戸建て住宅用免震部材の地震時応答性状に関する3次元振動台実験

SHAKING TABLE TESTS ON RESPONSE CHARACTERISTICS OF SEISMIC ISOLATION SYSTEMS FOR HOUSES SUBJECTED TO 3-DIMENSIONAL EARTHQUAKE MOTIONS

飯場正紀*, 緑川光正**

Masanori IIBA and Mitsumasa MIDORIKAWA

Lessons learned from the 1995 Hyogoken Nanbu earthquake and the excellent performance of seismically isolated structures during the earthquake have persuaded the application of seismic isolation systems to houses. Because of a light weight of houses sliding and rolling types of isolators have been developed. A purpose of this paper is to verify the behaviors of seismic isolation systems under 3-directional recorded earthquake ground motions. 3-dimensional shaking table tests on full-scale seismic isolation systems with different types of isolators were conducted. In this paper, the effects of earthquake motions with 2-horizontal and vertical components on the response characteristics of the seismic isolation systems are discussed.

Keywords : Seismic isolation, Shaking table test, 2-horizontal earthquake motions, Vertical earthquake motion, Response of isolation system

免震構造、振動台実験、2方向水平地震動、鉛直動、免震層応答

1. はじめに

1995年(平成7年)兵庫県南部地震では、発生時刻が午前6時前であったために、住宅の構造的な被害¹⁾あるいは家具等の家財の転倒・倒壊・破損²⁾による死傷者が多かったことが報告されている。また神戸市北区に建設されていた免震建築物の観測結果から免震建築物の上部構造の最大加速度が基礎のそれに比べて小さくなる結果や近傍の非免震建築物との比較から、免震効果が確認されている³⁾。

このような背景から、戸建て住宅の免震化に関する研究^{4),5)}とともに戸建て免震住宅の実用化を目指した現象解明がなされている⁶⁾。戸建て住宅の場合、重量が小さいことから、すべり系支承や転がり系支承の免震部材を利用する機会が多い^{6),8)}。水平1方向地震動による種々の住宅用免震部材あるいは戸建て免震住宅の振動台実験^{6),9),10)}から、いずれの免震部材でも、免震層上部での最大水平加速度応答値が、免震層下部でのそれに比べて低減する免震効果が報告されている。

実際の地震動に対応した、水平2次元や鉛直動も含めた3次元での免震部材の特性に関しては、一般の積層ゴム¹¹⁾や一部のすべり系支承⁶⁾に関する研究により、入力地震動の速度あるいは免震層の水平変位が水平面内で最大となる方向(主軸方向)での応答が支配的であることや鉛直動の影響は極めて小さいことが報告されている。

本論文では、機構の異なる免震部材の地震時挙動を統一的に把握することを目的として、建設省土木研究所(現在、独立行政法人土木研究所)の3次元大型振動台¹²⁾を利用し、免震試験体の3次元振動台

実験を行った^{13),14)}。水平1方向、2方向、さらに鉛直動を含めた3方向地震動における免震試験体の水平加速度応答や水平変位応答結果から、免震層の最大応答値や免震部材の力学特性に及ぼす地震動の影響について検討を加えた。

2. 免震試験体と免震部材

図1に示す免震試験体を作製し、振動台上に設置した。免震試験体は、免震部材とそれに支持される重量部で構成される。重量部の大きさは、長辺 5.64m、短辺 2.82m である。重量部はH形鋼(H-250x250x9x14)を主部材とし、H形鋼フレームの間には鉛を詰めた角型鋼管を配置している(H形鋼フレームも含めて質量約9.9ton)。その上部には、鋼板4枚(約6.0ton)を載せている。この重量部を長辺方向に3個ずつ設置した計6個の免震部材で支持している。

振動台実験に用いた免震部材の概要を図2に示す。図中に示した等価周期や等価粘性減衰定数の値は設計値である。これらの免震部材は、以下のような条件の下に設計されている。a)免震部材1台当りの長期鉛直支持荷重は20-30kNとする。b)1995年兵庫県南部地震における神戸海洋気象台の地震動記録NS成分を最大速度50cm/sとした地震動入力時の免震層の最大水平変位を10-15cmとする。

i)免震部材R(転がり支承)

ボールベアリングと高減衰積層ゴム(ゴム層は2層)を組み合わせで作られている。ボールベアリングは鉛直荷重支持機能を、高減衰積層ゴムは復元機能と減衰機能を有している。ベアリング部はリン

注) 本論文の一部は既に文献13)において発表されている。

* 国土交通省国土技術政策総合研究所
建築新技術研究官・博士(工学)

** 独立行政法人建築研究所 研究専門役・工博

Research Coordinator for Advanced Building Technology, National Institute for Land and Infrastructure Management, Dr. Eng.
Research Coordinator of Building Technology, Building Research Institute, Dr. Eng.

