

高層免震RC造集合住宅の地震応答特性

豊嶋 学*

要約: 平成9年度より、仙台市泉区に立地するRC造13階建集合住宅において高層免震建物の地震応答性状と免震装置の動的挙動を把握するために強震観測を実施してきた。

本論は、これまで観測してきた180波の地震動記録を対象にして、最大応答加速度分布、フーリエスペクトル比、伝達関数等を分析することにより対象建物の振動特性を同定した。さらに、観測開始後最大の震度を示した平成15年5月26日の宮城県沖地震の記録を基に、強震動を受けた免震構造物の非線形地震応答特性を分析した。

その結果、震度3以上の比較的大きな地震に対しては、免震層を介して入力加速度が大幅に低減されており、免震効果が発揮されていることを確認した。また、強震時には免震装置は明らかな非線形挙動を示していることが証明され、地震後においても地震発生前と同様の性能を示すことが実証された。

キーワード: 高層免震集合住宅、地震観測、免震効果、伝達特性

<p>目次:</p> <ul style="list-style-type: none"> 1. はじめに 2. 観測対象建物概要 3. 地震観測体制 	<ul style="list-style-type: none"> 4. 地震観測結果と解析結果 5. まとめ
---	--

1. はじめに

高層免震集合住宅の地震時応答性状および免震装置の挙動を把握し、今日振動を受けた構造物の健全性を検討するために、宮城県仙台市泉区に位置するRC造13階建ての共同住宅で1997年3月より地震観測を開始した。

本論では、これまで観測された地震波(合計180波)の分析を行い、観測対象建物の基本的な振動特性をのべ、これまで最大の震度(震度4, M=7.0)を記録した2003年5月26日に発生した宮城県沖地震による建物の地震応答特性と免震効果について検討した結果を報告する。

2. 観測対象建物概要

観測対象建物の規模はRC造13階建(塔屋1階、地下なし)の免震構造建物で、N値50以上の砂岩上にべた基礎で立てられている。本建物の免震装置として、750φ(11基)、800φ(4基)、900φ(4基)の3種類の径の鉛入り積層ゴム(LRB; Lead Rubber Bearing)を合計で19基使用している(表1 観測対象建物概要を参照)。なお、表2に設計段階で求めた、上部構造物のみの1次固有振動数と、免震層の各変形レベルにおける等価な1次固有振動数を示す。

3. 地震観測体制

地震観測を行っているセンサーの位置を図1に示す。観測成分は全部で9成分あり、その内訳は、P1にX, Y, Zの3成分(免震層床位置)、P2にX, Y, Zの3成分(1F床下)、P3はZの1成分(1F床下)、P4にX, Y, Zの3成分(ペントハウス床上)

表1 観測対象建物概要

(1)	泉パークタウン桂パークハウス東街区参番館			
(2)	宮城県仙台市泉区桂1-3-1			
(3)	共同住宅			
(4)	敷地面積	19,951.29m ²		
	建築面積	460.69m ²		
	延床面積	5,067.40m ²		
	基準階面積	388.10m ²		
(5)	地上	13階		
	地下	なし		
	塔屋	1階		
(6)	軒高	GL+38.165m		
(7)	基礎底深さ	GL-3.15~4.38m		
	土質, N値	GL-m	地層	N値
		0~0.43m	盛土	---
		0.43m~	砂岩	N≥50
(8)	RC造の上部構造と基礎の間に免震装置として鉛入り積層ゴム(LRB)を入れた免震構造			
(9)	構造設計	三菱地所(株), 東急建設(株)		
	施工	東急建設(株), (株)地崎工業JV		

表2 免震層の変形レベルと等価固有振動数

	建物のみ	微小振幅	レベル1	レベル2
LRBのせん断歪率(%)	—	5%	50%	100%
長辺(X)方向	0.75秒	1.33秒	2.52秒	2.98秒
短辺(Y)方向	0.505秒	1.23秒	2.47秒	2.94秒

