

地震観測に基づく免震建物の上下応答特性

野 畑 有 秀 寺 村 彰
安 井 謙Vertical Response Characteristic of Base-Isolated Building
Based on Observed Earthquake RecordsArihide Nobata Akira Teramura
Yuzuru Yasui

Abstract

There have been many reports on the horizontal response characteristic of base-isolated buildings during earthquakes. However, there have been far fewer reports on the vertical response characteristics, because base-isolated building is designed to decrease horizontal base shear coefficient. This paper describes the vertical response property of four base-isolated buildings on the basis of observed earthquake records of maximum acceleration ratio and transfer function of building response to input motion. The natural frequency and damping ratio of each buildings are identified by ARMA model fitting, and the transfer function of a building is simulated well by lumped-mass model which takes into account slab modeling.

概 要

免震構造物の地震観測は、多くの建物で実施されその観測結果に基づく貴重な報告がなされている。それらの報告は、免震構造の性質上、水平方向についてのものがほとんどであり、上下方向の応答に関する報告は少ない。そこで、本報告では、4棟の免震建物を対象として、各々の地震観測記録を基に、最大加速度増幅率、伝達関数を整理した。その結果、入力最大加速度に対する建屋最大応答加速度の倍率は、1～2倍程度であることがわかった。また伝達関数より、ARMAモデルによって、各建物の固有振動数と減衰定数の同定を行った。伝達関数では、2棟の建物で卓越振動数が分散する傾向があり、この現象を解釈するために、スラブを考慮した質点モデルを用い、ほぼその傾向を説明できることを示した。

1. はじめに

阪神大震災以降、免震建物は急激に増加しており、今後もその需要は伸びるものと考えられる。このような背景を反映して、免震構造への適用範囲、例えば、中高層構造物、中間階免震、軟弱地盤免震等、は拡大されつつある。一方、同地震で観測された震源近傍の地表面の記録には、上下動の最大加速度が水平動より大きい記録もあり、鉛直地震動が建物に及ぼす影響に関しても検討課題の一つとなっている。一般に、建築構造物においては、水平の挙動の明快さに比べて、上下応答特性は複雑になり、そのモデル化についての議論も絶えない¹⁾。このような観点より、地震時の構造物の実挙動より、上下応答特性を整理・分析しておくことは、今後の応答予測を行う上で

有益な資料となるものと考えられる。地震観測に基づく上下動特性の検討例は、柱の軸力変動が重要となる高層建築物や、原子力施設等重要構造物では、比較的多くあるが^{2)~5)}、免震構造物は、その性質上、水平方向についてのものがほとんどであり、上下方向の応答に関する報告は少ない。そこで、本報告では、免震構造物の上下応答特性に関する基礎的なデータを供する目的で、4棟の免震建物における地震観測記録を基に上下応答特性を調査した結果について述べる。

2. 建物概要と観測位置

今回報告する4建物の免震装置は、いずれも標準積層ゴムと鋼棒ダンパーとからなる機構を有しており、さら

Table 1 各建物の概要
Abstract of Analysing Base Isolated Building

名称	階数	平面形状	積層ゴムから屋上までの高さ	設計時上下振動数	免震装置	サブダンパー
A建物	地上5階	14.5m×21.6m (1×6スパン)	21.7m	15Hz	天然ゴム+ 鋼棒ダンパー	摩擦ダンパー (水平)
B建物	地下1階、地上5階	18m×30m (3×5スパン)	19.1m	13Hz	天然ゴム+ 鋼棒ダンパー	オイルダンパー (水平)
C建物	地上1階	16m×32m (3×7スパン)	5.75m	天然ゴム+ 鋼棒ダンパー	粘弾性ダンパー (水平)	
D建物	地下1階、地上2階	17m×25.5m (3×4スパン)	14.45m	6Hz	天然ゴム+ 鋼棒ダンパー	粘性ダンパー (鉛直)

