T2R2 東京工業大学リサーチリポジトリ
Tokyo Tech Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	観測記録に基づく地盤との動的相互作用を考慮した中高層免震建物の上下応答に関する研究
Title	
著者(和文)	木下貴博, 佐藤大樹, 本郷貴之, 永野正行, 北村春幸
Authors	daiki sato, Masayuki Nagano, Haruyuki Kitamura
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, Vol. 83, , 2050
Citation(English)	, Vol. 83, , 2050
発行日 / Pub. date	2013, 3
rights	日本建築学会
rights	本文データは学協会の許諾に基づきCiNiiから複製したものである
relation	isVersionOf:http://ci.nii.ac.jp/naid/110009769796

Powered by T2R2 (Tokyo Institute Research Repository)

Architectural Institute of Japan

2050

2012年度日本建築学会
関東支部研究報告集 I
2013年3月

観測記録に基づく地盤との動的相互作用を考慮した中高層免震建物の上下応答に関する研究

構造ー振動
免震建物　上下応答　動的相互作用
観測記録　立体モデル

準会員 ○ 木下貴博[*1]　正会員　佐藤大樹[*1]　同　本郷貴之[*1]
正会員　永野正行[*1]　同　北村春幸[*1]

1. はじめに

免震建物の強震時における水平応答は、免震層での変形が支配的となるため、慣性の相互作用効果である地盤ばねの有無が応答に与える影響は比較的小さいものと考えられる[1)]。しかし、上下応答では、免震層の剛性が水平方向よりも大きく、かつ上部構造の鉛直剛性が比較的大きいことから地盤との動的相互作用の影響が顕著にみられ、その影響を把握することは設計上不可欠であると考えられている[2)]。さらに、これまでに行われた上下動観測から、上下応答解析で一般的に用いられる、各階重心位置に質量を集中させ、鉛直部材の軸剛性のみを考慮した多質点モデルにより得られる解析結果は、建物の観測記録に対して過大な応答結果を与える傾向にあることが確認されている[3)]。

本報では、まず強震観測を行っている中高層免震建物の観測記録を用いて、上下方向の相互作用効果について検証する。その後、地盤との動的相互作用を考慮した解析モデルを作成し、基礎固定時との比較とモデル化の違いによる上下応答の解析結果に与える影響について考察する。

