

小型分散式免震部材を用いた戸建て住宅免震工法の開発

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF SEISMIC ISOLATION SYSTEM FOR RESIDENCE BY SIMPLE STRUCTURE BEARING AND DAMPER

深澤協三 —*1 松本達治 —*2
京島弘之 —*3 米倉正剛 —*3
立花正彦 —*4

Kyozo Fukazawa —*1 Tatsuji Matsumoto —*2
Hiroyuki Kyoujima —*3 Masataka Yonekura —*3
Masahiko Tachibana —*4

キーワード：
免震, 住宅, 転がり支承, 高減衰ゴム, 加力実験, 施工実験

Keywords:
Base isolation, Residence, Bearing, Damper, Loading test, Execution test

This paper presents that development of a cost-effective method of seismic isolation system for residence. This particular construction method makes use of seismic isolators with compact and simple bearing and damping materials. With an RC structured base isolation story, the entire construction method, including installation of the seismic isolator, was possible using conventional construction techniques.

Development of this construction method required construction and structural experiments. Results from construction experiments proved that the method developed is satisfactory in producing the base isolation story, while structural testing proved that there is positive capacity for vertical loads in the base isolation story, and that satisfactory earthquake protection was present

1. はじめに

ここ数年、人的な被害を伴う規模の大きな地震が頻発している。築年数の新しい戸建て住宅では建物倒壊・大破に至る例は少ない一方、住宅内の家具・什器の転倒等によってケガをする例が増えている。また、ケガに至らなくとも割れたガラス・散乱した荷物等により、震災後住宅としての機能を果たせず、例えば避難所生活を余儀なくされる場合もある。

このような「震災」に対する対策として「免震構造」は非常に有効である。戸建て住宅の免震化は、個人の生命・財産を守るだけでなく、震災後の地域全体の避難・復旧への負担を低減する役目も果たしており、社会的急務といっても過言ではない。

しかし、現状では上記の通り様々なメリットをもたらす「免震構造」が、戸建て住宅に普及しているとはいえない。普及を阻む大きな理由として「コスト」面でのデメリットが大きいと言われている。そこで、戸建て免震の大幅なコストダウンを目標に、簡単な構造から成り、かつ廉価な免震部材を開発した。さらに、この免震部材に適合した免震層部分の施工方法も併せて開発した。開発に際しては免震部材の力学的特性把握のための加力実験、施工方法・施工精度確認のため施工実験、施工実験で構築した免震層を対象に上部建物重量による免震層 RC 造スラブ及び転がり支承の変形状の確認、地震時の転がり支承・減衰材の変形状、接合部応力伝達の確認のための構造実験（静的な鉛直・水平載荷実験）を行った。

本報は、本免震工法の概要及び上記の各実験結果について報告するものである。

2. 免震工法概要

本免震工法は、免震部材には図1に示す「転がり支承」+「減衰材・復元材（高減衰ゴム、以下「減衰材」と略称）」を用い、これら免震部材上に図2に示すように RC 造スラブを設ける方式である。低コストを追求しながらも、RC 造スラブ方式とした理由は、1)重量を大きくしてトリガー荷重(減衰材降伏前の初期剛性の範囲となる荷重)を確保し、さらに建物全体を低重心化することにより風・地震荷重に対する安定性を高める。2)架台部分の耐久性の確保とメン

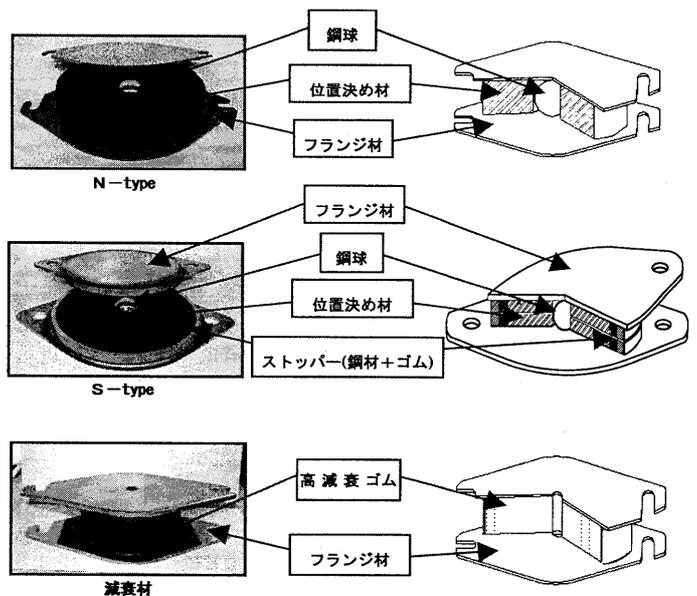


図1. 免震部材構造概要

*1 ㈱日本建設業経営協会中央技術研究所 工博
(〒104-0032 中央区八丁堀2-5-1東京建設会館3階)

