

U.D.C 624.07

積層ゴム支承を用いた戸建免震住宅の研究開発

鈴木 敏志* 根本 誠之** 豊嶋 学*
内田健一郎*** 竹中 宏明**** 竹田 史朗*

要約： 本報では、木造戸建住宅を対象とした積層ゴム支承による免震構造システムの実用化に関する一連の研究開発とその成果について報告する。本研究開発は、住宅建築の免震構造を積層ゴム支承のみにより成立させ、低コストで戸建免震システムを実現させることを目的としている。開発した積層ゴム支承は小型軽量で安定性に優れており、長期軸力 70kN、大地震時における等価固有周期 2 秒、等価減衰定数 20%以上という基本性能を有している。地震時挙動を確認するために行った振動台実験においても、大地震時に安定した応答性状を示し、免震効果も十分に発揮できることを確認した。また、積層ゴム支承を用いた免震住宅の特色を生かした施工方法の開発も併せて行った。RC 架台をベタ基礎の上で現場施工した後、架台をジャッキアップして装置を設置する方法を開発した。実用化された積層ゴム支承を用いた免震住宅の適用実績は、平成 20 年 4 月 1 日現在、4 棟である。

キーワード： 戸建免震住宅、座屈安定性、高減衰ゴム、中空断面、振動台実験、施工方法

目次：

1. はじめに	4. 振動台を用いた性能確認実験
2. 研究開発の概要	5. 実建物への適用
3. 積層ゴム支承の特性	6. まとめ

1. はじめに

免震構造を住宅建築に普及させることは、地震災害を低減する観点からも建物の長寿命化にとって極めて有効な手段となる。しかし、これまでは技術的に解決すべき課題が多く、戸建免震住宅を普及させる条件が整っていない状況となっていた。

その主な理由は、住宅建築では積層ゴム支承のみによる免震構造が実現できなかったことである。小型で軽量の住宅建築では積層ゴム支承の直径が小さくなり、大地震の際に予想される大変形に対して座屈現象が避けられないと考えられてきた。そのため、免震住宅には転がり支承やすべり支承を用いて鉛直荷重を支持し、減衰材としてオイルダンパなどを併用する方法が採られてきた。しかし、このような複数の部材により構成される免震構造では、必要な部材の種類が多く、機能も複雑で維持管理には特殊な技術が必要となり、費用が発生するなど、コストの面でも採用することが難しかった。

本技術開発は、住宅建築における免震構造を広く普及させるための技術革新を目指したものである。住宅建築に免震構造を普及させるために、これまで困難とされていた積層ゴム支承のみによる免震構造を成立させ、低コストで維持管理も容易な戸建免震システムを実現することを目標とした。

2. 研究開発の概要

開発に先立ち、積層ゴム支承の基本仕様として、長期軸力 70kN、大地震時における等価固有周期 2 秒、等価減衰定数 20%以上、などの数値目標を決定した。この基本仕様を目標に最適な積層ゴム支承の形状を数値解析により検討した^{1), 2), 3)}。また、使用するゴム材料については、試作品を製作して実験による検討を行った。このように、実験と解析による検討を繰り返し行うことによって、目標を満足する積層ゴム支承の開発に至った。開発した積層ゴム支承は、静的な加力実験によって性能を確認し、最終的には、国土交通大臣の認定部材として承認を得た。併せて、振動台を用いて動特性を確認する実験を行い、最大入力速度 75cm/sec の地震動における積層ゴム支承の動的安定性、水平変形能力などを確認した。また、積層ゴム支承を効果的に戸建住宅に適用できる工法の開発も行った。基礎スラブと免震スラブは共に鉄筋コンクリート構造とし、特に、上部の免震スラブは基礎スラブ上にコンクリートを打設し、後にジャッキアップして積層ゴム支承を敷設する工法を開発した。この方法によると、戸建免震構造の重心位置を低く設定できるので軸力変動も少なく、振動台実験で確認した通りの性能を確保することができる。以下に、一連の研究開発の詳細について記述する。

