

柱の傾斜復元力特性を含む礎石建ち板壁構面の繰り返し載荷実験

Cyclic loading tests of traditional timber frames with board wall on foundation stone including restoring force characteristics of column rocking

瀧野敦夫¹・佐藤澂²・日比野惇³・江南桃⁴・宮本裕司⁵

Atsuo Takino, Mio Sato, Atsushi Hibino, Momo Enami and Yuji Miyamoto

¹奈良女子大学准教授 生活環境学部住環境学科 (〒630-8506 奈良県奈良市北魚屋東町)
Associate Professor, Nara Women's University, Dept. of Residential Architecture and Environmental Science

²株式会社構造計画研究所 構造設計2部 (〒164-0012 東京都中野区本町4-38-13)
Staff, KOZO KEIKAKU ENGINEERING Inc.

³鹿島建設株式会社 構造設計本部 (〒107-8388 東京都港区元赤坂1-3-1)
Staff, KAJIMA CORPORATION

⁴積水ハウス株式会社 建築事業開発部 (〒531-0076 大阪市北区大淀中一丁目1番88号)
Staff, Sekisui House Ltd.

⁵大阪大学教授 工学部地球総合工学科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)
Professor, Osaka University, Dept. of Architectural Engineering

In this study, we conducted the horizontal shear loading tests of the board wall on foundation stone under the axial compressive force acting on columns. Under low axial force, there was almost no difference in strength with or without board walls. This is likely due to the fact that the columns were pushed horizontally by the compressive resistance of the board walls and therefore the board walls did not resist effectively. Under high axial force, the horizontal deformation of the column was suppressed due to the increased frictional force of the column base, and it was confirmed that the strength was increased by inserting the board walls compared to the specimen under low axial force.

Keywords: *shrine and temple structure, board wall, on foundation stone, column rocking*

1. はじめに

伝統構法による木造建築物の中でも神社や仏閣のような建築物では、外壁が板壁を含む軸組構面で構成されていることが多い。地震時には板壁構面も耐震要素として機能するが、民家でよく用いられる土壁と比べて板壁の方が地震時の抵抗力が強いため、接合部を含めた周辺の軸組が損傷することは地震被害調査¹⁾や既往実験²⁾から明らかにされている。また、このような建物では礎石建ち構法で建てられていることも多いため、礎石建ちの柱脚が地震時の板壁の圧縮抵抗力により滑り動くことも考えられる。社寺建築物の耐震設計を行うためにはこのような板壁構面の復元力特性を正確に把握する必要があるが、特に礎石建ち仕様の実験事例は非常に少なく³⁾、十分な検証が行われたとは言い難い。また、板壁の評価には技術解説書⁴⁾やその基となる実験事例⁵⁾が報告されているが、これらは民家での利用や新築の住宅を対象としており、先述したような課題を含めた既存の社寺建築物への適用は難しい。そこで本研究では、礎石建ち仕様の板壁構面の水平せん断加力試験を実施し、その破壊挙動や復元力特性について考察した。なお、礎石建ち仕様の実験では柱脚の滑りを抑制することが重要であるが、今回の実験では柱に圧縮軸力を作用させ柱脚の摩擦力によって試験

体の水平移動を支持したため、板壁構面の復元力特性以外に圧縮軸力に起因する柱の斜復元力特性⁶⁾も期待される。

2. 実験方法

(1) 試験体

試験体形状を図1に示す。試験体は柱、梁と2段の貫からなる軸組のみの試験体（以降、軸組試験体と呼ぶ）と、軸組試験体に板壁を付け加えた試験体（以降、板壁試験体と呼ぶ）の2種類とした。なお、試験体は既往の振動台実験⁷⁾で用いた試験体を再利用したが、振動台実験では主要な部材にはほとんど損傷は見られなかったため、今回の実験では楔のみを新しいものに取り替えた。軸組試験体と板壁試験体の2種類に後述する2種類の鉛直荷重の組み合わせで、合計4体の実験を実施した。

柱、梁は□-180×180のヒノキ材を、貫は□-120×50のヒノキ材を用いた。また、楔も同様にヒノキ材を用いた。板壁と柱-貫接合部の詳細図を図2に示す。柱-貫接合部は楔を用いた通し貫接合とし、貫の上部に16mmのクリアランスを設け、そこに楔を打ち込んだ。板壁は厚さ18mmのヒノキ材を用い、板壁の繊維方向が梁や貫の繊維方向と同じ方向になるように横使いとして用いた（図1中の矢印の向き）。また、板壁を挿入するために周辺の柱や貫には板壁用の溝を設けた。なお、板壁は軸組寸法から上下左右ともに5mm程度小さく製作されているため、製作後には上下左右それぞれに5mm程度のクリアランスが存在している。

