

令和 3 年 5 月 2 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K13866

研究課題名(和文) ロバスト性に優れた京町家の柱・梁接合部における耐震補強法の開発

研究課題名(英文) Development of robust seismic retrofit for beam - column joints in traditional wooden townhouses in Kyoto

研究代表者

杉野 未奈 (Sugino, Mina)

京都大学・工学研究科・准教授

研究者番号：80758368

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、ロバスト性に優れた京町家の柱・梁接合部における耐震補強法を開発することを目指す。そのために、まず、頂部と中間層に同時に水平荷重を加えることで、接合部に曲げモーメント・軸力を同時に作用させることができる加力システムを開発した。開発した加力システムを用いた2層伝統軸組架構の静的加力実験の結果を分析することで、柱・梁接合部に曲げ・軸力、特に引張力が同時に作用したときの力学特性や破壊メカニズムを把握した。さらに、2層軸組架構の静的加力実験や接合部の引抜実験で生じた破壊性状を考慮して、接合部の破壊性状を改善するための耐震補強について検討して実験や解析を実施した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発した加力システムにより、2層軸組架構に任意の変形分布の大変形を与える実験が可能となり、軸力の効果を考慮した接合部のモーメント・回転角関係の分析のみならず、通し柱の効果の評価や壁付架構の模擬実験等が可能となることで、今後木造軸組架構の力学特性のさらなる解明が期待できる。また、本研究により複数の接合部補強法・対策を検討し実験を行った結果、各補強法・対策の特長や注意点が明らかになり、京町家の耐震補強を考える上での有用な資料として活用できる。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to develop a robust seismic reinforcement for beam-column joints of Machiya houses in Kyoto. First, we developed a load application system that can simultaneously apply bending moment and axial force to the joints by simultaneously applying horizontal loads to the top and middle layers. By analyzing the results of static loading tests of two-story traditional wooden frames using the developed system, the mechanical properties and failure mechanism of the beam-column joints when bending and axial forces, especially tensile forces, are applied simultaneously were understood. In addition, seismic reinforcement to improve the fracture properties of the joints was studied and experiments and analyses were conducted.

研究分野：耐震構造

キーワード：伝統木造建物 静的水平加力実験 耐震補強 柱 梁接合部

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

京都には、京町家と呼ばれる伝統木造住宅が多数現存している。それらの京町家は、過去に大地震を経験していないものが多い。一方、京都には、複数の活断層が存在し、内陸地殻内地震の発生が懸念される。以上より、京町家の耐震性能を把握するとともに、耐震性能の低い京町家に関しては適切な耐震補強を施すことが求められる。

そこで、申請者ほかは、京町家の耐震性能を把握するための調査や実験を実施してきた。その一環として実施した、耐力壁（耐力要素）を付加する一般的な耐震補強を施した京町家の一部を模した架構の静的加力実験<sup>①</sup>の結果、住宅の中で耐力要素がバランスよく配置されていない場合に、柱-梁接合部で梁の脱落や柱の折損が確認された。そのような住宅は地震時に自重を支えることができなくなり倒壊する恐れがある。申請者ほかの調査<sup>②</sup>により、耐力要素の配置が悪い京町家が多いことが明らかになっており、バランスよく耐力要素を配置して耐震補強することが望ましい。しかし、住民の動線などの住まい方や間取りの都合上、適切な場所に壁を設置し難いことが多い。また、仮に耐力要素の設置位置を工夫して最大耐力時にバランスを保っていたとしても、脆性破壊する耐力要素と靱性の高い耐力要素が混在していると大変形時に架構のバランスが崩れて、最終的に接合部が破壊されてしまう。更に、梁の脱落を防ぐために柱と梁を金物で緊結すると、柱が負担する力が増加して柱の折損が生じる危険性がある。

以上より、住宅を倒壊から守るためには、耐力要素のバランスが最適でなくとも、接合部が大変形まで破壊されずに機能することが望ましい。つまり、耐力要素の配置に関わらず耐震補強の効果がある、ロバスト性に優れた柱-梁接合部の耐震補強が望ましい。

### 2. 研究の目的

本研究では、ロバスト性に優れた京町家の柱-梁接合部における耐震補強法を開発することを目指す。ロバスト性に優れた柱-梁接合部とは、耐力要素の配置に関わらず微小変形から大変形まで機能する接合部であり、その条件は回転方向・軸方向について高い変形性能と適度な剛性を持つことである。剛性が低すぎると変形が進みすぎる一方、剛性が高すぎると柱に力が集中して折損する危険性があるため、適度な剛性が求められる。

