住宅用免震部材の地震応答振動
台実験SHAKING TABLE TESTS ON SEISMIC
RESPONSE OF ISOLATORS FOR
HOUSES

緑川光正 — *1 飯場正紀 — *2

キーワード：
振動台実験, 地震応答, 地震時性能, 免震部材, 住宅Keywords:
Shaking table test, Seismic response, Seismic performance, Seismic
isolator, House

Mitsumasa MIDORIKAWA — *1 Masanori IIBA — *2

The high performance of seismically isolated structures during the 1995 Kobe earthquake revealed that seismic isolation systems are very effective on keeping the safety and functions of buildings during major earthquakes. In case of houses, it is generally difficult to elongate the period of the system to the sufficiently effective period by ordinary laminated rubber bearing isolators because of their light weight. In addition to rubber bearings, development and application of sliding and rolling isolators are needed for houses. In this paper, the mechanical characteristics of various kinds of seismic isolators newly developed and the effects on the response of seismically isolated houses are discussed by the shaking table tests of seismically isolated house models. The seismic performance and the validity of seismically isolated houses during strong earthquakes are demonstrated. It is shown that the seismic response of seismically isolated houses is definitely dependent on the mechanical characteristics of isolators, and that rubber, sliding and rolling isolators have their own distinctive features in the seismic response.

1. はじめに

1995年(平成7年)兵庫県南部地震における被害状況は、死者6,432人、行方不明者3人、負傷者43,792人、住家被害512,880棟(全壊10,496棟、半壊144,272棟、一部破損263,072棟)、公共建物865棟、その他建物3,983棟など(2000年1月11日現在、消防庁調べ)であり、死傷者は5万人以上にも達した。特に、この地震では、発生時刻が午前6時前であったために、自宅の被害による死傷者が多かった。調査報告¹⁾によると、死因別死亡数のうち、窒息・圧死による死亡数は77%だったことが報告されている。また、倒壊を免れた住宅においても、家具等の家財の転倒・倒壊・破損による死傷者も多く²⁾、恐怖心からの心の悩みに苦しむ等の精神的な被害³⁾も報告されている。

戸別訪問による調査分析結果から、一般住宅内部の被害状況は以下のように報告されている²⁾。

1)各部屋の散乱状況 独立住宅における部屋毎の家具什器、設備機器等の散乱状況の結果から、玄関、洗面・浴室、便所での散乱は、比較的少なく、主寝室、子供室、居間及び台所では、平均して40%以上の住戸に半分散乱状態が見られ、家具の転倒状況は子供室、主寝室でひどい状況が窺える。

2)人的被害への影響 怪我の発生時期は、揺れの最中や直後が多い。また怪我の原因は、家具等の転倒・落下、ガラスによるものがほとんどである。

以上の被害状況から、地震時の住宅内における人的被害の軽減には、建物床の加速度・速度応答を低減することが最も効果的な手段であると考えられる。従って、地震時の住宅被害ばかりでなく住宅内部の人的被害を軽減するためには、「上部構造への地震入力の低減」、「床応答加速度の低減」、「上部構造層間変位の低減」という特

徴を持つ免震構造^{4), 5)}を住宅に採用することが有効である。しかしながら、現状では、中低層鉄筋コンクリート造の免震建物は数多く建設されているものの、戸建て免震住宅は未だ一般に普及する段階には至っていない⁶⁾。

このような状況の下、地震時における安全性確保、心理的不安解消のために有効な手段と考えられる戸建て免震住宅の促進を意図して、免震住宅の要求性能、性能評価、それに対応した設計クライテリアなどに係わる研究^{7), 8)}が行われた。戸建て免震住宅と一般の鉄筋コンクリート造免震建物との主な相違点は、1)建物質量が小さいこと、2)強風や日常の居住性への配慮が必要なこと、3)1階床や基礎の補強が必要なこと、などが挙げられる⁹⁾。これらは同時に主要な検討課題でもあり、特に、建物質量が小さいことに起因して、一般に用いられる免震積層ゴムでは必要な免震周期を得られない場合が多く、すべり系や転がり系の免震部材(免震装置)を用いる必要が生じる。

