

垂れ壁と腰壁で分割された無開口土塗り壁の復元力特性

Restoring Force Characteristics of Blank Mud-walls Divided by Strip-Shaped Horizontal Mud-Walls

中治弘行¹・鈴木祥之²・長瀬正³

Hiroyuki Nakaji, Yoshiyuki Suzuki and Tadashi Nagase

¹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

²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

³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

In order to improve the capacity and deformability of mud-walls, strip-shaped horizontal mud-walls such as hanging wall and window back wall are effective. Shear cyclic loading tests of two types of mud-walls without open which are divided by hanging wall and window back wall were carried out. Test results show that maximum restoring force of such mud-walls is around that of mud-walls without open but the deformability of them is greater than that of usual blank mud-walls. In addition, the restoring force characteristics estimated theoretically agree well with test results.

Keywords: *Blank Mud-wall, Strip-shaped Horizontal Wall, Restoring Force Characteristics, Full-Scale Tests Structural Design*

1. はじめに

伝統的構法木造建物の主要な耐震要素は土塗り壁であり、全面壁だけではなく、垂れ壁や腰壁（小壁と総称する）も有効に耐震性能に貢献する。これらの耐震要素の復元力特性について、多くの実大実験による検証が行われており、柱2本の全面壁の場合、壁長さが半間（柱スパン910 mm、1P）と1間（同1820 mm、2P）では破壊性状が異なり、また、大変形時の復元力の減少程度が1Pの場合に比べて2Pの場合の方が大きいことが知られている¹⁾²⁾。一方、垂れ壁がついた2P木造軸組架構では、垂れ壁の高さが壁高さの半分を超えても全面壁と比べて大変形時の復元力低下が小さいことも実大実験で明らかになっている³⁾⁴⁾。これは、柱の曲げ抵抗が復元力に影響しているためと言える。筆者らは、土塗り小壁付木造軸組と総称されるこれらの耐震要素の設計用復元力特性の算定方法について構造力学的な検討を進めており、一部の実験結果について、計算値が実験値を再現できることを確認している⁴⁾⁵⁾。また、土壁部分の幅、高さ、厚さをパラメータとして小壁の復元力をこの算定方法⁵⁾で求めるとき、理論的に、通常の全面壁よりも「横架材等で分割された無開口壁」の方が耐力と変形性能が向上することが類推できるので、検証実験が重要である。

本研究では、特に2Pの土塗り壁について、無開口壁の耐力や変形性能の向上と大変形時の復元力低下を抑えることを目的として、垂れ壁と腰壁で分割された無開口土塗り壁2種類、各1体の正負繰り返し面内せん断加力実験を行った。実大実験の概要と結果を述べるとともに、設計用復元力との比較を行い、小壁高さの違いが破壊性状や復元力特性に与える影響を明らかにする。

2. 実大実験

(1) 試験体概要

図1に実大実験に用いた試験体を示す。試験体は、MWD-T900K1575とMWD-TK1238の2種類である。小壁の内法高さが等しく小壁の内法間隔を0としたMWD-TK1238について、荷重変形関係と損傷過程の一部を既報⁴⁾で述べているが、MWD-T900K1575を追加実験したので、あらためて実験結果を比較しつつ述べる。MWD-T900K1575試験体は、垂れ壁付木造軸組の耐震補強を想定して、MWD-T900の開口部を腰壁で塞いだ形状とした。

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し、Tは垂れ壁、Kは腰壁付である。T、KあるいはTKの後ろの数値は、垂れ壁と腰壁の内法高さを表す。その他、既報⁴⁾と同様に、共通の仕様は以下の通りである。

- 柱：120mm×120mm 角（スギ）
- 桁：120 mm×210 mm 角（スギ）
- 土台：120 mm×120 mm 角（ヒノキ）
- 貫：18 mm×105 mm 角（スギ）
- 鴨居・窓台：105 mm×45 mm 角（スギ）、柱との仕口は15 mm ほど差し
- 小舞竹の間隔は内法 45mm 程度
- 荒壁厚さ 36 mm、中塗り厚さ 12 mm×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