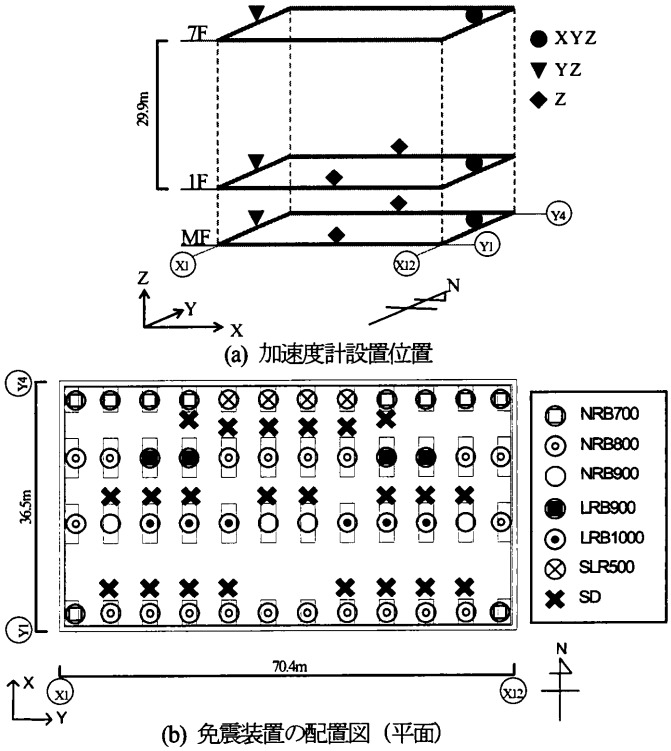
2. 検証建物および計測の概要

2.1 建物概要と観測概要

東京理科大学野田キャンパス講義棟(以後、講義棟)は、2003 年竣工の 7 階建て鉄筋コンクリート造中高層免震建物であり、地上高さ 29.9m、平面形状 36.5×70.4m、短辺方向のアスペクト比が約 1 と比較的平面形状の大きな建物である。建物は第 2 種地盤上に杭基礎で建設されており、地下約 38m の深さで支持されている。建物系の加速度計設置位置、免震部材配置図を図 1(a)、(b)に示す。また、建物系と併せて地盤系の鉛直アレー観測も行われており、建物から約 20m 離れた地盤内では地中深さ 1.0m(以後、GL1.0)、38m(以後、GL38)の 2 箇所に加速度計が設置されている。建物は 1 階床下に免震層(以後、MF)を設けた基礎免震構造であり、図 1(b)に示す通り、免震層は、直径 700、800、900mm の天然ゴム系積層ゴム(NRB700、NRB800、NRB900)計 34 基、直径 900、1000mm の鉛プラグ入り積層ゴム(LRB900、LRB1000)計 10 基、直径 500mm の弾性滑り支承(SLR500)4 基、鋼材ダンパー(SD)22 基から構成されている。講義棟の観測についての詳細は文献 3)を参照されたい。

2.2 使用地震動

本報で使用する地震動を表 1 に示す。加速度は講義棟 MF の X12 通りで観測された値と GL1.0 で観測された値である。表中の M はマグニチュードを、距離は講義棟からの震央距離を示している。*Ax*、*Ay*、*Az* はそれぞれ X、Y、Z 方向における加速度最大値を表している。既往の研究において、比較的平面規模が大きい建物で観測される上下動は、平面位置によって異なることが確認されている[5)]。本報では、研究の初期段階として、講義棟 MF4 地点(East、West、North、South)で観測された上下動の相関性を検証し、同一平面内で比較的相関性が高い地震動を 3 波選定することとした(表 1)。図 2 に使用地



(a) 加速度計設置位置

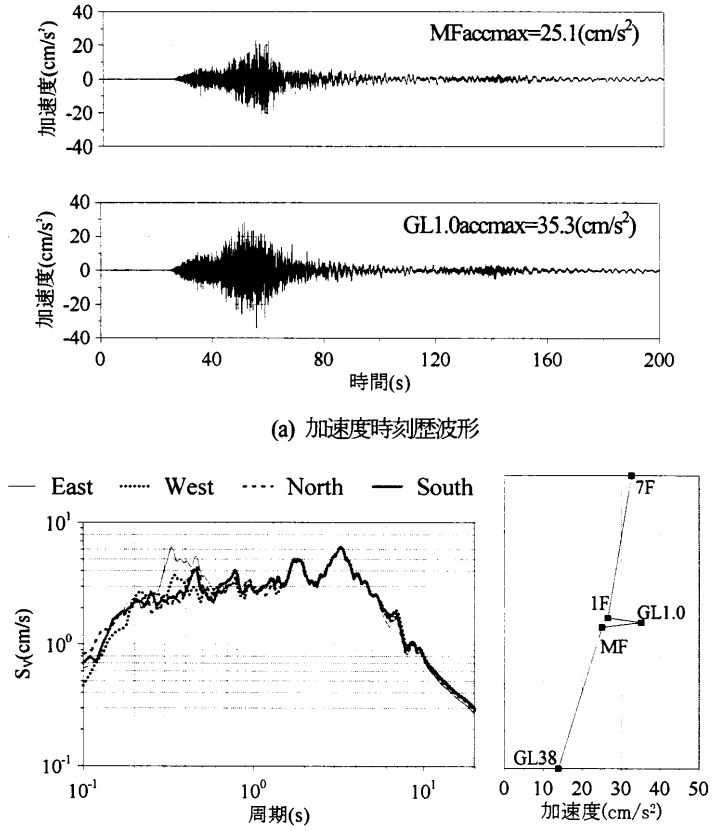
(b) 免震装置の配置図（平面）

図 1 講義棟の概要

表 1 使用地震動

震源地	年/月/日	震源深さ (km)	距離 (km)	M	観測地点	最大加速度		
						Ax(cm/s^2)	Ay(cm/s^2)	Az(cm/s^2)
新潟県中越沖	2007/7/16	17	208	6.8	MF	20.0	14.8	10.0
					GL1.0	24.7	19.0	10.7
宮城県沖	2011/4/7	66	314	7.1	MF	18.3	17.9	10.5
					GL1.0	29.8	20.8	18.9
福島県浜通り	2011/4/11	6	134	7	MF	36.3	50.6	25.1
					GL1.0	49.6	51.1	35.3

