

# 実大実験に基づく土塗り小壁付木造軸組の復元力特性

## Restoring Force Characteristics of Timber Frame with Strip-Shaped Horizontal Mud-Wall based on Full-scale Tests

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

Hiroyuki Nakaji, Tadashi Nagase, Koji Yamada and Yoshiyuki Suzuki

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

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

<sup>2</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>3</sup>豊田工業高等専門学校教授 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>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番地)

Professor, Ritsumeikan University, Kinugasa Research Organization

In order to clarify the restoring force characteristics of timber frames with strip-shaped horizontal mud-walls such as hanging wall and window back wall, cyclic shear loading tests of timber frames were carried out. The theoretical estimations agree well with the test results. It is found that the effect of the size of strip-shaped horizontal mud-wall is attributable to the failure mechanism of mud-wall, and the theoretical estimations give satisfactorily the restoring force characteristics timber frames with hanging wall or window back wall alone, and combined with them.

**Keywords:** *strip-shaped horizontal mud-wall, full-scale tests, restoring force characteristics, failure mechanism*

### 1. はじめに

伝統的構法木造建物の耐震設計において、壁、軸組、接合部を含めて建物の復元力特性を適切に予測することが極めて重要である。とりわけ、土塗り小壁は伝統的な建物で主要な耐震要素であり、建物の耐力への寄与は大きいため、小壁の復元力特性を評価し、設計用復元力の算定方法を提示する必要がある。「伝統的構法の設計法作成及び性能検証実験」検討委員会(以下、検討委員会と書く)で提案された詳細設計法(案)<sup>1)</sup>では、土塗り小壁付木造軸組の復元力特性を「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、とされているが、少ない実験例に基づくもので適用範囲が限られるという問題がある。本論文では、小壁の破壊モードとあわせて、垂れ壁や腰壁単独のみならず垂れ壁と腰壁の両方がある小壁付き軸組の復元力特性を評価し得る理論式を展開する。

土壁の破壊モードは、壁面中央に斜めひび割れを生じるせん断破壊と壁上下または左右の端部で壁土の圧壊を生じる曲げ破壊に大別することができる。前者のせん断破壊ではせん断応力度が、後者の曲げ破壊では曲げ応力度が壁構面の復元力において支配的となり、これらの破壊モードは壁のアスペクト比(壁長さ $l$ と壁高さ $h$ の長さの比)に依存することが検証されている<sup>2)3)</sup>。例えば、全面壁の場合には、壁長さが1P(910mm)の場合と2P(1820mm)の場合で顕著な違いのあることがよく知られている。

本研究では、土塗り小壁付木造軸組の復元力算定法における小壁寸法の影響を明らかにするため、文献1)では不十分であった実大実験に加えて、あえて現実的ではない小壁寸法も含めて様々な小壁寸法の土塗り小壁付木造軸組について行った実大実験の結果概要を述べるとともに、垂れ壁と腰壁の付いた木造軸組について、実験結果との比較を行い、理論式による復元力推定の妥当性を検証する。

## 2. 実大実験の概要

### (1) 試験体

土塗り小壁(垂れ壁・腰壁)付木造軸組試験体を図1に示す。試験体名称のMWは土壁(Mud-Wall)、Dは柱脚に土台を用いていることを表す。MWD-4、MWD-5、MWD-6の実験は、2010年度に検討委員会での検証実験の一部として福山大学で行われた。MWD-T300、MWD-T900、MWD-T1500、MWD-TK300、MWD-TK900、MWD-TK1238の実験は、MWD-4、5、6の実験結果をふまえ、検討委員会でまとめられた詳細設計法(案)<sup>1)</sup>で仮定されている「小壁高さ」の影響を明らかにする目的で、2013年度に鳥取環境大学(現在は公立鳥取環境大学)で行われた。共通の仕様は以下のとおりである。

- ✓ 柱：120mm×120mm 角(スギ)
- ✓ 桁：120mm×210mm 角(スギ)
- ✓ 土台：120mm×120mm 角(ヒノキ)
- ✓ 貫：18mm×105mm 角(スギ)
- ✓ 鴨居：105mm×45mm 角(スギ)
- ✓ 小舞竹の間隔は内法45mm程度