グ状の高減衰積層ゴムにより外気と遮断されている。

ii)免震部材S(すべり支承)

2面(2段式)のすべり面を有する免震部材であり、安定した鉛直支持能力とすべり特性を有する。比較的剛性の高い高減衰積層ゴムを取り付け、静摩擦から動摩擦への滑らかな移行を特徴とする。

iii)免震部材T(転がり支承)

ボールベアリングと高減衰積層ゴム(ゴム層は多層で、内側でつながっている)を組み合わせで作られている。ボールベアリングは鉛直荷重支持機能を、高減衰積層ゴムは復元機能と減衰機能を有している。ベアリング部はリング状の高減衰積層ゴムにより外気と遮断されている。

iv)免震部材U(すべり支承)

振り子運動の原理を応用した球面すべり支承(Friction Pendulum System、FPS)であり、上下2枚の部材(球面板)と可動子から構成されている。球面板の摺動面には特殊コーティングが施されており、低摩擦化を図っている。

v)免震部材W(ゴム弾性支承)

高減衰積層ゴムとオイルダンパーを併用した部材である。水平方向の剛性は鉛直方向の剛性の1/1000以下と非常に小さい。また座屈に対する安定性を向上させるために、座屈防止具を取付け、±250mmの水平変形に対して鉛直荷重が保持できる。

3. 振動台実験

3.1 計測

免震試験体における計測器の配置を、図1に示す。主な計測項目は、振動台と重量部の加速度、速度、免震層の水平、鉛直変位である。以下の測定器を使用した。

- a)加速度計：ひずみゲージ型加速度計
- b)速度計：サーボ型速度計
- c)変位計：非接触型変位計、リニア型パルスカウンthouse変位計、ポテンシオメータ型変位計

図1 免震試験体の概要

(←→は紙面平行方向を、・は紙面直交方向を示す)

3.2 加振

既往の観測地震動を振動台から入力した。採用した観測地震動は、1940 El Centro、1995 神戸海洋気象台の加速度記録である。地震動の大きさは、各地震動の3成分(NS、EW、UD)の内、最大速度となる成分の速度の最大値を25、50cm/sとなるように調整し、その係数をすべての成分の振幅に乗じている。ただし部材Tにおいては1940 El Centro地震動の最大速度を40cm/sとした。これは、1940 El Centro

表1 振動台からの入力地震動の各成分の最大速度例

地震動名	1940 El Centro			1995 神戸海洋気象台		
方向	X	Y	Z	X	Y	Z
最大速度	25	24.8	20.4	6.32	23.1	23.9
(cm/s)	50	49.1	39.7	12.2	44.6	48.3
					23.1	

表2 加振の次元とその記号

加振次元と記号	X方向 (EW成分)	Y方向 (NS成分)	Z方向 (UD成分)
1方向(X)	○		
1方向(Y)		○	
2方向(XY)	○	○	
2方向(YZ)		○	○
3方向(XYZ)	○	○	○

図2 実験に用いた免震部材

50cm/s の 2 方向入力の際、部材の変形が限界値に達したことから、最大速度を小さくして実験を行ったためである。地震動の各方向における最大速度の例を表 1 に示す。振動台の X、Y、Z 方向はそれぞれ地震動の EW、NS、UD 成分に対応する。

表 2 に、免震試験体に入力した地震動の成分の組み合わせを示す。基本的には、X または Y 各 1 方向加振(X 加振、Y 加振)、水平 2 方向加振(XY 加振)、3 方向加振(XYZ 加振)である。またいくつかの部材については、鉛直動の影響を確認するために、鉛直動のみ加速度振幅を 2 倍に増幅した 3 方向加振(XYZ2 加振)も行った。

3.3 データ処理

計測された加速度波形に関してはローパスフィルター処理を行った。加速度波形をフーリエ変換し、その振幅に振動数 15Hz から 20Hz にかけて線形に減少する関数(15Hz で 1.0、20Hz で 0.0)を乗じた後、逆フーリエ変換し、波形に戻している。速度、変位データに関しては、ローパスフィルター処理を行っていない。

