

論文内容の要旨

氏名	岡本 滋史			
学位の種類	博士(工学)			
学位記番号	工第189号			
学位授与の日付	平成23年3月22日			
学位授与の要件	学位規程第4条第2項該当			
学位論文題目	土壁の構造性能評価法に関する研究			
論文審査委員(主査)	教授	村上	雅英	
	(副主査)	特任教授	窪田	敏行
	(副主査)	教授	柳下	文夫

土壁は、竹などの小舞を格子状に組み立てた下地に、土を塗り重ねて仕上げた壁である。古くから住宅などで用いられてきた伝統的な壁のひとつであるが、下地を組んだあとに土を塗り重ねるため、施工は長い期間を必要とし、家づくりも工期短縮とコスト削減が最優先となった現代では、土壁を用いる建物は急速に減少している。しかし、土壁は、防火性、断熱性、遮音性、吸放湿性、耐久性に優れており、また、材料すべてが自然素材であることや、資材を無駄にすることがなくリサイクル活用することが可能であり、環境にも人にも優しい。このように様々な利点があることから、土壁を見直そうとする動きもある。

土壁を構造的にみてみると、他の壁に比べて重くて耐力が低いために、地震に対して不利である。また、一般的な設計では、土壁は耐震壁としての性能が画一的に与えられているが、土壁の施工方法は多様であり、仕様の違いによっても構造性能は大きく異なってくる。

土壁に関する研究は、古くから多くの研究者によって行われているが、土壁の耐力壁としての力学的特性や壁倍率を測定することを目的とした実験研究などが多く、力学モデルの解明には至っていない。日本全国には様々な仕様の土壁があるので、これらの土壁の構造性能を適切に評価するためには、土壁の力学モデルに基づいた影響因子の整理とそれらの評価法の確立が必要であると考えられる。そこで本論文では、京都の町家などで一般的に施工されている仕様の土壁を対象として、土壁の構造性能評価法を開発するための基礎理論の構築を目的とする。また、提案した土壁の耐力発現機構を基に、仕様の相違が土壁の各抵抗機構に対する影響の実験的な調査と、下地の工夫により安定して高耐力が得られる土壁の工法の提案を行った。

1章では、既往の研究、本研究の目的および概要を述べている。

2章では、土壁の破壊性状の詳細な観察に基づき、土壁の耐力発現機構の仮説を以下のように行った。土壁の破壊は、せん断破壊が先行する場合としない場合の2種類に分類した。せん断破壊が先行しない場合では、土壁が軸組内で1枚の剛版として回転することにより、図1(a)、(b)の変形成分で抵抗し、それにより土壁の最大耐力が支配される。この変形成分には、土壁のパネルが軸組内で回転することで、軸組一壁土間に生じる圧縮力による抵抗要素C、貫が土壁内で壁土をこじるように回転することで、貫一壁土間に生じる圧縮力による抵抗要素N、軸組に差し込まれた間渡しのダボ的抵抗のために、軸組一壁土間に生じるせん断力による抵抗要素Fの3つの抵抗要素が含まれ、これらの抵抗要素は、壁土の破壊によってお互いに影響し合う。せん断破壊が先行する場合は、土壁が1枚の剛版として回転する変形モードよりも、土壁の全体又は局部にせん断ひび割れが発生して土壁が図1(c)のようにせん断変形し、それにより土壁の最大耐力が支配される。また、各変形成分の変形角 θ_x 、 θ_y 、 γ を計測し、土壁の変形角Rに対する比率をみてみると、 $\theta_x/R + \theta_y/R + \gamma/R = 1$ となり、各変形成分が直列バネ配置的な関係にあることがわかった。

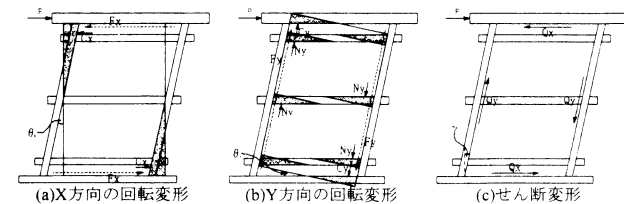


図1 土壁の変形成分

3章では、2章で仮説した土壁の耐力発現機構の検証を行った。耐力要素の一部を除きとした仕様の異なる土壁のせん断力の差し引きにより、C、N、Fの負担せん断力Pを実験的に抽出した。また、土壁の各耐力要素を単独で切り出した要素試験から各耐力要素の負担せん断力を算出した。そして、それぞれから得られた各耐力要素の負担せん断力を比較すると、概ね一致したが精度があまりよくなかった。土壁の中立軸位置に作用するせん断応力度を、要素試験により算出した。その結果、土壁にせん断ひび割れが発生した時のせん断応力度と、土壁がせん断破壊したときの最大せん断応力度の実験値と推定値は概ね一致した。これにより、2章で仮説した土壁の耐力発現機構の妥当性を示した。