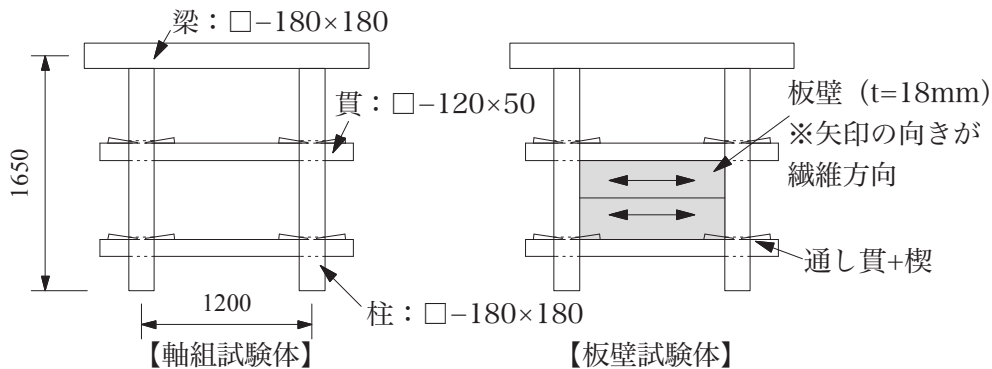


図1 試験体形状

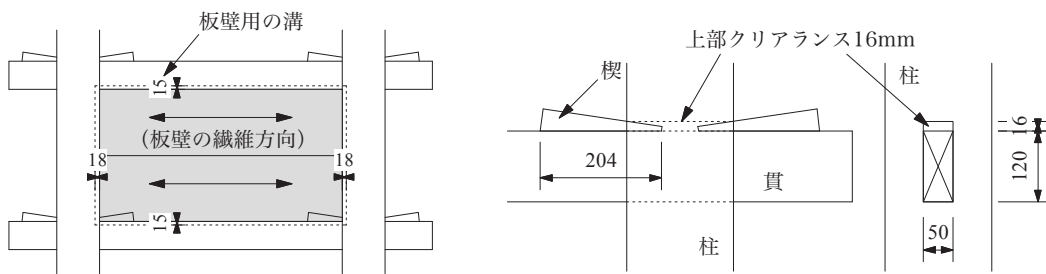


図2 板壁と柱-貫接合部の詳細図

(2) 載荷方法

載荷装置を図3に、接合部の変位計測位置を図4に示す。試験体上部に設置した鉄骨梁の両端に鉛直油圧ジャッキを用いて鉛直荷重を加えつつ、鉄骨梁の上部に設置したピン治具を介して水平力を加えた。鉛直荷重は2種類とし、柱1本あたりの圧縮軸力がヒノキの繊維直交方向の基準材料強度（7.8N/mm²）の0.05倍（柱2本の合計軸力：25.3kN）と0.25倍（柱2本の合計軸力：126.4kN）となるように設定した。なお、加力中は上部の鉄骨梁の水平を保持しつつ、左右の鉛直油圧ジャッキに作用する軸力の合計値がそれぞれ25.3kNと126.4kNとなるように制御した。試験体は反力用の鉄骨梁の上に設置しただけの状態とし、柱脚の水平方向の変形は特に拘束していない。

載荷スケジュールは変位制御とし、見かけのせん断変形角が0.005 (1/200) rad、0.01 (1/100) rad、0.02 (1/50) radとなるよう2回ずつ正負交番繰り返し加力を行い、最後に0.1 (1/10) rad付近まで片側加力を行った。