4. 2 方向・3 方向加振による免震層のせん断力係数と水平変位の応答特性

水平 2 方向地震動および鉛直動の免震層の応答特性への影響を検討するために、1 方向(X または Y 加振)、2 方向加振および 3 方向加振における免震層の水平変位(振動台との相対変位)の軌跡およびせん断力係数—水平変位の関係を比較する。なお、免震層のせん断力係数は、免震試験体の中央に取り付けた水平加速度計の値を重力加速度で除して求めている。また、免震層の水平変位は、各方向で 2 カ所に取り付けた変位計の値の平均値である(図 1 参照)。

以下、部材 T、U および W における実験結果を示す。機構の特性が似ている部材が複数存在する場合には、免震部材の機構がより一般的と考えられる部材の結果を示すこととした。なお、部材 R と S の実験結果を付録に示す。

図 3 に、部材 T、U および W における免震層の水平変位の軌跡(1995 神戸海洋気象台 50cm/s 入力)を示す。図中、X+Y の凡例で示した結果は、X 加振による X 方向変位、Y 加振による Y 方向変位をそれぞれ X 座標、Y 座標の値として、同一平面に描いた結果である。XY 加振における軌跡と X 加振と Y 加振の結果を重ね合わせた軌跡を比較すると、軌跡性状に差が生じており、特に部材 U で差が大きい。XY 加振と XYZ 加振による水平変位の軌跡においては、部材 U でわずかに差が見られるものの、その差は小さく、鉛直動の免震層の水平変位に及ぼす影響は小さい。

図 4 に、1940 El Centro 50cm/s 入力に対する部材 U と W における免震層の水平変位の軌跡を示す。部材 W における加振次元数による差は小さいのに対し、部材 U では、XY 加振における軌跡は、X 加振と Y 加振の結果を重ね合わせた軌跡に比べて、水平変位が大きくなる結果が得られた。

図 3 部材 T、U および W における水平面内の免震層水平変位の軌跡 (1995 神戸海洋気象台 50cm/s)

図 4 部材 U と W における水平変位の軌跡(1940 El Centro 50cm/s)

図 5 に、部材 T、U および W における、Y 方向の免震層のせん断力係数—水平変位の関係を加振次元数別に比較した(1995 神戸海洋気象台 50cm/s 入力)。部材 T と W では、Y 加振と XY 加振における結果には顕著な差は見られないが、部材 U では、Y 方向の係数に直交方向の変位の影響が見られる。XYZ 加振の場合、免震層のせん断力係数に短周期成分の応答が含まれてくる。図 6 に、XYZ2 加振における Y 方向の免震層のせん断力係数—水平変位の関係を示す。免震層のせん断力係数に短周期成分の影響がより顕著に見られるが、層せん断力係数—水平変位の履歴特性は、Y 加振における関係(図 5 参照)から大きくは変化しない。

図 7 に、1940 El Centro 50cm/s 入力に対する、部材 U と W における X 方向の免震層のせん断力係数—水平変位の関係を加振次元数別に比較した。XY 加振の場合、部材 U の免震層のせん断力係数—水平変位の関係には、2 方向入力の影響が見られ、バイリニアの関係がやや崩れる特性を示す。1995 神戸海洋気象台入力(図 5)に比べて、1940 El Centro 入力における層せん断力係数には短周期成分が多く

見られる。これは第7章に示すように、免震層の水平加速度応答が鉛直動の影響を受けるためである。

5. 2方向加振による免震層の最大応答値

免震層の最大応答値に及ぼす水平2方向地震動および鉛直動の影響を検討するために、加振次元数の違いによる最大応答値を比較する。表3に示す応答値を比較の対象とする。

図8に、1995 神戸海洋気象台 25 または 50cm/s 入力における、1方向加振に対する2方向加振のXあるいはY方向の最大水平加速度の比($\alpha_{x,xy} / \alpha_{x,x}$, $\alpha_{y,xy} / \alpha_{y,y}$)および最大水平変位の比($\delta_{x,xy} / \delta_{x,x}$, $\delta_{y,xy} / \delta_{y,y}$)を示す。最大水平加速度の場合、比の値は0.8~1.12の範囲にある。最大変位の場合、0.85~1.43となる。部材R、TおよびWにおける最大変位の比は0.9~1.0の範囲にある。これは図5に示す免震層のせん断力係数—水平変位の関係において、1方向加振と2方向加振結果の差が小さいことに対応している。すべり支承(S、U)では、2方向加振における最大値の方が大きくなる場合が見られ、最大水平変位の比のばらつきが大きい。

