

伝統木造建物の耐震補強工法の実験的研究

— 実大架構実験による耐震性能評価 —

Study on Seismic Reinforcement of Traditional Wooden Buildings

- Strength Evaluation by Full Scale Tests -

山上 聡* 安井健治* 岸本 剛* 平野 晋**

要 旨

伝統木造建築物の耐震補強には、ダボ付板壁、格子壁、仕口ダンパー等が用いられている。これら単体の耐震補強要素の設計指針は定められているが、詳細な耐震性能は明らかでない。そこで、これらの耐震補強要素を用いた実大架構実験を行い、単体での耐震性能および併用した場合の耐震性能を確認した。また、実建物の耐震補強に適用するダボ付板壁、格子壁、仕口ダンパーを併用した場合のレベル2相当の地震に対する耐震性能も確認した。

キーワード：伝統木造建物、耐震補強、ダボ付き板壁、格子壁、粘弾性ダンパー

1. まえがき

伝統木造建築物として文化財の指定を受けた木造建物の解体改修工事や耐震補強工事が増えつつある。文化財の耐震補強工事は、建物の歴史的価値を損なわないよう、現状の外観を維持した範囲で行う必要がある。さらに、補強箇所や補強工法が限定されることが多い。本報で対象にした建物では、目標耐震性能を確保するために、板壁を土壁やダボ付き板壁に変更し、床下の開口部に新たに格子壁や粘弾性ダンパー（以下、ダンパー）を設けるなど、複数の耐震補強要素の併用が必要になった。しかし、複数の耐震補強要素を併用した場合の耐震性能も評

価した研究は少ない。そこで、複数の耐震補強要素を併用した実大架構実験を実施し、その耐震性能を確認したので報告する。

2. 試験体概要

試験体の概略図を図-1に示す。対象建物の耐震補強は、床上の外周部では既存の板壁部分を耐力の大きい土壁やダボ付き板壁に変更し、床下の開口部には通気性を考慮し、耐力の小さい格子壁とダンパーを適用した。試験体はこれら複数の耐震補強を併用する箇所を取り出し模擬したものである。なお、土壁は既往の研究事例が

