

高減衰ゴムを用いた木造戸建て住宅用 パッシブダンパーの開発

古田 智基¹

¹第一工業大学教授 建築デザイン学科 (〒899-4395 鹿児島県霧島市国分中央1-10-2)
E-mail:t-furuta@daiichi-koudai.ac.jp

DEVELOPMENT OF PASSIVE DAMPER USING HIGH DAMPING RUBBER FOR WOODEN HOUSES

Tomoki FURUTA

¹Professor, Dept. of Architecture and Design, Daiichi Univ. Institute of Technology
(Kokubu-Chuo 1-10-2, Kirishima-shi, Kagoshima-ken 899-4395, Japan)
E-mail: t-furuta@daiichi-koudai.ac.jp

Abstract: New passive damper device with high damping rubber was developed. Static shear loading test and shaking table test of a wood frame which the damper device was installed were conducted. The initial shear stiffness was higher than the one of conventional shear resisting element, such as plywood or wood brace. The hysteresis loop of the wood frame with the damper device was stable even under cyclic load. Moreover, a structural model of a wood frame with the damper device for earthquake response analysis was constructed. It was found that the simulated response motion of the wood frames with the dampers was in good agreement with the measured response of them obtained from the shaking table test. In the analysis of various combinations of conventional shear resisting element and the damper device, it was also found that the more damper is installed, the less response displacement become. This result is based on the feature of the high damping rubber used for this damper.

Keywords: Passive damper, High damping rubber, Wooden house, Shaking table test, Earthquake response analysis

1. はじめに

近年、数百年に一度といったごく稀な大地震に対しても、建物の損傷を最小限にとどめ、建物の使用を継続できるよう、高い耐震性能の住宅が求められるようになってきている。そこで、木造戸建住宅の大多数を占める在来軸組工法を対象とし、高減衰ゴムを使用したパッシブダンパーを開発した。この装置は、免震の積層ゴム支承のために開発され、用いられてきた高減衰ゴムを、外径 48.6mm、厚さ 4.5mm の鋼製シリンダーとその内部に挿入された直径 27.2mm の鋼製ロッドとの間のスペースに充填した筒型のダンパーである。これを筋かい材として軸組の内側に取り付けることで、水平力に抵抗させようとするものである。既存のダンパーでは流体が用いられるが、その代わりに変位依存型の高減衰ゴムを用いることで、ダンパーの構造が単純かつ軽量にな

り、低コストとメンテナンスフリーを実現することができる。

本ダンパーは変位依存型の高減衰ゴムを用いているために速度依存性は低く、荷重変形曲線が紡錘型で靱性が高いなど、木造の復元力特性に似た特性を持っている。このため、木造に取り付けることを前提に、本ダンパーを「高剛性で靱性の高い耐力部材」として評価することを試みた。本ダンパーの性能を検証する方法として、このダンパーおよびダンパーを取り付けた軸組の静的加力実験を実施し、これらのデータを用いた地震応答解析により、振動台実験の結果を推定できるかを検討した。さらに、在来軸組工法の木造住宅に本ダンパーと既存の耐力壁を併用する場合の最適な組み合わせについて地震応答解析による検討を行った。なお本報告では、振動台の加振能力の制限により、変形角 1/120rad 程度までの

性能の検証を目的としており、それより大きな変形領域での性能については、別の機会に報告する。

2. 高減衰ゴムを用いた新ダンパーの基本性能と軸組へ設置方法

図1に高減衰ゴムを用いた本ダンパーの概要を示す。鋼製シリンダー（外径 48.6mm、内径 39.6mm、長さ 385mm）の内部には鋼製ロッド（直径 27.2mm）が挿入されており、このシリンダーとロッドとの間の円筒状のスペース（6.2mm）にせん断弾性係数（せん断ひずみ 100%時のせん断応力度）が 0.8N/mm² の高減衰ゴムが充填されている。高減衰ゴムの基本特性を表1に、各特性値の温度依存性を表2示す。静的加力実験により得られた、ダンパー軸力とシリンダー-ロッド間の相対変位（以下、ダンパー変位と表記する）の関係を図2に示す。これは、ダンパー単体を対象に約 15℃の室内で行った、軸方向加力実験の結果の一例である。1 回目のループでは耐力がやや高く、その後の繰り返し加力に対しては、若干耐力が低下するが、安定した履歴特性を示す。