1940 El Centro 入力における同様の結果を図9に示す。図8に示した結果と同様の傾向を示すものの、部材R、TおよびWでの最大水平変位の比は1.0~1.1程度となる。また、部材SとUでは、最大水平変位の比のばらつきが大きくなり、2方向加振の影響を大きく受ける結果が得られた。

上に示した水平変位の最大値は、各加振前の免震部材の位置からの水平変位の最大値(絶対値による算定)である。加振後の免震部材には残留変位が発生するため、本来加振後には免震部材の残留応力・残留変位を解除して、次の加振を行うことが望ましい。しかし、本実験では時間の制約から、免震部材の残留応力・残留変位を残したままの状態での次の加振を行ったため、免震部材に初期変位が存在

表3 最大水平応答値比較のための記号と定義

最大応答値の記号	説明
$\alpha_{x,x}$, $\alpha_{y,y}$ または $\delta_{x,x}$, $\delta_{y,y}$	XあるいはY加振における同方向の免震層の最大水平加速度または最大水平変位
$\alpha_{t,x+y}$ または $\delta_{t,x+y}$	X加振、Y加振における各時刻でのそれぞれの方向の水平加速度または水平変位の2乗和平方根の最大値。
$\alpha_{m,x+y}$ または $\delta_{m,x+y}$	X加振、Y加振におけるそれぞれの方向の免震層の最大水平加速度($\alpha_{x,x}$, $\alpha_{y,y}$)の2乗和平方根または最大水平変位($\delta_{x,x}$, $\delta_{y,y}$)の2乗和平方根値。
$\alpha_{x,xy}$, $\alpha_{y,xy}$ または $\delta_{x,xy}$, $\delta_{y,xy}$	XY加振におけるX方向、Y方向の免震層の最大水平加速度または最大水平変位。
$\alpha_{t,xy}$ または $\delta_{t,xy}$	XY加振におけるX方向、Y方向の各時刻での免震層の水平加速度または水平変位の2乗和平方根の最大値。
$\alpha_{t,xyz}$ または $\delta_{t,xyz}$	XYZ加振におけるX方向、Y方向の各時刻での免震層の水平加速度または水平変位の2乗和平方根の最大値。

図5 地震動の加振次元数の違いによるY方向の免震層のせん断力係数—水平変位の関係 (1995 神戸海洋気象台 50 cm/s)

図6 鉛直動のみ振幅を2倍にした場合のY方向の免震層のせん断力係数—水平変位の関係 (1995 神戸海洋気象台 50 cm/s)

図7 X方向の免震層のせん断力係数—水平変位の関係 (1940 El Centro 50 cm/s)

図 8 各方向の免震層の最大水平加速度、最大水平変位における 1 方向加振結果に対する 2 方向加振結果の比(1995 神戸海洋気象台)

図 9 各方向の免震層の最大水平加速度、最大水平変位における 1 方向加振結果に対する 2 方向加振結果の比(1940 El Centro)

図 10 Y 方向の免震層の水平変位の推移(1940 El Centro 50cm/s)

する条件となっている。図 10 には、1940 El Centro 50 cm/s 入力における、Y 方向の免震層の水平変位の加振前、最大(正側)、最小、加振後の値を加振の時系列で示した。部材 T には、ほとんど残留変位が発生していない。また部材 W では、15mm 程度の残留変位が発生するが、次の加振までに残留変位が非常に小さくなる。一方部材 U の場合、10mm を越える残留変位が発生するが、同一の振幅の地震動を繰り返すと加振前後での水平変位がほぼ等しくなる。部材 S の場合、免震部材の 2 次剛性が非常に小さいため、残留変位の最大値は 25mm 程度となった。

免震部材の残留変位の影響を除くために、Y 方向の免震層の水平変位の両振幅での最大値(最大値(正側)と最小値の差)を算定し、1 方向加振に対する 2 方向加振の最大水平変位の比を図 11 に示す。1995

図 11 両振幅最大水平変位における 1 方向加振結果に対する 2 方向加振結果の比

神戸海洋気象台入力の場合、図 8 に示す値に比べて、部材 U でばらつきが小さくなる。一方 1940 El Centro 入力の場合、比の値のばらつきはやや小さくなるものの、2 方向加振における最大水平変位の方が大きくなる性状は変わらないことが明らかとなった。以下の検討では、加振前の免震部材の位置からの相対変位を免震層の水

