

令和 6 年 5 月 31 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04356

研究課題名（和文）簡便な施工法を用いた既存木造建物の耐震化と残存耐震性仮判定ツールの構築

研究課題名（英文）Seismic Retrofit of Existing Wooden Structures Using Simple Construction Methods and Proposal for Provisional Evaluation of Residual Seismic Capacity

研究代表者

多幾山 法子 (Takiyama, Noriko)

東京都立大学・都市環境科学研究科・准教授

研究者番号：10565534

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、広域の既存木造建物群の迅速な耐震化を促進するため、安価で簡便な施工手法に限定し、実大実験、数値解析や調査を通じて、改修の程度と力学特性・振動性状の変化を定量化することで、簡便な建物応答推定法、および、被災後の簡便な安全性の仮判定手法の提案をしたものである。主な成果は以下の通りである。(a) 柱の根継ぎと躯体の力学特性の関連を明らかにした。(b) 実大架構実験を実施し、あと施工内挿格子壁の耐震性向上の程度を検討した。(c) アラミド繊維シート補強を施した接合部の要素実験を実施し、耐震性向上を目指した検討を行った。(d) 要素実験を実施し、水平構面の水平剛性の推定方法を模索した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

多数の木造建物の耐震化を効率的かつ迅速に進めるためには、劣化補修や耐震改修に要する手間の削減と、安価で簡便な施工法が必要である。また、被災後には建物の安全性を判定するが、被災が広域に渡る場合は、迅速で簡便なスクリーニング手法が必要となる。

以上より、本研究では安価で簡便である施工方法に特化した検討をしているため、耐震化の促進に直結し易い。また、残存耐震性の確認方法として建物の振動計測を実施する既往研究があるが、建物内の改修箇所と振動特性の変化を定量化しており、耐震設計手法の単純化を図れる可能性を示した。

研究成果の概要（英文）：This study proposes a simple building response estimation method and a simple provisional judgment method for safety after disaster, by quantifying the degree of retrofitting and changes in mechanical properties and vibration characteristics, in order to promote rapid seismic retrofitting of existing wooden structures in a wide area. In this study, we limited ourselves to inexpensive and simple construction methods and conducted full-scale tests, numerical analyses and investigations.

The main results are as follows. (a) The relationship between the root joints of the columns and mechanical properties of the frame is clarified. (b) Full-scale loading tests were conducted to study the degree of improvement in seismic performance of the post-constructed interpolated lattice wall. (c) Elemental tests were conducted on joints reinforced with aramid fiber sheets to improve seismic capacity. (d) Elemental experiments were conducted to find a method of estimating the horizontal stiffness.

研究分野：木質構造

キーワード：既存木造建物 耐震補強 アラミド繊維シート 根継ぎ 内挿格子壁 構造調査 振動特性 実大架構実験

1. 研究開始当初の背景

過去の地震では多くの木造住宅の倒壊が報告され、それに起因して多数の犠牲者が出ている。今後、南海・東南海地震や首都直下地震が高い確率で予測されている中、我国の木造住宅の耐震性向上に関する研究は急務である。

各自治体の防災活動においては、木造住宅の耐震化率の目標値を設定し、助成制度の整備や建替・除却の推進を行っている。しかし、助成額や専門家の人数に限りがあり、時間・費用・労力などの制約から断念する場合や、部分的な改修に止まる場合も多い。以上より、多数の木造住宅の耐震化を効率的かつ迅速に進めるためには、劣化補修や耐震改修に要する手間を削減し、安価で短期間でできる簡便な設計・補強手法が必要である。

一方、被災後には、専門家による住宅の安全性確認が必須であるが、被災エリアが広範囲に渡る場合は、専門家の人数に限りがあるため、全棟調査に時間を要し、長期間の避難所生活が強いられる。これは、迅速で簡便なスクリーニング手法があれば解決できる。

2. 研究の目的

以上を踏まえ、申請者は既存木造住宅に対する被災前後での防災対策として「簡便であること」に重点を置いた研究に多角的に取り組んでいる。

本研究課題では、安価で短期間で実施可能な劣化補修・耐震改修方法を対象とし、増改築や修復工事後の耐震性評価や建物挙動の推定、および、被災後の安全性の簡易判定ツールの提案、の2点を目的とし、実大実験、数値解析および構造調査を実施する。簡便な劣化補修・耐震改修手法として躯体に採用する操作は、以下3件とする。

