

令和 6 年 5 月 17 日現在

機関番号：12501

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2021～2023

課題番号：21K20458

研究課題名（和文）木質構造の引きボルト式柱脚接合部の変形と破壊のメカニズム解明および評価法構築

研究課題名（英文）Elucidation of deformation and failure mechanisms of tensile-bolted connection in timber structures and development of evaluation methods

研究代表者

戸塚 真里奈（Totsuka, Marina）

千葉大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号：60893774

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、中高層木質構造でよく用いられる接合部の一つである引きボルト式接合部に着目した実験および解析的研究を行った。引きボルト式接合部はすでに知られているボルトの降伏、座金下木材の圧縮降伏、木材のせん断破壊、木材の曲げ破壊のほかに割裂破壊が生じることが分かった。割裂破壊は脆性的な破壊で最大耐力後に荷重がゼロまで低下する危険な破壊であった。さらに割裂破壊の原因は木口面付近のボルト周りの応力集中であることが分かった。割裂破壊の評価手法として破壊力学を用いた手法を提案し実験値を概ね評価出来ることを確認した。また、割裂破壊は木質構造用ねじを木材の断面を横断するように打つことで防止できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、中高層木質構造に引きボルト式接合部を用いた場合の破壊モードを明確にできた。また、今まで破壊メカニズムがわかっていなかった引きボルト式接合部の割裂についてそのメカニズムを明らかにしたことで破壊荷重を予測できるようにした。また、引きボルト式接合部は柱脚だけでなく、柱梁接合部や梁の継手としてもつかわれる。提案する柱脚の評価法は鉛直荷重をゼロとすれば柱梁や梁継手に応用できる。

研究成果の概要（英文）：This experimental and analytical study focused on tensile-bolted connections, which are one of the most commonly used joints in mid- to high-rise timber structures. It was found that tensile-bolted connections can fail by splitting, in addition to the well-known types of bolts yielding, compression yielding of the wood under the washer, shear failure of the wood, and bending failure of the wood. Split failure is a brittle failure, which means that the load drops to zero after the maximum bearing capacity. Furthermore, the cause of split failure was found to be the stress concentration around the bolts near the end grain. A method using fracture mechanics was proposed to evaluate the split failure, and it was confirmed that the experimental values could be generally evaluated. It was also shown that split fracture can be prevented by driving a self-tapping screw across the cross section of the wood.

研究分野：木質構造

キーワード：木質構造 引きボルト 割裂 繊維方向圧縮

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

中大規模建物を木質構造で建てることにより、CO<sub>2</sub>を大量に固定化し地球温暖化を防止することが効果的な手段の一つである。一方で木質構造を中大規模建物に用いると接合部に大きな応力が生じて、今まで想定されていなかった変形や破壊が生じることがある。

その一つに引きボルト式柱脚接合部(図1)の繊維方向の圧縮変形と割裂破壊がある。図1の接合部は引張側では座金直下の木材が繊維方向に圧縮変形し、圧縮側では鉄骨土台と接する木材が繊維方向に三角めり込み変形する。今まで木質構造の主戦場であった低層建物では、繊維方向の圧縮変形が無視できるほど小さかったため、繊維方向圧縮や三角めり込みのメカニズムが未解明で、理論的な評価法も存在しない。さらに、申請者が予備試験として行った図1の引張側を想定した要素試験では、これまで想定されていなかった図2のような割裂破壊モードが見られた。この割裂破壊モードは、最大耐力到達後に急激に荷重が低下するため脆性的で危険なモードである。しかし、発生条件が不明で現在の構造設計法には組み込まれておらず、危険な現状がある。