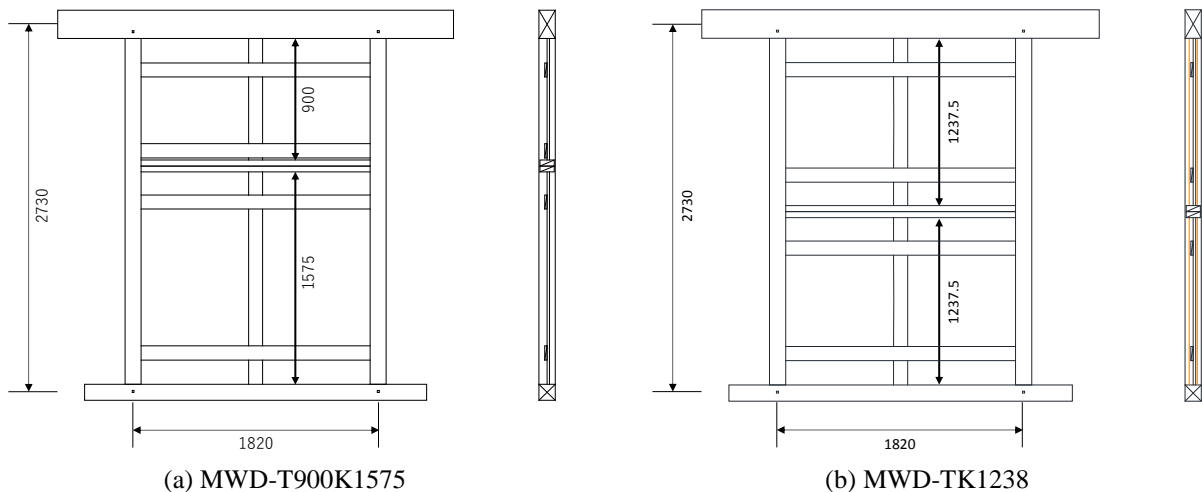


図1 試験体軸組図

MWD-T900K1575の製作過程は以下の通りである。2017年6月8日に試験体の軸組製作、6月27日に竹小舞を施工、6月29日に荒壁の片面、7月4日に裏返し、7月13日に両面中塗り仕上げを行った。軸組製作は鳥取県倉吉市の池田住研に、左官工事は鳥取県八頭町の山根左官に、それぞれ依頼した。2017年10月27日に実験を行った。

MWD-TK1238の製作過程は以下の通りである。2014年1月14日に軸組製作、1月22日に竹小舞を施工、1月23日に荒壁、1月24日に裏返し、2月12日に両面中塗り仕上げを行った。軸組製作は滋賀県大津市の宮内建築に、左官工事は京都市の丸浩工業に、それぞれ依頼した。2014年5月20日に実験を行った。

(2) 実験方法

電動アクチュエーター（THK社製 AE80、容量 100 kN、ストローク 800 mm）を用いた繰り返し面内せん断加力実験とした。繰り返しの目標変形は、桁部の水平変位を試験体の高さ $H = 2730$ mm で除した見かけの変形角 γ 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 19.24 kN の鉛直荷重 W 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、鴨居・窓台の柱からの抜け、ならびに、柱頭・柱脚と鴨居上、窓台下で柱軸方向ひずみを計測した。図 2 に、MWD-T900K1575 での計測状況を示す。また、写真 1 に MWD-T900K1575 の設置状況を示す。

