

高層建物と免震建物の地震観測とその評価

Observations and Evaluations of Earthquake Responses of High-rise Buildings and Base-isolated Buildings

井川 望*1 藤井 睦*1 伊藤 真二*1
Nozomu Ikawa Atsushi Fujii Shinji Ito

古城 豊光*2 太田 崇士*2
Toyomitsu Furuki Takashi Ohta

要旨

現在、当社で設計・施工した 10 建物において地震や風観測を実施している。実建物における地震・風観測は、観測建物の耐震、耐風性能評価に有効かつ不可欠であるだけでなく、今後の耐震、耐風設計への活用が期待できる。隣接する立体駐車場と粘弾性ダンパーで連結された超高層住宅であるシーリアお台場、免震建物である技術研究所について、地震観測記録をもとに数値解析を行った。数値解析により観測記録を再現することができ、解析モデルの妥当性が明らかになった。

キーワード：地震観測 高層建物 免震建物 耐震性能評価 粘弾性ダンパー

1. はじめに

1989 年に関西初の超高層 RC 建物である高見フローラルタウン、翌年に免震建物である市川社宅の観測開始以来、現在、表 1 に示す高層建物や免震建物など 10 物件で地震や強風時の建物の振動観測を実施している¹⁾。これら観測中の建物は当社が設計・施工した建物であり、高層 RC や免震・制振など施工時に何らかの新技术が導入された建物である。構造特性に関する基礎データの収集や建築物に導入した構造技術の評価、耐震・耐風設計法の検証などを目的として、観測を実施している。

本報告では、隣接する立体駐車場と粘弾性ダンパーで連結された超高層住宅である「シーリアお台場」、免震建物である「鴻池組技術研究所」での地震観測の概要と観測記録をもとに行なった数値解析について報告する。

表 1 観測建物一覧

建物名称	所在地	構造・規模	観測開始
高見フローラルタウン	大阪市	RC 31階	1989/9
市川社宅	市川市	RC 2階(免震)	1990/3
浦安マリーナイースト	浦安市	RC 28階	1996/2
THE ITOYAMA TOWER	東京都	CFT 18階(屋上にHMD)	1997/7
サンクレア池下	名古屋市	RC 26階、11階	1997/11
鴻池組技術研究所	つくば市	RC 3階(免震)	1997/11
鴻池ビル	大阪市	SRC12,9階(ダンパーで連結)	1999/4
西島リバーサイドビル	大阪市	CFT40階(層間にダンパー)	1999/7
後楽複合ビル	東京都	CFT9階+RC5階(免制震)	2000/3
シーリアお台場	東京都	RC 32階、S造駐車場(連結)	2001/4

2. シーリアお台場

シーリアお台場^{2,3)}は東京のウォーターフロント・台場に 2000年に竣工した32階建ての超高層住宅である。高さ80mの立体駐車場が住居棟に隣接している。各々単独で設計した場合、駐車場の剛性が小さく、変形が大きくなりすぎる。一方、駐車場と住居棟を一体とした場合、駐車場作動時の固体伝搬音が問題となる。これらの問題を解決するため、粘弾性ダンパーを連結材として使用している。本報告では、この建物で観測された地震記録の紹介と、観測記録をもとにした解析結果について報告する。

2.1 設計概要

この建物は鉄筋コンクリート造地下 1 階、地上 32 階建ての超高層住宅である。住居棟の基準階階高は 3m、建築高さは 104m である。住居棟に高さ 80m の鉄骨造の立体駐車場が隣接している。建築面積は 2,381m²、延床面積は 36,977m² である。図 1, 2 は軸組図と基準階伏図である。

基礎は直径 2m、杭長 47m の場所打ち杭底鋼管コンクリート杭で、全部で 45 本使われている。建設地点(地表から GL-47 m まで)の S 波速度は 90~570m/s である。

