

令和 4 年 6 月 20 日現在

機関番号：14303

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K01125

研究課題名（和文）土壁と木材の非破壊現地調査技術の文化財数寄屋建築への展開と保存設計技術の構築

研究課題名（英文）Development of non-destructive evaluation method for Mud walls and Timbers for Conservation Design of Sukiya-style Buildings

研究代表者

村本 真 (Makoto, Muramoto)

京都工芸繊維大学・デザイン・建築学系・准教授

研究者番号：70510296

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、木材と土壁に対する非破壊評価法を文化財保存のための技術として提供し、伝統木造のための高精度非線形解析法に計測値を反映することで、既存の数寄屋建築の耐震性能評価技術を構築する。木材の非破壊検査法の構築のため、押込試験結果と縦圧縮試験結果の関係を調べ、木材の応力ひずみ関係までを推定する手法を示した。また、壁土の場合にも同様の手法が適用できる。さらに、壁土の材料特性と土壁の構造性能に関する実験データベースを構築した。伝統木造のための予測解析法では、柱・横架材をプレート金物で補強した場合、通し貫接合部、柱傾斜復元力の解析モデルを提案し、それぞれの実験結果を概ね追跡可能となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、木材と壁土の強度を非破壊検査法により推定する技術を開発した。また、これまでは材料特性の予測のみであったが、押込試験と予め実施した材料実験データベースを用いることで、材料の応力ひずみ関係（性能曲線）までを予測することが可能となった。本研究の予測手法は、木材と壁土のいずれにおいてもほぼ同じであることが特徴であり、他の装置を必要としない。また、壁土と土壁の性能曲線に関する実験データベースを充実させている。さらに、伝統木造建築のための高精度予測解析法を開発し、実験結果を追跡することが可能となった。今後、伝統木造建築の保存設計や補強設計にこれらのデータベースや数値解析法は有効なツールとなる。

研究成果の概要（英文）：This study provides a nondestructive evaluation method for wood and mud walls for the preservation of cultural properties and develops a nonlinear analysis method for evaluating the seismic performance of existing sukiya-style buildings by using the measured values of nondestructive device. To construct a nondestructive inspection method for wood, the relationship between the results of indentation tests and longitudinal compression tests was investigated, and a method to estimate even the stress-strain relationship of wood was presented. The same method can be applied to wall clay. In addition, experimental databases on the material properties of wall clay and the structural performance of mud walls were developed. These databases can use for the conservation design of Sukiya-style Buildings. And numerical models were proposed for the case of beam-column reinforced with steel plate, Column-nuki joints, and restoring force due to column rocking.

研究分野：建築構造・材料

キーワード：文化財数寄屋建築 耐震性能評価 非破壊検査 押込試験 数値解析法

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

伝統木造建物の保存設計においては、不明な性能を安全率を過大にみて評価せず、土壁と構造木材の性能をできるだけ実状を反映した性能評価とすべきである。その上で、建築史家の評価を反映した適切な構造設計上の判断を行うことが望ましい。数寄屋建築の保存設計では、実際に不明点が多く設計で苦慮している場合が多い。また、近年は、こうした建物における地震被害も多く報告され、土壁のひび割れや軸組のずれなども確認されている。

本研究で対象とする数寄屋建築では薄い壁厚の土壁の構造性能が建物性能の評価に影響することが予想されるため、建物の保存設計を行うには、これまでに研究されているような補強方法の提案事例をまとめたものを参照するだけでは不十分であり、既存建物の木材や土壁といった耐震要素の性能を非破壊的に直接評価した上で、建物全体の耐震性能を評価することが必要である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、木材と土壁に対する非破壊評価法を文化財保存のための技術として提供し、伝統木造のための高精度非線形解析法にこれらの基礎技術で得た計測値を反映することで、既存の数寄屋建築の耐震性能評価技術を構築し、実状を把握できる基盤を整えて、効果的な耐震補強法を数値解析により探ることである。

筆者らは、数寄屋建築を対象に、その耐震要素となる薄い壁厚の土壁の構造性能を調べ、様々な壁厚の土壁性能データベースの構築を進めている。また、土壁と木材の非破壊検査法の構築を検討している。本研究は、筆者らが試みている計測技術を文化財数寄屋建築へ展開することを目指し、機械工学の精密計測技術と建築構造工学の実大規模実験のデータ分析結果を組み合わせ文化財数寄屋建築の保存設計を可能とする基盤を整える。