*2 SRI ハイブリッド㈱ 工博

*3 共立建設㈱

*4 東京電機大学工学部建築学科 教授・工博

*1 JARGC, Central Research Institute for Construction Technology, Dr. Eng.

*2 SRI Hybrid CO., LTD., Dr. Eng.

*3 KYORITSU Construction CO., LTD.

*4 Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Eng., Tokyo Denki Univ., Dr. Eng.

テナンスフリー化、3)間取りの変更 (=柱・壁位置の変更) への適応性確保 (設計時及び将来の増改築)、によるものである。

本工法で用いる免震部材及び施工方法の概要を以下に示す。

①免震部材: 転がり支承は、鋼球(ベアリング等に用いる規格品)に高硬度ステンレス板(材質:SUS304、硬度 HRC25以上)を上下に配した極めて単純な構造である(なお、鋼球の廻りにはダストカバー兼輸送・施工中鋼球のずれ留めのためのスポンジ材が取り付け)。この転がり支承は2タイプから成り、1つは設計で想定する以上の水平変形に対してストッパー機能を持たせるために、上下フランジ材に円筒形のステンレス材を溶接したタイプ(以下Sタイプ)、上下フランジ材がフラットなタイプ(以下Nタイプ)である。Sタイプは主に建物四隅に配置することとしている。両タイプとも簡便に製造が可能で、コストダウンが図られている。なお、これら転がり支承の最大支持荷重は長期 29.4kN、短期 58.8kNであり、上載荷重の多寡に応じて転がり支承を多数個分散して配置する方式を採用している。

減衰材は円筒形の高減衰ゴムの上下にステンレス板(材質:SUS304)を加硫接着し、高減衰ゴム外周を被覆ゴムにて保護する簡単な構造である(被覆ゴム込みの直径 108.5mm、高減衰ゴム高さ H=40,60,80mm の3タイプ)。減衰材の水平限界変形は170mm(H=40mm),240mm(H=60mm),320mm(H=80mm)である。H=40mmタイプでは限界変形が170mmと小さいが、本免震工法では極めて稀な地震動に対してはストッパー(Sタイプ転がり支承)による変形制限を前提としている。

②施工方法: 施工手順は図2に示す通りである。転がり支承は写真1に示すように、上下2枚亜鉛メッキ鋼板 PL4.5mm (以下取付プレート)に固定されて基礎面に据え付けられる。この上下の取付プレートは、コ字形の金物(以下固定金物。PL3.2mmをプレス加工)により固定されている。固定金物は転がり支承の上下フランジ材間の平行度を保つ役目と、施工荷重(主にスラブコンクリート打設時の荷重)を支持する役目を担う。また、基礎と免震部材の接合は、基礎施工時にアンカーボルトを打ち込む方法と後施工アンカーボルトによる方法の両方が可能である。なお、減衰材は写真2に示すように施工省力化のため上下取付プレート

(PL4.5mm)介して2個1組にまとめて配置する(但し、減衰材には施工荷重を負担させない)。続いて、転がり支承、減衰材上部に束柱(免震層にメンテナンス及び配管のために最低限必要なクリアランス・約40cmを確保するために高さ確保のため束柱を設ける)のコンクリートを打設する。強度発現後に床板型枠に用いる捨て型枠(デッキプレート)敷設用のアングル材を束柱間に掛け渡す。各通りにデッキプレート敷設した後は通常の方法で床板を施工する。なお、上部建物に必要なアンカーボルト類も床板コンクリート打設時に打ち込む。以降の上部建物の施工は通常の方法による。さらに、上部建物施工後(竣工直前)に、各転がり支承に取り付けた固定金物を撤去して施工が完了する。

