伝統的構法における垂壁腰壁を含む鉛直構面の水平耐力の評価 乾式土壁パネルを用いた場合

EVALUATION OF SHEAR STRENGTH OF TRADITIONAL WOODEN FRAME WITH HANGING AND WINDOW-BACK WALL

In the case of wooden frame with dry-mud panel

中尾方人 ——— * 1 後藤正美 ——— * 2
鈴木祥之 ——— * 3

Masato NAKAO ——— * 1 Masami GOTOU ——— * 2
Yoshiyuki SUZUKI ——— * 3

キーワード：
伝統的構法, 乾式土壁パネル, 垂壁, 腰壁

Keywords:
Traditional building construction, Dry-mud panel, Hanging wall, Window-back wall

Static shear loading tests on single full-height walls, hanging walls and window-back walls using dry-mud panels were conducted. And then, push-over analysis of combinations of the walls was performed, it was found that summation of shear forces of the single walls is higher than the shear force of combined analysis model except for the range of relatively large deformation. Consequently, to evaluate shear strength of traditional wooden building with dry-mud panel, summation of shear forces of the single walls was found to be adequate.

1. はじめに

伝統的構法の木造建築物では、柱や梁といった各部材の断面が比較的大きく、曲げ剛性が高いため、垂壁や腰壁も有効な水平抵抗要素として機能させることができる。全壁だけではなく、垂壁や腰壁も水平抵抗要素として考慮することで、全壁を少なくし、室内を開放的に計画することも可能になる。しかし、この場合に構造設計で問題になる点として、垂壁や腰壁自体のせん断剛性だけではなく、それらが取り付く柱の曲げ剛性も考慮しなければならないということがある。そのため、河合が文献1)で指摘しているように、垂壁や腰壁が全壁と隣接する場合などは、単独の場合とは柱の曲げ変形性状が異なるため、垂壁や腰壁の水平耐力と全壁の水平耐力とを単純に加算できる保証はなく、大変形に至るまでの荷重-変位関係を求

めるには壁をブレース置換するなどして解析を行う必要があり、手計算で簡単に求めることは難しい。また、垂壁の下端高さや腰壁の上端高さの柱に曲げ破壊が生じると、鉛直荷重の支持能力が失われて建物の倒壊につながる可能性があるため、垂壁や腰壁の設計には、細心の注意が必要である。

本報では、まず、乾式土壁パネル²⁾(以下パネルと略す)を用いた真壁形式の全壁、垂壁、腰壁および垂壁・腰壁併用試験体の静的せん断加力実験を行った結果を報告する。そして、それらの解析モデルを作成し、垂壁や腰壁を全壁に隣接して設けた場合の水平耐力について、増分解析による結果から検討する。また、垂壁の下端高さや腰壁の上端高さの柱に発生する曲げモーメントの大きさについても検討する。

図1 試験体一覧 (単位:mm)

^{*1} 横浜国立大学大学院都市イノベーション研究院 特別研究教員
(〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)
^{*2} 金沢工業大学環境・建築学部 教授
^{*3} 立命館グローバル・イノベーション研究機構 教授

^{*1} Research Assoc., Dept. of Architecture and Building Science, Yokohama National Univ.
^{*2} Prof., Dept. of Architecture, Kanazawa Institute of Technology
^{*3} Prof., Global Innovation Research Organization, Ritsumeikan Univ.

(a) ヤング係数 (単位: kN/mm^2)

部材	1P全壁 試験体	2P全壁 試験体	垂壁 試験体	腰壁 試験体	垂壁・腰壁 試験体
桁	23.0	25.7	30.0	29.8	45.5
柱	26.4	28.2	20.4	25.4	26.8
土台	34.9	33.3	29.8	32.0	32.8

(b) 含水率 (%)

部材	1P全壁 試験体	2P全壁 試験体	垂壁 試験体	腰壁 試験体	垂壁・腰壁 試験体
桁	23.0	25.7	30.0	29.8	45.5
柱	26.4	28.2	20.4	25.4	26.8
土台	34.9	33.3	29.8	32.0	32.8