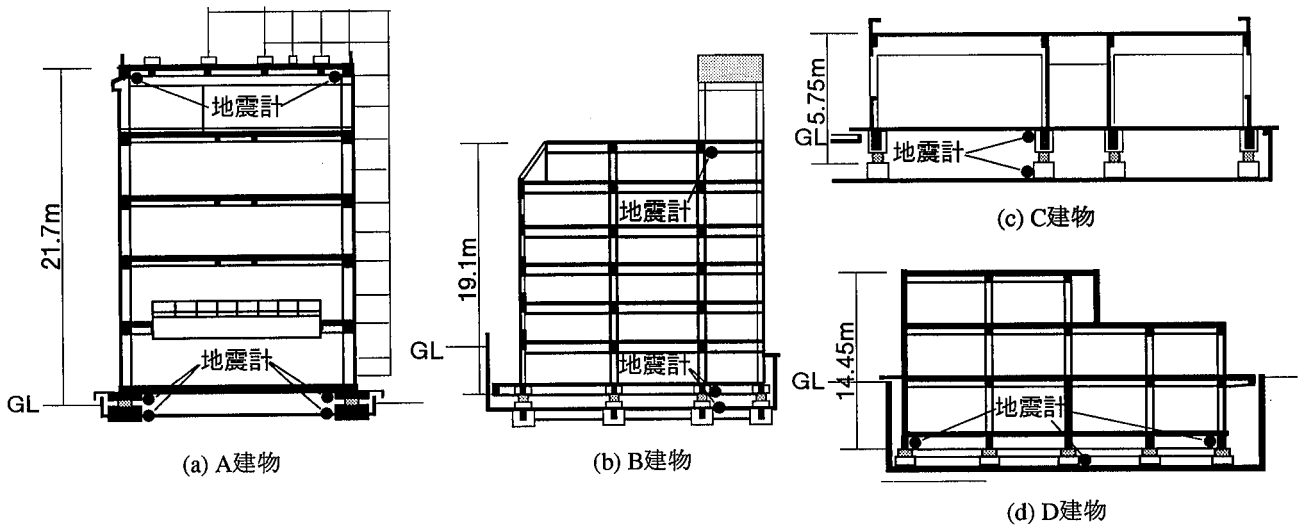


Fig. 1 建物断面図と地震観測点位置
Section of Each Building and Earthquake Observation Point

に、小地震でも減衰効果が発揮できるようにサブダンパーが設置されている。上部構造はいずれも鉄筋コンクリート造であり、杭で支持されている。

A建物：東京清瀬市に建つ地上5階の研究施設である。杭先端位置はGL-7mであり、地震観測は、1986年9月より開始している。

B建物：東京都渋谷区に建つ地下1階、地上5階の事務所ビルである。杭先端位置はGL-25mである。地震観測は、1988年7月より開始している。

C建物：茨城県つくば市に建つ地上1階の研究施設である。杭先端位置はGL-10.3mであり、地震観測は、1988年5月より開始している。

D建物：東京都板橋区に建つ地下1階、地上2階の診療所施設である。鉄道交通振動の低減を計るため、鉛直方向にも比較的柔らかな厚肉積層ゴムを用いている。また、地下逸散減衰と粘性体を利用した鉛直ダンパー機構により、減衰定数として10%以上を有するよう設計されている⁹⁾。地震観測は、1990年6月より開始している。

Table 1に建物概要を、Fig. 1に各々建物の断面図を示す。同図には地震観測点の内、上下動の測点を示す。センサーの位置は、いずれもスラブ振動の影響を避けるため、柱・梁接合部周辺に設置している。A建物とB建物では、

屋上階、1階及び底盤（ゴム直下位置）にセンサーが取り付けられている。他建物では、免震層直上階と底盤の観測点である。またA建物とD建物はロッキング成分が分離できるように、同一平面内に数個上下センサーが配置されている。

