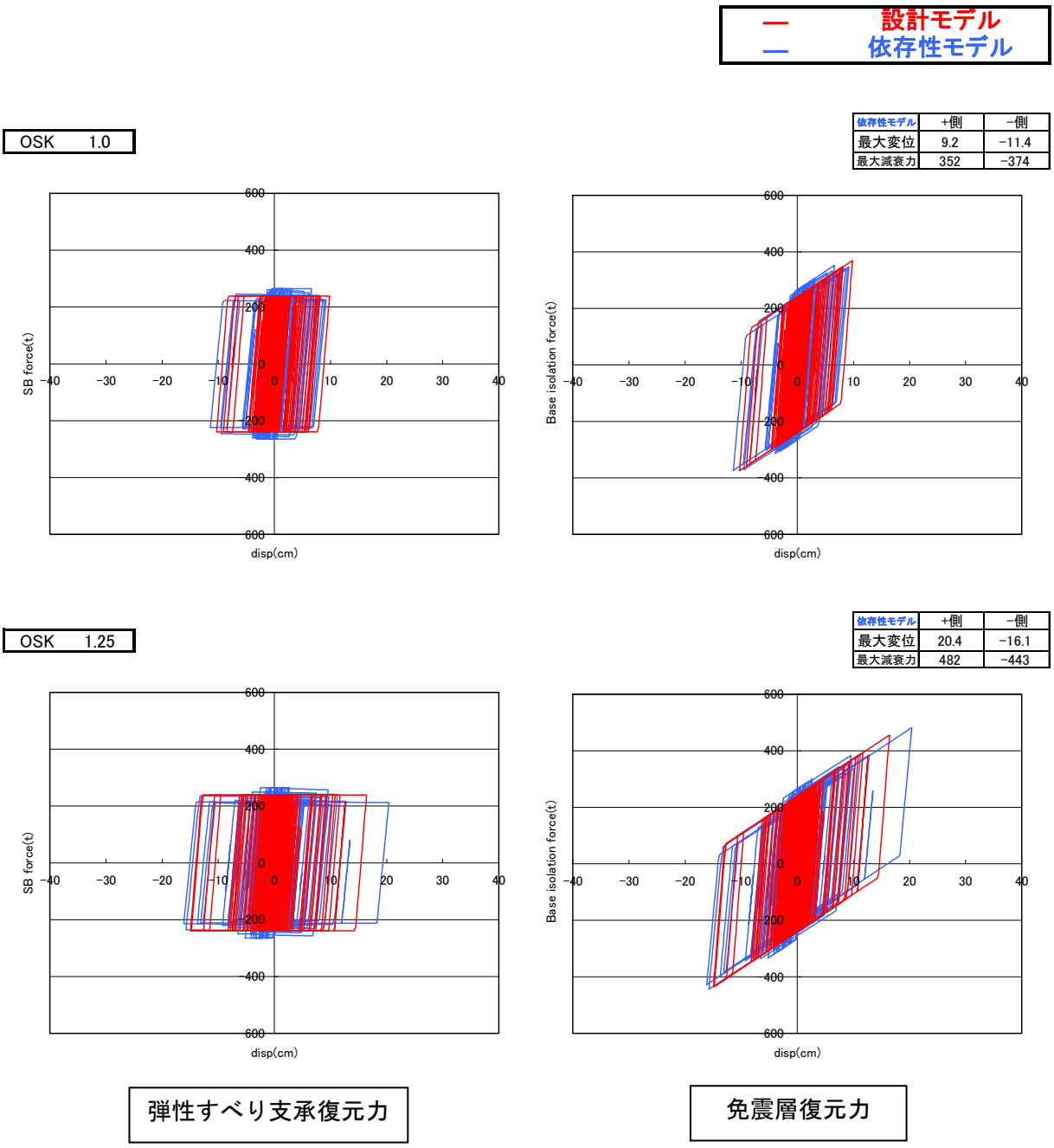

設計モデル
依存性モデル
OSK 1.0
依存性モデル | +側 | −側
最大変位 | 9.2 | −11.4
最大減衰力 | 352 | −374
SB force(t)
Base isolation force(t)
disp(cm)
OSK 1.25
依存性モデル | +側 | −側
最大変位 | 20.4 | −16.1
最大減衰力 | 482 | −443
弾性すべり支承復元力
免震層復元力

図 1.3.4-8(5)　応答履歴

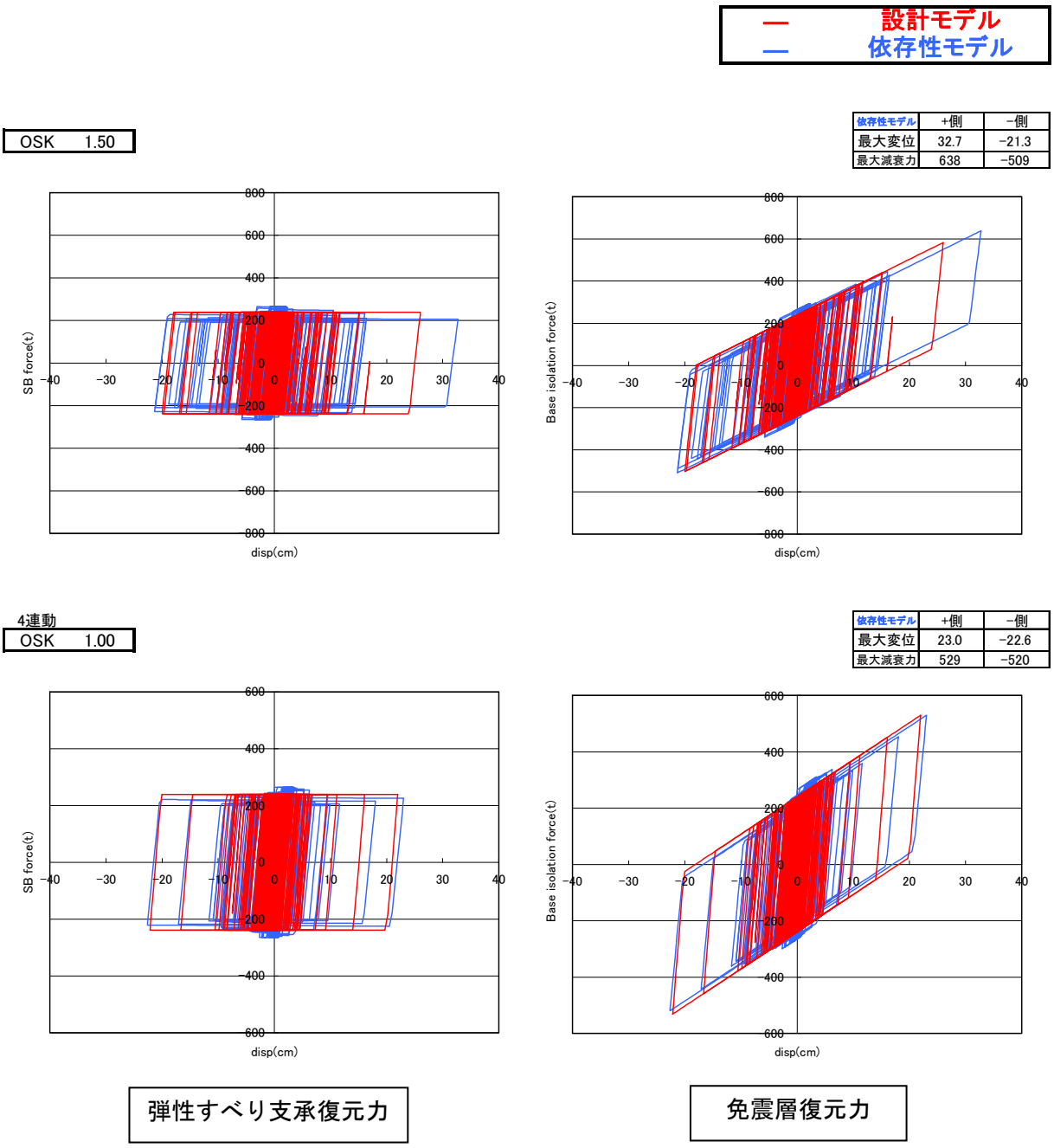

設計モデル
依存性モデル
OSK 1.50
依存性モデル | +側 | −側
最大変位 | 32.7 | −21.3
最大減衰力 | 638 | −509
SB force(t)
Base isolation force(t)
disp(cm)
4連動
OSK 1.00
依存性モデル | +側 | −側
最大変位 | 23.0 | −22.6
最大減衰力 | 529 | −520
弾性すべり支承復元力
免震層復元力

図 1.3.4-8(6)　応答履歴

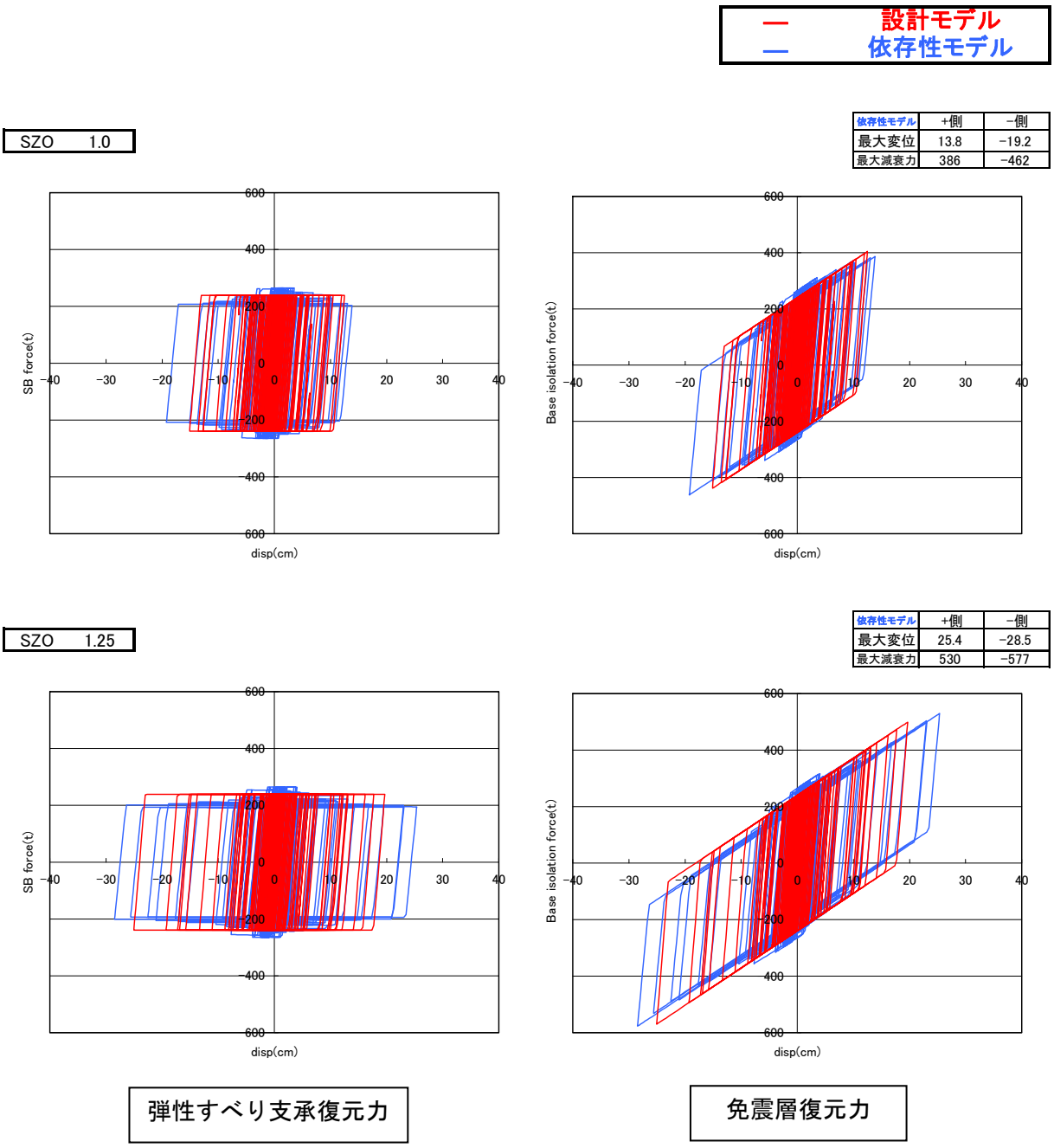

設計モデル
依存性モデル
SZO 1.0
依存性モデル | +側 | −側
最大変位 | 13.8 | −19.2
最大減衰力 | 386 | −462
SB force(t)
Base isolation force(t)
disp(cm)
SZO 1.25
依存性モデル | +側 | −側
最大変位 | 25.4 | −28.5
最大減衰力 | 530 | −577
弾性すべり支承復元力
免震層復元力

図 1.3.4-8(7)　応答履歴

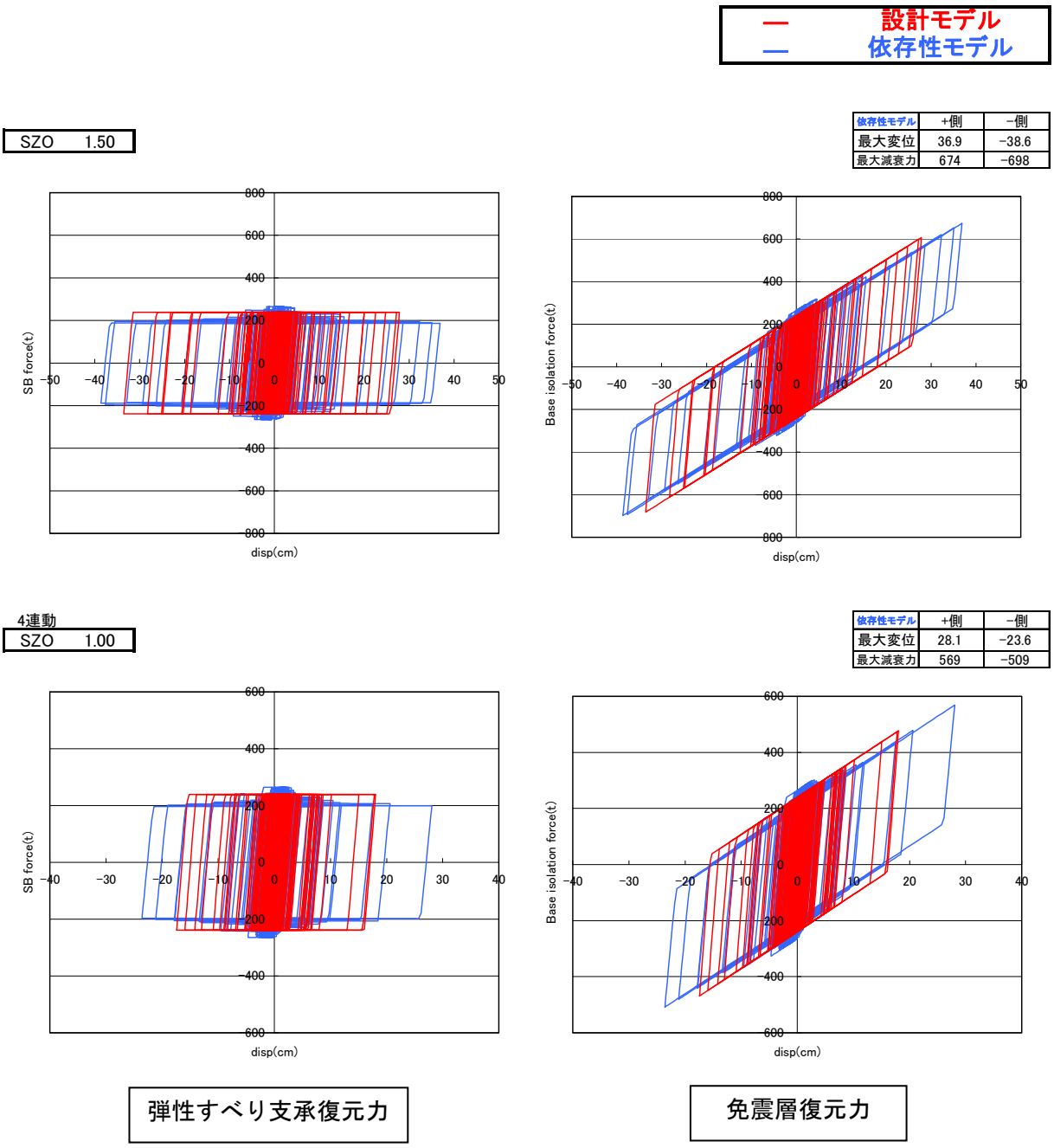

設計モデル
依存性モデル
SZO 1.50
依存性モデル | +側 | −側
最大変位 | 36.9 | −38.6
最大減衰力 | 674 | −698
SB force(t)
Base isolation force(t)
disp(cm)
4連動
SZO 1.00
依存性モデル | +側 | −側
最大変位 | 28.1 | −23.6
最大減衰力 | 569 | −509
弾性すべり支承復元力
免震層復元力

図 1.3.4-8(8)　応答履歴

設計モデルおよび依存性モデルの最大変位一覧を下表に示す。また、最大変形プロット図を示す。設計モデルよりも依存性モデルの方が、最大変形が大きい傾向が確認できる。最大で設計モデルの 1.56 倍の変位が生じている。このことから、既往の設計モデルで想定している免震層最大変位よりも過大な変形が生じる可能性が考えられる。

表 1.3.4-2　最大値一覧

AIC-1.0	設計モデル	依存性モデル	比率(依存性モデル/設計モデル)
最大変位cm	11.3	11.0	0.98
最大減衰力t	387.7	365.0	0.94

KGIN-1.0	設計モデル	依存性モデル	比率(依存性モデル/設計モデル)
最大変位cm	2.4	2.5	1.06
最大減衰力t	270.1	298.0	1.10

AIC-1.25	設計モデル	依存性モデル	比率(依存性モデル/設計モデル)
最大変位cm	15.5	17.0	1.10
最大減衰力t	443.7	433.0	0.98

KGIN-1.25	設計モデル	依存性モデル	比率(依存性モデル/設計モデル)
最大変位cm	2.7	4.0	1.50
最大減衰力t	274.2	318.0	1.16

AIC-1.5	設計モデル	依存性モデル	比率(依存性モデル/設計モデル)
最大変位cm	20.0	21.2	1.06
最大減衰力t	502.5	488.0	0.97

KGIN-1.5	設計モデル	依存性モデル	比率(依存性モデル/設計モデル)
最大変位cm	3.4	4.5	1.32
最大減衰力t	284.1	324.0	1.14

4連動AIC-1.0	設計モデル	依存性モデル	比率(依存性モデル/設計モデル)
最大変位cm	50.3	61.1	1.21
最大減衰力t	903.2	982.0	1.09

4連動KGIN-1.0	設計モデル	依存性モデル	比率(依存性モデル/設計モデル)
最大変位cm	4.1	3.8	0.92
最大減衰力t	293.3	314.0	1.07

OSK-1.0	設計モデル	依存性モデル	比率(依存性モデル/設計モデル)
最大変位cm	10.3	11.4	1.11
最大減衰力t	374.6	374.0	1.00

SZO-1.0	設計モデル	依存性モデル	比率(依存性モデル/設計モデル)
最大変位cm	15.1	19.2	1.27
最大減衰力t	438.2	462.0	1.05

OSK-1.25	設計モデル	依存性モデル	比率(依存性モデル/設計モデル)
最大変位cm	16.4	20.4	1.24
最大減衰力t	456.0	482.0	1.06

SZO-1.25	設計モデル	依存性モデル	比率(依存性モデル/設計モデル)
最大変位cm	25.0	28.5	1.14
最大減衰力t	569.4	577.0	1.01

OSK-1.5	設計モデル	依存性モデル	比率(依存性モデル/設計モデル)
最大変位cm	26.0	32.7	1.26
最大減衰力t	582.5	638.0	1.10

SZO-1.5	設計モデル	依存性モデル	比率(依存性モデル/設計モデル)
最大変位cm	33.5	38.6	1.15
最大減衰力t	681.9	698.0	1.02

4連動OSK-1.0	設計モデル	依存性モデル	比率(依存性モデル/設計モデル)
最大変位cm	22.2	23.0	1.04
最大減衰力t	531.5	529.0	1.00

4連動SZO-1.0	設計モデル	依存性モデル	比率(依存性モデル/設計モデル)
最大変位cm	18.0	28.1	1.56
最大減衰力t	477.3	569.0	1.19

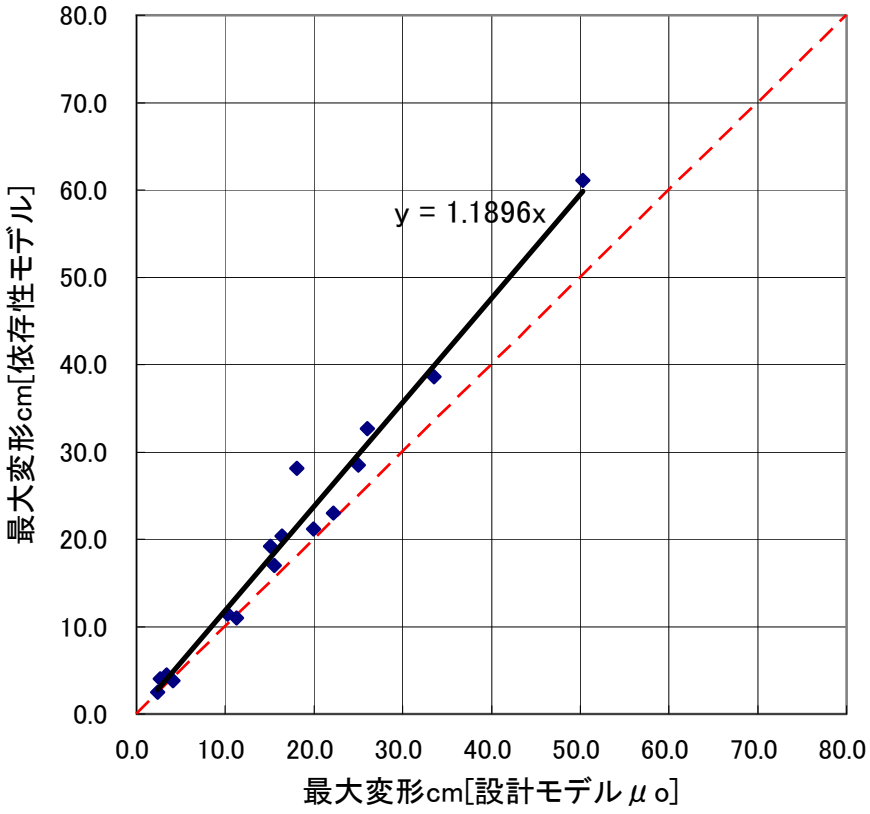


図 1.3.4-9　最大変形プロット図

■設計モデルと依存性モデルによる違い

・最大変形：通常設計で見込むばらつき以外に、繰り返し依存性により変形が増大する傾向がある。

・最大減衰力：繰り返し依存性により増加した減衰力と通常設計で見込むばらつき(+)側の最大減衰力の大小関係で、上部構造への影響もありうる。

⇒本検討では繰り返し依存性による変形増大をターゲットにした簡易評価法を検討する。

b）依存性モデルにおける摩擦係数低下傾向

依存性モデルの摩擦係数と累積すべり変位、累積すべりエネルギーの関係を示す。累積すべり変位・累積吸収エネルギーが過大なほど、摩擦係数の低減が大きいことが確認できる。

μｏ　：設計モデルの基準摩擦係数=0.112

μ（t）：依存性モデルの最終ステップ時摩擦係数

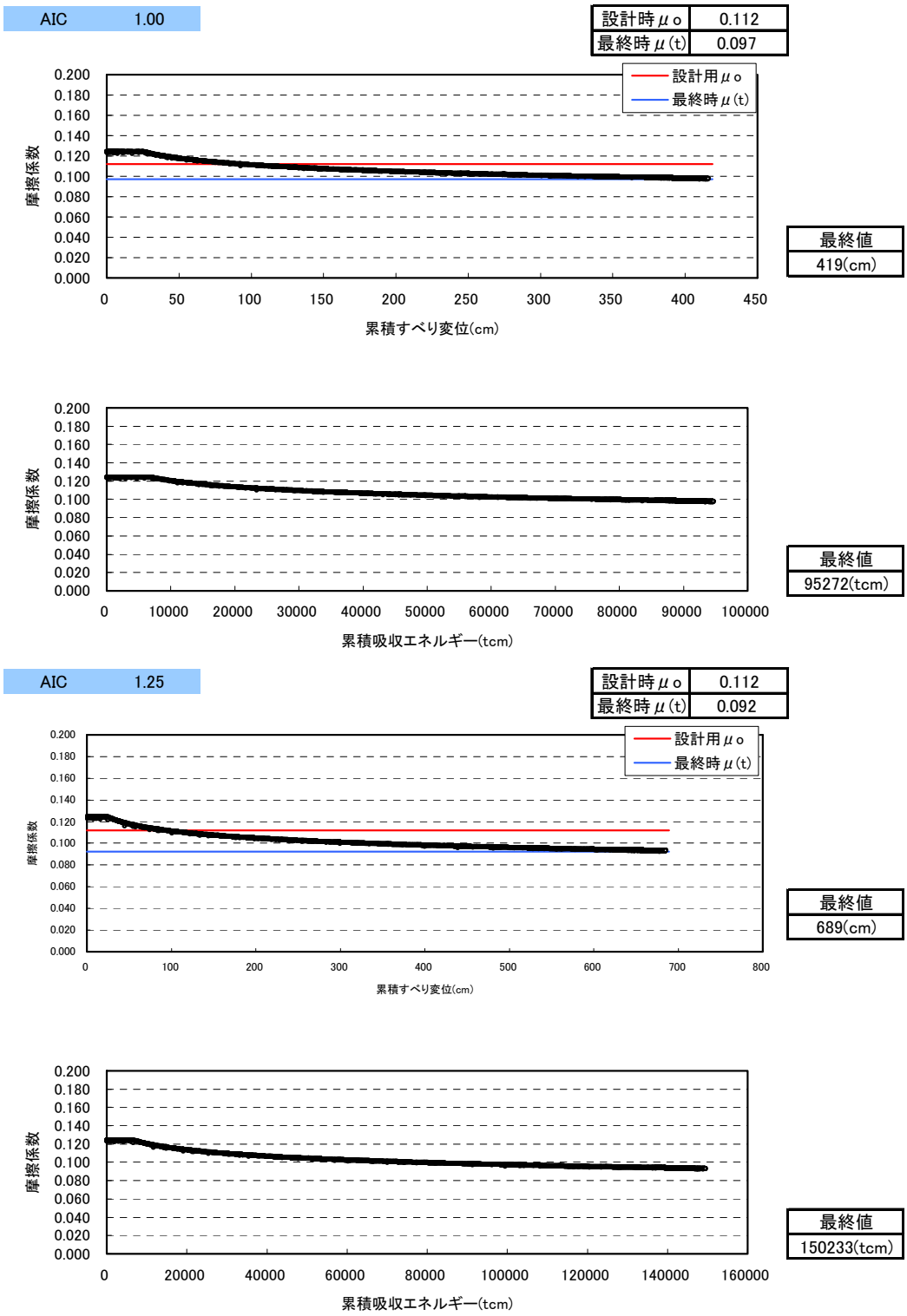
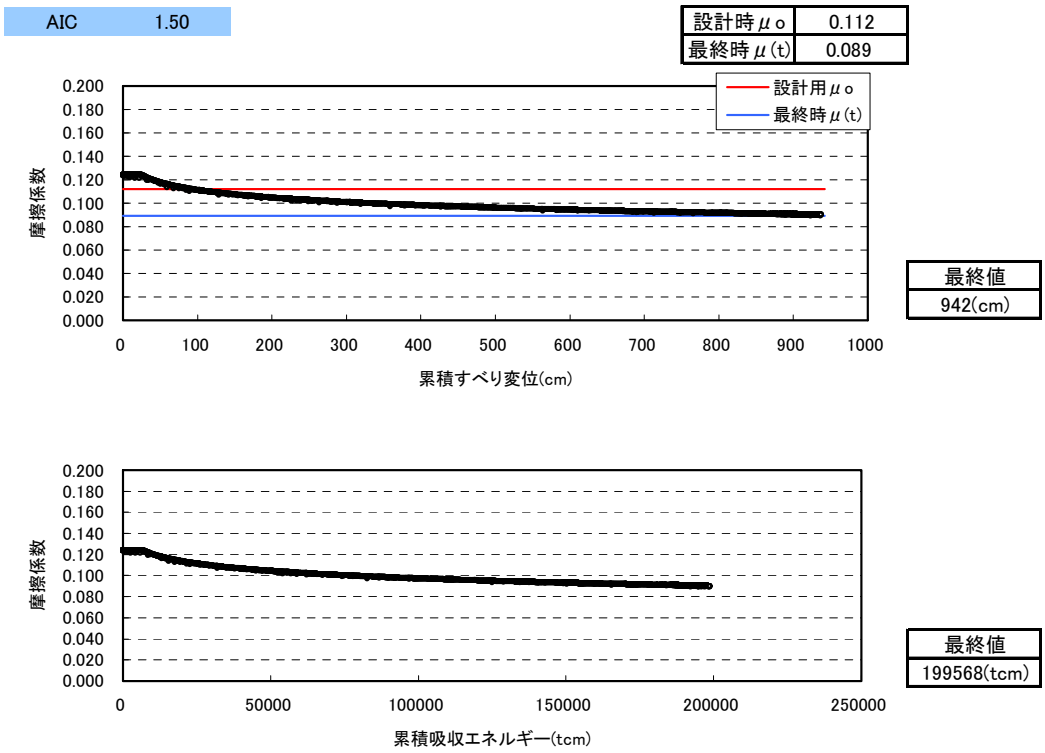


図 1.3.4-10(1)　摩擦係数－累積すべり変位、累積吸収エネルギー関係



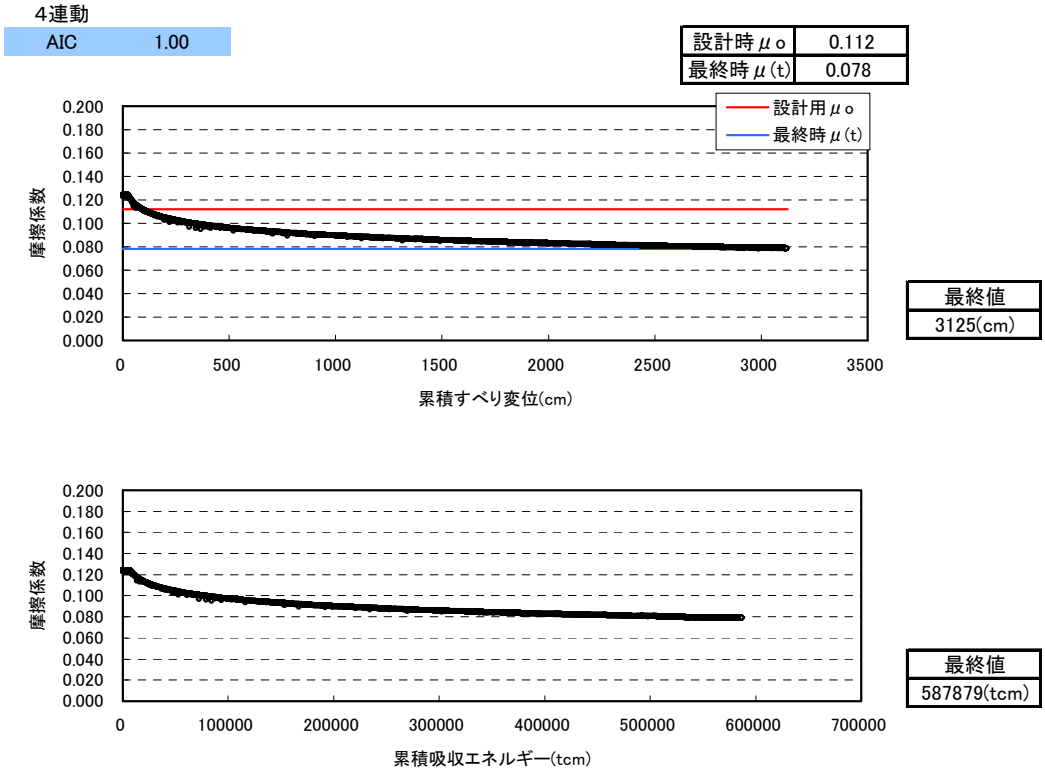


図 1.3.4-10(2)　摩擦係数－累積すべり変位、累積吸収エネルギー関係

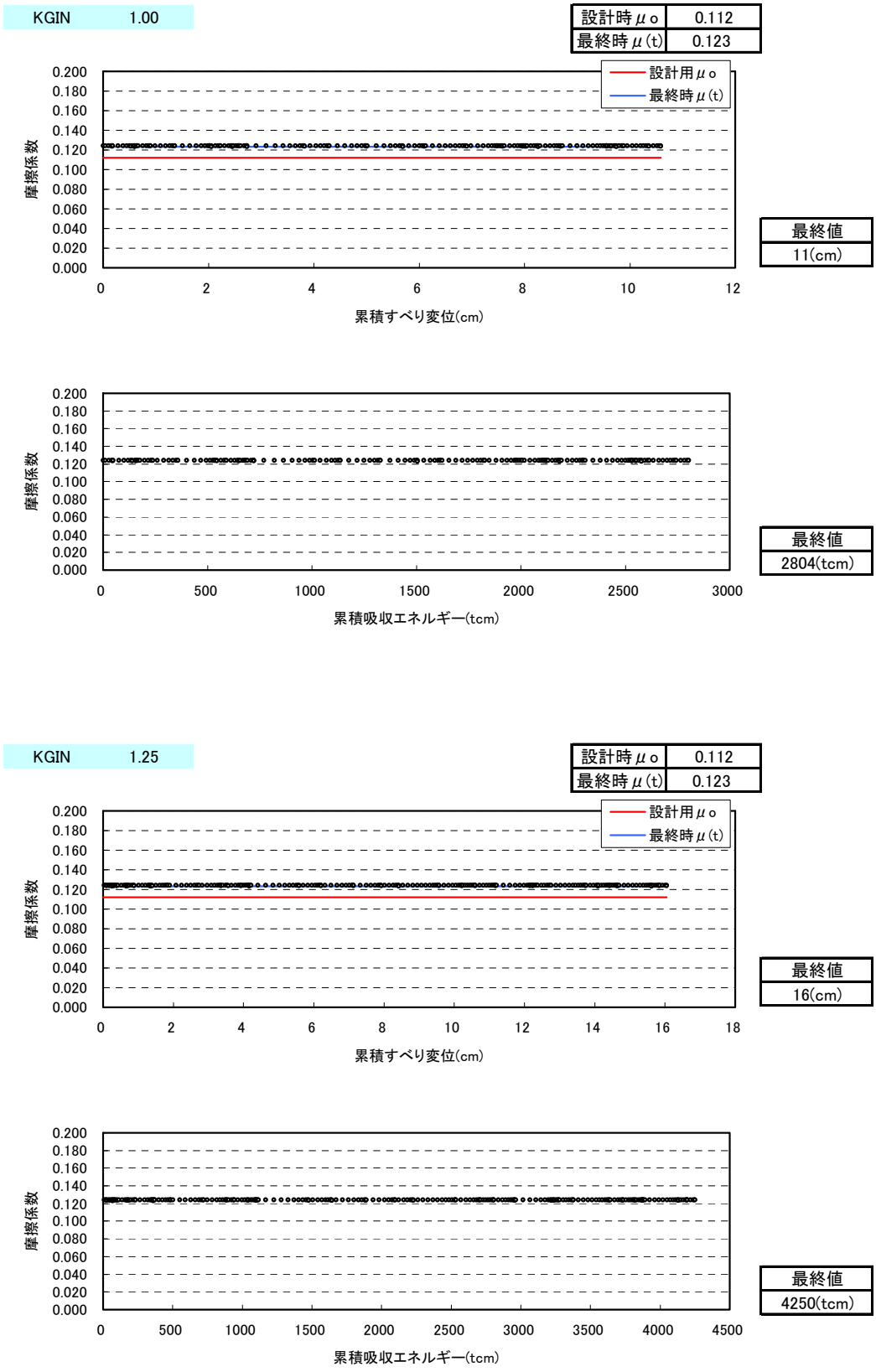
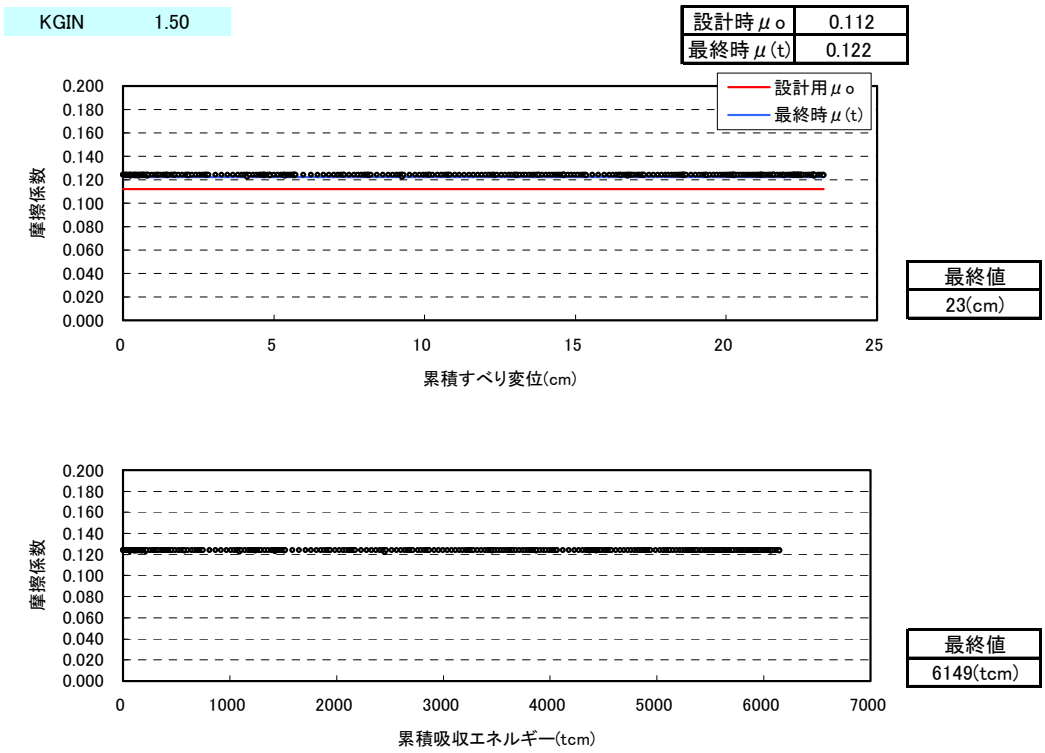


図 1.3.4-10(3)　摩擦係数－累積すべり変位、累積吸収エネルギー関係



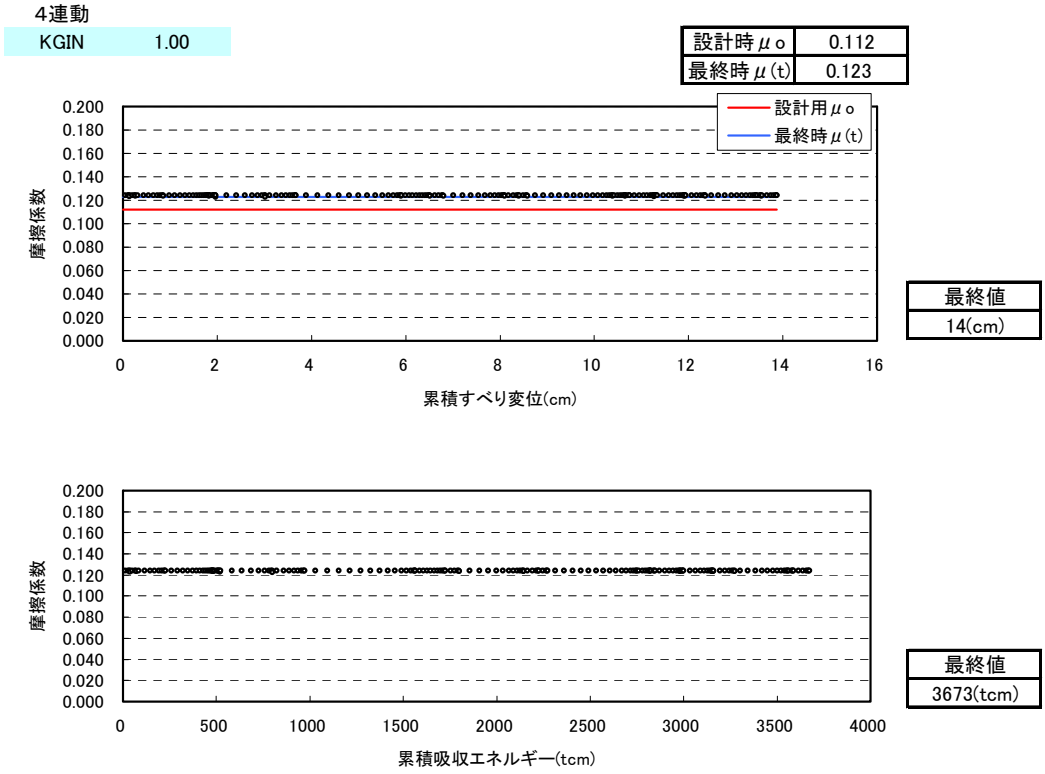


図 1.3.4-10(4)　摩擦係数－累積すべり変位、累積吸収エネルギー関係

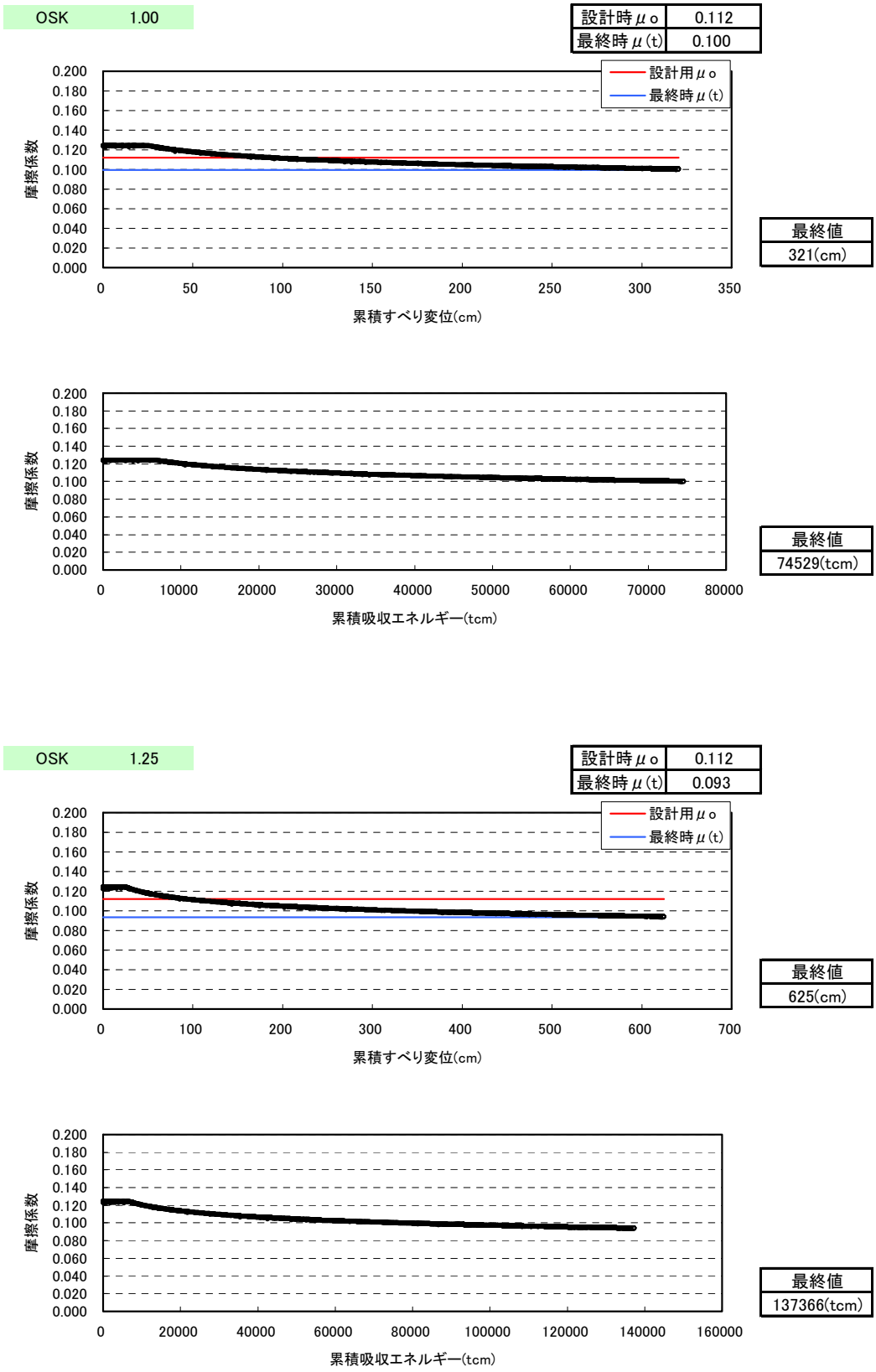


図 1.3.4-10(5)　摩擦係数－累積すべり変位、累積吸収エネルギー関係

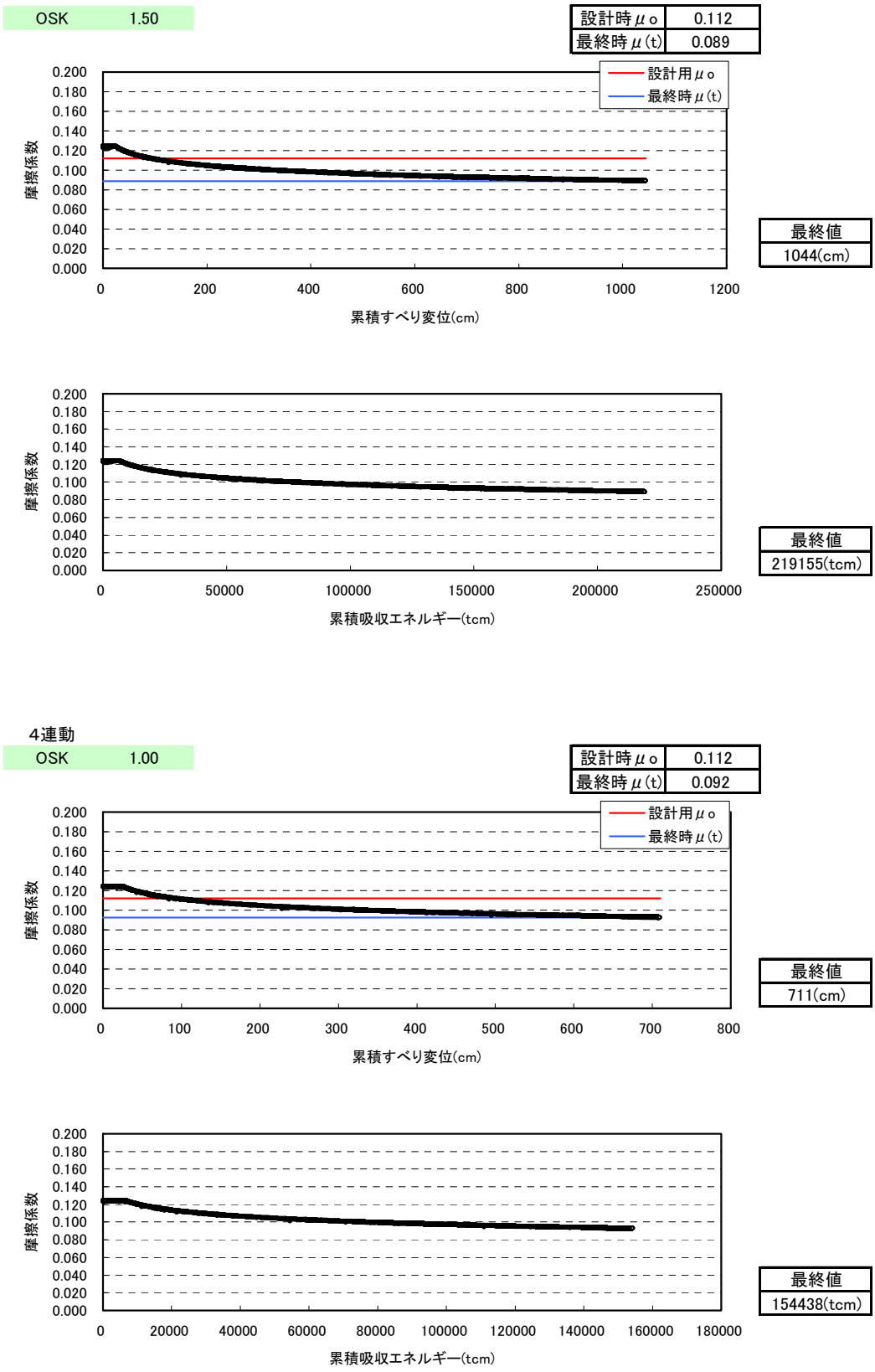


図 1.3.4-10(6)　摩擦係数－累積すべり変位、累積吸収エネルギー関係

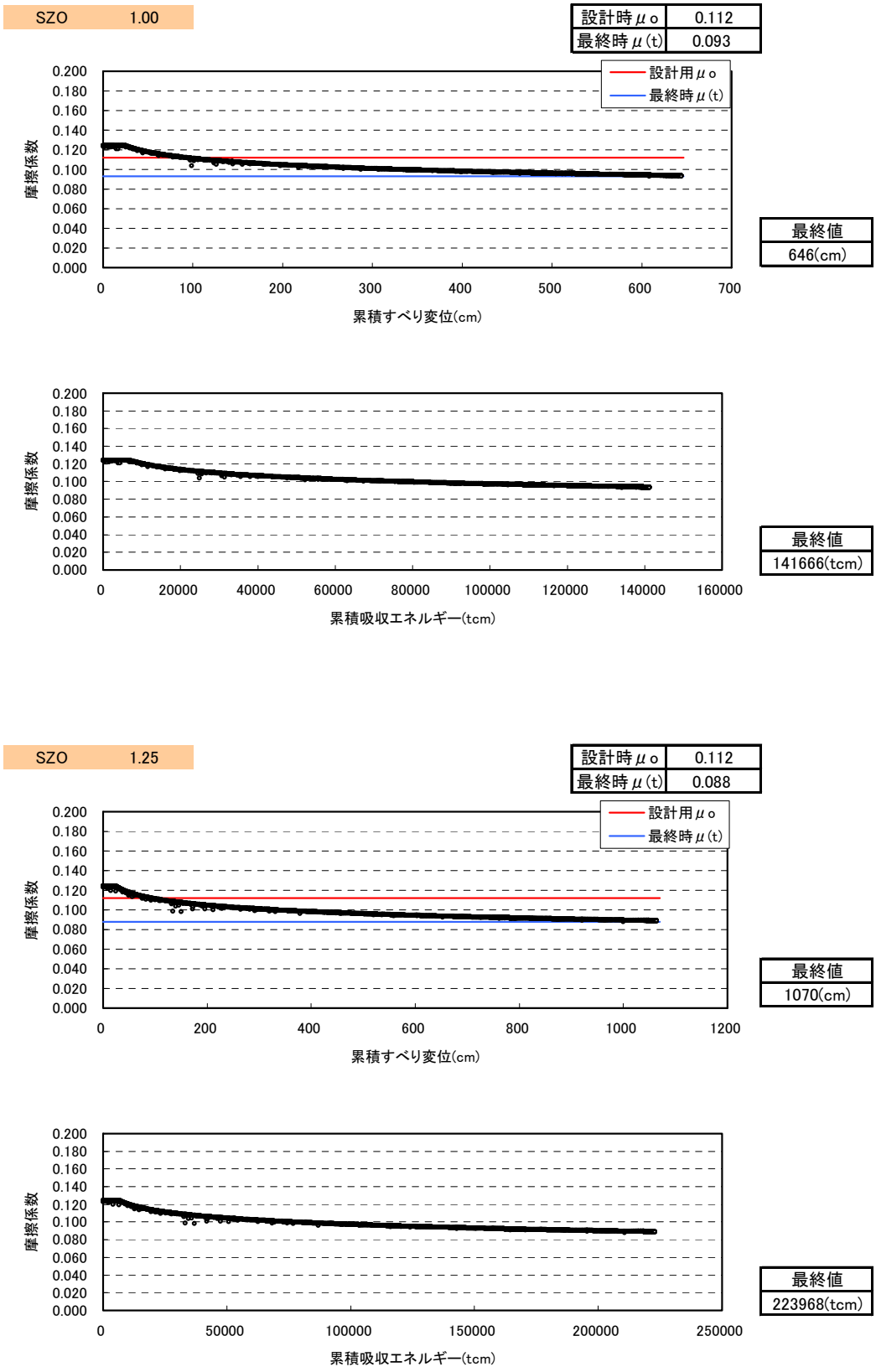
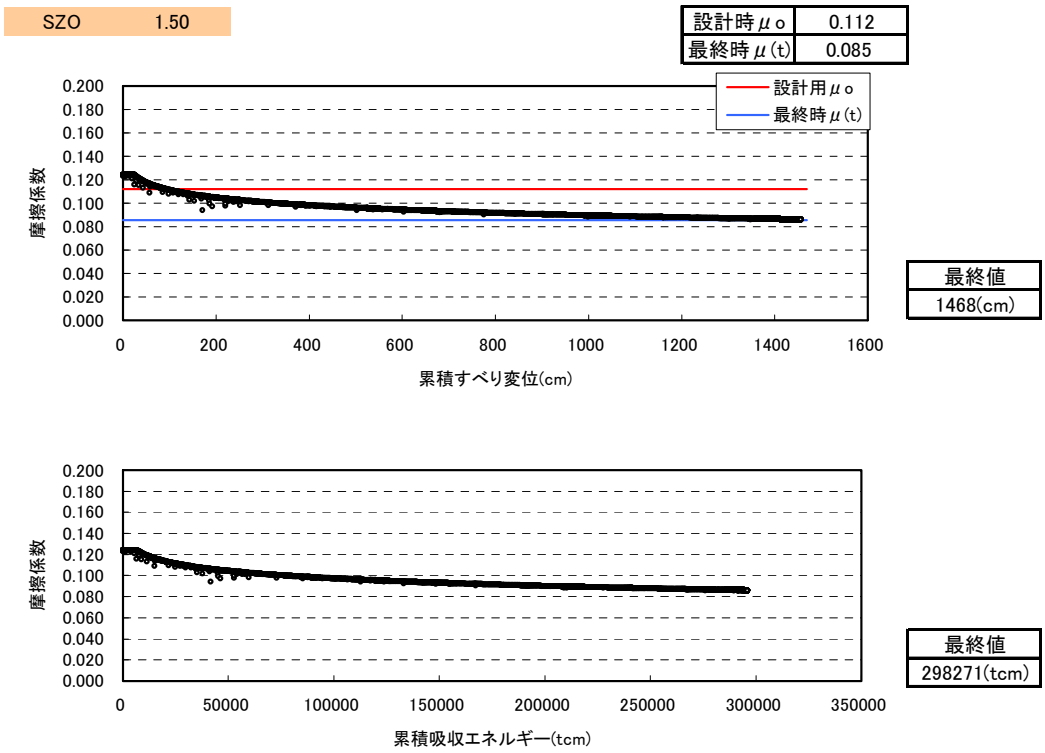


図 1.3.4-10(7)　摩擦係数－累積すべり変位、累積吸収エネルギー関係



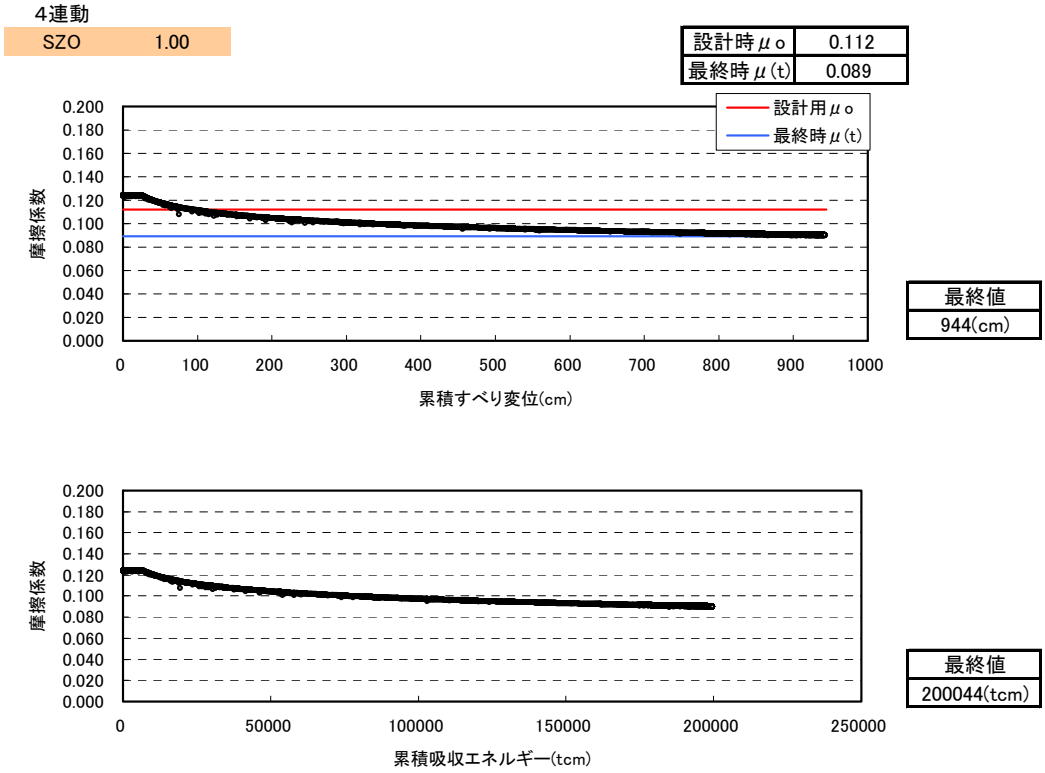


図 1.3.4-10(8)　摩擦係数－累積すべり変位、累積吸収エネルギー関係

c) 設計モデル応答時刻歴

設計モデル(μo=0.112)における変形及び累積すべり変位の時刻歴を示す。

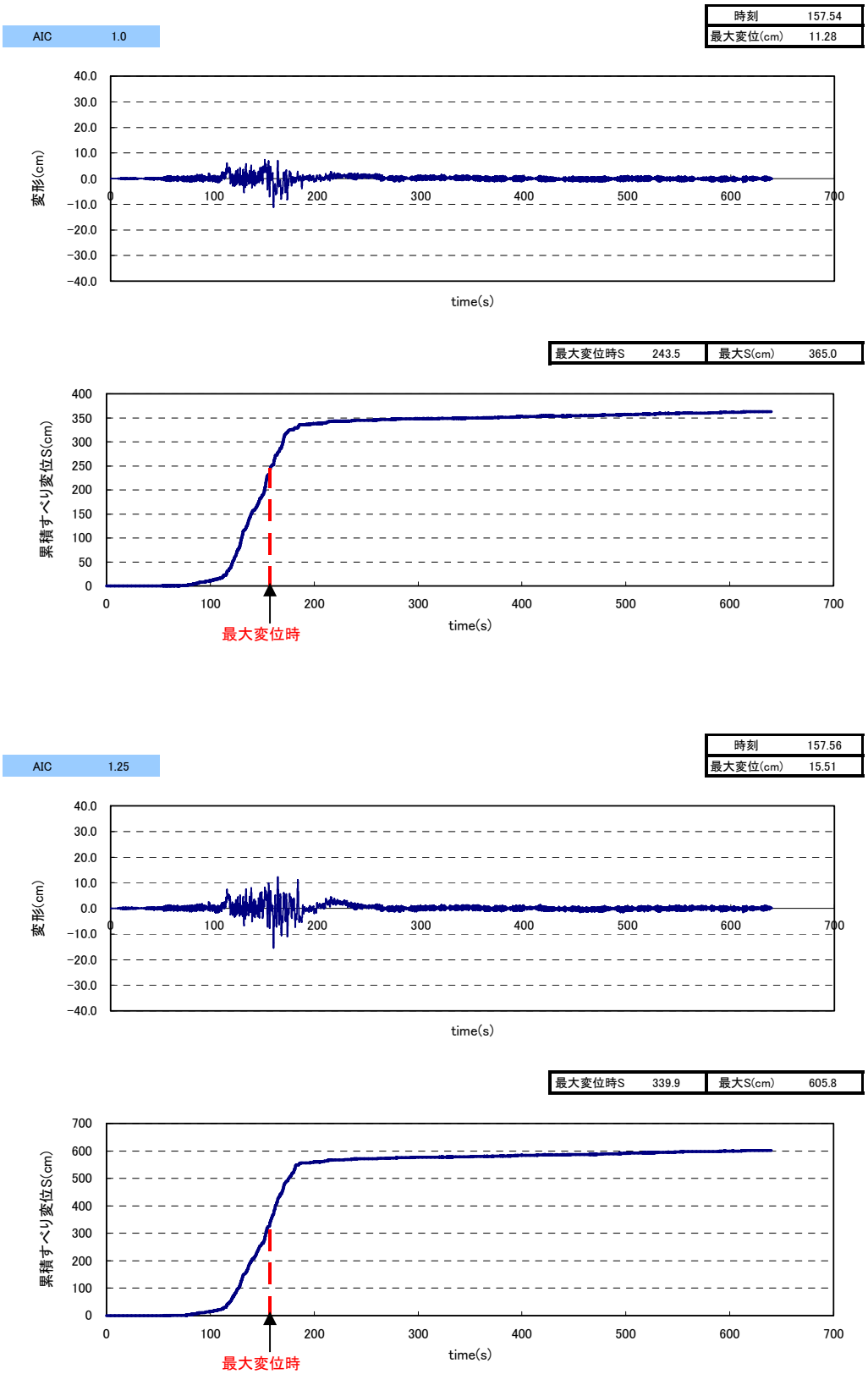
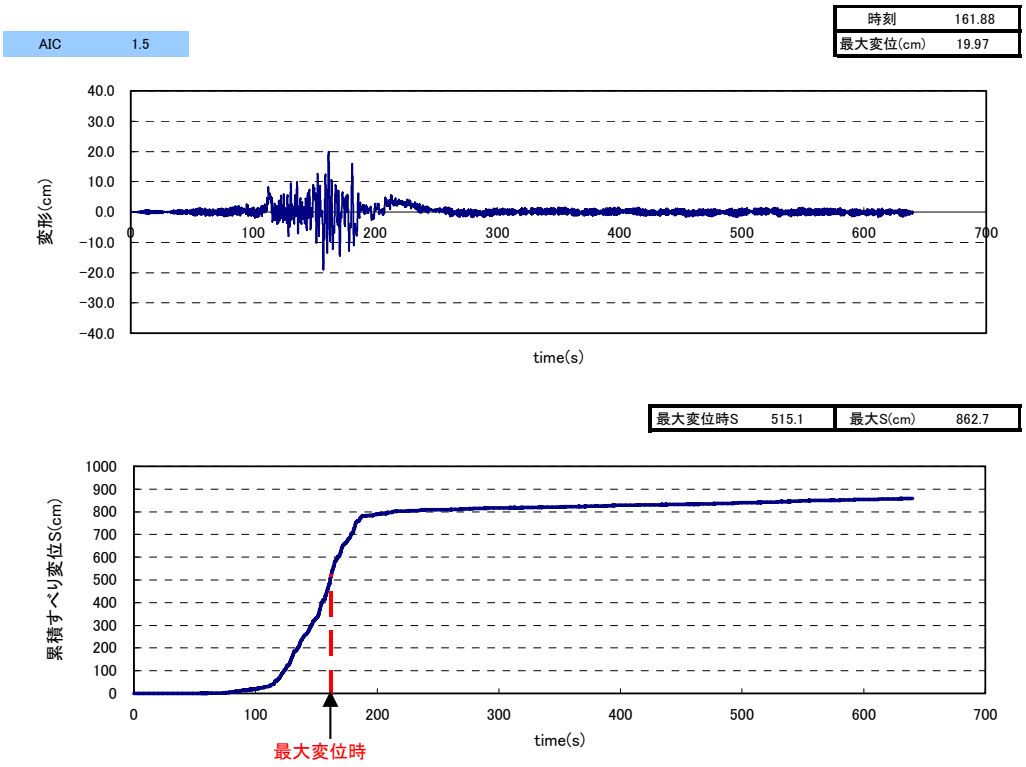


図 1.3.4-11(1)　変形・累積すべり変位時刻歴



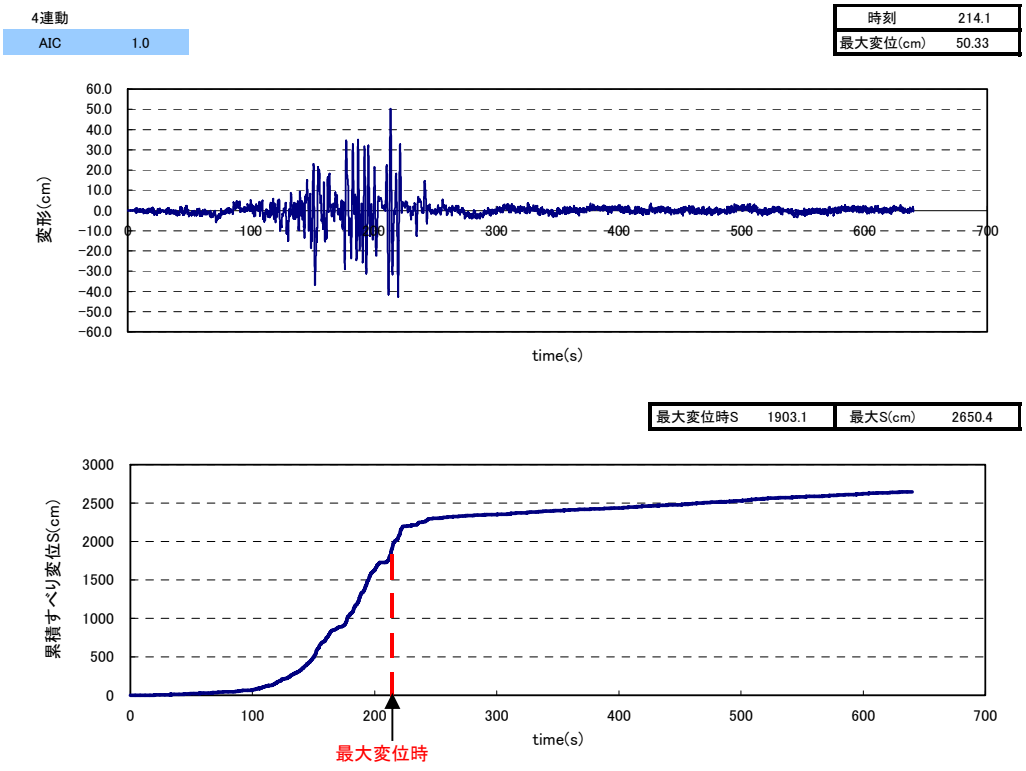
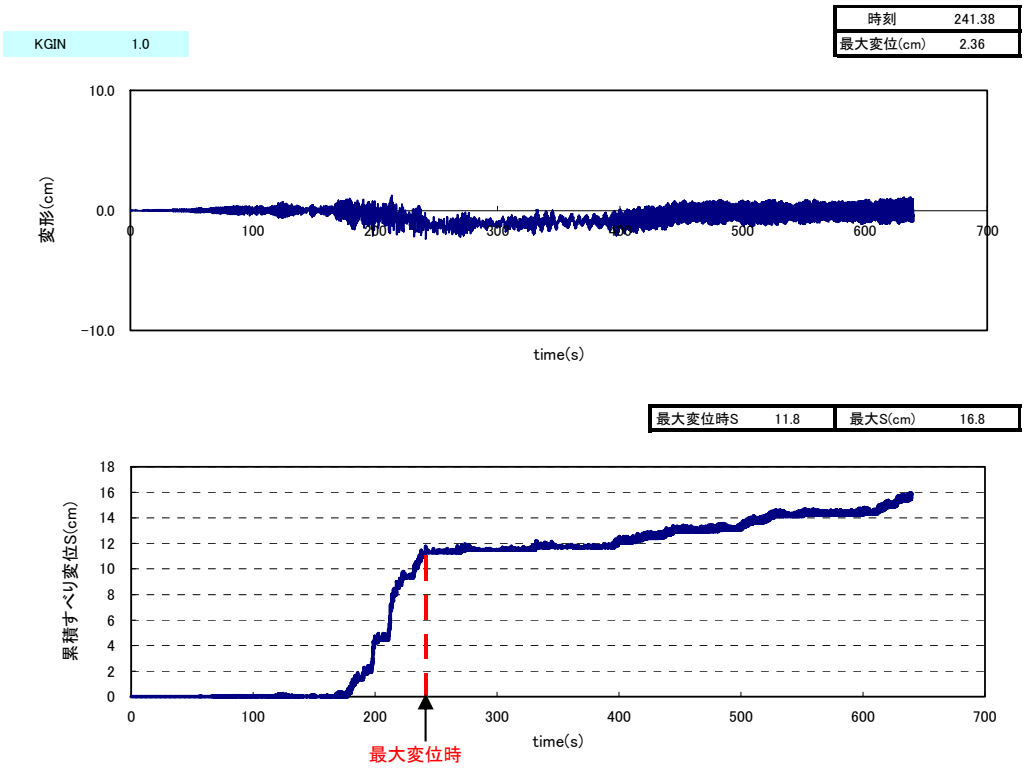


図 1.3.4-11(2)　変形・累積すべり変位時刻歴



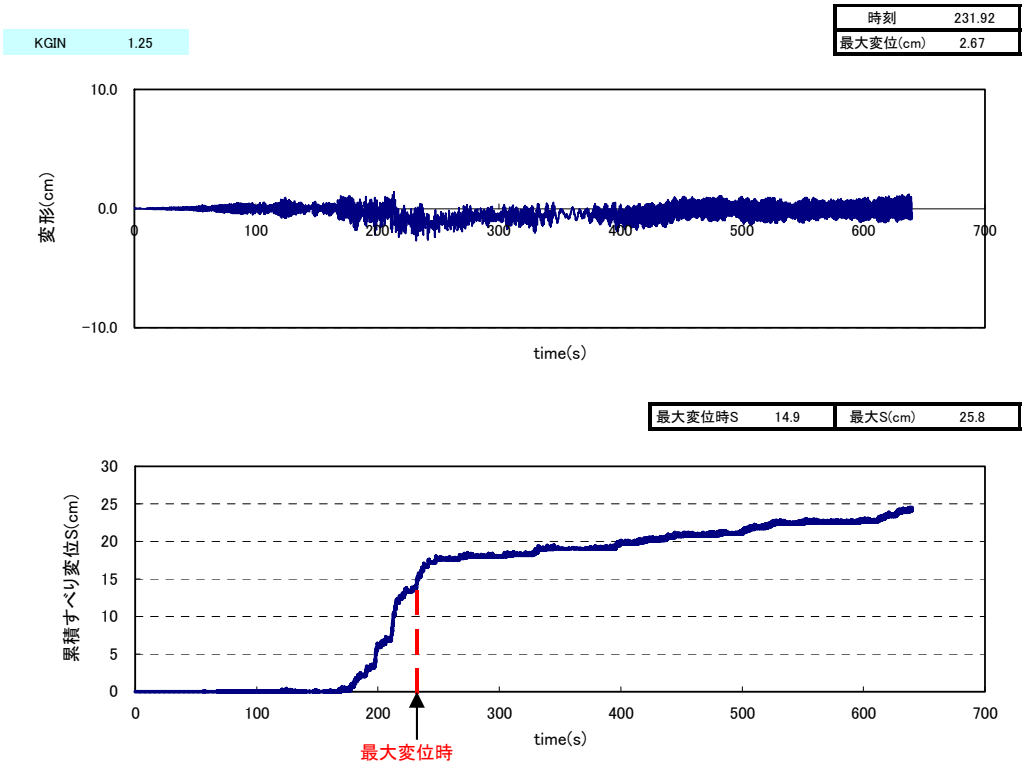
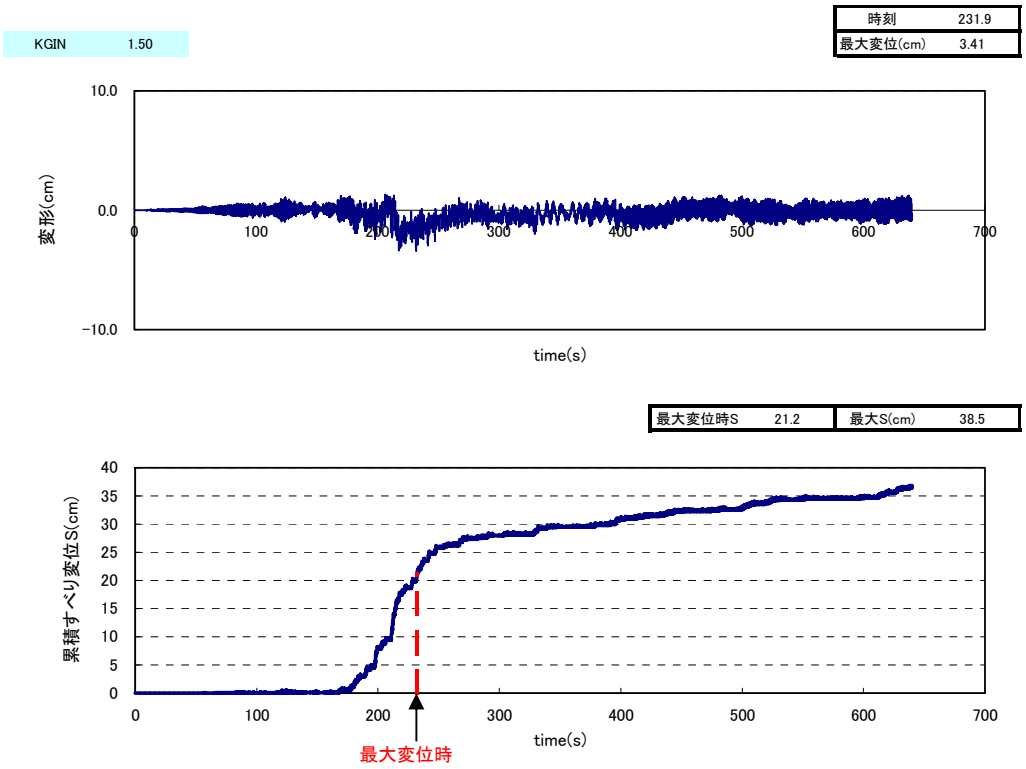


図 1.3.4-11(3)　変形・累積すべり変位時刻歴



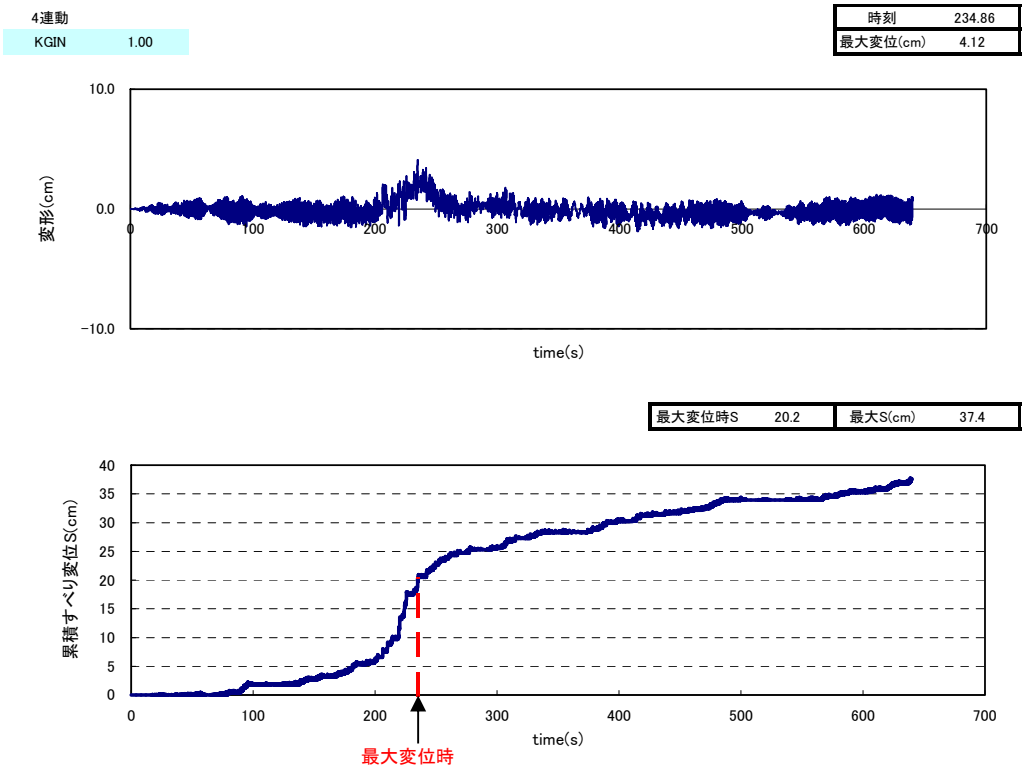
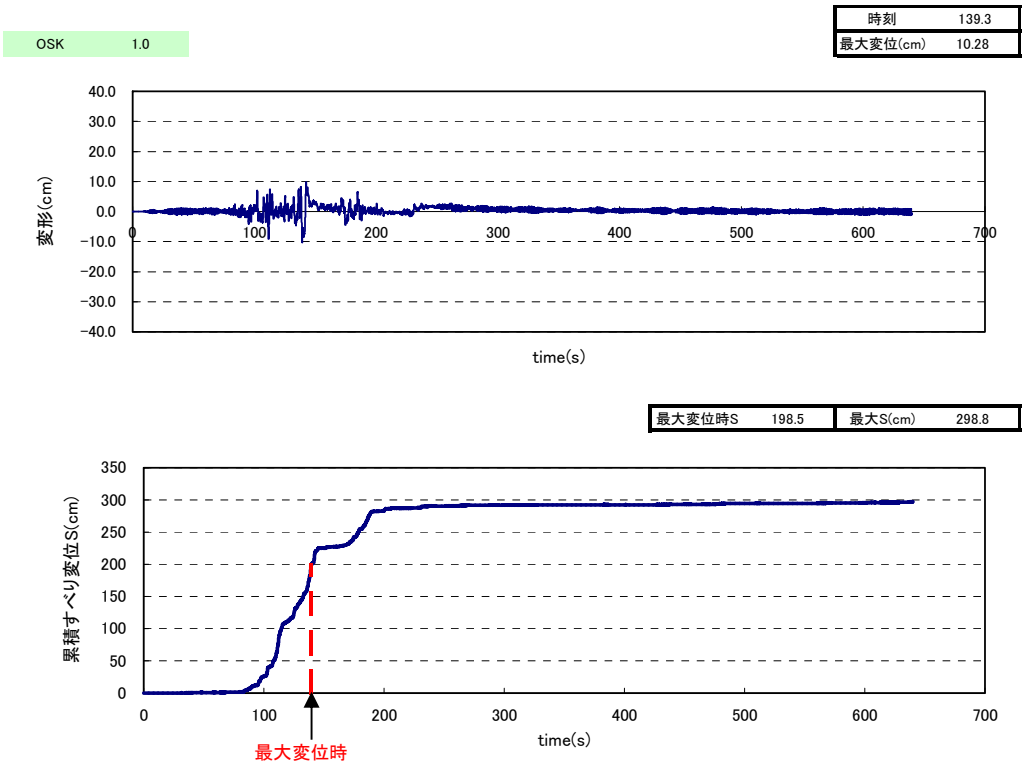


図 1.3.4-11(4)　変形・累積すべり変位時刻歴



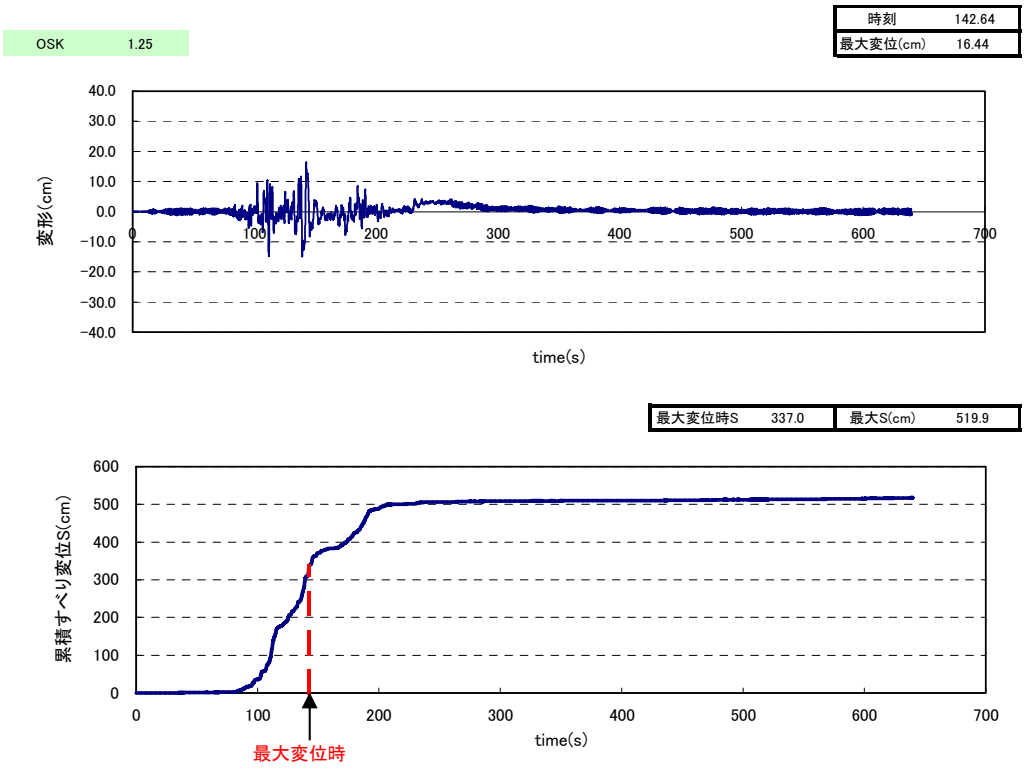
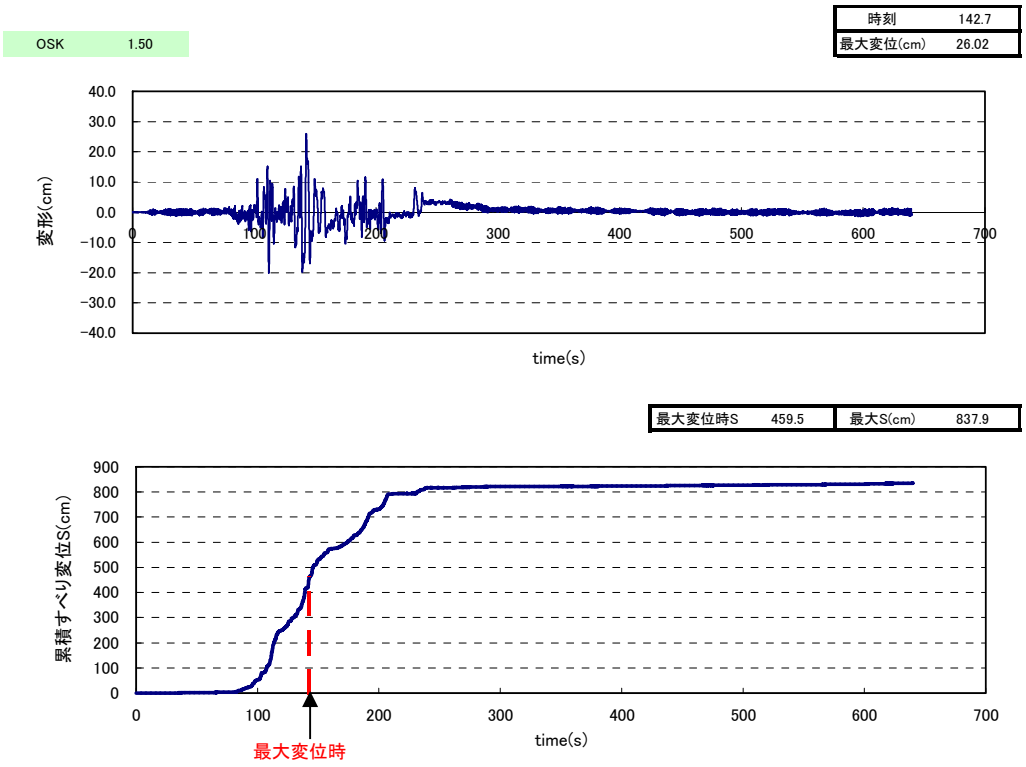


図 1.3.4-11(5)　変形・累積すべり変位時刻歴



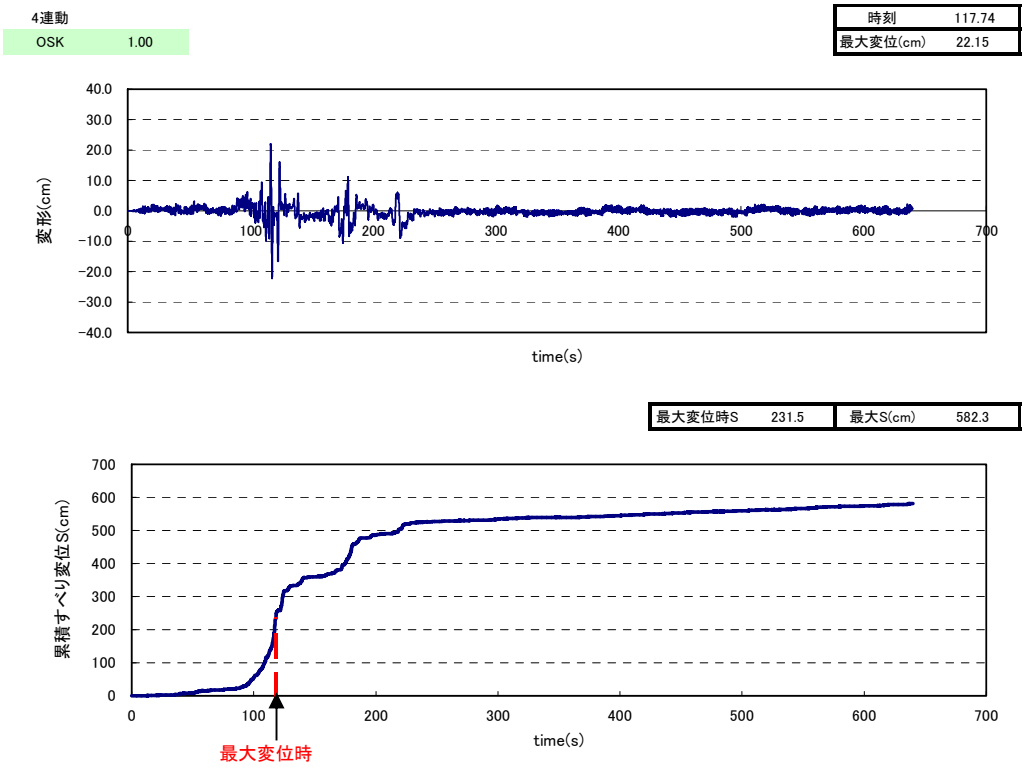
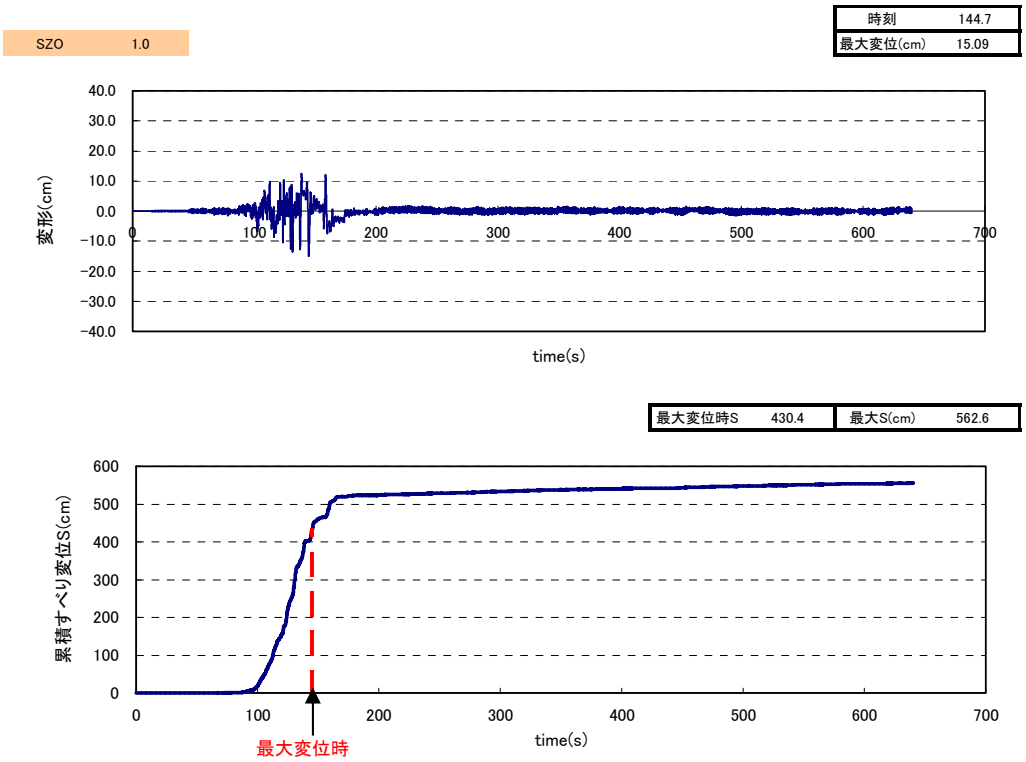


