左官事業所が異なり仕様に違いがある京土壁の繰り返し載荷実験

CYCLIC-LOADING TESTS OF TRADITIONAL MUD WALLS CONSTRUCTED BY THREE PLASTERERS IN KYOTO

村本 真 — * 1 平田 良 — * 2
午來嵩頭 — * 3 森迫清貴 — * 4

Makoto MURAMOTO — * 1 Ryo HIRATA — * 2
Takaaki GORAI — * 3 Kiyotaka MORISAKO — * 4

キーワード：
土壁、左官技法、繰り返し載荷実験、復元力特性、壁倍率

Keywords:
Mud wall, Plastering method, Cyclic-loading test, Hysteresis characteristics, Coefficient of the effective wall length

This paper presents the results of lateral shear performances and hysteresis characteristics of the mud walls that have been made by three plasterers in Kyoto. The specifications of the mud walls and the mixing preparation of materials are different in those ones, but the material of mud before mixing is the same. In the results of the test, envelope curves were almost the same until maximum strength. The coefficient of the effective wall length is about 1.8. In this tests, strength of the wall was reduced after tearing of mud wall.

1. はじめに

土壁の地域性を調べ評価する研究が多く報告されている。三芳・大橋ら¹⁾、村上ら²⁾は地域性に着目した実験結果を報告している。筆者らの一部も京土壁等^{3)~7)}の耐力評価を行ってきた。これらの報告により地域毎の仕様の違いや土壁の耐震性能が明らかとなってきた。また、佐藤ら^{8), 9)}は京土の材料特性を化学分析によって調べており「さび」の発現などの研究もあり、耐震性能だけでなく左官技法や土壁の風情にも言及されている。

一方、設計者からは土壁の耐震性能に期待が寄せられているが、施工者による技能の差や事業所による仕様の違いが土壁の耐震性能に不確定さを与えているのではないかとされている。土壁施工者である左官事業所が代々引き継いでいる施工方法や仕様は同じ地域であっても必ずしも同じとは限らないようである。以前に筆者らの一部が行った京土壁の実験^{3), 4)}では、比較的薄い塗り厚(55mm)で壁倍率1.5~2.0程度が得られており、そこで施工した事業所は本研究でも施工しているが、今回と前回の試験体の小舞寸法は多少異なっている。仕様の違いが構造性能に与える影響については、岡本・村上ら¹⁰⁾が部分壁体実験で調べている。

本研究では、3つの左官事業所による京土壁の繰り返し載荷実験の結果を検討するが、各事業所の仕様や壁土調合の優劣については議論しない。仕様の多少の異なりを含めて、京土壁の性能を評価することを目的として考察を行う。

筆者らの一部は、文献3)で「京土壁」を次のように考えた。本研究ではこれを引き継ぎ、

- (1) 京都周辺の土(伏見深草土、上塗りには聚楽土など)を使う。
- (2) 一回の塗り厚が比較的薄く、作業性を考慮して土とスサを混ぜた後、湿潤状態で寝かした壁土を使う。

(3) 何層かの塗りで製作されるが、総壁厚は比較的薄い。

ものを京土壁とする。そのほかに文献3)で示したようにチリ廻りの塗りや布連打ちの工程が施されることもある。

2. 京土壁の繰り返し載荷実験

2.1 試験体

試験体は半間壁(以下1Pと呼ぶ)を1体、一間壁(以下2Pと呼ぶ)を3体用意して、それぞれ3事業所が製作する。以降、A社、B社、C社と呼ぶ。試験体は(A,B,C)-(1P,2P)試験体番号(1,2,3)で表して区別する。

図1に軸組の基本寸法を示す。軸組の柱は105mm角のヒノキ、土台は105mm角のヒノキ、桁は105×210mmのベイマツである。柱には背割りが柱内側に入っている。貫は15×105mmのスギの差し込み貫が3段で、柱に釘2本で留めている。柱-土台と柱-桁仕口は長柄込み栓打ちで込み栓は15mm角のカシである。込み栓の中心は、土台上端(桁下端)から50mm離れた位置にある。竹小舞、荒壁と中塗りの仕様は各社により若干異なる。最終的な塗り厚は55mm程度を目標として各社で統一した。各社ともチリ廻りについてひげこや布連は用いていない。C社のみチリ廻り塗りを行っている。

