

令和 2 年 6 月 18 日現在

機関番号：14303

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06642

研究課題名(和文) 土壁厚が薄く繊細な架構の性能評価と実験データベース構築による土壁の性能分析

研究課題名(英文) Structural Performance Evaluation of Wooden Structures with Thin Thickness Mud Walls and Statistical Analysis of Mud Walls by Using an Experimental Database

研究代表者

森迫 清貴 (Morisako, Kiyotaka)

京都工芸繊維大学・法人本部・学長

研究者番号：90127168

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、茶室・数寄屋建築にみられる土壁厚が薄く繊細な架構の耐震性能評価を目的とした、極めて壁厚が薄い土壁を有する架構モデルを文献調査および実測結果に基づき設定し、それらの構造性能を評価する繰り返し載荷実験を実施した。はじめに、土台を有する全面土壁の架構で、柱サイズ、壁厚、載荷錘の重量をパラメータとした土壁モデルの基本性能を調べた。次に、下地窓、垂れ壁、腰壁、踊り口を有する場合の土壁モデルの場合、下地窓の位置や大きさをパラメータとした土壁モデルおよび石場建てで全面土壁と下地窓を有する場合の性能を調べた。実験結果を基に、土壁データベースを更新し、極薄土壁の構造性能を簡易的に評価する指標を与えた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、茶室・数寄屋建築にみられる土壁厚が薄く繊細な架構を持つ耐震性能評価を目的として、実大試験体による繰り返し載荷実験を行った。これまでに土壁の性能を整理したデータベースを構築してきたが、土壁厚が薄い場合の実験報告がほとんどなく、それらの耐震性能を評価することが困難であった。土台を有する場合および石場建ての場合における極薄土壁、さらに、下地窓や踊り口がある場合、開口の大きさや位置が異なる場合についての性能を実験的に把握した。茶室・数寄屋建築で壁厚が薄い場合においても耐震性能を評価できる基礎資料を提供している。

研究成果の概要(英文)：In this study, we evaluated the structural performance of wooden frameworks with thin thickness mud walls in tea rooms and Sukiya buildings. Experimental full-scale models of wooden frameworks with an extremely thin mud wall based on literature surveys and actual measurement results of a tea house were designed. And we carried out cyclic loading tests to evaluate their structural performances. First, we investigated the basic performance of models in which the size of the column, the wall thickness, and the weight of the loading weight were used as parameters in wooden frameworks with an extremely thin mud wall and foundation member. And, we investigated the performance of models with openings including a lattice window(shitajimado) and a nijiriguch, models with different opening positions and sizes and specific techniques for unfixing column bases to foundation stones. Based on these experimental results, the structural performance database of mud walls was updated.

研究分野：建築構造

キーワード：極薄土壁 茶室・数寄屋建築 構造性能評価 データベース

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

## 1. 研究開始当初の背景

木造建築には歴史的に重要な多くの文化財建造物がある。文化財の価値を失わないよう保存・活用するためには、耐震診断と補強計画で、信頼性の高い評価情報が必要である。しかし、これまでの耐震性能評価では、実験情報が必ずしも十分でなく、安全率を十分にみるか、鋼製治具を用いた耐震補強を検討せざるを得ない状況である。これは、多くの建造物に土壁が耐震要素として用いられており、文化財特有の仕様である土壁の耐震性能が未解明なことに起因している。文化財ではない近代和風建築の構造性能評価においても同様の懸念がある。特に、本研究で対象とする茶室・数寄屋建築では、壁厚が薄い土壁が用いられることがある。この土壁の構造性能を評価して、保存・再生の対象となる建物全体の性能を評価すべきであるが、その基礎資料となる実験報告がほとんど見当たらないため、上記のように対処せざるを得ない場合がある。

## 2. 研究の目的

伝統木造建築を保存・活用するためには、合理的で信頼性の高い評価情報が必要である。評価のため、既往の土壁実験データから、データベースを構築したが薄い壁厚の事例がない。過去に実施したデータベースの統計的検討では、壁厚は必ずしも性能に比例せず、薄い壁厚の場合に、既存実験を外挿しても薄い土壁の性能を示すことができない。本研究では、茶室・数寄屋建築に見られる壁厚が薄く繊細な架構の耐震性能評価を実現するため、実験によって基礎資料を得ることを目的としている。実験に基づいた極めて薄い土壁（以降、極薄土壁と呼ぶ）の性能を、筆者らが構築してきた実験データベースに加え、土壁を有する木造建築の保存設計に活用できる基盤を整える。