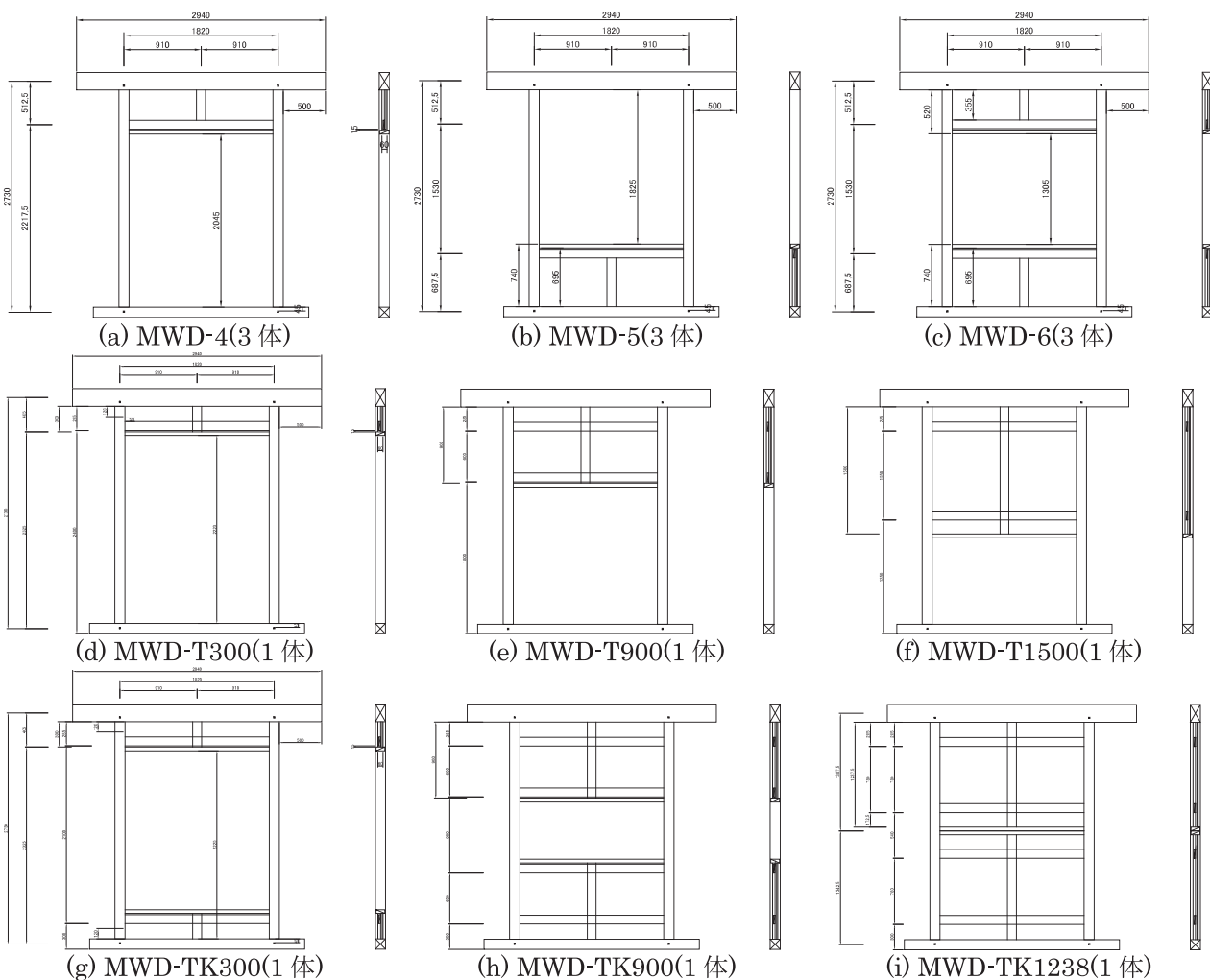


図1 試験体軸組図(単位: mm)

- ✓ 荒壁厚さ 36mm、中塗り厚さ 12mm×2 → 壁厚さ  $t_w=60$  mm
- ✓ 試験体の高さは、桁から土台までの材軸心間距離で  $H=2730$ mm

MWD-4 の垂れ壁高さは内法で 475mm、MWD-5 の腰壁高さは内法で 695mm、MWD-6 は MWD-4 の垂れ壁と MWD-5 の腰壁をあわせ持つものとした。図 1(d)から(i)の試験体で、T は垂れ壁、TK は垂れ壁と腰壁の意味である。T、TK の後の数値は、それぞれの小壁の内法高さを表す。つまり、MWD-T300 とは、土台付き土塗り壁の垂れ壁を持つ試験体であり、垂れ壁の内法高さが 300mm という意味である。

