

面格子壁を用いた土蔵の耐震補強工法に関する実験的研究

Experimental Study on the Seismic Reinforcement Method of Clay Storehouse Using Wooden Grid Wall

瀧野敦夫¹・村本真²・中村航³

Atsuo Takino, Makoto Muramoto and Wataru Nakamura

¹大阪工業大学特任准教授 工学部建築学科 (〒535-8585 大阪府大阪市旭区大宮5-16-1)

Associate Professor, Dept. of Architecture, Osaka Institute of Technology

²京都工芸繊維大学准教授 デザイン・建築学系 (〒606-8585 京都府京都市左京区松ヶ崎橋上町)

Associate Professor, Faculty of Design and Architecture, Kyoto Institute of Technology

³奈良女子大学助教 生活環境学部住環境学科 (〒630-8506 奈良県奈良市北魚屋東町)

Assistant Professor, Dept. of Residential Architecture and Environmental Science, Nara Women's University

In this paper, as a new method of seismic reinforcement for clay storehouses, we proposed a reinforcement method that a wooden thin grid wall is attached to the outer side of the clay wall, and the structural performance of this method was verified by an experiment. In this testing result, the shear failure of the column base occurred due to the insufficient shear strength of the wood screws. Therefore, during the actual reinforcement, it is necessary to prevent the shear failure of the column base by connecting the reinforcement to the existing frame. In addition, because the used wooden grid wall was very thin, it is necessary to take measures against buckling.

Keywords: *Seismic reinforcement, Clay storehouses, Wooden grid wall*

1. はじめに

近年、現存する伝統的木造建築物の耐震診断が積極的に行われるようになり、補強工事事例も増えてきている(例えば¹⁾、²⁾。多くの伝統的木造建築物において、耐震診断の結果は十分な安全性能を満足するものにはならず、ほとんどのケースで何らかの耐震補強を施している。しかし、このような伝統的木造建築物においては壁の少ない和風空間を有するものが多く、補強設計の際に既存の空間の良さを残しつつどのようにして補強するかが大きな課題である。

このような背景の中、本論では伝統的木造建築物の中でも土蔵を対象とした。土蔵は、他の伝統的木造建築物とは異なり外周のほとんどが壁で構成されているが、土壁が非常に厚いため重量が非常に大きく、耐震性能を満足しないことが多い。その場合、新たな耐震補強部材を壁の内側に取り付けることが一般的であるが、荷物の保管庫として蔵を利用する場合には特に問題にならないが、蔵を改修して別の用途(例えばイベントスペースなど)として利用する場合、耐震補強部材が建物内部の意匠性に及ぼす影響を無視することができない。

そこで筆者らは、土壁の外壁側に面格子壁を取り付け、その上から大壁の土壁を施工する補強工法を考案した。これにより、補強材が内部にも外部にも現れないため意匠性を損なわないことが大きな利点として挙げられる。また、面格子壁については既に多くの既往実験(例えば³⁾、⁶⁾があり、格子材の接合部におけるめり込み抵抗が主な耐力発現機構であるため粘り強く変形性能にも優れている。しかし、外側の土壁の厚み内に格子材を収める必要があるため面格子壁を厚くすることができず、実際の建物で検討してみると格子材の厚みを

60mm程度までに抑えなければならないことがわかった。一方で、既往文献⁷⁾によれば、面格子壁の仕様として最低限90mmの厚みが必要であり、今回のように薄い面格子壁を耐震補強材として用いることが可能かどうかは実験による検証が不可欠であると考える。そこで本論では、まずは試作品として厚みが60mmの面格子壁を製作するとともに水平せん断加力試験を実施し、本補強工法の実現可能性について検証したので報告する。

2. 実験方法

(1) 試験体

試験体形状を図1に示す。試験体は1体のみで、柱スパンを1,820mm、高さを2,730mmの面格子壁試験体とした。試験体上下の梁や土台についても格子材と同様の構成としており、格子材は全てヒノキの120×60mmの材料を用いた。また、各接合点の中央部に木ネジ（YD-R60／φ6.0×60、株式会社カナイ製）を1本ずつ打ち込み、材同士を固定した。