図 1.3.4-11(6)　変形・累積すべり変位時刻歴



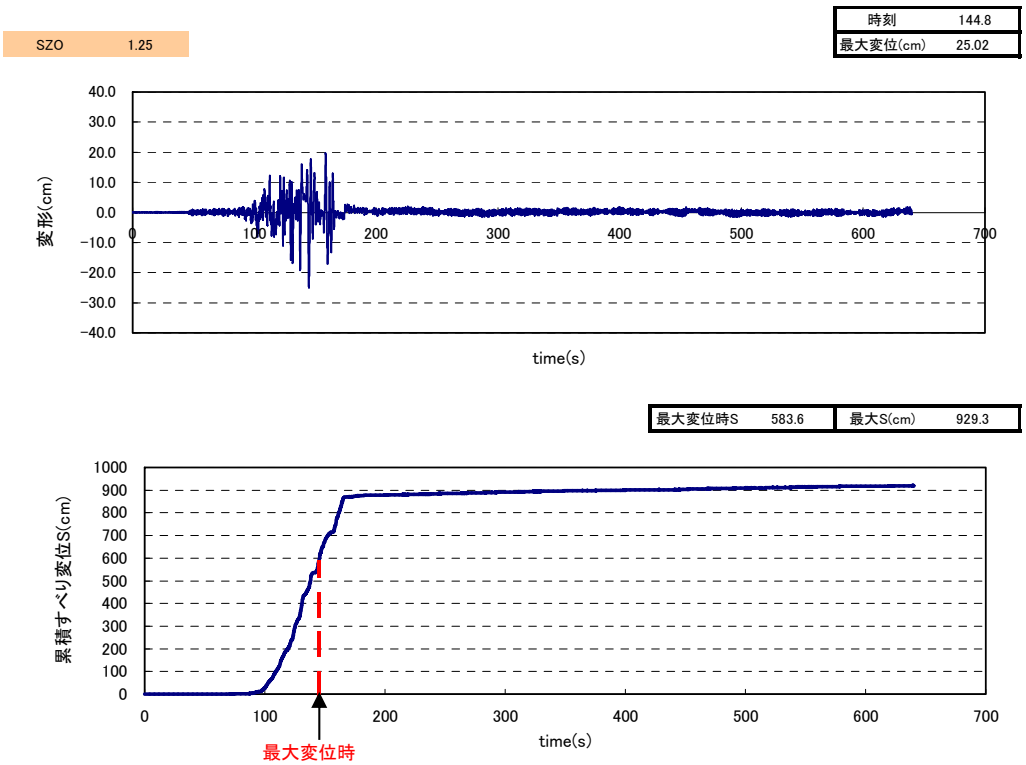
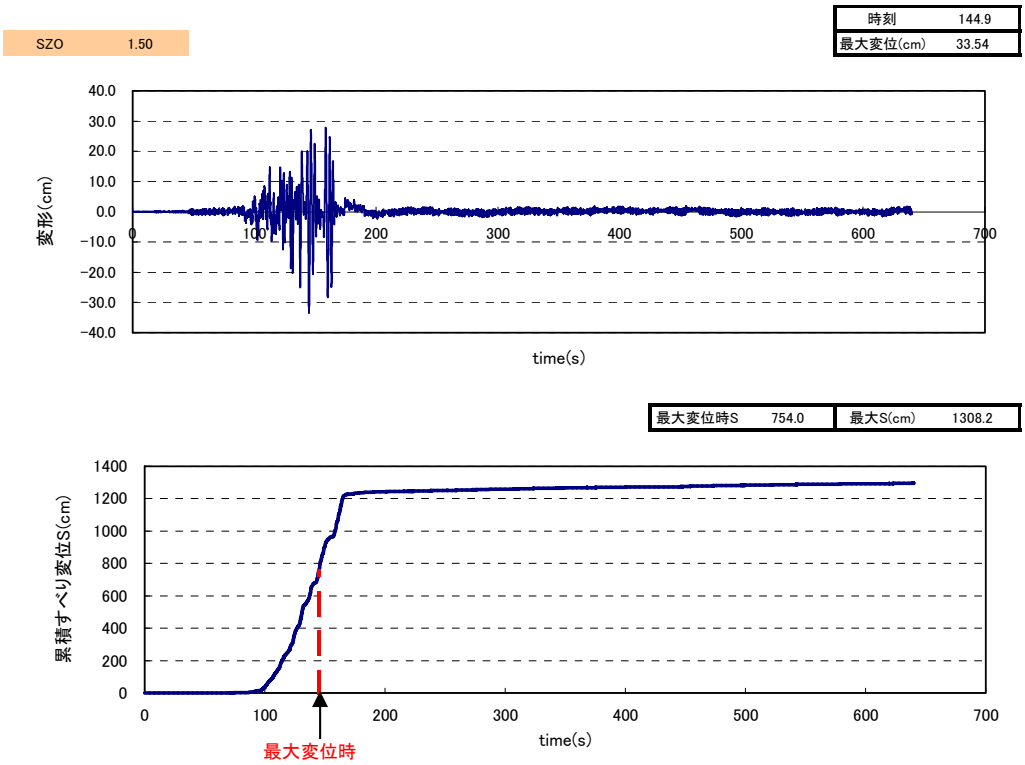


図 1.3.4-11(7)　変形・累積すべり変位時刻歴



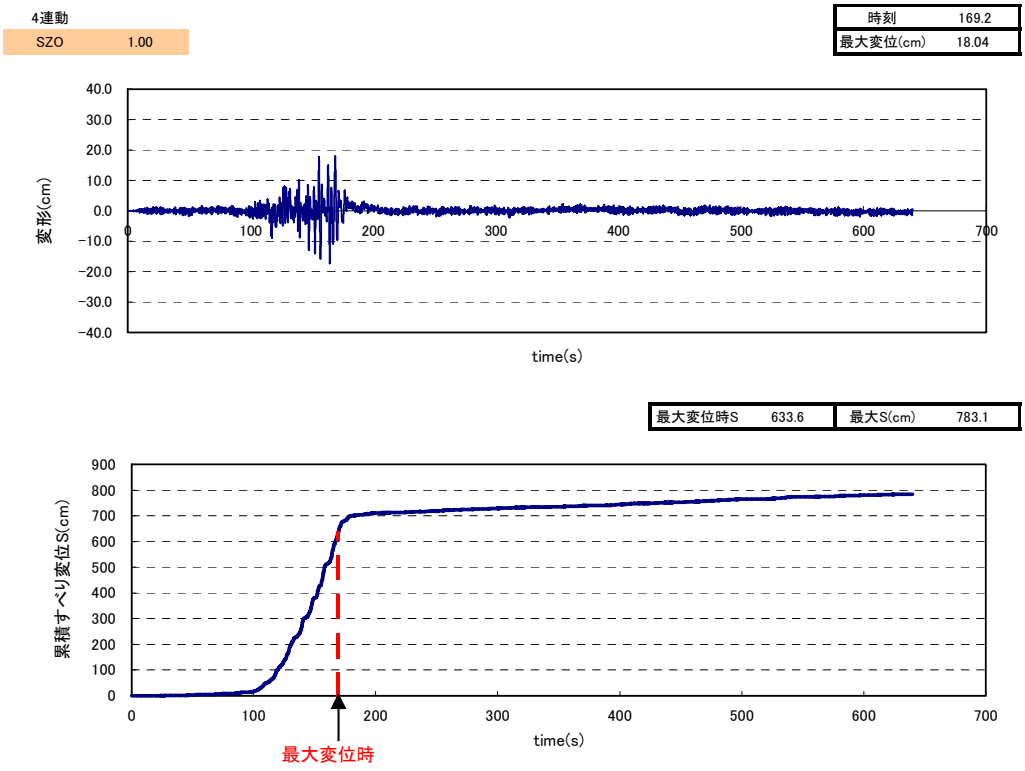


図 1.3.4-11(8)　変形・累積すべり変位時刻歴

d) 簡易評価指標の検討

弾性すべり支承は、繰り返し挙動(累積すべり変位・累積吸収エネルギー)により、摩擦係数が低下することが実験的に確認されている。しかし、通常は、基準摩擦係数μo 一定バイリニア型の非線形モデル(設計モデル)として評価していることが多い。そのため、摩擦係数低下により、設計で想定している以上の応答変位が生じることが考えられるため、低減摩擦係数の簡易評価について検討した。

摩擦係数の最大値および最大変位時の累積すべり変位を表 1.3.4-(3)-2 にまとめる。最終ステップ時μ(t)を評価指標とすると、応答変形が過剰評価となるため、μ1(設計モデルでの最大変形時累積すべり変位Sを依存式に代入して算定)を評価指標として使用する。なお、μ2(依存性モデルでの最大変形に合うよう、逆算した設計モデルの摩擦係数)は、評価指標の妥当性確認のために使用している。

実験により仮定した依存式:

$$\mu(t) = a\left[\log S(t) - \log So\right] + b \qquad (1.3.4\text{-}3)$$

面圧σ＝20N/mm2 → a=-2.079E-02　So=1.638E+03　b=9.684E-02

なお、式（1.3.4-3）を元に使用面圧σに応じて、パラメータ a, b に実験係数$\alpha = \left(\frac{\sigma}{20}\right)^{\left(-\frac{1}{3}\right)}$を乗じる。

本検討ではσ＝15N/mm2 より、 α＝1.1006

$$\mu(t) = 2.2869E-02\left[\log S(t) - \log(1.638E+03)\right] + 1.065E-01 \qquad (1.3.4\text{-}4)$$

μo：設計モデルの基準摩擦係数＝0.112

μ1：依存式（1.3.4-2）に設計モデル最大変形時累積すべり変位S[mm]を代入して算定

μ2：依存性モデルの最大変形と同等となる設計モデルの摩擦係数

(※設計モデルのμを調整して、パラメトリックスタディによりμ2を設定)

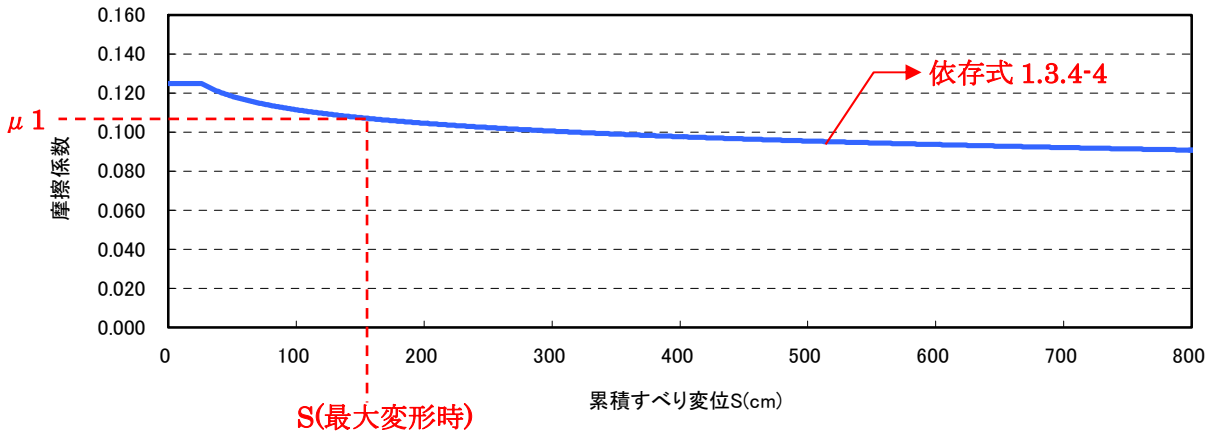


表 1.3.4-3　累積すべり変位・摩擦係数・最大変形一覧

累積すべり変位S　cm　　最大変形時

	三連動			四連動
	×1.00	×1.25	×1.50	×1.00
AIC	243.5	339.9	515.1	–
KGIN	–	–	–	–
OSK	198.5	337.0	459.5	231.5
SZO	430.4	583.6	754.0	633.6

μ1　※依存式5.3.4-2に上記のSを代入して算出

	三連動			四連動
	×1.00	×1.25	×1.50	×1.00
AIC	0.103	0.099	0.095	–
KGIN	–	–	–	–
OSK	0.105	0.099	0.096	0.103
SZO	0.097	0.094	0.091	0.093

μ2　※パラスタより算定

	三連動			四連動
	×1.00	×1.25	×1.50	×1.00
AIC	0.093	0.095	0.100	–
KGIN	–	–	–	–
OSK	0.102	0.099	0.097	0.103
SZO	0.097	0.095	0.090	0.094

μ1/μ2

	三連動			四連動
	×1.00	×1.25	×1.50	×1.00
AIC	110%	105%	95%	–
KGIN	–	–	–	–
OSK	103%	100%	99%	100%
SZO	100%	99%	102%	99%
			平均	**101.1%**

Ymaxμ1　cm　　※μ=μ1 設計モデル

	三連動			四連動
	×1.00	×1.25	×1.50	×1.00
AIC	12.2	16.6	21.0	–
KGIN	–	–	–	–
OSK	11.0	20.4	33.1	23.0
SZO	19.2	28.7	38.3	28.4

Ymaxμ2　cm　　※μ=μ2 設計モデル

	三連動			四連動
	×1.00	×1.25	×1.50	×1.00
AIC	11.0	17.0	21.2	–
KGIN	–	–	–	–
OSK	11.4	20.4	32.7	23.0
SZO	19.2	28.5	38.6	28.1

Ymaxμ1/Ymaxμ2

	三連動			四連動
	×1.00	×1.25	×1.50	×1.00
AIC	111%	98%	99%	–
KGIN	–	–	–	–
OSK	96%	100%	101%	100%
SZO	100%	101%	99%	101%
			平均	**100.6%**

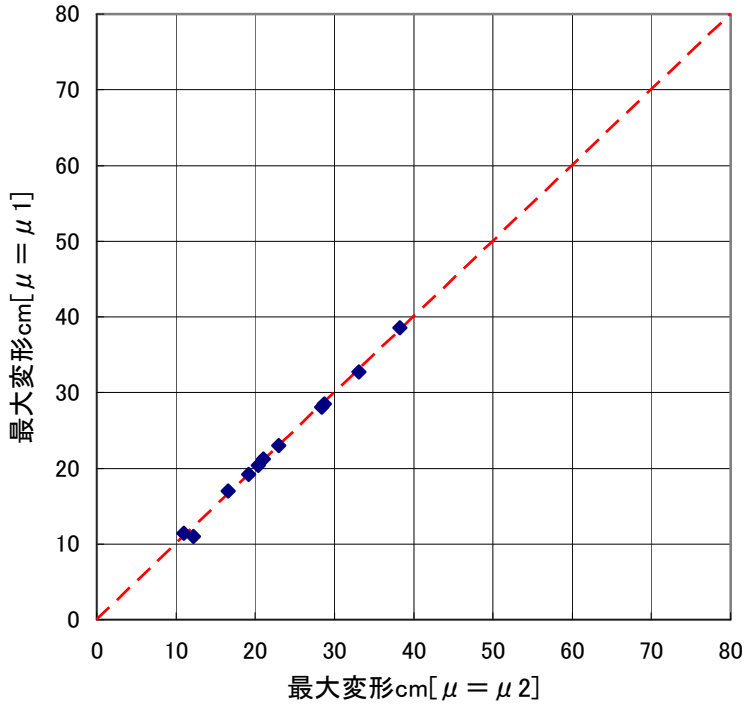


図 1.3.4-12　最大変形プロット図

■簡易評価方法および評価フロー

表 1.3.4-3 の結果より、μ1/μ2 は平均で 1%程度の誤差である。また、各摩擦係数時の最大変形については、平均誤差 0.6%と過小である。図 1.3.4-12 に、全波(累積すべり変位の小さい KGIN 波および応答変位がせん断ひずみ 400%を超える 4 連動 AIC 波は除外)における最大変形プロット図を示す。パラメトリックスタディにより算定したμ2 による設計モデルでの最大変形と、依存式(1.3.4-4)により算定したμ1 による設計モデルでの最大変形の関係を示している。これより、赤破線で示す基準線をよくとらえられていることが確認できる。したがって、依存式(1.3.4-4)によるμ1 で評価することは妥当と判断する。

次に、簡易評価フローを図 1.3.4-13 示す。本簡易評価法としては、あくまで既往の設計モデルで設計した上で、その累積すべり変位Ｓを指標に、変形増幅の有無および増幅する場合の摩擦係数を簡易に評価するものである。

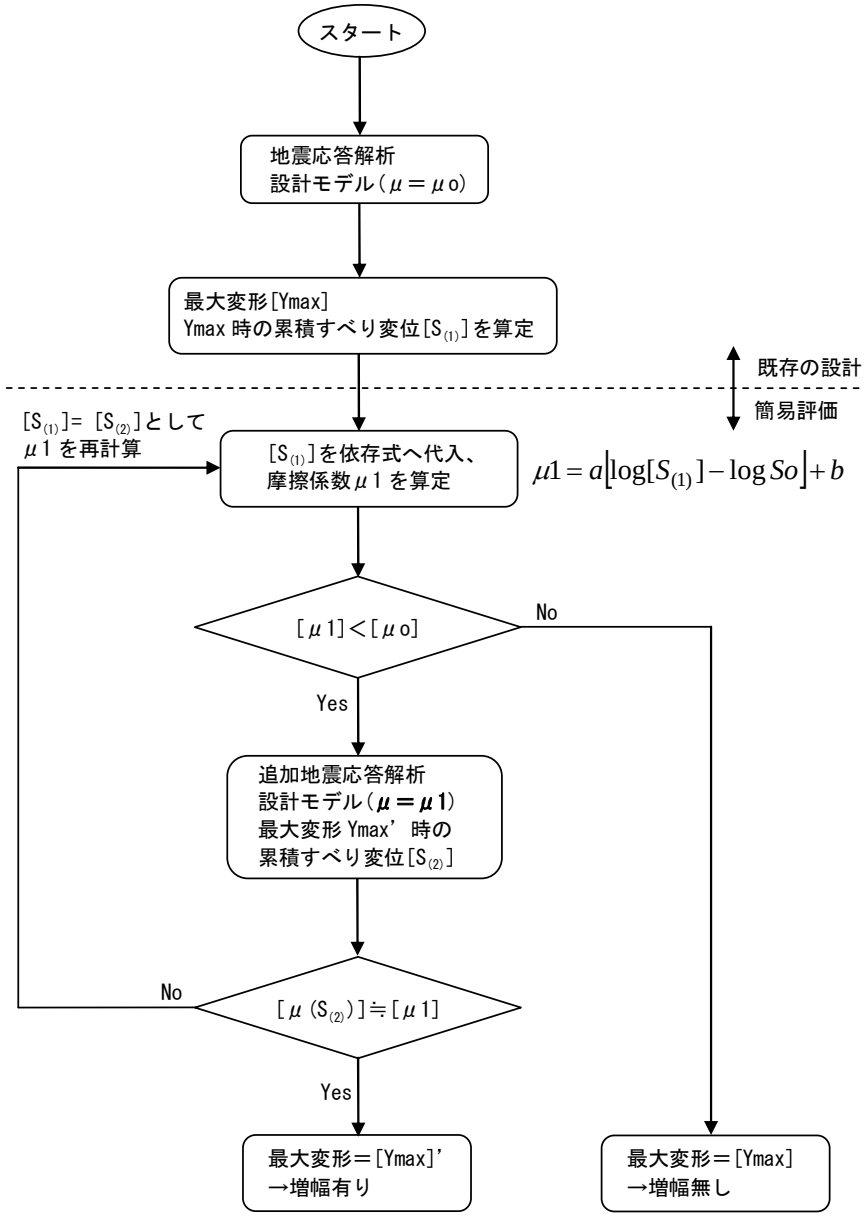


図 1.3.4-13　簡易評価フロー

（4）まとめ

[評価方法]

既往の設計モデル(基準摩擦係数μ_0)に対して、累積すべり変位依存性モデルでは、繰り返し挙動に伴う摩擦係数低下による応答変形増幅傾向がある。簡易評価手法としては、累積すべり変位と摩擦係数の関係式(実験結果より仮定した依存式（1.3.4-4)）を用いて、設計モデルにおける最大変形時累積すべり変位を指標に、低下摩擦係数μ_1を算定する。再度設計モデル($\mu=\mu_1$)において時刻歴応答解析を行い、増幅した応答変形を確認する。

[結果]

累積すべり変位依存性モデルにおける応答最大変形と設計モデル($\mu=\mu_1$)における応答最大変形は、概ね一致しており、簡易評価方法の妥当性を確認した。

[今後の課題]

本検討においては、建物モデルとして固有周期、せん断力係数を 1 ケース仮定し、入力地震動としても 4 種類という条件下において、簡易評価をまとめたものである。今後の課題としては、周期・せん断力係数・入力地震動のケースを増やし、簡易評価方法の精度を確認する必要がある。

1.3.5　天然ゴム系積層ゴム＋弾性すべり支承（低摩擦）＋粘性ダンパー

(1)　検討方針

1)　モデル化方針

提案モデルは一般的に用いられている解析モデルの定数を修正することで、繰り返し依存特性を簡易的に評価するものとする。設定する定数は免震層の変位が生じやすいモデル（ここでは簡易 A モデルと呼ぶ）、および変位が生じにくいモデル（ここでは、簡易 B モデルと呼ぶ）の 2 つを設定することとする。

設計時には両モデルの応答値の最大値に対して、健全性を検討するものとする。なお、繰り返し依存性を考慮することにより、応答変位は増加するため、繰り返し依存性は主に簡易 A モデルに組み込まれることになる。

天然ゴム系積層ゴム、弾性すべり支承（低摩擦）、粘性ダンパーはそれぞれ以下の方針によってモデル化するものとする。

①　天然ゴム系積層ゴム

積層ゴムは従来通り、線形モデルとして扱う。

②　弾性すべり支承（低摩擦）

低摩擦すべり支承は、ハードニングを考慮しない摩擦係数一定の単純なバイリニア型でモデル化する。摩擦係数については、面圧・速度依存性および繰り返し依存性を考慮した場合の、最大値および最小値の 2 種を設定する。

③　粘性ダンパー

粘性ダンパーは第Ⅲ部 2.3.7 に記述したと同様、材料認定書[1.3.5-1)]に基づく解析モデルを基本とする。本モデルは一般の設計者が利用する解析コードに導入されているモデルである。

本検討では、繰り返し依存係数α（一定値、基準値は 0.85）、および初期温度 T_0（一定値）を調整して、繰り返し依存性の影響を簡易的に評価することを図る。

2)　簡易モデルの設定フロー

低摩擦すべり支承および粘性ダンパーの簡易モデルの設定方法の概要について説明する。

なお，細かい数値や計算式の説明については，後述する「3)　免震要素諸元」にて説明する。

モデルの設定フローを図 1.3.5-1 に示す。

モデルは、減衰力を小さく評価し、変位を大きめに評価するモデル（簡易 A モデル）、減衰力を大きく評価し、変位を小さめに評価するモデル（簡易 B モデル）の 2 種のモデルを設定する。なお、一般的に繰り返し依存性を考慮することで減衰力は低下するため、繰り返し依存性の効果は主として簡易 A モデルに反映されることになる。ただし、地震動や建物諸元によっては一概に減衰力が小さい方が危険側になるとは限らないため，設計時には両モデルの応答値の最大値に対して、健全性を検討するものとする。

簡易 A モデルにおける、低摩擦すべり支承の摩擦係数は、面圧・速度依存性および繰り返し依存性を考慮した場合の、最小値（0.60%）として設定する。ただし，この値は面圧 20MPa を前提に計算されているため，面圧が変わる場合には修正が必要となる。

粘性ダンパーの繰り返し依存係数αは下限値である 0.70 とする。入力温度は、地震終了時の換算温度とする。この換算温度は、入力温度を初期温度とした場合の累積吸収エネルギーに基づき実験からの回帰式により設定する。

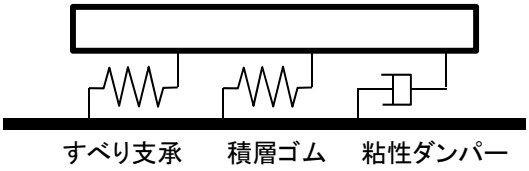
$$\Delta T = 0.12 \times \left(Ed / Vv \right)^{0.7} \tag{1.3.5-1}$$

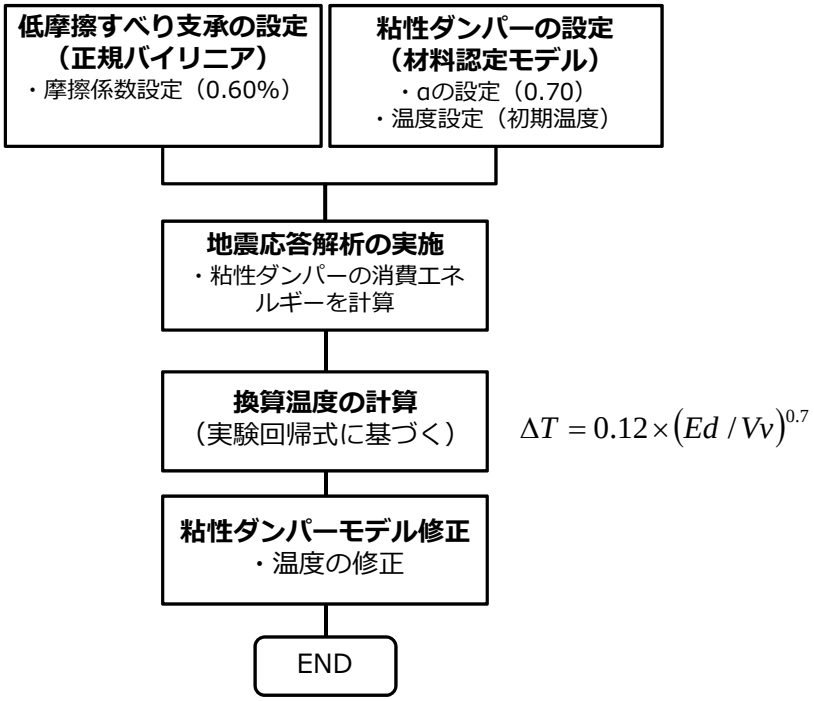
ここで、ΔT ：上昇温度（℃）、Ed ：吸収エネルギー（J）、Vv ：粘性体の体積（cc）であり，吸収エネルギーは入力温度を初期温度とした場合の解析における最終累積エネルギーの 95%の値を用いる。

以上のように、簡易 A モデルについては一度地震応答解析を実施した後にモデルの諸元が確定することになる。

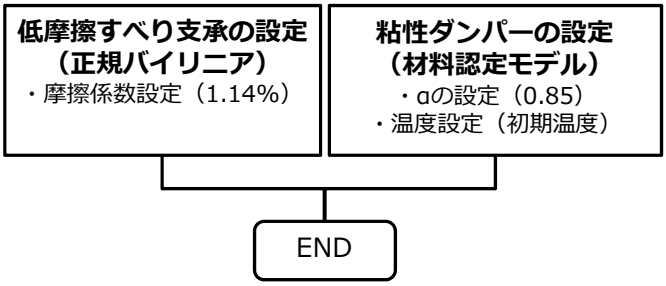
簡易 B モデルにおける、低摩擦すべり支承の摩擦係数は、面圧・速度依存性および繰り返し依存性を考慮した場合の、最大値（1.14%）として設定する。この値についても，面圧 20MPa を前提に計算されているため，面圧が変わる場合には修正が必要となる。

粘性ダンパーの繰り返し依存係数αは基準値である 0.85 とし、入力温度は初期温度とする。





(a)簡易 A（減衰力小・変位大）



(b)簡易 B（減衰力大・変位小）

図 1.3.5-1　モデルの設定フロー

3) 免震要素諸元

低摩擦すべり支承の摩擦係数および粘性ダンパーの繰り返し依存係数および初期温度の扱いを以下のように考慮する。

① 弾性すべり支承（低摩擦）の摩擦係数

弾性すべり支承（低摩擦）において摩擦係数は面圧・速度依存性および繰り返し依存性の 2 種の影響を受ける。

材料認定書においては面圧・速度依存性は、下式で評価される。

$$\mu(\sigma_s, V) = (0.0355 - 0.0093 \cdot \exp(-0.1 \cdot V)) \cdot \sigma_s^{-0.44} \tag{1.3.5-2}$$

ここに、σ_s は面圧（N/mm^2）、V は水平速度（mm/sec）を示す。

想定面圧を初期値（20.0MPa）で一定と考えれば、V が無限大の場合に最大値(μ=0.0095)、0.0 の場合に最小値(μ=0.0070)となる。

一方で、累積すべり量 50m を超える領域までの繰り返しによる摩擦係数の変動幅は、メーカー提供の実験値によれば、基準値に対して、最大で 1.20 倍、最小で 0.85 倍である。

以上より、本検討で扱う簡易モデルの摩擦係数の最大値および最小値は以下のように設定する。

最大値：μ_{max} = 0.0095×1.20 = 0.0114（※簡易 B モデル用）

最小値：μ_{min} = 0.0070×0.85 = 0.00595（※簡易 A モデル用）

なお、当該モデルの一基あたりの想定面圧は 20.0MPa（対応する軸力は 7697kN）であるため、一基あたりのすべり荷重は、摩擦係数最大の場合に 87.7kN、最小の場合に 45.8kN となる。

② 粘性ダンパーの繰り返し依存係数および初期温度

材料認定書に記載されたモデルでは、繰り返し依存性を表す係数αは、累積吸収エネルギーに応じて評価する場合と、一定値とする場合があるが、ここでは簡易的な一定値（基準値 0.85）で評価する方法を用いて、αの値を修正して用いる。

本検討では、繰り返し依存性を考慮しない場合のαを基準値 0.85（簡易 B モデル用）とし、繰り返し依存性を考慮する場合には下限値 0.70（簡易 A モデル用）を用いることとする。繰り返し依存係数αと単位容積当りの粘性累積吸収エネルギーとの関係を図 1.3.5-2 に示す。

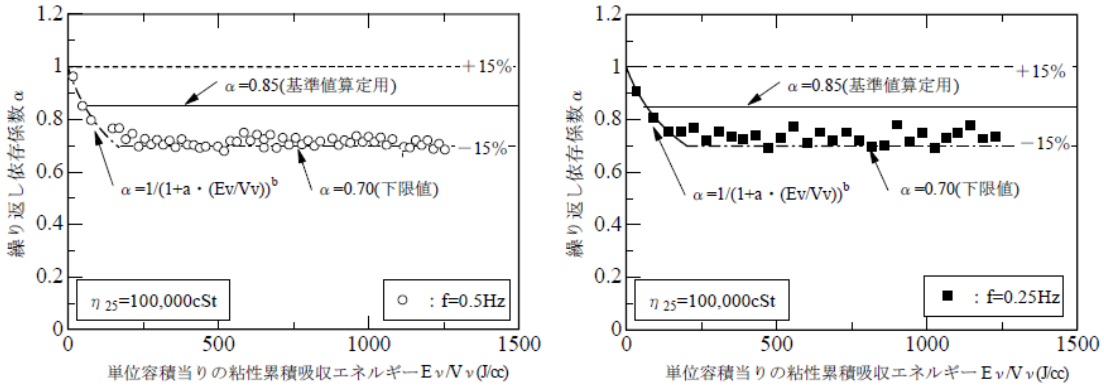


図 1.3.5-2　単位容積当りの粘性累積吸収エネルギーEvと繰り返し依存係数αの関係の一例

また、温度については、繰り返し依存性を考慮しない簡易 B モデルについては、初期温度（ここでは T_0=15℃）で一定値とする。一方、繰り返し依存性を考慮するモデル（簡易 A モデル）については、予備解析結果に基づき別途計算した想定温度を用いる。

簡易 A モデルの想定温度は、部材実験結果を参照し、粘性ダンパーの吸収エネルギーに応じた近似式を作成して算定する。図 1.3.5-3 に近似式を図示する。本検討では、吸収エネルギー量は初期値を用いた場合、(予備解析)モデルの解析結果における、最終累積吸収エネルギーの 95%の値を用いて簡易 A モデルの入力温度を決定することとする。

$$\Delta T = 0.12 \times \left(Ed / Vv\right)^{0.7} \tag{1.3.5-3}$$

ここで、ΔT ：上昇温度（℃）、Ed ：吸収エネルギー（J）、Vv ：粘性体の体積（cc）

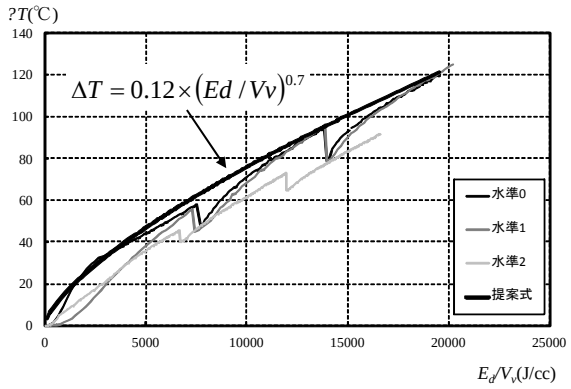


図 1.3.5-3　温度上昇の算定式

4)　解析対象

解析対象は第Ⅲ部 2.3.7、第Ⅲ部 3.2.6 と同じく、建物を 1 質点剛体と仮定した応答解析モデルとする。

想定する建物は 30m×30m の平面形状を持つ RC 造の 9 層建物とする。建物の総重量は 100,000kN とする。免震周期、ダンパーの諸条件は以下の通りとした。

・建物の免震周期は 4 秒程度
・免震層の最大応答変位は 250mm 程度
・ダンパーの負担層せん断力係数は 3.0%~3.5%程度

免震部材の配置状況を図 1.3.5-4 に示す。配置する免震部材は天然ゴム系積層ゴム、弾性すべり支承(低摩擦)および粘性ダンパーとする。解析では建物を 1 質点剛体でモデル化し、水平 1 方向入力とする。そのため粘性ダンパーについては加振方向に平行に配置された 4 基をモデル化する(図 1.3.5-5)。

なお、繰り返し依存性を考慮した詳細モデルの設定は、第Ⅲ部 3.2.6 と同様とする。

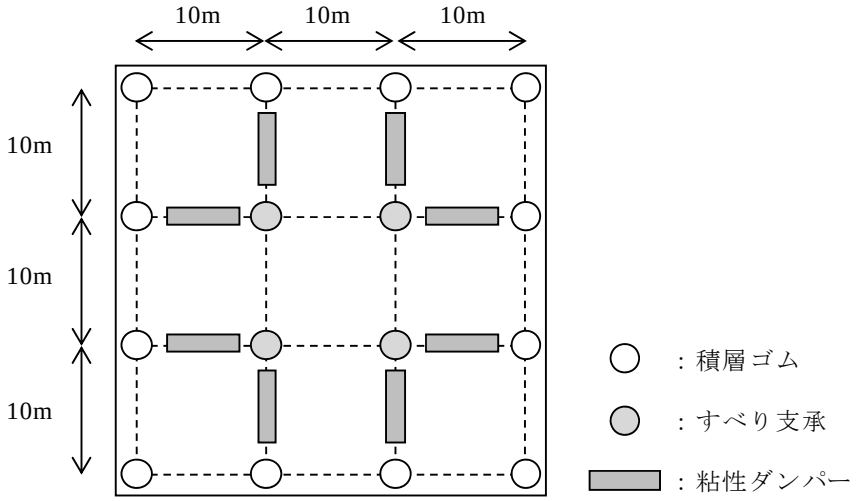


図 1.3.5-4　想定する建物モデルの平面形状

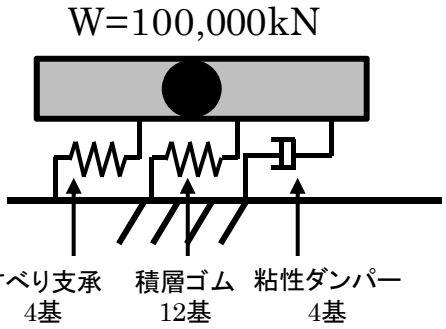


図 1.3.5-5　解析モデル(1 質点系剛体モデル・1 方向入力)

5) 解析ケース

設定した簡易モデルの概要および解析ケース一覧を下表に示す。

弾性すべり支承（低摩擦）の摩擦係数、粘性ダンパーの繰り返し依存係数 α および入力温度 T_0 を変化させ、簡易モデルを 2 モデル設定する。簡易 A モデルは変位を大きめに、簡易 B モデルは小さめに評価するモデルとしている。

なお，簡易 A モデルについては，換算温度計算のための予備解析として，入力温度を初期温度とした場合の解析を実施する。

これらのモデルによる解析結果を繰り返し依存性を詳細に考慮したモデルと比較して，簡易モデルの妥当性を検証する。

表 1.3.5-1　簡易モデル概要

モデル		低摩擦すべり支承	粘性ダンパー		備考
		摩擦係数 μ（一定値）	繰り返し依存係数 α	温度 T_0	
簡易 A	予備	0.60%（μ_{min}）	0.70	初期温度 T_0=15℃	換算温度算定用
	正式			換算温度	減衰力小・変位大
簡易 B		1.14%（μ_{max}）	0.85	初期温度 T_0=15℃	減衰力大・変位小

表 1.3.5-2　解析ケース一覧

解析モデル		入力地震動															
		OSKH02				AIC003				SZO024				KGIN			
		M8.7			M9.0	M8.7			M9.0	M8.7			M9.0	M8.7			M9.0
		1.0	1.25	1.5	1.0	1.0	1.25	1.5	1.0	1.0	1.25	1.5	1.0	1.0	1.25	1.5	1.0
簡易 A1	μ_{min} α=0.70 T_0 : 初期温度	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
簡易 A2	μ_{min} α=0.70 T_0 : 換算温度	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
簡易 B	μ_{max} α=0.85 T_0 : 初期温度	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
詳細		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

(2) 検討結果

1) 初期温度入力とした簡易 A モデルの応答結果（簡易 A 予備モデル）

簡易 A モデルの温度入力値を初期温度とした予備解析（簡易 A 予備）における、簡易 A、簡易 B、および詳細モデルの応答結果の比較を行う。比較する応答値は、免震層の最大応答変形および加速度、せん断力係数 Ci、累積変形量、等価エネルギー速度 V_E、免震部材の荷重変形関係とする。

表 1.3.5-3～表 1.3.5-6 に最大応答値一覧表を、図 1.3.5-6～図 1.3.5-9 に各モデルにおける最大応答値のばらつきを、図 1.3.5-10～図 1.3.5-25 には各免震層の荷重変形関係を示す。なお、荷重変形関係の縦軸は、各免震部材の減衰力の合計である。

表 1.3.5-3～表 1.3.5-6 および図 1.3.5-6～図 1.3.5-9 より、繰り返し依存性の影響を考慮した詳細モデルの結果は、地震動種別によらず変位を小さめに評価するものとして設定した簡易 B モデルの結果よりも最大変位を大きめに評価している。一方、詳細モデルと変位を大きめに評価するものとして設定した簡易 A モデルの結果を比較すると、現状では必ずしも詳細モデルよりも簡易 A モデルの応答変位は大きくなっていない。その他の応答値についても両簡易モデルの結果の間に詳細モデルの結果が入らない場合があり、概ね簡易 A モデルと詳細モデルが対応する結果となった。これは、図 1.3.5-10～図 1.3.5-25 に示した荷重変形関係においても同様の傾向であった。

以上の結果より、初期温度を一定とした場合の簡易 A モデルでは、繰り返し依存性による減衰力の低下が十分に反映されておらず、詳細モデルよりも応答変位を大きくするためには更なる減衰力の低下を考慮する必要があると考えられる。

① 最大応答値一覧

表 1.3.5-3 最大応答値一覧（OSKH02、簡易 A 予備）

応答値	OSKH02											
	M8.7 三連動									M9.0 四連動		
	×1.0			×1.25			×1.5			×1.0		
	簡易 A 予備	簡易 B	詳細	簡易 A 予備	簡易 B	詳細	簡易 A 予備	簡易 B	詳細	簡易 A 予備	簡易 B	詳細
最大応答変位 (cm)	21.45	17.55	21.99	29.90	25.78	31.20	38.19	34.36	39.07	33.60	24.06	37.35
最大応答加速度 (cm/s^2)	72.43	68.38	72.76	94.12	89.85	94.95	115.42	111.91	115.31	103.35	84.49	109.32
最大せん断力係数 *Ci*	0.0739	0.0697	0.0742	0.0960	0.0916	0.0968	0.1177	0.1141	0.1176	0.1054	0.0862	0.1115
累積変位量 (m)	8.928	6.998	10.08	12.97	10.36	14.53	17.42	14.24	19.44	15.54	12.33	19.36
等価エネルギー速度 V_E(m/s)	1.841	1.749	1.918	2.343	2.271	2.412	2.821	2.786	2.880	2.532	2.445	2.641

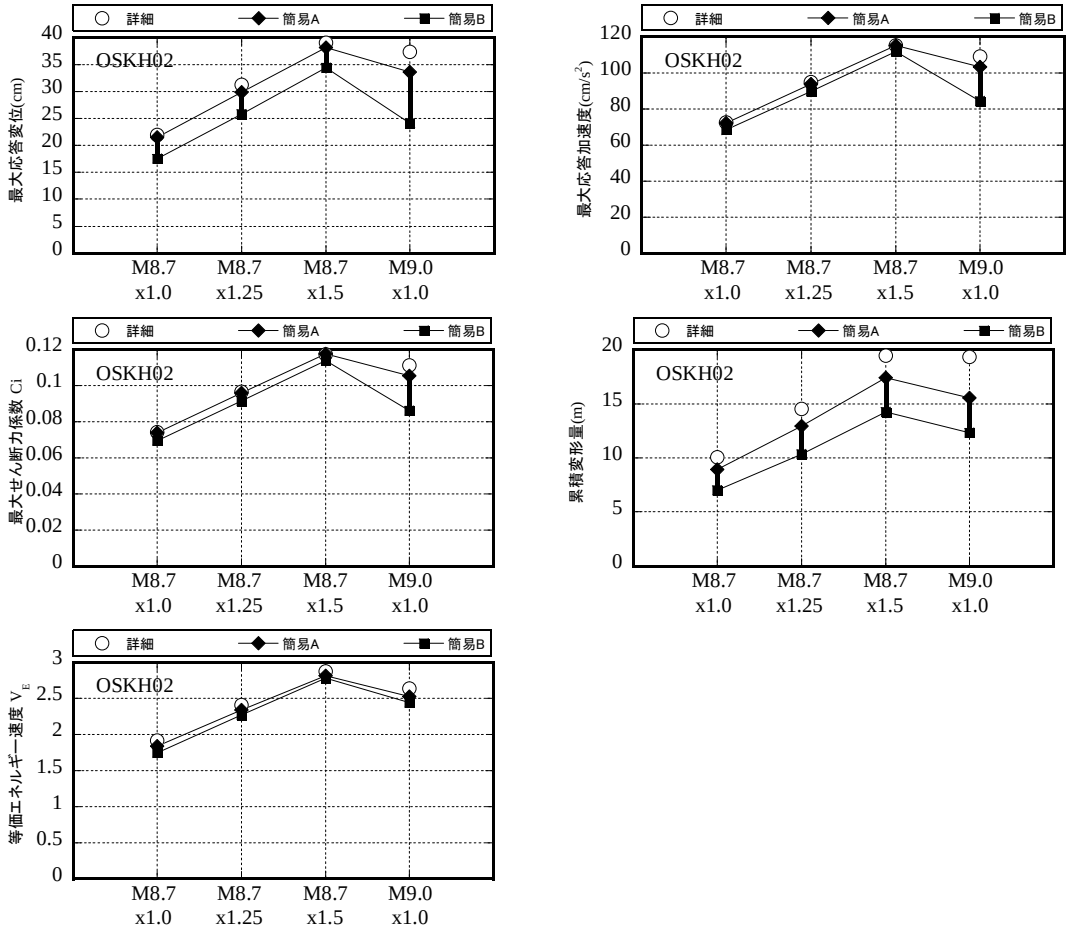


図 1.3.5-6 最大応答値の比較（OSKH02、簡易 A 予備）

表 1.3.5-4　最大応答値一覧（AIC003、簡易 A 予備）

応答値	AIC003											
	M8.7 三連動									M9.0 四連動		
	×1.0			×1.25			×1.5			×1.0		
	簡易 A 予備	簡易 B	詳細	簡易 A 予備	簡易 B	詳細	簡易 A 予備	簡易 B	詳細	簡易 A 予備	簡易 B	詳細
最大応答変位 (cm)	13.27	9.96	15.67	20.05	15.16	22.96	28.23	21.45	32.30	64.98	50.42	74.83
最大応答加速度 (cm/s^2)	50.98	48.56	54.30	68.74	62.05	73.51	90.00	78.57	97.32	182.82	152.40	202.77
最大せん断力係数 *Ci*	0.0520	0.0495	0.0554	0.0701	0.0633	0.0750	0.0918	0.0801	0.0992	0.1864	0.1554	0.2068
累積変位量 (m)	7.044	6.029	8.048	9.835	8.387	11.09	12.95	11.03	14.57	36.13	30.99	41.86
等価エネルギー速度 V_E(m/s)	1.599	1.603	1.699	1.989	2.002	2.081	2.373	2.394	2.464	4.221	4.282	4.263

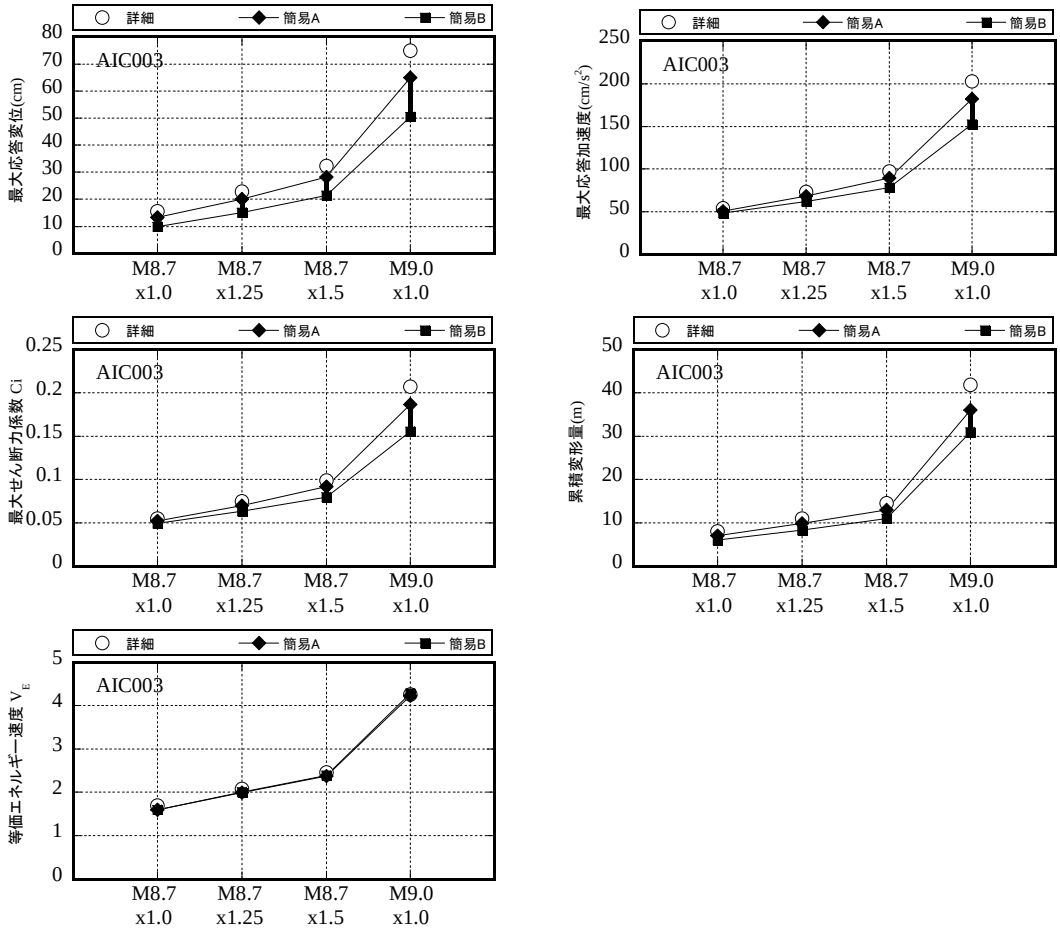


図 1.3.5-7　最大応答値の比較（AIC003、簡易 A 予備）

表 1.3.5-5　最大応答値一覧（SZO024、簡易 A 予備）

応答値	SZO024											
	M8.7 三連動									M9.0 四連動		
	×1.0			×1.25			×1.5			×1.0		
	簡易 A 予備	簡易 B	詳細	簡易 A 予備	簡易 B	詳細	簡易 A 予備	簡易 B	詳細	簡易 A 予備	簡易 B	詳細
最大応答変位 (cm)	19.73	16.91	21.30	28.77	24.10	30.94	38.80	32.34	41.06	31.20	26.30	33.04
最大応答加速度 (cm/s^2)	68.20	66.25	68.64	91.56	85.55	94.07	117.69	106.57	120.04	97.71	91.65	99.82
最大せん断力係数 *Ci*	0.0695	0.0676	0.0700	0.0934	0.0872	0.0959	0.1200	0.1087	0.1224	0.0996	0.0935	0.1018
累積変位量 (m)	9.669	8.538	10.32	13.20	11.77	13.87	16.97	15.25	17.59	13.36	11.98	13.52
等価エネルギー速度 V_E(m/s)	2.042	2.102	2.084	2.477	2.581	2.489	2.883	3.027	2.870	2.263	2.336	2.250

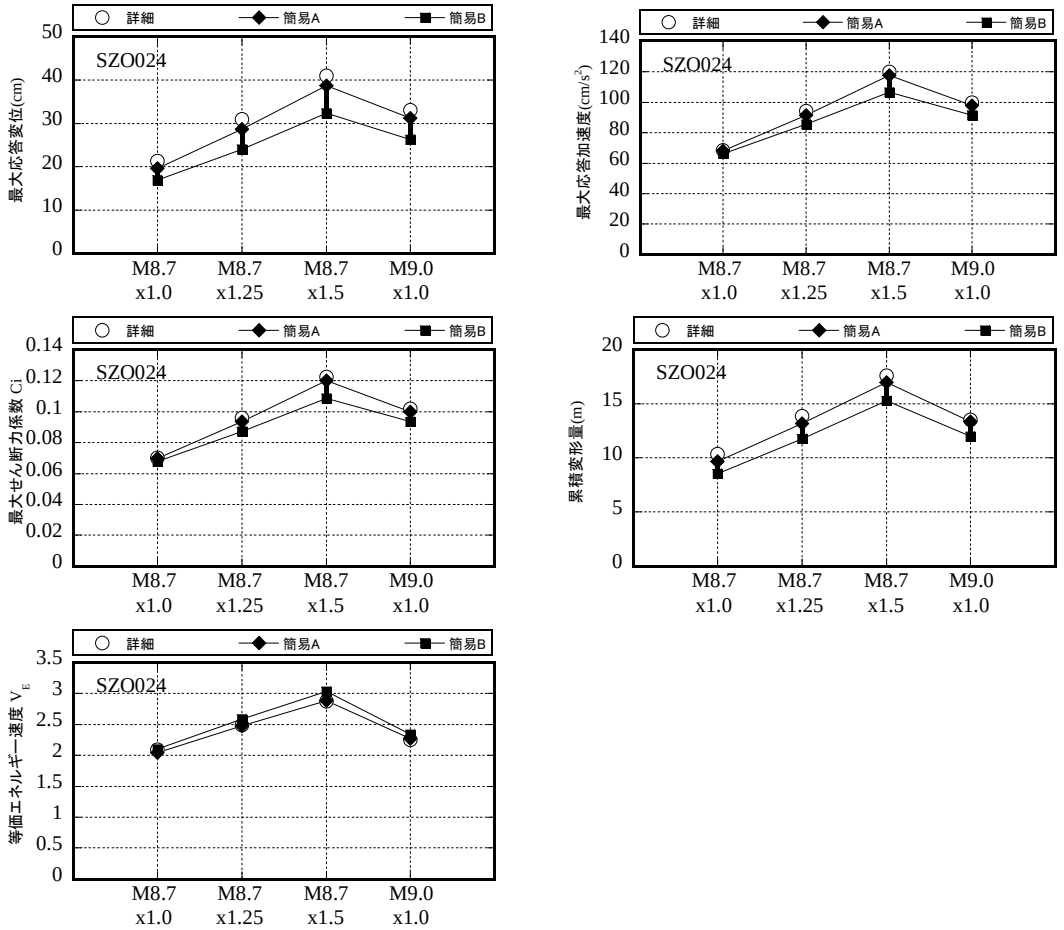


図 1.3.5-8　最大応答値の比較（SZO024、簡易 A 予備）

表 1.3.5-6　最大応答値一覧（KGIN、簡易 A 予備）

応答値	KGIN											
	M8.7 三連動									M9.0 四連動		
	×1.0			×1.25			×1.5			×1.0		
	簡易 A 予備	簡易 B	詳細	簡易 A 予備	簡易 B	詳細	簡易 A 予備	簡易 B	詳細	簡易 A 予備	簡易 B	詳細
最大応答変位 (cm)	5.03	3.40	2.90	7.75	5.21	5.98	11.10	7.55	10.36	10.33	7.22	8.80
最大応答加速度 (cm/s^2)	25.27	23.62	23.31	33.57	30.42	30.97	43.09	37.96	41.11	40.61	36.54	37.95
最大せん断力係数 *Ci*	0.0258	0.0241	0.0238	0.0342	0.0310	0.0316	0.0439	0.0387	0.0419	0.0414	0.0373	0.0387
累積変位量 (m)	3.028	2.500	1.678	4.300	3.389	3.276	5.837	4.435	5.577	5.800	4.339	4.385
等価エネルギー速度 V_E(m/s)	0.736	0.654	0.571	0.980	0.860	0.859	1.241	1.088	1.197	1.176	1.024	1.055

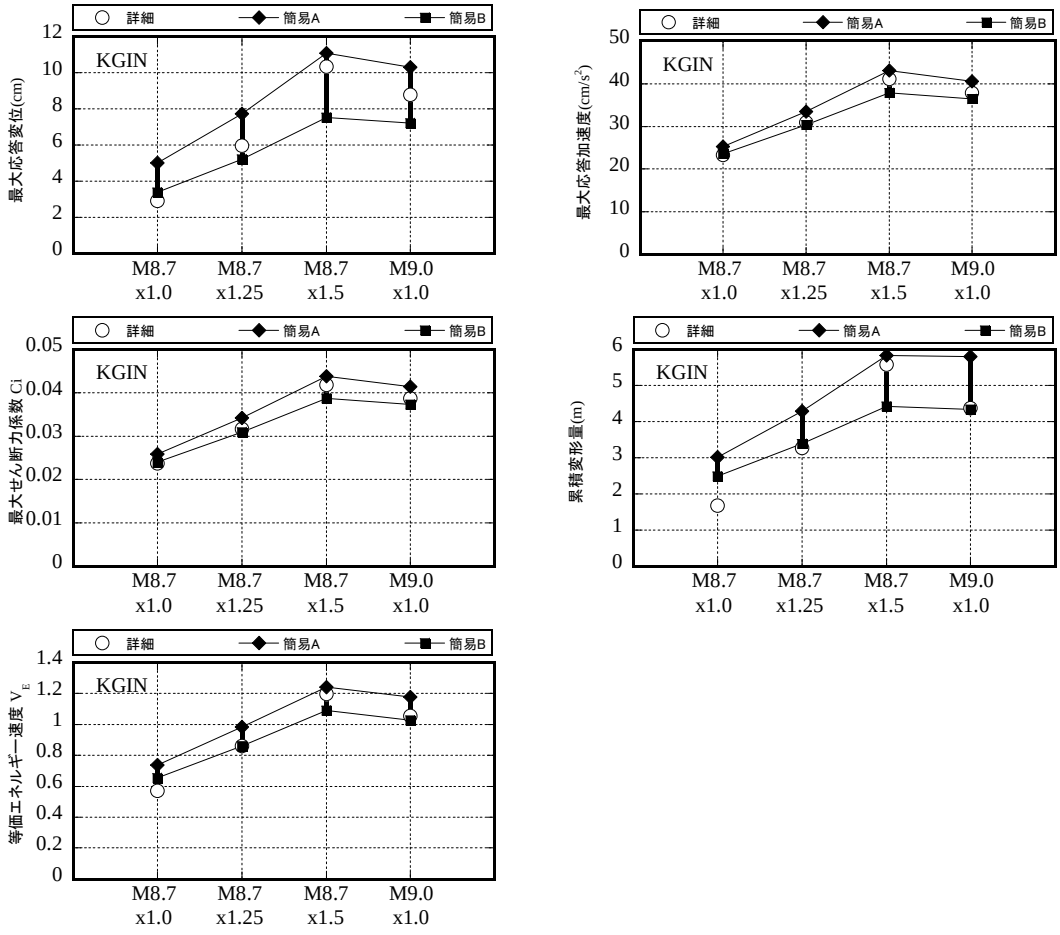
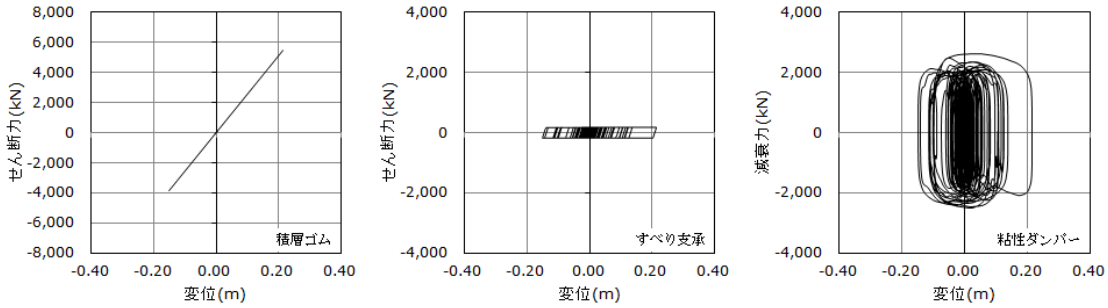
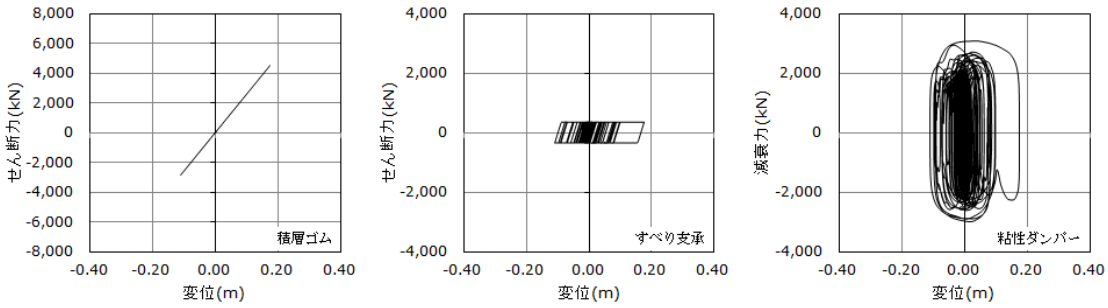


図 1.3.5-9　最大応答値の比較（KGIN、簡易 A 予備）

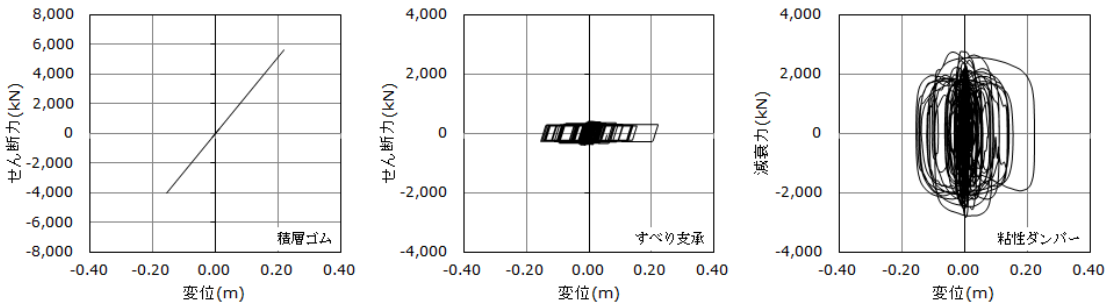
② 荷重変形関係



(a)簡易モデル A 予備（μ_{min}、α=0.70、T_0=15℃）

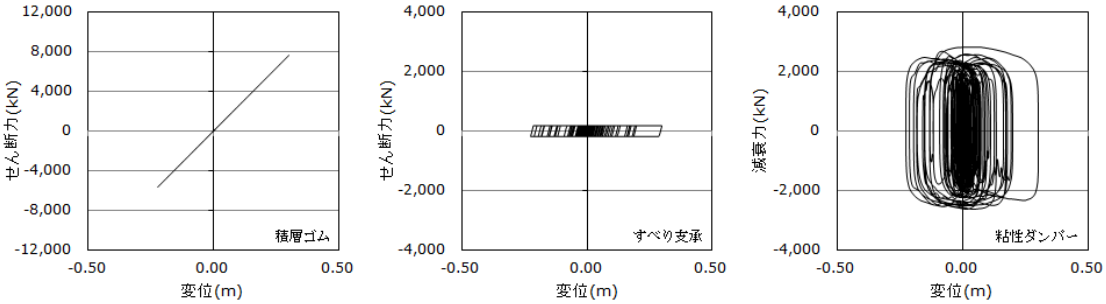


(b)簡易モデル B（μ_{max}、α=0.85、T_0=15℃）

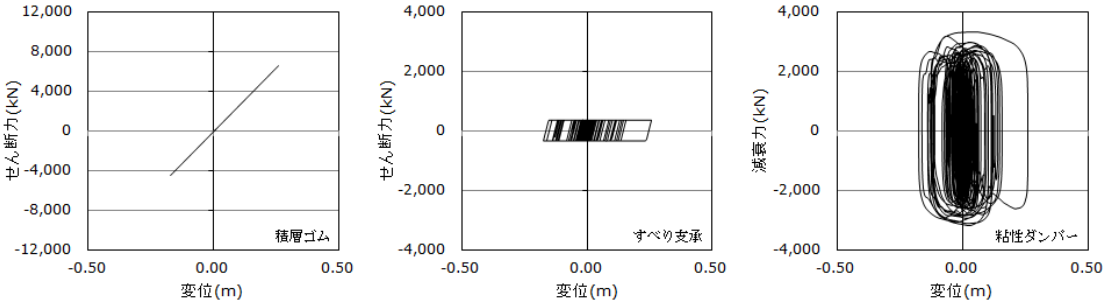


(c)詳細モデル（繰り返し依存性考慮）

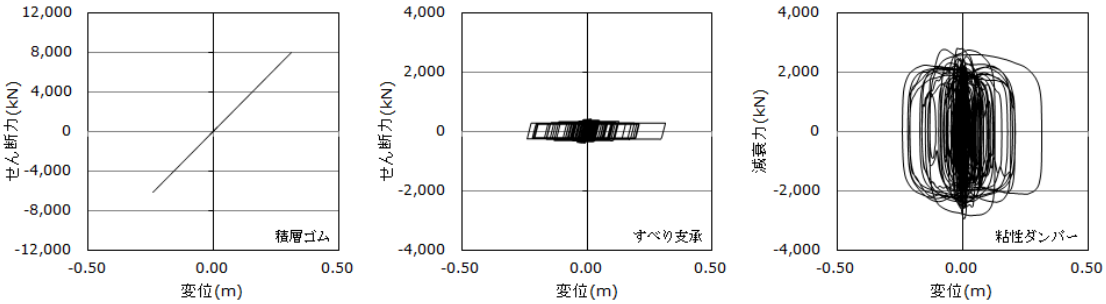
図 1.3.5-10　免震層の荷重変形関係（OSKH02・M8.7・1.0 倍入力）



(a)簡易モデル A 予備（μ_{min}、α=0.70、T_0=15℃）

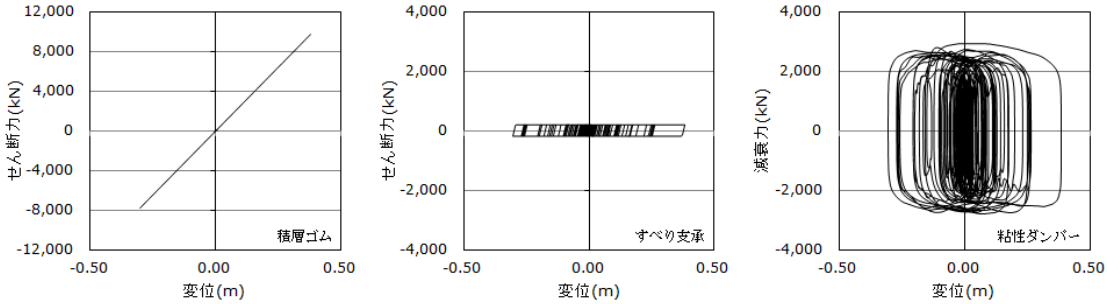


(b)簡易モデル B（μ_{max}、α=0.85、T_0=15℃）

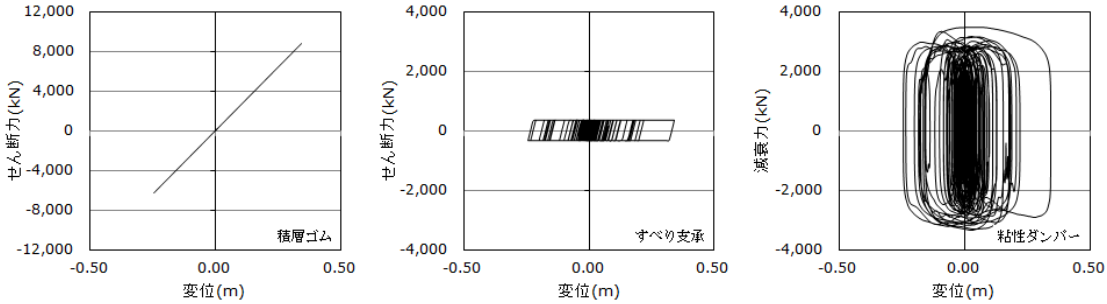


(c)詳細モデル（繰り返し依存性考慮）

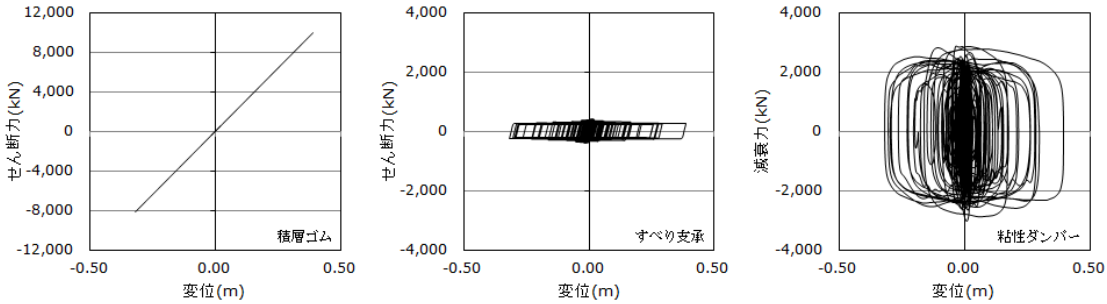
図 1.3.5-11　免震層の荷重変形関係（OSKH02・M8.7・1.25 倍入力）



(a)簡易モデル A 予備（μ_{min}、α=0.70、T_0=15℃）

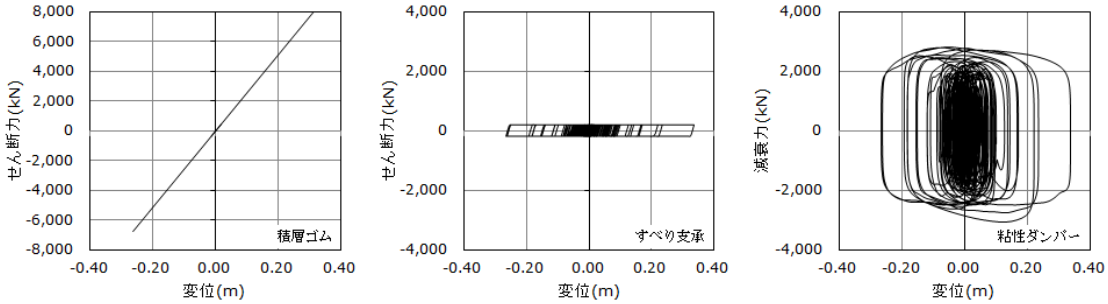


(b)簡易モデル B（μ_{max}、α=0.85、T_0=15℃）

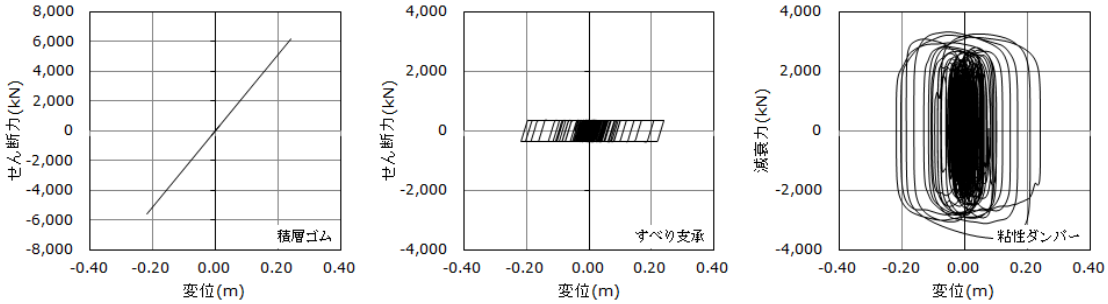


(c)詳細モデル（繰り返し依存性考慮）

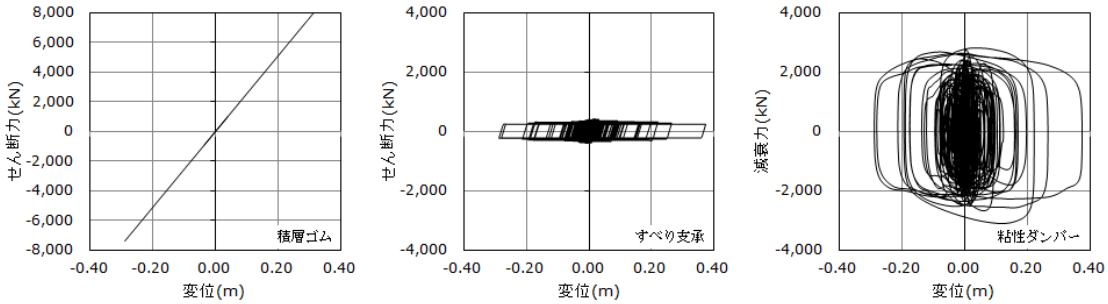
図 1.3.5-12　免震層の荷重変形関係（OSKH02・M8.7・1.5 倍入力）



(a)簡易モデル A 予備（μ_{min}、α=0.70、T_0=15℃）

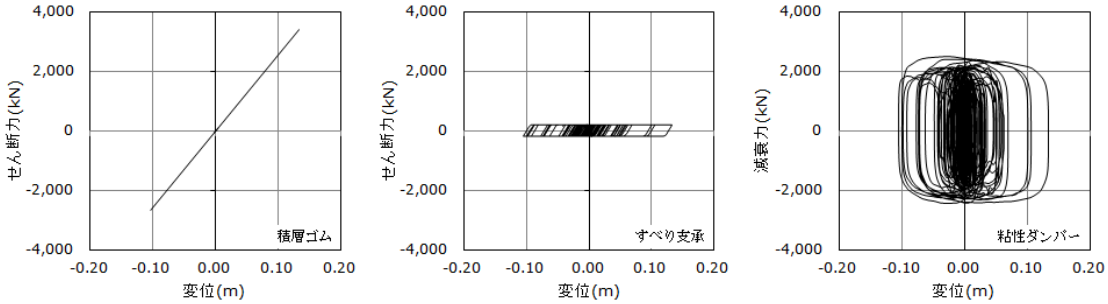


(b)簡易モデル B（μ_{max}、α=0.85、T_0=15℃）

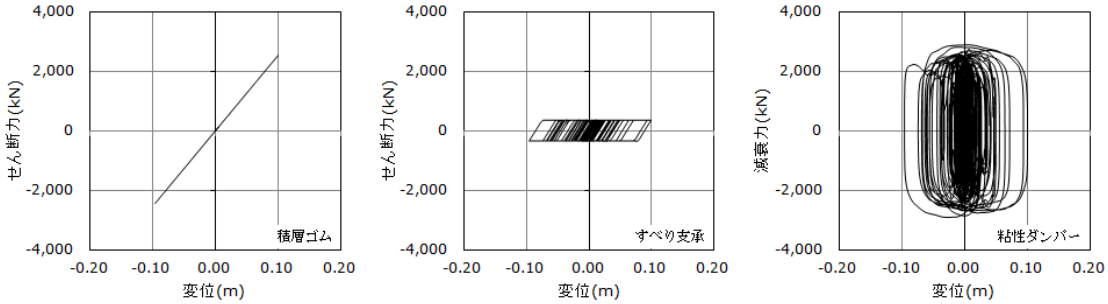


(c)詳細モデル（繰り返し依存性考慮）

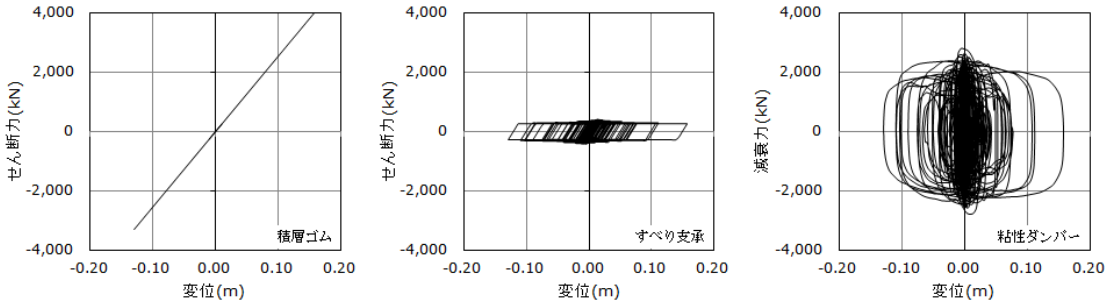
図 1.3.5-13　免震層の荷重変形関係（OSKH02・M9.0・1.0 倍入力）



(a)簡易モデル A 予備（μ_{min}、α=0.70、T_0=15℃）

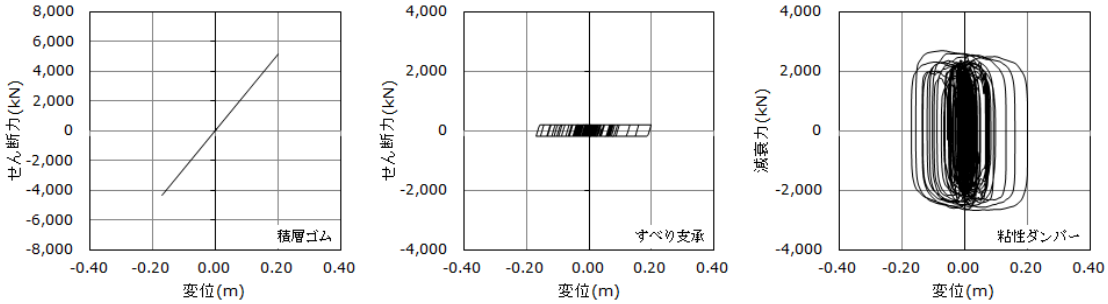


(b)簡易モデル B（μ_{max}、α=0.85、T_0=15℃）

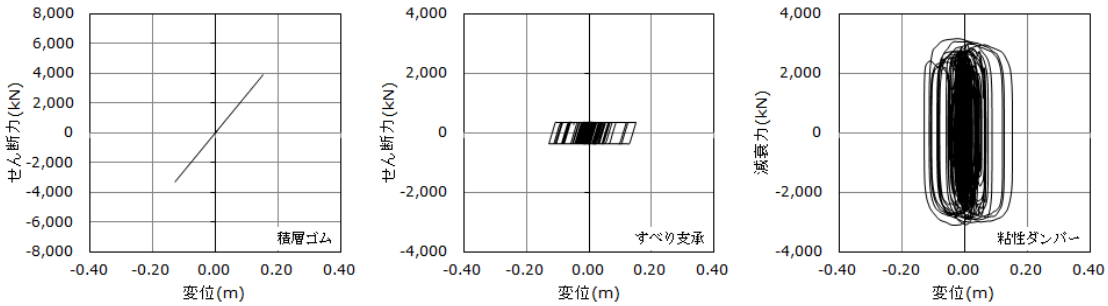


(c)詳細モデル（繰り返し依存性考慮）

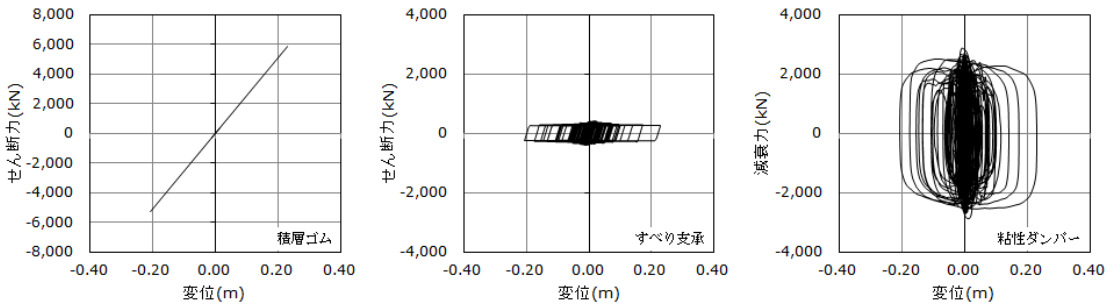
図 1.3.5-14　免震層の荷重変形関係（AIC003・M8.7・1.0 倍入力）



(a)簡易モデル A 予備（μ_{min}、α=0.70、T_0=15℃）

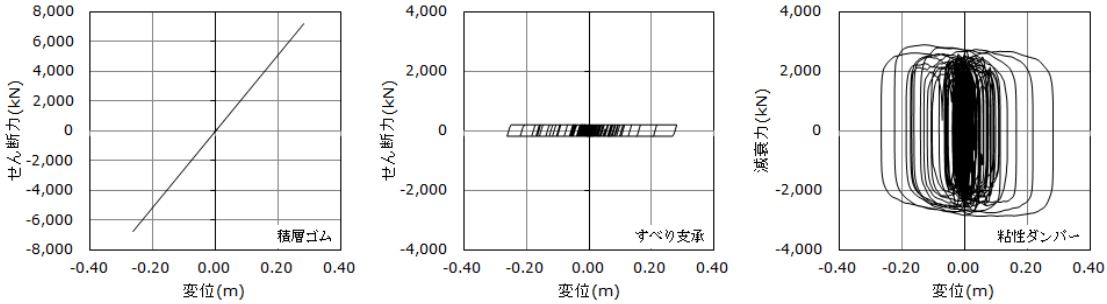


(b)簡易モデル B（μ_{max}、α=0.85、T_0=15℃）

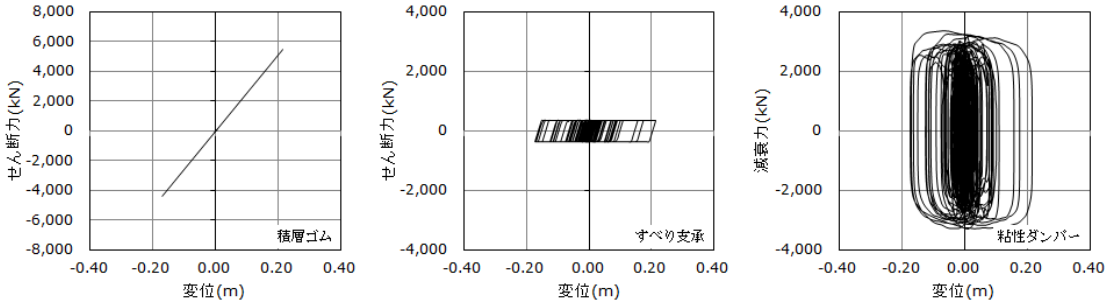


(c)詳細モデル（繰り返し依存性考慮）

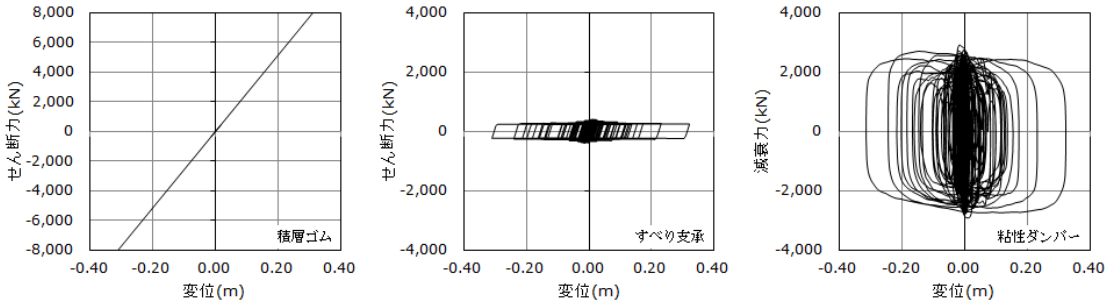
図 1.3.5-15　免震層の荷重変形関係（AIC003・M8.7・1.25 倍入力）



(a)簡易モデル A 予備（μ_{min}、α=0.70、T_0=15℃）

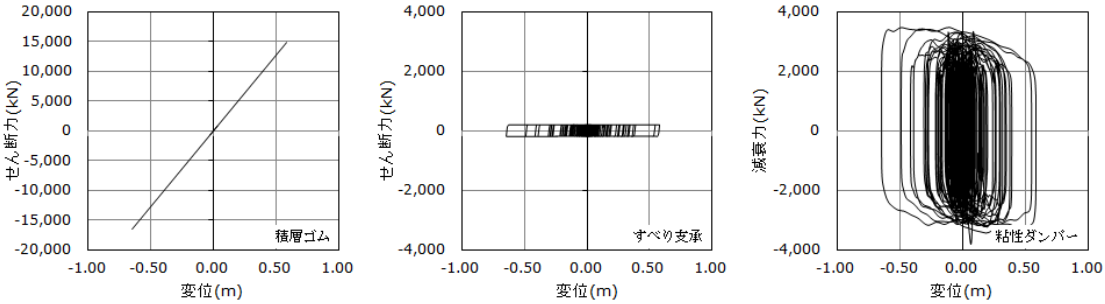


(b)簡易モデル B（μ_{max}、α=0.85、T_0=15℃）

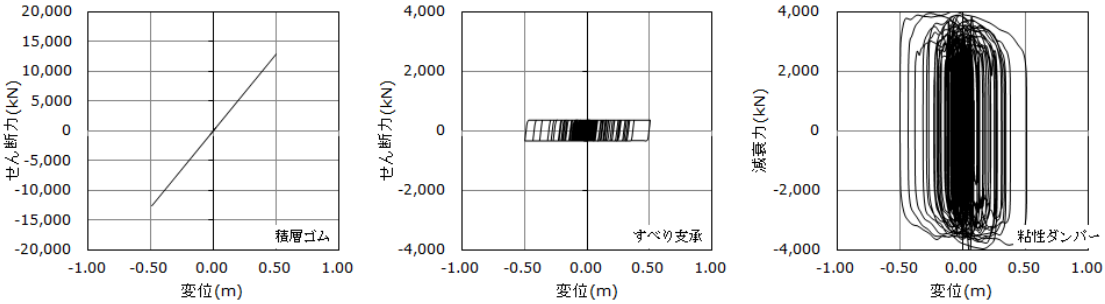


(c)詳細モデル（繰り返し依存性考慮）

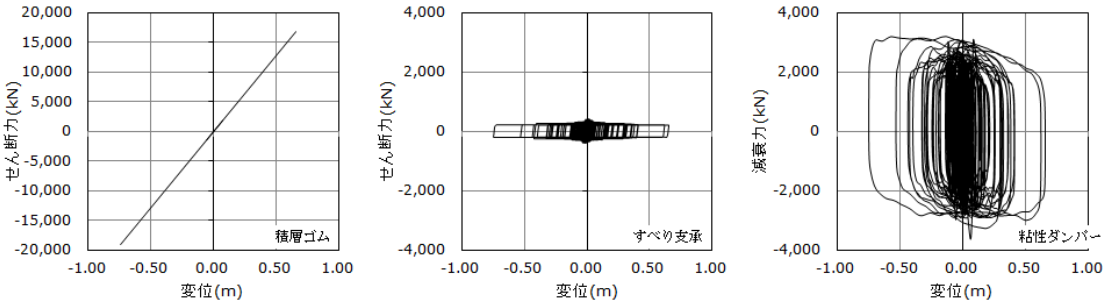
図 1.3.5-16　免震層の荷重変形関係（AIC003・M8.7・1.5 倍入力）



(a)簡易モデル A 予備（μ_{min}、α=0.70、T_0=15℃）

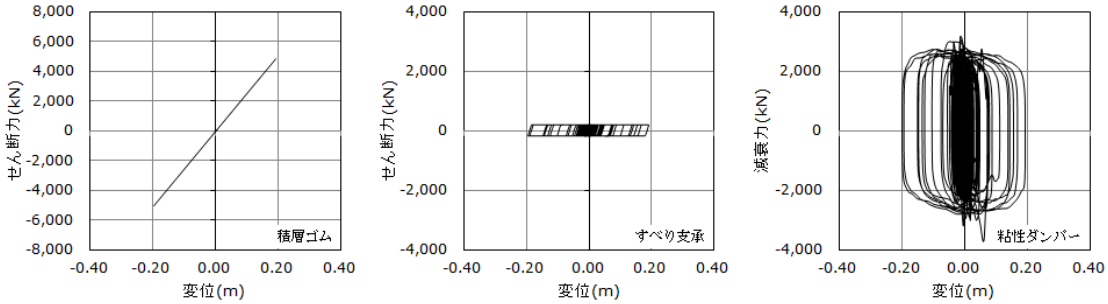


(b)簡易モデル B（μ_{max}、α=0.85、T_0=15℃）

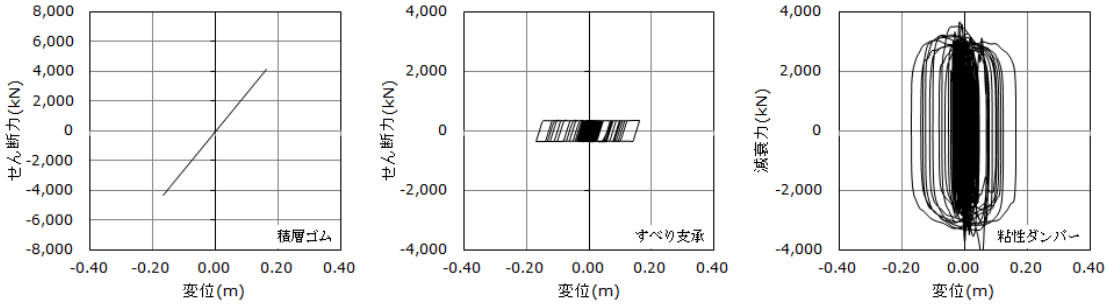


(c)詳細モデル（繰り返し依存性考慮）

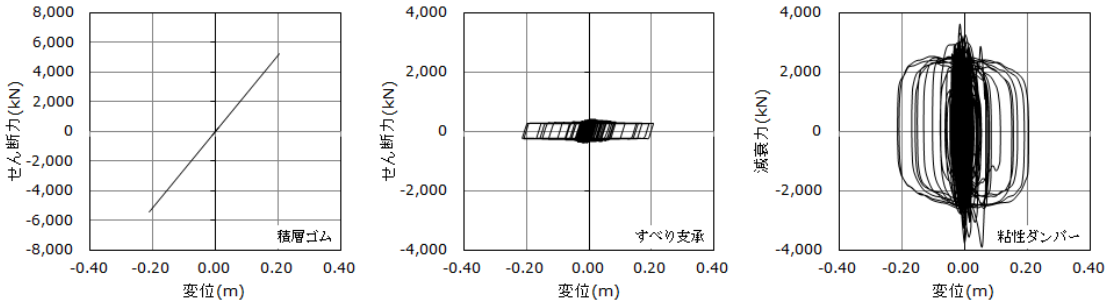
図 1.3.5-17　免震層の荷重変形関係（AIC003・M9.0・1.0 倍入力）