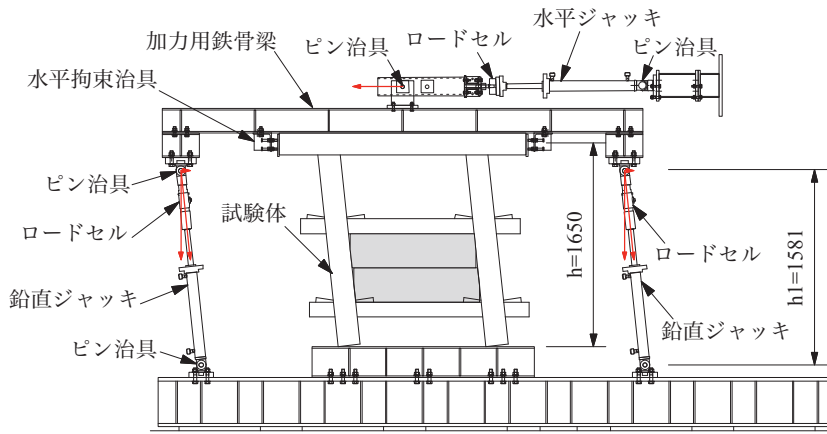


図3 载荷装置

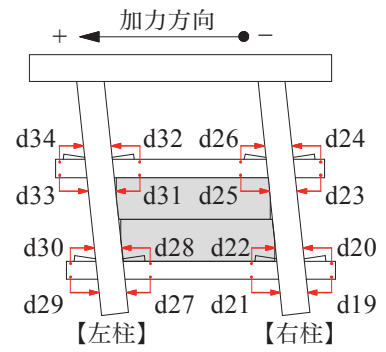


図4 接合部の変位計測位置

3. 結果と考察

(1) 破壊性状・変形性状

荷重-見かけのせん断変形角関係の一覧を図5に示す。なお、礎石建ち仕様の試験体では柱脚の水平変位も生じてしまうことから、上部に設置した加力用鉄骨梁の水平変位を試験体高さ ($h=1,650\text{mm}$) で除した値を見かけのせん断変形角として定義した。また、今回採用した加力形式では、鉛直油圧ジャッキにより軸力を作用させているため、水平変位の進展に伴い鉛直油圧ジャッキに傾きが生じ、その傾きによる水平分力が水平荷重として検知されることとなる。そこで、次式により荷重の補正を行っている。

$$Pr = P - (N_1 + N_2) \cdot \sin(R_1) \quad (1)$$

ここで、 Pr は水平荷重の補正值、 P はロードセルで計測した水平荷重、 N_1 は鉛直油圧ジャッキ（左側）のロードセルで計測した鉛直荷重、 N_2 は鉛直油圧ジャッキ（右側）のロードセルで計測した鉛直荷重、 R_1 は油圧ジャッキのせん断変形角である。

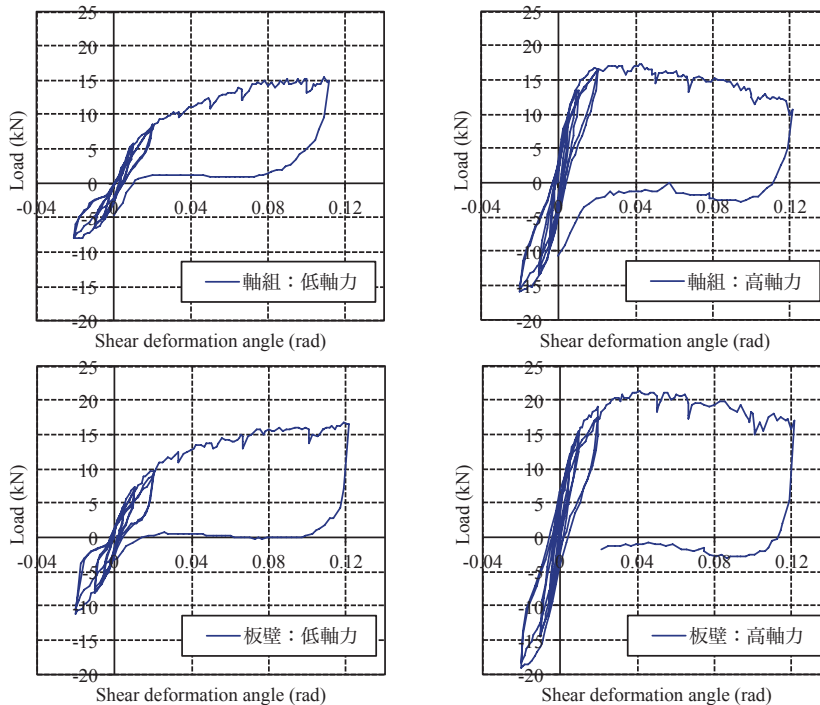


図5 荷重-見かけのせん断変形角関係（縦軸には式(1)で補正した Pr を採用）

なお、2本の柱に作用する軸力の合計値 Nr についても式(2)のように傾きによる誤差が生じるが、水平分力と違い軸力の絶対値が大きいため、傾きによる誤差は非常に小さく（0.1rad時での誤差が0.14kN（低軸力）、0.69kN（高軸力））、計算値を求める際には特に考慮しない。

$$Nr = (N_1 + N_2) \cdot \cos(R_1) \quad (2)$$

また、軸力を一定に保持するために、鉛直油圧ジャッキを上下に動かしているため水平の加力用鉄骨梁が上下しており、これが原因で水平油圧ジャッキも若干ではあるが傾きを生じることになるが、この誤差も非常に小さかったため、今回の検討では無視することとした。