3. 研究の方法

以下の方法で木材と土壁の非破壊検査法を整備し、伝統木造建築の高精度予測解析法を開発する。加えて、現地調査によって、現場適用性を確認する。

(1) 木材の非破壊検査法を押込試験と材料試験を組み合わせ構築する。無欠点小試験体(30×30×60 mm)と実大規模試験体(90×90×180 mm)のそれぞれで押込試験と縦圧縮試験を実施し、その関係性および材料試験の応力ひずみ関係そのものを調べることで、非破壊検査から木材の圧縮時の応力ひずみ関係モデルを構築する。

(2) 壁土の非破壊検査法を押込試験と材料試験を組み合わせ構築する。平板型の壁土試験体(170×170×60 mm)で押込試験と圧縮試験を実施し、その関係性および材料試験の応力ひずみ関係そのものを調べることで、非破壊検査から木材の圧縮時の応力ひずみ関係モデルを構築する。また、材料特性が十分に解明されていない壁土の材料実験を整理して、日本国内の土による壁土の材料試験データベースを作成する。

(3) 伝統木造建築の高精度予測解析法を開発する。接合部や石場建て構法時の骨組挙動を予測可能な数値解析モデルの検討する。

(4) 現地調査によって、(1)～(3)の現場適用性を確認し、数値解析によって必要な補強方法を提案する。

以上のように、当初は研究を計画していたが、世情によって、実験室利用や現場で実測調査がかなり制限されたため、(1)では可能な範囲での実験のみとし、(2)でも可能な範囲での実験のみとし、壁土の材料実験データベースを充実させることに注力した。また、これに対応させて、土壁の性能評価に活用できるように、実験データベースを充実させることとした。特に研究期間後半の現地調査は困難であったので、(3)の数値解析モデルの検討に注力することとした。

4. 研究成果

木材の非破壊検査法の構築のため、図1のような押込試験装置を用いた押込試験結果と精密万能試験機または万能試験機による縦圧縮試験結果の関係性を、ヒノキ、ベイマツ、スギを対象に調べた。その結果、無欠点小試験体(24体、3樹種)と実大規模試験体(12体、3樹種)で、それぞれ図2のような押込荷重と圧



(a) 押込試験装置のシステム構成

(b) 平圧子

図1 押込試験装置と圧子

縮強度の関係を得た。樹種によらず相関係数 0.6 程度の相関が得られた。表 1 は押込荷重とそのほかの材料特性との関係を示している。無欠点小試験体については、多くの材料特性値が押込荷重と相関がある。実大規模試験体では、欠点の影響によると思われるが、相関が小さい。これらの結果および材料実験の分析結果を用いて、無欠点小試験体の応力ひずみ関係を推定し、図 3 の結果を得た。非破壊検査による推定圧縮強度の最小値と最大値を用いた応力ひずみ関係モデルの間に実験結果がある。

しかしながら、実大規模試験体の場合には欠点の影響を考慮した分析がさらに必要であったことから、試験体数を 144 体まで増やし、追加実験を実施した。

壁土の非破壊検査法の構築では、木材と同様の実験は十分に実施できなかった。そこで、既往の実験結果を再評価して分析した。京都深草産の壁土を対象を絞り、荒壁土(85 体)と中塗り土(61 体)の材料特性および応力ひずみ関係を調べた。 $\phi 125 \times 250$ mm の円柱試験体の結果を整理した。その結果、図 4 のような関係性が確認でき、材料特性値間には、荒壁土では相関が低いが、荒壁土と中塗り土全体では相関があることがわかった。本研究では、これらの実験データの再整理を含め、国内の壁土の材料実験が記載され

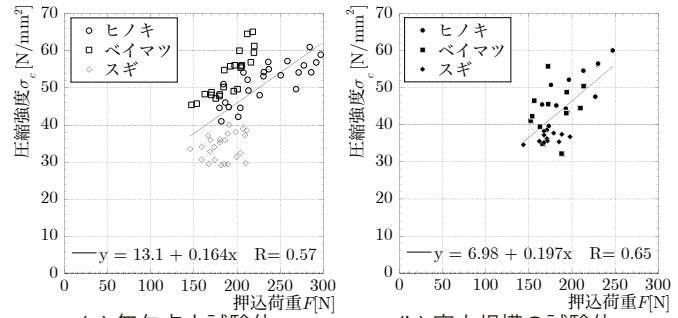


図 2 押込荷重と縦圧縮強度の関係

表 1 押込荷重と材料特性値の相関係数の一覧

(a) 無欠点小試験体

樹種	σ_c	${}_d k_1$	${}_d k_2$	${}_d k_{\sigma c}$	${}_d \varepsilon_c$	${}_d \sigma_{cp}$	${}_d \varepsilon_{cp}$
ヒノキ	0.79	0.77	0.35	0.74	0.49	0.50	0.06
ベイマツ	0.86	0.79	0.35	0.59	0.60	0.86	0.41
スギ	0.26	0.47	0.22	0.52	0.56	0.27	0.47
全種	0.57	0.66	0.16	0.65	0.61	0.54	0.50