図2 試験体の仕口の詳細

静的せん断加力実験に用いた試験体は、図 1 のように、壁長 910mm（以下 1P と表記する）と壁長 1820mm（以下 2P と表記する）の全壁試験体、2P の垂壁試験体、腰壁試験体および垂壁・腰壁併用試験体であり、各 3 体ずつで計 15 体である。土台と桁の芯々間距離は 2730mm であり、土台は 120mm 角のヒノキである。桁は 210mm×120mm、柱は 120mm 角であり、いずれもスギである。部材毎に 3 体の平均ヤング係数と含水率を表 1 に示す。柱－土台および柱－桁仕口は長ぼ込桝打ちである。図 2 に柱－土台仕口の詳細を示す。柱－桁仕口についても、ほぞの形状や柱との接触面からの込桝の位置と同じである。込桝の断面は 15mm 角であり、樹種はカシである。鴨居と窓台は 45mm×105mm のスギで、その端部は 15mm×75mm×15mm のほぞで柱に差してあり、N65 釘 2 本で斜め打ちされている。

本実験における加力方法は載荷式とした。2 本の外柱の直上の桁にそれぞれ 9.6kN の錘を設置し、合計 19.2kN の鉛直荷重を作用させた状態で桁に正負交番の繰返し載荷を行った。仕口へ補強金物の取り付けやタイロッドの設置は行っていない。水平力の載荷履歴は、見かけの変形角が 1/480, 1/240, 1/120, 1/90, 1/60, 1/45, 1/30, 1/20, 1/15, 1/10rad となる変形を折り返し点として、各変形角を正負 2 回繰返しした。

カー（標点）を取り付けて写真撮影することにより、各点の変位を求めた。

図 3 に水平荷重と真のせん断変形角との関係を示す。各種 3 体ずつ実験を行ったうち、耐力性状が平均的なものを示したが、図 4 に示すように、3 体の水平耐力のばらつきは小さかった。正側加力時における 3 体の平均の最大耐力について、1P および 2P の全壁試験体ではそれぞれ 10.3kN (1/20rad 時) と 15.8kN (1/30rad 時) であり、垂壁試験体、腰壁試験体および垂壁・腰壁併用試験体では、そ

図3 荷重-真の変形角関係

れぞれ、は 4.5kN (1/15rad 時)、4.2kN (1/15rad)、7.7kN (1/15rad 時) であった。

全壁試験体では、1/45～1/30rad でパネルにせん断ひび割れが発生し、さらに変形が進むと、パネルの木小舞上の土が剥落したり、パネルが面外にはらみだす様子も観察された。全壁以外の試験体の破壊性状は共通しており、まず、写真 1 に示すような、鴨居や窓台の端部の引き抜け、パネル隅角部の圧壊や写真 2 のようなパネルのせん断ひび割れが生じて最大耐力に達した。鴨居や窓台端部と柱との開きは 1/120rad 付近から確認され、その大きさは変形角と共に大きくなった。試験体解体後の観察では、仕口における長ほどの込栓穴から先のせん断破壊（先抜け）（写真 3）や、ほぞ根元の曲げ破壊が見られた。込栓の損傷としては、ほぞによる軽微なめり込み程度であり、曲げ破壊や破断は生じていなかった。また、パネルの隅角部と接していた柱の表面には、写真 4 のような、パネルの木小舞の木口がめり込んだ跡がみられ、2～3mm 程度の深さのものもあった。

4. 増分解析モデル

4.1 パネルの復元力特性の設定

図 4 全試験体の骨格曲線

写真 1 窓台端部の引き抜け

写真 3 ほぞのせん断破壊

写真 2 垂壁のせん断ひび割れ

写真 4 木小舞によるめり込み跡

パネルに打たれたコーススレッドは、木小舞を貫通し、縦横に達するように留められていたが、実験後の観察では、パネルの外周では端距離の不足で、木小舞に割れが生じている場合が多かった。また、前述のように、各パネルの隅角部と接する柱の内側の表面には、木小舞の木口のめり込み跡が見られたことから、各パネルのせん断抵抗機構としては、対角線方向の圧縮力が支配的であると考え、各パネルの対角線方向に配した非線形パネでパネルの復元力特性を表現することとした。図 5 に 2P 全壁試験体と 2P 垂壁試験体の解析モデルを例として示す。各パネルの境界には、柱の面内外側への開きを拘束する線形の柱拘束パネも配置している。このパネの剛性の設定方法については 4.3 節で述べる。