いずれの試験体においても、低軸力の実験結果では見かけのせん断変形角が0.01rad付近から剛性が徐々に低下し始めるものの、0.1rad付近まで緩やかに荷重上昇を続けており、安定した履歴特性を示した。一方で、高軸力の実験結果では0.02から0.04rad付近で最大値を迎え、それ以降は徐々に荷重が低下していることがわかる。この荷重低下は柱の傾斜復元力特性に起因するものと考えられる。

図6に終局時の試験体全体の様子の一例を、図7に板壁試験体の終局時の柱頭柱脚の様子を示す。目視では特に顕著な破壊は見られなかったが、柱頭側で梁のめり込み変形が僅かに見られ、高軸力の試験体の方がめり込み変形は顕著であった。柱脚側ではいずれの試験体も木口の圧壊はほとんど見られなかった。また、板壁試験体では、変形の進展に伴い横使いとして設置された板壁の繊維方向の圧縮抵抗によって柱が左右に押し出される様子を目視で確認することができた。これが原因で図8に示すように貫が柱から引き抜けている様子も目視で確認できた。

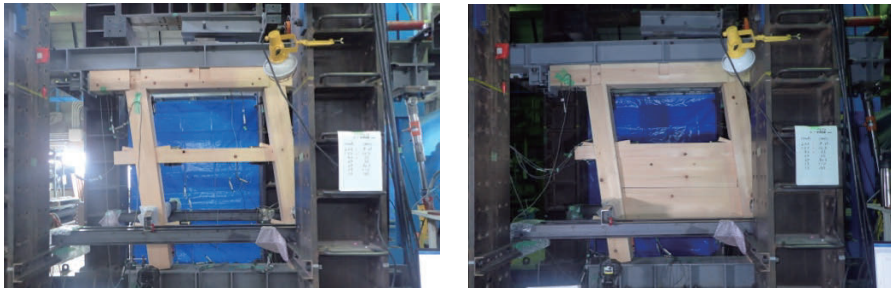


図6 終局時の試験体の様子の一例（左：軸組試験体／高軸力、右：板壁試験体／高軸力）



図7 板壁試験体の終局時の柱頭柱脚の様子（上：低軸力／下：高軸力）



図8 板壁試験体における貫の引き抜けの様子（左：低軸力／右：高軸力）

図9に各接合部における柱の貫からの引き抜け量の推移を、図10に柱脚のすべり量の推移を示す。なお、いずれのグラフも横軸は試験体の見かけのせん断変形角を示す。ここで、柱の貫からの引き抜け量は図4で示した各接合部に設置した変位計を用い、1対の上下の変位計の平均値を柱の左右でそれぞれ求め、左右の値をさらに平均化して1接合部あたりの引き抜け量とした。この時、貫に対して柱が加力の正方向へ変位したときを正とした。また、柱脚のすべり量は柱脚が加力の正方向へ変位したときを正とし、図11に示すように柱の傾斜により生じる変位を取り除いた値とした。なお、貫の引き抜け量も柱脚の移動量も同符号の場合は柱が平行移動していることを示している。図9、図10のいずれも明らかに板壁試験体に低軸力を作用させた場合の変位量が突出しており、板壁の繊維方向の圧縮力によって柱が左右に押し広げられた様子が見てとれる。一方で高軸力を作用させた板壁試験体では、低軸力の時と比べて貫の引き抜け量も柱脚の水平移動量も全体的に低い値を示している。これは、高軸力によって柱脚の摩擦力が上昇したことが原因と考えられる。