## 3. 研究の方法

以下の方法で極薄土壁の構造性能を評価した基礎資料を整備する。

(1) 極薄土壁の仕様をその変遷を踏まえて調査し実験仕様を決定する。

(2) 実大軸組複数試験体の繰り返し载荷実験により復元力特性等を把握する。

茶室・数寄屋建築にみられる 45~30 mm の極めて薄い壁厚の土壁の性能を繰り返し载荷実験で調べた。実験は 3 期に分けて、後述する表 1 のような一連の試験体を数寄屋大工と左官事業所が製作している。

試験体は開口無しと開口有りの土台勝ちのモデルで、試験体の種類を図 1 に示す。試験体寸法は、文献 1), 2) および実測調査 (1 件のみ)、日本建築史家と左官との検討に基づいて決定した。鉛直荷重は、文献調査結果に基づいて、椀瓦葺、こけら葺および茅葺の屋根荷重を想定して、それぞれで異なる鋼製錘を梁上から吊り下げ 7.11 kN と 2.68 kN を作用させた。さらに、石場建ての場合のモデルで、開口無しと開口有りがある。表 1 に対応した軸組のみの試験体の実験も行った。

試験体の柱は 90 mm 角、 $\phi 90$  mm もしくは  $\phi 60$  mm の丸柱、壁厚は 45 mm または 30 mm とした。試験体 E は垂れ壁のみ、F は垂れ壁と腰壁のみのモデルである。試験体 G は踊り口と連子窓があるモデルである。ただし、試験体 G は、実情に近づけるために踊り口の引き尻部分の壁厚を 30 mm としている。試験体 D-1 から D-3 は下地窓の位置と大きさを変えたモデルである。

図 2 のような载荷装置に試験体を設置して、正負繰り返し载荷を経て 1/6 rad までの一方向载荷を行った。载荷途中で長柄の破壊が生じ柱脚の浮き上がりが大きく生じた場合は、変位を 0 に戻してから、柱脚に金物補強を行って再度繰り返し载荷履歴を実施した。また、石場建ての場合は、柱の水平変位を拘束し、浮き上がりを許容した。

(3) (2) の実験結果を既開発のデータベースに追加し、極薄土壁の性能を明らかにする。

## 4. 研究成果

図 3 に荷重-見かけのせん断変形角関係を示す。荷重は  $PA$  効果による影響を除去した値で整

表 1 試験体の柱寸法、壁厚、载荷錘重

試験体	柱 [mm]	壁厚 [mm]	錘重量 [kN]
A-1	105 角		7.11
B-1	$\phi 90$	45	2.68
B-2			7.11
C-1	$\phi 90$	30	2.68
C-2			7.11
C-3			
D			
D-1	$\phi 90$	45	
D-2			
D-3			
E			7.11
F	$\phi 90$	45	
G			45*
H	$\phi 90$	45	
I			