4章では、土壁のせん断性状を評価するための部分壁体試験法の提案をした。各耐力要素の相互作用を含めて抵抗要素の挙動を再現できるように、2種類の部分壁体試験体を提案し、これらの試験結果から、変形成分 θ_x の $M_{\theta_x} - \theta_x$ 関係、変形成分 θ_y の $M_{\theta_y} - \theta_y$ 関係を推定する方法を提案した。また、変形成分 γ の $M_{\gamma} - \gamma$ 関係を推定するための部分壁体試験体を提案した。3種類の仕様の土壁に対して、部分壁体試験体の試験結果から各変形成分のモーメント-変形角関係を推定し、土壁のせん断力-変形角関係を推定した結果、実験値と推定値は概ね一致した。これにより、4章で提案した部分壁体試験法の妥当性を検証し、土壁の変形成分をX方向の回転変形 θ_x 、Y方向の回転変形 θ_y 、せん断変形 γ に分離して、各変形成分が直列バネ配置の関係となることを示した。

5章では、壁長が異なる2種類の土壁のせん断力-変形角関係から、任意壁長の土壁のせん断力-変形角関係を推算する方法を提案した。木造の一般的な設計では、土壁は、壁長の単位長さ当りの耐力が定められており、土壁の耐力は壁長比例を前提としている。壁長が1P(910mm)、2P(1820mm)の土壁から、壁長比例で1.5P(1365mm)のせん断力-変形角関係を推定した結果、大変形時の耐力は壁長比例の関係にあったが、初期変形時の耐力は壁長比例の関係になかった。そこで、土壁の各変形成分における力学モデルを考慮して、壁長が1.5Pの土壁のせん断力P-変形角R関係を、せん断破壊するまでを壁長が1Pの土壁から推算し、せん断破壊した後を壁長が2Pの土壁から推算する方法を提案した。その結果、本提案によるせん断力-変形角関係の推算値と実験値はきわめてよく一致した。このことから、土壁のせん断力-変形角関係は壁長比例しないことを示し、任意壁長の土壁のせん断力-変形角関係の推定方法の妥当性を検証した。

6章では、仕様の相違が土壁の構造性能に及ぼす影響の実験的調査を行った。全国の工務店などに土壁の仕様に関するアンケート調査を行って、土壁の様々な仕様を調査した。そして、4章で提案した部分壁体試験体を用いて、土壁の主要な耐力要素の隅角部の圧縮抵抗、壁土のせん断強度の実験的調査を行った。隅角部の圧縮抵抗に関しては、初期変形時では主として壁土(主に中塗り)の圧縮により抵抗し、初期変形以降では主として下地の圧縮により抵抗しており、下地の圧縮抵抗では間渡しの強度負担の割合が高いことが確認された。貫のこじり抵抗に関しては、荒壁の圧縮強度が大きく影響しており、下地の影響は少ないことが確認された。壁土のせん断強度に関しては、壁土の強度が低いときは下地の影響が少なく、壁土の強度が高い場合には下地の影響が大きいたことが確認された。壁土の強度が高い場合の下地の影響は、小舞間で表と裏の荒壁がつながっている部分の面積が広い方が荒壁の表と裏との一体性はあるため、せん断強度は高かった。これらのことから、仕様の相違が土壁の構造性能に及ぼす影響を示した。