3. 最大加速度増幅率

最初に、免震層及び建屋内の最大値分布に着目し、Fig. 2 (a)～(d)に、底盤の最大加速度に対する建物の最大応答値の関係を示す。A建物とB建物に関してのみ、屋上階と免震直上階を示している。図中rと記した直線は、底盤の最大加速度に対する建物の最大応答値の倍率を示す。

何れの建物も底盤に対して、応答倍率rの1～2倍の値に入っている。各々の平均倍率を求めて、Table 2にまとめて示す。A建物で底盤から1階までの増幅で1.3倍、底盤から屋上までの増幅で1.7倍である。5階建てのB建物でも同様に底盤からB1階までの増幅で1.3倍、屋上までの増幅で1.8倍程度である。即ち、免震建物の水平での特徴である「ゴム上で剛体モード」とはなっていないことがわかる。また、1階建てのC建物では1.9倍、D建物では、1.8倍程度となっている。

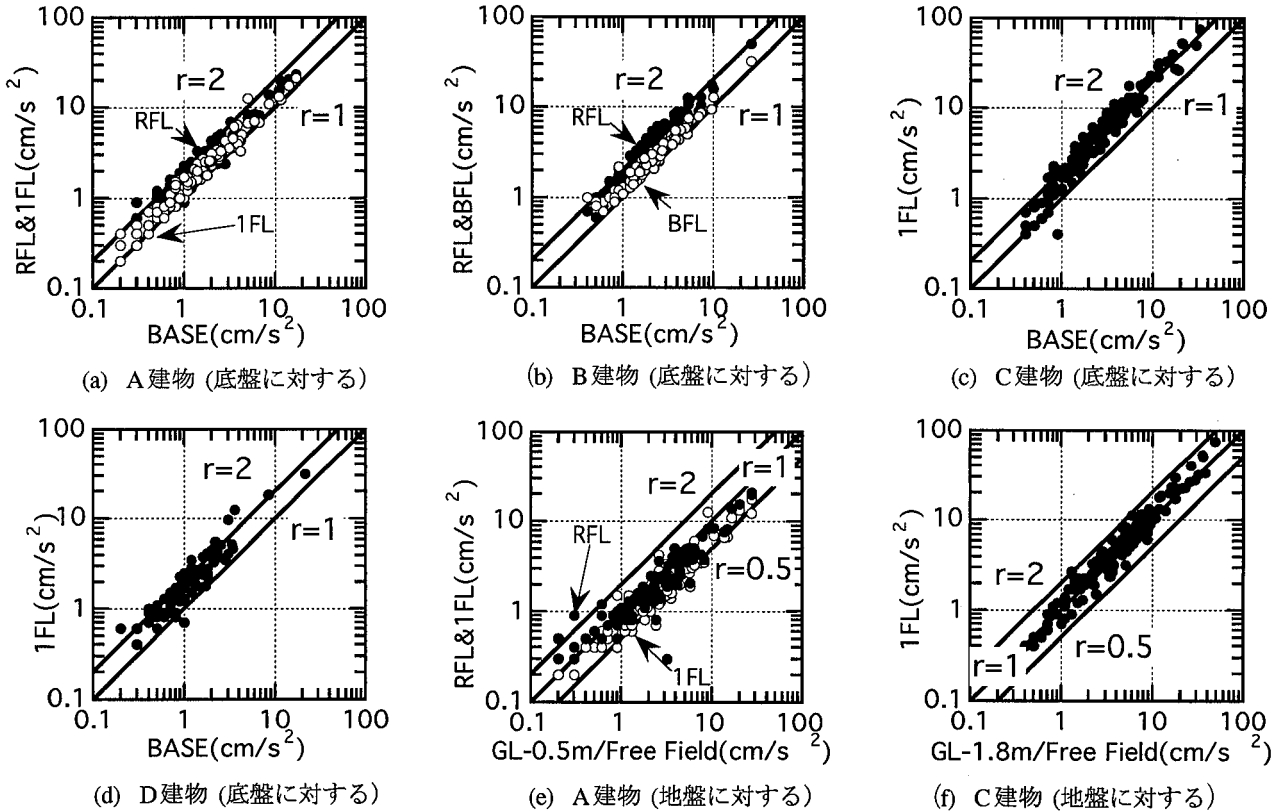


Fig. 2 最大加速度の増幅率
Amplification of Maximum Acceleration

これらの結果は、高層ビル等^{2) 3) 4)}の既往の観測結果(1~4倍程度)に比べてみても、積層ゴムを介することによる影響はなく、一般の建物の増幅率とほぼ同程度であると言える。

さらに、Fig. 2 (e) ~ (f)には、自由地表面の最大加速度に対するA建物、C建物の最大応答値を示す。A建物では、前述した屋上までの平均増幅率が1.7倍から0.98倍、1階でも1.3倍が0.79倍になる。同様に、C建物でも1.9倍から1.2倍になっていることがわかる。これは、自由地表面の最大加速度に比べ、地盤では約6割程度に低減されていることを意味している。したがって、上下応答予測を精度良く行う場合には、杭・地盤・埋め込み深さ等による入力損失効果を考慮する必要がある。