(a)簡易モデル A 予備（μ_{min}、α=0.70、T_0=15℃）

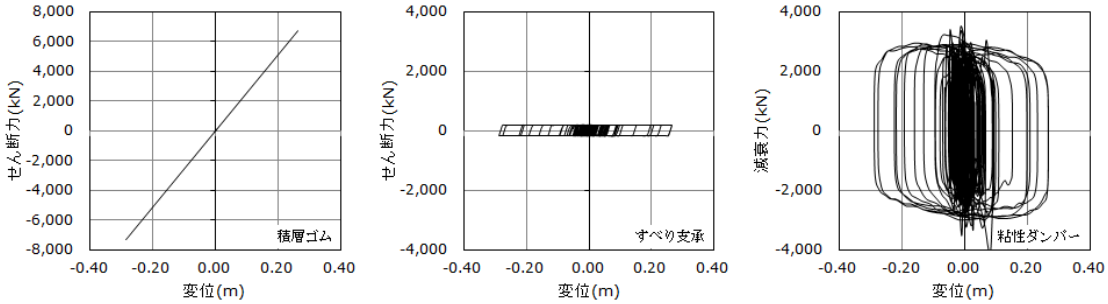


(b)簡易モデル B（μ_{max}、α=0.85、T_0=15℃）

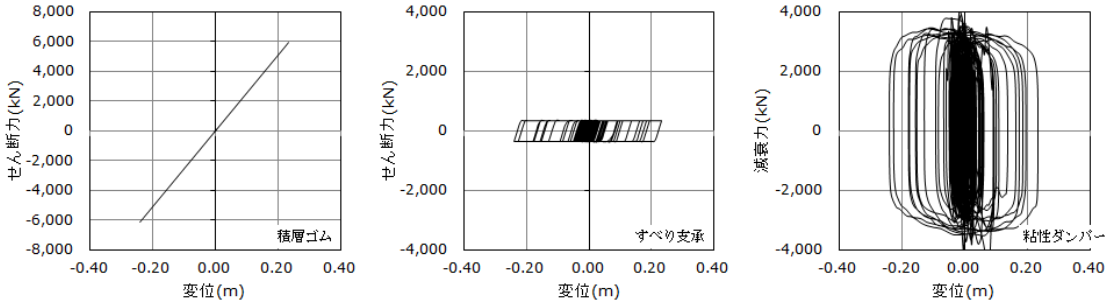


(c)詳細モデル（繰り返し依存性考慮）

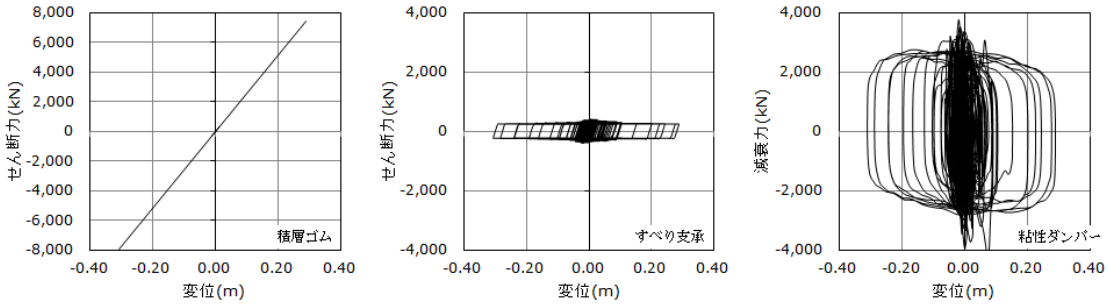
図 1.3.5-18　免震層の荷重変形関係（SZO024・M8.7・1.0 倍入力）



(a)簡易モデル A 予備（μ_{min}、α=0.70、T_0=15℃）

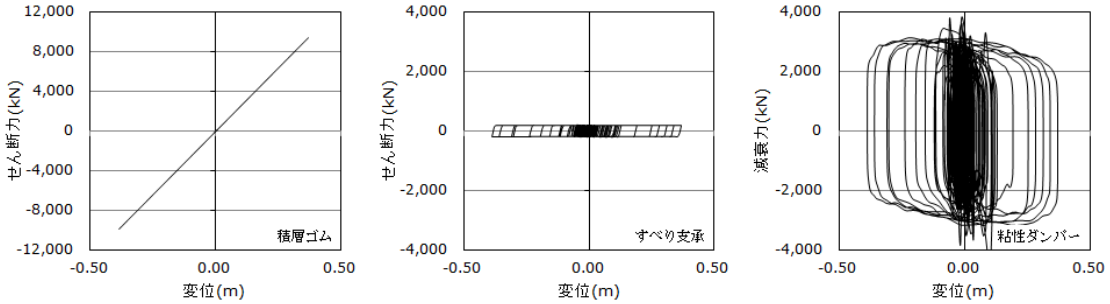


(b)簡易モデル B（μ_{max}、α=0.85、T_0=15℃）

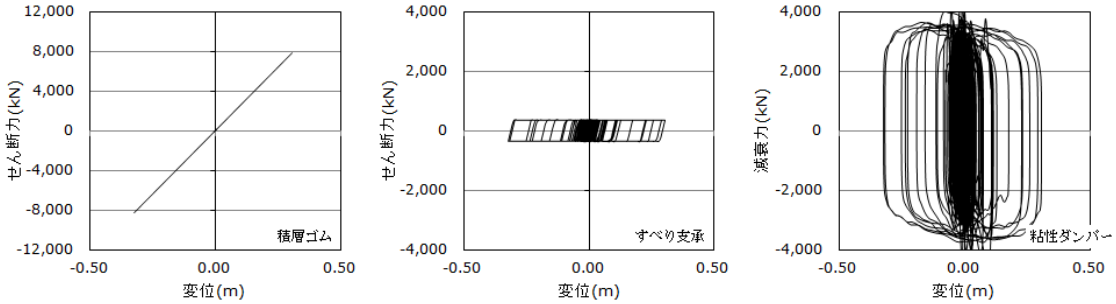


(c)詳細モデル（繰り返し依存性考慮）

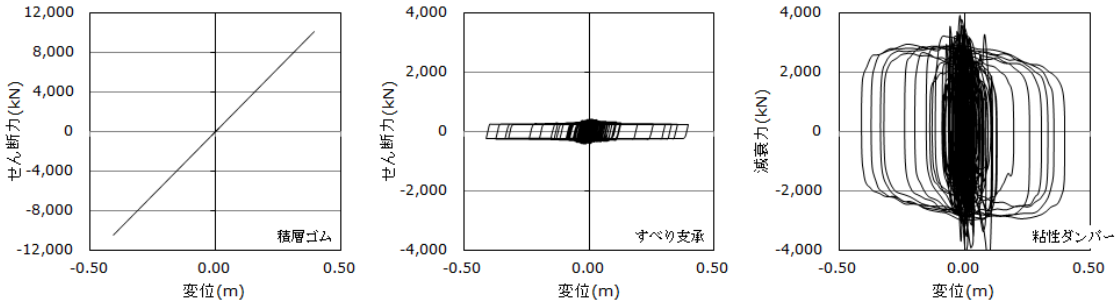
図 1.3.5-19　免震層の荷重変形関係（SZO024・M8.7・1.25 倍入力）



(a)簡易モデル A 予備（μ_{min}、α=0.70、T_0=15℃）

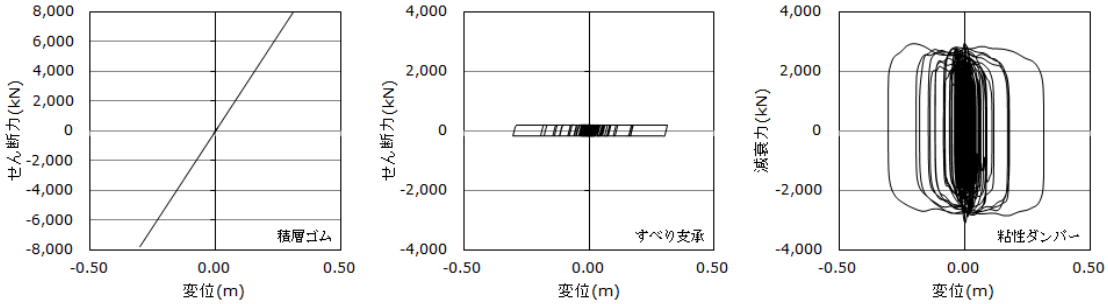


(b)簡易モデル B（μ_{max}、α=0.85、T_0=15℃）

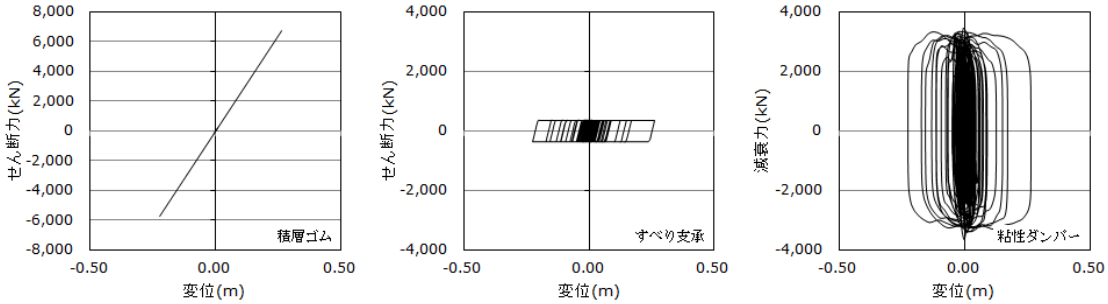


(c)詳細モデル（繰り返し依存性考慮）

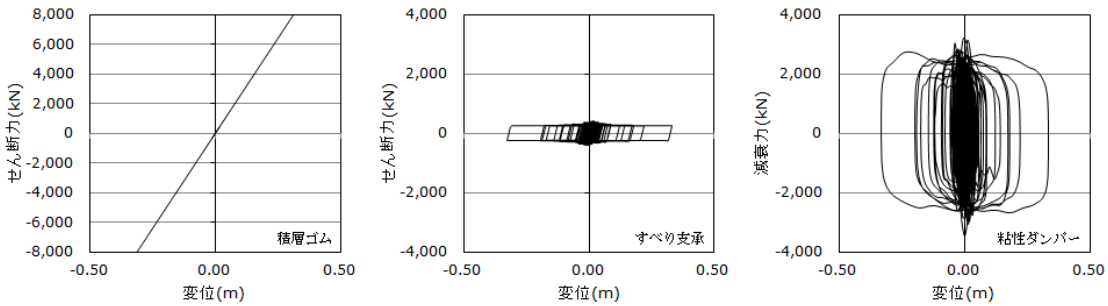
図 1.3.5-20　免震層の荷重変形関係（SZO024・M8.7・1.5 倍入力）



(a)簡易モデル A 予備（μ_{min}、α=0.70、T_0=15℃）

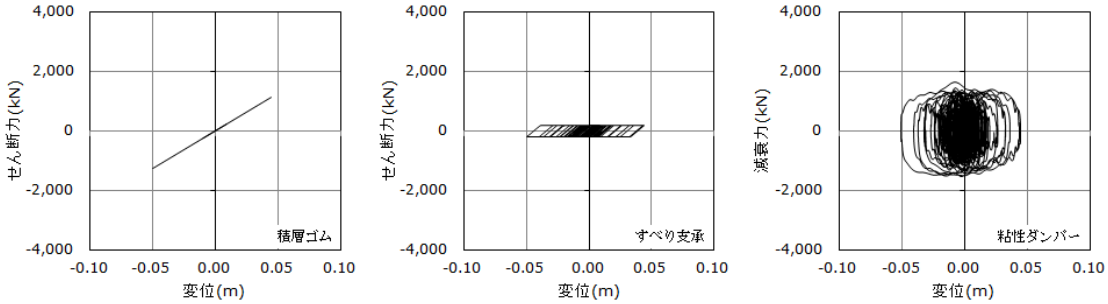


(b)簡易モデル B（μ_{max}、α=0.85、T_0=15℃）

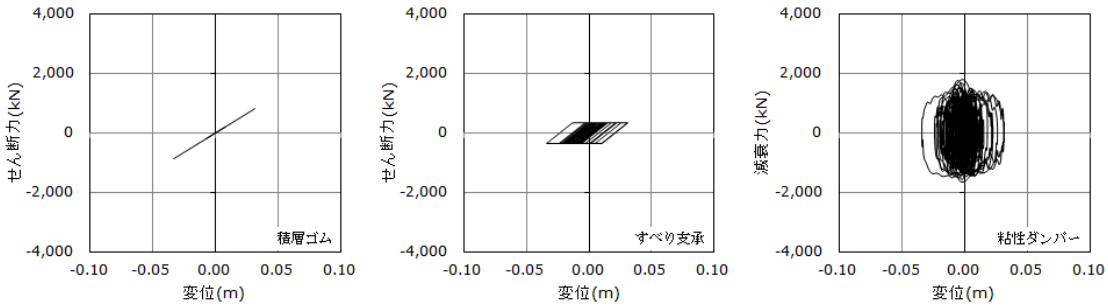


(c)詳細モデル（繰り返し依存性考慮）

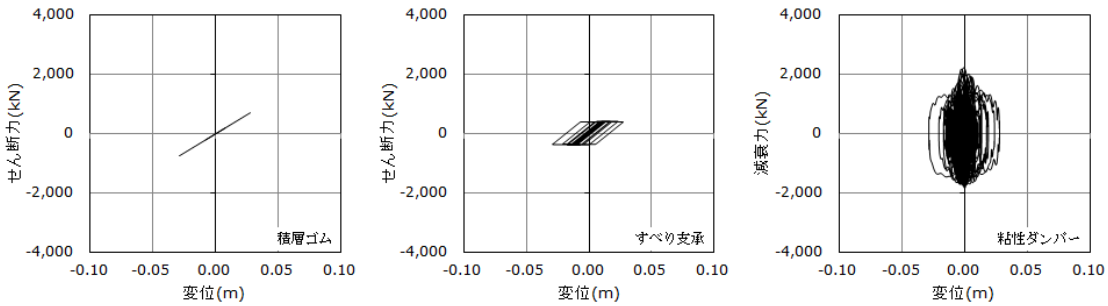
図 1.3.5-21　免震層の荷重変形関係（SZO024・M9.0・1.0 倍入力）



(a)簡易モデル A 予備（μ_{min}、α=0.70、T_0=15℃）

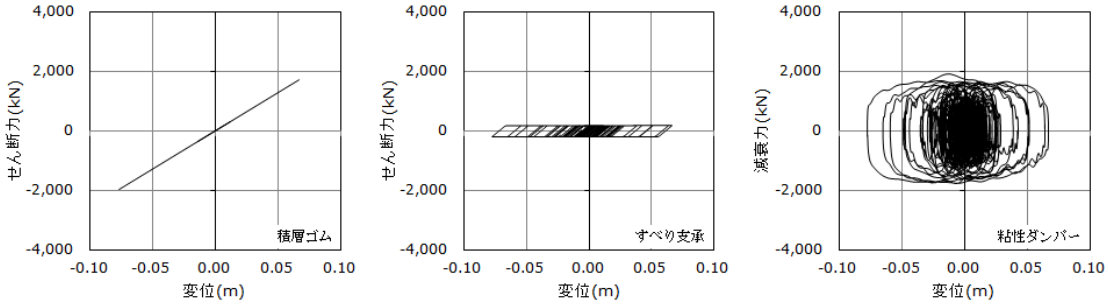


(b)簡易モデル B（μ_{max}、α=0.85、T_0=15℃）

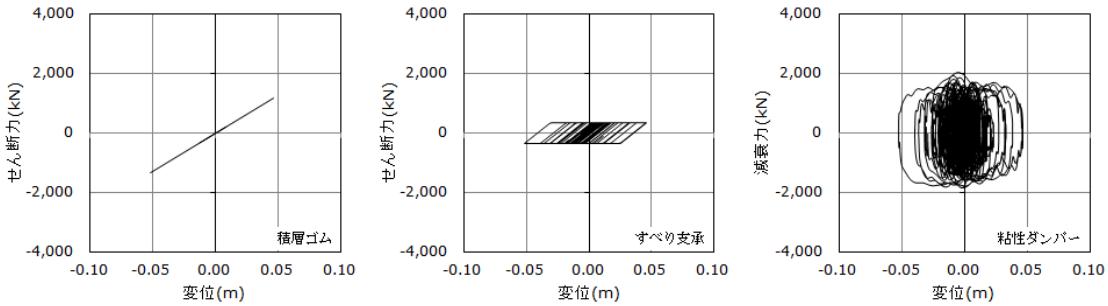


(c)詳細モデル（繰り返し依存性考慮）

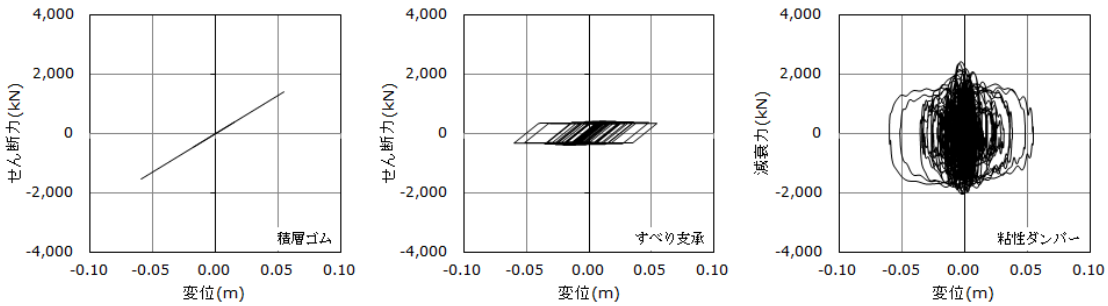
図 1.3.5-22　免震層の荷重変形関係（KGIN・M8.7・1.0 倍入力）



(a)簡易モデル A 予備（μ_{min}、α=0.70、T_0=15℃）

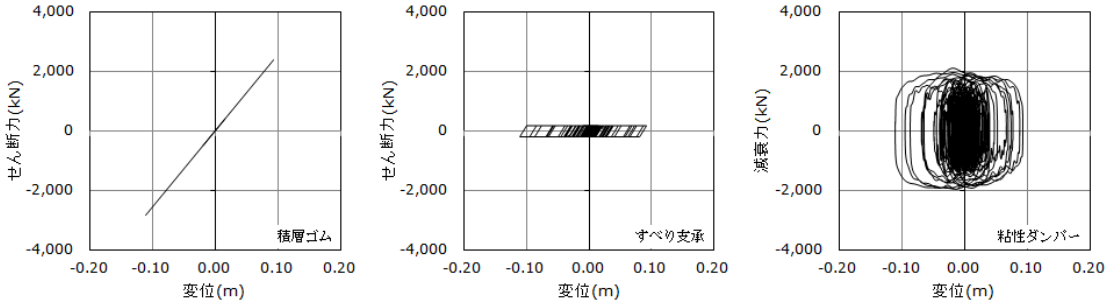


(b)簡易モデル B（μ_{max}、α=0.85、T_0=15℃）

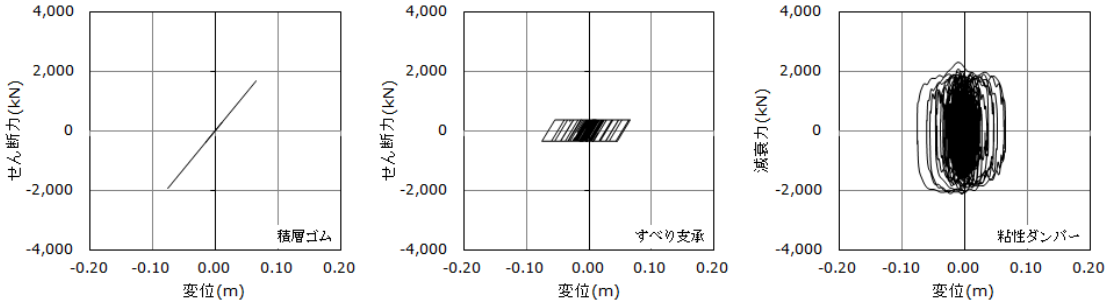


(c)詳細モデル（繰り返し依存性考慮）

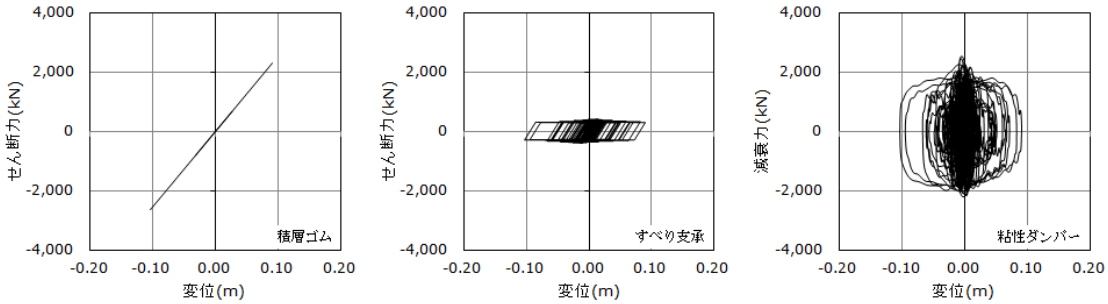
図 1.3.5-23　免震層の荷重変形関係（KGIN・M8.7・1.25 倍入力）



(a)簡易モデル A 予備（μ_{min}、α=0.70、T_0=15℃）

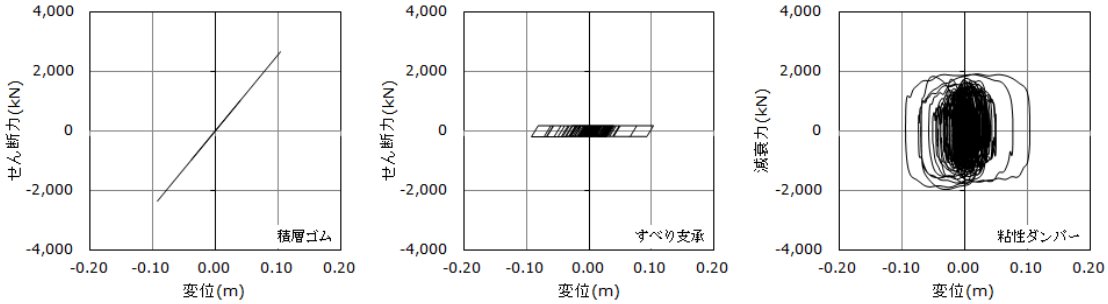


(b)簡易モデル B（μ_{max}、α=0.85、T_0=15℃）

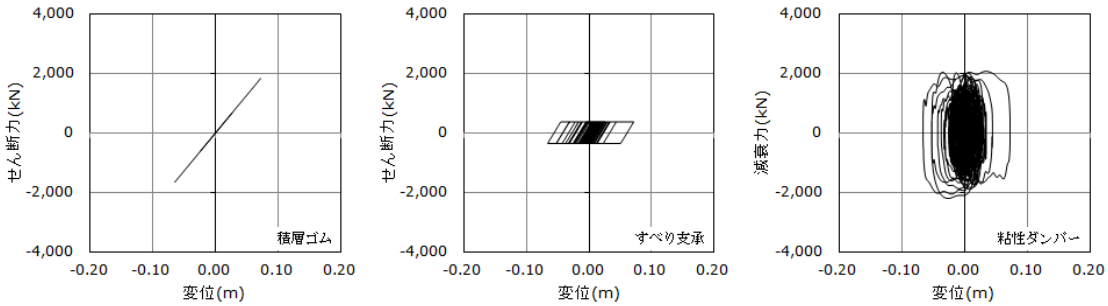


(c)詳細モデル（繰り返し依存性考慮）

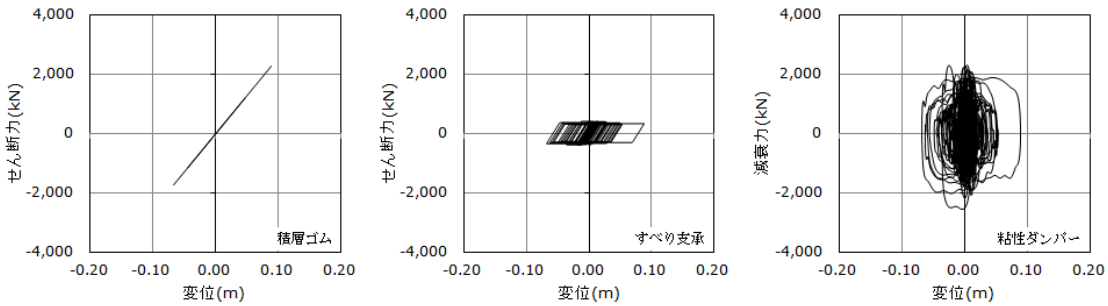
図 1.3.5-24　免震層の荷重変形関係（KGIN・M8.7・1.5 倍入力）



(a)簡易モデル A 予備（μ_{min}、α=0.70、T_0=15℃）



(b)簡易モデル B（μ_{max}、α=0.85、T_0=15℃）



(c)詳細モデル（繰り返し依存性考慮）

図 1.3.5-25　免震層の荷重変形関係（KGIN・M9.0・1.0 倍入力）

2) 換算温度入力とした簡易 A モデルの応答結果

簡易 A 予備モデルによる解析結果の「最終累積吸収エネルギーの 95%」の値を基に計算された換算温度を用いたモデルの解析結果を示す。なお、計算に用いた累積吸収エネルギー量および計算された上昇温度、換算温度は下表に示すとおりである。最も大きな温度増分は、AIC003 の M9.0 の 1 倍入力時における 57.2℃であった。

表 1.3.5-7 簡易 A モデルの換算温度（簡易 A 予備の最終累積エネルギー95%から計算）

Case		粘性ダンパー Ed(Nm=J) 4基分	Ed/Vv (J/cc)	温度増分 ΔT （℃）	入力T_0
OSKH002	M8.7x1.00	1.56E+07	1.25E+03	17.7	32.7
	M8.7x1.25	2.54E+07	2.04E+03	24.9	39.9
	M8.7x1.50	3.69E+07	2.97E+03	32.3	47.3
	M9.0x1.00	2.96E+07	2.38E+03	27.7	42.7
AIC003	M8.7x1.00	1.18E+07	9.52E+02	14.6	29.6
	M8.7x1.25	1.84E+07	1.48E+03	19.8	34.8
	M8.7x1.50	2.62E+07	2.10E+03	25.4	40.4
	M9.0x1.00	8.33E+07	6.69E+03	57.2	72.2
SZO024	M8.7x1.00	1.94E+07	1.56E+03	20.6	35.6
	M8.7x1.25	2.87E+07	2.30E+03	27.1	42.1
	M8.7x1.50	3.89E+07	3.13E+03	33.6	48.6
	M9.0x1.00	2.40E+07	1.93E+03	23.9	38.9
KGIN	M8.7x1.00	2.43E+06	1.96E+02	4.8	19.8
	M8.7x1.25	4.33E+06	3.48E+02	7.2	22.2
	M8.7x1.50	6.96E+06	5.60E+02	10.1	25.1
	M9.0x1.00	6.21E+06	4.99E+02	9.3	24.3

※Ed：簡易 A 予備の最終累積エネルギーの 95%

簡易 A モデルに換算温度を入力した場合における、簡易 A、簡易 B、および詳細モデルの応答結果の比較を行う。比較する応答値は、免震層の最大応答変形および加速度、せん断力係数 *Ci*、累積変形量、等価エネルギー速度 V_E、免震部材の荷重変形関係とする。

表 1.3.5-8～表 1.3.5-11 に最大応答値一覧表を、図 1.3.5-26～図 1.3.5-29 に各モデルにおける最大応答値のばらつきを、図 1.3.5-30～図 1.3.5-45 には各免震層の荷重変形関係を示す。なお、荷重変形関係の縦軸は、各免震部材の減衰力の合計である。

表 1.3.5-8～表 1.3.5-11 および図 1.3.5-26～図 1.3.5-29 より、簡易 A モデルに換算温度を入力した結果、詳細モデルよりも変位を大きめに評価する結果となっている。その他の応答値についても簡易 A および B の両簡易モデルの結果の間に詳細モデルの結果が入る性状に修正された。これは、図 1.3.5-30～図 1.3.5-45 に示した荷重変形関係においても同様の傾向であった。

以上の結果より、簡易 A モデルの温度入力値を換算温度とすることにより、繰り返し依存性による剛性低下は反映され、詳細モデルよりも応答変位を大きくするといえる。

この方法により、簡易 A、B モデルを設定すれば、詳細モデルの結果を挟み込めるといえる。

① 最大応答値一覧

表 1.3.5-8 最大応答値一覧（OSKH02、簡易 A）

応答値	OSKH02											
	M8.7 三連動									M9.0 四連動		
	×1.0			×1.25			×1.5			×1.0		
	簡易 A	簡易 B	詳細	簡易 A	簡易 B	詳細	簡易 A	簡易 B	詳細	簡易 A	簡易 B	詳細
最大応答変位 (cm)	23.08	17.55	21.99	31.70	25.78	31.20	39.92	34.36	39.07	39.33	24.06	37.35
最大応答加速度 (cm/s^2)	73.79	68.38	72.76	94.99	89.85	94.95	114.77	111.91	115.31	113.90	84.49	109.32
最大せん断力係数 *Ci*	0.0752	0.0697	0.0742	0.0969	0.0916	0.0968	0.1170	0.1141	0.1176	0.1161	0.0862	0.1115
累積変位量 (m)	10.37	6.998	10.08	15.30	10.36	14.53	20.82	14.24	19.44	19.34	12.33	19.36
等価エネルギー速度 V_E(m/s)	1.879	1.749	1.918	2.361	2.271	2.412	2.812	2.786	2.880	2.590	2.445	2.641

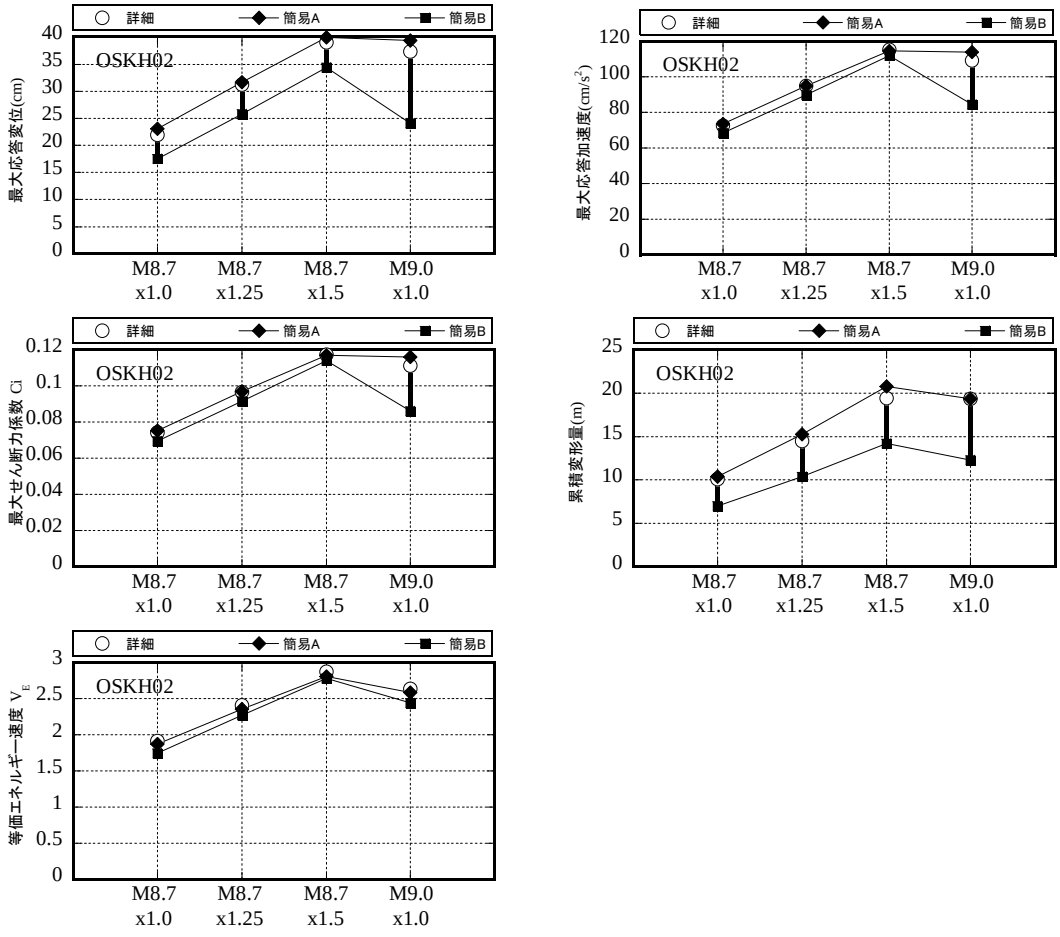


図 1.3.5-26 最大応答値の比較（OSKH02、簡易 A）

表 1.3.5-9　最大応答値一覧（AIC003、簡易 A）

応答値	AIC003											
	M8.7 三連動									M9.0 四連動		
	×1.0			×1.25			×1.5			×1.0		
	簡易 A	簡易 B	詳細	簡易 A	簡易 B	詳細	簡易 A	簡易 B	詳細	簡易 A	簡易 B	詳細
最大応答変位 (cm)	15.08	9.96	15.67	23.44	15.16	22.96	33.93	21.45	32.30	83.69	50.42	74.83
最大応答加速度 (cm/s^2)	53.36	48.56	54.30	74.45	62.05	73.51	100.62	78.57	97.32	221.81	152.40	202.77
最大せん断力係数 *Ci*	0.0544	0.0495	0.0554	0.0759	0.0633	0.0750	0.1026	0.0801	0.0992	0.2262	0.1554	0.2068
累積変位量 (m)	7.829	6.029	8.048	11.15	8.387	11.09	15.05	11.03	14.57	46.85	30.99	41.86
等価エネルギー速度 V_E(m/s)	1.604	1.603	1.699	1.992	2.002	2.081	2.377	2.394	2.464	4.137	4.282	4.263

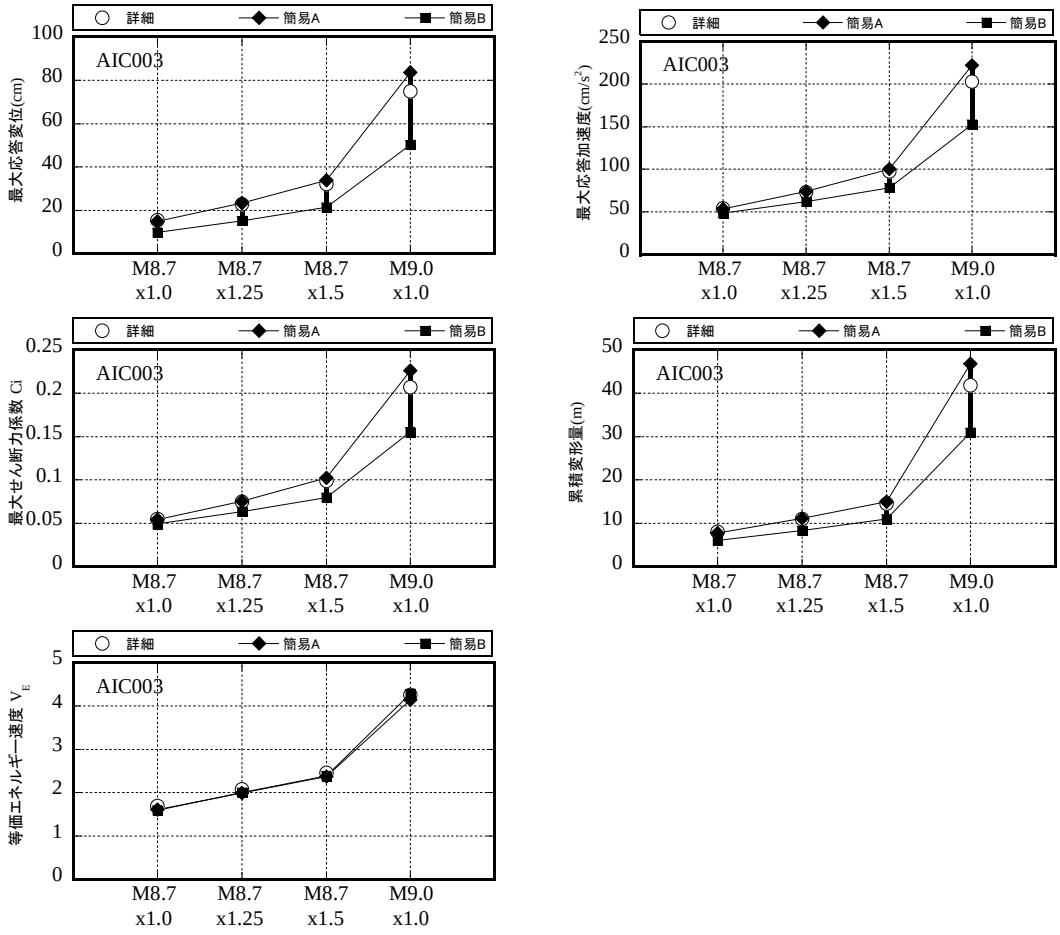


図 1.3.5-27　最大応答値の比較（AIC003、簡易 A）

表 1.3.5-10　最大応答値一覧（SZO024、簡易 A）

応答値	SZO024											
	M8.7 三連動									M9.0 四連動		
	×1.0			×1.25			×1.5			×1.0		
	簡易 A	簡易 B	詳細	簡易 A	簡易 B	詳細	簡易 A	簡易 B	詳細	簡易 A	簡易 B	詳細
最大応答変位 (cm)	21.86	16.91	21.30	32.16	24.10	30.94	42.80	32.34	41.06	34.16	26.30	33.04
最大応答加速度 (cm/s^2)	70.01	66.25	68.64	96.39	85.55	94.07	122.63	106.57	120.04	101.53	91.65	99.82
最大せん断力係数 *Ci*	0.0714	0.0676	0.0700	0.0983	0.0872	0.0959	0.1250	0.1087	0.1224	0.1035	0.0935	0.1018
累積変位量 (m)	10.58	8.538	10.32	14.53	11.77	13.87	18.78	15.25	17.59	14.68	11.98	13.52
等価エネルギー速度 V_E(m/s)	2.000	2.102	2.084	2.395	2.581	2.489	2.755	3.027	2.870	2.204	2.336	2.250

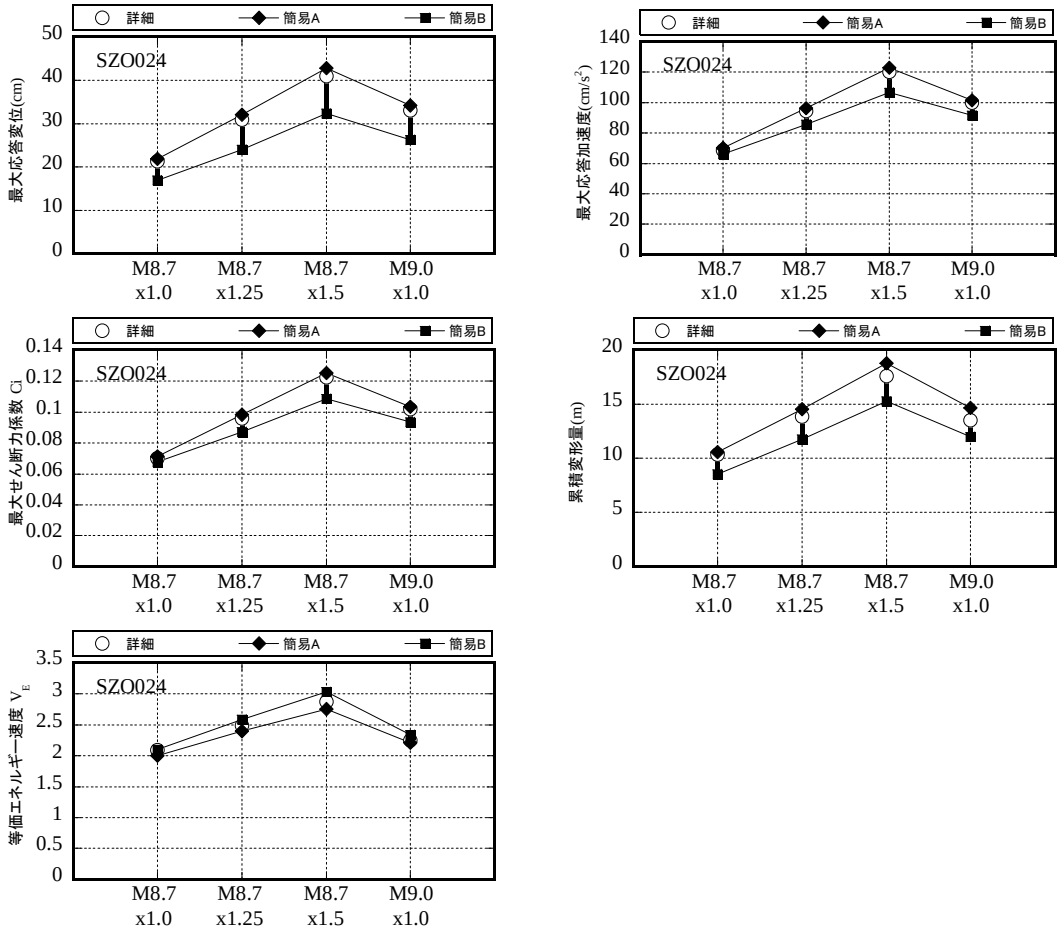


図 1.3.5-28　最大応答値の比較（SZO024、簡易 A）

表 1.3.5-11　最大応答値一覧（KGIN、簡易 A）

応答値	KGIN											
	M8.7 三連動									M9.0 四連動		
	×1.0			×1.25			×1.5			×1.0		
	簡易 A	簡易 B	詳細	簡易 A	簡易 B	詳細	簡易 A	簡易 B	詳細	簡易 A	簡易 B	詳細
最大応答変位 (cm)	5.40	3.40	2.90	8.47	5.21	5.98	12.26	7.55	10.36	11.17	7.22	8.80
最大応答加速度 (cm/s^2)	25.66	23.62	23.31	34.53	30.42	30.97	44.61	37.96	41.11	41.23	36.54	37.95
最大せん断力係数 *Ci*	0.0262	0.0241	0.0238	0.0352	0.0310	0.0316	0.0455	0.0387	0.0419	0.0420	0.0373	0.0387
累積変位量 (m)	3.227	2.500	1.678	4.723	3.389	3.276	6.616	4.435	5.577	6.633	4.339	4.385
等価エネルギー速度 V_E(m/s)	0.755	0.654	0.571	1.014	0.860	0.859	1.290	1.088	1.197	1.231	1.024	1.055

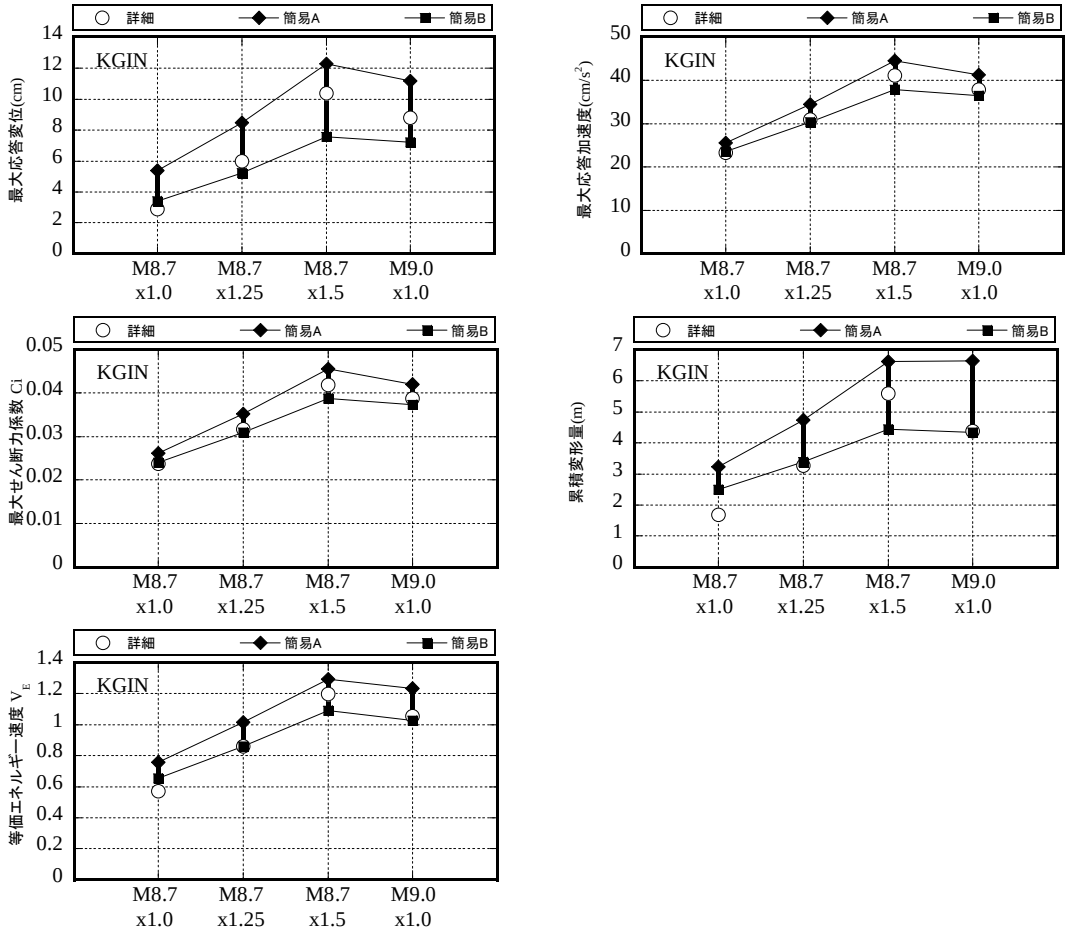
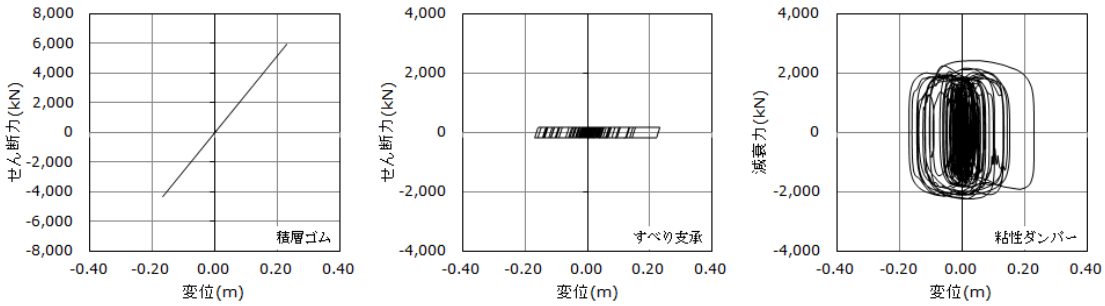
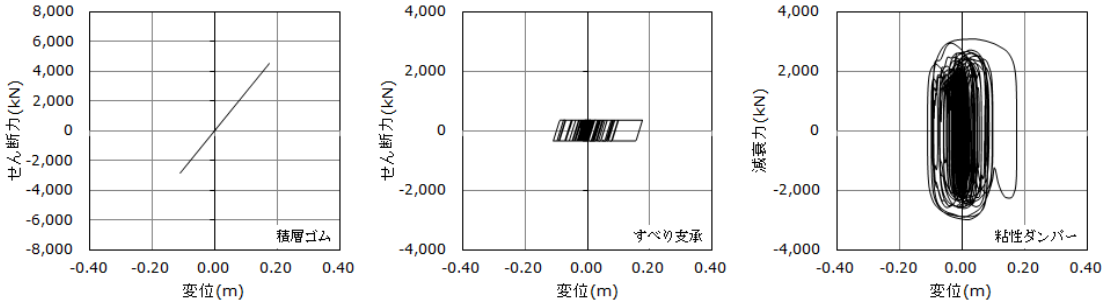


図 1.3.5-29　最大応答値の比較（KGIN、簡易 A）

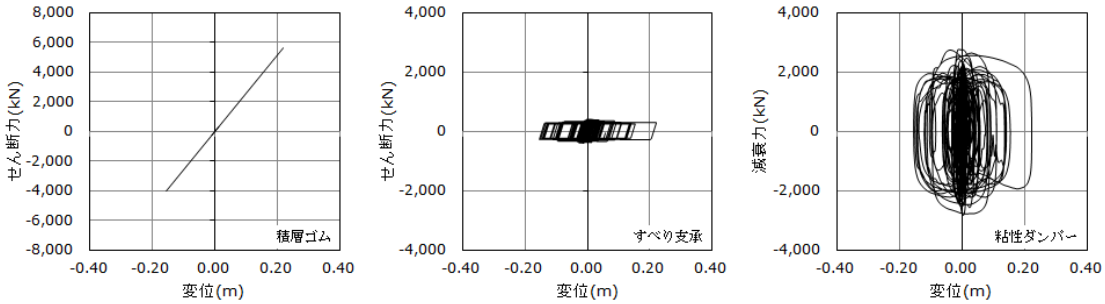
② 荷重変形関係



(a)簡易モデル A（μ_{min}、α=0.70、T_0=32.7℃）

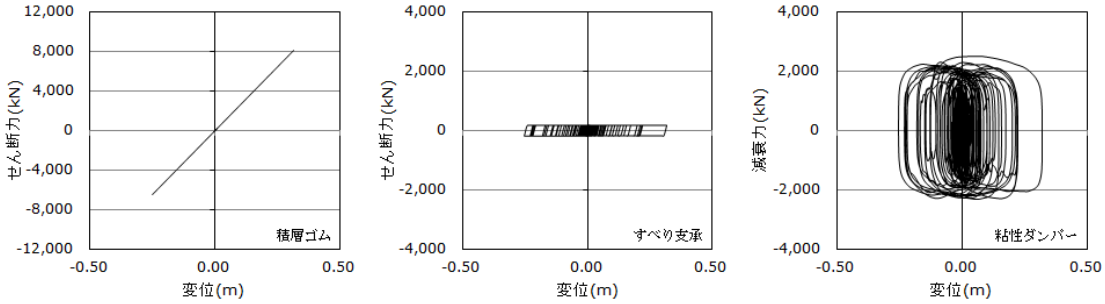


(b)簡易モデル B（μ_{max}、α=0.85、T_0=15℃）

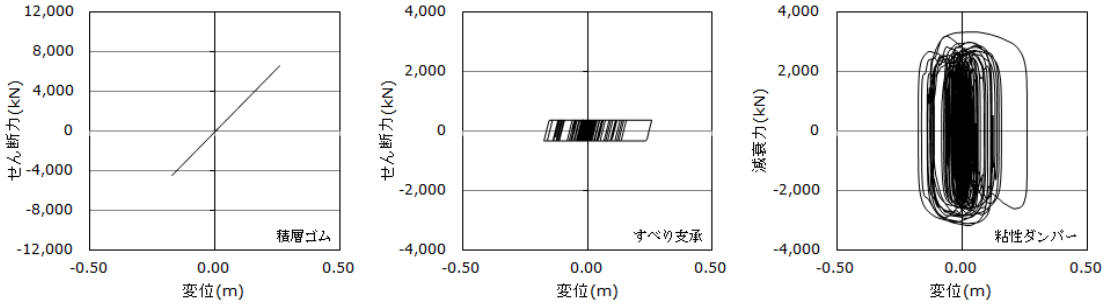


(c)詳細モデル（繰り返し依存性考慮）

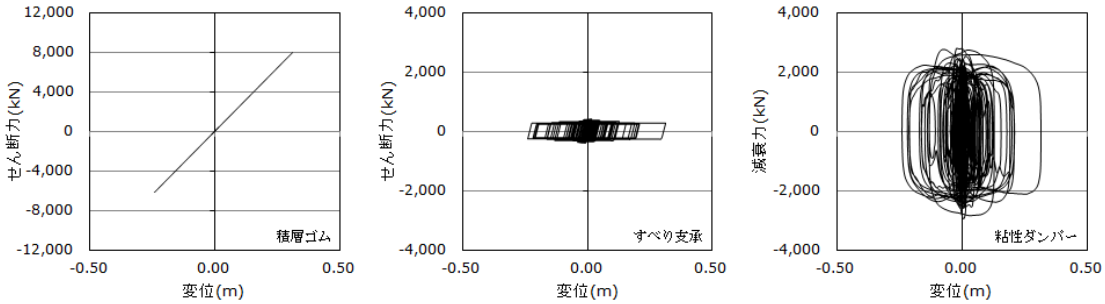
図 1.3.5-30　免震層の荷重変形関係（OSKH02・M8.7・1.0 倍入力）



(a)簡易モデル A（μ_{min}、α=0.70、T_0=39.9℃）

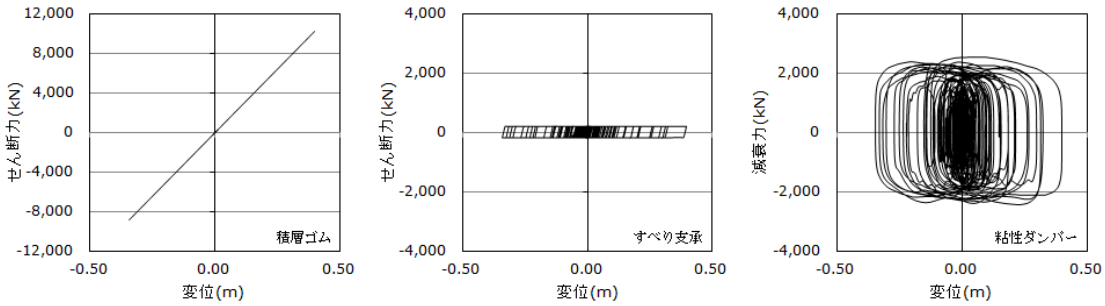


(b)簡易モデル B（μ_{max}、α=0.85、T_0=15℃）

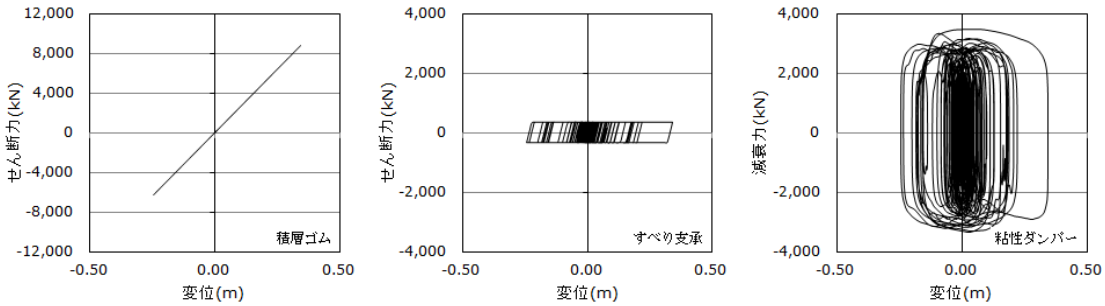


(c)詳細モデル（繰り返し依存性考慮）

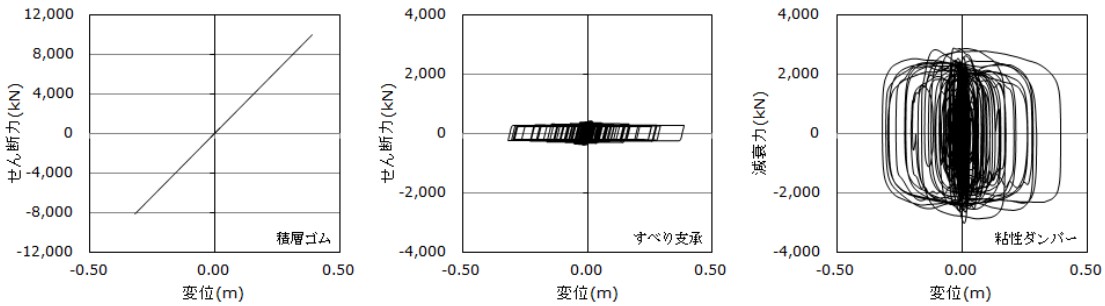
図 1.3.5-31　免震層の荷重変形関係（OSKH02・M8.7・1.25 倍入力）



(a)簡易モデル A（μ_{min}、α=0.70、T_0=47.3℃）

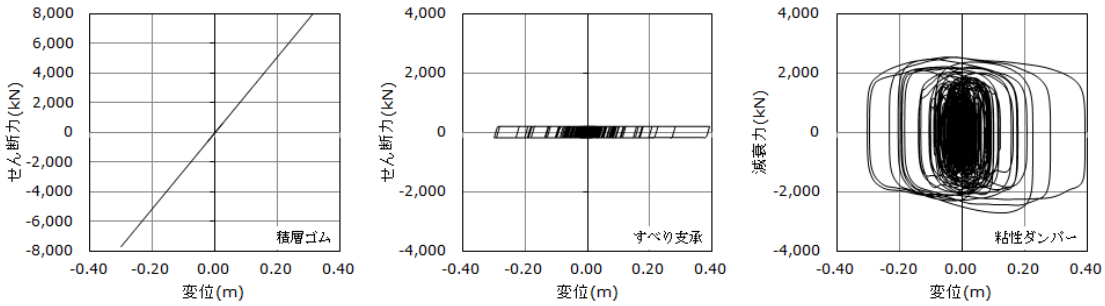


(b)簡易モデル B（μ_{max}、α=0.85、T_0=15℃）

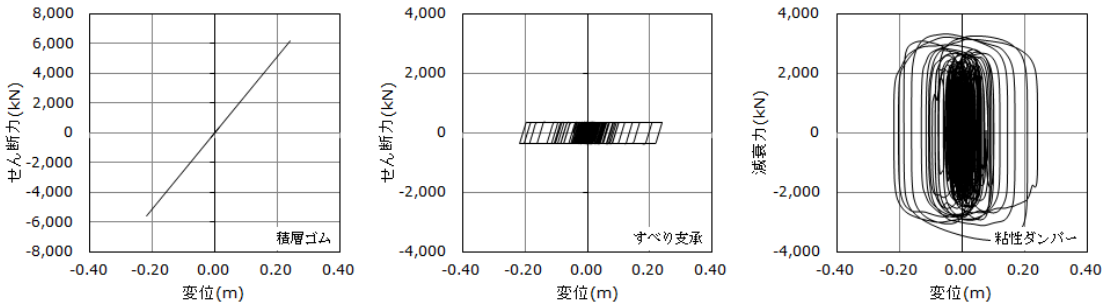


(c)詳細モデル（繰り返し依存性考慮）

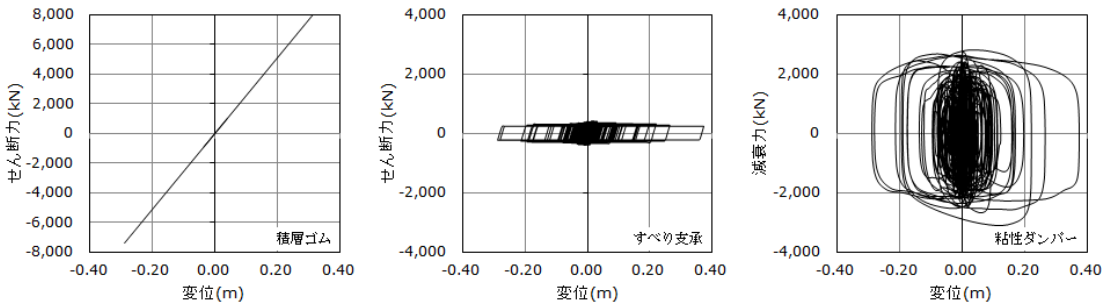
図 1.3.5-32　免震層の荷重変形関係（OSKH02・M8.7・1.5 倍入力）



(a)簡易モデル A（μ_{min}、α=0.70、T_0=42.7℃）

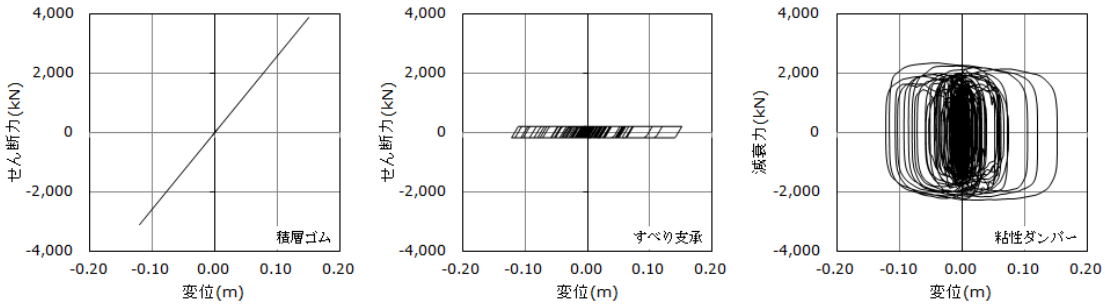


(b)簡易モデル B（μ_{max}、α=0.85、T_0=15℃）

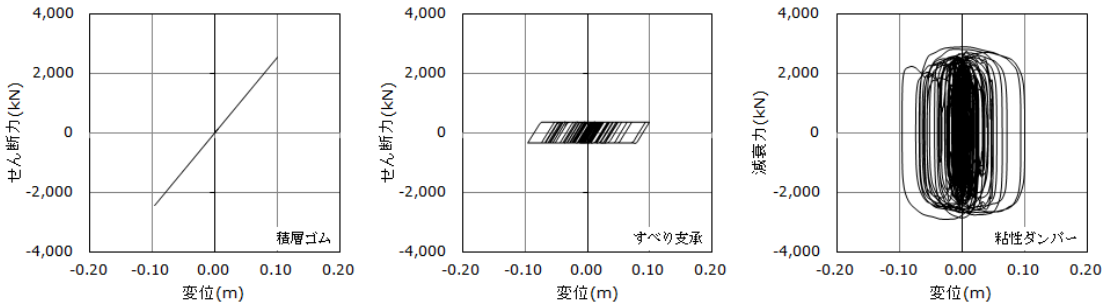


(c)詳細モデル（繰り返し依存性考慮）

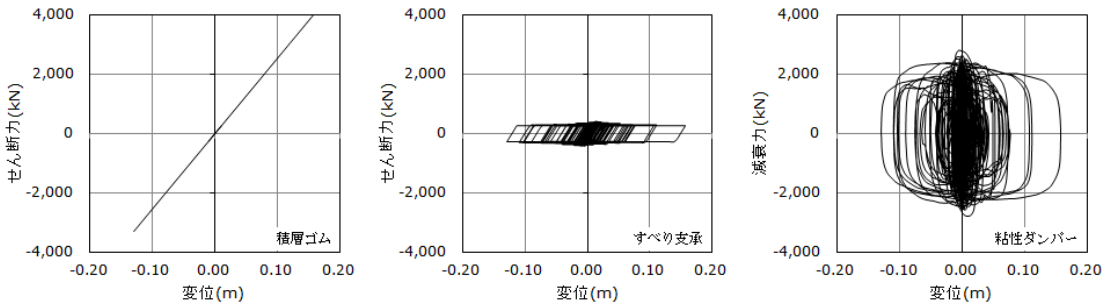
図 1.3.5-33　免震層の荷重変形関係（OSKH02・M9.0・1.0 倍入力）



(a)簡易モデル A（μ_{min}、α=0.70、T_0=29.6℃）

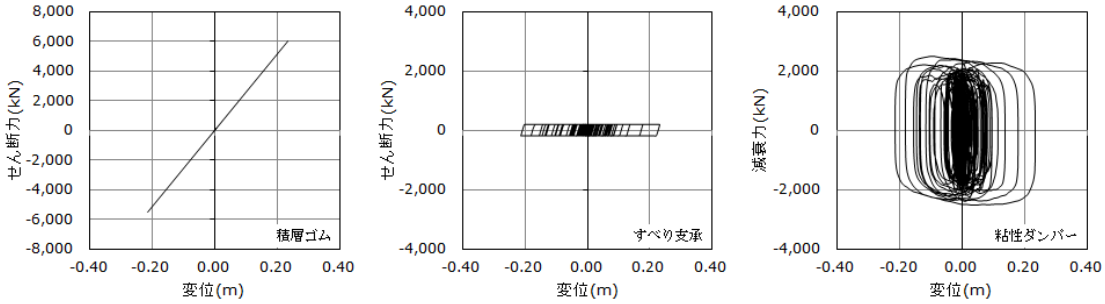


(b)簡易モデル B（μ_{max}、α=0.85、T_0=15℃）

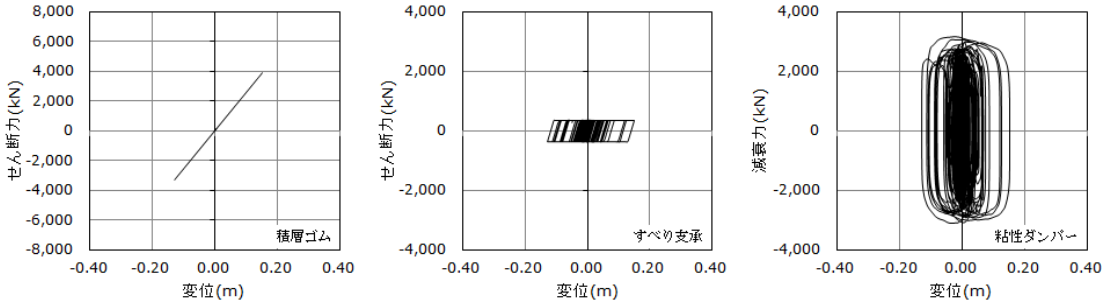


(c)詳細モデル（繰り返し依存性考慮）

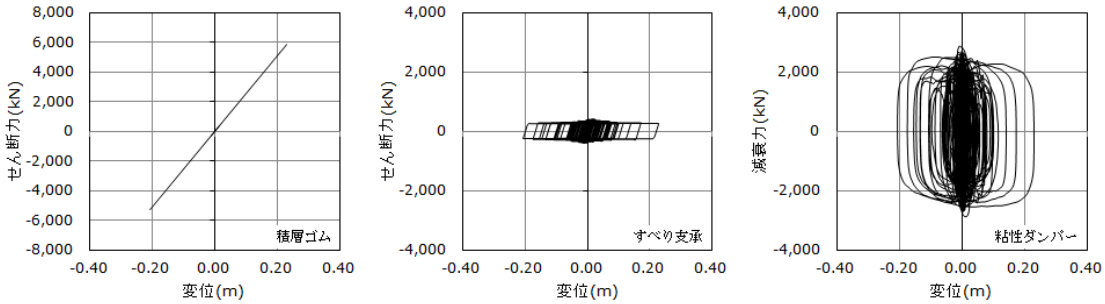
図 1.3.5-34　免震層の荷重変形関係（AIC003・M8.7・1.0 倍入力）



(a)簡易モデル A（μ_{min}、α=0.70、T_0=34.8℃）

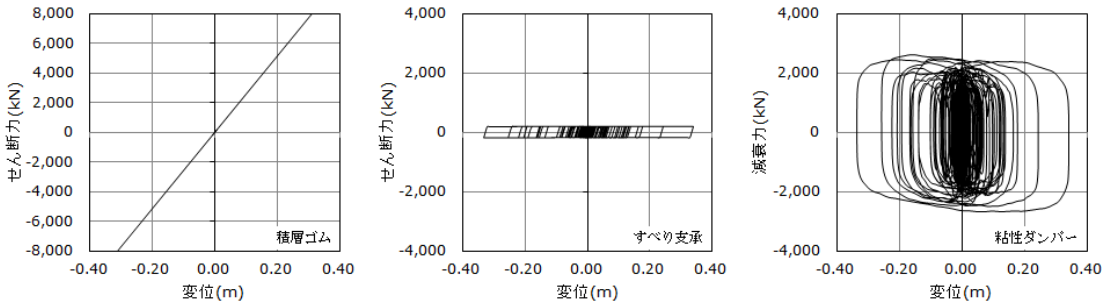


(b)簡易モデル B（μ_{max}、α=0.85、T_0=15℃）

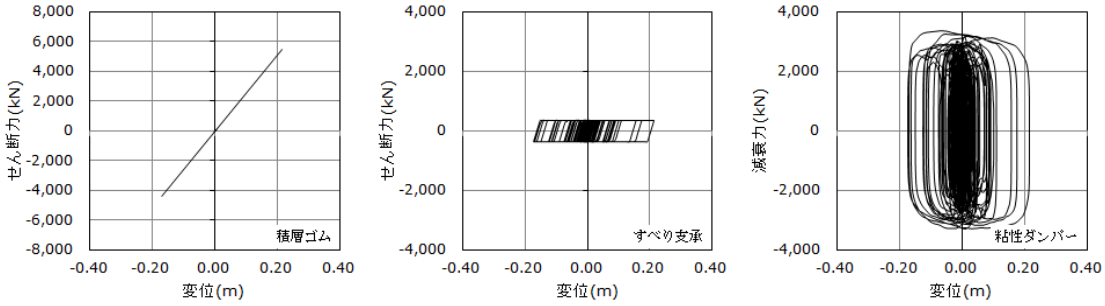


(c)詳細モデル（繰り返し依存性考慮）

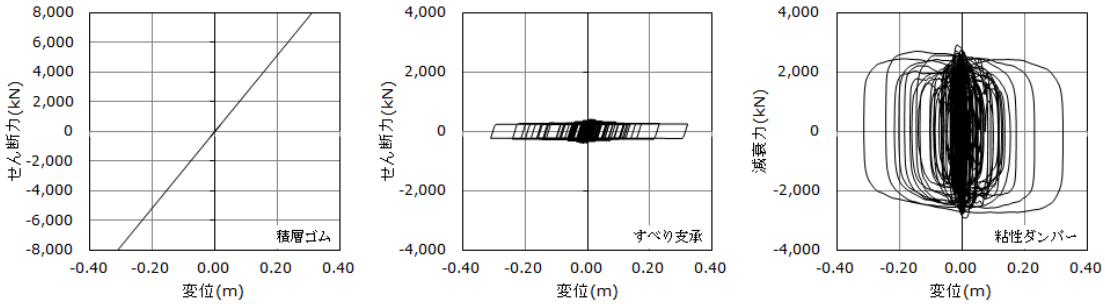
図 1.3.5-35　免震層の荷重変形関係（AIC003・M8.7・1.25 倍入力）



(a)簡易モデル A（μ_{min}、α=0.70、T_0=40.4℃）

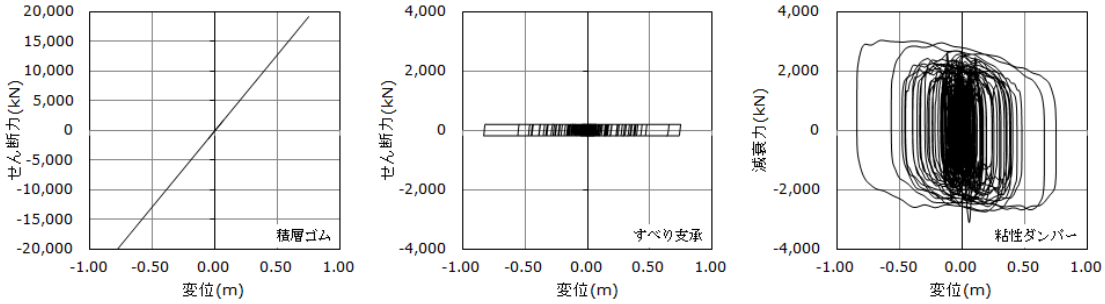


(b)簡易モデル B（μ_{max}、α=0.85、T_0=15℃）

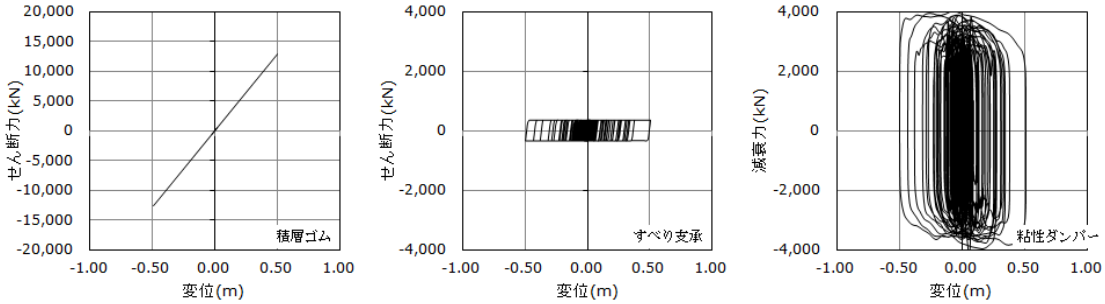


(c)詳細モデル（繰り返し依存性考慮）

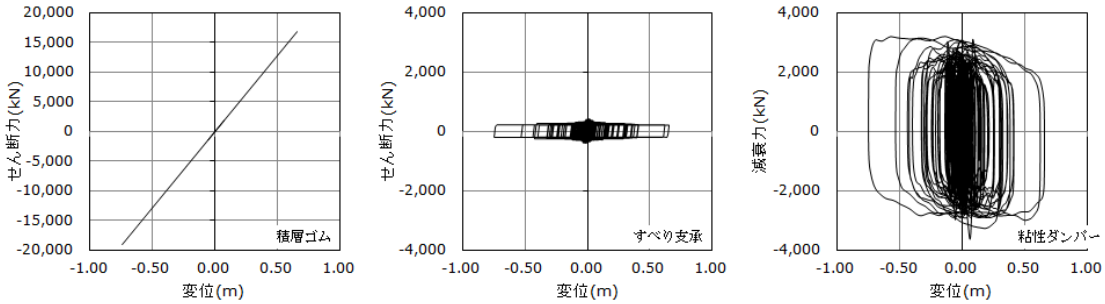
図 1.3.5-36　免震層の荷重変形関係（AIC003・M8.7・1.5 倍入力）



(a)簡易モデル A（μ_{min}、α=0.70、T_0=72.2℃）

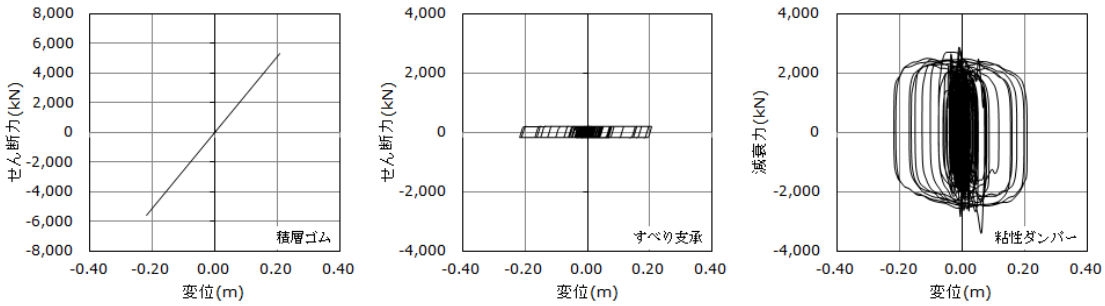


(b)簡易モデル B（μ_{max}、α=0.85、T_0=15℃）

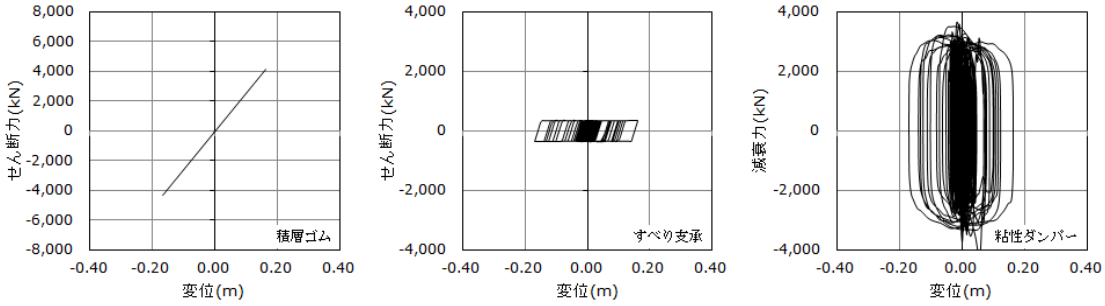


(c)詳細モデル（繰り返し依存性考慮）

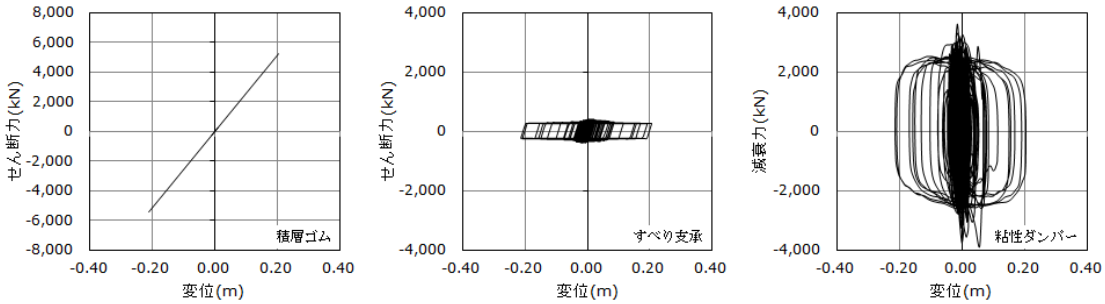
図 1.3.5-37　免震層の荷重変形関係（AIC003・M9.0・1.0 倍入力）



(a)簡易モデル A（μ_{min}、α=0.70、T_0=35.6℃）

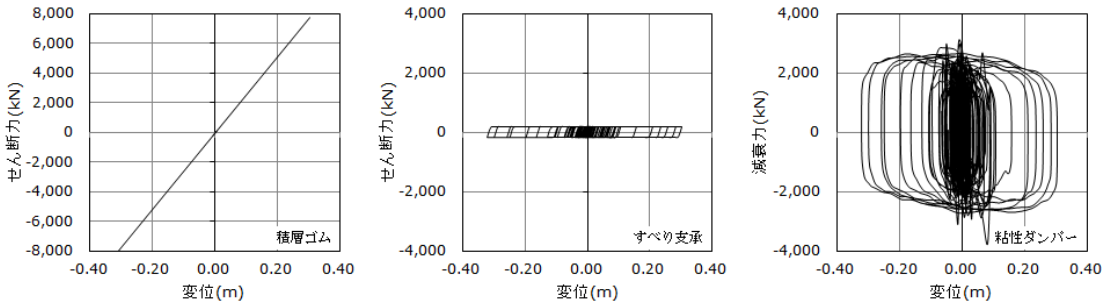


(b)簡易モデル B（μ_{max}、α=0.85、T_0=15℃）

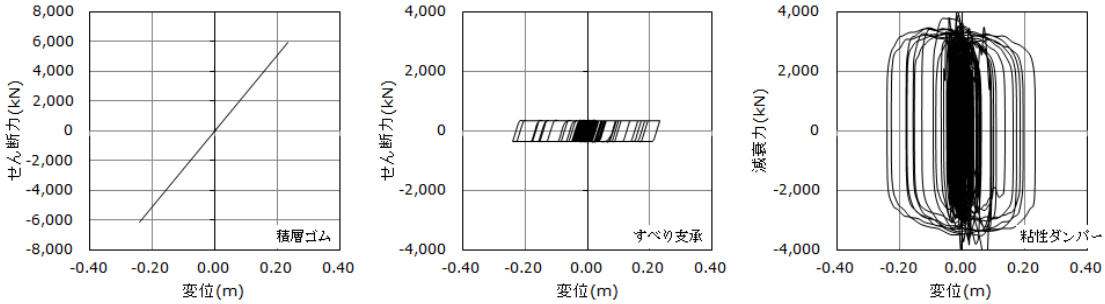


(c)詳細モデル（繰り返し依存性考慮）

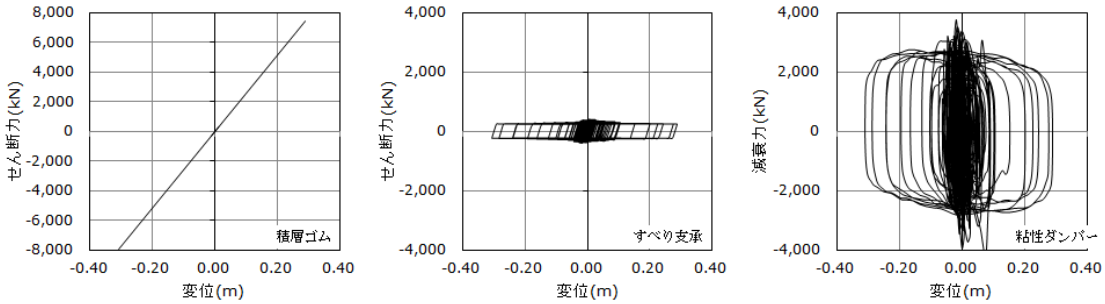
図 1.3.5-38　免震層の荷重変形関係（SZO024・M8.7・1.0 倍入力）



(a)簡易モデル A（μ_{min}、α=0.70、T_0=42.1℃）

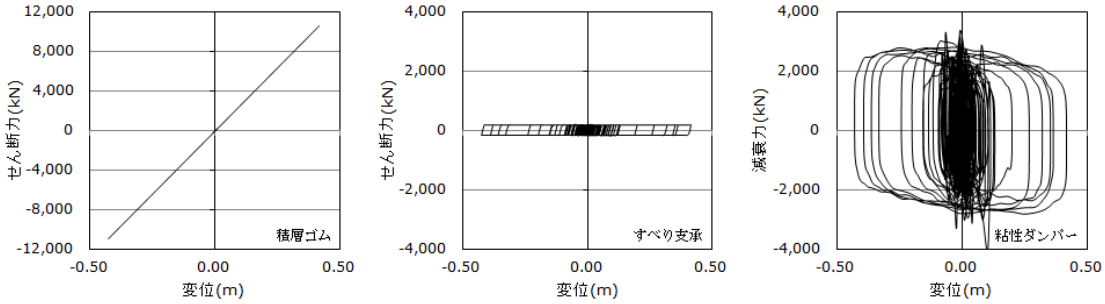


(b)簡易モデル B（μ_{max}、α=0.85、T_0=15℃）

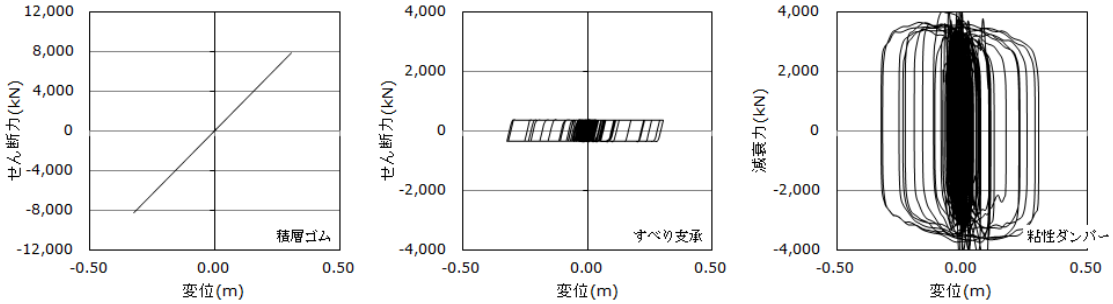


(c)詳細モデル（繰り返し依存性考慮）

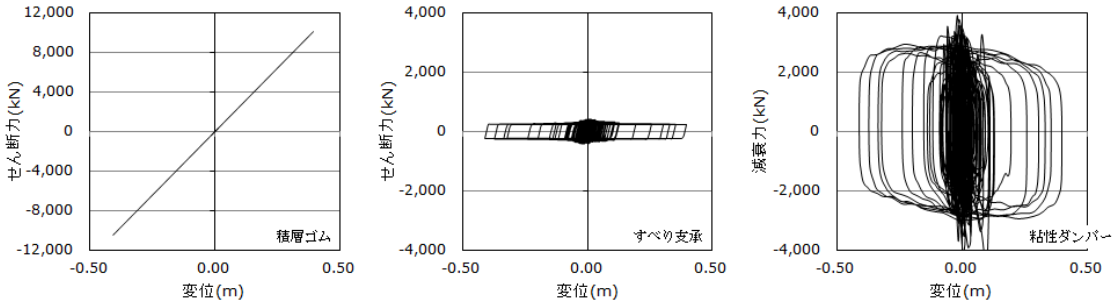
図 1.3.5-39　免震層の荷重変形関係（SZO024・M8.7・1.25 倍入力）



(a)簡易モデル A（μ_{min}、α=0.70、T_0=48.6℃）

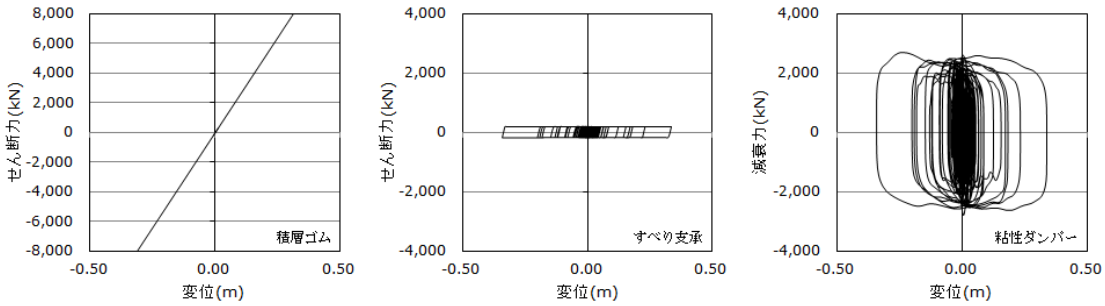


(b)簡易モデル B（μ_{max}、α=0.85、T_0=15℃）

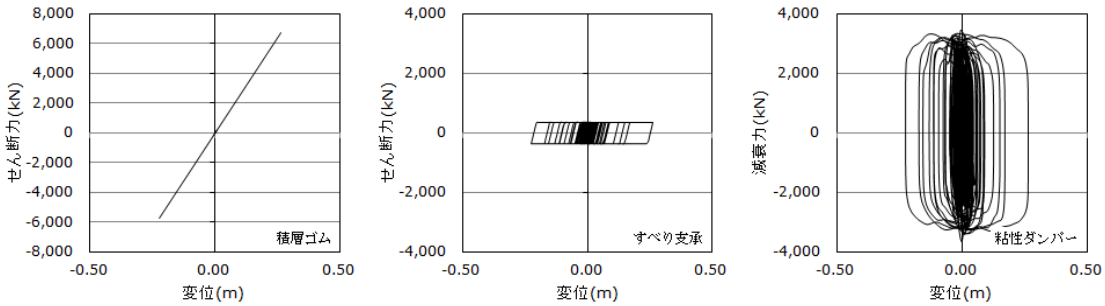


(c)詳細モデル（繰り返し依存性考慮）

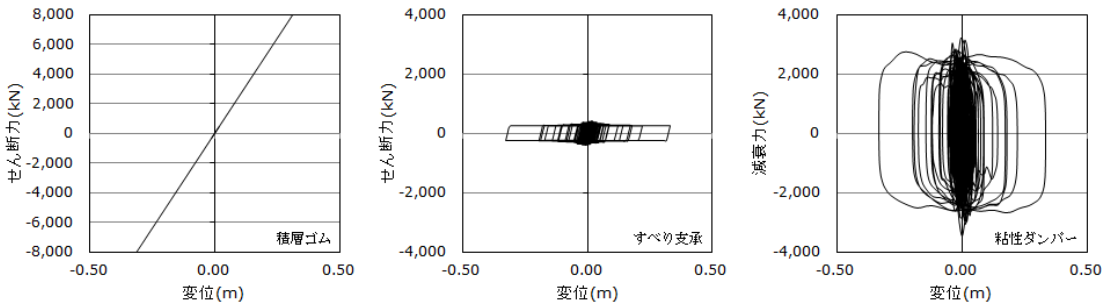
図 1.3.5-40　免震層の荷重変形関係（SZO024・M8.7・1.5 倍入力）