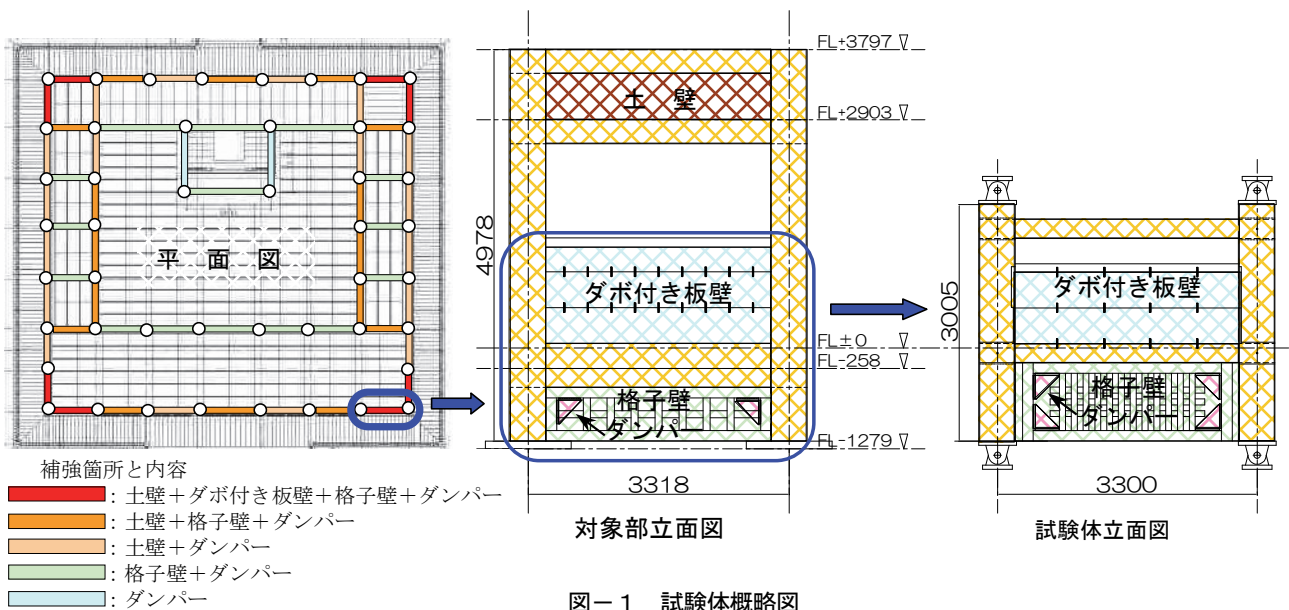


図-1 試験体概略図

*技術研究所 **東日本支社建築設計部

数あることから実験対象から除外した。

実験目的は、以下のとおりである。

- ①耐震補強要素個別の復元力特性の把握
- ②耐震補強要素を併用した場合の復元力特性の把握

2.1 試験体形状

試験体概要を表-1に、試験体形状を図-2に示す。

試験体の外寸は3,300(柱芯間隔)×3,005(高さ)mmである。ダボ付き板壁を落としこみ工法により設置し、その下部に格子壁を、格子壁の枠にダンパーを設置している。

仕口部は貫のめり込みによる影響が出ないように、柱と貫のクリアランスを十分に確保して、ピン接合とした。また、柱頭、柱脚をピン接合とした。

2.2 耐震要素

実験対象の耐震要素は①ダボ付き板壁、②格子壁、③ダンパーとした。ダボ付き板壁には厚さ48mmのスギ板を用い、各板の上下には□18mmのヒノキのダボを600mm間隔で設置している。格子壁には□75mmのヒノキを用い、150mm間隔で格子を形成している。ダンパーはジエン系の粘弾性体を2枚の徹板間に挟んだ構造

でありその性能は速度や振動数に依存する傾向がある。これを格子枠の四隅に2個ずつ計8個設置した。

2.3 耐震要素の設計

ダボ付き板壁、格子壁は技術解説書¹⁾に基づいて設計し、材料定数は無等級材として学会規準²⁾に示されたも

表-1 試験体概要

試験体 (2体)	試験体A (静的加力用) : ダボ付板壁、格子壁
	試験体B (動的加力用 周期3s) : ダボ付板壁、格子壁、ダンパー
外 寸	3,300mm(柱間隔)×3,005mm(高さ)
樹 種	柱・貫 : ベイマツ 板 壁 : スギ ダ ボ : ヒノキ 格子壁 : ヒノキ
寸法等	柱 : 470mm八角形、 貫 : 120×242.4mm
	板 壁 : 厚48mm
	ダ ボ : □18mm
	格 子 : □75mm
	ダンパー : ジエン系30cmタイプ