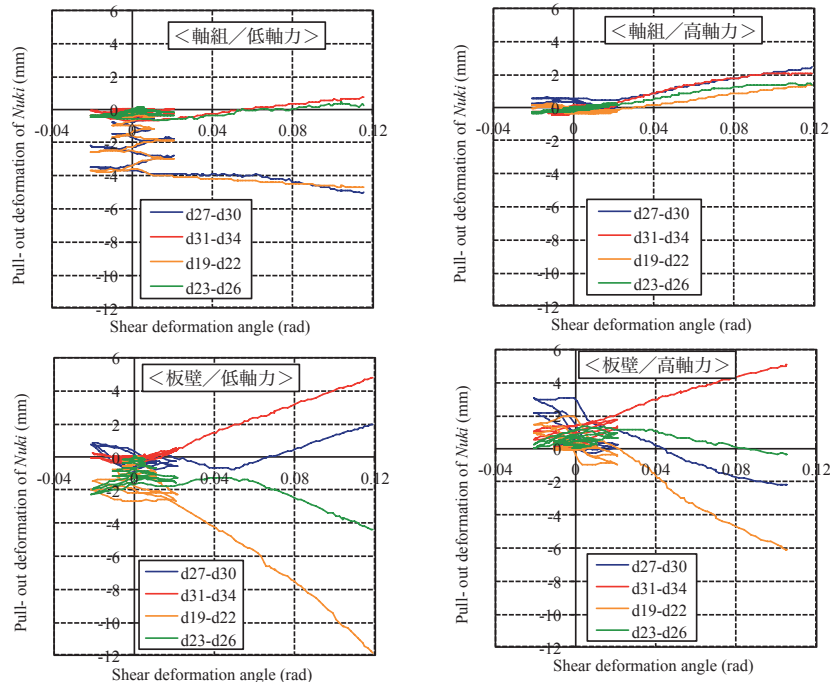


図9 貫の引き抜け量の推移

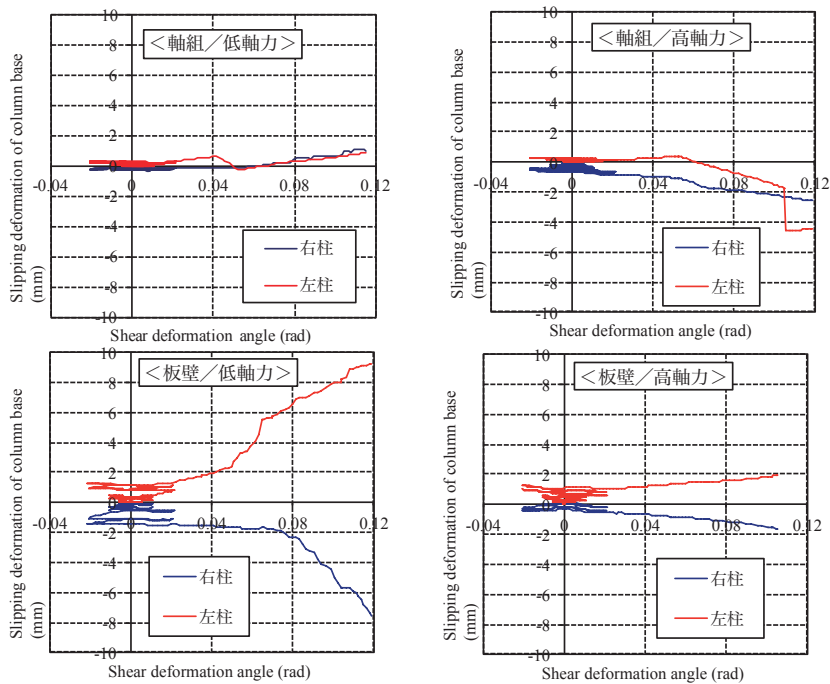


図10 柱脚のすべり量の推移

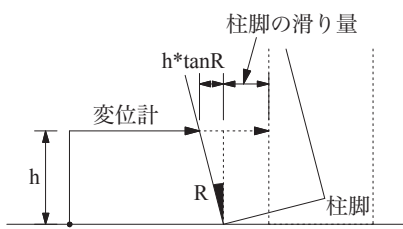


図 11 柱脚に設置した変位計の模式図

図4に示した変位計の値を用いて求めた貫接合部の回転角の推移を図12に示す。なお、回転角は一对の上下の変位計の差分をその変位計間の距離で除した値とし、横軸は試験体の見かけのせん断変形角である。図より、全ての貫接合部において、外側に設置した変位計で計測した貫の回転角の方が内側の結果と比べて小さくなっていることがわかる。これは、貫の端部が自由端となっているため、貫の曲げ変形に対する拘束が内側に比べて小さく、柱の傾斜によって貫端部が曲げ変形したことに起因すると考えられる。また、全体的に左柱の方が貫端部の回転角が小さくなっているが、この原因については現時点では不明である。