住居棟と立体駐車場を独立に設計した場合、駐車場の剛性が小さく、変形は大きくなり、2棟の衝突が避けられない。住居棟と立体駐車場を一体として設計した場合、駐車場作動時の固体伝搬音が問題となる。これらの問題を解決するため、粘弾性ダンパーを連結材として使用している。

*1 技術研究所 建築技術研究部門 *2 東京本店 建築設計部

この建物で使用されている粘弾性ダンパーはジェン系ゴムを使い、厚さ15mmで4層構造としている。設置場所は図1, 2に示すように4~5層ごとに6体ずつ、合計30体設置されている。

26階(立体駐車場の屋根)は、住居棟の集会室及び庭園となっているため、上下接続部には、過大な応力集中を避け、かつ駐車場作動時の防音防振対策を目的として積層ゴムが採用されている。

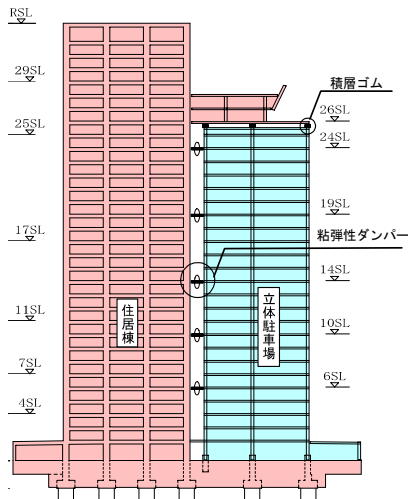


図1 軸組図

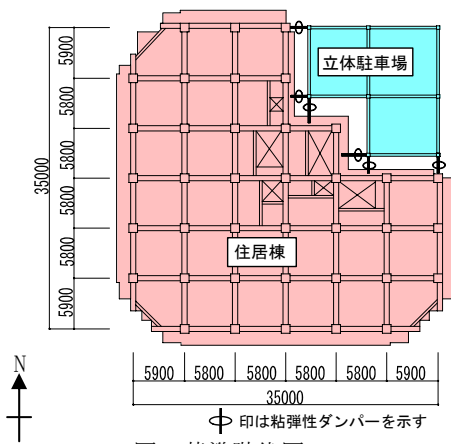


図2 基準階伏図

設計時には住居棟、立体駐車場とも3次元立体モデルの静的増分解析結果をもとに1層1質点の質点系モデルにモデル化され、粘弾性ダンパーで連結された。粘弾性ダンパーは、振幅依存、振動数依存、温度依存の特性を有するため、Maxwellモデルを並列につないだ4要素モデルに置換され、動的特性は早稲田大学曾田研究室によるRL法を用いた実験結果をもとに設定された。温度依存の検討のため、低温0℃、常温20℃、高温35℃の3ケースについて検討された。

時刻歴解析の結果、立体駐車場の応答は粘弾性ダンパーで連結しない場合と比べかなり小さくなり、ダンパーの効

果が大きいことが確認された。また、連結することによる住居等に対する影響もほとんどないことが確認された。なお、温度の変化による応答の違いは小さく、2棟間距離の変化量は温度が高い場合でも±5cm以下となった。

2.2 地震観測

この建物では、建物の振動特性と粘弾性ダンパーの効果の確認のため建物竣工以来、地震観測を行っている。加速度計が8ヶ所(住居棟の屋上、24階、14階、1階、駐車場棟の24階、14階、杭先端と地表)に2または3成分設置され、全部で22成分である。建物間の変形を計るために24階と14階にあわせて4つの変位計が設置されている。現在までに多くの記録が観測されている。

観測記録の一例として、震央までの距離が約25kmである表2の地震により観測された加速度波形を図3に示す。表3, 4にこの地震での最大値を示す。最大の加速度記録は駐車場棟24階(東西方向)の98.9cm/s²であり、加速度を積分して得られた変位の最大値は住居棟屋上(東西方向)で9.3mmである。水平2方向の加速度について、杭先端と比べて地表では2.3~2.8倍に増幅しており、建物1階では地表面の半分程度に低減され、屋上では1階の2.2~2.5倍に増幅している。