3. 積層ゴム支承の特性

3.1 形状

開発した積層ゴム支承の形状を図 3.1 に示す。断面は中空孔を有し、ゴム外径 200mm、ゴム内径 120mm である。また、鋼板総高さ 207mm、ゴム総高さ 96mm、支承の総高さ 355mm というプロポーションの高い形状となっている。内部鋼板は 9mm とゴム層 4mm よりも厚くし、さらに鋼板露出構造とすることにより曲げ剛性を高くしている。これにより、水平変形の増大によらず鉛直荷重を安定して支持することが可能となる。使用したゴム材料は、高減衰ゴムでゴム材料の等価せん断弾性係数は $G_{eq}=0.34\text{N/mm}^2$ (せん断ひずみ 100%時) である。1 基あたりの支持荷重は 70kN (面圧: 3.5N/mm^2) を基準としている。

3.2 基本特性

開発した積層ゴム支承の基本特性を確認する目的で、複数の試験体を製作し、性能評価実験を行った。実験に使用した試験機を写真 3.1 に示す。

実験は軸力と水平変位の 2 つをパラメーターとして行った。写真 3.2 は鉛直軸力 70kN 載荷時の変形状態である。また、せん断ひずみ $\gamma=300\%$ (水平変位 288mm) まで加振した際の荷重-変形関係を図 3.2 に示す。図 3.2 に示す通り、積層ゴム支承の外径よりも大きな変形 (水平変位 288mm) をしても鉛直荷重を支持している事がわかる。荷重-変形関係は修正バイリニアモデルにより近似ができ、特にせん断ひずみ $\gamma=200\%$ までは良く一致している。

また、高減衰ゴムの特徴として、ひずみ依存性の大きい事が挙げられる。図 3.3 に示すように、ひずみが小さい領域では、せん断ひずみ $\gamma=10\%$ の時で等価せん断弾性係数 $G_{eq}=1.30\text{N/mm}^2$ と高弾性になる。これは、風荷重などに対するトリガー機能として有効と考えられる。一方、ひずみが大きい領域では、せん断ひずみ $\gamma=100\%$ 時で等価せん断弾性係数 $G_{eq}=0.34\text{N/mm}^2$ と低弾性になり、地震時には固有周期が約 2 秒に長周期化する。また、せん断ひずみ $\gamma=100\%$ 時における等価減衰定数は $h_{eq}=23.7\%$ となる。

3.3 限界性能試験

前項と同様の試験機を用いて積層ゴム支承の限界性能を確認する実験を行った。実験は、載荷荷重をパラメータとして、表 3.1 に示す 8 パターンについて行った。鉛直軸力 0, 50, 70, 100kN の 4 パターンでゴムが破断するまで行った実験より、図 3.4 に示す破断に至るまでの限界ひずみ曲線が得られた。また、表 3.1 の結果を用いて圧縮限界強度領域図を求めると図 3.5 に示す通りとなった。