本論文では、主として戸建て住宅のために開発された数種類の免震部材を用いて、免震及び非免震住宅試験体の振動台実験を行い、免震住宅の振動特性、地震動応答を求め、住宅における免震効果に関する基本性状及び免震部材の力学特性を検討する。さらに、免震部材の減衰特性などについて考察する。

2. 小規模住宅に用いる免震部材

中低層建物に比べて質量の小さい一般の小規模住宅では、中低層免震建物と同程度の免震周期を確保するためには、上部構造の比較的小さな質量に対応した水平剛性を持つ免震部材を用いる必要がある。例えば、積層ゴム支承を採用する場合、住宅の質量が中低層建物の1/10とすると、積層ゴムの断面積は1/10になり、積層ゴムの直径

本論文の一部は既に文献12), 13)に発表した。

*1 独立行政法人建築研究所 研究専門役・工博
(〒305-0802 茨城県つくば市立原1)

*2 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)

*1 Research Coordinator of Building Technology, Building Research Institute, Dr. Eng.

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

比は1/3.16となる。直径の積層ゴム高さに対する比が小さくなると、積層ゴムが水平方向に大きく変形した時、積層ゴムが座屈し、上部構造の重量を支持できなくなる。従って、積層ゴムを住宅に使用する場合には、座屈の発生を防止することが必要であり、1段毎に直径の小さな積層ゴムを複数設置した多段積層ゴムや、中空積層ゴムなどが開発されている⁷⁾。

さらに、積層ゴムのような弾性体による支承の他に、図1に示すように、転がり機構やすべり機構を用いる支承があり、座屈が発生しにくいこと、力学特性が上部構造の質量に依存しにくい等の特徴がある。これらの支承の特徴は以下のとおりである⁸⁾。

(1) 転がり支承

機械分野で利用されているベアリング等を利用した支承であり、転がり摩擦が非常に小さい。ベアリングを使用するため、転がりの摩擦係数が1/100以下となり、非常に小さい水平力で移動を開始する。さらに、復元機能を持たせるために、転がり面の勾配を利用した支承、積層ゴムと併用する場合等がある。転がり支承のみで十分な減衰性能を確保できない場合にはダンパーと併用される。実用化されている例として、リニアベアリングを用いた支承などがある¹⁰⁾。

(2) すべり支承

接触面の摩擦を利用した支承であり、減衰機能として水平方向の摩擦抵抗力を利用する。すべり発生後も復元機能（水平変形に対してせん断力が増加する特性）を持たせるために、すべり面に曲率を設けた支承、積層ゴムとの併用などが検討されている^{8), 11)}。

3. 実験内容

実験には、建設省建築研究所（当時、現在は独立行政法人建築研究所）強度実験棟の中型振動台（加振方向水平1軸；最大変位、最大速度、最大加速度は各々15cm、100cm/s、2g；振動台寸法3x4m；最大積載質量20t）を使用した。

免震住宅試験体及び計測器の配置を図2に示す。上部構造は、木造2階建て（枠組壁工法）で、平面寸法は2.73x2.73m、各階高さは2.7mである。加振方向の壁には、幅600mm、厚さ12mmの構造用合板を取り付けた。免震部材は、上部構造と振動台の間の四隅に計4個配置し、上下のH形鋼フレームに固定した。なお、1階の質量は1.37tであり、一部の免震部材（図3のRL1, RL2）を除き、上部構造1階床下に付加質量（7.34t）を載せた。付加質量を設置した主な理由は、積層ゴム支承を用いた試験体の免震周期を延ばすためである。

