

## 伝統構法木造軸組における土塗り小壁の復元力評価法

### Evaluation Method for Restoring Force Characteristics of Strip-shaped Horizontal Mud-Walls in Traditional Wooden Frames

山田耕司<sup>1</sup>・中治弘行<sup>2</sup>・長瀬 正<sup>3</sup>・鈴木祥之<sup>4</sup>

Koji Yamada, Hiroyuki Nakaji, Tadashi Nagase and Yoshiyuki Suzuki

<sup>1</sup>豊田高専教授 建築学科 (〒471-8525 愛知県豊田市栄生町2-1)

Professor, National Institute of Technology, Toyota College, Dept. of Architecture

<sup>2</sup>公立鳥取環境大学教授 環境学部 (〒689-1111 鳥取市若葉台北1-1-1)

Professor, Tottori University of Environmental Studies, Faculty of Environmental Studies

<sup>3</sup>日本建築総合試験所 (〒565-0873 大阪府吹田市藤白台5-8-1)

General Building Research Corporation of Japan

<sup>4</sup>立命館大学教授 衣笠総合研究機構 (〒603-8341 京都市北区小松原北町58)

Professor, Ritsumeikan University, Kinugasa Research Organization

In this paper, the resisting force calculation method of hanging walls made of mud plaster in a wooden frame is proposed. This calculation method is composed of 2 fracture mechanisms: the compression failure and the shear failure of a hanging wall derived from full-height mud plaster wall test. This calculation method is checked by the comparison with the full scale tests of wooden frame with various height hanging walls. Results are as follows: 1) The proposed method gives the approximate horizontal resisting force of wooden frame with a hanging wall. 2) Six hundred mm height of a hanging wall is the border line between the compression failure and the shear failure of a hanging wall.

**Keywords:** strip-shaped horizontal wall, mud-wall, failure mechanism, evaluation method, restoring force characteristic

#### 1. 序

伝統構法木造建築物では、土塗り全面壁以外にも土塗り小壁が多用され、その復元力特性を評価することが重要である。これらの復元力特性に関する研究は、実大実験によるものが多い。これは材料および構法がモデル化を行うには複雑であり、一方、実大実験が容易に実施可能なためである。著者らも実験により伝統構法木造住宅の耐震性能を再検討してきた<sup>1),2)</sup>。土塗り壁の耐力機構に関しては、実大実験に基づいた研究が多くなされている。例えば、村上ら<sup>3),4)</sup>は、半間幅（以後、1P：910mm）の土塗り壁の実験を行い、壁土がせん断破壊しない範囲で、土壁の耐力は隅角部圧縮力が30-50%、貫のこじりが50-10%を占め、これらが主要な要因であることを示している。加えて、土塗り壁の耐力特性は、隅角部圧縮力と貫のこじりの物性が分かれば、予測可能であるとしている。壁土のせん断破壊が先行しやすい1間幅（以後、2P：1820mm）の土塗り壁に関する代表的な研究としては、村上ら<sup>5)</sup>、中尾ら<sup>6)</sup>の実験的研究がある。村上らは要素試験結果に基づき、初期剛性、最大耐力の推測式を提案している。中尾らも材料実験結果に基づくせん断抵抗力の推定を行っている。一方、村上らの一連の報告<sup>7)</sup>を見ると、土塗り壁の耐力は貫間隔、壁土の特性、貫伏せの有無・種類の影響を受けるとされており、土塗り壁を含む架構の耐力特性には未解明な部分が多いと言える。

土塗り小壁（以下、小壁）は、1P土塗り壁、2P土塗り壁に次ぐ伝統木造の重要な耐震要素であるが、その耐力性状は、壁土の特性、柱径、樹種、仕口形状により影響を受けると考えられる。そこで、著者の一部を

