

実大振動実験による戸建て免震住宅の装置別応答性状比較

COMPARISON OF SEISMIC PERFORMANCE OF BASE-ISOLATED HOUSE WITH VARIOUS DEVICES

桐山伸一*, 中田信治**, 花井 勉***, 福和伸夫****

Shin-ichi KIRIYAMA, Shinji NAKATA, Tsutomu HANAI, and Nobuo FUKUWA

Recently, various base-isolated devices corresponding to the low-rised house have been developed in practical use. However, the common information for designers to select specific device has not been gathered. Therefore, a full scale vibration test was conducted to grasp the difference of the isolated response by replacing only base-isolated devices system using common superstructure on the shaking. The result of the test shows that each devices system fulfills the basic performance demanded for base-isolated houses. Each devices system is evaluated from the view points of response to each input wave, influence of vertical motion, residual displacement and the ease of construction

Keywords : Base-isolated house , Full scale vibration test, Comparison of various devices, Ball bearing type, Slide type

戸建て免震住宅, 実大振動実験, 装置比較, 転がり系, すべり系

1. はじめに

日本建築センターで免震評定を受けた建築物のうち、3階建以下の戸建て物件をその免震機構で分類し、年代順に推移を見てみると、表1のように兵庫県南部地震以降、多様な戸建て用の免震装置が開発、実用化され、木造、鉄骨造の通常の戸建て住宅では「転がり系」と「すべり系」が主流になってきているのが分かる。

免震装置の動的な性能把握の為に、以前より装置単体で振動実験が行われてきたが、近年では振動台の性能が向上し、戸建て建物では上部架構の応答性能まで直接把握できる実大免震住宅の振動実験が行われるようになってきた。坂本、花井ら²⁾は平面すべり支承+積層ゴムの装置システムで木造2階建の振動実験を行い、最大入力加速度1Gの水平動、2方向の水平動、及び0.3Gの上下動同時入力などから、このすべり系システムが十分な性能を有している事を報告している。佐藤ら³⁾は、鉄骨2階建住宅に平面転がり支承と復元減衰機構を加えたシステムに対し1G近く水平動加振を行い、十分な免震効果があることを報告している。他には、飯場ら⁴⁾が開発段階のいくつかの戸建て用免震装置を用いて重りを載せて振動実験しているが、実用化されている免震装置(単体及びシステム、以下略)での実大建物応答挙動が共通の条件下で比較検証されてはならず、入力地震動の特性、敷地の制約、施主の要望などに応じて設計者が免震装置を選択できる情報がそろっていないのが現状である。

そこで、筆者らは3軸同時加振が可能な振動台上において共通の

上部構造を用い免震装置のみを交換することで、免震装置による応答性状の違いを確認する実大の振動実験を行った。今回、実験に用いた免震装置は、戸建て免震住宅用として使用実績の多い「転がり系」(?、?)2種類と「すべり系」(?)1種類である。

表1 免震評定を取得した戸建て建築物¹⁾の分類と件数の推移(2002.5まで)

	積層ゴム系		転がり系		すべり系	
支承	積層ゴム	曲面	直動	平面	曲面	平面
復元	積層ゴム	曲面	ゴム	ゴム	曲面	ゴム
減衰	ダンパー		ダンパー		摩擦	摩擦
-1994	RC10,W4					
1995	兵庫県南部地震					
-1996	RC6,S2	W2				
1997	RC3,W1	W4,S6*	RC3,	RC2,	RC2,	W9**
-2002			S9**,W2	W1	S3,W4	

RC：鉄筋コンクリート造、S：鉄骨造、W：木造
数字は件数、*の数はそのうちの一般評定件数

入力には直下型の地震を想定した地震動や海溝型の長周期成分を含んだ地震動を用い、中地震動レベルの加振から2G近くの水平動加振、1Gを超える上下動を加えた3軸同時加振を行って、入力レベルによる応答性状の変化や上下動入力が応答に与える影響を確認した。さらに想定外の地震への対応用としてストッパーにより免震層変位を制限した場合の応答も調査し、免震層を固定した場合の応答

本論文は文献5)に加筆したものである。

* 旭化成ホームズ株式会社 工修
** 名古屋大学大学院環境学研究所 大学院生
(旭化成ホームズ株式会社)工修
*** 名古屋大学大学院環境学研究所 大学院生
(株式会社日本システム設計)
**** 名古屋大学大学院環境学研究所 教授・工博

Asahi Kasei Homes Co.,M.Eng.
Graduate Student, Dept. of Environmental Engineering and Architecture, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya Univ.,M.Eng.
Graduate Student, Dept. of Environmental Engineering and Architecture, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya Univ.
Prof., Dept. of Environmental Engineering and Architecture, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya Univ., Dr.Eng.

と比較している。試験建物には仕上げを施し、上部応答による損傷の様子を観察するとともに、アスペクト比の高い家具を配置してその応答挙動より家具転倒の要因を分析する。

実験結果より各免震装置の応答の特徴を把握し、加えて解析モデルを設定して実験値の分析、補填を行う事で、戸建て免震住宅において性能設計を行う際の有用な情報を引き出していく。

2. 実大振動実験

2.1 試験体

試験体は、振動台に緊結した重量鉄骨架台を基礎と見立て、その上に免震層、2階建の上部架構を配置した。写真1に実験状況を、図1に実験概要図、図2に試験体平面図を示す。上部構造体は耐力パネル形式の軽量鉄骨系軸組構造である(「住宅の品質確保の促進等に関する法律」耐震等級1相当の耐力パネルを配置している)。1階平面寸法は6.710m×6.405m、構造階高は1、2階とも2.87mで1階床梁まで含めた総重量は約302kNである。部材断面は柱 $-80 \times 80 \times 3.2$ 、梁 $H-250 \times 100 \times 4.5 \times 6$ 、1階床梁には $H-250 \times 125 \times 6 \times 9$ を用いた。床はALC厚100mm、外壁はALC厚75mmで目地にシールを施している。内壁間仕切りは木下地に石膏ボード12.5mmをビス打ちし、クロス仕上げとしている。積載荷重として、1階及び2階の床に 600N/m^2 相当のおもりを配置した。

2.2 免震層構成

実験で採用した免震装置は表2に示す3つの種類である。装置A(システム、以下略)は平面直動転がり支承に復元材として積層ゴム、減衰材として粘性ダンパーを組合せたもので、積層ゴムとダンパーは偏心の無い配置としている。装置Bは周辺にすり鉢状の転がり支承を配し、中央部にはねじれ抑制ガイドを持つ平面転がり支承と減衰材として粘性ダンパーが配置されている。復元力はすり鉢の勾配を利用しており特定の周期を持たないのが特徴である。装置Cは平面すべり支承に積層していない復元ゴムを組合せたもので、復元ゴムは偏心のない配置としている。減衰材は特に設けず、すべり摩擦によりエネルギーを消費していく構造である。表中には今回用いた装置のメーカー出荷時の特性値を記入しているが、転がり支承とすべり支承では摩擦係数 μ が10倍程の違いがある。

2.3 加振測定方法

加振は大林組技術研究所3次元振動台にて行った。表3に水平方向、鉛直方向性能及びその他諸元を示す。

表3 振動台諸元

	水平性能	鉛直性能	その他 諸元
最大加速度	3000 cm/s^2	1000 cm/s^2	積載質量 50 t
最大速度	200 cm/s	100 cm/s	テーブル寸法 $5\text{m} \times 5\text{m}$
最大変位	$\pm 60 \text{ cm}$	$\pm 20 \text{ cm}$	加振周波数 DC~50 Hz

図3には測定機器の配置を示す。免震層と上部構造の水平2方向の層間変位をレーザー式変位計(分解能 $0.01 \sim 0.05\text{mm}$ 、サンプリング $1/1000$ 秒)を用いて計測した。建物応答の計測はひずみゲージ式加速度計(有効レンジ $0.001\text{G} \sim 5\text{G}$)を用いて行った。水平2方向については鉄骨架台、1階床、2階床及びR階床、上下方向については鉄骨架台、1階床及びR階床において計測した。さらに1階及び



写真1 実験状況

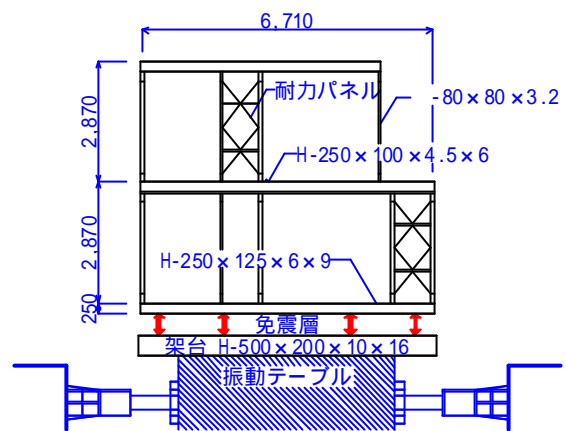


図1 実験概要図

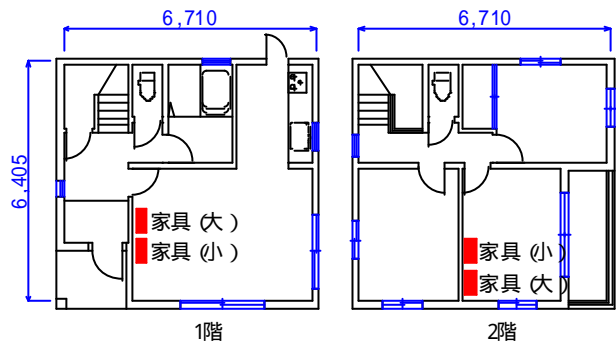


図2 試験体平面図












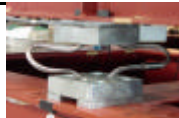
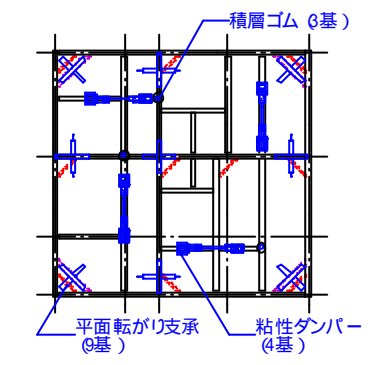
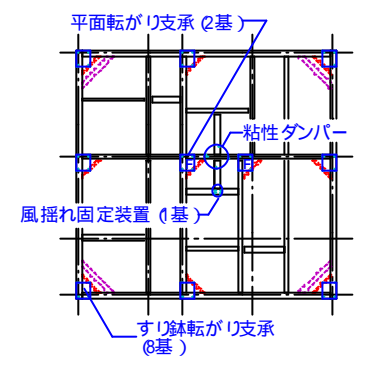
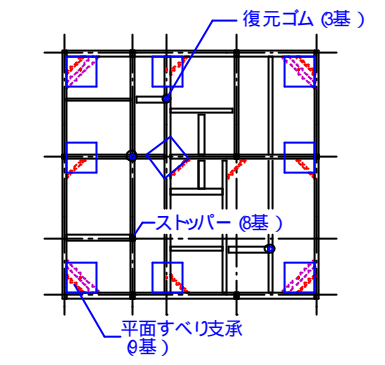
2階に配置した家具の頂部加速度も水平1方向及び上下方向について計測した。尚、計測時のサンプリング振動数は200Hzである。