パネルの非線形パネの復元力特性は、以下のような手順で決定した。まず、全壁試験体に横張りされた 600mm の幅の 4 枚のパネルは均等にせん断力を負担していると仮定し、試験体全体の水平耐力から仕口の曲げモーメント抵抗による水平耐力を差し引き、錘による P- δ 効果分（錘の重量 $\times \delta / H$ (δ は頂部水平変位、 H は加力点高さ) と仮定) を加えた力の 1/4 が各パネルに作用するせん断力とみなし

図 5 解析モデル

(a) 1P 幅のパネル (b) 2P 幅のパネル

図 6 パネルの非線形パネの復元力特性

図 7 仕口の曲げモーメントー回転角関係
(細線：実験結果、太線：モデル)

た。仕口の曲げモーメント抵抗力の評価については4.2節で述べる。そして、この力とパネルの隅角部が接する柱上の2点間の変位とを考慮して、パネルの非線形パネの復元力特性を図6のように設定した。

4.2 仕口における曲げモーメント抵抗力の評価

仕口における曲げモーメントと回転角との関係を把握するため、

図8 解析結果と実験結果の比較

図9 全壁におけるせん断力の伝達

図10 全壁と垂壁解析のパターン一覧

各垂壁試験体の全ての柱脚においてその評価を行った。曲げモーメントは、柱脚に貼付したひずみゲージで計測した曲げひずみと当該柱のヤング係数を用いて求めた。土台に対する柱脚の回転角は、柱脚毎に土台に設置した2台の変位計により計測した、柱端部との相対変位の差から求めた。このようにして得られた、柱脚の曲げモーメントー回転角関係を図7に示す。また、平均的な曲げモーメントー回転角関係のモデルを設定し、同図中に併記した。この設定した曲げモーメントー回転角関係は、前項において、試験体全体の水平耐力から仕口の曲げモーメント抵抗による水平耐力を差し引く際に用いた。

4.3 柱間の拘束力の設定

水平力が試験体の頂部に作用する際には、各パネルの反力により、柱には面内外側へ開くような変形が生じる。この変形に対して、柱間に設置された横桟や、パネルに内蔵された横方向の木小舞、また、垂壁や腰壁を有する場合においては、鴨居や窓台による拘束力が存在する。これらの拘束力を適切に評価する必要があるが、この実験結果からそれぞれの力を推定することは難しいと考えられる。そのため、解析モデルの柱拘束パネの剛性は、各試験体の増分解析によって得られた荷重ー変形曲線が実験結果に近くなるように調整し、3kN/mm という値を設定した。

4.4 設定した解析モデルの検証

上述のような方法で作成した解析モデルに対して、一方向の増分解析を実施した結果と実験結果との比較を図8に示す。解析モデルにおける柱のヤング係数は、対応する試験体の柱のヤング係数の平均値を用いた。また、解析結果には、19.2kNの錘によるP- δ 効果が考慮されている。すなわち、錘を考慮しない場合に比べ、錘の重量の δ/H だけ荷重が低くなっている。

全壁の実験で得られた水平耐力から、解析に用いるパネル1枚あたりの負担力を求めているため、全壁については1P、2Pとも解析値は実験値に近い結果である。垂壁、腰壁および垂壁・腰壁併用の場合においては、解析値が実験値に対してやや高めの結果である。この理由としては、全壁では図9のように、パネル1枚毎に伝達するせん断力のほか、全パネルが一体として伝達するせん断力が存在し、全壁におけるパネル1枚あたりの負担せん断力が、垂壁等よりも大きいことが考えられる。

5. 垂壁や腰壁が全壁に隣接した場合の水平耐力の評価

建物のある層に垂壁や腰壁しか存在しない場合には、第3章で示した垂壁試験体や腰壁試験体のような、単独の実験結果をもとに、耐力が壁長に比例するものとして、層の水平耐力を算定しても差し

図 11 柱が 120mm 角で垂壁が全壁に隣接する場合の加算耐力に対する複合モデルの耐力比
(凡例の記号：数値は壁長(P), F は全壁, H は垂壁を示す。)

図 12 全壁に隣接する場合と単独の場合の 2P 垂壁パネルの負担せん断力

図 13 柱が 150mm 角で垂壁が全壁に隣接する場合の加算耐力に対する複合モデルの耐力比
(凡例の記号：数値は壁長(P), F は全壁, H は垂壁を示す。)

