

平成21年5月22日現在

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2006～2008

課題番号：18560544

研究課題名（和文） 壁土の地域性を考慮した土塗り壁のせん断耐力の評価

研究課題名（英文） Evaluation of the Shear Strength of Mud-plastered Walls  
all over Japan

研究代表者

山崎 裕 (YAMAZAKI YUTAKA)

横浜国立大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：30313464

研究成果の概要：伝統的構法の木造住宅では、土塗り壁が主な耐震要素であることが多いが、地域により仕様が大きく異なるため、一般的な土塗り壁のせん断耐力の評価は困難と考えられていた。そこで、実大土塗り壁試験体によるせん断加力実験とその数値解析とを組み合わせることで、壁土の産地（材料強度）と土塗り壁のせん断耐力との関係を明らかにし、日本各地の土塗り壁のせん断耐力の変動幅を評価した。

交付額

(金額単位：円)

|        | 直接経費      | 間接経費    | 合計        |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2006年度 | 900,000   | 0       | 900,000   |
| 2007年度 | 1,800,000 | 540,000 | 2,340,000 |
| 2008年度 | 800,000   | 240,000 | 1,040,000 |
| 年度     |           |         |           |
| 年度     |           |         |           |
| 総計     | 3,500,000 | 780,000 | 4,280,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学・建築構造・材料

キーワード：木質構造、伝統的構法、土塗り壁、せん断耐力、壁土、材料試験、数値解析

## 1. 研究開始当初の背景

近年の新築の木造住宅においては、解体のことまで考慮されることなく、施工の簡略化、部材の化学材料化、低コスト化のみを追求して技術開発がなされてきた結果、リサイクル困難な建材が使用され、産業廃棄物による環境悪化が問題となっている。一方では、そうした事態を省みて、天然素材を使用し、多量の金物を使用しない、伝統的構法の木造住宅が見直されてきている。

こうした伝統的構法の住宅では、土塗り壁が主な耐震要素であることが多いが、壁土や下地については、地域により仕様が大きく異なることから、一般的な土塗り壁のせん断耐

力の評価は困難と考えられており、そのことをテーマにした研究は、ほとんど行われてこなかった。

構造設計では、土塗り壁のせん断耐力は、全国的に同じとみなしているが、壁土の強度特性は多様であることから、実際には、変動幅がかなり大きいと考えられる。

## 2. 研究の目的

本研究では、実大土塗り壁試験体によるせん断加力実験とその数値解析とを組み合わせることで、壁土の産地（材料強度）と土塗り壁のせん断耐力との関係を明らかにし、日本各地の土塗り壁のせん断耐力の変動幅を

評価することを目的とする。

### 3. 研究の方法

#### (1) 土塗り壁工法に関するアンケート調査

日本全国の土塗り壁工法の実態を把握するために、アンケート調査を実施する。そして、壁土の産地、土塗り壁の標準的な軸組や下地の仕様、施工方法等を把握する。

#### (2) 関東地方の仕様の土塗り壁のせん断加力実験および数値解析モデルの作成

関東地方で容易に入手可能な荒木田土を用いて、関東地方で標準的な仕様の土塗り壁試験体を製作し、せん断加力実験を行う。試験体のパラメータは、側柱の断面寸法、壁厚、側柱の面内はらみ拘束の有無である。

そして、この実験の試験体を対象に数値解析モデルを作成し、解析モデルのキャリブレーションを行う。

#### (3) 壁土の収集および材料強度試験

アンケートの結果をもとに、各地で実際に使用されている壁土を収集する。そして、材料強度試験を行い、数値解析に必要な壁土の弾性係数、圧縮強度、引張強度およびせん断強度を得る。

#### (4) 強度特性が異なる壁土を用いた土塗り壁のせん断加力実験

前項で収集した壁土の中から強度特性が異なる壁土を3種類程度選定する。そして、その壁土を用いて土塗り壁試験体を製作し、せん断加力実験を行う。

#### (5) 土塗り壁のせん断耐力の変動幅の評価

各地の土塗り壁の仕様、壁土の材料強度の分布、土塗り壁試験体のせん断加力実験結果および数値解析結果を総合して、日本各地の土塗り壁のせん断耐力の変動幅を評価する。

### 4. 研究成果

#### (1) 土塗り壁工法に関するアンケート調査

##### ①調査の方法と項目

本アンケート調査では、(社)日本左官業組合連合会に協力を依頼し、2006年11月、各都道府県連に10部ずつアンケート用紙を送付し、土塗り壁の施工経験が豊富な左官職人の方々に転送していただいた。