\* 踊り口の引き尻部分の土壁厚は 30mm とする。

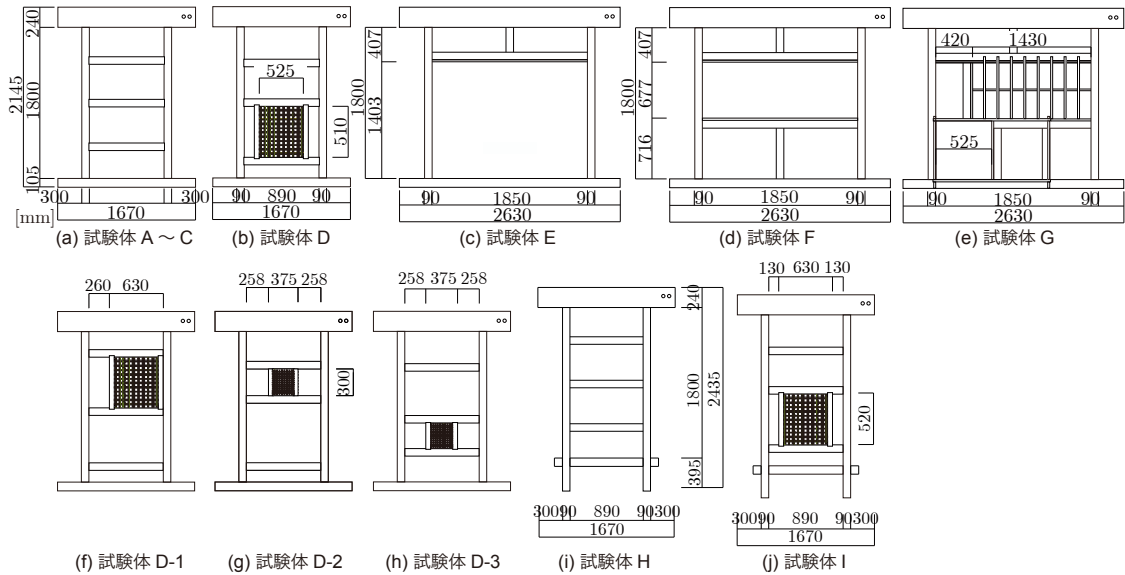


図1 試験体の種類

理した。

試験体 A-1 は、 $1/60$  rad 時に柱が浮き上がり接合部の破壊が生じ、その後  $1/15$  rad まで  $2$  kN 程度で推移した。接合部を金物で補強すると、図 3(b) のように最大耐力  $9$  kN 程度を発揮した。試験体 B-1 は  $1/90$  rad まで、B-2 は  $1/120$  rad までに柱が浮き上がり、接合部の破壊が生じたため、金物で補強した後、再実験した。その後、試験体 B では  $1/30$  rad 以降で耐力低下がみられる。試験体 C-2 は  $1/45$  rad までに柱が浮き上がり、接合部の破壊が生じたため、金物で補強した後、再実験した。試験体 C-1、C-2、C-3、D では、最大耐力後、 $1/15$  rad までに  $3$  kN 程度の耐力低下が生じた。鉛直荷重と柱径の大きさが履歴が異なることがわかる。

試験体 E、F、G では、最大耐力後、 $1/15$  rad までに耐力低下は生じなかったが、最終加力時には耐力低下した。試験体 F では荷重中に耐力上昇する領域がみられた。

試験体 B-1 と D は、軸組と壁厚が同じ寸法のモデルで開口の有無の違いがある。両試験体は最大耐力に違いがあるが、その後の荷重は最大加力時まで、同様に推移した。

試験体 D-1～D-3 は開口位置と大きさが異なる。試験体 D と D-1 では、耐力低下領域の荷重-見かけのせん断変形角曲線が異なる。試験体 D-2 と D-3 では開口部の大きさが小さくなっており、試験体 D より最大耐力が大きい。

試験体 H と試験体 I は石場建ての場合であり、鉛直荷重  $7$  kN 程度では試験体の浮き上がりを拘束できず、荷重-見かけのせん断変形角関係は  $2$  kN 程度の耐力でスリップする履歴形状となった。なお、 $1/45$  rad で荷重を中止している。これらの耐力は、試験体 A-1 で接合部破壊が生じた以降の耐力とほぼ同等となっている。

次に、土壁壁面の 3 次元挙動を画像計測により調べた。ここでは、開口部の有無が異なる試験体 B-1 と D について土壁面の面外変位の状況を示す。図 4 に、試験体 B-1 および D について、最終加力時の試験体の面外変位の分布を示す。また、図 5 に、最終加力時の試験体 B-1 および D の土壁中央断面の面外変位の分布を示す。図 4 および図 5 では、計測できていない箇所を面外変位  $0$  として表している。

土壁面の面外変形の最大値は、試験体 B-1 で  $83$  mm、D で  $47$  mm となり、いずれも試験体の中程の高さで記録された。また、図 4 と図 5 に示すように、試験体 D では下地窓上辺より下側