上記の通り、床板型枠にはデッキプレートを用い、さらに施工荷重を各転がり支承に取り付けた固定金物に支持させることにより、支保工の設置及び型枠の撤去が不要となった。その結果、免震層のクリアランスが型枠・支保工からの制限を逃れることが可能になった(通常60cm以上は必要となる。本工法ではメンテナンスに必要な40cmに抑えることが出来る)。さらに、型枠・支保工の配置・撤去等の施工手間の省力化と同時に狭隘な空間での無理な型枠・支保工解体作業を無くして施工の安全性を高めている。

3. 免震部材概要

3.1 免震部材の仕様

①転がり支承: 本免震工法では転がり支承はNタイプ(標準型)、Sタイプ(ストッパー付き)の2タイプを用いる。両タイプとも鋼球が上下フランジ材間で転がる構造である。また、Sタイプは上下フランジ外周部にストッパー用円筒形のリングを溶接したものである。両タイプの形状・寸法及び材質を図3に示す。

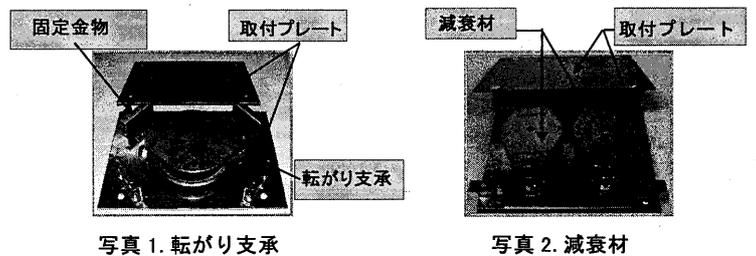


写真1. 転がり支承

写真2. 減衰材

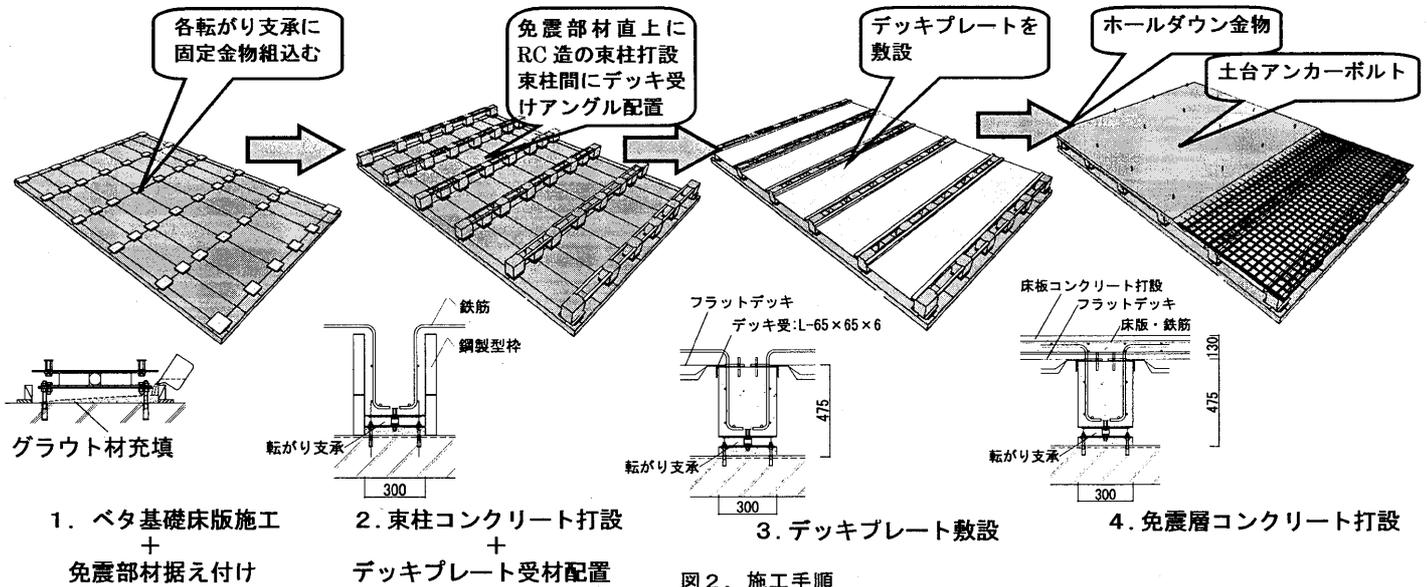


図2. 施工手順