図 12 免震層の最大水平加速度、最大水平変位の 1 方向加振合成最大値に対する 2 方向加振合成最大値の比

平変位とし、その最大値を用いて検討することとする。

図 12 に、X または Y 加振における応答の各時刻における 2 乗平方根の最大値(1 方向加振の合成最大値)に対する 2 方向加振における X と Y 方向の 2 乗平方根の最大値(2 方向加振の合成最大値)の比($\alpha_{txy}/\alpha_{t,x+y}$, $\delta_{txy}/\delta_{t,x+y}$)を示す。1940 El Centro 地震動において、最大水平加速度の比が大きくなるが、比の値はほぼ 1.0 以下の値である。1 方向加振の合成最大値は、2 方向加振の合成最大値のほぼ上限の値を与えることがわかる。一方最大水平変位においては、転がり支承やゴム弾性支承の場合、1995 神戸海洋気象台地震動で 0.9~1.0、1940 El Centro 地震動で 1.05~1.1 と比較的一定の値を示す。一方、すべり支承では 1 を大きく上回る場合が多く、2 方向加振の合成最大値を 1 方向加振の合成最大値で算定すると過小評価となる。

図 13 に、X または Y 加振における各方向の水平変位の最大値の 2 乗平方根(各方向の最大値の合成値)に対する 2 方向加振の合成最大値の比($\delta_{txy}/\delta_{m,x+y}$)を示す。すべり支承の一部の結果を除いて、2 方向加振の合成最大値を各方向の最大値の合成値を用いることにより、免震層の最大水平変位を安全側に算定することができる。

6. すべり支承の 2 方向加振時の免震層水平変位応答値の評価

すべり支承において、1 方向加振に対する 2 方向加振結果の最大水平変位の比が大きくなる原因について検討する。1940 El Centro 50cm/s 入力における、部材 U と W の水平変位の軌跡(最大応答が生じる時刻付近の結果)を図 14 に示す。部材 U の場合、1 方向加振の重ね合わせによる水平変位より、2 方向加振の水平変位が大きくなる。特に X、Y 方向に同程度の水平変位が同時に発生する場合に、水平変位の変化量が増大する。このような変位軌跡を生じると、X、

図 13 免震層の最大水平変位の 1 方向加振における最大値合成値に対する 2 方向加振における合成最大値の比較

Y 各方向の水平変位の 2 乗平方根では 2 方向加振の水平変位を過小に評価することになる。一方、部材 W の場合は 2 方向加振の水平変位が大きくなるが、その程度は小さい。部材 U の場合、図 5 に示す層せん断力係数-水平変位の特性が加振次元に関係なく安定しており、2 方向の降伏耐力の相関関係が円形であるためと考えられる。部材 T と W の場合、免震層の応答速度が大きくなると、層せん断力係数が大きくなる特性を示すことから、2 方向の降伏耐力の相関関係が少なくなるため、1 方向と 2 方向加振の差が部材 U ほど大きくなかったと考えられる。

次に、2 方向地震動における水平変位応答を主軸方向の地震動を用いた応答解析により検討する。ここでは、主軸方向を XY 平面で免震層の水平変位が最大となる方向とする¹¹⁾。図 15 のように、部材 U の履歴特性をバイリニアにモデル化する。降伏層せん断力係数や 2 次剛性は、1995 神戸海洋気象台 50cm/s の Y 加振時の実験結果から求めた。

表 4 に、1995 神戸海洋気象台および 1940 El Centro 50cm/s 入力における 2 方向加振時の免震層の最大水平変位を示す。地震応答解析の場合、X、Y 方向および主軸方向の地震動に対する結果を示す。

図 14 部材 U と W における免震層水平変位の軌跡(最大水平変位発生時刻付近、1940 El Centro 50cm/s)

図 15 部材 U の層せん断力係数-水平変位の解析モデル

主軸の X 軸に対する角度は、1995 神戸海洋気象台および 1940 El Centro 地震動で、それぞれ 45.6、39.2 度である。また図 16 に、1940 El Centro 入力時の免震層の主軸方向のせん断力係数—水平変位の関係を示す。主軸方向の地震動を用いた解析結果は実験結果と良い対応を示し、バイリニア特性を有するすべり支承の 2 方向地震動における水平変位の算定には、主軸方向での応答計算が非常に良い精度の結果を与えることが確認できた。