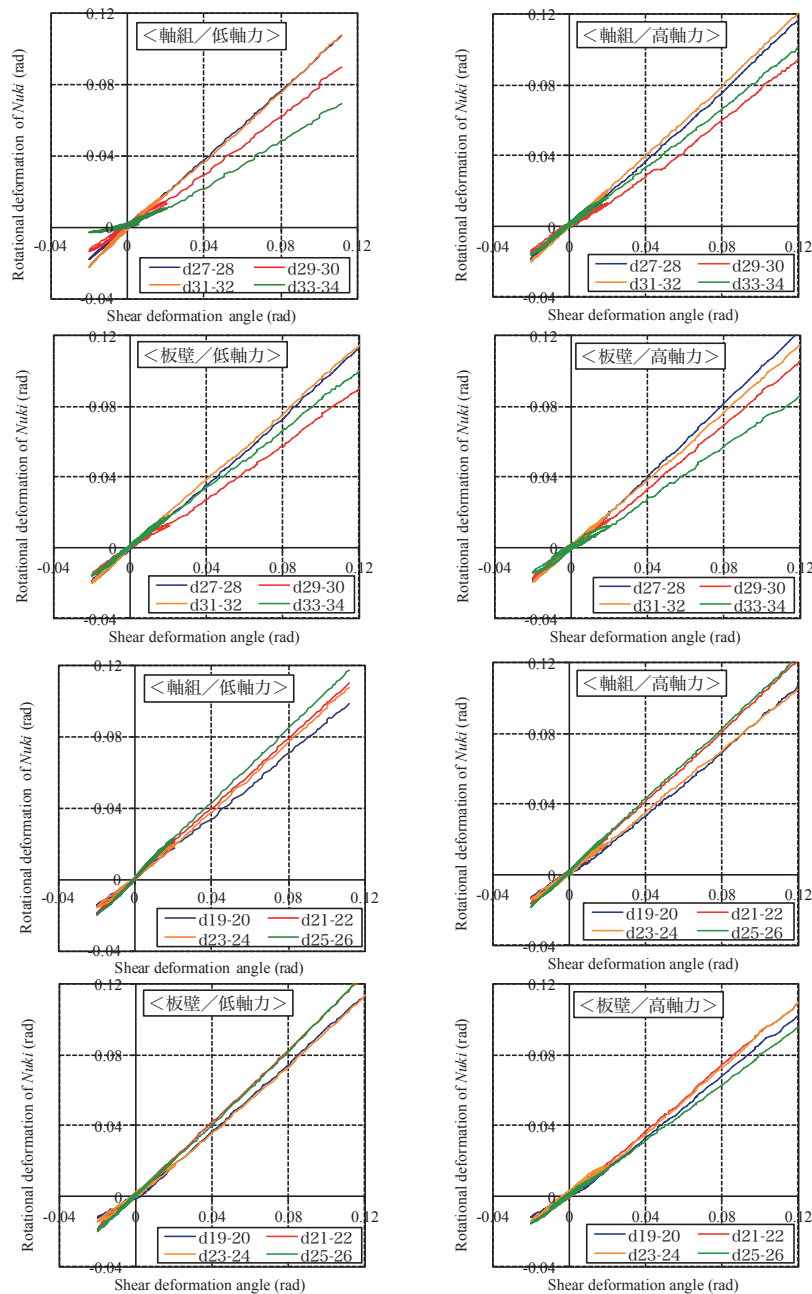


図12 貫接合部の回転角の推移 (上段4つのグラフ：左柱/下段4つのグラフ：右柱)

(2) 荷重-見かけのせん断変形角関係の比較

荷重-見かけのせん断変形角関係の正側の包絡線を比較した結果を図13に示す。低軸力下での試験体では、軸組試験体と板壁試験体とで大きな差は生じておらず、板壁による耐力上昇は僅かであった。これは、横使

いとして設置された板壁が繊維方向に圧縮抵抗することで柱が押し広げられたために、板壁があまり有効に機能しなかったことが原因であると考えられる。一方、高軸力を作用させた試験体では、柱の傾斜復元力特性の効果により、軸組試験体と比べて初期剛性が格段に上昇していることがわかる。また、 0.02rad 付近から板壁の有無による耐力の差が生じ始め、 5kN 程度の荷重上昇を確認することができた。これは、高軸力下では柱脚の摩擦力の上昇により柱の水平移動が拘束されたため、板壁が効果的に抵抗したことが原因であると考えられる。

(3) 柱の傾斜復元力特性について

柱の傾斜復元力特性を推定するために、軸組試験体と板壁試験体それぞれの試験結果において、同一変形角における高軸力試験体の荷重から低軸力試験体の荷重を引き算した結果を図14に示す。なお、軸組試験体は目視ではほとんど同一の破壊性状を示していたが、板壁試験体では板壁の繊維方向の圧縮抵抗によって柱が左右に押し広げられたために貫が柱から引き抜けている様子を確認することができ、特に柱脚での摩擦力が小さい低軸力の板壁試験体で貫の引き抜け量が顕著であった。このように軸力の違いにより破壊性状に差が生じているため単純に引き算することはできないが、参考として板壁試験体における実験結果を引き算した結果も併記した。また、図中には、既往文献⁶⁾に掲載される柱の傾斜復元力特性の計算値を併記した。

