

令和 2 年 5 月 28 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06649

研究課題名(和文) 木造住宅の躯体の地震時挙動と損傷定量評価

研究課題名(英文) Seismic Behavior and Damage Quantitative Evaluation of Wooden Frame

研究代表者

多幾山 法子 (Takiyama, Noriko)

首都大学東京・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) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、木造住宅の耐震性向上に資するものであり、地震時挙動のうち、建物の捩れ挙動を明らかにすることを目指したものである。まず、増改築履歴のある実建物の実測と常時微動計測を行い、耐震要素配置や平面的な偏心の特徴を把握した。また、接合部の要素試験を実施し、木造建物の捩れ応答の解析に必要な接合部の3方向バネの復元力特性を適切に理解した。さらに、接合部の破壊モードを制御可能な補強方法を模索し、アラミド繊維シート補強法を応用した改良提案を示した。最後に、耐力壁単体の静的加力実験に基づき、壁倍率や耐力壁のディテールの違いが、壁の破壊現象や耐力にどの程度の影響を与えるのか、感度解析を通じて検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

・本研究が今後発展し、面内偏心を有する耐震壁が建物挙動に及ぼす影響を定量的に評価することができれば、設計において、直交構面の耐力低減率を導入するなど、木造住宅の耐震改修にあたって有益な成果となる。また、これらのモデル化手法を構築できれば、国内外の既存木造住宅の耐震改修に関して、プレゼンスを示すことができる。

・木造住宅の接合部の破壊モードを制御しつつ架構全体の復元力を向上できる簡易で安価な補強手法が構築出来れば、耐震改修の普及が速まり、普及率も高まると考えられる。

研究成果の概要(英文)：This research contributes to the improvement of the earthquake resistance of wooden houses, and aims to clarify the torsional behavior of house among behaviors during an earthquake. First, we measured houses which has renovation history and performed microtremor measurement to understand the features of seismic element placement and planar eccentricity. In addition, we also performed element tests on the joints and properly understood restoring force characteristics of springs at the joints, which are necessary for analyzing the torsional response of wooden house. Furthermore, we sought a reinforcement method that can control the fracture mode of the joint, and presented an improvement proposal that applied the aramid fiber sheet reinforcement method. Finally, based on the static loading test of bearing wall and through sensitivity analysis, we verified how much the difference in wall magnification and wall detail affects the fracture phenomenon and yield strength of the bearing wall.

研究分野：木質構造

キーワード：既存木造住宅 耐震補強 構造調査 仕口・継手 実大架構実験 要素試験 アラミド繊維シート補強法 面内偏心

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

## 様式 C-19, F-19-1, Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

1995年兵庫県南部地震では多くの木造住宅の倒壊が報告され、犠牲者5000人余の内90%が木造住宅の倒壊に起因している。以降頻発している内陸地殻内地震や、2016年に発生した熊本地震においても多数の木造住宅が倒壊した(写真1,2)。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。

木造建物の設計や増改築を行う際は、可能な限り整形平面とし、耐力要素を平面的に均等配置することが重要であるが、異なる構造種別で増改築することも多い。そこで、平面的に偏心した混構造建物のねじれ応答に着目した振動台実験が行われている。

また、建築基準法では、在来軸組構法の住宅設計時には個々の壁の強さを壁倍率という指標で評価するよう定めており、倍率が高いほど耐震性能が高い。現在、高倍率壁が多く開発されているが、上限値を超えた倍率の壁は建物全体の偏心や耐力壁周辺の接合部での損傷など、想定外の破壊が生じ、期待通りの強度を発揮できないことが指摘されている。

接合部に関しては多数の実験に基づいた復元力モデルが提案されているが、面内方向に限定された事例が多く、構造部材の捩れに関してモデル化した事例は少ない。さらに、金物接合された構造材にはボルト孔などの断面欠損が生じ、躯体の耐力低下を招くことが懸念される。そこで、近年、安価で施工性の高い手法としてアラミド繊維シート補強法が提案されている。