4. 伝達関数

建物の上下固有振動特性を確認するために、各建物の最大加速度の大きい10波を基に、次式により入力の振幅レベルで基準化し、伝達関数 S_{xy} を求めた。

$$S_{xy}(f) = \frac{\sum \left[\frac{(X_i(f) \times \bar{Y}_i(f))}{\int_{1.0}^{20} (X_i(f) \times \bar{X}_i(f)) df} \right]}{\sum \left[\frac{(X_i(f) \times \bar{X}_i(f))}{\int_{1.0}^{20} (X_i(f) \times \bar{X}_i(f)) df} \right]}$$

ここに、 $X(f)$ 、 $Y(f)$ は、各々入力に当たる免震層直

Table 2. 地盤に対する最大加速度の平均増幅率
Mean Amplification of Maximum Acceleration

建物名称	最大加速度増幅率	
	ゴム直上階	屋上階
A建物	1.3	1.7
B建物	1.3	1.8
C建物	1.9	-
D建物	1.8	-

下地盤の加速度フーリエスペクトル、建屋内でのフーリエスペクトルを示す。また、A建物、D建物のように、上下方向の測点が同一平面上に2点ある建物では、各測点の算術平均による波形を純上下成分とみなして検討を行っている。

Fig. 3にA, B, C, D建物の伝達関数を各々示す。A建物に関しては、R階と1階の振幅及び位相も併せて示す。C, D建物では、Table 1に示される積層ゴムの設計固有振動数に、ほぼ対応した卓越振動数が顕著に見られる。また、D建物では、交通振動を除振するために、上下方向に比較的柔らかい厚肉積層ゴムを用いているため、約8Hz以上での高振動数領域での伝達率が1以下になっており、良好な除振効果が伺える。