## (2) 実験方法

電動アクチュエーター(THK 社製 AE80、容量 100kN、ストローク 800mm)を用いた繰り返し面内せん断力加力実験とした。繰り返しの目標変形は、桁部の水平変位を試験体の高さ 2730mm で除した見かけの変形角が、 $1/480$ rad、 $1/240$ rad、 $1/120$ rad、 $1/90$ rad、 $1/60$ rad、 $1/45$ rad、 $1/30$ rad、 $1/20$ rad、 $1/15$ rad、 $1/10$ rad、 $1/7$ rad、となるように設定し、それぞれを 3 回繰り返すように変形制御で加力した。鋼製おもりで  $9.62$ kN×2 の鉛直荷重を作用させる載荷式とした。アンカーボルト等で土台の浮き上がりと水平移動を拘束した。

桁部の水平変位、土台の水平変位、土台の浮き上がり、柱頭・柱脚の抜けと回転、柱頭・柱脚の軸方向ひずみを計測した。一例として、図 2 に MWD-T300 での計測位置、写真 1 に MWD-T900 の設置状況を示す。

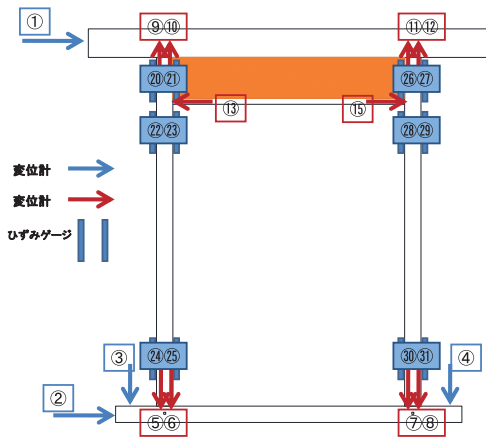


図 2 MWD-T300 での計測



写真 1 MWD-T900 の設置状況

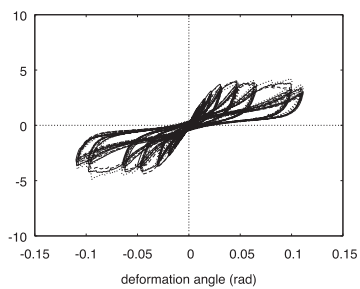
## (3) 実験結果

### a) 復元力特性

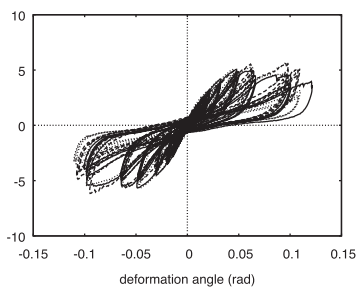
実験で得られた各試験体の復元力特性を図 3 に示す。横軸は、桁部の水平変位(図 2 の①)から土台の水平変位(図 2 の②)を差し引き、①と②の計測器間の距離 2730mm で除した見かけの変形角、縦軸は、計測荷重から鋼製おもりによる  $P\Delta$  効果の影響を差し引いた復元力(=計測荷重+おもり重量× $\tan$ (見かけの変形角))である。MWD-4、5、6 では、3 体の実験結果を重ねて表示している。図 3 の復元力特性から第 1 象限において  $1/480$ rad から  $1/10$ rad までの各折り返し変形点での復元力を結んだ骨格曲線を図 4 に示す。縦軸の値は 3 回繰り返しの平均とした。MWD-4、5、6 ではさらに 3 体の平均とした。

### b) 損傷過程

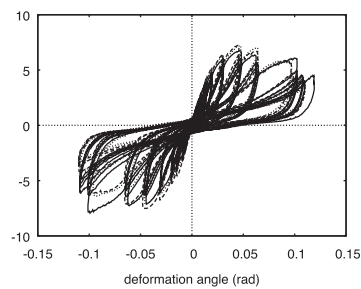
写真 2 に、MWD-T1500、MWD-TK300 及び MWD-TK900 試験体の損傷の様子を示す。文献 2)や 3)にも指摘されるように、垂れ壁、腰壁の形状によって、図 5 の 2P のように壁中央部に壁土のせん断ひび割れが目立つ「せん断破壊」の場合と、図 5 の 1P のように壁土の隅角部での圧壊が目立つ「曲げ破壊」の場合があることがわかる。MWD-4、MWD-5、MWD-6、MWD-T300、MWD-T900、MWD-TK300、MWD-TK900 の 7 種の試験体では、隅角部での壁土の圧壊が顕著で、小壁面内でのせん断ひび割れはほとんど見られなかったが、MWD-T1500 と MWD-TK1238 では、大変形時にせん断ひび割れが目立っていた。