2.4 入力地震動

入力地震動は表4のように5つの実地震動、建築基準法施行令第82条の6で示される解放工学的基盤の応答スペクトルに同告示第1457号に依り弾性地盤周期 T_g の異なる3種類の表層地盤を想定した模擬地震動(以下告示波 y_{S_a})、及び免震層初動を確認する為の中地震動記録と調和正弦波を用いた。

図4には強震波として用いたKobe波、Tarzana波、告示波および中地震動波の擬似速度応答スペクトルを示す。図中には加振時にお

表2 免震装置システムの概要と装置の配置

呼称	装置 A (平面転がり)	装置 B (すり鉢転がり)	装置 C (平面すべり)			
支承材	直動転がり	すり鉢転がり 平面転がり	平面すべり			
復元材	積層ゴム	-	復元ゴム			
減衰材	粘性ダンパー	粘性ダンパー	-			
装置概要	 直動転がり支承 $\mu=0.0033$ 限界変形 $\pm 400\text{mm}$	 積層ゴム $K=38.5\text{N/mm}$ 限界変形 $\pm 400\text{mm}$	 すり鉢転がり支承 $\mu=0.006$ 限界変形 $\pm 285\text{mm}$	 平面転がり支承 $\mu=0.006$ 限界変形 $\pm 285\text{mm}$	 平面すべり支承 $\mu=0.046$ 限界変形 $\pm 350\text{mm}$	 同左
	 粘性ダンパー (減衰コマ) 最大減衰力 17kN 限界速度 75cm/s	 同左 限界変形 $\pm 500\text{mm}$	 粘性ダンパー 負担水平力 12kN 限界速度 75cm/s 限界変形 $\pm 285\text{mm}$	 風揺れ固定	 復元ゴム $K=31.2\text{N/mm}$ 限界変形 $\pm 400\text{mm}$	 ストッパー 作動変形 $\pm 330\text{mm}$
装置配置	 積層ゴム (8基) 粘性ダンパー (4基) 平面転がり支承 (8基)	 平面転がり支承 (8基) 粘性ダンパー (4基) 風揺れ固定装置 (1基) すり鉢転がり支承 (8基)	 復元ゴム (8基) ストッパー (8基) 平面すべり支承 (8基)			

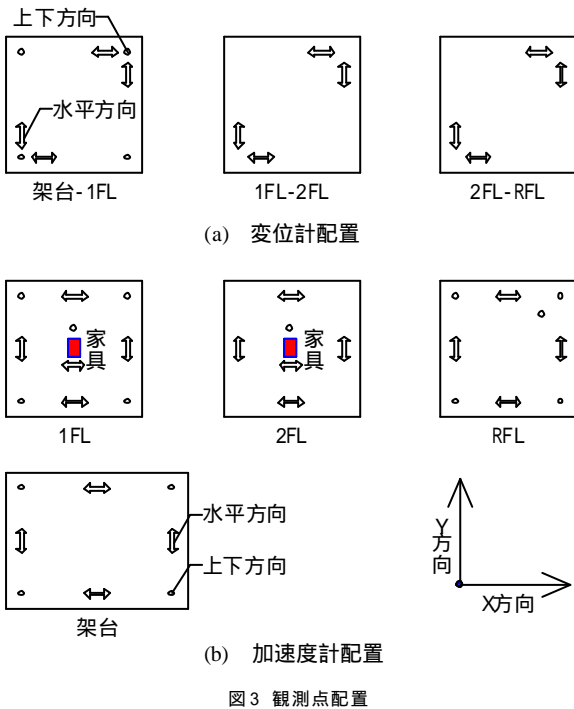


表4 入力地震動の一覧

入力地震動	Amax	Vmax	Dmax	備考
	(cm/s^2)	(cm/s)	(cm)	
El Centro 1940 NS	486	50.0	13.7	入力レベル:50, 100%
Taft 1952 EW	529	50.0	22.7	
Hachinohe 1968 EW	266	50.0	14.7	
Kobe(JMA) 1995 NS	813	93.3	19.0	NSをX軸に入力 入力レベル:50~150%
" EW	619	81.3	15.7	
" UD	333	41.5	13.0	
Tarzana ^{*1} NS	971	74.5	26.5	EWをX軸に入力 入力レベル:50~100%
" EW	1745	114.7	26.3	
" UD	1028	70.5	13.4	
告示波 1 ($y, S_a 050$)	490	65.6	28.6	$T_g = 0.50$ 秒
告示波 2 ($y, S_a 075$)	433	68.4	31.6	$T_g = 0.75$ 秒
告示波 3 ($y, S_a 100$)	364	68.8	35.8	$T_g = 1.00$ 秒
Taft 位相告示波				入力レベル:50~140%
中地震動 ^{*2}	62~53	1.9~4.2	1.0~1.1	静岡県 2001.4.3
調和正弦波	周期 3 秒、振幅 $\pm 10 \sim \pm 250\text{mm}$			

*1 Northridge 1994

*2 Kyoshin Net (K-NET)

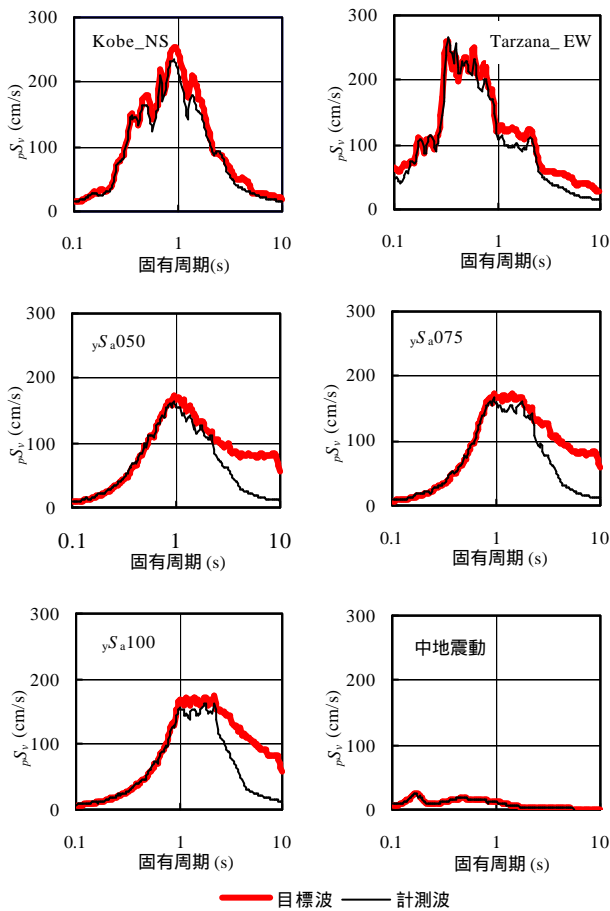


図4 入力目標波と架台部での計測波の速度応答スペクトル

ける架台位置での応答スペクトルも示しているが、振動台の安全確保の為にローカットフィルターがかかっており、特に告示波において長周期成分が目標に達していない入力となっている。

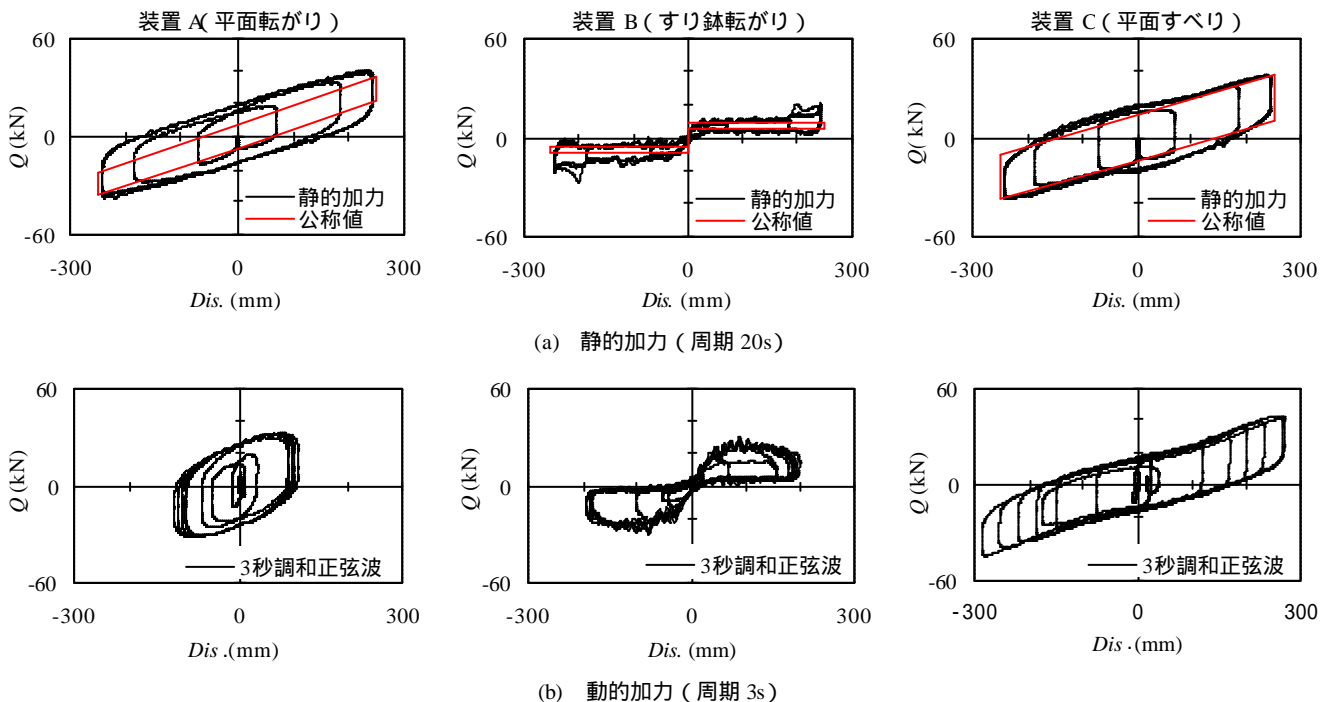


図5 免震層荷重変形特性

尚、特記のない入力波は 100% (=表中数値) を目標として加振を行った

2.5 免震層と上部建物の特性

装置毎の免震層の復元力特性を図5に示す。同図(a)には上部架構下部をロードセルを介して固定し、振動台を20秒正弦波加振した場合(以下、静的加振と称する)の荷重変形の関係を設計公称値モデル(又は装置単体試験値)と共に示す。又、同図(b)には上部架構固定を解除して免震層を動的加振(3秒調和正弦波)した場合の荷重変形特性を示す。尚、この場合の荷重は(各階質量×各階加速度)として算出したものである。