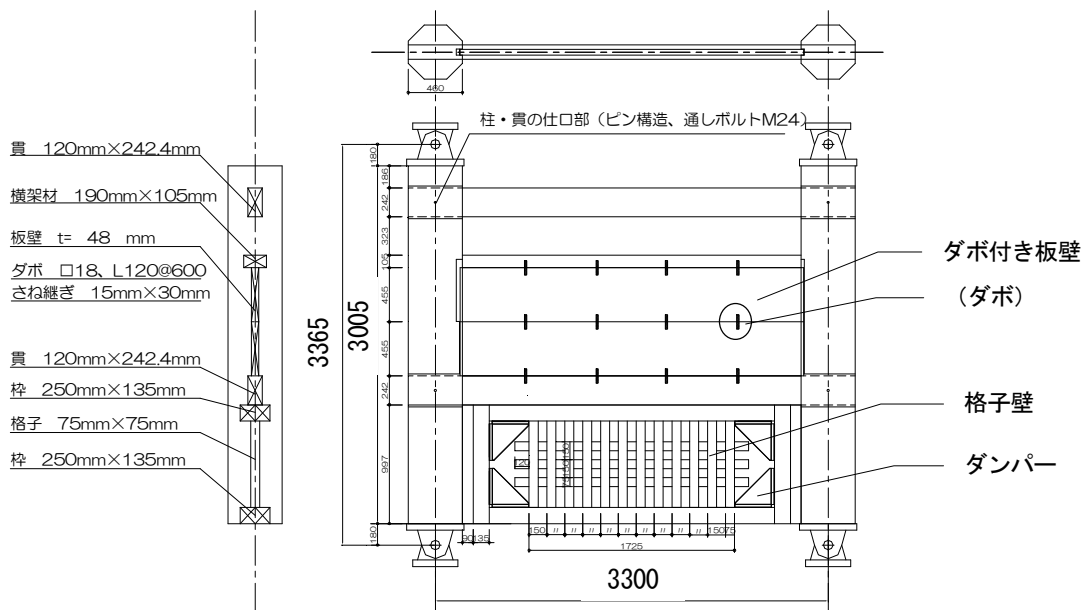


図-2 試験体形状

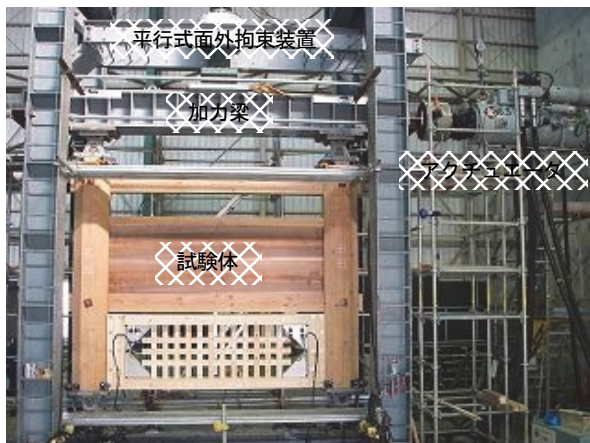
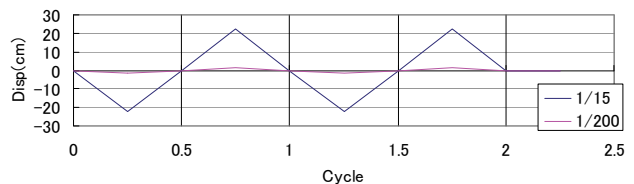
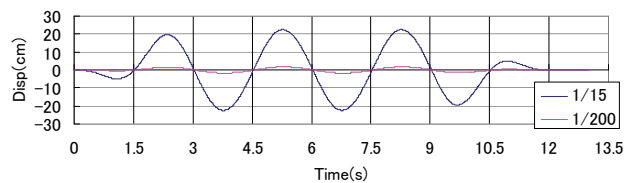


写真-1 実験状況



(a) 静的加力スケジュール



(b) 動的加力波形

図-3 加力方法

のをを用いた。ダンパーの個数は性能証明資料³⁾をもとに決めた。

3. 実験概要

3.1 実験方法

a. 加力方法

実験状況を写真-1に示す。加力は試験体上部に設置した加力梁を介して水平方向に行った。加力梁上部には平行式面外拘束装置を設け、加力梁の平行を維持し面外方向の動きを拘束した。実験は、静的加力実験と動的評価が必要なダンパーを含めた特性を把握することを目的とした動的加力実験の2種類である。加力には1000kNアクチュエーターを用い、変位制御で加力した。

b. 加力波形

静的加力実験の加力スケジュールを図-3(a)に示す。正負交番で2サイクルの繰り返しとし、この時の加力速度は0.5cm/sとした。

動的加力実験の加力波形を図-3(b)に示す。対象建築物の地震時の固有周期を想定し、周期3秒の正弦波とした。正弦波は、全体で4サイクルとし、加力時の急加振、急停止を回避するために最初と最後に1サイクルずつ漸

増・漸減した。

c. 計測方法

計測概要を図-4に示す。耐震要素の変計量は各要素の水平変位を計測し、要素の高さで除した変形角とする。試験体の荷重は、柱脚部に設置した水平方向と鉛直方向の荷重が同時に計測できる分力計で計測し、水平荷重は左右の柱脚で計測する水平反力の合計とした。

