

壁倍率 10 倍を超える「スーパー板壁工法」の開発

石川 理都子 三谷 一房 榎本 浩之
 (本社設計本部)

北山 宏貴 山中 昌之 五十畑 建
 (大阪本店構造設計部) (本社設計本部) (東京本店建築事業部)

Development of “Super Wooden Wall Construction” — Construction Method of Wooden Wall with over 10 fold Magnification —

Ritsuko Ishikawa Hitofusa Mitani Hiroyuki Enomoto
 Hiroki Kitayama Masayuki Yamanaka Takeshi Isohata

Abstract

The "Super Wooden Wall" has been developed as a seismic element for a traditional wooden structure. The durability and designability of the "Super Wooden Wall" are equivalent to those of a traditional dropped wooden sliding wall, moreover, the seismic performance of the "Super Wooden Wall" is superior to that of structural plywood. In fact, a static loading test of full-scale specimens revealed that the wall magnification of the "Super Wooden Wall" is 10-fold higher. Consequently, this wall was considered to be the optimum structure for the seismic retrofit of the Chusonji-Temple Hondo. Then, the seismic performance of the Hondo was found to have sufficiently improved, with its original appearance from the founding era remaining intact.

概要

伝統木造建築の耐震要素として、伝統的な落とし込み板壁工法と同等の意匠性・耐久性を持ちながら、構造用合板以上の耐震性をもつ「スーパー板壁工法」を開発した。接合部の要素実験によりディテールを検討し、実大試験体による静的載荷実験により性能を確認した。その結果、壁倍率 10 倍を超える公的評価を取得し、構造用合板の 2.5 倍を大きく上回ることを確認した。中尊寺本堂の耐震改修工事では、スーパー板壁工法の採用により、創建当時の姿を変えずに十分な耐震性能を確保することができた。

1. はじめに

伝統木造建築をはじめとする木造建築では「落とし込み板壁工法」が多く採用されている。この工法は意匠性・耐久性は高いが耐震性能が低く、十分な開口を確保しつつ現行の耐震基準に適合させることは困難である。

一方、構造用合板を用いた場合はより高い耐震性能が得られるが、接着剤を使用しているため、耐久性に難点がある。

そこで、落とし込み板壁工法と同様に、板壁を積み上げる外観は変えずに板壁パネル同士および板壁パネルと枠材間の応力伝達機構を改良することにより、意匠性と空間自由度を保ちながら耐震性を飛躍的に向上させる「スーパー板壁工法」を開発した。

2. スーパー板壁工法の概要

2.1 スーパー板壁工法の特長

落とし込み板壁工法は、柱の内側に設けた溝の間に板壁パネルを順に落とし込むことで壁を構成するものである。スーパー板壁工法では、Fig. 1 のように板壁パネル同士および板壁パネルと梁桁を横長の「長ダボ」で接合し、さらに板壁パネルと柱をほぞ接合で一体化すること

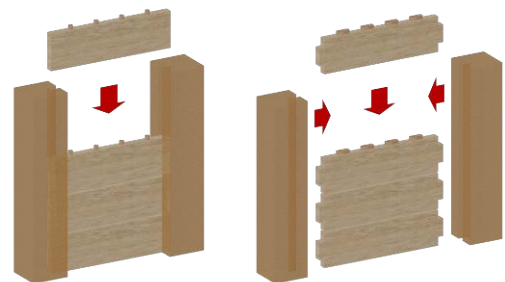


Fig. 1 落とし込み板壁とスーパー板壁
 Dropped Wooden Sliding Wall and Bearing Wall using Wooden Panel called "Super Wooden Wall"