一方、A, B建物では卓越振動数が分散される傾向が見られる。特に、B建物では、図では割愛したが、約8Hzまで位相が動いておらず、8Hz程度に見られる卓越振動数

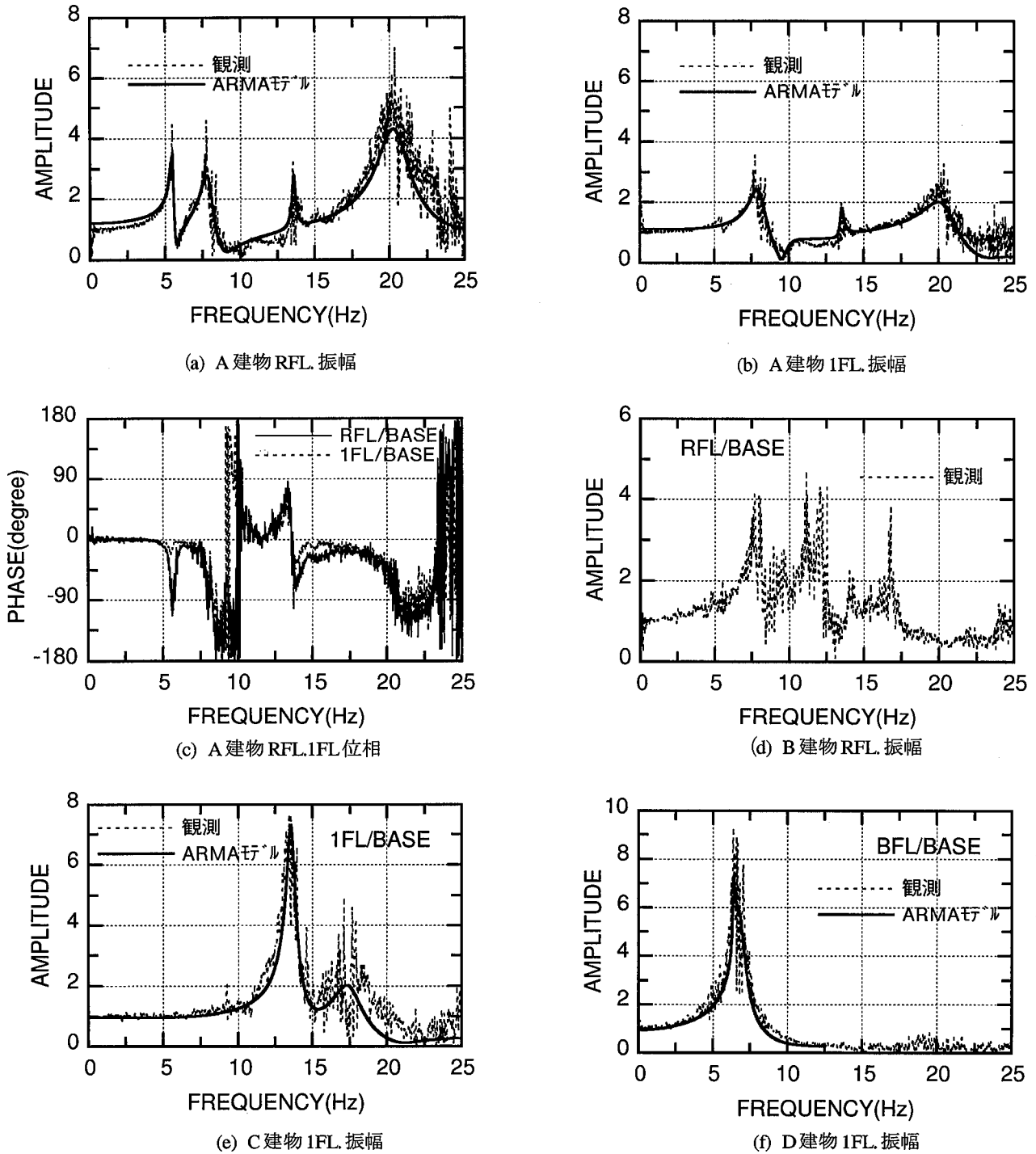


Fig. 3 伝達関数
Transfer Function

は、入力位置である底盤の上下成分とはインコヒーレントな性質のものと推定される。ロッキング振動等の影響も考えられるが、上下測点が同一平面上1点しか観測しておらず、特定はできない。そこで、A、C、D建物を対象として、次式に示すARMAモデルの伝達関数と観測値との複素カーブフィッティングを行い、固有振動数と減衰を同定を試みた。この手法は、振幅と位相を同時に