免震部材としては、ゴム弾性系（3種類）、すべり系（2種類）、転がり系（2種類）の計7種類の支承の実験を行った⁷⁾が、本論文では、この内の6種類を取り上げる。図3に6種類の免震部材と主な仕様を示す。部材RB1, RB2, RB3がゴム弾性系（積層ゴム支承）、部材SL1がすべり系（すべり支承）、部材RL1, RL2が転がり系（転がり支承）である。各免震部材の支承と減衰機構の特徴を表1に示す。RL1以外は、支承自身が減衰機能を兼ね備えている。

これらの免震部材は、以下のような基準の下に設計されている。すなわち、1)免震部材1台当りの鉛直支持荷重は20-30kNとする、

図1 転がり支承すべり支承の機構⁸⁾

図2 免震住宅試験体と計測器配置

2)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最大応答変位を10-15cmとする。

振動台と上部構造との相対変位を計測するために、図2に示すように、変位計測用フレームを設置した。なお、変位計測用フレームの固有振動数は約8Hzであり、免震住宅試験体の振動特性には影響を及ぼさないことを確認した。

試験体の基本的な動特性を把握するために、ホワイトノイズのランダム波加振（0.5-30Hz、20-30cm/s²程度）を行った。地震時挙動を把握するための地震動加振では、4種類の地震動（1995 JMA Kobe NS、1940 El Centro NS、1952 Taft EW、1968 Hachinohe NS）を用い、目標

図3 免震部材

表1 免震部材の支承と減衰機構

部材	支承	減衰機構
RB1	高減衰積層ゴム (多段)	高減衰積層ゴムの履歴
RB2	高減衰積層ゴム (中空)	高減衰積層ゴムの履歴
RB3	シリコン積層ゴム (2段)	シリコン積層ゴムの履歴
SL1	すべり (倒立振り子式)	すべり摩擦
RL1	転がり (鋼球)	オイルダンパ
RL2	転がり (車輪とレール)	車輪とレールの走行抵抗

とする入力最大速度を5, 10, 25, 50cm/s (一部65cm/s) とした。入力地震動の最大速度を65cm/sとしたのは、振動台の性能の制限値 (最大変位15cm) による。

なお、基礎固定時の上部構造の弾性時における固有振動数、減衰定数は、それぞれ約4.0Hz, 3.0%であった。これらの値は、一般戸建

て住宅の構造部材のみの場合の値⁸⁾と同程度である。また、2階と屋根の質量は各々0.77t, 0.58tであり、固有振動数の実測値から推定される水平剛性は、1層と2層ともに約1100kN/mである。

以下では、どの地震動入力に対しても概ね同様な結果が得られているため、1995 JMA Kobe NS地震動入力に対する実験結果のみを示す。また、部材名 (表1参照) を付して試験体名を呼ぶこととする。

4. 免震住宅の地震動入力時挙動と免震効果

地震動 (1995 JMA Kobe NS) を入力した場合の時刻歴応答及び最大応答値に着目して、免震住宅試験体 (RB1, SL1, RL1またはRL2) 及び非免震住宅試験体の地震動入力時挙動の特徴を示し、非免震住宅の応答と比較することにより免震効果を検討する。

免震住宅と非免震住宅における1階床水平加速度 (非免震の場合は振動台の水平加速度と同じ) の時刻歴応答 (25, 50cm/s入力時) の比較を図4に示し、その時の免震層の相対変位応答を図5に示す。最大入力加速度295cm/s²に対して、試験体RB1, SL1, RL1の最大加速度は、各々206, 138, 62.3cm/s²、免震層の最大層間変位は、各々79.5, 35.2, 91.7mmである。また、最大入力加速度508cm/s²に対して、試験体RB1, SL1, RL2の最大加速度は、各々292, 180, 99.1cm/s²、免震層の最大層間変位は、各々141, 102, 91.5mmである。積層ゴム支承RB1の場合には、他の支承に比べて免震層で大きな変位応答を示し、時刻歴応答では短周期成分が少なく周期の長い成分が多い。一方、すべり支承SL1の場合には、部材にすべりが発生し、1階床応答加速度が摩擦係数に対応する約100cm/s²以上の大きさになると或一定値を超えなくなる。また、積層ゴム支承に比べると、加速度時刻歴応答にすべりに伴うと考えられる短周期成分が多く含まれること、変位時刻歴応答に残留変位が見られることなどの相違がある。転がり支承RL1, RL2の場合には、加速度時刻歴応答では短周期成分と比較的周期の長い成分が混在し、変位時刻歴応答には短周期成分があまり含まれない。

