

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返し加振される外力下での免震部材の繰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-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

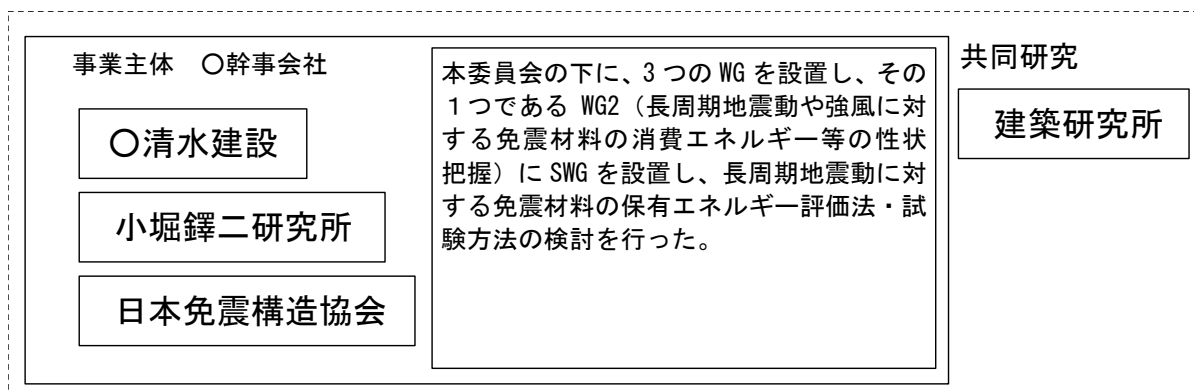
建築基準整備促進事業 12 では、清水建設、小堀鐸二研究所、日本免震構造協会が事業主体となり、建築研究所との共同研究により調査が実施された。また、建築基準整備促進事業 27-3 では、大成建設、鹿島建設、清水建設、竹中工務店が事業主体となり、建築研究所、防災科学技術研究所、日本免震構造協会との共同研究により調査が実施された。

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」

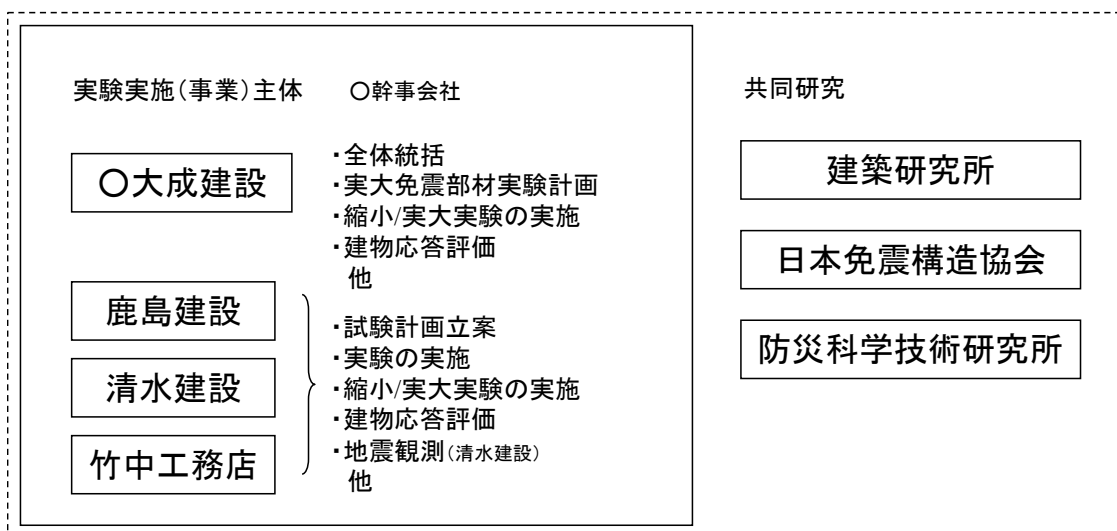


図1 調査実施体制

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	高山 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 (WG 2：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	讚井洋一	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	住友金属鉱山シボレックス
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 $\gamma=50\%$ および $\gamma=100\%$ では長周期・限界の両試験とも繰り返しの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				
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った。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みると、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。繰り返しの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

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 $\phi 1000$ 、弾性すべり支承は $\phi 800$ 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、 $\phi 1000$ の積層ゴム支承で、 $\pm 40\text{cm}$ （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はいくつか見られた。我が国において、 $\phi 1000$ 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	<ul style="list-style-type: none"> ・積層ゴム：φ1000 ・弾性すべり支承：φ800 	<ul style="list-style-type: none"> ・弾性すべり支承は、積層ゴムよりも基準面圧が大きいいため、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： <ul style="list-style-type: none"> ・±40cm ・4秒周期で30回～60回（累積変形で50m～100m） 地震波加振： <ul style="list-style-type: none"> ・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。 	<ul style="list-style-type: none"> ・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。
鉛直载荷	<ul style="list-style-type: none"> ・最大 5000kN* 	<ul style="list-style-type: none"> ・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	<ul style="list-style-type: none"> ・各方向とも±40cm（せん断歪 200%）以下程度 	<ul style="list-style-type: none"> ・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	<ul style="list-style-type: none"> ・±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） 	<ul style="list-style-type: none"> ・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、载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ため、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の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 方向繰り返し加振（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、徐々に鉛内部を通過し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 方向加振時に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しみだしは見られなかった。

多数繰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

るといふ、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 $\gamma=100\%$ （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'）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 μ_0)に対して、累積すべり変位依存性モデルでは、繰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。

(二) 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/s²の範囲であり、震央距離350kmを境界に250cm/s²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/s²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。

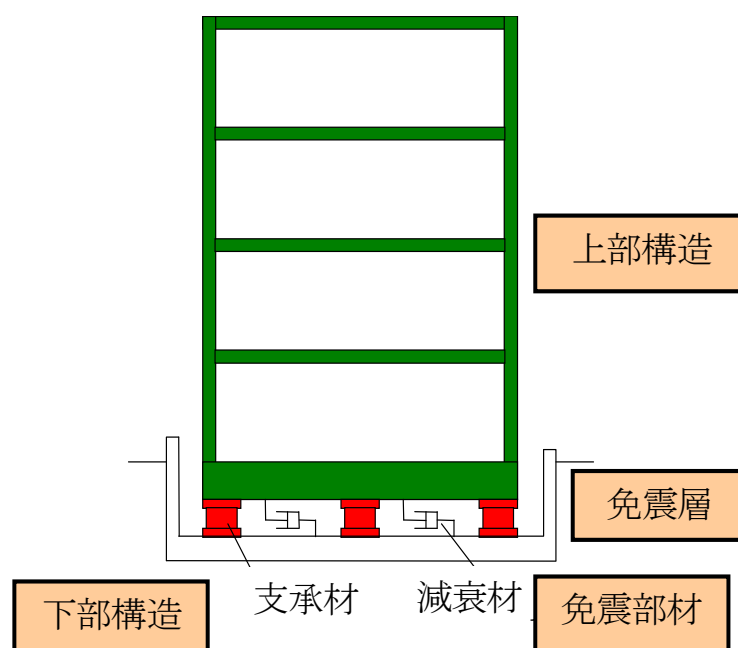


図2 免震構造の概要

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。特定の製品を利する意図はなく、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。