3.2 実験項目

実験ケースを表-2に示す。ダボ付き板壁、格子壁、ダンパーの単体要素実験については静的・動的な加力を行った。また、ダンパーと他の耐震要素を併用した場合については動的加力実験を行った。

加力は耐震要素の損傷を考慮し、加力範囲を小変形範囲と大変形範囲に分けて行う。加力の範囲は全体の層間変形角(R)で評価し、小変形での加力範囲はR=1/400、1/300、1/200の3段階とし、大変形での加力範囲はR=1/120、1/60、1/30、1/20、1/15の5段階とした。ここに、小変形はレベル1(中小地震時)、大変形はレベル2(大地震時)の変形を想定したものである。

評価は小変形範囲内において、各耐震要素の単独での特性を確認した後に併用した場合の耐力を確認し、単独の耐力を足し合わせた場合と比較する。

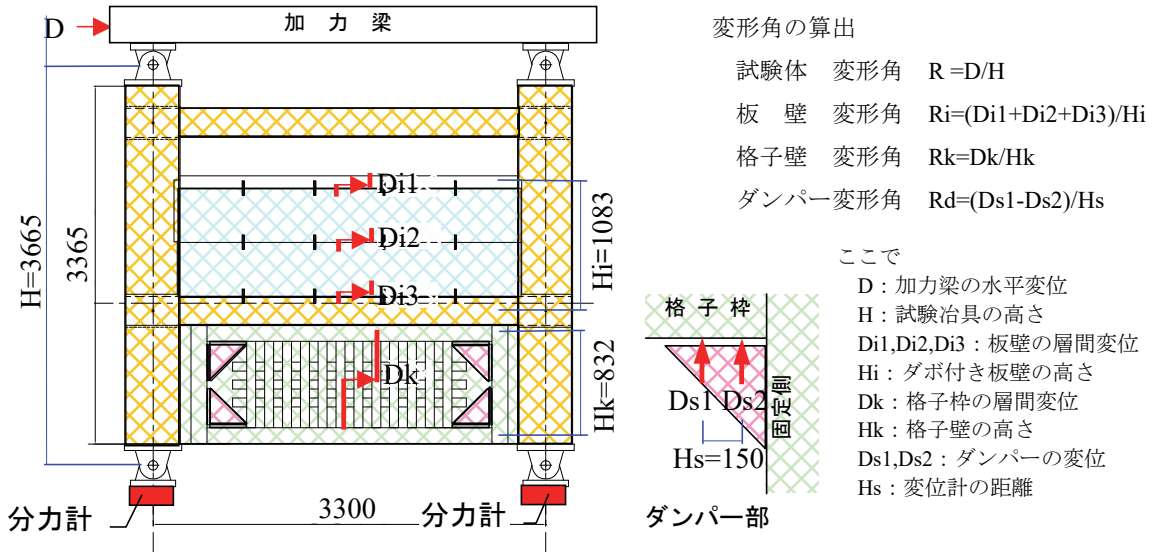


図-4 計測概要

表-2 実験ケース

実験ケース		加力方法		加力範囲	
		静的加力	動的加力	小変形 1/400~1/200	大変形 1/120~1/15
単体	①	ダボ付き板壁	○	○	
	②	格子壁	○	○	
	③	ダンパー	○	○	
併用	④	ダボ付き板壁+格子壁	○		
	⑤	格子壁+ダンパー		○	
	⑥	ダボ付き板壁+格子壁+ダンパー		○	○