貫伏せは、A社とC社は漆喰を塗り寒冷紗を敷き、B社はプラスターを塗り寒冷紗を敷き塗り込んでいる。ただし、A社のみ貫伏せは縦貫のみである。

試験体は2期に分けて製作し実験している。その作業工程を表1に示す。作業は全て京都工芸繊維大学の地階構造実験室で実施した。表2に試験体の小舞寸法、壁厚、実験直前の重量を示す。竹小舞の目はB社が他社より細かいことが特徴である。

壁土は京都深草産で各社で同じものを使用し、藁スサの量などの

本稿は文献14)を加筆、修正したものである。

¹⁾ 京都工芸繊維大学デザイン・建築学系 講師・博士(学術)
(〒606-8585 京都府京都市左京区松ヶ崎橋上町)

²⁾ 西宮市役所 学士(工学)

³⁾ 京都工芸繊維大学大学院工芸科学研究科建築学専攻 大学院生・学士(工学)

⁴⁾ 京都工芸繊維大学 理事・副学長・博士(工学)

¹⁾ Lecturer, Kyoto Institute of Technology, Ph.D.

²⁾ Nishinomiya City Government Office, B. Eng.

³⁾ Graduate Student, Kyoto Institute of Technology, B. Eng.

⁴⁾ Trustee, Vice President, Kyoto Institute of Technology, Dr. Eng.

調査結果が異なる。壁土の調合が異なるため、各作業工程で文献11)に倣って円柱(125φ×250mm)の圧縮強度試験体を作成する。壁土の配合を表3に示し、圧縮試験により得た強度特性の平均値を表4に示す。A社は斑直しを行わないため、中塗りに1週間寝かせた土と寝かせてない土の2種類を用いている。表3に示した配合で、B社は荒壁土と中塗り土ともに他社の4、5倍程度のスサを混入している。これらは寝かしを経てミキサー練りで作られ、表2と表4からわかるように密度も小さく、最終的な土壁も軽く仕上がっている。

2.2 载荷と計測の方法

図2に载荷・計測装置と試験体の設置状況を示し、全体の様子を写真1に示す。文献6)、7)と同じ実験装置による载荷式とし、19.6kNの鉛直荷重を桁上から鋼製錘として吊り下げて作用させた。ストローク400mmのスクリュージャッキにより加力し、土台の浮き上がりを防止するように反力枠に固定した。水平変位を試験体の高さで除した見かけのせん断変形角で制御する。1/480、1/240、1/120、1/90、1/60、1/45、1/30radまで正負2回繰り返し载荷の後、正側で1/15radの2回繰り返しを行い、1/10radまでの一方向载荷とした。繰り返し履歴は、文献12)では原則3回となっているが、包絡曲線の取得に重点を置き、また後で示す画像解析による計測時間を短くする必要があるため、2回とした。ただし、最終加力の前に柱の損傷が大きくなり、浮き上がってしまった場合、および2P試験体の3体目は土壁の補修を予定しているため1/15radで実験を終了した。

変位の計測は、文献12)と同様に柱の浮き上がり変位をV1、V2で、桁の水平変位をH1、H2で土台の水平変位をH3で計測した。また、図2に示す载荷装置東側下部の隅2箇所の土の浮き上がり挙動をレーザー変位計L1とL2で計測した。西側は画像解析(VENUS3D)による計測とした。画像解析による計測位置を図3に示す。軸組の接合部や貫の位置、壁土の隅角部を中心にマーカーを配置している。

計測した荷重は鉛直荷重による $P\Delta$ 効果の影響を次式

$$P' = P + W \tan \theta \quad (1)$$

で除去した値で整理している。ここで、 P' : $P\Delta$ 効果を除いた荷重(以下これを荷重と呼ぶ)、 P : 実験時の計測荷重、 W : 鋼製錘の重量、 θ : 見かけのせん断変形角である。