装置Aでは公称値として転がり支承と積層ゴム及びダンパー切片荷重(動き出し荷重)を加えているが、静的加振では転がり出し直後より公称復元力より大きく荷重が出はじめ、原点付近では公称値の倍程となっている。ドラムが回転する機構の為か、1~2cm/s(振幅5~10mm)の速度の小さい状態からダンパーの負担がかなり大きくなる特徴を有している。動的加振では速度依存性により、さらにダンパーの寄与が大きくなり紡錘形になっている。

すり鉢型転がり支承の装置Bは、すり鉢勾配が一定で固有周期を持たず、原点付近で抵抗荷重が変化するだけの特徴的な復元力特性となっている。転がり支承の負担する荷重はごく少なく、静的加力ではダンパーの負担もあまり大きくない。しかし、動的加振時にはダンパーの負担が大きく、粘性的な復元力特性をしている。速度の大きい原点付近でのダンパー負担がほとんど無いのは、上皿曲面にダンパーのヘッドを押しつける構造になっていると思われる。尚、小刻みな荷重変動は、支承受け皿表面の塗膜の一部不良によるものである。

装置Cはダンパーがないので、静的加力ではすべり支承と復元ゴムの公称復元力とよく合っている。動的加振でもそれ程変化がなく、速度依存性は小さいと言える。

公称値における 20cm 変位時の等価周期は、装置 A：2.84 秒、装置 B：3.71 秒、装置 C：2.73 秒、20cm 変位時の等価剛性より算出した免震層偏心率は 装置 A：0.01 装置 B：0.03 装置 C：0.03 である。大きく変位した 3 秒調和正弦波加振時において、いずれの装置もねじれ挙動はほとんど生じていない。

次に免震層上の上部建物の振動特性を調べる。X、Y 方向それぞれにホワイトノイズ (20cm/s^2) と Kobe 波を入力した場合の 1F に対する RF の伝達関数と、それを 1 自由度系振動システムの理論解を用いてカーブフィッティング⁶⁾した曲線を図 6 に示す。この入力地震動の採用理由は、比較的上部架構の応答が大きい為である。架台入力レベルは約 800cm/s^2 であるが、免震効果により 1 階床での応答レベルは 100cm/s^2 程度となっている (装置 A)。

カーブフィット法より推定した各方向の固有振動数と減衰定数を入力レベルごとに表 5 に示す。表中には参考として 1 階の層間変位 δ_1 と、耐力パネルのみを考慮して立体振動解析から求めた固有振動数 (解析値) も合わせて示す。これらを見ると、解析値の固有振動数よりも実験値のほうが 2 倍近く大きな値となっている。通常構造材として考慮しない 2 次部材 (内外装材) の剛性が微動状態のみならず免震振動状態においても大きく寄与していることを示している。一方、減衰定数は各方向とも通常の鉄骨造 (h -数⁷⁾) に比べ大きな値となっている。これは、躯体に取り付く 2 次部材の影響や装置取り換えの為に固定されていない床版の影響と、水平 2 方向の振動数が近接していることなどが関係していると考えられるが詳細については今後の課題である。

振幅依存性に着目してみると、ホワイトノイズ入力時に対して Kobe 波入力時は固有振動数が低下し、減衰定数が増加している。但し、振動数はまだ 3Hz 程度と耐力パネルのみの立体振動解析の値 1.88Hz よりかなり高く、2 次部材が健全で剛性への寄与の大きい応答領域であることが分かる。

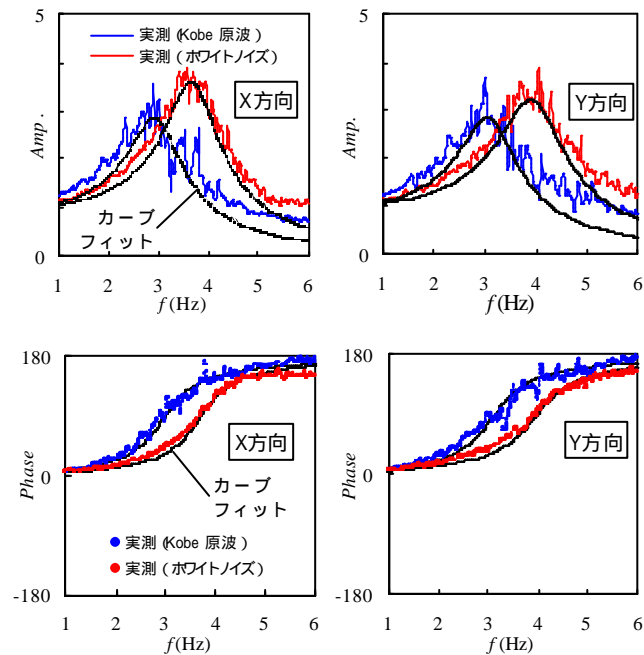


図6 伝達関数とカーブフィット曲線

表5 各方向の固有振動数と減衰定数

方向	ホワイトノイズ 入力：約 20cm/s^2			地震動入力 入力：約 100cm/s^2			解析値
	δ_1 (mm)	f (Hz)	h (%)	δ_1 (mm)	f (Hz)	h (%)	
X	1.22	3.71	14.06	4.19	2.99	17.87	1.88
Y	2.34	3.99	15.73	6.56	3.13	17.94	1.89

3. 実験結果

3.1 入力レベルと最大応答値

1 軸加振を行った地震動応答について、図 7 には鉄骨架台位置 (免震装置直下) で計測された加速度を積分して求めた入力速度の最大値を横軸に、免震層応答変位の最大値、各床位置での応答せん断力係数及び応答床震度の最大値を縦軸に示す。尚、床震度とは各階の加速度応答波形を用いて計測震度を算出したものである。いずれの装置を用いても免震層応答変位は 250mm 以下、応答せん断力係数は 1 階で 0.22 以下、2 階で 0.26 以下、床震度も最大 5 強に収まっており十分な免震効果が確認できた。

装置別で見てみると、装置 A は低速度から減衰機構が働き始める為、入力速度が 10cm/s 以下程度の中地震動でも免震効果が現れている。又、入力速度とせん断力係数に相関が見られる。線形的に挙動する積層ゴムと粘性減衰の特性が現れていると言える。これに対して他の装置では中地震動ではある程度の応答が生じているが、大地震動時でもそれ程大きくならない。すり鉢勾配を上がった (装置 B) すべり摩擦力を上回る (装置 C) 為には、ある一定以上の入力が必要であることを示している。

免震層変位に関しては装置 A の免震層変位が最も小さく、復元力が変位に依存しない装置 B の免震層変位が最も大きくなる傾向が現れている。

次に入力加速度が 1G を大きく超えるレベルでの応答を見てみる。Tarzana 水平 2 軸波を入力レベル 50% ~ 100% に変えて加振した場合の X 方向の最大応答加速度及び最大応答変位を図 8 に示す。

全ての装置で応答加速度は入力加速度の $1/3 \sim 1/6$ に低減でき、免震層変位は 25cm 以内、1 階の層間変形角も最大で 7mm と損傷は発生していない。家具も転倒せず、この入力波では想定を超える入力レベルでも十分に免震性能を発揮している。又、入力加速度を 2 倍程度変化させても、上部構造の応答加速度にあまり変化は見られなかった。中でも装置 C は 1 階で $173 \sim 187\text{cm/s}^2$ 、2 階で $87 \sim 97\text{cm/s}^2$ 、R 階で $187 \sim 192\text{cm/s}^2$ と変化が少ない。これに対し装置 A では入力レベルの増加と共に上部応答変位が多少増加している。免震層の線形剛性的な特性が応答に現れているようである。装置 A が他の装置に比べ応答が大きいのは粘性ダンパーの容量が上部構造体の重量に対してやや過大であった為と考えられる。しかしながら、この様な過減衰状態でも免震効果は明らかに発揮されており、また前述した通り、免震層の変位をかなり抑えられるのは利点とも言える。

次に地震動加振後の残留変位についても考察する。風荷重に対するトリガー機能をもたせようと免震層のすべり出し荷重を大きくすると、逆に残留変位が大きくなる傾向にある。1 軸加振を行った地震波に対する免震層の最大変位 D_{max} と、残留変位 D_r の

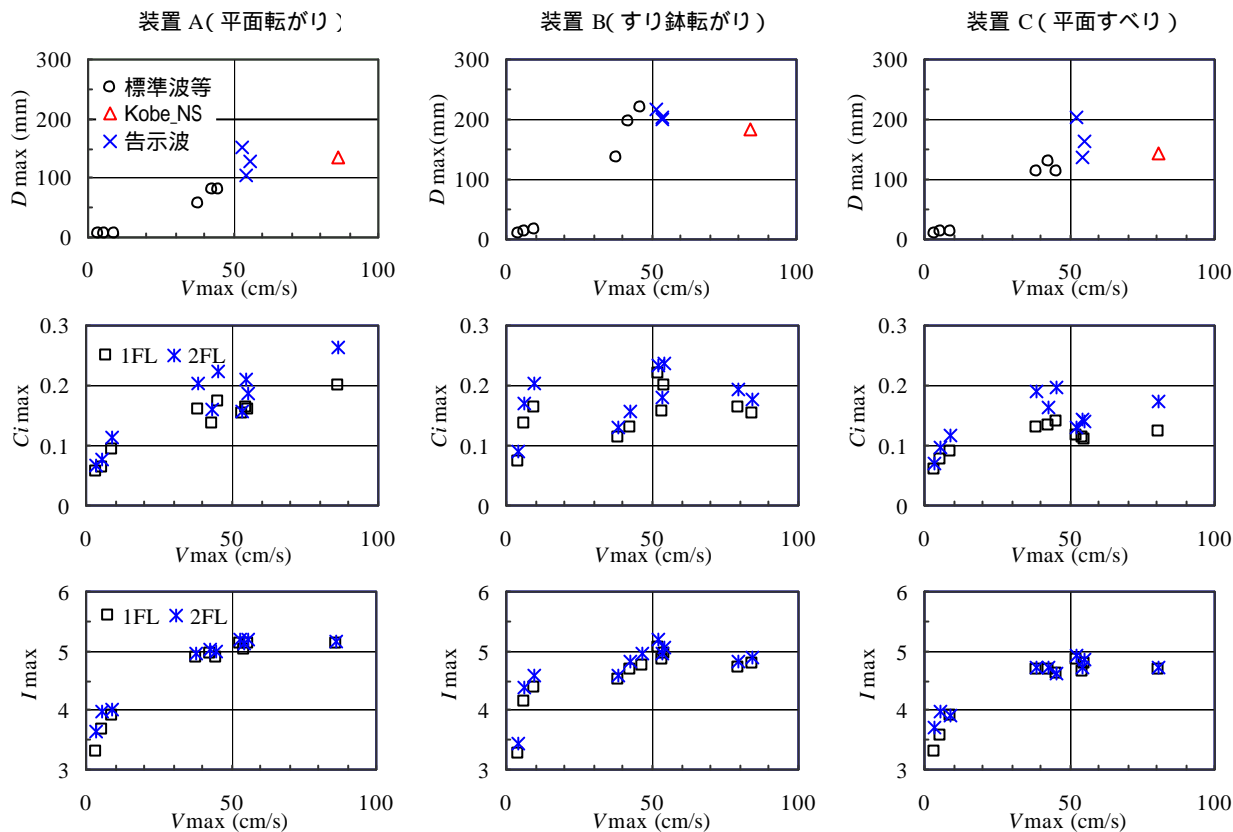


図7 最大入力速度 V_{max} と最大応答値 (免震層変位 D_{max} 、上部構造 C_i max 及び床震度 I_{max})

