

# 戸建住宅用免震システムの開発

西村 拓也      佐藤 孝典      寺田 岳彦      半澤 徹也      邵 立  
(技術研究所)      (事業開発部)      (技術研究所)      (技術研究所)      (技術研究所)

## Development of a Base-isolated System for Detached Houses

by Takuya Nishimura, Takanori Sato, Takehiko Terada, Tetsuya Hanzawa and Shao Li

### Abstract

A base-isolated system for detached houses was developed to save residents and properties from earthquakes. The base-isolated device consists of a ball-bearing and a viscoelastic material. The ball bearing works for supporting and sliding the superstructure. The viscoelastic material works for damping of vibrations. The device is the combination of existing technology. The shaking table tests of full-scale base-isolated houses were experienced to confirm the effectiveness of the base-isolated system. The accelerations and the story displacements of superstructure of the base-isolated houses were reduced remarkably in comparison of no base-isolated houses in every level of ground motions. The seismic response analyses were carried out to verify the validity of the numerical model and the method. The calculations largely corresponded to the responses of the full-scale tests.

### 概 要

大地震時における住宅内の居住者の安全や財産の保護を目的として、戸建住宅用の免震システムを開発した。新たに開発された免震装置は支承機能を担うボールベアリングと減衰機能を担う粘弾性体から成り、既存の技術を新しく組み合わせたものである。本システムの有効性を確認するため、本装置をくみこんだ実大住宅の振動台実験を行った。あらゆる入力レベルにおいて、免震住宅の加速度応答と上部構造の層間変位は非免震住宅に比べ著しく低減した。また、解析モデルと解析手法の妥当性を検証するため、地震応答解析を行った。計算結果は実験結果と概ね一致した。

### § 1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震により多くの戸建て住宅が倒壊し、多数の人命が失われた。倒壊した住宅の多くは建築年代が古いものであり、新しいものは十分な耐震性が確保されていると考えられる<sup>1)</sup>。しかし、兵庫県南部地震のように建築基準法で想定しているレベルよりも大きな入力となる地震が生じる可能性もあり、建築基準法で規定する最低限の耐震性を確保するだけでは十分とは言えない。

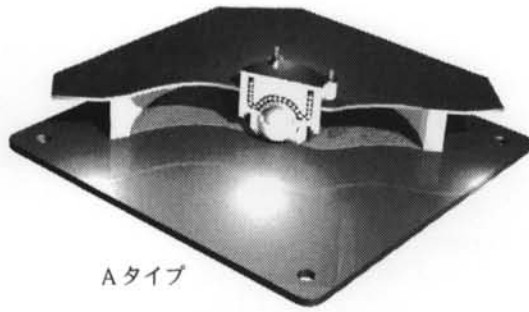
一方、構造躯体の被害は軽微であっても、室内の家具や什器の転倒により体を負傷したり、財産が失われたり、また激しい揺れによる恐怖を感じたりする人もいたと指摘されている。建物の強度を高めるだけでは、建物に強い揺れを生じることは避けがたく、人的物的被害を防ぐことはできない。このような被害を避けるには、建物の加速度応答を低減できる免震構造が有効である<sup>2)</sup>。

筆者らは、大規模な地震においても、居住者の安全

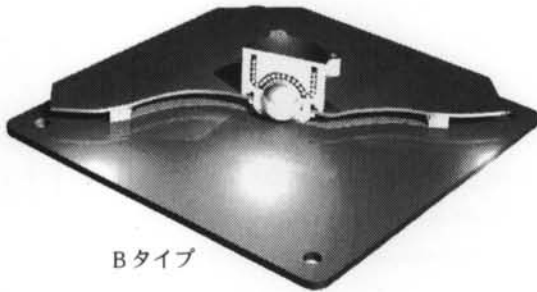
と財産が守られることを目的とした戸建住宅用免震システムを開発した。その効果を確認するために、木質系および軽量鉄骨系の戸建て実大住宅を用いて振動台実験を行った。また、実大免震住宅の力学特性を数値モデル化して地震応答解析を行った。計算結果と振動台実験結果を比較し、地震応答解析の妥当性を検証した。