(a)簡易モデル A（μ_{min}、α=0.70、T_0=38.9℃）

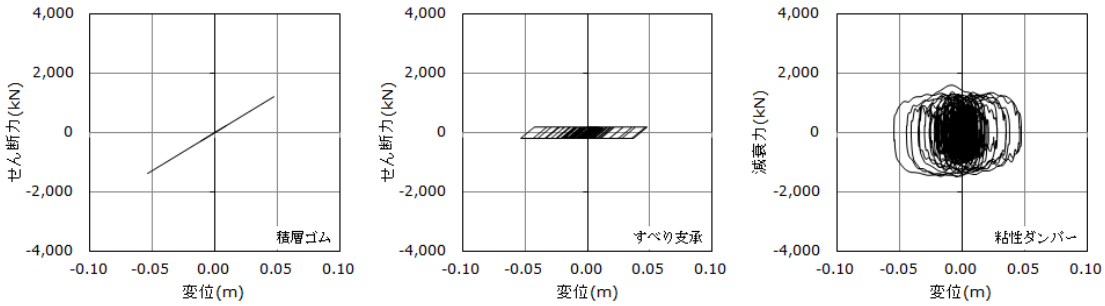


(b)簡易モデル B（μ_{max}、α=0.85、T_0=15℃）

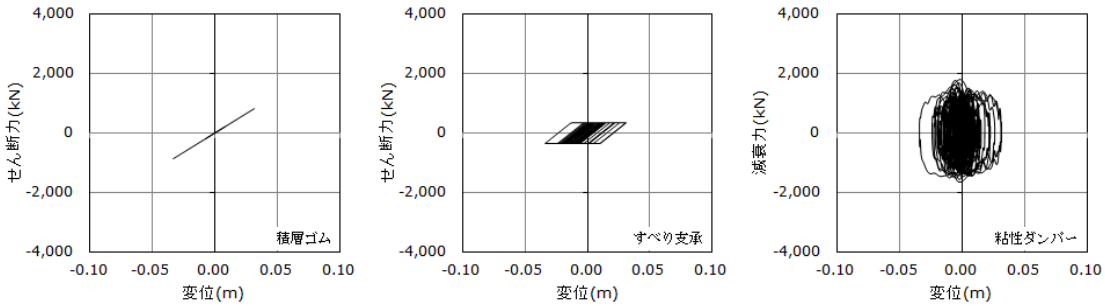


(c)詳細モデル（繰り返し依存性考慮）

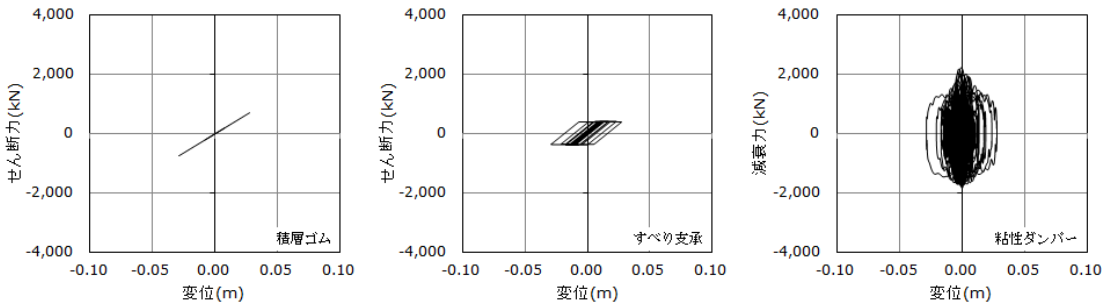
図 1.3.5-41　免震層の荷重変形関係（SZO024・M9.0・1.0 倍入力）



(a)簡易モデル A（μ_{min}、α=0.70、T_0=19.8℃）

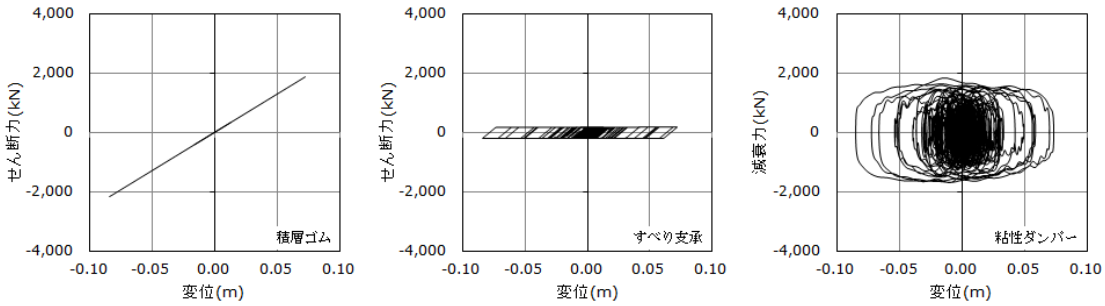


(b)簡易モデル B（μ_{max}、α=0.85、T_0=15℃）

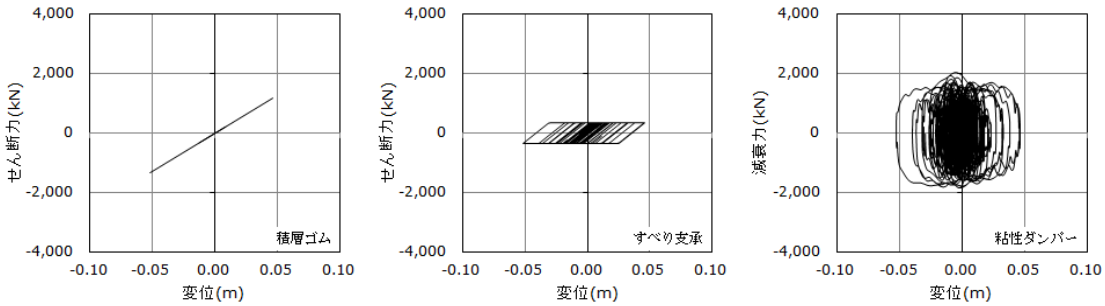


(c)詳細モデル（繰り返し依存性考慮）

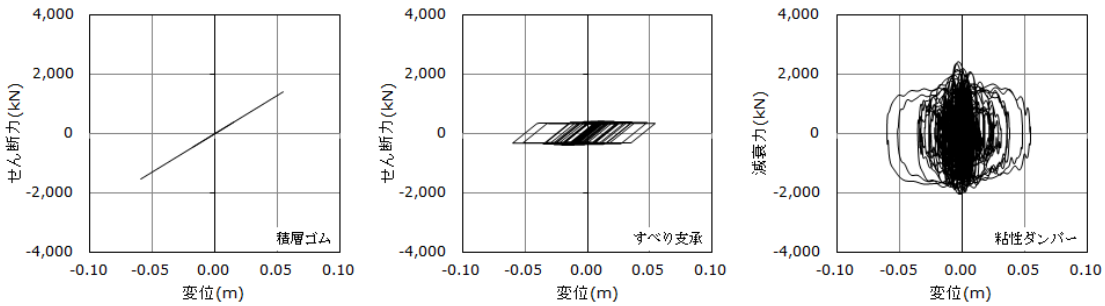
図 1.3.5-42　免震層の荷重変形関係（KGIN・M8.7・1.0 倍入力）



(a)簡易モデル A（μ_{min}、α=0.70、T_0=22.2℃）

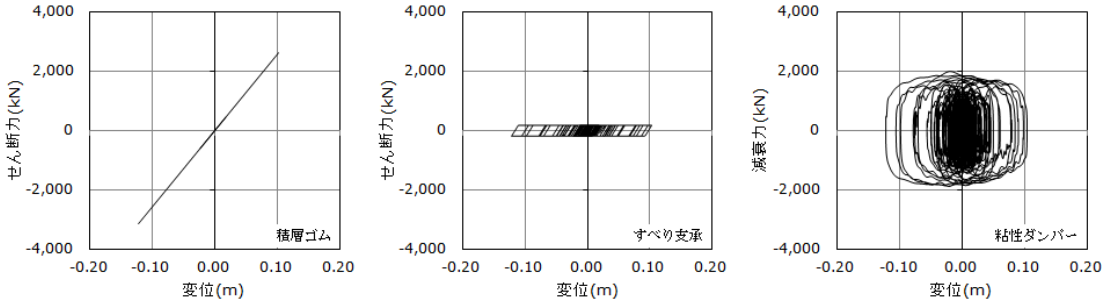


(b)簡易モデル B（μ_{max}、α=0.85、T_0=15℃）

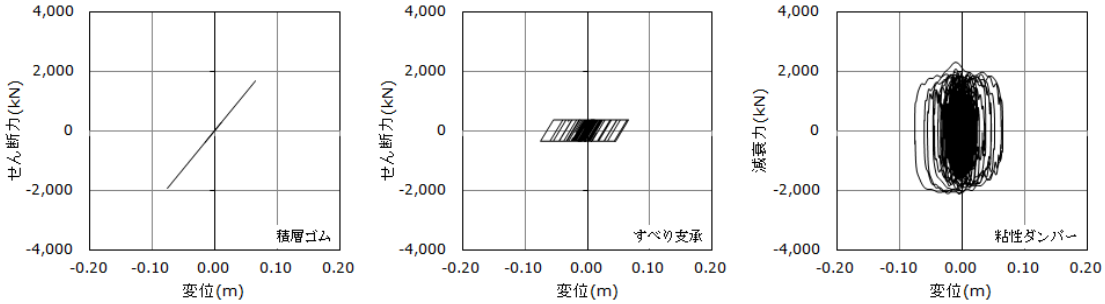


(c)詳細モデル（繰り返し依存性考慮）

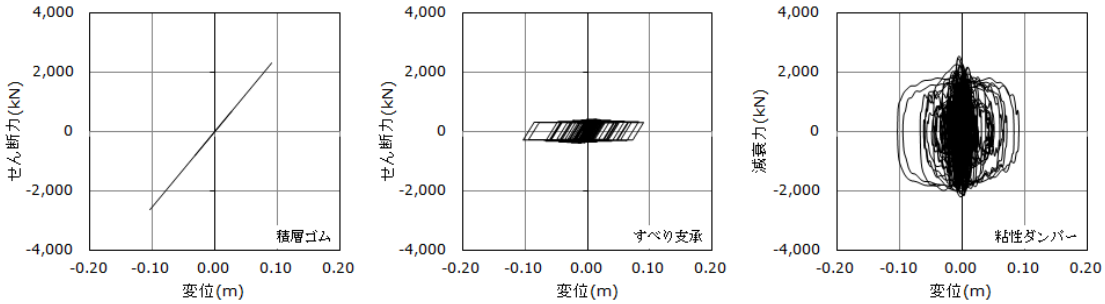
図 1.3.5-43　免震層の荷重変形関係（KGIN・M8.7・1.25 倍入力）



(a)簡易モデル A（μ_{min}、α=0.70、T_0=25.1℃）

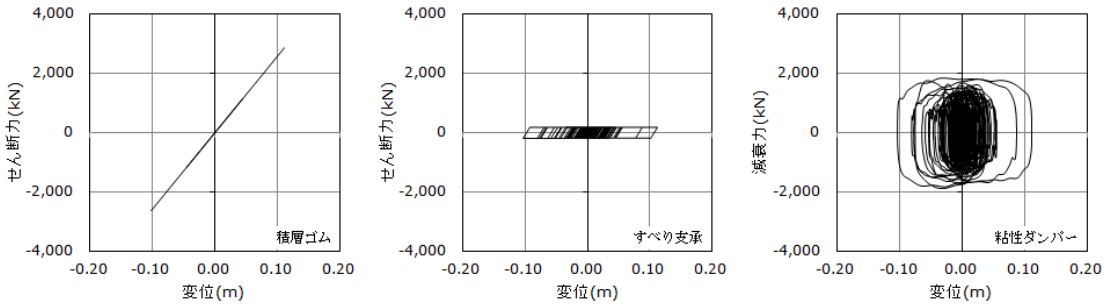


(b)簡易モデル B（μ_{max}、α=0.85、T_0=15℃）

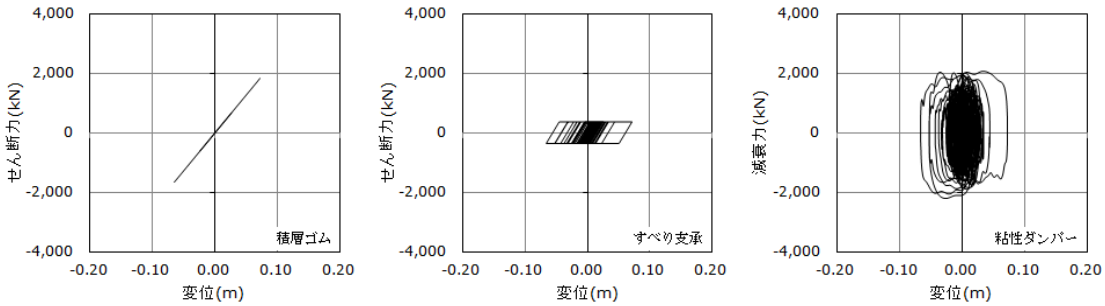


(c)詳細モデル（繰り返し依存性考慮）

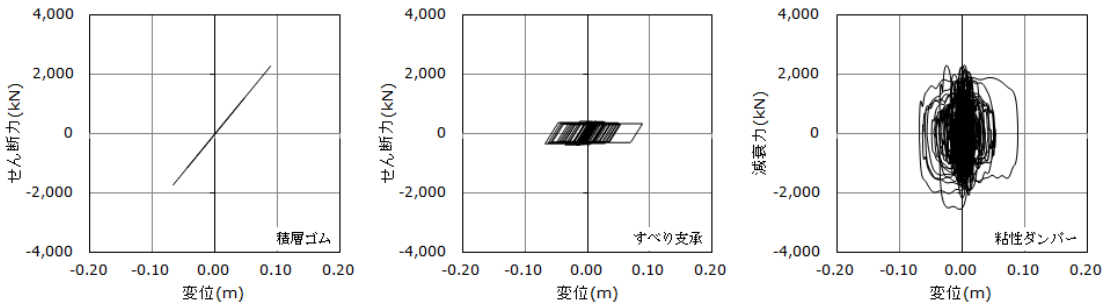
図 1.3.5-44　免震層の荷重変形関係（KGIN・M8.7・1.5 倍入力）



(a)簡易モデル A（μ_{min}、α=0.70、T_0=24.3℃）



(b)簡易モデル B（μ_{max}、α=0.85、T_0=15℃）



(c)詳細モデル（繰り返し依存性考慮）

図 1.3.5-45　免震層の荷重変形関係（KGIN・M9.0・1.0 倍入力）

(3) まとめ

天然ゴム系積層ゴム、弾性すべり支承(低摩擦)および粘性ダンパーの繰り返し依存性の簡易評価モデルの設定法の提案を行い、地震応答解析を実施しその妥当性検証を行った。以下に、本検討のまとめを示す。

1) 弾性すべり支承(低摩擦)をバイリニアモデルにより、粘性ダンパーを材料認定書モデルによってモデル化する簡易モデルの設定法を提案した。簡易モデルは変位を大きめに評価する簡易 A モデルおよび小さめに評価する簡易 B モデルの 2 種の設定法を示した。ここで、弾性すべり支承(低摩擦)においてはバイリニアモデルにおける折れ点を決定する摩擦係数に、粘性ダンパーにおいては繰り返し依存係数αおよび入力温度 T_0 に繰り返し依存性を考慮した値を入力することとした。なお、簡易 A モデルの入力温度 T_0 については、初期温度を用いた解析結果から得られる吸収エネルギーから実験回帰式に基づいて設定することとした。

2) 弾性すべり支承(低摩擦)の摩擦係数に最小値を適用し、粘性ダンパーの繰り返し依存係数αを最小値（0.70）、入力温度 T_0 を換算温度とした簡易 A モデルの各種応答結果は、概ね詳細モデルの結果を安全側に近似した。一方、弾性すべり支承(低摩擦)の摩擦係数に最大値を適用し、粘性ダンパーに繰り返し依存性を考慮しない（α =0.85、T_0=初期温度）簡易 B モデルの応答結果は、詳細モデルよりも応答を全体的に小さ目に評価する傾向となった。

3) 今後の課題として、入力がさらに大きくなった場合の簡易モデルの適用限界の把握、２方向入力による検討、建物をより詳細にモデル化した検討、などが挙げられる。

参考文献

1.3.5-1) 国土交通省：オイレス式弾性すべり支承、 建築材料認定書（認定番号MVBR-0377）別表、2008.6

1.4　まとめ

第Ⅲ部第 2 章および第 3 章に示した繰り返し依存性を考慮できる解析プログラムを用い、長周期地震動に対する 1 質点モデルの応答解析を実施し、繰り返し依存性を簡易的に取り込むための手法を検討した。

各免震部材の繰り返し依存性をどのようにしたら通常使用している設計モデルで評価できるかを検討し、そのまとめと今後の課題は以下の通りである。

(1)まとめ

・鉛プラグ入り積層ゴム

鉛プラグの温度上昇による特性変化を考慮した場合の免震建築物の応答評価を、熱伝導解析と地震応答解析と並行して実施する詳細応答評価法（手法１）、エネルギーの釣り合いを基にした包絡解析法による応答予測評価法（手法２）及び降伏荷重をあらかじめ低減させた一定値により地震応答解析を行う応答評価法（手法３、手法３’）の各手法により実施し、それらの結果を比較した。

免震層の水平変形についてはエネルギーの釣り合いを基にした包絡解析法による応答予測評価法（手法２）での結果が詳細応答評価法（手法１）による結果と比較的良い一致を示しているが、過小評価となっているケースも見られた。免震層の応答層せん断力係数については手法２と降伏荷重をあらかじめ低減させた一定値により地震応答解析を行う応答評価法（手法３）による結果に大きな違いが見られなかった。

降伏荷重の低下率を求める際に用いる鉛プラグ入り積層ゴムの履歴吸収エネルギーについて地震終了時の値を用いる手法３と免震層の水平変形が最大となった時刻における履歴吸収エネルギーを用いる手法３’との評価結果を比較した。免震層の水平変形については手法３’による簡易応答評価法による結果が詳細応答評価法による解析結果と比較的良い一致を示しているが、水平変形が大きい領域では過小評価となるケースも見られた。

・高減衰ゴム系積層ゴム

繰り返し依存性による高減衰ゴム系積層ゴムの特性変動を簡易的に評価する手法として、累積吸収エネルギーの値(解析終了時の 95%値)を基に、高減衰ゴム系積層ゴムの等価剛性および等価減衰定数の低下率を設定した。通常の考慮される免震部材特性のばらつき（製品ばらつき、経年変化、環境温度）に、累積吸収エネルギーによる低下率を加え、地震応答解析を行う方法を示した。

簡易評価による解析結果は、繰り返し依存性を考慮しない解析結果よりも免震層最大変位と免震層の累積変形量を増大させ、繰り返し依存性を時時刻々と考慮する解析結果に近い応答値を与えることを確認した。ただし、簡易評価は繰り返し依存性を時々刻々と考慮する場合の等価剛性と等価減衰定数の低下した値を、解析開始時から一定値として用いるため、免震層変位をやや大きめに評価する結果となった。

・鉛ダンパー

鉛ダンパーの繰り返し依存性を簡易的に評価する方法として、初期から一律にダンパーの降伏耐力を低減する手法を提案した。ダンパーの耐力低減方法として 2 通りの簡易的手法を用い、手法 A は、最大変形と最大変形発生時刻におけるダンパーの累積吸収エネルギーを用いるもの

であり、手法 B は、最大変形と解析終了時におけるダンパーの累積吸収エネルギーを用いるものである。

手法 B により算出された最大変位は、ほとんどのケースにおいて手法 A の結果よりも最大変形は大きく評価されており、繰り返し考慮モデル（精算法）に対して-1%～+19%の差であった。

最大加速度は繰り返し依存考慮モデルの結果に対して AIC003 四連動を除けば 1 割以内の差であり、手法 A、B の大小関係は入力地震動により異った。

ダンパー1 台あたりの累積吸収エネルギーは、手法 A および B ともに繰り返し依存考慮モデルの結果に対して 1 割以内の差となった。簡略的手法は、繰り返し考慮モデルの結果に対して過小評価となる場合があるため、ダンパーの累積吸収エネルギー能力に対する評価において、簡略的手法による解析に基づく場合には、安全率を考慮するなどの配慮が必要である。また手法 A､B で求めた累積変形量は繰り返し考慮モデルによる結果に対して 2 割以内の差となった。

簡略法手法 A による解析結果から算出した疲労損傷度は、繰り返し考慮モデルに対して 2 割以下損傷度を小さく評価する場合があった。一方、手法 B は繰り返し考慮モデルよりも大きな値として累積損傷度を評価し、その差は 18%未満であった。

本検討で提案した２つの簡略法のうち、ダンパーの変形量を最大変形時、ダンパーの累積吸収エネルギーは解析終了時におけるダンパーの累積吸収エネルギーとして、降伏耐力を低減する方法（手法 B）を用いた方が、ダンパーの最大変形量ならびに累積損傷度を繰り返し考慮モデルよりも大きな値として評価し、安全側の評価となることがわかった。

・弾性すべり支承（高摩擦）

既往の設計モデル(基準摩擦係数 μ o)に対して、繰り返し挙動に伴う摩擦係数の低下により応答変形が増大する傾向がある。累積すべり変位と摩擦係数の関係式を用いて、設計モデルにおける最大変形時における累積すべり変位から、摩擦係数を簡易的に評価した。その結果、累積すべり変位による摩擦係数の低減による免震層の最大応答変位と設計モデルにおける最大応答変位は概ね一致し、簡易評価方法の妥当性を確認した。

・弾性すべり支承（低摩擦）＋粘性ダンパー

弾性すべり支承(低摩擦)をバイリニアモデルにより、粘性ダンパーを免震材料認定に基づく値を用いてモデル化する簡易モデルの設定法を提案した。簡易モデルは変位を大きめに評価する簡易 A モデルおよび小さめに評価する簡易 B モデルの 2 種の設定法を示した。ここで、弾性すべり支承(低摩擦)においてはバイリニアモデルにおける折れ点を決定する摩擦係数に、粘性ダンパーにおいては繰り返し依存係数 α および入力温度 T_0 に繰り返し依存性を考慮した値を入力した。なお、簡易 A モデルの入力温度 T_0 については、初期温度を用いた解析結果から得られる吸収エネルギーから実験回帰式に基づいて設定した。

弾性すべり支承(低摩擦)の摩擦係数に最小値を適用し、粘性ダンパーの繰り返し依存係数 α を最小値（0.70）、入力温度 T_0 を換算温度とした簡易 A モデルの各種応答結果は、概ね詳細モデルの結果を安全側に近似する結果となった。一方、弾性すべり支承(低摩擦)の摩擦係数に最大値を適用し、粘性ダンパーに繰り返し依存性を考慮しない（α =0.85、T_0=初期温度）簡易 B モデルの応答結果は、詳細モデルよりも応答を全体的に小さ目に評価する傾向となった

(2)今後の課題

・鉛プラグ入り積層ゴム

本検討で示した簡易応答評価法（手法２、手法３及び手法３’）による応答評価結果は、詳細応答評価法による応答評価結果と良い一致を示すケースもあるが、地震動の特性によっては過大、過小評価するケースも見られた。簡易応答評価法の適用については解析対象の免震システムと入力地震動の関係によっては応答評価精度が異なる可能性があるため注意が必要である。

・高減衰ゴム系積層ゴム

本検討で用いた長周期地震時に予想される高減衰ゴム系積層ゴムの繰り返しによる特性変動は、等価剛性で－5%～－10%程度、等価減衰定数で－5%程度と比較的小さいことから、繰り返しによる影響に比べて、通常の設計で考慮される免震部材特性のばらつき値(製品ばらつき、経年変化、環境温度)が建物応答に大きく影響する可能性が高い。今後は通常のばらつき値の大きさと比較することにより、繰り返し依存性の影響を確認していく必要がある。

・鉛ダンパー

本検討では、四連動 AIC003 を除いた入力地震動に対する免震層の最大変位は 43cm 以下、ダンパーの破断に対する累積損傷値は 25%以下となり、免震部材の破断の可能性は少ないと考えられる。ただし、四連動 AIC003 の場合には、最大変位が 70cm を超える結果となった。本検討で用いた解析モデルは、積層ゴムを線形弾性と仮定しており、40～50cm 以上の水平変形時から生じるハードニング挙動を模擬できていないため、最大応答値の評価に注意を要する。より高精度な評価とするためには、積層ゴムの非線形挙動も模擬しうるモデルを用いて評価する必要がある。

・弾性すべり支承（高摩擦）

本検討においては、建物モデルとして固有周期、せん断力係数を 1 ケース仮定し、入力地震動としても 4 種類という条件下において、簡易評価をまとめたものである。今後の課題としては、周期・せん断力係数・入力地震動のケースを増やし、簡易評価方法の精度を確認する必要がある。

・弾性すべり支承（低摩擦）＋粘性ダンパー

今後の課題として、入力がさらに大きくなった場合の簡易モデルの適用限界の把握、２方向入力による検討､建屋を詳細モデルとした地震応答解析による応答の評価､などが挙げられる。

また、今回の検討は 1 質点の剛体モデルにより実施したが、今後は多質点モデルによる検討を追加し、高層建物応答への影響についても確認する必要がある。

第Ⅶ部

免震建築物の地震観測と公表観測記録の整理・分析

第1章　免震建築物の地震観測

1.1 目的

長周期地震動の発生が予想される地点（東京・大阪）に建設されている免震建築物をそれぞれ１棟選定し、建物及びその周辺地盤に計測機等を設置して、長周期地震動が免震建築物の応答に及ぼす影響を把握することを目的とする。

1.2　免震建築物の地震観測体制

(1)　共通事項

1) センサー諸元

加速度計、相対変位計の概要を以下に示す。

a) 加速度計(建屋)

製造	（株）東京測振
品名・形式	サーボ型加速度計　VS-355T
測定周波数	DC ～ 250 Hz（±3dB）
測定範囲(加速度)	±2000 gal,、±10V
感度(加速度)	5mV / gal
出力抵抗	100Ω
分解能(加速度)	フルスケールの 0.001％
直線性	フルスケールの 0.003％
ダンピング	ｈ＝0.6 ～0.7
ケースアライメント	誤差± 1 度以内
出力ノイズ	5 mV rms
横感度	0.003G / G 以下
最大出力電圧	±11 V
供給電源	±15 V（DC）
消費電流	約 10mA
動作温度	－20 ℃ ～＋70 ℃

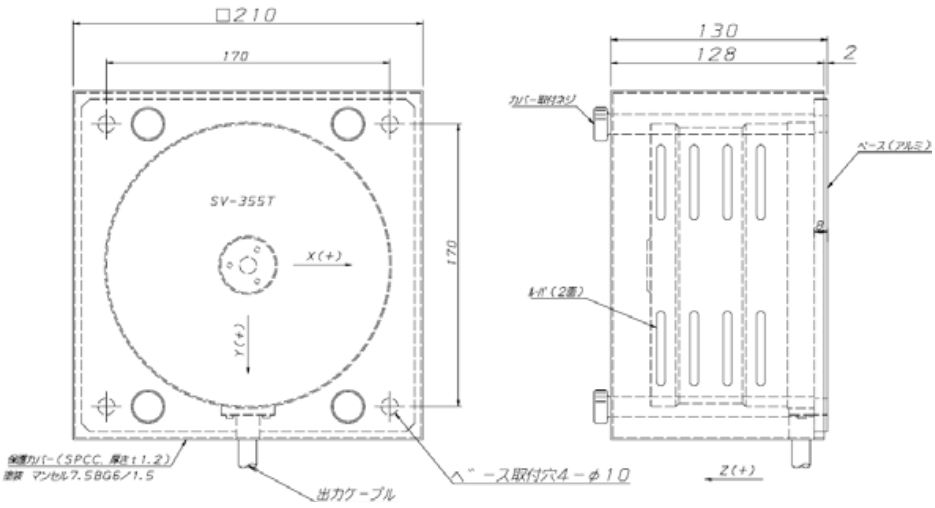


図 1.2-1 サーボ型加速度計(VS-355T)

b) 加速度計(地表用)

製造	（株）東京測振
品名・形式	サーボ型加速度計 AS-303D3BH
測定周波数	DC ～ 250 Hz（±3dB）
測定範囲(加速度)	±2000 gal　　±10V
感度(加速度)	5mV / gal
出 力　抵　抗	100Ω
分解能(加速度)	フルスケールの 0.001％
直線性	フルスケールの 0.003％
ダンピング	ｈ＝0.6 ～　0.7
ケースアライメント	誤差± 1 度以内
出力ノイズ	5 mV rms
横感度	0.003G / G 以下
最大出力電圧	±11 V
供給電源	±15 V（DC）
消費電流	約 10mA
動作温度	－20 ℃ ～＋70 ℃

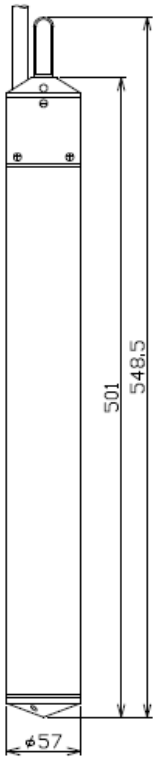


図 1.2-2 サーボ型加速度計(AS-303D3BH)

c) 相対変位計

製造	（株）東京測振
品名・型式	回転角付変位計　DPR-600A
感度	
	移動距離　0.016 V/mm
	回転角　0.067 V/度
最大測定範囲	
	変位　±625mm
	回転角
	方位±40 度、仰角±10 度
分解能	
	変位 0.25mm
	回転角　0.05 度
最大応答速度	変位 250 mm/sec　(max)
	回転角　720 度/sec　(max)
温度範囲	-20℃～+60℃
供給電圧	DC±15V (上記感度はこの供給電圧の場合)

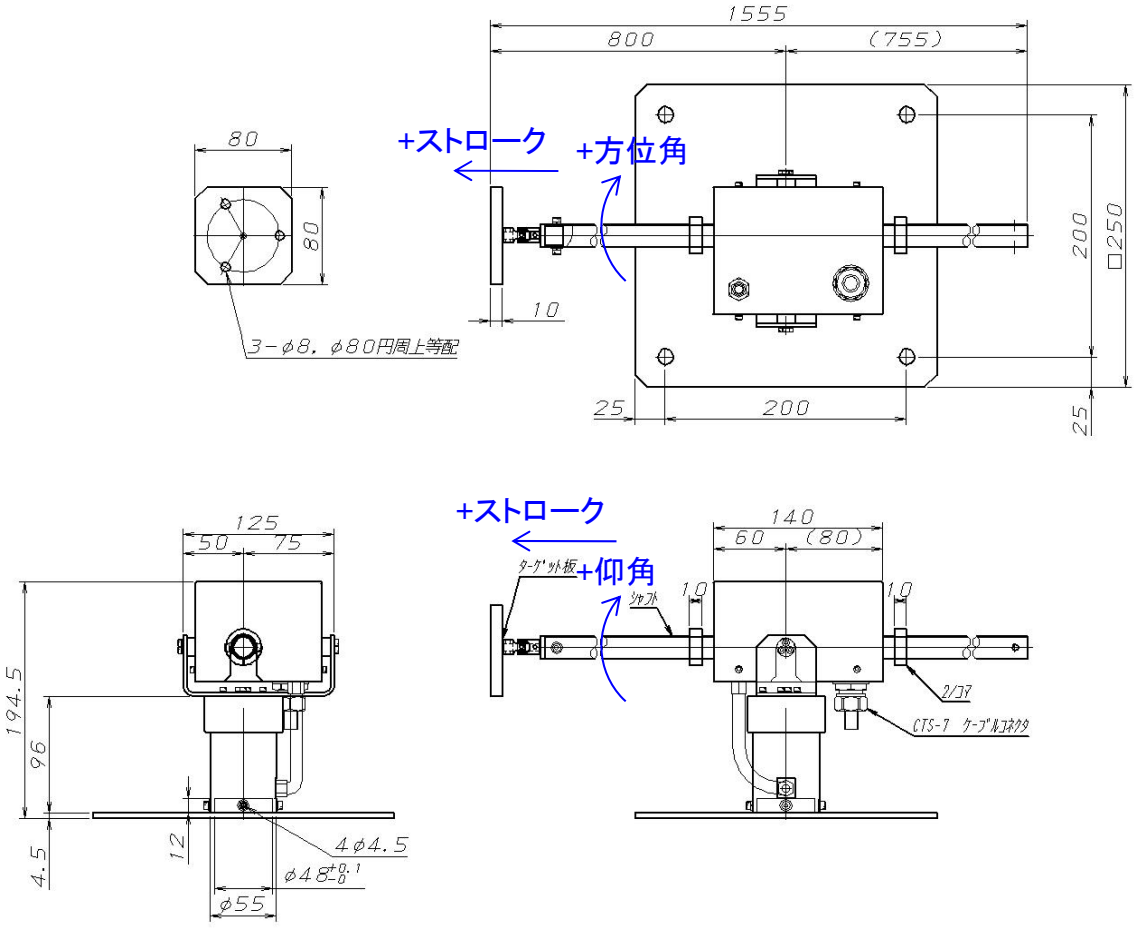


図 1.2-3 相対変位計(AS-303D3BH)

2) 収録装置諸元

収録装置の機器一覧を表1.2-1に示す。

収録を開始するトリガーはいずれかの計測位置で加速度の1秒間のr.m.s.が2cm/s^{2}を越えた場合と設定している。

表1.2-1　収録装置の機器一覧

機器名称	型式	メーカー名
①計測用ＰＣ	2Uラックマウント PC Core2 2.13 GHz SSD A/D NI PCI-6224 (32ch 16bit)	ミスミ National Instruments
②ディスプレイ	QT-1003B-AVG	クイックサン
③キーボード	MINI KEYBOARD III	Plat’Home
④HUB	LSW-TX-8NP	BUFFALO
⑤プリンタ	POCKET BOOK Si	ペンタックス
⑥無停電電源装置	UPS1010SS	ユカタ電機製作所
⑦LAN制御電源タップ	WATCH BOOT L-zero	明京電機
⑧センサフィルタ・アンプ	SCC-16	東京測振(幸和電子)
⑨センサ端子BOX	SCC-16-BOX	東京測振(幸和電子)

(2) 観測建物概要

1) A建物(大阪地区)

a) 建物概要

本建物の概要を以下に示す。建物の所在地を図1.2-4に示す。

所在地　：大阪府大阪市中央区

竣　工　：平成20年3月（耐震改修による免震構造、元建物は昭和34年竣工）

構　造　：鉄骨鉄筋コンクリート造、地下1階、地上8階、塔屋2階
地下1階柱頭免震構造(耐震改修による)

基礎形式：直接基礎

免震装置：ＲＢ55台、直動転がり55台

高さ　　：28.550m

延床面積：24,226m^2

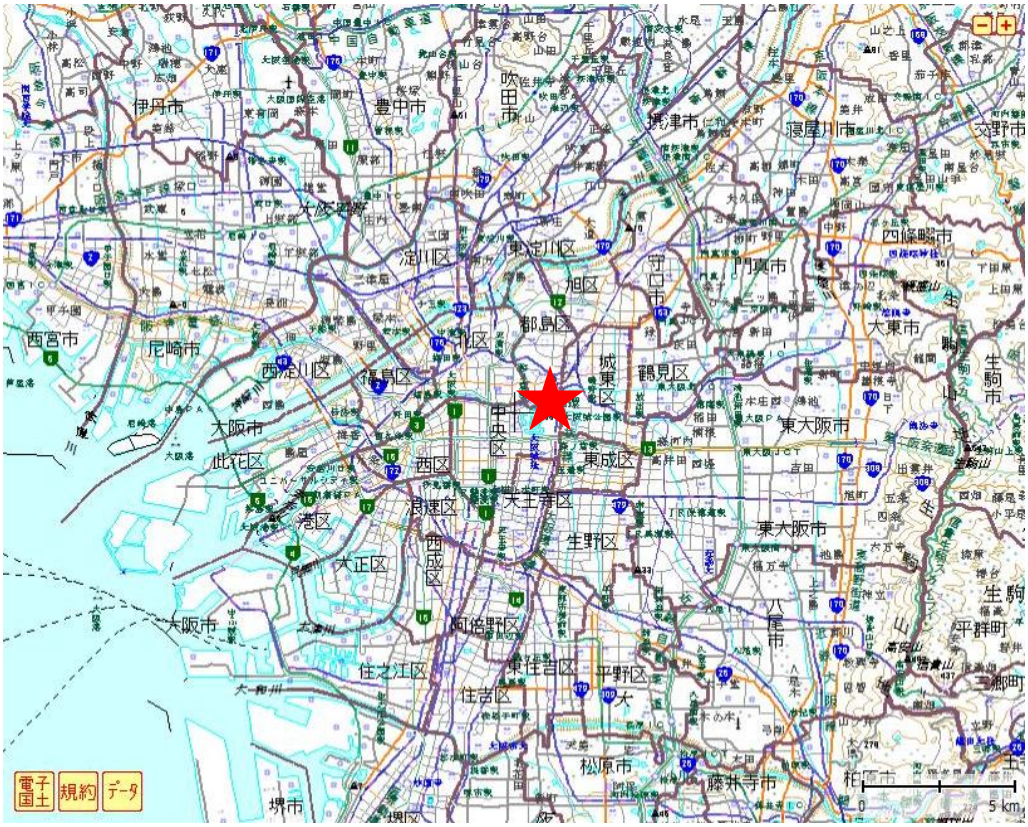


図1.2-4 建物所在地

b) 機器・設置箇所

観測は、加速度計を地表面・地下1階・1階・8階の4箇所に設置し、相対変位計を地下1階免震層に設置した。図1.2-5に観測機器の概要を、図1.2-6～9に設置位置を示す。図1.2-10～15に設置状況の写真を示す。

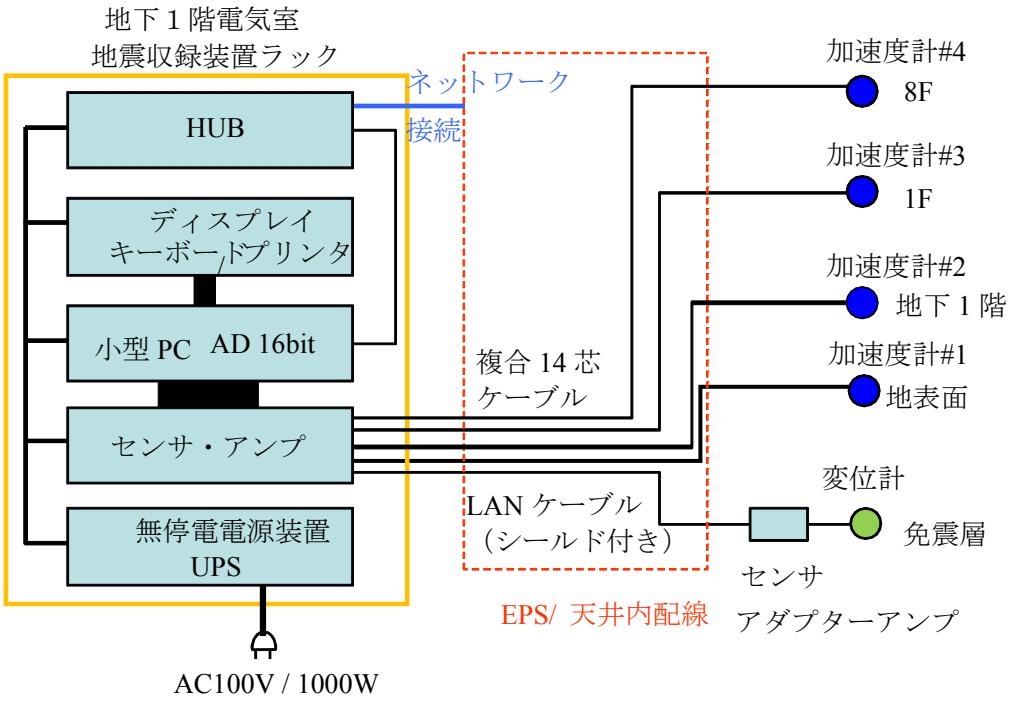


図1.2-5 観測機器概要

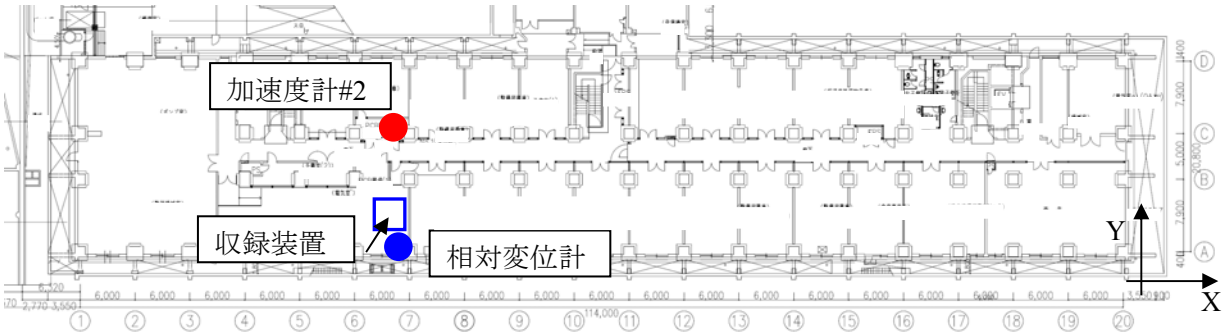


図1.2-6 地震計位置(地下1階)

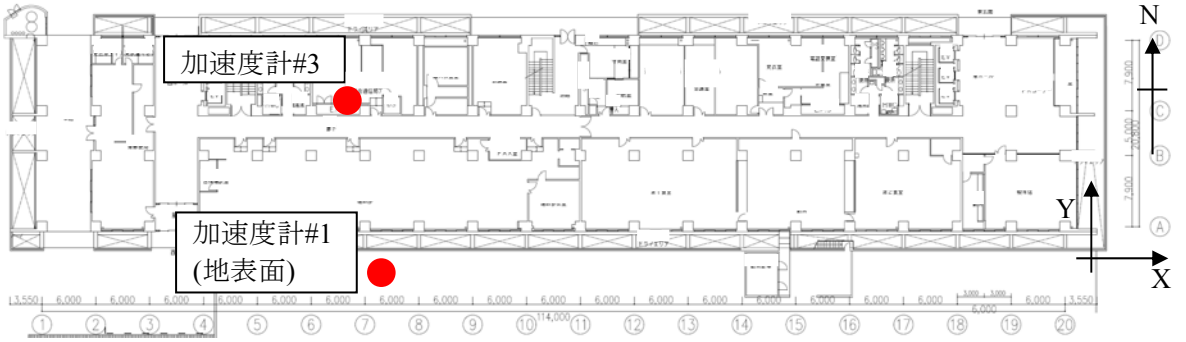


図1.2-7 地震計位置(1階および地表)

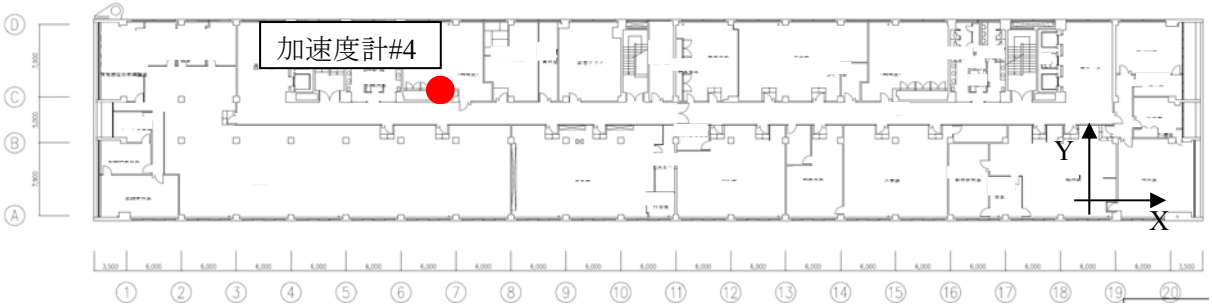


図1.2-8 地震計位置(8階)

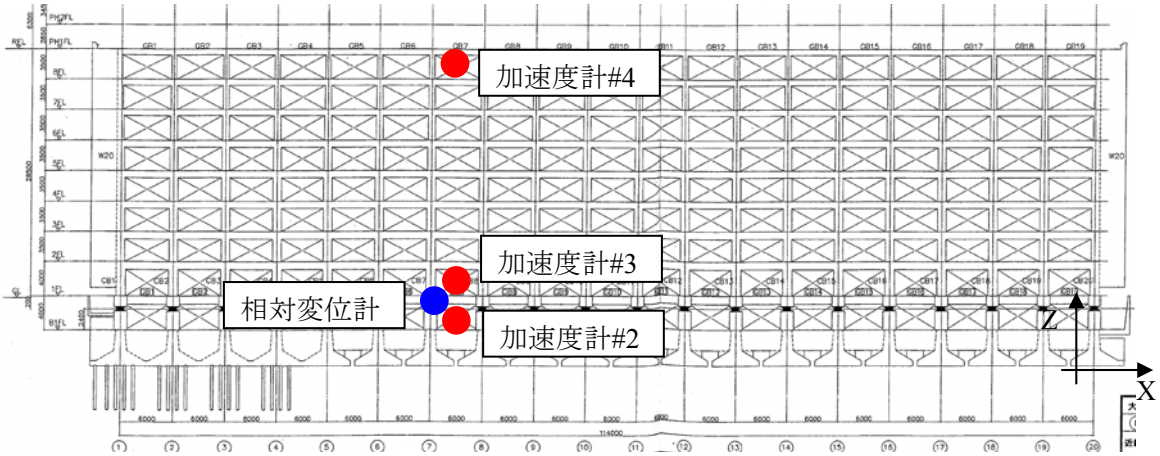


図1.2-9 地震計位置(断面図)

図1.2-10 収録装置(地下1階電気室)

図1.2-11 加速度計#4(8階EPS)

図1.2-12 加速度計#3(1階EPS)

図1.2-13 加速度計#2(地下1階EPS)

図1.2-14 加速度計#1(地盤GL-1.3m)

図 1.2-15 相対変位計(地下 1 階)

2) B建物(東京地区)

a) 建物概要

本建物の概要を以下に示す。建物の所在地を図1.2-16に示す。

所在地　：東京都江東区

竣　工　：2011年2月

構　造　：ＲＣ造、免震構造（3-4階間に免震層）、

基礎形式：杭基礎（場所打ちコンクリート拡底杭）

免震装置：鉛プラグ入り積層ゴム40台、天然ゴム系積層ゴム11台

用　途　：共同住宅・駐車場

敷地面積：7,380m^2

建築面積：3448m^2

延床面積：51,856m^2

軒　高　：114m

最高高さ：123m

階　数　：地下なし、地上36 階、塔屋1階

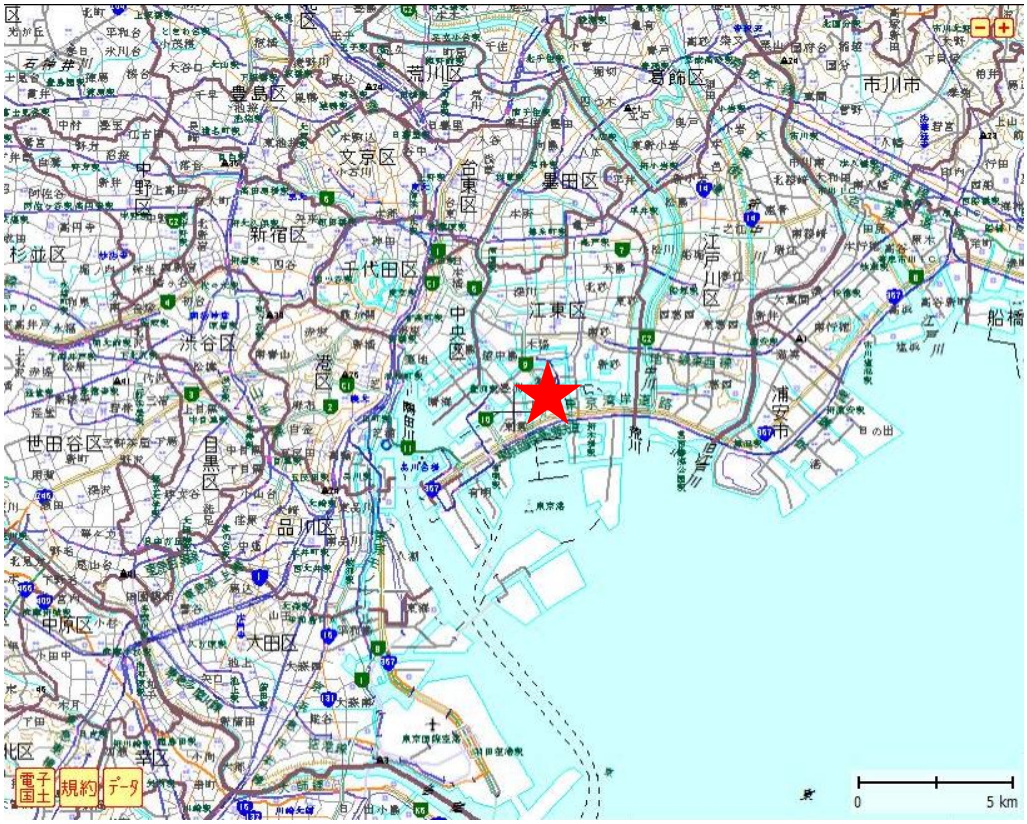


図 1.2-16 建物外観図

b) 機器・設置箇所

観測は、加速度計を地表面・1階・3階・4階・20階(*)・36階の6箇所に設置し、相対変位計を免震ピット階(3階～4階間)に設置した。図1.2-17に観測機器の概要、図1.2-18～20に設置位置の概要を示す。　((*)：20階は2012年3月17日から観測開始)

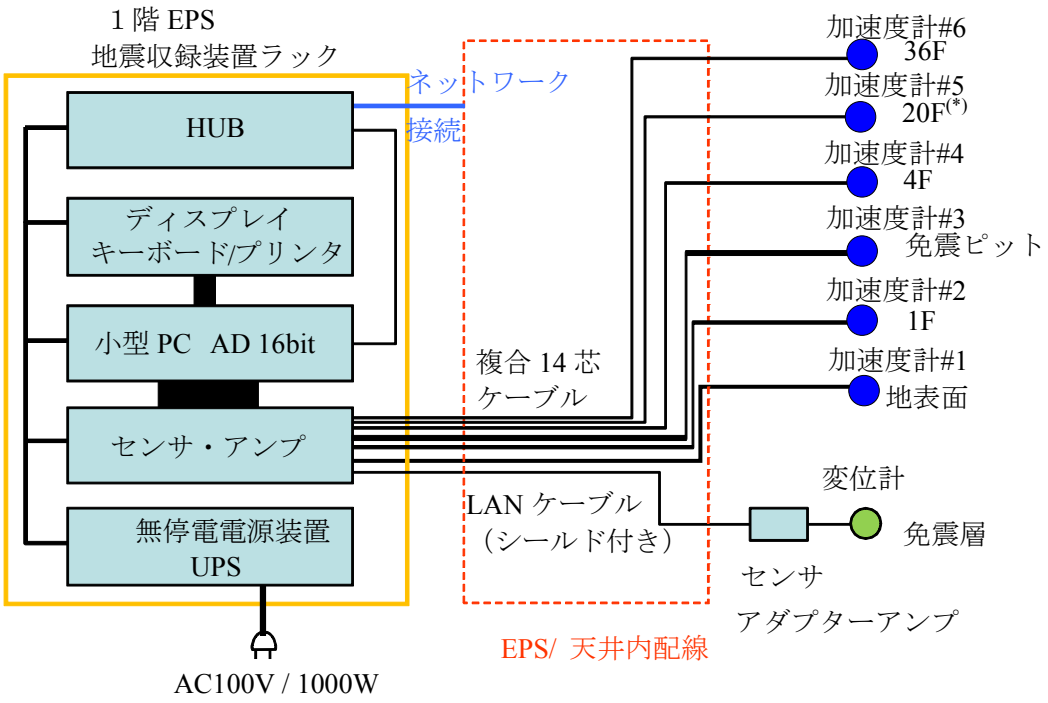


図1.2-17 観測機器概要

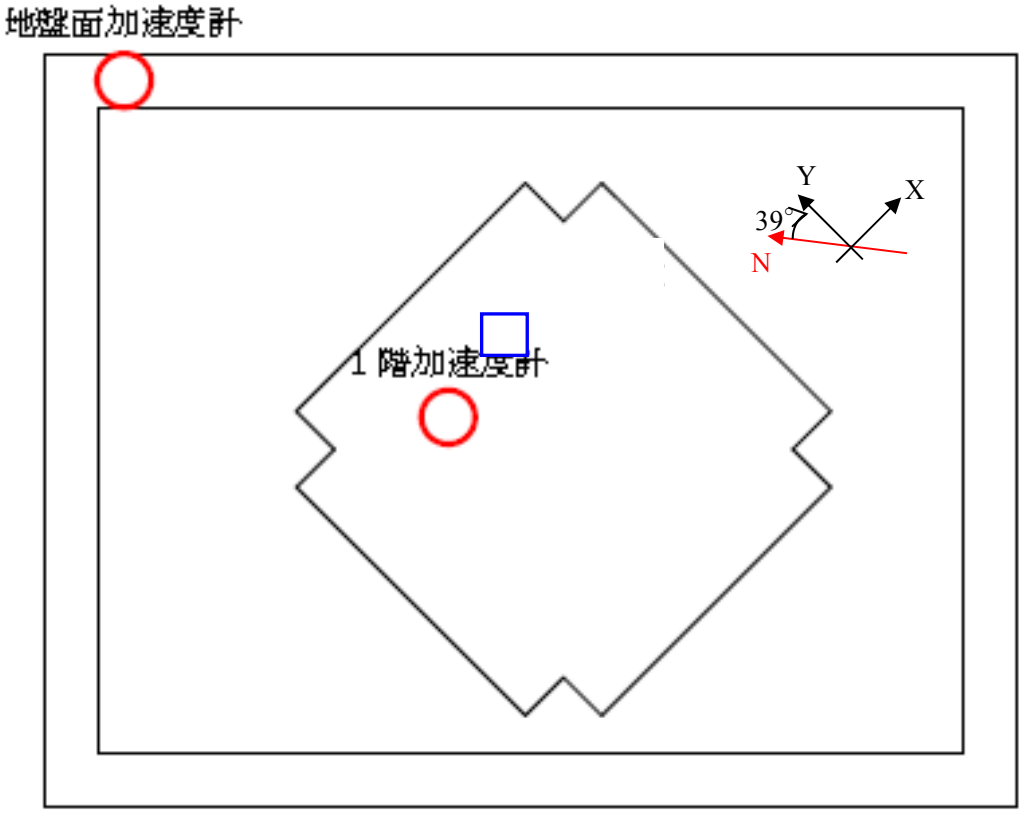


図1.2-18 地震計位置(1階および地盤)

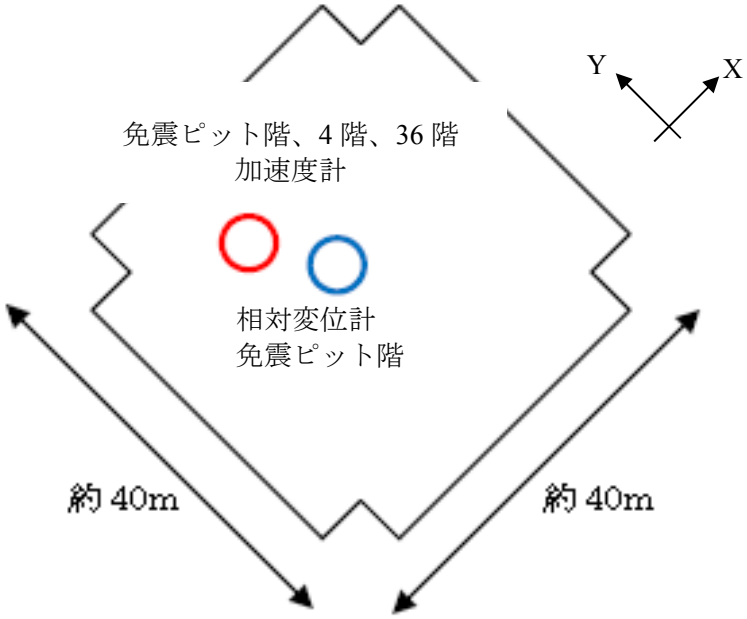


図1.2-19 地震計位置(免震ピット階および4階、36階)

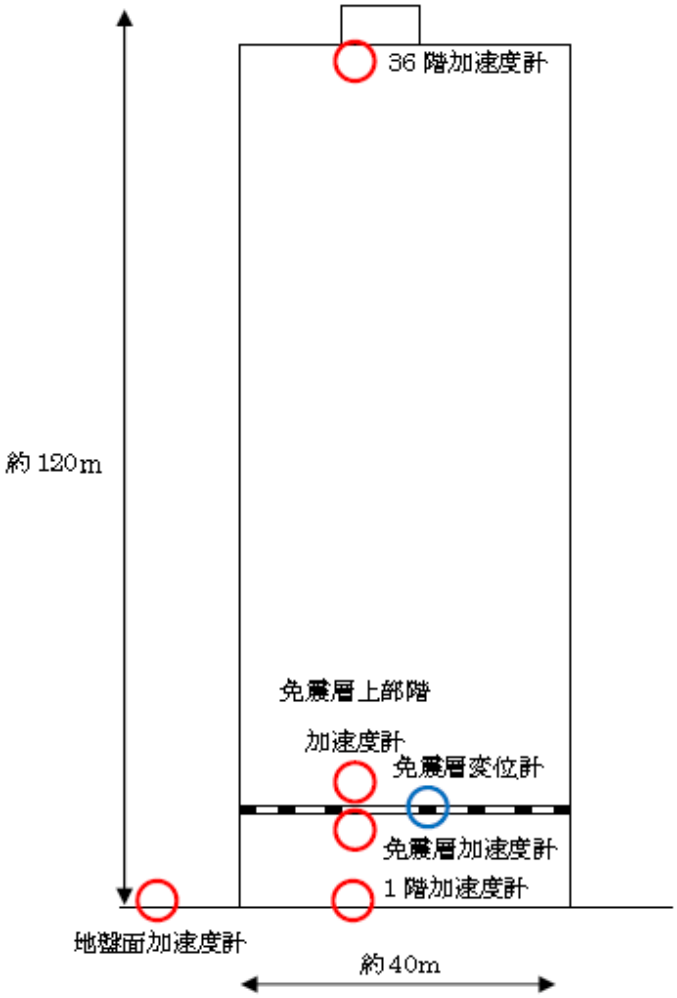


図1.2-20 地震計位置(断面図)

図1.2-21 収録装置(1階EPS)

図1.2-22 加速度計#2(1階EPS)

図1.2-23 加速度計#3(免震ピット階)

図1.2-24 加速度計#4(4階EPS)

図 1.2-25 加速度計#5(36 階 EPS)

図 1.2-26 加速度計#1(地表面 GL-1.5m)

図 1.2-27 相対変位計(免震ピット階)

1.3　観測免震建築物の地震観測記録の分析とシミュレーション解析

1.3.1　観測記録の整理

１）A 建物（大阪地区）

（1）観測記録リスト

2011年2月に設置後2013年2月までに、トリガーした観測リストを表1.3.1-1に示す。2012年度に新たに観測された記録はなかった。震源の位置を図1.3.1-1のマップに示す。

表1.3.1-1 観測リスト

観測日時		地表面計測震度	発震時　震源情報									震央距離	震源距離
			日時	緯度		経度		深さ	M	震央地名	最大震度		
				(度	分)	(度	分)	(km)				(km)	(km)
2011/03/11	14:49:34	3.0	2011/03/11 14:46:00	38	0.0	142	54.0	10	7.9	三陸沖	7	757	757
2011/03/11	15:18:10	2.3	2011/03/11 15:15:00	36	0.0	141	12.0	80	7.4	茨城県沖	6弱	536	542
2011/03/15	22:32:59	1.2	2011/03/15 22:31:00	35	18.0	138	42.0	10	6.0	静岡県東部	6強	298	298
2011/07/05	19:18:42	1.2	2011/07/05 19:34:56	33	59.7	135	14.5	7	4.5	和歌山県北部	4	81	82
2011/10/09	16:18:02	1.5	2011/10/09 16:18:26	34	30.2	135	29.4	12	3.9	大阪府南部	3	21	24

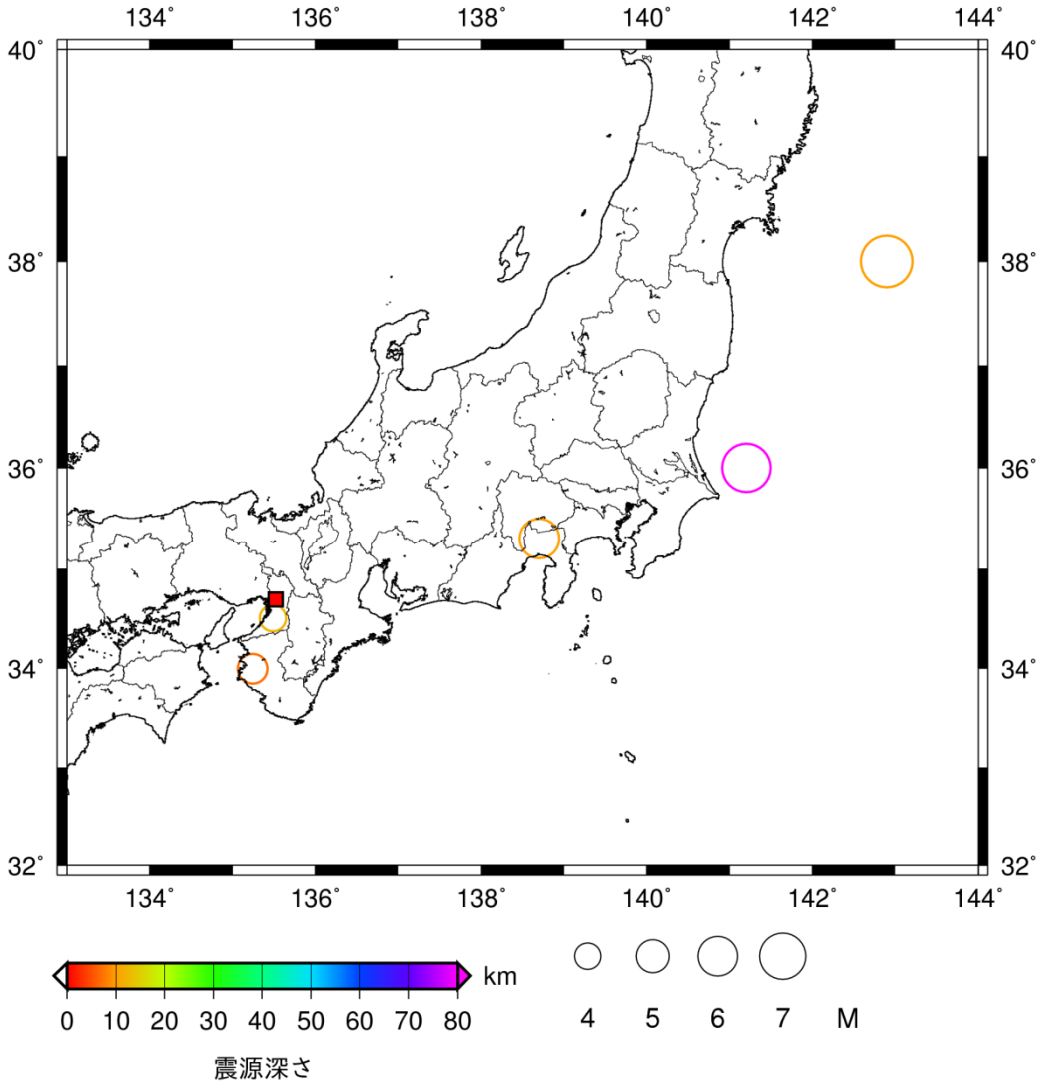


図1.3.1-1 震源マップ

(2) 観測記録の整理・分析

2011 年 3 月 11 日東北地方太平洋沖地震における観測記録について，加速度時刻歴波形を図 1.3.1-2～4 に，免震層の相対変位計の時刻歴波形を図 1.3.1-5 に示す。また、各測定位置の加速度最大値を表 1.3.1-2 に示す。

相対変位波形を見ると、2mm 程度の動きがあるが、免震構造としての機能は発揮されていないものの、上層での増幅もほとんど見られない。

地盤の擬似速度応答スペクトル（h=5%）を図 1.3.1-6 に示す。X 方向で 4.75 秒、Y 方向で 2.5 秒付近にピークが見られる。

1 階および 8 階の地下 1 階に対する伝達関数を、図 1.3.1-7 に示す。1 次の固有振動数は、X・Y 方向とも約 1.6Hz となっている。

表 1.3.1-2 加速度最大値　(cm/s^2)

位置	X	Y	Z
8F	10.5	13.3	4.4
1F	10.1	12.8	4.3
B1F	9.2	11.2	4.3
GL	9.5	10.7	4.7

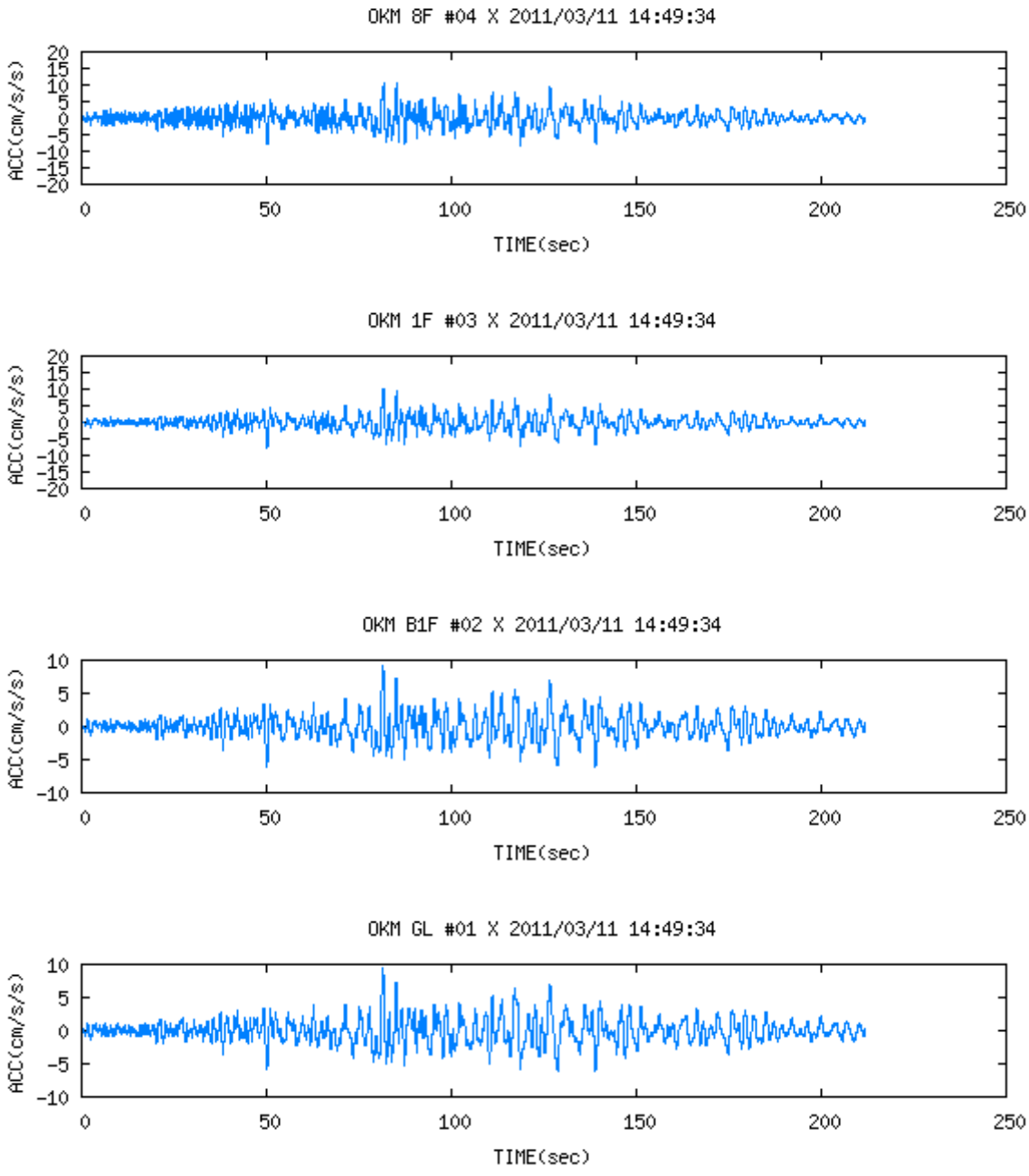


図 1.3.1-2 加速度時刻歴波形（X 方向）

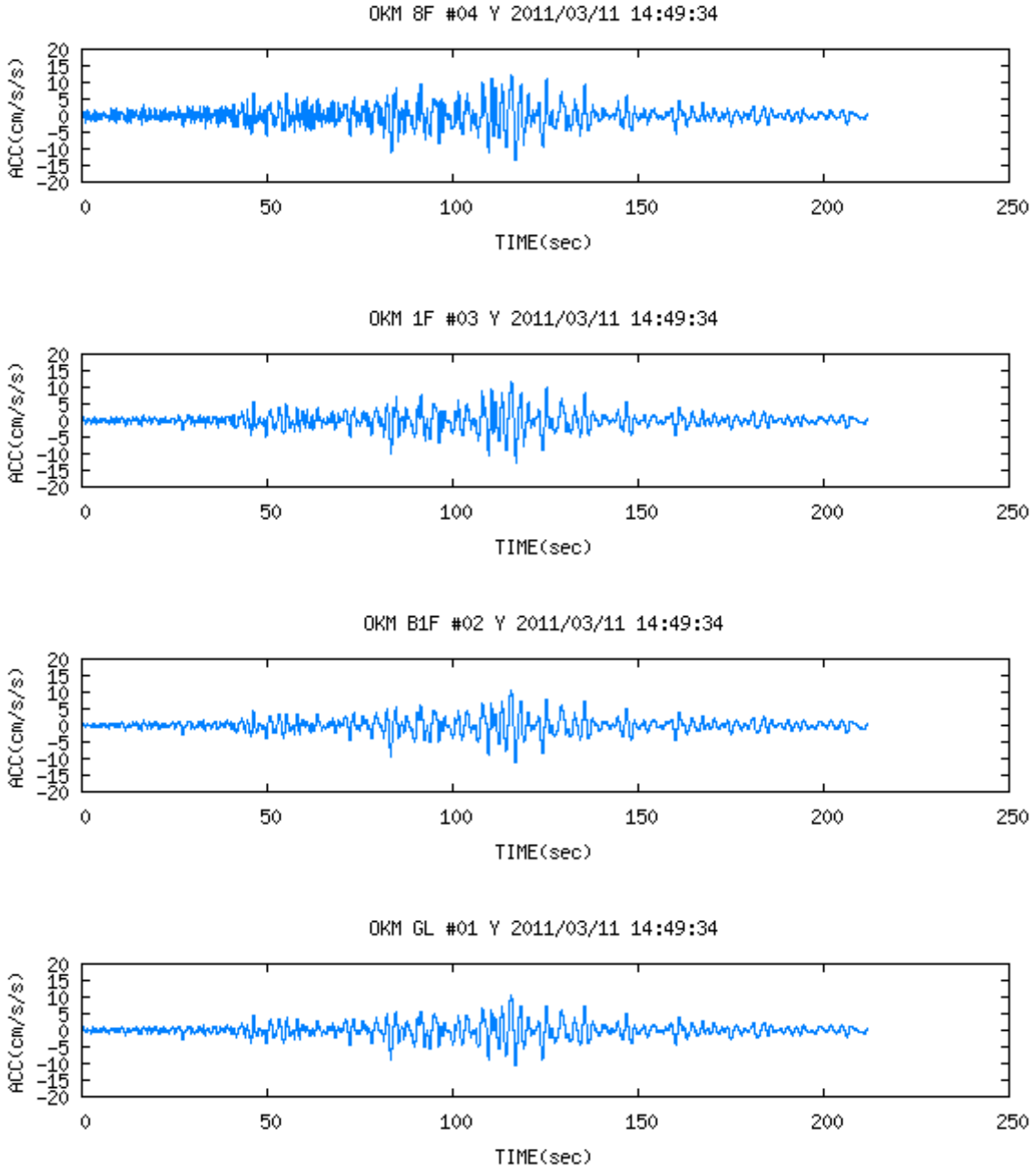


図 1.3.1-3 加速度時刻歴波形（Y 方向）

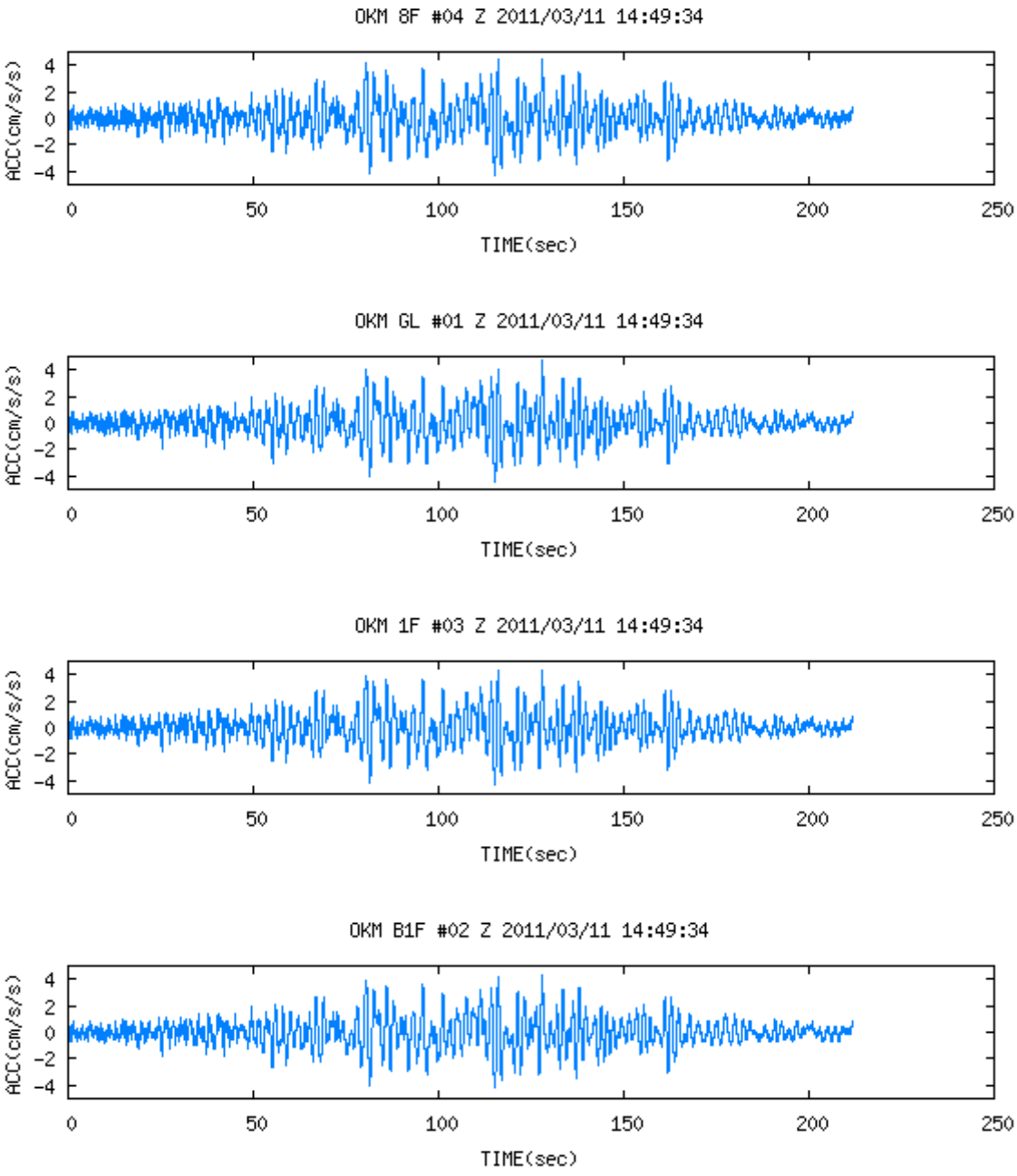


図 1.3.1-4 加速度時刻歴波形（上下方向）

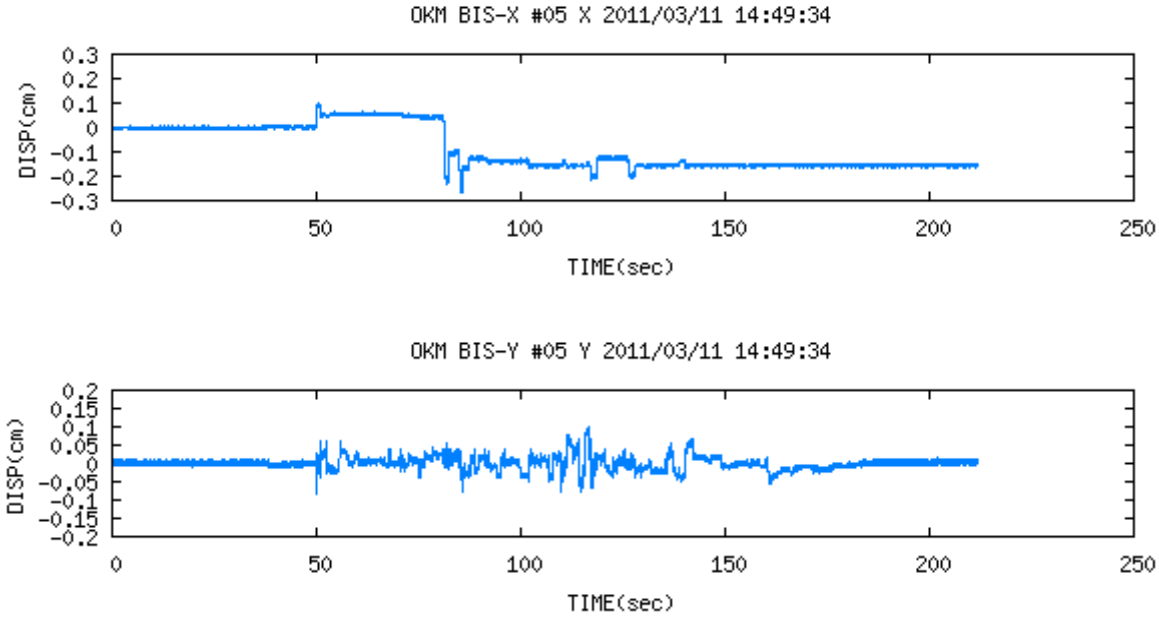


図 1.3.1-5 相対変位時刻歴波形（免震層）

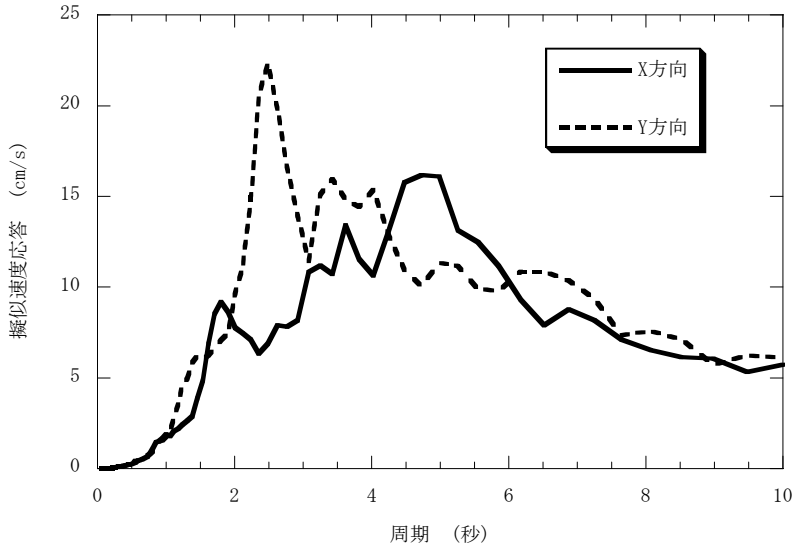
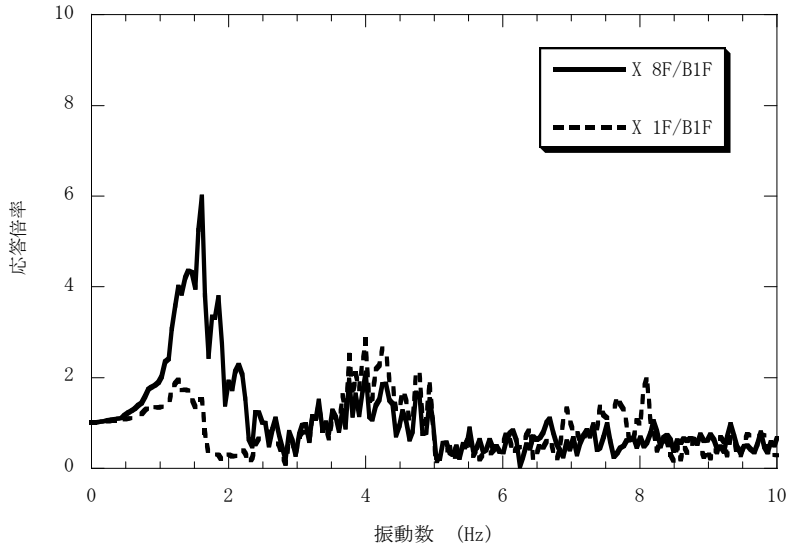


図 1.3.1-6 擬似速度応答スペクトル（地盤）



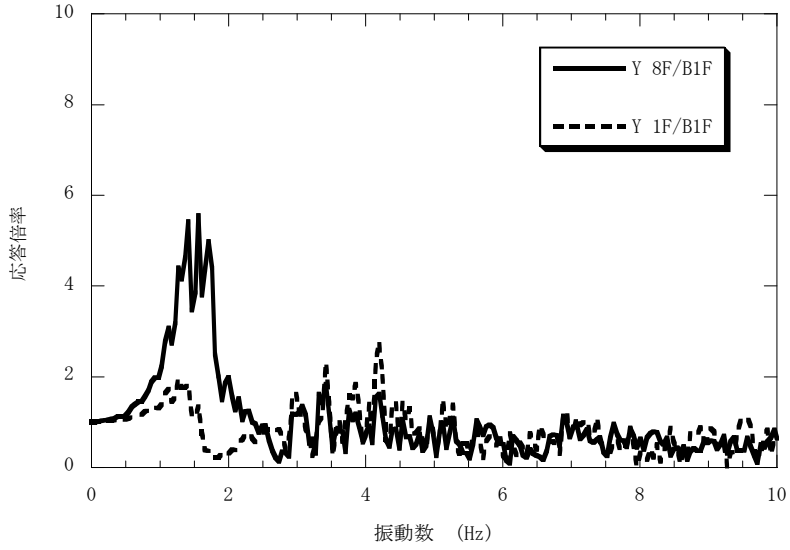


図 1.3.1-7 伝達関数（8F／B1F, 1F／B1F）

２）B 建物（東京地区）

(1) 観測記録リスト

東京の建物では、2010年度85件、2011年度87件、2012年度29件、計201件の観測記録が得られ、免震構造としての効果が確認された。2011年3月から2013年2月末までの観測リストのうち，1階での計測震度が2以上のものを表1.3.1-3に示す．表中赤枠部は、1階での計測震度が3以上のものである。また、震源の位置を図1.3.1-8のマップに示す。

注1)　2011年9月20日までのＧＬの記録の内、ＹおよびＺ成分は、アンプの設定が悪かったために、正規の記録が観測されなかった。9月21日以降は、正規の値として記録されている。

注2)　2012年3月17日以降の観測記録は、20階の記録が追加されている。

表1.3.1-3 観測リスト

観測日時		1階	免震層変位		発震時　震源情報								震央距離 (km)	震源距離 (km)	枝川・東陽町震度
		計測震度	X(cm)	Y(cm)	日時	緯度		経度		深さ	M	震央	最大震度			
2011/03/09	11:46:54	2.1	-0.255	-0.24	2011/3/9_11:45:12.9	38	19.7	143	16.7	8	7.3	三陸沖	5弱	430	430	江東区枝川 - 震度3，東陽 - 震度2
2011/03/11	14:47:14	4.8	-14.56	-13.22	2011/3/11_14:46:18.1	38	6.2	142	51.6	24	9.0	三陸沖	7	386	387	江東区枝川，東陽 - 震度5強
2011/03/11	15:14:37	4.4	3.29	-8.99	2011/3/11_15:15:34.4	36	6.5	141	15.9	43	7.6	茨城県沖	6強	142	148	江東区東陽 - 震度4
2011/03/11	15:26:06	2.3	-0.18	0.28	2011/3/11_15:25:44.4	37	50.2	144	53.6	34	7.5	三陸沖	4	515	516	江東区東陽 - 震度3
2011/03/14	10:02:49	2.5	0.25	-0.15	2011/3/14_10:02:38.7	36	27.5	141	7.5	32	6.2	茨城県沖	5弱	149	153	江東区枝川，東陽 - 震度3
2011/03/15	22:31:48	2.7	0.28	0.31	2011/3/15_22:31:46.3	35	18.5	138	42.8	14	6.4	静岡県東部	6強	106	107	江東区枝川，東陽 - 震度3
2011/03/16	12:52:02	2.5	-0.29	-0.18	2011/3/16_12:52:2.7	35	50.2	140	54.3	10	6.1	千葉県東方沖	5弱	102	102	江東区枝川，東陽 - 震度3
2011/03/19	18:57:10	2.5	0.24	0.11	2011/3/19_18:56:48.0	36	47	140	34.2	5	6.1	茨城県北部	5強	144	144	江東区枝川，東陽 - 震度3
2011/04/11	17:16:26	3.3	-0.55	-0.75	2011/4/11_17:16:12.0	36	56.7	140	40.3	6	7.0	福島県浜通り	6弱	164	164	江東区枝川 - 震度4，東陽 - 震度3
2011/04/12	8:08:19	2.9	-0.28	-0.49	2011/4/12_08:08:15.8	35	28.9	140	52.0	26	6.4	千葉県東方沖	5弱	98	102	江東区枝川，東陽 - 震度3
2011/04/16	11:19:29	2.7	-0.24	-0.13	2011/4/16_11:19:31.6	36	20.4	139	56.7	79	5.9	茨城県南部	5強	78	111	江東区枝川，東陽 - 震度3
2011/04/21	22:37:00	2.4	-0.2	0.13	2011/4/21_22:37:2.1	35	40.5	140	41.1	46	6.0	千葉県東方沖	5弱	80	92	江東区枝川，東陽 - 震度3
2011/07/15	21:01:07	2.8	-0.31	-0.17	2011/7/15_21:01:10.8	36	9.8	140	5.0	66	5.4	茨城県南部	5弱	63	91	江東区枝川 ，東陽 - 震度3
2012/01/01	14:29:40	2.7	-0.16	0.025	2012/1/1_14:27:52.0	31	25.6	138	33.9	397	7.0	鳥島近海	4	484	626	江東区枝川，東陽 - 震度3
2012/05/29	1:36:42	2.6	-0.12	-0.13	2012/05/29_01:36:47.1	35	48.3	140	5.2	64	5.2	千葉県北東部	4	31	71	江東区東陽 - 震度3
2012/11/24	17:59:38	2.5	0.17	-0.04	2012/11/24 17:59:47	35	38.2	140	1	72	4.8	東京湾	4	19	75	江東区東陽 - 震度3
2012/12/07	17:19:13	3.2	0.39	0.59	2012/12/07 17:18:30	38	1.1	143	52	49	7.3	三陸沖	5弱	448	451	江東区東陽 - 震度3