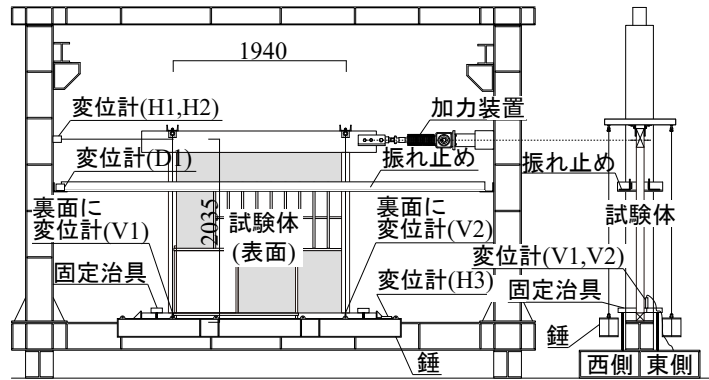


図2 荷重装置と試験体 G の設置例

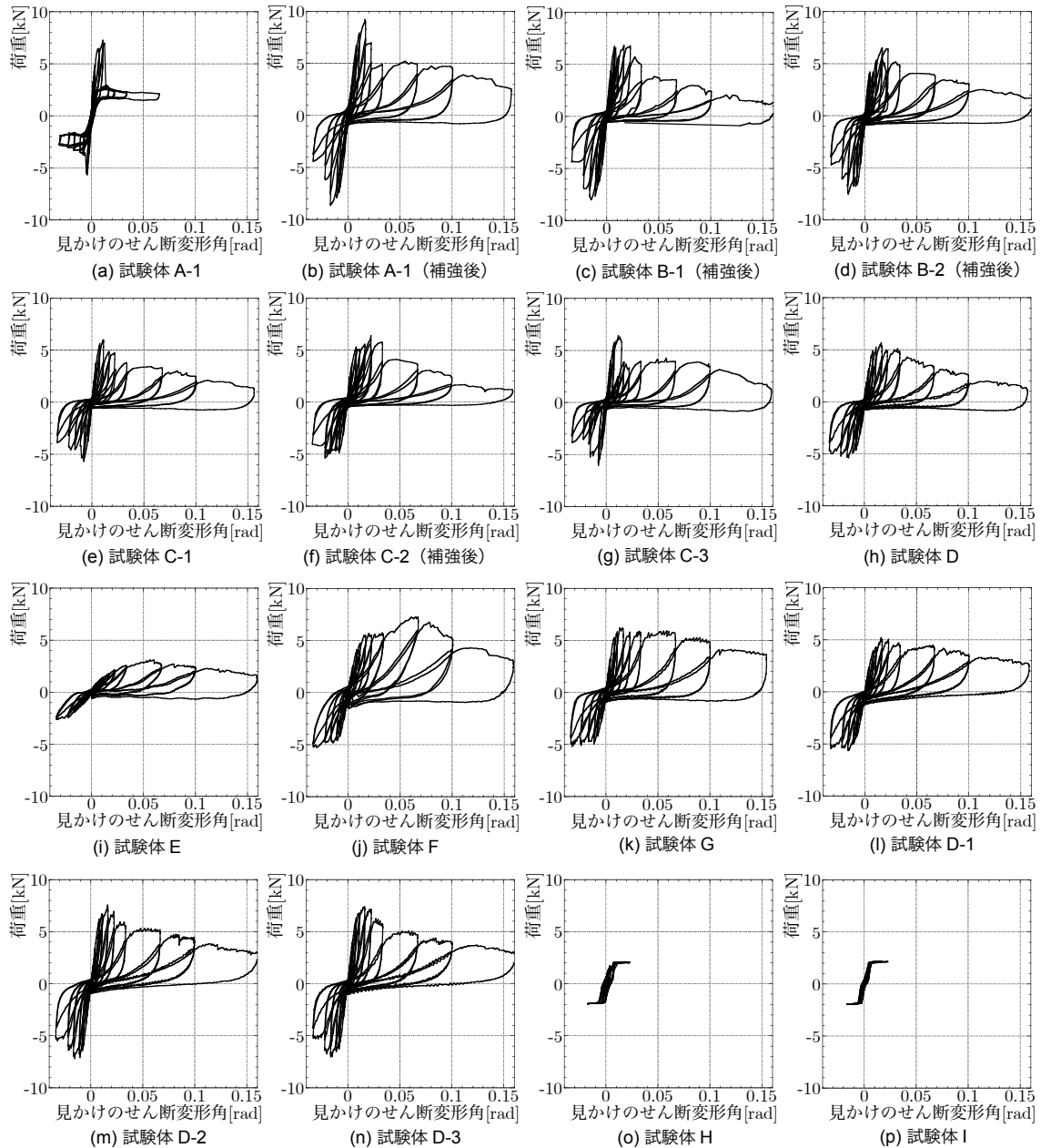


図3 荷重-見かけのせん断変形角関係

の壁面で、試験体 B-1 の同じ位置に比べて面外変位が小さくなった。これは、繰り返し载荷の際に、下地窓部を境にして、上部と下部の壁面で土壁面がひび割れにより不連続となったことに起因すると思われる。