そのために、まず、柱-梁接合部に曲げ・軸力、特に引張力が同時に作用したときの力学特性と破壊メカニズムを把握する。軸組のみで構成される2層軸組架構に任意の変形分布をかけることができれば、柱-梁接合部に引張力と曲げモーメントを同時に作用させることができるため、本研究では頂部と中間層に同時に水平荷重を加えることで、接合部に曲げモーメント・軸力を同時に作用させることができる加力システムを開発する。その上で、実験結果を分析することで柱-梁接合部の力学特性や破壊メカニズムを把握する。さらに、接合部の破壊性状を改善するための耐震補強について検討する。

### 3. 研究の方法

#### (1) 加力システムの開発

柱-梁接合部に曲げ・軸力、特に引張力が同時に作用したときの力学特性と破壊メカニズムを把握するため、2層軸組架構の頂部と中間層に同時に水平荷重を加えることで任意の変形分布をかけることができる加力システムを開発した。本研究で開発した加力システムを図1に示す。

軸組架構頂部への加力は、中川他<sup>③</sup>で報告されている柱脚・柱-梁接合部をピン接合とした加力フレーム全体が変形することで試験体を加力する既往の加力システムを用いる。軸組架構中間層の加力は、試験体の中間層梁両側面に取り付けた鋼板をロードセルで押すことで加力する。ロードセルが固定された中間鉄骨梁をローラー支持し、油圧ジャッキを用いて押し引きする。加力の制御については、頂部変位を手動制御とし、頂部変位と中間層変位の比が一定になるように中間層変位を自動で制御する。頂部変位と中間層変位の比は任意に設定することができる。

#### (2) 変形分布制御による2層軸組架構の静的加力実験

(1)で開発した加力システムを用いて、2層伝統木造軸組架構の静的加力加力実験を行った。実験の目的は、開発した加力システムの動作確認、変形分布が架構の復元力・応力・挙動に与える影響の定性的な把握、柱-梁接合部の違いによる架構の復元力・応力・挙動の違いの把握である。

試験体は、応力状態を明快に把握できるように、軸組で壁のない1スパン・2層の軸組試験体とした。柱-梁接合部が長ほぞ込接合および長ほぞ鼻接合である2体の試験体を加力した。加力は、正負交番2回繰り返し加力とし、1層・2層に与える層間変形角の比率として、1:1、1:0.5、1:0、1:0.25の4つのパターンを設定した。加力の様子を写真1に示す。

#### (3) 接合部補強を施した2層軸組架構の静的加力実験

(2)で実施した柱-梁接合部が長ほぞ込接合である2層軸組架構の静的加力実験で生じた破壊性状を考慮して、接合部補強を施した2層軸組架構の静的水平加力実験を行った。試験体は、

柱-梁接合部位置に柱繊維断裂防止のためにステンレスプレートを設けた試験体と、接合部の曲げモーメント低減と梁の抜け出し防止のために FMS 合金ダンパーを付加した試験体の 2 体とした。接合部の補強状況を写真 2 に示す。静的水平加力には、(1) で開発した加力システムを用いた。また、梁の圧縮・抜け出しと曲げを伴う接合部および架構の挙動を評価するための、汎用プログラムによる実用的な 2 次元 FEM モデルを構築した。

#### (4) 込栓接合部の引抜実験

接合部仕様の違いによる破壊メカニズムや耐震性能の変化を把握するとともに、補強効果を把握するために、長ほぞ込栓接合の柱-梁接合部の引抜試験を実施した。試験体は、栓やほぞの樹種、ほぞの端あき長さ、柱長さ、柱の仕口切欠の有無を変化させた。また、地震後の対策を想定して加力後の試験体に対して栓を打ち直しての再加力、履歴特性の把握のための繰り返し加力、破壊が生じると想定される位置に金物で補強を施した試験体の加力もあわせて、計 26 体の試験体に対して加力実験を実施した。

### 4. 研究成果

#### (1) 加力システムの開発

今回新たに開発したシステムについて、架構全体の変形角、1 層層間変形角ともに 1/5rad 以上にいたる大変形まで目標とする 2 層各層の変形分布で加力が可能であることを確認した。このシステムの実現により、2 層軸組架構に任意の変形分布の大変形を与える実験が可能となり、軸力の効果を考慮した接合部のモーメント-回転角関係の分析のみならず、通し柱の効果の評価や壁付架構の模擬実験等が可能となることで、今後木造軸組架構の力学特性のさらなる解明が期待できる。