### § 2. 免震システムの概要

本免震システムは、免震装置、オイルダンパーおよびブレーキ付モーター式復元装置から構成される。筆者らが開発した戸建て住宅用の免震装置を図-1に示す。免震装置はAタイプとBタイプの2種類あり、いずれも直径50mmのキャスター型ベアリングで鉛直荷重を支持する。Aタイプは、ベースプレート上を水平移動したベアリングをリング状粘弾性体で原点に戻そうとする復元および減衰機能を付加したものである。



Aタイプ



Bタイプ

図-1 免震装置

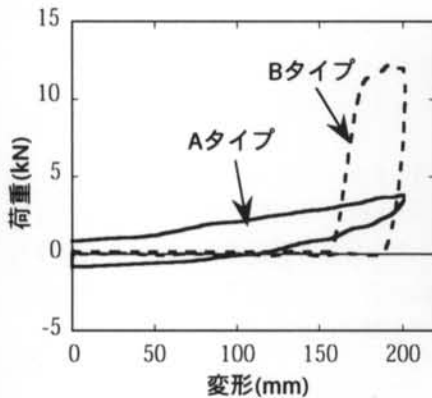


図-2 免震装置の荷重変形関係  
(周期  $T=3$  秒、変形 200mm 時)

一方、Bタイプは、大地震時でもベアリングが脱落しないように、移動半径165mm以上において、ベアリングとリング状粘弾性ストッパーが衝突し、水平荷重が急激に上昇する機構を備えたものである。設計上の可動半径はいずれも220mmと設定している。常時の鉛直支持荷重は、AタイプとBタイプともに15kN程度とするが、鉛直支持荷重100kN時においても、ベアリングは損傷せずに水平方向へ可動することが確認されている。免震装置の荷重変形関係を図-2に示す。また、各装置の特性値を表-1に示す。ここで用いた粘弾性体は文献3)に示すSTD1であり、その力学特性、化学特性等は文献4)で述べられている。

図-3に免震システムの施工状況を示す。外周に4台のオイルダンパーが設置され、1台当たり  $C=20 \sim 30$  kN・sec/mの減衰性能が付加されている。また、地震後の残留変形を戻したり、強風による風圧力に耐えるた

特性	Aタイプ	Bタイプ
水平限界変形 (mm)	220	220
圧縮限界強度 (kN)	100	100
等価剛性 (kN/m)	21.0	-
等価減衰定数	0.28	-
転がり摩擦係数	0.007	0.007
硬化剛性 (kN/m)	-	513

注1 Aタイプの等価剛性、等価減衰定数は温度  $T_e=20$  °C、周期  $T=3$  sec、水平変形  $\delta = \pm 100$  mm 時の定常履歴時のものである。

注2 Bタイプの硬化剛性とは、水平変形165mm以上において荷重が急激に上昇する部分の剛性である。表中の値は、 $T_e=20$  °C、周期  $T=3$  sec、水平変形  $\delta = \pm 185$  mm 時の加振時のものである。

表-1 免震装置の特性値

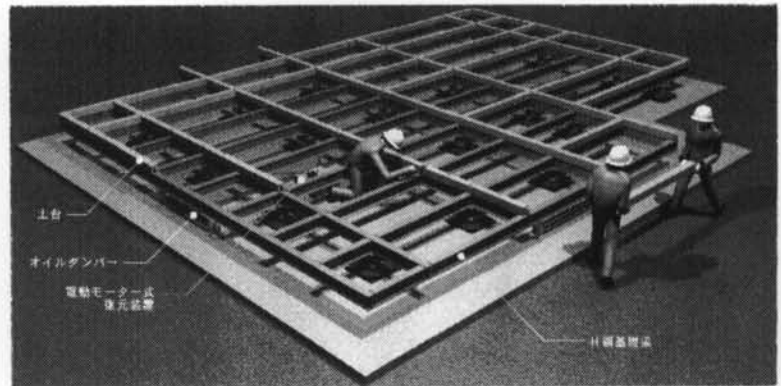


図-3 免震システムの施工状況

試験体	装置
木質パネル構法の2階建て 1F: 53.8m <sup>2</sup> , 2F: 42.3m <sup>2</sup> 総重量: 22.8ton	Aタイプ: 4台 Bタイプ: 12台
軽量鉄骨構造の2階建て 1F: 40.0m <sup>2</sup> , 2F: 40.0m <sup>2</sup> 総重量: 26.1ton	Aタイプ: 4台 Bタイプ: 14台