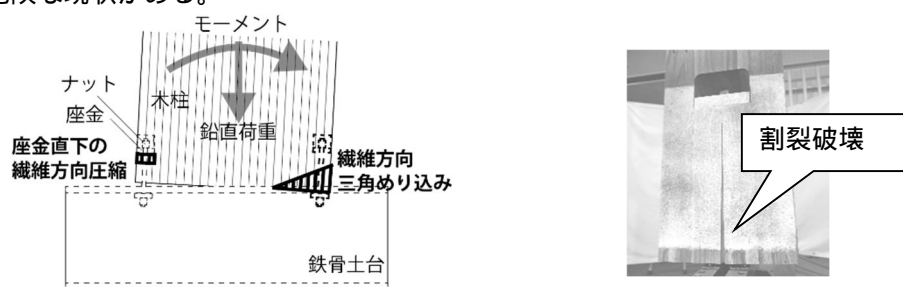


図1 引きボルト式柱脚接合部の変形 図2 引きボルト式接合部の割裂破壊

引きボルト式柱脚接合部は施工の簡易さ、剛性・耐力の高さから中大規模木質構造に有用である。しかし、上記の背景から中大規模木質構造の柱脚に引きボルト式接合部を用いる際は、寸法や樹種が変わるごとに実大実験を行い剛性と耐力を確認している現状がある。実大実験は時間も費用もかかるため、中大規模建物に木質構造を採用する足かせとなっている。

### 2. 研究の目的

本研究では引きボルト式柱脚接合部の繊維方向の圧縮変形や割裂破壊のメカニズムを解明し、評価法を提案することを目的とする。

### 3. 研究の方法

研究手法を下記に示す。

#### (1) 引きボルトを用いた柱土台接合部の水平繰返し実験(図3)

本実験は地震力や風力などの繰返し水平力を受ける引きボルト式接合部の柱土台について発生する破壊モードを整理するために実施した。試験変数は接合部の寸法である。

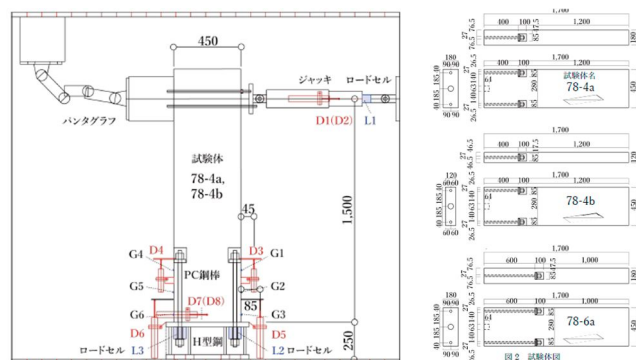


図3 水平繰返し実験加力装置と試験体一覧

(2) 引きボルト式接合部の鉛直引張実験と補強方法考案 (図4)

水平繰り返し実験により引きボルト式接合部では今まで想定されていなかった割裂破壊が生じることが分かった。一方、どのような条件(寸法, 樹種, 金物)で割裂破壊が生じるかが不明であったため, 本実験によりそれらを明らかにした。また, 割裂破壊の防止方法を検討した。防止手法は木質構造用ねじとし数値解析の結果を参考に打ち込み位置を検討した。

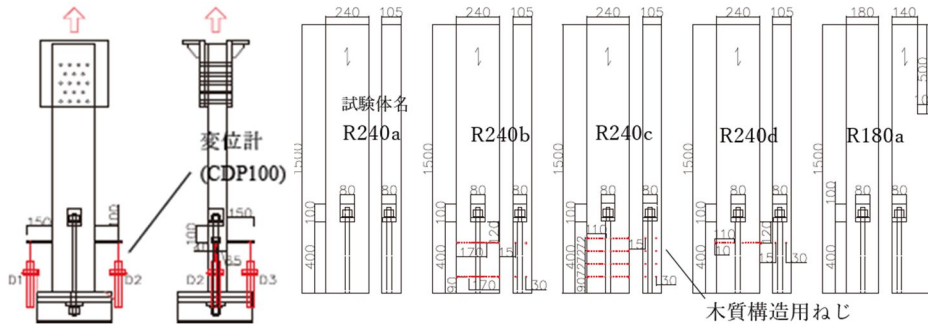


図4 鉛直引張実験加力装置とねじによる補強

(3) 引きボルト式接合部の有限要素法を用いた数値解析 (図5)

割裂破壊の評価法を提案するためには割裂破壊が生じるメカニズムを解明する必要がある。本解析では上記の実験の数値解析を実施し応力分布を検討した。また, パラメトリックスタディにより割裂が発生しうる状況を検討した。