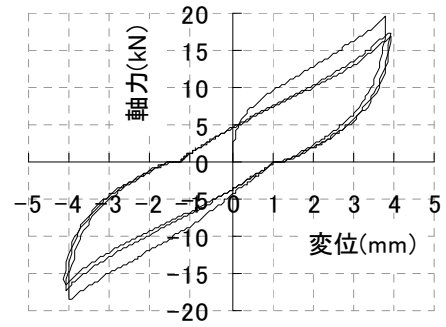


図2 ダンパーの軸力とシリンダー-ロッド間の相対変位関係

このダンパーは、軸組に設置する際、2本のダンパーのシリンダー部を延長し、図3のように、K型に配置する。延長したシリンダーの先端部やロッドの後端部は、図4のように、羽子板状の金物を介して、柱端部や柱中間にビス留めした筋かい金物に M20 の高力ボルトで摩擦接合される。さらに、このダンパーの効果を最大限に発揮させるため、柱と土台および横架材の仕口には、ほぞを貫通させる穴を有する鋼製のめり込み防止プレートを設置して、柱や筋かい金物が土台等にめり込むことを抑制している。また、柱や桁の浮上りを防止するタイロッドとして、土台や横架材を貫通し、柱に沿って M16 の全ネジ棒を設置している。このタイロッドは、柱端部や柱中間の筋かい金物の鉛直方向の挙動も拘束する。

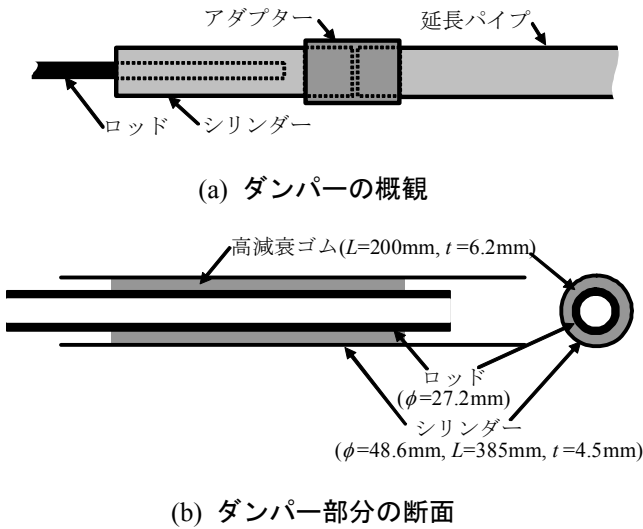


図1 新開発の高減衰ゴムを用いた筒型パッシブダンパー

表1 高減衰ゴムの基本特性 (20℃時)

せん断弾性係数 G(N/mm ²)	等価粘性減衰定数 H _{eq} (%)	破断伸び率 E _b (%)
0.80	22.9	600 以上

表2 高減衰ゴムの温度依存性 (20℃±20℃)

せん断弾性係数 G の変化率	等価減衰定数 H _{eq} の変化率
±20%以内	+20%～-5%以内

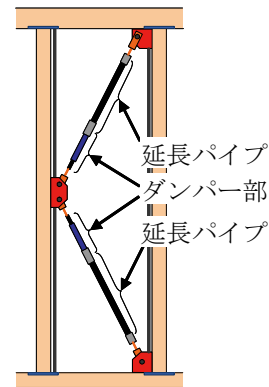


図3 軸組へのダンパーの設置方法

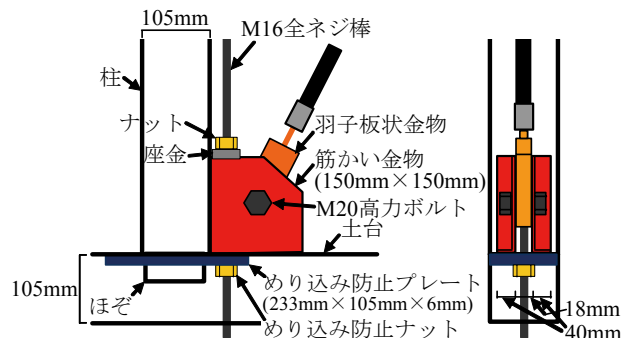


図4 軸組への取り付け方法詳細

3. 静的せん断加力実験

静的せん断加力実験用の軸組の壁長は 2P (1820mm) であり, 1P (910mm) 間隔で柱を 3 本有している。柱と土台は 105mm 角のツガ, 桁は 180mm×105mm のベイマツで, 土台と桁の芯々間距離は 2792.5mm である。仕口については短ほぞ差しとした。この軸組に対し, 2 本のダンパーを K 型に設置して, みかけの層間変形角 1/300rad, 1/200rad, 1/150rad において, 正負 2 回ずつ桁に繰り返し水平力を載荷した。なお, この試験体の 2 本の外柱直上には 4kN ずつ, 中柱の直上には 8kN の錘を載荷している。これは, 後述する振動台実験の試験体における, 柱 1 本あたりの負担鉛直荷重と同じにするためである。