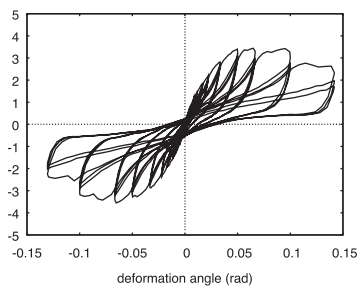
(a) MWD-4



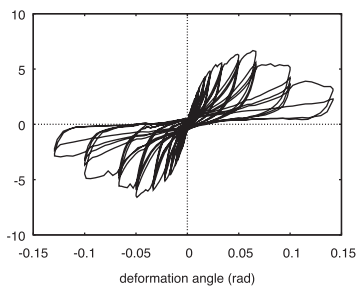
(b) MWD-5



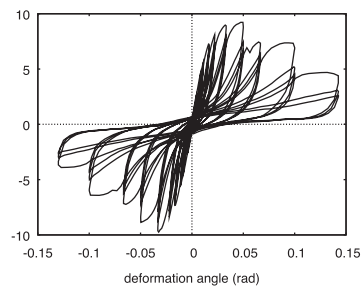
(c) MWD-6



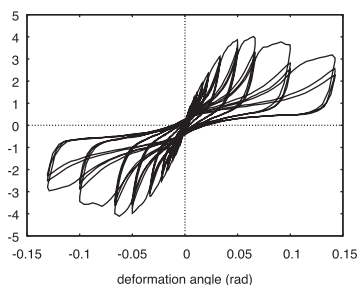
(d) MWD-T300



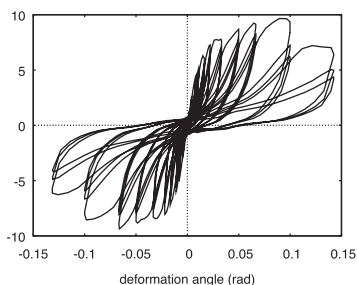
(e) MWD-T900



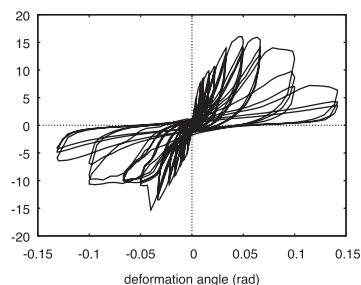
(f) MWD-T1500



(g) MWD-TK300

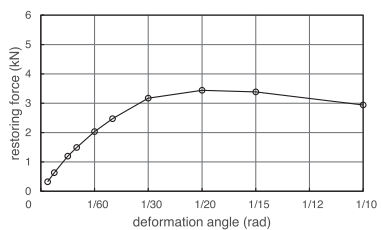


(h) MWD-TK900

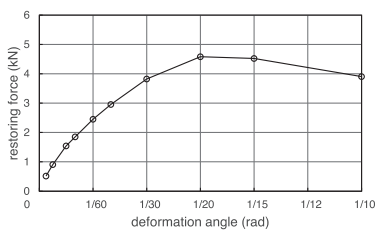


(i) MWD-TK1238

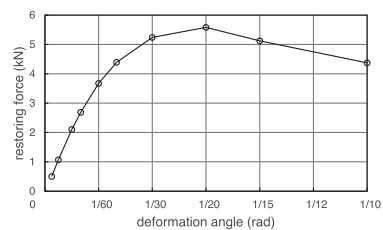
図 3 復元力特性



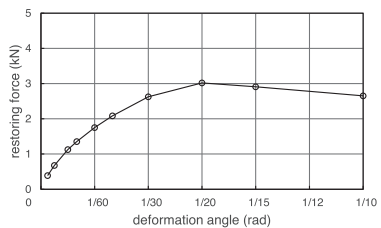
(a) MWD-4



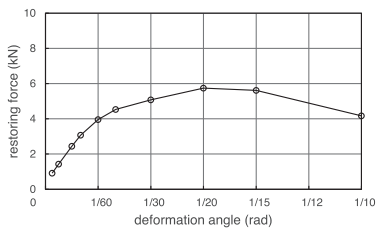
(b) MWD-5



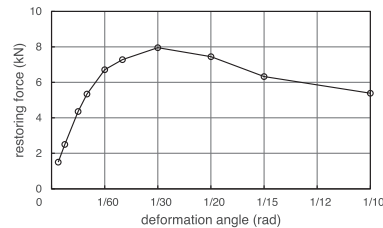
(c) MWD-6



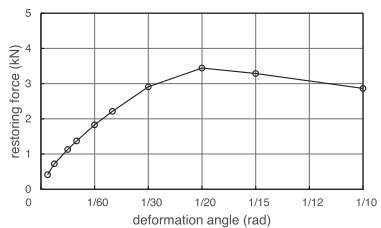
(d) MWD-T300



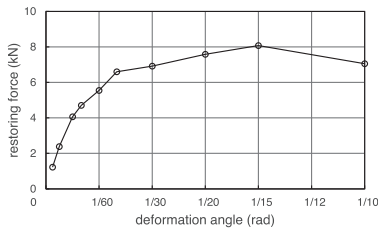
(e) MWD-T900



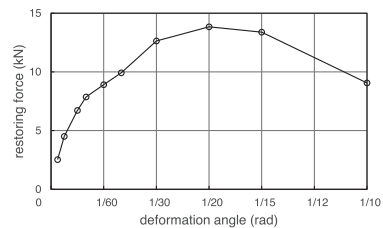
(f) MWD-T1500



(g) MWD-TK300



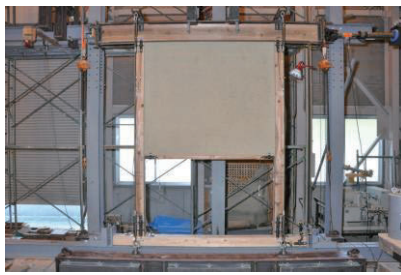
(h) MWD-TK900



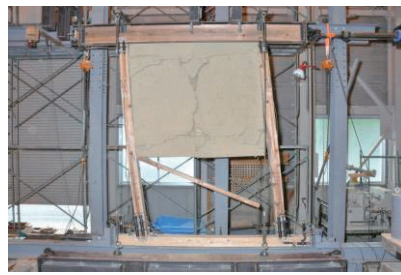
(i) MWD-TK1238

図 4 骨格曲線





実験開始時

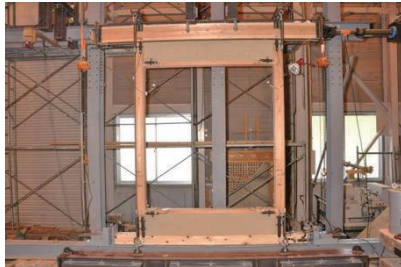