図6に各階床の水平加速度と水平変位の最大応答値分布を示す。非免震試験体の場合に比べて、いずれの試験体でも、入力が増大するにつれて、各階床の応答加速度が入力に対して低減される効果が現れている。試験体RB1の免震層変位は、入力の増加に伴って単調に増加する傾向を示す。一方、試験体SL1の場合、入力が増加しても各階床の応答加速度は或一定値を超えなくなり殆んど変化しなくなる。また、他の部材では加速度分布がほぼ一樣になるのに対して、加速度分布に高次モードの影響が現れている。試験体RL2の場合には、入力の大きさに拘らず応答加速度が余り変わらない特徴を示す。

上部構造各層の層間変形角の最大応答値分布を図7に示す。試験体RB1, SL1, RL2及び非免震試験体について、1層の層間変形角 (括弧内の数値は非免震に対する比率) をみると、10cm/s入力時には、各々0.00077 (0.54), 0.00138 (0.97), 0.00048 (0.34), 0.00142 (1.0), 25cm/s入力時には、各々0.00139 (0.47), 0.00247 (0.84), 0.00060 (0.20), 0.00295 (1.0), 50cm/s入力時には、各々0.00243 (0.47), 0.00254 (0.33), 0.00082 (0.11), 0.00779 (1.0) である。比較した4種類の免震試験体の中では、転がり支承RL2の層間変形角が入力の大きさに拘らず最小となり、免震効果が最も大きい。非免震に対する比率を比較すると、試験体RB1では、入力の大きさに拘らず0.5前

(a) 最大速度 25cm/s 入力

(b) 最大速度 50cm/s 入力

図4 1階床加速度の時刻歴応答：1995 JMA Kobe NS 入力

後である。試験体SL1では、すべり係数に対応する入力の大きさ以下では免震効果が発揮されないが、それ以上の入力になると応答がそれ以上増加しなくなるために、入力の増加につれて比率が減少する。試験体RL2では、入力が10cm/s時に比率0.34で他の試験体に比べて最小であり、入力が増加するにつれて比率がさらに減少する。なお、65cm/s入力時の非免震に対する比率は、部材SL1が0.14、部材RL2が0.06であり、優れた免震効果を示している。

5. 免震部材のせん断力—水平変位関係

(a) 最大速度 25cm/s 入力

(b) 最大速度 50cm/s 入力

図5 免震層の相対変位時刻歴応答：1995 JMA Kobe NS 入力

地震動（1995 JMA Kobe NS）を入力した場合の免震層（部材RB1, SL1, RL2）のせん断力係数—水平変位関係（50cm/s入力時）を図8に示す。免震層せん断力は、上部構造の応答加速度測定値から慣性力を計算して求めた。部材RB1は、一般の高減衰積層ゴム支承と同様に紡錘形の履歴形状を呈する。それに対して、部材SL1は、すべり支承に特有の剛塑性形に近い履歴形状を示し、しかも原点に対して非対称な一方に偏った履歴を描く傾向がある。また、すべり面が球面であるために、正の第2分岐勾配が現れる。なお、せん断力係数は、すべり摩擦係数0.1にほぼ対応した値を示している。部材RL2は、トリリニア形の履歴形状を呈する。履歴は、車輪の回転抵抗及び車輪とレール間の走行抵抗によるものであり、レールが緩い曲線状になっているために正の第2分岐勾配を有する。