- (a) 劣化・損傷箇所の補修として多く採用される、柱の根継ぎによる損傷部材の交換
- (b) 既存建物への木格子の内装による架構せん断力の上昇
- (c) 新素材であるアラミド繊維シートを用いた損傷接合部の補強

3. 研究の方法

- (1) 根継ぎに関するアンケート調査、および、接合部補強に関するヒアリング：全国の工務店を対象とし、過去に施工された根継ぎの情報を幅広く収集する。
- (2) 根継ぎした実建物の実測調査、および、根継ぎした柱を有する架構のモデル化と数値実験：実建物において施された根継ぎの実測とアンケート結果に基づき継手をモデル化し、架構に対する数値実験をし、根継ぎと建物応答の関係性を定量化する。
- (3) アラミド繊維シートを用いた接合部補強を施した架構のモデル化と地震直後の安全性判定手法の模索：スプリット状のアラミド繊維シートで補強した損傷接合部の要素実験や数値実験による検証を続ける。また、スプリットシートの破壊性状と躯体の最大層間変形角の層間を確認し、簡易判定手法を模索する。
- (4) 木格子を内挿した架構補強の検証実験：躯体のせん断力向上を目指し、木格子の内挿補強を施した実大倒壊実験を実施する。
- (5) 木造水平構面の水平剛性の検討：段階的に耐震補強を進める建物や、増改築を行う建物に関して、特性の異なる躯体の連成を考慮した地震応答の推定方法を模索するため、水平構面の水平剛性を検討するための要素実験を実施した。

4. 研究成果

本研究課題では、既存木造住宅に対する被災前後での防災対策として「簡便であること」に重点を置き、劣化部材の交換、接合部や躯体の耐震性能の向上、被災後の建物安全性の仮判定ツールの構築等を目指し、実大架構実験、数値解析や構造調査等の多角的な検討を行った。実施した内容を以下にまとめる。

既存木造躯体への根継ぎが力学特性と固有振動数に与える影響の解明

本項目では、劣化部位の簡便な修復方法として柱の根継ぎに着目し、根継ぎと建物全体の力学特性や固有振動数の関連を明らかにした。

まず、工務店や実務者を対象としたアンケート調査を実施し、根継ぎの施工実態を理解した。採用した継手と選択理由、樹種変更の有無、設計時の留意点などを詳細に収集し、統計を取った。また、施工の簡便性として重要視する点を把握した。

次に、複数の柱で根継ぎが行われている実建物において継手の実測調査を実施した。

アンケート結果と実建物での継手の実測に基づき、統計的に多い構法の金輪継ぎ（図1）を対象として、既往研究での引張実験や曲げ実験結果、および、既往の理論式に基づき接合部モデルを構築し、架構の増分解析や振動解析を実施した。躯体における根継ぎの設置率、設置高さや改修部位と躯体の力学特性や振動特性の変化を分析することで地震時応答への影響を定量化した。

以上は既に審査付学术论文として公表しており、そのうち主な知見を以下に抜粋する。

- 平面架構モデルを用いた変位増分解析を実施したところ（図 2(a)）、根継ぎを施すとせん断力、初期剛性ともに低下した。特に、柱の反曲点以上に継手を設けると、せん断力の低下量が大きかった。継手は反曲点以下に設け、柱頭・柱脚より先に曲げ降伏しない継手を設定する必要がある。
- 反曲点付近に継手を設けると、初期剛性が低下し難い。継手を反曲点から離す場合は、反曲点より下方に継手を設けると初期剛性が低下し難いが、上方に設けなければならない場合は、柱頭柱脚の曲げ剛性より初期剛性が高い継手を選定すべきである。
- 建物平面において根継ぎした柱が集中配置されていると、常時、建物が若干傾斜している可能性がある。
- 立体架構モデルを用いた固有値解析を実施したところ（図 2(b)）、柱の反曲点付近に継手を設けると継手の曲げ剛性に依らず固有振動数が上昇した。継手を反曲点から離して施工すると、曲げ剛性が高い継手の場合は根継ぎした柱本数に応じて固有振動数が上昇する。一方、曲げ剛性が低い継手の場合は固有振動数が低下し、特に反曲点より下方に設けると低下率が大きい。
- 金輪継ぎの復元力には方向性（強軸、弱軸）があり、施工する継手の方向に応じて初期剛性、せん断力や固有振動数の変化量が異なる（図 3）。また、継手を施すと、上載荷重に応じて鉛直方向の初期変位が異なる。実施工では建物内で根継ぎの強軸、弱軸方向や分布が偏らないように注意する必要がある。