この軸組にダンパーを設置するに先立ち, 軸組の水平耐力を把握するため, 軸組のみでの加力を行った。鉛直荷重を載荷した状態での軸組のみの水平剛性は 80kN/rad (0.029kN/mm) 程度であった。また, ダンパー端部を軸組と接続するための筋かい金物を, 軸組の仕口部に取り付けると, 土台や横架材に対する柱の回転剛性を高める効果があり, 筋かい金物 1 個につき, 30kN/rad (0.011kN/mm) 程度の水平剛性の増加が認められた。

図 5 にダンパーを設置した軸組の水平耐力と層間変位の関係を, 図 6 にダンパーに作用する軸力と変位の関係を示す。ダンパーに作用する軸力は, ダンパーのロッドに貼付したひずみゲージの計測値から計算によって求めた。また, 図 7 は, ダンパーの軸力とダンパー端部の接合部における変位との関係である。ダンパー端部の接合部における変位は, ダンパーの両端が取り付く軸組上の 2 点間の変位からダンパーの変位を差し引いて求めた。

加力を行った 1/150rad までの間には, 若干の剛性低下が認められるものの, 繰り返し加力による水平剛性の低下は顕著ではなかった。1/200rad 時の水平耐力は, 正側と負側の平均で 7.6kN であり, このときの層の割線剛性は 0.55kN/mm である。上下 2 本のダンパーには平均 1.6mm (ゴム厚の 25%) の変位と 13.1kN の軸力が生じていた。ダンパーに生じた変位は, 高減衰ゴムの厚さ (6.2mm) に対して小さく, この程度の変形角に対しては, ダンパーは安定した挙動であるといえる。ダンパーの軸力に対する水平耐力の比は 0.58 であり, ダンパーが発生した力のおよそ 60%を水平耐力として有効に利用できていることが分かる。なお, ダンパー端部の接合部の剛性は, ダンパーの両端 2 箇所あたり, 15kN/mm 程度である。

ダンパーを K 型に配置した場合, 上下ダンパーの軸力の絶対値に大きな差が生じると, ダンパーが取り付く柱の中央に水平せん断力が作用して, 柱が折損する危険性があるが, このダンパーの上下ダンパーの軸力の水平方向成分力はほぼ釣り合っており, 柱への負担は限定的である。

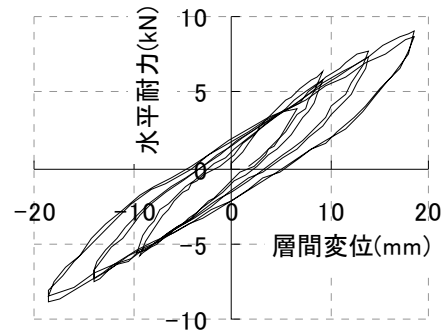
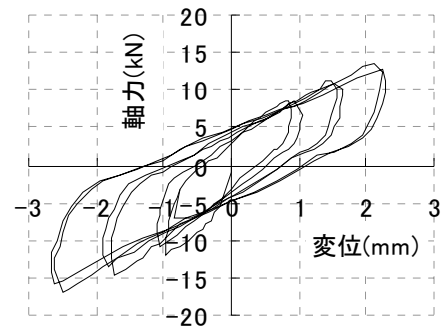
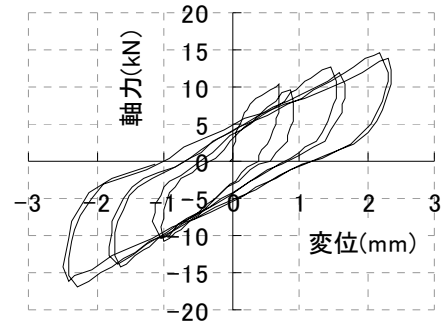