4. 実験結果

実験結果はダボ付き板壁、格子壁、ダンパーそれぞれの要素の単体試験結果とそれらを組み合わせた場合に分けて示す。

4.1 単体要素の実験結果

実験から得られた単体要素の特徴を次に示す。

a. ダボ付き板壁

静的加力におけるダボ付き板壁の復元力特性を図-5に示す。変形角は 1/400、1/300、1/200 でそれぞれ 2 サイクルの加力を行った。バイリニア型の復元力を示し、大きなエネルギー吸収能力が期待できる。加力が 1/200 では、変形角 0rad における荷重は 1.3kN であり降伏後の剛性は 440kN/rad である。また、各加力ケースにおいて、1 サイクル目と 2 サイクル目の復元力はほぼ重なっている。戻りの剛性は変形が大きくなると小さくなる傾向がある。

b. 格子壁

静的加力における格子壁の復元力特性を図-6に示す。スリップ型の復元力を示し、0.002rad 程度までスリップし、それ以降の復元力は若干増加している。

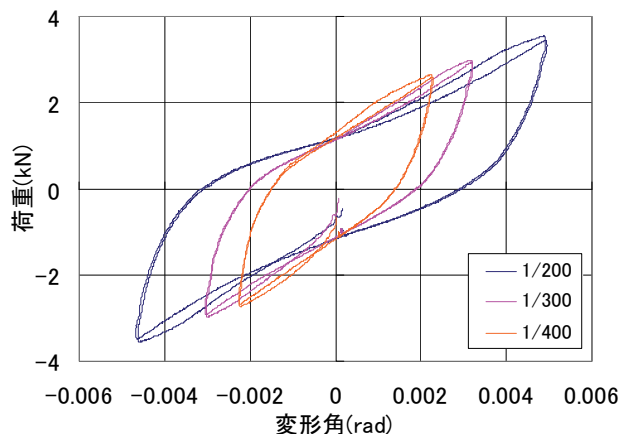


図-5 ダボ付き板壁の荷重-変形角関係

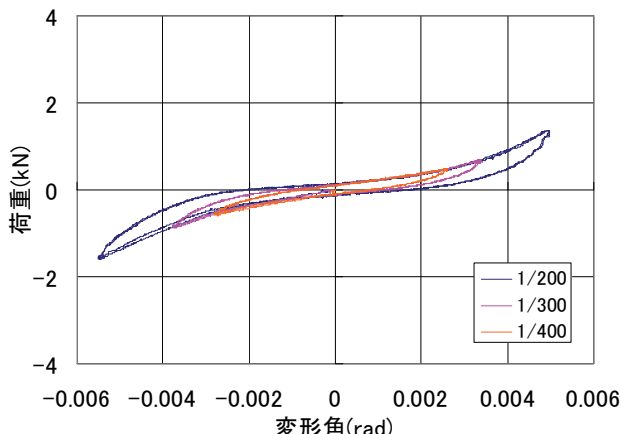


図-6 格子壁の荷重-変形角関係

c. ダンパー

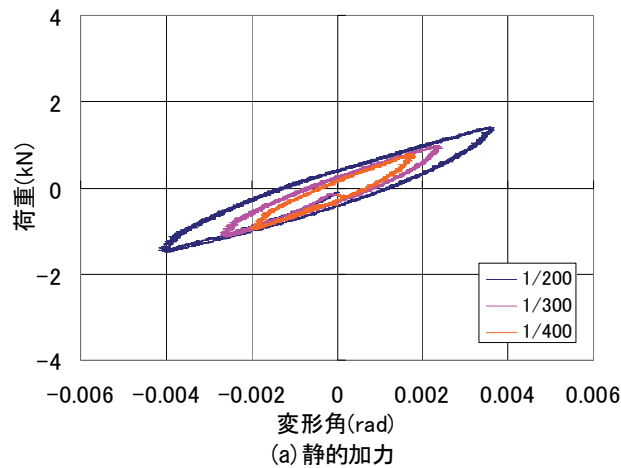
ダンパーは粘弾性ダンパーであり、剛性と減衰係数を評価する必要がある。そのため、静的加力、動的加力実験を行った。

静的加力における復元力特性を図-7 (a)に示す。剛性は変形角が大きくなるにつれ低下しており、1/200での剛性は 360kN/rad である。また、若干の履歴減衰を期待できる。