含むグループでは、実験によりその特性把握を試みた<sup>8)</sup>。実験結果より柱径の影響などの定性的な結果が得られたが、全容解明には至らなかった。その後、「伝統的構法の設計法作成及び性能検証実験検討委員会」で提案された詳細設計法(案)<sup>9)</sup>では、土塗り小壁付木造軸組の復元力特性について、「単位壁高さ・単位壁厚あたりのせん断応力度」から算定する案が提案されている。しかし、対象とした実大実験（MWD4、MWD5）では小壁高さの範囲が限られており、小壁高さの適用範囲が狭く、土塗り小壁付木造軸組の設計用復元力として汎用性がない。そこで、小壁高さの異なる土塗り小壁付木造軸組の実大実験を実施した<sup>10)</sup>。

本報では、小壁高さの異なる土塗り小壁付木造軸組の実大実験結果に基づいて、土塗り小壁付き架構の設計用復元力特性の評価方法の改善を目的として、土塗り小壁部分の復元力算定方法を提案し、垂れ壁あるいは腰壁のみの場合について、提案算定法と実験結果を比較し、その妥当性を示す。

## 2. 実験概要

小壁（垂れ壁、腰壁）付木造軸組の試験体を図1に示す。試験体名称後の（ ）内は軸組を含まない土塗り小壁のみの高さを表す。軸組の仕様は、柱120×120、桁120×210、貫18×105、鴨居材105×45 で、材種はスギ。寸法の単位はmm。文献<sup>9),11)</sup>等の検討委員会での試験体と同様の仕様とし、実験方法も同様の載荷式（重り重量19.24kN）として、1/480radから1/7radまで変形を増大させながら、各変形を3回ずつ経験するように正負繰り返し加力を行った<sup>12)</sup>。MWD4、MWD5、MWD-T300、MWD-T900の4種の試験体では、隅角部での壁土の圧壊が顕著で、小壁面内でのせん断ひび割れはほとんど見られなかったが、MWD-T1500では、大変形時にせん断ひび割れが目立っていた。

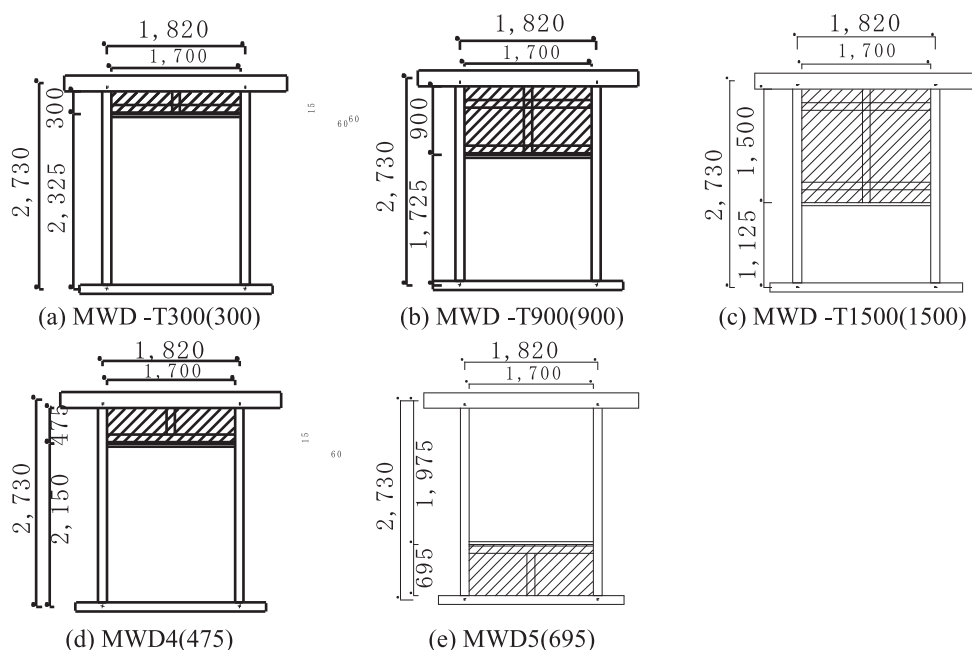


図1 試験体軸組図（ハッチ部は土塗り小壁を示す）

計測荷重から重り重量によるPΔ効果を除いた復元力を求め、各変形点で結んだ骨格曲線を図2に示す。なお、骨格曲線は、各折り返し変形点における3回の復元力の平均としている。