アンケートの内容は、最近に施工した小舞下地の土塗り壁(真壁に限定)について、主に、下地の仕様や壁土について尋ねるもので、全40問からなる。設問の一部を表1に示す。

##### ②集計結果

###### ・下地の仕様や施工の頻度について

Q.7の結果をみると、間渡しはほぼ全て竹であり、縦横ともに丸竹であったのは27%、割竹を用いていたのは41%であった。割竹を使う地域と丸竹を使う地域とは、明確に区別できなかった。

小舞について(Q.9)、全体の66%は割竹であり、葦は10%であった。葦を用いていること

が多い県は、青森県、岩手県、山形県、宮城県、新潟県、富山県であった。これまで、せん断加力実験の試験体としては、ほとんどが竹小舞であったが、今後は、葦が小舞である土塗り壁の耐震性能の検証も必要である。

小舞縄の材質について(Q.11)、ワラが44%、シュロと麻はそれぞれ6%と7%、ビニールは12%であった。縄の巻き方について(Q.12)、全体では、「螺旋」と「千鳥」はほぼ同数であり、関東、近畿、九州では「螺旋」が多く、中国地方では「千鳥」が多い傾向であった。

###### ・壁土について

塗り厚に関する設問(Q.17)では地域性はみられず、全国平均で、下塗り29.4mm、むら直し(片面)11.9mm、中塗り(片面)12.0mm、上塗り(片面)3.7mmであった。両面塗りの場合の壁厚は84.7mmとなり、やや厚いと思われるが、柱の断面について(Q.13)、69%が120mm角以上との回答であり、妥当な壁厚であるといえる。

Q.18で、壁土を自ら入手した場合は、全体の64%であり、九州では「他の人が手配した」場合も多くみられた。Q.19で既調合の土を使う場合は、全体の約43%であり、その他は、山や田畑から採取しているとのことである。「既調合の製品を購入」という回答が高いのは、中部、北陸、近畿地方であった。

むら直し用の壁土を、荒壁土に砂を混ぜてつくった場合は64%(Q.24)、中塗り用では54%であった。近畿、東海地方では、むら直しや中塗り用に、荒壁土とは別の土を用意する場合が多くみられた。

表1 アンケートの主な設問

|  |
|--|
| Q.7 間渡しの種類について教えてください。                 |
| Q.9 小舞の種類について教えてください。                  |
| Q.11 小舞を掻く縄の材質について教えてください。             |
| Q.12 小舞を掻く縄の絡め方について教えてください。            |
| Q.13 柱はどのくらいの断面寸法でしたか。                 |
| Q.17 それぞれの塗り厚はどの程度でしたか。                |
| Q.18 荒壁用の土はどなたが手配されましたか。               |
| Q.19 荒壁用の土の入手先について教えてください。             |
| Q.24 むら直し(中付け)用の土は、荒壁を塗った土に砂を混ぜたものですか。 |

#### (2) 関東地方の仕様の土塗り壁のせん断加力実験および数値解析モデルの作成

##### ①土塗り壁試験体のせん断加力実験

表2のように、2種類の側柱の断面寸法(105mm角と120mm角)と2種類の壁厚(60mmと80mm)とを組み合わせた土塗り壁試験体を4体、および、柱と横貫の仕口に鼻栓を打ち、両側柱が面内で外側に開くことを抑えた試験体1体の計5体を製作し、せん断加力実験を行った。試験体図を図1に、乾燥後に実測した各層の厚さを表3に示す。

図2に荷重-変形関係を示す。全試験体に

において、壁土のロッキングによる隅角部の圧壊の後、せん断ひび割れが生じ、せん断スリップ破壊が生じる前後に最大耐力となった。H1 試験体の最大耐力は 9.65kN、H2 試験体は 13.50kN、鼻栓によって両側柱の開きを拘束した H3 試験体は、H2 試験体よりやや高い 14.15kN、H4 試験体は 7.37kN であり、壁厚は H1 より約 10%小さいが、最大耐力は約 25%低い。H5 試験体は、H2 試験体とほぼ同じ壁厚であるが、最大耐力は 12.17kN で H2 試験体より約 10%低い。側柱の断面が大きいほうが、最大耐力が低い傾向がみられた。