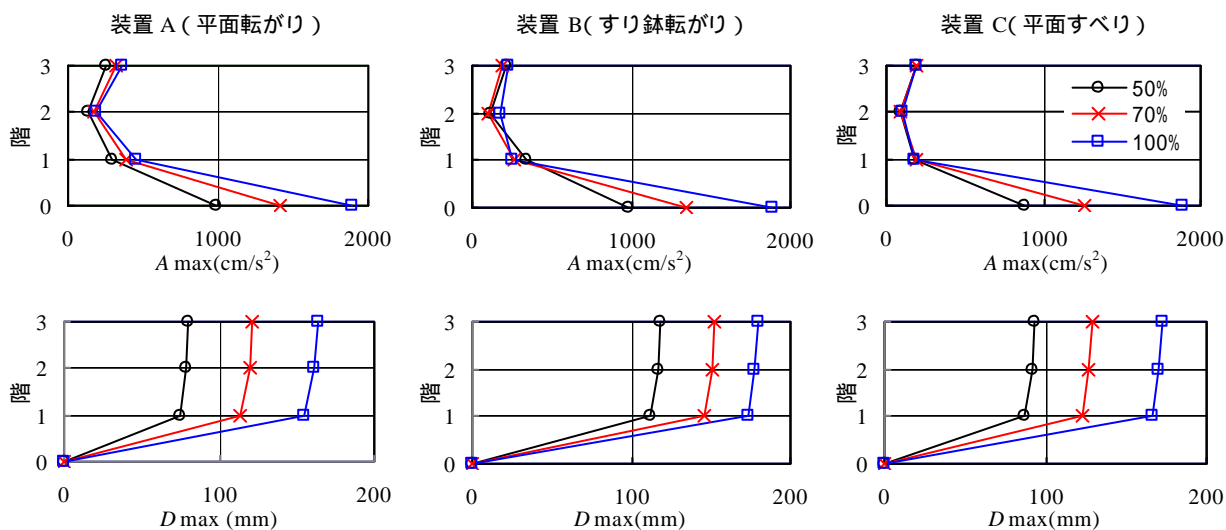


図8 Tarzana 波入力レベルと最大応答値 (応答加速度 A_{max} 及び応答変位 D_{max}) の関係

関係を図9に示す。公称値の免震層復元力特性(図5)が荷重0と交わるポイントは装置Aで50mm程度、装置Bで0mm、装置Cでは140mm程度であるが、地震動応答後の残留変位は最大でも13.6mmと小さい。文献²⁾では、同様のすべり支承 ($\mu = 0.048$) において免震層接線周期 T_l 違いにより残留変形が2cm ($T_l = 3s$)、7cm ($T_l = 4.4s$) の報告があるが、今回のように静摩擦係数が大きい装置で接線周期もそれ程長くしなければ(今回は $T_l = 3.6s$) 転がり支承のみならず、すべり支承でも大地震遭遇後に装置を原点復帰させる作業はあまり発生しないと思われる。

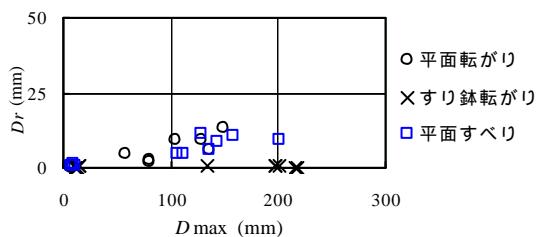


図9 免震層最大応答変位 D_{max} と残留変位 D_r の関係

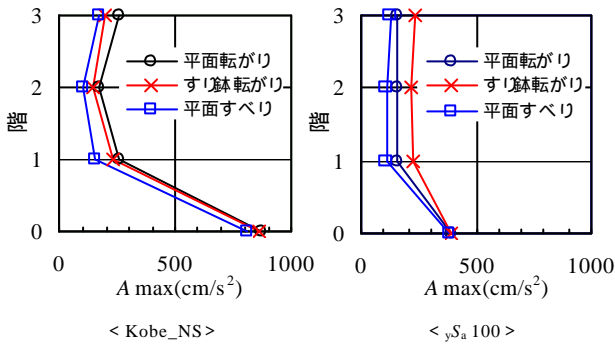


図10 入力波特性の違いによる最大応答加速度の比較

3.2 入力波による応答比較

地震動の卓越周期の違いによる応答比較として、図10にKobe_NS波及び告示波 y_{s_a100} 加振時の応答加速度の比較を示す。短周期成分を多く含むKobe波加振では応答モードがくの字型なのに対して、長周期の卓越する告示波 y_{s_a100} ではほぼ直線型のモードとなっている。くの字型は入力短周期成分を免震層でカットしきれず、上部架構の高次モードの影響が現われたものであるが、すべり支承だけでなく折り返し時荷重変動の大きい軽がり支承装置Aでも若干発生している。しかし応答は十分に小さく、極端に上部架構の剛性は低くなければこの影響は無視し得るものと思われる。4章にて解析的にも検証する。

次に上下動入力の影響を見る。Kobe及びTarzana波の水平2軸加振と同3軸加振(上下方向最大加速度 330cm/s^2 及び 1028cm/s^2)でのX方向免震層荷重変形関係を図11に、最大応答値の比較を表6に示す。3軸加振の場合、2軸加振に比べ応答履歴ループに細かい荷重変動が加わるのが特徴である。免震層応答変位は「転がり系」装置A、Bでは明確な差異は認められなかったが、「すべり系」装置Cでは3軸加振での変位が6~9%小さかった。上部応答

せん断力係数はKobe波で装置Bが、上下動振幅が1Gを超えるTarzana波では特に装置B、Cが2軸加振に比べ大きく増幅されている。しかしながら、上部架構の最大変形角は $1/442$ と十分に弾性範囲内の応答である。

表6 3軸入力時応答値の2軸入力時応答値に対する比率

地震動	Kobe波			Tarzana波		
	A 平面 転がり	B すり鉢 転がり	C 平面 すべり	A 平面 転がり	B すり鉢 転がり	C 平面 すべり
免震層変位	1.00	1.02	0.49	1.03	1.00	0.91
せん断力係数	免震層	1.03	1.19	1.08	1.25	1.47
	1階	1.08	1.26	1.08	1.12	1.09
	2階	1.01	1.48	0.98	1.15	1.30

3.3 室内家具の応答

家具は写真2のように各階にそれぞれ2個ずつ本棚が配置されており、背の高い家具頂部にひずみゲージ式加速度計が設置されている。家具の概要を表7に示す。床面との摩擦係数はばね秤より算出したものであるが、摩擦係数がB/Hより十分大きいので、すべり挙動ではなくロッキング挙動となる⁸⁾。



写真2 家具

表7 家具の概要(背の高い本棚 B×H=33cm×196.5cm)

階	家具自重(N)	アスペクト比	収納本重量(N)	合計重量(N)	摩擦係数(平均値)	床仕上
1	195.0	5.1	640.9	835.9	0.444	じゅうたん
2	195.0	5.1	680.1	875.1	0.413	フローリング