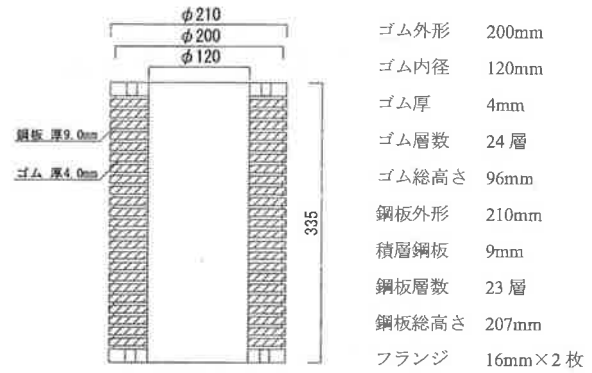


図 3.1 積層ゴム形状



写真 3.1 試験機



写真 3.2 試験状況

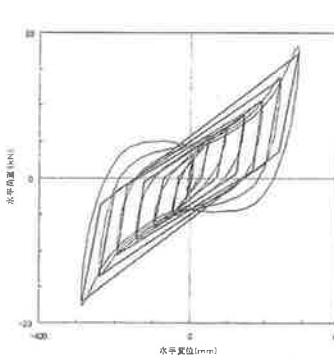


図 3.2 荷重-変形関係

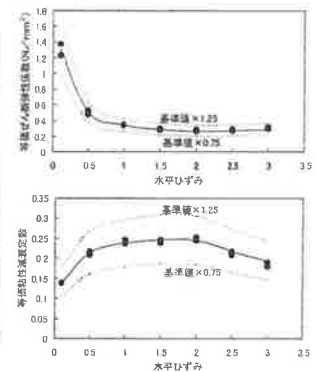


図 3.3 ひずみ依存性

表 3.1 限界性能試験結果

載荷荷重 (kN)	面圧 (N/mm ²)	水平変位 (mm)	水平ひずみ (%)	モード
364	18.1	0	0	異常なし
250	12.4	144	150	異常なし
70	3.5	288	300	異常なし
280	13.9	192	200	座屈
0	0	339	353	破断
50	2.5	330	344	破断
70	3.5	366	382	破断
100	5	303	316	破断

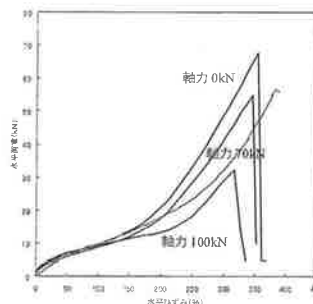


図 3.4 限界ひずみ曲線

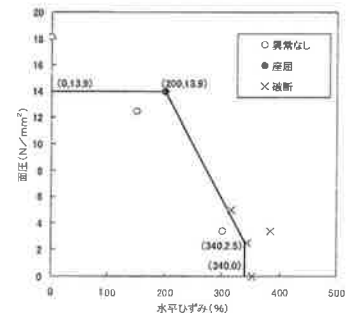


図 3.5 圧縮限界強度領域図

4. 振動台を用いた性能確認実験

開発した積層ゴム支承について、地震時挙動を確認する目的で振動台実験を実施した。

4.1 振動台実験概要

表 4.1 に実験に使用した振動台の基本性能を示す。本振動台は、駆動方式として電気・油圧サーボ方式を採用した三次元振動台で、水平方向に最大±500mmの可働能力を持っており、試験体 30ton 搭載時に10m/sec²の加速度を発生させる推力を有している。

試験体は、平面形状が 3500mm×3500mm の鋼製架台に鋳鉄製の錘が取り付けられ、それらを 4 基の積層ゴム支承で支える構造となっている(写真 4.1)。実験に使用した積層ゴム支承は、前節 3.1 の通りである。試験体は、鋼製架台の質量を 24.6ton(試験体 KM-1)と 28.2ton(試験体 KM-2)の 2 種類とした。積層ゴム支承 1 基あたりの支持荷重は、おおよそ 60kN および 70kN となる。

加振に使用した地震波は El-centro, Taft, Hachinohe, および JMA Kobe の 4 波とし、JMA Kobe 波以外の 3 波は 25kine, 50kine の加振レベルを目標に、JMA Kobe 波は最大加速度 400gal および 800gal を目標にした加振を行った(表 4.2 参照)。なお、試験体の振動特性把握のため、X, Y, Z 方向個々に、0.1Hz~30Hz の周波数帯域 (Z 方向は 1.0Hz~30Hz) でフーリエ振幅が一定、位相がランダムな WhiteNoise 波 (100gal) を作成し加振を行った。

4.2 振動台実験結果

表 4.3 に WhiteNoise 加振時の試験体の固有振動数を示す。試験体質量によらず水平方向の固有振動数は 1.5Hz 程度であったが、鉛直方向は KM-1 で 9.40Hz, KM-2 で 8.89Hz となり試験体の質量比に対応する振動数の比率となった。