(b) 実大規模の試験体

樹種	σ_c	${}_d k_1$	${}_d k_2$	${}_d k_{\sigma c}$	${}_d \varepsilon_c$	${}_d \sigma_{cp}$	${}_d \varepsilon_{cp}$
ヒノキ	0.77	0.79	0.32	0.61	0.28	0.78	0.48
ベイマツ	0.23	0.27	0.18	0.40	0.25	0.24	0.04
スギ	0.36	0.43	0.03	0.18	0.06	0.32	0.35
全種	0.64	0.50	0.20	0.53	0.30	0.65	0.15

σ_c は圧縮強度、 ${}_d k_1$ は弾性係数、 ${}_d k_2$ はひずみ 2% と 3% 間の応力低下域の勾配、 ${}_d k_{\sigma c}$ は圧縮強度点の割線勾配、 ${}_d \varepsilon_c$ は圧縮強度時のひずみ、 ${}_d \sigma_{cp}$ は比例限度時応力、 ${}_d \varepsilon_{cp}$ は比例限度時のひずみである。なお、下添え字 ${}_d$ は変位計によって求めた応力-ひずみの値であることを示す。

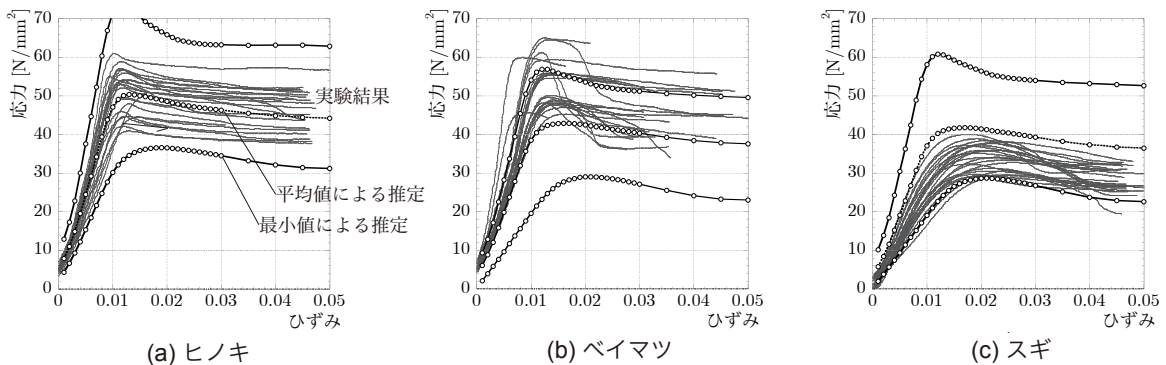


図 3 縦圧縮応力-ひずみ関係の実験結果と推定結果の比較 (無欠点小試験体の場合)