NII-Electronic Library Service



(a) 加速度時刻歴波形

(b) 速度応答スペクトル Sv (h=5%) の比較　(c) X12 通り加速度最大値分布

図2 使用地震動の概要（上下動、福島県浜通り）

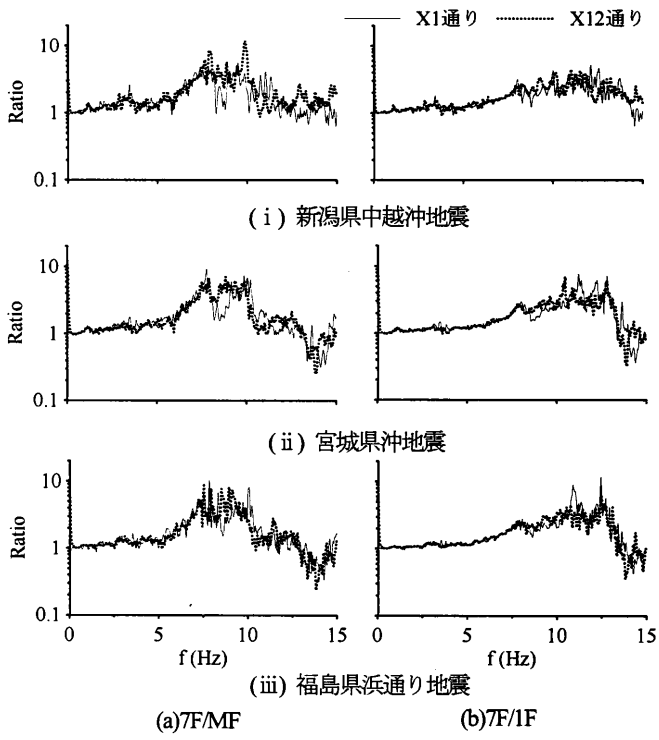
震動の例として、福島県浜通り地震の上下動の加速度時刻歴、MF4 地点における速度応答スペクトル $Sv(h = 5\%)$の比較、X12 通りで観測された地震動の加速度最大値分布を示す。加速度時刻歴、速度応答スペクトル算出時には 0.1~30Hz のバンドパスフィルターを設けている。図2(b)の速度応答スペクトルでは1秒以上の周期帯において相関性が高いことが伺える。図2(c)において、地盤系で得られた加速度最大値は GL38 から GL1.0 に向けて大きくなり、表層地盤内で地震動が増幅する。GL1.0 に対する MF の最大加速度は小さくな入力低減効果が現れている。また、建物系で得られた加速度最大値は MF、1F、7F の順に大きくなり、一般の耐震建物の水平応答と同様に増幅する。

3. 観測記録の検証

3.1 高さ方向への伝達特性の分析

本節では観測記録を用いて、上下動における加速度時刻歴から算出した高さ方向の伝達関数により講義棟の伝達特性の分析を行う。図3に講義棟の免震層(MF)に対する 7F の伝達関数 7F/MF と 1F に対する 7F の伝達関数 7F/1F を示す。いずれの図も、X1 通りと X12 通りでの比較を示している。伝達関数算出時には 0.1Hz の Parzen window を用いて平滑化した。

図3より、3地震動に共通して、X1 通りと X12 通りでは異なった伝達特性を示していることがわかる。また、伝達関数には複数のピークが確認できる。これは、建物上下方向の1次固有振動と、横架材である梁や床スラブの上下振動により多数のピークが表れたものと考えられる[3)-7)]。