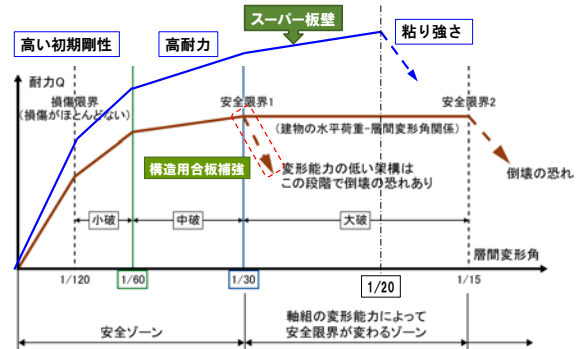


Fig. 2 スーパー板壁工法の構造性能
 Structural Performance of Super Wooden Wall

により、剛性と耐力を大きく向上させた。

木造建築の構造設計に用いる壁倍率は、地震に対する壁の強さ（耐力）を表す数値である。建築基準法（施行令、告示）では、一般的な筋違壁が 1.0、落とし込み板壁が 0.6、構造用合板が 2.5（片面）とされているが、スーパー板壁は 10 倍を超える壁倍率の評価を（公財）日本住宅・木材技術センターより取得しており、従来よりも少ない壁面積で十分な耐震性能を確保できる。

Fig. 2 と Table 1 に示すように、スーパー板壁は、構造用合板以上の耐震性・機能性と、落とし込み板壁同等の耐久性・意匠性を兼ね備えており、開放的な空間や 100 年単位の耐久性が要求される伝統木造建築の耐震要素として極めて有効である。

2.2 耐震性能

壁倍率は、軸組試験体の水平載荷実験の結果より、以下①～④の最小値を用いて算出される。

- ① 降伏耐力 P_y
- ② 終局耐力 $P_u \times 0.2/D_s$ (D_s : 構造特性係数)
- ③ 最大耐力 $P_{max} \times 2/3$
- ④ 特定変形時 ($1/120rad$) の耐力

すなわち、高い初期剛性（④）および耐力（①、③）を有し、かつ最大耐力後にも靱性を保持する（②）ことで壁倍率の評価が向上する。

Table 1 従来技術との比較
Comparison with other Wooden Walls

	スーパー板壁	落とし込み	構造用合板
耐震性能	◎ 壁倍率10倍以上	× 壁倍率0.6倍	○ 壁倍率2.5倍
機能性	◎ 必要壁量：小	× 必要壁量：大	△ 必要壁量：中
耐久性	◎ 純木造	◎ 純木造	× 接着剤使用
意匠性	◎ 板壁仕上げ可	◎ 板壁仕上げ可	△ 塗装が必要
コスト	△	○	◎

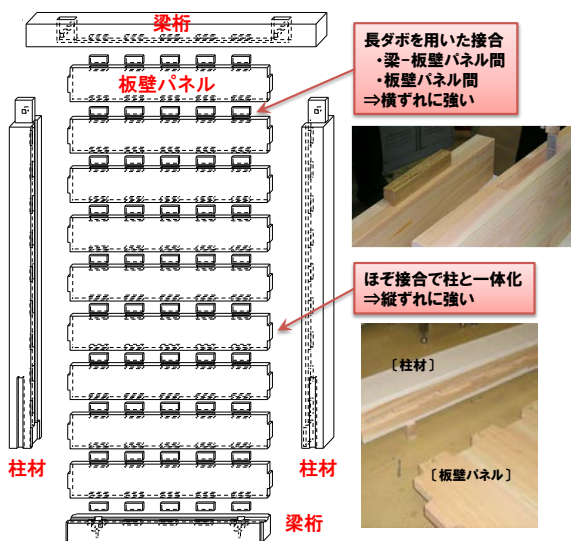


Fig. 3 スーパー板壁の構成
Configuration of Super Wooden Wall

そこで、Fig. 3 のように板壁パネル間および板壁パネルと梁桁の間の嵌合方式として長ダボを採用することでダボ接合部の変形・破壊を抑止し、さらに板壁パネルと柱材をほぞ接合として板壁パネルの縦ずれを抑止することで、剛性・耐力・靱性の向上を図った。

