実在建物を活用した多様な振動実験・計測環境の構築と免震建物の応答特性評価

1. 序論

本論で対象とする名古屋大学減災館(以下対象建物)で は、屋上に免震装置を介して加振可能な実験室を持つ基礎 免震建物で、建物自体が多様な振動実験に対応するよう計 画された。常設の加力装置を用いた自由振動実験と強制振 動実験の2種の振動実験が可能で、地盤応答や土圧を含む 高密度の観測体制により、実在建物の環境条件や経年変化 などの影響も含めた応答特性の検討を、建設段階から長期 にわたり繰り返し行いうることが特徴である。

本研究では、振動実験に基づいた免震建物の応答特性お よび免震装置の特性について分析を行う。

2. 対象敷地および建物の概要

対象建物は、地上4階+屋上実験室1階建てのRC造基 礎免震建物である。免震層は地下となり北側を除く3面が 擁壁に囲まれている。免震装置は、天然ゴム系積層ゴムア イソレーター (以下積層ゴム)5基、直動転がり支承 (Cross Linear Bearing 以下 CLB) 9 基、オイルダンパー8 基を採用 し、線形弾性の復元力特性で初期剛性が小さくすることで、 比較的小さい振幅から免震建物としての挙動を示すよう設 計された。屋上には免震装置を介して実験室(写真1)が設 置されている。建物本体が約5,900tで実験室の質量が約400 t である。敷地の深部地盤に起因する長周期側の卓越周期が 約3秒であることから、免震固有周期5.2秒、等価減衰定 数は31%に設定されている。

屋上免震層には、CLB4 基、積層ゴム 8 基 (2 段 4 か所)、 高減衰・低減衰切り替えダンパー1 基を採用している。屋上 免震層の固有周期は、基礎免震層の固有周期に合わせて 5.2 秒に設定している。通常はシアピンで固定されている。

3. 振動実験・計測環境の概要

3.1 自由振動実験

対象建物の基礎免震層には、自由振動実験を行うための 1 基あたり 1000 kN の性能を持つ油圧ジャッキ (写真 2) を 3 基常設している。油圧ジャッキを用いて建物本体を引い て初期変位を与え、解放することで免震装置の復元力によ ってジャッキから離れる方向に応答し、建物全体の自由振 動を励起する。対象建物の免震装置が初期剛性の小さいほ ぼ弾性の復元力特性を持つためこのような実験が可能とな っている。免震建物の自由振動実験は急速解放ジャッキに よる押して初期変位を与えるものが多いが、継続的な実験 のため、コストを抑えた常設の自由振動実験用のジャッキ を新たに開発し、その方法の有効性を確認した¹⁾。

3.2 強制振動実験

屋上実験室は電動アクチュエータ (写真 3) によって実験 室を加振することができる。アクチュエータの最大加力は 約80kNと比較的小さいが、屋上免震層の固有周期に合わ せて定常加振することで、共振によって大きく振動させる

名古屋大学大学院 環境学研究科 都市環境学専攻 博士前期課程2年 飛田研究室 鵜生 明穂



写真1 屋上実験室全景



写真3 雷動アクチュエータ



写真2 基礎免震層油圧



写真4 ひずみゲージ



図1 常設の計測機器の配置



221



Lmax:4700 Lmin:2900 ストローク:1800 取付長:3800 施工長さ:4240 図3 オイルダンパーの形状とひずみゲージ取り付け位置

ことができる。また、屋上免震層の2段の積層ゴムのうち 下1段分を拘束することで、固有周期を短くすることがで きる。屋上実験室の加振によって建物本体も振動し、建物 全体の強制振動実験が可能である。

3.3 計測体制概要

対象建物では加速度計(10点)、基礎免震層に相対変位 計(2点2方向)、免震層擁壁に土圧計(4点)を常設し、 地震時や振動実験時で計測を行うことができる環境を整え ている。図1に計測機器の配置を示す。

また、振動実験時のオイルダンパーの減衰特性を分析す るするため、常設の計測機器の他に新たに基礎免震層の 8 基のオイルダンパーのロッドにひずみゲージを設置した。 写真4に設置したひずみゲージ、図2に計測点配置、図3・ 図4にオイルダンパーの形状と諸元を示す。

4. 振動実験に基づいた免震建物の振動特性

4.1 自由振動実験に基づく免震建物の振動特性

図5に自由振動実験の計測記録を示す。変位記録から(1) オイルダンパーありの場合では、振動せずに中立点に漸近 する応答になり、オイルダンパーによる減衰が大きいこと が推定される。また、実験によりばらつきはあるが、おお よそ1 cm 程度の残留変形が生じる。(2) オイルダンパーな しの場合では、振動し、(1)に比べて残留変形が小さい。