上述の背景を踏まえ、申請者は、耐震壁の捩れや、接合部の捩れと損傷制御などに着目した研究を進めている。(a)耐震壁には面内偏心した面材も多い。単位耐力要素の静的加力実験事例の多くは、面外方向へのねじれ変形を拘束した条件下で行っているが、架構構面の面内偏心に起因する面外構面への荷重伝達を定量的に評価した。(b)在来軸組構法や伝統構法の様々な接合部模擬試験体に対して曲げ試験を行い、力学特性を把握してきた。(c)既存住宅の簡易な補強方法の一つに、新素材であるアラミド繊維シートを接合部に貼り付ける手法がある。そこで、アラミド繊維シート補強した柱-土台接合部の柱引抜試験と曲げ試験を実施し、補強効果を定量的に把握するとともに、より効果の高い補強形式を提案した。

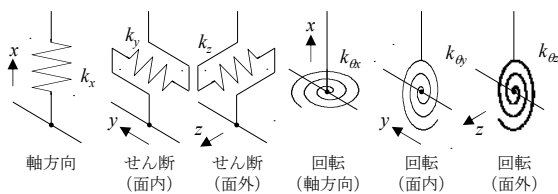


写真1 木造住宅の倒壊

写真2 柱脚の引き抜け

図1 接合部のバネ

### 2. 研究の目的

本研究では、木造住宅の地震時挙動のうち、建物の捩れ挙動を明らかにすることを目指す。

- (1) 増改築履歴のある実建物の実測と常時微動計測を行い、壁などの耐震要素配置や平面的な偏心の特徴と振動特性を把握する。
- (2) 接合部の3方向バネとして、木造建物の捩れ応答に対応可能な復元力特性(図1)を適切に与えるため、接合部の曲げ試験を実施する。
- (3) 既存接合部の破壊モードを制御可能な補強方法を模索し、アラミド繊維シート補強法を応用した改良提案を示し、簡易な解析モデルを構築する。
- (4) 耐力壁単体に着目し、壁倍率や耐力壁のディテールの違いが、壁の破壊現象や耐力にどの程度の影響を与えるのか確認するため、既往の静的加力実験結果、および、シミュレーション解析結果に基づいて感度解析を実施する。

### 3. 研究の方法

- (1) 既存木造住宅の構造調査と振動解析: 増改築した既存木造住宅の実測や、それに基づく振動解析を行い、耐力要素配置と耐震性能や振動性状の関係を明確にする
- (2) 接合部の復元力モデルの構築: 曲げ試験より、3方向バネの復元力モデルを構築する
- (3) 接合部の補強方法の改良提案: アラミド繊維シート補強法を応用した改良提案を示す
- (4) 捩れ挙動の数値実験: 静的加力実験結果に基づき、壁架構の解析モデルを構築し、平面架構の面内偏心が直交構面や構造物全体に及ぼす影響を定量化する
- (5) 解析モデルの構築: 実架構の解析モデルを構築して、シミュレーションを行う

### 4. 研究成果

#### 既存木造住宅の構造調査と振動解析

福島県の複数の地域において既存住宅群の構造調査を実施した。つし2階を有する住宅や増改築を繰り返した住宅、偏心を有する平面形状の住宅など、複数のパターンの住宅の構造調査や振動計測を実施し、耐震性評価を実施した。民家の被災履歴や維持管理などに関する集落の住民への聞き取り、腐朽や蟻害の有無、柱傾斜などの状態把握、表層地盤条件と民家の振動特性を把握するための常時微動測定、耐震性検討のための民家の実測を実施した。