図 12 において、1 方向加振の重ね合わせの最大水平変位と 2 方向加振の最大値を比較すると、一部の結果を除いて、1995 神戸海洋気象台入力ではほぼ等しく、1940 El Centro 入力では 2 方向加振の結果が大きくなる。この理由として最大水平変位の発生する水平面での位置が関係していると考えられる。X と Y 方向に、同程度の水平変位が同時に生じる場合、1 方向加振に比べて水平変位が大きくなり、1940 El Centro 入力における最大水平変位発生時の主軸方向はほぼ 45 度方向となり(図 4 参照)、特にすべり支承にその影響が大きく見られた。一方、1995 神戸海洋気象台入力の場合、最大水平変位の発生時の主軸方向は Y 軸に近いので、1 方向と 2 方向加振の差が小さかったと考えられる(図 3 参照)。

7. 免震層応答への鉛直動の影響

7.1 免震試験体の鉛直方向の応答特性

まず 3 方向加振(最大速度 50cm/s)における免震試験体の鉛直方向の特性について示す。図 17 に、各地震動の鉛直成分のフーリエスペクトルを示す。フーリエスペクトルには、5 回のハニングウィンドウ処理を行った。1995 神戸海洋気象台の場合、低振動数域の成分が多いのに対し、1940 El Centro では、8~13Hz の成分が多い。両地震とも 13Hz より高振動数域での成分は少なくなる。

表 5 に、3 方向加振における各免震部材の振動台の最大鉛直加速度に対する免震層の最大鉛直加速度の増幅率を示す。免震層の鉛直加速度は、免震試験体の周辺の 4 カ所の加速度計の平均値である。1995 神戸海洋気象台入力の場合、増幅率は比較的小さいのに対し、

表 4 免震層水平変位の地震応答解析結果

方向	水平変位(mm)			
	1995神戸海洋気象台 50cm/s		1940 El Centro 50cm/s	
	実験	解析	実験	解析
X方向	89.7	89.9	103.4	53.8
Y方向	89.9	90.6	105.2	104.4
XとYの2乗和平方根	125.4	129.4	130.1	114.1
主軸方向入力		135.1		134.4

注) XまたはY方向における実験値は2方向加振の各方向の最大応答変位
解析値は1方向の地震動に対する最大応答変位

図 16 免震層のせん断力係数—水平変位の関係(主軸方向)

1940 El Centro 入力では、1.2~2.9 倍の値を示す。特に、部材 T と W の増幅率が高い。部材 T、U および W における振動台の鉛直加速度に対する免震層の鉛直加速度のフーリエスペクトル比(ハニングウィンドウ 5 回)を、図 18 に示す。免震試験体の鉛直方向の共振振動数は、部材 T と W で 11~12Hz、部材 U で約 15Hz である。1940 El Centro 入力で、部材 T と W の増幅率が大きくなった理由として、免震層の鉛直方向の共振現象が関係している。

7.2 鉛直動の免震層水平方向応答への影響

3 方向加振(最大速度 50cm/s)における、鉛直動の免震層の水平加速度と水平変位への影響について述べる。

図 19 に、2 方向加振における合成最大値に対する 3 方向加振(XYZ または XYZ2)における合成最大値の比を示す。最大水平加速度の場合、比は 0.9~1.17 となり、鉛直動により比が増大するケースが多い。一方、最大水平変位の比はほぼ 0.87-1.01 の範囲にあり、鉛直動が加わった場合の免震層の水平変位の最大値は、鉛直動がない場合に比べて等しいか、むしろ小さくなる結果が得られた。

図 20 に、1940 El Centro 50cm/s 入力における、2 方向加振に対する 3 方向加振の免震層の水平加速度(Y 方向)のフーリエスペクトル比(ハニングウィンドウ 10 回)を示す。部材 U では、振動数とともに、スペクトル比が小さくなる傾向を示し、免震層の水平加速度には、鉛直動の影響が見られない。一方、部材 W の場合、11Hz 付近を中心に比が大きくなる振動数域を有し、鉛直動が水平動の振動数特性

表 5 最大鉛直加速度の増幅率

	1995神戸海洋気象台	1940 El Centro
部材R(転がり支承)	1.01	1.18
部材S(すべり支承)	1.05	1.41
部材T(転がり支承)	1.07	2.90
部材U(すべり支承)	1.09	1.20
部材W(ゴム弾性支承)	1.13	1.67
平均	1.07	1.67

図 17 地震動の鉛直成分のフーリエスペクトル

図 18 地震動の鉛直加速度応答のフーリエスペクトル比
(1940 El Centro 50cm/s)