実験結果の一例として試験体 KM-2 に JMA Kobe NS 成分 800gal を入力した際の応答結果を以下に示す。図 4.1 は試験体の水平変形と慣性力の関係を示したものである。図 4.1 より、積層ゴム支承の直径を越える 20cm 以上の応答変形を示したが試験体の荷重-変形関係は安定したループ形状を示していることがわかる。最大変形時付近の 1 サイクル分を取り出して等価粘性減衰定数を求めると約 23%となっており、積層ゴム支承に使用した高減衰ゴムは十分な減衰能力を有していることがわかる。また、図 4.2 は水平変形と鉛直変形(鋼製架台中央部の沈み込み量)の関係を示したものである。直径を越える水平変形時にも沈み込み量は 0.5cm 程度であり、安定性に優れた鉛直荷重支持能力を示した。

表 4.1 振動台の基本性能

項目	仕様		
テーブル寸法	4m×4m		
搭載質量	定格:30ton 最大:50ton		
加振成分	水平2軸(X, Y), 鉛直1軸(Z)		
	軸回転成分(φ, θ, ψ)の6成分同時加振可能		
	X	Y	Z
最大変位	±500mm	±200mm	±100mm
最大速度	±1.5m/s	±1.0m/s	±0.99m/s
最大加速度	±10m/s ²	±10m/s ²	±10m/s ²
回転成分	±0.049rad	±0.049rad	±0.07rad
加振周波数範囲	DC~30Hz	DC~50Hz	DC~50Hz

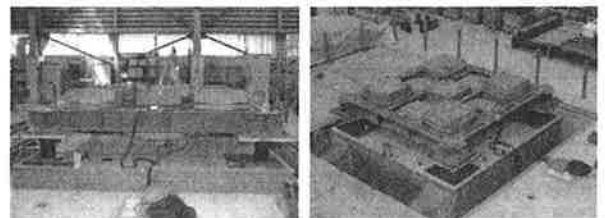


写真 4.1 試験体全景

表 4.2 加振波概要

加振波名	加振方向	加振レベル
El-centro NS	X	25kine,50kine
El-centro 3D	X,Y,Z	
Taft EW	Y	
Taft 3D	X,Y,Z	
Hachinohe NS	X	
Hachinohe 3D	X,Y,Z	400gal,800gal
JMA Kobe NS	X	
JMA Kobe 3D	X,Y,Z	

表 4.3 WhiteNoise 加振による試験体の固有振動数(Hz)

	X方向	Y方向	Z方向
KM-1	1.54	1.54	9.40
KM-2	1.51	1.54	8.89

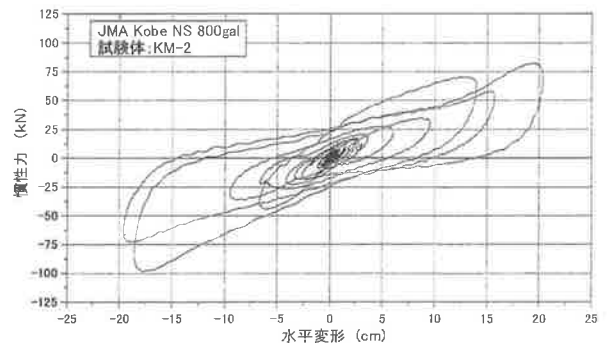


図 4.1 水平変形-慣性力関係

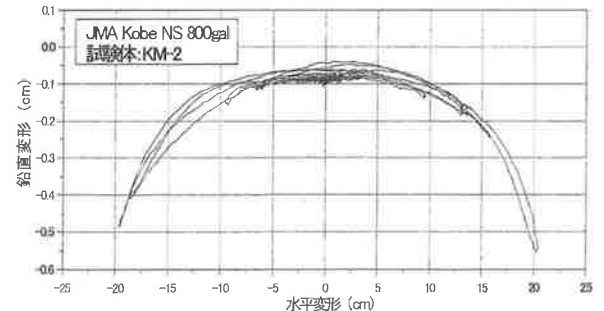


図 4.2 水平変形-鉛直変形関係

図 4.3 は、表 4.2 に示す地震波によって加振したときの振動台上の最大応答加速度と試験体の最大応答加速度の関係を示したものである。種々のレベルの加振波に対して、試験体 KM-1 と試験体 KM-2 との間で最大応答加速度の差はほとんど見られない。また、振動台上の最大加速度（入力加速度）が 500gal を越えるあたりから最大応答加速度の値は入力加速度の 4 割程度以下となり免震効果が発揮されていることがわかる。図 4.4 に JMA Kobe NS 成分 800gal の加振をした場合の KM-1 試験体の応答結果からエネルギーを計算したものを示す。減衰エネルギーは試験体の加振方向の加速度、速度および変形から算出した。総エネルギー入力の大半は加振方向の試験体の減衰エネルギーで消費されていることがわかる。