図 5 ダンパーを設置した軸組の水平耐力-層間変位関係

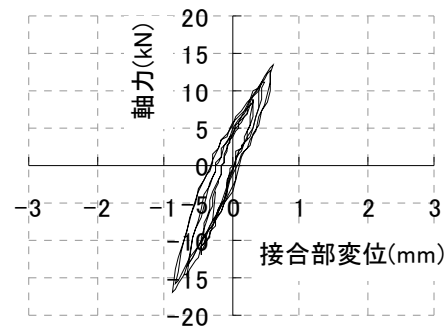


(a) 上側ダンパー

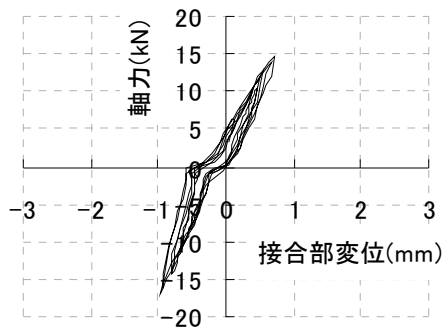


(b) 下側ダンパー

図 6 ダンパーの軸力-変位関係



(a) 上側ダンパー



(b) 下側ダンパー

図7 ダンパーの軸力-接合部変位関係

4. 振動台実験

図8に示す軸組に本ダンパーを設置し、振動台実験を実施した。加振方向に3構面からなるが、水平抵抗要素を設置するのは、錘の荷重を主として負担する中央の構面のみである。柱および土台は105mm角のツガ、桁は180mm×105mmのベイマツであり、仕口は短ほぞ差しである。錘および試験体の上側1/2の重量の合計は24.5kNである。加振は1方向のみであり、入力波としては、パルス波の1mm、2mmおよび3mm、建築基準法告示に示された応答スペクトルを有する人工地震波（1968HachinoheNS位相、以降告示波と記す）の最大加速度の10%、20%および40%、1995年兵庫県南部地震における神戸海洋気象台で観測された南北方向の地震波（以降JMA Kobe波と記す）の最大加速度の10%、20%および40%を順次入力した。告示波とJMA Kobe波での最大の入力倍率を40%としたのは、振動台の容量制限による。試験体頂部での加速度や層間変位、ダンパーの変位等を計測した。

ダンパーを設置した軸組の粘性減衰定数と固有周期を、パルス3mm波入力時の応答変位の時刻歴から計算すると、減衰定数は4.4%であり、固有周期については0.28秒であることが分った。なお、このときの最大の層間変位は、2.7mm(1/1000rad)であり、これより大きな層間変位においては、減衰定数、固有周期ともにこれより大きな値になると考えられる。

図9にJMA Kobe40%波入力時における、応答加速度-層間変位関係を示す。加速度は、試験体の頂部で計測されたものである。振動台上で計測された最大加速度は239galであり、最大層間変位は20mm(およそ1/140rad)であった。若干の剛性低下はみられるが、比較的安定した履歴ループであるといえる。応答加速度に試験体重量を乗じて得られた最大層せん断力は10.9kNであり、最大層間変位時の割線剛性は0.54kN/mmとなる。構造用合板(ラワンJAS特類1級、9mm厚、3×9版、N50@150mm)を張った場合についても同様の加振を行ったが、JMA Kobe40%波の入力時で最大層間変位は47mm(およそ1/60rad)、最大層せん断力は9.8kN、割線剛性は0.21kN/mmで

あることを考慮すると、耐力要素としての本ダンパーの性能は、構造用合板に比べて2倍以上の剛性があり、JMA Kobe40%波入力時の応答変位は1/2以下となっている。

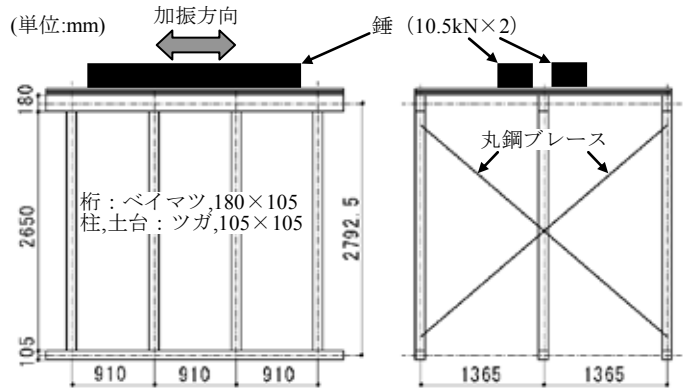


図8 振動台実験試験体の軸組

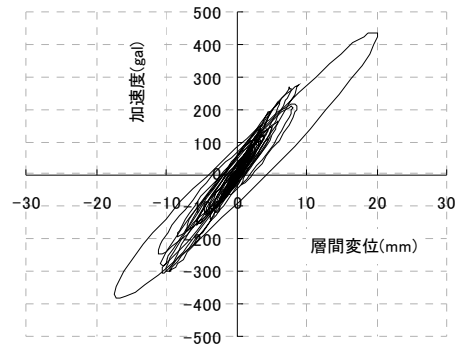


図9 応答加速度-層間変位関係(振動台実験)