(2) 荷重方法

写真1に荷重の様子を示す。今回は荷重式（重量：7.11kN）により行った。なお、重量については、既存治具および柱の座屈を考慮して、ある程度の柱の浮き上がりを防止するため、実験装置の大幅な改造を要せずに実現できる範囲として設定した。加力スケジュールは、見かけのせん断変形角で1/480、1/240、1/120、1/90、1/60、1/45、1/30radをそれぞれ2回ずつ繰り返し、その後1/15radまで加力を試みたが、途中で柱脚のせん断破壊が進み、試験体全体のロッキングが生じたため加力途中で実験を終了した。なお、面外変形の拘束治具については、試験体の半分程度の高さの位置に取り付けている。

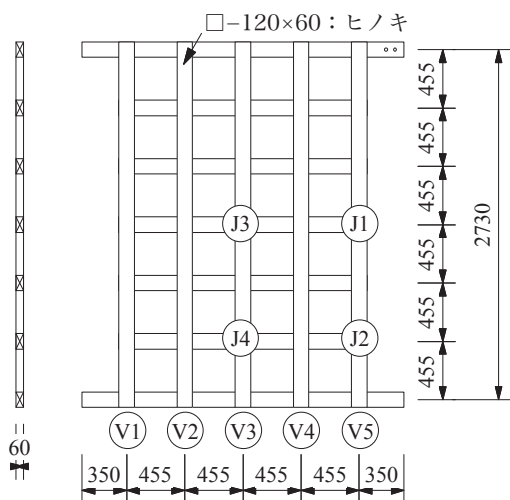


図1 試験体形状（丸数字は変位計設置位置を示す）

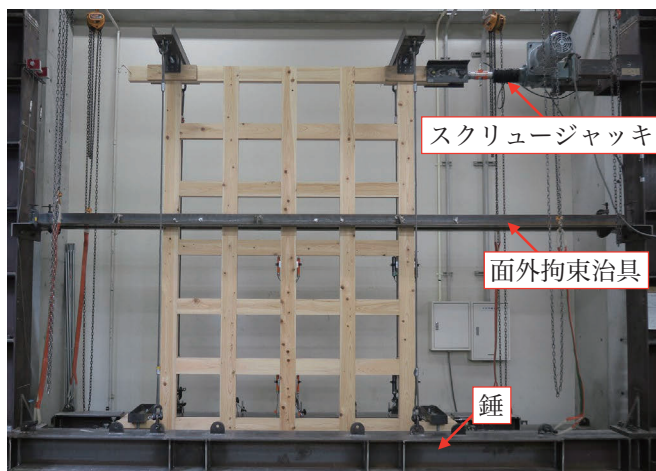


写真1 荷重の様子

3. 結果と考察

(1) 変形状・破壊性状

荷重-せん断変形角関係を図2に示す。なお、図には見かけのせん断変形角（ γ ）、柱脚の浮き上がりによる変形角（ θ ）、その差分から求めた真のせん断変形角（ R ）の3つを併記した⁸⁾。また、荷重式による加力のため、次式により荷重の補正を行なった。

$$P_r = P_L + \frac{W\delta_1}{H} \quad (1)$$

ここで、 P_r は真の荷重、 P_L はロードセルで計測した荷重、 W は錘の重量、 δ_1 は頂部の水平変位量、 H は試験体高さである。

図から明らかのように試験体の変形角が0.01rad付近から真のせん断変形角と見かけのせん断変形角のグラ

フの差が大きくなり始めていることがわかる。これは、写真2に示すように、柱脚の木ネジがせん断降伏し、大きなずれ変形が生じ始めたことに起因している。図3は柱脚に設置した縦材の鉛直方向の変位量を示したグラフであるが（横軸は見かけのせん断変形角）、0.01radを超えたあたりから徐々に変形が生じ始めていることを確認することができる。実際の補強においては、土蔵の柱や土台にこの格子材を設置し、面格子壁のせん断抵抗力を土蔵側の軸組に伝達する必要があり、そのせん断キーと柱脚のずれ防止とをうまく兼ねた接合方法を検討する必要がある。

また、加力の途中で試験体全体が僅かに座屈し始める様子を確認することができた。ただし、写真3に示すように今回の実験では面外変形の拘束治具を試験体の半分程度の高さに設置していたため、座屈による面外への曲げ変形が著しく進行することはなかった。