家具の重心位置が高さの中心となるよう収納した。

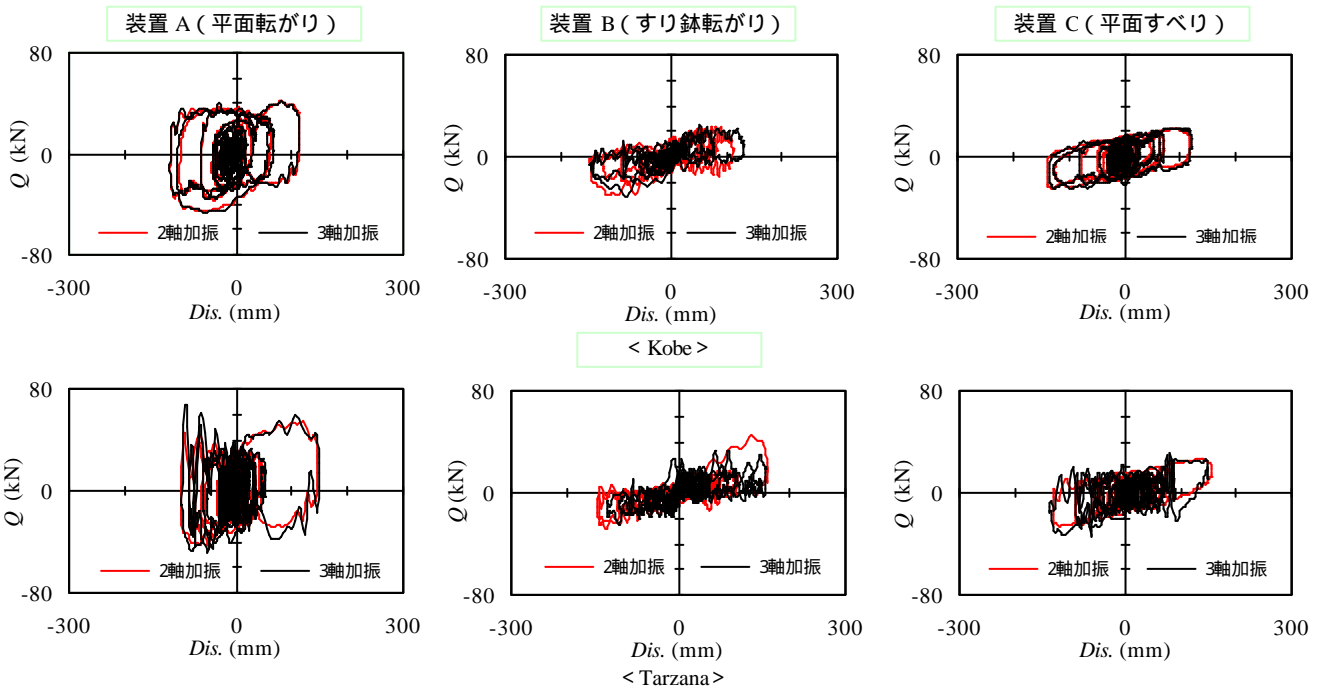
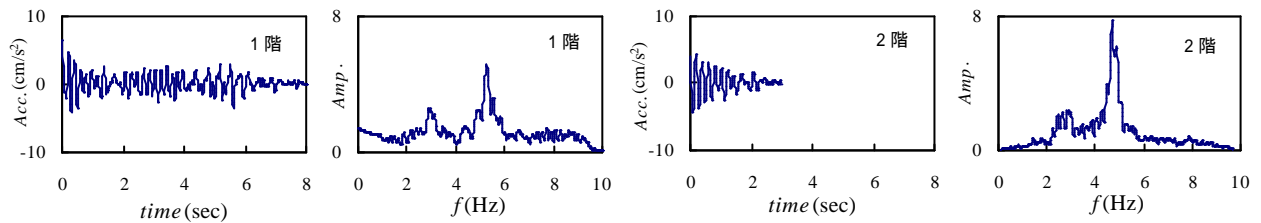
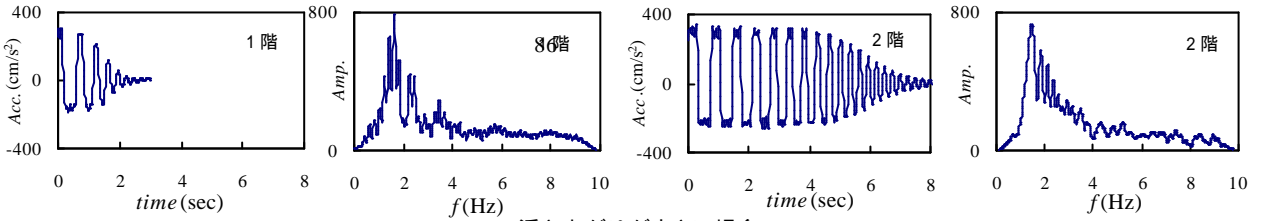


図11 上下動の有無による免震層荷重変形関係比較



(a) 浮き上がりの生じない場合



(b) 浮き上がりが大きい場合

図12 家具の自由振動性状(家具頂部の加速度波形及びフーリエスペクトル)

家具は背板と壁面との間隔が5cmとなるように配置されており、特性把握の為、背板上部が壁面につくように傾け、手を離して自由振動させた。家具に浮き上がりがほとんど生じない小振幅域の自由振動波形とフーリエスペクトルを図12(a)に、浮き上がりが大きい振幅域での自由振動波形とフーリエスペクトルを同図(b)に示す。図12(a)のフーリエスペクトルより、家具自身の固有振動数は、1F家具(じゅうたん床仕上げ)が5.3Hz、2F家具(フローリング床仕上げ)が4.7Hzであることが分かる。1F家具の固有振動数の方が若干大きい原因としては、収納本の重量と配置の差および床仕上げによるものと考えられる。

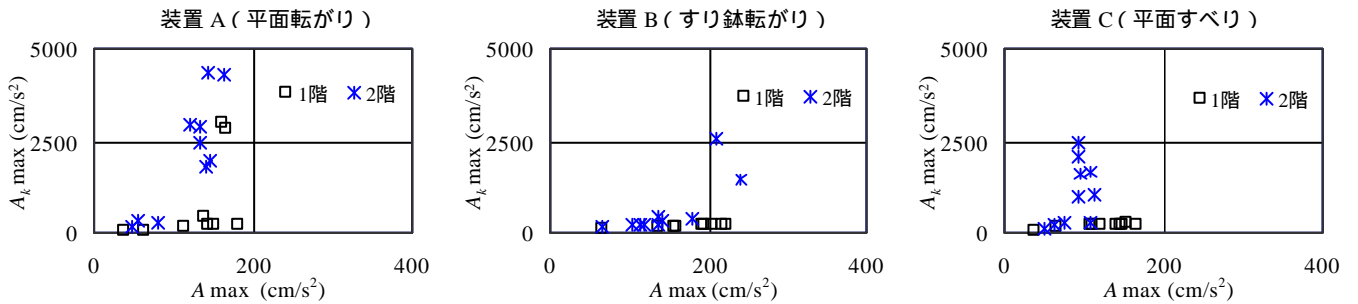
図12(b)からは、大振幅でのロッキングの振動数はじゅうたんで1.7Hz、フローリングで1.5Hzであり、フローリングに比べじゅうたんの方が早く減衰して家具自身の振動数に近づいていく様子が分かる。

地震動入力時には、家具はどの地震動でも転倒していないが、

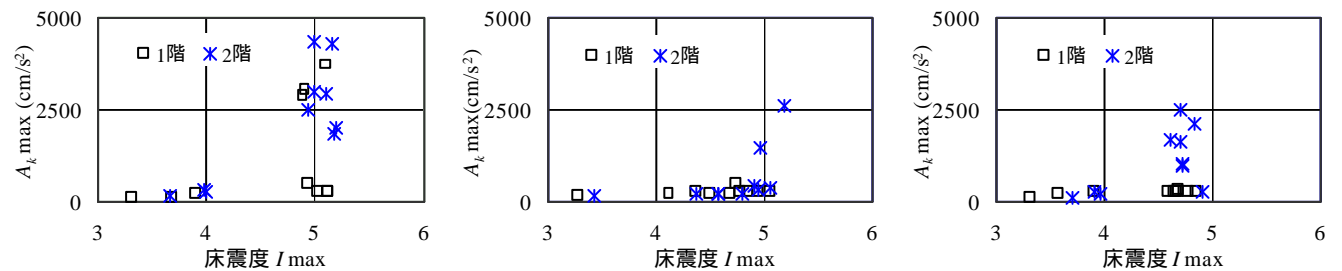
床応答があるレベルを超えると家具頂部加速度も大きくなり、浮き上がりロッキングをおこし壁に衝突を繰り返すようになる。特に過減衰の装置AではKobe_NS入力時に大きくロッキングし、転倒のおそれを感じた。

図13(a)に各階の床加速度と家具頂部の加速度の関係を示す。家具の転倒指標としては、通常、床応答の最大加速度 $A=B/H \cdot g$ ($g=980\text{cm/s}^2$)、最大速度 $V=10B/H^{0.5}$ が用いられており⁹⁾、速度応答の大きい免震挙動では等価振動数 $F_b=A/(2 \cdot V)$ が境界振動数 $F_b=15.6/H^{0.5}$ を下回るため、加速度指標が決定要因となる¹⁰⁾。今回の家具の場合では 192cm/s^2 以上が転倒の可能性域となるが、装置A、Cにおいてはこれを下回る加速度でも家具頂部加速度がかなり大きい応答も見られる。

同図(b)には速度値も考慮される床の応答震度と家具頂部加速度の関係を示しているが、いずれの装置も震度5前後より家具応答が大きくなっている。これは過去の地震被害調査の家財被害



(a) 最大床応答加速度 A_{max}



(b) 最大応答床震度 I_{max}

図13 床最大応答値と家具頂部加速度 A_k_{max} の関係

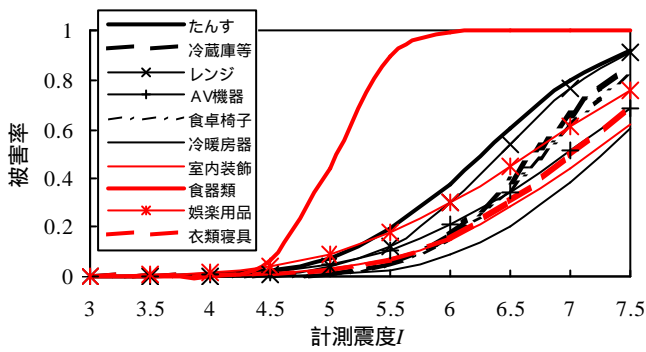


図 14 家財の被害率曲線

率曲線(図 14)¹¹⁾とも一致しており、免震住宅内の家具の転倒可能性判断には床震度も有効な指標といえる。

家具の共振状態を調べる為、家具頂部加速度のフーリエスペクトルのピーク振動数を横軸に、最大応答加速度を縦軸にとったものを図 15 に示す。(a) は装置別を、(b) は入力地震動別を示している。入力地震動は Kobe_NS、El Centro、Taft、Hachinohe、ySa100 である。図 15 (a) より、装置 A は装置 B、C に比べロッキング振動数(1.5~1.7Hz)付近でかなり大きく振動していることが分かる。又、同図(b)より、Kobe_NS のようにパルス的な地震動の場合の方が家具の応答加速度が増大しやすいようである。

各階床応答のフーリエスペクトルを図 16 に示す。(a) は Kobe_NS 入力時、(b) は告示波 ySa100 入力時である。(a) より装置 A は他の装置と比べて、ロッキング振動数(1.5~1.7Hz)近傍が約 2 倍増幅されている。装置 A のように免震周期があまり長くない場合は、パルス的な地震動の入力によって床応答成分にアスペクト比の高い家具のロッキング振動数に近い成分が入る為、注意が必要である。一方、図 16 (b) のように長周期成分が卓越する告示波 ySa100 の場合は、各階床応答の振動数と家具の振動数が共振することはほとんど無く、家具転倒は起りにくいと考えられる。

3.4 ストッパー作動時及び非免震応答

想定外の地震動が入力された場合に、過度の免震層変位を抑制する為のストッパーを装置 C に配置した。使用したストッパーは環状のワイヤーロープで緊結された 2 つの鋼製ブロックを、架台及び 1 階鉄骨梁に取付