このように、開発した積層ゴム支承を用いて振動台実験を行った結果、大地震時にも安定した応答性を示し、免震効果も十分に発揮されることを確認した。また、静的な加力実験と同様に、積層ゴム支承の直径を超える変形時においても鉛直方向の沈み込み量は少なく、高い鉛直支持能力を有していることを確認した。

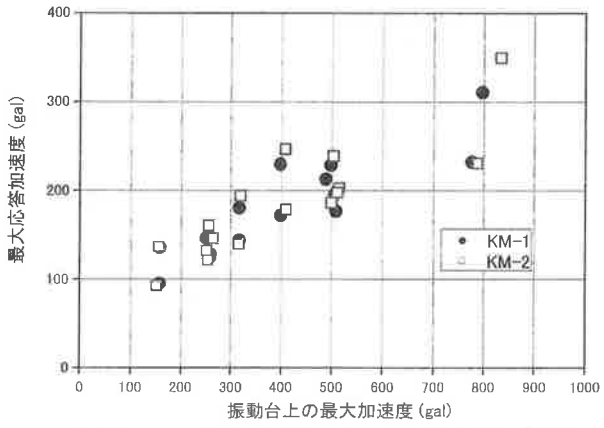


図 4.3 最大入力加速度と最大応答加速度の関係

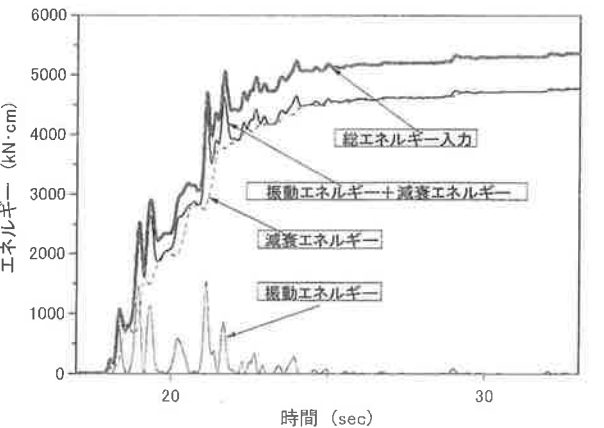


図 4.4 振動台実験時のエネルギー

5. 実建物への適用

開発した積層ゴム支承を用いた免震システムを構築して、実建物へ適用した。本システムでは、高減衰積層ゴム支承のみで構成される免震構造という特徴を生かす為、RC 造の免震架台を採用した。それにより、積層ゴム支承を任意の位置に設置可能となり、設計の自由度を向上させている。

5.1 建物概要と構造設計

表 5.1 に本免震システムを採用した建物概要を、写真 5.1 に建物全景を示す。図 5.1 には設置した積層ゴム支承の配置及び免震架台の可動範囲を示す。

構造設計では、極めて希に起こる地震に対しては各部位及び接合部が短期許容応力度以内となることを目標に設計した。上部構造は、上部構造の最下階における地震層せん断力が 0.2 を上回り、免震層の設計で得られたせん断力係数にて構造耐力の確認を行った。免震層の風応答変位が地震応答変位を下回ることを確認し、また、ゴムの初期剛性が高いために、特に風用拘束装置の設置は行っていない。