1/10rad

(a) MWD-T1500



垂れ壁のせん断破壊



実験開始時



1/10rad

(b) MWD-TK300



腰壁の曲げ破壊(隅角部圧壊)

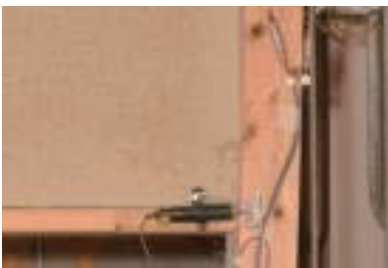


実験開始時



1/10rad

(c) MWD-TK900



垂れ壁の曲げ破壊(隅角部圧壊)

写真2 MWD-T1500、MWD-TK300 及び MWD-TK900 試験体の損傷

### 3. 土塗り小壁の負担せん断力に関する検討

#### (1) 定式化

2章(3)b)でも述べたように、土壁の破壊モードは、大きく、壁中央に斜めひび割れを生じるせん断破壊と、壁上下端または左右端に圧壊を生じる曲げ破壊に分類できる。前者のせん断破壊では壁土のせん断応力度が、後者の曲げ破壊では壁土の曲げ応力度(圧縮強度)が壁の復元力決定に支配的となり、さらにこれらの破壊モードは壁のアスペクト比に依存する<sup>3)</sup>。

図5のような全面壁の実験結果<sup>4)</sup>では2P壁がせん断破壊、1P壁が曲げ破壊を示しているので、これらから破壊時のせん断強度 $\tau_s$ と曲げ応力度 $\sigma_b$ を評価することができる。すなわち2P試験体から、せん断応力度 $\tau_s$ を(1)式で計算する。

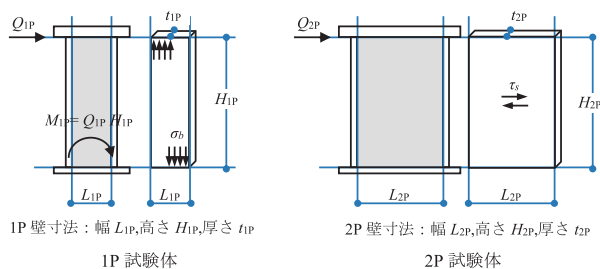


図5 全面壁 1P、2P

表1 全面壁 1P、2P のせん断応力度<sup>1)</sup>

	1/480	1/240	1/120	1/90	1/60	1/45	1/30	1/20	1/15	1/10
2P	30	54	86	96	98	93	84	72	58	34
1P	15	28	48	60	70	68	65	60	52	32

$$\tau_s = \kappa \frac{Q_{2P}}{t_{2P}L_{2P}} \quad (1)$$

ここで、 $Q_{2P}$ は2P壁せん断耐力、 $t_{2P}$ 、 $L_{2P}$ はそれぞれ2P壁厚さ及び長さを示す。 $\kappa$ はせん断応力度の最大/平均を表し、矩形では $\kappa=1.5$ となる。曲げ応力度 $\sigma_b$ は1Pの試験体から次式で与えられる。