表2 地震の概要

日時	2003年10月15日 16:30
マグニチュード	5.1
震源	千葉県北西部 深さ 74km (北緯 35° 37'、東経 140° 3')

表3 最大加速度 (単位:cm/s²)

	南北	東西	上下
屋上	66.0	98.2	42.4
1階	29.6	39.2	13.5
24階(駐車場棟)	37.4	98.9	35.9
地表	74.6	67.3	33.9
杭先端	26.8	28.7	7.2

表4 最大棟間変位 (単位:mm)

	南北方向	東西方向
24階	0.58	2.36
14階	0.70	1.71

表5に住居棟の加速度記録から得られた固有周期を示す。これらの固有周期(測定値)は設計時の固有周期(水平2方向とも1次:2.12秒、2次:0.81秒)とは幾分異なる。実際のコンクリート強度が設計値を上回ることや、設計時には考慮されていない非構造材が存在するため、一般に測定された固有周期は設計値よりも短くなる。今回の観測値も1次周期で10~15%程度短くなっている。

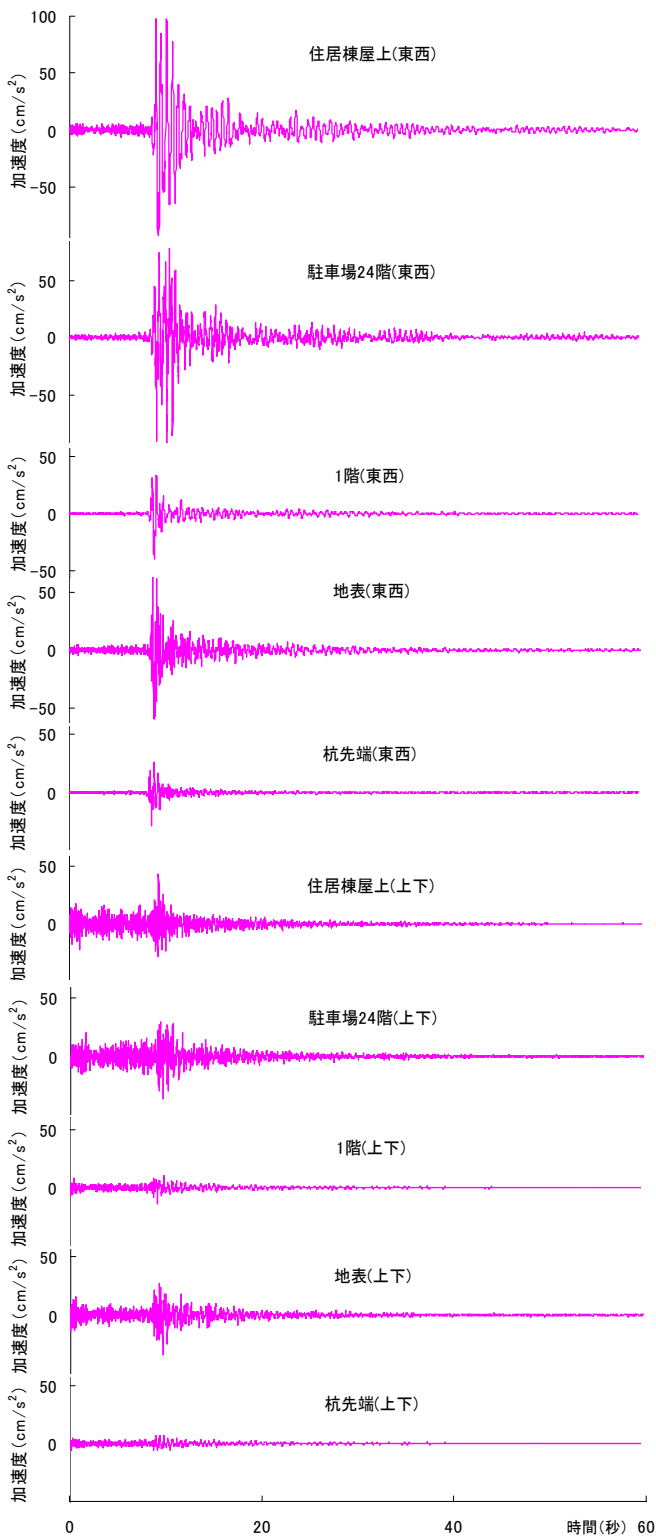


図3 加速度波形（観測記録）

表5 固有周期 (単位：秒)

	南北方向	東西方向	上下方向
1次	1.86	1.82	0.223