表1 試験体の作業工程

作業工程	実施日(2014年6月～2015年1月)		
	A社	B社	C社
軸組設置	6月28日	10月17日	10月17日
小舞掻き	7月5日	10月23日	10月23日
荒壁塗り	7月12日	10月27日	10月27日
裏返し塗り	7月26日	10月30日	11月7日
貫伏せ	8月2日*	11月15日	11月15日
斑直し	—	11月21日	11月21日
共チリ廻り	—	—	11月28日
中塗り	8月2日	11月28日	12月1日
実験	9月30日～ 10月3日	12月24日～ 1月19日、 1月28日	1月22日～ 1月26日、 1月29日

*縦貫のみの施工である。

表2 試験体の種類と実測の平均値

試験体	竹小舞 [mm]	荒壁厚 [mm]	中塗り厚 [mm]	総塗り厚 [mm]	重量 [kN]
A-1P	えつり竹幅30～35 小舞竹幅15～20	41.1	22.4	63.5	2.34
A-2P	小舞間隔31.0 下端浮き35.3	35.3	24.3	59.6	4.40
B-1P	えつり竹幅30～35 小舞竹幅15～20	43.8	10.5	54.3	1.96
B-2P	小舞間隔24.6 下端浮き8.9	38.8	16.2	54.9	3.59
C-1P	えつり竹幅25～30 小舞竹幅10～20	40.5	14.0	54.4	2.34
C-2P	小舞間隔30.0 下端浮き12.3	36.1	22.3	58.5	4.36

表3 壁土の配合

事業所	土の分類	土 [t]	スサ [kg]	スサ長さ [mm]	砂 [t]	スランプ値 [mm]	水合わせ 期間
A社	荒壁土	100	1.24	120-150	—	194	3ヶ月
	中塗り土	100	1.00	12-20	14.2	95 137	1週間 無し
B社	荒壁土	100	9.34	120	—	80	4ヶ月
	斑直し土 中塗り土	100	7.71	20	4 0	189 245	2ヶ月
C社	荒壁土	100	1.70	100-150	—	54	4ヶ月
	斑直し土 中塗り土	100	1.83	60	26.6	183 193	1週間

表4 壁土の強度特性

事業所	土の分類	ヤング係数 [N/mm ²]	圧縮強度 [N/mm ²]	密度 [g/cm ³]	
A社	荒壁土	31.8	0.34	1.37	
	中塗り土	86.2 86.6	0.68 0.92	1.41 1.45	水あわせ1週間 無し
B社	荒壁土	36.1	0.52	1.10	
	斑直し土 中塗り土	31.0 34.1	0.59 0.57	1.36 1.11	
C社	荒壁土	117.7	0.76	1.64	
	斑直し土 中塗り土	49.7 65.8	0.87 0.94	1.54 1.56	

3. 実験結果と考察

3.1 荷重-見かけのせん断変形角関係

図4と図5に全ての試験体の荷重-見かけのせん断変形角関係を示す。ここではC社が以前に施工した京土壁の実験結果^{3), 4)}と比較しながら考察する。文献3)の試験体6と7が1P試験体、文献4)の試験体1が2P試験体である。文献3)の試験体6は布連打ちされておらず中塗り土は寝かせず、試験体7はひげこを打ち中塗り土は1週間寝かせたものである。軸組は桁が105×240mm、貫位置が多少異なることを除き本実験と同様である。また、文献4)の試験体1は文献3)の試験体7と同じ仕様である。参照試験体は、最も伝統的な仕様であるが、今回は町家タイプの壁を想定し簡略化した仕様と

図4 1P試験体の荷重-見かけのせん断変形角関係

図5 2P試験体の荷重-見かけのせん断変形角関係

写真2 1P試験体最大変形時のひび割れ状況

写真3 2P試験体最大変形時のひび割れ状況

3.3 壁土挙動と土壁耐力の関係

ここでは2P試験体について壁土挙動と土壁耐力の関係を詳細に述べる。図6にA社、図7にB社、図8にC社について、荷重と(a)隅角部の壁土の面外変位(浮き上がり)の関係、(b)桁下位置で