②減衰材：減衰材は円筒形の高減衰ゴムの上下にステンレス板を加硫接着し、高減衰ゴム外周を被覆ゴムにて保護する構造である。減衰材の形状・寸法及び材質を図4に示す。

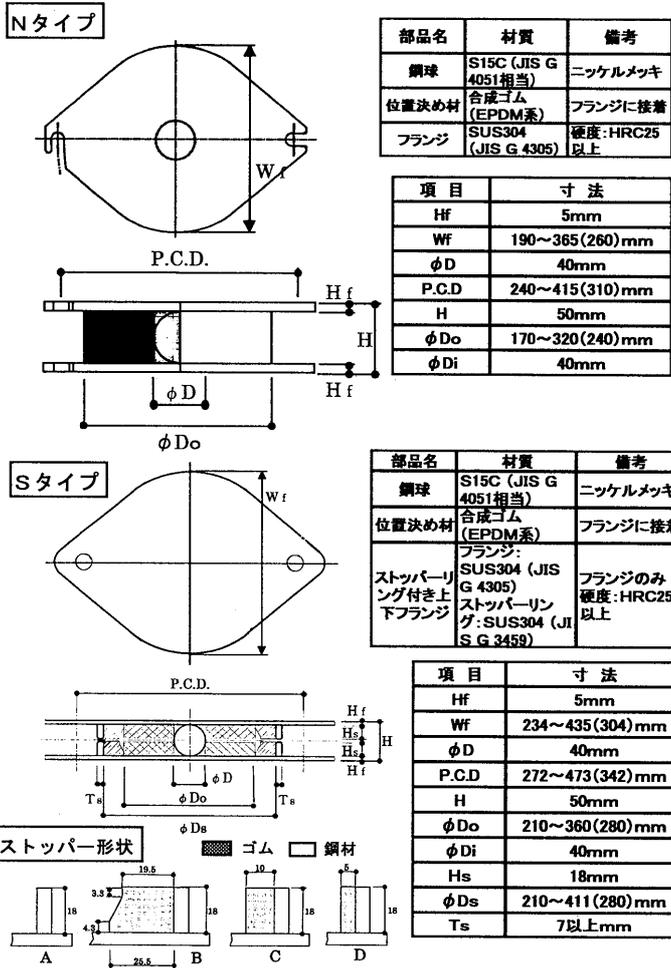


図3. 転がり支承形状寸法及び材質

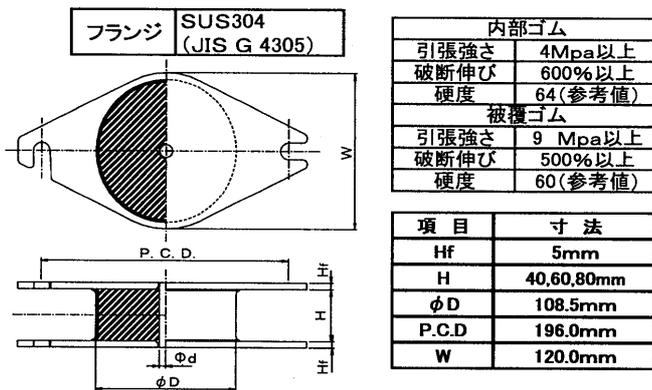


図4. 減衰材形状寸法及び材質

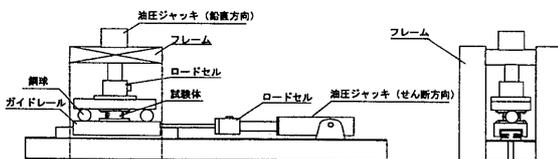


図5. 加力装置

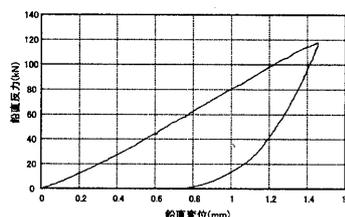


図6. 転がり支承・鉛直加力実験結果

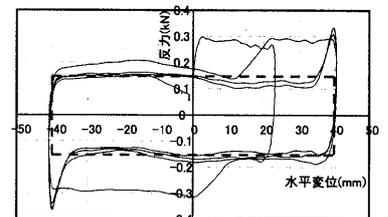


図7. 転がり支承・水平加力実験結果

3.2 実験概要

実験計画を表1に示す。転がり支承では「鉛直加力実験」「水平加力実験」を行った(Sタイプについてはストッパー作動時の水平加力実験のみを示す)。減衰材では「水平加力実験」「限界水平変形実験」を行った。これらの実験は、図5に示す2軸試験機(最大圧縮力:98kN,最大せん断力 49kN,最大ストローク±250mm)で行った。