2次	0.550	0.573	-

2.3 応答解析

構造設計の有効性を確認するため観測記録をもとに数値解析による検証を行っている。ここでは 2003 年 10 月 15 日の記録を用いた数値解析について紹介する。解析は水平方向について行う。設計時に用いられた方法と同じ解析方法により、3次元モデルをもとに質点系モデルを決定する。住居棟と駐車場棟は各階 1 質点の質点系モデルとし、1 階での観測記録を入射波として用いる。コンクリート強度の違いや非構造材の影響により実際の建物の剛性は設計値と幾分異なるため、測定された周期と一致するように剛性を割り増す。なお、今回の解析は弾性範囲内であるため、耐力は設計時と同じ値とする。振幅レベルが小さいため、減衰は 1% とする。

気象庁の記録によると地震時の東京の気温は 18℃程度であるので、粘弾性ダンパーの解析モデルは設計時に用いられた 20℃でのモデルとする。

図4は住居棟屋上、図5は駐車場24階の加速度波形(東西方向)である。住居棟屋上の解析結果は観測記録とよく一致しているが、駐車場の解析結果は観測記録とはやや異なる。解析では高振動数成分をよく表せていない。解析において考慮していないフレームが存在しているために、複雑な応答をしているものと思われる。加速度記録を積分して求め