さらに、あらかじめ板壁パネルと柱材で作成した板壁ユニットを架構に嵌め込み、柱材と架構材をビスで固定した耐震補強仕様も開発した。

3. 性能確認実験と解析モデルの検証

3.1 ダボ接合部の要素実験

Photo 1 の載荷装置により、Fig. 4 に示す接合部 2 面からなる要素試験体の一方向静的載荷実験を行った。ダボ

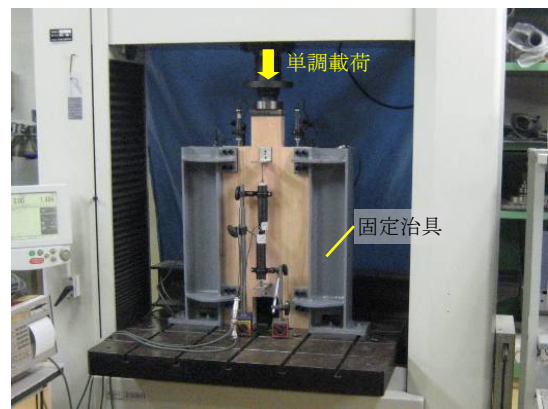


Photo 1 要素実験載荷状況
Set up of Specimen and Loading Machine

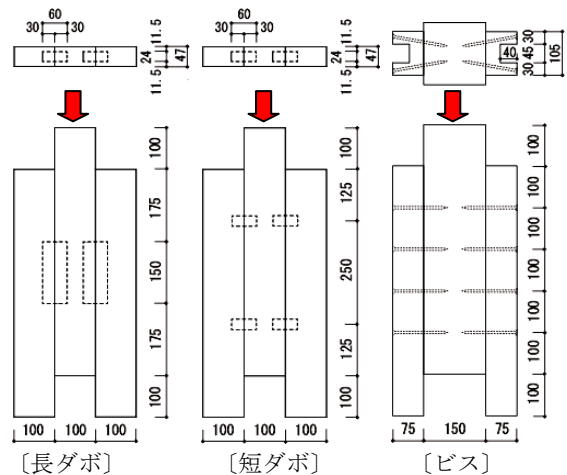


Fig. 4 要素試験体
Element Specimens for Dowel and Screw Joint

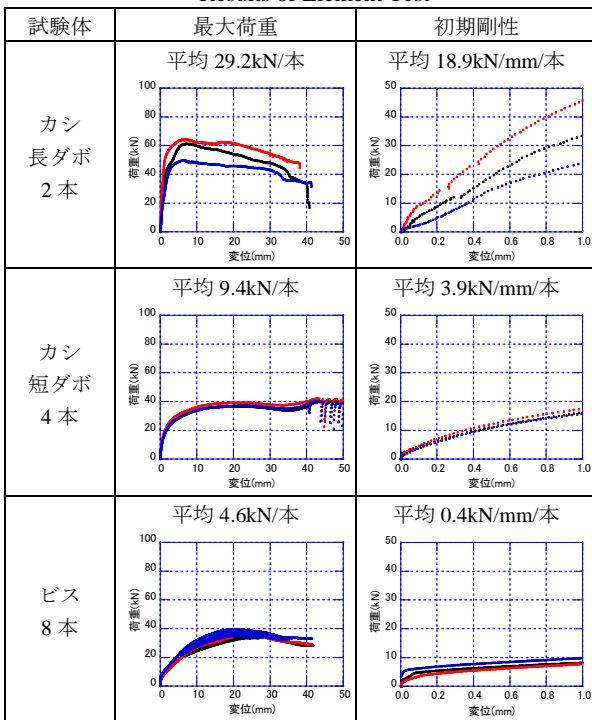
Table 2 要素実験ケース(ダボ接合部)
Properties of Specimens for Dowel Joint