表1.実験計画

実験対象	実験種別	試験体	試験条件
転がり支承	鉛直加力	Nタイプ	単調載荷 加力速度 1.0mm/s
	水平加力	Nタイプ	鉛直荷重14.7kN 正負繰返し(3サイクル) 加振周期 10s
Sタイプ (ストッパー:A~Dタイプ)		鉛直荷重14.7kN 正負繰返し(3サイクル) 加振周期 10s ストッパー作動まで変形	
減衰材	水平加力	H=40,60,80mm	$\gamma = \pm 100\% \cdot 4$ サイクル 加振周期 10s 軸変形拘束
	限界水平変形	H=40,60,80mm	単調載荷 加力速度 12.6mm/s 軸変形拘束

3.3 実験結果

①転がり支承：鉛直加力実験結果を図6に示す。最大荷重118kNまで剛性低下を生じない。なお、0.8mm弱の残留変形が生じるが実験では長期最大荷重の約4倍まで載荷したため、フランジ材に窪み(=塑性変形)が生じたためである。

水平加力実験結果を図7に示す。第1サイクル目は水平荷重が大きい2サイクル目以降は履歴ループが安定する。また、同図中に示すように、実験で得られた荷重～変形曲線は剛塑性形ループ(摩擦係数0.008相当)でモデル化が可能である。

Sタイプストッパー(代表例としてストッパーCタイプ)作動時の荷重～変形関係は図8に示す通りで、 $\delta = 350$ mm付近より急激に反力が立ち上がり安定的にストッパー作動していることが判る。②減衰材：水平加力実験結果(代表例としてH=60mm)を図9に示す。第1サイクル目は水平荷重が大きい2サイクル目以降は履歴ループ形状が安定し、バイリニア型のループ形状を示す。また、 $\gamma = 100\%$ での履歴ループの等価粘性減衰定数は23%(H=40mm)、25%(H=60mm,80mm)であった。

限界水平変形実験結果(代表例として高さ60mm)を図10に示す。 $\delta = 100$ mm($\gamma = 167\%$)付近まではほぼ一定の剛性を示し、それ以降の変形ではハードニングが生じる。 $\delta = 200$ mm($\gamma = 333\%$)付近から剛性低下が始まり、 $\delta = 250$ mm($\gamma = 417\%$)付近(試験体によりバラツキがある)から負勾配を示す。これらの結果から、限界変形量を170mm(H=40mm, $\gamma = 425\%$)、240mm(H=60mm, $\gamma = 400\%$)、320mm(H=80mm, $\gamma = 400\%$)としている。

②**施工精度**：免震部材据え付け施工精度の基準値と本施工実験で得られた実測値の比較を表3に示す。なお、実測値はスラブコンクリート打設後のものである(=施工荷重を固定金物で負担させた状態)。免震部材の相互間の距離、高さ、傾きとも基準値以内で施工できることを確認できた

5. 構造実験

5.1 実験概要

①**試験体**：施工実験で構築した免震層を対象に実験を行った。

②**実験方法**：鉛直載荷実験は写真4に示すように免震層スラブ上に鉄骨梁を渡しその上にコンクリートブロック(約 5kN×4 個+約 10kN×10 個。重量は積載時にロードセルで測定)を順次積載して鉛直荷重を作用させた。積載荷重は126kNでスラブ自重119kNと合わせて総重量は245kNである。また、支承の最大軸力(計算値)は27kNである。測定項目は、1)転がり支承の鉛直・回転変形(4箇所)、スラブのたわみ(5点×2通り)である。