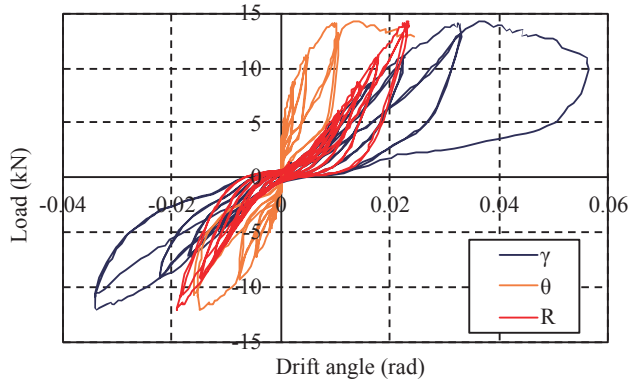


図2 荷重-せん断変形角関係

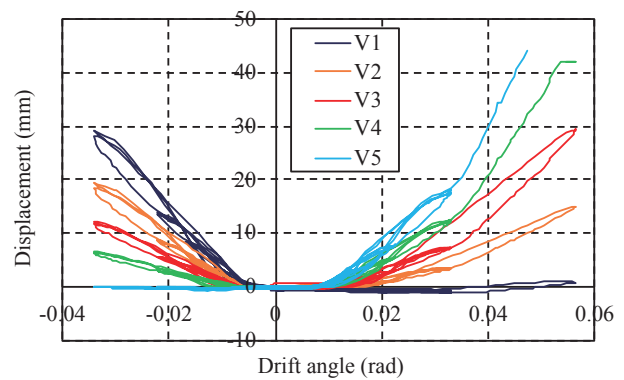


図3 柱脚の鉛直変位量の推移（横軸は見かけのせん断変形角）



写真2 柱脚のずれ変形の様子



写真3 試験体の座屈の様子と治具による拘束

(2) 接合部の変形の様子

図1に示した変位計設置位置において、格子材の接合部の回転変形を計測した。図4は接合部の回転変形角の推移である。なお、横軸は試験体全体の真のせん断変形角とした。柱脚のずれ変形が進行し始める0.01rad付近からグラフにばらつきが生じており、同じ縦位置で比較した場合に、柱脚側の方（J2とJ4）が回転量が小さくなっている。ただし、この原因が柱脚の引き抜きによるものかは現時点では不明である。また、端部の接合部（J1とJ2）と比較して、中間部の接合部（J3とJ4）の方が回転量が大きくなっている。既往文献⁷⁾では、端部の回転めり込みについては考慮しないことになっているが、グラフからJ1とJ2の回転量はJ3とJ4より多少小さくなっているものの、ある程度の回転量は生じていることがわかる。写真4は接合部の回転変形の様子を示しているが、中間部の十字型接合部では回転によるめり込み変形が対称に生じているのに対し、端部のT字型接合部では横材が水平方向に少しだけずれるように変形していた。