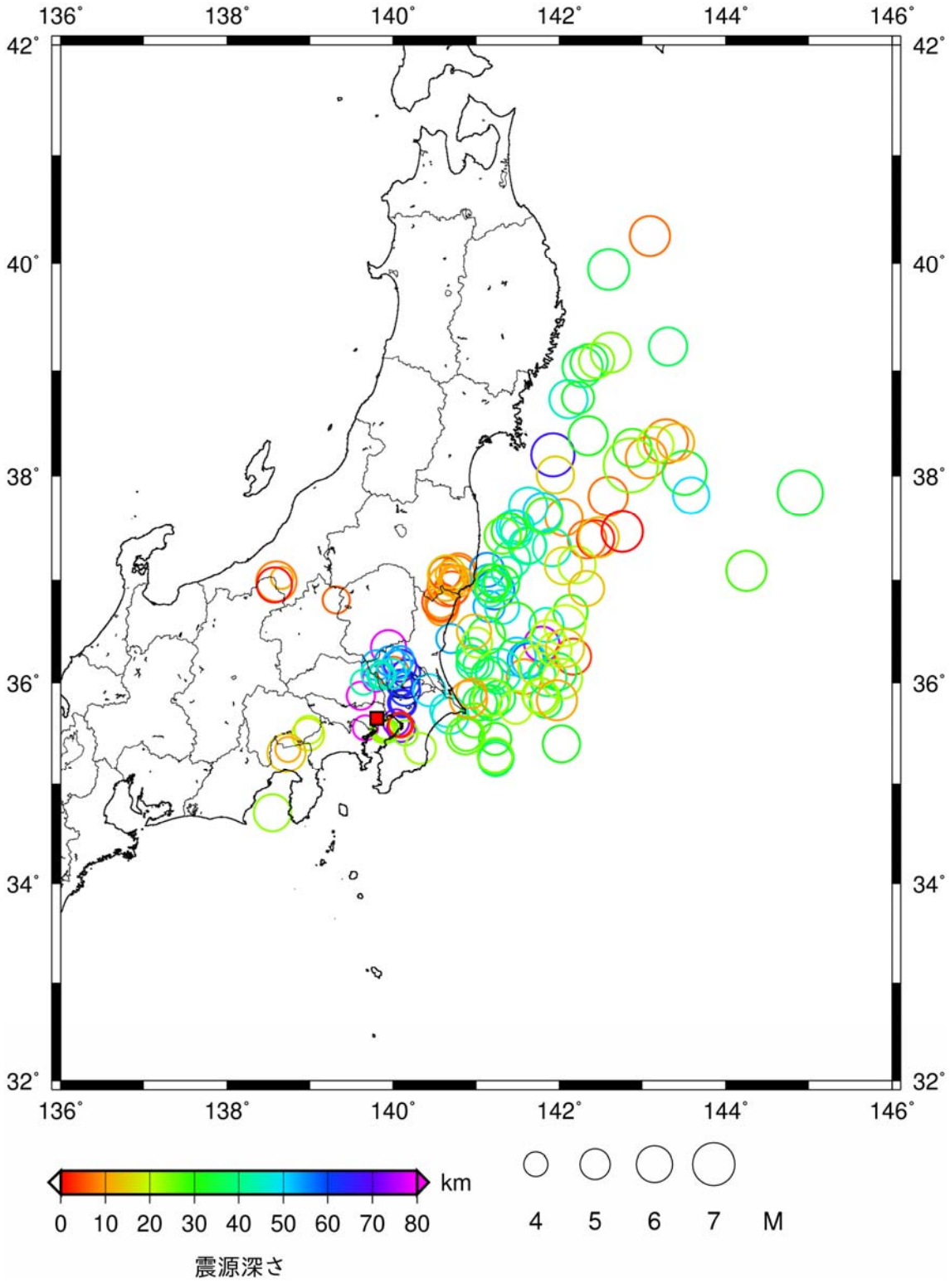


図1.3.1-8 震源マップ　注)　2012/1/1　鳥島近海は除く

(3) 観測記録の整理・分析

観測リストの地震について、加速度の最大値を図 1.3.1-9～11 に示す。

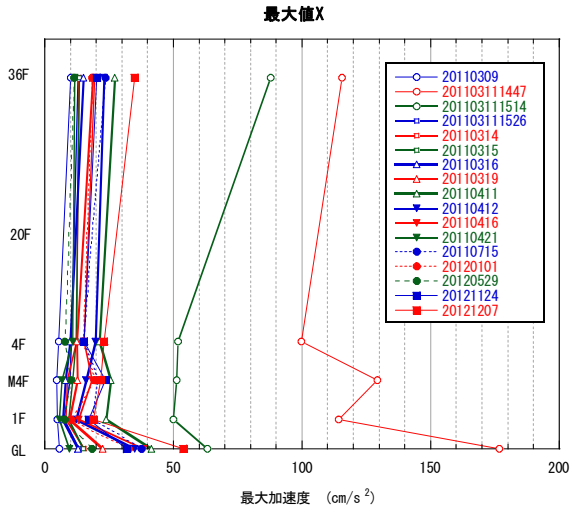


図1.3.1-9 加速度最大値の分布（X方向）

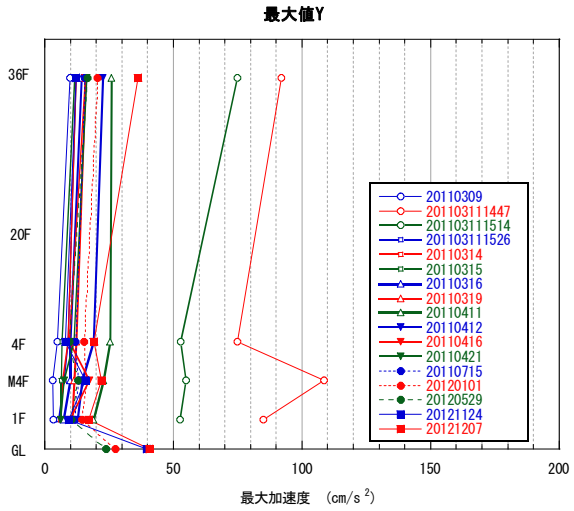


図1.3.1-10 加速度最大値の分布（Y方向）

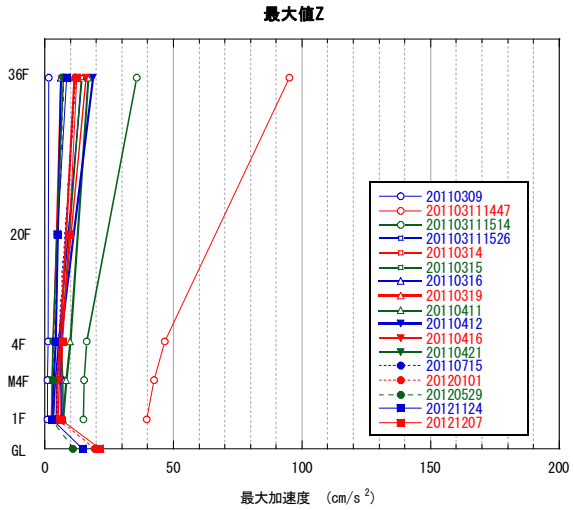


図1.3.1-11 加速度最大値の分布（Z 方向）

観測リストから、揺れの大きかった以下の 4 地震について、加速度の時刻歴波形・スペクトル比・擬似速度スペクトルを図 1.3.1-12～23 に示す。

水平方向の固有振動数は、201103111447 東北地方太平洋沖地震では、約 0.25Hz と免震の固有振動数で応答していることが、201103111514 茨城沖および 20110411 茨城沖の地震では約 0.5Hz と固有振動数高くなっている。

また、免震層での相対変形および累積変形について、図 1.3.1-24~25 に示す。

201103111447 東北地方太平洋沖地震では、最大変形が 15cm、累積変形が 10ｍであった。201103111514 茨城沖の地震では、最大変形が 9cm、累積変形が 4ｍであった。

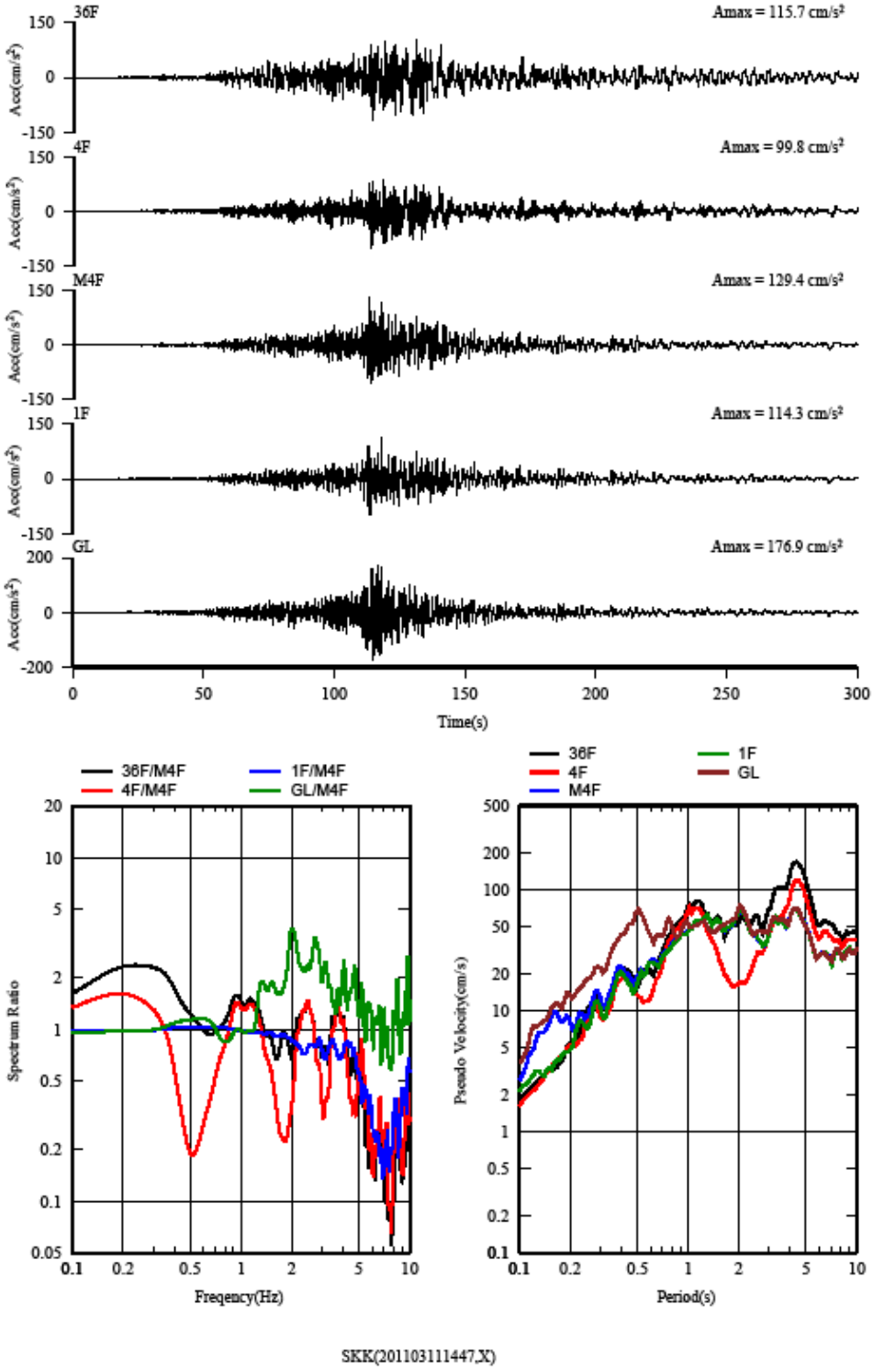


図 1.3.1-12　2011 年 3 月 11 日東北地方太平洋沖地震　観測記録（X 方向）

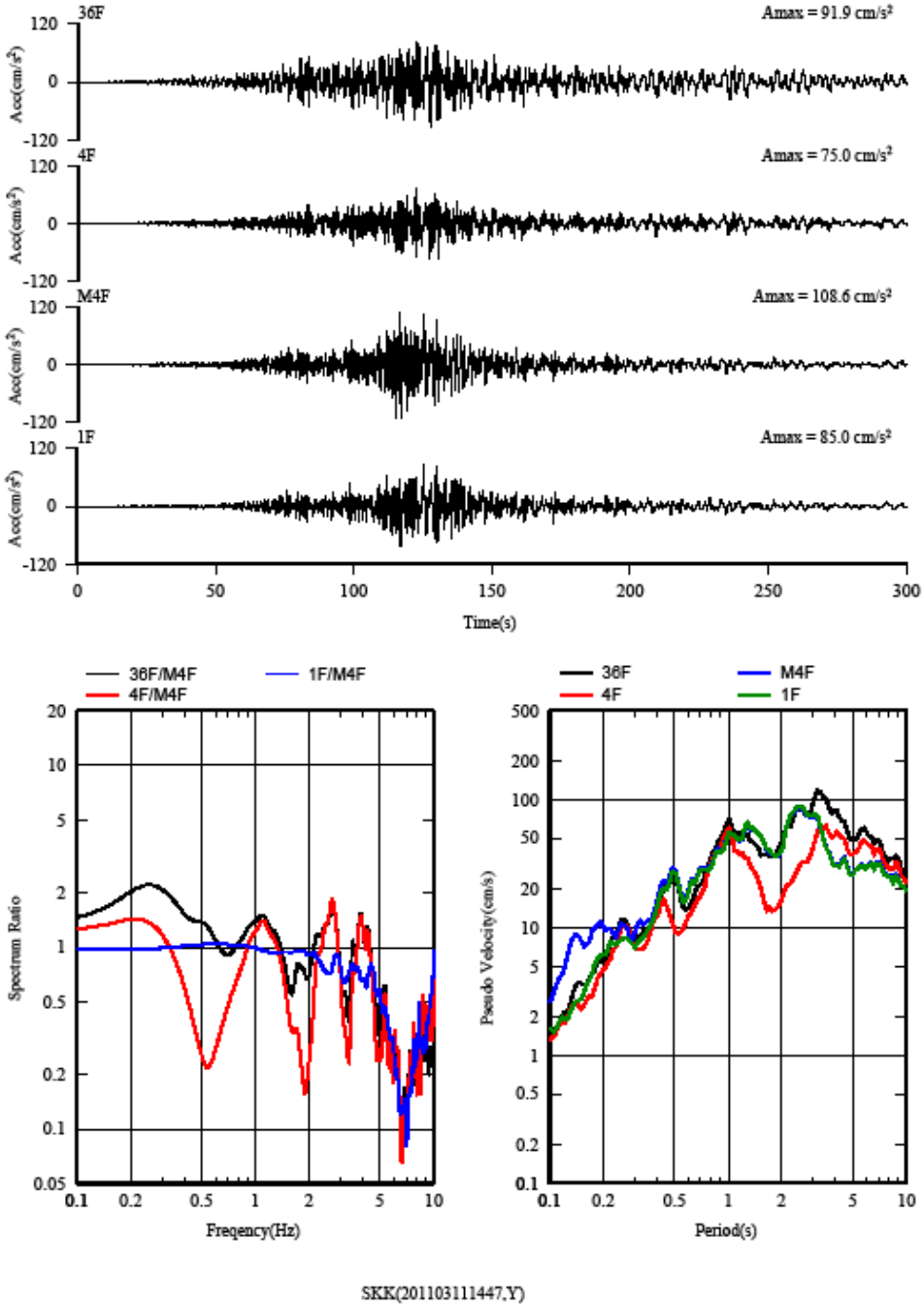


図 1.3.1-13　2011 年 3 月 11 日東北地方太平洋沖地震　観測記録（Y 方向）

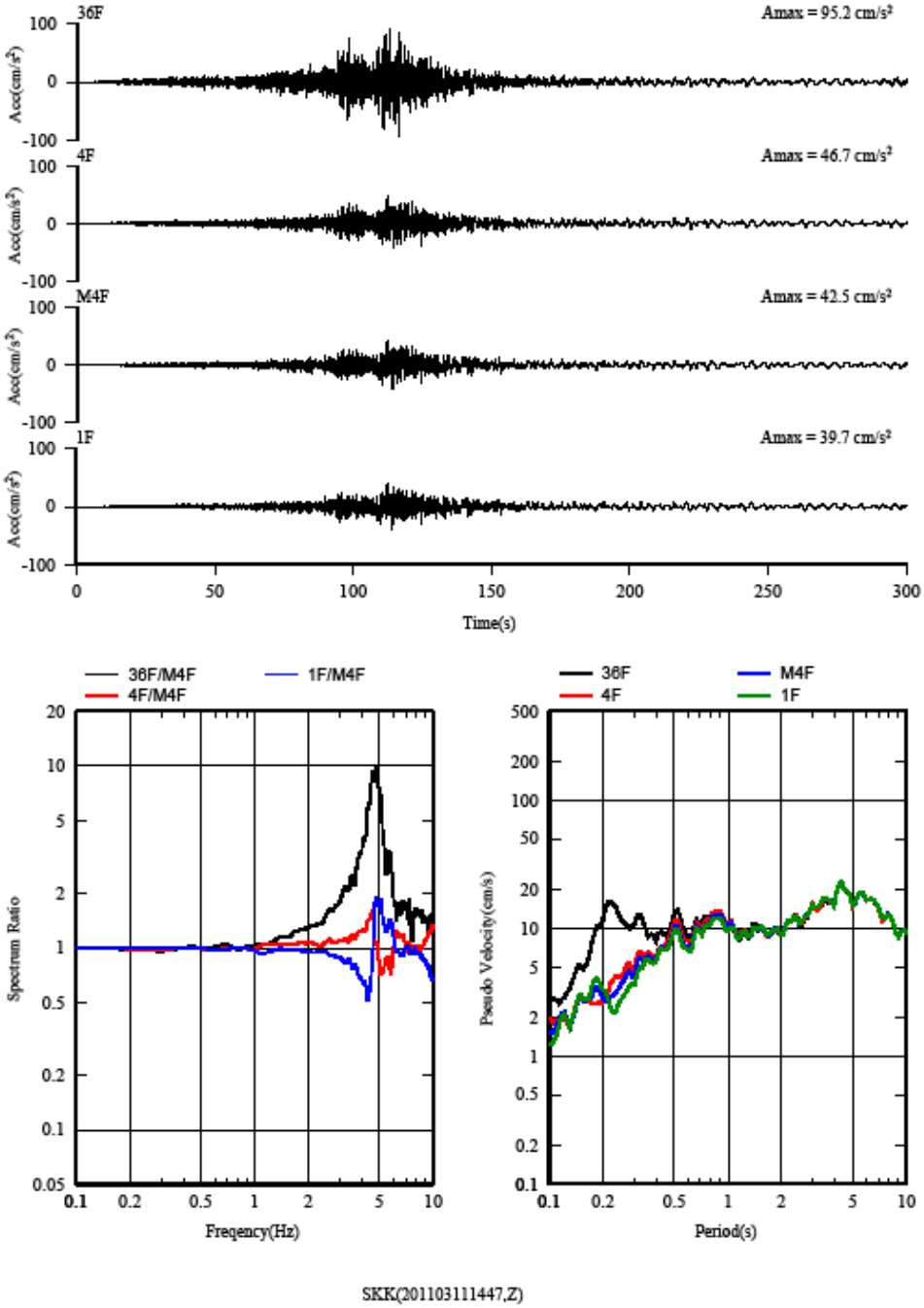


図 1.3.1-14　2011 年 3 月 11 日東北地方太平洋沖地震　観測記録（Z 方向）

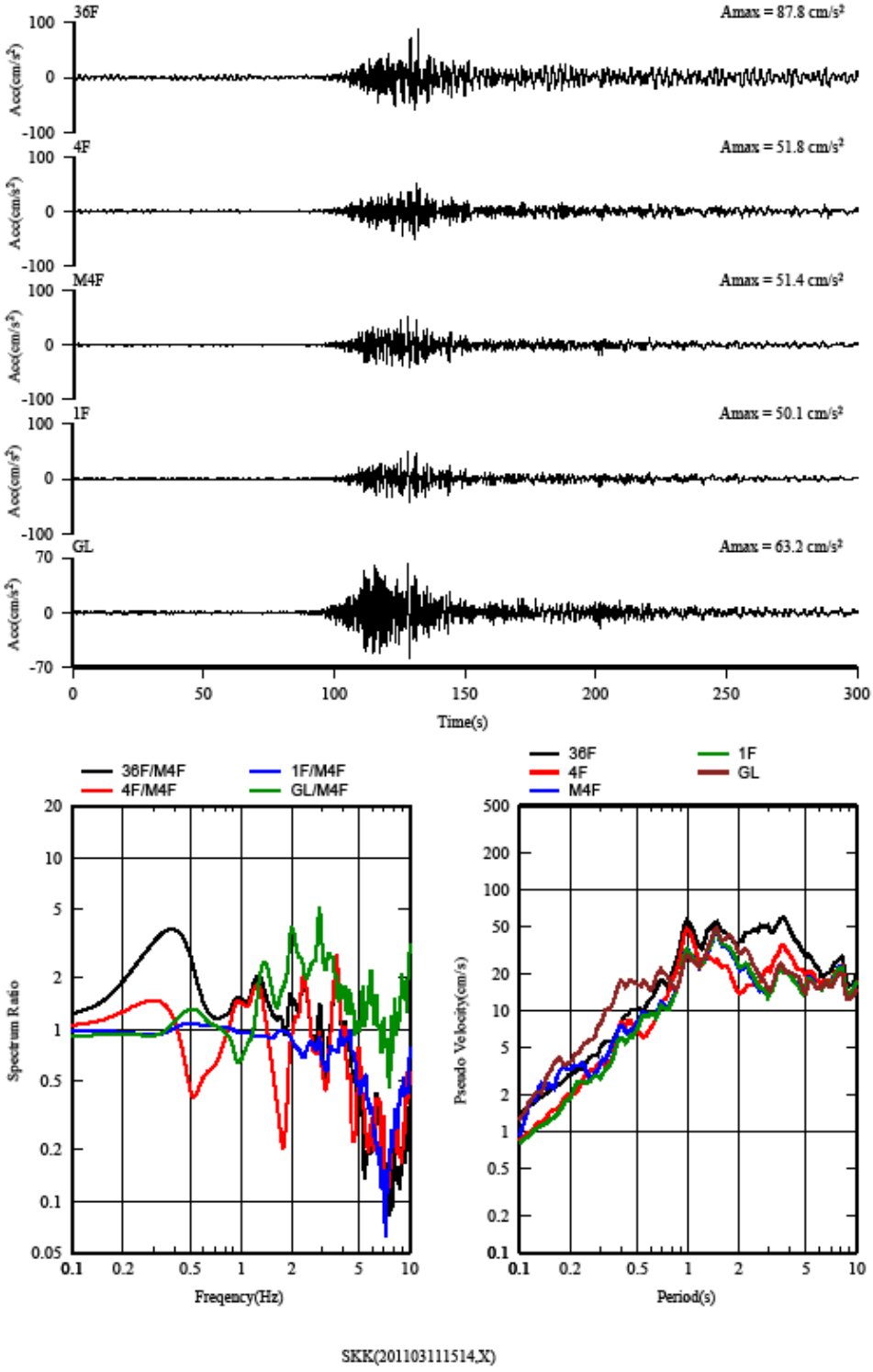


図 1.3.1-15　2011 年 3 月 11 日 15:14　茨城県沖の地震　観測記録（X 方向）

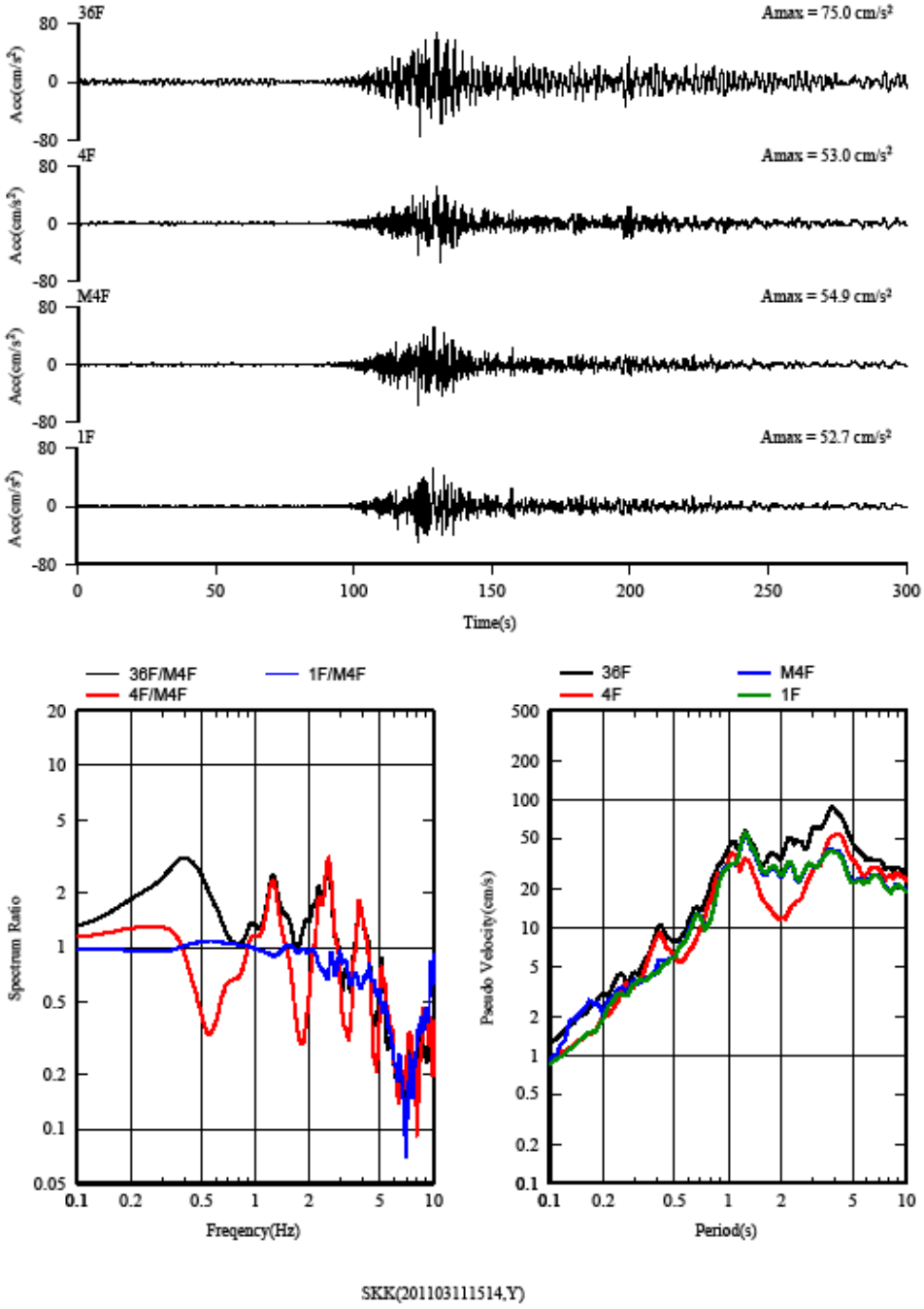


図 1.3.1-16　2011 年 3 月 11 日 15:14　茨城県沖の地震　観測記録（Y 方向）

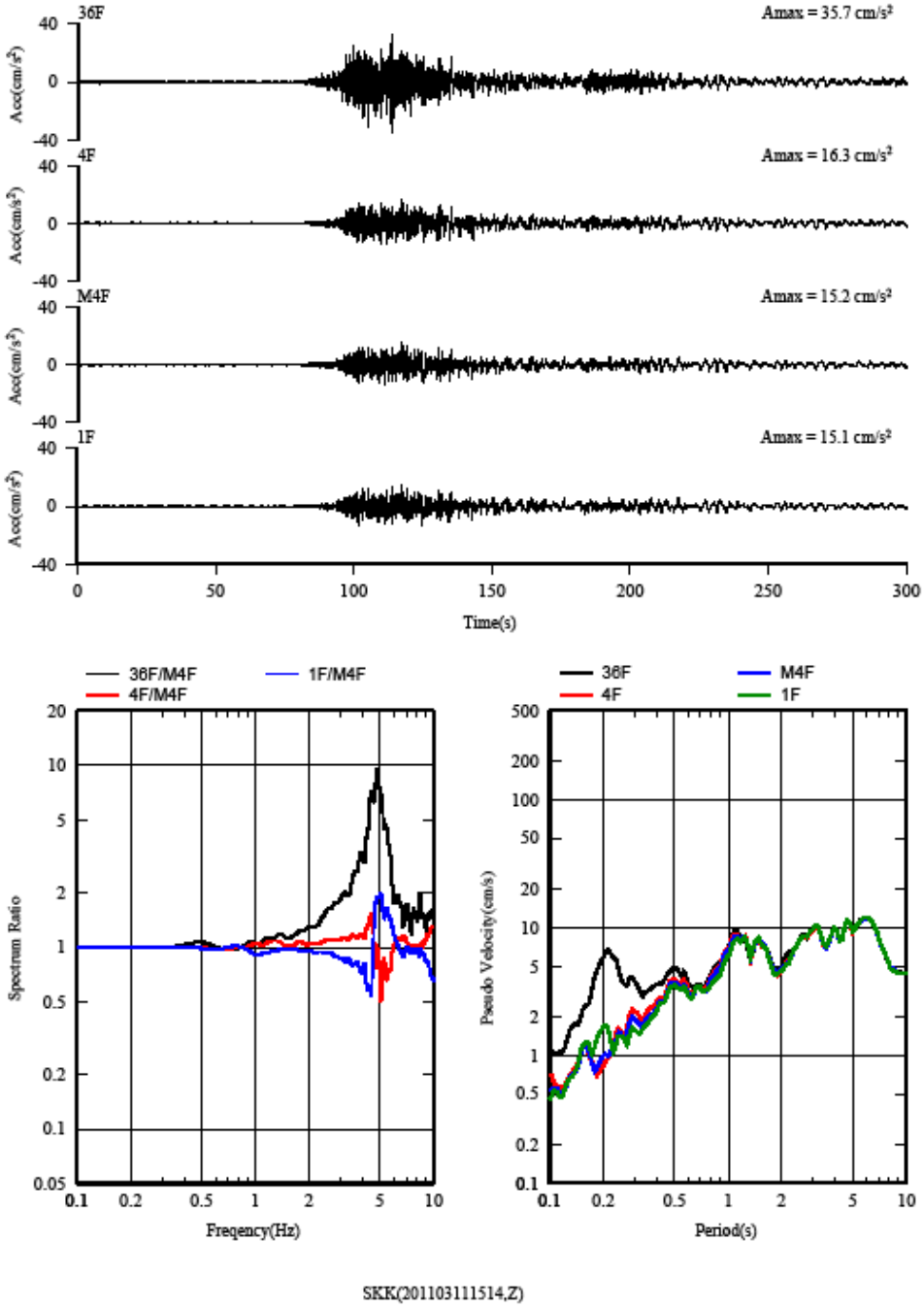


図 1.3.1-17　2011 年 3 月 11 日 15:14　茨城県沖の地震　観測記録（Z 方向）

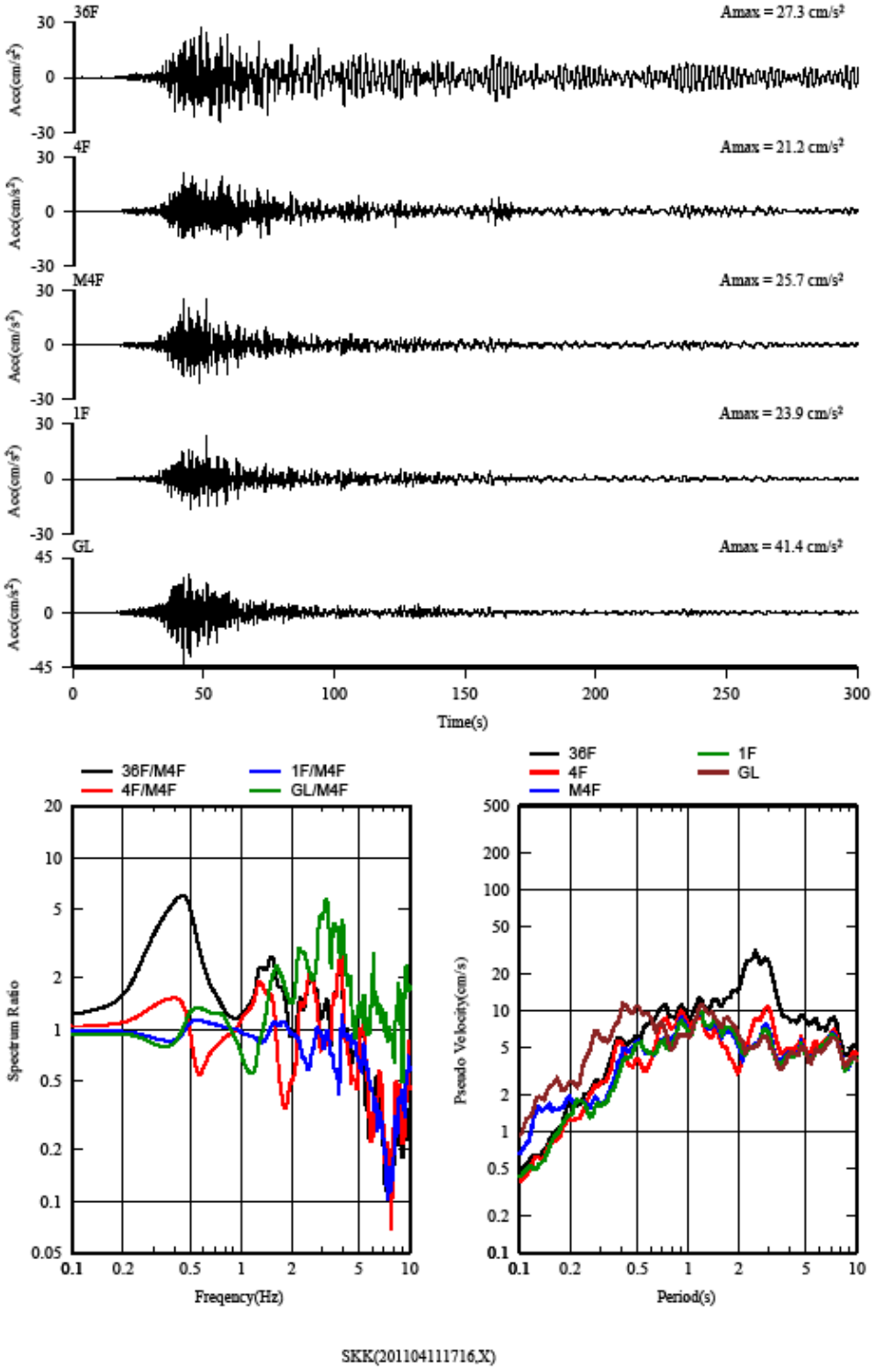


図 1.3.1-18　2011 年 4 月 11 日 17:16　茨城県沖の地震　観測記録（X 方向）

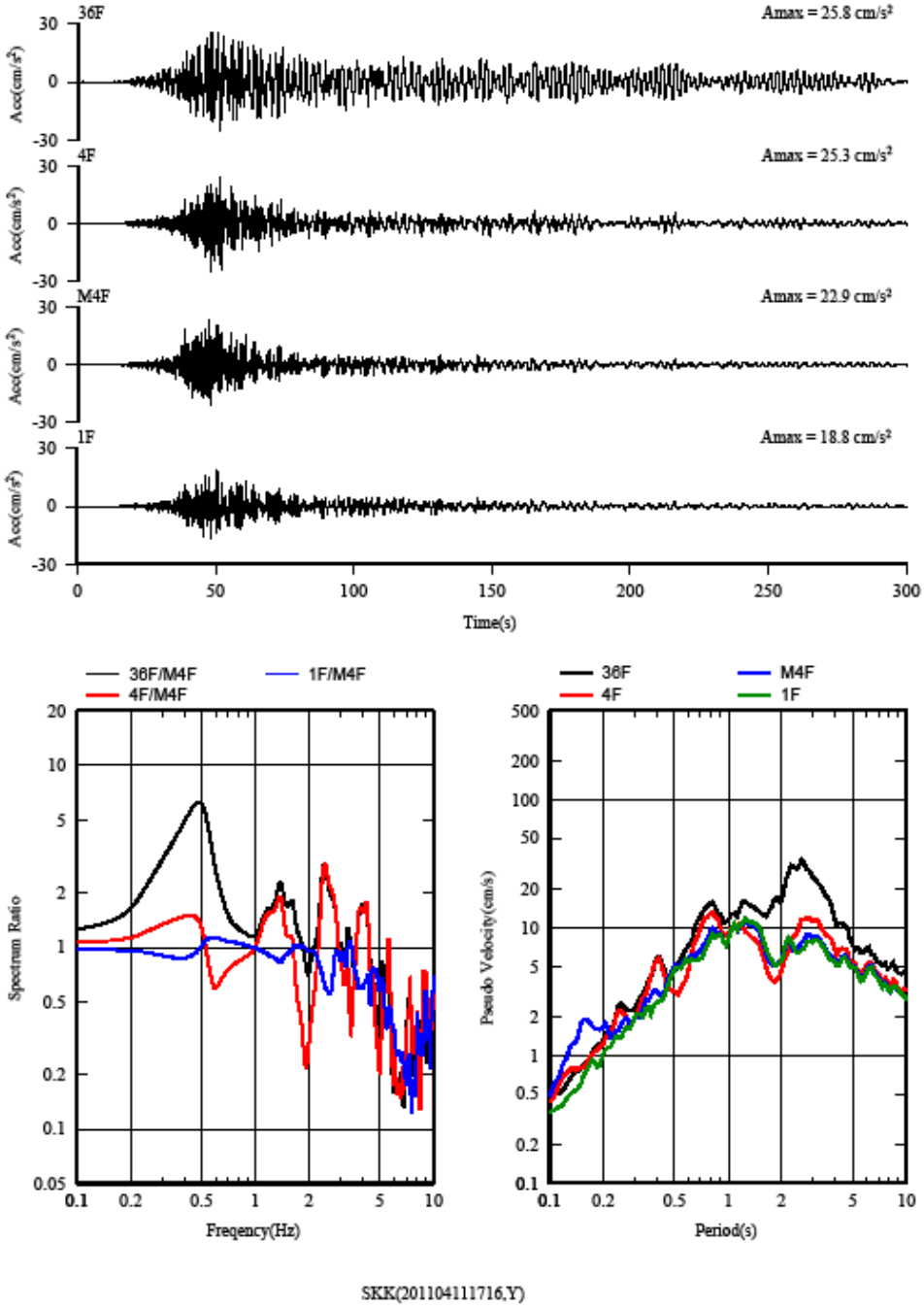


図 1.3.1-19　2011 年 4 月 11 日 17:16　茨城県沖の地震　観測記録（Y 方向）

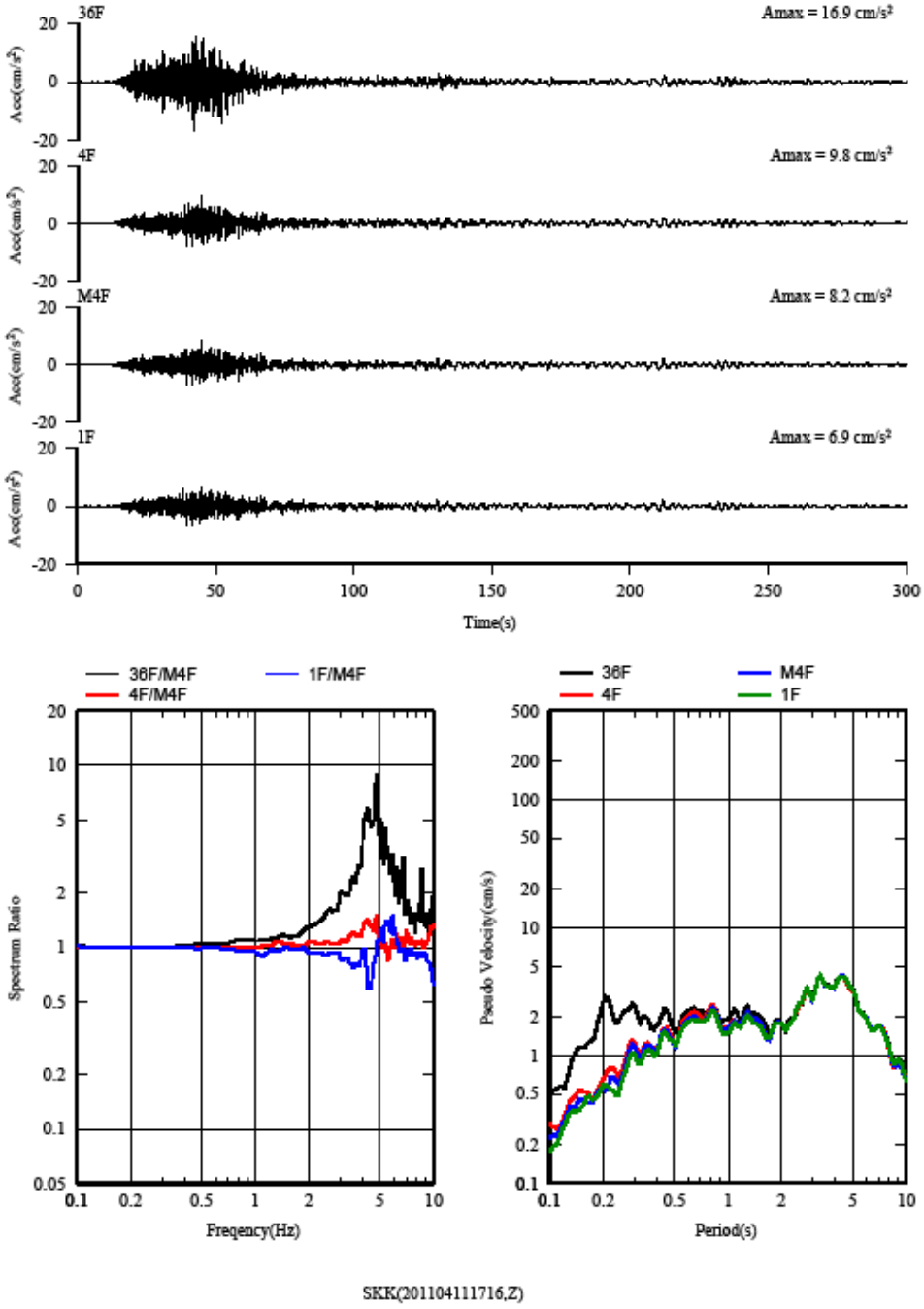


図 1.3.1-20　2011 年 4 月 11 日 17:16　茨城県沖の地震　観測記録（Z 方向）

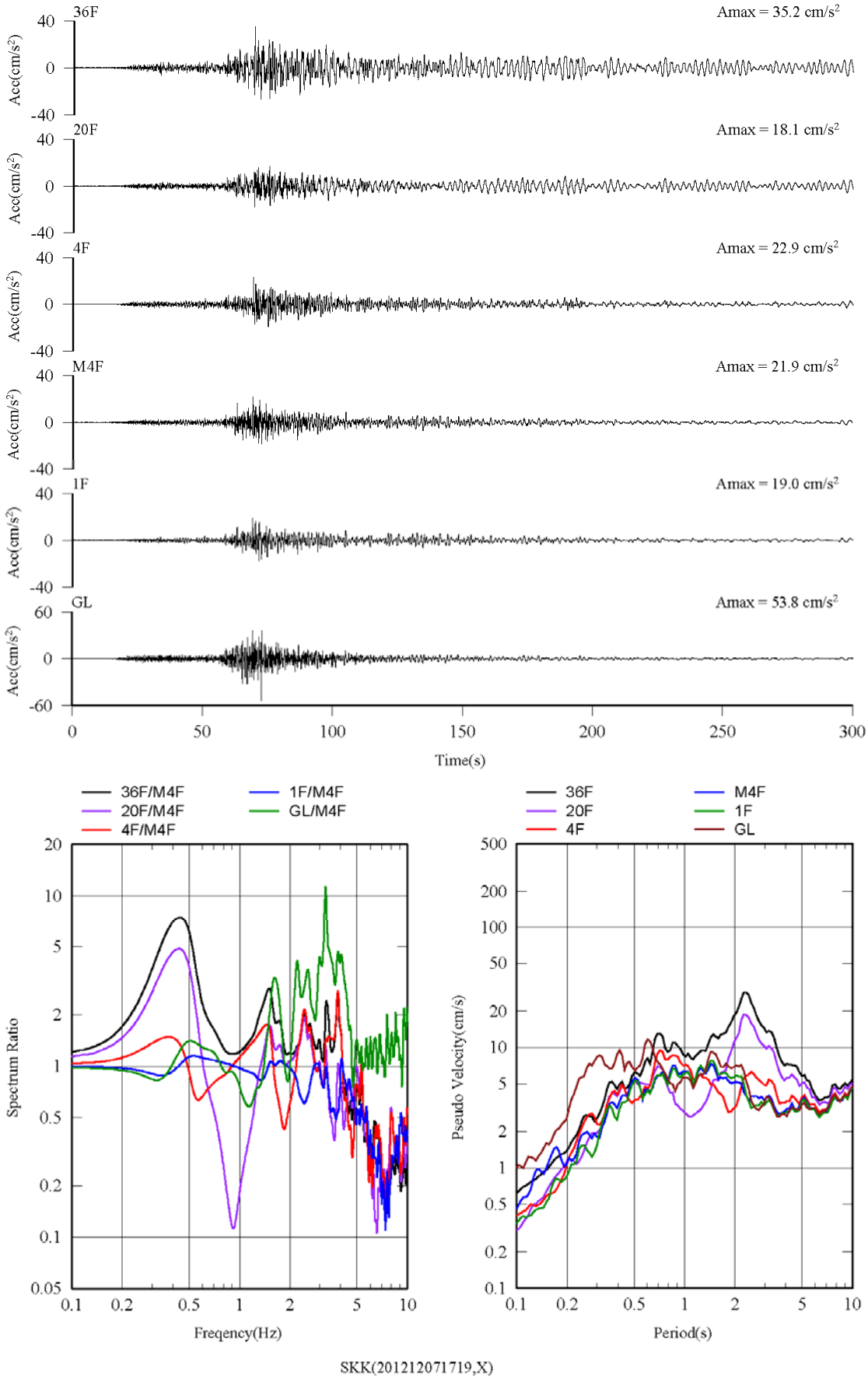


図 1.3.1-21　2012 年 12 月 7 日 17:19　三陸沖の地震　観測記録（X 方向）

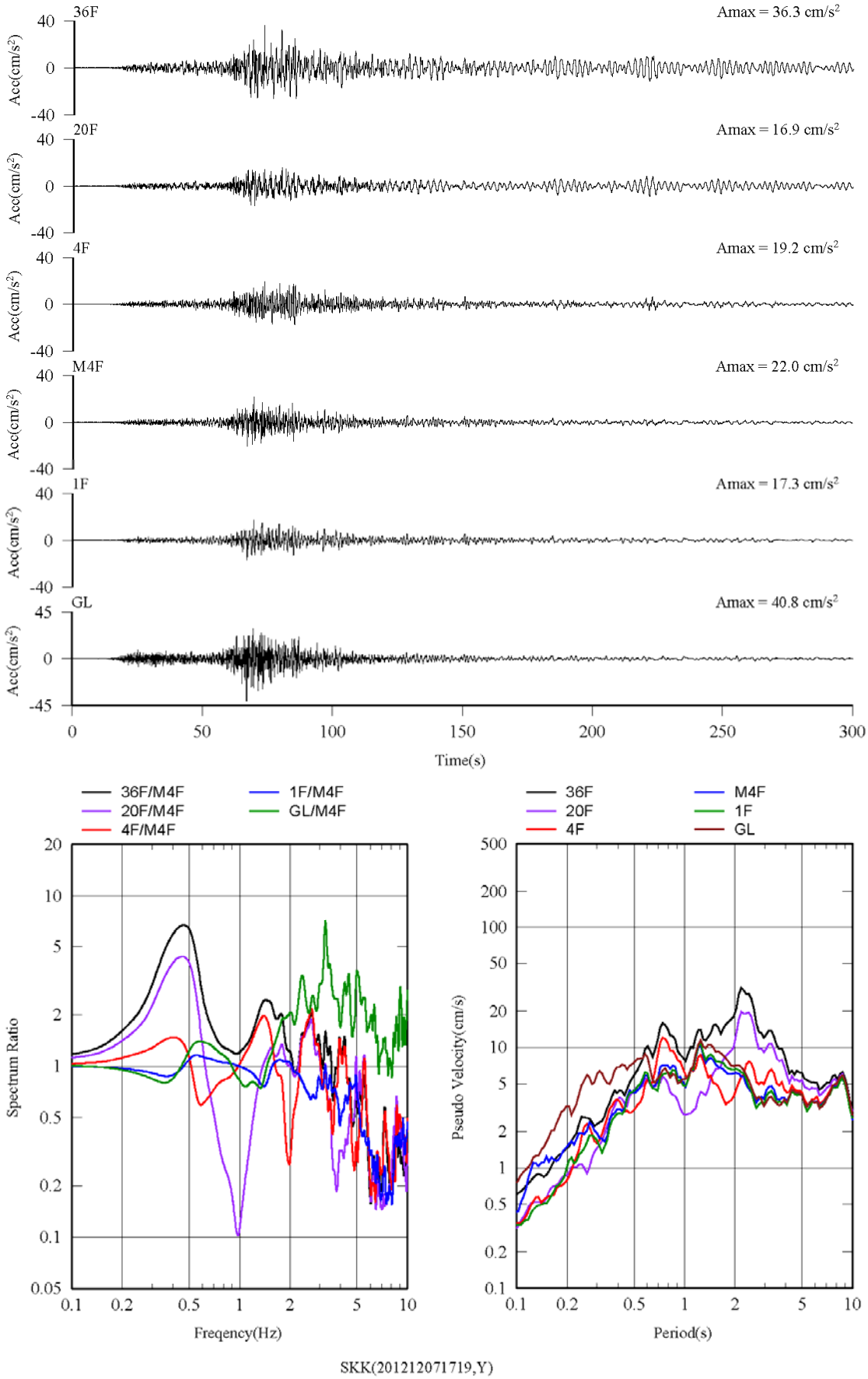


図 1.3.1-22　2012 年 12 月 7 日 17:19　三陸沖の地震　観測記録（Y 方向）

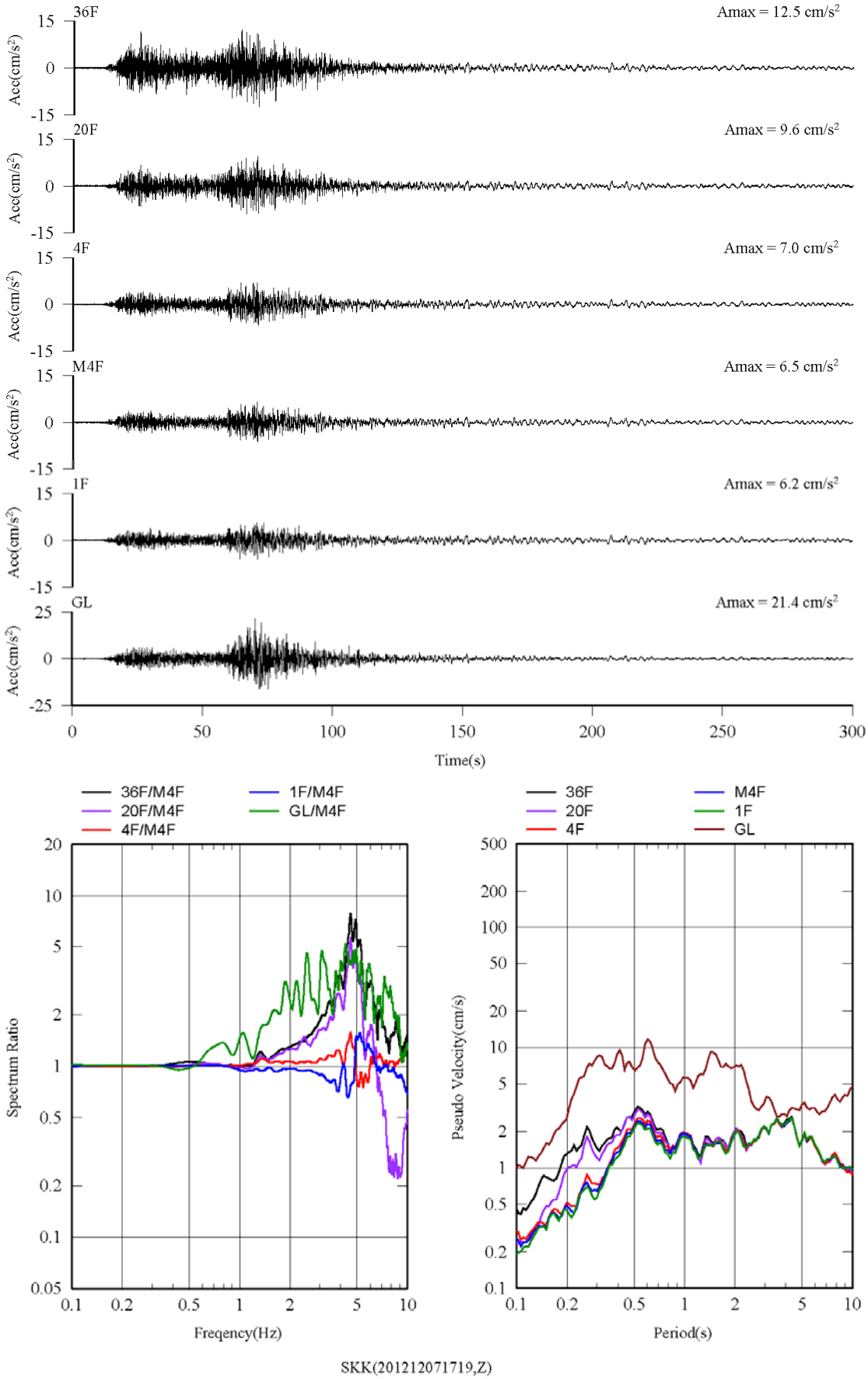
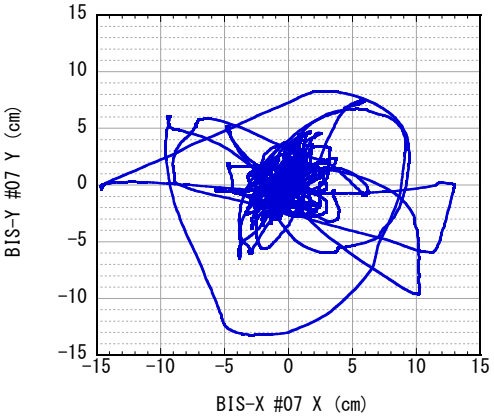
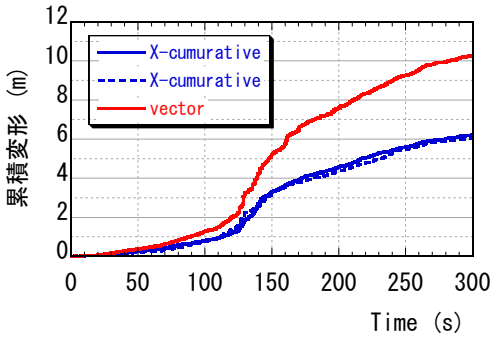


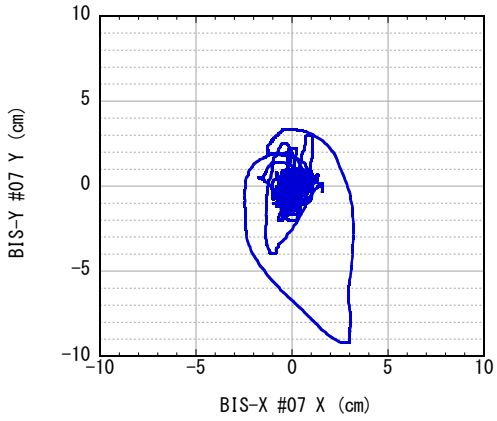
図 1.3.1-23　2012 年 12 月 7 日 17:19　三陸沖の地震　観測記録（Z 方向）

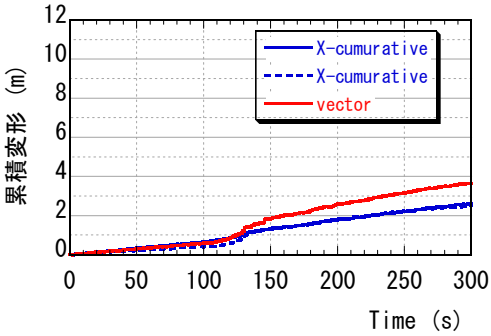




(1)　免震層相対変形オービット　　(2)　累積変形

図 1.3.1-24　2011 年 3 月 11 日東北地方太平洋沖地震（免震層相対変形と累積変形）





(1)　免震層相対変形オービット　　(2)　累積変形

図 1.3.1-25　2011 年 3 月 11 日 15:14 茨城沖の地震（免震層相対変形と累積変形）

1.3.2　観測免震建築物のシミュレーション解析

1)　解析モデル

2011 年 3 月 11 日の東北地方太平洋沖地震本震時の建物応答を再現するため、シミュレーション解析を実施した。図 1.3.2-1 に、解析モデルの概念図を示す。モデルは 37 質点の曲げーせん断型の弾性モデルである。建物の減衰は、免震層固定時の 1 次固有振動数に対して、h=2%の剛性比例型減衰とする。免震層は、鉛プラグ入り積層ゴムと天然ゴム系積層ゴムをそれぞれひとつの MSS に集約し、ふたつの MSS を並列配置した。建物 1 階床を固定として、1 階における X, Y 方向の観測記録の同時入力により、シミュレーション解析を実施した。

解析条件としては、免震層および建物の諸元をすべて設計値通りとしたケース(Normal)に加え、表 1.3.2-1 に示す免震部材の製造時のばらつき、温度変化、経年変化による性能変動を考慮して、免震層の水平剛性と降伏荷重が最も高くなるケース(Hard)と、最も低くなるケース(Soft)を設定した。さらに、2011 年 3 月 11 日の東北地方太平洋沖地震本震時の状態を再現するケースとして、免震部材に対しては、製品検査結果を本震発生時の環境温度(10℃と想定)により補正し、入居前であったため建物重量から積載荷重を差し引き、また、コンクリートの 4 週強度を基に推定した推定長期強度が設計強度の 1.6 倍であることから、コンクリートのヤング係数を 1.2 倍としたケース(110311)も設定し、計 4 ケースでシミュレーション解析を実施した。表 1.3.2-2 に、Normal ケースにおける解析モデルの 1 次固有周期を示す。また、表 1.3.2-3 に解析ケース一覧を示す。

表 1.3.2-1　免震部材の性能変動
（通常設計値に対して）

	水平剛性	降伏荷重
製造時	-10%～+10%	-10%～+10%
環境温度	-3%～+5%	-9%～+19%
経年変化	0%～+11%	0%

表 1.3.2-2 解析モデルの 1 次固有周期

	X 方向	Y 方向
免震固定時	2.36sec	2.25sec
免震γ=100%時	4.71sec	4.68sec

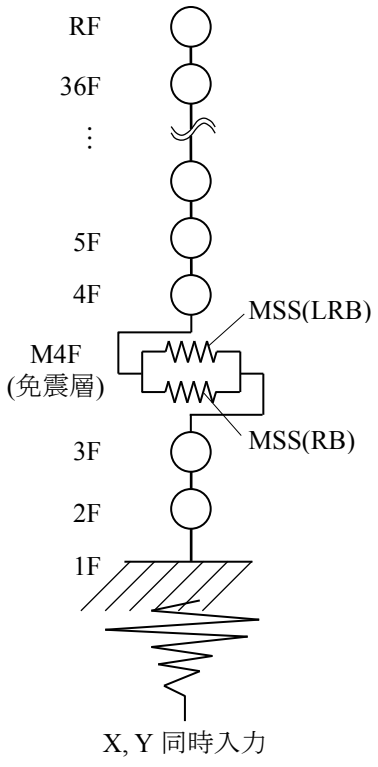


図 1.3.2-1 解析モデル概念図

表 1.3.2-3 解析ケース一覧

	建屋		免震層	
	ヤング係数	重量	水平剛性	降伏荷重
Normal	設計値	設計値	設計値	設計値
Hard	設計値	設計値	設計値×1.26	設計値×1.29
Soft	設計値	設計値	設計値×0.85	設計値×0.81
110311	設計値×1.2	設計値－地震時積載荷重	設計値×1.03	設計値×1.09
110311 修正	**設計値×1.2**	**設計値－地震時積載荷重**	**LRB 設計値×1.01** **RB 設計値×1.10**	**設計値×1.12**

■積層ゴムの製品検査結果と解析条件の設定

表 1.3.2-4 に、RB の製品検査結果の水平剛性を、表 1.3.2-5 に LRB の製品検査結果の降伏後剛性および降伏荷重を示す。製品検査時の温度は 20～26℃程度であった。計測値の 20℃換算値を設計値で除した値を対設計値として示している。RB の製品検査による水平剛性の対設計値の平均は 1.067、LRB の製品検査による降伏後剛性の対設計値の平均は 0.984、降伏荷重の対設計値の平均値は 1.028 である。また、2011 年 3 月 11 日の環境温度は 10℃程度であり、以下の式より温度依存性の性能変動を考慮すると、水平剛性の対設計値は 1.03、降伏荷重の対設計値は 1.09 である。

水平剛性の補正係数： $C_K = \exp(-0.00271\,(t0-t))$

降伏荷重の補正係数： $C_Q = \exp(-0.00879\,(t0-t))$ （t0：補正温度、 t：補正前温度 ）

以上より、110311 ケースについて RB および LRB の補正値を以下のように設定する。

RB： 水平剛性設計値×1.067×1.03 = 設計値×1.10

LRB： 降伏後剛性設計値×0.984×1.03 = 降伏後剛性設計値×1.01

降伏荷重設計値×1.028×1.09 = 降伏荷重設計値×1.12

表 1.3.2-4 RB 製品検査の水平剛性

種類	台数	水平剛性Kr			
		設計値 (kN/mm)	計測値 (kN/mm)	20℃換算値 (kN/mm)	対設計値
RB-S1300	1	2.598	2.519	2.564	0.987
RB-S1300A	2	2.598	2.547	2.581	0.993
			2.534	2.567	0.988
RB-S1000	8	1.907	2.044	2.074	1.088
			2.042	2.07	1.085
			2.074	2.104	1.103
			2.029	2.058	1.079
			2.065	2.094	1.098
			2.021	2.051	1.076
			2.106	2.135	1.120
			2.104	2.134	1.119
平均値					1.067

表 1.3.2-5　LRB 製品検査の降伏後剛性と降伏荷重

種類	台数	降伏後剛性Kd				降伏荷重Qd			
		設計値 (kN/mm)	計測値 (kN/mm)	20℃換算値 (kN/mm)	対設計値	設計値 (kN)	計測値 (kN)	20℃換算値 (kN)	対設計値
LRB-S1200	12	2.328	2.019	2.047	0.879	202.9	210.7	220.4	1.086
			2.022	2.048	0.880		218.7	227.9	1.123
			2.31	2.321	0.997		209.6	212.7	1.048
			2.35	2.361	1.014		210.6	213.8	1.054
			2.296	2.306	0.991		212	215	1.060
			2.362	2.374	1.020		214.5	217.9	1.074
			2.321	2.33	1.001		209.9	212.6	1.048
			2.317	2.321	0.997		211.3	212.6	1.048
			2.337	2.343	1.006		210.8	212.5	1.047
			2.366	2.37	1.018		213.8	215.1	1.060
			2.381	2.385	1.024		211.7	212.8	1.049
			2.362	2.374	1.020		211.1	214.6	1.058
LRB-S1100	6	2.094	1.929	1.942	0.927	360.6	347.5	355.2	0.985
			1.923	1.937	0.925		348.7	356.8	0.989
			1.865	1.878	0.897		348.4	356.1	0.988
			1.916	1.933	0.923		346.1	356	0.987
			1.873	1.887	0.901		351	359.4	0.997
			1.916	1.929	0.921		349.8	357.3	0.991
LRB-S1000	14	1.945	1.864	1.88	0.967	250.4	254.3	261.3	1.044
			1.853	1.867	0.960		241.8	247.8	0.990
			1.823	1.838	0.945		250.3	257	1.026
			1.879	1.895	0.974		250.8	257.9	1.030
			1.846	1.862	0.957		250.4	257.3	1.028
			1.866	1.881	0.967		253	259.5	1.036
			1.902	1.918	0.986		250.9	257.8	1.030
			1.858	1.873	0.963		251.1	257.6	1.029
			1.842	1.857	0.955		250	256.7	1.025
			1.845	1.859	0.956		250.5	256.8	1.026
			1.845	1.86	0.956		250.5	257.2	1.027
			1.805	1.819	0.935		252.9	259.2	1.035
			1.932	1.947	1.001		250.9	257.3	1.028
			1.89	1.903	0.978		253.6	259.4	1.036
LRB-S1000A	8	1.945	2.055	2.075	1.067	250.4	244.1	251.7	1.005
			2.027	2.051	1.054		240.5	250	0.998
			2.073	2.09	1.075		241.4	248.1	0.991
			2.049	2.063	1.061		243	248.4	0.992
			2.04	2.056	1.057		248.7	254.8	1.018
			2.046	2.071	1.065		246.1	256	1.022
			2.045	2.064	1.061		247.1	254.9	1.018
			2.046	2.063	1.061		240.3	246.7	0.985
平均値					0.984				1.028

2)　2011 年 3 月 11 日東北地方太平洋沖地震時 シミュレーション解析結果

図 1.3.2-2 に、最大応答加速度分布の解析結果と観測記録を比較して示す。X 方向は、4 階(免震層上階)において、どの解析ケースにおいても解析結果の応答加速度が観測記録に比較して小さな値を示しているが、Y 方向においては 4 階(免震層上階)および 36 階の応答加速度において、110311 ケースの解析結果は、Normal ケースの解析結果よりもやや小さな値を示し、観測記録によく一致している。

また、図 1.3.2-3 に、1 階に対する 36 階の伝達関数の比較、および 4 階に対する 36 階の伝達関数の比較を示す。上部建屋の伝達関数においては免震部材の性能変動は関わらないため、4 階に対する 36 階の解析結果の伝達関数は、Normal と 110311 のケースのみ示す。1 階に対する 36 階の X 方向伝達関数においては、2.5 秒付近で解析結果は観測記録に見られないピークを示しており、X 方向観測記録と解析結果の不一致の要因のひとつと考えられる。Y 方向では、解析結果は観測記録の免震 1 次固有周期とよく一致しているが、建物の特性変動を考慮しない Normal ケースが観測記録に最も近い結果となっている。4 階に対する 36 階の伝達関数においては、X, Y 方向とも建物の特性変動を考慮した 110311 ケースが観測記録の 1 次固有周期に最もよく一致している。また、0.1～0.4 秒の短周期領域での不一致が見られるが、これは減衰定数の評価等の影響によるものと考える。

図 1.3.2-4 に、免震層の相対変位の解析結果と観測記録の比較、および解析結果による免震層の荷重変形関係を示す。解析結果は、観測記録に対して、やや大きな最大変位を示しているが、観測記録に見られる真円に近い軌跡をよく再現している。

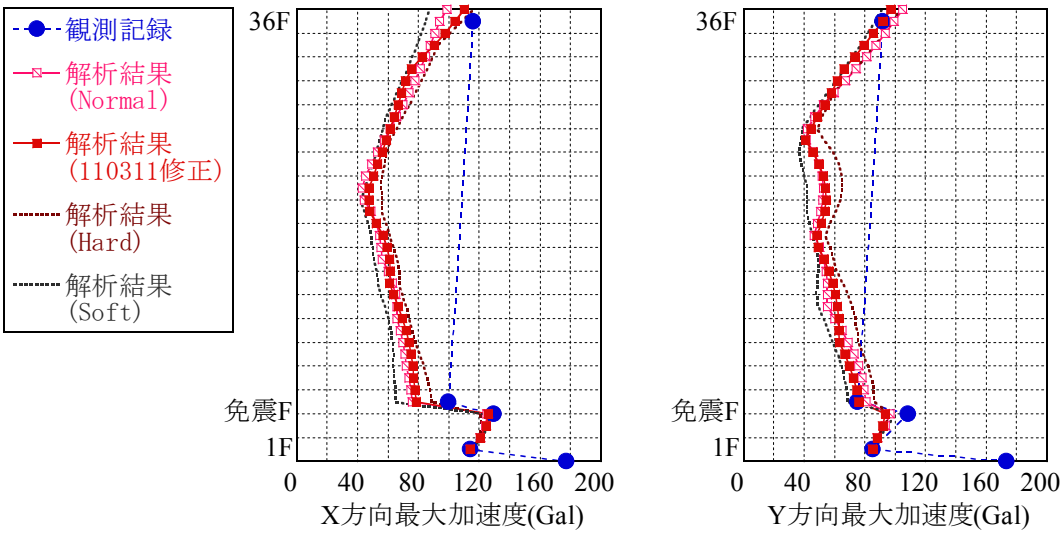


図 1.3.2-2　2011 年 3 月 11 日東北地方太平洋沖地震時　最大加速度分布

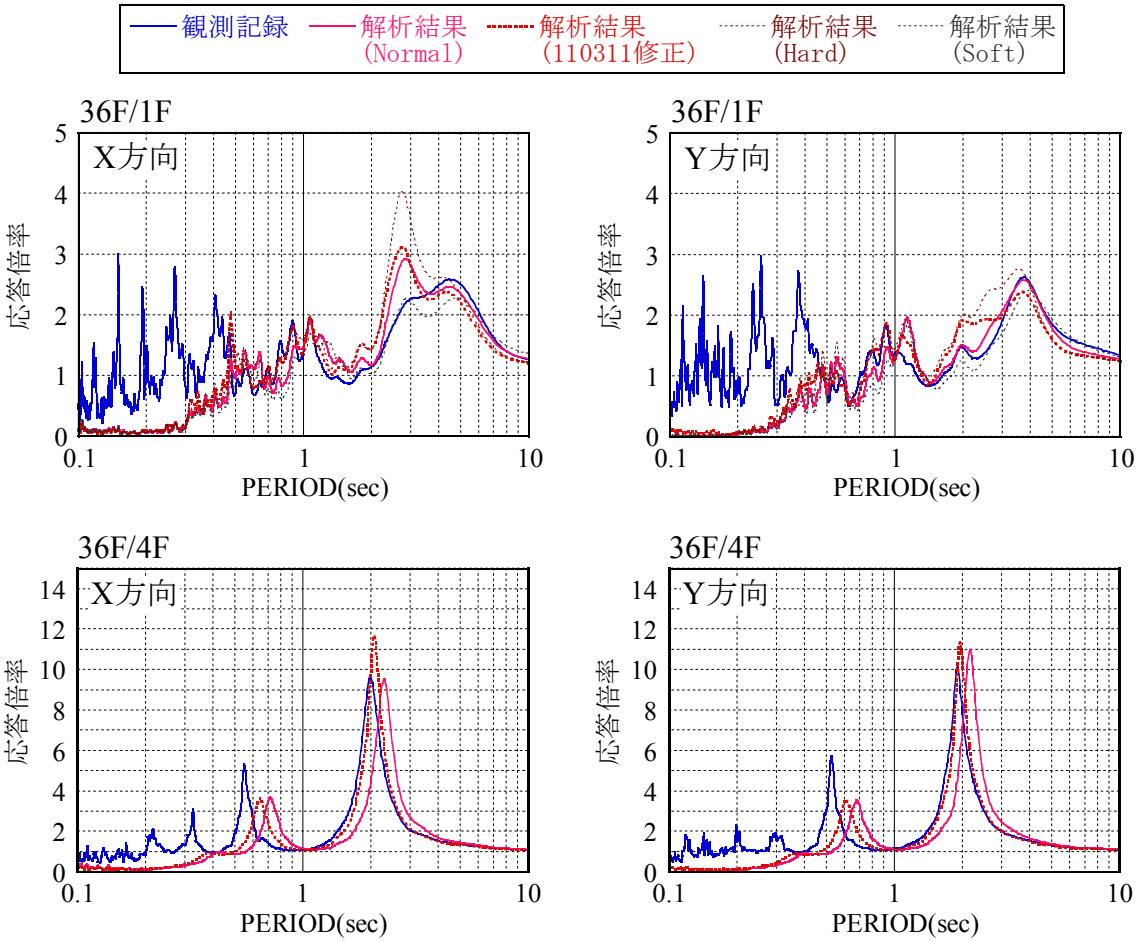


図 1.3.2-3　2011 年 3 月 11 日東北地方太平洋沖地震時　伝達関数

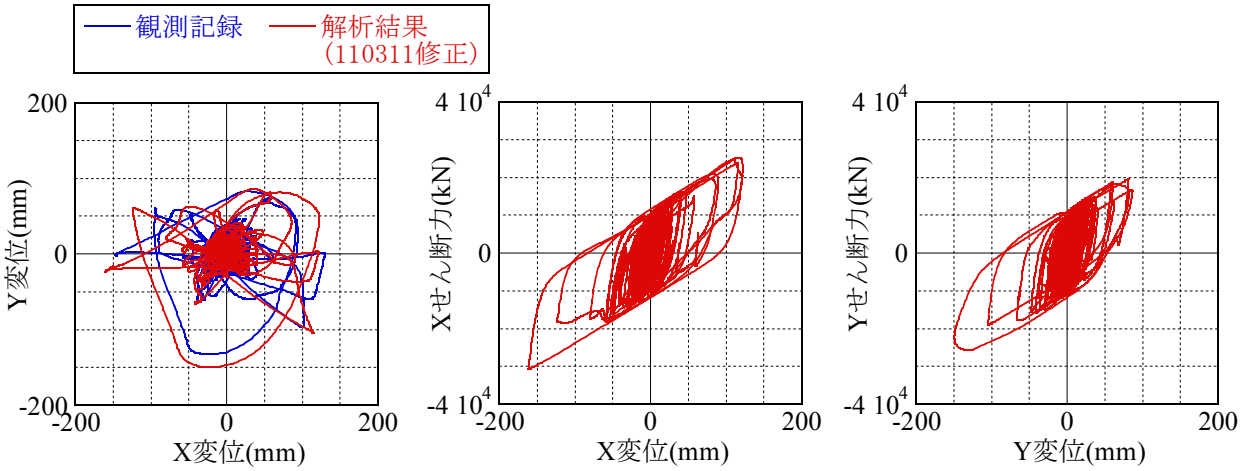


図 1.3.2-4　2011 年 3 月 11 日東北地方太平洋沖地震時　免震層変位および解析結果の荷重変形関係

表 1.3.1.2-6 に、観測記録と解析結果(Normal ケースおよび 110311 ケース)の最大値一覧を示す。Normal ケースの解析結果は、X 方向の加速度は観測記録よりも小さく、Y 方向の加速度は観測記録よりもやや大きく評価している。110311 ケースの解析結果は、X, Y 方向とも加速度を観測記録よりも小さくめに評価し、免震層変位は観測記録よりも大きい評価となっているが、Normal ケースよりも観測記録に近い値を示している。

表 1.3.2-6　2011 年 3 月 11 日東北地方太平洋沖地震時　最大値一覧

		観測記録	解析結果 (Normal)	解析結果 (110311 修正)
36 階最大加速度 (Gal)	X 方向	116	93.8	104
	Y 方向	91.9	99.3	91.5
4 階最大加速度 (Gal)	X 方向	100	75.8	78.6
	Y 方向	75.1	80.6	75.7
免震階最大加速度 (Gal)	X 方向	129	124.9	126
	Y 方向	109	96.7	93.5
免震層最大変位 (mm)	X 方向	147	172	161
	Y 方向	132	118	150

1.4　南海トラフの巨大地震における観測免震建築物のシミュレーション解析

1) 解析モデル

a) モデル概要

東北地方太平洋沖地震本震時の建物応答を再現した解析モデル（B 建物）を用い、南海トラフの巨大地震における観測免震建物のシミュレーション解析を実施した。図 1.4-1 に解析モデルの概念図を示す。1.3.2 1)と同様に、モデルは 37 質点の曲げーせん断型の弾性モデルである。建物の減衰は、免震層固定時の 1 次固有振動数に対して、h=2%の剛性比例型減衰とする。免震層は、鉛プラグ入り積層ゴムと天然ゴム系積層ゴムをそれぞれひとつの MSS に集約し、ふたつの MSS を並列配置した。建物 1 階床を固定として、1 階における X、Y 方向の同時入力により、シミュレーション解析を実施した。

解析モデルの各種設定値を表 1.4-1 に示す。ここでの建屋の設定は、ヤング係数にはコンクリートの 4 週強度を考慮した設計値の 1.2 倍を採用し、重量には積載荷重も考慮している。

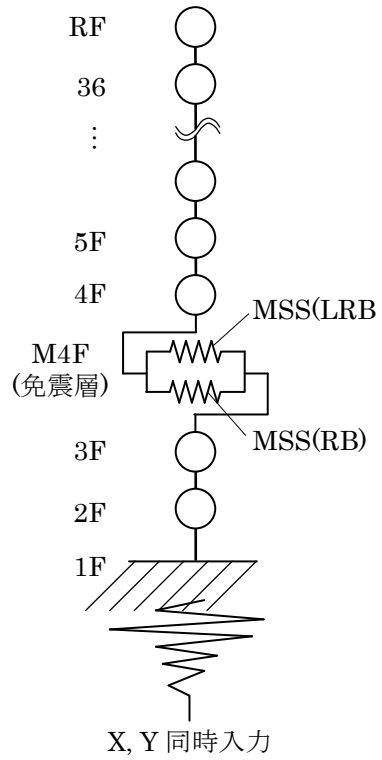


図 1.4-1 解析モデル概念図

表 1.4-1 各種設定値

建屋		免震層	
ヤング係数	重量	水平剛性	降伏荷重
設計値×1.2	設計値	設計値	設計値

b) 入力地震動

東雲における 3 連動地震及び 4 連動地震の波形を図 1.4-2、スペクトルを図 1.4-3 に示す。波形は建築基準整備促進事業 42（H23 年度及び H24 年度）で作成された地震動である。なお、3 連動地震に関しては、平均波およびばらつきを考慮した平均＋標準偏差波の 2 種類の波形が作成されている。3 連動地震波および 4 連動地震波では、6～7 秒付近の成分が卓越している。

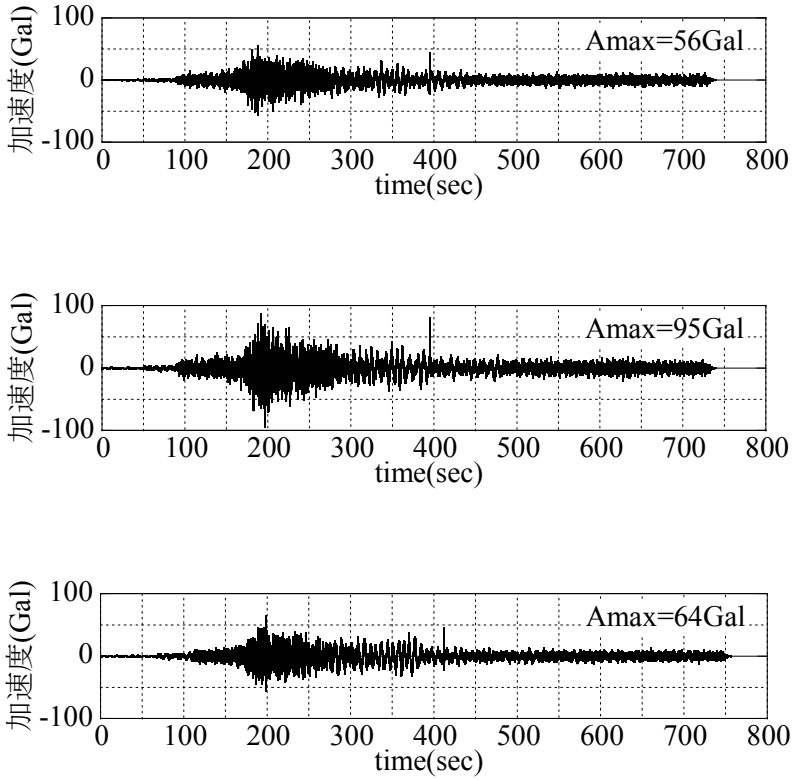


図 1.4-2 時刻歴波形

（上段：3 連動（平均）、中段：3 連動（平均＋標準偏差）、下段：4 連動）

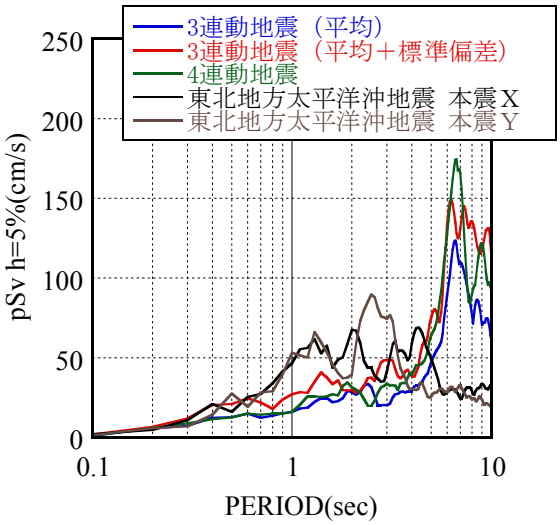


図 1.4-3 擬似速度応答スペクトル（h=5%）

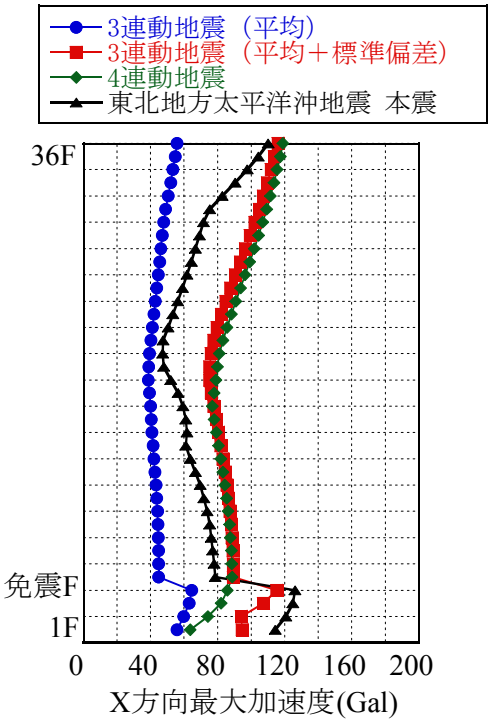
2) 南海トラフの巨大地震のシミュレーション解析結果

図 1.4-4 に最大加速度分布を示す。3 連動地震時においては、4 階の加速度は免震階の概ね 2/3 程度に低減されている。なお、4 連動地震時にはその傾向がやや異なっているが、高次モードの寄与度が高くなっている影響と推察される。

図 1.4-5 に、1 階に対する 36 階および 4 階に対する 36 階の伝達関数の比較を示す。1 階に対する 36 階の応答倍率をみると、4 連動地震時には 2 次モードに相当する 1 秒付近の増幅が極めて大きくなっている。

図 1.4-6 に免震層の荷重変形関係を示す。3 連動地震（平均＋標準偏差）時や 4 連動地震時には、免震層の最大変位が 45cm 程度生じている。

解析結果の最大値一覧を表 1.4-2 に示す。東北地方太平洋沖地震本震時の応答と比較すると、3 連動地震（平均）時には免震層の最大変位は 2 割程度大きく、免震層より上層の加速度は 0.5～1.0 倍程度となっている。また、3 連動地震（平均＋標準偏差）や 4 連動地震発生時の免震層の最大変位は 3 倍程度になっているものの、免震層より上層の加速度は 1.0～2.0 倍程度である。



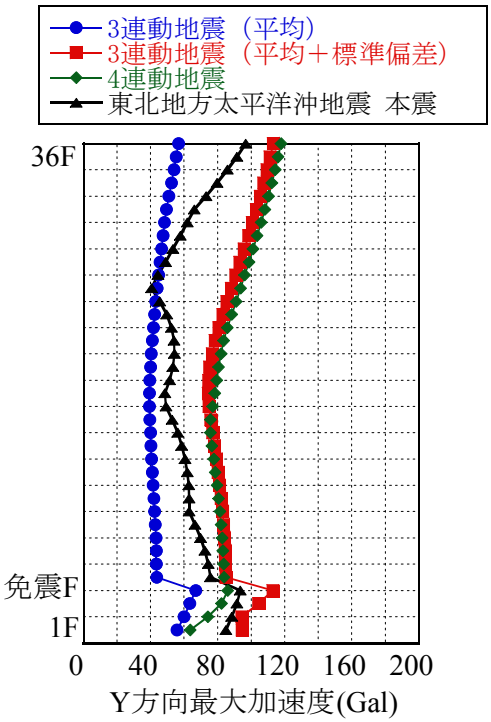
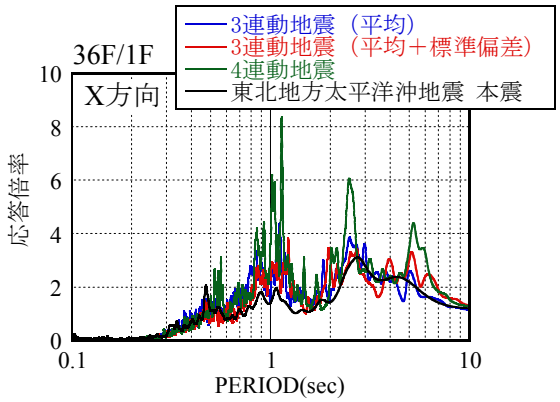
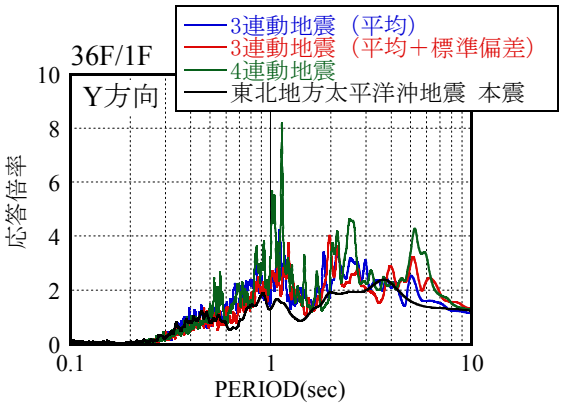
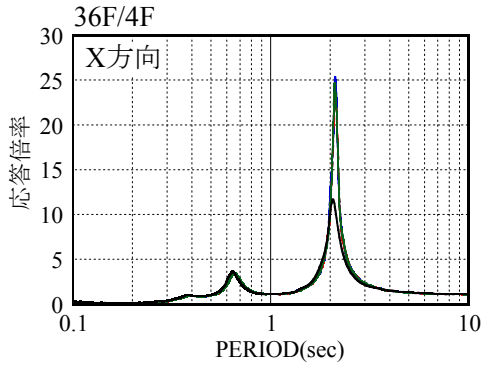


図 1.4-4 最大加速度分布


3連動地震（平均）
3連動地震（平均＋標準偏差）
4連動地震
東北地方太平洋沖地震 本震
36F/1F
X方向
応答倍率
PERIOD(sec)


3連動地震（平均）
3連動地震（平均＋標準偏差）
4連動地震
東北地方太平洋沖地震 本震
36F/1F
Y方向
応答倍率
PERIOD(sec)


36F/4F
X方向
応答倍率
PERIOD(sec)