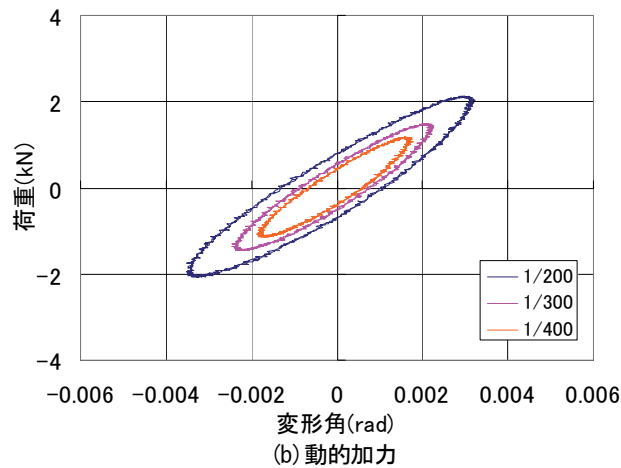
動的加力における復元力特性を図-7 (b)に示す。試験ケース 1/400、1/200 における最大速度はそれぞれ 0.0037rad/s、0.0067rad/s である。動的加力では静的加力に比べ剛性、履歴共にも大きくなっている。等価剛性は 650kN/rad で、等価減衰定数は $\eta=0.17$ である。

4.2 併用した場合の試験結果

伝統木造建築物では前節で述べた耐震補強要素を組み合わせ耐震補強を行うことがある。対象とした建物の場合、格子壁とダンパー、さらにはダボつき板壁を併用して使う場合が多いので、併用して使う場合の復元力特性を確認しておく必要がある。本節では、それぞれの耐震要素を併用した場合の復元力特性について、単体要素実験の結果と比較して述べる。



(a) 静的加力



(b) 動的加力

図-7 ダンパーの荷重-変形角関係

a. 格子壁とダンパー

動的加力実験を行った格子壁とダンパーを組み合わせた場合の最大荷重の比較を図-8に示す。これは、床下に適応する耐震補強の組み合わせである。ダンパーの耐力は格子壁の2倍程度である。併用した場合の荷重は、単体試験の結果を足し合わせた荷重とほぼ等しい。

b. ダボ付き板壁と格子壁とダンパー

ダボ付き板壁と格子壁とダンパーを併用した場合の比較を図-9(a)(b)に示す。

動的加力実験を行った板壁と格子壁とダンパーの結果を組み合わせた場合の最大荷重の比較を図-9(a)に示す。各要素の耐力は前述の組合せと同様で、ダンパーの耐力は格子壁の2倍程度であり、板壁の耐力は格子壁の3倍程度である。併用した場合の荷重は、単体試験の結果を足し合わせた荷重とほぼ等しい。

板壁と格子壁とダンパーを足し合わせた場合と併用した場合の動的加力実験から得られた復元力特性の比較を図-9(b)に示す。足し合わせた場合と併用した場合では概ね一致している。併用した場合、戻りの剛性が低くなっているが、これは板壁の戻り剛性が、繰り返しの実験により低下したことによるものと考えられる。

単体での実験結果を足し合わせた結果と併用した実験結果は一致しており、異なる耐震要素を併用した場合は個々のせん断耐力を足し合わせて評価できることを確認した。

4.3 大変形時の実験結果

ダボ付き板壁と格子壁とダンパーを併用し、1/15 まで動的加力実験を行ったときの復元力を図-10に示す。図中の●は格子枠の破損を示している。

変形角が 1/20 までは、徐々に耐力が増加する安定した復元力特性を示した。また、板壁や格子壁は変形が進むとスリップ型の復元力特性に変わり、エネルギー吸収力が少なくなる傾向が表れている。

試験体変形角 1/20 以降では柱脚が浮き、1/15 に達したときには格子枠が一部破損した。

実験終了時の状態を写真-2に示す。板壁には大きな損傷は見られなかったが、写真-3に示すように板壁に印したマーキングは 1cm 程度ずれており、板壁に残留変位がみられた。また、写真-4に示すように、ダボはせん断力により破壊されていた。格子壁は形状は保っていたものの、部材の数箇所破損がみられた。