図 1 金輪継ぎ

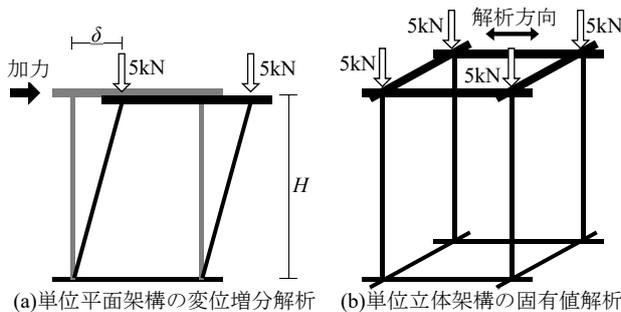


図 2 解析方法

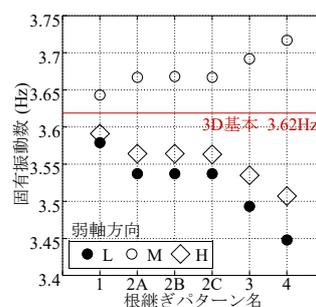


図 3 固有振動数の変化（弱軸）

実大架構実験に基づくあと施工内挿格子壁の耐震性の検討

せん断力の不足する建物に対する簡便な補強方法として架構に木格子を内挿する方法に着目し、複数の実大架構の倒壊実験を実施し、期待できる耐震性向上の程度を検討した。無補強、全壁、垂壁、腰壁、垂腰壁の試験体を用いた実験を通じて、格子を内挿すると耐力、変形性能ともに向上することがわかった（図4、図5）。一方、垂壁や腰壁のような小壁を内挿する際には、格子壁の1辺に窓台のような曲げ剛性の低い部材を配するが、大変形時に格子の変形を抑制できず、格子が割裂してしまう現象が発見された（図6）。このように、周辺架構による拘束条件に応じて格子の破壊メカニズムが異なる可能性が考えられたため、腰壁試験体を対象に、格子外周を囲む部材の曲げ剛性をパラメータとした追加実験を実施した。

以上は既に発表論文として公表しており、そのうち主な知見を以下に抜粋する。

- 面格子内挿による耐力向上は格子の数と寸法によりめり込み理論式を用いて概算可能であるが、格子材の割裂や柱の曲げ変形により過大評価となる。
- 格子材は、直交する格子材から受ける鉛直・水平方向の力によって割裂する場合があります。面格子の外周部材の曲げ剛性の低さにより助長される。割裂し分離した格子の2部材片は力学的役割の違いがある。
- 腰壁試験体の窓台の部材寸法を柱材に等しくし、曲げ剛性を上げると耐力が向上した。格子欠き込み部の拡張が抑制され、せん断破壊が生じにくくなったと推察する。
- 重要文化財（建造物）耐震基礎診断実施要項を応用し、垂壁架構の柱の折損判定を行った。現在扱っている試験体の格子寸法・本数であれば、柱の折損が生じないことを確認した。