表 2 土塗り壁試験体一覧

| 試験体名 | 柱の断面寸法  | 全壁厚  | 特記    |
|------|---------|------|-------|
| H1   | 105mm × | 60mm |       |
| H2   | 105mm   | 80mm | 横貫に鼻栓 |
| H3   | 120mm × | 60mm |       |
| H4   | 120mm × | 60mm |       |
| H5   | 120mm   | 80mm |       |

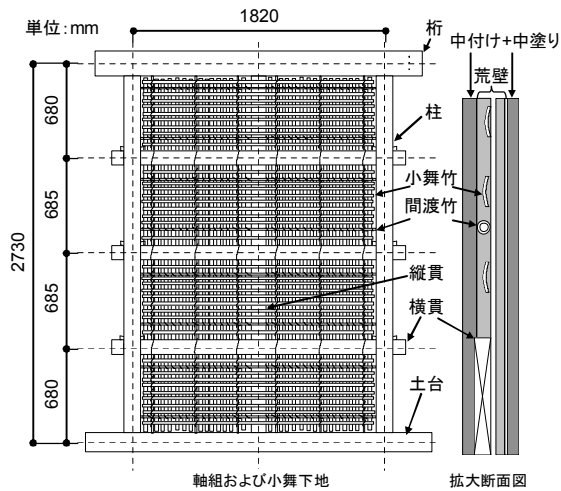


図 1 土塗り壁試験体

表 3 各層の厚さ (mm)

|         | H1   | H2   | H3   | H4   | H5   |
|---------|------|------|------|------|------|
| 荒壁      | 31.9 | 28.0 | 32.3 | 29.5 | 31.3 |
| 中付け+中塗り | 29.7 | 52.7 | 51.6 | 26.3 | 49.5 |

※中付け+中塗りは、表裏両面の合計。

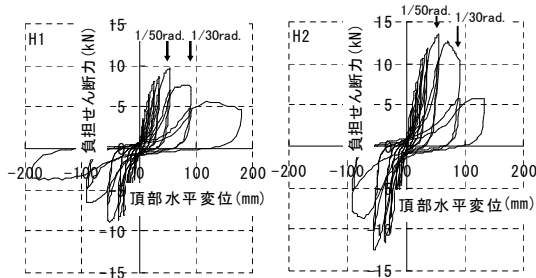


図 2 土塗り壁試験体の荷重-変形関係

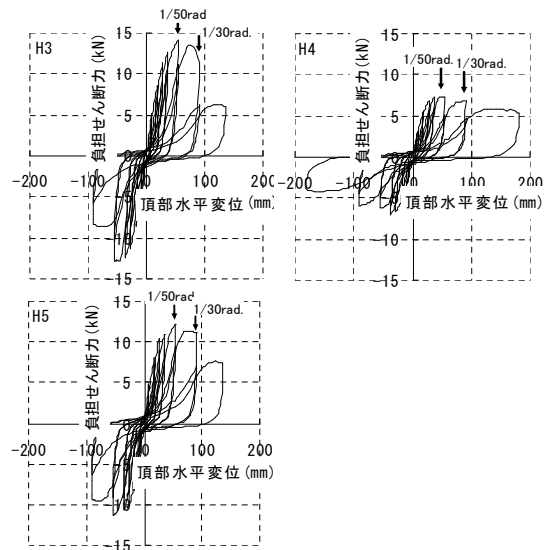


図 2 土塗り壁試験体の荷重-変形関係

②試験体を対象とした数値解析の結果

図 3 に実験結果と数値解析結果を示す。荷重値は、中付けおよび中塗り層の負担せん断力である。側柱の断面が大きい H4、H5 試験体では、実験値より高い解析値が得られている。土塗り壁試験体の側柱の断面が大きい場合には、壁土の変形を拘束する力が大きいため、断面が小さい場合よりせん断耐力は高くなると考えられ、解析結果では、壁厚の差を考慮すると、そのような傾向である。しかし、実験ではその逆の結果が得られているが、その明確な理由は不明である。