表-2 加振用の実大住宅の一覧

めにブレーキ付モーター式復元装置が1棟に2ヶ所設置されている。

### § 3. 実大免震住宅の振動台実験

免震システムの効果を把握するために、表-2に示す実大の免震用住宅2棟(木質パネル構法と軽量鉄骨



図-4 木質系住宅試験体の平面、立面図

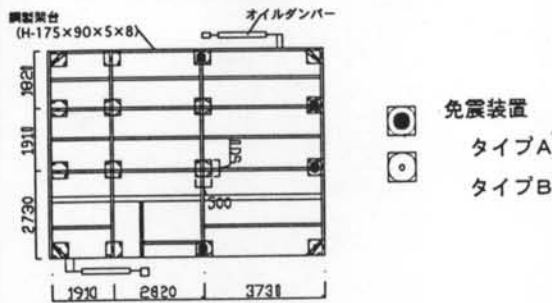


図-5 木質系住宅試験体の免震装置配置図

構造)の振動台実験を行った。加振は、防災科学技術研究所(茨城県つくば市)にある15m×15mの大型一軸振動台を用いた。免震用住宅は、初め免震住宅、その後基礎を固定し従来住宅としての加振を行った。

### 3.1 木質系住宅の実験結果

試験体は木質パネル構法(面材と柱材を接着した構法)による一部下屋付きの2階建て住宅で、平面寸法は約8.5m×6.5m、床面積は1階53.8m<sup>2</sup>、2階42.3m<sup>2</sup>、延床面積96.1m<sup>2</sup>である。平面図と立面図を図-4に示す。試験体の各階重量は、屋階5.8ton、2階9.0ton、1階8.0tonであり、総重量は、22.8tonである。

免震装置の配置は図-5に示す通りであり、Aタイプの免震装置を4基、Bタイプを12基設置している。また、この他に1台あたりの減衰係数が24.5kN・sec/mのオイルダンパを2台設置している。試験体は、格子形に組まれた鋼製架台(H-175×90×5×8)に建物の土台を緊結し、この鋼製架台と振動台の間に免震装置を配置するものである。

