

東本願寺御影堂門における板壁構面の耐震性能と 吸い付き桟を用いた補強法に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON SEISMIC BEHAVIOR OF BOARD WALL WITH STIFFENING BAR OF TRADITIONAL WOODEN STRUCTURES

瀧野敦夫¹・鈴木祥之²

Atsuo Takino and Yoshiyuki Suzuki

¹ 奈良女子大学講師 生活環境学部住環境学科 (〒 630-8506 奈良県奈良市北魚屋東町)

Lecturer, Nara-Women's University, Faculty of Human Life and Environment

² 立命館大学教授 衣笠総合研究機構 (〒 525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

Professor, Ritsumeikan University, Kinugasa Research Organization

The very large board walls are used in the traditional wooden structures such as shrines and temples. These board walls are expected to have the seismic performance, however, elucidation of the seismic behavior of the board walls remains incomplete. In this study, we conducted the in-plane shear tests of frames including board walls and attempted to clarify the mechanism of the seismic performance of the large board walls. In addition, we suggested the seismic strengthening scheme with the stiffening bar and verified the stiffening effect by the in-plane shear tests.

Keywords : seismic behavior, board wall, stiffening bar, traditional wooden structures

1. はじめに

現在、東本願寺御影堂門において、耐震補強のための調査研究が実施されている。東本願寺御影堂門は、1911年に再建された幅20.6m、奥行13m、高さ26.89mの建物である(写真1)。この中で、写真2に示すような非常に大きな板壁を含む軸組構面があり、耐震性能が期待できると思われる。しかし、その復元力特性を推定するための根拠規準や技術資料はなく、復元力特性の推定が課題である。

板壁の耐震性能に関しては、住宅規模に用いるような落とし込み板壁に関する実験は多数報告されており(例えば¹⁾、稲山らによって理論的な考察も行われ²⁾、壁倍率認定も行われている³⁾。しかしながら、本論で対象



写真1 御影堂門



写真2 板壁を含む軸組構面

とする非常に大きな板壁を対象とした既往研究は乏しい。そこで、本論では、板壁構面を模擬した軸組による水平せん断加力試験を実施し、破壊挙動や復元力特性について考察するとともに、力学モデルによる復元力特性の推定を行う。また、吸い付き棧を用いた耐震補強法を提案し、その効果を実験により検証する。

2. 実験方法

(1) 試験体

試験体は合計4体とした。試験体1は、現地調査に基づき御影堂門内に現存する板壁を含む軸組構面を模擬した試験体であり、軸組内に3枚の板壁を用いている。試験体2および試験体3は、吸い付き棧と呼ばれる材を板壁内に貫通させた試験体であり、板壁の補強を意図した試験体である。なお、吸い付き棧の段数は試験体2と試験体3でそれぞれ1段と2段とし、吸い付き棧によるずれ止めの効果を検証することとした。試験体4は、3枚の板壁が完全に一枚の板と仮定した場合の挙動を確認するために、軸組内に構造用合板を設けた。なお、試験体4では、先に軸組のみの加力試験を実施し、その後に軸組を一度分解し、構造用合板を設置することで試験体4としている。これは、他の試験体において板壁による耐力を精確に評価するために、軸組のみの耐力を把握するために実施した。

板壁は、板厚30mmのヒノキ(板幅283.3mm・長さ872mm)を2枚重ねで用いた。板壁と上部の梁との間には隙間を3mm設けている。また、荷重時に摩擦による耐力上昇を避けるために、板壁間には約10mmの隙間を設けた。吸い付き棧には、□-30×60のカシを用いた。2枚の板壁にそれぞれ15mmの溝を掘り、その溝に吸い付き棧を挟み込む仕様となっている。また、板壁と吸い付き棧とが荷重時に面外へはらみ出さないように、N50釘により板壁と吸い付き棧とを留めつけている。

軸組には、荷重梁(□-120×180)、土台(□-120×120)、柱(□-120×120)にヒノキを用い、板壁の上下に設けた梁(□-125×160)にケヤキを用いている。上側のケヤキの梁と柱との仕口には引き独鈷(カシ)および車知栓を用い、下側のケヤキの梁と柱との仕口には引き独鈷(カシ)および込み栓を用いた。なお、載