軸組試験体は概ね柱の傾斜復元力特性の傾向を捉えられているが、計算値と比べて負勾配が大きく、荷重喪失時の変形角が小さい結果となった。これは、柱頭側が梁で支持されているため、梁のめり込みが生じたことが原因であると考えられる。一方、板壁試験体では板壁の繊維方向の圧縮抵抗によって柱が左右に押し広げられるが、高軸力試験体では柱脚の摩擦力が大きくなったために柱の水平移動が抑制され、その結果として板壁の圧縮抵抗力が高軸力試験体の方が大きくなったと予想される。そのため、板壁試験体の結果が計算値を上回ったと考えられる。

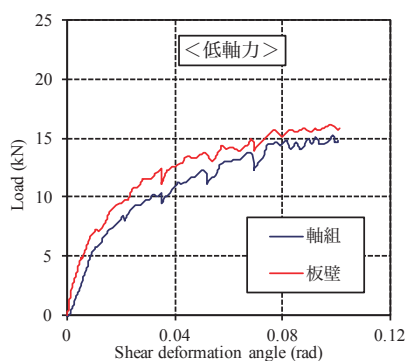


図13 荷重-見かけのせん断変形角関係の正側の包絡線

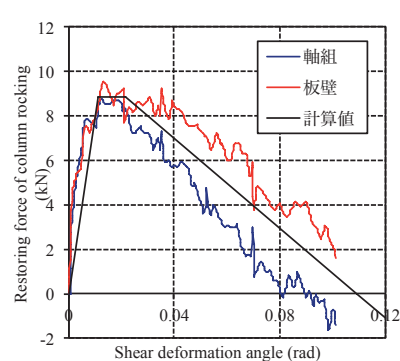
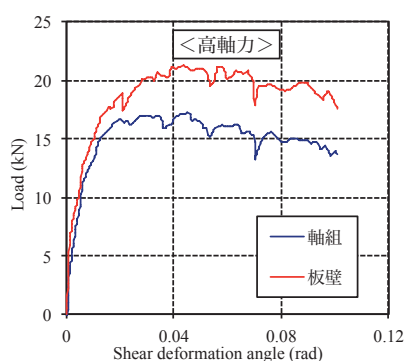


図14 柱の傾斜復元力特性

(4) 要素実験に基づく耐力推定

既往研究⁸⁾で実施した貫接合部と板壁構面の要素実験の概要を図15に示す。今回実施した試験体とは柱の長さ以外は基本的には同一形状であり、樹種もヒノキである。実験時の柱長さが異なるため、試験体高さの比で水平荷重を補正して、それぞれ貫構面と板壁構面の耐力とした。また、柱の傾斜復元力特性は、既往文献⁶⁾に掲載される柱の傾斜復元力特性の計算値とした。図16に、荷重-見かけのせん断変形角関係の正側の包絡線と要素実験から求めた推定耐力を比較した結果を示す。実験値と推定耐力を比較すると、いずれの試験体においても初期剛性や大変形時の耐力に差が見られ、実験値の方が耐力が大きくなっている。これは、耐力推定の際に短ほぞによる耐力を考慮していないことが主な原因であると考えられる。

4. まとめ

本研究では、鉛直軸力作用下における礎石建ち仕様の板壁構面の水平せん断加力試験を実施し、その破壊挙動や復元力特性について検証した。低軸力作用下では、板壁の有無による耐力の差はほとんど見られなかった。これは、横使いとして設置された板壁の繊維方向の圧縮抵抗力によって柱が水平方向に押し広げられ

たため、板壁が効果的に抵抗しなかったことが原因であると考えられる。また、高軸力作用下では、柱の傾斜復元力特性によって初期剛性や降伏荷重が上昇した。さらに柱脚の摩擦力が上昇するため柱の水平方向の変形が抑制され、低軸力下の試験体と比較して板壁を挿入したことによる耐力上昇が確認された。