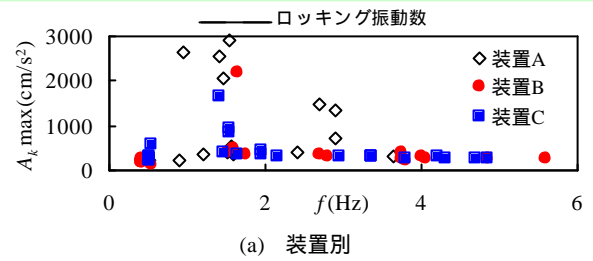


写真 3 ストッパー

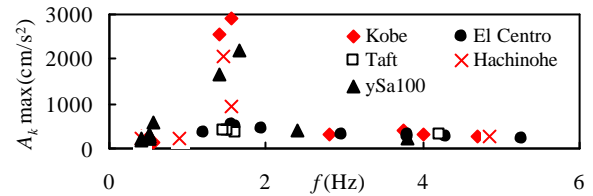
ける形のもので、免震層変位 33cm 付近から効き始め 34cm 付近で完全にワイヤーロープが伸びきる機構となっている(写真 3)。

図 17 にストッパーが作動した加振時の免震層の荷重変形関係を示す。ストッパーが作動すると急激に剛性が立ち上がり応答せん断力も大きくなる。尚、ストッパーが作動したのは、加振順に Kobe3 軸 150%、3 秒調和正弦波(振幅 ±200mm 及び ±185mm)、ySa100 140% の 4 加振である。

ストッパーが数回作動した 3 秒調和正弦波(振幅 ±200mm)について、架台と 1 階床の加速度及び架台変位と免震層変位の波形比較を示す(図 18)。ストッパー作動時には 1 階床レベルにパル

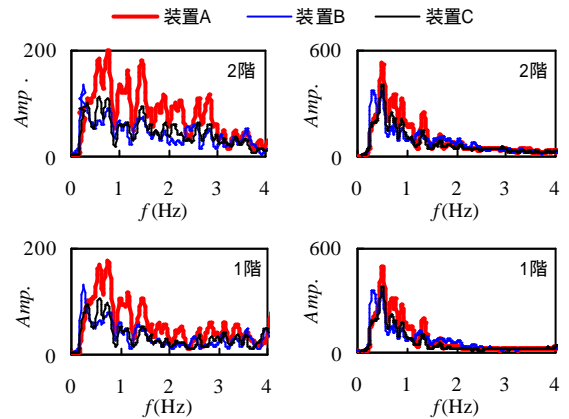


(a) 装置別



(b) 入力地震動別

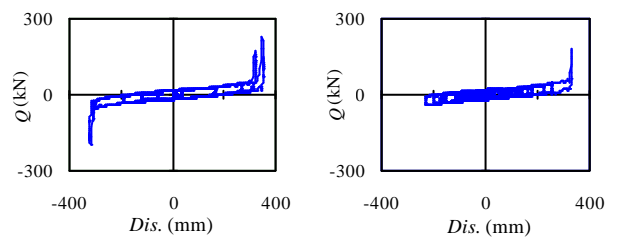
図 15 家具頂部応答の卓越振動数 f と最大応答加速度 A_{kmax} の関係



(a) Kobe_NS

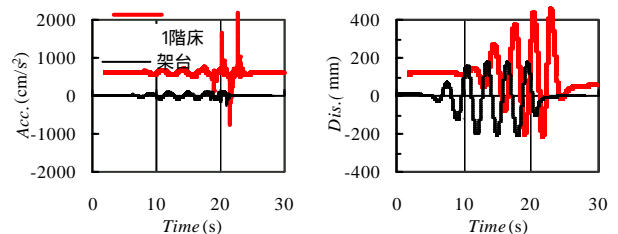
(b) ySa100

図 16 入力地震動別の各階床応答のフーリエスペクトル



(a) 3 秒調和正弦波 (±200mm) (b) ySa100 (140%)

図 17 ストッパー作動時の免震層荷重変形関係



(a) 加速度

(b) 変位

図 18 ストッパー作動時加速度変位の時刻歴波形

(3秒調和正弦波 ±200mm 加振時)

的な大きな応答加速度が生じている。又、変位挙動では免震層周期と入力波周期が近い為、徐々に共振的に増幅して作動変位に達している様子がわかる。

図 19 には地震動別の上部構造の変形、応答加速度及び床震度の最大値を示す。又、比較用として各図中にはストッパー作動していない入力レベルでの応答値を合わせて示す。さらに Kobe 波には免震層を固定ブロックにて緊結した非免震状態（耐震）での実験結果も示している。ここで、参考としてストッパーのないモデルによる免震層応答変位の解析値と実験での応答変位の差をストッパーによる「抑制変位」と定義し、作動速度と共に表 8 に示す（Kobe 波は衝突速度がほとんど 0 だった為除く）。抑制変位が 4cm 以上の調和正弦波では作動速度が 50cm/s を超えている。尚、解析値は 4 章に示すモデルにより解析したものである。

表 8 ストッパーによる抑制変位と作動速度

入力波	3秒調和正弦波		$y_s S_a 100$ EW
加振レベル	$\pm 185\text{mm}$	$\pm 200\text{mm}$	140%
免震層 (mm) *	346	341	324
	388	477	344
抑制変位(mm)	42	136	20
作動速度(cm/s) **	56	60	34

*上段：実験値、下段：解析値

**実験において 1 階床の応答加速度が 500cm/s^2 を超えた時の速度とした

図 19 から作動速度の速い調和正弦波加振による応答値の方がかなり大きかったことがわかる。家具も正弦波加振のストッパー作動時のみ転倒し、他の地震動では転倒に至っていない。ストッパーが作動した加振の後に目視による損傷確認を行ったが、1 階の一部でクロス切れ及び天井と内壁取合い部分に数ミリ幅のスリットが生じている程度で、修復の必要の無いレベルであることを確認した。これに対して耐震時は主要動当初から家具が転倒し、

層間変形角も 1/50 に達して内外装に部分的な割れを生じ、修復が必要であった。

次に実験経過に沿って一定の加振毎に上部架構の特性が、どのように推移したかを 1 階の最大層間変形と共に図 20 に示す。経験

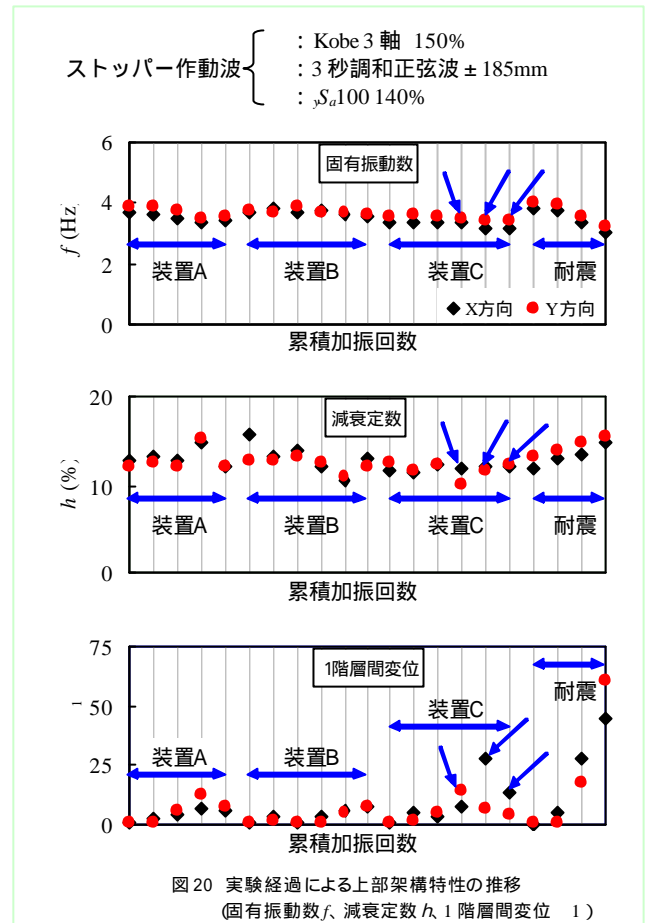


図 20 実験経過による上部架構特性の推移 (固有振動数 f 、減衰定数 h 、1 階層間変位)

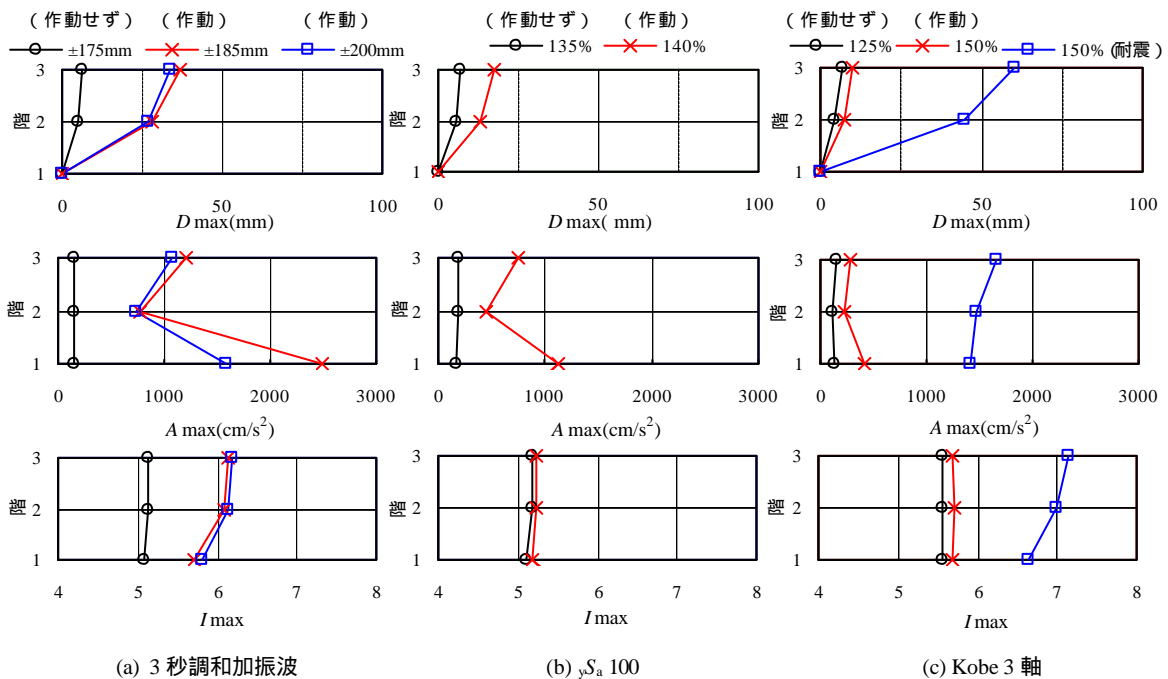


図 19 上部構造の最大応答値 (免震層からの相対変位 D_{max} 、応答加速度 A_{max} 、応答床震度 I_{max})