水平載荷実験では、上記鉛直載荷実験で免震層上に載荷した鉛直力を作用させた状態で水平方向への加力を行う。実験は「減衰材なし(=転がり支承のみ)」、「減衰材あり」の2ケースについて行う。加力は図14に示すように、実験場の土間スラブに固定したオイルジャッキにより免震層にせん断力を作用させる。加力速度は10mm/sとした。載荷パターンを図15に示す。減衰材なしでは $\delta=200\text{mm}$ まで単調載荷後、 $\delta=\pm 75\text{mm}$ の正負繰返し載荷、減衰材ありでは載荷パターン $\delta=\pm 50\text{mm}$ の正負繰返し載荷とする(実験装置能力上減衰材ありでは $\delta=\pm 50\text{mm}$ まで載荷となった)。測定項目は免震層水平変形(スラブの左右2点で測定)である。

5.2 実験結果

①**鉛直載荷実験**：鉛直荷重載荷に伴う免震層スラブ及び転がり支承・減衰材接合部のひび割れ発生は認められなかった。

東柱部分の鉛直変形(δv)及び回転変形(θ)を図16に示す。 δv 、 θ とも荷重の大きい中通り部分の変形が大きい。 $\delta v < 0.2\text{mm}$ 、 $\theta < 1/600\text{rad}$ であり十分小さな変形に収まっている。所定荷重時のスラブのたわみを図17に示す。スパン中央部のたわみが最も大きく、たわみ量は0.3mm以内に収まっている。

②**水平載荷実験**：減衰材なし・ありの載荷とも水平加力に伴う免震層スラブ及び転がり支承・減衰材接合部のひび割れ発生は認められなかった。

減衰材なしの荷重～変形曲線(代表例として長辺方向)を図18に示す。第1サイクル目の荷重が大きい、2サイクル目以降はほぼ同一履歴ループを示す。また、除荷→逆側への載荷途中の原点($\delta=0\text{mm}$)付近で荷重低下(ループ形状が凹形となる)部分がある。これは写真6に示すように、鉛直力と水平力載荷に伴い上下フランジ材に鋼球の条痕が出来て、その条痕鋼球がトレスしながら動くためと考えられる。また、同図中に示すように、水平荷重の実験値は計算値(重量×摩擦係数0.008)よりも大きく、 $\delta=40\text{mm}$ (本転がり支承基準変形)では約1.6倍であった。なお、実地震では今回の実験のように条痕上をトレスするような応答変形が生じることは稀であり、実際は条痕を付けながらフランジ材を転がることになる。この場合は図18中の第1サイクル目の荷重～変形に近いものとなるが、後に示すように免震層の復元力は