タイプ	ダボ材				板材	
	樹種	幅	厚さ	深さ	樹種	板厚
長ダボ	カシ	150	24	30	ヒノキ	47
	カシ	24	24	30	ヒノキ	47
短ダボ	ケヤキ	24	24	30	ヒノキ	47
	メープル	24	24	30	ヒノキ	47

接合部は、ダボ材の樹種とサイズをパラメータとして Table 2 に示す実験ケースをそれぞれ 3 体ずつ実施した。ビス接合部も同様に、中央の架構材と両側の枠材をビスで接合した試験体 3 体とした。

実験結果のうち、カシの長ダボと短ダボ、ビスについて、各ケース 3 体ずつの荷重-変形曲線と、ダボ 1 本あたりの平均値から算定した最大荷重および初期剛性を Table 3 に示す。初期剛性は最大荷重の 0.1 倍と 0.4 倍にあたる点を結ぶ直線の傾きとした。長ダボは短ダボと比較してダボ 1 個所あたりの最大荷重が 3 倍以上、初期剛性は 4 倍以上となっている。また、最大荷重、初期剛性とも樹種による違いはほとんど見られないことから、入手や加工性を考慮し、ダボ材にはカシの長ダボを選択することとした。

Table 3 要素実験結果
Results of Element Test



3.2 実大試験体の静的繰り返し加力実験

実大試験状況を Photo 2 に、試験体の概要を Fig. 5 と Table 4 に示す。全面壁タイプは柱脚固定、小壁タイプはピン支持となっている。柱脚はホールダウンアンカーで鉄骨治具に固定し、柱頭はローラー治具で面外方向のみ拘束した。柱頭の梁端部を加力点とし、水平方向にせん