7章では、土壁に筋かいを埋め込み、従来より性能の高い土壁の開発を行った。筋かい補強をした土壁は、筋かい補強した土壁の軸組に90mmの壁土を塗ったものである。試験結果は、筋かい端部と軸材とのクリアランスにより、初期変形時には筋かいの耐力は見られず、およそ1/150rad付近から耐力の上昇が見られ、1/20rad付近まで安定して耐力が増え続けた。よって、大地震を想定した大変形領域での補強効果は期待できることが確認された。また、この耐力要素の一部である筋かいに関して、圧縮筋かい耐力壁の破壊性状の考察から、耐力発現機構に基づく力学モデルの構築を以下の①、②ように行った。①筋かい端部の応力伝達機構は、筋かいに加わる柱と横架材からのそれぞれ水平方向と鉛直方向の応力とその応力による摩擦力により釣り合い状態にある。②圧縮筋かい耐力壁の変形成分を(a)筋かい端部の柱へのめり込みによる変形成分、(b)ほぞのほぞ穴へのめり込みによる変形成分、(c)筋かい端部の横架材へのめり込みによる変形成分、(d)接合部の浮き上がりによる変形成分、(e)筋かい材の軸方向への変形成分の5種類に分解し、これらの各変形成分が直列バネ配置的な関係にある。これらのことを考慮し、圧縮筋かい耐力壁のせん断力-変形角関係の推定方法の提案を行い、推算値と実験値と比較した結果、提案した推定方法が妥当であることを確認した。そして、4章で提案した部分壁体試験体から推算した土壁のせん断力-変形角関係を圧縮筋かい耐力壁のせん断力-変形角関係の推定方法を用いて、筋かい補強した土壁のせん断力-変形角関係の推定を行った。推算値と実験値を比較した結果、提案した推定方法の妥当性を検証した。

8章では、1章～7章で得られた知見をまとめて示した。

以上、本研究により京都の町家などで一般的に施工されている仕様の土壁を対象として、土壁の耐力発現機構を解明し、力学モデルの提案とその妥当性を検証した。そして、全国各地で行われている様々な仕様の土壁を実験的に調査した結果、様々な仕様の土壁であっても本研究で提案した土壁の力学モデルが有用であり、仕様の相違により耐震性が異なることが確認できた。また、耐震壁としての耐力を上げるために、土壁に筋かいを埋め込むことで、安定して高耐力が得られ、大地震を想定した大変形領域での補強効果があることが確認できた。

論文審査結果の要旨

土壁に関する研究は、古くから多くの研究者によって行われているが、土壁の耐力壁としての力学的特性や壁倍率を測定することを目的とした実験研究などが多く、力学モデルの解明には至っていない。日本全国には様々な仕様の土壁があるので、これらの土壁の構造性能を適切に評価するためには、土壁の力学モデルに基づいた影響因子の整理とそれらの評価法の確立が必要であると考えられる。

本論文は、京都の町家などで一般的に施工されている仕様の土壁を対象として、土壁の構造性能評価法を開発するための基礎理論の構築を目的としたものである。

まず、土壁の破壊性状の詳細な観察に基づき、土壁の耐力発現機構を①～④のような仮説を行っている。

①土壁の変形成分を壁土と柱との回転変形 θ_x 、壁土と横架材との回転変形 θ_y 、壁土のせん断変形 γ の3つに分解した。

② θ_x 、 θ_y の変形成分には、土壁のパネルが軸組内で回転することで、軸組一壁土間に生じる圧縮力による抵抗要素C、貫が土壁内で壁土をこじるように回転することで、貫一壁土間に生じる圧縮力による抵抗要素N、軸組に差し込まれた間渡しのダボ的抵抗のために、軸組一壁土間に生じるせん断力による抵抗要素Fの3つの抵抗要素が含まれる。

③ γ の変形成分には、土壁のせん断抵抗による抵抗要素が含まれる。

④各変形成分の変形角 θ_x 、 θ_y 、 γ の土壁の変形角Rに対する比率は、 $\theta_x/R+\theta_y/R+\gamma/R=1$ となり、各変形成分が直列バネ配置的な関係にある。

そして、この仮説を基に、土壁の耐力発現機構の挙動の解明として、耐力要素の一部を除去した仕様の異なる土壁のせん断力の差し引きにより、C、N、Fの負担せん断力を実験的に抽出し、土壁の中立軸位置に作用するせん断応力度を、要素試験により得られたせん断応力度から算出できることを示した。これにより、仮説の妥当性を示し、土壁の耐力発現機構を明らかにした。

次に、土壁のせん断性状を評価するための部分壁体試験法の提案として、各耐力要素の相互作用を含めて抵抗要素の挙動を再現できるように、3種類の部分壁体試験体を提案し、これらの試験結果から、変形成分 θ_x の $M_{\theta_x}-\theta_x$ 関係、変形成分 θ_y の $M_{\theta_y}-\theta_y$ 関係、変形成分 γ の $M_{\gamma}-\gamma$ 関係を推定する方法を提案した。そして、3種類の仕様の土壁に対して、部分壁体試験体の試験結果から各変形成分のモーメント-変形角関係を推定し、土壁のせん断力-変形角関係を推定した結果、実験値と推定値は概ね一致し、部分壁体試験法の妥当性を示した。また、このことより、土壁の変形成分を回転変形 θ_x 、回転変形 θ_y 、せん断変形 γ に分解して、各変形成分が直列バネ配置の関係となることを明らかにした。