の壁土の鉛直変位(下がり量)の関係を示した。それぞれの計測点で最大の変位を生じたものを代表例として描いている。面外変位は図2の断面図で試験体中央から左側に向かって正、鉛直変位は桁から土台に向かって正の向きとした。計測点の位置と表記(PX)は図

3 に示した通りである。

これらの結果から、荷重が低下する原因は、(a) より壁土の面外変位の増加、(b) より壁土構面の竹小舞下地が軸組から離れ、軸組との間に隙間ができることであるとわかる。A 社と C 社では、(a) で壁土の面外変位が 25mm を超えてくると耐力低下している。壁土の配合は表 3 のように異なり、C 社のように中塗り土の砂の量が多いと、壁土のはがれが起きて土壁の面外変形が大きくなり耐力低下に繋がっている。B 社のように大量のスサの混入は土壁のひび割れを生じさせるが壁土の面外変形を抑制する効果がある可能性がある。壁土挙動の計測では、文献 4) で行ったレーザー変位計による浮き上がり計測 (図 3 の P3 と P8 のみの計測) は、特定位置の情報しか得ることができず、加えてその位置が必ずしも特徴的な面外変形を生じるかどうか分からないことが欠点であった。今回はそれより多くの位置の壁土の 3 次元挙動を計測することが可能となっている。

なお、1P 試験体については、文献 4) に記したように、2P 試験体より面外変位の増加の発生は遅く、荷重の低下も小さい。

3.4 包絡曲線と壁倍率

図 9 にそれぞれの試験体の包絡曲線を比較した。文献 3) と 4) の試験体の包絡曲線も描いた。包絡曲線 1P 試験体はそれぞれの実験結果から、2P 試験体は 3 体の平均曲線を求めて、なめらかにした

表 5 壁倍率と破壊状況

試験体	初期剛性 K [kN/rad]	最大耐力 P_{max} [kN]	構造特性 係数 D_s	降伏耐力 P_y [kN]	終局耐力 $P_u \times 0.2 / D_s$ [kN]	$2/3 P_{max}$ [kN]	$P_{1/120}$ [kN]	相当 壁倍率	壁倍率 [#]	主な破壊状況
A-1P	616.6	6.75	0.29	4.66	4.34	4.50	4.21 *	2.36	—	隅角部壁土の圧壊。横貫回りでひび割れ。裏面で壁土の浮き上がり。
1P B-1P	508.1	8.12	0.38	5.90	3.83 *	5.41	4.20	2.15	—	隅角部壁土の圧壊。横貫回りでひび割れ。
C-1P	838.7	8.10	0.23	4.40 *	6.26	5.40	5.45	2.47	—	隅角部壁土の圧壊。横貫回りでひび割れ。裏面で壁土の浮き上がり。
A-2P1	1812.1	16.67	0.27	9.38 *	11.25	11.12	12.70	2.63	—	隅角部の壁土の浮き上がりとし小舞の座屈あり。地貫下にひび割れ。桁下で壁土の下がりがある。柱ほぞ穴の下が割れる。
A-2P2	1581.0	13.24	0.31	10.34	8.16 *	8.83	11.58	2.29	1.69	
A-2P3	1571.5	16.44	0.43	10.72	7.13 *	10.96	12.13	2.00	—	
B-2P1	1642.0	17.28	0.35	11.55	8.84 *	11.52	12.60	2.48	—	縦貫位置、横貫位置でひび割れる。桁下で壁土の下がりとし小舞の座屈あり。柱ほぞ穴の下が割れる。
B-2P2	1714.3	17.80	0.27	12.40	12.24	11.87 *	13.48	3.33	2.08	
B-2P3	1523.1	17.71	0.31	12.40	10.52 *	11.80	12.49	2.95	—	
C-2P1	1873.5	15.35	0.33	7.71 *	8.05	10.23	11.44	2.16	—	隅角部の壁土の浮き上がりが大きい。載荷点側桁下でも壁土の浮き上がりがある。小舞の座屈あり。桁下で壁土の下がりがある。柱ほぞ穴の下が割れる。
C-2P2	2323.2	15.77	0.29	9.39 *	9.69	10.51	12.75	2.63	1.60	
C-2P3	2586.1	12.95	0.33	7.89	6.79 *	8.63	12.70	1.90	—	