5. まとめ

伝統木造建築物における耐震補強要素とし、ダボ付き板壁、格子壁、ダンパーの加力実験を行い、次のことを明らかにした。

- i. 施工が比較的簡易なダボ付き板壁はバイリニア型の復元力特性を示し、大きな減衰力が期待できる

- ii. 格子壁は変形が大きくなると若干の復元力が期待できるスリップ型の復元力特性を有する
- iii. 格子枠の隅角部に設置する粘弾性ダンパーは大きな減衰力が期待でき、等価減衰係数でモデル化できる
- iv. 異なる耐震要素を併用する場合には、それぞれの復元力特性を重ね合わせたモデルで評価できる

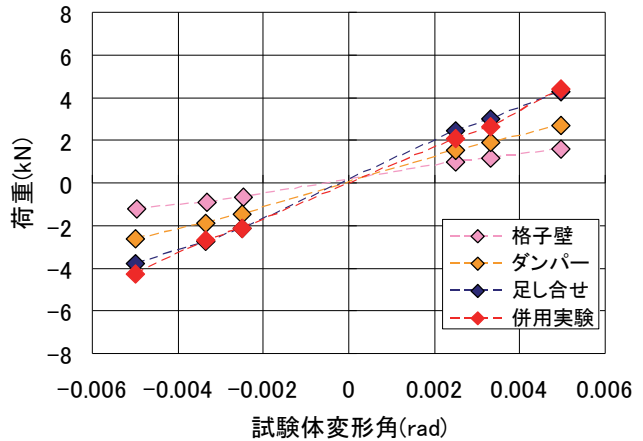
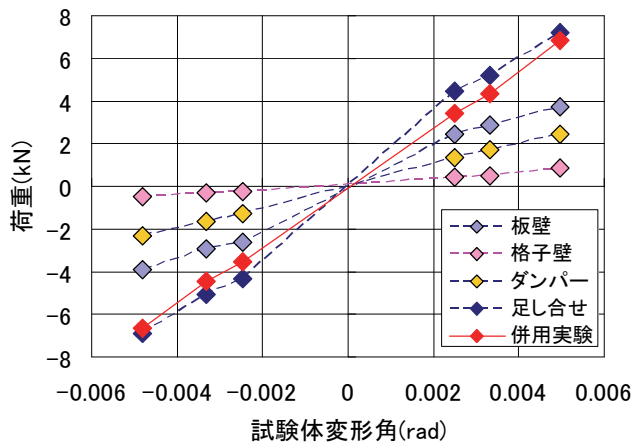
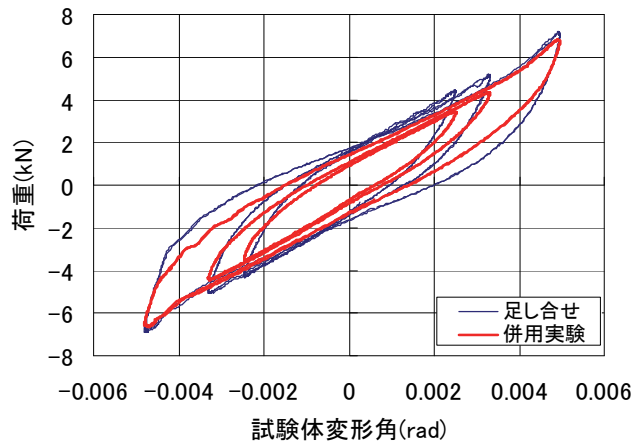