5.2 免震層の施工方法

本施工では、鉄筋コンクリートの免震架台をベタ基礎の上で現場施工した後、架台をジャッキアップして装置を設置する方法を開発し、採用した。これにより架台スラブ打設前に上下ベースプレートを取り付けベースプレートの位置決め精度を向上させるだけでなく、鉄骨や集成材などの架台で使用するクレーンなどの重機を使う必要もなくなり、ジャッキアップ工事を 1 日で行なうことができた。さらに、ベタ基礎の採用により免震装置個々に必要な免震基礎型枠が不要となり、施工性を向上させた。図 5.2 に免震層周辺詳細を示す。

図 5.3 には免震層の施工手順を、写真 5.2 にはジャッキアップの施工状況を示す。ジャッキアップの手順は、まず、架台スラブに開けられた 30cm 角の穴に油圧ジャッキを設置し、鉛直変位を管理しながら架台を徐々に持ち上げていく。次に、架台が免震装置の高さまで持ち上がった所で、鋼製のスペーサーによってスラブを仮に支え、その状態で免震装置を設置する。免震装置を取付けた後、スペーサーを外し、ジャッキダウンすることで作業を完了する。

写真 5.3 には免震層内部の施工状況を示す。免震層内の電気配線及び設備配管類は、地震時の架台スラブの変形に追従する必要がある。電気配線及び給湯・給水・ガス管の配管は、変形に追従できる余長を確保して配線、配管した。排水管は、塩ビのジャバラ管に余長を確保し、さらに、支持金物を取り付けることで排水に必要な勾配を確保した。



写真 5.1 建物全景

表 5.1 建物概要

用途	住宅(個人)		
延べ面積	164.17㎡	建築面積	103.22㎡
階数	地上2階		
建物高さ	7.053m	軒の高さ	5.744m
構造種別	木造(免震) 免震ゴム 22基		
基礎種別	直接基礎		