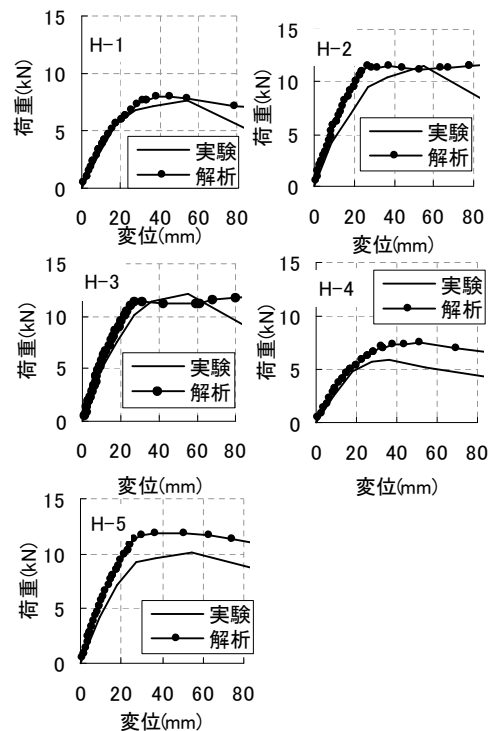


図 3 解析結果

### (3) 壁土の収集および材料強度試験

#### ①実験の概要

各地で実際に使用されている壁土（中塗り土）を収集するため、(社)日本左官業組合連合会を通じて、土塗り壁の施工を行っている左官職の方々に壁土の提供をお願いした。壁土の提供にあたっては、採取した土に砂やスサなどを混ぜ合わせ、水分量も調整し、“すぐ塗れる状態の中塗り土”をお送りいただくようお願いした。到着した中塗り土は、型枠に詰めて養生した。

中塗り土の材料強度試験は、JIS R 5201「セメントの物理試験方法」に準じて行った。各材料強度試験の方法を図4に示す。供試体数は各5体を標準とし、各壁土の4種類の材料強度の代表値としては、5体の平均値を採用した。中塗り土は、22県から29種類ご提供いただき、壁土が足りなかったり、乾燥中にひび割れが生じたりしたものなどを除く539体について材料強度試験を行った。

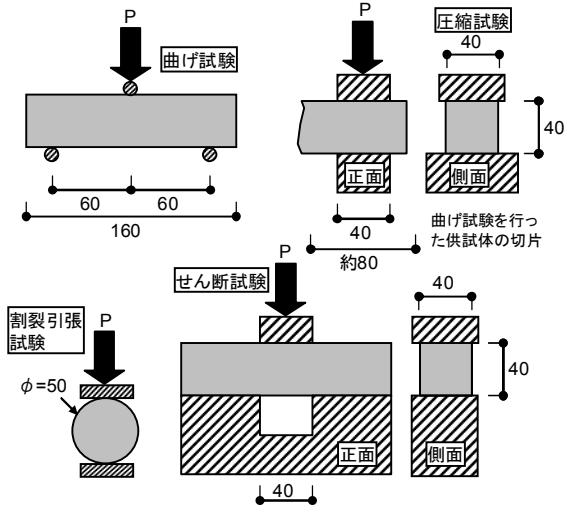


図4 材料強度試験の方法  
(図中の数値の単位はmm)

#### ②実験結果

表4に29種類の壁土の材料強度の統計値を示す。圧縮強度の平均値に対して、曲げおよびせん断強度の平均値は35%程度、引張強度の平均値は10%程度で、変動係数はいずれも0.3前後である。同表中の「ばらつき」とは、各壁土のそれぞれの試験における5体の変動係数を29種類分平均した値である。

表5は、各強度間および各強度と密度、フロー値、粘土率との相関係数であり、図5にはその散布図を示す。

密度と各強度とは0.5前後の相関係数であり、粘土率は圧縮およびせん断強度との相関がやや高い。フロー値と各強度との相関は、ほとんどないといえる。

各強度間の相関係数は比較的大きく、いずれの組み合わせも0.8程度以上である。圧縮とせん断強度との間には非常に高い相関が

あるが、これは、圧縮試験では、45度方向の対角線上にすべり破壊が生じることが多く、圧縮強度とせん断強度とは本質的に同じ破壊性状であるためと考えられる。また、曲げ強度と引張強度との相関も高い。従って、ばらつきの比較的少ない圧縮試験と割裂引張試験とを行えば、せん断強度と曲げ強度も推定可能であるといえる。