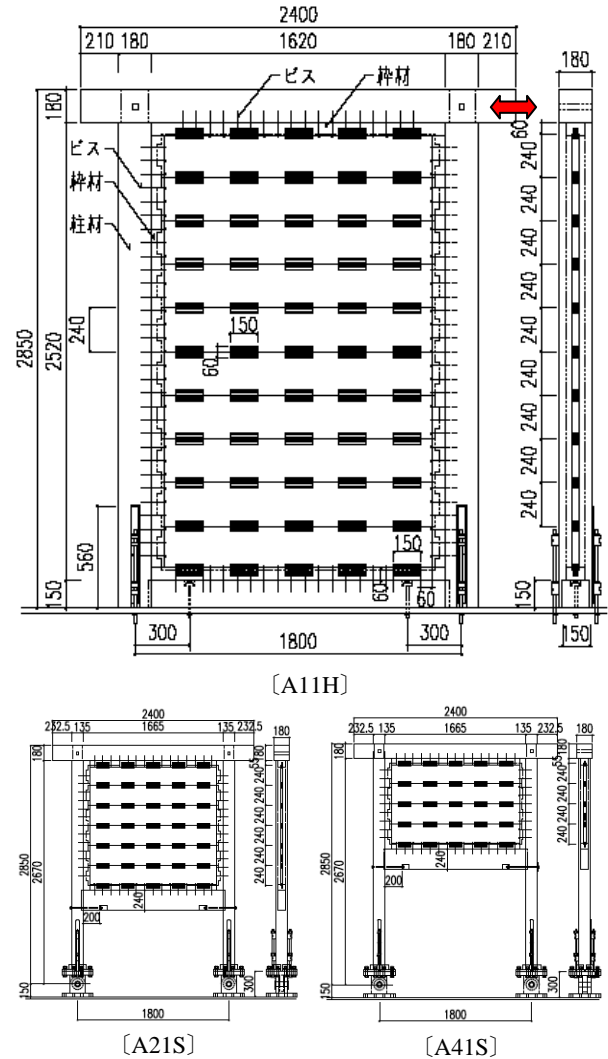


Fig. 5 実大試験体概要
Overview of Full-Scale Specimens



Photo 2 実大加力実験状況
Set up of Full-Scale Specimen and Loading Machine

Table 4 実大試験体一覧
Properties of Full-Scale Specimens

試験体	タイプ	柱材 (断面)	板材 (厚さ)	ダボ材 (厚さ x 本数)
A11H	全面壁	ヒノキ (180x180mm)	ヒノキ (45mm)	カシ (24mmx5本)
A11S	全面壁	ヒノキ (135x135mm)	ヒノキ (30mm)	カシ (12mmx5本)
B11H	全面壁	ヒノキ (180x180mm)	スギ (45mm)	ヒノキ (24mmx3本)
A21S	小壁	ヒノキ (135x135mm)	ヒノキ (30mm)	カシ (12mmx5本)
A41S	小壁	ヒノキ (135x135mm)	ヒノキ (30mm)	カシ (12mmx5本)

断変形角 1/600~1/50 まで正負交番で 3 サイクルずつ漸増増荷した後、正方向に単調増荷とした。

実験により得られた荷重-変形曲線を Fig. 6 に示す。全面壁タイプの荷重-変位関係は 3 体とも同様の傾向を示し、概ね板厚とダボ数に比例する復元力となっている。いずれも単調増荷に入ると徐々に板壁パネル間の開きとパネル-枠材間の滑りが進行し、最終的に負側柱頭のほぞが破断した。ほぞの厚さは柱幅の 1/3 としているため、柱の細い A11S はほぞも薄く、開きや滑りの小さい層間変形角 1/30 程度の段階で破断している。

小壁タイプはいずれも想定通り開口部柱頭で柱材が曲げ破壊を生じ、開口部が広いほど耐力が小さくなる。

壁倍率を決定する耐力値は、全面壁タイプは終局耐力、小壁タイプは特定変形 (1/120rad) 時となっている。

実験結果より算定した初期剛性と耐力値および壁倍率を Table 5 に示す。標準タイプの A11S の壁倍率は 11.58 倍で、一般的な構造用合板 (片面) の 4 倍以上となった。また、板厚 30mm の A11S と低剛性仕様の B11H は、標

準タイプの 1/2 程度、小壁タイプは開口部高さに概ね反比例した壁倍率となっている。

3.3 解析モデルの検証

木造の場合、材質のばらつきや加工精度により、解析モデルで精密に再現することは困難であるが、ここでは要素実験から得られた復元力特性の平均値を用いて実大試験体の解析モデルを作成し、実験結果と比較を行う。

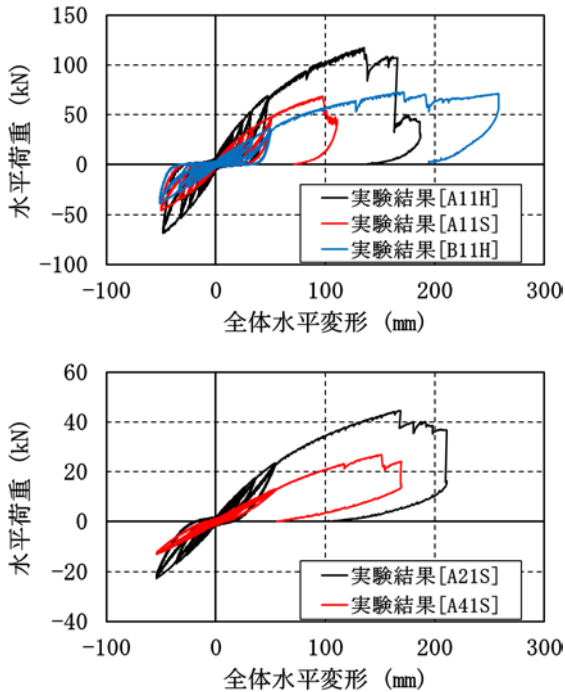


Fig. 6 実大試験体の荷重-変形曲線
Load-Displacement Curve of Full-Scale Specimens

Table 5 実大実験結果
Results of Full-Scale Test

試験体	初期剛性 [kN/rad]	耐力値[kN]				壁倍率
		①	②	③	④	
A11H	4254	62.8	40.9	78.5	41.7	11.58
A11S	3013	36.1	19.3	45.6	27.7	5.48
B11H	1883	42.5	27.7	48.5	19.5	5.52
A21S	1150	23.8	14.6	29.6	12.4	3.52
A41S	633	15.2	7.2	17.9	6.2	1.75