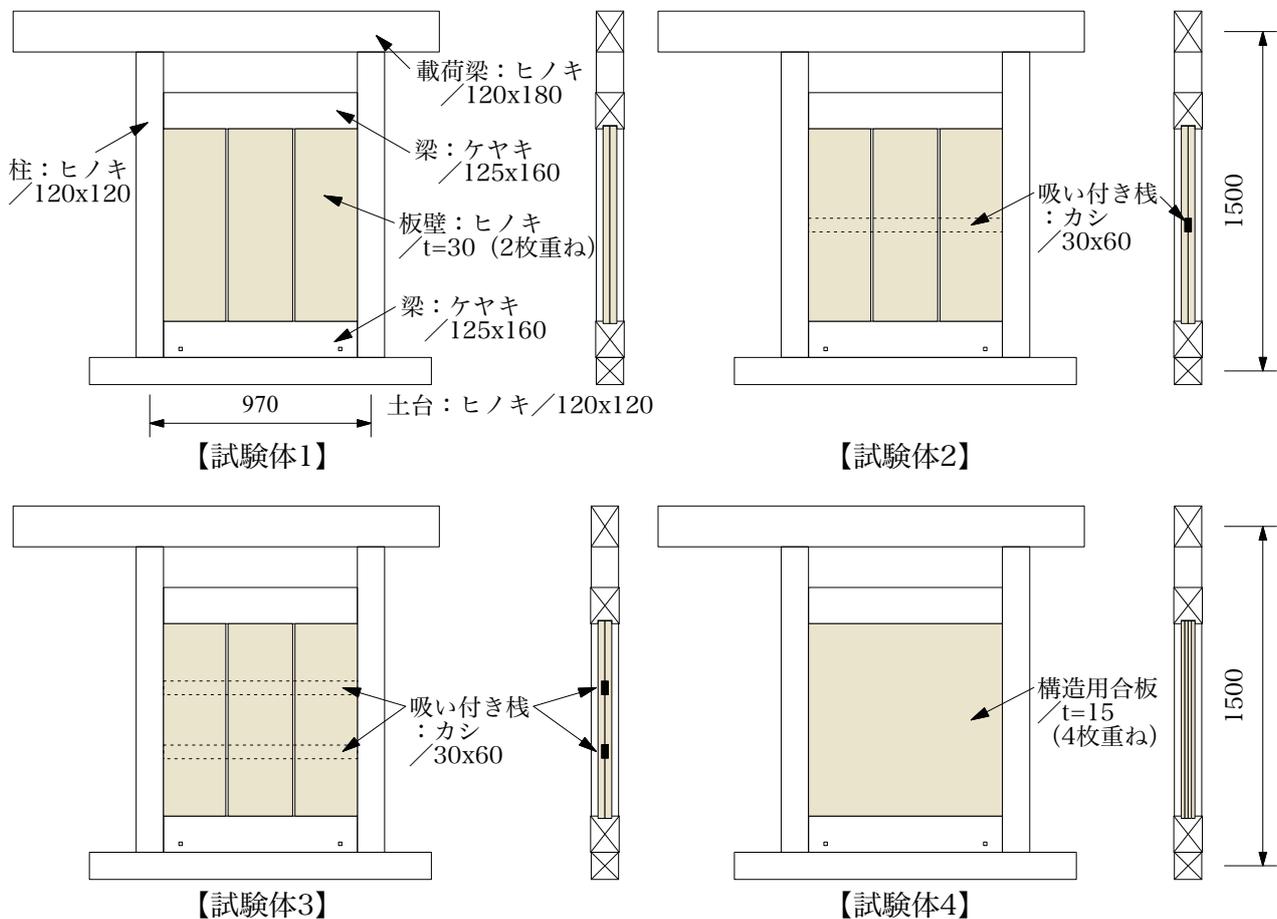


図1 試験体形状

荷梁および土台と柱との仕口は短ホゾとし、込み栓などの引き抜け防止材は用いていない。

(2) 荷重方法

荷重方法を写真3に示す。加力はタイロッド式とし、上部の荷梁に連結した油圧ジャッキにより水平力を加えた。加力は変位制御により行い、1/300、1/200、1/150、1/100、1/75、1/50、1/30、1/15radの変形角を2回ずつ正負交番繰り返し加力とし、最後に約1/10radまで片側加力を行った。