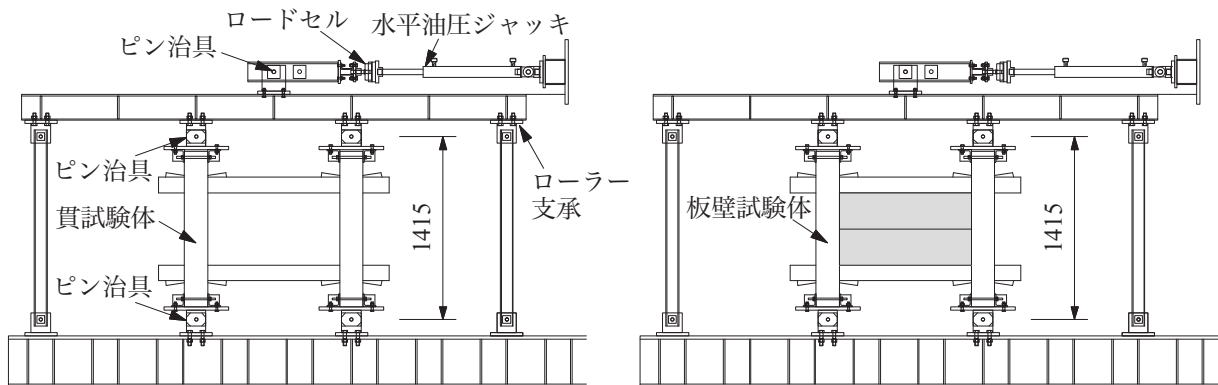


図15 要素実験

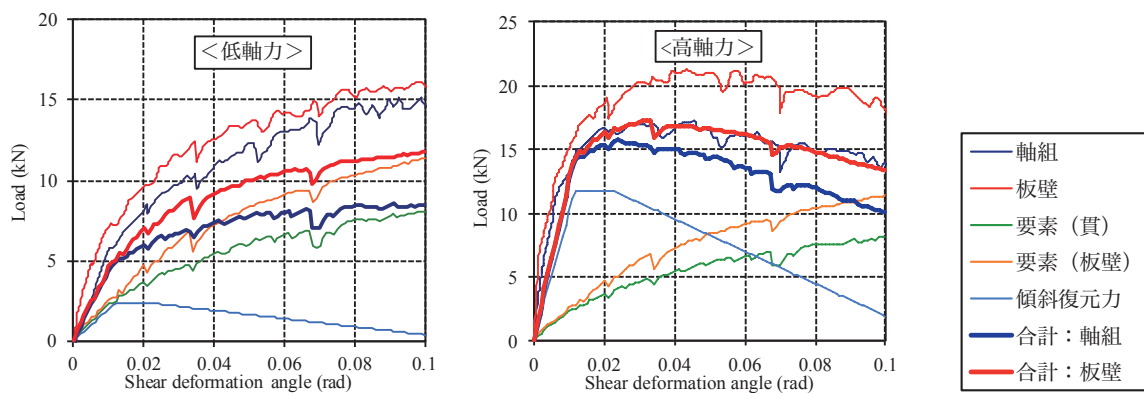


図16 要素実験から求めた推定耐力と実験結果との比較

謝辞：本研究は、公益財団法人東レ科学振興会による東レ科学技術研究助成を受けて実施しました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 瀧野敦夫・佐藤澤・向坊恭介・鈴木祥之：平成28年（2016年）熊本地震で被災した八王神社の解析的研究，歴史都市防災論文集，Vol.11，pp.49-56，2017.7
- 2) Atsuo Takino・Yoshiyuki Suzuki：Experimental study on the seismic behavior of wide-board walls in existing traditional wooden structures，Proc. of the World Conference on Timber Engineering (WCTE) 2016，2016.8
- 3) 河内武・貞広修・木村誠・福本敦子・近藤一夫：板壁等に耐震上の工夫を施した伝統木造架構の実大水平加力実験，日本建築学会構造系論文集，Vol.77，No.682，pp.1887-1896，2012.12
- 4) 公益財団法人日本住宅・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係る技術解説書，土塗壁等告示に係る技術解説書作成編集委員会編，2004.2
- 5) 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，Vol.76，No.659，pp.97-104，2011.1
- 6) 学芸出版社：伝統構法を生かす木造耐震設計マニュアル 限界耐力計算による耐震設計・耐震補強設計法，木造軸組構法建物の耐震設計マニュアル編集委員会編，2004
- 7) 瀧野敦夫・江南桃・日比野惇・宇都宮直樹・藤村悦生・村本真・向坊恭介・宮本慎宏：社寺建築物における貫と板壁を有する軸組構面の振動台実験，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造Ⅲ，pp.185-186，2018.9
- 8) 田中健太・瀧野敦夫・佐藤澤・宮本裕司：社寺建築物における貫と板壁を有する軸組構面の復元力特性に関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造Ⅲ，pp.305-306，2017.8