入力波は兵庫県南部地震神戸海洋気象台波南北成分の加速度記録とし、入力レベルをかえて加振を行った。各階の最大応答加速度および最大応答層間変位の分

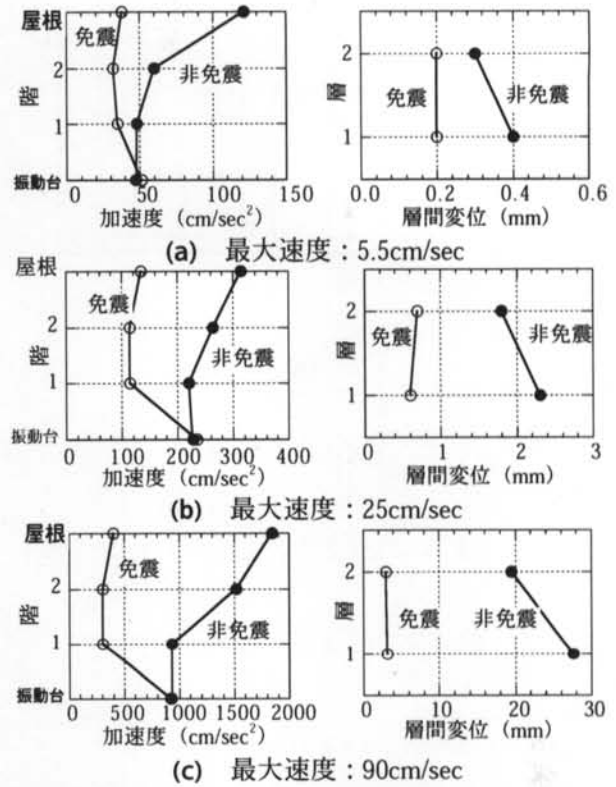


図-6 各階応答加速度と層間変位の分布

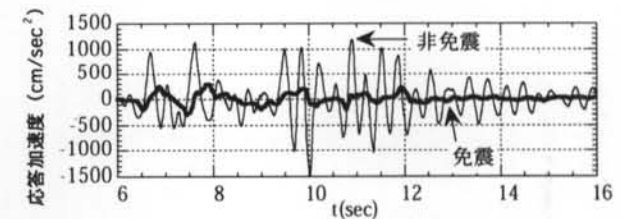


図-7 2階床応答加速度時刻歴(90cm/sec入力時)

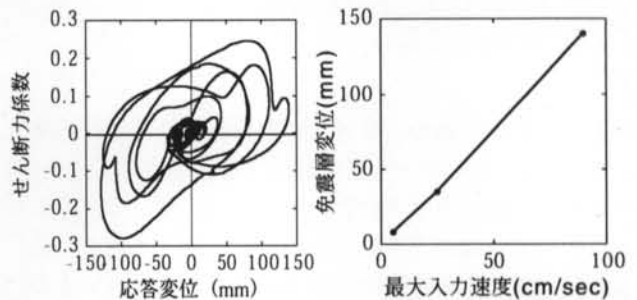


図-8 応答せん断力係数 図-9 入力速度と免震層変位の関係

布を図-6に示す。また90cm/sec入力時の2階床応答加速度の時刻歴を図-7に示す。図-6、図-7から、免震構造は非免震に対し著しく応答値が小さくなっていることが分かる。低下率は入力レベルや位置により異なるが、90cm/secの入力では2階床面での免震構造の応答加速度は、非免震構造の1/5程度になっている。また、免震構造は100cm/secの入力に対しても損傷が生じず、内部に置いた家具類の転倒も認められなかった。

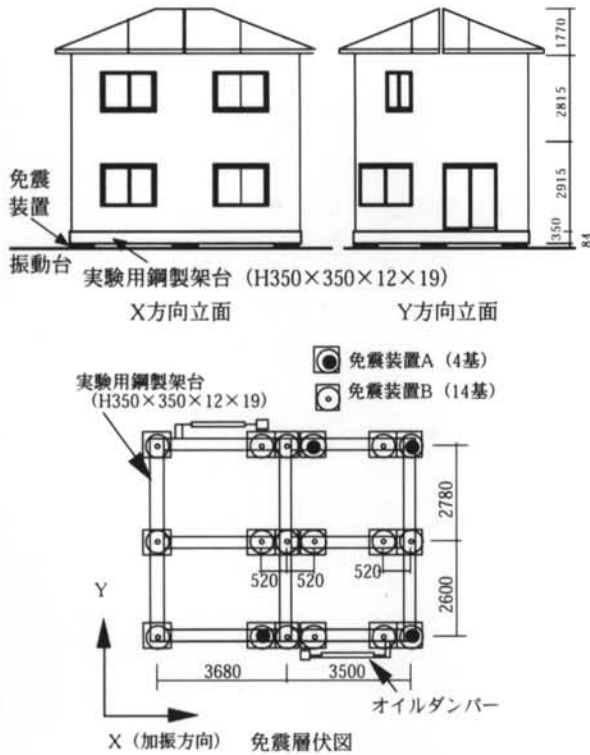


図-10 軽量鉄骨系住宅試験体の立面図および免震装置配置図

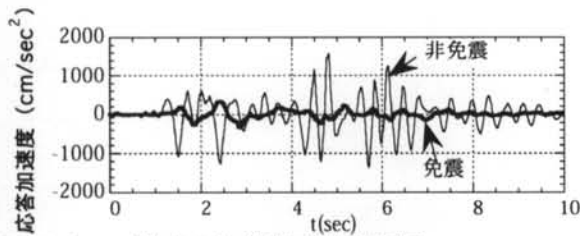
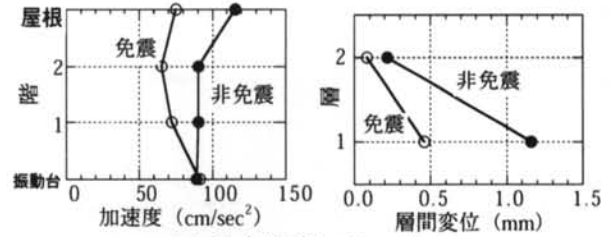