図4 垂腰壁試験体（正側1/6rad）

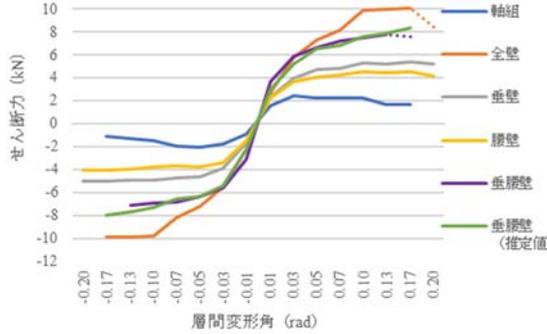


図5 架構せん断力の比較

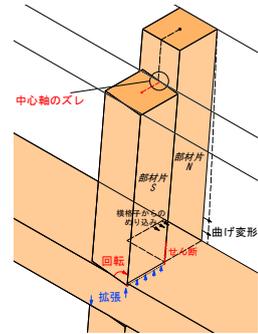


図6 格子の割れ機構

アラミド繊維シートを用いた損傷木造接合部への補修・補強法の開発

新素材のアラミド繊維シートを用いた補修・補強を施した柱-土台接合部の要素実験（曲げ試験（図7）および引張試験）を複数実施し、接合部の曲げ耐力および変形性能の向上を目指した様々な検討を行った。シートの基本的な剥離性状を利用し、予めスプリット状にした貼付方法を提案し（図8左）、曲げ挙動および引張挙動に関する解析モデルを構築した。スプリット状貼付形式を用いた場合、変形性能は向上することは確認できたものの、解析モデルを構築するにあたり、分割されたシートごとに設ける集約線の位置が不明確であり、精度良く評価できない課題が生じた。

そこで、これを解消するためにシートと組紐を併用する新しい形式を提案し（図8右）、検証実験を行った。また、組紐間隔をパラメタとした要素実験を実施した（図9）。

本補強法を応用し、シートの剥離性状と躯体の損傷度を対応させることができれば、被災時の簡易な建物安全性の仮判定に使用できる可能性を確認したが、更に安定した性能を得られるように改良することが課題である。

以上は既に審査付学術論文や発表論文として公表しており、そのうち主な知見を抜粋する。

- シートをプレキャスト化すると施工性が向上した。性能に問題は無いが、施工時に確実に接着させる工夫が必要である。
- シート全体がまとめて剥離する場合は脆性破壊に近いが、スプリット状に分割されながら順に破壊が進展する場合は、段階的な耐力低下が生じやすい。
- クロス貼りシートを予め数畝ごとのグループにスプリット状分割して施工することで、柱引抜時にはグループごとに順次剥離が生じ、変形性能が若干向上した。
- 曲げ性状については、クロス貼りシートの分割数を減らしても最外側グループの畝数が等しければ、同等の復元力が得られ、段階的な破壊が生じることが確認できた。
- スプリット状形式の場合、プレキャスト式よりも現場施工式の方が最大耐力、変形性能ともに高い結果となった。プレキャスト式シートを施工する際に予め分割していたシートが固着してしまい、分割した利点を発揮できない。
- スプリット状形式のシミュレーション時には、終局時の剥離性状を適切に与えられていないため、集約線の位置を決定できず、解析精度が高くない。
- 解析モデルの単純化を目指し、アラミド繊維シートと組紐を併用した貼付形式を提案した。

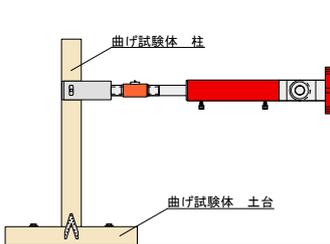


図7 曲げ試験加力装置

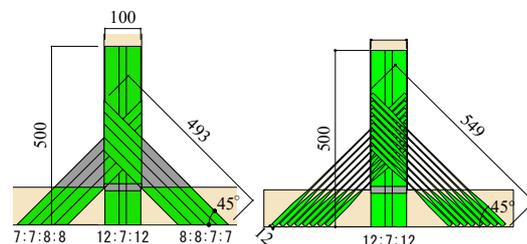


図8 シート貼付形式（右:スプリット，左:組紐）



図9 組紐の剥離性状

要素実験に基づく水平構面の水平剛性推定式の提案

段階的に耐震補強を進める建物や、増改築を行う建物に関して、特性の異なる躯体の連成を考慮した地震応答の推定方法を模索するため、剛床仮定が成立しない木造水平構面の水平剛性を検討する要素実験を実施した。