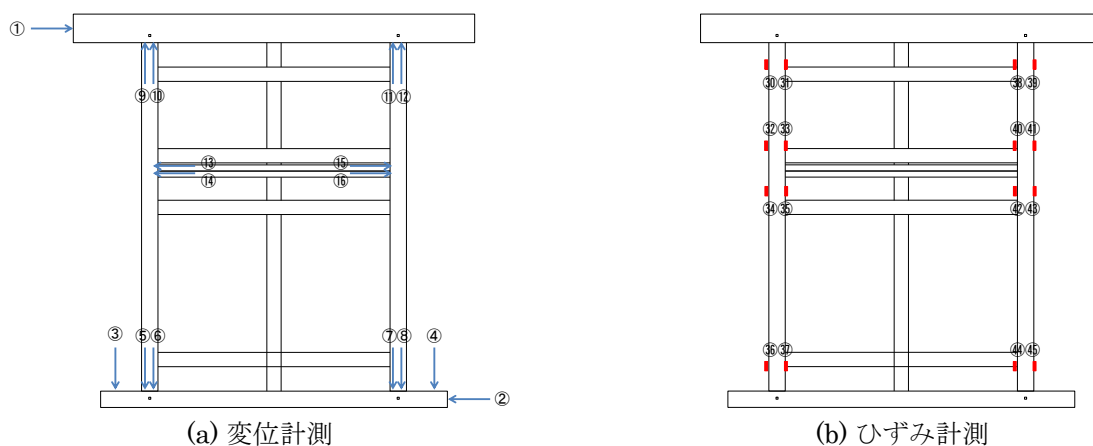


図 2 MWD-T900K1575 の計測

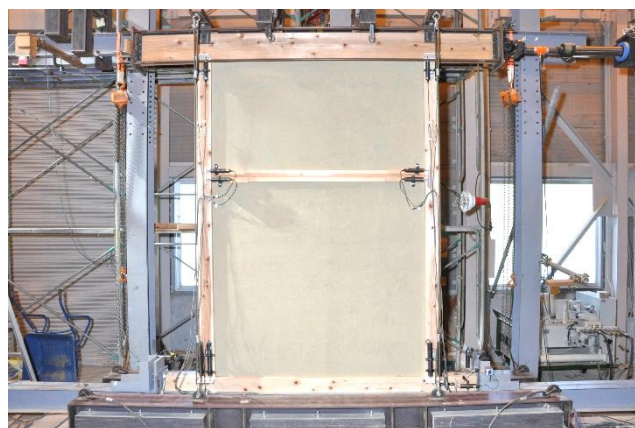


写真 1 MWD-T900K1575 の設置

(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 2730 mm ($= H$) で除した見かけの変形角 γ 、縦軸は、計測荷重から鋼製おもりによる $P\Delta$ 効果の影響を除いた復元力 ($=$ 計測荷重 $+ W \times \tan \gamma$) である。図 3 の復元力特性の第 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。同じ変形を 3 回ずつ繰り返したので、骨格曲線も 3 本である。

b) 損傷状況

MWD-T900K1575 と MWD-TK1238 の実験途中の損傷の様子を写真 2、写真 3 に示す。2 つの試験体では、小壁の縦横比が異なるため、損傷の進展が異なる。

MWD-T900K1575 の損傷状況は以下の通りである。1/60 rad で腰壁中央に小さくせん断ひび割れが生じた。1/45 rad で腰壁縦貫に沿った縦ひび割れと柱脚隅角部のひび割れが生じた。ここまで、垂れ壁に目立った損傷は見られない。2 回目の 1/45 rad 変形で、腰壁の横貫に沿って縦方向のひび割れが生じた。これは試験体製作時の乾燥中に生じたものである。1/30 rad で最大耐力 (約 13 kN) となり、2P 全面壁に比べて最大耐力の大きさは同程度 θ だが変形性能が向上することがわかる。腰壁中央でのせん断ひび割れが進み、垂れ壁は左右下隅角部に少しひび割れが生じた。1/20 rad で、腰壁下貫上のせん断ひび割れ部が落下し、垂

れ壁にも貫に沿ってひび割れが多数見られた。1/10 rad で、腰壁の前面・背面で下部の剥落が多く見られた。垂れ壁のせん断破壊は腰壁ほどではなく、実験後の解体時でも壁土の除去に手間取った。