①Py, ②0.2Pu/Ds, ③Pmax×2/3, ④1/120rad

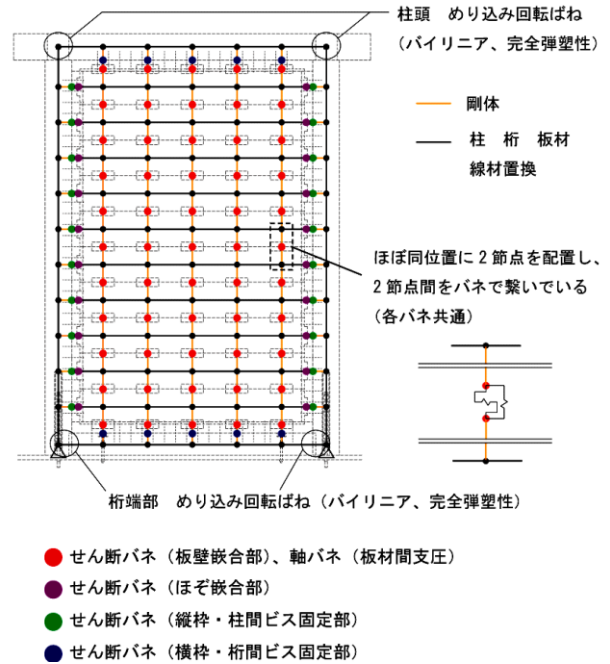


Fig. 7 解析モデルの概要
Overview of Analytical Model

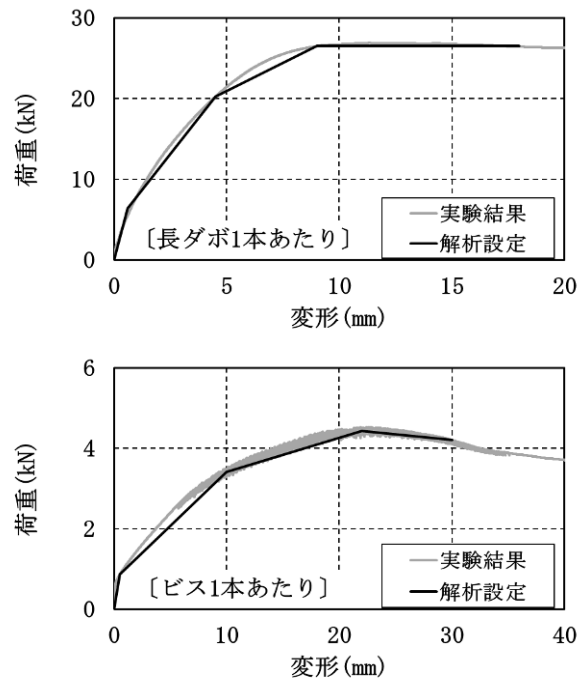


Fig. 8 接合部の復元力特性
Load-Displacement Curve of Spring Element

解析モデルの概要を Fig. 7 に、接合部の復元力特性を Fig. 8 に示す。柱および梁桁と板壁パネルは線材に置換し、架構の仕口部はめり込みによる復元力を表す回転ばねとした。長ダボ部分は板壁同士のずれをせん断ばね、支圧を軸ばねで評価し、ほぞとビスはせん断ばねとした。