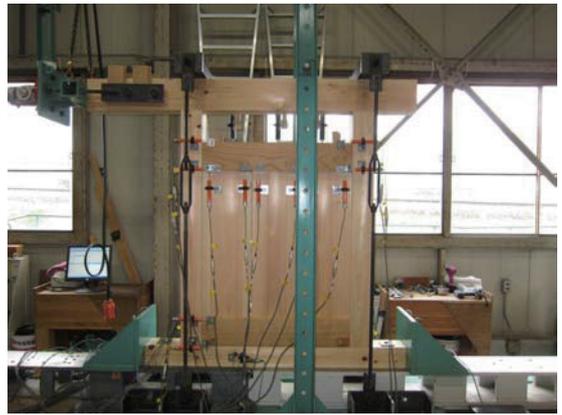


写真3 荷重方法

3. 実験結果

(1) 破壊性状・変形状

図2に荷重-せん断変形角関係を、写真4、写真5に破壊性状の代表例を示す。板壁のみの試験体1では、柱の傾斜とほぼ平行に3枚の板壁が変形した。主な抵抗機構は、板壁の上下の梁へのめり込みによるものであり、解体後の損傷観察ではケヤキの梁にめり込みの跡を確認することができたが、板壁も角が押しつぶされており、局所的に大きな力が生じたことがわかる。また、板壁のめり込みによって生じる力により、板壁の上部にある梁が荷重の進行とともに上に押し上げられ、梁を支える仕口部の引き独鉗に大きなめり込みが生じた。

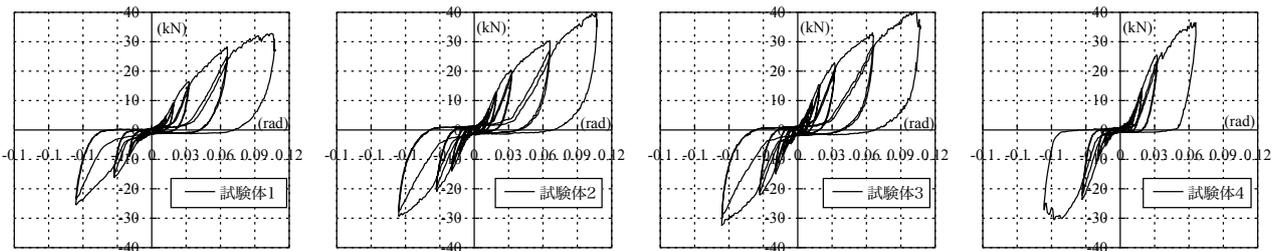


図2 荷重-せん断変形角関係



【梁(ケヤキ)の溝に生じた板壁によるめり込み跡】

【板壁端部の圧壊】

【梁の上部への押し上げ】

【引き独鉗のめり込み】

写真4 破壊性状(試験体1)



【板壁側面の圧壊】

【軸組ととの間に生じた隙間】

【柱-梁仕口の引き抜け破壊】

【吸い付き棧と板壁との間に生じた隙間】

写真5 破壊性状(試験体2および試験体3)

試験体2および試験体3では、吸い付き棧を設けたことで板壁のずれ変形が抑制され、大変形時に板壁と軸組との間に隙間が生じた。また、一体化されたことで柱間に圧縮力が対角線上に伝達されるようになり、そのため柱-梁仕口において引き抜け破壊を生じた。解体後の損傷観察では、対角線上に生じた圧縮力によって板壁の側面が押しつぶされた跡を確認することができた。また、吸い付き棧には大きな損傷は見られず、板壁の端部と吸い付き棧との間に少しだけ隙間が生じた程度の損傷であった。

試験体4は、吸い付き棧による補強試験体と同傾向の破壊性状を示し、対角線上に圧縮力が伝達されることで柱-梁仕口の引き抜け変形が生じ、また構造用合板と軸組との間に隙間が見られた。試験体4では、元々軸組だけの試験を先に実施していたため、載荷前から柱-梁仕口に損傷があり、これが原因で1/15rad付近で仕口が完全に破壊し、加力を終了した。

(2) 板壁の変形挙動

図3に示すように、板壁の上部に取り付けた変位計から読み取った板壁と梁との相対変位の推移を図4に示す。板壁のみの試験体1では、加力開始から板壁のずれ変形が大きく、3枚の板壁はほぼ同程度の回転変形をしていることがわかる。しかし、吸い付き棧を付与した試験体2、試験体3では小変形時には変位計の値がほぼ直線的に分布しており、3つの板壁が一体化して変形していることがわかる。ただし、両試験体とも1/30rad時には板壁のずれ変形が生じ始めており、一体化効果が失われつつあることがわかる。また、構造用合板を用いた試験体4では、完全に一枚の板を用いているため、試験体1～3のようなずれ変形は一切見られず、大変形時においても変位計の値はほぼ直線挙動のままである。