MWD-TK1238 の損傷状況は以下の通りである。1/90 rad で、小壁隅角部の壁土の圧壊が見え始める。1/60 rad を超えると、小壁と柱の曲げ変形の間隙が目立ち始め、一方の柱が小壁に押されて曲がっている様子がわかる。1/30 rad ~ 1/20 rad の変形で鴨居・窓台が 1 cm 以上抜けてくる。腰壁部分にひび割れが目立ち始める。垂れ壁隅角部の圧壊が目立つ。1/20 rad 時に、左の柱脚が損傷して抜けた（実験後の解体時に柱脚ほぞの折損を確認した）。このとき、最大耐力は 14.9 kN である。最大耐力は 2P 全面壁の平均 θ より大きく、変形は約 3 倍であり、耐力や変形性能が向上することがわかる。1/15 rad の 1 回目に右柱脚が 8 mm ほど抜けてきた。左柱脚の抜けは約 45 mm まで大きくなった。腰壁のひび割れはさらに進展し、2 回目の 1/15 rad 加力中に、垂れ壁部にもひび割れが発生した。1/10 rad の 1 回目には、垂れ壁のひび割れも進展し、裏側で少し剥落がみられた。腰壁の方が損傷が大きく、実験終盤には、表側でも剥落が発生した。

両試験体で最大耐力時の変形が 2P 全面壁に比べて 2~3 倍に増大した理由について、全面壁では柱の曲げ変形の影響がほとんどないのに対して本実験の 2 試験体では柱の曲げ変形の影響があること、ならびに、後述の設計用復元力算定法で用いる土壁の縦横比が、2P 全面壁に対して本実験の 2 試験体では変化するため破壊モードが変わることが考えられる。

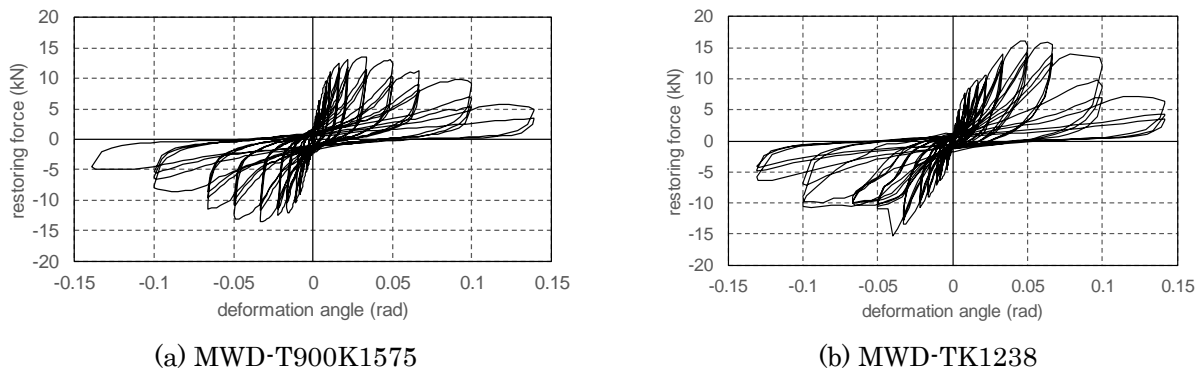


図 3 荷重変形関係

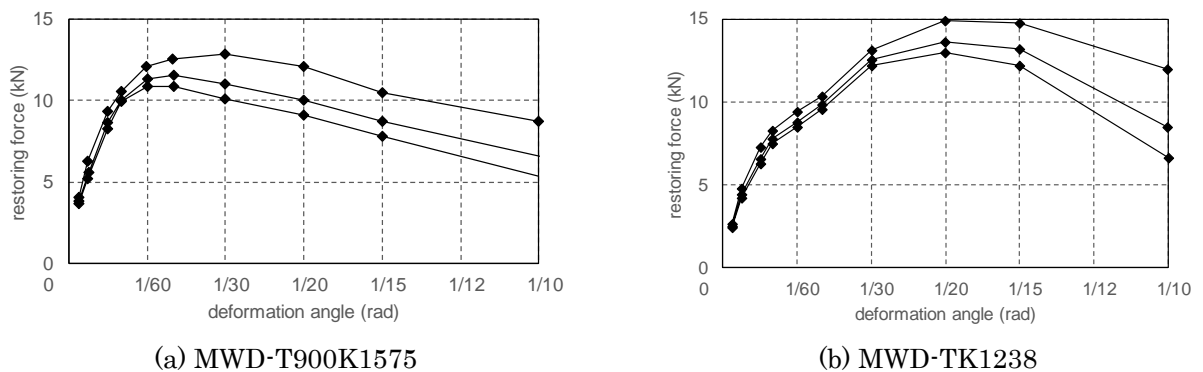
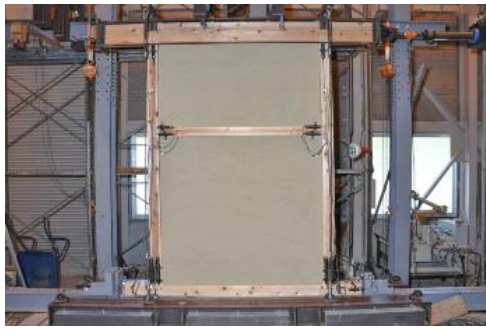