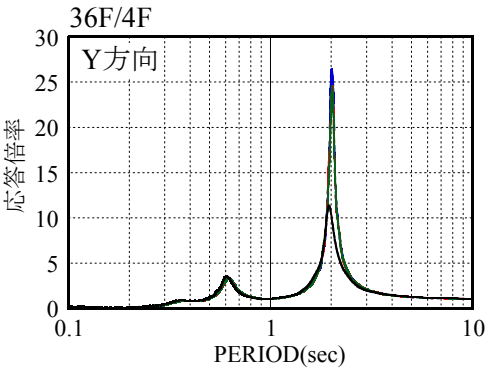

36F/4F
Y方向
応答倍率
PERIOD(sec)

図 1.4-5 伝達関数

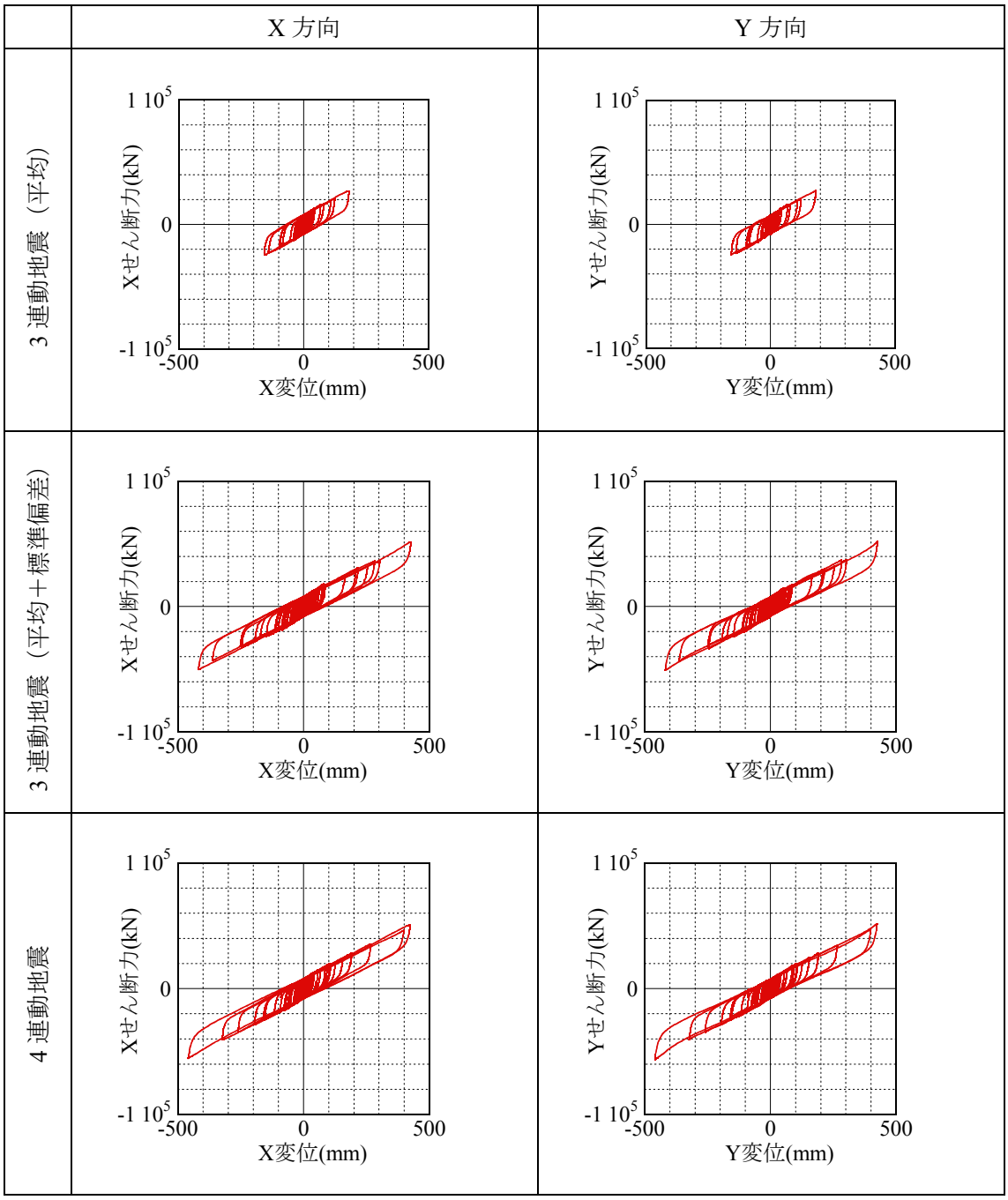


図 1.4-6 荷重変形関係

表 1.4-2 解析結果の最大値一覧

	方向	南海トラフの巨大地震			東北地方太平洋沖地震	
		3連動		4連動	本震	
		平均	平均＋標準偏差		観測結果	解析結果
36階最大加速度 (Gal)	X	55	114	117	116	104
	Y	55	111	116	92	92
4階最大加速度 (Gal)	X	45	89	88	100	79
	Y	44	85	84	75	76
免震階最大加速度 (Gal)	X	64	115	86	129	126
	Y	67	113	86	109	94
免震層最大変位 (mm)	X	183	427	459	147	161
	Y	183	426	459	132	150

1.5 まとめ

大阪および東京にて、1 棟ずつの免震建物の地震観測を継続して実施した。

大阪の建物では、計 5 件の観測記録が得られたが、免震構造が効果を発揮する入力レベルでは無かった。

東京の建物では、2010 年度 85 件、2011 年度 87 件、2012 年度 29 件、計 201 件の観測記録が得られ、免震構造としての効果が確認された。また、観測記録を入力とするシミュレーション解析を実施し、2011 年 3 月 11 日東北地方太平洋沖地震時の建物応答の再現を試みた。シミュレーション解析は、設計値通りに設定したケースに加え、免震部材の製造時のばらつき、温度変化、経年変化を考慮したケースと、地震発生当日の環境温度や建屋の状態を考慮した解析ケースを設定して解析を行った。解析結果は、X 方向についてはまだ検討の余地を残した結果となったが、Y 方向については地震発生当日の状態を考慮した解析結果は、観測記録とよい一致を示した。

東京の建物の解析モデルを用いて、南海トラフでの巨大地震時の応答を確認した。東北地方太平洋沖地震本震時の応答と比較すると、3 連動地震（平均）時には免震層の最大変位は 2 割程度大きく、免震層より上層の加速度は 0.5～1.0 倍程度となっていた。また、3 連動地震（平均＋標準偏差）や 4 連動地震発生時の最大変位は 3 倍程度になっているものの、免震層より上層の加速度は 1.0 倍～2.0 倍程度であった。

第２章　公表観測記録の整理・分析

2.1　観測記録の収集

2011～2012 年度において、学術誌や、公的機関及び民間企業による各種報告書とホームページ等の公表資料 [2-1)~2-33)]を調査し、東北地方太平洋沖地震における免震建築物の地震観測に関するデータを収集した。

収集したデータの総数は、表 2.1-1 に示す 65 棟分である。同表では、観測地、上部構造種別、階数、支承材と減衰材の構成、最大加速度、最大変位等がまとめられている。

なお、公的施設の観測結果と免震建築物の被害調査結果を報告したものとして、国土交通省国土技術総合研究所（以降、国総研）と建築研究所によるものが挙げられる。国総研と建築研究所では、地震発生翌日から 2012 年 1 月 27 日まで計 43 回にわたり被害地域の現地調査が行われてきた。2011 年 5 月に速報版の報告書 [2-1)]が、2012 年 3 月に最終報告書 [2-2)]が公表された。免震建築物については最終報告書の第 5 章の 5.5 節に被害調査や観測記録がまとめられている。収集された観測記録に関する情報の一覧を表 2.1-2 に示す。紹介されている建物は、7 棟である。これらは表 2.1-1 に含まれている。

次節以下では、以上にデータを収集した表 2.1-1 に示す 65 棟を対象に分析を行う。

表 2.1-1　データ一覧表

No.	出典	観測地	都道府県	震央距離(km)	建物用途	構造種別-階数	軒高(m)	竣工年	支承材	減衰材	設計周期(秒)	設計周期(レベル1)(秒)	設計周期(レベル2)(秒)	計測震度	加速度(cm/s^2)			免震層変位(cm)	累積変位(m)
															入力	直上階	最上階		
1	⑦	宮城県仙台市／	宮城	172	事務所	SRC-6F,B2F			HDR						381	200	209	18.1	14.6
2	③	宮城県仙台市宮城野区／A建築物	宮城	172	事務所	SRC-9F		2009	HDR	オイル					289	121	142	18.0	
3	③⑤⑥⑧	宮城県仙台市／仙台MTビル	宮城	173	事務所	RC-18F,B2F	75	1999	NRB+すべり		5.4			5.3	311	173	194	23.0	
4	⑦	宮城県仙台市宮城野区／事務所	宮城	173	事務所	SRC,S-9F,B2F	39.2	2009	NRB+LRB					5.5	289	121	142	15.1	11.0
5	⑦	宮城県仙台市泉区／	宮城	175	事務所	RC-5F			HDR						345	177	224	10.5	12.5
6	①⑥⑦⑧	宮城県仙台市青葉区青葉山／東北大学免震試験建物	宮城	177	研究所	RC-3F	9.9	1986	HDR		1.67			5.5	301	362	344	11.5	21.9
7	④⑧	福島県双葉郡／福島第一原子力発電所免震重要棟	福島	178	事務所	SRC(S)-2F	11.95	2010	NRB+LRB+すべり	オイル				6.1	756	213	185	24.0	12.3
8	⑤	宮城県仙台市	宮城	179	事務所	S-14F,B1F	59.55	2008	LRB		3.501	3.501	3.786		353	198	235	13.2	
9	④⑤	福島県双葉郡／福島第二原子力発電所免震重要棟	福島	184	事務所	SRC(S)-3F	15.7	2007	LRB+すべり	オイル				5.3	411	184	154	4.3	7.8
10	⑤⑧	宮城県仙台市／Aビル	宮城	195		S-9F		2006	NRB+LRB		2.82			5.3	299	152		8.0	
11	⑤⑧	岩手県北上市／岩手県立中部病院	岩手	205	病院	RC-6F,B1F	28.4	2009	NRB+LRB+すべり	鋼製					305	83	183	9.4	
12	⑤	茨城県那珂郡東海村／東海研究開発センター内	茨城	272	研究所	RC-5F	27	2003	NRB	鉛					305	238	203	18.9	
13	⑤⑦⑧	茨城県水戸市／水戸市超高層集合住宅	茨城	288	共同住宅	RC-21F	64.05	2001	NRB+すべり	鉛、鋼棒	3.8			5.7	402	185	181	13.9	9.0
14	②	青森県八戸市／	青森	292	事務所	SRC-10F,B1F	42.83	1998	LRB		3.37	3.37	4.02	4.7	104	122	123	2.3	3.6
15	⑤⑥⑧	茨城県つくば市／鴻池組技術研究所管理研究棟	茨城	330	研究所	RC-3F	14.3	1997	NRB	鉛、鋼棒	2.1	2.1	2.55	5.7	296	117	121	5.6	
16	⑧	茨城県つくば市／奥村組技術研究所管理棟	茨城	332	研究所	RC-4F	13.75	1986	NRB	鋼棒,オイル	1.4	1.4	2.1	5	270	148			
17	⑧	茨城県つくば市／Bビル	茨城	334		S-6F,B1F	31	2008	NRB+すべり	オイル				5.2	295	101	110	10.0	
18	②⑦	茨城県つくば市／	茨城	334	事務所	RC-7F	32.2	2010	NRB+LRB	鋼材	2.58	2.58	3.11	5.2	327	92	126	5.9	6.2
19	⑧	新潟県新潟市／Bマンション	新潟	334	共同住宅	RC-24F		2009	HDR					3.6	30	30			
20	⑦⑧	千葉県船橋市／西船橋免震社宅LRB棟	千葉	370	共同住宅	RC-4F	11.65	1992	LRB		1.66	1.66	2.03		170	101	107	2.9	4.3
21	⑦⑧	千葉県船橋市／西船橋免震社宅HRB棟	千葉	370	共同住宅	RC-4F	11.65	1992	HDR		1.55	1.55	1.9		169	149	139	4.4	6.2
22	⑦	千葉県／	千葉	370	事務所	SRC-8F			HDR+NRB						219	98	137	4.7	8.5
23	①⑥⑦⑧	千葉県船橋市／船橋竹友寮	千葉	371	共同住宅	RC-3F	10.9	1987	NRB	粘性体	2.1			4.8	150	70	75	7.8	14.0
24	⑤⑧	東京都足立区／Cビル	東京	376	共同住宅	RC-14F	41.64		NRB+LRB+すべり						173	109	165		
25	⑤⑧	東京都江戸川区／Aビル	東京	377	共同住宅	5F	15.08		NRB+すべり						119	71	85		
26	⑤	東京都江東区／芝浦工業大学豊洲キャンパス	東京	380	文教施設	S-14F,B1F	67.3	2005	NRB+すべり		5.95			4.8	118	95		11.0	
27	②	東京都台東区／	東京	382	文教施設	RC-3F,B1F	10.01	1998	HDR		2.169	2.169	2.651	4.5	100	76	100	4.1	5.8
28	①⑥⑦⑧	東京都江東区／フラッツ東陽	東京	383	共同住宅	RC(S)-12F	37.8	2008	NRB+LRB		3.52	3.52	4.57	4.8	100	53	61	6.5	8.1
29	⑧	東京都千代田区／日本大学駿河台キャンパス5号館	東京	384	文教施設	SRC-9F,B1F	31	2008	NRB+LRB	粘性流体	2.26			4.7	140	145	190	3.3	
30	⑤	埼玉県ふじみ野市／安藤建設技術研究所	埼玉	385	研究所	RC-3F	11.6	1991	LRB		1.01	1.01	1.77		76	64	46		
31	⑦⑧	東京都千代田区／	東京	385	事務所	SRC,RC-10F	29.9	1999	NRB	粘性制振壁	3.41			4.9	245	166	137	2.9	7.5
32	⑥	東京都豊島区／豊島区役所	東京	385	事務所	RC-4F,B1F,P3F	18.45	2000	NRB+すべり		2.386	2.386	2.857		95		75	3.0	
33	①⑤⑥⑧	東京都江東区／清水建設技術研究所安全安震館	東京	385	研究所	RC,S-4F	13.95	2006	NRB	オイル	5.14			5.25	204	132	89	7.7	10.9
34	①⑤⑥⑦⑧	東京都江東区／清水建設技術研究所本館	東京	385	研究所	S(RC)-6F	26.8	2003	LRB		3.5	3.5	4.03	5.25	142	73	70	7.6	9.4
35	①⑤⑥⑧	東京都江東区／清水建設技術研究所風洞実験棟	東京	385	研究所	RC(S)-2F,B1F	13.8	2006	HDR		3.12	3.12	3.72	4.75	110	52	250	7.7	11.2
36	②⑦	東京都千代田区／	東京	386	事務所	SRC-11F,B2F	44.9	2009	NRB+LRB	オイル	3.89	3.89	4.33	4.5	104	55	94	5.1	4.3
37	⑤⑧	東京都江東区／	東京	386	共同住宅	RC-36F	114	2011	NRB+LRB		4.71				129	100	116	14.2	
38	①	東京都豊島区／鹿島テラハウス南長崎	東京	387	共同住宅	RC-5F	13.7	1998	LRB+すべり		1.09	1.89	2.25	4.8	134		109	3.6	
39	⑥⑧	東京都渋谷区／代ゼミタワー	東京	389	文教施設	SRC-26F,B3F	131.1	2008	NRB	オイル	5.5			4.4	98	29	46	7.7	
40	⑦	東京都港区／慶応義塾大学三田南館	東京	389	文教施設	RC-13F,B3F		2005	NRB+すべり	オイル	4.2				65	38	59	14.2	13.0
41	⑧	東京都港区／奥村組東京本社ビル	東京	389	事務所	SRC-9F		2007	HDR	オイル				4.5	94	62			
42	⑤⑧	東京都杉並区／阿佐ヶ谷「知粋館」	東京	392	共同住宅	RC-3F	8.9	2011	NRB	オイル	2.9				89	51	87	4.0	
43	③	神奈川県川崎市／	神奈川	401	共同住宅	RC-6F								4.7	104	65	68	4.8	4.7
44	⑦	神奈川県横浜市／慶応義塾大学創想館	神奈川	403	文教施設	S,SRC,CFT-7F,B2F	30.89	2000	NRB	オイル	4.03				71	54	57	12.0	15.0
45	⑧	神奈川県川崎市／Cマンション	神奈川	403	共同住宅	RC-14F		1998	LRB					4.4	96	72			
46	⑦	神奈川県横浜市／慶應義塾大学日吉キャンパス来往舎	神奈川	403	文教施設	S-7F	27.5	2002	HDR						147	51	99	6.8	7.0
47	①⑦	東京都調布市／鹿島技術研究所音響実験棟	東京	403	研究所	RC-2F	10.2	1986	NRB	鋼棒	2			4.7	143	113	125	4.0	7.4
48	⑤⑧	東京都府中市／Dビル	東京	405		5F	14.75		LRB						97	77			
49	⑧	東京都立川市／Dマンション	東京	407	共同住宅	RC-17F		2003	LRB+すべり						69	79			
50	⑤	神奈川県横浜市／神奈川大学23号館	神奈川	410	文教施設	RC-8F,B2F	30.1	2001	NRB	鉛、鋼棒					75			6.6	
51	⑦	神奈川県／	神奈川	412		RC(S)-14F,B1F	74.3		NRB+すべり	オイル	2.14				49	42	90	9.5	7.8
52	⑧	東京都八王子市／Eビル	東京	412		RC-2F		1996	すべり・転がり	粘性					151	33			
53	⑤⑦	神奈川県横浜市／東京工業大学すずかけ台キャンパスJ2 棟	神奈川	416	文教施設	S(RC)-20F	85.3	2005	NRB	鋼製、オイル	3.79	3.79	4.38		69	70	116	9.0	
54	⑤⑧	東京都町田市／Eビル	東京	416		8F	29.28		LRB+すべり						116	110			
55	①⑦⑧	神奈川県横浜市／技術センターJ棟	神奈川	420	研究所	RC-4F	19.1	1988	すべり・転がり		1.2	1.2	2.5	4.5	97	118	143	4.2	7.2
56	②⑤	山梨県甲府市／	山梨	468	事務所	RC-8F,B1F	28.2	2002	LRB					3.9	47	37	41	1.5	
57	②	北海道釧路市／	北海道	558	事務所	SRC-9F,B1F	43.7	2000	NRB	鉛、鋼棒	4.01	4.01	4.01	2.6	12	16	19		
58	⑧	静岡県浜松市／Fマンション	静岡	598	共同住宅	RC-6F		1990	NRB	鋼棒、鉛				2.5	8	18			
59	⑧	愛知県豊田市／Gマンション	愛知	612	共同住宅	RC-14F		2007	NRB+LRB					3.3	16	22			
60	⑤	名古屋市昭和区／名古屋大学鶴舞キャンパス内	愛知	623	病院	SRC-7F,B2F	33.82	2005	NRB+すべり	U型	1.5	1.5	4.2	3.5	21	25	30	1.0	
61	⑤	名古屋市昭和区／名古屋大学鶴舞キャンパス内	愛知	623	病院	SRC-4F			NRB+すべり	U型				3.5	21	25	26	1.5	
62	⑧	大阪府大阪市／	大阪	759	事務所	SRC-8F,B1F		2008	NRB+すべり						11	13	13	0.3	
63	⑧	大阪府大阪市／Hマンション	大阪	762	共同住宅	RC-43F		2007	NRB+すべり	オイル、粘性				2.9	10	17			
64	⑧	兵庫県芦屋市／Iマンション	兵庫	773	共同住宅	RC-6F		1996	NRB	鋼棒、鉛				2.3	6	9			
65	⑧	／			事務所	S-5F,B2F	22.5	1995	NRB	鉛、摩擦	2.75			4.9	164	80	70	5.0	

出典：①事業主体②建築研究所強震観測③国総研・建研調査報告書④東電福島原子力発電所⑤2011 年度、2012 年度 AIJ 大会梗概集⑥ゼネコンホームページ⑦JSSI 応答制御建築物調査委員会⑧その他（協会誌、各社技術研究所報等）

表 2.1-2　国総研・建研調査報告書による観測結果

記号	観測地点	建物用途	建物概要	罫書き記録の有無	位置	免震層下部（基礎・地下）の計測震度	最大加速度（cm/s²）			最大層間変位(cm)			累積変位(m)
							Y	X	Z	Y	X	XY	
KA	宮城県 仙台市	事務所	SRC 造 地上 9F 地下 2F	○	9F		142	170	524				
					1F（免震上）		121	144	374	2.63	1.69*		
					B1F（免震下）	5.5、5.6 隣接(JMA)	289	251	235	13.49	14.42	15.7	10.9
KB	福島県	事務所	地上 2F		2F		155	185	621				
					1F（免震上）		176	213	516	0.6	0.66		
					B1F（免震下）		582	756	446	8.02	24.45	24.6	12.3
KC	福島県	事務所	地上 3F		3F		154	157	581				
					1F（免震上）		184	226	463	0.94	0.69		
					B1F（免震下）	5.3	411	334	324	4.24	4.34	5.81	7.79
KD	茨城県 つくば市	事務所	RC 造 地上 7F		6F		126	91	243				
					1F（免震上）	5.2、5.9（地表面・震度計）	92	76	198	0.65	0.6		
					B1F（免震下）		327	233	122	4.81	5.93	6.81	6.24
KE	東京都 台東区	文教施設	RC 造 地上 3F 地下 1F		4F		100	77	84				
					1F（免震上）		76	89	87	0.48	0.66		
					B1F（免震下）	4.5、4.9 地表面	100	79	84	3.66	4.12	4.21	5.76
KF	東京都 千代田区	事務所	SRC 造 地上 12F 地下 1F	○	12F		94	82	104				
					B2F（免震上）		55	41	62	1.43	1.28		
					B3F（免震下）	4.5	104	91	58	5.05	3.7	5.1	4.3
KG	神奈川県 川崎市	宿舎	RC 造 地上 6F		7F		86	104	34				
					1F（免震上）		58	65	49	0.79	2.26*		
					BF（免震下）	4.7、4.8 地表面	63	68	55	4.81	3.24	5.22	4.73

*ノイズあり

2.2　観測記録の整理・分析

表 2.1-1 の 65 棟を対象に、これらの地震観測データから東北地方太平洋沖地震における免震建築物の挙動について考察を行う。

(1) 収集データの内容

1) 建設地について

建設地の都道府県の内訳を図 2.2-1 に示す。東京都が 23 件と最も多く、宮城県、神奈川県の 8 件が続く。地方別では、関東地方が 42 件、東北地方が 12 件、それ以外が 11 件となっている。

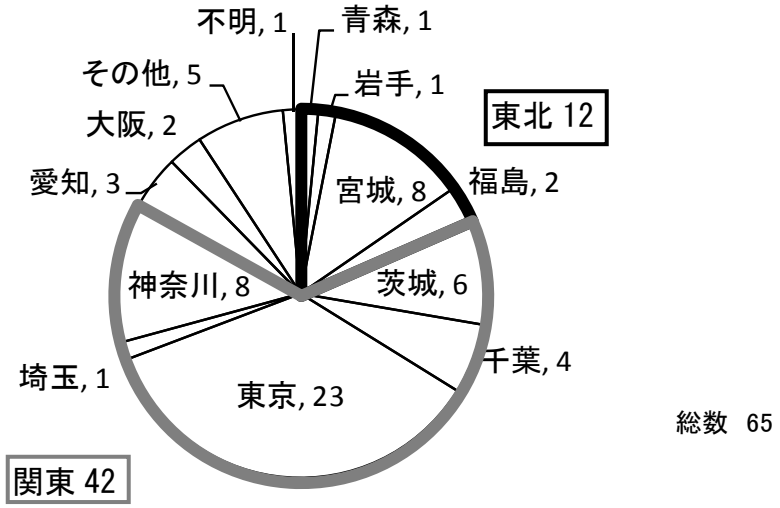


図 2.2-1　建設地の都道府県の内訳

2) 竣工年について

収集したデータを文献 2-34)の提案に従って年代別に分類した。改修の場合は、改修を行った年を採用している。竣工年による年代別の内訳を図 2.2-2 に示す。図 2.2-2 より、第 4 期に竣工した建築物が最も多いことが分かる。全免震建築物に占める第 1 期の建築物の割合は 1%程度と僅かである [2-35)]が、本調査では 8%と比較的多い。これは、免震の草創期におけるゼネコンの自社施設で観測が多いためと思われる。

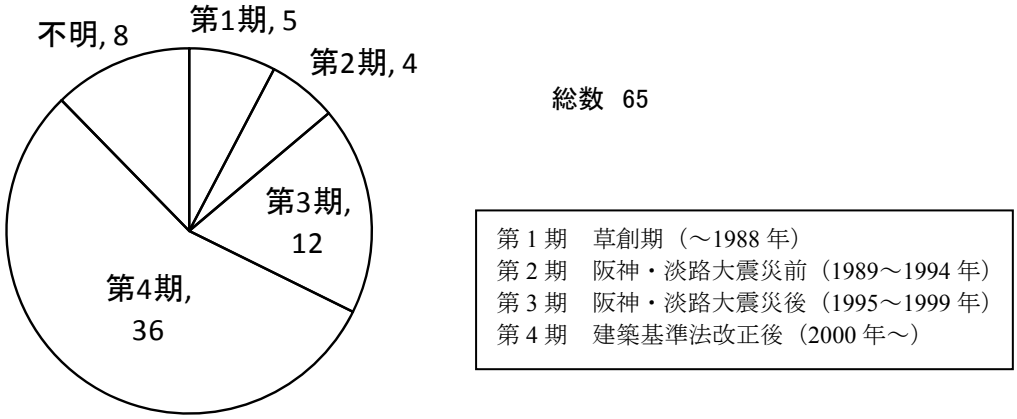


図 2.2-2 竣工年による年代別の内訳

3) 建物用途について

建物用途の内訳を図 2.2-3 に示す。免震建築物全体では共同住宅が約半数を占める [2-36)]が、庁舎を含む事務所が最も多く、共同住宅が続く。共同住宅や研究所が多いのは、収集したデータにゼネコンの自社施設での観測結果が含まれているためである。また文教施設が多いのは大学キャンパス内の施設で観測を行っている例も多いためである。

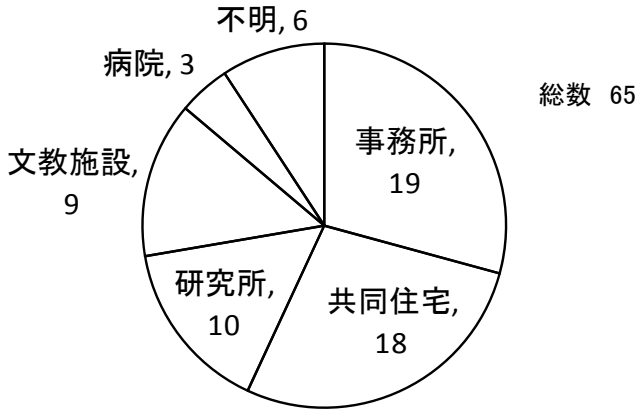


図 2.2-3 建物用途の内訳

4) 支承材の種類について

支承材の内訳を図 2.2-4 に示す。本調査では天然ゴム系積層ゴム単独の使用が最も多く、次に天然ゴム系積層ゴムとすべり支承との組み合わせが続く。以降、支承材の違いによる影響を調べる際は、大きく以下のように分類する。

NRB　：天然ゴム系積層ゴム単独、天然ゴム系積層ゴムとすべり支承の併用
LRB　：鉛プラグ入り積層ゴム単独、鉛プラグ入り積層ゴムと天然ゴム系積層ゴムまたはすべり支承、またはその両方との併用
HDR　：高減衰積層ゴム単独、高減衰積層ゴムと天然ゴム系積層ゴムとの併用
すべり：すべり・転がり単独

またセミアクティブ免震が 2 件含まれる。2 棟とも上記の分類の NRB に含まれる。

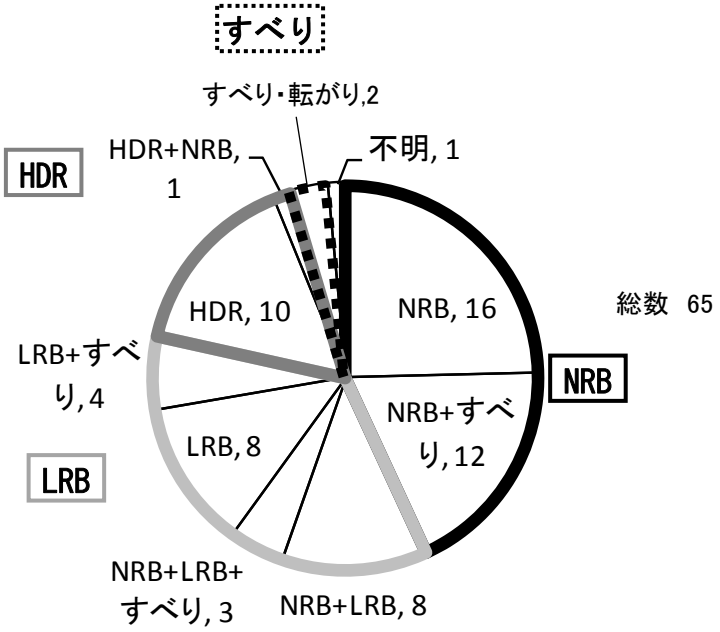


図 2.2-4　支承材の内訳

5) 建物用途と支承材について

建物用途毎の支承材の内訳を図 2.2-5 に示す。事務所と共同住宅では LRB の占める割合が最も大きく、研究所、文教施設、病院では NRB の占める割合が最も大きい。

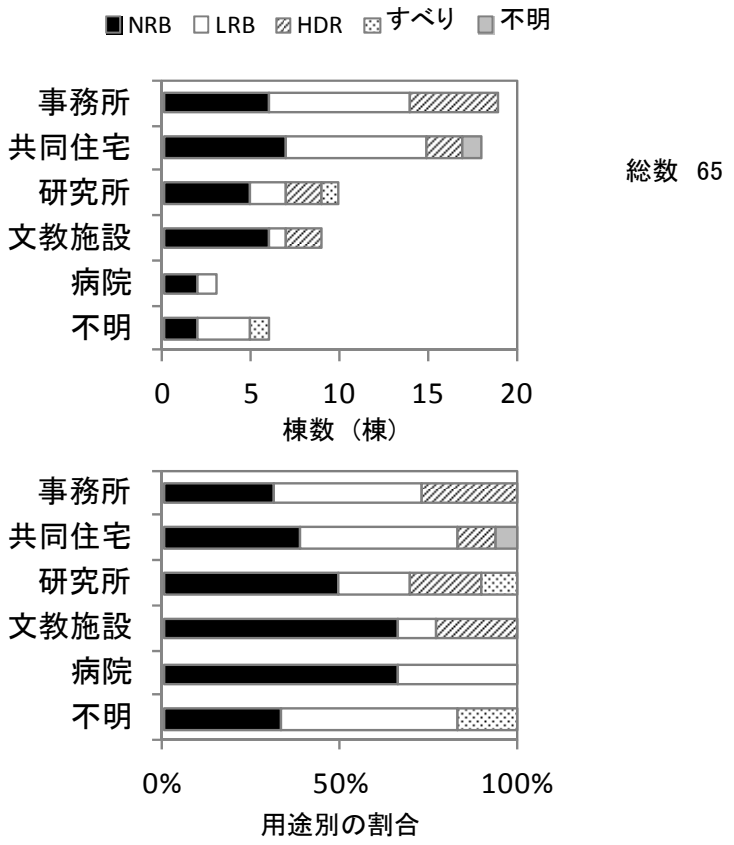


図 2.2-5　建物用途と支承材の関係

6) 軒高と設計周期について

図 2.2-6 に軒高と設計周期の関係を示す。2.1 項に示す参考文献で軒高が不明な場合、別の文献[2-37)~2-41)]および一般財団法人日本建築センター機関誌「ビルディングレター」[2-42)~2-48)]に記載の値を採用した。設計周期が複数レベルある場合、レベル毎に示した。設計周期は軒高が高くなる程長くなる傾向がみられるが、高さ 40m 以上ではその傾向が小さくなる。

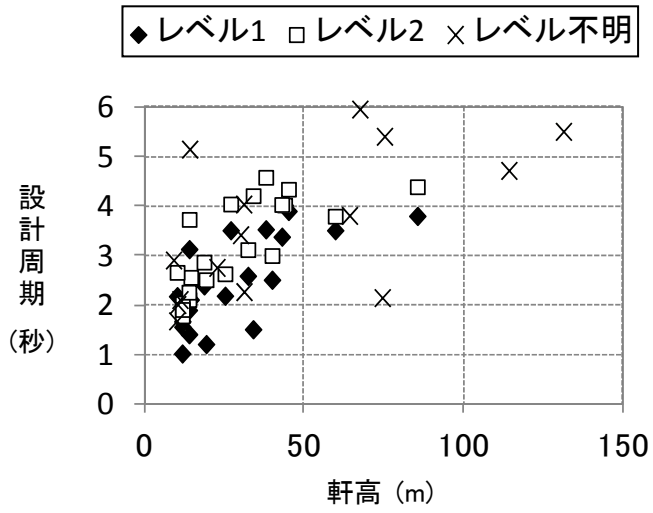


図 2.2-6　軒高と設計周期の関係

7) 竣工年と設計周期について

竣工年と設計周期との関係を図 2.2-7 に示す。竣工年が新しいほど、設計周期が長くなる傾向が見られる。理由としては、積層ゴムの高面圧化や上部構造の高層化等が考えられる。1990 年前半の免震建築物には、レベル 2 で設計周期が 2 秒以下の建築物も含まれる。

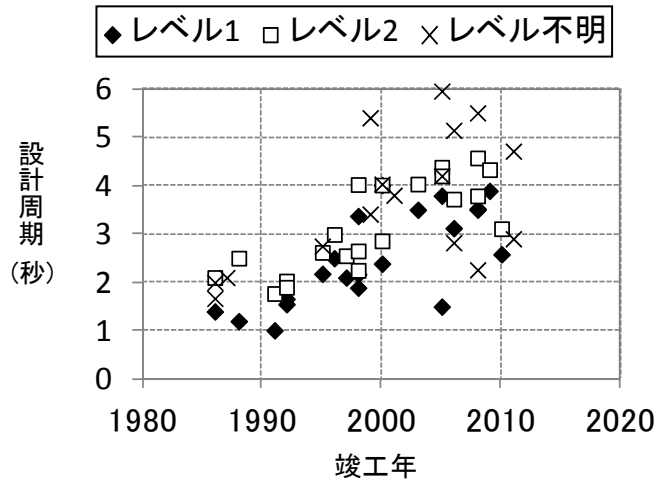


図 2.2-7　竣工年と設計周期

(2) 収集データの分析

1) 入力加速度について

震央距離と入力加速度の関係について調べた。ここで、震央距離は、詳細な所在地が不明な場合（○○区や○○市まで)、区役所や市役所との距離を震央距離とした。入力加速度は免震層下の水平加速度の２方向の大きい方と定義する。震央距離と入力加速度の関係を図 2.2-8 に示す。入力加速度は 6～756 cm/s^2 の範囲である。東北地方と茨城県の記録は震央距離 350km 以内に含まれる。震央距離 350km 以内では 2 点を除き、入力加速度が 250cm/s^2 を超えている。以降、2 点を除く震央距離 350km 以内の地域を「（東北・茨城）地域」、震央距離 350km 以上の地域を「（東北・茨城）地域以外」と呼ぶこととする。

震央距離と計測震度との関係を図 2.2-9 に示す。計測震度は、公開情報で 6 弱、5 強等と書かれている場合、平均値（例：6 弱→5.75、5 強→5.25）とした。計測震度は震央距離が小さい程大きくなり、大きい程小さくなる傾向が見られる。

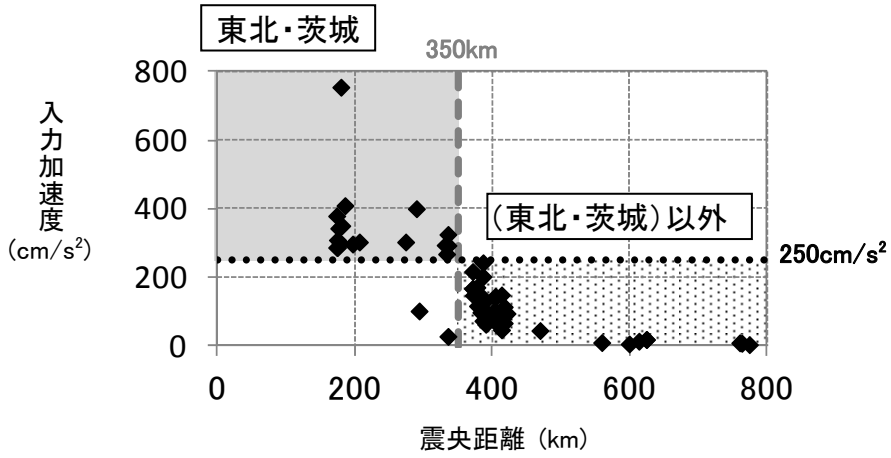


図 2.2-8　震央距離と入力加速度の関係

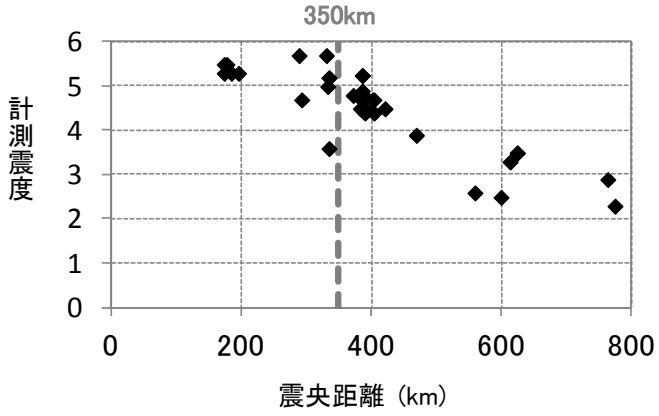


図 2.2-9　震央距離と計測震度の関係

各建設地の入力加速度波形をみると、宮城県と岩手県では主要動が 2 回あるが、関東以西では 1 回である。青森県と福島県ではその中間的な時刻歴波形であった。一例として各地の時刻歴を文献 2-21), 2-30), 2-49)から引用して図 2.2-10 に示す。観測記録時間は 5 分程度またはそれ以上継続する記録が多い。文献 2-21)でつくば市と新潟市が比較されており、震央距離はほぼ等しいが、加速度は大きく異なることが示されている。

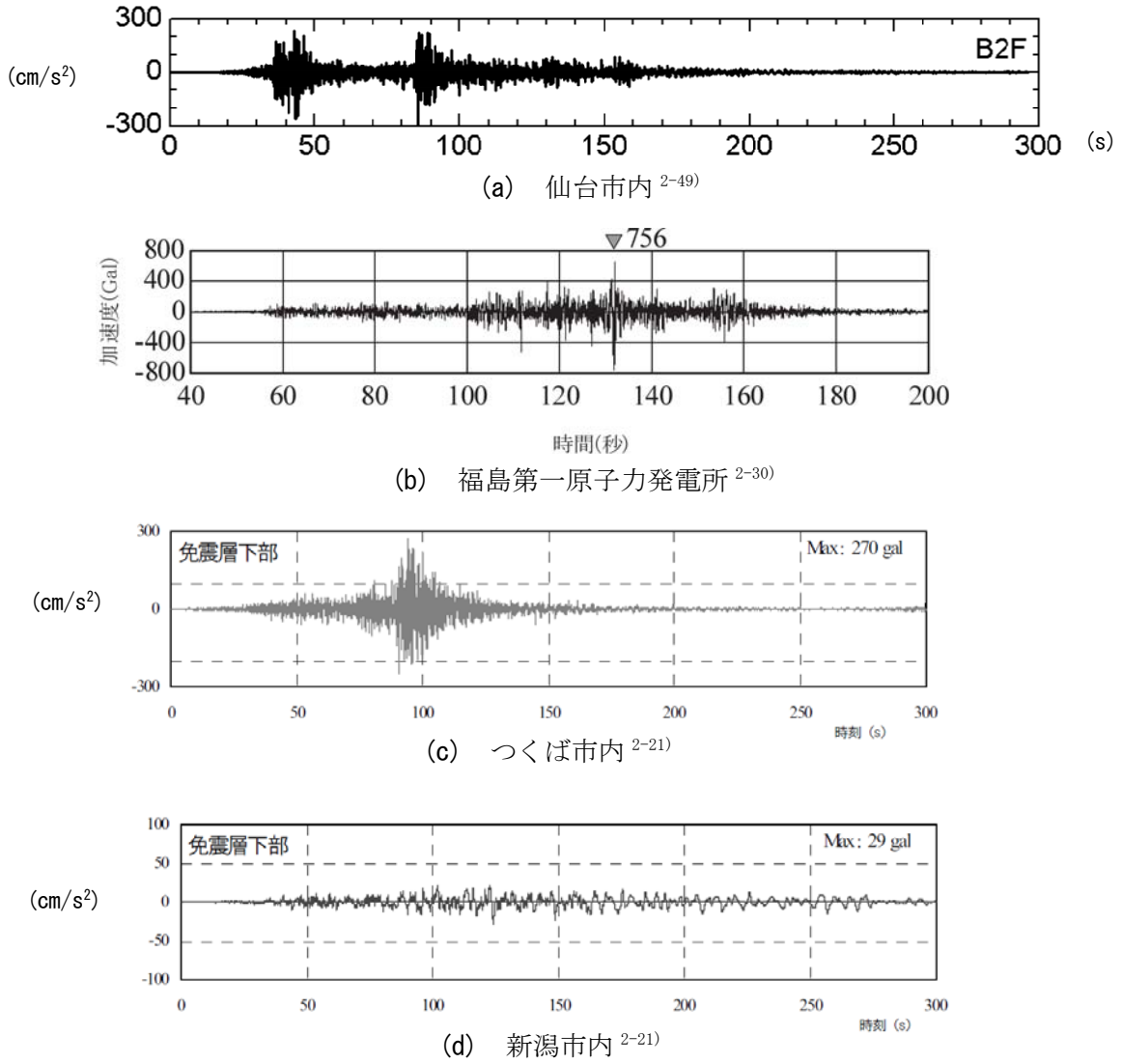
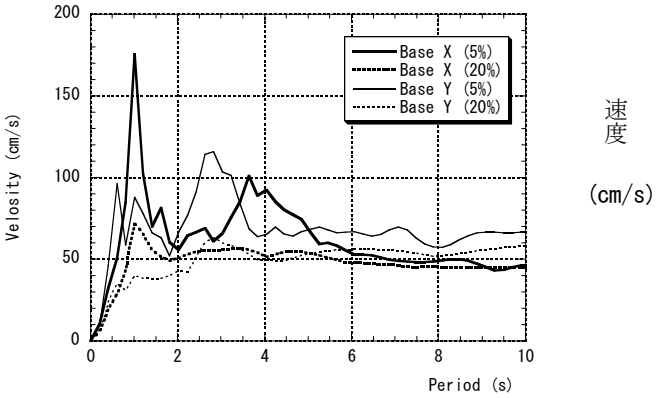
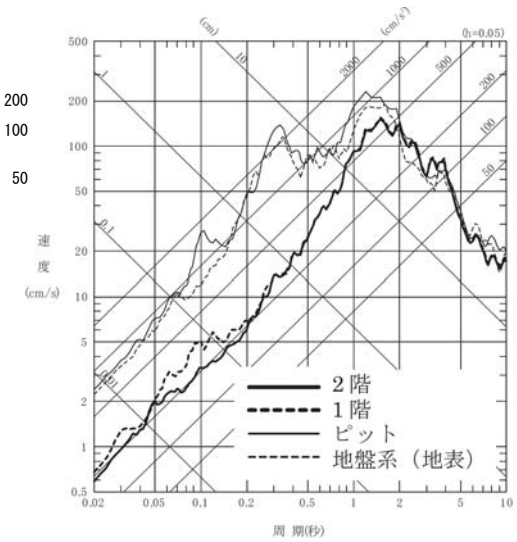


図 2.2-10 入力加速度時刻歴

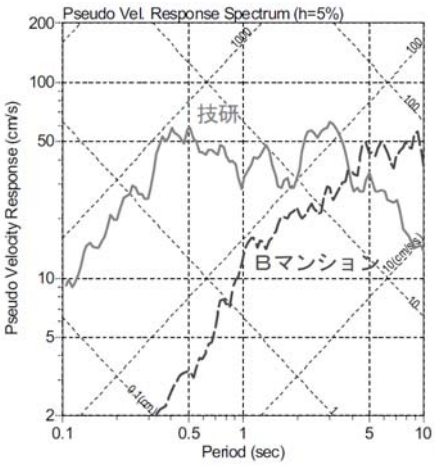
擬似速度応答スペクトルの例を文献 2-15), 2-21), 2-30),2-49)より引用して図 2.2-11 に示す。仙台市やつくば市では、速度一定域において 50cm/s 程度、ピークでは 80～100cm/s 程度である。福島第一原子力発電所ではピークが 200cm/s を超えていた。茨城県以外の関東においては 30～40cm/s 程度である。つくば市と新潟市のは震央距離はほぼ等しいが、応答スペクトルは大きく異なっている。断層最短距離が異なるためと考えられる。



(a)　仙台市内 [2-15)]

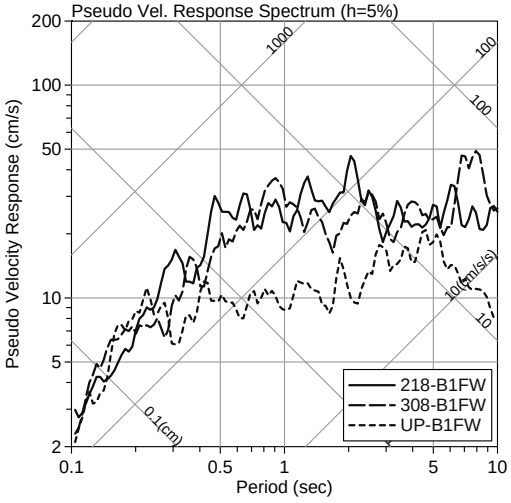


(b)　福島第一原子力発電所 [2-30)]



※技研は
つくば市内、
Bマンションは
新潟市内である

(c)　つくば市内と新潟市内 [2-21)]



(d)　東京都内 [2-49)]

図 2.2-11　擬似応答速度スペクトル

2) 入力加速度と応答加速度の関係

免震層直上階および観測位置の中での最上階（以降、直上階および最上階）の加速度（以降、応答加速度と呼ぶ。）の最大値と入力加速度の最大値との関係を図 2.2-12 に示す。観測値が水平 2 方向で得られている場合、応答加速度は入力加速度が大きい方の方向の値とした。直上階、最上階共、入力より小さくなる建物が多い。最上階でも概ね 250cm/s^2 で頭打ちとなり、入力加速度が大きくなるほど応答低減効果が大きくなる傾向が見られる。入力加速度が 100cm/s^2 程度と比較的小さい場合、最上階が入力より若干増幅する建物も見られた。一方、入力加速度が 300 cm/s^2 程度でも増幅している建物がある。これは、設計周期 2 秒未満の初期の免震建物であるが、最上階では隣接の同規模耐震建物の半分以下に応答が低減されている [2-7)等]。

入力加速度の最大値と直上階の応答倍率（=応答加速度÷入力加速度）の関係を 2.2 (1), (4)で示した支承材の分類に従って、図 2.2-13 にプロットした。NRB については特にオイルダンパーまたは粘性ダンパーなどの流体系ダンパーを併用した場合を区別した。セミアクティブ免震 2 件はいずれも NRB と流体系ダンパーの併用であり、さらに区別して示す。セミアクティブ免震の結果は入力加速度が比較的小さくても、応答倍率が小さくなっている。

図 2.2-14 に上下方向の入力加速度の最大値と応答倍率の関係を示す。上下方向の入力加速度は最大で 446cm/s^2 である。（東北・茨城）地域では 120cm/s^2 を超え、（東北・茨城）地域以外では一部を除き、120cm/s^2 以下であった。応答倍率は直上階では概ね 1 前後であるのに対し、最上階では 0.74～4.3 とばらつき、特に入力加速度が小さいほどばらつきが大きい。上下免震建物が 1 件含まれており、応答倍率は最も小さくなった。

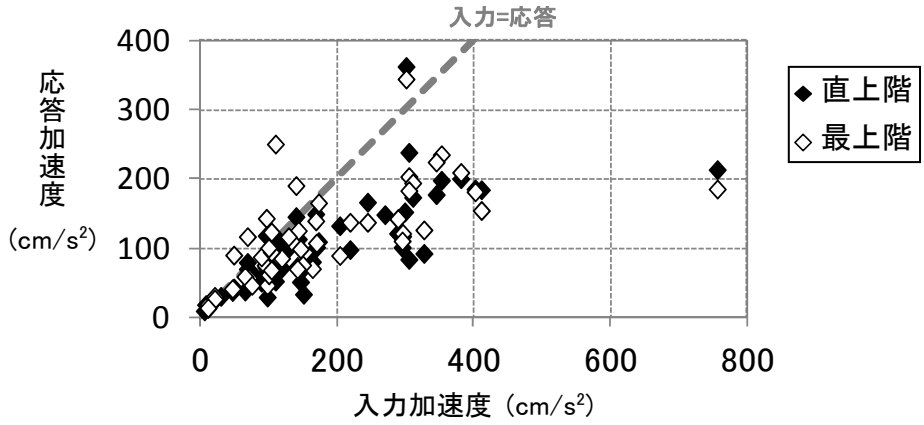


図 2.2-12　入力加速度と応答加速度（水平）

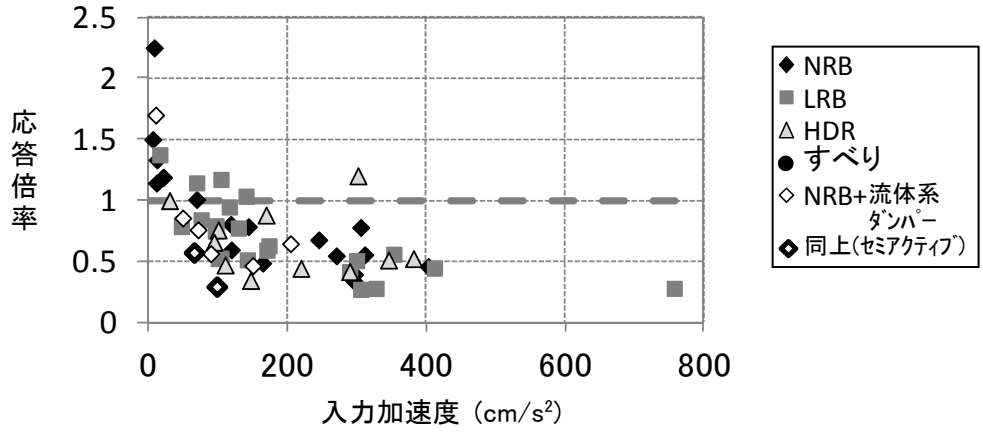


図 2.2-13　入力加速度と直上階応答倍率（水平）

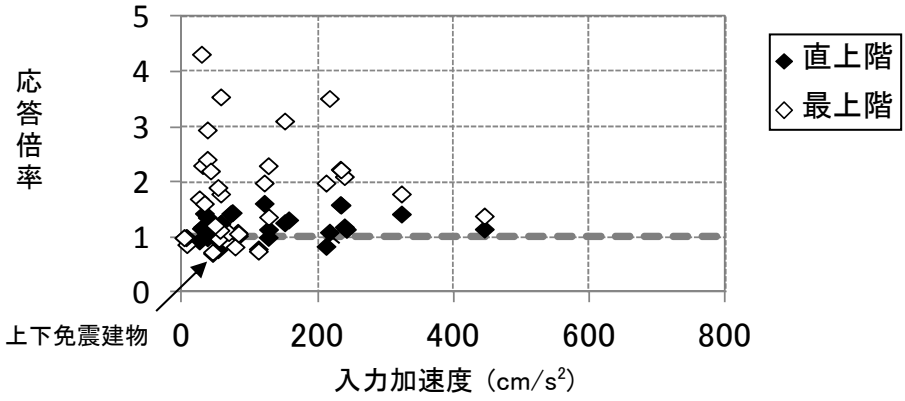


図 2.2-14　入力加速度と応答倍率（上下）

3) 震央距離と応答倍率の関係

震央距離と応答倍率との関係を図 2.2-15 に示す。これより、震央距離が大きくなるほど、応答倍率は大きくなる傾向が見られる。これは、図 2.2-8 に示した通り、震央距離が大きくなるほど入力加速度が小さくなる傾向に対応するものである。すなわち、震央に近い「(東北・茨城) 地域」では入力加速度が大きいため、応答倍率が小さくなり、一方、震央から遠い「(東北・茨城) 地域以外」では、入力加速度が小さいため、免震効果が明確に見られないことが分かる。

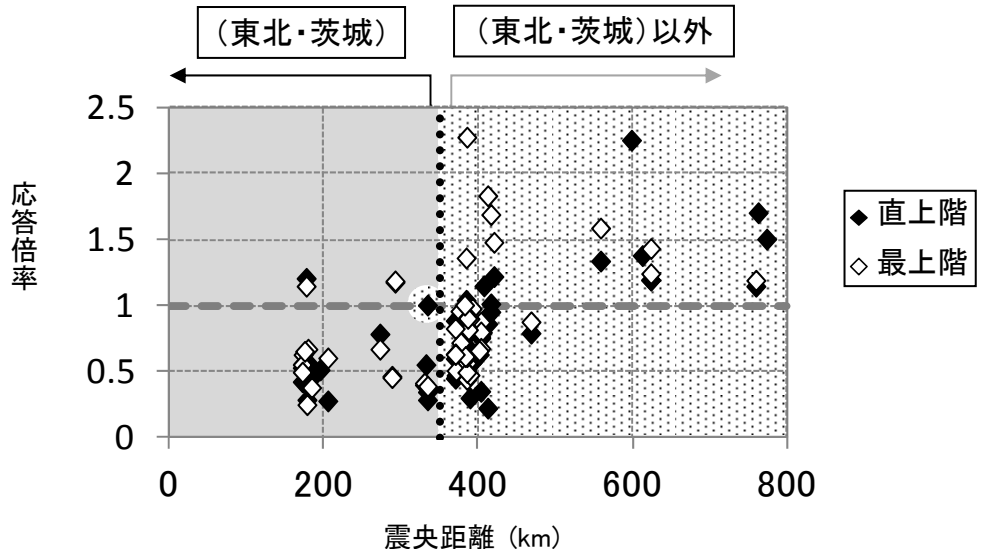


図 2.2-15　震央距離と応答倍率の関係

4) 軒高と増幅率の関係

軒高と直上階と最上階の最大加速度応答の比（以降、増幅率）の関係を調べた。軒高と増幅率の関係を地域別に図 2.2-16 と図 2.2-17 に示す。「（東北・茨城）地域」では 1 点を除き、1.0 付近でありほとんど増幅していない。「（東北・茨城）地域以外」は、1.0 よりやや大きい点が多くなり、軒高が大きくなると増幅率も若干大きくなる。

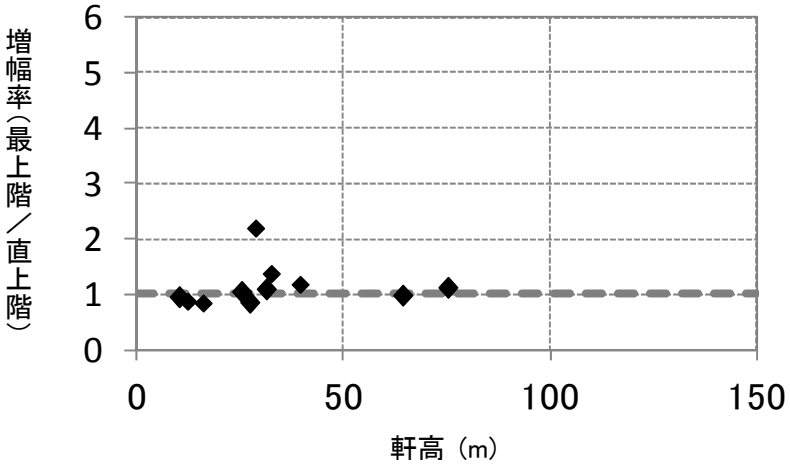


図 2.2-16　軒高と増幅率の関係　「（東北・茨城）地域」

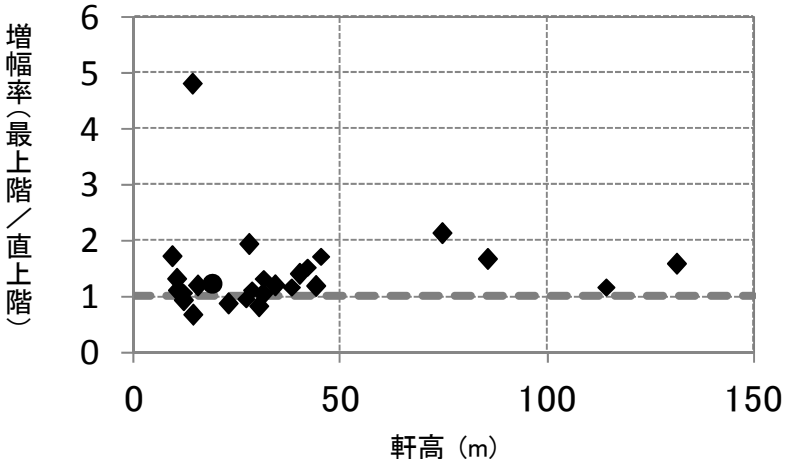


図 2.2-17　軒高と増幅率の関係　「（東北・茨城）地域以外」

5) 入力加速度と免震層変位との関係

入力加速度と免震層変位との関係を図 2.2-18 に示す。ここで、免震層変位は、観測値が水平 2 方向ある場合、大きい方の値を採用した。なお、文献によっては、各方向の最大値と 2 方向の合成の最大値が混在し、入力加速度と変位の方向は一致していない可能性もある。

図 2.2-18 より入力加速度が大きい程、免震層変位が大きくなる傾向がある。「（東北・茨城）地域」では 5cm 以上であり、本調査での最大値は約 24cm であった。「（東北・茨城）地域以外」は 5cm 付近が多い。

支承材による違いを見ると、NRB はややばらつきが大きく、HDR や LRB は（LRB は中間層免震の 1 棟を除くと）ややばらつきが小さく、入力加速度とともに、免震層変位が大きくなる傾向が見られる。NRB において流体系ダンパーを用いた場合、免震層変位はやや大きくなる傾向が見られる。

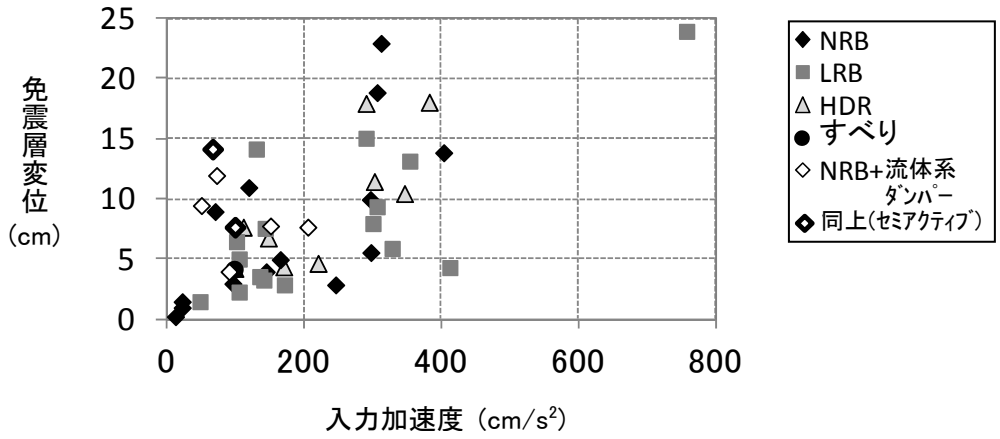
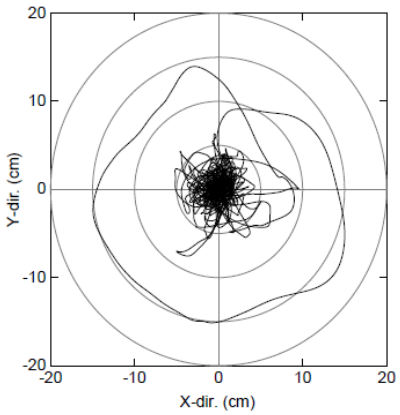
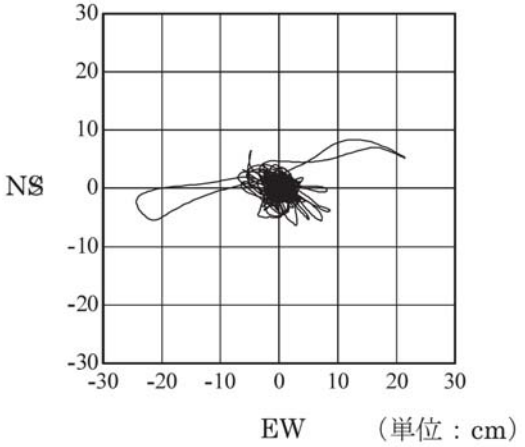


図 2.2-18　入力加速度と免震層変位の関係

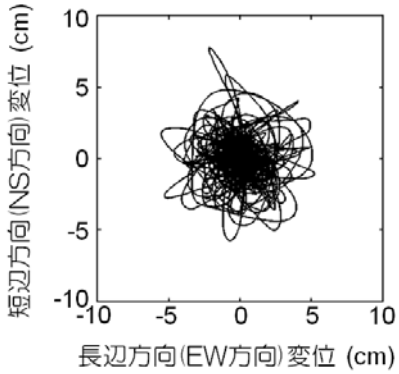
変位履歴の例を文献 2-15), 2-26), 2-30)より引用して図 2.2-19 に示す。大半は(c)のようにランダムな軌跡を描くが、(a)や(b)のように 1 周期大きく動き、真円に近い軌跡や 1 方向に大きい軌跡を描く物もあった。(a)仙台市では 90 度の位相差で XY 方向に同程度の地震動が、(b)福島第一原子力発電所は EW 方向が特に大きい地震動が作用したためと考えられる。変位履歴は、変位計や加速度の積分によって算出されたものが多いが、同時にけがき計が設置されている建物もあり、けがき計で変位の概要がわかることが確認されている [2-50) 等]。



(a) 仙台市内 [2-15)]



(b) 福島第一原子力発電所 [2-30)]



(c) 船橋市内 [2-26)]

図 2.2-19　変位履歴

6) 設計周期と免震層変位との関係

設計周期と免震層変位との関係を地域別に図 2.2-20、図 2.2-21 に示す。2.1 の公開情報の参考文献内で設計周期が不明な場合、別の文献[2-37)~2-41)]および（財）日本建築センター機関誌「ビルディングレター」[2-42)~2-48)]の値を採用した。ここでの設計周期は、その算出時に用いた変位がなるべく観測された免震層変位に近い周期とした。図 2.2-20、図 2.2-21 より設計周期が長い程、免震層変位が大きくなる傾向がある。NRB において流体系ダンパーを用いた場合、免震層変位がやや大きくなる傾向が見られる。

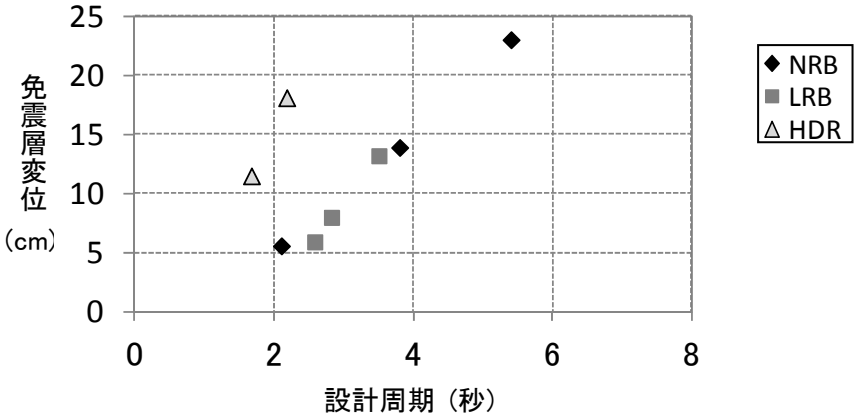


図 2.2-20　設計周期と免震層変位の関係　「（東北・茨城）地域」

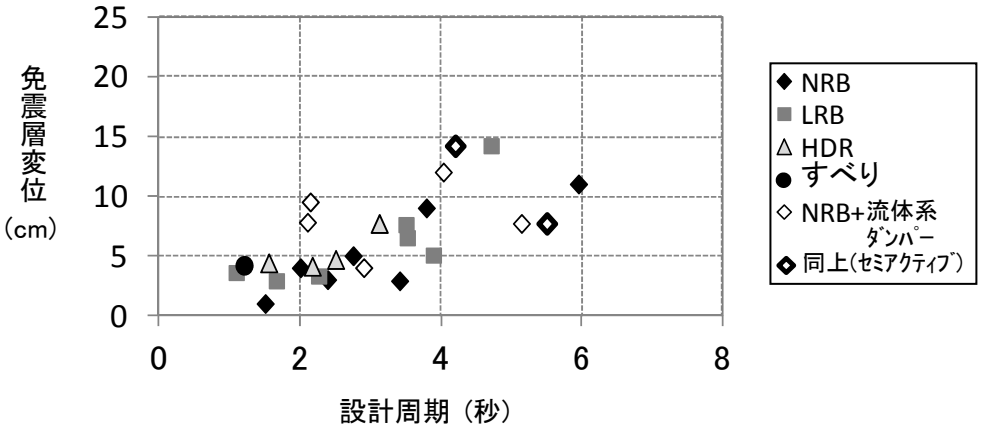


図 2.2-21　設計周期と免震層変位の関係　「（東北・茨城）地域以外」

7) 設計周期と応答倍率との関係

設計周期と直上階応答倍率との関係を地域別に図 2.2-22、図 2.2-23 に示す。ここでの設計周期は「6) 設計周期と免震層変位との関係」と同じものである。これより、設計周期が長い程、応答倍率が小さくなる傾向が見られる。応答倍率は NRB において流体系ダンパーを用いた場合とそれ以外とで、違いはほとんど見られない。

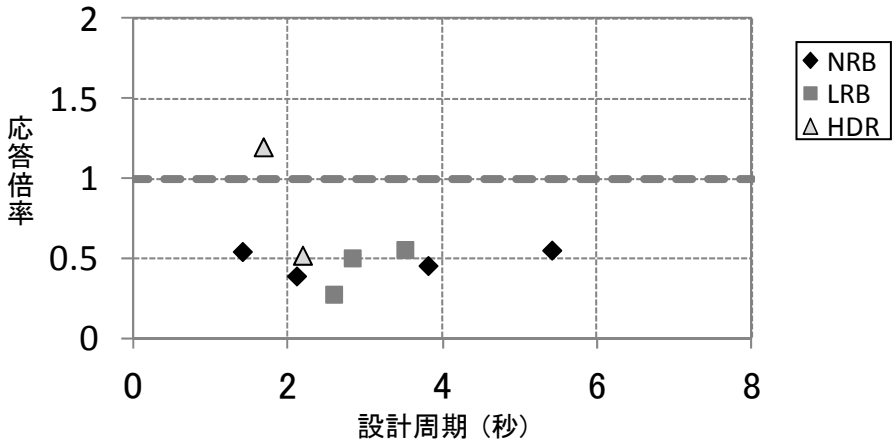


図 2.2-22　設計周期と応答倍率の関係（直上階）　「（東北・茨城）地域」

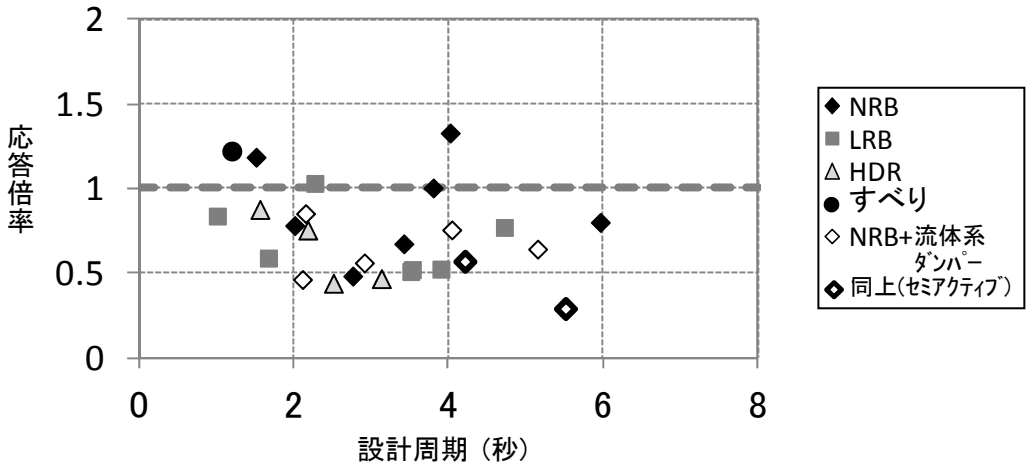


図 2.2-23　設計周期と応答倍率の関係（直上階）　「（東北・茨城）地域以外」

8) 累積変位について

入力加速度と累積変位の関係を図 2.2-24 に示す。入力加速度が大きくなる程、累積変位は大きくなる傾向があり、本調査では最大で 22m であった。NRB において流体系ダンパーを用いた場合、入力加速度が 100cm/s^2 前後でも累積変位が 12～15m とやや大きくなっており、最大変位と同様の傾向が見られる。

最大変位と累積変位との関係を図 2.2-25 に示す。累積変位は最大変位の 50～200 倍の範囲に分布しており、平均して 100 倍程度となっている。最大変位と同様に、NRB と流体系ダンパーの併用では、入力加速度が比較的小さくても累積変位がやや大きくなる建物もあった。

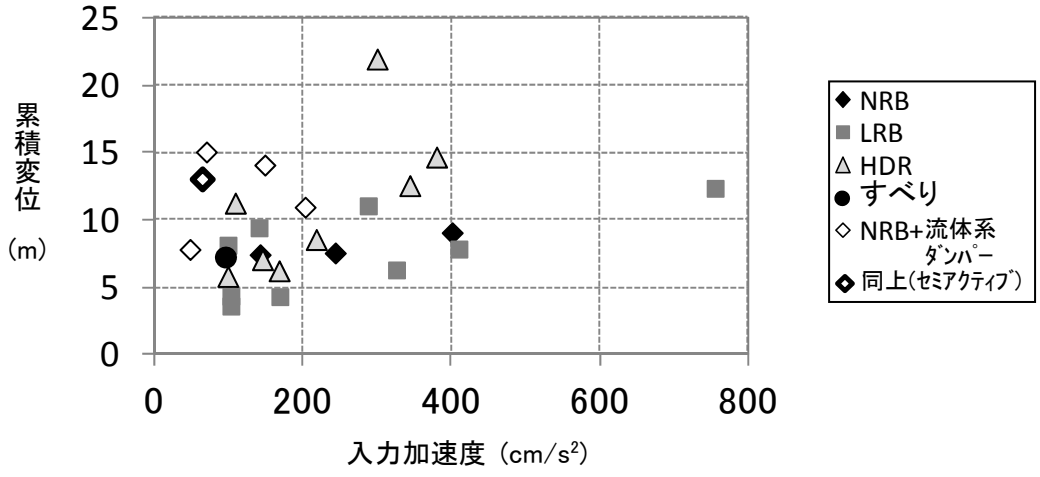


図 2.2-24　入力加速度と累積変位の関係

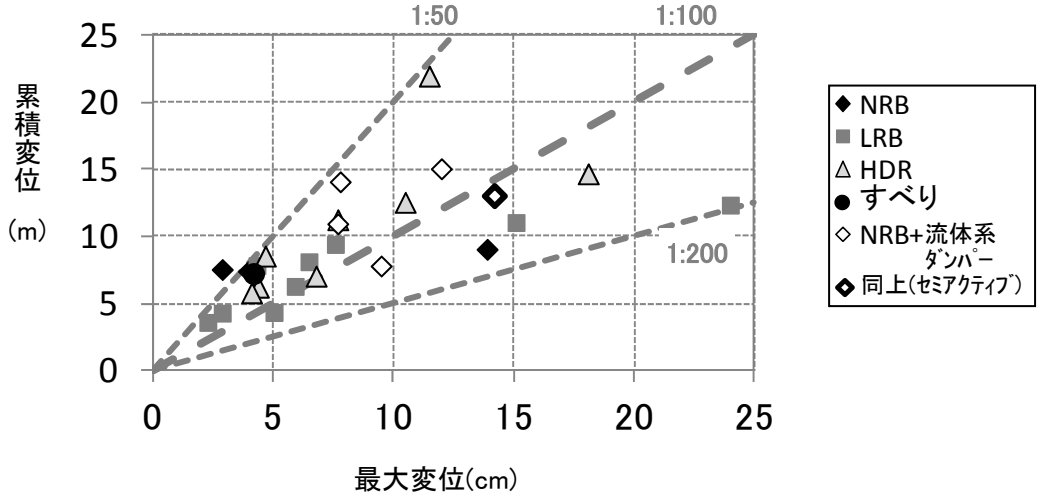


図 2.2-25　最大変位と累積変位

2.3 まとめ

表 2.1-1 に示すデータを収集し、これらに基づき東北地方太平洋沖地震による免震建築物の地震時挙動を分析した。データの総数は 65 であり、その内関東は 42、東北は 12 であった。建物用途は事務所が最も多く、続いて共同住宅であった。支承材は天然ゴム系積層ゴム単独やすべり支承との併用が半数近くを占めた。竣工年では 2000 年以降の建築物が最も多い。しかし 1988 年以前の割合も比較的多く、固有周期は 2 秒以下の建築物も含まれる。これは今回収集したデータに初期の免震でゼネコンが自社の施設で観測しているデータが多く含まれているためであると考えられる。収集したデータの分析結果から以下の知見を得た。

- 免震層下の水平加速度は 6～756 cm/s^2 の範囲であり、震央距離 350km を境界に 250cm/s^2 を超えるデータとそれ以下とに大きく分けることが出来る。
- 免震層下の水平加速度が大きくなっても、免震層直上階と最上階の水平加速度は概ね 250 cm/s^2 で頭打ちとなった。最上階でも水平加速度が免震層下より小さくなるケースが多かった。免震層下の水平加速度が 100 cm/s^2 程度で比較的小さい場合、最上階が免震層下より若干増幅するケースも見られた。
- 入力加速度が大きい程、免震層の変位は大きくなる傾向が見られた。免震層の変位は震央距離 350km 以内の「(東北・茨城) 地域」では 5～24cm、震央距離 350km 以上の「(東北・茨城) 地域以外」では 5cm 前後の物が多いが、天然ゴム系積層ゴムと流体系ダンパーを組み合わせた場合、5cm よりもやや大きくなる傾向が見られる。
- 免震層の変位の最大値は支承材の種類によりばらつきに違いが見られた。天然ゴム系積層ゴムは、すべり支承やダンパーと組み合わされて用いられるため、それの組み合わせに応じて、免震層の特性が異なるため、免震層の変位の差異が大きくなると考えられる。
- 変位履歴で一部特徴的な軌跡が見られた。免震部材の維持管理には最大変形量を知ることが重要であるのは言うまでもないが、変位履歴も重要な情報である。
- 変位履歴は、変位計の記録または加速度記録の積分により免震層の変位履歴を得たが、罫書き変位計でも同様の情報を得る事が出来ため、今後は、全ての免震建築物に罫書き変位計を取り付け、免震層の変位状況が把握できるようになれば、免震建築物の地震時挙動は飛躍的に解明される。
- 設計周期が長い程、直上階の応答倍率は若干小さくなり、免震層の変位は大きくなる傾向が見られた。
- 累積変位は最大変位の約 100 倍であった。天然ゴム系積層ゴムと流体系ダンパーを組み合わせた場合、入力が比較的小さくても累積変位が 12～15m となることもあった。

参考文献

2-1) 国土交通省国土技術政策総合研究所、独立行政法人建築研究所：平成 23 年東北地方太平洋沖地震による建築物被害第 1 次調査、2011.8

2-2) 国土交通省国土技術政策総合研究所・独立行政法人建築研究所：平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震被害調査報告、2012.3

2-3) 建築研究所の強震観測　http://smo.kenken.go.jp/ja、（参照 2012/10/3）

2-4) 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2、2011.8

2-5) 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2、2012 年 9 月

2-6) 東京電力ホームページ、http://www.tepco.co.jp/cc/press/11092910-j.html、（参照 2012/10/3）

2-7) 清水建設ホームページ、http://www.shimz.co.jp/theme/earthquake/effect. html、（参照 2012/10/3）

2-8) 大成建設ホームページ、http://www.taisin-net.com/solution/taiseis_eye/87lvn7000001579e.html、（参照 2012/10/3）

2-9) 竹中工務店ホームページ、http://www.takenaka.co.jp/news/2011/07/03/ index. html、（参照 2012/10/3）

2-10) 鴻池組ホームページ、http://www.konoike.co.jp/et/detail/000562.html、（参照 2012/10/3）

2-11) 芝浦工業大学ホームページ、http://www.eq.db.shibaura-it.ac.jp/ Mensin/ index.shtml、（参照 2012/10/3）

2-12) 神奈川大学ホームページ、http://f0303176.yb12.kanagawa-u.ac.jp/TEDCOM/3_eqdata/index.htm、（参照 2012/10/3）

2-13) 東北地方太平洋沖地震による神奈川県の震度分布・観測記録 http://www.serc.titech.ac.jp/~kasailab/acceleration.pdf、（参照 2012/10/3）

2-14) 第 97 回建築物理研究センター講演会「東北地方太平洋沖地震における建物強震記録」、http://www.serc.titech.ac.jp/~kasailab/20110927/sercseminar　20110927.html、（参照 2012/10/3）

2-15) 日本免震構造協会：応答制御建築物調査委員会報告書、2012.1

2-16) 秦一平：駿河台・船橋キャンパスの地震観測結果（特集号 2011 年東北地方太平洋沖地震被害調査報告）、日本大学理工学部理工学研究所研究ジャーナル (125)、pp.67-70、2011.8

2-17) 川島学他：東北地方太平洋沖地震における関東地域の免制震建物の挙動：三井住友建設技術開発センター報告、第 9 号、2011.9

2-18) 森下真行他：地震観測結果に基づく免震構造物の動特性について、前田建設技術研究所報 Vol.52、2011.10

2-19) 山本雅史：観測記録に基づく免震建物の評価、竹中技術研究報告、No.67、2011.12

2-20) 井川望他 : 東北地方太平洋沖地震における地震観測建物の観測記録、鴻池組技術研究報告、p.45-48、2011.7

2-21) 上寛樹他 : 免震建物の地震観測－2011 年東北太平洋沖地震における免震建物の地震応答－、奥村組技術研究年報 No.37、pp.57-62、2011.8

2-22) 半澤徹也他：2011 年東北地方太平洋沖地震における東京湾沿岸の免震構造物の挙動、清水建設研究報告、第 88 号、2012.1

2-23) 欄木龍大他：東北地方太平洋沖地震における免震・制振建物の効果観測記録の分析に基づく免震・制振効果の検証、大成建設技術センター報、第 44 号、pp.05-1-8、2011.12

2-24) 鹿島俊英他：2011 東北地方太平洋沖地震における免震建物の挙動、振動技術 第 24 号、pp.9-13、2011. 10
2-25) 猿田正明他：2011 東北地方太平洋沖地震における東北大学免震実証試験建屋の挙動、振動技術 第 24 号、pp.14-16、2011. 10
2-26) 山本雅史:東北地方太平洋沖地震における免震建物の観測記録､振動技術 第 24 号､pp. 17-21、2011. 10
2-27) 高橋治他：阿佐ヶ谷「知粋館」、MENSHIN、No.73、pp.15-18、2011.8
2.28) 古澤健他：東北地方太平洋沖地震における免震構造の観測記録と居住者のアンケート調査及び応急点検、MENSHIN、No.73、pp.23-28、2011.8
2-29) 仲山雅一他：岩手県立中部病院、MENSHIN、No.74、pp.14-17、2011. 11
2-30) 土方勝一郎他：東北地方太平洋沖地震における福島原子力発電所「免震重要棟」の挙動について、MENSHIN、No.75、pp.21-26、2012.2
2-31) 小室努他：仙台 MT ビル、MENSHIN、No.75、pp.35-38、2012.2
2-32) 平成 22 年度 国土交通省建築基準整備促進事業　27-3 長周期地震動に対する免震建築物の安全性検証方法に関する検討　調査報告書、2011.3
2-33)　2011 年東北地方太平洋沖地震災害調査速報、日本建築学会、2011.7
2-34) 日本建築学会：長周期地震動と建築物の耐震性、2007
2-35) 日本免震構造協会運営委員会：2010 年度免震制振建物データ集積結果、MENSHIN No.73、pp.29-33、2011. 8
2-36) 田中佑治他：国内免震建物データベース構築と現状分析、日本建築学会技術報告集、第 17 巻(第 35 号)、 pp.79-84、2011.2
2-37) 広野衣美他：高密度強震観測に基づく免震建物の立体振動特性の分析と分析支援ツールの開発、日本建築学会学術講演梗概集、pp.965-966、2007.8
2-38) 大森一紘他：免震構法開発に関する研究（その３ 技術研究所研究等の免震構法)、日本建築学会大会梗概集、PP.727-723、1990.10
2-39) 広瀬景一他：日本大学理工学部駿河台校舎 5 号館の免震改修、MENSHIN No.60、pp.7-11、2008.5
2-40) 大竹透他：免震建築紹介 芝浦工業大学豊洲キャンパス--軟弱地盤に建つ L 字型免震建築物の構造設計、MENSHIN、No.50、pp.4-8、2005.11
2-41) 藤波健剛他：免震建築訪問記 慶應義塾大学（三田）南館、MENSHIN、No.54、pp. 23-28、2006.11
2-42) 日本建築センター性能評定シート 1987　BCJ-免 2：奥村組筑波研究所管理棟新築工事、ビルディングレター、pp.155-156、1987.3
2-43) 日本建築センター性能評定シート 1989　BCJ-免 36：（仮称）社員施設新築工事、ビルディングレター、pp.87-90、1989.12
2-44) 日本建築センター性能評定シート 1996　BCJ-免 184:釧路合同庁舎､ビルディングレター、pp.77-78、1996.10
2-45) 日本建築センター性能評定シート 1997　BCJ-免 231：（仮称）㈱鴻池組筑波技術研究所新築工事、ビルディングレター、pp.117-118、1997.3

2-46) 日本建築センター性能評定シート 1998　BCJ-免 463：慶應義塾理工学新棟（仮称）、ビルディングレター、pp.73-74、1998.9
2-47) 日本建築センター性能評定シート 1998　BCJ-免 464：東京都豊島区役所本庁舎耐震補強工事、ビルディングレター、pp.75-76、1998.9
2-48) 日本建築センター性能評定シート 2000　BCJ-免 609：神奈川大学（仮称）新 3・4 号館、ビルディングレター、pp.169-170、2000.4
2-49) 平成 23 年度 国土交通省建築基準整備促進事業　27-3 長周期地震動に対する免震建築物の安全性検証方法に関する検討　調査報告書、2012.3
2-50) 山際創他：多点同時地震動観測記録に基づく超高層免震建物の地震応答性状の考察、日本建築学会学術講演梗概集 B-2、pp.333-334、2011.8

第３章　東日本大震災の本震・余震観測記録に基づく免震建築物の地震時挙動の分析

3.1 検討方針

1) はじめに

2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震では、主に東北地方から関東地方に建設された免震建築物が継続時間の長い地震動を受け、免震建築物の地震時挙動について多くの知見が得られている。「平成 23 年度国土交通省建築基準整備促進事業 27-3」において実施した検討では、事業者から提供された免震建築物の地震観測結果および学術誌や Web 等で公表されている地震観測資料に基づいて、免震建築物の特徴（免震部材、固有周期等）と地震応答（最大加速度、免震層最大変位、加速度低減効果等）についてまとめた。

一方、今回の地震ではマグニチュード 9.0 の本震の後、数多くの余震が発生したが、これらの余震の中には、マグニチュードが 6～7 程度と比較的大きな規模を持つものも含まれていた。よって、免震建築物が複数の余震による揺れを受けることで、免震層の累積変位が過大になるなど、その特性に影響を及ぼす可能性もある。ここでは、東北地方太平洋沖地震の後に発生した余震を対象とし、これらの地震が免震建築物に与えた影響を定量的に把握するため、観測記録に基づく建物挙動について検討を行った。

2) 対象建物の選定

検討の対象とした建物は、事業者から提供された免震建築物であり、以下の 6 棟とする。

A 建物【鹿島建設】
B 建物【竹中工務店】
C 建物【竹中工務店】
D 建物【大成建設】
E 建物【清水建設】
F 建物【建築研究所】

3) 対象とする地震

2011 年 3 月 11 日の本震後に発生した余震を対象とする。このうち、観測結果から得られた基礎の最大加速度、免震層の最大変位あるいは計測震度のうち一つの要因が、一定の水準以上となるものを選定した。これらの要因と水準は、次項以降の各建物の項で示した。

4) 検討項目

余震の地震観測記録を整理するに際して、各建物について、以下の項目に沿った整理を行った。

a) 建物概要

建物の所在地、構造、規模、免震部材などの建物情報を開示可能な範囲で示した。

b) 累積変位や固有周期等

最大加速度､免震層最大変位､免震層累積変位ならびに建物の固有周期と減衰定数を求めた。免震層累積変位は、地震の全継続時間ならびに主要動継続時間における値を算定した。ここでは、主要動継続時間を地震による総エネルギー入力の 5%～95%に相当する時間で定義した。固有周期と減衰定数は ARX 法などを用いて同定した。

c) 観測記録やその他の情報

加速度、免震層変位、免震層累積変位の時刻歴波形、免震層の変位オービット、建物基礎に

おける擬似速度応答スペクトル他を示した。

次項以降に、各建物についての観測結果を示す。

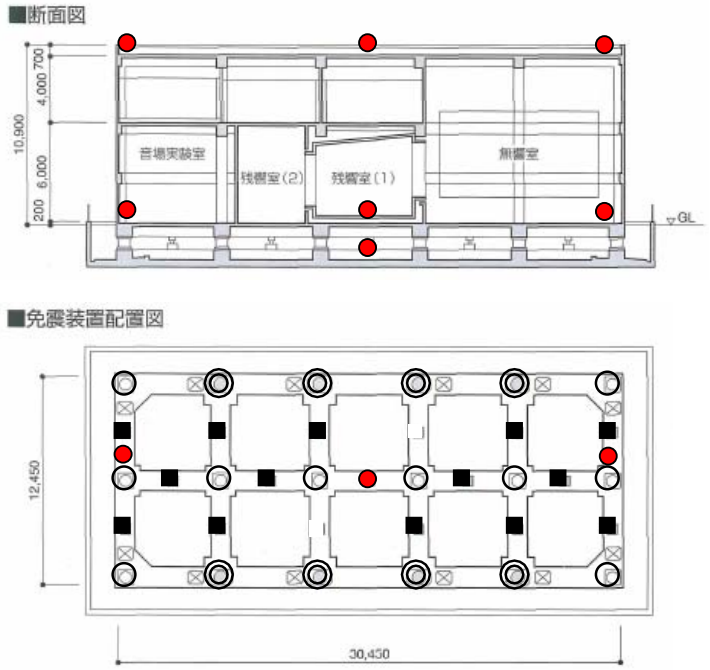
3.2 本震・余震による免震層の累積変位等の整理

1) A 建物

a) 建物概要

対象とした建物の概要を以下に示す。また、建物の平面図、断面図および加速度計の設置位置を図 3.2-1 に示す。

・所在地：東京都調布市
・竣工年：1986 年
・建物用途：研究施設
・構造種別：鉄筋コンクリート造
・基礎形式：杭基礎
・建物規模：地上 2 階、高さ 10.2m
・免震部材：天然ゴム系積層ゴムφ1000×8、φ800×10、鋼棒ダンパー×14、オイルバッファ×12
・固有周期：2.0 秒（積層ゴムのみ）、0.83 秒（鋼棒ダンパー弾性時）