図 19 免震層の最大水平加速度、最大水平変位の 2 方向加振合成最大値に対する 3 方向加振合成最大値の比

に影響している。図 21 に、1940 El Centro 50cm/s 入力における、部材 U の免震層の水平加速度と鉛直加速度の時刻歴を示す。2 方向加振と 3 方向加振の免震層の水平加速度を上図に、その差(鉛直動により付加される水平加速度と考えられる)と免震層の鉛直加速度を下図に描いた。免震層の水平加速度の差と鉛直加速度が良く対応している時刻部分を○印で囲んだ。水平加速度の変化が少ない時間帯には、鉛直加速度の影響が顕著に見られる。この原因として、鉛直動によるすべり支承の面圧の変動に伴うすべり摩擦力の变化が生じていることが考えられる。図 22 には、同様に部材 W の結果を示す。部材 W の場合には、免震層の水平加速度の差が鉛直加速度と良い対応を示しており、免震層の水平加速度には、鉛直動の影響が含まれていることがわかる。その結果、部材 U と W とともに、鉛直動により免震層の水平加速度が増加する。しかし、その増加分の大きさは免震層の最大水平加速度に比べてわずかであること、また水平加速度の成分が高振動数であることから、鉛直動が免震層の水平変位に及ぼす影響は小さいと判断される。

8. まとめ

機構の異なる免震部材を用いた免震試験体の 3 次元振動台実験を行い、水平 1 方向、水平 2 方向、さらに鉛直動を含めた 3 方向地震動に対する免震試験体の水平加速度や水平変位応答を求めた。免震層の最大応答値や免震部材の力学特性に及ぼす水平 2 方向地震動および鉛直動の影響についてまとめると以下のようになる。

1) 水平 2 方向地震動の免震層水平方向応答への影響

2 方向加振の場合、各方向の層せん断力係数-水平変位の関係は、その直交方向の水平応答の影響を受けて、1 方向加振の層せん断力係数-水平変位の関係と差を生じる。その際、転がり支承やゴム弾性支承では直交方向の影響は小さいのに対し、すべり支承では直交方向の影響が大きい。1 方向加振結果を水平面に重ね合わせて求めた免震層の水平応答と 2 方向加振における水平応答を比較すると、以下のことが明らかになった。

a) 2 方向加振における水平面内での最大水平加速度(X と Y 方向の各

図 20 2 方向に対する 3 方向加振の免震層水平加速度応答のフーリエスペクトル比

図 21 部材 U における免震層の水平加速度と鉛直加速度(1940 El Centro 50cm/s)

図 22 部材 W における免震層の水平加速度と鉛直加速度(1940 El Centro 50cm/s)

時刻での応答値の 2 乗和平方根の最大値)は、1 方向加振の重ね合わせた最大水平加速度と比べて同程度かやや小さくなる場合が多く、1 方向加振における最大加速度は、2 方向加振における最大値の上限を与える。

b) 2方向加振における免震層の水平面の最大水平変位と1方向加振の重ね合わせた最大水平変位を比較すると、1995 神戸海洋気象台地震動では、両者がほぼ等しい。一方、1940 El Centro 地震動では、2方向加振における最大水平変位の方がやや大きい結果が得られた。

1方向加振における各方向の最大値の2乗和平方根から求めた水平変位を用いると、2方向加振における免震層の最大水平変位より大きくなる場合が多く、免震層の最大水平変位を安全側に評価できる。ただし、すべり支承では、水平2方向の降伏耐力の相関関係が強いいため、この関係が成り立たない場合がある。

c) 1940 El Centro 地震動で、2方向加振における免震層の最大水平変位の方が大きくなる理由として、水平変位応答の主軸方向(最大水平変位を発生する方向の軸)が関係していると考えられる。1940 El Centro 地震動における最大水平変位発生時の主軸方向はほぼ 45 度方向であり、X と Y 方向に同程度の水平変位が同時に生じる場合に水平変位が大きくなる。

d) すべり支承の場合、加振次元に関係なく、免震層のせん断力係数-水平変位の関係が安定しており、水平2方向の降伏耐力の相関関係が円形であるため、2方向加振の免震層の水平変位応答に及ぼす影響は大きいと考えられる。主軸方向に変換した地震動を用いた、すべり支承(部材 U)の地震応答解析の結果、主軸方向の応答計算結果と実験結果が良く対応し、主軸方向で検討することにより、2方向加振の最大水平変位が評価できることを確認した。