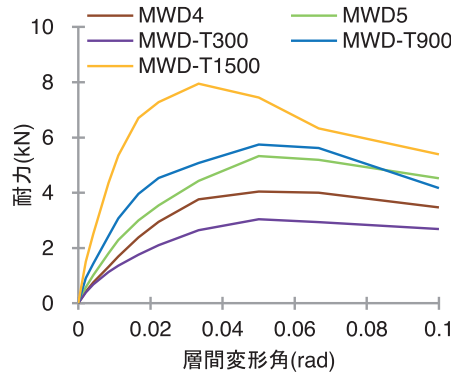


図2 骨格曲線（柱2本分のホゾ耐力を含み PΔ 効果を除く）

### 3. 評価手法

#### (1) 土塗り壁の破壊形式

土塗り壁の破壊形式は、壁土の圧潰が発生する場合と壁土のせん断破壊が発生する場合とに分類できる。一般に、1P 土塗り壁と 2P 土塗り壁の破壊形式は異なり、1P 土塗り壁では「壁土の圧潰および貫の壁土へのめり込み」、2P 土塗り壁では、「壁土のせん断破壊」が発生する。これは、土塗り壁のアスペクト比（高さ／長さ）と壁土の圧縮強度、せん断強度により決定される。壁土の強度は、既報<sup>13)</sup>より、

$$\sigma_t = 0.15\sigma_c \quad (1)$$

の関係が導かれる（ $\sigma_t$ ：引張強度、 $\sigma_c$ ：圧縮強度）。いま、純せん断状態の主応力度を考えれば、

$$\tau = \sigma_t = 0.15\sigma_c \quad (2)$$

とおける。高さ $H$ 、長さ $L$ 、厚さ $t$ の土塗り壁の頂部にせん断力 $Q_s$ が作用している場合を考える。最大せん断応力度は平均せん断応力度の 1.5 倍であるから、この土塗り壁がせん断破壊する場合、

$$1.5 \frac{Q_s}{tL} = \tau \quad (3)$$

として、(2)式を組み合わせると

$$Q_s = 0.1tL\sigma_c \quad (4)$$

となる。また、壁土が圧潰する場合のせん断力 $Q_b$ は、 $t=60\text{mm}$ 、貫厚 15mm、荒壁土強度/中塗り土強度を 0.8 として、

$$Q_b = \frac{M_b}{H} = \frac{tL^2}{6H} \sigma_c \left( 1 + 3 \cdot \frac{15}{t} \cdot 0.8 \right) = 0.27 \frac{tL^2}{H} \sigma_c \quad (5)$$

となる。結果として、 $Q_s:Q_b = 0.37:L/H$ となるから $0.37 > L/H$ なら壁土が圧潰、 $0.37 = L/H$ なら壁土が圧潰もしくはせん断破壊、 $0.37 < L/H$ なら壁土がせん断破壊すると導ける。つまり、土塗り壁の破壊形式は、壁のアスペクト比に関係する。