例として、H邸の外観、1次モード形状、桁行方向の必要性能スペクトルを図2-4に示す。



図2 H邸外観

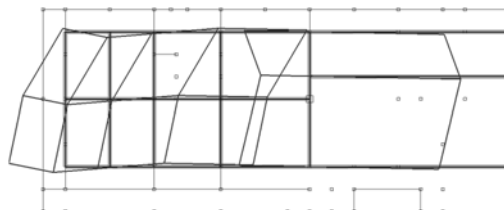


図3 H邸1次モード形状

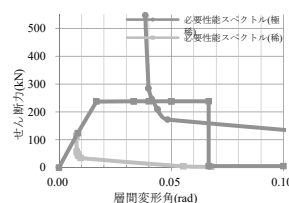


図4 H邸桁行必要性能スペクトル

### 接合部の復元力モデルの構築

仕口や継手の復元力特性を把握するため、非対称形状の横栓車知継ぎ接合部と差鴨居接合部に着目し、その力学特性の解明を目指した様々な要素試験および材料試験を実施し、剛性と耐力推定式の提案を目指した。

ここでは、柱-差鴨居接合部の仕口形状や架構のプロポーショナルパラメータとした要素試験体の静的加力実験結果を例示する。本研究では、半ホゾ込栓留め、全ホゾ込栓留め、引き独鉗車知栓、下げ鎌楔の計4種類の仕口形状を選定した。これら4種類の仕口に対して、試験体のプロポーショナルパラメータや栓の材種を変更することで、仕口周辺に生じる応力状態の違いによる力学特性の変化を確認した。

試験体は柱と差鴨居で構成される逆T字型とする。プロポーショナルパラメータ、差鴨居の配置高さ、断面欠損の大小や材種を変化させ、計8体の試験体を設計する。試験体は柱が水平、差鴨居が鉛直になるよう設置し、柱両端をピン及びピンローラーとして鉄骨架台に取り付ける(図5)。アクチュエータ先端に取り付けた治具で試験体の差鴨居にピン接合して加力する。試験体の目標変形角の振幅を増加させながら正負交番二回繰返加力を実施した。また、柱芯と差鴨居芯の交点には、試験体と非接触のピンを設け、これと加力点をロードセル付きPC鋼棒で連結した。これにより、差鴨居に傾斜が生じた際には、幾何学的に柱に曲げ変形が生じることで、差鴨居に軸力が発生し、実架構で生じる現象を模擬するシステムとする。

更に、既往の推定式を参考に、差鴨居に生じた軸力の影響を考慮した復元力特性の推定式を提案した。また、提案推定式を用いた評価値と実験値の対応を確認し、推定精度を確認した。また、異なる仕口形状をした差鴨居接合部の挙動を再現することを目的とし、解析モデルを構築し、接合部曲げ実験のシミュレーションとして変位増分解析を行い、精度検証を行った。

例として、半ホゾ込栓留めの結果を図6,7に示す。なお、提案した評価式を用いた推定値、およびシミュレーション解析結果を実験値と比較して掲載している。提案した推定式を用いた評価値、および、シミュレーション結果については、復元力、軸力共に概ね良く対応している。

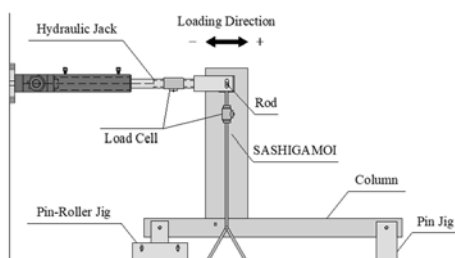


図5 加力システム

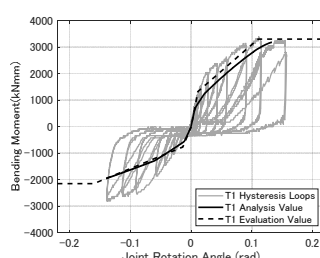


図6 M-θ関係

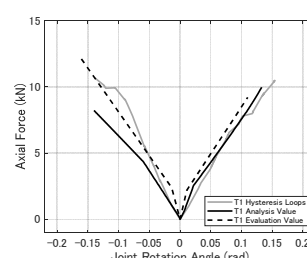


図7 差鴨居の軸力変動

### 接合部の補強方法の改良提案 (アラミド繊維シート補強法)

先行研究での提案に基づき、シートを予め数畝ごとに分割してスプリット状剥離を誘発する貼付形式に着目し、曲げ変形性能の向上を目指した改良を行った。また、接合部を補強した実大軸組架構の静的加力実験を実施し、シートの破壊モードと地震時挙動の関係を検証した。