他のゴム弾性系の部材RB2, RB3の免震層せん断力係数—水平変位関係（40または50cm/s入力時）を図9に示す。高減衰ゴムを用いた部材RB2は、部材RB1と同様の履歴形状を示すが、変位が大きい領域でやや大きな履歴を描く。シリコンゴムを用いた部材RB3は、高減衰ゴムに比べると履歴面積が小さい。

図6 各階床水平加速度と水平変位の最大応答値分布
: 1995 JMA Kobe NS 入力

図8 免震層のせん断力係数- 水平変位関係: 1995 JMA Kobe NS 最大速度 50cm/s 入力
(免震部材 RB1, SL1, RL2)

図9 免震層のせん断力係数- 水平変位関係: 1995 JMA Kobe NS 入力
(免震部材 RB2, RB3)

6. 免震部材の等価周期と等価粘性減衰定数

地震動 (1995 JMA Kobe NS) を入力して得られた免震層の履歴曲線 (25, 50cm/s入力時) から求めた等価周期及び等価粘性減衰定数と水平変位との関係を, 部材RB1, SL1, RL2について, 図10(a), (b)

図7 層間変形角の最大応答値分布
: 1995 JMA Kobe NS 入力

に示す。また, 図10(c)は, ゴム弾性系の部材RB1, RB2, RB3の等価粘性減衰定数-水平変位関係である。等価周期は, 免震層のせん断力-水平変位関係において水平変位が正側あるいは負側にある履歴曲線の最大せん断力を最大変位で除した割線剛性から求め, 等価粘性減衰定数は, 各履歴曲線の履歴エネルギーと弾性歪エネルギーから求めた。なお, 参考までに, 各部材の設計式を図中に実線, 破線, 点線で示す。等価周期は, 水平変位の増加に伴って単調に増加し, 水平変位がある程度大きい領域では増加の程度が小さくなる傾向を示す。また, 積層ゴム支承RB1は, 他の支承と比較すると, 水平変位に伴う等価周期の変動が小さい。

一方, 等価粘性減衰定数は, 水平変位が増加すると単調に減少し, 水平変位がある程度以上になるとほぼ一定値を維持する。比較した3種類の免震部材の中では, すべり支承SL1の等価粘性減衰定数が最も大きく, 積層ゴム支承RB1が最も小さい。

図10(b), (c)から, すべり系の部材SL1と転がり系の部材RL2は, ゴム弾性系の部材に比べると, 変位の小さな領域からかなり大きな減衰を持っていることが分かる。すべり支承SL1と転がり支承RL2の等価粘性減衰定数は, 積層ゴム支承RB1の2倍以上の値になっている。また, 図10(c)から, ゴム弾性系の3つの部材で等価粘性減衰定数を比較すると, 高減衰ゴムを用いた部材RB1, RB2では15%前後, シリコンゴムを用いた部材では10%前後であり, シリコンゴムによる減衰がやや小さい。

7. まとめ

主として戸建て住宅に用いる6種類の免震部材 (積層ゴム支承3種類, すべり支承1種類, 転がり支承2種類) を用いて, 免震及び非免震住宅試験体の振動台実験を行い, これらの免震部材を有する免震住宅の地震時応答性及び免震部材の力学特性を検討した。本実験において得られた主な結果を以下に示す。

(1) いずれの部材においても上部構造の応答加速度及び層間変形角が

低減し、免震効果が見られた。

(2) 免震部材の力学特性の違いが上部構造の地震応答性状に大きく影響する。ゴム弾性系、すべり系、転がり系の免震部材を有する免震住宅試験体では、応答性状において以下に示す特徴が見られた。

a) 1階床応答加速度と免震層層間変位の時刻歴応答を比較すると、積層ゴム支承では、応答加速度に短周期成分が少なく周期の長い成分が多い。すべり支承では、すべり発生後に応答加速度が或る一定値を超えなくなり、応答加速度に短周期成分が多く含まれ、応答変位に残留変位が見られる。転がり支承では、応答加速度に短周期成分と比較的周期の長い成分が混在する。