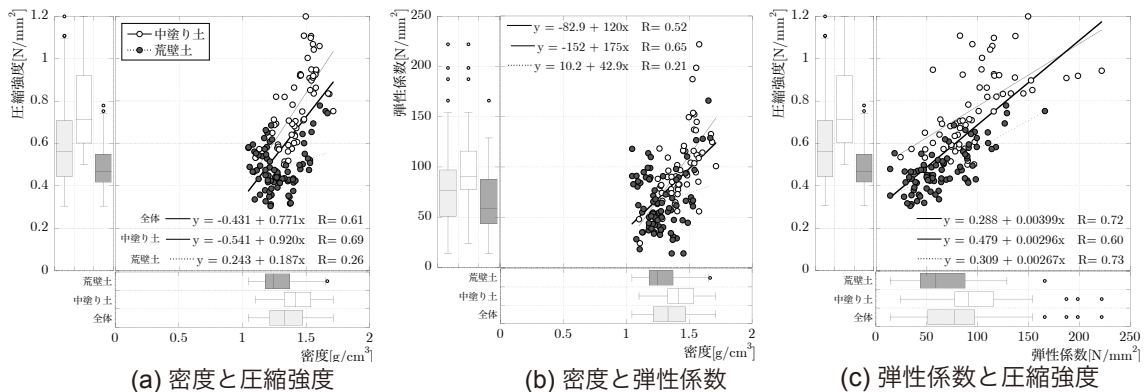


図 4 材料特性値間の関係

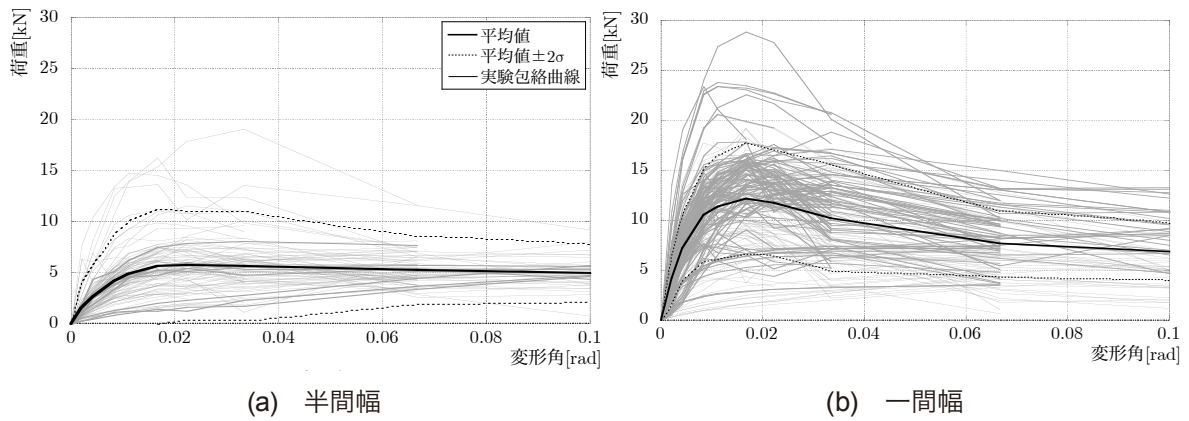


図5 全面土壁の荷重-変形角関係

た文献を収集し、壁土の材料実験のデータベースを整備した。また、これまでに作成していた既往の土壁実験に関する荷重-変形角関係についても同様に新たな文献を収集し、図5のように整理して、それらを実験データベースとしてまとめた。

伝統木造建築のための高精度予測解析法の開発では、(i) 柱-横架材をプレート金物で補強した場合、(ii) 通し貫接合部、(iii) 柱傾斜復元力の解析モデルを検討した。これらは、ばねモデルによらず、木材の応力ひずみ関係モデルまたは鋼材の応力ひずみ関係モデルをそれぞれ考えている。通し貫接合部の場合には、材料特性値と接合部内のめり込みに関する実際が不明であることから、材料特性に関して調整係数を与えている。柱傾斜復元力の解析モデルでは柱木口が基礎によってめり込む場合の初期剛性の変化をモデル化することによって、柱が傾斜していく挙動を追跡することができた。

図6に柱-横架材をプレート金物(CP-T または VP 金物)で補強した場合の軸組の実験結果¹⁾と解析結果の比較、図7に通し貫接合部の実験結果⁵⁾と解析結果の比較の例、図8に柱傾斜復元力についての実験結果³⁾と解析結果の比較をそれぞれ示す。なお、図6の[CASE1]は木材とプレ