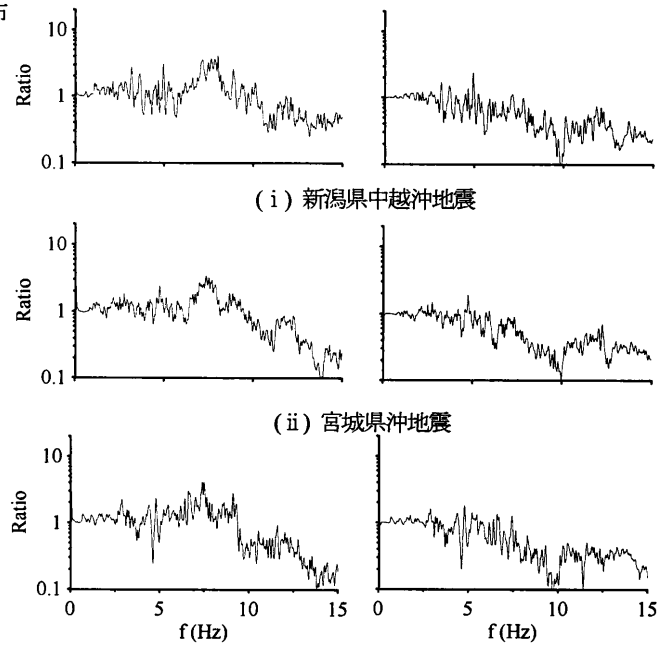
(i) 新潟県中越沖地震

(ii) 宮城県沖地震

(iii) 福島県浜通り地震

(a)7F/MF　(b)7F/1F

図3 X1 通りと X12 通りの伝達関数の比較



(i) 新潟県中越沖地震

(ii) 宮城県沖地震

(iii) 福島県浜通り地震

(a) 7F/GL1.0　(b) MF/GL1.0

図4 GL1.0 に対する建物上下応答の伝達関数

3.2 地盤との相互作用効果の分析

図4に観測記録から算出した GL1.0 に対する建物上下応答の伝達関数 7F/GL1.0、MF/GL1.0 を示す。これらの伝達関数には、地盤との動的相互作用の効果が含まれるている。図4(a)の 7F/GL1.0 では、図3(a)の 7F/MF から 7.5Hz 付近のピークの高さが低下する傾向を示すが、その変動はそれほど顕著ではない。図 4(a)の有効入力動である MF/GL1.0 では、8Hz 以上の振動数領域で全体的に倍率が 1 以下

NII-Electronic Library Service

表2　講義棟の地盤物性

地層	地層下面(m)	層厚(m)	ρ(t/m³)	Vs(m/s)	Vp(m/s)
①ローム層	7.80	7.80	1.63	120	1554
②砂層	20.55	12.75	1.74	194	1547
③粘性土層	35.85	15.30	1.74	230	1568
④粘土質砂層	39.85	4.00	1.80	250	1379
⑤砂泥互層	62.95	23.10	1.75	289	1471
⑥砂質粘性土層	88.10	25.15	1.80	318	1660
⑦砂質土層	105.00	16.90	1.80	403	1779
⑧砂礫層	108.50	3.50	1.80	510	2050

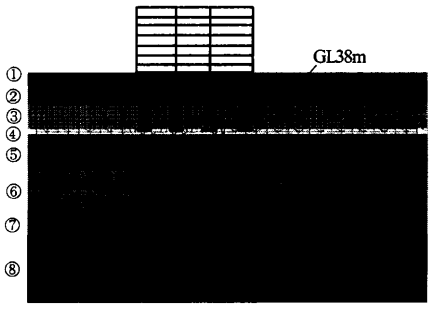


図6　地層と杭のイメージ図X12通り)

となっており、入力低減効果が見られる。

4. 解析モデルを用いた検証

本章では地盤との相互作用効果が建物の上下応答に与える影響を、解析モデルを用いて検証する。解析モデルに入力する地震動は表1に示す使用地震動の福島県浜通り地震GL1.0の観測記録を使用する。

4.1 解析モデルの概要

図5に上下応答解析モデルの概要を示す。図5(a)に示す多質点基礎固定モデル(以後、1A-model)は、各階重心位置に質量を集中させ、鉛直部材の軸剛性のみを考慮したモデルである。解析モデルの質量や剛性は、設計図書に基づき作成した。上部構造の減衰は、上下方向の1次固有周期に対してh=2%となる剛性比例減衰を、免震層はh=1%となるように設定した。図5(b)に示す多質点地盤考慮モデル(以後、1B-model)は、1A-modelの免震層下にマットスラブと地盤ばね(後述)を組み込んだモデルである。図5(c)に示す3次元立体基礎固定モデル(以後2A-model)は、横架材である梁やスラブの振動を考慮できるように、梁の中央もしくは3等分する位置に質量を分配したモデルであり、図5(d)の3次元立体地盤考慮モデル(以後2B-model)は、1B-modelと同様に、2A-modelの免震層下にマットスラブを剛体でモデル化し、地盤ばねを組み込んでいる。2A-modelと2B-modelの上部構造のモデル化の詳細に関しては文献4)を参照されたい。