$P_{1/120}$ は 1/120rad 時の耐力、* は試験体で短期基準せん断耐力を決定した値、壁倍率[#] は $\alpha=0.75$ として求めた。土壁裏面は図 2 断面図の左側。

ものである。

1P 試験体では、事業所によらず同様の包絡曲線を得ていることがわかる。文献 3) の試験体 7 は今回と同様の包絡曲線である。2P 試験体では負側載荷時はほとんど同様の曲線で、正側載荷時は最大耐力に違いがあり、B 社は耐力低下が小さい。これに対し、文献 4) の試験体 1 の耐力低下が急である。試験体 1 では布連打ちがあることが本実験と異なる。壁土を軸組に拘束する効果とその部分の破壊が復元力に影響している可能性がある。図 9 で 1P 試験体ではあまり耐力低下していないが、2P 試験体は耐力低下が最大耐力後、1/15rad までは 5kN 程度生じることがわかる。2P 試験体は事業所の仕様の違いで最大耐力に 2 ～ 4kN の差がでている。これらの違いから、大変形領域までを考えると京土壁の設計用復元力特性は壁幅で異なるものとすべきである。

表 5 は各試験体の包絡曲線から求めた壁倍率等の値である。壁倍率は、考えられる耐力低減の要因を評価する係数である低減係数 α を文献 13) を参考に、事後的な水がかりによる耐久性、左官技能による施工性、建物重量への影響を考慮して 0.75 とした。なお、表 5 に示した値において複数試験体ある場合には、それらのばらつき係数は 0.90 を下回っていなかった。ここで相当壁倍率は 1 体毎に求めた値である。壁倍率で評価すると、3 事業所で仕様に違いがあるが、1P 試験体では 3 社の試験体でばらつき係数と低減係数を 0.75 で考慮すると 1.81 であった。2P 試験体では 3 社 9 体でばらつき係数と低減係数を 0.75 で考慮すると 1.82 であった。1P と 2P 試験体ともに壁倍率 1.5 以上ある。また、2P 試験体で、事業所毎に 3 体で壁倍率を求めても 1.5 を超えている。このとき B 社の壁倍率が大きい。なお、構造特性係数は 0.23 ～ 0.43 程度であるが、かなりばらつきがある。

4. まとめ

3 つの左官事業所が製作した京土壁の繰り返し載荷実験を行った結果をまとめると以下になる。

- (1) 復元力特性の包絡曲線は、事業所によらず、最大耐力まではおおむね同じような履歴を描く。ただし、その後の耐力低下、ひびわれの発生状況や最終状況には違いが見られる。
- (2) 最大耐力後の耐力低下の原因としては、壁土の面外変位（浮き上がり）と下地の軸組からのはずれにあることを壁土挙動の計測から確認した。面外変位が柱幅四分の一を超えると耐力低下する。
- (3) 半間壁の壁倍率は、3 事業所の 3 体で求めると低減係数を 0.75 として 1.81 であった。
- (4) 一間壁の壁倍率は、3 事業所の 9 体で求めると、低減係数を 0.75 として 1.82 であった。また、事業所毎にみた壁倍率は壁土の浮き上がりがあると小さく、浮きがないと大きい。
- (5) 構造特性係数は 0.23 ～ 0.43 まででとなりかなりばらつきがある。

軸組の接合部仕様の影響で柱脚が浮く試験体があったが、一連の実験後、接合部を金物で補強し、土壁を補修した実験では柱脚の浮きを押さえることができています。筆者らが実施した一連の京土壁実