*先端技術研究室

であり、すべてサーボ型加速度計（測定レンジは 2,000gal, A/D 変換 16bit）を配置している。

4. 地震観測結果と解析結果

4.1 加速度記録と最大値分布

観測された地震波の総数は平成 15 年 9 月末現在で 180 波である。免震層床位置 (P1) で観測された加速度波形を基に計測震度を計算した結果、震度 3 以上の地震が 6 波あり、震度 2 以上の地震は 22 波記録されていることを確認した。また、免震層床位置の X 方向加速度が 10gal 以上を示したものは、28 波記録されている。

このうち No. 32 地震波は平成 10 年 9 月 15 日に発生した宮城県南部地震 (M=5.0) の際に観測された波形データで免震層床上の X, Y, Z 各方向で、最大加速度がそれぞれ 192.9gal, 287.1gal, 87.4gal とこれまで観測された地震波の中でもっとも大きな加速度値を示した (震度は 3)。No. 148 地震は、2003 年 5 月 26 日の宮城県沖地震 (M=7.0) で震度は 4 であった。

図 2 に震度が 3 以上の地震記録 6 波について最大加速度分布を示す。X 方向、Y 方向ともに免震装置をはさんで加速度が大きく低減していることがわかる。No. 32 地震では、X 方向で加速度値が 78% 小さくなっており、No. 148 地震でも 62% 加速度値が低減しており免震効果が現れている。

4.2 計測震度と最大加速度

計測震度と最大応答値の関係を検討することを目的として、これまで観測された 180 波すべてについて計測震度と免震層の X 方向、Y 方向それぞれの最大加速度の関係を示した (図 3 参照)。(a) は横軸に計測震度を、縦軸に最大加速度の常用対数をとってプロットしてある。(b) は、観測された加速度記録を

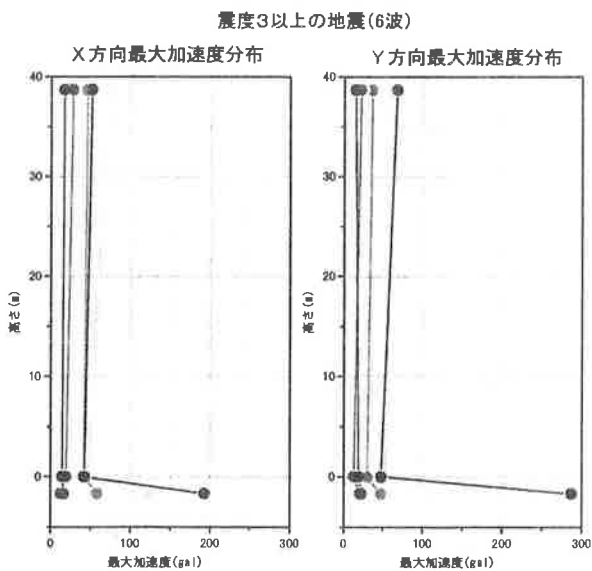


図 2 震度 3 以上の地震の最大加速度分布

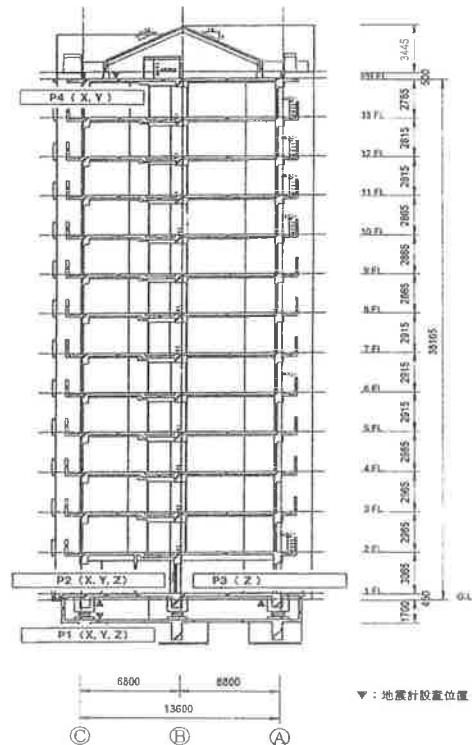
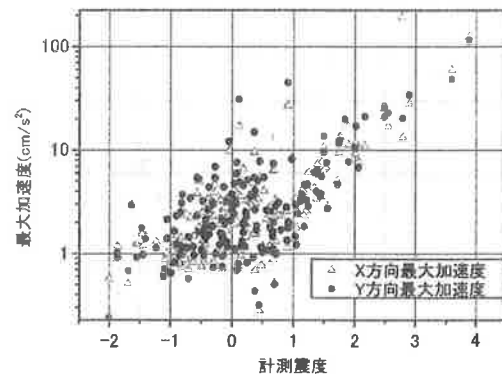
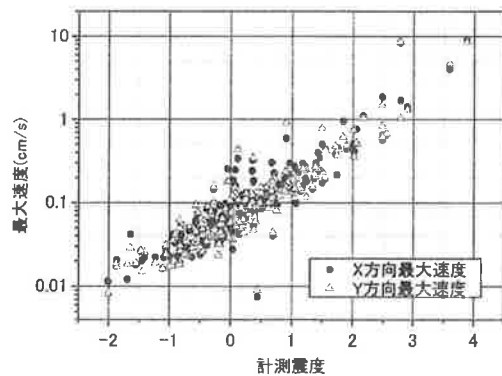