更に、木造の一般的な設計では、土壁の耐力は壁長比例を前提とし、壁長の単位長さ当りの耐力が定められているが、壁長が1P(910mm)、2P(1820mm)の土壁から、壁長比例で1.5P(1365mm)のせん断力-変形角関係を推定した結果、大変形時の耐力は壁長比例の関係にあったが、初期変形時の耐力は壁長比例の関係になかったことを明らかにした。そこで、土壁の各変形成分における力学モデルを考慮して、壁長が1.5Pの土壁のせん断力-変形角関係を、せん断破壊するまでを壁長が1Pの土壁から推算し、せん断破壊した後は壁長が2Pの土壁から推算する方法を提案し、本提案の妥当性を検証した。このことから、土壁のせん断力-変形角関係は壁長比例しないことを示し、土壁の壁長の違いによるせん断性状の関係性を明らかにした。

以上より、本研究により京都の町家などで一般的に施工されている仕様の土壁を対象として、土壁の耐力発現機構を解明し、力学モデルの提案とその妥当性を示した。

続いて、提案した土壁の耐力発現機構を基に、仕様の相違が土壁の各抵抗機構に対する影響の実験的な調査と、下地の工夫により安定して高耐力が得られる土壁の工法の提案を行っている。

まず、仕様の相違が土壁の構造性能に及ぼす影響の実験的調査として、全国の工務店などに土壁の仕様に関するアンケート調査を行って、土壁の様々な仕様を調査し、部分壁体試験体を用いて、土壁の主要な耐力要素の隅角部の圧縮抵抗、壁土のせん断強度の実験的調査を行い、以下のことを明らかにした。

- ・隅角部の圧縮抵抗に関しては、初期変形時では主として壁土(主に中塗り)の圧縮により抵抗し、初期変形以降では主として下地の圧縮により抵抗しており、下地の圧縮抵抗では間渡しの強度負担の割合が高いことが確認された。
- ・貫のこじり抵抗に関しては、荒壁の圧縮強度が大きく影響しており、下地の影響は少ないことが確認された。壁土のせん断強度に関しては、
- ・壁土の強度が低いときは下地の影響が少なく、壁土の強度が高い場合には下地の影響が大きいことが確認された。

次に、下地の工夫により安定して高耐力が得られる土壁の工法として、土壁に筋かいを埋め込んだ試験を行い、性能を確認した結果、筋かい補強をした土壁は、筋かい端部と軸材とのクリアランスにより、初期変形時には筋かいの耐力は見られず、およそ1/150rad付近から耐力の上昇が見られ、1/20rad付近まで安定して耐力が増え続けたことが確認された。このことより、筋かいは土壁により座屈拘束され、大地震を想定した大変形領域での補強効果は期待できることを示した。

また、この耐力要素の一部である筋かいに関して、圧縮筋かい耐力壁の破壊性状の考察から、耐力発現機構に基づく力学モデルの構築を以下の①、②のように行い、圧縮筋かい耐力壁のせん断力-変形角関係の推定方法の提案し、検証した結果、提案した推定方法が妥当であることを明らかにした。

- ①筋かい端部の応力伝達機構は、筋かいに加わる柱と横架材からのそれぞれ水平方向と鉛直方向の応力とその応力による摩擦力により釣り合い状態にある。
- ②圧縮筋かい耐力壁の変形成分を(a)筋かい端部の柱へのめり込みによる変形成分、(b)ほぞのほぞ穴へのめり込みによる変形成分、(c)筋かい端部の横架材へのめり込みによる変形成分、(d)接合部の浮き上がりによる変形成分、(e)筋かい材の軸方向への変形成分の5種類に分解し、これらの各変形成分が直列バネ配置的な関係にある。

以上より、全国各地で行われている様々な仕様の土壁を実験的に調査した結果、仕様の相違により耐震性が異なることが確認でき、また、耐震壁としての耐力を上げるために、土壁に筋かいを埋め込むことで、安定して高耐力が得られ、大地震を想定した大変形領域での補強効果があることを明らかにした。

よって、審査員は、各審査試験、予備試験ならびに博士学位論文公聴会(平成23年1月26日)を行って慎重に審議した結果、本論文は、土壁の耐力発現機構を解明し、更に、仕様の違いによる影響や高耐力土壁の開発と広範囲に渡る実験事実に基づいた理論的研究を展開しており、本論文の内容は博士(工学)の学位を授与するに相当するものと認めた。