## (2) 土塗り小壁部分の荷重－変形角関係の一般化

### a) 小壁部分の壁土圧潰時耐力と壁土せん断破壊時耐力の算定法

本項では、土塗り小壁部の破壊耐力を算定する。土塗り壁の破壊形式は、前項でも検討したように壁土の圧潰とせん断破壊に分類でき、壁のアスペクト比に関係する。しかし、本報では、アスペクト比により破壊形式を選択せず、破壊形式ごとの耐力を算定して、その小なる方をとることにより破壊形式を選定することを提案する。小壁部分の壁土圧潰時耐力と壁土せん断破壊時耐力の算定には、基準となる1P、2Pの土塗り壁の試験結果<sup>9)</sup>を用いる。今、算定対象の小壁の土塗り部実寸を高さ $H_W$ 、長さ $L_W$ 、厚 $t_W$ 、耐力 $Q_W$ とし、比較対象の土塗り壁の土塗り部実寸を高さ $H_{1P}, H_{2P}$ 、長さ $L_{1P}, L_{2P}$ 、厚 $t_{1P}, t_{2P}$ 、耐力 $Q_{1P}, Q_{2P}$ とおく。土塗り小壁を梁長さ $H_W$ 、梁成 $L_W$ 、厚 $t_W$ の梁とみなし、壁土圧潰時耐力 $Q_{Wb}$ に壁高さを乗じたモーメントは断面係数に比例、壁土せん断破壊時耐力 $Q_{Ws}$ は断面積に比例すると考え、次式を設定する。

$$Q_{Wb} = Q_{1P} \frac{H_{1P}}{H_W} \left( \frac{L_W}{L_{1P}} \right)^2 \frac{t_W}{t_{1P}} \quad (6)$$

$$Q_{Ws} = Q_{2P} \left( \frac{L_W}{L_{2P}} \right) \frac{t_W}{t_{2P}} \quad (7)$$

ここで、基準となる1P、2Pの土塗り壁の諸寸法を表1に、耐力を図3中の太線として示す。図中の破線は、土塗り耐力に柱2本分のホゾ耐力を加算した値である。図2と図3中の破線との比較より、1Pおよび2P土塗り壁は、小壁付き構面の実験結果より最大耐力発生後の耐力劣化が激しいことが分かる。このため、提案式と実験結果の比較でも最大耐力発生後に大きな誤差が生じた（4節図8）。そこで本報では、1Pおよび2P土塗り壁の復元力特性を図2の実験結果に適合するように、最大耐力発生後の剛性を図3中の細線のように修正し、これを土塗り小壁部の耐力算定用の提案式とする。

表1 基準となる 1P、2P の土塗り壁の諸寸法(mm)

	高さ	長さ	厚
1P 土塗り壁	2600	800	60
2P 土塗り壁	2600	1710	60

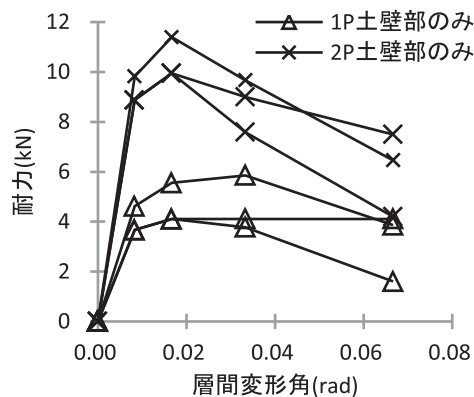


図3 基準となる 1P、2P の土塗り壁の耐力（破線：柱2本分のホゾ耐力加算後、細線：負勾配修正後）

### b) 土塗り小壁の耐力予測

本項では図4に示す小壁部に作用するせん断力 $Q_W$ を算定する。土塗り壁では壁のアスペクト比により破壊形式が異なるが、事前に破壊形式を予測できないため、 $Q_W$ 算定時には、小壁部の破壊形式を4ケ（ $Q_{Ws1}$ 、 $Q_{Wb1}$ 、 $Q_{Ws2}$ 、 $Q_{Wb2}$ ）想定し、最小値を取る。 $Q_{Wb1}$ は、小壁高さを $H_W$ 、長さを $L_W$ とした際の壁土圧潰時耐力を示す（図4b））。

$$Q_{wb1} = Q_{1P} \frac{H_{1P}}{H_W} \left( \frac{L_W}{L_{1P}} \right)^2 \frac{t_W}{t_{1P}} \quad (8)$$