する変形（損傷）に伴い若干固有振動数は低下していくが、免震応答の間はストッパーが作動しても 3Hz は保持している。対して耐震用に固定装置を設置すると、耐力パネル、2 次部材の固定状態が変化し、振動数が若干上がるが、加振により上部架構の損傷が生じ振動数が大きく低下し、減衰定数も増加しているのが分かる。

以上の事象より想定外の地震動でも、ストッパーによる抑制変位が数 cm で作動速度が小さい場合は、損傷は軽微で済む事が分かった。

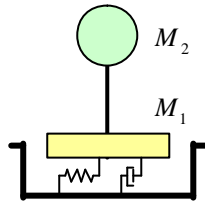
4. 応答解析による検証

4.1 解析モデル

本試験体の解析モデルとして、図 21 に示す上部架構（1 質点縮約）及び免震層の 2 質点並進モデルを想定する。上部架構は表 5 に示した地震動入力時における 1 次振動数及び等価減衰定数を有する線形モデルとし、設定した解析諸元を表 9 に示す。但し、通常の設計を想定して構造躯体のみの剛性と減衰定数（ $h=3\%$ ）を用いた場合も検討する。

表 9 解析諸元

層	M (t)	K (kN/cm)	h (%)
上部	20.89	72.73 (29.15)	17.87 (3.0)
免震	9.95		



上部架構質量：2 階床(12.95t) + R 階床(7.94t)
() 内数値は、通常の設計時に設定する値を示す。

図 21 振動モデル

入力波としては、1) Kobe_NS 波と 2) 告示波 $y_{S_{a100}}$ 加振波の鉄骨架台位置（免震装置直下）での計測加速度を用いた。又、長周期成分を含んだ地震動に対する補足検討用として告示波 $y_{S_{a100}}$ 目標波を用いた。尚、本検討では X 方向を検討対象とし、数値積分は Newmark- 法（ $\alpha=1/2$, $\beta=1/4$ ）を解析時間刻み 1/200s にて行っている。図 22 には各装置の免震層モデルを示す。装置 A、C の支承は完全剛塑性のモデルで、切片荷重は公称摩擦係数に上部構造体の全重量を乗じた値とした。装置 B のすり鉢転がり支承は、すり鉢勾配（公称値）による復元力に転がり摩擦係数（公称値）

を加えて（または減じて）支持重量を乗じた値を切片荷重とする履歴モデルとした。積層ゴム及び復元ゴムは線形モデルで剛性は公称値とした。積層ゴムでは 5% の減衰を考慮している。装置 A のダンパーは公称値を元に非線形速度依存モデルとしたが、実験後に同装置で行った単体試験結果を考慮して 1 基あたり 3.0kN の切片荷重を与えた（速度 30cm/s 以上では最大ばらつきとしている公称値 + 20% 相当となる）。装置 B のダンパーのモデルは装置改良中につき装置単体の静的加力の結果と本実験の静的加振及び動的加振（3 秒調正弦波）の結果を考慮して定めた。

4.2 解析結果

図 23 に実験値と解析値の加速度及び変位波形を比較（解析時刻 5 ~ 20s）して示す。装置 A、C では、加速度の反転時において変位に若干の誤差が生じるが、加速度・変位共によく対応している。但し装置 B では他の装置モデルと比較して誤差が大きく生じた。原因として、解析モデルにおいて転がり挙動時の接線剛性が無い事及びダンパーの速度依存性等を設定していない事等が考えられる。又、各装置共に短周期成分が卓越する Kobe_NS 波の方が $y_{S_{a100}}$ 波より加速度の誤差が大きく、上部架構などによる高振動数成分の影響が若干生じているようである。

図 24 に同じ振動モデルを用いて長周期成分に違いのある地震動（ $y_{S_{a100}}$ 目標波）を入力した時の解析結果を示す。長周期成分の影響により目標波では装置 B、C において大きな変位を生じる結果となった。但し、装置 A での変位は殆ど変わらなかった。同図より、他の装置と比較して装置 A は免震層の等価剛性が大きく長周期成分の入力の影響をあまり受けなかったものと思われる。

また、表 10 には Kobe_NS 波及び $y_{S_{a100}}$ 目標波を用い、上部架構の剛性及び減衰定数の値を通常の設計時に設定する値とした場合（設計値）と、本実験から求めた値（計測値）を用いた場合との差異を確認した。各装置共に短周期成分の卓越する Kobe_NS 波で上部架構を柔らかく評価する設計モデルの方が免震層変位を数% 小さめに評価することが分かった。逆に長周期成分の卓越する告示波では上部架構モデルの影響は殆どない。

そこで、上部架構の剛性が応答に与える影響を調べる為、上部架構の固有振動数を 5Hz から 1.5Hz の間で変化させた場合の装置別の応答比較を行った。尚、入力に Kobe_NS 波、各階の剛性バランスは構造躯体のみのものに合せている。図 25 に結果を示す。

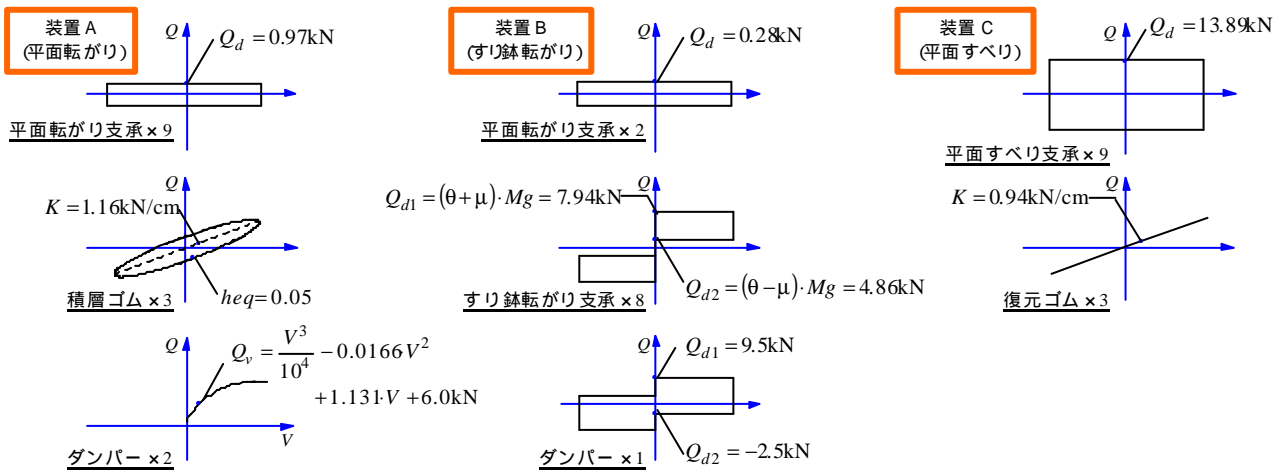


図 22 各装置の免震層モデル

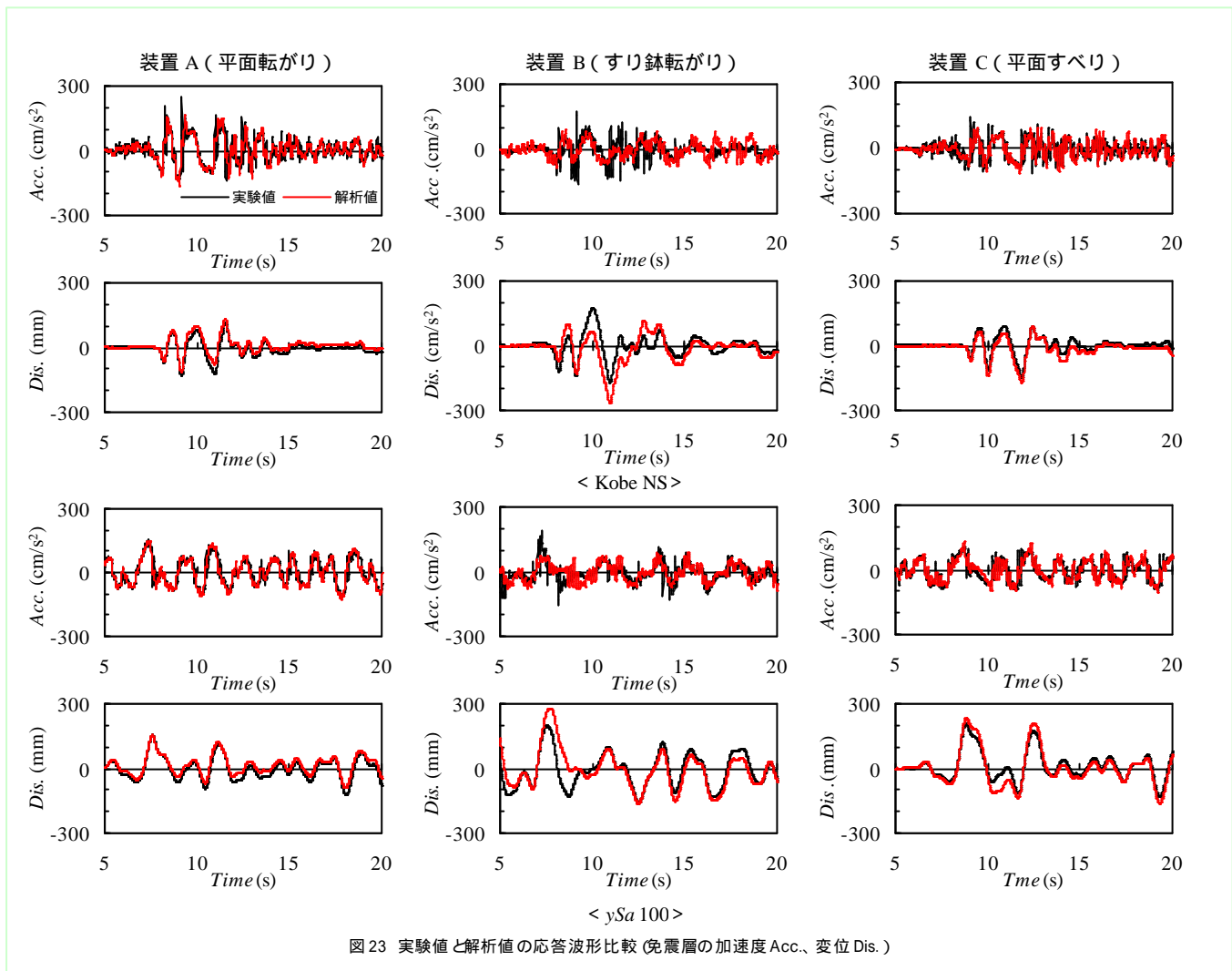


図23 実験値と解析値の応答波形比較 (免震層の加速度 Acc.、変位 Dis.)