図-8 格子壁とダンパーの併用



(a) 最大値



(b) 履歴

図-9 板壁と格子壁とダンパーの併用

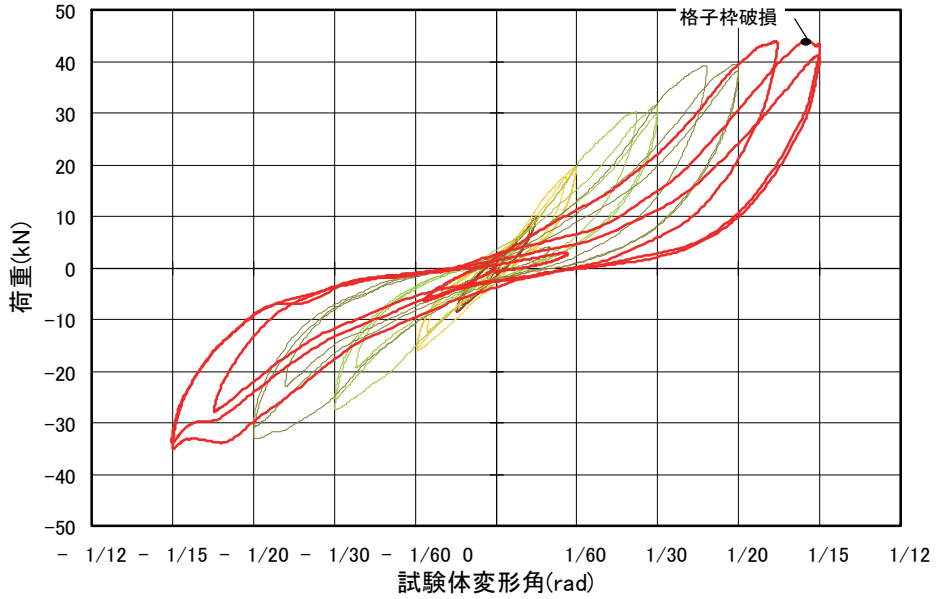


図-10 大変形時の試験結果 板壁+格子壁+ダンパー（動的加力）

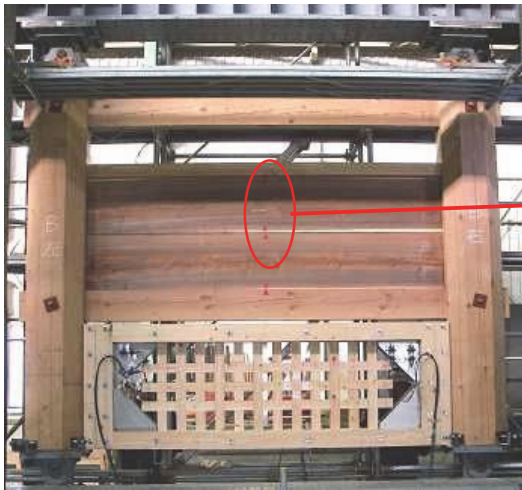


写真-3 実験後の状況

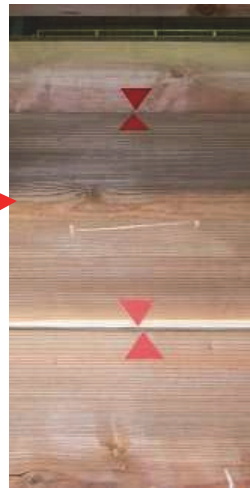


写真-4 板壁の残留変位

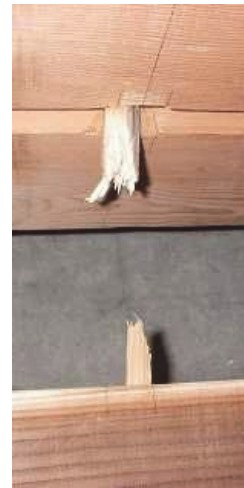


写真-5 ダボの破損

6. あとがき

外観の維持という厳しい制約の中での伝統木造建築物の耐震補強工法の効果が実証できた。今後、さらに効率の良い伝統木造建築物の耐震補強工法の開発に取り組んでいきたい。

【参考文献】

- 1) 日本住宅・木材技術センター、「土塗壁・面格子壁・落とし込み板壁の壁倍率にかかる技術解説書」
- 2) 日本建築学会、「木質構造設計基準・同解説」
- 3) 日本建築総合試験所、「仕口ダンパーによる木造軸組み耐震補強工法」、性能証明 第 01-10 号