図5で示したように、極薄土壁の場合は土壁の表裏の両面で浮い（剥がれ）ており、町家型の土壁で見られるような隅角部周辺の片面で壁土が浮き上がる挙動<sup>3)</sup>と異なる。

最後に、開口の大きさが極薄土壁の性能に与える影響を調べる。表2に、軸組寸法と壁厚が共通する試験体 B-0, B-1, D-0, F-0, D, E, F, G について、試験体毎に算出した開口率を示す。なお、試験体 B-0 は B-1 の、D-0 は D の、F-0 は

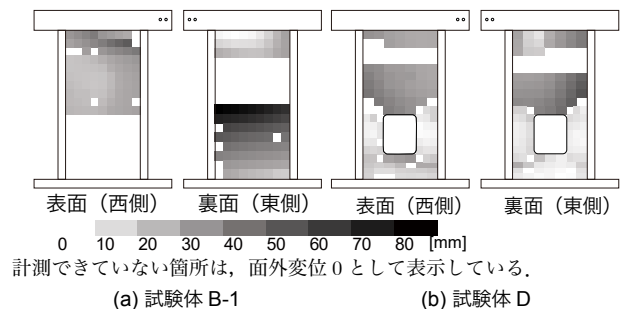


図4 土壁の面外変位の分布

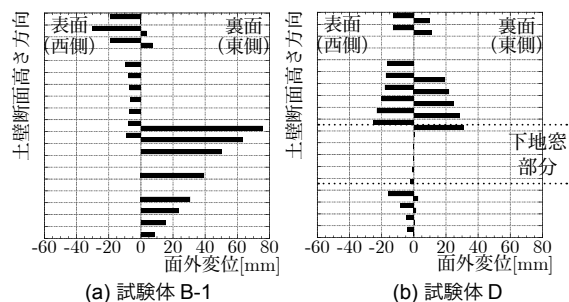


図5 試験体中央断面での面外変位の分布

F の軸組のみの試験体である。ここでは、開口の面積を、開口無しとした場合の土壁面の面積で除した値を百分率で表したものを開口率とした。開口無しの試験体の場合は開口率が 0 %、軸組のみの試験体の場合は開口率が 100 % となる。

図 6 に、軸組試験体 B-0, D-0, F-0 と無開口壁試験体 B-1 と開口付き試験体 D, E, F, G の開口率と最大耐力  $P_{max}$  の関係、開口率と降伏耐力  $P_y$  の関係、開口率と終局耐力  $P_u$  の関係、開口率と相当壁倍率の関係をそれぞれ示す。これらの指標は図 3 の荷重-変形角関係の包絡曲線から完全弾塑性モデル<sup>4)</sup>を作成する際に得られるものである。なお、相当壁倍率を算出する際、その低減係数  $\alpha$  を 0.75 とした。また、それぞれの図で、最小二乗法を用いた回帰直線を描いている。

図 6 に示したように、柱径  $\phi 90$  mm で壁厚 45 mm の試験体において、開口率と  $P_{max}$  および  $P_y$ ,  $P_u$ , 相当壁倍率のそれぞれの関係に相関がみられた。なお、構造特性係数については相関が見られなかった。筆者らの実験のみの検討ではあるが、極薄土壁の耐力について、開口率で簡易的に整理できる可能性がある。

それぞれの試験体毎のひび割れ状況の説明は省略したが、極薄土壁の繰り返し載荷実験の結果から、以下のことが整理された。

- (1) 壁厚が 45 mm 程度の土壁において、長柄込栓打ち接合部では 1/90 rad までに柱の柄が損傷する。その場合は、柄損傷前の最大耐力の半分以下の耐力となる。
- (2) 接合部を補強すると土壁は耐力を発揮できるが、1/45 rad 以降でひび割れが貫上で生じると耐力低下していく。
- (3) 極薄土壁の場合、最終加力までに耐力が低下し、鉛直荷重や柱径の大きさに荷重-見かけのせん断変形角関係が異なる。
- (4) 極薄土壁の場合、変形の進展に従って、土壁の両面で壁面が浮いて（剥がれて）両面の面外変位が大きくなる。
- (5) 柱径が  $\phi 90$  mm で壁厚が 45 mm 程度の土壁において、開口率と最大耐力および終局耐力、降伏耐力、相当壁倍率のそれぞれの間に相関がみられた。