4.2 上下方向の動的地盤ばねの評価

3次元薄層法のリング加振解を利用して、上下方向の動的地盤ばねを評価した。基礎部は48本の鋼管杭から構成される。地盤物性はPS検層家結果を参照した。表2に講義棟の地盤物性を、図6に地層と杭のイメージ図を示す。基礎底面位置のGL-3.7mより浅い地盤の影響は無視し、剛基礎と仮定した。図7に計算より得られた動的地盤ばねを示す。最初に、0.5Hz時の実部と虚部を用いて、地盤ばね定数と減衰係数を設定した。図8に1B-modelを対象とし、入力波GL1.0に対する建物1Fの応答の伝達関数1F/GL1.0を、観測記録と比較して示す。ここでは、GL1.0の記録を基礎入力動と見なした。解析結果では2.5Hz付近に大きなピークが見られ、観測記録の伝達関数を再現できていない。次に、減衰係数を係数倍して、観測記録の再現を試みた。図8に修正後の1F/GL1.0を併せて示す。修正後の減衰係数を修正前の30倍に設定した。観測記録に表れている複数のピークは再現できていないものの、概ね伝達特性は再現できている。図7の動的地盤ばねでは、虚部が上昇する傾向が見られない。一方、杭基礎の代わりに免震層下のブロックを直接基礎として動的地盤ばねを評価したところ、虚部が振動数の上昇とともに増加する傾向を示した。このような違いが現れる原因は現時点では不明であるが、上下地盤ばねの減衰係数には、べた基礎による逸散減衰効果が含まれるものと推定される。以降は、この地盤ばね定数と減衰係数を利用して、上下地盤ばねが上下応答に与える影響の検討を進める。

4.3 多質点モデルによる検討

図9に1A-model、1B-modelの解析結果と観測記録の比較を示す。

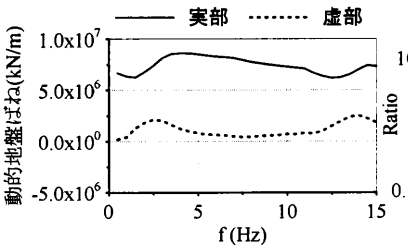


図7 動的地盤ばね

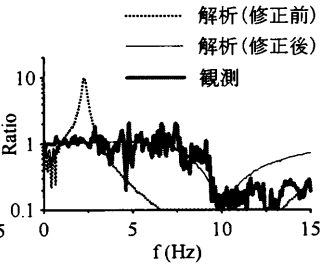
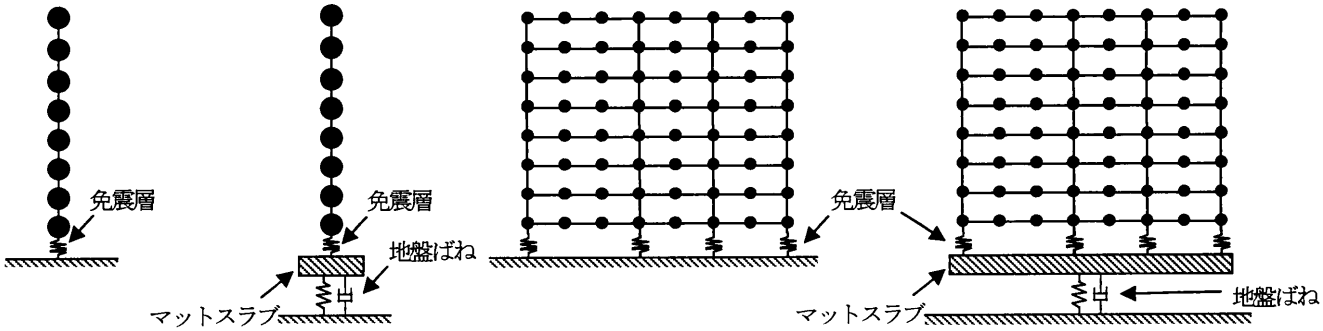