5. 地震応答解析

これまで、本ダンパーを設置した軸組について、静的せん断加力実験と振動台実験によって、その性能の検証を行ってきた。ここでは、このダンパーを設置した軸組と、構造用合板耐力壁や筋かい耐力壁といった既存の耐力壁の解析モデルを作成し、既存耐力壁とこのダンパーを併用した場合の地震時の応答変位と応答加速度について検討する。

5.1 解析モデルとその検証

(1) ダンパーの解析モデル

図10に解析モデルを示す。図10中のダンパーの復元力特性を表す非線形バネは最大点指向型のトリリニアとし、解析モデルの各パラメータは、図6に示した静的加力実験時のダンパーの軸力-変位関係をもとに決定した。静的せん断加力実験時のダンパーの軸力-変位関係と解析モデルとの対応を図11に示す。なお、本ダンパーで用いた高減衰ゴムの剛性は、振動数に対する依存性が小さく、1Hzを基準に0.2Hz~3Hzにおける変化率は最大6%であることを別途行った素材試験により確認している。従って、静的実験をもとに決定したダンパーの解析モデルを

そのまま地震応答解析に適用することとする。図10のダンパー端部と軸組との間に設けた線形の接合部バネは、ダンパー端部と軸組との間の接合部の剛性を表現するためのもので、図7を参考に、ダンパーの両端それぞれ30kN/mmとした。さらに、軸組の剛性を表すバネは、静的せん断加力実験から得られた、「軸組のみの水平剛性80kN/rad (0.029kN/mm)」と、「ダンパー端部を軸組と接続するための筋かい金物による、柱端部の回転拘束による剛性(1個につき30kN/rad (0.011kN/mm))」の和としている。図12にダンパーを設置した軸組の層の増分解析結果を示す。図10の解析モデルに対して、振動台実験時と同じ重量(24.5kN)を設定し、モデル全体の粘性減衰として瞬間剛性比例型で5%を与えて地震応答解析を行い、振動台実験の結果と比較したところ、図13のように、応答変位や応答加速度は良好な対応であり、静的実験結果をもとに設定した各部の復元力特性モデルは概ね適切と考えられる。

(2) 既存耐力壁の解析モデル

既存耐力壁として、構造用合板耐力壁と筋かい耐力壁に対して、木造用の4折れ線NCLモデルを用い、静的せん断加力実験の結果にフィッティングさせるように復元力特性のパラメータを決定した。実験に用いた試験体の仕様は標準的なものであり、表3にその仕様を示す。図14と図15に構造用合板耐力壁および筋かい耐力壁の実験から得られた復元力と作成した解析モデルを示す。解析モデルは、特に初期剛性と最大耐力を実験結果に近似させるように設定した。

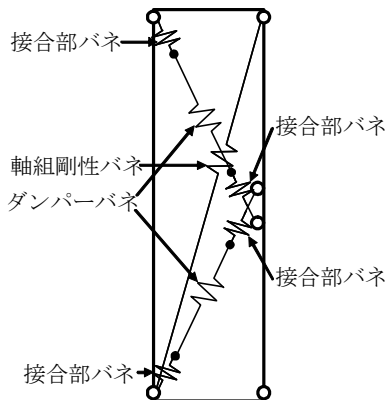
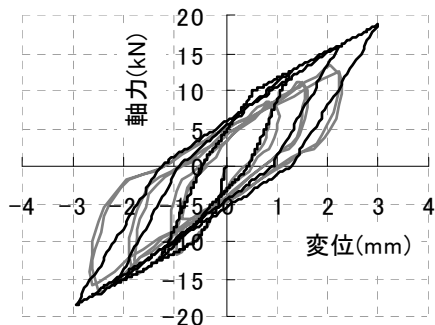
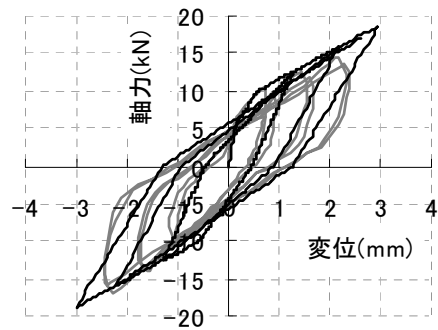


図10 ダンパーを設置した軸組の解析モデル



(a) 上側ダンパー



(b) 下側ダンパー

図11 ダンパーの復元力特性モデル (灰色線：実験結果，黒線：解析モデル)