#### 参考文献

- 1) 中村昌生, 山田幸一, 稲垣栄三, 太田博太郎: 日本建築史基礎資料集成第二十巻茶室, pp. 1-71, pp. 115-182, 中央論美術出版, 1974
- 2) 北尾春道: 茶室の展開図, pp. 83-84, pp. 144-146, pp. 164-166, pp. 200-203, pp. 232-234, 光村推古書院, 1970
- 3) 例えば, 村本 真, 平田 良, 午來嵩頭, 森迫清貴: 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, 日本建築学会技術報告集, 第 23 巻, 第 53 号, pp. 103-108, 2017. 2
- 4) 公益財団法人日本住宅・木造技術センター: 木造軸組工法住宅の許容応力度設計 (2017 年版) ①, 2017

表 2 試験体の開口率

試験体	B-0,D-0,F-0	B-1	D	E	F	G
柱寸法 [mm]	$\phi 90$			$\phi 90$		
壁厚 [mm]	-	43.7	41.4	41.4	43.0	38.3
開口率 [%]	100	0	17.9	77.2	37.0	42.2

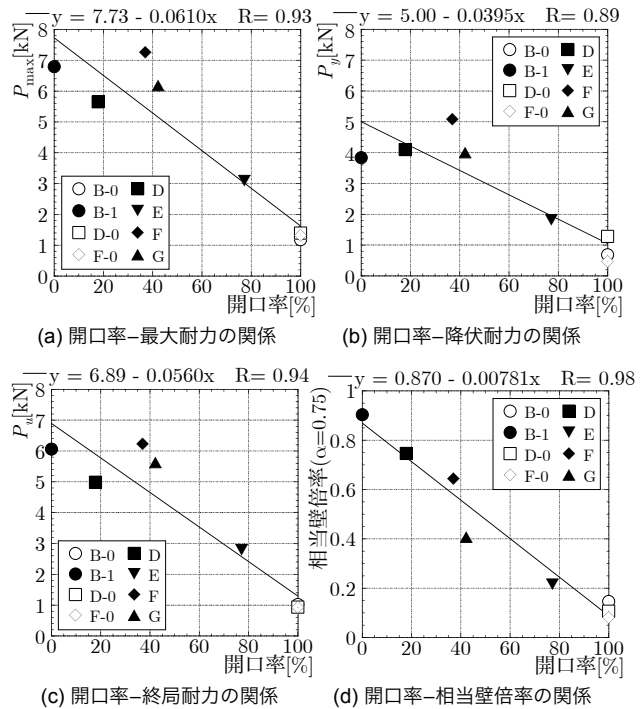


図 6 開口率と耐力指標



5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 井上 彰, 井上祥子, 村本 真, 森迫清貴	4. 巻 59
2. 論文標題 茶室・数寄屋建築にみられる開口を有する極薄土壁の繰り返し載荷実験	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本建築学会近畿支部研究報告集・構造系	6. 最初と最後の頁 441-444
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 井上 彰, 井上祥子, 村本 真, 森迫清貴
2. 発表標題 茶室・数寄屋建築にみられる極薄土壁の性能と開口率
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 井上 彰, 井上祥子, 村本 真, 森迫清貴
2. 発表標題 茶室・数寄屋建築にみられる極薄土壁の繰り返し載荷実験
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	村本 真 (Muramoto Makoto) (70510296)	京都工芸繊維大学・デザイン・建築学系・准教授  (14303)	

## 6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	矢ヶ崎 善太郎 (Yagasaki Zentarou)  (90314301)	大阪電気通信大学・工学部・教授  (34412)	
研究 協力者	井上 彰 (Inoue Akira)	京都工芸繊維大学・大学院建築学専攻・大学院生  (14303)	
研究 協力者	井上 祥子 (Inoue Sakiko)	京都工芸繊維大学・大学院建築学専攻・大学院生  (14303)	
研究 協力者	佐藤 ひろゆき (Sato Hiroyuki)	井筒屋佐藤	