（◎積層ゴムφ1000、○：積層ゴムφ800、■：鋼棒ダンパー、●：加速度計）

図 3.2-1　建物平面図、断面図および加速度計設置位置

b) 累積変位や固有周期等

本検討では、上記建物の基礎での入力加速度が 10cm/s^2 以上の余震を選定した。検討対象の余震について、地震発生日時、震央および規模（マグニチュード M）を表 3.2-1 に示す。参考のために 2011 年 3 月 11 日の本震についても示している。

表 3.2-2 に各地震における最大加速度と免震層最大変位を示す。対象とした地震が M6～7 程度と比較的大きい規模を有するものの、震源から建設地までの距離が離れているため、基礎における入力の大きさは本震と比較して小さくなっている。建物基礎（BF）における加速度は 10～30cm/s^2 程度であり、免震層の水平変位も 1cm 以下であった。上部構造の加速度は、4/16 では基礎の加速度 20～30 cm/s^2 に対して 50%程度に低減されているが、3/15、3/19、4/7、4/11 では、基礎の加速度 10～20cm/s^2 程度に対して概ね同程度あるいは増幅される傾向になっている。

表 3.2-3 に各地震における免震層累積変位を示す。また、図 3.2-2 に、本震と余震の免震層累積変位を比較して示す。各余震の主要動継続時間における免震層累積変位は、0.267～0.925m となっており、本震の 4.76m と比べて小さい。また、これらの値は、それぞれの地震の記録全時間の累積変位に対して 67～80%程度となっている。また、余震について、主要動継続時間における免震層累積変位の総和を求めると 2.57m であった。この値は、地震記録全時間の同総和 3.61m に対して 71%に、本震の主要動継続時間における免震層累積変位 4.76m に対して 54%になっている。

表 3.2-4 と図 3.2-3、図 3.2-4 に各地震における建物の固有周期と減衰定数をそれぞれ示す。余震における建物の固有周期は長辺方向が 0.90～0.92 秒、短辺方向が 0.79～0.87 秒となっている。両方向ともに本震時の固有周期（1.03 秒および 1.05 秒）よりもやや短くなっているが、余震による固有周期の変化は小さい。減衰定数は長辺方向が 0.085～0.120、短辺方向が 0.144～0.192 であり、地震による値のばらつきが認められる。また、短辺方向の減衰定数が大きくなっている。

表 3.2-1　対象とした地震

地震発生日時	震源	規模
2011/3/11　14:46（本震）	三陸沖	M9.0
2011/3/15　22:31	静岡県東部	M6.4
2011/3/19　18:56	茨城県北部	M6.1
2011/4/7　23:32	宮城県沖	M7.2
2011/4/11　17:16	福島県浜通り	M7.0
2011/4/16　11:19	茨城県南部	M5.9

表 3.2-2　最大加速度と免震層最大変位

地震発生日	最大加速度（cm/s^2）						免震層最大変位（cm）	
	長辺方向			短辺方向				
	BF	1F	RF	BF	1F	RF	長辺方向	短辺方向
2011/3/11（本震）	108.8	121.1	124.2	143.4	112.8	124.9	3.99	3.61
2011/3/15	12.0	19.3	19.8	19.6	17.9	43.4	0.43	0.43
2011/3/19	7.22	8.05	8.94	10.5	7.97	11.2	0.15	0.16
2011/4/7	12.5	14.5	15.0	15.1	23.7	28.8	0.31	0.92
2011/4/11	21.1	20.0	20.6	17.4	15.5	16.9	0.46	0.32
2011/4/16	22.3	12.36	14.2	29.9	12.3	15.5	0.20	0.22

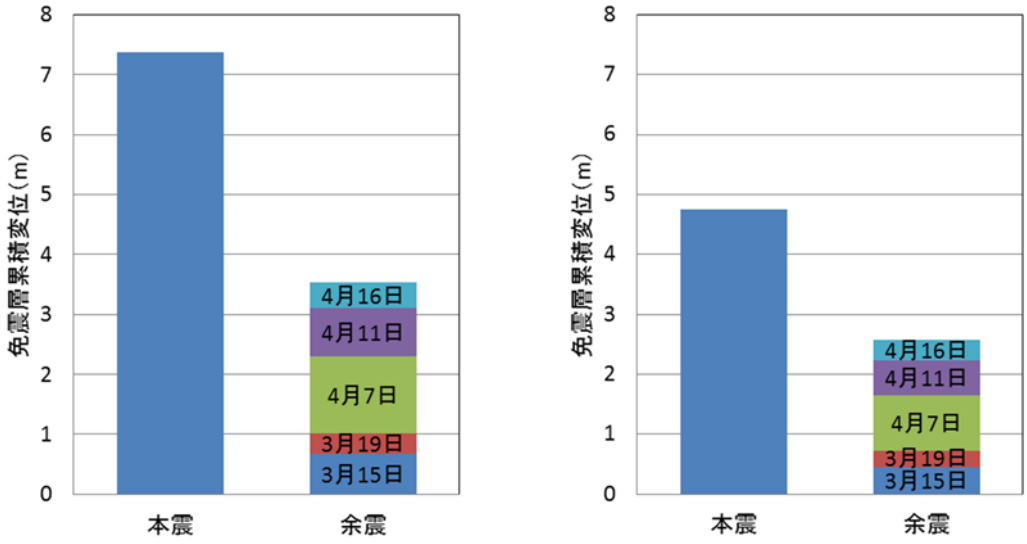
表 3.2-3　免震層の累積変位

地震発生日	地震記録全時間（m）			主要動継続時間（m）			
	長辺	短辺	2 方向	継続時間(s)	長辺	短辺	2 方向*
2011/3/11（本震）	4.98	4.35	7.37	70～160	3.27	2.73	4.76（0.65）
2011/3/15	0.501	0.367	0.682	30～80	0.330	0.259	0.459（0.67）
2011/3/19	0.257	0.173	0.341	30～100	0.200	0.139	0.267（0.78）
2011/4/7	0.559	1.03	1.28	50～150	0.437	0.725	0.925（0.72）
2011/4/11	0.578	0.432	0.800	40～120	0.422	0.309	0.577（0.72）
2011/4/16	0.316	0.228	0.431	30～110	0.253	0.183	0.346（0.80）
総累積変位	余震		3.61		余震		2.57（0.71）
	本震＋余震		10.98		本震＋余震		7.33（0.67）
	余震／本震		0.49		余震／本震		0.54

*（　）内は地震記録全時間の値に対する割合

表 3.2-4　建物の固有周期と減衰定数

地震発生日	固有周期（s）		減衰定数	
	長辺方向	短辺方向	長辺方向	短辺方向
2011/3/11（本震）	1.03	1.05	0.167	0.185
2011/3/15	0.922	0.867	0.120	0.183
2011/3/19	0.905	0.788	0.085	0.157
2011/4/7	0.916	0.818	0.097	0.177
2011/4/11	0.919	0.839	0.107	0.192
2011/4/16	0.922	0.803	0.090	0.144



地震記録全時間　　主要動継続時間

図 3.2-2　免震層累積変位の比較

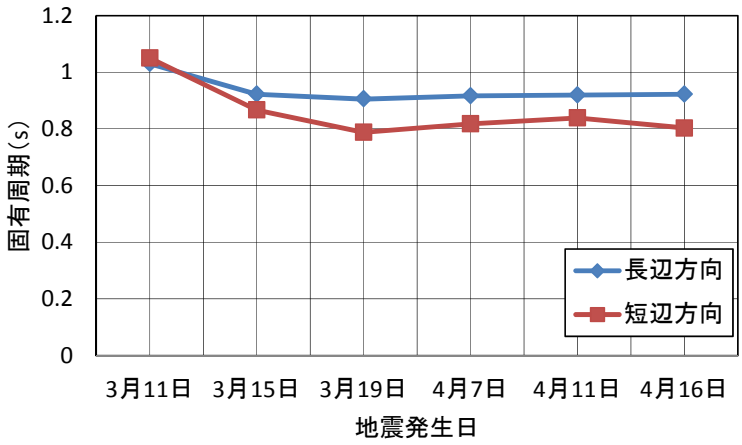


図 3.2-3　各地震における建物の固有周期

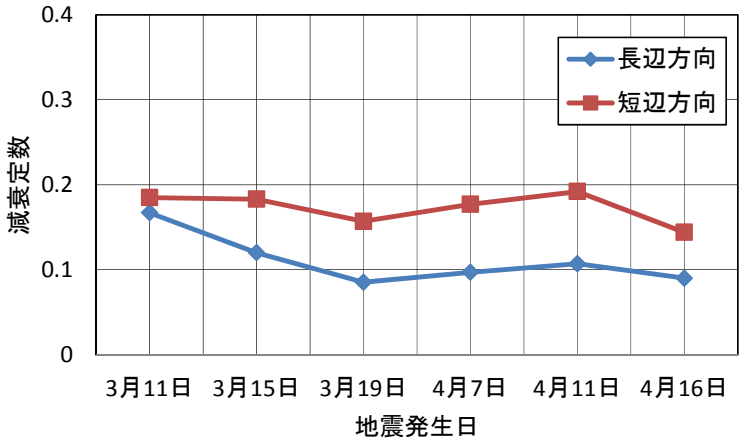
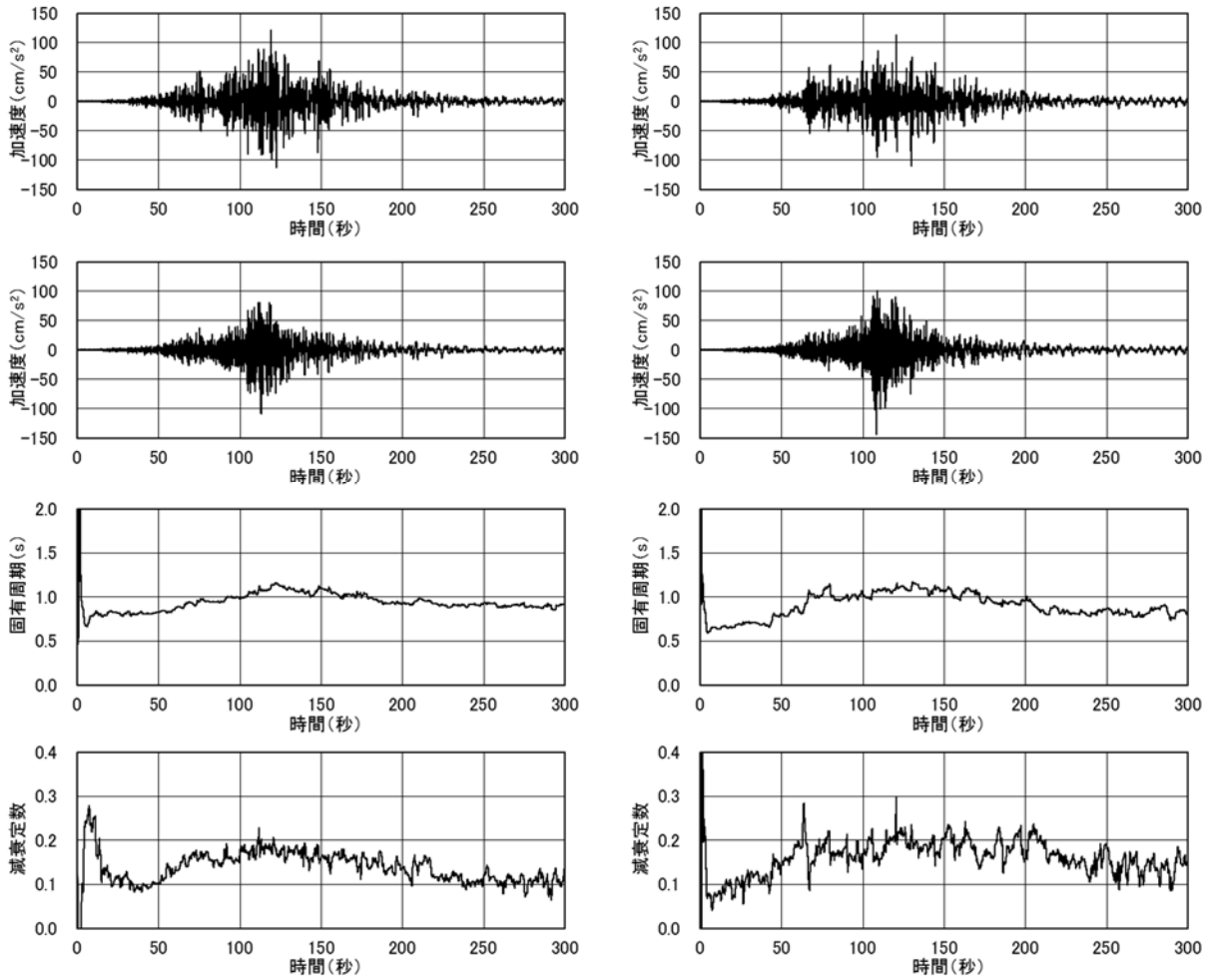


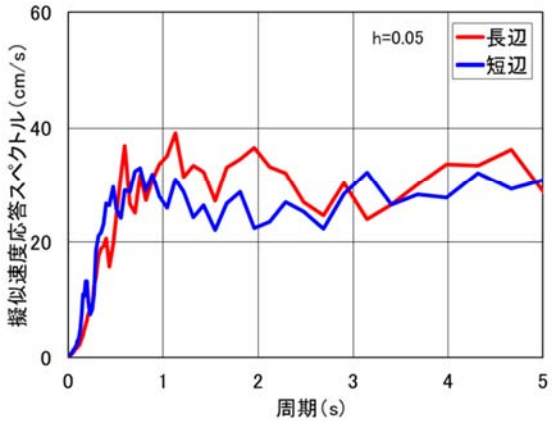
図 3.2-4　各地震における建物の減衰定数

c) 観測記録のその他の情報

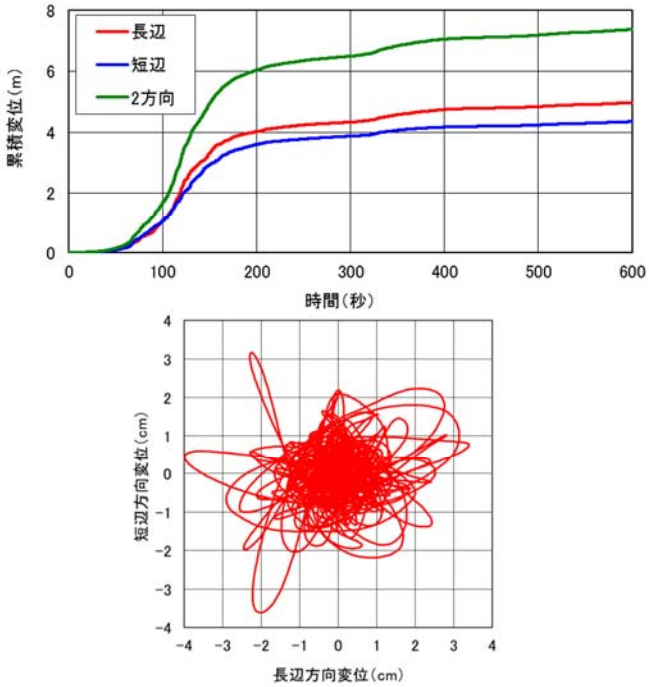
図 3.2-5～図 3.2-10 に、各地震について、加速度、固有周期、減衰定数および免震層累積変位の時刻歴波形、免震層の変位オービット、ならびに建物基礎における擬似速度応答スペクトルを示す。時刻歴波形によると、固有周期は地震の継続時間においてほとんど変化しないが、減衰定数は、基礎の加速度の増加に伴い大きくなり、加速度の最大値付近で最大となり、その後加速度の減少に伴い小さくなる傾向が認められる。



時刻歴波形

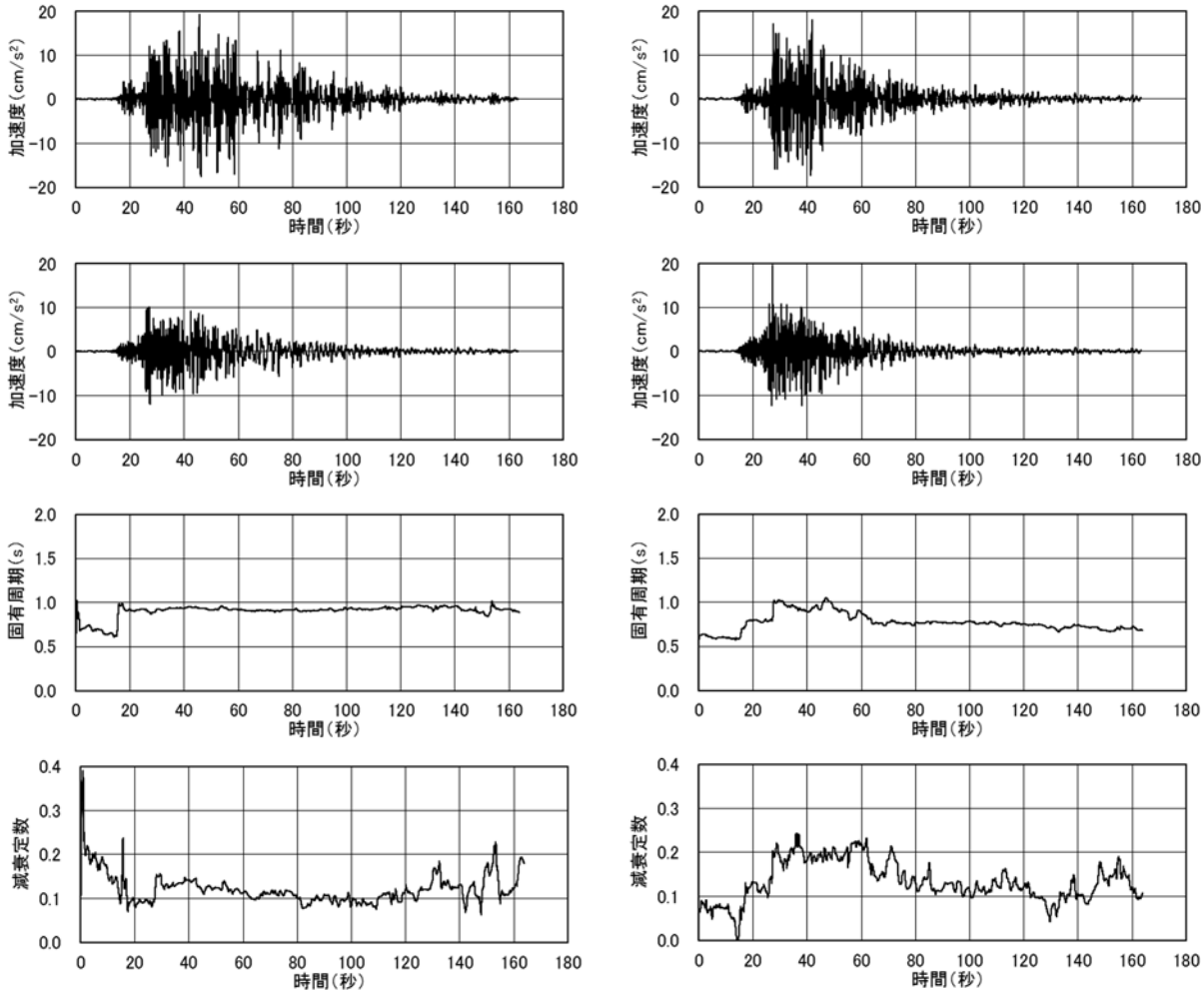


擬似速度応答スペクトル（基礎）

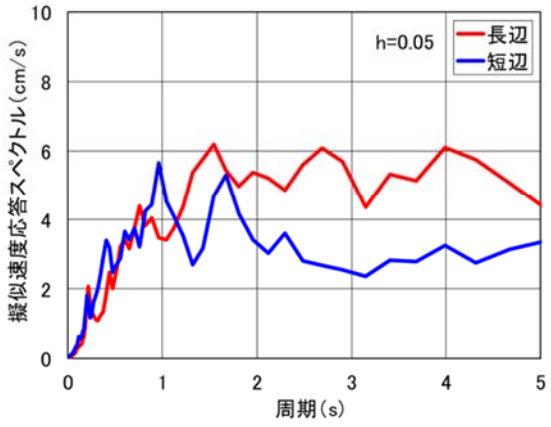


免震層水平変位

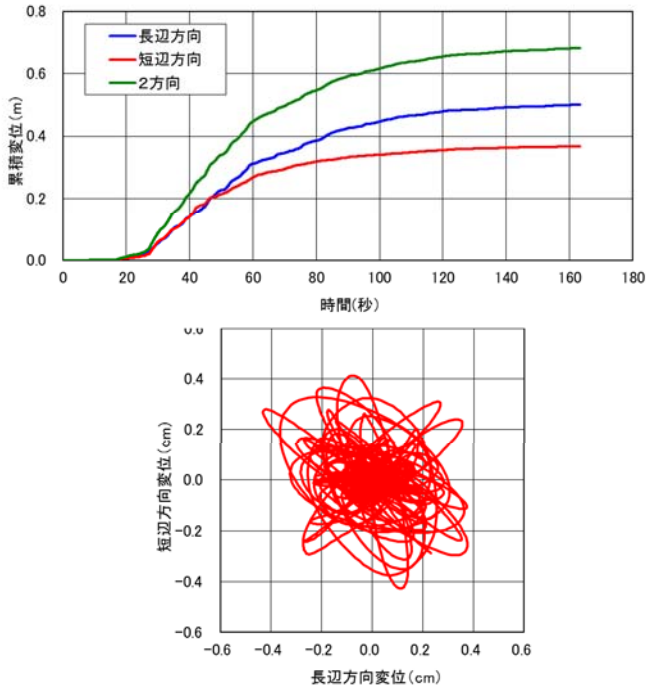
図 3.2-5　2011/3/11 三陸沖 M9.0（本震）



時刻歴波形

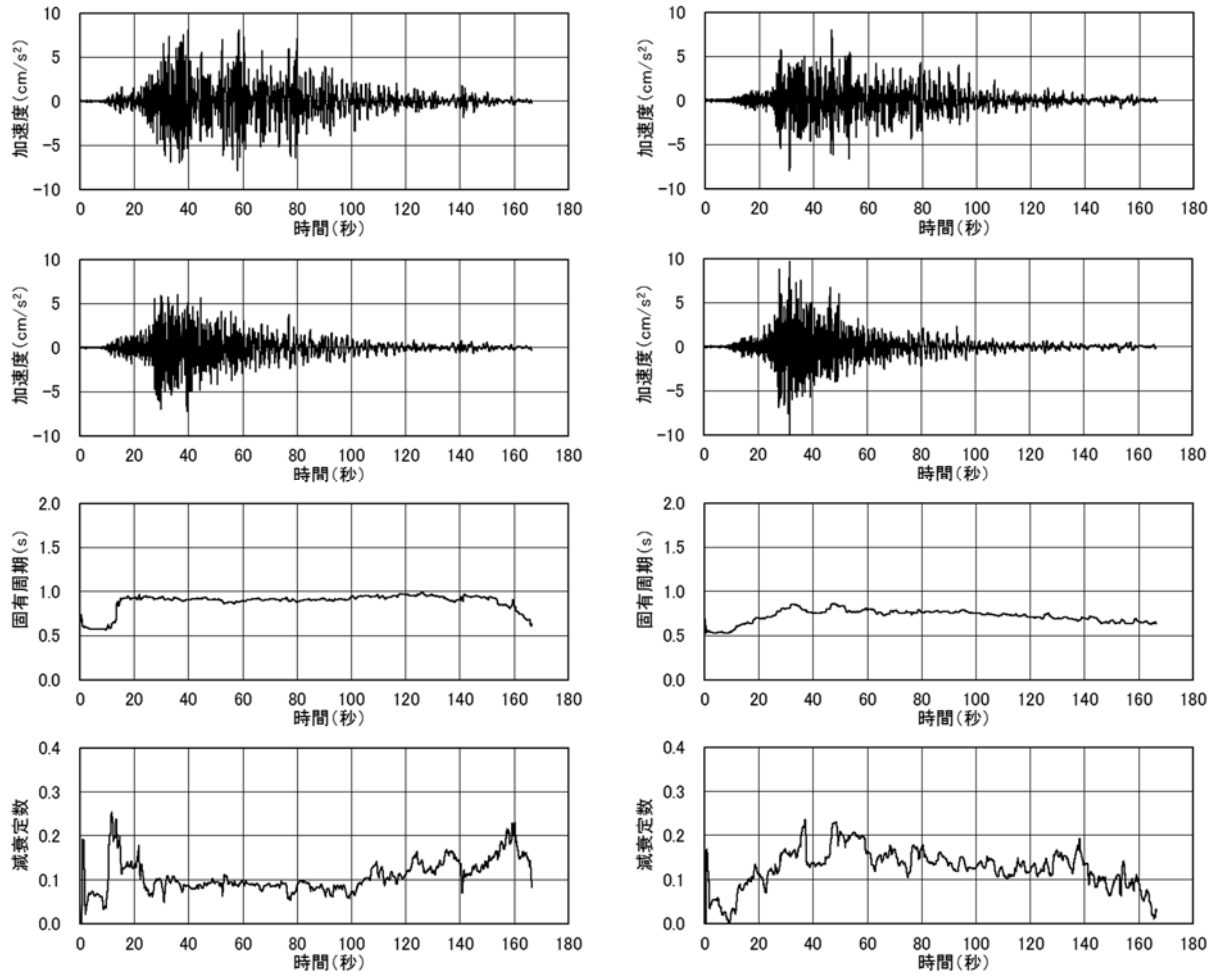


擬似速度応答スペクトル（基礎）

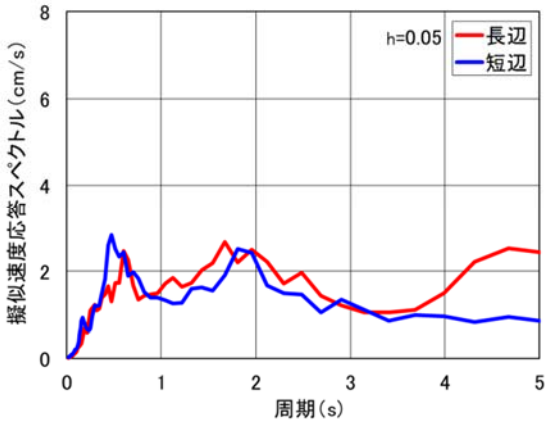


免震層水平変位

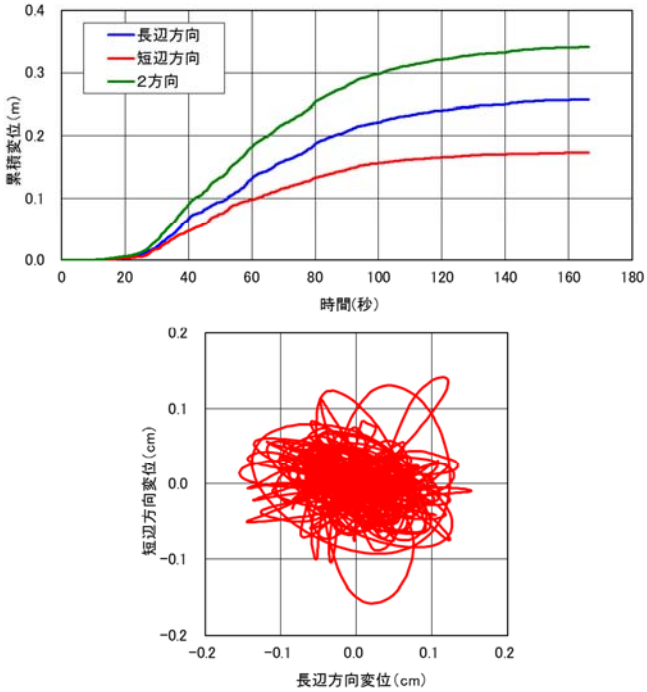
図 3.2-6　2011/3/15 静岡県東部 M6.4



時刻歴波形

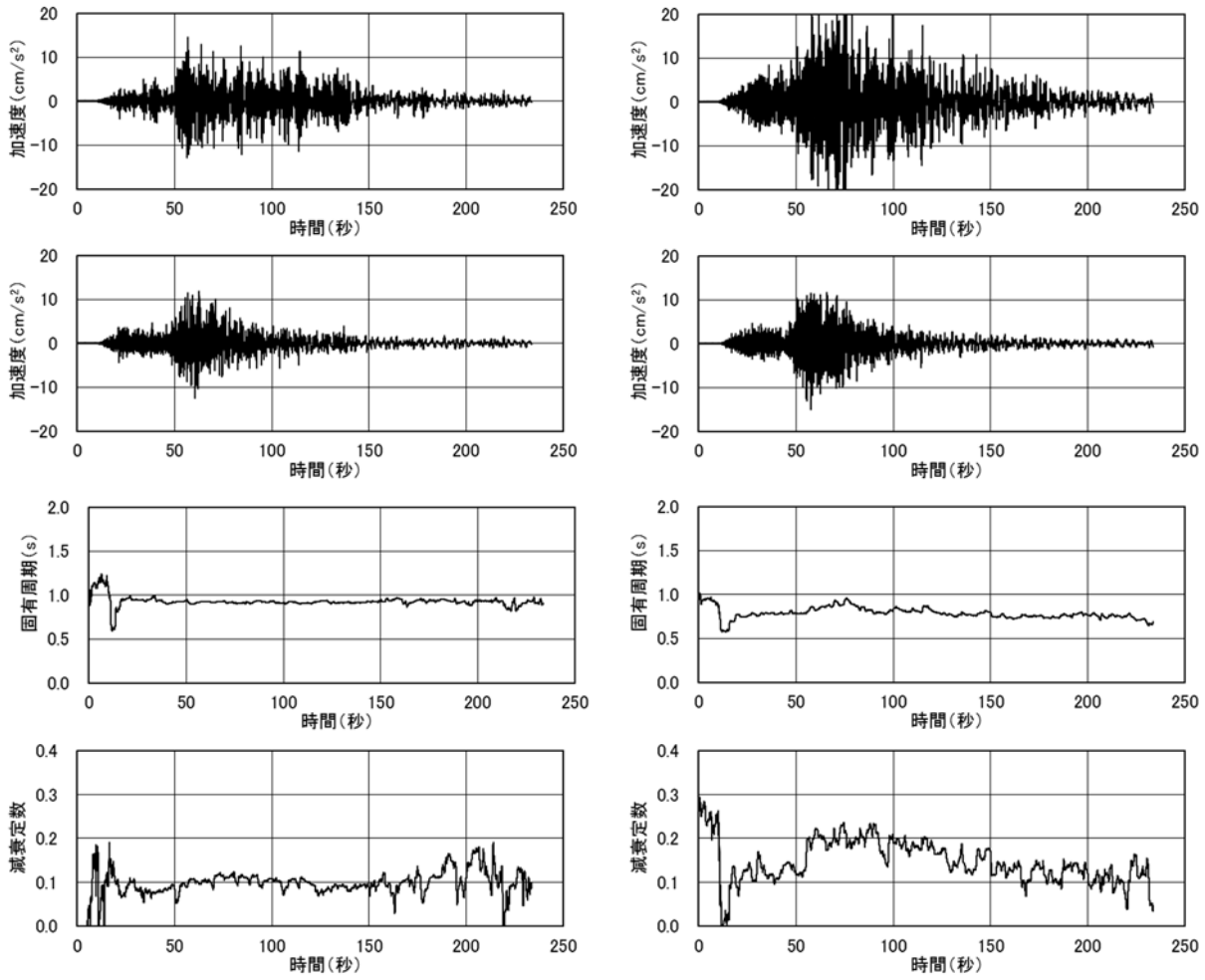


擬似速度応答スペクトル（基礎）

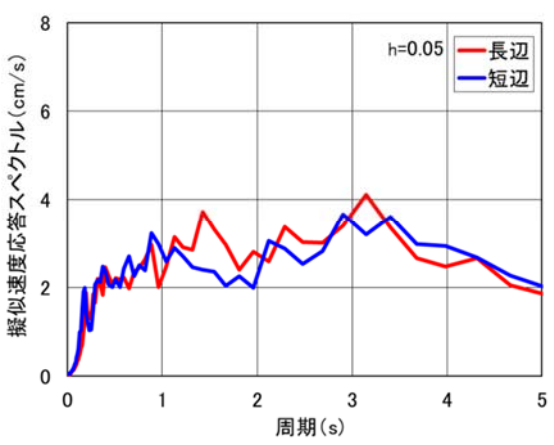


免震層水平変位

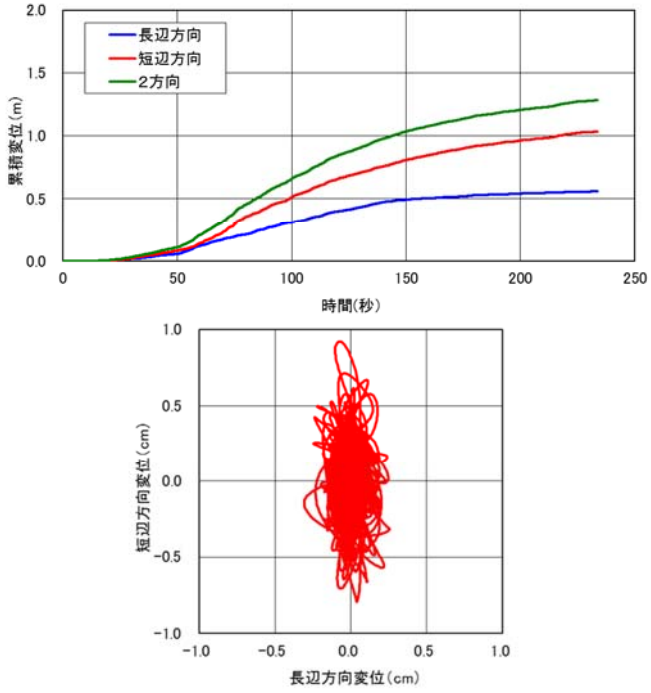
図 3.2-7　2011/3/19 茨城県北部 M6.1



時刻歴波形

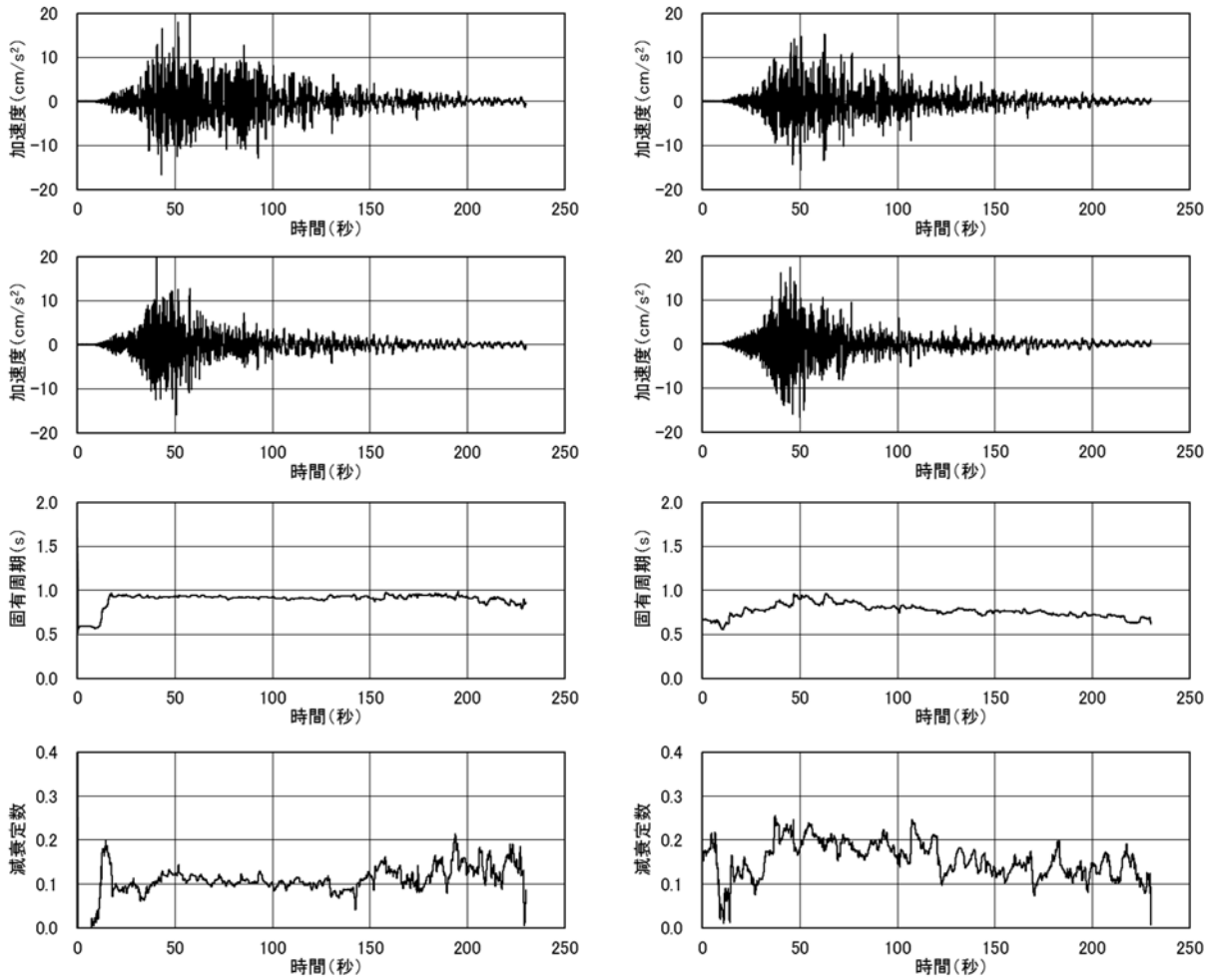


擬似速度応答スペクトル（基礎）

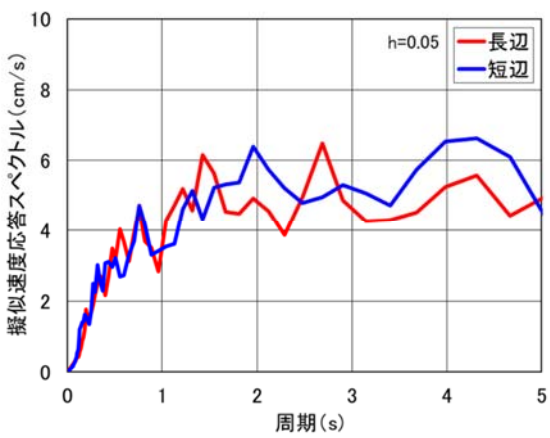


免震層水平変位

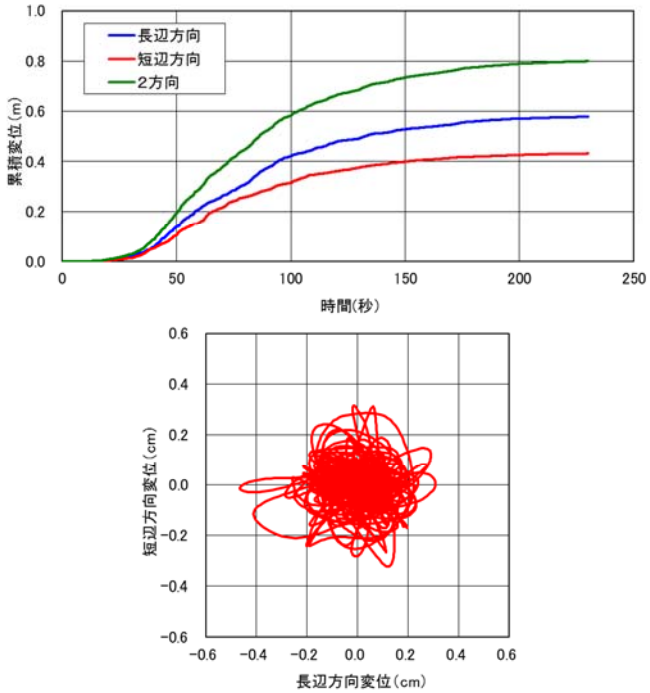
図 3.2-8　2011/4/7 宮城県沖 M7.2



時刻歴波形

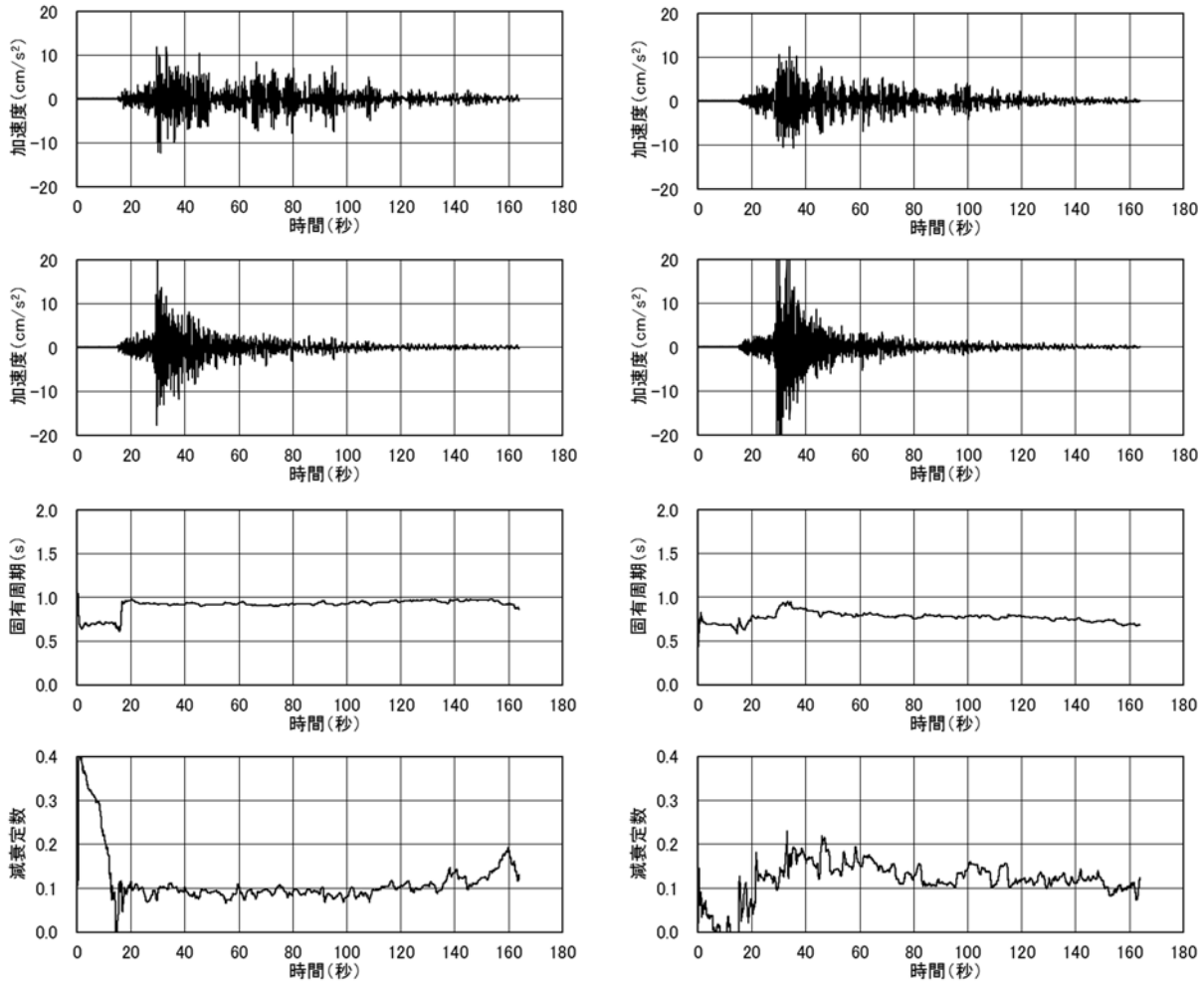


擬似速度応答スペクトル（基礎）

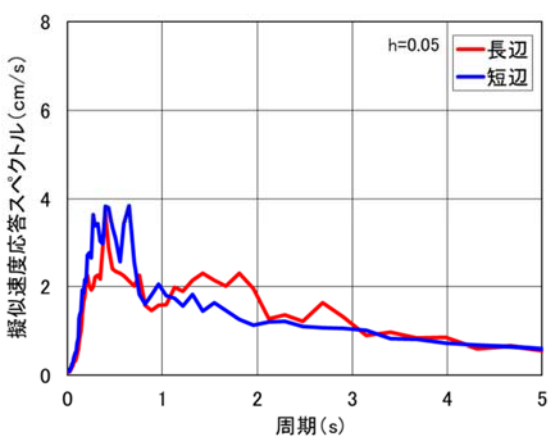


免震層水平変位

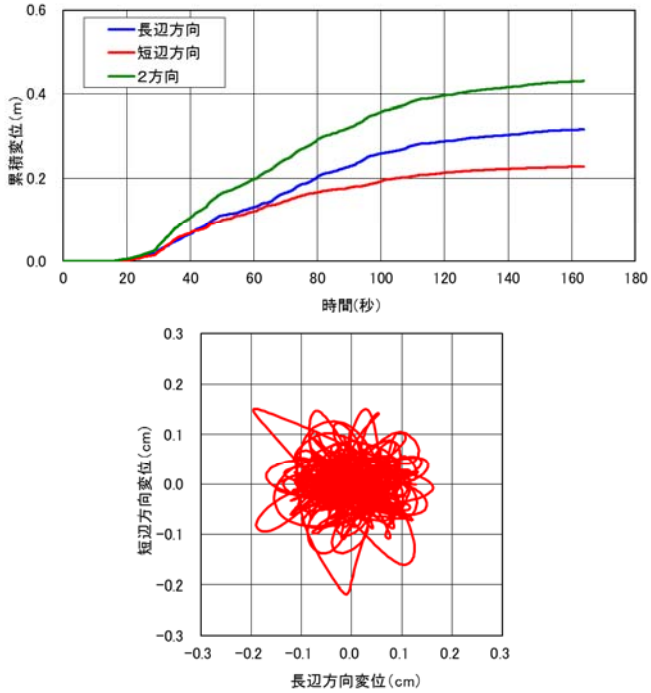
図 3.2-9　2011/4/11 福島県浜通り M7.0



時刻歴波形



擬似速度応答スペクトル（基礎）



免震層水平変位

図 3.2-10　2011/4/16 茨城県南部 M5.9

2) B 建物

a) 建物概要

・所在地：東京都江東区東陽3丁目

・竣工年：2008年

・構造種別：鉄筋コンクリート造　一部S造

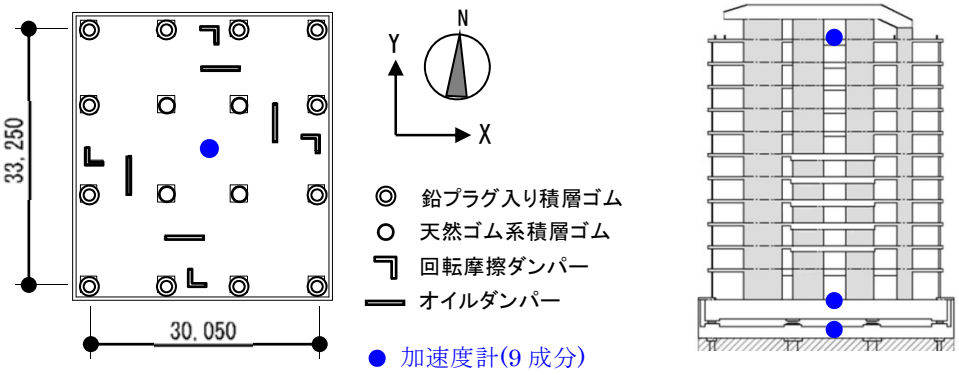
・基礎形式：パイルド・ ラフト基礎

・建物規模：地上12階建、軒高37.75m

・免震部材：鉛プラグ入り積層ゴムφ750　4 個、φ900　6 個、φ950　2 個
天然ゴム系積層ゴムφ1400　2 個、φ1300　2 個
回転摩擦ダンパー4 基 1 組×1
オイルダンパーX･Y 各 2 基　計 4 基

・固有周期：レベル1　10cm　3.52秒(X)、3.54秒(Y)
レベル2　40cm　4.57秒(X)、4.58秒(Y)

建物の平面図、断面図および加速度計の設置位置を図 3.2-11 に示す。



(a) 平面図　　(b) 断面図

図 3.2-11　加速度計の設置位置

b）累積変位や固有周期等

2011 年 3 月 9 日の地震に加え、本震以降に観測された地震観測記録の内、最大変位が 0.3cm 以上の記録を検討対象の余震とした。対象とした地震を表 3.2-5 に示す。

表 3.2-5　対象とした地震

No.	観測日時	震源	M
1	2011/03/09　11:45	三陸沖（311 前震）	7.3
2	2011/03/11　14:46	三陸沖（311 本震）	9.0
3	2011/03/11　15:15	茨城県沖（311 余震）	7.6
4	2011/03/15　22:31	静岡県東部	6.4
5	2011/04/07　23:32	宮城県沖	7.2
6	2011/04/11　17:16	福島県浜通り	7.0
7	2011/04/12　8:08	千葉県東方沖	6.4
8	2011/04/16　11:19	茨城県南部	5.9
9	2011/07/15　21:01	茨城県南部	5.4
10	2012/01/01　14:27	鳥島近海	7.0

表 3.2-6 に各地震による最大加速度、最大変位を示す。表 3.2-7 に累積変位、周期および減衰を示す。累積変位は、全時刻における値と主要動（エネルギー入力 5～95%区間）における値の 2 種類を求めた。周期および減衰は ARX 法を用い、上記の主要動における値を 1 点求めた。前処理として、7Hz で 3 次のローパスフィルターを適用し、20Hz にリサンプルを実施している。モデル次数は na=20、nb=21、nk=0 とした。

図 3.2-12 に本震の累積変位と余震の累積変位の合計の比較を示す。余震の累積変位の合計より、本震の累積変位の方が大きい。また、主要動で求めた累積変位は全時刻で求めた累積変位の 70～80%程度であった。

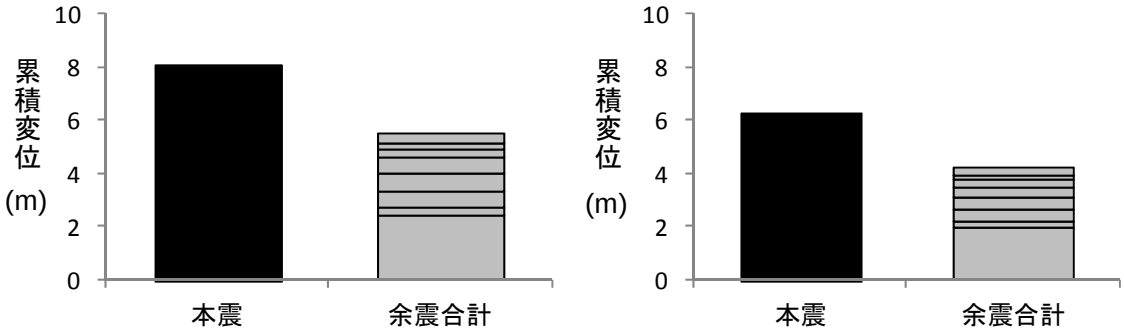
図 3.2-13 に各地震における周期と減衰を示す。周期は本震では 1.6 秒、余震では 1 秒前後である。減衰は本震では 55%となっている。これは、免震層の変形は 6.5cm 程度であることから鉛プラグ入り積層ゴムが降伏するが、それほど大きな変形ではなかったためと考えられる。余震では 10%前後となっている。これは免震層の変形が小さく、鉛プラグ入り積層ゴムが降伏していないためと考えられる。

表 3.2-6　観測結果一覧 1

No.	計測震度	最大加速度（cm/s²）						最大変位（cm）	
		X 方向			Y 方向			X 方向	Y 方向
		BF	1F	12F	BF	1F	12F		
1	2.1	4.7	7.7	10.2	3.5	6.7	8.1	0.22	0.16
2	4.8	100.2	52.7	61.9	91.1	43.6	58.5	6.54	6.46
3	4.0	29.6	28.3	33.5	35.1	31.8	38.3	3.15	3.07
4	2.5	8.7	7.8	10.8	7.1	9.6	12.8	0.19	0.33
5	2.6	8.1	11.3	15.6	8.9	12.1	16.2	0.29	0.39
6	3.0	12.5	16.3	20.3	13.0	15.9	20.2	0.61	0.62
7	2.9	10.9	12.0	18.1	13.6	16.3	20.5	0.34	0.58
8	2.3	9.5	9.2	13.0	8.2	10.8	14.9	0.28	0.23
9	2.6	17.5	10.8	13.9	8.4	8.9	11.5	0.35	0.14
10	2.5	10.4	11.0	15.5	8.6	9.8	12.8	0.16	0.35

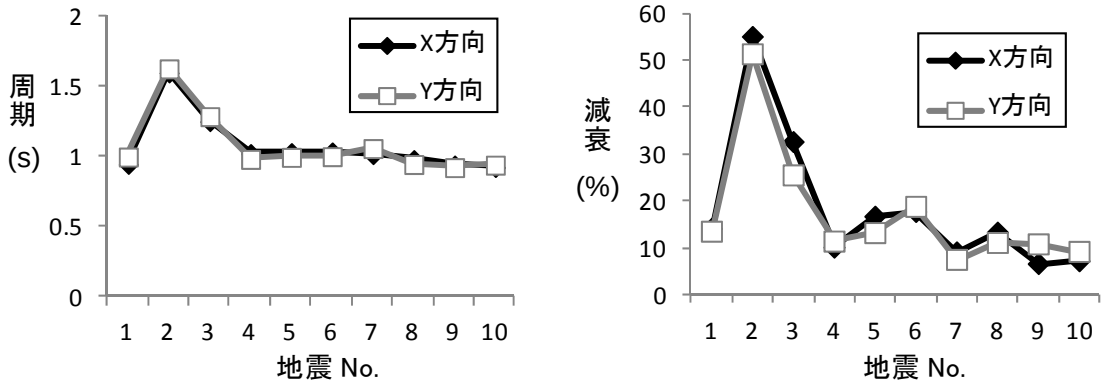
表 3.2-7　観測結果一覧 2

No.	全時刻		主要動					
	累積変位(m)	総累積変位(m)	累積変位(m)	総累積変位(m)	周期(秒)		減衰(%)	
					X 方向	Y 方向	X 方向	Y 方向
1	0.28	—	0.21	—	0.95	1.00	14.1	13.5
2	8.08	8.08	6.29	6.29	1.60	1.63	55.0	51.3
3	2.39	10.48	1.95	8.24	1.25	1.29	32.6	25.5
4	0.29	10.77	0.23	8.47	1.03	0.99	10.1	11.6
5	0.61	11.38	0.43	8.90	1.03	1.00	16.6	13.2
6	0.72	12.10	0.51	9.40	1.04	1.00	17.7	18.8
7	0.55	12.65	0.38	9.79	1.02	1.06	9.2	7.6
8	0.35	13.00	0.26	10.05	0.98	0.95	13.3	11.1
9	0.20	13.21	0.15	10.20	0.94	0.93	6.6	10.8
10	0.37	13.57	0.28	10.48	0.93	0.94	7.2	9.2



(a)　全時刻　　(b)　主要動

図 3.2-12　累積変位



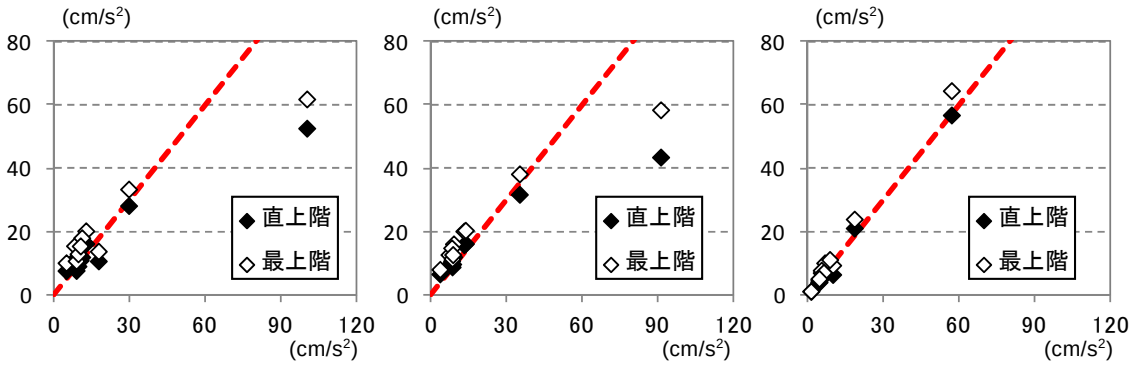
(a) 周期　　(b) 減衰

図 3.2-13　各地震における周期と減衰

c) 観測記録のその他の情報

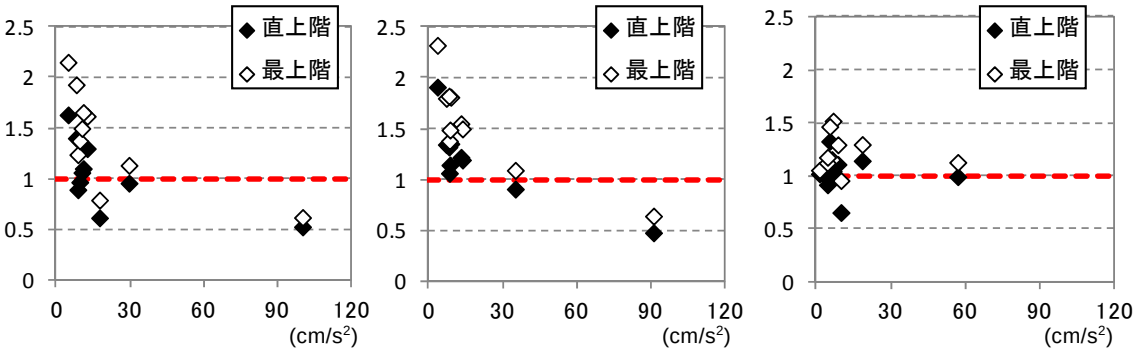
表 3.2-6 に示した値を図 3.2-14～図 3.2-17 に示す。入力加速度が 30cm/s² 程度以下の余震では応答倍率が 1 を超えるものも多い。全時刻で求めた累積変位は最大変位の約 120 倍、主要動の区間で求めた累積変位は最大変位の約 84 倍であった。

応答変位が大きい 3 つの地震について、加速度時刻歴、累積変位時刻歴、変位オービット、擬似速度応答スペクトル、変位時刻歴、ARX 法で算出した主要動区間における周期、減衰の時刻変化を図 3.2-18～図 3.2-23 に示す。周期、減衰の時刻変化は評価区間を 10 秒とし、0.5 秒毎にプロットしている。



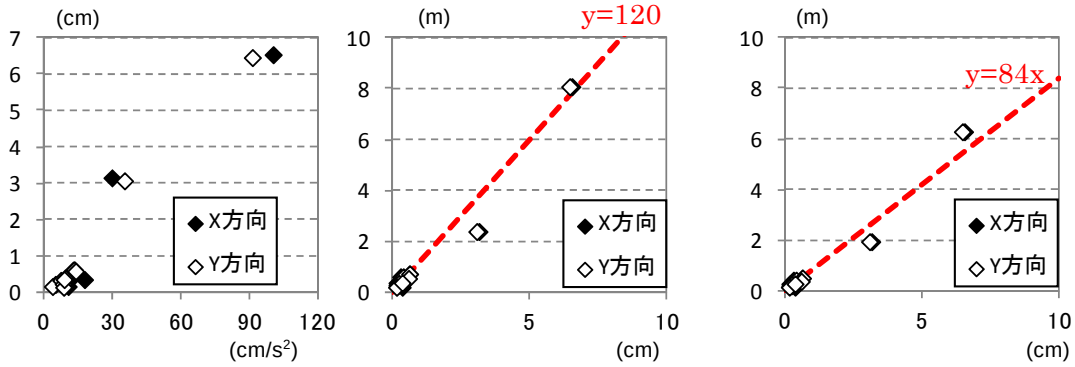
(a) X 方向　(b) Y 方向　(c) Z 方向

図 3.2-14　入力加速度と応答加速度



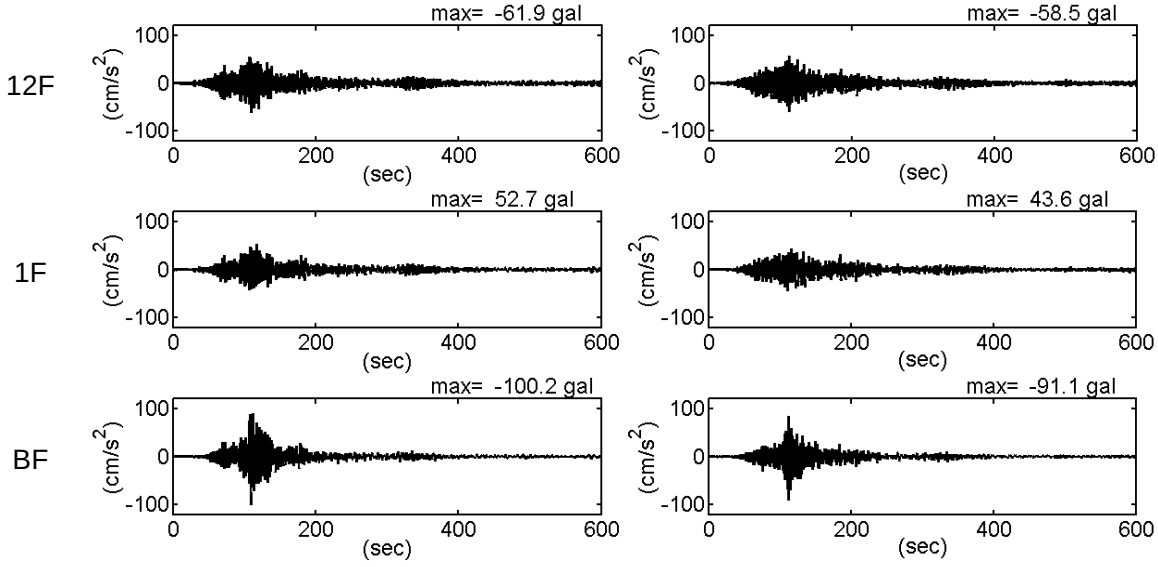
(a) X 方向　(b) Y 方向　(c) Z 方向

図 3.2-15　入力加速度と応答倍率

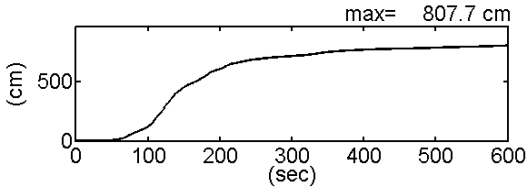


(a) 全時刻　(b) 主要動

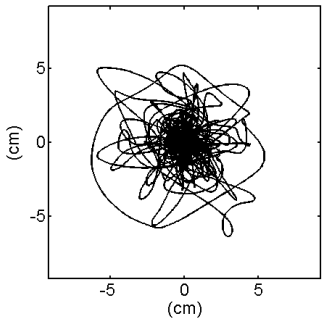
図 3.2-16　入力加速度と最大変位　　図 3.2-17　最大変位と累積変位



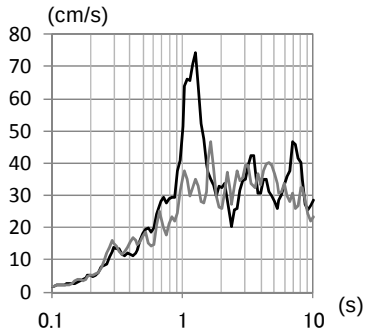
(a) 加速度時刻歴



(b) 累積変位

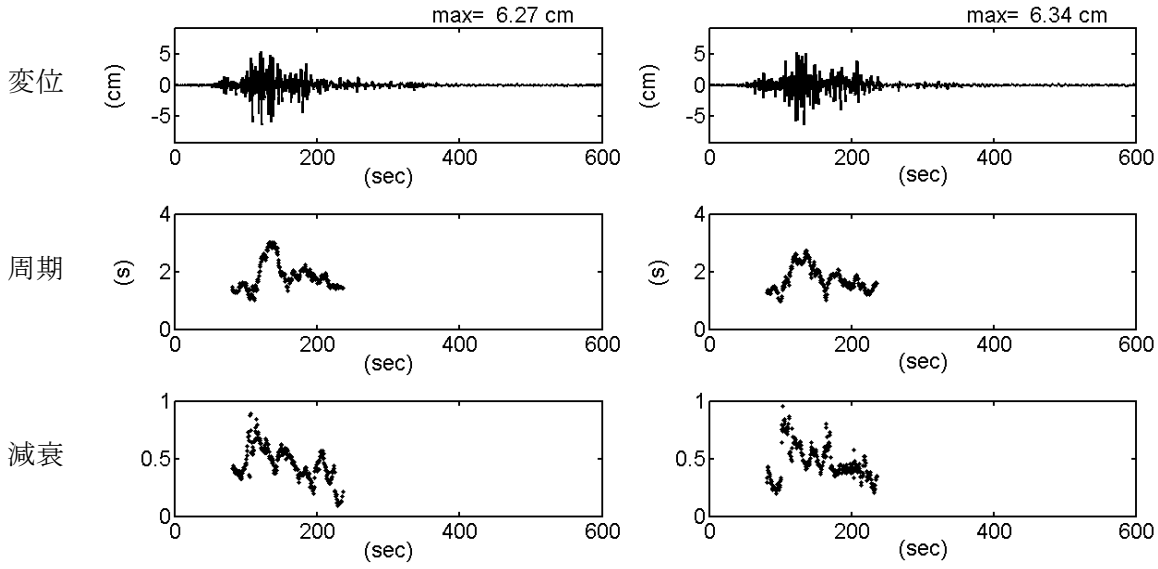


(c) 変位オービット



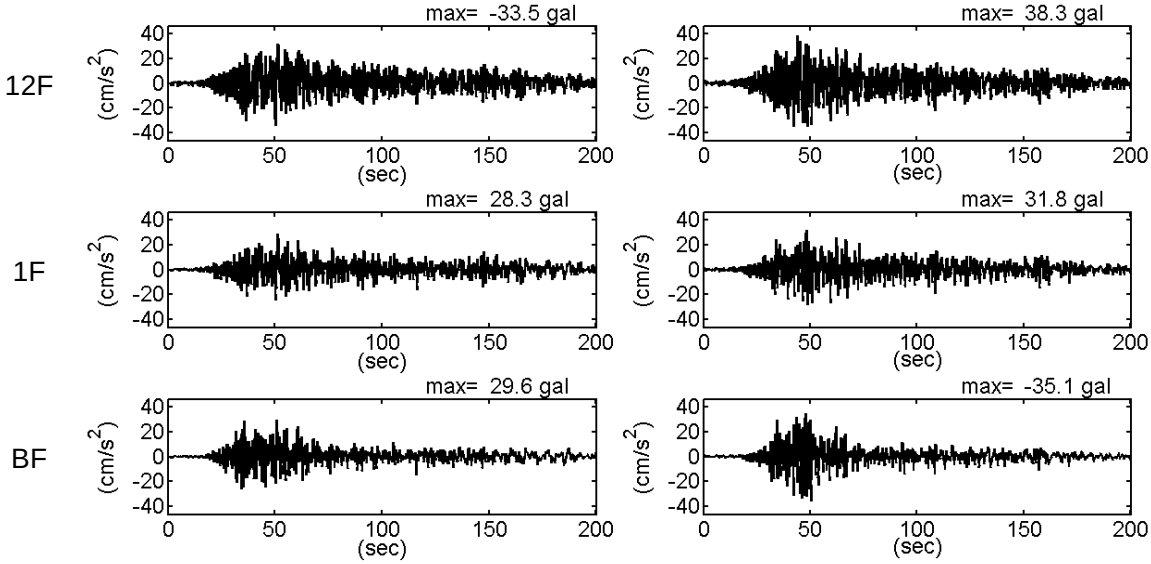
(d) 擬似速度応答スペクトル（黒：X 方向、灰：Y 方向）

図 3.2-18　No.2　2011/3/11　本震時　観測記録 1

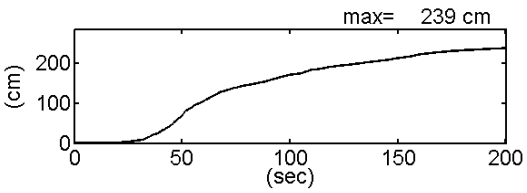


変位、周期、減衰の時刻変化

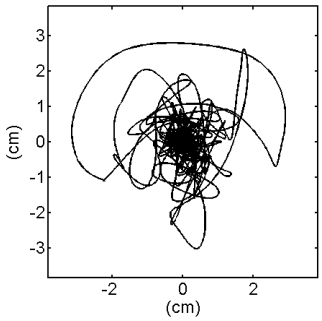
図 3.2-19　No.2　2011/3/11　本震時　観測記録 2



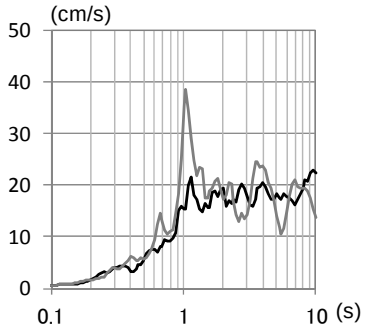
(a) 加速度時刻歴



(b) 累積変位

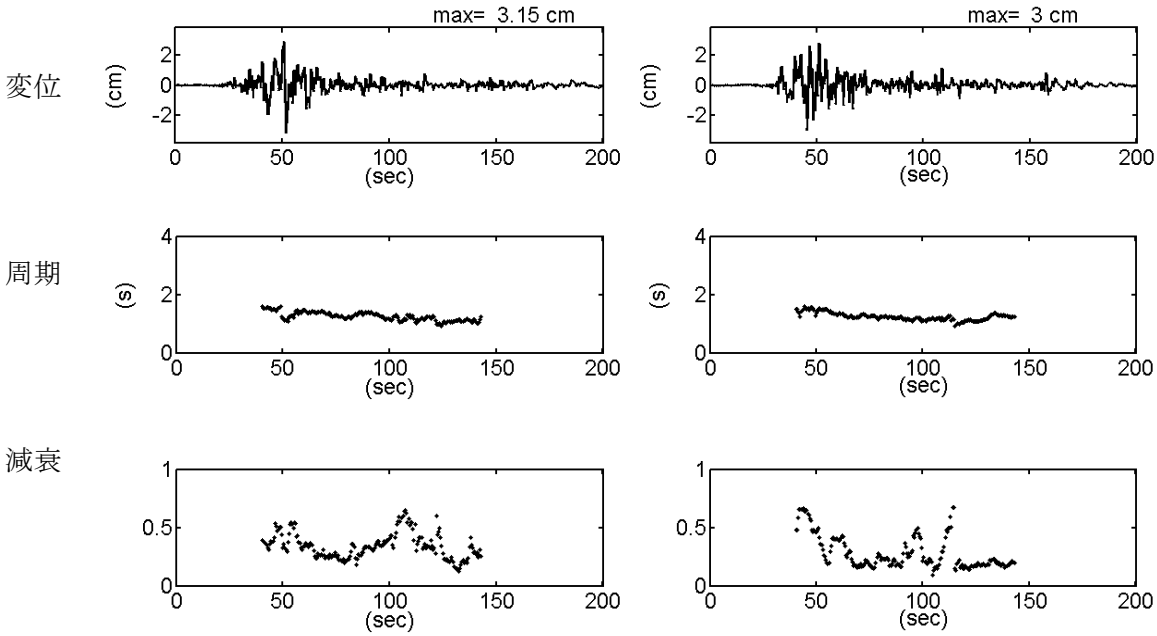


(c) 変位オービット



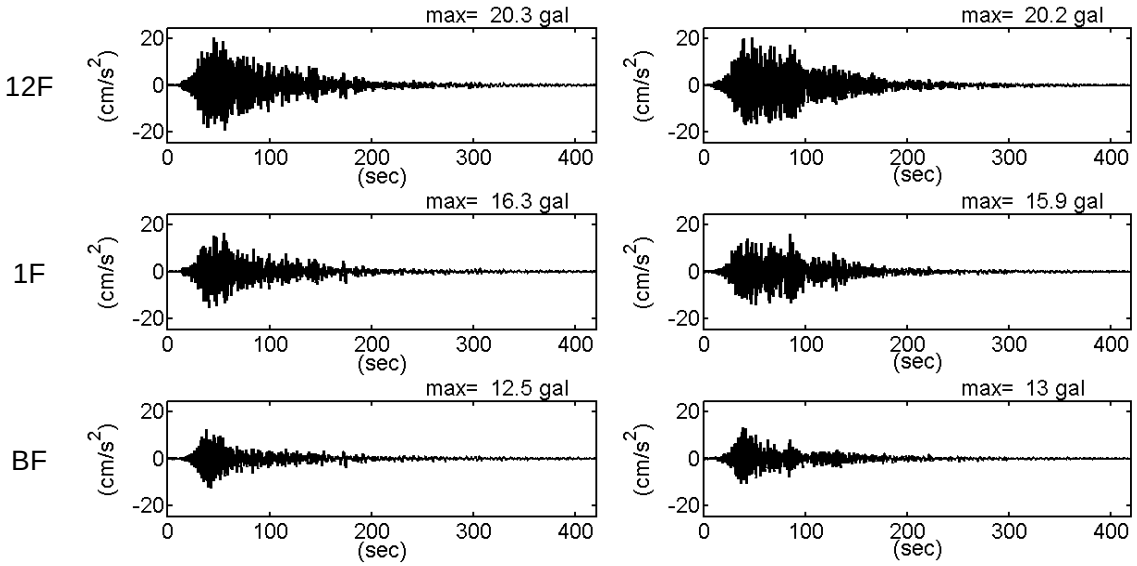
(d) 擬似速度応答スペクトル（黒：X 方向、灰：Y 方向）

図 3.2-20　No.3　2011/3/11　最大余震　観測記録 1



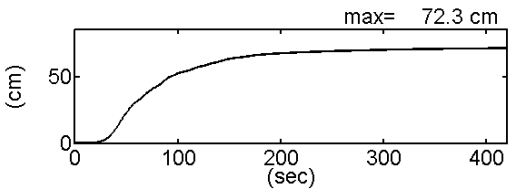
変位、周期、減衰の時刻変化

図 3.2-21　No.3　2011/3/11　最大余震　観測記録 2

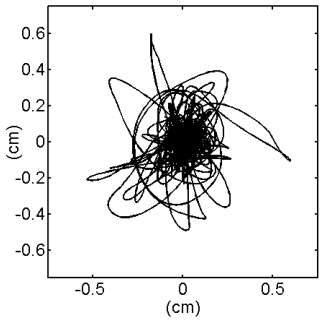


X 方向　　Y 方向

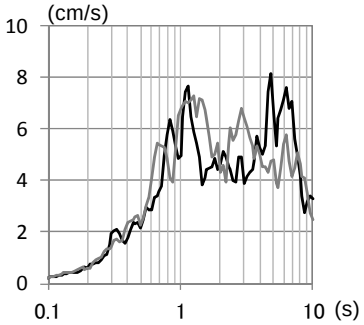
(a) 加速度時刻歴



(b) 累積変位

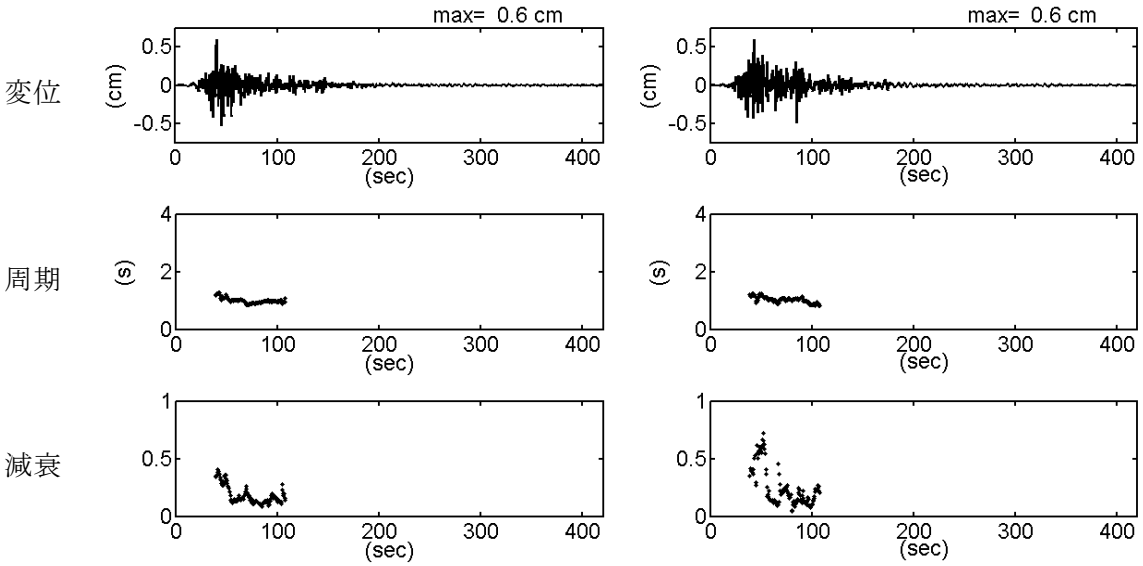


(c) 変位オービット



(d) 擬似速度応答スペクトル（黒：X 方向、灰：Y 方向）

図 3.2-22　No.6　2011/4/11　本震の 1 ヶ月後　観測記録 1



変位、周期、減衰の時刻変化

図 3.2-23　No.6　2011/4/11　本震の 1 ヶ月後　観測記録 2

3) C 建物

a) 建物概要

・所在地：千葉県船橋市

・竣工年：1987年

・構造種別：鉄筋コンクリート造

・基礎形式：場所打ち鉄筋コンクリート杭

・建物規模：地上3階、軒高10.9m

・免震部材：天然ゴム系積層ゴムφ670　8個、φ790　6個

　　粘性体ダンパー抵抗板φ680　8個

・固有周期：2.1秒

建物の平面図、断面図および加速度計の設置位置を図 3.2-24 に示す。

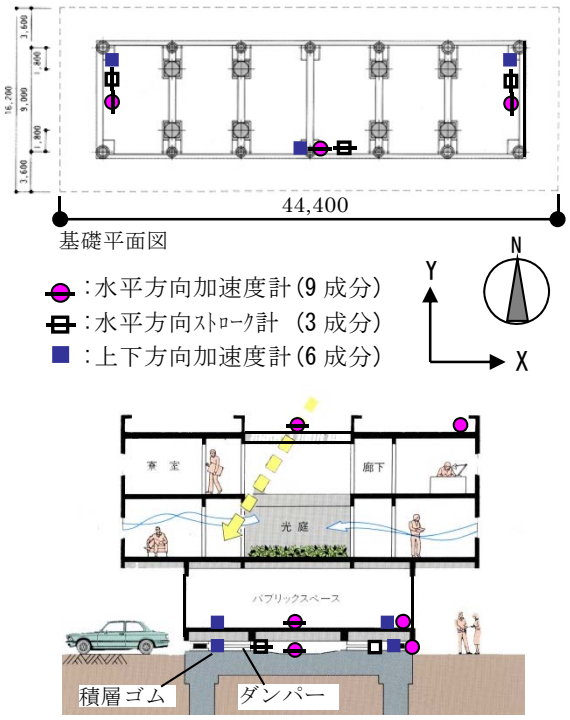


図 3.2-24　加速度計、変位計の設置位置

b) 累積変位や固有振動数等

本震以降に観測された地震観測記録の内、最大変位が 0.3cm 以上の記録を対象とした。地震観測記録を表 3.2-8 に示す。

表 3.2-8　対象とした地震

No.	観測日時	震源	M
1	2011/03/11　14:46	三陸沖（311 本震）	9.0
2	2011/03/11　15:15	茨城県沖　（311 余震）	7.6
3	2011/03/16　12:52	千葉県東方沖	6.1
4	2011/04/07　23:32	宮城県沖	7.2
5	2011/04/11　17:16	福島県浜通り	7.0
6	2011/04/12　8:08	千葉県東方沖	6.4
7	2011/04/16　11:19	茨城県南部	5.9
8	2011/07/31　3:53	福島県沖	6.5
9	2012/01/01　14:27	鳥島近海	7.0
10	2012/03/14　21:05	千葉県東方沖	6.1
11	2012/05/29　1:36	千葉県北西部	5.2
12	2012/12/07　17:18	三陸沖	7.3

表 3.2-9 に各地震による最大加速度、最大変位を示す。表 3.2-10 に累積変位、周期および減衰を示す。累積変位は、全時刻における値と主要動（エネルギー入力 5～95%区間）における値の 2 種類を求めた。周期および減衰は ARX 法を用い、上記の主要動における区間で 1 点求めた。前処理として、7Hz で 3 次のローパスフィルターを適用し、20Hz にリサンプルを実施している。モデル次数は na=10、nb=11、nk=0 とした。

図 3.2-25 に本震の累積変位と余震の累積変位の合計の比較を示す。余震の累積変位の合計より、本震の累積変位の方が大きい。また、主要動で求めた累積変位は全時刻で求めた累積変位の 70～85%程度であった。

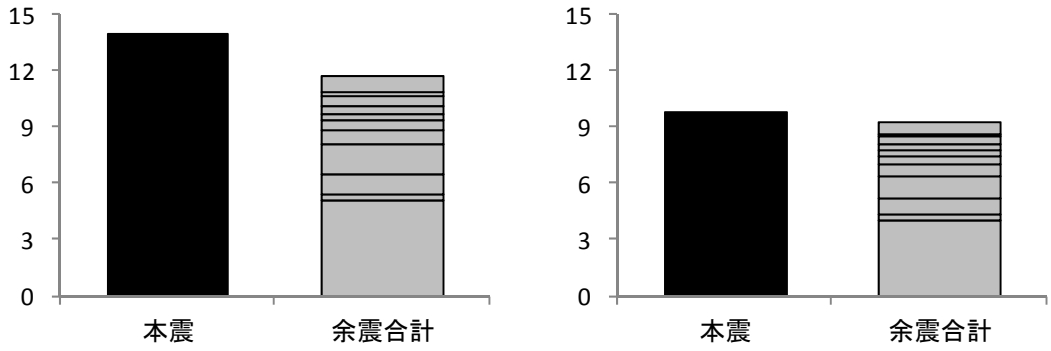
図 3.2-26 に各地震における周期と減衰を示す。周期は本震、No.2 では 1.7 秒、その他の余震の多くは 1.4 秒前後である。減衰は本震、No.2、No.7 では 13～14%である。その他の余震の多くは 20%前後である。

表 3.2-9　観測結果一覧 1

No.	計測震度	最大加速度（cm/s^2）						最大変位（cm）	
		X 方向			Y 方向			X 方向	Y 方向
		BF	1F	RF	BF	1F	RF		
1	4.8	149.8	69.9	75.2	133.8	91.8	95.5	5.55	7.78
2	4.1	58.1	62.4	64.9	65.1	56.4	53.8	4.74	4.45
3	2.8	20.8	7.6	8.4	24.7	9.0	10.3	0.38	0.41
4	2.9	22.0	8.2	9.3	17.7	11.0	11.6	0.39	0.51
5	3.3	36.8	15.1	15.7	34.2	19.6	21.3	0.95	1.26
6	3.2	33.2	9.7	10.3	44.7	11.4	12.8	0.52	0.37
7	3.2	48.6	9.9	10.4	24.0	8.0	8.0	0.43	0.32
8	3.3	39.8	11.9	13.0	36.7	14.4	16.7	0.33	0.28
9	2.9	16.4	8.5	8.5	19.0	5.1	5.2	0.30	0.12
10	3.0	31.4	7.5	8.2	31.5	12.1	12.7	0.30	0.41
11	3.2	27.7	8.5	8.7	29.0	7.3	6.2	0.38	0.20
12	3.3	28.2	19.4	20.8	24.6	18.1	20.3	0.95	0.88

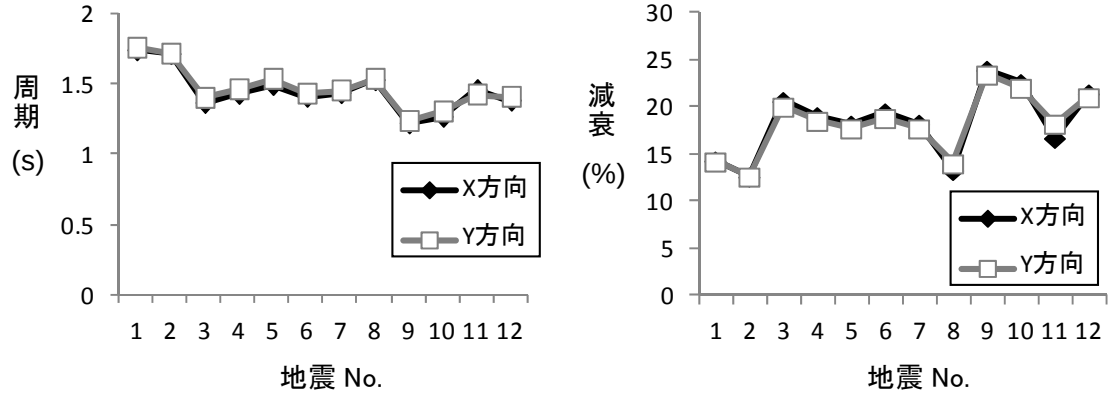
表 3.2-10　観測結果一覧 2

No.	全時刻		主要動					
	累積変位(m)	総累積変位(m)	累積変位(m)	総累積変位(m)	周期(秒)		減衰(%)	
					X 方向	Y 方向	X 方向	Y 方向
1	14.03	14.03	9.87	9.87	1.74	1.75	14.3	14.2
2	5.04	19.06	4.04	13.91	1.71	1.71	12.6	12.6
3	0.34	19.40	0.27	14.18	1.36	1.40	20.6	20.0
4	1.14	20.54	0.88	15.06	1.43	1.46	19.0	18.5
5	1.53	22.07	1.18	16.24	1.49	1.53	18.1	17.7
6	0.76	22.83	0.66	16.90	1.41	1.43	19.4	18.8
7	0.54	23.37	0.45	17.35	1.43	1.45	18.2	17.7
8	0.34	23.71	0.28	17.63	1.52	1.53	13.3	14.0
9	0.45	24.15	0.32	17.95	1.22	1.23	23.9	23.4
10	0.53	24.69	0.38	18.33	1.26	1.30	22.5	22.0
11	0.19	24.87	0.10	18.43	1.45	1.42	16.7	18.2
12	0.91	25.78	0.64	19.07	1.38	1.41	21.4	21.0



(a) 全時刻　　(b) 主要動

図 3.2-25 累積変位



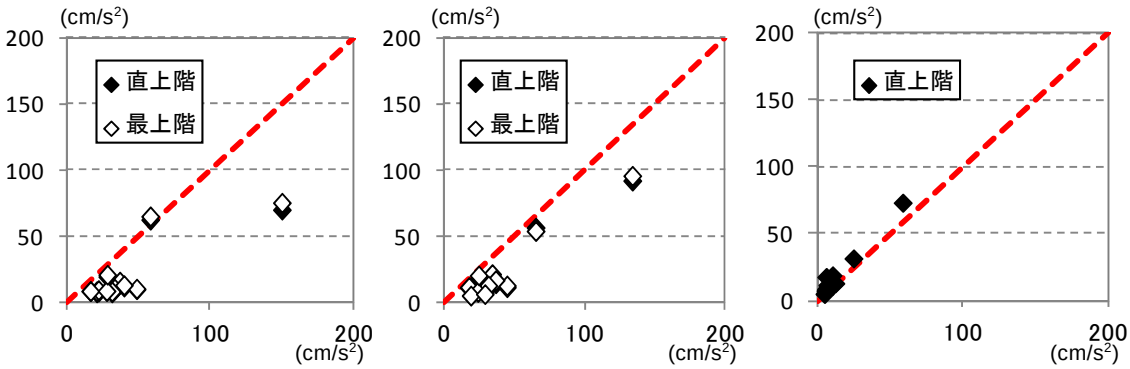
(a) 周期　　(b) 減衰

図 3.2-26　各地震における周期と減衰

c) 観測記録のその他の情報

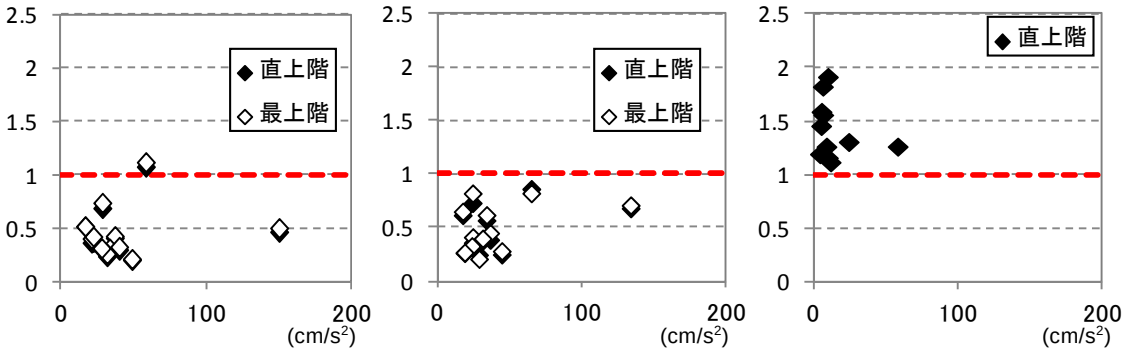
表 3.2-9 に示した値を図 3.2-27～図 3.2-30 に示す。最大余震を除き、応答加速度が入力加速度より小さくなり、余震においても応答が低減されている。全時刻で求めた累積変位は最大変位の約 200 倍、主要動の区間で求めた累積変位は最大変位の約 140 倍であった。