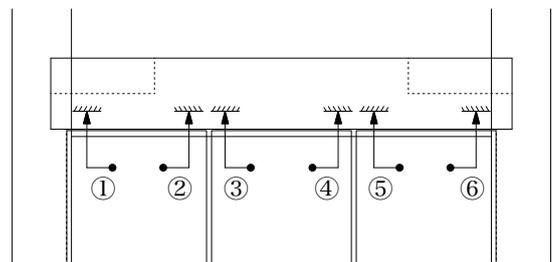


図3 板壁と梁との相対変位の計測位置

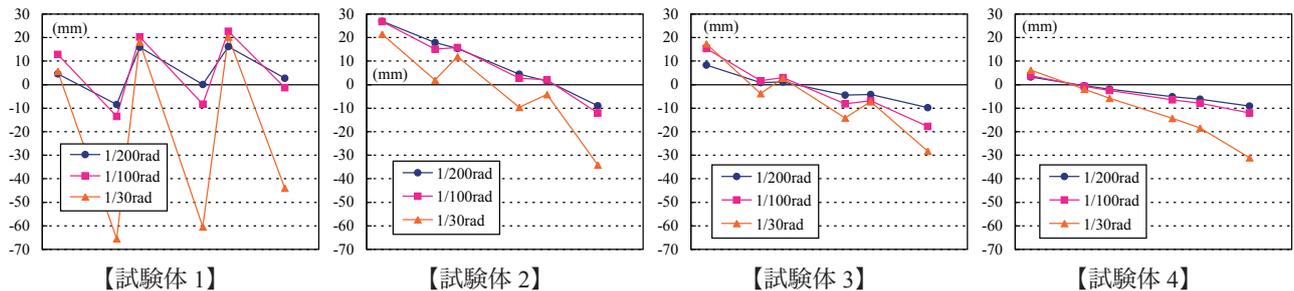


図4 板壁と梁との相対変位の推移（グラフの左から右に向かって①～⑥の変位計の値を示す。）

(3) 補強効果の検証

荷重-せん断変形角関係の正側の包絡線を図5に、軸組の結果を除去したものを図6に示す。板壁と上部の梁との間には3mmほどの隙間があるため、1/100rad付近まで板壁による耐力上昇がほとんど見られない。

同一変形角時の板壁1の耐力に対する各試験体の耐力の比の推移を図7に示す。ただし、1/100rad以降の結果のみを示している。図より、同一変形角で比較すると、ほぼ全域にわたって試験体2、試験体3、試験

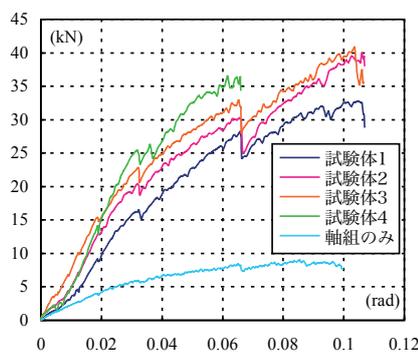


図5 荷重-せん断変形角関係の正側の包絡線

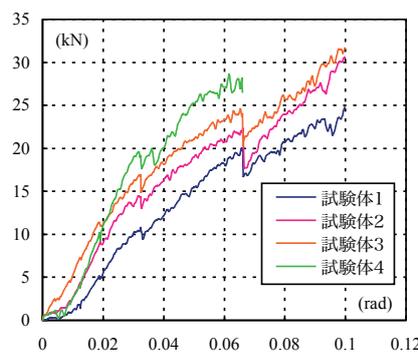


図6 荷重-せん断変形角関係の正側の包絡線（軸組除去）

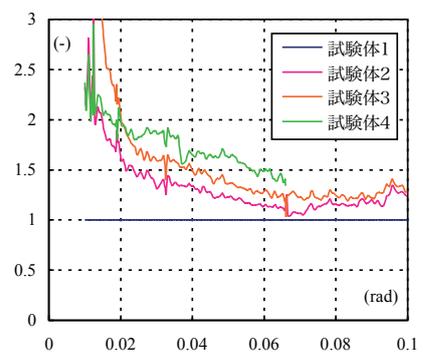


図7 試験体1に対する耐力比の推移

体4の順に耐力が高くなっており、吸い付き棧の段数による一体化効果の差が現れているといえ、1/50rad付近の耐力比で比較すると吸い付き棧1段の試験体2で約1.6倍、吸い付き棧2段の試験体3で約2倍の補強効果を確認することができた。しかし、変形角が進むにつれて、徐々に耐力比は小さくなっており、一枚の構造用合板を用いている試験体4でもほぼ同様の傾向である。つまり、今回の実験においては、吸い付き棧の周辺が塑性化したのではなく、軸組の損傷による耐力低減の方が顕著であるといえる。また、1/15rad付近からは軸組の損傷が進行していることから試験体ごとの差は小さくなっている。