減衰材が支配的であり影響は少ないと考えられる(履歴減衰が大きくなるので免震層の応答変位量は減少すると考えられる)。

減衰材ありの荷重～変形曲線を図19に示す。載荷回数の影響

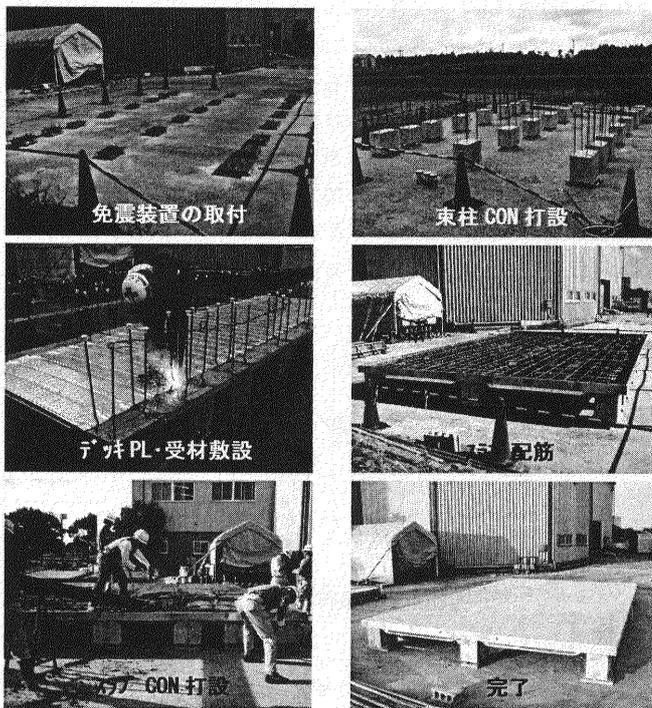


写真3. 施工状況

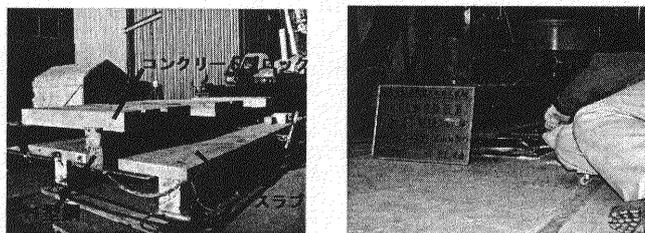


写真4. 建物重量上載状況

写真5. 固定金物取外し

表3. 施工精度・基準値と実測値の比較

管理・検査項目	管理・検査方法	管理・検査時期・回数	管理・検査基準値	スラブ打設後実測値
免震部材取付プレート 天端四隅レベル	オートレベル等による測定	免震部材設置後、型枠建込み前	傾き1/100以内	傾き最大値: 1/100
免震部材設置位置制度 (平面)	金属製直尺、スケール等で測定	免震部材設置後、型枠建込み前	通り芯からの部材芯のずれ±3mm以内	1部材芯のずれ最大値3mm 部材相互間のずれ最大値5mm

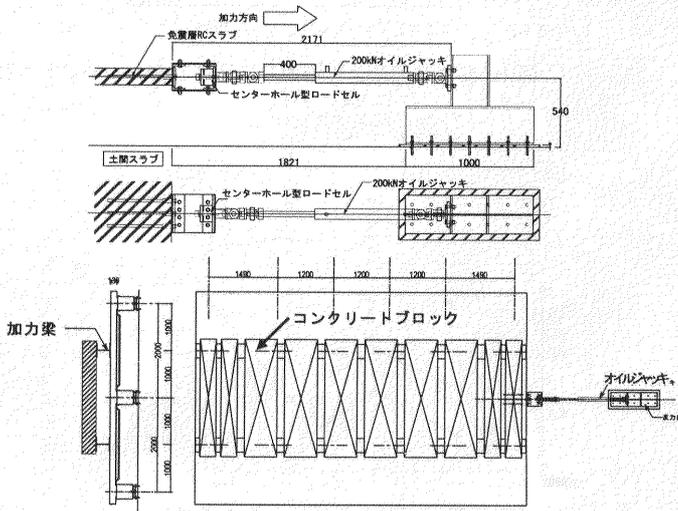


図14. 水平載荷実験装置

が認められ、第3サイクル目以降でループ形状が安定する。履歴ループ形状は大略ではバイリニアーループの形状を示すが、減衰材なしの場合と同様に原点付近で履歴ループがくびれる形状を示す。これは、「減衰材なし」で述べたように、鋼球がフランジ材の条痕を横切るためと考えられる(加力装置の能力上剛性が負勾配な部分では加力は不安定になる影響も考えられる)。なお、このループのくびれによる地震応答性状への影響は今後さらに検討を行う予定である。また、同図中に示す通り実験値は計算値に対して若干低い剛性を示す。これは、主に加力速度の影響であると推定される。 $\delta=50\text{mm}$ での減衰材の荷重分担率は74%であり、減衰材が免震層復元力に対して支配的であることが判る。