表4 中塗り土の各材料強度の統計値

|      | 曲げ    | 圧縮    | せん断   | 引張    |
|------|-------|-------|-------|-------|
| 平均値  | 0.381 | 1.107 | 0.404 | 0.120 |
| 変動係数 | 0.294 | 0.308 | 0.296 | 0.321 |
| 最大値  | 0.617 | 1.787 | 0.685 | 0.234 |
| 最小値  | 0.150 | 0.452 | 0.171 | 0.042 |
| ばらつき | 0.100 | 0.049 | 0.059 | 0.073 |

表5 中塗り土の特性値や強度の相関係数

|         | 曲げ           | 圧縮           | せん断          | 引張           |
|---------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 密度(乾燥後) | <b>0.506</b> | <b>0.538</b> | <b>0.492</b> | <b>0.489</b> |
| フロー値    | -0.173       | -0.175       | -0.174       | -0.098       |
| 粘土率     | 0.302        | <b>0.405</b> | <b>0.460</b> | 0.258        |
| 曲げ      | -            | <b>0.819</b> | <b>0.823</b> | <b>0.886</b> |
| 圧縮      | -            | -            | <b>0.981</b> | <b>0.794</b> |
| せん断     | -            | -            | -            | <b>0.793</b> |

白抜き:0.7以上、太字:0.4以上~0.7未満

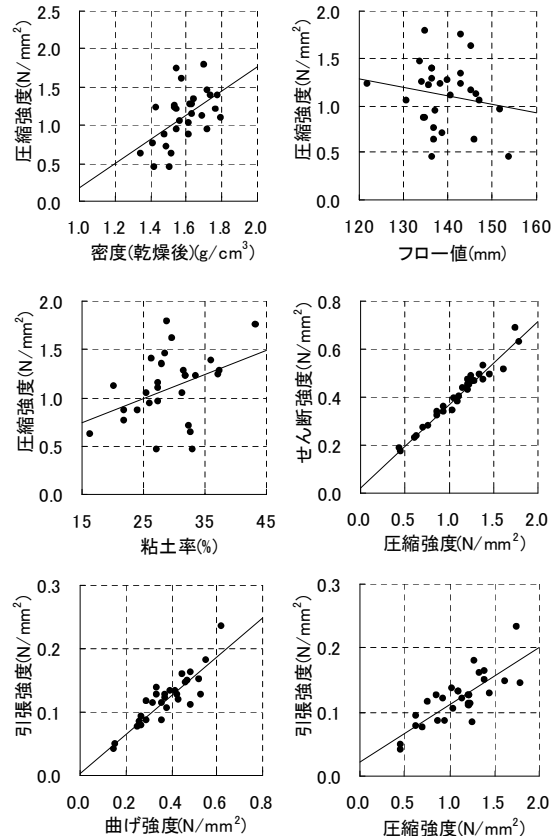


図5 中塗り土の特性値や材料強度の相関

(4) 強度特性が異なる壁土を用いた土塗り壁のせん断加力実験

①実験の概要

前項(3)の壁土(中塗り土)の中から、強度特性の異なる3種類の壁土(中塗り土)を選定し、土塗り壁試験体を製作した。

表6は土塗り壁試験体の一覧である。壁長が910mmの試験体が1体ずつであり、荒壁土には荒木田土を用い、厚さは30mm程度とした。中付け土と中塗り土では、土や砂等の配合比は若干異なるが、材料強度試験の結果はほぼ同じであるので、中付け土は中塗り土と同じとみなすことができる。乾燥後の実測によると、中付け層と中塗り層の厚さは、表側と裏側とで計25mm程度であった。軸組の仕様は図1の試験体と同じである。

表6 土塗り壁試験体一覧

| 試験体名 | 荒壁土  | 中塗り土の産地 |
|------|------|---------|
| I-4  |      | A       |
| I-5  | 荒木田土 | B       |
| I-6  |      | C       |

今回の土塗り壁試験体の製作に用いた3種類の壁土の強度を図6に示す。材料強度試験の供試体は2種類あり、40mm×40mm×160mmの供試体ではJIS R5201に準じた試験を、φ50mm×100mmの供試体では、圧縮および割裂引張試験を行った。今回の産地Aの壁土については強度がかなり高くなり、産地Cの強度特性に近くなった。その原因としては、今回の産地Aの壁土の密度が、(3)の材料試験時より2割程度高かったことが考えられる。なお、産地Aと産地Cの壁土の強度は、産地Bの1.5倍程度であった。