図 1 加速度センサー設置位置



(a) 計測震度と最大応答加速度



(b) 計測震度と最大応答速度

図 3 計測震度と最大応答値の関係

数値積分して得られた速度の最大値に対して同様にプロットしてある。両者を見比べると、最大加速度値に関する分布はふくらみが大きく計測震度との相関はやや低くなったが(相関係数 0.703)、最大速度に対しては相関が高く(相関係数 0.91)その分布形状はやや膨らみはあるものの、ほぼ直線的な関係があることがわかる。この関係を、最小二乗法を用いて最大速度にたいする線形回帰を行うと以下の関係式が得られる。

$$Y = 0.071 \times 10^{0.44 X}$$

Y:計測震度

X:最大応答速度

4.3 観測対象建物の伝達特性

図4に1997年12月7日(地震No.12)、1998年9月15日(地震No.32)の地震波のフーリエスペクトル比を示す。左側の列はX方向、右側の列はY方向について基礎(免震装置床位置)、1階大梁下、ペントハウス床上の三地点間のフーリエスペクトル比を示した図である。

X方向の基礎とペントハウス床上(図中の実線:P1-X→P4-X)のフーリエスペクトル比に注目すると、No.12地震動(基礎部の最大加速度16.79gal)の時の1次卓越振動数は1.51Hz、2次卓越振動数は4.44Hzであるのに対し、No.32地震動(同192.87gal)の時には、1次卓越振動数が1.35Hz、2次卓越振動数が3.86Hzと減少していることがわかる。これは、No.32地震動がNo.12地震動に比べて大きな入力であったため、免震装置が変形し水平剛性が低下したため、建物全体の固有振動数が低下したことを示している。また、ピークの高さも低くなっており、免震装置が非線形挙動を示したことがうかがえる。

1階床上を入力としペントハウス床上を出力としたフーリエスペクトル比を算出した(図4中の白丸:免震層より上の構造物の伝達特性に相当する)。No.12地震を例に取ると、X方向の卓越振動数は1.96Hz、Y方向は1.80Hzであった。設計時点での、上部構造物の固有振動数は、X方向で1.33Hz(0.75秒)、Y方向で1.98Hz(0.505秒)であり、Y方向は比較的よい一致を示しているが、X方向では実測結果のほうがかなり高い振動数を示した。これは、Y方向にはほとんど耐震壁しがなく、それに対してX方向には多くの雑壁を配しているためと考えられる。

免震層より上の構造物の卓越振動数を比較すると1次卓越振動数はNo.12地震では1.96Hz、No.32地震では1.8Hzと1割程度振動数が下がっており、上部構造物の剛性が低下したことを示している。No.32地震以後の解析結果を見ると再び1次固有振動数が1.98Hzと初期の値と同様な値を示しており、このことから、建物は何ら損傷しておらず雑壁等の2次部材の影響と