$Q_{ws1}$ は、小壁高さを $H_W$ 、長さを $L_W$ とした際の壁土せん断破壊時耐力を示す（図4c））。

$$Q_{ws1} = Q_{2P} \left( \frac{L_W}{L_{2P}} \right) \frac{t_W}{t_{2P}} \quad (9)$$

$Q_{wb2}$ は、小壁高さを $L_W$ 、長さを $H_W$ とした際の壁土圧潰時耐力を示す。この時に計算されるせん断力は $Q_1$ であるので、 $Q_{wb2} = (L_W/H_W)Q_1$ で計算する（図4d））。

$$Q_{wb2} = \frac{L_W}{H_W} Q_{1P} \frac{H_{1P}}{L_W} \left( \frac{H_W}{L_{1P}} \right)^2 \frac{t_W}{t_{1P}} = Q_{1P} \frac{H_{1P}}{H_W} \left( \frac{H_W}{L_{1P}} \right)^2 \frac{t_W}{t_{1P}} \quad (10)$$

$Q_{ws2}$ は、小壁高さを $L_W$ 、長さを $H_W$ とした際の壁土せん断破壊時耐力を示す。この時に計算されるせん断力は $Q_1$ であるので、 $Q_{ws2} = (L_W/H_W)Q_1$ で計算する（図4e））。

$$Q_{ws2} = \frac{L_W}{H_W} Q_{2P} \left( \frac{H_W}{L_{2P}} \right) \frac{t_W}{t_{2P}} = Q_{2P} \left( \frac{L_W}{L_{2P}} \right) \frac{t_W}{t_{2P}} \quad (11)$$

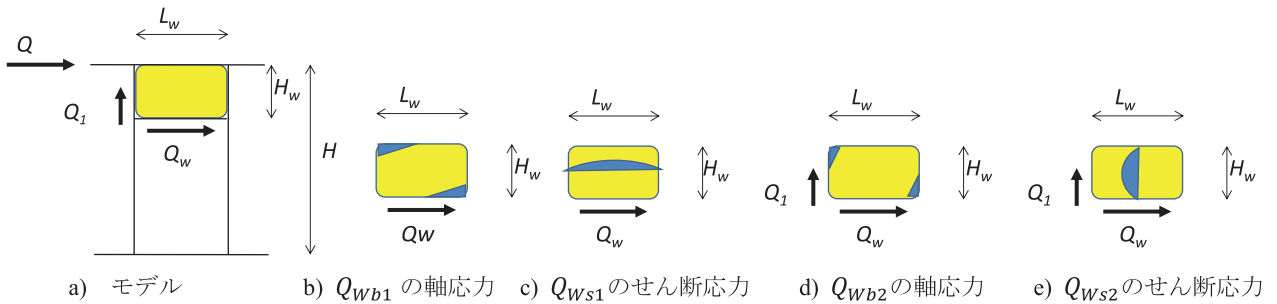


図4 モデル図と応力仮定

式(9)と式(11)は等価である。さらに式(8)~(11)を、図5に示す1P,2P土塗り壁の水平断面積あたりのせん断応力度 ( $\tau_{1P}, \tau_{2P}$ ) および小壁の寸法比 ( $H_W/L_W$ または $L_W/H_W$ の小さい方) と1P試験体のアスペクト比 ( $H_{1P}/L_{1P}=2600/800=3.25$ )でままとめると式(12)となる。

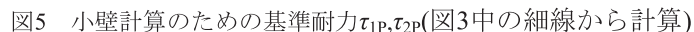
$$\begin{aligned} Q_W &= \text{Min}\{Q_{ws}, Q_{wb}\} \\ Q_{ws} &= \tau_{2P} t_W L_W \\ Q_{wb} &= 3.25 \tau_{1P} t_W L_W \text{Min}\left(\frac{H_W}{L_W}, \frac{L_W}{H_W}\right) \end{aligned} \quad (12)$$