接合部曲げ試験の試験体は柱と土台を逆T字型に短ほぞ接合し、V字金物で留める。被災履歴のある接合部に対するアラミド繊維シート補強を模擬するため、一度加力して損傷を与える。その後、V字金物を撤去し、アラミド繊維シートで補強を施し、再加力する流れを基本方針とする。シートは一部をあらかじめスプリット状に分割して貼り付け、接合界面付近の領域と、シートと木材が接着していない三角領域には、接着剤の代わりにシリコン樹脂を含浸させる。なお、いずれの試験体もシートは両面貼りとする。試験体土台を加力装置の架台にアンカーボルトで緊結し、アクチュエータで試験体柱頂部を加力し、正負交番二回繰返加力を行った(図8,9)。

クロス貼り角度や長さ、分割方法をパラメータとした16体の試験体を加力することで、より効果的な分割方法を模索し、また、スプリット状にしたアラミド繊維シートはどの面も外縁から順に剥離することを確認した。(a)クロス貼りが60度より45度の方が最大耐力が高く、また、クロス貼り間隔を広げたほうがより高い。(b)クロス貼りの畝分割数において、外縁から畝数の大

きい順に貼ると、変形性能が高い。

実大架構実験の軸組架構は桁、柱、土台から構成され、短ほぞ接合する。既往研究の解析モデルを用いた検討より、シートの畝数を縦貼り 12:7:12 に、クロス貼りを外縁から 7:8:7:8 の比率に分け、両面貼りする。土台はアンカーボルトで鉄骨架台に固定し、上載荷重は柱 1 本あたり 1t とする。試験体頂部に設置した治具を介し、正負交番漸増繰返加力を行った (図 10)。最大抵抗力と変形性能ともに高く、段階的な破壊が生じたことを確認した (図 11)。

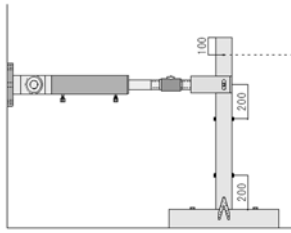


図 8 曲げ試験装置

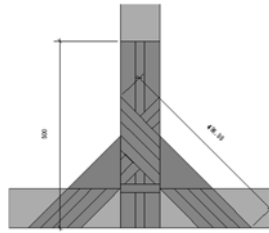


図 9 スプリット状貼付



図 10 架構試験体



図 11 シートの損傷

#### 架構の解析モデルの構築と捩れ挙動の数値実験

木造建物の耐力壁単体の面内偏心に着目した既往研究である、合板壁の静的加力実験に基づき、シミュレーションを実施し、構面への伝達荷重 (構面外荷重) を定量化した。また、単位架構を基準とし、実測済の住宅 3 棟の壁面の大きさまで、壁の幅や高さをパラメタとした感度解析を実施し、面内偏心を有する木造壁に水平荷重が作用したときの直交構面へ伝達する荷重を分析した。

柱、桁、土台、間柱から成る基本架構に 9mm 厚構造用合板を片面貼りした。

先行研究の単位架構モデルを基準として拡張し (図 12)、変位増分解析を行い、架構復元力と構面外荷重の感度解析を実施した。構造用合板はブレース置換し、基本架構の柱芯から合板の芯までリジッドリンクでセットバックして接続する。桁には面外方向への抵抗バネを設置し、構面内で捩れが生じた場合は応力を確認することで構面外荷重を得る。スパンが長い場合、偏心率が大きくなり、捩れ挙動が発生しやすい。また壁の枚数を増やしていくと、構面外荷重の値も高くなった (図 13)。