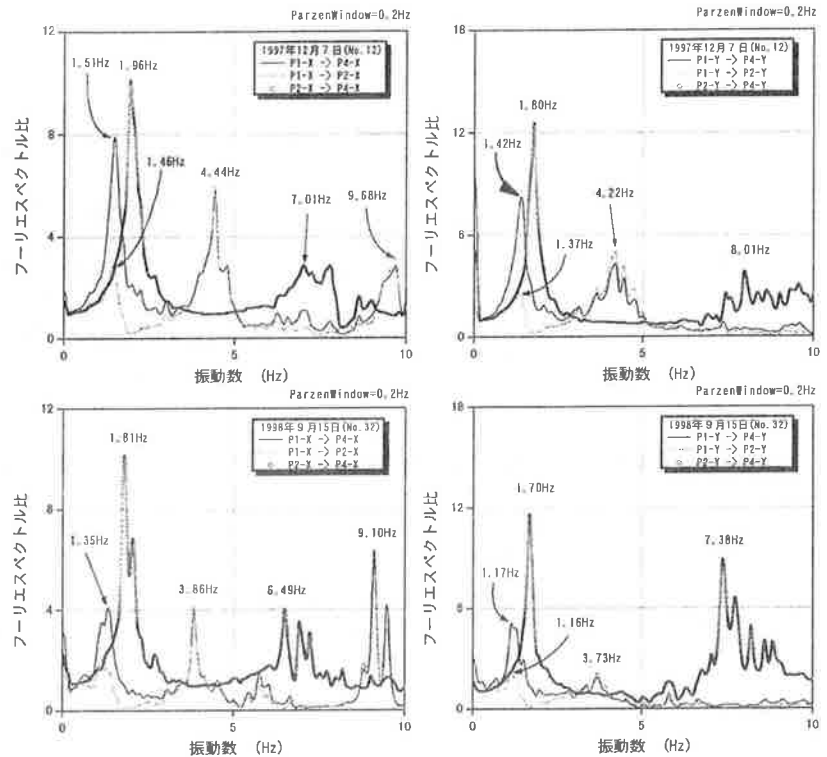


図4 観測対象建物のフーリエスペクトル比

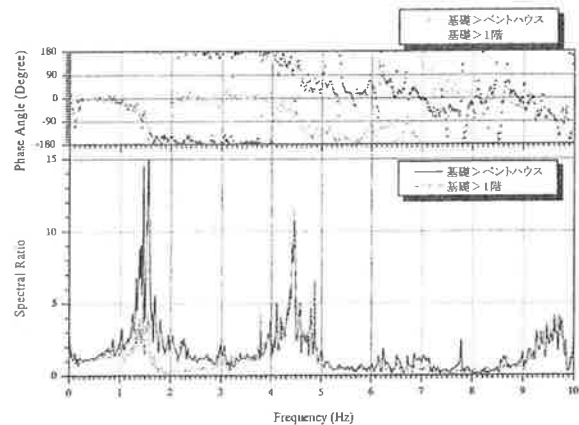


図5 観測対象建物の伝達関数

考えられる。

次に、基礎を入力としペントハウス床上を出力とした場合のフーリエスペクトル比(図中の実線)と、基礎を入力とし1階床上を出力とした場合のフーリエスペクトル比(図中の2点鎖線)を比べると観測されたいずれの地震動でも、2次卓越振動数付近の曲線がほぼ一致していることがわかる。この現象をさらに詳しく検討するために、No.12地震について伝達関数を求め、その振幅と位相を図5に示す。2次固有振動数付近の位相角は、基礎とペントハウス間では+90度、基礎と1階では-90度となっており、1階とペントハウス間では180度の位相遅れが生じている。基礎の動きに対して免震層から上の上部構造物

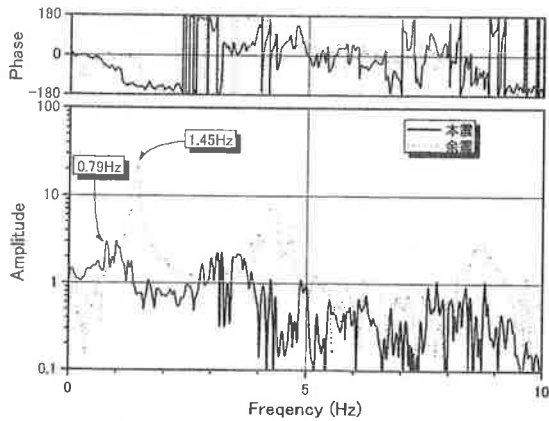


図6 2003年5月26日の地震による伝達関数

は90度のずれを持って振動している。上部構造物の頂部と下部では正反対の方向に振動し、かつ、その振幅はまったく同じであることがわかる。上部構造物は、高さ方向の中心位置を節として（回転中心として）頂部と下部が左右に振動していることになる。Y方向についてもほぼ同様な傾向をしている。