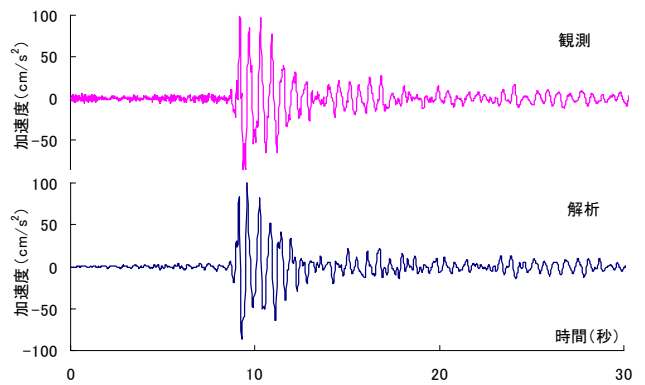


図4 加速度波形（住居棟屋上、東西方向）

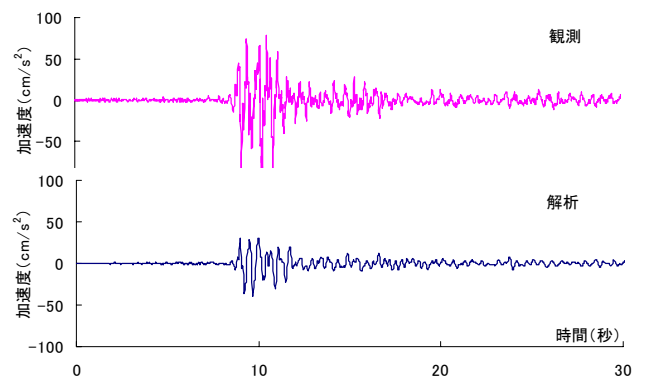


図5 加速度波形（駐車場棟24階、東西方向）

た変位は5.18mmで、解析による変位(4.88mm)と近く、変位波形はかなりよく一致している。駐車場について今後、さらなる検討が必要である。

図6は24階の棟間変位(東西方向)である。この波形も解析と観測がよく一致している。

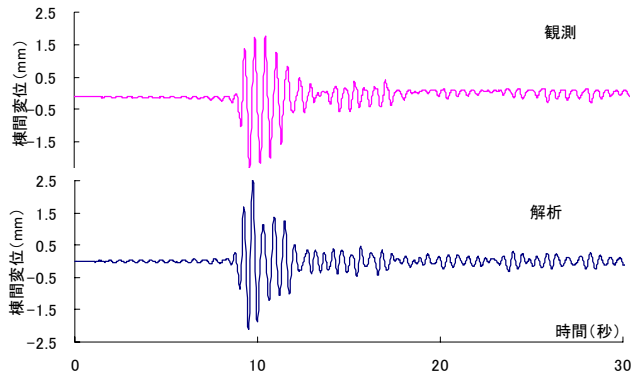


図6 24階棟間変位(東西方向)

表6に南北、東西方向の最大値を示す。南北方向の解析結果についても東西方向と同様の傾向を示している。

表6 最大値一覧

		観測	解析
住居棟屋上 加速度 (cm/s^2)	南北	66.0	67.6
	東西	98.2	100.7
駐車場24階 加速度 (cm/s^2)	南北	37.4	27.7
	東西	98.9	39.0
24階棟間変位 (mm)	南北	2.36	2.53
	東西	0.58	0.77

2.4 まとめ

粘弾性ダンパーで連結された超高層の住居棟と立体駐車場からなるシリアお台場について2003年10月に観測された地震記録の紹介と観測記録をもとにした時刻歴解析を紹介した。立体駐車場の解析用モデル化など検討すべき項目は残っているが、観測記録は概ね数値解析により再現でき、粘弾性ダンパーを含む設計時に行われた解析の妥当性が確かめられた。

3. 当社技術研究所

技術研究所(茨城県つくば市)の管理研究棟では、免震デバイスの低コスト化と選択自由度の向上を目標とした免震システムを導入しており、これらの性能および免震設計の妥当性を実際の地震で検証するため、1997年の開所以来地

震観測を行っている。本報告では、地震観測の概要およびこれまでに得られた多数の中小地震での記録を整理して示すとともに、最近発生したやや顕著な地震での観測記録を用いた応答解析について示す。

3.1 観測建物と観測方法

写真1に示すように、観測対象の建物は杭基礎・RC造耐震壁付きラーメン構造3階建てであり、平面24m(3スパン)×48m(8スパン)の比較的扁平な形状を持つ。中央部の吹抜けで上部構造は二分されており、1階以外では大梁のみで連結されスラブは連続していない。地震時設計重量6150トンの上部構造に対して、短辺中央の短いスパンを1積層ゴムに集約することで27(3×9)基の積層ゴムアイソレータにより支持している。一般部の積層ゴムには冷間接着型⁴⁾を用いている。ダンパーには鋼棒製(4C-70φ×12基)と鉛製(U-180×8基)の2種類を併用している。図7に免震デバイスの配置を示す。



写真1 観測建物 左:管理研究棟(免震) 右:実験棟(非免震)