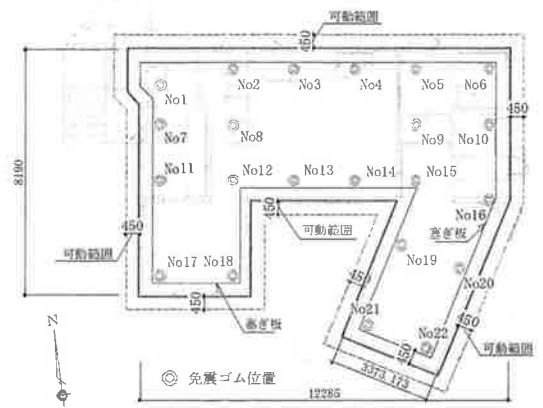


図 5.1 積層ゴム配置及び可動範囲

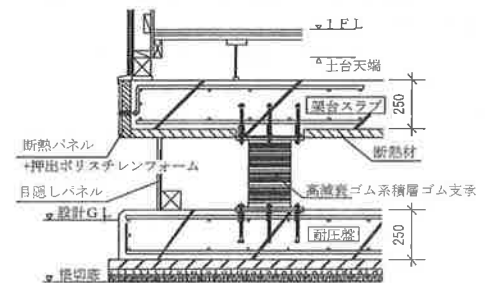


図 5.2 免震層周辺詳細図

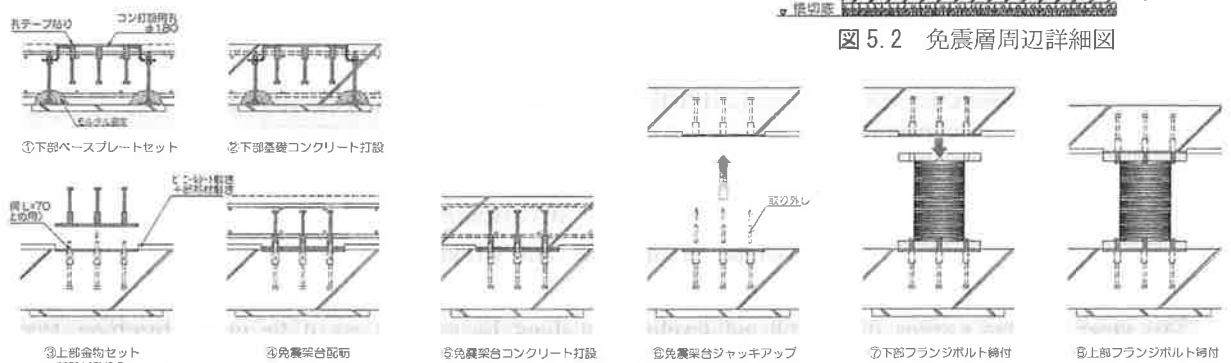
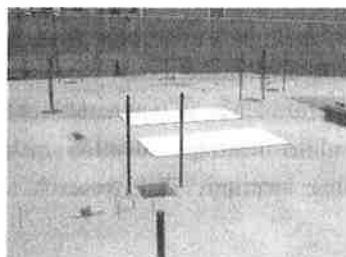
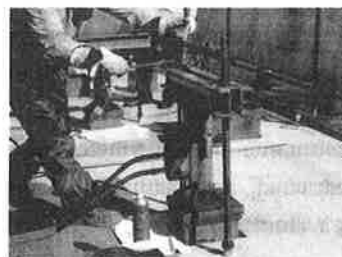


図 5.3 免震層施工手順



(a) 架台スラブ

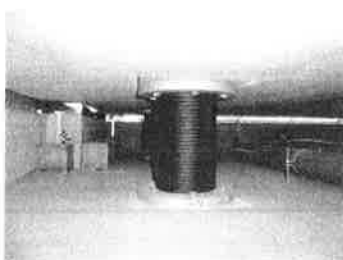


(b) 油圧ジャッキ設置状況



(c) ジャッキアップ状況

写真 5.2 ジャッキアップ施工状況



(a) 積層ゴム支持



(b) 電気配線



(c) 設備配管

写真 5.3 免震層内の施工状況

6. まとめ

開発した積層ゴム支承によって、これまで困難とされていた積層ゴム支承のみによる戸建住宅の免震構造を実現することが可能となった。また、住宅の規模や形状に依らず同じ積層ゴム支承を用いることが可能であり、大量生産可能な製品が入手できるよ

うになった。このことは、戸建免震住宅の普及に伴うコストの削減と信頼性の向上に大きな効果が期待できると考えられる。

今後、更なる性能向上を目指した研究開発を継続して行う予定である。

謝 辞

本研究開発は、武蔵工業大学および東洋ゴム工業株式会社との共同研究である。研究開発を進めるにあたり、多大なるご指導・ご協力を頂きましたことをここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 西村功：幾何学的非線形を考慮した曲げ-せん断部材の座屈後挙動-免震構造用積層ゴム支承の座屈安定性問題への適用-, 日本建築学会構造系論文集, 第 593 号, pp. 65-72, 2005 年 7 月
- 2) 西村功：積層ゴム支承の座屈荷重に与える幾何学的非線形の影響, 日本建築学会構造系論文集, 第 599 号, pp. 79-86, 2006 年 1 月
- 3) 西村功：中空断面を有する積層ゴム支承の曲げ剛性に関する解析的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 558 号, pp. 149-156, 2002 年 8 月

RESERCH AND DEVELOPMENT OF BASE ISOLATED HOUSES SUPPORTED BY LAMINATED RUBBER BEARINGS

S.Suzuki, M.Nemoto, M.Toyoshima,
K.Uchida, H.Takenaka, and S.Takeda

This paper reported a series of research and development about the practical use of the quake-absorbing structure system by laminated rubber bearings for wooden house. This research and development has aimed to pass the quake-absorbing structure of the wooden house only by laminated rubber bearings, and to achieve quake-absorbing system low-cost. Developed laminated rubber bearings is small excellent in stability. The basic performance is more than 20% equivalent damping ratio, equivalent period is two seconds at the time of the big earthquake, axial force over a long duration is 60kN. And tested it with using shaking table and identified performance of laminated rubber bearings. In addition we developed the construction method which used laminated rubber bearings. Adoption method is the lifting after the RC floor is constructed, and setting up laminated rubber bearings. This research and development was able to give result during a short term.