4. 要素実験

(1) はじめに

前章までに述べた試験において、载荷終了後の試験体から要素試験体を取り出し、横圧縮試験、めり込み試験を実施した。

(2) 横圧縮試験

横圧縮試験体の形状を図8に、载荷の様子を写真6に示す。試験体数は、ケヤキを4体、ヒノキを2体とした。計測項目は、荷重、クロスヘッド間の変形、载荷方向のひずみとした。加力は単調载荷とし、降伏後十分に塑性変形が進行した時点で加力終了とした。

応力度-ひずみ度関係の一覧を図9に、試験結果一覧を表1に示す。なお、応力度は荷重を試験体の断面積で除した値とし、ひずみ度は変位計の値を試験体長さで除した値と2つのひずみゲージの平均値をそれぞれ用いた。

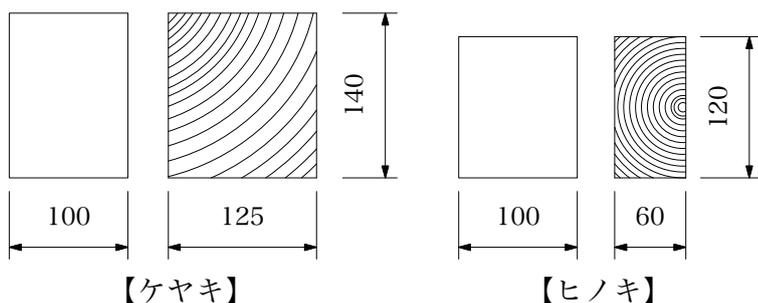


図8 横圧縮試験体



写真6 横圧縮試験の载荷状況

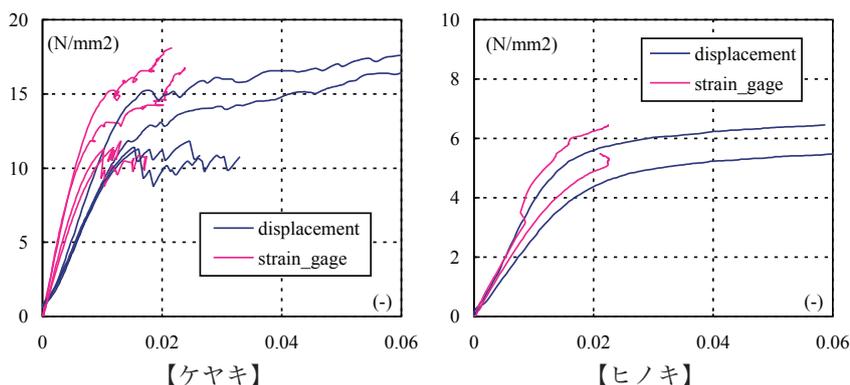


図9 応力度-ひずみ度関係 (横圧縮試験)

表1 結果一覧 (横圧縮試験)

試験体	ヤング係数		降伏応力度 N/mm ²
	変位計 N/mm ²	ひずみゲージ N/mm ²	
ケヤキ1	960.1	2046.2	10.09
ケヤキ2	1148.5	1869.6	11.34
ケヤキ3	899.8	1514.7	8.45
ケヤキ4	947.6	1316.3	7.63
平均値	989.0	1686.7	9.38
ヒノキ1	436.4	352.3	3.95
ヒノキ2	269.2	315.8	3.02
平均値	352.8	334.1	3.49

(3) めり込み試験

めり込み試験体の形状を図10に示す。試験体中央に断面が□-45×120の加力治具を用いて载荷を行った。ただし、ケヤキとヒノキに関しては、ヒノキ板のめり込みを確認するために、写真7に示したように加力治具を直接を用いる場合と加力治具と同じ断面のヒノキ材を介して加力する場合の合計2種類を実施した。試験体数は、カシが3体、ケヤキが4体 (ヒノキ材を介したものが2体)、ヒノキが6体 (ヒノキ材を介したものが2体) とした。加力は単調加力とし、降伏後、十分に塑性変形が進行した時点で加力終了とした。

図 11 に荷重-めり込み変形関係を示す。ケヤキの試験結果で、ヒノキ材を介したものと加力治具を直接用いた場合とで大きな差が生じているが、これは元の材料強度のバラツキが原因と考えられる。その理由として、図 9 および表 1 の横圧縮試験結果を見ると、ケヤキ 1、ケヤキ 2 の耐力と比べてケヤキ 3、ケヤキ 4 の耐力が非常に低いことが挙げられる。めり込み試験体と横圧縮試験体は元々同じ材から取り出しているため、これらの関連性は非常に強いと思われる。