図8 1F/GL1.0の比較



(a) 多質点基礎固定モデル (1A-model)　(b) 多質点地盤考慮モデル (1B-model)　(c) 3次元立体基礎固定モデル X12通り軸組図 (2A-model)　(d) 3次元立体地盤考慮モデル X12通り軸組図 (2B-model)

図5　上下応答解析モデルの概要

NII-Electronic Library Service

Architectural Institute of Japan

なお、上下応答は弾性範囲であることから、図9(a)、(b)に示す観測記録の伝達関数は使用地震動3波での平均値を用いている。図9(a)のMFの応答に対する7Fの応答の伝達関数7F/MFでは、1A-modelと1B-modelでの違いは見られないが、観測記録に対して過大評価になっていることが分かる。図9(b)の入力波GL1.0に対する7Fの応答の伝達関数7F/GL1.0では、地盤ばねを考慮することでピーク倍率の低下が見られる。また、図9(a)、(b)に示す伝達関数は観測記録に表れている複数のピークを再現できていない。図9(c)の加速度最大値分布では、地盤ばねを考慮することで応答は低減しているが、上部になるにつれて観測記録に対して過大評価になっている。そのため、上下応答を評価する際には、文献2)に示されているように、梁やスラブの振動を考慮したモデルを用いる必要がある。

4.4 3次元立体モデルを用いた検討

図10に1B-model、2A-model、2B-modelの解析結果と観測記録との比較を示す。図10(a)の7F/MF、(b)の7F/GL1.0では、梁やスラブの振動を考慮することで、1B-modelでは表現出来なかった複数のピークを再現できていることが分かる。さらに、地盤の影響を考慮することで7F/GL1.0での倍率も低下しており、相互作用による応答低減効果が現れている。図10の加速度最大値分布では、2B-modelを用いることで、1B-modelでは過大評価である上部の応答が低減しており、観測記録の傾向が再現されている。

以上の検討により免震建物の上下方向では、梁やスラブの振動と地盤と動的相互作用を考慮した応答解析モデル(2B-model)を作成することで、観測記録の傾向を捉えられることが分かった。

5. まとめ

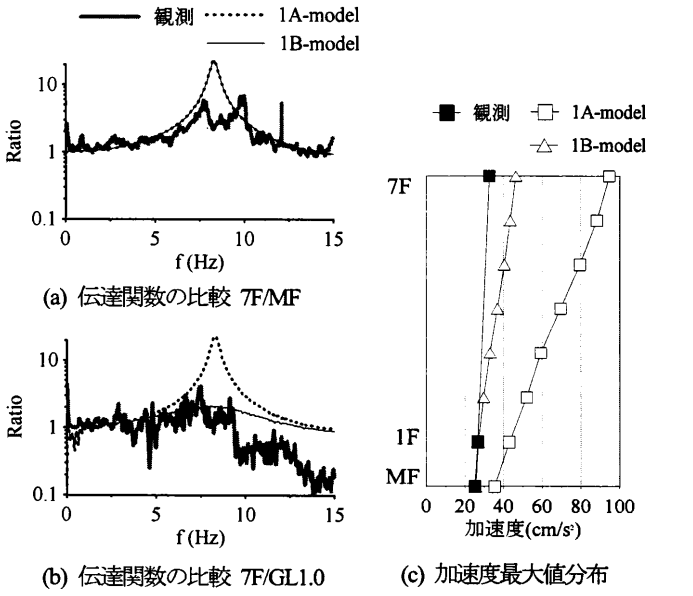
本報では、強震観測を行っている講義棟を対象に地盤との動的相互作用を考慮した解析モデルを作成し、免震建物の上下応答における地盤との動的相互作用の影響とモデル化の違いによる上下応答の影響について検証した。以下に得られた知見を示す。

(1) 観測記録を用いて上下動の伝達特性を検証した結果、同一平面内では異なった伝達特性を示していることが分かった。また、MF/GL1.0では、8Hz以上の振動数領域で全体的に倍率が1以下となっており、入力低減効果が見られた。