2) 免震層応答への鉛直動の影響

a) 1995 神戸海洋気象台の鉛直動には低振動数域の成分が多いのに対し、1940 El Centro 地震動では、8~13Hzの成分が多い。転がり支承(部材 T)とゴム弾性支承(部材 W)を有する免震層の鉛直方向の共振振動数は11~12Hz、すべり支承(部材 U)のそれは約 15Hz である。1940 El Centro 地震動で、転がり支承とゴム弾性支承における免震層の鉛直加速度が大きくなる。その理由は鉛直動の振動数成分と免震層の共振現象である。

b) 2方向加振における免震層の水平加速度の最大値に対し、3方向加振では最大水平加速度が最大 18%程度増加する。一方、免震層の最大水平変位の増加は見られなかった。これは免震層の水平加速度は鉛直動の影響を受けるためであり、鉛直動が作用すると、免震層の水平加速度が若干増加する。しかし、その増加分の大きさは免震層の最大水平加速度に比べてわずかであること、またその増加分の成分は高振動数であることから、鉛直動が免震層の水平変位に及ぼす影響は小さいと判断される。

謝辞

本研究は、建設省建築研究所(現、独立行政法人建築研究所)と(社)建築研究振興協会との共同研究「住宅用免震技術の開発(免震住宅研究委員会)(委員長: 山口昭一博士・(株)東京建築研究所長)」において実施されたものである。関係各位に感謝いたします。また、3次元振動台の使用においてご協力頂きました田村敬一上席研究員(独立行政法人土木研究所)、東拓生専門員(国土交通省関東地方整備局常総国道事務所)、実験データの収録・整理に際してご協力頂きましたDr. Bujar Myslimaj (McMaster University, Ontario, Canada)に感謝致します。

参考文献

- 1) 阪神・淡路大震災災害調査報告編集委員会: 阪神・淡路大震災災害調査報告 共通編-I 総集編, 日本建築学会, pp.59-62, 2000.3
- 2) 日本建築学会建築計画委員会兵庫県南部地震調査研究部会建築内部空間における WG: 阪神大震災住宅内部被害調査報告書,

1996.9

- 3) 日本建築センター: 免震構造建築物-その技術開発と地震観測結果 PART 2-, 1995.6
- 4) 飯場正紀、山内泰之、緑川光正他: 住宅の免震化に関する研究(その1) 住宅の免震化における検討項目、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造 II、pp.687-688、1997.9
- 5) Masanori Iiba, Hiroyuki Yamanouchi, Mitsumasa Midorikawa, et al.: Research on Performance of Base Isolated House, Proceedings of the Second World Conference on Structural Control (2WCSC), Kyoto, Japan, pp.1119-1126, 1998.6
- 6) 平野茂、三宅辰哉、深堀美英他: 実大振動実験に基づく木造免震住宅の地震応答評価手法に関する研究、その1 実験結果ならびに1質点振動モデルを用いた解析的考察、日本建築学会構造系論文集、No.529、pp.65-72、2000.3
- 7) 古橋剛: シリーズ免震関連部材-⑥ 戸建住宅用免震装置-2、mensin、(社)日本免震構造協会、No.29、pp.23-30、2000.8
- 8) 三浦義勝、箭野憲一: シリーズ免震関連部材-⑦ 戸建住宅用免震装置-3、mensin、(社)日本免震構造協会、No.30、pp.24-29、2000.11
- 9) 福田一郎、飯場正紀、緑川光正他: 住宅の免震化に関する研究(その2) 免震住宅モデルの振動台実験、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造 II、pp.689-690、1997.9
- 10) 飯場正紀、緑川光正他: 戸建住宅用免震装置の振動台実験、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造 B-II、pp.661-662、1998.9
- 11) 日本建築学会: 免震構造設計指針、pp.102-104、pp.330-336、2001.9
- 12) 建設省(現独立行政法人)土木研究所: 「3次元大型振動台」パンフレット
- 13) 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)(その2)、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造 B-II、pp.741-744、751-752、1999.9
- 14) Bujar Myslimaj, Mitsumasa Midorikawa, Masanori Iiba, et al.: Seismic behavior of a newly developed base isolation system for houses, Journal of Asian Architecture and Building Engineering, Vol.1, No.2, pp.17-24, 2002.11

付録

付図1に、免震部材 R(転がり支承)および S(すべり支承)における免震層のせん断力係数-水平変位の関係を示す。

付図1 地震動の加振次元の違いによる Y 方向の免震層のせん断力係数-水平変位の関係(1995 神戸海洋気象台 50 cm/s)

(2003年7月9日原稿受理、2004年1月9日採用決定)