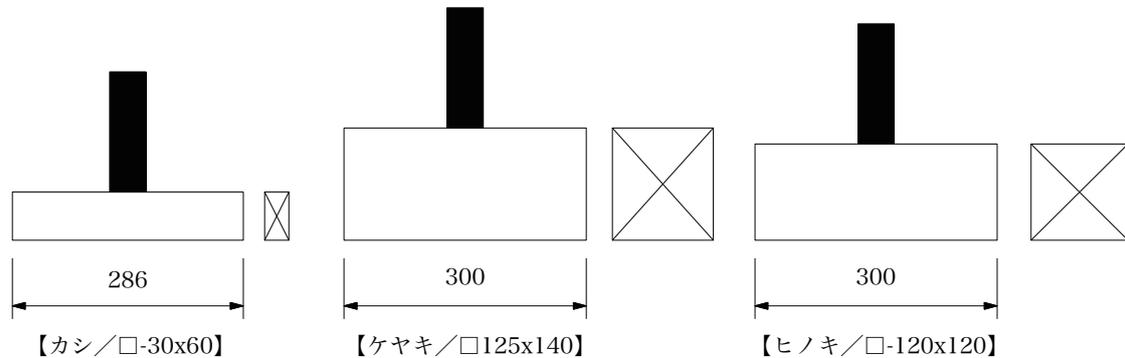


図 10 めり込み試験体形状



写真 7 めり込み試験方法 (左: 加力治具のみ / 右: ヒノキ材有り)

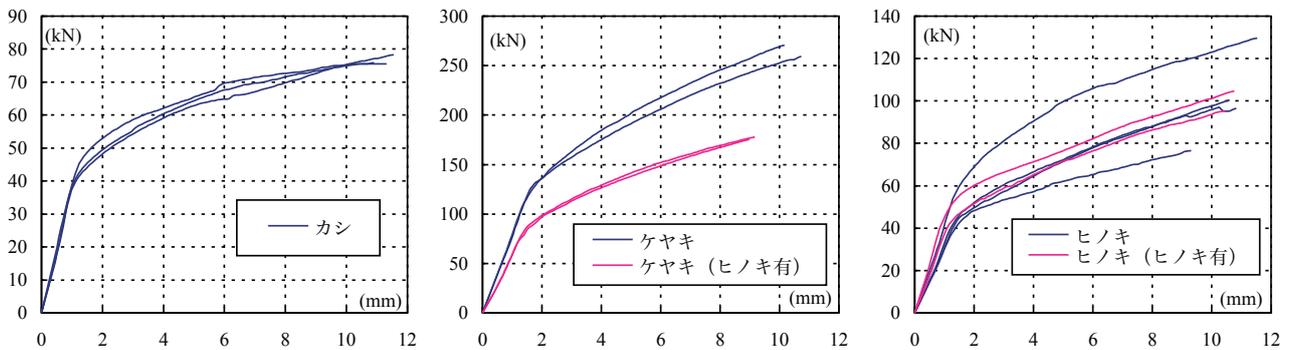


図 11 めり込み試験結果 (荷重-めり込み変形関係)

5. 力学モデルによる復元力特性の推定

(1) 力学モデル

板壁のみを用いた試験体 1 の力学抵抗モデルを図 12 に示す。柱の傾斜に伴い、板壁が柱と同様に傾斜することにより、上下の梁 (ケヤキ) にめり込み抵抗が生じ、このめり込みによる力が抵抗モーメントとなると仮定した。なお、めり込みによって生じる抵抗モーメントは、稲山のめり込み式^{4) 5)}を参照した。表 2 に稲山のめり込み式に用いた諸定数を示す。上下の梁の樹種がケヤキであるため、諸定数は文献 5) を参考にしている。また、めり込み範囲 X_p は、文献 2) を参照し、板壁の幅の $1/3$ とした。

板壁と梁との間には初期クリアランスが存在しているため、ある変形角まではめり込みが生じない。そこ

で、図 13 に示すように、板壁が回転することで生じる板壁頂点の y 方向の変位量 Δy_1 と梁を含む軸組が柱の下部を基点に回転変形した際に生じる y 方向の変位量 Δy_2 とを考え、 Δy_1 と Δy_2 との和が初期クリアランスとなる点を板壁と梁とが接触する変形角とした。接触後は通常の稲山のめり込み式と同様に、一定のめり込み範囲を保持した状態で、変形角の進展とともにめり込み量が増大するとした。