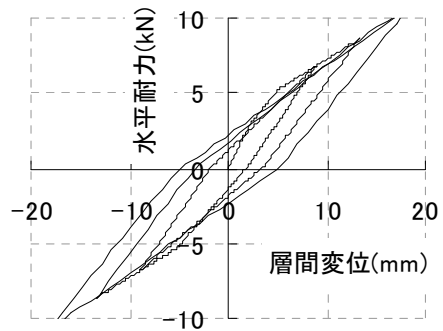
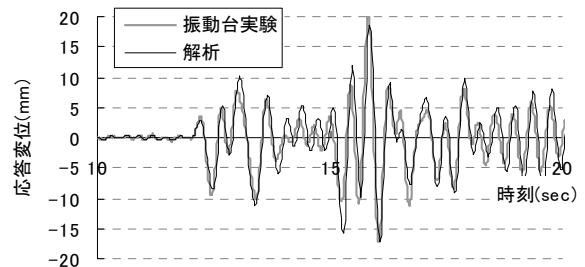
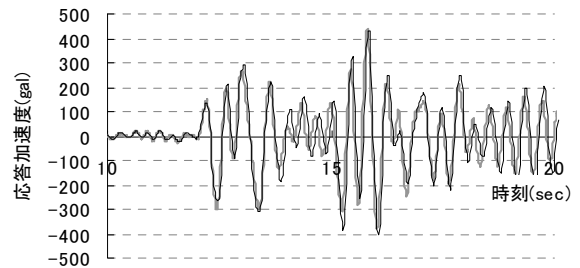


図12 増分解析による水平耐力-層間変位関係



(a) 応答変位の時刻歴

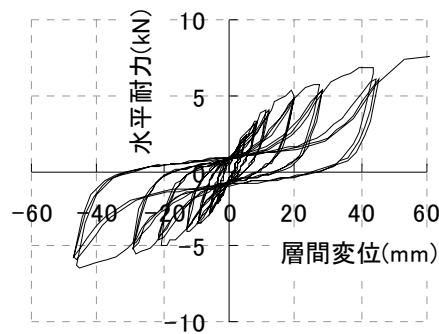


(b) 応答加速度の時刻歴

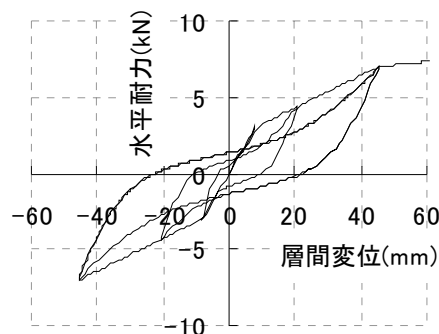
図13 振動台実験結果と解析結果との比較

表3 既存耐力壁の試験体仕様

種類	壁長	使用材料,接合具
構造用合板耐力壁	910mm	合板：12mm厚,2級,ヒノキ構造用合板 接合具：N50@150mm
筋かい耐力壁 (片筋かい)	910mm	筋かい材：ツガ,90mm×45mm 接合金物：ボックス型2倍用筋かい金物

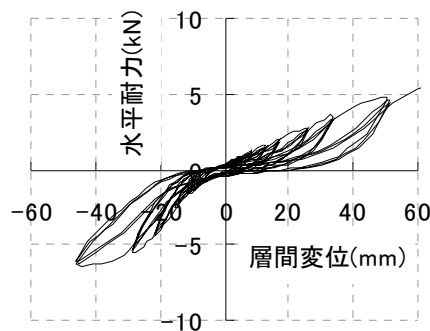


(a) 実験結果

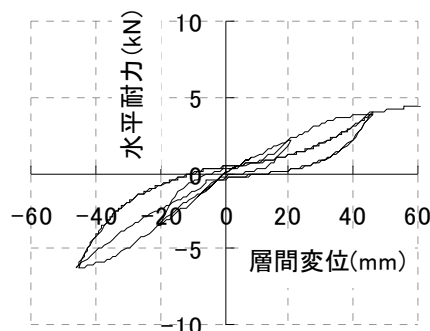


(b) 解析モデル

図 14 構造用合板耐力壁の復元力



(a) 実験結果



(b) 解析モデル

図 15 筋かい耐力壁の復元力

5.2 ダンパーと既存耐力壁の組合せに関する検討

5.1 節に示した解析モデルを用いて、様々な壁長比で「ダンパーを設置した軸組」と「既存耐力壁（合板もしくは筋かい）」を組み合わせたモデルを対象に、地震応答解析を行った。