検討の諸段階として、仕口の耐震性を把握するため、込栓留めの柱-梁接合部を対象とし、面外曲げ性状を理解するための要素実験を行い（図10）、評価方法を提案した。更に、二方差し接合部の要素実験に基づき（図11）、水平剛性の推定手法を提案した。関連して、剛床仮定が成立しない不整形既存木造住宅の常時微動計測結果をまとめた。

以上は既に発表論文として公表しており、そのうち主な知見を抜粋する。

- (a) 一方差しの場合、先行研究の面内方向曲げ性状と比較すると、曲げ剛性は面内方向の 1/2 程度、最大曲げモーメントは面内方向の 1/3 程度となる。
- (b) 既往の推定式を用いて一方差しの実験結果を評価したが、初期剛性は実験値より大きく推定され、終局耐力は実験値より小さく推定された。また、ホゾから柱へのめりこみは繊維直交方向の三角形変位めり込みとなるため既往の理論式は適用できない。本検討では等変位めりこみとみなして推定したが、繊維直交方向の三角形めり込み理論式を完備する必要がある。
- (c) 二方差し接合部は面外曲げを受けると、両差鴨居の力学特性が異なる。ホゾが下側に取付いている場合、最大曲げモーメントとその時の接合部回転角、最大軸力と損傷いずれも大きい。差鴨居の母材とホゾの部材軸が異なることに起因すると考える。また、それに応じて差鴨居が振れながら変位する。
- (d) 先行研究の面内曲げと比較すると、二方差しの曲げ剛性は面内方向の約 25% 程度であった。

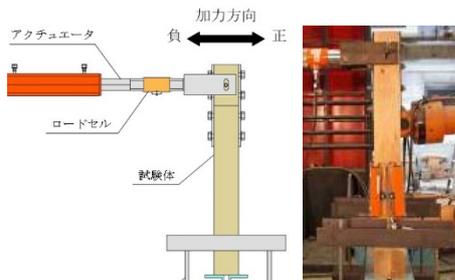


図 10 一方差し面外曲げ加力システム

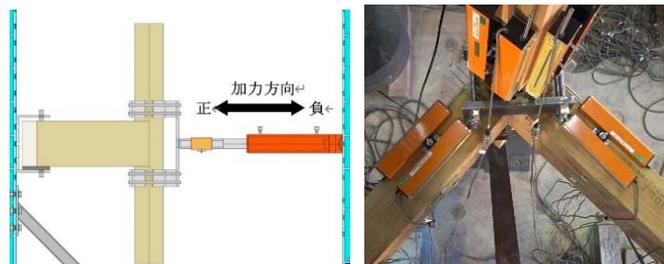


図 11 二方差し面外曲げ加力システム

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3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 TAKIYAMA Noriko, CHEN Xinyan	4. 巻 29
2. 論文標題 STRUCTURAL CHARACTERISTICS OF TRADITIONAL WOODEN HOUSE, <i>&MAGARIYA&/i>, OF MAESAWA DISTRICT AND KITAKATA CITY IN FUKUSHIMA	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 AIJ Journal of Technology and Design	6. 最初と最後の頁 1314 ~ 1319
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3130/aijt.29.1314	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 -

1. 著者名 TAKIYAMA Noriko, OGINO Tomohiro, CHEN Xinyan	4. 巻 88
2. 論文標題 アラミド繊維シートを用いた接合部補強法の伝統構法を含む既存木造住宅への展開	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)	6. 最初と最後の頁 1250 ~ 1261
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3130/aijs.88.1250	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 -

1. 著者名 TAKIYAMA Noriko, TOGAWA Fuko, CHINO Eiko	4. 巻 88
2. 論文標題 既存木造躯体への根継ぎが力学特性と固有振動数に与える影響	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)	6. 最初と最後の頁 1262 ~ 1272
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3130/aijs.88.1262	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 -