$$\sigma_b = \frac{M_{1P}}{Z_{1P}} = \frac{Q_{1P}H_{1P}}{\frac{1}{6}t_{1P}L_{1P}^2} = 6 \left( \frac{Q_{1P}}{t_{1P}L_{1P}} \right) \left( \frac{H_{1P}}{L_{1P}} \right) \quad (2)$$

ここで、 $Q_{1P}$ は1P壁せん断耐力、 $t_{1P}$ 、 $L_{1P}$ はそれぞれ1P壁厚さ及び長さを示す。 $Z_{1P}$ は曲げ圧壊部の曲げ応力を算定するための断面係数で、1P壁の上下面での断面係数は、例えば $t_{1P}L_{1P}^2/6$ となる。(1)(2)式より $\tau_s$ 、 $\sigma_b$ ともに水平断面積あたりのせん断耐力、すなわちせん断応力度で規定される。このせん断応力度を表1に示す<sup>1)</sup>。

せん断または曲げから決まる耐力を小壁を含む任意寸法の土壁に応用するには、図6のように、①横せん断、②縦せん断、③横曲げ(壁上下面で周辺架構横材位置での圧壊)、④縦曲げ(壁左右面で周辺架構縦材位置での圧壊)の4つの破壊モードを考えて、その最小値を壁耐力とする。ここで、壁内法寸法を水平長さ $L_W$ 、鉛直高さ $H_W$ とし、壁厚さを $t_w$ とする。

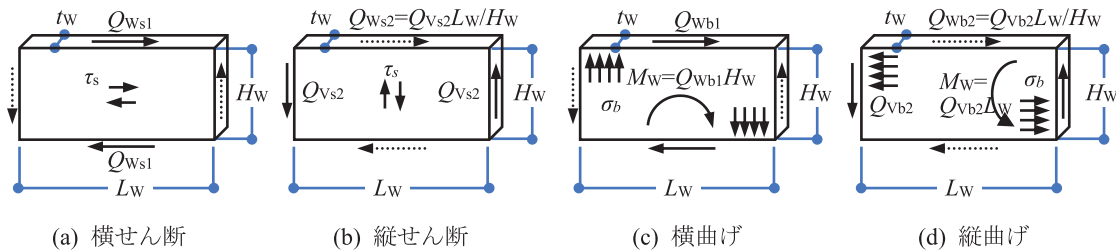


図6 壁の耐力を決定する4つの破壊モード

壁の耐力 $Q_W$ は、図6の4つの破壊モードに対応する各せん断力の最小値として、(3)式で得られる<sup>3)</sup>。

$$\begin{aligned} Q_W &= \text{Min}\{Q_{Ws}, Q_{Wb}\} \\ Q_{Ws} &= \tau_{2P}t_wL_W \\ Q_{Wb} &= 3.25\tau_{1P}t_wL_W \text{Min}\left(\frac{H_W}{L_W}, \frac{L_W}{H_W}\right) \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 $\tau_{2P}$ 、 $\tau_{1P}$ は2P、1P壁の水平断面積あたりのせん断応力度で、表1に示した通りである。

曲げできまる小壁の寸法比は $L_W > H_W$ とすれば、

$$\frac{Q_{Wb}}{Q_{Ws}} = 3.25 \left( \frac{\tau_{1P}}{\tau_{2P}} \right) \frac{H_W}{L_W} \leq 1 \quad (4)$$

$\tau_{1P}/\tau_{2P}$ は変形角に応じて0.5~0.9と変化し、それぞれの値が最大となる1/60radでは70/98=0.7であるので、(10)式から $L_W \geq 3.25 \times 0.7 H_W = 2.275H_W$ 、すなわち壁高さが壁長さの0.44倍以下と計算される。この場合、 $Q_W$ は、

$$Q_W = Q_{Wb} = 3.25\tau_{1P}t_wL_W \left( \frac{H_W}{L_W} \right) = 3.25\tau_{1P}t_wH_W \quad (5)$$