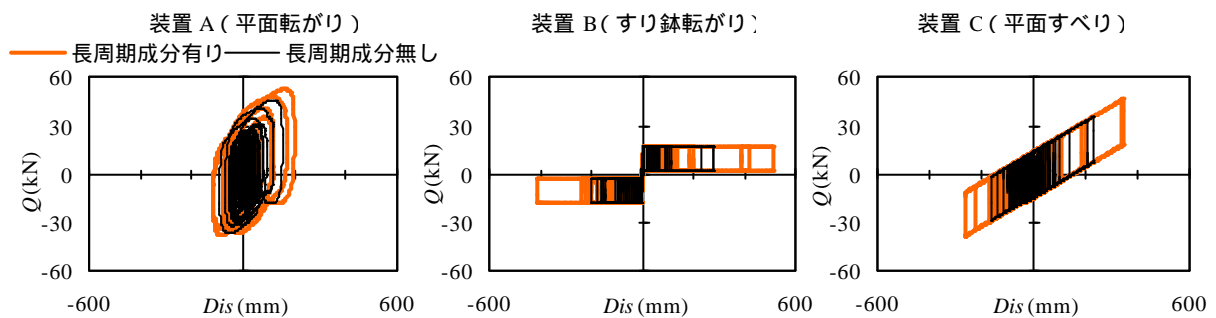


図24 長周期成分の有無による免震層応答解析値の違い ($y_{Sa}100$)

表10 上部架構諸元の違いによる免震層最大応答変位の比較

入力波	解析用の 上部架構諸元	免震層最大応答変位 (cm)		
		装置 A	装置 B	装置 C
Kobe_NS	設計値	13.06	25.97	16.34
	計測値	13.35	26.85	17.08
$y_{Sa}100$	設計値	19.92	50.51	34.55
	計測値	19.91	51.04	34.40

層変位は上部架構の剛性がほとんど影響しないが、装置 A の 1.5Hz 時のみ応答変位が小さくなった。装置 A は等価周期 3 秒以下で過減衰味の為、上部架構が柔らかい場合に高次モードを誘発しているようである。

装置組合せにもよるが、このように免震実効周期が 3 秒より短く解析時の上部架構振動数が 2Hz を下回る場合は、免震層変位を小さく見積もることがあり、実態として 2 次部材等により剛性が高い場合は、高い剛性での解析も併せて行うべきである。

上部架構が柔らかいと上部架構応答が大きくなる傾向を示すが、特に装置 A で 1.5Hz 時の変形角は 1/120 に達している。免震

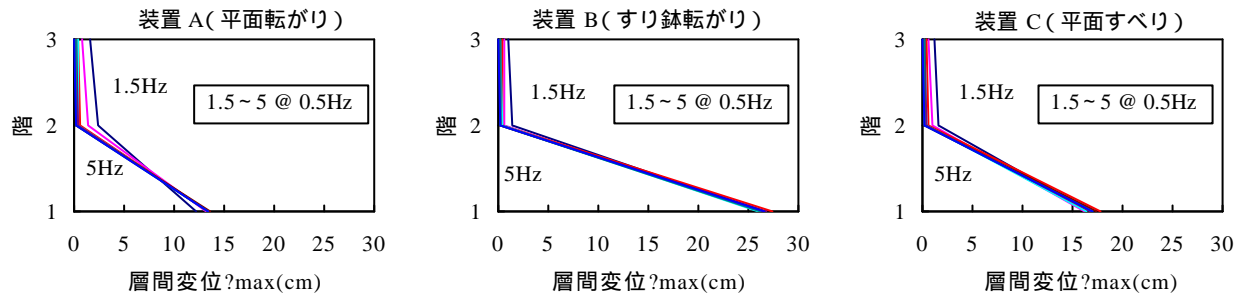


図 25 上部架構剛性の違いによる最大応答層間変位比較

5. まとめ

共通の上部構造を用いて、免震装置のみを交換して振動台実験を行う事で同一条件、同一入力波による3種類の免震装置の応答性状比較を行った。各装置とも今回行った入力地震波において応答加速度は入力加速度に対して十分低減することができ、上部構造における内外装材の損傷及び室内に配置した本棚の転倒も認められず、免震装置として要求される基本性能を確認することができた。表 11 は免震住宅に要求される性能について実験及び解析結果をもとにその評価を一覧表にまとめたものである。尚、表中、免震層変位と層せん断力係数についてはクライテリアとして免震層変位を 30cm、1 階の層せん断力係数を 0.2 としてその数値以下であるか否かを示している。以下に明らかになった評価を述べる。

- 1) 平面転がり装置 A: 建物規模に対して今回使用したダンパーの容量が大きく過減衰であった為、上部の応答加速度が大きくなる傾向になった。実地震動による応答ではその傾向が顕著であったが長周期地震動に対しては良好な結果が得られた。戸建て免震住宅用としてはより小型のダンパーがあれば設計の自由度が大きくなるものと思われる。
- 2) すり鉢転がり装置 B: 実地震動に対しては上部構造の応答が抑えられ良好な結果が得られた。入力レベルが大きい場合や長周期成分を多くもつ地震動の場合は免震層変位が装置の限界変位に達することがある為、ダンパーの能力を更に大きくするか装置の限界変位を大きくすることが必要である。

- 3) 平面すべり装置 C: 各地震波に対して上部構造の応答が抑えられ良好な結果が得られた。しかしながら、長周期成分が卓越する入力波に対して変形が大きくなる傾向にあった。こうしたすべり系の装置に対して長周期対応または変形を抑制する為に装置 A で用いたような粘性系減衰要素を付加することは有効であろう。
- 4) 上下動の影響: 上下動 1G 入力時には上部せん断力に影響が見られるが、免震としての性能はいずれの装置も十分に発揮されている。
- 5) 家具応答: 家具頂部にも計測器を設置しその応答性状より、転倒指標として床の応答加速度よりも応答震度が有効なことを確認した。又、免震周期が比較的短く上部応答の大きい装置 A が家具も揺れやすい傾向にあり、全体的には短周期パルス的な波のほうが揺れやすい傾向にあった。床応答にアスペクト比の大きい家具のロッキング振動数に近い成分を含む為であり、免震層周期をなるべく伸ばす対策が有効である。
- 6) 上部架構モデルの影響: Kobe のような短周期が卓越するような波については上部構造の振動特性を躯体のみの特性ではなく精度よく評価したほうが若干応答が大きくなる傾向にある。特に解析時上部架構振動数が 2Hz を下回る時は注意が必要である。これに対して長周期の波については影響がないことが確認された。
- 7) 残留変形: 今回のように静摩擦係数が大きくない装置で接線周期もそれ程長くしなければ、転がり支承のみならず、すべり支承でも大地震遭遇後に装置を原点復帰させる作業はあまり発生しない

表 11 免震装置の性能評価一覧表

		装置 A 過減衰設定 (平面転がり)	装置 B (すり鉢転がり)	装置 C (平面すべり)
実地震動	免震層変位	30cm 以下	30cm 以下	30cm 以下
	1 階せん断力係数	0.2 以下	0.2 以下	0.2 以下
想定外地震動 (実地震波の 1.5 倍)	免震層変位	30cm 以下	30cm 以上	30cm 以上
	1 階せん断力係数	0.2 以上	0.2 以下	0.2 以下
長周期地震動 (告示目標波 $y_{Sa}100$)	免震層変位	30cm 以下	30cm 以上	30cm 以上
	1 階せん断力係数	0.2 以下	0.2 以下	0.2 以下
上下動の影響 (Kobe3 軸上下動 0.3G)	免震層変位	影響なし	影響なし	影響なし
	1 階せん断力係数	影響なし	影響なし	影響なし
上下動の影響 (Tarzana3 軸上下動 1.0G)	免震層変位	影響なし	影響なし	影響なし
	1 階せん断力係数	影響なし	2 軸加振に対して増加	2 軸加振に対して増加
家具応答		転倒危険性有	転倒危険性無	転倒危険性無
残留変位		最大 14mm	原点に復帰	最大 12mm
施工性		ダンパーの設置精度が必要	ダンパーの設置精度が必要	装置の種類が少なく、軽量である為施工性は相対的に良

い。

8) 施工性：今回は実験の都合上、上部構造を変えないでジャッキアップをすることにより装置の変更を行った為、現場での実施工とは条件が異なるが、取り付け精度を要求されないもの、装置の種類が少ないもの、装置単体の重量の軽いものについては比較的容易に装置の変更ができた。戸建て住宅の場合は重要な要素であると考えられる。

9) ストッパー：ワイヤーロープ製のストッパーを用いて、数 cm の免震層の変位抑制を行った。衝突時には瞬間的に大きな加速度が発生するものの、上部構造躯体に著しい損傷は生じず、想定外の地震対策として有効と思われる。

尚、今回特に検証はしていないが、戸建て住宅の免震装置システムの性能として再現期間の短い風荷重に対し動かない(トリガー)機能を有する事、極めて稀な風荷重に対し、免震層の耐力で抵抗できる事が必要である。

上記に加えて、風荷重による応答時の居住性感覚面、免震装置の耐久性、維持管理面及び免震システム全体としてのコスト面等を追跡調査することで、特徴を生かした免震装置の選択、及び免震システムの設計を容易にし、性能を提示する免震設計に結びつけていきたい。

謝辞

本研究を実施するにあたり実験実施及び実験データ分析では、旭化成三輪正保氏、池口義治氏、日本システム設計飯田秀年氏、皆川隆之氏、並びに名古屋大学大学院生西畑尚氏に協力を頂きました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1)日本建築センター：ビルディングレター
- 2)坂本 功,花井 勉,他：木造免震住宅の実大振動実験 その1~9,日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.715~732, 1999.9
- 3)佐藤孝典,坂本 功,他：免震住宅と制震住宅の開発 その1~3,日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.715~720, 2001.9
- 4)飯場正紀,緑川光正,他：住宅用免震装置の3次元振動台実験(その1~6),日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.741~752, 1999.9
- 5)桐山伸一,中田信治,他：実大振動実験による戸建て免震住宅の装置別応答性状比較 その1~6,日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.583~593, 2003.9
- 6)技術評論社：Numerical Recipes in C, 1993.6
- 7)日本建築学会：建築物の減衰,丸善,2000.10
- 8)金子美香,林康裕：地震時の剛体の転倒限界と移動量に関する検討,日本建築学会構造工学論文集, Vol.1.43B, pp451~458, 1997.3
- 9)日本建築学会：非構造部材の耐震設計指針・同解説および耐震設計・施工要領, pp327~333, 1985.11
- 10)鳥野幸弘,浜口弘樹,他：建物内什器類の地震時挙動に関する実験的研究(その1,2),日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp133~136, 2000.9
- 11)損害保険料算定会：地震時の家財被害予測に関する研究,地震保険調査研究 46, pp61~93, 1998.10