

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-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、反力フレームは十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 50mm 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し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 Q_d 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。 Q_d 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 Q_d 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°C 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Ⅶ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/s²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/s²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-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。