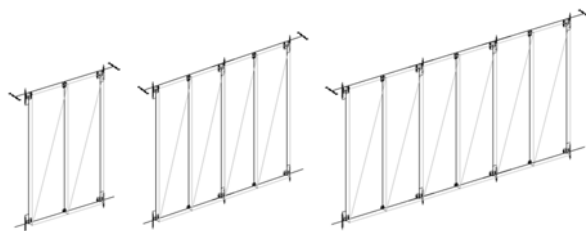


図 12 壁架構モデル (左から壁 1 枚, 2 枚, 3 枚)

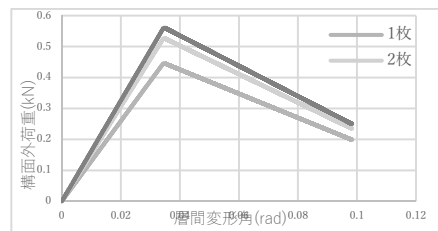


図 13 構面外荷重—層間変形角関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4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 多幾山法子, 井立直人, 陳昕岩, 讃岐亮, 権藤智之, 松本真澄, 青木茂	4. 巻 第83巻
2. 論文標題 大田区中央三丁目における実態調査に基づく看板建築の地震挙動に関する解析的考察	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本建築学会構造系論文集	6. 最初と最後の頁 837-846
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aijs.83.837	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 Noriko Takiyama, Xinyan Chen, Ayaka Hirose and Kousei Kawashima	4. 巻 -
2. 論文標題 Structural Characteristics of Remodeled Traditional Thatched Houses in the Old Post Town of Ouchi-Juku	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceeding of 6th International Conference on Heritage and Sustainable Development	6. 最初と最後の頁 1557-1564
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 -

1. 著者名 Kousei Kawashima, Xinyan Chen and Noriko Takiyama	4. 巻 -
2. 論文標題 Structural Characteristics of Traditional Thatched Chumon-Zukuri Houses in the Old Mountain Village of Maesawa, Japan	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceeding of 6th International Conference on Heritage and Sustainable Development	6. 最初と最後の頁 1363-1371
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 -

1. 著者名 多幾山法子, 井立直人, 陳昕岩, 讃岐亮, 権藤智之, 松本真澄, 青木茂	4. 巻 第83巻
2. 論文標題 大田区中央三丁目における実態調査に基づく看板建築の地震挙動に関する解析的考察	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本建築学会構造系論文集	6. 最初と最後の頁 837-846
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 -

〔学会発表〕 計23件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 陳昕岩, 多幾山法子
2. 発表標題 伝統木造住宅における仕様の異なる差鴨居接合部のモデル化とシミュレーション解析
3. 学会等名 日本建築学会関東支部研究報告集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 川島康生, 藤崎洸佑, 陳昕岩, 多幾山法子
2. 発表標題 福島県大内宿における伝統的茅葺住宅の構造的特徴と耐震性の分析
3. 学会等名 日本建築学会関東支部研究報告集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 浅岡優奈, 小池奨, 陳昕岩, 多幾山法子
2. 発表標題 アラミド繊維シート補強法を施した木造住宅の柱 - 土台接合部の変形性能の向上
3. 学会等名 日本建築学会関東支部研究報告集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 弘末絢香, 玉記良平, 陳昕岩, 川島康生, 多幾山法子
2. 発表標題 福島県大内宿における構造調査に基づく伝統的茅葺住宅の振動性状の把握
3. 学会等名 日本建築学会関東支部研究報告集
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 川島康生, 弘末絢香, 陳昕岩, 多幾山法子
2. 発表標題 福島県前沢集落における伝統的中門造民家の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 2018年