(a) 等価周期—水平変位関係：装置 RB1,SL1,RL2

(b) 等価粘性減衰定数—水平変位関係：装置 RB1,SL1,RL2

(c) 等価粘性減衰定数—水平変位関係：装置 RB1,RB2,RB3

図 10 免震層の等価周期・等価粘性減衰定数—水平変位関係

b) 上部構造各階床の最大水平加速度分布を比較すると、ゴム弾性系と転がり系ではほぼ一樣になるのに対して、すべり系では高次モードの影響が見られる。

c) 地震動1995 JMA Kobe NSの最大速度10, 25, 50cm/s入力時の上部構造層間変形角を非免震に対する比率で比較すると、積層ゴム支承RB1では入力の大さに拘らず0.5前後となるのに対して、すべり支承SL1では0.97~0.33, 転がり支承RL2では0.34~0.11であり、いずれも入力の増加とともに比率は減少する。

d) 免震層のせん断力係数—水平変位関係において、免震部材がゴム弾性系の場合には紡錘形、すべり系の場合には剛塑性形、転がり系の場合にはトリリニア形の履歴形状を呈する。

e) いずれの免震部材においても、等価周期は水平変位の増加と共に単調に増加し、水平変位が大きくなると増加の割合が減少する。また、ゴム弾性系では、すべり系と転がり系に比較して、水平変位に伴う等価周期の変動が小さい。

f) いずれの免震部材でも、等価粘性減衰定数は、水平変位が増加するにつれて単調に減少し、一定値に近づく。高減衰積層ゴム支承の等価粘性減衰定数は15%前後であり、また、すべり系と転がり系では、ゴム弾性系に比べると、2倍以上の等価粘性減衰定数を有する。

なお、すべり支承を用いた場合の実験結果と解析結果の比較については文献14)を参照されたい。

謝辞

本研究は、建設省建築研究所（当時）の共同研究として(社)建築研究振興協会に設置された免震住宅研究委員会（委員長：(株)東京建築研究所長、山口昭一氏）（1995年度から3年間）の活動の一環として行われた。関係各位に謝意を表する。

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-1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) 神戸市消防局：兵庫県南部地震における市民行動調査「地震発生!そのとき市民は!」，1995.4
- 4) 日本建築学会：免震構造設計指針，2001.9
- 5) 日本免震構造協会編：免震構造入門，オーム社，1995.9
- 6) Kitagawa, Y. and Midorikawa, M., "Seismic Isolation and Passive Response-control Buildings in Japan," Smart Materials and Structures, Vol. 7, No. 5, pp. 581-587, 1998.10
- 7) 山内泰之，緑川光正，飯場正紀編：住宅を対象とした免震構法技術の開発—免震住宅の性能評価に向けての既往成果の整理と住宅モデルの振動台実験—，建築研究資料，No.89，1997.3
- 8) 免震住宅研究委員会：住宅を対象とした免震構法技術の開発—免震住宅設計ガイドライン（案）一，建築研究資料，No.94，2000.3
- 9) 飯場正紀，ほか5名：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
- 10) 原田浩之，ほか3名：建築構造物の地震応答制御設計法への研究 第11編 低摩擦型直動システム免震装置の性能試験，日本建築学会大会学術講演梗概集B-2，pp.735-736，1996.9
- 11) 平野茂，ほか4名：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，第529号，pp.65-72，2000.3
- 12) 福田一郎，ほか5名：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
- 13) 小松豊，ほか2名：振動台を用いた住宅用免震装置の動的特性に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造II，pp.739-740，1999.9
- 14) Myslimaj, B., Midorikawa, M., Iiba, M and Ikenaga, M.: 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, 2002.10

[2003年2月6日原稿受理 2003年7月29日採用決定]