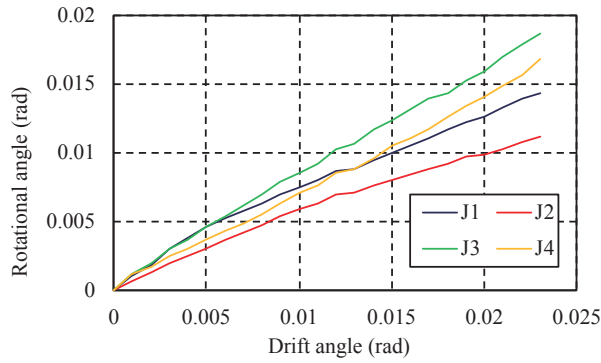


図4 接合部の回転変形角の推移（横軸は真のせん断変形角）



写真4 接合部の回転変形の様子（左がJ3／右がJ1）

(3) 既往文献による耐力推定値との比較

既往文献⁷⁾に記載されている面格子壁を用いた耐力壁の復元力特性を推定するための計算式を用いて、今回実施した試験体の復元力特性を求め、実験結果と比較した（図5）。計算に用いた諸定数を表1に示す。計算では仕口製作時の平均嵌合誤差を1mmとしたcase1（Calc.1）と、プレカットで逃げがゼロの場合における計算値をcase2（Calc.2）とした。今回用いた計算方法は梁や土台を設けることや部材断面の最小値が105mm以上など本論で提案する補強工法が適用範囲外ではあるものの、耐力抵抗機構は基本的には各接合部での木材同士の三角形めり込みによるものであるため、この計算式が原則適応可能と考えられる。図5より、計算値は初期剛性、降伏荷重ともに実験結果より低い結果となっており、設計値としては安全側の評価であるといえる。ただし、計算では十字型となる内部の接合部のみを計算対象としているのに対し、先述したように端部の接合部においてもめり込み抵抗があることが過小評価となった一因になっていると考えられる。一方で、柱脚接合部のせん断破壊の検定においては、計算値を用いると危険側の評価となるため、割増係数を考慮するなど安全側となるような配慮が必要である。

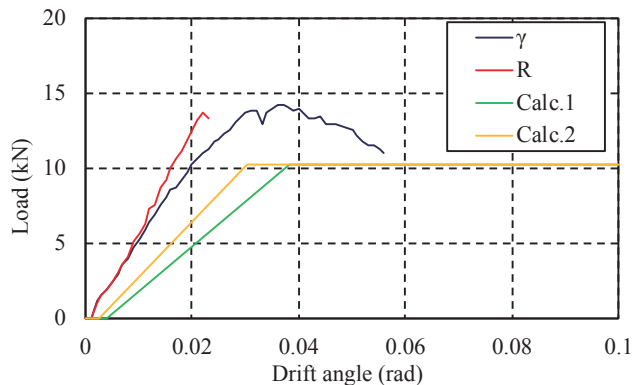


図5 実験結果と計算結果の比較

表1 計算に用いた諸定数

耐力壁	幅	L	1820	mm
	高さ	H	2730	mm
縦格子	見付け	b	120	mm
	奥行き	h	60	mm
	本数	v	3	本
横格子	見付け	b	120	mm
	奥行き	h	60	mm
	本数	u	5	本
格子材	ヤング係数	E	9000	N/mm ²
	めり込み基準強度	Fcv	7.8	N/mm ²
	繊維直交方向置換係数	n	6	-
	格子材の1%あたりの乾燥収縮率	ψ	0.0015	-
	製作時の含水率	γA	20	%
	乾燥後の平衡含水率	γB	15	%
	相欠き仕口製作時の平均嵌合誤差	μ	1	mm
	プレカットで逃げがゼロの場合	μ/b	0.002	-

(4) 座屈検定

今回採用した面格子壁では材の厚みが薄いため、加力時に面外への座屈変形が生じ始めていた。実験時には面外への拘束治具を用いていたため座屈変形が顕著になることはなかったが、ここでは面格子壁の座屈について検証する。

計算においては、面格子壁の縦材を1本の部材と仮定して、次に示すオイラーの座屈式より座屈応力度 σ_k を求めた。

$$\sigma_k = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \quad (2)$$

ここで、 E は格子材のヤング係数(9,000N/mm²)、 λ は細長比である。

縦材の断面を120×60mmとし、両端ピン支持で座屈長さを2,730mmとして式(2)より座屈応力度を求め、断面積を掛けることで求めた座屈荷重が25.7kNとなる。ここで、木質構造設計規準・同解説⁹⁾には切欠きのある場合の座屈荷重比に関する記述があり、切欠きによる欠損率がある場合に表2のような荷重低減が生じるとされている。表の定数が線形ではなく、実験事例も少ないことからあくまでも参考値として欠損率が1/2の時の値を0.3と仮定してみると、座屈荷重が25.7×0.3=7.7kNとなる。図5で示したように試験体の降伏荷重が計算値で約10kNであり、実験結果はそれよりも大きいことから、今回の試験体仕様においては試験体全体が座屈する可能性が高いことがわかる。さらに、実際の土蔵での利用を想定すると、厚みはそのままで試験体高さがさらに高くなることから、座屈への対策は必要不可欠である。ただし、今回の補強工法では、面格子壁を既存の軸組に取り付けることを想定しており、その際に縦材を柱と何らかの形で留めつけることで座屈による面外への変形を抑制することはそれほど難しいものではないと考えられる。