フィッティングするため、複雑なモデルの固有値を比較的正確に同定することができる。尚、今回ここで扱うARMAモデルは1入力1出力のモデルである。

$$y(i) = \sum_{k=1}^m a_k y(i-k) + \sum_{k=0}^n b_k x(i-k)$$

ここで、x、yは各々、底盤の加速度波、建屋内応答の加速度波を示す。また、伝達関数表示では、

Table 3 固有振動数一覧
Natural Frequency obtained by ARMA Model

	f1(Hz)	h1(%)	f2(Hz)	h2(%)	f3(Hz)	h3(%)	f4(Hz)	h4(%)
A建物	5.5	2.0	7.9	5.0	13.6	1.0	20.4	5.0
C建物	13.6	2.0	-	-	-	-	-	-
D建物	6.4	1.3	6.8	6.6	-	-	-	-

Table 4 実測によるスラブ1次振動数
Measured Natural Frequency of Slab

	RFL.	5FL.	4FL.	3FL.	2FL.	1FL.
1次固有振動数 (Hz)	5.3	8.5	8.4	8.9	14.5	8.6

$$H_{xy}(z^{-1}) = \frac{\sum_{k=0}^n b_k z^{-k}}{1 - \sum_{k=1}^m a_k z^{-k}}$$

である。同定基準は、上式における伝達関数と観測値よりもとめた伝達関数の二乗誤差の重み付き和を最小にすることで行っている。ただし、本検討では、解析周波数範囲を限定するのみで、特に周波数に依存する重みはかけていない。

ARMAモデルでのフィッティング結果をFig.3の振幅部に実線で示す。同定された固有振動数、減衰定数をTable3にまとめて示す。C建物は1次で13.6Hz、h=2%であり、ほぼ積層ゴムの設計上下振動数と一致していることがわかる。D建物の一次近傍では、6.4Hz、h=1.3%と6.8Hz、h=6.6%の近接モードが存在する。D建物には上下方向の減衰装置がついていることから判断して、ゴム系の1次が6.6Hz、h=6.6%であると推察される。ここでの伝達関数は、底盤に対する建屋であるため、逸散減衰の項は評価されていない。この2棟に関しては、積層ゴムの固有振動数に対応した卓越振動数、減衰が得られている。一方、A建物に関しは、積層ゴムの卓越振動数に対応する振動数には、顕著な卓越振動数は見られない。Table4にA建物の竣工時に測定したスラブの固有振動数を示す。ARMAモデルで特定された振動数、f1=5.5Hz、f2=7.9Hz、f3=13.6Hzは、スラブの固有振動数に近接していることより、スラブによる影響が大きいことが推察される。