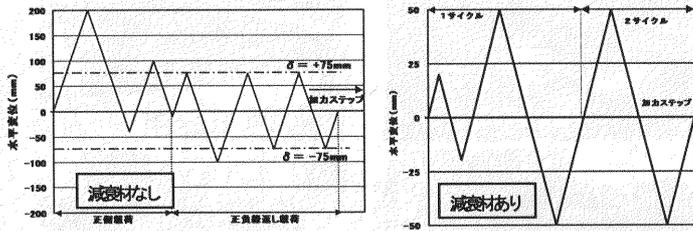


図 15. 荷重パターン

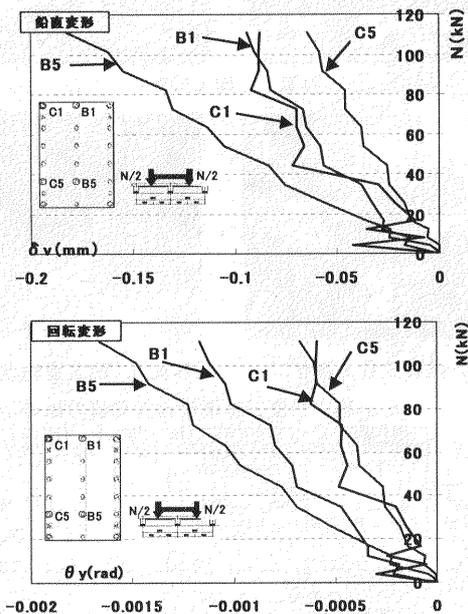


図 16. 鉛直荷重による転がり支承の変形

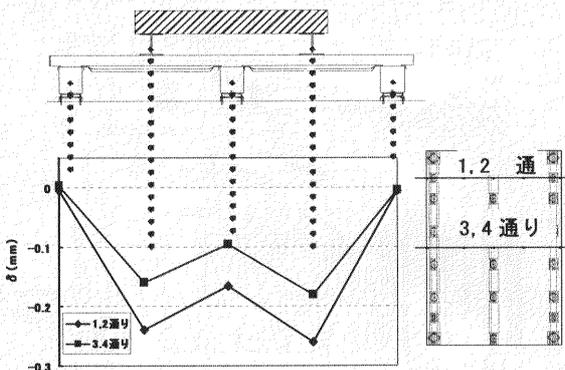


図 17. 鉛直荷重によるスラブたわみ

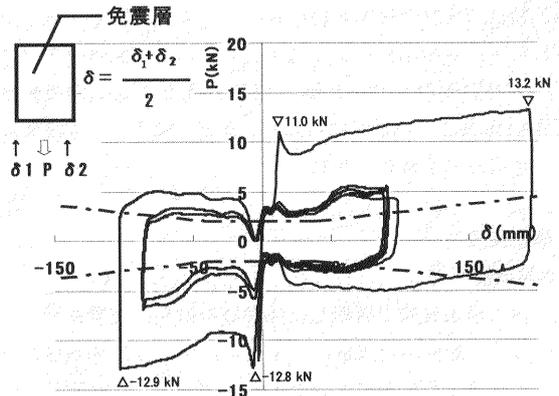


図 18. 水平荷重実験結果(減衰材なし)

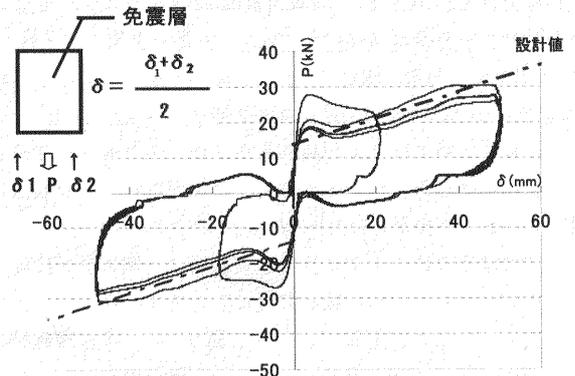


図 19. 水平荷重実験結果(減衰材あり)

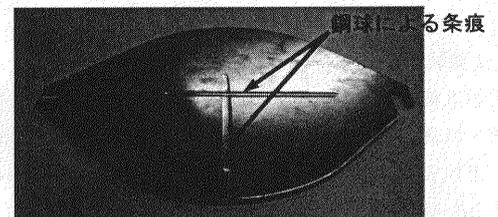


写真 6. 転がり支承フランジプレートの条痕

6. まとめ

戸建て住宅への免震構造の普及を目指し、簡単な構造の免震部材を用いた免震工法を開発した。施工実験及び構造実験を行い下記の点が明らかとなった。

- 1) 転がり支承については必要な鉛直荷重支持能力(98 kN 以上)が確認できた。水平方向の荷重～変形関係では、単体実験は設計値(摩擦係数 0.008)通りであったが、免震層全体では設計値(摩擦係数 0.008)より約 1.6 倍の荷重を示した。
- 2) 減衰材は安定したバイリニアーループを示し、等価減衰定数は 23～25%である。また、 $\gamma=400\%$ 以上の水平変形能力を有する。
- 3) 基礎～免震部材据え付け～スラブコンクリート打設までの施工手順は妥当であり、必要な施工精度も確保されている。
- 4) 上部建物相当の鉛直荷重及び水平荷重に対して、免震層スラブ、支承・減衰材接合部にひび割れ等の損傷は発生しない。
- 5) フランジ材には鋼球による条痕が生じる。この条痕の影響により水平方向の履歴ループにくびれが生じる。履歴ループのくびれが応答性状に与える影響については今後検討予定である。

[2005年4月20日原稿受理 2005年7月22日採用決定]