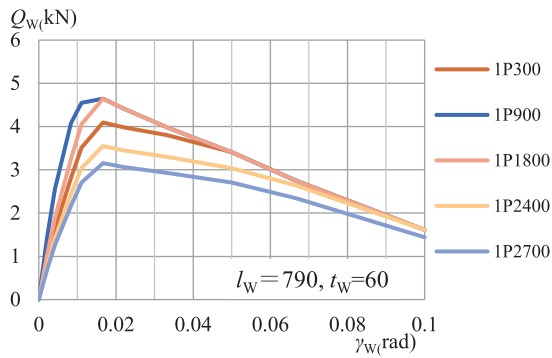


図7 1P小壁復元力  $Q_w-\gamma_w$

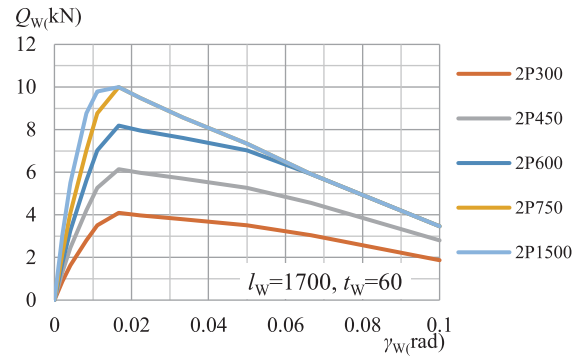


図8 2P小壁復元力  $Q_w-\gamma_w$

となって、壁耐力は壁の縦断面積すなわち壁高さ  $H_w$  に比例する。せん断で決まる場合は(3)第2式

$$Q_w = Q_{ws} = \tau_{2P} t_w L_w \quad (6)$$

より、壁の水平断面積に比例するので、壁長さが一定であれば、壁高さに関係なく一定の値となる。

例えば、1P(壁長さ  $910-120=790\text{mm}$ )、2P(壁長さ  $1820-120=1700\text{mm}$ )で壁高さが  $300\sim 2700$  の小壁の復元力  $Q_w$  はそれぞれ図7、図8のようにまとめられる。小壁厚さはいずれも  $t_w=60\text{mm}$  である。

## (2) 垂れ壁と腰壁のついた木造軸組の復元力特性

垂れ壁と腰壁の両方がある場合、柱仕口の曲げ抵抗を除いた状況で、図9のようなメカニズムを考えることができる。このとき、垂れ壁のせん断力を  $Q_{w1}$ 、腰壁のせん断力を  $Q_{w2}$  とすると、水平力  $Q$  との間に(7)式が成り立つ。図9での柱の曲げ変形を図10のように考えると、図9の  $\delta_B$  と  $\delta_C$  は(8)、(9)式で得られる。

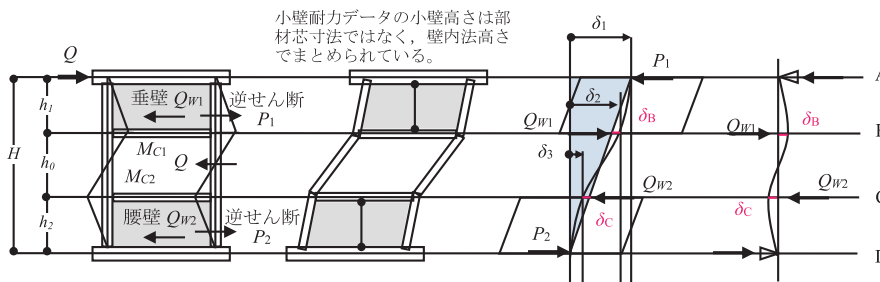


図9 垂れ壁・腰壁付木造軸組が水平力に抵抗するメカニズム

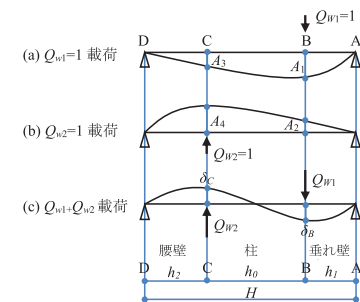


図10 柱のたわみ

$$Q = \frac{Q_{w1}h_1 + Q_{w2}h_2}{H} \quad (7)$$

$$\delta_B = A_1Q_{w1} - A_2Q_{w2} = \delta_2 - \frac{H-h_1}{H}\delta_1 \quad (8)$$

$$\delta_C = -A_3Q_{w1} + A_4Q_{w2} = \frac{h_2}{H}\delta_1 - \delta_3 \quad (9)$$