(1) 重量設定

「ダンパーを設置した軸組」と「既存耐力壁」とを組み合わせる場合、解析モデルの壁長 1P (0.91m) あたりに適用する重量については、既存耐力壁の壁倍率を基準とした。すなわち、構造用合板（壁倍率 2.5 で壁長 1P）の場合は式(1)、筋かい（壁倍率 4.0（たすきがけ）で壁長 1P）の場合は式(2)で求めた。

$$\cdot 2.5 \times 1.96 \text{ kN/m} \times 0.91 \text{ m} / 0.2 = 22.295 \text{ kN} \quad (1)$$

$$\cdot 4.0 \times 1.96 \text{ kN/m} \times 0.91 \text{ m} / 0.2 = 35.672 \text{ kN} \quad (2)$$

この重量を、「既存耐力壁」の壁長と「ダンパーを設置した軸組」の壁長とを足し合わせた全壁長に比例させるように割り増し、解析モデルに適用した。

(2) 入力波

解析モデルへの入力波は、観測地震波として JMA Kobe 波、人工地震波として日本建築センター-BCJ L2 波を用い、既存耐力壁のみの場合において、弾性時の層せん断力係数が 0.2 になるように、入力倍率を決定した。表 4 に入力倍率の一覧を示す。

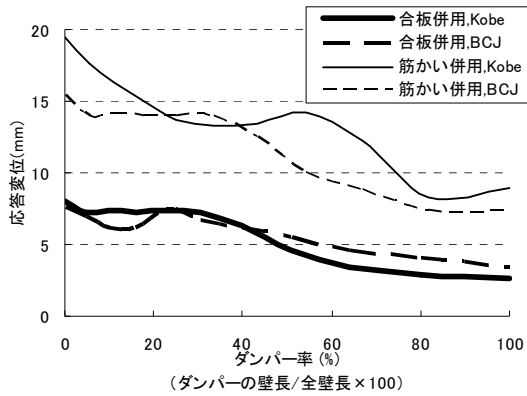
(3) 解析結果

図 16 は、全壁長にしめる「ダンパーを設置した軸組」の壁長の割合（以下、ダンパー率と表記する）と最大応答変位および最大応答加速度との関係である。最大応答変位については、いずれのケースにおいても、ダンパーの割合が多くなるに従って、低減する傾向が認められ、最大応答加速度については、ダンパーの割合によらず、概ね一定の応答である。このような結果になる理由は、次の図 17 および図 18 で説明することができる。図 17 および図 18 は、ダンパー率が 0%（既存耐力壁のみ）、50%（既存耐力壁とダンパーを設置した軸組の壁長比が 1:1）および 100%（ダンパーを設置した軸組のみ）の加速度-層間変位関係である。表 5 には、各解析モデルにおける 1P あたりの重量と剛性から計算した固有周期の一覧を示す。ダンパー率が 0% の場合は応答変位が比較的大きいが、ダンパーが 100% の場合は、剛性が高く、塑性化が抑制されるため、応答変位が小さい。「ダンパーを設置した軸組」と「既存耐力壁」が組み合わせられた場合は、以上の 2 つの性状が複合した状態と考えられる。

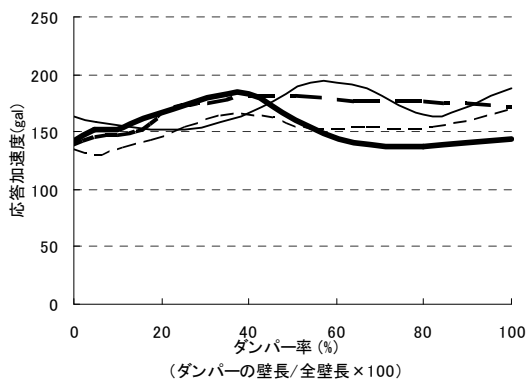
速度依存型のダンパーは、バネ要素と並列して「ダッシュポット」として設置して使用する。これに対して、高減衰ゴムを用いる本パッシブダンパーは、図 6 に示したように、変位依存型の性状を示し、初期剛性が高いなどの耐力要素としての性能も併せ持っている。このために、本パッシブダンパーはダンパーの割合が多くなるに従って、水平剛性も増加し、建物の地震応答変位が低減したと考えられる。

表4 解析における入力倍率の一覧

既存耐力壁	JMA Kobe 入力倍率	BCJ L2 入力倍率
構造用合板耐力壁	0.086	0.197
筋かい耐力壁	0.114	0.204



(a) 応答変位



(b) 応答加速度

図16 ダンパーを設置した軸組と既存耐力壁とを併用した場合の地震応答

表5 1Pあたりの重量Wと剛性Kから計算した固有周期T

(a) 第一剛性とそれに対する固有周期

		ダンパー率		
		0%	50%	100%
合板耐力壁と併用した場合	W (kN)	22.3		
	K_1 (kN/mm)	0.50	0.91	1.33
	T_1 (秒)	0.43	0.31	0.26
筋かい耐力壁と併用した場合	W (kN)	35.7		
	K_1 (kN/mm)	0.35	0.84	1.33
	T_1 (秒)	0.64	0.41	0.33