#### (2) 変形分布制御による 2 層軸組架構の静的加力実験

本研究で開発した加力システムを用いて、通し柱を含む 2 層木造軸組架構の加力実験を行った結果、柱-梁接合部において、各層の変形分布によって接合部に生ずるモーメントおよび梁に生ずる軸力が異なることが確認された。また、鼻栓・込栓の接合部の違いによって、架構の崩壊形式が異なることが確認された。特に込栓を用いた試験体については、柱の大きな割裂による破壊モードが観察された。この形式の破壊は、破壊直前までの加力で柱繊維が切断され切欠き状態となり、それを起点とする曲げ破壊によって割裂が生じたとすることで説明が可能であることを確認した。

#### (3) 接合部補強を施した 2 層軸組架構の静的加力実験

通し柱を有する 2 体の 2 層軸組架構について、柱-梁接合部に補強を施した試験体に対する静的加力実験を行い、架構および接合部の挙動を把握するとともに、補強の有効性について考察を行った。今回考案したステンレスプレートによる補強は、簡易な対策で柱繊維断裂とそれに起因する柱の曲げ破壊を防ぐことが可能であることを確認した。FMS 合金ダンパーでは、梁の抜け出しを防ぐ効果を確認した。また、非補強試験体で生じていたような梁の下端で生じる柱の曲げ破壊を防ぐことができたが、ダンパー固定治具下端での柱の曲げ破壊が生じた。

そして、柱-梁接合部の引張・圧縮と曲げによる挙動の評価を可能とする、実用的な 2 次元 FEM モデルを考案し、良い精度で実験結果を模擬できることを確認した。

#### (4) 込栓接合部の引抜実験

引抜実験の結果についてパラメータごとに分類し、復元力特性や破壊性状の違いを確認し考察を行った。また、代表的な破壊性状の破壊メカニズムについて検討を行った。例えば写真 3 に示すように、栓の樹種(カシ・ベイマツ)を変えることによって、栓の破壊性状が異なることで柱の割裂といった大変形時の柱の損傷状況が変化することを確認した。また、地震後に栓を打ち直しても地震前の復元力まで回復しないことや、破壊が生じると想定される位置に金物で補強を施した場合に破壊性状がどのように変化するかを把握した。

#### <引用文献>

- ① 小池哲朗, 大村早紀, 杉野未奈, 林康裕: 京町家の耐震補強に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 82 巻, No. 736, pp. 843-852, 2017. 6.
- ② 徳岡怜美, 内田賢, 杉野未奈, 林康裕: 1 列 3 段型の京町家の間口方向構面における架構の構造的特徴, 日本建築学会技術報告集, 第 24 巻, No. 53, pp. 119-122, 2017. 2.
- ③ 中川敦嗣, 多幾山法子, 林康裕: 2 階建京町家を想定した実大平面架構の大変形静的加力実験, 日本建築学会構造系論文集, 第 78 巻, No. 685, pp. 513-520, 2013. 3.

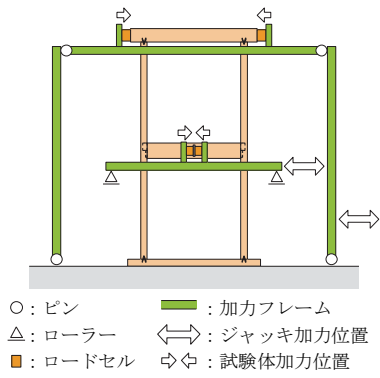
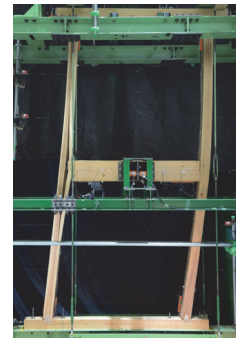