支えないと考えられる。しかし、垂壁や腰壁が全壁に隣接する場合には、単独の場合に比べて柱の曲げ変形状が異なるため、垂壁や腰壁と全壁との単純な水平耐力の足し合わせが成立しない可能性がある。そこで、図 10 に示すような全壁と垂壁とを組み合わせた解析モデル（以下複合モデルと表記する）に対して増分解析を実施し、単独の垂壁と単独の全壁の特定変形角時の耐力の和（以下加算耐力と表記する）との比較を行う。なお、ここでは、柱頭・柱脚はピン接合とし、柱のヤング係数は一律 7kN/mm^2 、鉛直荷重は作用させないこととした。加力の方向は、解析モデルの桁を右方向に加力する場合（以下、正加力と表記する）と左方向に加力する場合（以下、負加力と表記する）の両方を実施し、当該の解析モデルの水平耐力としては、両方向の水平耐力の平均値を採用した。解析モデルにおけるパネルパネは、加力の方向によって、圧縮力が作用する対角線方向に配置している。加算耐力の計算に使用する単独の垂壁と全壁の特定変形角時の水平耐力は、実験結果ではなく、上記の条件のもとに単独の壁のモデルで増分解析を行って得られた値を用いることとした。

図 11 は、全ての柱を 120mm 角とした場合の結果であり、縦軸は、加算耐力に対する複合モデルの増分解析で得られた水平耐力の比（以下耐力比と表記する）である。耐力比の算定は、 $1/120\text{rad}$ 、 $1/60\text{rad}$ 、 $1/30\text{rad}$ および $1/15\text{rad}$ 時において行った。 $1/15\text{rad}$ 時の一部の組み合わせを除いて耐力比は 1.0 以上、すなわち、複合モデルの耐力が加算耐力を上回っていることが分かる。この理由としては、全壁と隣接する垂壁は、単独の垂壁よりも同じ変形角時に負担するせん断力が高くなることによる。図 12 は一例として、2P 垂壁のパネルの負担せん断力について、2P の全壁に隣接した場合（複合モデルの一部である場合）と単独の場合とを示したものであり、複合モデルにおける負担力が $1/20\text{rad}$ 程度まで単独の場合より高く、それ以降は逆に単独の場合よりやや低くなっていることが分かる。各パラメータの傾向としては、垂壁の壁長が大きくなるにつれて耐力比が大きいく傾向があり、これは、垂壁の壁長が大きい場合には、垂壁の負担せん断力が高く、隣接する全壁が柱の曲げ変形を拘束す

図 14 柱が 120mm 角で垂壁および腰壁が全壁に隣接する場合の加算耐力に対する複合モデルの耐力比
(凡例の記号：数値は壁長(P), F は全壁, HWb は垂壁・腰壁を示す。)

る効果が顕著に表れるためと考えられる。また、隣接する全壁の壁長が大きいほど、耐力比は小さくなる傾向があるが、これは、全壁の耐力に対する垂壁の耐力の割合が小さくなるためと考えられる。なお、図 10 には左右非対称となる組み合わせしか表示していないが、4P 全壁を垂壁の左右に 2P ずつ配置し、左右対称の配置とした場合の水平耐力は、非対称の場合の正側加力時と負側加力時の水平耐力の平均とほぼ一致した。

同様に、図 13 は、垂壁が全壁に隣接し、柱が 150mm 角の場合である。柱の曲げ剛性が 120mm 角の場合の 2.4 倍になるため、耐力比は 120mm 角の柱の場合ほど高くないが、同様の傾向がみられる。図 14 は、120mm 角の柱で、全壁に隣接したスパンに垂壁と腰壁が併用されている場合である。垂壁のみが全壁に隣接する場合と同じ傾向であるが、垂壁と腰壁の併用によって柱の曲げ変形が拘束されるために、耐力比は 1.0 をやや上回る程度であり、いずれの組み合わせにおいても、加算耐力と複合モデルの耐力とはほぼ同じであるといえる。なお、設計では正加力時と負加力時の平均値だけではなく、最大値や最小値も必要になる場合があるが、今回の解析の範囲においては、正加力時と負加力時の水平耐力は、平均値に対して最大 7% の差であった。