表2 切欠きのある場合の座屈荷重の低減率

切欠き 欠損率	片欠き	
	年輪に直角	年輪に平行
1/4	0.43	0.50
1/3	0.38	0.38
2/5	0.31	0.33

4. まとめ

本論では、土蔵に用いる新たな耐震補強工法として、土壁の外壁側に面格子壁を取り付け、その上から大壁を施工する補強工法を考案し、その試作品として厚みが60mmの面格子壁試験体を製作するとともに、水平せん断加力試験を実施し、本補強工法の実現可能性について検証した。以下に得られた結論を列挙する。

・今回の実験では、加力の途中から柱脚部の木ネジ接合がせん断破壊し、試験体全体がロッキングによる変形を生じたため、加力途中で載荷を終了した。しかし、接合部での三角形めり込みによる抵抗が生じる面格子壁としての構造性能は十分発揮できることを確認した。

・実際の補強においては、土蔵の柱や土台にこの格子材を設置し、面格子壁のせん断抵抗力を土蔵側の軸組に伝達する必要があるため、そのせん断キートと柱脚のずれ防止とをうまく兼ねた接合方法を検討する必要がある。

・面格子壁の厚みが薄いため、加力の途中から座屈による面外変形が生じ始めたことを確認した。実際の補強時には、今回の試験体と比べて厚みは同程度のままでさらに高さが高い仕様となることから、座屈への対策が必要不可欠であり、面格子壁を既存の軸組に設置する際に縦材を何らかの形で柱に留めつける必要があると考えられる。

・既往文献に記載されている面格子壁の復元力特性推定式から求めた結果は、初期剛性と降伏荷重のいずれも実験結果より低い結果となったが、設計値としては安全側の評価であるといえる。ただし、柱脚接合部のせん断破壊の検定においては計算値を用いると危険側の評価となるため、割増係数を考慮するなど安全側となるような配慮が必要である。

謝辞：本研究は、星野梨沙子氏（2020年度奈良女子大学卒業）の卒業研究による成果である。面格子壁を用いた補強工法については、藤岡龍介氏（藤岡龍介＋藤岡建築研究室）、高島和之氏（高島和之建築設計室）、上村孝友氏（株式会社伸構造事務所）の協力を得ました。また、実験の実施においては、京都工芸繊維大学高度技術支援センター技術職員の小山清司氏、四方利和氏、澤井伸吾氏、川端勝己氏および京都工芸繊維大学の大学院生と学部生諸氏の協力を得ました。さらに、試験体製作時に株式会社カナイより木ネジを提供していただきました。ここに感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 文化庁：重要文化財（建造物）耐震診断・耐震補強の手引き（改訂版）事例集，2017.
- 2) 伝統的構法木造建築物設計マニュアル編集委員会：伝統的構法のための木造耐震設計法：石場建てを含む木造建築物の耐震設計・耐震補強マニュアル，学芸出版社，2019.
- 3) 清水秀丸・若島嘉朗・清水人美・北守顕久：高い初期剛性を有する面格子耐力壁の開発と社寺建築の耐震補強，日本建築学会技術報告集，Vol.26，No.63，pp.537-542，2020.
- 4) 廣石秀造・岡田章・宮里直也・佐藤公紀・斉藤公男：木造面格子壁の格子間隔が剛性と耐力に及ぼす影響，日本建築学会構造系論文集，Vol.78，No.689，pp.1273-1279，2013.
- 5) 高田豊文・中西智也：水平加力試験に基づくパネル型面格子壁の復元力特性モデルに関する考察，構造工学論文集，Vol.58B，pp.251-257，2012
- 6) 中治弘行・倉垣俊一：鳥取県産スギ材を用いた面格子壁の水平加力実験，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造Ⅲ，pp.63-64，2011.
- 7) 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，2004.
- 8) 公益財団法人日本住宅・木材技術センター：木造軸組工法住宅の許容応力度設計（2008年版），2008.
- 9) 一般社団法人日本建築学会：木質構造設計規準・同解説-許容応力度・許容耐力設計法-，2006.