図-12 2階床の加速度応答時刻歴 (90cm/sec 入力)

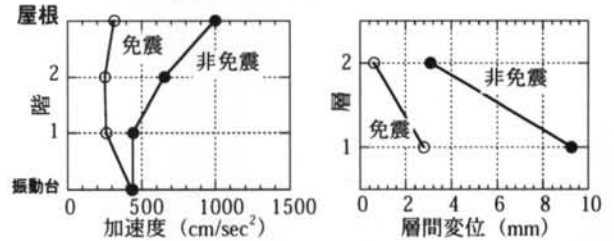
図-8 に免震層の応答せん断力係数と応答変位の関係を示す。エネルギー吸収の大きな履歴を描いている。上部構造の変形が小さいことなどから、ほとんどのエネルギーが免震層で吸収されていると考えられる。最大入力速度と免震層変位の関係を図-9 に示す。本実験の加振レベルでは、入力速度と免震層の変位は線形関係であると認められる。

### 3.2 軽量鉄骨系住宅の実験結果

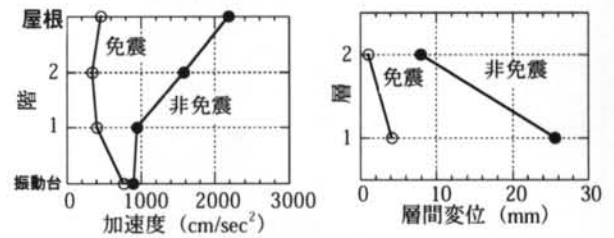
試験体は実大の2階建て軽量鉄骨構造の戸建て住宅である。試験体の立面および免震層の伏図・免震装置の配置を図-10 に示す。免震装置の台数は、Aタイプ4基、Bタイプ14基の合計18基であり、さらに減衰係数が24.5 kN・sec/mのオイルダンパーを2台設置した。各階の床面積は約40m<sup>2</sup>、延床面積は80m<sup>2</sup>である。また、試験体の各階の質量は屋階6.1ton、2階9.8ton、1



(a) 最大速度：11cm/sec



(b) 最大速度：50cm/sec



(c) 最大速度：90cm/sec

図-11 最大応答加速度および最大応答加速度の分布

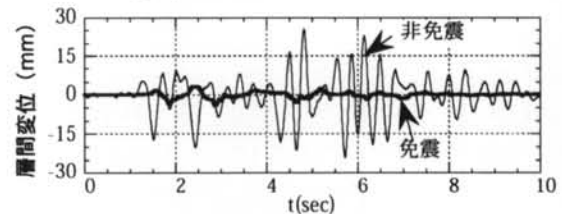


図-13 1階の応答層間変位時刻歴 (90cm/sec 入力)

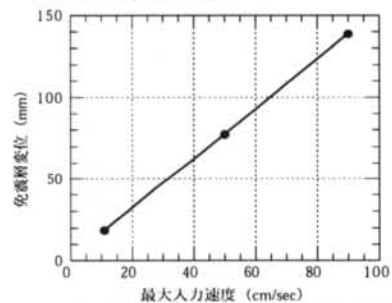


図-14 最大入力速度と免震層の最大変位の関係

階10.2tonであり、総質量は26.1tonである。試験体は格子形に組まれたH形鋼 (H-350×350×12×19) の上に建設されているが、このH形鋼は実験時の試験体の移動等のためのものであり、実際はH-175～250程度のH形鋼の架台の上に建設される。