ここで、 $Q_W$ は小壁耐力、 $Q_{ws}$ は壁土のせん断破壊で決まる小壁耐力、 $Q_{wb}$ は壁土の圧潰で決まる小壁耐力である。

表2 小壁計算のための基準耐力  $\tau_{1P}, \tau_{2P}(\text{kN/m}^2)$

層間変形角	0	1/120	1/60	1/30	1/15
1P 土塗り壁	0.00	76.46	85.55	85.63	85.63
2P 土塗り壁	0.00	86.55	96.98	87.72	73.10

(図3中の細線から計算)



– 100 –

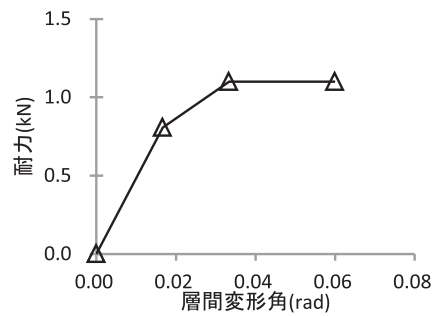


図7 ホゾ耐力に起因する柱の復元力

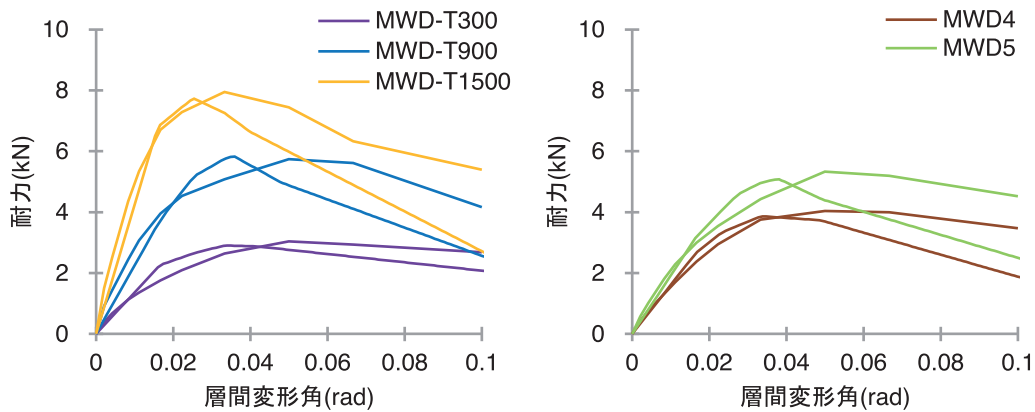


図8 P/Δ除去後の骨格曲線の比較（負勾配修正前、細線が推定値）

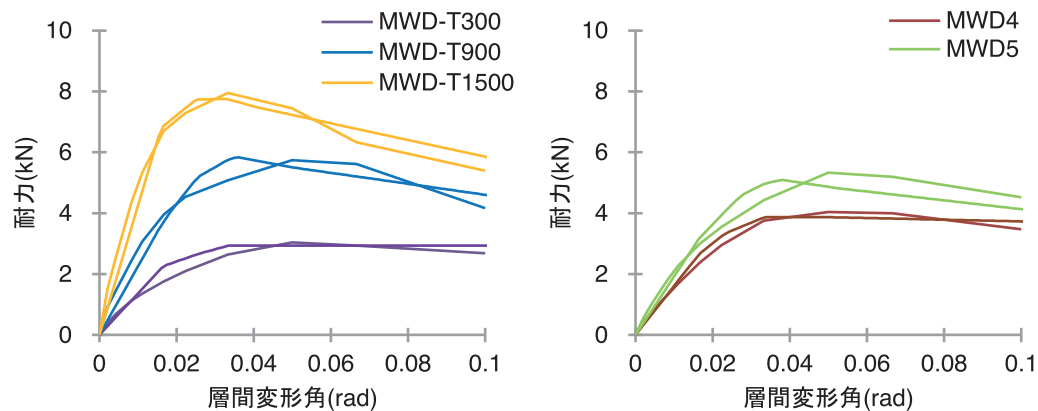


図9 P/Δ除去後の骨格曲線の比較（負勾配修正後、細線が推定値）

## 5. 結語

本報では、土塗り小壁の付随した架構の設計用復元力特性作成方法の改善を目的とし、実大実験結果に基づいて土塗り小壁部分の復元力算定方法を提案し、垂れ壁のみの場合について、提案算定法と実験結果を比較しその妥当性を検討した。その結果、提案した算定法がほぼ妥当であること、提案した算定法では破壊形式を誤判する可能性もあること、が判明した。以後、適用範囲の拡大・推定精度の向上を実験を通して検証する必要がある。