ここで、 $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ 、 $A_4$ は図10における各単位荷重に対するたわみで、以下のように表される。

$$A_1 = \frac{(H-h_1)^2 h_1^2}{3EIH} \quad (10)$$

$$A_2 = A_3 = \frac{h_1 h_2 (H^2 - h_1^2 - h_2^2)}{6EIH} \quad (11)$$

$$A_4 = \frac{(H-h_2)^2 h_2^2}{3EIH} \quad (12)$$

垂れ壁のせん断変形角を $\gamma_{W1}$ 、腰壁のせん断変形角を $\gamma_{W2}$ とすれば、 $\delta_1 - \delta_2 = \gamma_{W1}h_1$ 、 $\delta_3 = \gamma_{W2}h_2$ であるので、

$$(h_1A_2 + h_2A_1)Q_{W1} + h_1h_2\gamma_{W1} = (h_1A_4 + h_2A_3)Q_{W2} + h_1h_2\gamma_{W2} \quad (13)$$

の関係が成り立つ。(3)式で $Q_{W1}$ と $Q_{W2}$ の初期値を定め、垂れ壁の変形角 $\gamma_{W1}$ に応じて腰壁の変形角 $\gamma_{W2}$ を変化させながら(13)式の両辺が等しくなるまで収斂計算を行って、 $\gamma_{W1}$ と $Q_{W1}$ に対応する $\gamma_{W2}$ と $Q_{W2}$ を算出し、これを(7)式に代入すれば、ほぞの抵抗を除いた小壁付木造軸組の復元力を推定することができる。図 11 に、MWD-6、MWD-TK300 及び MWD-TK900 試験体について、推定結果((7)式の  $Q$ )にほぞの耐力を加算したものと実験結果(図 4 の(c)、(g)及び(h))との比較を示す。MWD-6 と MWD-TK300 では初期剛性に差がみられ、MWD-TK900 では変形角 1/30rad と 1/20rad で差がみられるが、近い値を推定できていると言える。

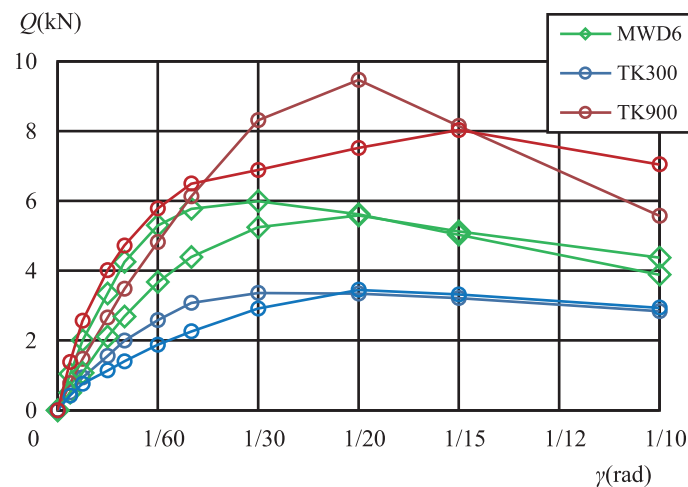


図 11 MWD-6、MWD-TK300 及び MWD-TK900 の比較 (実線：推定結果、点線：実験結果)

#### 4. まとめ

小壁高さの異なる試験体を用いた実大面内せん断試験を行い、土塗り小壁付木造軸組の復元力特性について、土塗り小壁部分の破壊モードを考慮したモデル化による検討を行った。垂れ壁のみ、または腰壁のみの付いた木造軸組の復元力を推定できるモデル<sup>3)</sup>を応用して、垂れ壁と腰壁がついた木造軸組の復元力推定方法を示し、実験結果と近い値を推定できることが明らかになった。土塗り小壁付き木造軸組の復元力について、その算定方法の妥当性が示されたので、検証実験を積み重ね、設計者が使いやすいよう、確かなものにしていく必要がある。

#### 参考文献

- 1) 「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)，pp.99-109，2014年
- 2) 岡本滋史・村上雅英・稲山正弘：破壊モードの異なる2種類の土壁の包絡線から任意壁長の土壁の包絡線を推定する方法とその検証．日本建築学会構造系論文集第74巻第639号，pp.881-888，2009年5月
- 3) 山田耕司・中治弘行・長瀬正・鈴木祥之：伝統構法木造軸組における土塗り小壁の復元力評価法．歴史都市防災論文集Vol.11，2017年7月(投稿中)
- 4) Hiroyuki Nakaji, Teruo Kamada, Masami Gotou, Koji Yamada, Yoshiyuki Suzuki : SEISMIC PERFORMANCE OF MUD-WALLS WITH SILL BASED ON FULL-SCALE CYCLIC LOADING TESTS. 12th World Conference on Timber Engineering 2012, 2012年7月