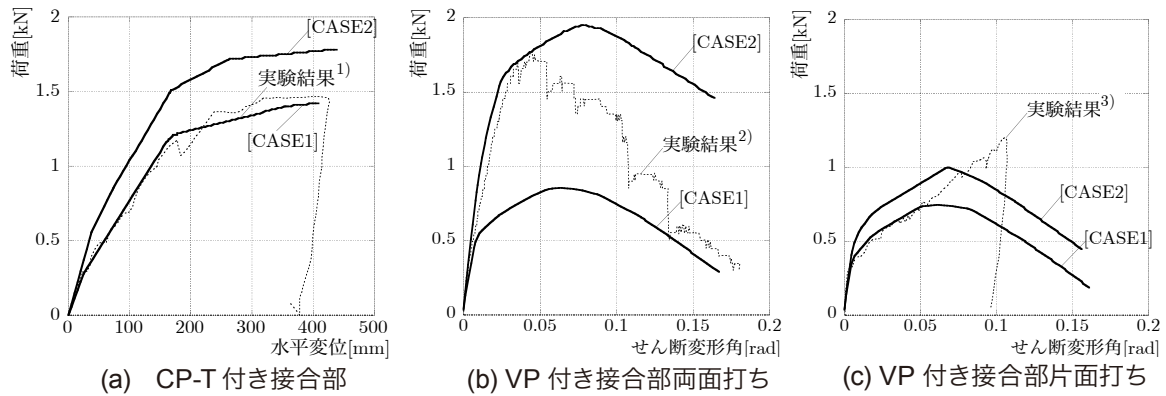


図6 金物補強付き接合部を有するフレームの荷重変位関係

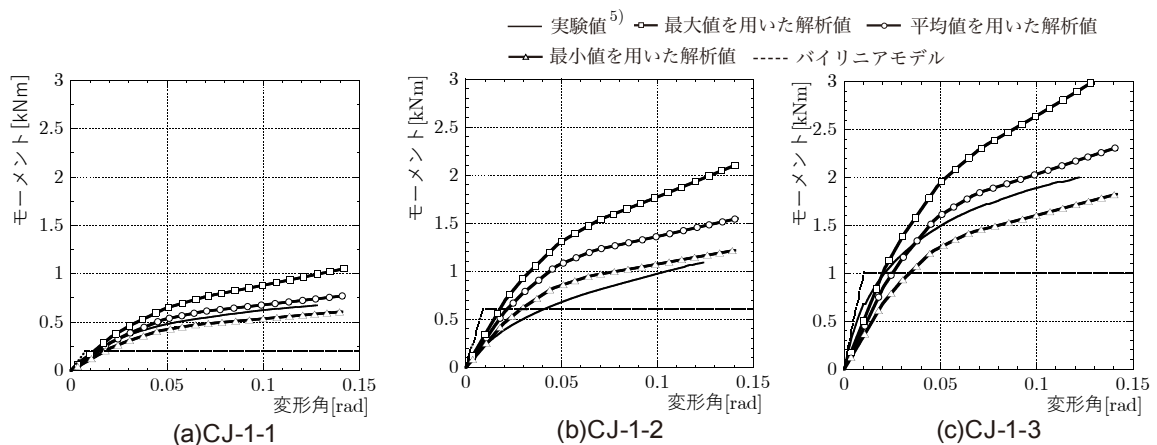


図7 通し貫接合部のモーメント-変形角関係

ートのモデル化による場合、[CASE2]は木材とプレートと釘をモデル化した場合の解析結果⁴⁾である。図7では完全弾塑性モデルとした場合の実験の予測結果も示し、解析結果は材料特性値のばらつきを考慮して考え得る最大または最小強度等を用いた場合も示している。実験結果と異なる場合もあるが、概ね実験曲線を追跡している。その他の解析例は文献6)に示した。図8は、丸柱の場合と角柱の場合を検討した。図中の $2a$ は柱脚の要素サイズを示し、予測最大荷重が異なる場合がある。文献8)には横架材間に柱がある場合の解析結果も示した。

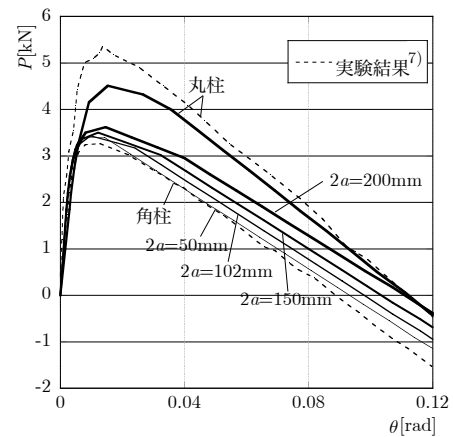


図8 柱傾斜復元力の荷重-変形角関係

以上より、木材と壁土の非破壊検査法は押込試験を用いてそれらの応力ひずみ関係までを推定する手法が構築された。上述したように世情により現場調査が困難であったことから、伝統木造建築の保存再生現場への適用性に関する課題が残されている。また、木材の欠点の取り扱いに関する検討を加えることによって、推定精度の向上が期待される。これらの手法から得られる材料特性の推定情報を開発した木造建築のための複合非線形解析法に与えることで、耐震性能評価の信頼性を向上することができる。