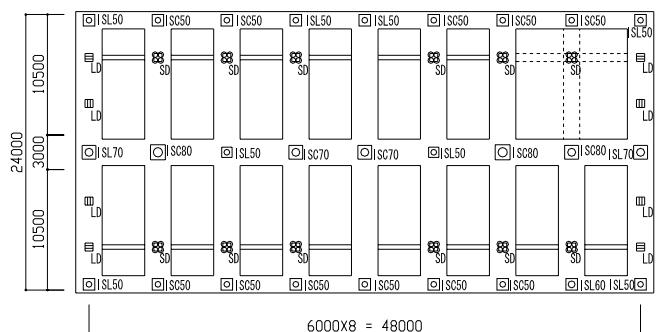


図7 免震デバイスの配置

地震の観測には、フィードバック型の加速度計を用いており、図8に示すように、建物近傍の地中3点(地表、中間層GL-8m、せん断波速度 $V_s=550\text{m}/\text{s}$ 層GL-36m)、基礎、1階および屋上に合計24成分の加速度計を設置している。吹抜け部では、スラブ不連続の影響を見るため、その両側に複数の観測点を設けている。また、耐震構造との比較のため、

隣接する実験棟(RC造地下1階・地上3階、一部鉄骨造)の屋上に観測点を設けている。なお、冷間接着型積層ゴムについて、クリープ観測のための変位計および地震時の詳細挙動を見るためのビデオカメラを設置している。

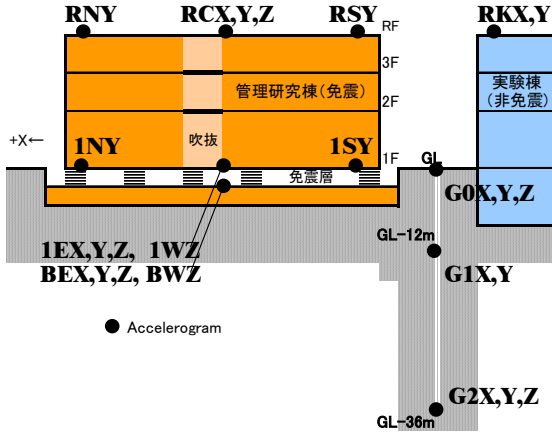


図8 センサー配置

3.2 地震記録

1997年11月から2005年2月までに地表計測震度5以下の約200個の地震記録が得られている。これらの最大加速度とその増幅率の関係を図9に示す。非免震では平均増幅率が1.7倍であるのに対して、免震では全数平均増幅率0.8倍、基礎加速度 15cm/s^2 以上での平均では0.4倍であり、免震による加速度の低減効果は入力が大きいくほど明瞭となっており、これらの傾向は他の加筋接着型積層ゴムを用いた免震建物での傾向⁵⁾と同様である。

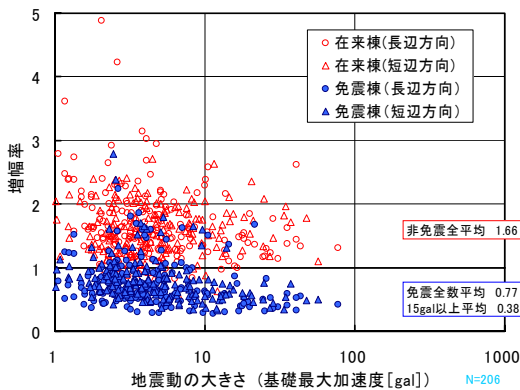


図9 加速度増幅率

前述の記録から得た免震層の最大相対変位と1次周期の関係を図10に示す。周期は変形の増大とともに徐々に伸び、弾性域から弾塑性に変わる領域(鉛製ダンパーの塑性化)では片対数表示で下向凸の滑らかな曲線となる。なお、微小変形での実測周期 $0.80\sim 0.86$ 秒は、弾性での設計周期 0.76 秒に比べやや長めとなっている。