1. 発表者名 陳昕岩, 多幾山法子
2. 発表標題 伝統木造住宅における仕様の異なる差鴨居接合部の力学特性の比較と復元力の推定
3. 学会等名 日本建築学会関東支部研究報告集
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山口あかり, 小池奨, 陳昕岩, 多幾山法子
2. 発表標題 既存木造建物の柱脚補強におけるアラミド繊維シート貼付形式の体系的検証実験
3. 学会等名 日本建築学会関東支部研究報告集
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Xinyan Chen and Noriko Takiyama
2. 発表標題 The modeling and simulation analysis of SASHIGAMOI Joint in traditional wooden house
3. 学会等名 Proceeding of The 4th International Conference on Preservation, Maintenance and Rehabilitation of Historic Buildings and Structures (REHAB2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 多幾山法子, 陳昕岩
2. 発表標題 既存木造住宅の耐震性向上を目指したアラミド繊維シート接合部補強法の展開(その1) 研究概要・基本的特性の理解
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 川島康生, 陳昕岩, 多幾山法子
2. 発表標題 既存木造住宅の耐震性向上を目指したアラミド繊維シート接合部補強法の展開(その2) 非含浸部位の設定・プレキャスト板
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 陳昕岩, 小池奨, 多幾山法子
2. 発表標題 既存木造住宅の耐震性向上を目指したアラミド繊維シート接合部補強法の展開(その3) 材料試験・シミュレーション解析
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小池奨, 陳昕岩, 多幾山法子
2. 発表標題 既存木造住宅の耐震性向上を目指したアラミド繊維シート接合部補強法の展開(その4) スプリット状貼付形式の提案
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 船津寛子, 陳昕岩, 多幾山法子
2. 発表標題 既存木造住宅の耐震性向上を目指したアラミド繊維シート接合部補強法の展開(その5)実大架構実験
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 陳昕岩, 多幾山法子
2. 発表標題 伝統木造住宅におけるプロポーションの異なる差鴨居接合部の力学特性
3. 学会等名 日本建築学会関東支部研究報告集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小池奨, 陳昕岩, 多幾山法子
2. 発表標題 静的加力実験に基づく硬質ウレタンフォームを充填した木造平面壁の力学特性の解明
3. 学会等名 日本建築学会関東支部研究報告集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 川島康生, 陳昕岩, 多幾山法子
2. 発表標題 福島県の伝統的家屋・曲家の耐震性評価及びL字型単層建物の等価1質点系縮約手法の提案
3. 学会等名 日本建築学会関東支部研究報告集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 船津寛子, 若林佑果, 陳昕岩, 多幾山法子
2. 発表標題 熊本地震で被災した木造住宅の断面欠損を有する筋交い耐力壁の破壊メカニズム検証実験
3. 学会等名 日本建築学会関東支部研究報告集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宇山史恩, 陳昕岩, 川島康生, 多幾山法子
2. 発表標題 喜多方市小田付の伝統的な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 2020年

1. 発表者名 扇野智弘, 浅岡優奈, 小池奨, 陳昕岩, 多幾山法子
2. 発表標題 アラミド繊維シート補強を施した実大木造軸組架構の倒壊実験に基づく地震時挙動の検証
3. 学会等名 日本建築学会関東支部研究報告集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 坪井弥, 川島康生, 陳昕岩, 多幾山法子
2. 発表標題 福島県大内宿における伝統木造住宅群の積雪による耐震性への影響とつし2階の評価値の比較
3. 学会等名 日本建築学会関東支部研究報告集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 陳昕岩, 多幾山法子
2. 発表標題 硬質ウレタンフォームを充填した木造平面壁の力学特性の解明(その1)ウレタンの材料特性と木造壁面の対角圧縮試験
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 舩津寛子, 陳昕岩, 多幾山法子
2. 発表標題 硬質ウレタンフォームを充填した木造平面壁の力学特性の解明(その2)実大架構実験と最大水平抵抗力の簡易評価式
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 扇野智弘, 陳昕岩, 多幾山法子
2. 発表標題 既存木造住宅の耐震性向上を目指したアラミド繊維シート接合部補強法の展開(その6)スプリット状貼付形式の追加実験
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集
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