験の結果から、事業所が引き継いできた仕様であれば壁倍率 1.5 を満足する京土壁とすることができると思われる。

謝辞

試験体は軸組を岩見工務店、左官をさくあん、奥田左官工業所、佐藤左官工業所の職人の方々に製作していただきました。実験は京都工芸繊維大学高度技術支援センター技術職員の小山清司、四方利和の両氏、于征博士（現 渋谷）、同大学院生の田邊雄太（現 日総建）、瀬戸尚晃（現 熊谷組）、林慶樹、小池岳明、学部学生の新井友香理（現 繁建築構造設計事務所）の諸氏にお世話になりました。また、本実験は京都左官協同組合（理事長 倉理一郎氏）から一部助成をいただき、同組合および関西木造住文化研究会（田村佳英、武田真理子の両氏）との連携で実施しました。ここに感謝して皆様にお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 三芳紀美子、大橋好光：土壁の強度に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-1、構造 III、pp.207-208、2002.8；その 2 実大面内せん断試験、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-1、構造 III、pp.409-410、2003.9；その 3 壁土圧縮試験、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-1、構造 III、pp.399-340、2004.8
- 2) 村上雅英、岡本滋史、鈴木 有、稲山正弘：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 部分壁体による要素試験法の提案—その 6 3 地域の仕様の違いが土壁の性能に与える影響—、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-1、構造 III、pp.405-416、2004.8
- 3) 佐藤ひろゆき、嶋瀬裕之、森迫清貴：京土壁の耐力評価のための繰返し載荷実験、構造工学論文集、Vol.54B、pp.157-164、2008.3
- 4) 森迫清貴、嶋瀬裕之、青野弘和、佐藤ひろゆき：京土壁の荷重変形関係モデルの検討、構造工学論文集、Vol.55B、pp.101-108、2009.3
- 5) 村本 真、小田憲史、西岡建雄：土佐漆喰壁の耐力評価のための繰返し載荷実験、構造工学論文集、Vol.57B、pp.343-348、2011.3
- 6) 寺西ゆう子、村石一明、青野弘和、森迫清貴：葦、萱（すすき）を小舞に用いた土壁の繰返し載荷実験、構造工学論文集、Vol.59B、pp.579-584、2013.3
- 7) 村石一明、田中邦明、森迫清貴：飛騨高山伝統構法土壁の繰返し載荷実験、構造工学論文集、Vol.60B、pp.357-362、2014.3
- 8) 小田原晶子、佐藤ひろゆき、杉江朋彦、森迫清貴、塩野剛司、北島佐紀人、仲井朝美、濱田泰以：複合材料としての京壁、日本複合材料学会誌、第 35 巻、第 1 号、pp.27-32、2009.1
- 9) 黒田孝二、佐藤ひろゆき、高井由佳、後藤彰彦：経年京壁の風情を醸す「さび」発現機構の解明—伝統技術にひそむ工学要素の展開研究—、科学・技術研究、第 3 巻、第 1 号、pp.69-72、2014.7
- 10) 岡本滋史、村上雅英、稲山正弘：仕様の相違が土壁の構造性能に及ぼす影響に関する実験的調査、日本建築学会構造系論文集、第 74 巻、第 641 号、pp.1275-1283、2009.7
- 11) 宇都宮直樹、山中 稔、松島 学：藁スサを混合した壁土の新しい供試体の提案、日本建築学会構造系論文集、第 76 巻、第 664 号、pp.1119-1124、2011.6
- 12) 日本住宅・木造技術センター：木造軸組工法住宅の許容応力度設計（2008 年版）、第 4 版、2008
- 13) 土塗壁等告示に係る技術解説書作成編集委員会編：土塗壁・面格子壁・落とし込み板壁の壁倍率に係る技術解説書、pp.112-113、日本住宅・木造技術センター、2004
- 14) 平田 良、午来嵩顕、村本 真、森迫清貴：製作する左官が異なる京土壁の繰返し載荷実験、日本建築学会近畿支部研究報告集・構造系、第 55 号、pp.305-308、2015.6

[2016 年 2 月 3 日原稿受理 2016 年 6 月 9 日採用決定]