加振方向は水平1軸であり、入力地震動として、1995年兵庫県南部地震の時に神戸海洋気象台で記録された



南北方向の加速度記録を用いる。

各加振レベルにおける免震構造および非免震構造の各階の最大応答加速度および最大応答層間変位の分布を図-11に示す。また、90cm/sec入力時の2階床の応答加速度および1階の応答層間変位の時刻歴の比較を図-12および図-13に示す。非免震構造に対し、免震構造は入力レベルにかかわらず応答加速度、上部構造の層間変位ともに著しく低減されていることが分かる。

最大入力速度と免震層の最大応答変位の関係を図-14に示す。最大入力速度と免震層の最大応答変位の間には本実験の範囲では線形関係が認められる。また、最大入力速度が90 cm/secの場合の免震層の最大応答変位は約140mmであり、Bタイプの免震装置のハードニング領域（165mm以上）には達していなかった。

#### § 4. 地震応答解析

実大戸建て住宅の振動台実験によって得られた免震および非免震住宅の地震時挙動について解析的に検討し、免震住宅の地震時挙動の予測に対する地震応答解析の妥当性を検証する。

##### 4.1 解析モデル

解析対象は3.2節に示した軽量鉄骨系免震住宅および非免震住宅とし、それぞれ図-15に示すせん断型3質点および2質点モデルとする。上部構造のバネは免震および非免震構造で共通であるが、外壁等の理論的にモデル化が困難な要素の剛性や耐力が層の復元力特性に影響を及ぼしていると考えられるため、実験結果を模擬するよう層の力学特

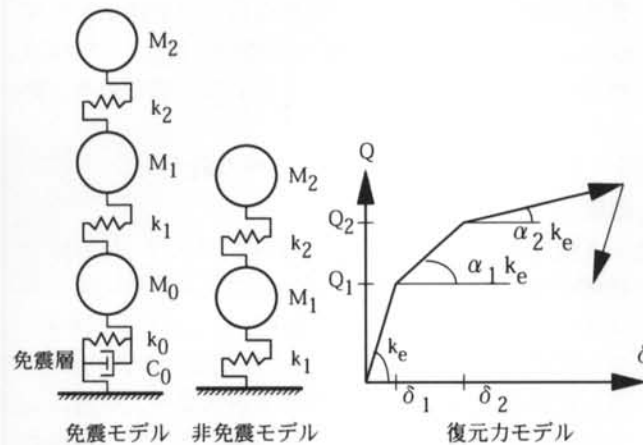


図-15 解析モデル

質量			ばね										C <sub>0</sub> (kNs/m)	
M <sub>2</sub> (kg)	M <sub>1</sub> (kg)	M <sub>0</sub> (kg)	k <sub>2</sub> (Tri-linear)				k <sub>1</sub> (Tri-linear)				k <sub>0</sub> (線形)			
			k <sub>e</sub> (kN/m)	δ <sub>1</sub> (mm)	δ <sub>2</sub> (mm)	α <sub>1</sub>	α <sub>2</sub>	k <sub>e</sub> (kN/m)	δ <sub>1</sub> (mm)	δ <sub>2</sub> (mm)	α <sub>1</sub>	α <sub>2</sub>	(kN/m)	
6098	9765	10244	23.6 × 10 <sup>3</sup>	0.2	5.0	0.67	0.37	23.0 × 10 <sup>3</sup>	0.2	20.3	0.67	0.2	490	107.8

表-3 解析モデルの力学定数

性を試行錯誤的に求める。免震層の力学モデルは、免震装置の動特性値に基づき、線形バネとダッシュポットを並列させた Voigt モデルとする。解析モデルの質量、バネの復元力特性、バネとダッシュポットの諸定数を表-3に示す。減衰は初期剛性比例型で、1次固有振動数に対し1%とする。数値積分はニューマークのβ法 (β=1/4)、時間刻みは0.005秒とする。解析時間は100secとする。

入力波は、振動台実験の時に実際に記録された振動台の加速度記録を用いる。

##### 4.2 計算結果

入力速度11および50cm/secのときの非免震構造について、各層の層せん断力-層間変形関係の解析結果と実験結果の比較を図-16に示す。実験結果の方が履歴は膨らんでいるが、剛性や最大応答変位、最大応答せん断力はほぼ対応し、上部構造のバネの設定がほぼ妥当であることが分かる。