一方、めり込みが生じることにより、写真 4 で示したように板壁が上部の梁を上側に押し出すため、めり込みによる抵抗力は梁の変形によって低減されると考えられる。梁は、柱-梁仕口の引き独鈞によって上下方向に拘束されており、引き独鈞のめり込み抵抗により梁を単純支持していると考えられる (図 14・図 15)。この際に、引き独鈞のめり込み変形量を Δy_3 とし、図 16 に示したように Δy_3 が生じることでめり込み範囲 X_p が減少するとした。 Δy_3 を考慮しためり込み範囲 X_p' は幾何学的な関係より次式から求めた。

$$X_p' = X_p - \frac{(\Delta y_3 - \Delta y_2)}{2 \cdot R} \quad (1)$$

なお、上式では、軸材の幾何学的変形による Δy_2 も考慮した。さらに、今回の試験体では板壁の上下の土台と梁との拘束条件が異なるが、本論の計算では簡便のため対称と仮定し、式 (1) の第 2 項に示したように X_p' を求める際には $(\Delta y_3 - \Delta y_2)/2$ として計算した。

また、引き独鈞のめり込みによる支点反力 V は、図 12 に示すように、板壁が梁を押し上げる力を両側で均等に支えるとして、次式より求めた。

$$V = \frac{N_1 + N_2 + N_3}{2} \quad (2)$$

ここで、 N_1 、 N_2 、 N_3 は板壁がめり込みによって梁を押し上げる力とする (図 12 参照)。

Δy_3 を変数として、引き独鈞と板壁のめり込み反力をそれぞれ求め、式 (2) が成立するように収斂計算をし、板壁の抵抗モーメントを求める。

(2) 計算結果と実験結果の比較

計算結果と実験結果の比較を図 17 に示す。なお、要素実験結果に基づき推定した引き独鈞のめり込み特性を図 18 の case1 に示す。図 17 の case1 の結果では、初期剛性は実験結果と良い対応を示しているものの、降伏後の耐力に大きな開きが見られた。そこで、引き独鈞のめり込み特性値において、初期剛性は保持しつ

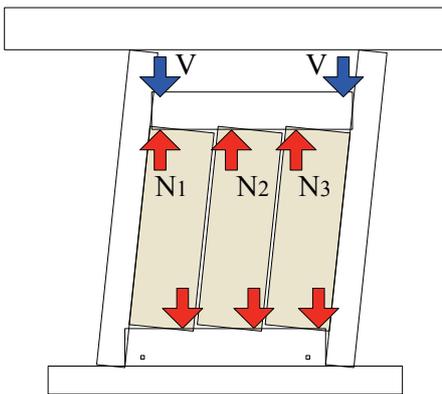


図 12 力学抵抗モデル

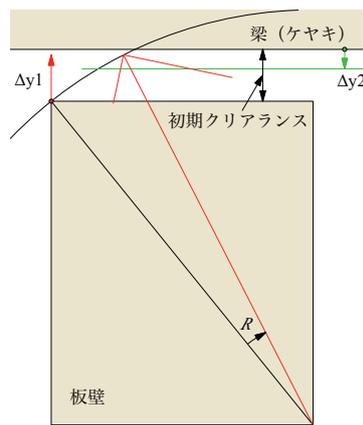


図 13 板壁と梁の回転による y 方向変位

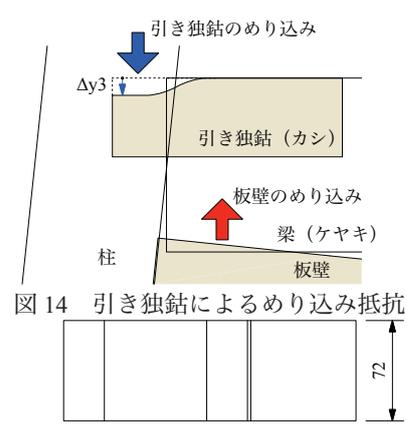


図 14 引き独鈞によるめり込み抵抗

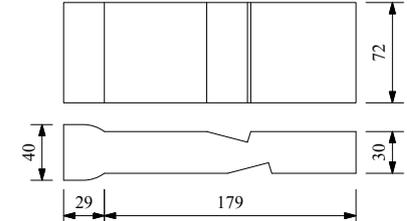


図 15 引き独鈞の形状

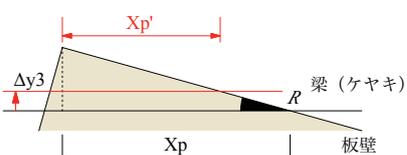


図 16 めり込み範囲 X_p

表 2 計算に用いた諸定数

梁 (ケヤキ) の縦ヤング係数	E_0	11.5	kN/mm ²
全面横圧縮ヤング係数	$E_{90}=E_0/15$	767	N/mm ²
めり込み基準材料強度	F_{cv}	21.3	N/mm ²
めり込み範囲	X_p	94.3	mm
稲山めり込み式におけるパラメータ	n	4	-
稲山めり込み式におけるパラメータ	A	4	-