〔学会発表〕 計16件（うち招待講演 0件／うち国際学会 0件）

1. 発表者名 大浦 陸, 千野詠子, 鈴木咲希, 多幾山法子
2. 発表標題 アラミド繊維シートと組紐を併用した木造接合部補強法の提案
3. 学会等名 日本建築学会関東支部研究報告集, 93(1)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 千野詠子, 多幾山法子
2. 発表標題 喜多方市の伝統的な土蔵造建造物に用いる大壁の力学特性の解明(その3) 諸変位およびひずみに基づく分析
3. 学会等名 日本建築学会関東支部研究報告集, 93(1)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 砂川仁寿, 千野詠子, 鈴木咲希, 多幾山法子
2. 発表標題 長野県の歴史的教会の構造調査に基づく構造種別の異なる躯体と木造小屋組の耐震性評価(その1) 躯体が木造と煉瓦造の教会の比較
3. 学会等名 日本建築学会関東支部研究報告集, 93(1)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 姜 昊, 多幾山法子
2. 発表標題 伝統木造建物における半ホゾ込柱留め接合部の面外曲げ復元力と破壊状況の推定
3. 学会等名 日本建築学会関東支部研究報告集, 93(1)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 松本勇生, 千野詠子, 多幾山法子
2. 発表標題 八王子市の複数の木造古民家を活用した地域活性化に向けた研究(その5) 等級区分材を用いたあと施工面格子垂壁の格子内挿箇所が補強効果に及ぼす影響
3. 学会等名 日本建築学会関東支部研究報告集, 93(1)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 扇野智弘, 多幾山法子
2. 発表標題 アラミド繊維シート接合部補強法の改良提案とスプリット状解析モデルの再検討
3. 学会等名 日本建築学会関東支部研究報告集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 堺琉華, 千野詠子, 多幾山法子
2. 発表標題 八王子市の複数の木造古民家を活用した地域活性化に向けた研究(その4)等級区分材を用いたあと施工面格子垂壁の静的加力実験
3. 学会等名 日本建築学会関東支部研究報告集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 宮川佳乃, 扇野智弘, 千野詠子, 多幾山法子
2. 発表標題 八王子市醍醐地区の木造古民家における構造調査と耐震性評価
3. 学会等名 日本建築学会関東支部研究報告集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 砂川仁寿, 鈴木咲希, 山田幸正, 多幾山法子
2. 発表標題 長野県の歴史的教会における構造種別の異なる躯体と木造小屋組の振動特性
3. 学会等名 第16回日本地震工学シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 千野詠子, 多幾山法子
2. 発表標題 喜多方市の伝統的な土蔵造建造物に用いる大壁の力学特性の解明(その4) 限界耐力計算に用いる復元力特性と剥落を考慮した重量低減の提案
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 鈴木咲希, 多幾山法子
2. 発表標題 アラミド繊維で編んだ組紐を用いた木造接合部補強法の提案(その1) 羽子板状組紐シートの力学特性
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 砂川仁寿, 多幾山法子
2. 発表標題 長野県の歴史的教会の構造調査に基づく構造種別の異なる躯体と木造小屋組の耐震性評価(その2) 躯体が煉瓦造と鉄筋コンクリート造の比較
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 斉藤樹, 鈴木咲希, 砂川仁寿, 多幾山法子
2. 発表標題 長野県千曲市稲荷山の伝統的土蔵造建物における構造調査と耐震性評価
3. 学会等名 日本建築学会関東支部研究報告集
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 姜昊, 多幾山法子
2. 発表標題 伝統木造建物における二方差し半ホゾ込栓留め接合部の面外曲げ力学特性の評価
3. 学会等名 日本建築学会関東支部研究報告集
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 江森隆聖, 姜昊, 砂川仁寿, 多幾山法子
2. 発表標題 八王子市の複数の木造古民家を活用した地域活性化に向けた研究(その6)等級区分材を用いたあと施工面格子小壁の破壊メカニズムの分析
3. 学会等名 日本建築学会関東支部研究報告集
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 中山幸人, 姜昊, 多幾山法子
2. 発表標題 木造接合部曲げ試験によるアラミド繊維シートの組紐配置間隔と復元力特性の関係
3. 学会等名 日本建築学会関東支部研究報告集
4. 発表年 2024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
研究協力者	陳 昕岩 (Chen Xinyan)		

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	山田 幸正 (Yamada Yukimasa)		

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