最大応答加速度および最大応答層間変位について、解析と実験結果とを比較し図-17に示す。また、90cm/sec入力時の2階床の応答加速度の時刻歴の比較

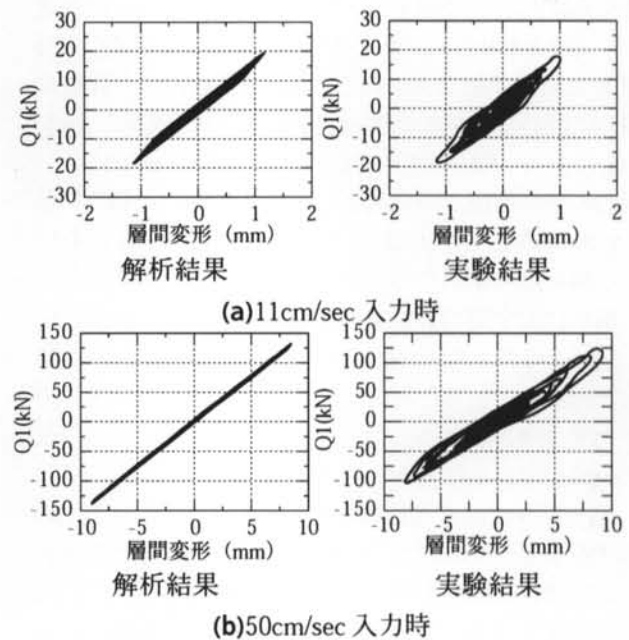


図-16 解析と実験の比較

(非免震モデルの第1層の層せん断力-層間変形関係)

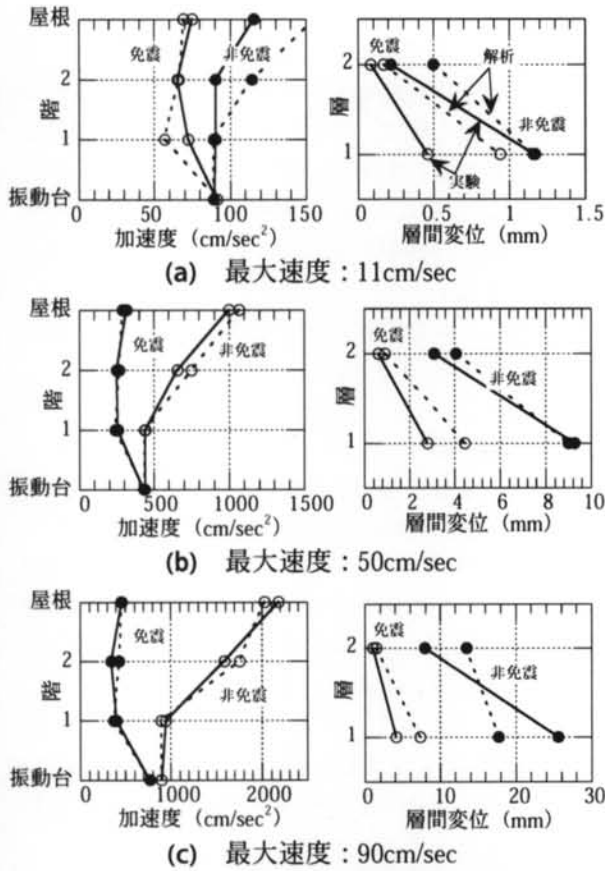


図-17 最大応答加速度および最大応答層間変位の比較

を図-18に示す。図-17では○が免震構造、●が非免震構造を表し、図-17および図-18ともに実線が実験結果、破線が解析結果を示している。図-17に示す応答加速度では、入力速度が11 cm/secのときや実験と解析結果との差が大きくなっているが、入力速度50および90 cm/secのときには、免震および非免震構造に関わらず解析結果と実験結果とは良好な一致を示している。層間変位に関しては、応答加速度に比べ解析の予測精度がやや低下している傾向にある。しかし、免震構造に対しては、いずれの入力レベルにおいても解析は実験よりも大きな値となった。このことから解析は安全側の評価を与えていると考えられる。