5. 質点モデルによる検討

本章では、前述したA建物の伝達関数を対象として、Fig.4に示される3つのモデルを基に上下応答特性の解釈を試みる。

CASE1は、上部建物の全重量を考慮するのみのモデルであり、いわゆる積層ゴムの軸剛性と設計荷重より求まる上下固有振動数が1次振動数となるケースである。

CASE2の6質点モデルは、各階床部に質量を集中させ

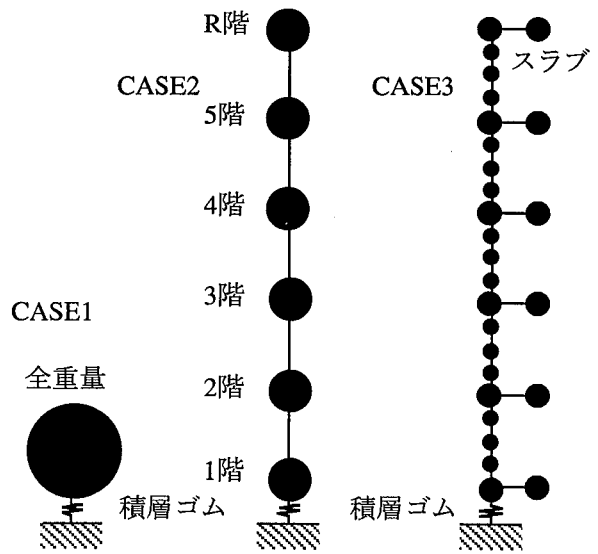


Fig. 4 質点モデル図
Model of A Building

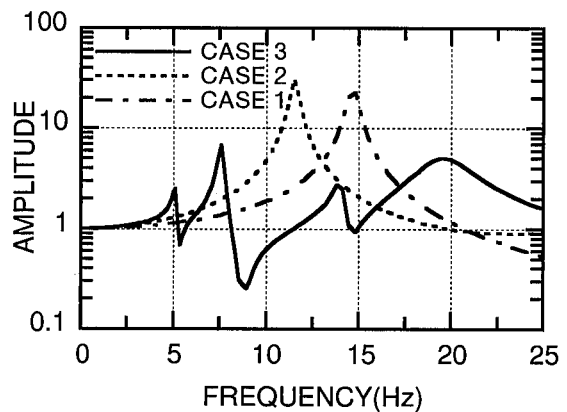


Fig. 5 伝達関数の差異
Transfer Function of each CASE

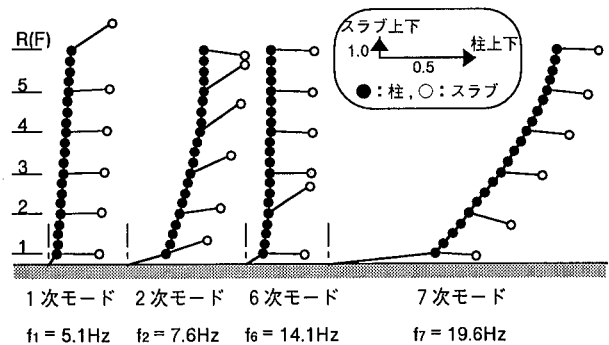


Fig. 6 CASE3における代表モードの刺激関数図
Participation Function of Principal Mode on CASE3 Model

たモデルである。剛性は柱・壁の軸剛性のみを考慮した。この時の、上部構造のみの1次固有振動数は約16Hzである。

CASE3の27質点モデルは、柱・壁を各階とも4等分して分散し、梁接合部の質点に大梁と、スラブ・積載重量の

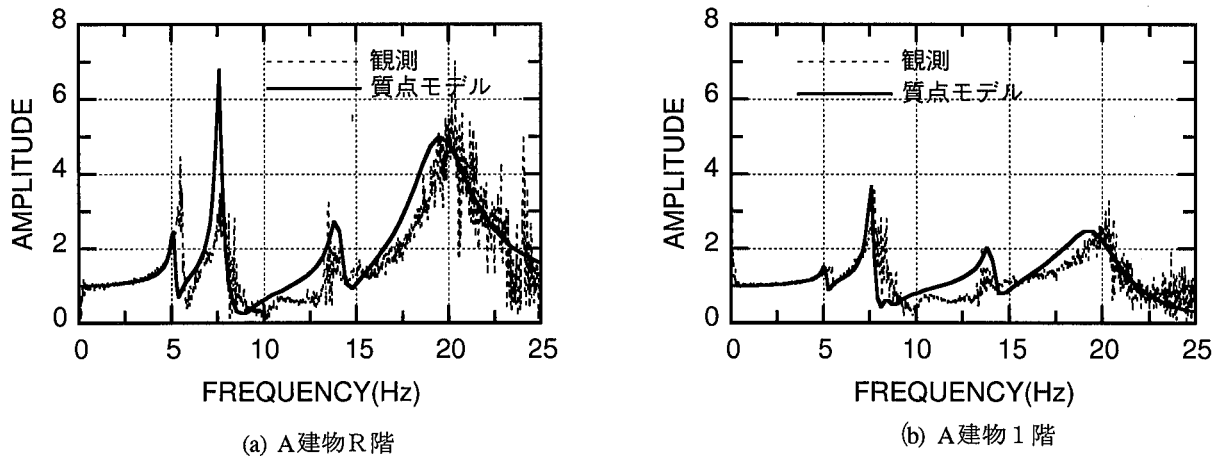


Fig. 7 質点モデルと観測結果の比較
Comparison of Lamped Mass Model and Observed Transfer Function