## 参考文献

- 1) 鈴木祥之，中治弘行：木造住宅土塗り壁の実大実験による耐震性能の再検討，日本建築学会構造系論文報告集，第515号，pp.115-122.，1999.



- 2) 山田真澄, 鈴木祥之, 後藤正美, 清水秀丸: 単位木造フレームを用いた動的・静的実験による木造軸組の耐震性能評価, 日本建築学会構造系論文集, 第582号, pp.95-102, 2004.
- 3) 村上雅英, 景山誠, 鈴木有, 稲山正弘: 静的水平加力実験に基づく土壁の耐荷機構の解明 ―せん断破壊が先行しない土壁の力学挙動―, pp.103-, 日本建築学会構造系論文集, NO.582, pp.103-108, 2004.
- 4) 村上雅英, 景山誠, 岡本滋史, 鈴木有, 稲山正弘: 要素試験による土壁の水平力耐荷機構の検証 ―せん断破壊が先行しない土壁の力学挙動(続)―, 日本建築学会構造系論文集, NO.594, pp.111-118, 2005.
- 5) 村上雅英, 景山 誠, 岡本滋史, 鈴木 有, 稲山正弘: 水平力の耐荷機構に基づく土壁の剛性と耐力の算定法に関する提案と検証, 日本建築学会構造系論文集, NO.605, pp.119-126, 2006.
- 6) 中尾方人, 一文字里紗, 山崎 裕, 石橋庸子: 土塗り壁のせん断抵抗機構およびせん断耐力の評価法に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, NO.598, pp.109-116, 2005.
- 7) 村上雅英ら: 耐荷機構に基づく土壁の構造性能評価法の提案と検証 (その1-6) 日本建築学会大会学術講演梗概集2004年C-1, pp.405-416, 2004.
- 8) 鎌田輝男, 清水秀丸, 細入夏加, 中治弘行, 鈴木祥之, 後藤正美: 土塗り垂れ壁構面の耐震性能評価に関する研究-パラメータが耐震性能に及ぼす影響-, 第12回日本地震工学シンポジウム, pp. 774-777, 2006.
- 9) 伝統的構法の設計法作成及び性能検証実験検討委員会、詳細設計法(案), 「伝統的構法の設計法作成及び性能検証実験検討委員会平成24年度報告書」, 2014.
- 10) 中治弘行・長瀬 正・鈴木祥之: 土塗り小壁付木造軸組の復元力特性への垂れ壁高さの影響. 2017年度日本建築学会大会学術講演梗概集, 2017.
- 11) 中治弘行・後藤正美・河原大・鈴木祥之: 土塗り壁の復元力特性への壁高さの影響 その1 土台仕様試験体. 2013年度日本建築学会大会(北海道)学術講演梗概集, pp.453-454, 2013.
- 12) 中治弘行・長瀬正・山田耕司・鈴木祥之: 実大実験に基づく土塗り小壁付木造軸組の復元力特性. 歴史都市防災論文集Vol.11, 2017年7月(投稿中)
- 13) Koji YAMADA, Masato NAKAO, Yutaka YAMAZAKI, Yoshiyuki SUZUKI : HORIZONTAL RESISTANT FORCE ESTIMATION OF MUD PLASTERED WALLS FOR A JAPANESE TRADITIONAL WOODEN STRUCTURE, Proc. 11th World Conference on Timber Engineering(WCTE 2010), pp.1063, 2010.