以上の結果のように、全壁と隣接する垂壁や腰壁のパネルの負担力は、同一変形角における単独の場合の負担力と比べると、大変形域以外では高くなるため、単独の垂壁や腰壁、全壁の耐力を加算しても、過大評価にはならないことが分かる。大変形域においては、逆に、加算耐力がやや過大評価になる傾向があり、注意が必要と考えられる。

6. 柱の曲げモーメント

垂壁や腰壁の剛性を高くし、水平抵抗要素として期待する場合、垂壁や腰壁が取り付け柱では、垂壁の下端高さや腰壁の上端高さで曲げ破壊が生じることが懸念される。前章で示した結果のうち、120mm 角の柱で垂壁が全壁に隣接する場合の増分解析の結果から、垂壁の下端高さでの柱の曲げモーメントを、単独の場合と全壁に隣

図 15 単独の垂壁における垂壁の下端高さの柱の曲げモーメントに対する複合モデルにおける同じ箇所の曲げモーメントの比
(凡例の記号：数値は壁長(P)，F は全壁，H は垂壁を示す。)

接する複合モデルの場合とで比較する。なおここでは、垂壁の両側の柱のうち、曲げモーメントが大きくなる側の柱を対象とする。

図 15 の縦軸は、垂壁が単独の場合における垂壁の下端高さの柱の曲げモーメントに対する複合モデルにおける同じ箇所の曲げモーメントの比であり、小変形域から大変形域に至るまで、いずれの組み合わせにおいても 0.9 以下であることが分かる。これは、複合モデルにおいては、垂壁と全壁が共有する中柱の曲げ変形が抑えられるため、柱間の拘束バネによる引き戻し力で、垂壁の下端高さの柱の曲げモーメントが低減されるものと考えられる。なお、柱が 150mm 角の場合や、柱が 120mm 角で垂壁・腰壁併用の場合についても同様の検討を行ったが、縦軸の曲げモーメントの比が 1.0 を上回るケースは、柱が 150mm 角で 1P 垂壁と 4P 全壁との組み合わせ 1 ケースのみであり、最大でもこの比は 1.06 (1/60rad 時) であった。すなわち、本解析の範囲では、複合モデルの柱に生じる曲げモーメントは、単独の垂壁の柱に生じる曲げモーメントと同等程度と考えて、柱の曲げ破壊の検討を行ってよいものと考えられる。

7. まとめ

乾式土壁パネルを用いた真壁形式の全壁、垂壁、腰壁および垂壁・腰壁併用試験体の静的せん断加力実験を行い、これらの解析モデルを作成した。そして、垂壁や腰壁を全壁に隣接して設けた複合モデルの水平耐力を増分解析によって求め、単独の垂壁や腰壁と単独の全壁の水平耐力を加算した場合との比較を行った。その結果、大変形域を除き、単独壁の加算によって求めた水平耐力より、複合モデルの水平耐力が上回り、本検討結果からは、建物の層の水平耐力を単独壁の水平耐力を加算して求めても、大変形域を除いて過大評価にならないとの結論が得られた。また、垂壁の下端や腰壁の上端高さでの柱の曲げモーメントは、単独壁の場合より、全壁と隣接した場合のほうが、解析を行ったほとんどのケースで小さくなることが分った。

本報で示した結果は、乾式土壁パネルを用いた実験結果に基づいているが、柱が面内外側に開く力を拘束する貫や長押などを有し、かつ、同程度の耐力を有する湿式土壁においても、同様の結果が得られるものと考えられる。また、柱間を水平材で繋いで面内外側への変形を拘束することは、このような真壁形式の耐力壁では水平剛性の上昇や、垂壁下端高さや腰壁上端高さでの柱の曲げ破壊を生じにくくする効果があると考えられ、鴨居や窓台端部と柱との接方法などについても設計時に十分な検討が必要と考えられる。

謝辞

本研究は、「伝統的構法の設計法作成及び性能検証実験」検討委員会において行われたものです。ここに記して、関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 河合直人：垂壁(腰壁)付き独立柱の設計，建築技術，pp.136-139，2010.12
- 杉山亮太，鈴木祥之，後藤正美，村上博：乾式土壁パネルを用いた木造軸組耐力壁の開発，日本建築学会技術報告集 第 12 巻 第 24 号，pp.125-130，2006.12

[2012 年 6 月 20 日原稿受理 2012 年 9 月 3 日採用決定]