自由振動実験における固有周期、減衰定数を推定するために、(1)式を用いて基礎免震層の相対変位波形の同定を行った。同定結果を表1、推定した波形を図6に示す。

$$y = e^{-h\omega t} \left(d_0 \cos\sqrt{1-h^2}\omega t + \frac{v_0 + h\omega d_0}{\sqrt{1-h^2}\omega} \sin\sqrt{1-h^2}\omega t \right)$$
(1)

(a) オイルダンパーありは、実測波形にほぼ一致する波形 が得られたが、(b) オイルダンパーなしは、振動中の変位が 大きい範囲に比べ、振幅が小さい範囲では、実測波形と推 定した波形が対応していない。これは実際の建物応答が、1 自由度系の粘性減衰モデルでは考慮されてない基礎免震層 の CLB 等の摩擦による影響のためと思われる。

推定された固有周期は (a)、(b) のいずれも設計値 5.2 秒 よりも短周期となった。対象建物の免震層の復元力特性は、 ほぼ弾性となるように設計されており、小振幅時と大振幅 時の固有周期が同じになることが期待されているが、自由 震振動実験の 140mm 程度の小さい振幅では、基礎免震層の CLB などの摩擦の影響が相対的に大きくなり、免震周期が 短周期化されてしまうと考えられる。

(a) で推定された減衰定数は 80 %強で、オイルダンパー 4 基分の等価粘性減衰定数 31 %に対し 2 倍以上となってい る。これはオイルダンパーの減衰力が速度に対してバイリ ニア特性であり、リリーフ速度以下では減衰力が大きくな ることが影響していると考えられる。(b) で推定された減衰 定数は初期変位が大きいほど小さい値となっており、振動 特性の振幅依存性がみられる。

4.2 強制振動実験に基づく振動特性の分析

図7に強制振動実験の計測記録を示す。屋上加速度が約50galを超えるところから建物加速度が大きくなっており、 建物による加振力が基礎免震層の静摩擦力を上回り応答が 大きくなると考えられる。

また、各観測点での加速度フーリエスペクトルが加振振 動数の倍数の振動数で卓越している。これは、加振源であ る屋上実験室の応答により励起されており、アクチュエー タの制御や実験時の屋上実験室のロッキングの影響などが 考えられ、強制振動実験での特徴的な応答性状であると考 えられる。

5. 振動実験に基づく基礎免震層の特性と応答解析

5.1. 静的加力に基づく基礎免震層の水平剛性と摩擦

静的加力実験から得られた基礎免震層の荷重変形関係を 図8に示す。傾きが基礎免震層の水平剛性、切片が摩擦力 に相当する。最小二乗法による線形近似から求まる剛性と 摩擦力を図9に示す。基礎免震層の5基の積層ゴムの剛性 の設計値は9.21 kN/mmである。積層ゴムの剛性には面圧や せん断歪の依存性があることがわかっており、実基検査デ ータをもとにこれらの要因を考慮した剛性³(図9破線)と 基礎免震層の剛性は整合している。また、基礎免震層の摩 擦力は、設計に用いた CLB の摩擦係数 0.0039 と9基の CLB が負担する軸力の総和 4220 t の積から求まる CLB による摩 擦力は 161.5 kN (図9破線)より大きい。基礎免震層の摩擦 力のほとんどは CLB の摩擦力によるものと考えられるが、 エキスパンションジョイントなど諸設備による干渉も含ま れている可能性がある。

5.2. 振動実験に基づく免震建物の履歴特性

強制変位 138 mm の静的加力における荷重変位関係と建 物慣性力の和を縦軸、基礎免震層の相対変位を横軸として、 図 10 に自由振動実験、図 11 に強制振動実験の履歴ループ を示す。図 10 より、(a) オイルダンパーありの場合では、 小振幅範囲でオイルダンパーによって急激にエネルギーが 吸収されていることがわかる。(b) オイルダンパーなしの 場合では、履歴が平行四辺形を描き、静的加力実験の結果 ともよく対応し、免震層の摩擦による影響が表れている。 図 11 より、オイルダンパーの有無に関わらず免震層の摩擦 の影響が確認でき、切片は静的加力時の荷重変位関係とよ く対応している。また、履歴の傾きは静的加力実験の荷重 変形関係やオイルダンパーなしの自由振動実験の履歴の傾 きより大きく、小振幅範囲における振動時の摩擦の干渉に よる基礎免震層の見かけの剛性の増加であると推察される。

5.3. 基礎免震層の減衰特性

(a) 自由振動波形の同定による免震層の減衰特性の推定

5.2 の履歴から免震層の摩擦は振動特性に少なからず影響を及ぼしており、5.1 より免震層の摩擦のほとんどが CLB によるものであると考えられる。積層ゴム+CLB の状態で行ったオイルダンパーなしの自由振動実験での基礎免震層の変位波形の同定から、オイルダンパー以外による基礎免震層の減衰特性について詳細な検討を行う。