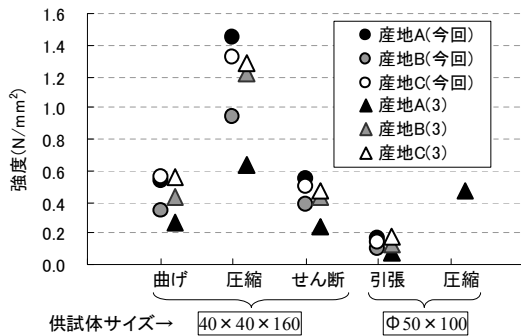


図6 壁土(中塗り土)の材料強度

②実験結果

図7に土塗り壁試験体の荷重-変形関係を示す。各試験体とも、壁土のロッキングにより隅角部での圧壊が生じた後、せん断ひび割れはみられず、1/75rad.~1/50rad.で最大耐力に達し、中付けおよび中塗り層が荒壁層から剥がれて全体的に浮上った。

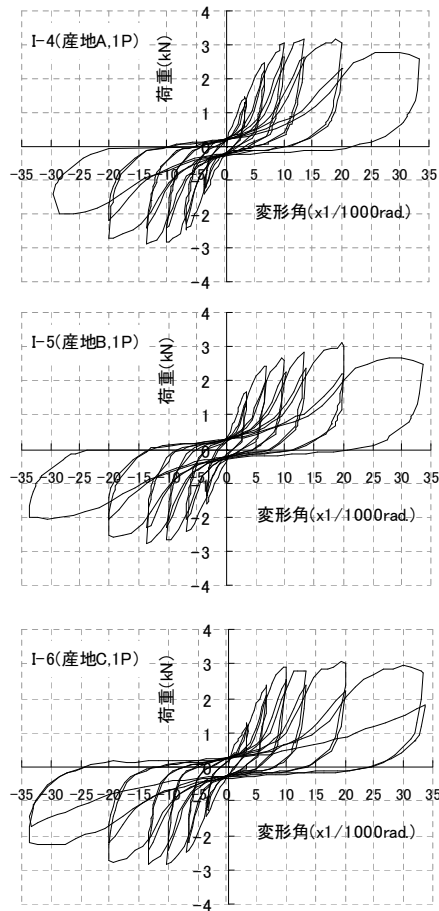


図7 土塗り壁試験体の荷重-変形関係

図8に正側加力の各ピーク時における、中付けおよび中塗り層の負担せん断応力度の推移を示す。これは、各試験体の耐力から、軸組および荒壁層の負担せん断力を差し引き、断面積で除した値である。最大のせん断応力度の比は、産地A:B:C=1.19:1.00:1.12で、大きくとも20%程度の差である。中塗り土のφ50×100の圧縮強度の比は1.50:1.00:1.59であり、土塗り壁試験体の比よりかなり大きく、今回の土塗り壁のせん断耐力は、単純に壁土の圧縮強度に比例するわけではないといえる。なお、中付けおよび中塗り土の圧縮強度に対する負担せん断応力度の最大値の比は、平均すると12%である。

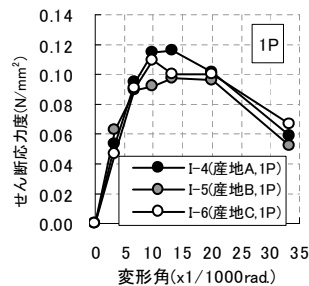


図8 中付けおよび中塗り層の負担せん断応力度

(5) 土塗り壁のせん断耐力の変動幅の評価

以上の結果から、全国の土塗り壁のせん断耐力の変動幅を評価する。

φ50mmの供試体による圧縮強度は、(3)の結果から0.32N/mm<sup>2</sup>~1.28N/mm<sup>2</sup>と推定され、平均は0.79N/mm<sup>2</sup>、標本偏差は0.25N/mm<sup>2</sup>である。ここでは、40mm×40mmの供試体の圧縮強度の71.7%がφ50mmの供試体の圧縮強度とみなしているが、これは(4)の実験内で行った材料強度試験の結果から導いた関係式に基づいている。