(b) 1/200rad時の割線剛性とそれに対する固有周期

		ダンパー率		
		0%	50%	100%
合板耐力壁と併用した場合	W (kN)	22.3		
	$K_{(1/200)}$ (kN/mm)	0.29	0.47	0.65
	$T_{(1/200)}$ (秒)	0.56	0.44	0.37
筋かい耐力壁と併用した場合	W (kN)	35.7		
	$K_{(1/200)}$ (kN/mm)	0.33	0.49	0.65
	$T_{(1/200)}$ (秒)	0.66	0.54	0.47

6. まとめ

在来軸組工法の戸建て住宅を対象として、高減衰ゴムを用いた、パッシブダンパーを開発した。本ダンパーは、高い初期剛性を有し、繰り返し加力に対しても剛性低下が小さいという特徴を活かし、静的加力実験の結果を用いた地震応答解析によって振動台実験の応答を予測できることを確認した。本報告では、概ね 1/120rad 程度までの性能の検証を目的としたが、ダンパー内の高減衰ゴムは、繰り返し加力に対しても顕著な剛性低下はみられず、安定した挙動を示した。また、地震応答解析の結果、本ダンパーを用いることで、既存耐力壁より大きく地震応答変位を低減できることが分った。小規模な木造住宅等に対しては、地震応答解析に代わる簡便な設計法が望ましく、今後は、本ダンパーのこれらの特徴を考慮したより簡便な設計法の検討が必要である。

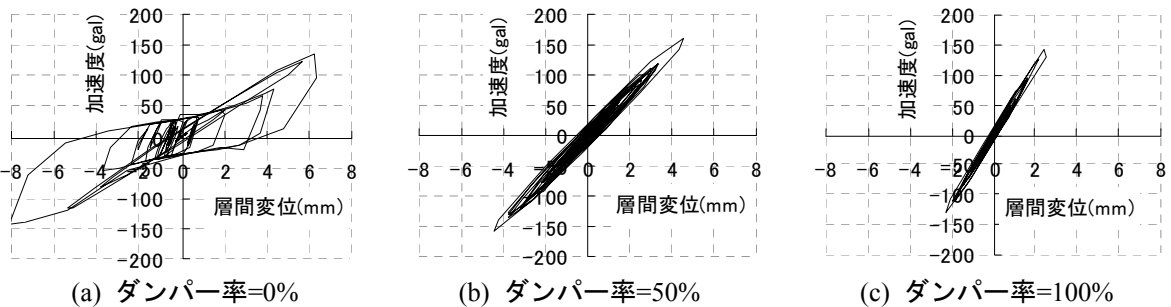


図17 合板耐力壁と併用した全壁長に占めるダンパーの割合毎の加速度-層間変位関係(Kobe 波)

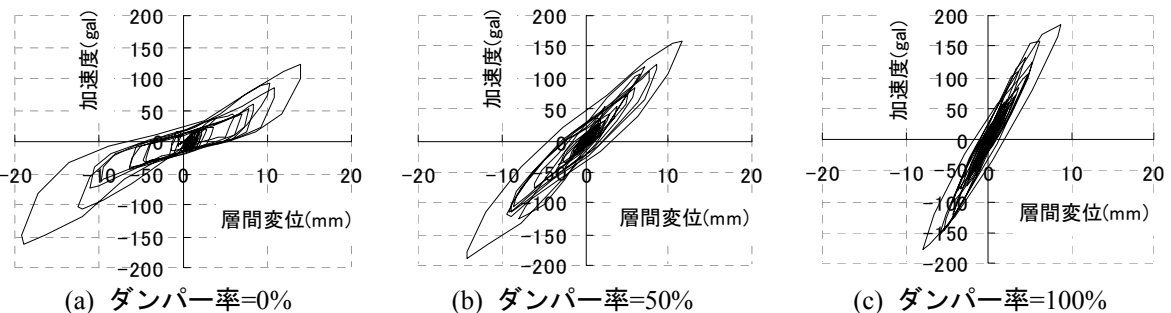


図18 筋かい耐力壁と併用した全壁長に占めるダンパーの割合毎の加速度-層間変位関係(Kobe 波)