図 4 骨格曲線

3. 設計用復元力との比較

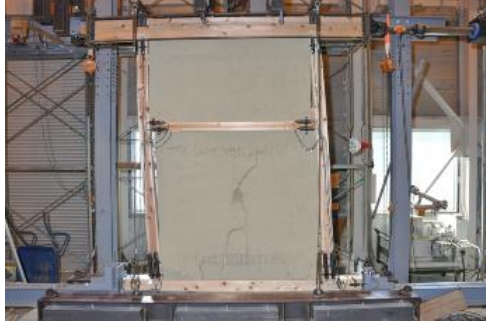
垂れ壁と腰壁のついた木造軸組の復元力特性の算定では、それぞれの負担割合などを正確に予測することは困難である。(1)式⁴⁾を使って、表2の壁土せん断応力度 (τ_s 、 τ_B) から垂れ壁部分と腰壁部分の負担せん断力 Q_{w1} 、 Q_{w2} を算定し、図5のように、垂れ壁付木造軸組のせん断力 Q_1 と腰壁付木造軸組のせん断力 Q_2 の和として簡略計算を行った。ここで、 τ_s 、 τ_B はそれぞれ、2P 全面壁及び 1P 全面壁の水平断面積あたりの設計用せん断応力度⁴⁾である。 Q_1 と Q_2 をそれぞれ算定する際には、文献7)で解説されている方法により、(2)式で得られる柱の曲げ変形 γ_c による構面全体の変形増大を考慮して、復元力を線形補間した。(2)式で、 γ_w は小壁のせん断変形角、 Q_w は γ_w 毎に(1)式で得られる小壁のせん断力、 H は試験体高さ、 h は小壁高さ (図6の



(a) 1/120 rad



(b) 1/45 rad



(c) 1/20 rad



(d) 1/10 rad

写真2 MWD-T900K1575 損傷状況



(a) 1/120 rad



(b) 1/45 rad



(c) 1/20 rad



(d) 1/10 rad

写真3 MWD-TK1238 損傷状況

h_1 または h_2)であり、 E および I はそれぞれ、柱の曲げヤング係数、柱の断面2次モーメントである。柱の曲げヤング係数は、実験後の解体材で曲げ試験を行って平均値を算定した。柱の曲げ変形 γ_c を考慮する際、実験時の鴨居及び窓台の柱からの抜け量に応じて、曲げ抵抗する柱（有効柱）の本数 c を1本から2本の間で調整した。すなわち、抜け量が10 mm以下と小さい、変形角が1/480 radから1/120 radまでは有効柱2本（ $c = 2$ ）、抜け量が10 mmを超えてくる1/30 rad以上の変形角では有効柱1本（ $c = 1$ ）となるようにした。1/120～1/30 radでは、実験時に計測した柱材軸方向のひずみ値から得られる柱の曲げモーメントの値も参考にしながら、小壁の変形角 γ_w と γ_1 、 γ_2 の関係が単調増加となるように、 $c = 1.8$ 、 1.5 、 1.3 とした。各試験体について、図6に示した算定に必要な各寸法等を表1に示す。木造軸組のせん断力 Q_h は、表2に示す長ほぞ仕口のモーメント M を用いて、図7の考え方で算定した。表2の M の値は文献7)で示されている値である。

$$Q_w = \text{Min}\{Q_{ws}, Q_{wb}\}$$

$$Q_{ws} = \tau_s t_w L_w \quad (1)$$

$$Q_{wb} = 3.25 \tau_B t_w L_w \text{Min}\left(\frac{H_w}{L_w}, \frac{L_w}{H_w}\right)$$

$$\gamma = \gamma_c + \gamma_w = \frac{h(H-h)^2}{3cEIH} Q_w + \gamma_w \quad (2)$$