免震層の異なる特性を持つ減衰を同時に評価するため、 粘性減衰と摩擦減衰の組合わせたモデルによる同定を行う。 摩擦力 R は速度方向と反対に作用することに留意すると、 運動方程式は(2)式となる。速度の符号によって解の区間を 分け、添字i = 0,1,2,...で表すと、(3)式のような解となる。 なお、 $\dot{y} = 0$ かつ $|y| < R/m\omega^2$ となるとき振動が停止し、そ の際の位置により残留変位が生じる。(3)式を用いて同定を



図14 ロッドの軸ひずみと変位・速度



図11 強制振動実験における履歴



行い、固有周期、減衰定数、摩擦係数を求める。ただし、摩 擦力 R は全て CLB の転がり摩擦によるものとして、CLB の軸力負担率 0.63 を考慮した同定を行う。

同定結果を表 2、推定した変位波形を図 12 に示す。推定 した波形は振動が収束した後の残留変形まで実測とおおむ ね一致した結果が得ることができた。推定した摩擦係数は CLB の規格値 0.0039 に対応する結果が得られており、異な る減衰特性を分離して評価したこの推定手法は妥当と思わ れる。積層ゴムの粘性減衰や諸設備による干渉による等価 粘性減衰は 10~14 %と評価された。この等価粘性減衰定数 と表 1 の減衰定数の差より、CLB による摩擦減衰は等価粘 性減衰 10%程度に相当すると考えられる。また、固有周期 は振幅が小さくなるほど短くなっており、免震層の振動特 性に振幅依存性があることがわかる。推定された固有周期 と自由振動の初期変位の関係は静的加力時の割線剛性と建 物質量から求めた周期と対応している(図 13)。

(b) オイルダンパーの減衰特性の分析

自由振動実験時のロッドの軸ひずみの絶対値および免震 層の相対変位・相対速度を図 14 に示す。初期変位 130 mm の自由振動実験を複数回行い、再現性を確認した。計測し た軸ひずみに一般的な鋼材のヤング係数 205 kN/mm² とロ ッドの断面積 11309.7 mm² を乗じて求めた減衰力とオイル ダンパーの軸方向の速度の関係を図 15 に示す。自由振動の 動きはじめでは減衰力が立ち上がらず、約 0.05 m/s を超え ると急に減衰力を生じて、最大速度以降は速度に比例し、 傾きはリリーフ速度以下のオイルダンパーの粘性減衰定数 は 2,500 kN/(m/s)とよく対応している。自由振動実験時の斜 め方向のオイルダンパーによって東西方向に作用する減衰 力は東西方向のオイルダンパーの 0.34 倍となり、実験時の オイルダンパーによって免震層に作用する減衰力は、オイ ルダンパー4.7 基分に相当する。この減衰力 (11,682 kN・s/m) と図 9 の基礎免震層の接線剛性の平均値 13.1 kN/mm およ び建物質量から計算される減衰定数は約64%となる。表1 より、オイルダンパーありの自由振動実験における減衰定 数は80%程度、オイルダンパーなしの自由振動実験におけ る減衰定数は20%程度と推定されており、その差からオイ ルダンパーによる減衰は60%程度と考えられ、計測された 64%とおおむね対応している。

5.4 免震層のモデル化と応答解析

強制振動実験および静的加力実験から得られる履歴特性 に基づき基礎免震層の復元力特性をトリリニア型でモデル 化を行い、1 自由度 1 質点系モデルのよる弾塑性応答解析



を行った。建物モデルの概略図および解析の諸元を図16に 示す。図17に2016年4月1日三重県南東沖の地震で対象 建物の基礎上で観測された加速度を入力波として用いた解 析結果を示す。加速度フーリエスペクトルから1Hz以下の 低振動数成分において建物応答の再現ができていることが わかる。図18に内閣府中央防災会議より発表された南海ト ラフの巨大地震での震源域を用いて作成された名古屋地区 における模擬地震動を入力波として用いた解析結果を示す。 上部構造の加速度が大きく低減されており充分に免震性能 が発揮されている。また、設計とトリリニアモデルの応答 はほぼ一致しており、大振幅応答時には非線形性による影 響が小さくなることを確認した。

6. 結論

免震建物の振動特性は明確にモデル化できると考えられ ているが、実在建物の振動特性や運用下での免震装置の特 性を計測に基づいて詳細に検討した例はほとんどない。

本論では、多様な振動実験環境を構築した実在免震建物 について、振動実験に基づく免震建物の振動特性および免 震装置の特性に関する詳細な検討を行った。

本研究で行った振動実験設備の開発・改良や継続的な実 験・観測によるモニタリング手法・結果の蓄積は、免震装 置の変化を含めた詳細な分析にあたり有用な資料となる。 参考文献

- 成澤健太他:実在免震建物を利用した振動実験環境の構築,構造工学論文 集 vol.63B, 2017 年 3 月
- 2) 平野貴士他:免震建物の加力実験および振動実験に基づく性能評価、日本 建築学会大会学術講演梗概集,2015年9月