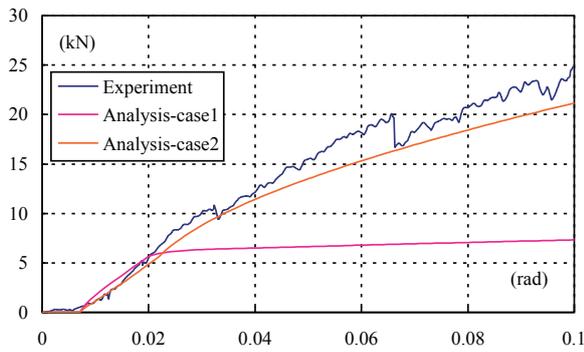


図 17 計算結果と実験結果の比較

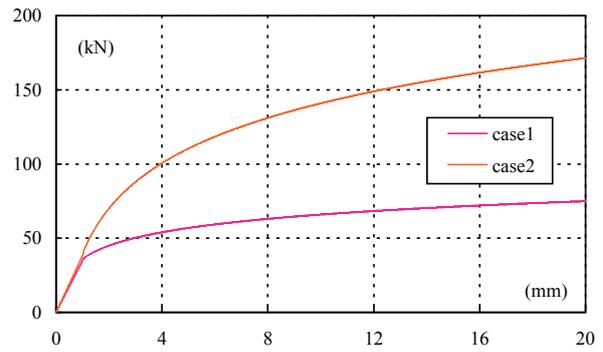


図 18 引き独鈷のめり込み荷重-めり込み変形関係

つ降伏耐力と 2 次剛性を増加させた結果が case2 の結果であり、実験結果と良い対応を示すようになった。要素実験で実施したカシのめり込み試験のデータが少ないことから、バラツキも含めて引き独鈷のめり込み耐力の推定精度についてさらに検討が必要であると思われる。また、本論の検討においては板壁を剛体と仮定しているが、実際には写真 4 に示したように板壁自身も圧壊しており、板壁の圧壊の影響をどのようにして力学モデルに考慮するかも今後の課題である。

6. まとめ

本論では、東本願寺御影堂門における板壁構面の耐震性能および吸い付き棧を用いた補強効果について、実験による検証を行った。また、板壁の耐力発現メカニズムについて、力学モデルを検討し実験結果と比較検討した。以下に、本論で得られた結論を示す。

- ・板壁のみの試験体では、板壁が上下の横架材にめり込むことで耐力を発現しているが、このめり込みによって生じる力により上下の横架材を押し上げることとなり、試験体の最大耐力や終局状態は軸組の耐力に依存する結果となった。
- ・吸い付き棧を付与することにより、3 枚の板壁で一体化効果を確認することができた。一体化することにより、柱間に対角線上の圧縮力が卓越し、両端の柱を押し広げるような破壊性状を確認した。
- ・吸い付き棧による補強試験体と板壁のみの試験体との耐力を比較すると、小変形時では 1.6 倍～2 倍程度の補強効果を確認することができたが、大変形時には軸組が損傷したために無補強試験体と補強試験体との耐力差はほとんど見られなくなった。

謝辞：本研究は、東本願寺耐震調査研究委員会のもとで実施されました。また、本研究を進めるにあたり、有限会社播磨社寺工務店には多大なるご協力をいただきました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 飯田龍太、北原昭男：伝統構法住宅に適用可能な落とし込み板壁の開発に関する研究、日本建築学会九州支部研究報告、第 49 号、pp.677-680、2010.3
- 2) 稲山正弘、青山章一、村上雅英：落とし込み板壁の面内せん断試験と力学的挙動の解析、日本建築学会構造系論文集、第 76 巻、第 659 号、pp.97-104、2011.1
- 3) 土塗壁等告示に係る技術解説書作成編集委員会：土塗壁・面格子壁・落とし込み板壁の壁倍率に係る技術解説書、(財)日本住宅・木材技術センター、2004.12
- 4) 稲山正弘：木材のめりこみ理論とその応用、東京大学学位論文、1991.12
- 5) 藤田克則、稲山正弘、安藤直人：接合具に用いられる広葉樹材の横圧縮性能、木材学会誌、Vol.58、No.4、pp.181-192、2012