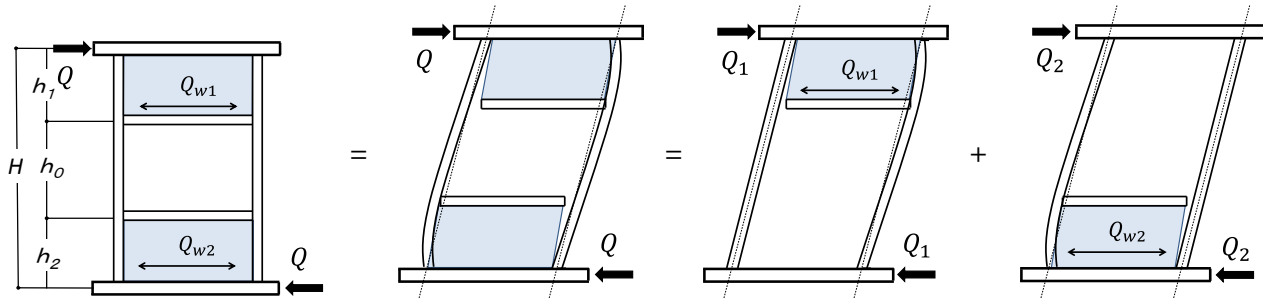


図5 垂れ壁と腰壁がった木造軸組の復元力算定の考え方（軸組のせん断力は別途加算）

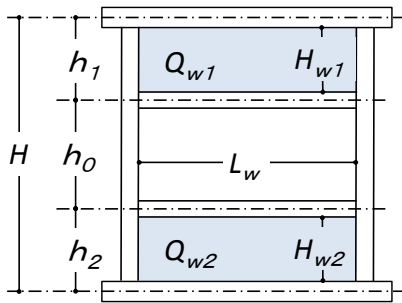


図6 垂れ壁と腰壁のついた木造軸組の寸法

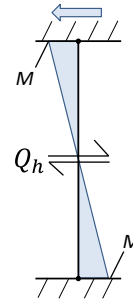


図7 長ぼぞ仕口モーメントMによるせん断力Qh

表1 設計用復元力算定に関わる寸法等

試験体	h_0 (mm)	h_1 (mm)	h_2 (mm)	H_{w1} (mm)	H_{w2} (mm)	L_w (mm)	E (GPa)	I (10^6 mm^4)
MWD-T900K1575	45	1027.5	1657.5	900	1575	1700	7.101	17.28
MWD-TK1238	45	1365	1320	1237.5	1237.5	1700	7.466	

表2 長ぼぞ仕口モーメントMと壁土せん断応力度 τ_s 、 τ_B

γ (rad)	1/480	1/240	1/120	1/90	1/60	1/45	1/30	1/20	1/15	1/10
M (kNm)	0.25	0.45	0.70	0.90	1.10	1.30	1.45	1.50	1.50	1.50
τ_s (kN/m ²)	30	54	86	96	98	93	84	72	58	34
τ_B (kN/m ²)	15	28	48	60	70	68	65	60	52	32

表3、表4に算定結果を示す。表3、表4で「変形角」は、計算対象に応じて、小壁の変形角 γ_w あるいは柱の曲げ変形を含んだ全体の変形角 γ のいずれかである。添え字の1、2はそれぞれ垂れ壁、腰壁での算定に対応する。 γ_1 は、垂れ壁の変形角 γ_{w1} での垂れ壁のせん断力 Q_{w1} に応じて(2)式で得られる垂れ壁付木造軸組の変形角であり γ_{w1} より大きい。 γ_2 は同様に得られる腰壁付木造軸組の変形角である。 Q_1 、 Q_2 は、各変形角 γ で線形補間した値である。表3に下線で示すように、MWD-T900K1575で垂れ壁の変形角 $\gamma_w = 1/120$ rad以下の範囲で Q_{w1} が Q_{wb1} で決定される他は、小壁の復元力 Q_w は Q_{ws} で決定される算定結果となった。