参考文献

- 1) 後藤正美, 秦 正徳, 鈴木 有: 開口部を持つ木造軸組の補強法とその実験的検討, 日本建築学会技術報告集, 第4号, pp. 108-113, 1997
- 2) 杉野未奈, 林 康裕: 伝統木造軸組架構の仕様が復元力特性に及ぼす影響, 日本建築学会技術報告集, 第21巻, 第47号, pp. 113-118, 2015
- 3) 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69巻, 第582号, pp. 95-102, 200
- 4) 山口咲子, 井上祥子, 村本 真: 接合部をプレート金物で補強した木造軸組の数値解析モデルの検討, 日本建築学会近畿支部研究報告集・構造系, 第61号, pp.213-216, 2021
- 5) 河原 大: 伝統的構法による木造建築物の荷重-変位関係推定に関する研究, 東京大学博士論文, 2016
- 6) 吉田勇哉, 井上祥子, 村本 真: 梁-柱有限要素法による通し貫接合部の数値解析モデルの検討, 日本建築学会近畿支部研究報告集・構造系, 第62号, pp.129-132, 2022
- 7) 瀧野敦夫, 向坊恭介, 荒木康弘, 宮本裕司, 五十田 博, 河合直人: 軸力変動および横架材を有する柱の傾斜復元力特性に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第85巻, 第771号, pp. 715-723, 2020
- 8) 胡 蓉, 村本 真: 梁-柱有限要素のファイバーモデルで柱脚の応力状態を考慮した柱傾斜復元力挙動の解析, 日本建築学会近畿支部研究報告集・構造系, 第61号, pp.217-220, 2021

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 胡 蓉, 村本 真, 井上祥子, 李 軍	4. 巻 67.B
2. 論文標題 梁-柱有限要素法のファイバーモデルを並列化して接合部の履歴特性を考慮した解析法 - 蟻落とし接合部の繰り返し挙動の解析 -	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 構造工学論文集	6. 最初と最後の頁 403-412
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 有
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 該当する
1. 著者名 櫻田理沙子, 村本 真	4. 巻 61
2. 論文標題 半間幅および一間幅全面土壁の性能の統計的検討	5. 発行年 2021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 57-60
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 -
1. 著者名 高田莉子, 村本 真	4. 巻 61
2. 論文標題 木材の縦圧縮強度を基点とした応力-ひずみ関係推定法	5. 発行年 2021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 13-16
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 -
1. 著者名 胡 蓉, 村本 真	4. 巻 61
2. 論文標題 梁-柱有限要素法のファイバーモデルで柱脚の応力状態を考慮した柱傾斜復元力挙動の解析	5. 発行年 2021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 217-220
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 -

1. 著者名 山口咲子, 井上祥子, 村本 真	4. 巻 61
2. 論文標題 接合部をプレート金物で補強した木造軸組の数値解析モデルの検討	5. 発行年 2021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 213-216
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 -

1. 著者名 HU RONG, 井上 祥子, 村本 真	4. 巻 60
2. 論文標題 ファイバー要素で蟻落とし仕口のめり込みを考慮した燕尾木単接合部挙動の解析	5. 発行年 2020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 225-228
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 -

1. 著者名 吉田勇哉, 井上祥子, 村本 真	4. 巻 62
2. 論文標題 梁-柱有限要素法による通し貫接合部の数値解析モデルの検討	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本建築学会近畿支部研究報告書・構造系	6. 最初と最後の頁 129-132
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 -

1. 著者名 太田和輝, 村本 真	4. 巻 66
2. 論文標題 圧縮力を受ける木材柱の最大荷重評価のための単純柱モデル	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 理論応用力学講演会講演論文集	6. 最初と最後の頁 -
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4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 高田莉子, 村本 真
2. 発表標題 押込試験と圧縮試験の結果を用いた木材の材料特性の推定
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 胡 蓉, 村本 真
2. 発表標題 梁-柱有限要素のファイバーモデルで柱脚の応力状態を考慮した柱傾斜復元力挙動の解析
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山口咲子, 井上祥子, 村本 真
2. 発表標題 接合部をプレート金物で補強した木造軸組の数値解析モデルの検討
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 HU RONG, 井上 祥子, 村本 真
2. 発表標題 ファイバー要素で蟻落とし仕口のめり込みと埋木の影響を考慮した燕尾木隼接合部挙動の解析
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2020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	矢ヶ崎 善太郎 (Yagasaki Zentaro) (90314301)	大阪電気通信大学・工学部・教授 (34412)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------