図1 加力システム

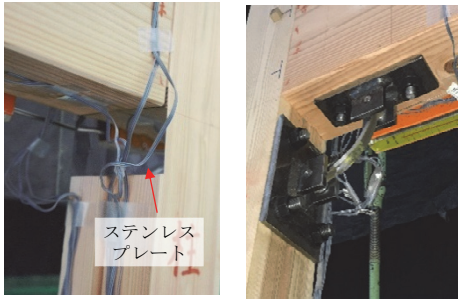


(a) 鼻栓試験体



(b) 込栓試験体

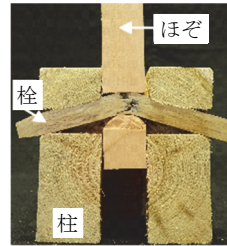
写真1 2層軸組架構の加力風景



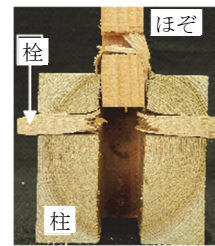
(a) ステンレスプレート

(b) FMS合金ダンパー

写真2 接合部補強状況



(a) 栓：カシ



(b) 栓：ベイマツ

写真3 接合部引抜実験の損傷例

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 青木和雄, 李唐怡, 杉野未奈, 林康裕	4. 巻 86
2. 論文標題 変形分布制御による伝統木造軸組架構の静的水平加力実験	5. 発行年 2021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 415 ~ 423
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aijs.86.415	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12件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 木本雄太, 給田ありさ, 李唐怡, 青木和雄, 杉野未奈, 林康裕
2. 発表標題 伝統木造建物における込栓接合部の破壊メカニズム評価に関する研究(その1)接合部引抜実験の試験体概要と材料試験
3. 学会等名 日本建築学会大会（東海）学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 給田ありさ, 李唐怡, 青木和雄, 杉野未奈, 林康裕
2. 発表標題 伝統木造建物における込栓接合部の破壊メカニズム評価に関する研究(その2)実験結果および考察
3. 学会等名 日本建築学会大会（東海）学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 李唐怡, 青木和雄, 給田ありさ, 杉野未奈, 林康裕
2. 発表標題 通し柱・差鴨居を有する伝統木造軸組架構の接合部補強に関する研究(その1)接合部補強を施した2層軸組架構の静的加力実験
3. 学会等名 日本建築学会大会（東海）学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 青木和雄, 李唐怡, 給田ありさ, 杉野未奈, 林康裕
2. 発表標題 通し柱・差鴨居を有する伝統木造軸組架構の接合部補強に関する研究(その2)2次元FEMによる接合部挙動の検討
3. 学会等名 日本建築学会大会(東海)学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 給田ありさ, 李唐怡, 青木和雄, 杉野未奈, 林康裕
2. 発表標題 伝統木造建物における込栓接合部の破壊メカニズム評価に関する研究
3. 学会等名 令和3年度日本建築学会近畿支部研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 李唐怡, 青木和雄, 給田ありさ, 杉野未奈, 林康裕
2. 発表標題 通し柱を有する伝統木造軸組架構の接合部補強に関する研究(その1)接合部補強を施した2層軸組架構の静的加力実験
3. 学会等名 令和3年度日本建築学会近畿支部研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 青木和雄, 李唐怡, 給田ありさ, 杉野未奈, 林康裕
2. 発表標題 通し柱を有する伝統木造軸組架構の接合部補強に関する研究(その2)2次元FEMによる接合部挙動の検討
3. 学会等名 令和3年度日本建築学会近畿支部研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 青木和雄, 李唐怡, 杉野未奈, 林康裕
2. 発表標題 異なる接合部仕様を有する伝統木造軸組架構の変形分布制御静的水平加力実験
3. 学会等名 令和2年度日本建築学会近畿支部研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 李唐怡, 青木和雄, 杉野未奈, 林康裕
2. 発表標題 変形分布制御による伝統木造軸組架構の静的水平加力実験(その3)異なる接合部を有する試験体の実験結果
3. 学会等名 日本建築学会大会(関東)学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 青木和雄, 李唐怡, 杉野未奈, 林康裕
2. 発表標題 変形分布制御による伝統木造軸組架構の静的水平加力実験(その4)接触問題を適用した2次元FEMモデルによる解析
3. 学会等名 日本建築学会大会(関東)学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 青木和雄, 李唐怡, 杉野未奈, 林康裕
2. 発表標題 変形分布制御による伝統木造軸組架構の静的水平加力実験(その1)加力システムの開発と実験概要
3. 学会等名 日本建築学会大会(北陸)学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 李唐怡, 青木和雄, 杉野未奈, 林康裕
2. 発表標題 変形分布制御による伝統木造軸組架構の静的水平加力実験(その2) 実験結果の分析
3. 学会等名 日本建築学会大会(北陸) 学術講演会
4. 発表年 2019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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------