表 3 MWD-T900K1575 の諸量算定結果

変形角 (rad)	1/480	1/240	1/120	1/90	1/60	1/45	1/30	1/20	1/15	1/10
Q_{ws} (kN)	3.060	5.508	8.772	9.792	9.996	9.486	8.568	7.344	5.916	3.468
Q_{wb1} (kN)	2.633	4.914	8.424	10.530	12.285	11.934	11.408	10.530	9.126	5.616
Q_{wb2} (kN)	4.607	8.600	14.742	18.428	21.499	20.885	19.963	18.428	15.971	9.828
Q_{w1} (kN)	<u>2.633</u>	<u>4.914</u>	<u>8.424</u>	9.792	9.996	9.486	8.568	7.344	5.916	3.468
γ_1 (rad)	1/167	3/262	1/48	25/918	13/357	31/707	35/596	61/850	73/867	44/399
Q_{w2} (kN)	3.060	5.508	8.772	9.792	9.996	9.486	8.568	7.344	5.916	3.468
γ_2 (rad)	2/401	2/213	1/60	3/140	17/580	11/305	6/121	53/829	31/398	81/760
Q_1 (kN)	0.345	0.690	1.360	1.797	2.585	3.283	3.736	3.427	2.944	1.668
Q_2 (kN)	0.776	1.553	2.987	3.813	5.327	5.958	5.885	5.181	4.289	2.446
Q (kN)	1.121	2.242	4.347	5.610	7.913	9.241	9.621	8.608	7.233	4.115
Q_h (kN)	0.366	0.659	1.026	1.319	1.612	1.905	2.125	2.198	2.198	2.198
$Q + Q_h$ (kN)	1.488	2.902	5.373	6.929	9.525	11.146	11.746	10.806	9.431	6.313

表 4 MWD-TK1238 の諸量算定結果

変形角 (rad)	1/480	1/240	1/120	1/90	1/60	1/45	1/30	1/20	1/15	1/10
Q_{ws} (kN)	3.060	5.508	8.772	9.792	9.996	9.486	8.568	7.344	5.916	3.468
Q_{wb1} (kN)	3.620	6.757	11.583	14.479	16.892	16.409	15.685	14.479	12.548	7.722
Q_{wb2} (kN)	3.620	6.757	11.583	14.479	16.892	16.409	15.685	14.479	12.548	7.722
Q_{w1} (kN)	3.060	5.508	8.772	9.792	9.996	9.486	8.568	7.344	5.916	3.468
γ_1 (rad)	5/867	8/741	16/847	16/661	7/214	15/377	15/278	67/990	25/309	61/563
Q_{w2} (kN)	3.060	5.508	8.772	9.792	9.996	9.486	8.568	7.344	5.916	3.468
γ_2 (rad)	1/170	7/636	1/52	13/528	19/572	14/347	29/531	26/381	55/676	29/267
Q_1 (kN)	0.553	1.106	2.155	2.818	3.938	4.706	4.975	4.412	3.717	2.106
Q_2 (kN)	0.524	1.048	2.046	2.683	3.750	4.515	4.829	4.286	3.619	2.051
Q (kN)	1.077	2.153	4.200	5.501	7.688	9.221	9.805	8.698	7.336	4.157
Q_h (kN)	0.366	0.659	1.026	1.319	1.612	1.905	2.125	2.198	2.198	2.198
$Q + Q_h$ (kN)	1.443	2.813	5.226	6.820	9.299	11.126	11.929	10.896	9.534	6.355