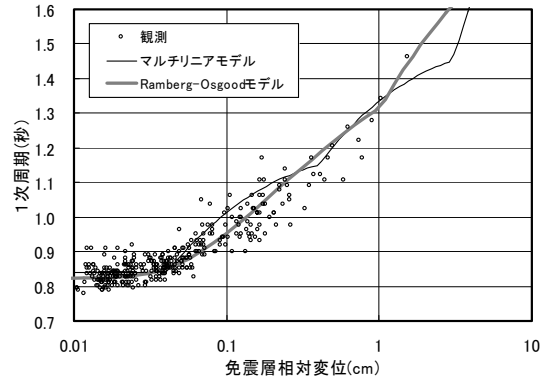


図10 免震層相対変位と1次周期の関係

3.3 応答解析例

2004年10月から2005年2月にかけてのやや顕著な3地震により免震層の相対変位が最大 $0.9\sim 1.5\text{cm}$ となる応答が生じた。過去の微小な記録とあわせ、観測記録を用いた弾塑性時刻歴応答解析を行った。図11に示すように、鉛ダンパーについて設計では入力レベル(小地震・レベル1・レベル2)ごとに特性値を変えたバイリニアモデルとトリリニアモデルを用いている。前出図10に示すように、マルチリニアモデルではマクロな変形 - 周期関係は表せるが、変形レベルによっては誤差が大きくなる。今回は、変形 - 周期関係が実測同様に滑らかで、また弾性から大変形まで連続的に扱えるRamberg-Osgoodモデル⁶⁾も採用した。図10に示すように大変形域および実測の変形($0.01\sim 1.5\text{cm}$) - 周期関係に適合させた場合、同モデル復元力特性は、支配する指数が $\gamma=4$ となり、完全剛塑性とはならない。

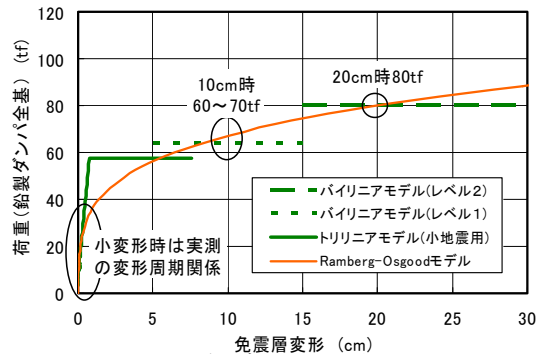
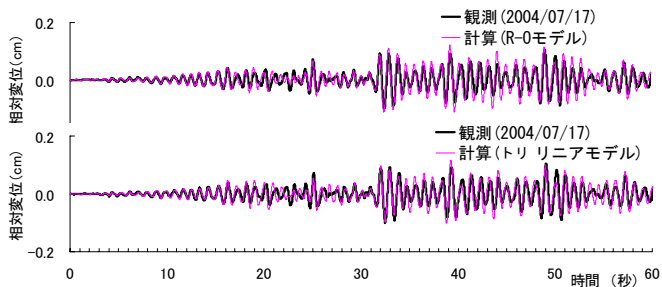
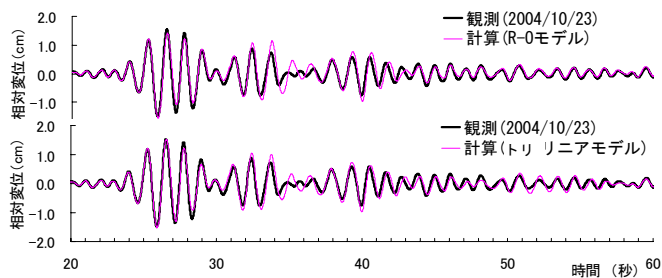


図11 鉛ダンパーの復元力特性

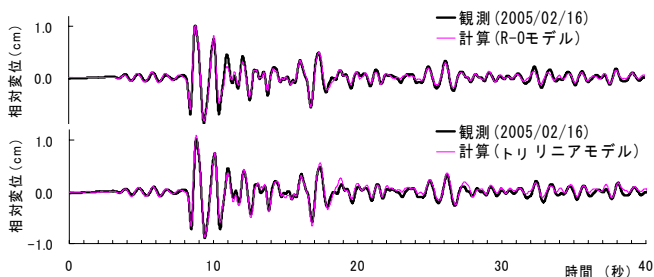
図12に変形量の異なる3記録(応答変形 $0.1, 0.9, 1.5\text{cm}$)での免震層の相対変位波形を、図13には過去最大の入力であった記録での1階加速度を入力加速度とあわせてそれぞれ示す。いずれのモデルも変形レベルにかかわらず計算値は観測値とほぼ整合している。また、Ramberg-Osgoodモデルはトリリニア(免震層全体ではマルチリニア)モデルに比べて全体的に整合性が優れる。