図-18に示す時刻歴では、図-17で見られたことと対応しているために実験結果よりも解析結果の方が大きな応答となっている。しかし、位相特性は完全に一致していることが分かる。

図-19に最大入力速度と免震層の最大応答変位の関係を示す。実験および解析ともに入力速度と免震層の応答変位とは線形関係があることが分かる。ただし、解析結果は実験結果よりもやや小さく、上部構造の応答変位では解析結果は実験結果よりも大きかったことと逆の結果となっている。

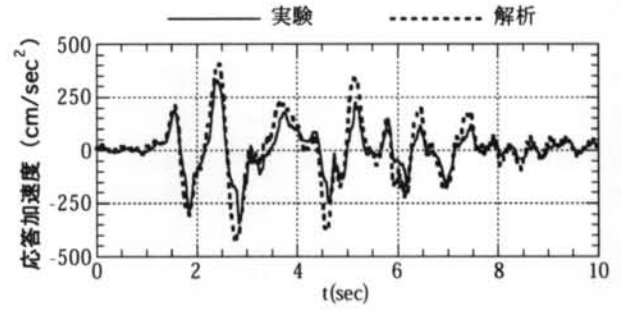


図-18 2階の床応答加速度時刻歴の比較 (90cm/sec入力時)

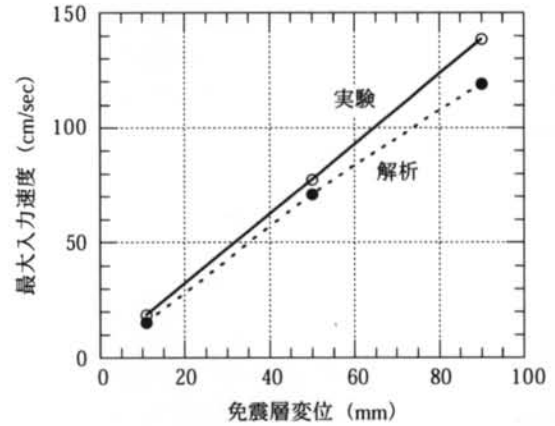


図-19 最大入力速度と免震層の最大応答変位の関係

## § 5. まとめ

大地震時における住宅の損傷防止のみならず、居住者の安全と財産の保護を目的とし、筆者らは戸建住宅用免震システムを開発した。実大免震住宅による振動台実験を行った結果、木質系住宅、軽量鉄骨系住宅ともに上部構造の応答加速度と層間変位は非免震に比べ著しく減少し、免震システムの有効性が実証された。また、免震住宅および非免震住宅の質点系モデルによる地震応答解析を実施し、実験結果と解析結果とを比較検討した。解析と実験結果とは概ね一致し、本解析は免震住宅の地震応答予測に対し有効な手法であると結論付けられる。

## 謝辞

本報告は、東京大学工学部の坂本功教授、防災科学技術研究所の箕輪親宏氏と清水建設による共同開発の成果の一部である。また、エス・バイ・エル株式会社、エースホーム株式会社、ナショナル住宅産業株式会社、住友林業株式会社、積水化学工業株式会社、東海ゴム工業株式会社の関係者各位には多大なる援助と御協力を頂きました。記して謝意を表します。

<参考文献>

- 1) 建築研究所：“平成7年兵庫県南部地震被害調査中間報告書”，1995.8
- 2) 日本免震構造協会編：“免震構造入門”，1995.7
- 3) 佐藤孝典，堀江竜巳，邵立，西村拓也：“粘弾性ダンパーを用いた細柱制震構造とその設計法の提案”，日本建築学会構造系論文集，第543号，2001.5
- 4) 半澤徹也，寺田岳彦，佐藤孝典，西村拓也，邵立：“スチレン-オレフィン系粘弾性体のモデル化と制震効果”，日本建築学会技術報告集，第13号，2001.7
- 5) 日本建築構造技術者協会編：“応答制御構造設計法”，2000.12
- 6) 国土交通省住宅局指導課，建築研究所，日本建築行政会議，日本免震構造協会，日本建築センター編：“免震建築物の技術基準解説及び計算例とその解説”，2001.5