(2) 各階重心位置に質量を集中させ、鉛直部材の軸剛性のみを考慮した多質点モデルを作成し、基礎固定時と相互作用考慮時での比較を行った結果、相互作用を考慮することで応答低減効果が見られたが、観測に対しては過大評価になることが分かった。

(3) 梁の振動を考慮できる3次元立体モデルを作成し、基礎固定時と相互作用考慮時、質点系モデルとの比較を行った結果、梁やスラブの振動により伝達関数には複数のピークが確認できた。加速度最大値分布では観測記録を精度よく再現できた。

(4) 水平応答には、地盤との動的相互作用による影響は小さいと考えられるが、上下応答には相互作用の影響が大きいことが分かった。免震建物の上下応答解析を行う際には、梁やスラブの振動や影響を考慮することで、観測記録の伝達関数に表れる複数のピークが再現できることが分かった。免震建物の上下応答解析では、これらの影響を考慮して行う必要がある。

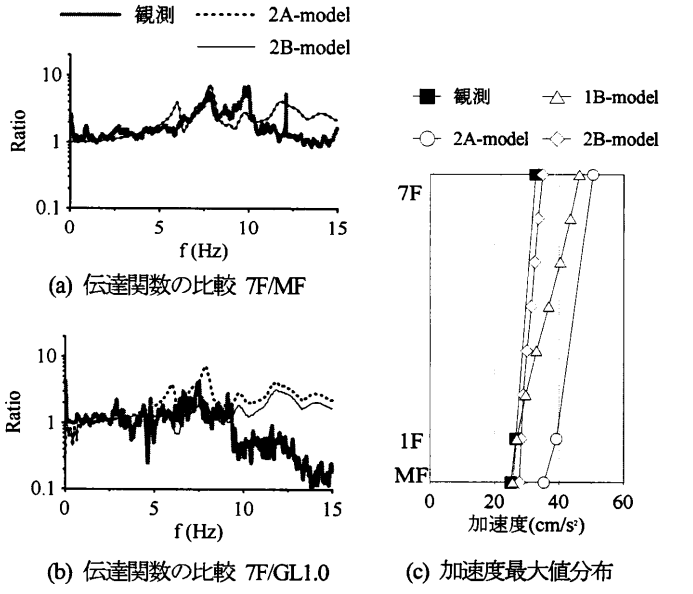


(a) 伝達関数の比較 7F/MF

(b) 伝達関数の比較 7F/GL1.0

(c) 加速度最大値分布

図9 1A-model、1B-modelの解析結果と観測記録の比較(3波平均)



(a) 伝達関数の比較 7F/MF

(b) 伝達関数の比較 7F/GL1.0

(c) 加速度最大値分布

図10 1B-model、2A-model、2B-modelの解析結果と観測記録の比較(3波平均)

参考文献

1) 永野正行, 飯場正紀, 鹿嶋俊英：大小地震時における9階建免震建物の上下応答特性と地盤との動的相互作用効果, 日本建築学会構造系論文集, pp 77-86, 2010 野畑有秀, 寺村彰, 安井譲：地震観測に基づく免震建物の上下応答特性, 大林組技術研究所報, No56, 1998

2) 日本建築学会：建物と地盤の動的相互作用を考慮した応答解析と耐震設計, 10章 試設計例Ⅲ：高層11階免震建物―杭基礎(建物―C), pp 265-287, 2006

3) 北村春幸, 楊志勇, 多田英之：免震建物の鉛直地震応答に関する一考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.817-818, 1996.9

4) 森清宣貴, 金澤健司, 北村春幸：免震建物を対象とした強震―振動モニタリングシステム, 日本建築学会技術報告集, pp 133-138, 2005.12

5) 佐藤大樹, 福田優輝, 北村春幸：多点同時地震動観測記録に基づく免震建物の上下応答解析手法, 日本建築学会構造系論文集, pp 1853-1862, 2012

6) 鍋澤斤吾, 藤田隆史, 北村春幸, 浅野美次, 吉江慶祐, 江利川俊明, 森清宣貴, 安田正志：免震建物の常時微動特性 その9 上下動の応答性状, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.303-304, 2004.8

7) 野畑有秀, 寺村彰, 安井譲：地震観測に基づく免震建物の上下応答特性, 大林組技術研究所報, No56, 1998

*1 東京理科大学

NII-Electronic Library Service