次に、本研究で行った土塗り壁のせん断加力実験から計算した、中付けおよび中塗り層の負担せん断力の最大値を表7に記入し、さらに、表中ハッチで示した不足しているデータを数値解析により補間する。

表7に記入したデータに基づき、壁土の圧縮強度と土塗り壁のせん断耐力（中付けおよび中塗り層の負担せん断力の最大値）との関係を図9に示す。ここでは、圧縮強度が0.49N/mm<sup>2</sup>~1.06N/mm<sup>2</sup>の結果を示しているが、これは(3)で行った材料試験結果が正規分布に従うと仮定すると、下側11%、上側14%を除いた75%に相当する。従って、全国の75%の壁土について、図9のように土塗り壁のせん断耐力を推定できたものと考えられる。

中付けおよび中塗り土の圧縮強度に2倍程度の差があっても、壁長が2Pで中付けおよび中塗り層の厚さが50mmの場合では30%程度、25mmの厚さでは25%程度の差である。壁長が1Pの場合は、壁厚が50mmの場合は50%程度、25mmの場合は30%程度の差であり、土塗り壁のせん断耐力には、壁土の材料強度ほどの差は生じていない。

この結果は、中付けおよび中塗り層のみを評価の対象としているが、実際の土塗り壁では、荒壁層や軸組の負担せん断力もこれに加算される。そうすれば、各地の土塗り壁のせん断耐力の差は、さらに小さくなると考えられる。

なお、図9に示したせん断耐力は、土塗り壁の側柱が105mm角の場合を想定している。(2)の土塗り壁実験では、側柱の断面積が120mm角の場合には105mm角の場合よりせん断耐力が低い傾向がみられた。その原因は不明ではあるが、注意が必要である。

表7 壁土の圧縮強度・壁厚と試験体の対応

| 壁土<br>産地 | 圧縮強度<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 中付け+中塗り25mm |     | 中付け+中塗り50mm |    |
|----------|------------------------------|-------------|-----|-------------|----|
|          |                              | 2P          | 1P  | 2P          | 1P |
| 荒木田      | 0.49                         | H-1         |     | H-2         |    |
| B        | 0.67                         |             | I-5 |             |    |
| A        | 1.00                         |             | I-4 |             |    |
| C        | 1.06                         |             | I-6 |             |    |

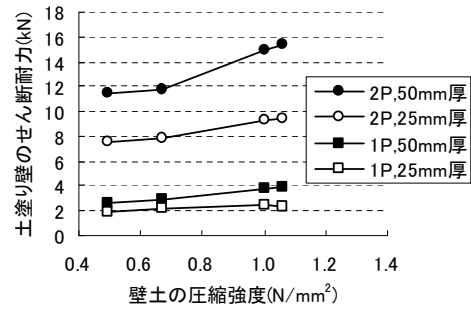


図9 壁土の圧縮強度と土塗り壁のせん断耐力の関係

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計5件)

- ① 山崎裕、土塗り壁の耐力および変形性能の推定に関する実験的研究(その12 壁土の産地および下地の工法が土塗り壁のせん断耐力に及ぼす影響)、日本建築学会大会、2009.8.26、東北学院大学
- ② 中尾方人、土塗り壁の耐力および変形性能の推定に関する実験的研究(その13 3種類の壁土を用いた土塗り壁の数値解析)、日本建築学会大会、2009.8.26、東北学院大学
- ③ 山崎裕、土塗り壁の耐力および変形性能の推定に関する実験的研究(その10 側柱の断面寸法が土塗り壁の最大耐力に及ぼす影響)、日本建築学会大会、2008.9.20、広島大学
- ④ 中尾方人、土塗り壁の耐力および変形性能の推定に関する実験的研究(その11 各地の壁土の強度の変動幅について)、日本建築学会大会、2008.9.20、広島大学
- ⑤ 中尾方人、土塗り壁の耐力および変形性能の推定に関する実験的研究(その9 真壁形式の土塗り壁工法に関するアンケート調査)、日本建築学会大会、2007.8.29、福岡大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山崎 裕 (YAMAZAKI YUTAKA)  
 横浜国立大学・大学院工学研究院・教授  
 研究者番号：30313464

(2) 研究分担者

中尾 方人 (NAKAO MASATO)  
 横浜国立大学・大学院工学研究院・特別研究教員  
 研究者番号：60323937  
 (H19→H20：連携研究者)

(3) 連携研究者