4.4 2003年5月26日宮城県沖地震での免震効果

図6に本震および余震における基礎X方向とペントハウス内X方向との伝達関数を比較したものを示す。この図を見ると、余震では1.45Hzに卓越振動数がありピークの形も位相も滑らかで弾性的な挙動を示していることがわかる。それに比して、本震ではピークの振動数が低くなり（0.79Hz付近）、応答倍率も大きく下がり、位相曲線もがたがたしている。これらの傾向は典型的な非線形挙動を示しており、免震装置が変形することによって建物全体の周期が伸び、エネルギー吸収が行われた結果を顕著に表している。

図7の上の波形は基礎と1Fの加速度記録を2回数値積分して変位波形を求め、それから免震装置のX方向の相対変形波形を求めたものである。最大変形は1.25cmで、その時の免震装置のせん断歪率はおよそ5%程度になる。この変形レベルに

謝辞

本研究は、三菱地所株式会社(現三菱地所設計株式会社)殿との共同研究によるものです。ここに感謝の意を表します。

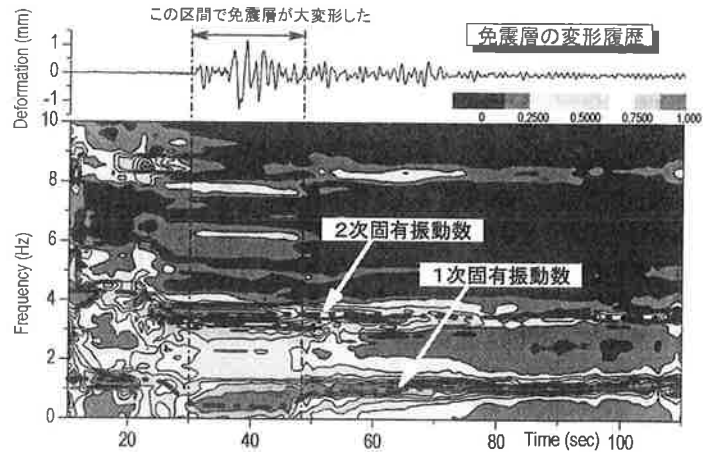


図7 免震層の変形と非定常伝達関数

おける設計時の固有振動数は0.75Hz（1.33秒）であり、図6から読み取れる実際の卓越振動数0.79Hzとほぼ整合している。

図7下のコンター図は、基礎とペントハウスのX方向の非定常伝達関数を示したものである（振幅の最大値を1に基準化して示してある）。免震層の変形時刻歴と見比べると、30秒付近までは小振幅時と似た傾向があるものの、変形が大きくなっていく30秒～50秒の範囲で1次固有振動数、2次固有振動数ともに低振動数側にシフトしており免震による長周期化の現象がはっきり現れている。その後、免震装置の変形が小さくなるにつれ、初期剛性にもどり地震前の状態に近づいていることがわかる。

5. まとめ

1997年よりRC造13階建て高層免震集合住宅を対象に地震観測を行ってきた。震度3以上の比較的大きな地震に対しては、免震層を介して入力加速度が大幅に低減されており、十分な免震効果が発揮されていることを確認できた。また、免震装置が非線形を示す変形レベルでの地震応答特性はほぼ設計値どおりであった。なお、本建物は強震動経験後も地震前と同様の性能を示した。

Dynamic Behaviors of a Base Isolated High-Rise RC Apartment Building Under Strong Motions

M. Toyoshima

We have measured the earthquake response on high-rise RC apartment building with base isolation system since 1997. By using the response data, it was found that the base isolation was very effective in terms of reducing the input acceleration of the building during strong earthquake motions. It was also verified that the dynamic characteristics when designed, was agreed with the observed response results according to the spectral and stochastic analyses.