全面壁タイプの試験体について、解析により得られた荷重-変形曲線を実験結果と比較して Fig. 9 に示す。板厚 45mm の A11H と B11H は、初期剛性・復元力特性ともに、破断による荷重低下の直前まで実験結果とよく一致している。板厚 30mm の A11S は、解析の初期剛性が高く、大変形になると徐々に実験結果に近づく傾向があるが、最大荷重は実験結果とほぼ一致している。

以上より、要素実験結果を取り入れた解析モデルであれば、実際の挙動を概ね再現することが可能である。ただし、実施設計においては、材質のばらつき等を考慮し、幅をもたせた検討が必要である。また材質や厚みを変更する場合は、事前に要素実験を行うことが望ましい。

4. 実物件への適用

4.1 耐震改修計画

Photo 3 の中尊寺本堂は明治 42 年 (1909) に再建され、一山の中心となる建物である。平成 23 年 3 月 11 日の東北地方太平洋沖地震において土壁の一部にひび割れが生じており、平泉が世界文化遺産に指定されたことから構造安全性確保のため、耐震改修を行うこととなった。耐震改修工事において、建築主の要望は、創建当時の姿をそのまま残す改修の実現であり、「外観と使い勝手を変えずに」大地震時の安全性を確保する技術として、ス

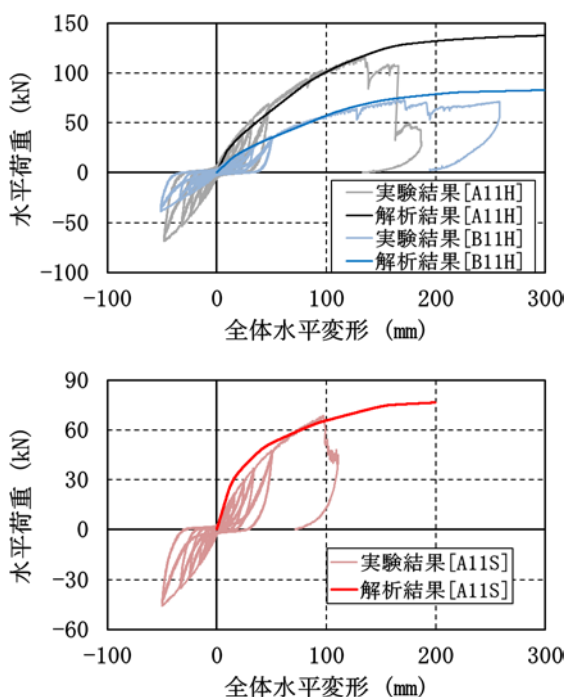


Fig. 9 荷重-変形曲線の比較
Load-Displacement Curve by Analysis and Test

ーパー板壁工法が採用された。

改修計画では既存の開口部を塞がない方針とし、Fig. 10 のように、内陣回りに長ダボを 300mm ピッチで配した標準タイプのスーパー板壁を主体とした補強を行い、外周小壁では中地震時での柱頭部曲げ破壊を避けるため長ダボを 600mm ピッチで配して板壁の剛性・耐力を低減した低剛性タイプのスーパー板壁を配置した。

さらに、小屋裏に水平ブレースを設置し、内陣回りは床下の筋違補強 (Photo 4)、基礎コンクリート打設 (Photo 5) および柱脚アンカー設置などで足固めを行い、地震力をスムーズに板壁に伝達できる構造とした。スーパー板壁設置状況を Photo 6、内陣の完成状況を Photo 7 に示す。

4.2 補強後の耐震性能

限界耐力計算法により評価した結果、Fig. 11 に示すように、中地震動時における層間変形角は許容値 1/60 に対して最大で 1/153 (東西方向) であり、大地震動時では許容値 1/30 に対して 1/33 (東西方向) と、「重要文化財 (建造物) 耐震診断基準」の安全確保水準を満足することを確認している。