(1) デバイス変形0.1cm 2004/7/17房総半島南東沖



(2) デバイス変形 1.5cm 2004/10/23 新潟県中越(本震 M6.8)



(3) デバイス変形0.9cm 2005/2/16茨城県南部(M5.4)

図 12 免震層相対変位時刻歴の観測値と解析値

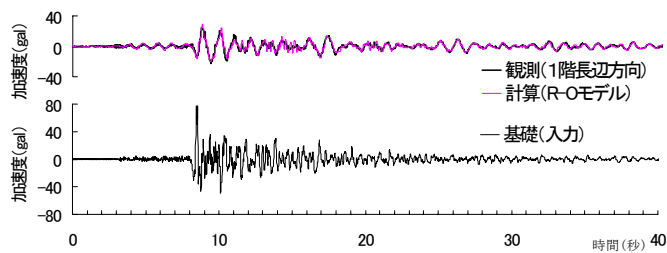


図 13 加速度時刻歴 2005/2/16 茨城県南部

3.4 まとめ

技術研究所における地震観測の概要について示すとともに、観測記録を用いた応答解析について示した。観測記録やそれらを用いた解析より以下のような知見が得られた。

- ・弾性域での周期は設計値とほぼ整合するが、実測がわずかに長めの側にある。
- ・中小地震に対する加速度の低減効果は、加硫接着型積層ゴムを用いた免震建物での傾向と変わらない。
- ・免震デバイス最大変形1.5cmまでの観測記録による時刻歴応答解析を行い、設計モデルおよび実測の変形 - 周期関係をもとに作成したモデルの妥当性を確認した。
- ・Ramberg-Osgoodモデルによる鉛ダンパーのモデル化は、弾性から大変形まで連続的に扱え、遠距離大規模地震による居住性振動など、様々な応答量となる際の解析に有効と考える。

4. おわりに

隣接する立体駐車場と粘弾性ダンパーで連結された超高層住宅であるシーリアお台場、免震建物である当社技術研究所での地震観測の紹介と観測記録をもとに行なった数値解析についてまとめた。両建物とも数値解析により観測記録を再現することができ、解析モデルの有効性が確認できた。

今後も地震観測を続け、記録の蓄積に努めるとともに、シミュレーションによる検証も並行して行っていく予定である。

最後に、本研究は、独立行政法人 都市再生機構を始め、施主、設計事務所等のご理解とご協力を得て実施することができました。ここに厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1)井川望ほか：高層建物・免震建物における地震・風観測とその評価、鴻池組技術研究報告、Vol.13、pp.71-76、2003.3
- 2)古城豊光ほか：連結制振として粘弾性ダンパーを用いた高層建物の設計・施工、鴻池組技術研究報告、Vol.13、pp.85-90、2003.3
- 3)N.Ikawa, T.Furuki, S.Oda: Design and Earthquake Observation of High-rise Building with Visco-elastic Dampers as Vibration Control Joint Devices, Smart Structures Technologies and Earthquake Engineering, pp.687-692,2004.7
- 4)岡城寛ほか：冷間接着型アイソレータの実用化 第1・第2報、日本建築学会大会講演梗概集、B-2、1997.9
- 5)藤井睦ほか：免震構法の開発 その1～6、日本建築学会大会講演梗概集、B、1990・1992
- 6)日本建築学会：建築物の耐震設計資料、丸善、1981