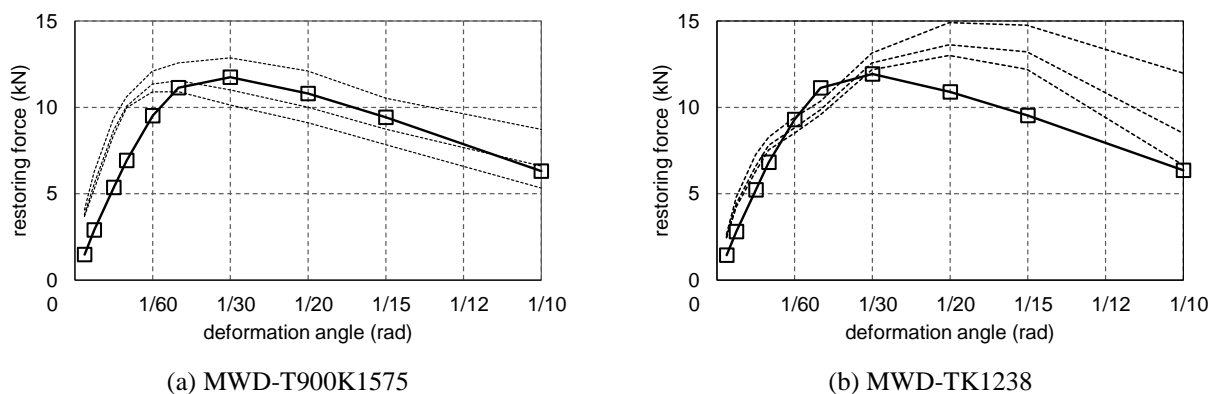


図8 設計用復元力特性との比較 (実線：計算値、点線：実験結果)

表 3、表 4 で得られた設計用復元力 ($Q + Q_h$) を実験結果の骨格曲線 (図 4) に重ねて、図 8 に示す。MWD-T900K1575 では、1/60 rad より小さい変形の範囲で計算値が実験結果を最大で約 60 % 下回り、1/60 rad より大きい変形の範囲では、3 回繰り返しのうち 2 回目の骨格曲線に近い値となった。3 回繰り返しの骨格曲線の平均と比較すると、10 % 未満の差である。また、計算値の最大復元力は 1/30 rad 時に 11.7 kN であり、実験結果のうち 1 回目の加力時の最大荷重 (1/30 rad 時に 12.9 kN) を約 10 % 下回る。MWD-TK1238 では、1/60 rad より小さい変形の範囲で計算値が実験結果を最大で 40 % 超下回り、1/30 rad より大きい変形では実験結果を 20~30 % 下回る結果となった。実験時の最大復元力は 1/20 rad 時に 14.9 kN であるが、計算値では 1/30 rad 時に 11.9 kN である。設計用であることを考えると、安全側の算定結果であると言えるが、特に大変形領域での差が大きいため、表 2 の値を見直す必要があるとも言える。

4. まとめ

2P 全面壁の耐力と変形性能の向上、ならびに大変形時の復元力低下を抑えるための 1 つの方法として、垂れ壁と腰壁の間隔を 0 とした「無開口土壁」の実大実験を行った。垂れ壁腰壁の寸法により実験途中の損傷の様子は異なるものの、全面壁と比べて、最大耐力は同程度だがその時の変形が大きいこと、最大耐力経験後の復元力の低下も緩やかになることが明らかになった。理論的に略算で求めた設計用復元力特性は、実験結果と比べて、安全側に得られた。

謝辞： 本実験の一部は平成 28 年度公益財団法人松井角平記念財団の研究助成による。実験の実施、データ整理に当たっては、鳥取環境大学環境情報学部上杉周平君、長尾隼君および公立鳥取環境大学環境学部大串来華君、古田祐吾君、山賀天樹君ほか学生諸君の貢献が大きい。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 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
- 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) 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会梗概集DVD, 構造III, pp. 279-280, 2017年7月
- 4) 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, pp. 103-110, 2017年7月
- 5) 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, pp.95-102, 2017年7月
- 6) Hiroyuki Nakaji, Masami Gotou, Hiro Kawahara, Yoshiyuki Suzuki : EVALUATION OF RESTORING FORCE CHARACTERISTICS OF MUD-WALLS CONSIDERING EFFECT OF WALL-HEIGHT FOR SEISMIC STRUCTURAL DESIGN. 13th World Conference on Timber Engineering, August 2014
- 7) 「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