また、発注者からも、「外観・使い勝手を変えない」耐震補強が実現したことへの満足感、その後の余震等においても揺れが少ないことへの安心感といった点で、高い評価を頂くことができた。



Photo 3 建物外観
Exterior of Chusonji-Temple Hondo

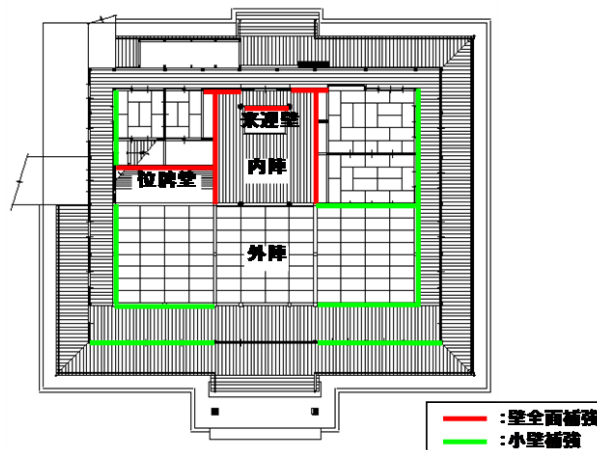


Fig. 10 スーパー板壁の配置
Arrangement of Super Wooden Wall



Photo 4 床の下の筋違補強
Reinforced Under Floor by Braces



Photo 6 スーパー板壁設置状況
Installation of Super Wooden Wall



Photo 5 RC 基礎の施工
Reinforced Concrete Foundation



Photo 7 内陣の完成状況
Inner Temple Completed

5. まとめ

伝統的な落とし込み板壁と同等の意匠性・耐久性に加えて、壁倍率 10 倍を超える耐震性をもつ「スーパー板壁工法」を開発した。

接合部の要素実験と実大加力実験によりスーパー板壁の性能を確認し、板壁の復元力は概ね板厚とダボ数に比例し、小壁の場合には開口部高さに反比例する傾向があることを確認した。

実験結果のシミュレーション解析により解析モデルの妥当性を検証し、要素実験結果を取り入れた解析モデルであれば、実際の挙動を概ね再現できることを確認した。

また、中尊寺本堂の耐震改修に「スーパー板壁工法」を採用することにより、外観・使い勝手を変えない耐震補強を実現することが可能となった。

謝辞

本研究は、東京大学農学部・稲山正弘教授、社寺工舎の菊池恭二棟梁および榎中村建築研究所との共同研究によるものです。また、実験実施に当っては、東日本パワーファスニング(株)よりビスをご提供頂きました。関係各位に深謝いたします。

【東西方向（西⇒東）の応答値】

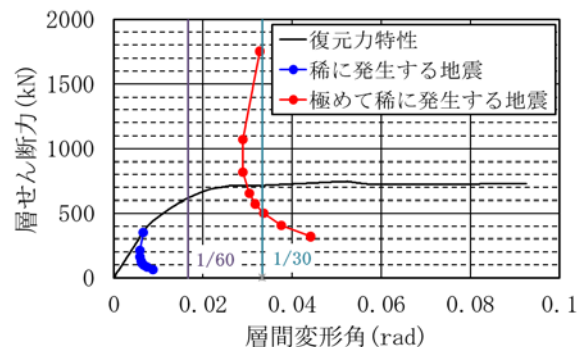


Fig. 11 限界耐力計算法による応答値
Response by Calculation of Limit Strength Method

参考文献

- 1) 榎本浩之, 他: 嵌合部の応力伝達を考慮した板壁工法の開発 (その 1~3), 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-3, pp.91~96, (2011)
- 2) 木村寛之, 他: 嵌合部の応力伝達を考慮した板壁工法の開発 (その 4~5), 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-3, pp.119~122, (2012)
- 3) 長谷部裕, 他: 嵌合部の応力伝達を考慮した板壁工法の開発 (その 6~8), 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-3, pp.491~496, (2013)