応答変位が大きい 3 つの地震について、加速度時刻歴、累積変位時刻歴、変位オービット、擬似速度応答スペクトル、変位時刻歴、ARX 法で算出した主要動区間における周期、減衰の時刻変化を図 3.2-31～図 3.2-36 に示す。周期、減衰の時刻変化は評価区間を 10 秒とし、0.5 秒毎にプロットしている。



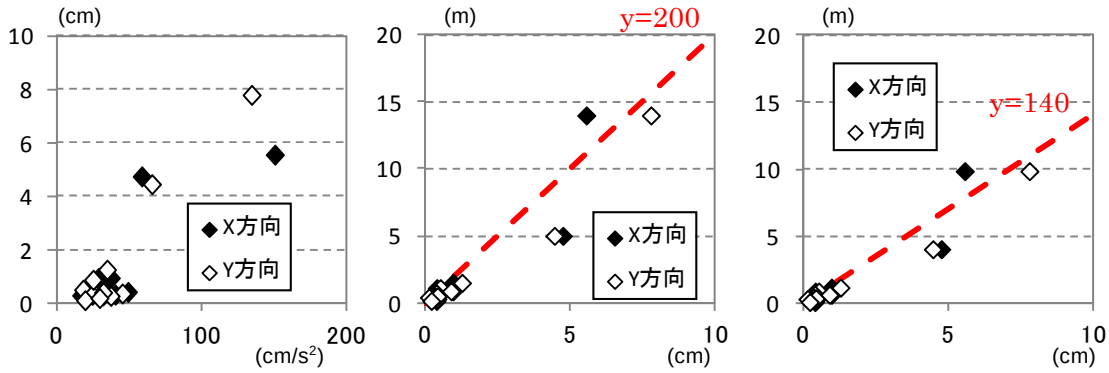
(a) X 方向　(b) Y 方向　(c) Z 方向

図 3.2-27　入力加速度と応答加速度



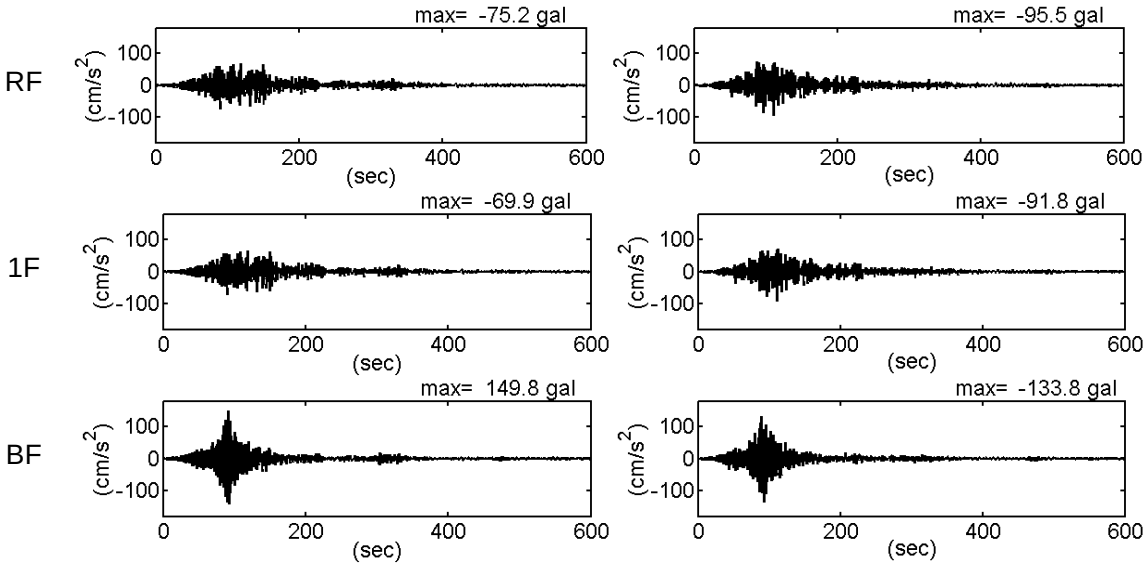
(a) X 方向　(b) Y 方向　(c) Z 方向

図 3.2-28　入力加速度と応答倍率



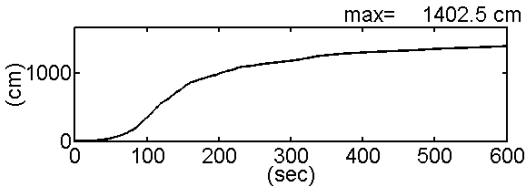
(a) 全時刻　(b) 主要動

図 3.2-29　入力加速度と最大変位　　図 3.2-30　最大変位と累積変位

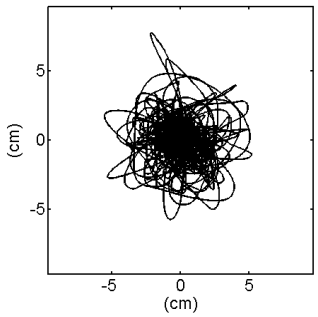


X 方向　　Y 方向

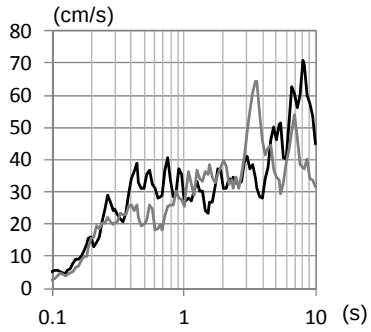
(a) 加速度時刻歴



(b) 累積変位

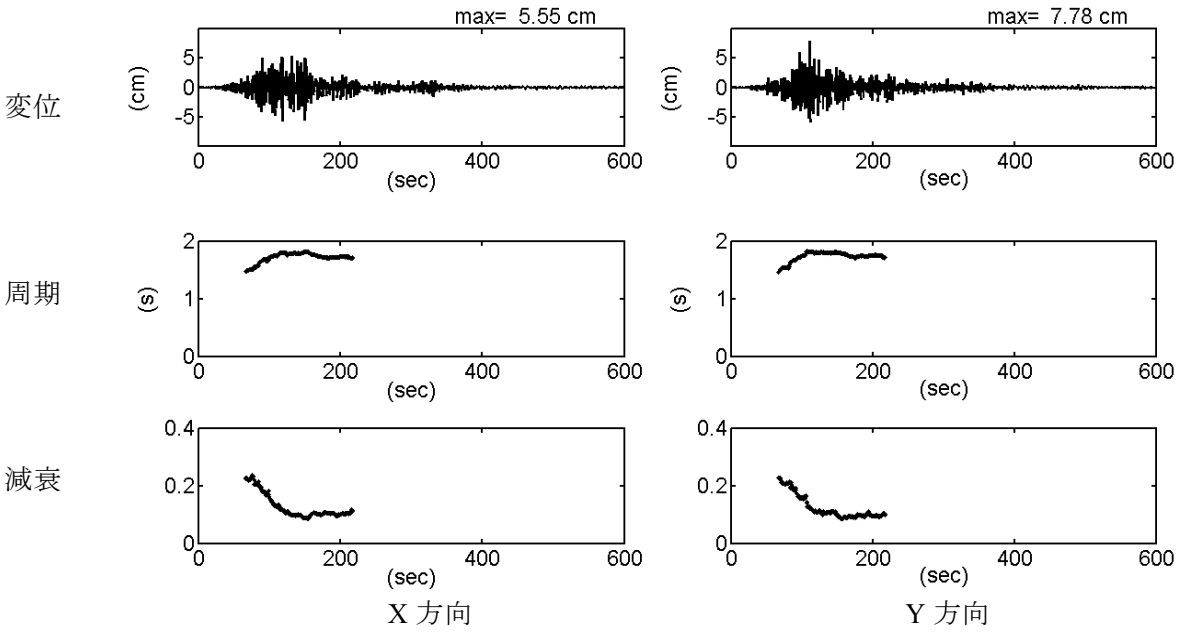


(c) 変位オービット



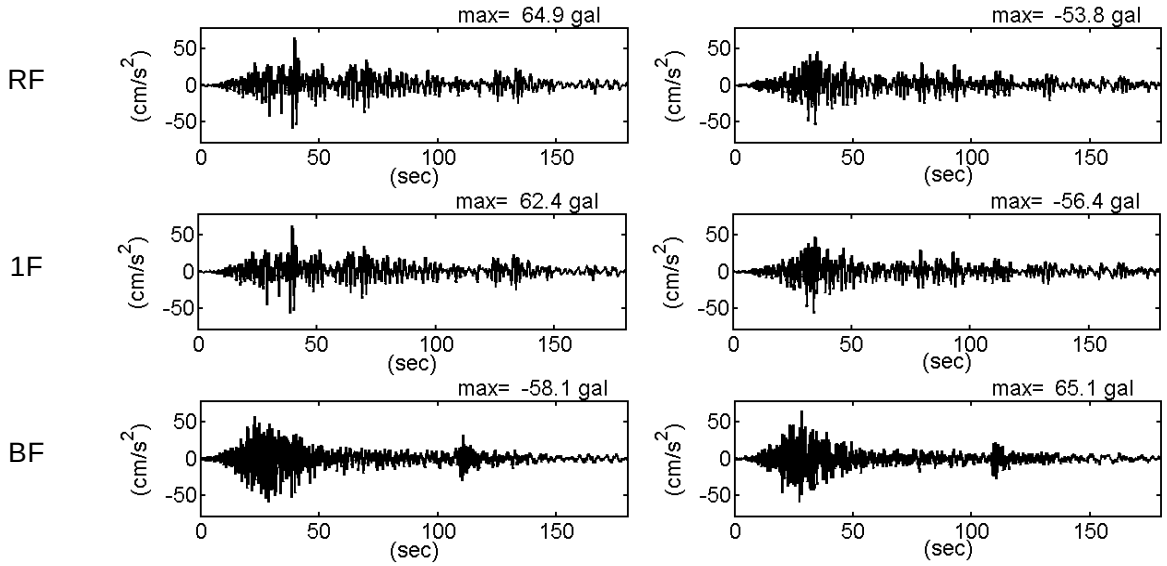
(d) 擬似速度応答スペクトル（黒：X 方向、灰：Y 方向）

図 3.2-31　No.1　2011/3/11　本震時　観測記録 1



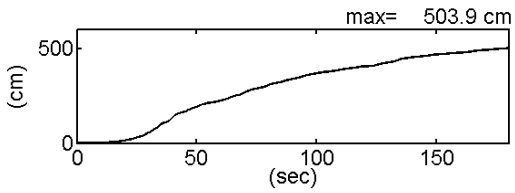
変位、周期、減衰時刻変化

図 3.2-32　No.1　2011/3/11　本震時　観測記録 2

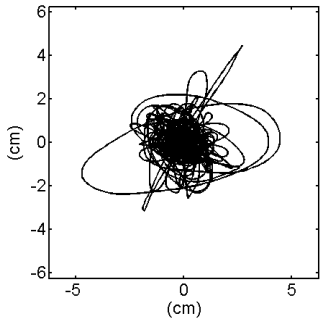


X 方向　　Y 方向

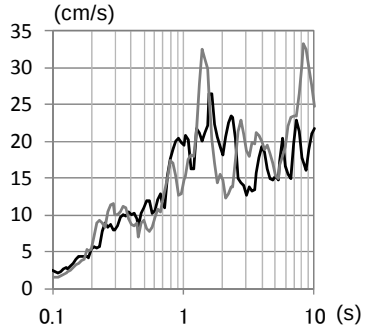
(a) 加速度時刻歴



(b) 累積変位

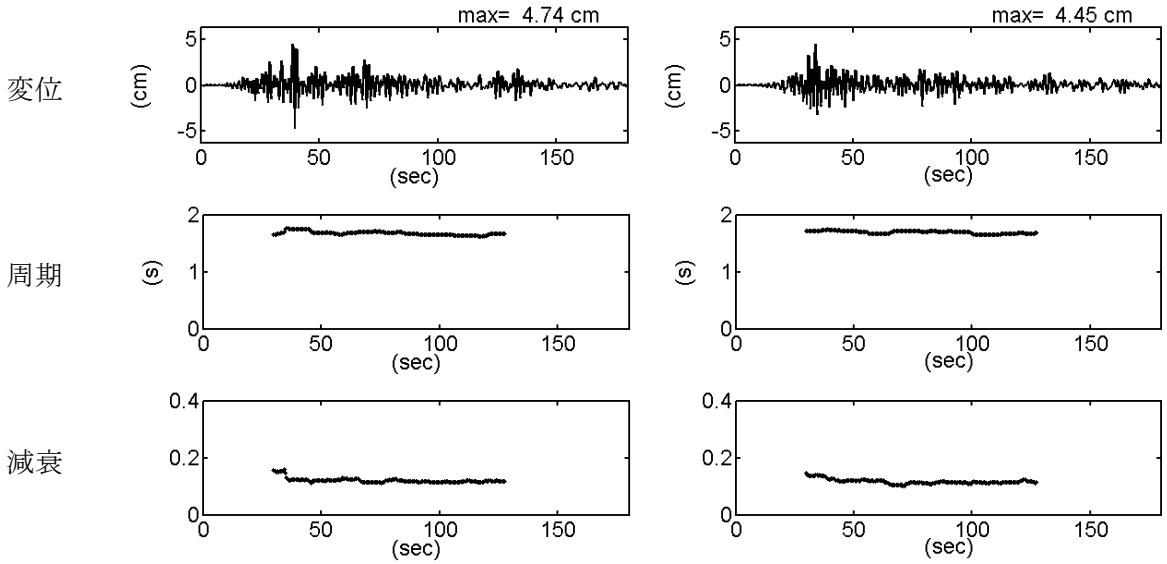


(c) 変位オービット



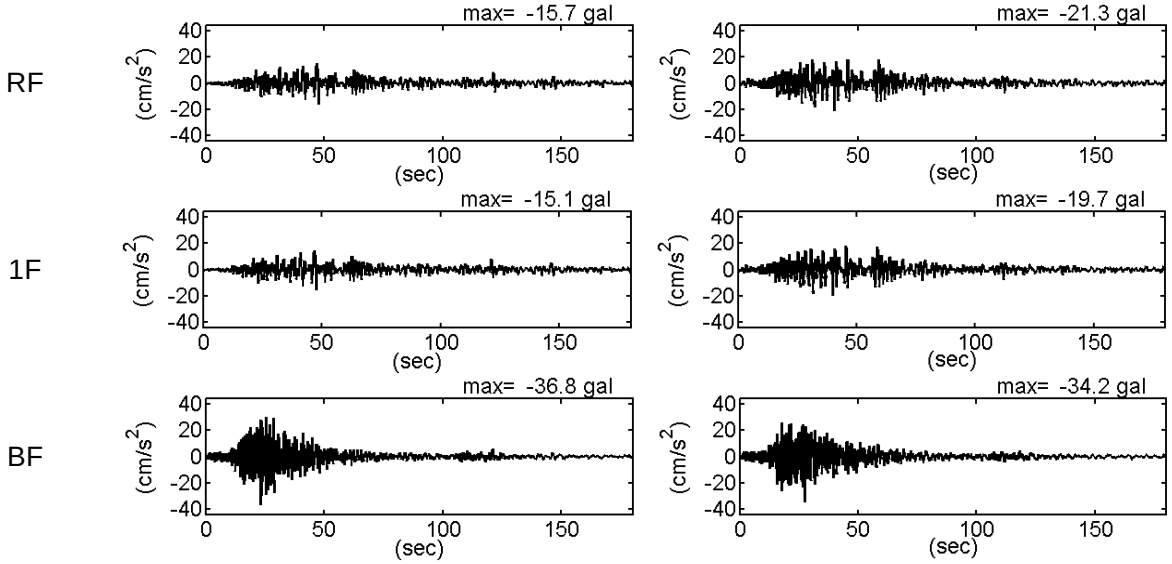
(d) 擬似速度応答スペクトル（黒：X 方向、灰：Y 方向）

図 3.2-33　No.2　2011/3/11　最大余震　観測記録 1



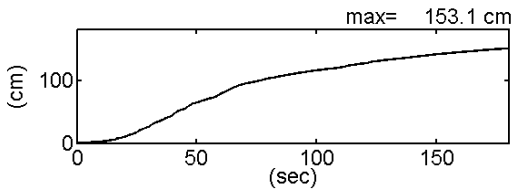
変位、周期、減衰時刻変化

図 3.2-34　No.2　2011/3/11　最大余震　観測記録 2

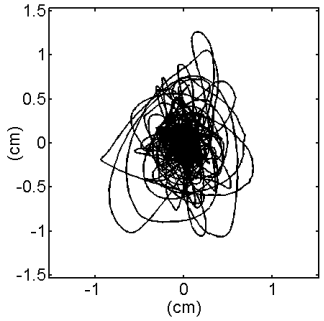


X 方向　　Y 方向

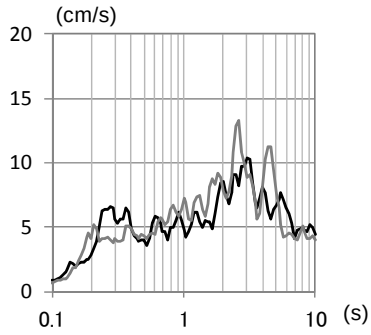
(a) 加速度時刻歴



(b) 累積変位



(c) 変位オービット



(d) 擬似速度応答スペクトル（黒：X 方向、灰：Y 方向）

図 3.2-35　No.5　2011/4/11　本震の 1 ヶ月後　観測記録 1

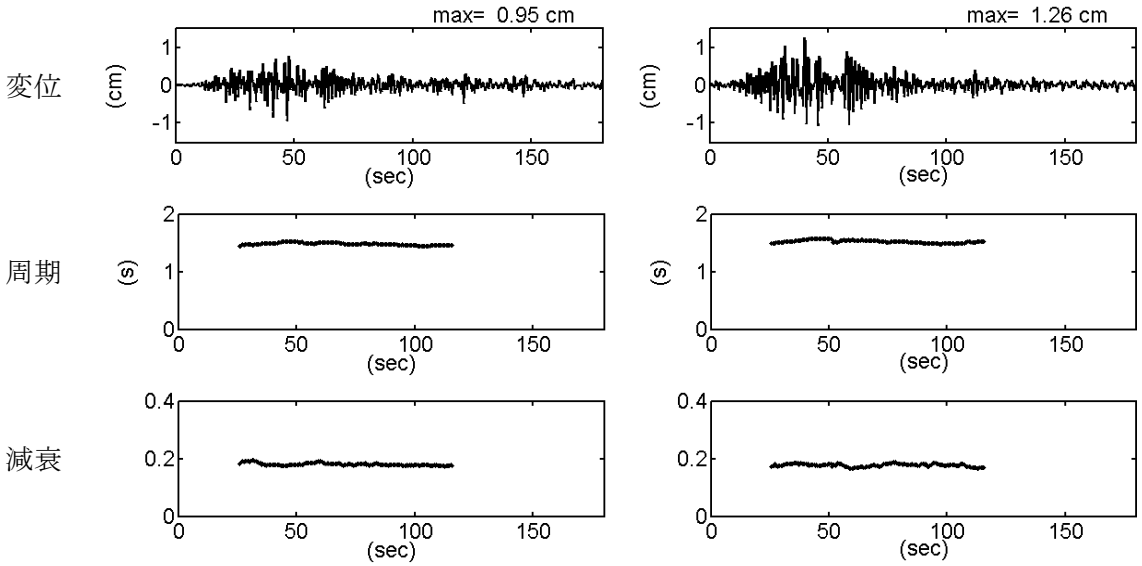


図 3.2-36　No.5　2011/4/11　本震の 1 ヶ月後　観測記録 2

4) D 建物

茨城県つくば市に建設されている免震建築物（積層ゴム支承+オイルダンパー）における観測記録の分析を行った。2011 年 3 月 11 日の本震では、基礎上面の記録で震度 5 強を観測している。

a) 建物概要

対象とした免震建築物の概要を以下に示す。

・所在地：茨城県つくば市
・構造種別：上部構造 S 造
・建物規模：地上 6 階
・免震部材：積層ゴム支承＋オイルダンパー（基礎免震）

b) 累積変位や固有周期等

本震以降に観測された地震記録のうち、免震層の最大変位が 5mm を超えた地震（10 地震）を分析の対象とした。表 3.2-11 に対象とした地震の諸元を示す。表 3.2-12 に各観測記録の計測震度、最大加速度、免震層最大変位、免震層累積変位および固有周期、減衰定数の評価結果を示す。免震層累積変位は、観測記録の全区間と主要動区間（エネルギー入力が 5~95%の区間）の 2 種類を求めた。また、建物の固有周期および減衰定数は、上記の主要動区間について ARX 法を用いて同定した。

図 3.2-37 に、本震と余震の累積変位量（2 方向）を、観測記録の全区間と主要動区間で合計した結果について比較して示す。主要動区間（エネルギー入力が 5~95%の区間）の累積変位量は、記録全区間の累積変位量の 75%程度の値となっている。2011 年 3 月および 4 月の余震（主要動区間）における累積変位量の合計値は 8.8m であり、本震（主要動区間）の累積変位量 7.7m よりも 14%程度大きな値となっている。

図 3.2-38、図 3.2-39 に各地震の固有周期と減衰定数を示す。固有周期は 2.2～2.5 秒を示しており、本震と余震でほとんど変化がなかった。一方，減衰定数は、免震層の最大変位が 3cm を超える地震（本震および 3.11 茨城県沖の地震）では 0.3 程度の値となっているが、免震層の最大変位が 2cm 以下の小さな余震では、0.1 程度の値となっている。

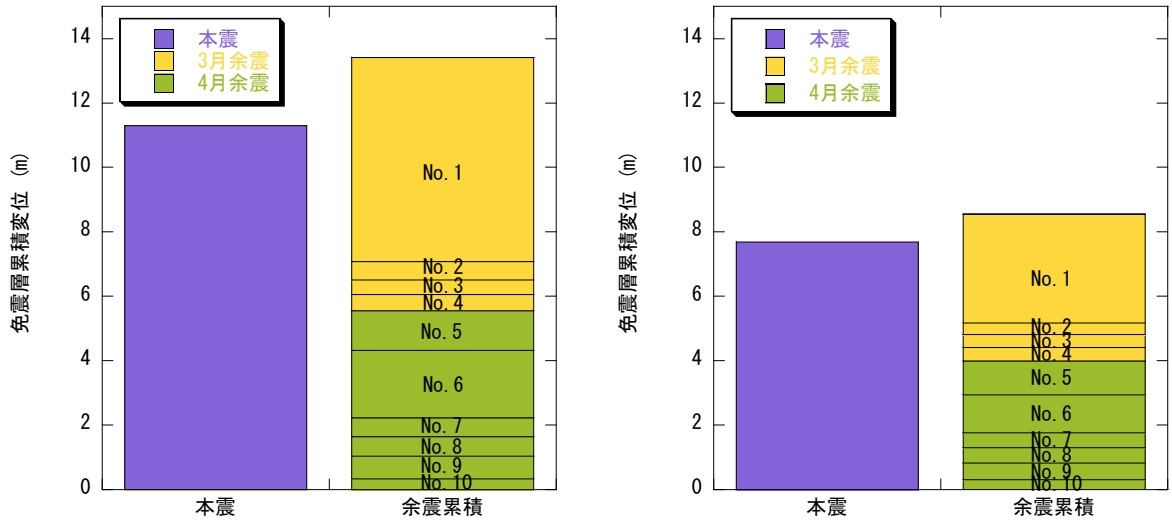
表 3.2-11　対象とした地震

	NO.	発生日時	震源	M
(本震)	0	2011/3/11 14:46	三陸沖	M9.0
	1	2011/3/11 15:14	茨城県沖	M7.5
	2	2011/3/14 10:02	茨城県沖	M6.2
	3	2011/3/16 12:51	千葉県東方沖	M6.1
	4	2011/3/19 18:56	茨城県北部	M6.1
	5	2011/4/7 23:33	宮城県沖	M7.1
	6	2011/4/11 17:16	福島県浜通り	M7.0
	7	2011/4/11 20:43	福島県浜通り	M5.9
	8	2011/4/12 8:08	千葉県東方沖	M6.4
	9	2011/4/12 14:08	福島県中通り	M6.4
	10	2011/4/16 11:19	茨城県南部	M5.9

表 3.2-12　観測結果一覧

	NO.	観測記録の全時間							主要動(総エネルギー入力の5%～95%に相当する時間)						
		計測震度	最大加速度(cm/s^2)				免震層最大変位(cm)		免震層累積変位(m)	免震層の累積変位(m)			固有周期 (s)		減衰定数	
			ﾋﾟｯﾄX	ﾋﾟｯﾄY	1F X	1F Y	X	Y	2方向	X	Y	2方向	X	Y	X	Y
(本震)	0	5.2	271.6	295.2	76.2	100.7	9.81	6.14	11.30	5.09	4.72	7.68	2.5	2.3	0.31	0.34
	1	4.2	98.0	73.7	31.9	38.5	3.45	2.67	6.34	2.20	2.11	3.38	2.3	2.2	0.26	0.26
	2	2.8	13.0	20.5	8.6	8.2	1.02	0.83	0.56	0.24	0.21	0.36	2.3	2.2	0.13	0.11
	3	2.8	13.2	16.7	6.7	9.3	0.74	0.61	0.46	0.26	0.25	0.39	2.3	2.2	0.12	0.12
	4	3.5	48.8	41.3	10.5	14.3	0.73	0.55	0.49	0.26	0.29	0.43	2.4	2.3	0.11	0.10
	5	3.0	20.9	28.0	10.3	11.9	0.93	0.63	1.24	0.74	0.59	1.04	2.3	2.3	0.12	0.09
	6	4.1	57.7	60.0	19.9	29.8	1.92	1.89	2.09	0.73	0.81	1.19	2.3	2.3	0.15	0.13
	7	3.4	21.2	20.1	7.8	10.8	0.90	0.84	0.59	0.31	0.27	0.45	2.4	2.3	0.22	0.13
	8	2.9	17.6	24.7	6.1	10.2	0.42	0.82	0.61	0.28	0.33	0.49	2.3	2.3	0.14	0.11
	9	3.1	19.9	29.0	10.0	11.4	1.01	0.79	0.70	0.35	0.31	0.52	2.4	2.3	0.09	0.09
	10	3.2	22.9	45.1	9.4	15.3	0.53	0.38	0.34	0.21	0.18	0.30	2.3	2.4	0.11	0.09

*No.1 の余震記録は、地震の途中 60 秒間分のデータ欠測があり、それ以外の時間について評価した。



(a)記録全区間の累積変位　　(b)主要動区間の累積変位

図 3.2-37　免震層累積変位の比較

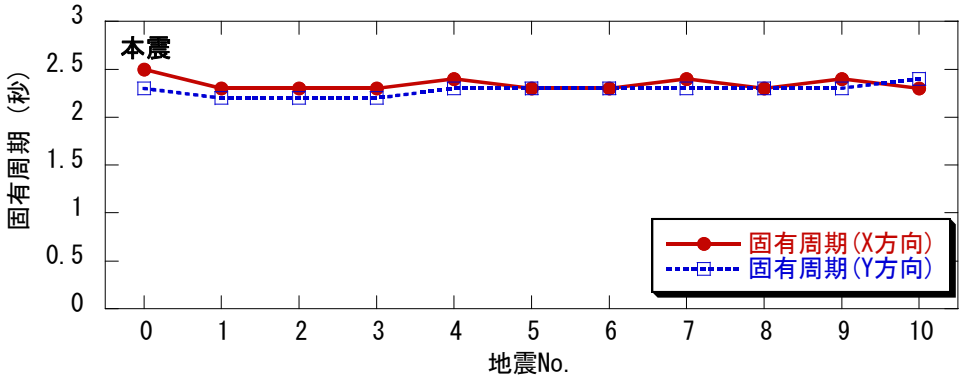


図 3.2-38　各地震における建物の固有周期

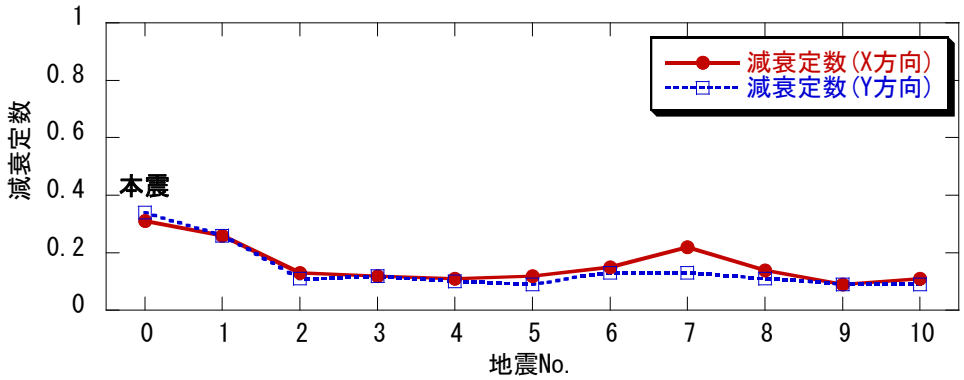
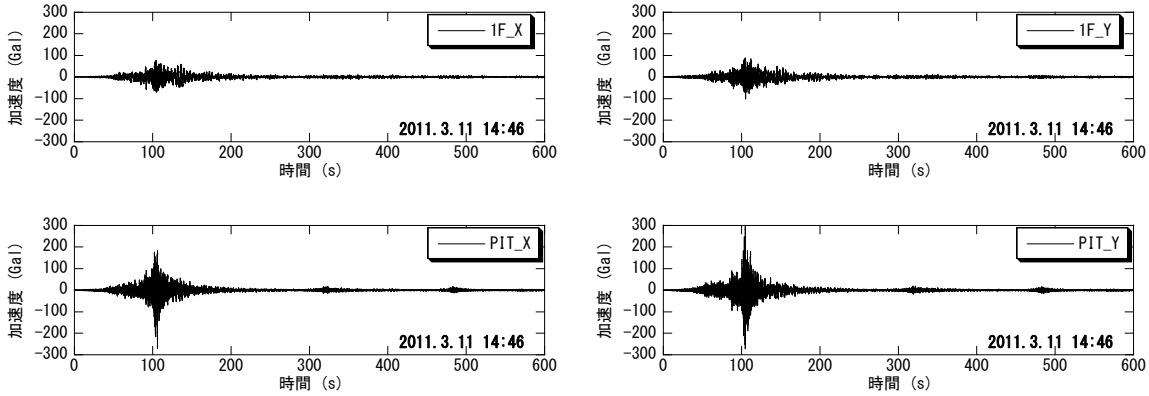


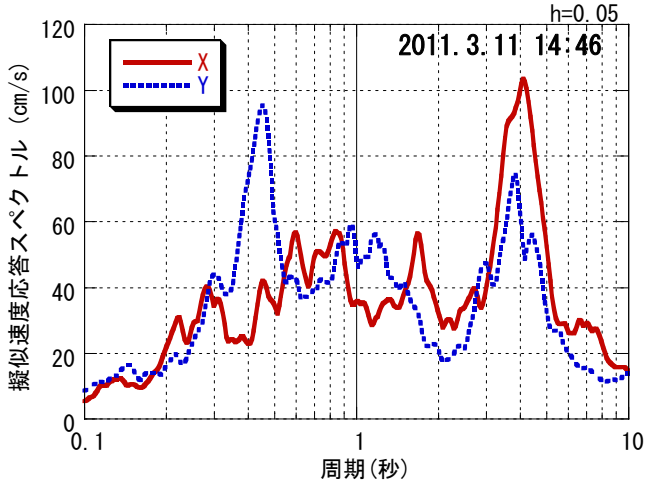
図 3.2-39　各地震における建物の減衰定数

c) 観測記録のその他の情報

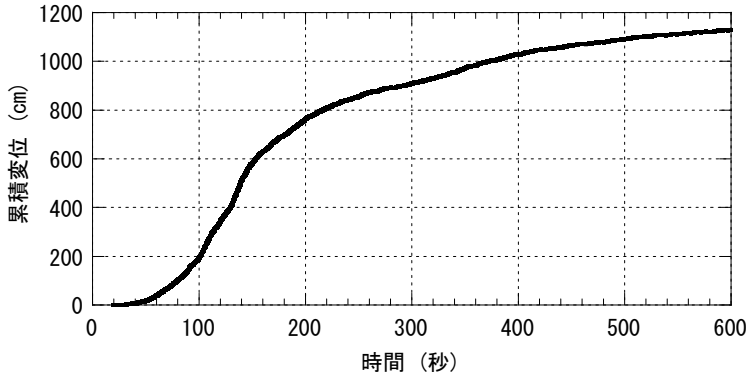
図 3.2-40～図 3.2-42 に、本震、2011.4.7 宮城県沖の余震（No.5）および 2011.4.11 福島県浜通りの余震（No.6）について、加速度の時刻歴波形，擬似速度応答スペクトル、免震層累積変位の時刻歴波形ならびに免震層の変位オービットを示す。



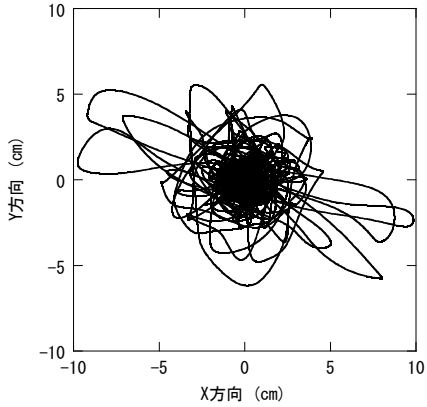
(a)　加速度波形



(b)　擬似速度応答スペクトル（ピット）

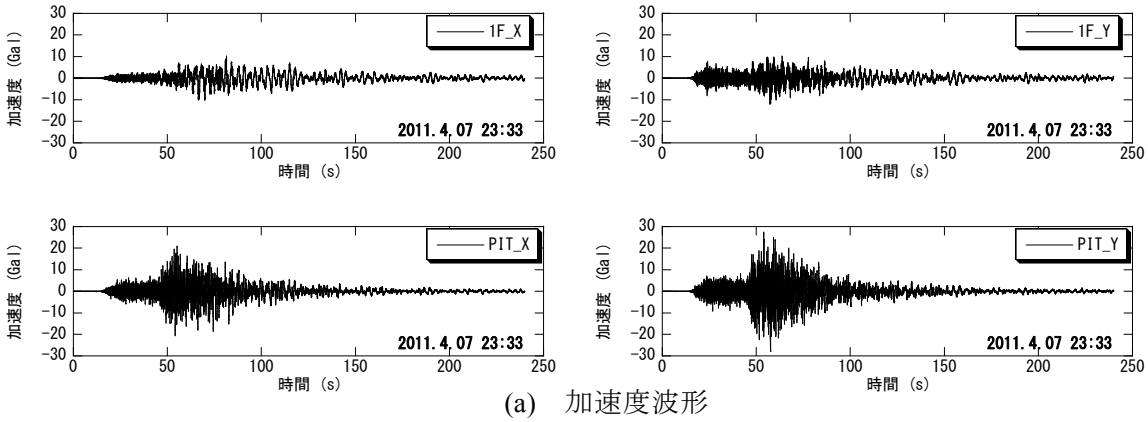


(c) 免震層累積変位(2 方向)

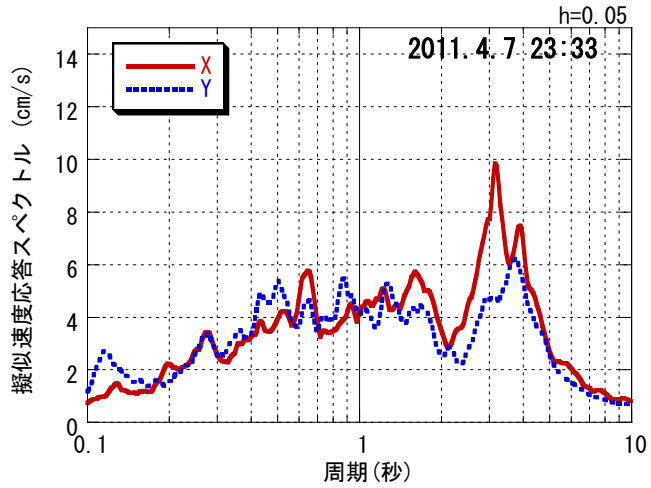


(d) 免震層変位オービット

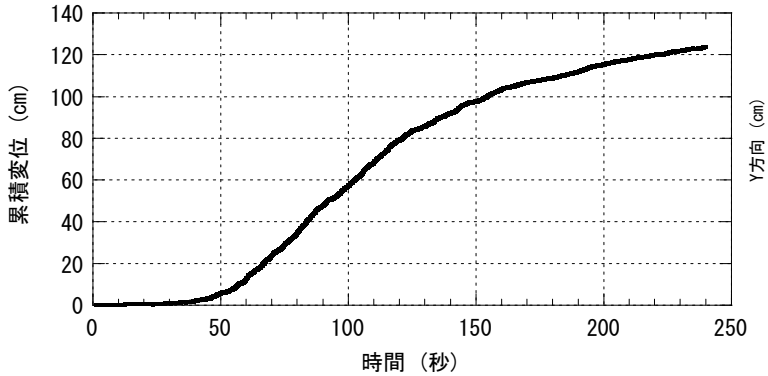
図 3.2-40　2011.3.11 本震の観測記録



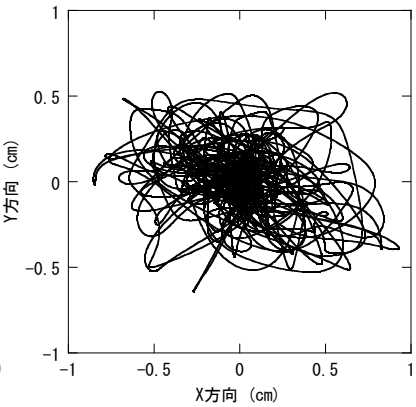
(a)　加速度波形



(b)　擬似速度応答スペクトル（ピット）

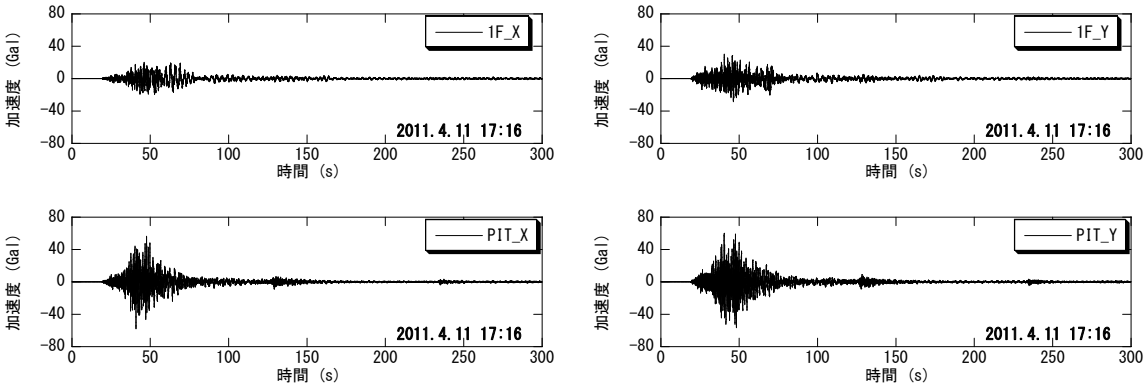


(c) 免震層累積変位(2 方向)

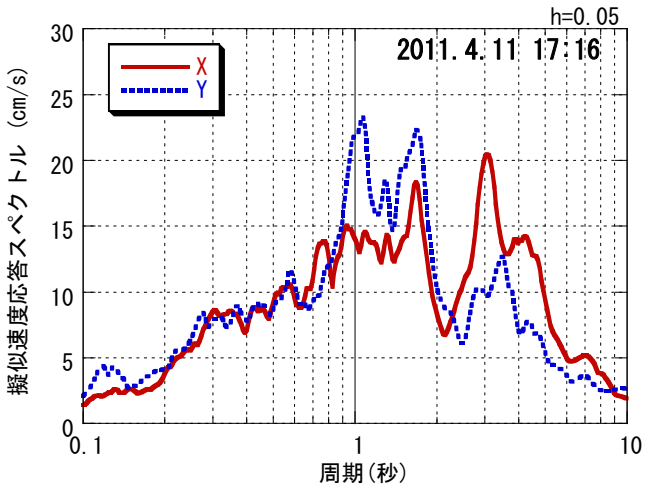


(d) 免震層変位オービット

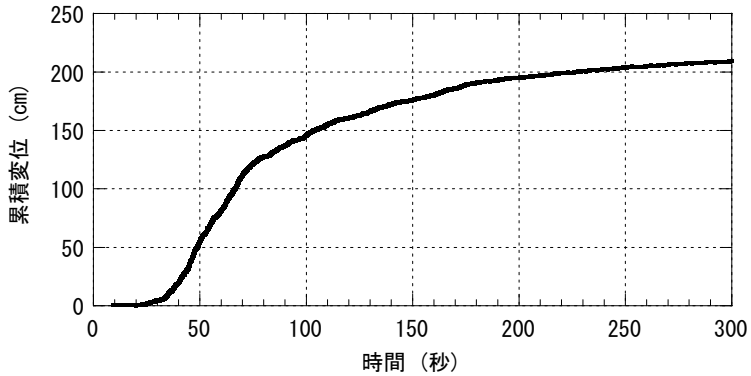
図 3.2-41　2011.4.7 宮城県沖の余震の観測記録（No.5）



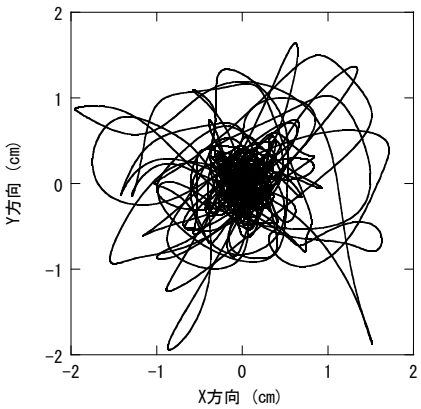
(a)　加速度波形



(b)　擬似速度応答スペクトル（ピット）



(c) 免震層累積変位(2 方向)



(d) 免震層変位オービット

図 3.2-42　2011.4.11 福島県浜通りの余震の観測記録（No.6）

5) E 建物

a) 建物概要

対象とした免震建築物と観測内容の概要を示す。

・所在地：東京都江東区
・竣工年：2011年2月
・建物用途：共同住宅、駐車場
・構造種別：ＲＣ造、免震構造（3-4階間に免震層）
・基礎形式：杭基礎（場所打ちコンクリート拡底杭）
・敷地面積：7,380m^2
・建築面積：3448m^2
・延床面積：51,856m^2
・建物規模：地上36 階、塔屋1階、軒高114m、最高高さ123m
・免震部材：鉛プラグ入り積層ゴム40台、天然ゴム系積層ゴム11台
・観測概要：地震計は、GL-1m・1 階・免震ピット階・4 階・36 階に設置している。

b) 累積変位や固有周期等

観測記録の中から、本震発生後の 2011 年 4 月までの記録より、建物 1 階での加速度記録より求めた計測震度が 2 以上のものについて検討を行った。

対象とした、地震の一覧を表 3.2-13 に示す。

表 3.2-13 対象観測地震一覧

No.	観測日時		1階	免震層変位		発震時　震源情報								震央距離(km)	震源距離(km)
			計測震度	X(cm)	Y(cm)	日時	緯度		経度		深さ	M	震央	最大震度	
1	2011/03/11	14:47:14	4.8	-15.8	-11.9	2011/3/11_14:46:18.1	38	6.2	142	51.6	24	9.0	三陸沖	7	386	387
2	2011/03/11	15:14:37	4.4	3.62	-8.24	2011/3/11_15:15:34.4	36	6.5	141	15.9	43	7.6	茨城県沖	6強	142	148
3	2011/03/11	15:26:06	2.3	0.26	-0.31	2011/3/11_15:25:44.4	37	50.2	144	53.6	34	7.5	三陸沖	4	515	516
4	2011/03/14	10:02:49	2.5	0.35	0.23	2011/3/14_10:02:38.7	36	27.5	141	7.5	32	6.2	茨城県沖	5弱	149	153
5	2011/03/15	22:31:48	2.7	0.34	0.33	2011/3/15_22:31:46.3	35	18.5	138	42.8	14	6.4	静岡県東部	6強	106	107
6	2011/03/16	12:52:02	2.5	0.17	-0.21	2011/3/16_12:52:2.7	35	50.2	140	54.3	10	6.1	千葉県東方沖	5弱	102	102
7	2011/03/19	18:57:10	2.5	0.14	0.16	2011/3/19_18:56:48.0	36	47.0	140	34.2	5	6.1	茨城県北部	5強	144	144
8	2011/04/11	17:16:26	3.3	0.64	-0.87	2011/4/11_17:16:12.0	36	56.7	140	40.3	6	7.0	福島県浜通り	6弱	164	164
9	2011/04/12	8:08:19	2.9	0.36	-0.45	2011/4/12_08:08:15.8	35	28.9	140	52.0	26	6.4	千葉県東方沖	5弱	98	102
10	2011/04/16	11:19:29	2.7	0.17	0.15	2011/4/16_11:19:31.6	36	20.4	139	56.7	79	5.9	茨城県南部	5強	78	111
11	2011/04/21	22:37:00	2.4	-0.10	-0.19	2011/4/21_22:37:2.1	35	40.5	140	41.1	46	6.0	千葉県東方沖	5弱	80	92

免震層の最大変位･累積変位及び免震建物の固有周期と減衰定数の結果を､表 3.2-14 に示す。最大変位、累積変位ともに、本震が圧倒的に大きいことが分かる。

図 3.2-43 に累積変位を示す。本震以外の余震での累積変位の総和は、本震の累積変位の 79%であった。

免震ピット階を入力、36 階を出力として、主要動部分の記録から、ARX 法を用いて固有周期・減衰定数の同定を行った。

固有周期は、大きな差は見られないが、減衰定数は、本震および本震直後の茨城県沖の余震で、大きな値を示している。

表 3.2-14 各地震動による免震層の累積変位と免震建築物の固有周期・減衰定数

No.	観測日時		震央	免震層変位		全時間		5～95%区間		固有周期(s)		減衰定数(%)	
				X(cm)	Y(cm)	累積変位(m)	総累積(m)	累積変位(m)	総累積(m)	X	Y	X	Y
1	2011/03/11	14:47:14	三陸沖	-15.8	-11.9	9.98	9.98	8.11	8.11	0.9	2.5	12.2	77.0
2	2011/03/11	15:14:37	茨城県沖	3.62	-8.24	3.00	12.97	2.91	11.01	2.2	2.4	48.9	33.7
3	2011/03/11	15:26:06	三陸沖	0.26	-0.31	0.43	13.40	0.43	11.44	2.2	2.2	4.8	6.2
4	2011/03/14	10:02:49	茨城県沖	0.35	0.23	0.45	13.85	0.35	11.80	2.3	2.2	9.7	6.6
5	2011/03/15	22:31:48	静岡県東部	0.34	0.33	0.45	14.31	0.33	12.13	2.2	2.1	5.3	4.1
6	2011/03/16	12:52:02	千葉県東方沖	0.17	-0.21	0.26	14.57	0.24	12.37	2.2	2.1	4.9	4.7
7	2011/03/19	18:57:10	茨城県北部	0.14	0.16	0.28	14.84	0.26	12.63	2.2	2.1	5.8	4.8
8	2011/04/11	17:16:26	福島県浜通り	0.64	-0.87	1.00	15.84	0.94	13.57	2.3	2.2	9.2	11.2
9	2011/04/12	8:08:19	千葉県東方沖	0.36	-0.45	0.61	16.45	0.57	14.14	2.2	2.2	8.2	8.8
10	2011/04/16	11:19:29	茨城県南部	0.17	0.15	0.30	16.75	0.19	14.32	2.2	2.1	5.6	4.4
11	2011/04/21	22:37:00	千葉県東方沖	-0.10	-0.19	0.23	16.98	0.18	14.51	2.1	2.1	4.0	6.0

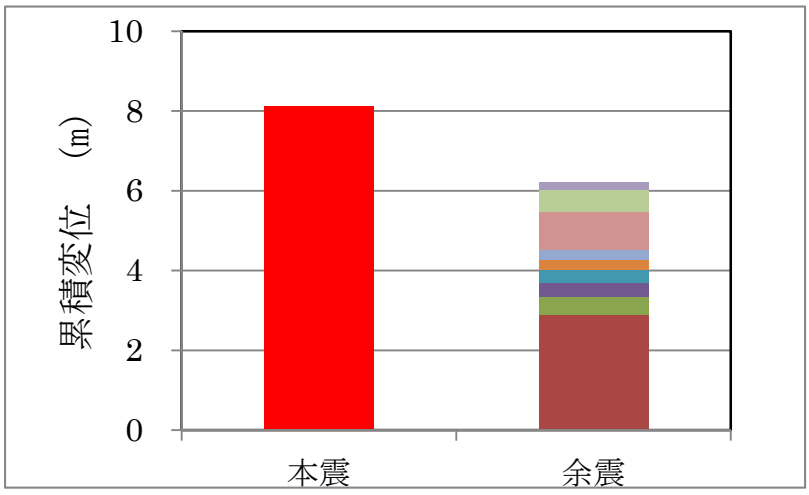


図 3.2-43 本震の累積変位と余震を合計した累積変位の比較

6) F 建物

茨城県つくば市に建設されている免震建築物における観測記録の分析を行った。2011 年 3 月 11 日の本震では、基礎上面の記録で震度 5 強を観測している。

a) 建物概要

対象とした免震建築物と観測内容の概要を示す。

・所在地：茨城県つくば市
・竣工年：2010 年
・建物用途：事務所
・構造種別：PCaPS コンクリート造
・基礎形式：杭基礎
・建物規模：地上 7 階、高さ 33m
・免震部材：天然ゴム系積層ゴム 11 基、鉛プラグ入り積層ゴム 45 基、鋼材ダンパー一体型鉛プラグ入り積層ゴム 9 基
・地震観測：地震計は免震層下部（基礎上面、ピット）、1 階床、6 階床に設置されている。各階で 3 成分の加速度記録が収録される。地震計と建物の方向については、建物の X（長辺）、Y（短辺）方向は、それぞれ北から 94 度、4 度、東に回転した方向となっている。

b) 累積変位や固有周期等

観測記録の中から、本震発生後の約 1 年間の記録の中から、免震層下部の計測震度が 3.0 以上となる地震動における記録を対象とし、免震層の最大変位・累積変位及び免震建物の固有周期と減衰定数の結果を、表 3.2-15 と表 3.2-16 に示す。地震の震央は、茨城県沖から三陸沖にかけた範囲が多いが、一部福島県や茨城県の内部で発生している地震もある。建物 1 階の最大加速度は、基礎上面（ピット）の値に対して、1 地震記録の 1 方向を除いてすべて小さくなっている。免震層の累積変位は、地震動により、大きな差が見られ、M9 の地震に対して、M5 程度になると、1/40～1/50 程度に小さくなる。

図 3.2-44 に、全観測時間に対して、90%のエネルギーが入力される時間における、本震と余震を合計した XY 面内での累積変位を示す。余震の累積変位に比べて、本震の累積変位の 8 割強の値となっている。

図 3.2-45 に、各地震動における免震建物の固有周期と減衰定数を示す。地震の番号は、表 3.2-15 の記録番号と対応している。本震や 3.11 の最大余震では、免震建物の周期は大きくなっているが、その他の地震では、0.6～0.8 秒を示す場合が多い。減衰定数は、0.1～0.3 の値となり、地震動におけるばらつきが大きい。本震や 3.11 の最大余震では、免震建物の減衰定数は、0.3 前後の値を示している。

表 3.2-15　各地震動による免震層の最大変位・累積変位（全観測時間）

記録番号	観測日時	地震諸元		計測震度	最大加速度(cm/s^2)				免震層最大変位(cm)		免震層累積変位(m) 2方向
		震源	M		ピットX	ピットY	1FX	1FY	X	Y	
1	2011/03/11 14:47	三陸沖	9.0	5.2	232.6	326.9	76.1	91.7	5.91	4.72	6.24
2	2011/03/11 15:14	茨城県沖	7.6	4.3	92.3	95.2	56.7	46.2	1.66	2.01	2.24
3	2011/04/11 17:16	福島県浜通り	7.0	4.0	53.3	77.4	45.2	46.4	1.30	0.95	1.11
4	2011/03/19 18:56	茨城県北部	6.1	3.5	29.1	39.7	19.7	29.7	0.316	0.333	0.350
5	2011/04/11 20:42	福島県浜通り	5.9	3.3	19.7	31.2	15.8	28.0	0.207	0.757	0.209
6	2011/04/16 11:19	茨城県南部	5.9	3.3	35.6	26.8	28.7	28.7	0.445	0.194	0.280
7	2012/03/14 21:05	千葉県東方沖	6.1	3.2	34.4	23.5	22.4	21.3	0.509	0.177	0.253
8	2011/04/12 14:07	福島県中通り	6.4	3.2	25.0	28.9	22.4	23.3	0.260	0.316	0.316
9	2011/04/07 23:32	宮城県沖	7.2	3.1	23.5	24.0	23.2	22.8	0.267	0.235	0.472
10	2011/07/15 21:01	茨城県南部	5.4	3.1	31.1	22.2	27.1	16.6	0.363	0.102	0.172
11	2012/03/01 07:32	茨城県東方沖	5.3	3.0	39.6	37.5	20.0	14.3	0.218	0.123	0.136
12	2011/03/16 12:52	千葉県東方沖	6.1	3.0	28.3	22.1	21.9	18.9	0.336	0.136	0.206

表 3.2-16　各地震動による免震層の累積変位と免震建築物の固有周期・減衰定数
（90%エネルギー入力時）

記録番号	観測日時	地震諸元		計測震度	主要動継続時（総入力エネルギー入力の5-95%に相当する時間）						
					免震層累積変位(m)			固有周期(s)		減衰定数	
		震源	M		X	Y	2方向	X	Y	X	Y
1	2011/03/11 14:47	三陸沖	9.0	5.2	2.84	2.79	4.41	1.54	1.92	0.28	0.31
2	2011/03/11 15:14	茨城県沖	7.6	4.3	0.98	0.86	1.44	1.33	1.28	0.30	0.30
3	2011/04/11 17:16	福島県浜通り	7.0	4.0	0.425	0.457	0.695	1.02	0.88	0.30	0.25
4	2011/03/19 18:56	茨城県北部	6.1	3.5	0.128	0.165	0.229	0.81	0.73	0.20	0.17
5	2011/04/11 20:42	福島県浜通り	5.9	3.3	0.068	0.097	0.129	1.19	0.66	0.39	0.16
6	2011/04/16 11:19	茨城県南部	5.9	3.3	0.129	0.107	0.187	0.63	0.81	0.09	0.26
7	2012/03/14 21:05	千葉県東方沖	6.1	3.2	0.116	0.090	0.163	0.66	0.85	0.15	0.30
8	2011/04/12 14:07	福島県中通り	6.4	3.2	0.127	0.135	0.206	0.72	0.68	0.19	0.17
9	2011/04/07 23:32	宮城県沖	7.2	3.1	0.181	0.212	0.310	0.68	0.65	0.15	0.15
10	2011/07/15 21:01	茨城県南部	5.4	3.1	0.084	0.061	0.115	0.63	0.92	0.10	0.27
11	2012/03/01 07:32	茨城県東方沖	5.3	3.0	0.056	0.049	0.082	0.58	0.74	0.09	0.20
12	2011/03/16 12:52	千葉県東方沖	6.1	3.0	0.090	0.065	0.124	0.64	0.78	0.12	0.25

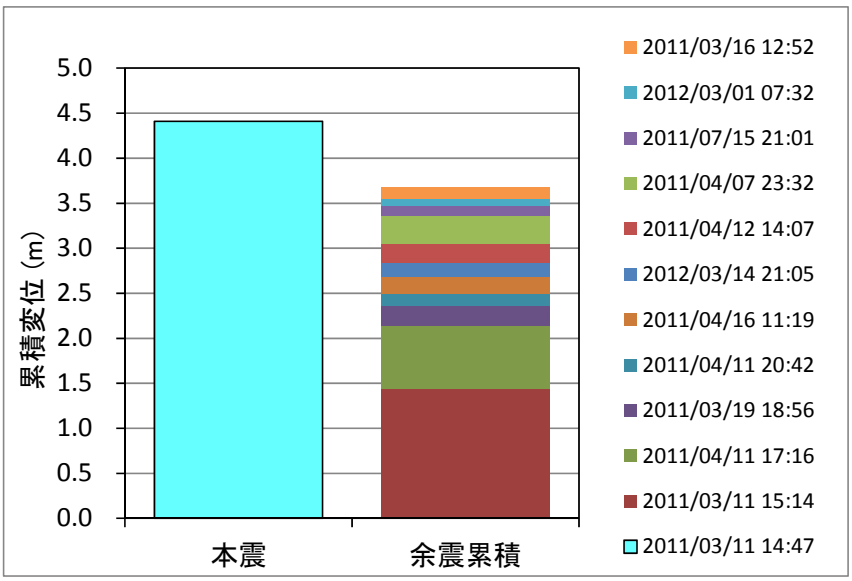


図 3.2-44　本震の累積変位と余震を合計した累積変位の比較

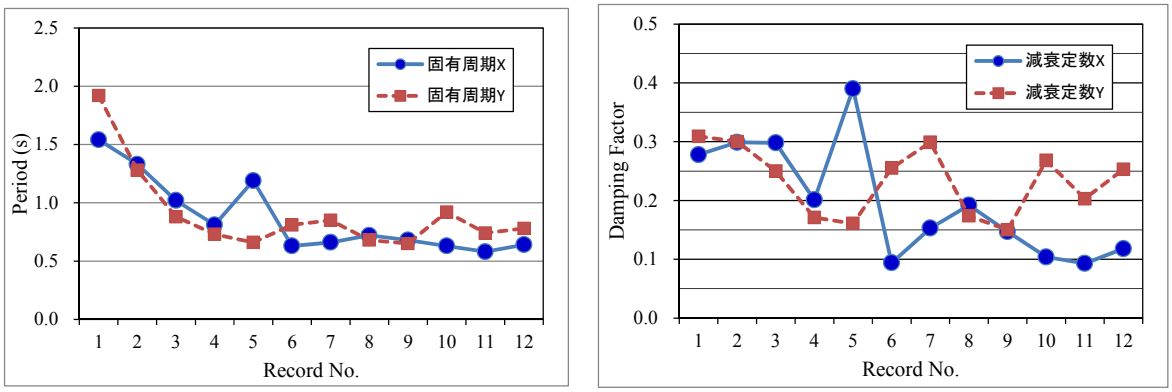
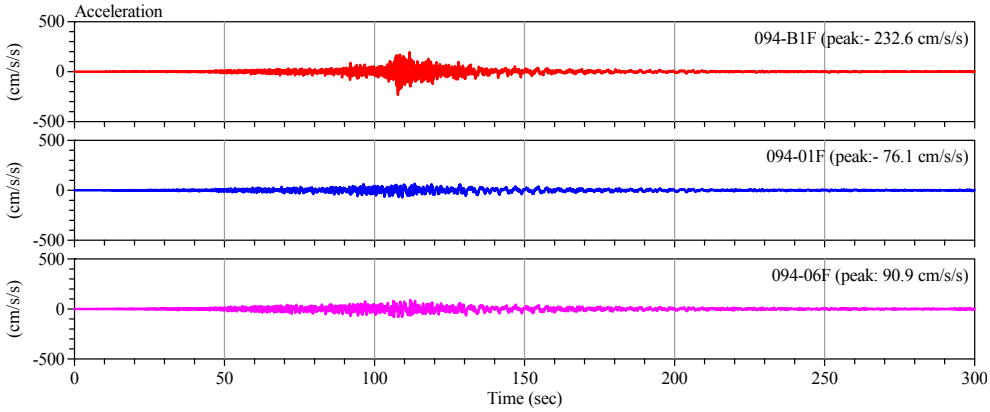


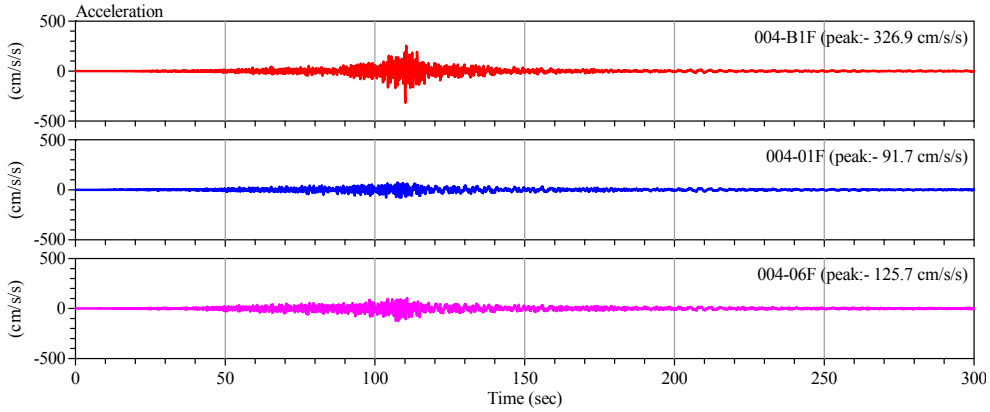
図 3.2-45　地震動別免震建物の固有周期と減衰定数（地震動の番号は、表 3.2-15 参照）

c) 観測記録のその他の情報

2011.3.11 の本震で得られた免震建物の観測結果の概要を、以下に示す。図 3.2-46、図 3.2-47、図 3.2-48 および図 3.2-49 に、それぞれ免震建物の加速度時刻歴、免震層の変位時刻歴、免震層の変位オービット及び入力地震動の擬似速度応答スペクトルを示す。



X 方向



Y 方向

図 3.2-46　免震建物の加速度波形（2011.3.11 本震）

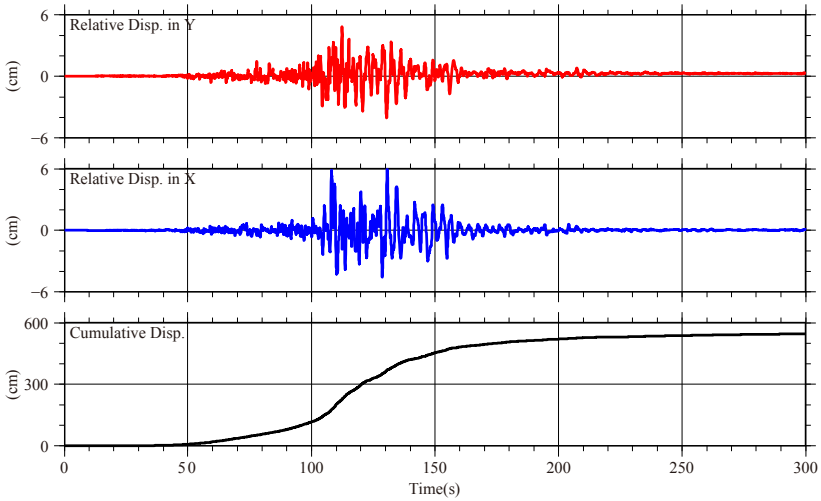


図 3.2-47　免震建物の免震層変位及び累積変位の波形（2011.3.11 本震）

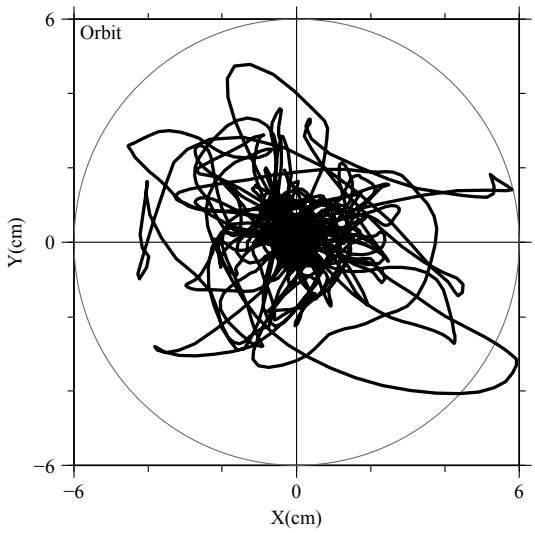


図 3.2-48　免震建物の免震層変位オービット（2011.3.11 本震）

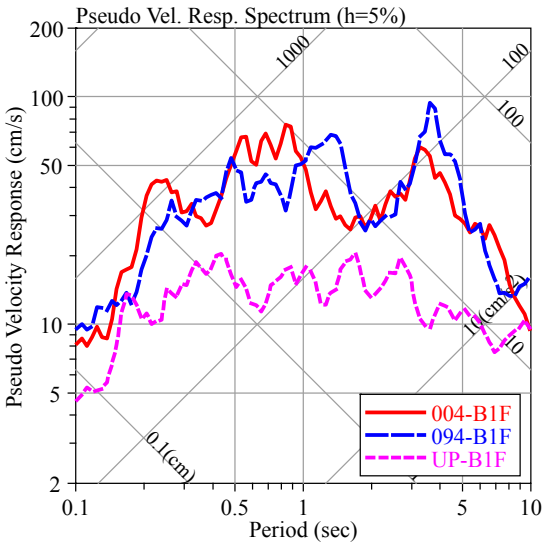


図 3.2-49　免震層下部の記録の擬似速度応答スペクトル（減衰定数 5%）（2011.3.11 本震）

3.3 まとめ

2011 年 3 月 11 日の東北地方太平洋沖地震の後に発生した余震を対象とし、これらの地震が免震建築物に与えた影響を定量的に把握するため、観測記録に基づく建物挙動について検討を行った。検討の対象とした建物は、事業者から提供された免震建築物 6 棟（A～F 建物）とし、観測結果から得られた加速度、免震層変位あるいは計測震度が一定の水準以上となる余震に対して、加速度、免震層変位、免震層累積変位ならびに建物の固有周期と減衰定数について整理した。

本検討から得られた主な知見は以下の通りである。

1) 加速度と免震層変位

対象とした免震建築物 6 棟の所在地は、D 建物と F 建物が茨城県、A 建物、B 建物および E 建物が東京都、C 建物が千葉県となっている。D 建物と F 建物では、建物から距離の近い場所で余震が発生しており、その他の建物と比較して、大きい加速度と免震層水平変位が生じている。これら 2 つの建物についで、千葉県の C 建物の応答値が大きくなっている。

2) 免震層累積変位

免震層累積変位は地震の全継続時間ならびに主要動継続時間における値を算定した。主要動継続時間を地震による総エネルギー入力の 5%～95%に相当する時間で定義した。本検討によれば、主要動継続時間における免震層累積変位は地震の全継続時間の値と比較して概ね 60～85%程度となっていた。また、余震の主要動継続時間における免震層累積変位の総和（総累積変位）を求め、本震の累積変位と比較した。これより、余震の総累積変位は本震の累積変位に対して、A 建物で 50%、B 建物で 67%、C 建物で 93%、D 建物で 114%、E 建物で 79%、F 建物で 83%であり、D 建物の総累積変位は本震の累積変位を超えていた。すなわち、免震建築物が複数の余震による揺れを受けることで、本震に匹敵するあるいはそれを上回る累積変位が免震層に生じる可能性があることが分かる。

3) 固有周期と減衰定数

建物の固有周期と減衰定数を ARX 法などを用いて同定した。固有周期については、いずれの建物についても、本震における値が最大（1.0～2.5 秒）となる。また、基礎（ピット）における入力加速度が大きくなるほど固有周期が大きくなる傾向があるが、余震による固有周期の変化は小さい。減衰定数についても、固有周期と同様の入力加速度に対する傾向が認められるが、地震に対するばらつきが大きくなっている。

第Ⅷ部

まとめと課題

１　まとめ

長周期地震動に対する免震建築物の安全性照査に向けて必要となる各種免震部材の性能を、縮小または実大試験体による性能評価試験及び破壊実験を行った。また多数回繰り返し特性を考慮した地震応答解析を行った。各免震部材について、多数回繰り返し特性（累積変形、温度上昇などの関数として評価）を考慮する方法として、詳細法（時々刻々特性変化を考慮する方法）および簡易法（通常の応答解析で評価できる方法）により、応答結果を整理した。繰り返し依存性を考慮した場合としない場合の比較を通して、各免震部材の繰り返し依存性の地震応答に影響をまとめた。さらに、長周期地震動の発生が予想される地点（東京・大阪）に建設されている免震建築物をそれぞれ１棟選定し、建物及びその周辺地盤に計測機等を設置して、地震観測体制を整備し、２棟の免震建築物の観測記録の整理及び分析を行った。提供された観測結果や公表観測資料、被災調査報告等に基づき、65 件のデータを用いて、免震建築物の地震挙動の概要を整理した。

以下に、各項目のまとめを示す。

（１）免震部材のエネルギー吸収性能の整理　［第Ⅱ部第１章］

既存の文献による「長周期地震動の免震性能評価の実状調査」を行い、2010 年度までの知見についてとりまとめた。その内、免震材料が保有しているエネルギー吸収性能については、詳細な内容について試験データを踏まえて紹介した。

また、10 棟の代表的な免震建築物における時刻歴応答解析を実施し、エネルギー吸収性能に着目した検討を行うとともに、これらの応答時刻歴データを用いて、代表的な免震材料として支承材 3 種類（鉛プラグ入り積層ゴム・高減衰ゴム系積層ゴム・弾性すべり支承）、ダンパー3 種類（鋼材ダンパー・鉛ダンパー・オイルダンパー）についてエネルギー吸収の評価を行い、エネルギー吸収性能を把握した。

（２）縮小試験体を用いたエネルギー吸収性能の把握　［第Ⅲ部第１章］

各種免震部材の性能を明らかとすることを目的として、部材の多数回繰り返し実験（縮小または実大実験）を行った。実験の対象とする部材は、支承材（アイソレータ）、減衰材（ダンパー）として一般的に用いられる、天然ゴム系積層ゴム、鉛プラグ入り積層ゴム、高減衰ゴム系積層ゴム、弾性すべり支承（高摩擦）、弾性すべり支承（低摩擦）、鋼材ダンパー、鉛ダンパー、オイルダンパー、粘性ダンパーとした。各部材の試験条件として、振幅 400mm 以下の３水準（400、200、100mm）の変位振幅および累積変形量２水準（50m, 100m）の正弦波加振を設定した。上記水準を目標として各部材の試験を実施し、多数回繰り返しのもとでのエネルギー吸収性能の変化を確認した。

（３）実大試験体を用いたエネルギー吸収性能の把握

１）実験手法の選定　［第Ⅳ部第１章］

実大試験体の多数回繰り返し実験及び、破壊実験まで実施可能な実験計画を立案した。長時間・大振幅動的繰り返し加振、鉛直載荷、水平 2 方向加振、破断実験の 4 条件を実現出来る実験方法として、震動台上部に反力梁を架設する方法（上部反力梁方式）を選択した。水平方向加振時には、震動台の上下方向に変位が生じ、試験体へ作用する鉛直軸力が変動することが考えられるた

め、水平方向加振時の鉛直方向変位を実測した上で、鉛直方向変位をキャンセルする補償波（逆位相波）を作成して、補償加振を行うこととした。

２）載荷治具の設計・製作　［第Ⅳ部第 2.1・2.2 章］

Eーディフェンス震動台を用いた多数回繰り返し荷重を受ける実大免震部材の構造実験を行うための載荷治具の設計・製作を行った。遠隔操作の油圧ジャッキにより試験体と反力フレームを固定し、コッターでせん断力を伝達する機構を開発した。加振波形の作成にあたっては、無負荷時に試加振を行い目標加振波形に対する震動台応答波形の誤差を評価して、誤差波形の逆位相波を用いて補償波を作成する方法を検証した。軸力導入および水平方向の加振に伴う主梁フレームの上下変形、傾斜角を把握し、加振精度を検証した結果、精度の高い加振が実現出来ていることを確認した。反力フレームに取付けた歪ゲージから加振実験時の応力を評価し、反力フレームは充分な性能を有していることを確認した。

３）エネルギー吸収性能の確認（その１）　［第Ⅳ部第 2.3 章］

平成 23 年度は実大弾性すべり支承（直径 80cm）の 1 方向および 2 方向多数回繰り返し実験、実大オイルダンパー（最大減衰力 1000kN）の大振幅多数回繰り返し実験及び高速度加振実験を行った。また、実大天然ゴム系積層ゴムについては静的に多数回繰り返し試験を実施した。

弾性すべり支承の加振実験では、繰り返しに伴って摩擦係数が低下する傾向が見られ、累積変形 50m の長周期試験で摩擦係数が 0.147 から 0.062 と初期の 42%程度にまで低下した。セット間のインターバルでは摩擦係数が回復（上昇）する傾向が見られた。試験終了後のすべり板温度は、長周期試験（1 方向）で 204℃、長周期試験（2 方向）で 260℃まで上昇したが、長周期および限界試験を経験したすべり支承試験体は、すべり面の四フッ化エチレン樹脂（PTFE）に損傷は見られず健全な状態を保っていた。

オイルダンパーの加振実験では、限界加振条件での油温は 108℃まで上昇したが、履歴性状の変化は小さく、シール部から作動油の滲みだしは見られなかった。油温の上昇に伴い、最大減衰力と吸収エネルギー量は僅かに低下する傾向が見られたが、常温（20℃）に対する油温 108℃時の最大減衰力の低下率は伸び側･縮み側共に約 4%､エネルギー吸収量の低下率は約 5%であった。大変形・大速度試験では、各加振の 1 波目では正常な減衰力-変位特性が得られたが、2 波目では圧縮側の減衰力に立ち上がり遅れ（無効ストローク）が発生した。

４）エネルギー吸収性能の確認（その２）　［第Ⅴ部］

平成 24 年度は減衰性能を持つ積層ゴム系実大支承として鉛プラグ入り積層ゴムと高減衰ゴム系積層ゴムについて、正弦波と地震応答波による 1 方向多数回繰り返し加振および大振幅加振実験を行った。さらに、楕円加振と真円加振の正弦波と地震応答波による 2 方向多数回繰り返し加振実験を行った。

鉛プラグ入り積層ゴムの加振実験のうち、正弦波 1 方向加振では繰り返し回数が増すごとに降伏荷重 Qd が低下し履歴ループが小さくなっているものの、安定したループを描いていることが確認された。Qd は初期サイクルで大きく低下する傾向が見られたが、それ以降の低下は緩やかであった。正弦波 2 方向加振の楕円加振における主梁方向の荷重-変形関係は、受梁方向の振幅の影

響により Qd は小さくなっているものの、安定した履歴曲線を描いた。一方、正弦波 2 方向加振の楕円加振の受梁方向加振、真円加振においては、主梁・受梁方向加振ともに履歴ループ面積の殆どない履歴曲線が得られた。試験終了後に鉛プラグが 3 層に分断されていたことが確認され、真円加振あるいは楕円加振の過酷な加振によって分断が生じて減衰性能の顕著な低下を生じたものと推察された。地震応答波 1 方向と 2 方向では、温度上昇に明確な差は現れず、鉛中央温度は加振開始と同時に急上昇し、加振が終了すると直ちに温度が低下し始めていた。これに対し、鉛上部やフランジ中央の温度上昇は緩やかで、加振終了後も温度が上昇し続けた。実験結果のシミュレーション解析では、1 方向および 2 方向の地震応答波加振については積層ゴムの内部温度や荷重変形関係、降伏荷重の変化について実験結果とよく一致した。

鉛プラグ分断の現象の解明と、実験時に見られた荷重変形関係の履歴面積が小さくなる現象のシミュレーション解析やその特性変化が地震応答に与える影響評価については今後の課題である。

高減衰ゴム系積層ゴムの加振実験では、水平 1 方向繰り返し加振、水平 2 方向繰り返し加振とも、加振によるゴム温度の上昇とともに履歴ループが細くなった。1 方向繰り返し加振時には、最大変位時の荷重の低下が顕著であるが､2 方向加振時では最大変位時の荷重はあまり低下せず、荷重切片の低下が見られた。楕円加振、真円加振においては、直交方向の加振の影響から、1 方向加振時と比較して履歴ループ形状の顕著な変化が見られた。1 方向、2 方向入力とも正弦波の繰り返し加振は、大振幅によるエネルギーが連続的に入力され続けるため、試験体の温度上昇が大きい。一方、地震応答波は大振幅によるエネルギーの入力は数回、断続的に生じるため試験体の温度上昇は､正弦波に比べると小さい｡真円加振では上フランジ直下に内部剥離の兆候が見られ、その後の加振により内部剥離の拡大と被覆ゴムの破れが生じた。300m 以上の累積変形を経験し、加振開始時のゴム温度も 50℃以上と高温であったことから、本実験における試験体の損傷は高温状態で厳しい加振ケースを繰り返したことによる試験体の疲労の影響が大きいと推測された。

（４）免震部材特性の評価と建物応答評価

１）評価手法の整理と応答影響の分析　［第Ⅲ部第 2 章］

既往の研究と免震部材メーカー提供による多数回繰り返し特性を解析に反映させ、長周期地震動に対する免震建物の応答解析を実施し、応答評価を行った。その中で、各免震部材について、応答解析に反映させるべきもの（累積変形、温度上昇などの関数として評価できるもの)、通常の応答解析を行なった結果から評価できるものなど、評価手法を整理した。応答解析に反映させる部分については、各社が独自にプログラムを改良し、繰り返し依存性を考慮できる解析プログラムを整備した。繰り返し依存性を考慮した場合としない場合の比較を通して、各免震部材の繰り返し依存性がどのように応答に影響するかを検討した。

２）部材特性の評価と応答評価の実施　［第Ⅳ部第 3 章］

鉛プラグ入り積層ゴム、高減衰ゴム系積層ゴム、天然ゴム系積層ゴム＋鋼材ダンパー、天然ゴム系積層ゴム＋鉛ダンパー、天然ゴム系積層ゴム＋弾性すべり支承（高摩擦)、天然ゴム系積層ゴム＋弾性すべり支承（低摩擦）＋粘性ダンパーで構成される免震層の長周期地震動による影響を把握するため、上記（２）に示した実験結果に基づいた、繰り返し依存性を考慮できる解析プログラムを整備した。次に、それらを用いた長周期地震動に対する免震建築物の応答性状を把握す

るため、１質点モデルの応答解析を実施し応答評価を行った。

鉛プラグ入り積層ゴムでは、繰り返し特性を考慮した解析手法として熱伝導解析と温度上昇による力学的特性変化を考慮した手法について、正弦波繰り返し加振実験のシミュレーション解析によりその妥当性を確認した。高減衰ゴム系積層ゴムでは、繰り返し特性を考慮した復元力モデルとして、積層ゴムの代表温度を評価指標として復元力特性値を変化させる解析モデルを作成し、縮小試験体の多数回繰り返し実験結果を良好に再現することを確認した。弾性すべり支承（高摩擦）では、摩擦係数の累積吸収エネルギー依存性を考慮することにより、繰り返し荷重により摩擦係数が低下し、応答変位が大きくなることが確認された。弾性すべり支承（低摩擦）では、摩擦係数を累積変位と吸収エネルギーに依存する式としてモデル化した結果、試験と解析は良好な対応を示した。

鋼材ダンパーでは、応答評価に用いた設計モデル（バイリニア）とトリリニアモデルとの比較を行い、入力波および倍率によっては最大水平変形で 2 割程度差が生じることを確認した。鉛ダンパーでは、振幅および繰り返しによるエネルギー吸収量に応じてダンパーの耐力を変化させる解析モデルを用いると、実験結果の力学特性を精度よく表現できることを確認した。粘性ダンパー（減衰こま）では、試験結果から得られた減衰力の変動を単位体積当たりのエネルギーとして評価した結果、試験結果と解析は良好な対応を示した。

３）簡易応答評価手法の検討　［第Ⅵ部第１章］

２）で整備した繰り返し依存性を考慮できる解析プログラムを用い、長周期地震動に対する１質点モデルの応答解析を実施し、各免震部材の繰り返し依存性を既往の設計モデルに簡易的に取り込むための手法を検討した。

鉛プラグ入り積層ゴムでは、エネルギーの釣り合いを基にした包絡解析法による応答予測評価法及び降伏荷重をあらかじめ低減させた一定値により地震応答解析を行う応答評価法の各手法を比較した。詳細応答評価法による応答評価結果と良い一致を示すケースもあるが、地震動の特性によっては過大、過小評価するケースも見られた。

高減衰ゴム系積層ゴムでは、累積吸収エネルギーの値(解析終了時の 95%値)を基に、等価剛性および等価減衰定数の低下率を設定した。高減衰ゴム系積層ゴムの等価剛性および等価減衰定数を設定する際、通常の考慮される免震部材特性のばらつき（製品ばらつき、経年変化、環境温度）に、累積吸収エネルギーによる低下率を加え、地震応答解析を行う方法を示した。簡易評価による結果は、詳細解析結果と同様に免震層最大変位と免震層の累積変形量を増大させることを確認した。ただし、簡易評価は等価剛性と等価減衰定数の低下した値を解析開始時から一定値として用いるため、免震層変位をやや大きめに評価する結果となった。

鉛ダンパーの繰り返し依存性を簡略的に評価する方法として、初期から一律にダンパーの降伏耐力を低減する２つの手法を提案し、このうちダンパーの変形量を最大変形時、ダンパーの累積吸収エネルギーを解析終了時におけるダンパーの累積吸収エネルギーとして、降伏耐力を低減する方法が、安全側の評価を与えることがわかった。

弾性すべり支承（高摩擦）では、累積すべり変位と摩擦係数の関係式を用いて設計モデルにおける最大変形時累積すべり変位を指標に摩擦係数を算定し、これを設計モデルに適用して時刻歴応答解析を行う方法を提案した。その結果、累積すべり変位依存モデルにおける応答最大変形と

設計モデルにおける応答最大変形は概ね一致し、簡易評価方法の妥当性を確認した。

弾性すべり支承（低摩擦）と粘性ダンパーの組み合わせでは、弾性すべり支承(低摩擦)をバイリニアモデルにより、粘性ダンパーを免震材料認定値による簡易モデルの設定法を提案した。弾性すべり支承の摩擦係数と粘性ダンパーの繰り返し依存係数および入力温度の設定法により、応答の傾向に差が見られた。

（５）免震建築物の地震観測とシミュレーション解析と免震建築物の挙動調査［第Ⅷ部］

１）観測体制の整備　［第Ⅶ部第１章］

長周期地震動が免震建築物の応答に及ぼす影響を把握することを目的として、長周期地震動の発生が予想される地点（東京・大阪）に建設されている免震建築物をそれぞれ１棟選定し、建物及びその周辺地盤に計測機等を設置して、地震観測体制を整備した。両地点とも、2011 年 3 月 11 日東北地方太平洋沖地震での貴重な記録が観測された。

２棟の免震建築物の観測記録の整理及び分析を行った。さらに観測地震動による免震建築物のシミュレーション解析を行い、長周期地震動が免震建築物の応答に及ぼす影響を評価した。大阪の免震建築物では、平成 22 年度に 3 件、平成 23 年度に 2 件、計 5 件の観測記録が得られたが、免震構造が効果を発揮する入力レベルでは無かった。東京では、平成 22 年度に 85 件、平成 23 年度に 87 件、平成 24 年度に 29 件、計 201 件の観測記録が得られ、免震構造としての効果が確認された。また、2011 年東北地方太平洋沖地震時のシミュレーション解析により、温度の補正を行うことで観測記録と良く一致することを確認した。

また、南海トラフでの３連動及び４連動地震における建設地の地震動に対して、免震建築物（東京）の応答を確認するために、地震応答計算によるシミュレーション解析を行った。免震層の相対変位の最大値は、約 459mm となり、2011 年東北地方太平洋沖地震の本震で観測された最大変位の３倍程度となった。

２）公表観測記録の整理・分析　［第Ⅶ部第２章］

提供された免震建築物の観測結果や公表されている地震観測資料、被災調査報告等に基づき免震建築物の特徴、地震応答、被害調査結果、構造設計・維持管理に反映させる項目をまとめた。東日本大震災を踏まえて必要とされる免震部材の実験項目を整理した。

65 件の地震観測データについて、免震建築物や免震部材の概要・最大加速度等の一覧表にまとめ、一部についてはデータシートにまとめ、データの分析を行った。免震層下で観測された水平加速度の最大値は 6～756 cm/s^2 の範囲にあり、免震層直上階と最上階の水平加速度は概ね 250 cm/s^2 で頭打ちとなっていた。免震層の最大変位は震央距離 350km 以内では 5～24cm、震央距離 350km 以上では 5cm 前後の値が多かった。

３）東日本大震災の本震・余震記録の分析　［第Ⅶ部第３章］

2011 年東北地方太平洋沖地震の本震および余震を対象とし、免震建築物６棟（茨城県２棟、千葉県１棟、東京都３棟）について、観測記録に基づく建物挙動について検討を行った。免震建築物が複数の余震を受けることで、本震に匹敵するあるいはそれを上回る累積変位が免震層に生じることが確認された。固有周期については、いずれの建物も本震時で最大（1.0～2.5 秒）となり、

基礎（ピット）の入力加速度が大きくなるほど固有周期が長くなる傾向が見られ、余震による固有周期の変化は小さかった。

２　課題

免震部材の長周期地震動に対する性能評価と建築物応答への影響を評価することを目的として、縮小免震部材の多数回繰り返し加振実験、実大免震部材の Eーディフェンス震動台を用いた多数回繰り返し加振実験、免震部材の特性を考慮した応答解析、免震建築物の地震観測を実施した。本検討により各種免震材料の長周期・長時間の揺れに対するエネルギー吸収性能が明らかとなり、長周期地震動に対する免震建築物の安全性を照査するためのクライテリア設定の根拠となるデータを取得した。

エネルギー吸収性能の把握に関して、鉛プラグ入り積層ゴムにおける鉛プラグ分断の現象の解明と実験時に見られた荷重変形関係の履歴面積が小さくなる現象のシミュレーション解析やその特性変化が地震応答に与える影響評価、高減衰ゴム系積層ゴムの 2 方向加振時の繰返しまたは疲労の蓄積による特性変動と限界性能を分離して評価するための追加実験や 2 方向加振時の荷重変形関係を表現できる復元力モデルの構築などが、今後の課題である。

＜謝辞＞

本報告書は、建築基準整備促進事業「12 免震建築物の基準の整備に資する検討（平成 21 年度）」「27-3 長周期地震動に対する免震建築物の安全性検証方法に関する検討（平成 22～24 年度）」との共同研究において実施された成果の一部を再構成したものである。

本報告書を作成するに当たり、一部の免震部材については、装置メーカーの好意により、実験結果を提供して頂きました。

また、第Ⅶ部において、国土地理院の電子国土 web システムを利用させて頂きました。

関係各位に謝意を表します。

© 建築研究資料　　第１７０号

平成 28 年　4 月　印刷・発行

編集
発行　国立研究開発法人建築研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは下記まで

国立研究開発法人建築研究所企画部企画調査課

〒305-0802　茨城県つくば市立原１番地

電話(029)　864-2151（代）