1/4を集中させ、その質点より、スラブの1次振動のみを表現できるよう分岐の質点を設けたモデルである。スラブの質点は残りの3/4を集中させ、その固有振動数は、Table 4に示される実測値に合うよう剛性を設定した。減衰は各次数とも2%とした。ただし、CASE3の7次モードである約20Hzに関しては、実測結果より8%ととしている。Fig. 5に各ケースによる伝達関数の違いを、Fig. 6にCASE3における代表的な次数の刺激関数図を、Fig. 7に前章で示した観測による伝達関数とCASE3の結果を各々示す。

Fig. 5より、CASE1とCASE2を比較すると、CASE1で生じる設計上の上下固有振動数は、上部構造と連成することにより、約15Hzから11Hz程度になることがわかる。

スラブ振動を考慮したCASE3では、分散型の伝達関数となり、観測点での各次の柱頭における刺激関数が下がっていることがわかる。この結果は、Fig. 7に示されるように観測結果とほぼ良い対応を示す。これは、スラブを考慮したモデルの妥当性を示している。

Fig. 6には、○に柱・壁の上下の刺激関数を横軸方向に、●にスラブの上下の刺激関数を縦方向にして示す。1次は屋上階のスラブが揺れるモードであり、2, 3, 4, 5次モードは約8Hz付近で各階のスラブが揺れるモードである。ここでは、代表して2次のみを示している。6次は吹き抜けのある2階スラブが揺れるモードであり、柱の軸変動が大きくなる全体系のモードは7次である約20Hzにあることがわかる。

以上より、上下応答特性を検討する場合、スラブ等の影響を考慮することにより、全体系の固有振動数がかなり影響されることがわかった。ただし、ここで扱ったA建物は、比較的ロングスパンのスラブであり、一般建物よりスラブの影響が大であることが考えられる。一方、C建物のようにゴムの上下固有振動数がほぼ単峰で見られる例もあり、応答予測を行う場合、各々の建物についての適切なモデル化が必要であると考えられる。

6. おわりに

免震建物の上下応答特性を把握するため、地震観測記録を調査・分析し、以下のような知見を得た。

- 1) 免震ゴム直上・直下の最大加速度の比は1～2倍程度である。
- 2) 建物入力位置での上下動最大加速度は、自由地盤で観測されたものに比べ、入力損失効果によりかなり低減されている。
- 3) 免震ビルの上下方向の固有振動数は、上部構造の柱剛性により、基本的には、設計上下振動数に比べ低振動数側になる。
- 4) 地震観測からもとまる伝達関数は、ピークが幾つか現れる。これらはスラブの固有振動数であり、モード干渉により、免震ビルの応答特性が複雑になる。

以上の結果、中高層免震でゴムの引き抜きが重要な場合など、上下応答が重視される建物においては、梁・スラブ等の構造部材を的確に考慮したモデル化が必要になるものと思われる。

参考文献

- 1) 北村，他：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，P.817～818，(1996)
- 2) 此上，他：地震観測からみた建物上下動の振幅特性，日本建築学会大会学術講演梗概集，P.337～338，(1989)
- 3) 山中，他：地震観測に基づく高層建物の上下方向の応答特性，日本建築学会大会学術講演梗概集，P.657～660，(1996)
- 4) 柴崎，他：ウォーターフロントに建つ高層建築物の挙動，日本建築学会大会学術講演梗概集，P.661～662，(1994)
- 5) 例えば，久野，他：原子力発電所における地震観測記録の上下動シミュレーション解析，日本建築学会大会学術講演梗概集，P.659～660，(1994)
- 6) 寺村，他：厚肉積層ゴムを用いた免震・除振システムの開発（その3），No.43，大林組技術研究所報，(1991)