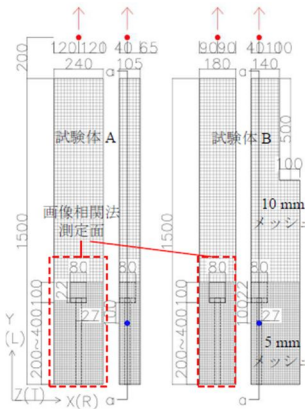


図5 解析モデルと変数

(4) 割裂破壊の評価法構築

これまでの実験データと数値解析結果から割裂破壊がボルト周りの応力集中により生じていることが分かった。破壊力学を用いて外力(荷重×変位)と内力(き裂長さ×破壊エネルギー)のつり合いから導き出される割裂破壊の評価法を提案した。

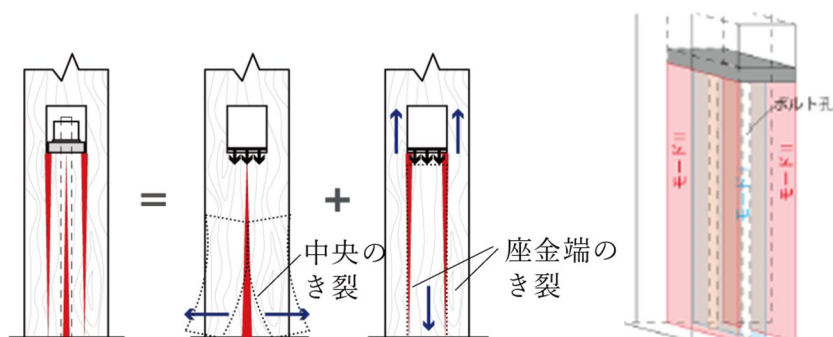


図6 割裂破壊の評価法概念図

(5) 接合部の木材の繊維方向圧縮変形と既存式の適応性検討

木材が繊維方向に圧縮される際の変形は算定式がない現状がある。設計者はドリフトピン接合部のすべり変形を算出するための実験式を引きボルト式接合部にも使用しているが, その妥当性は検証されていない。本研究ではこれまでの実験データを用いて

木材の繊維方向圧縮変形について既存のドリフトピン式が適用可能かを検討した。

#### 4. 研究成果

##### (1) 引きボルトを用いた柱土台接合部の水平繰り返し実験

引きボルト式接合部はすでに知られているボルトの降伏，座金下木材の圧縮降伏，木材のせん断破壊，木材の曲げ破壊のほかに割裂破壊が生じることが分かった。また，割裂破壊は脆性的な破壊で最大耐力後に荷重がゼロまで低下する危険な破壊であった。一方，木材の圧縮降伏は降伏後荷重が横ばいになり靱性の高い荷重変形関係になることが分かった。

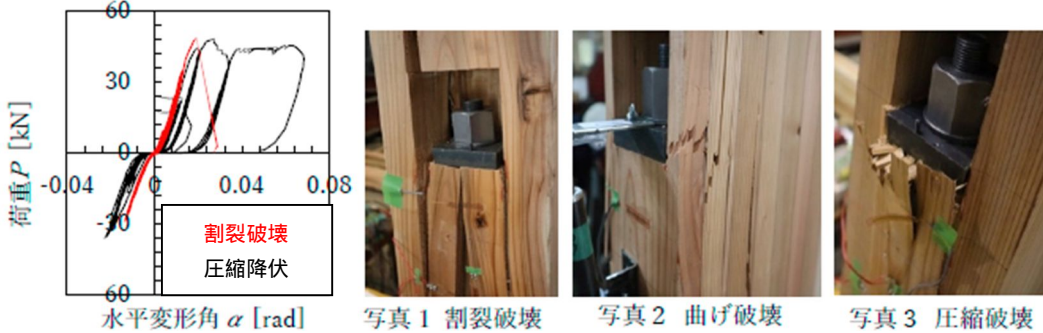


図7 代表的な荷重変位関係（木材の圧縮と割裂）と破壊モード

##### (2) 引きボルト式接合部の鉛直引張実験と補強方法考案

鉛直引張においてボルト長さが長く，角座金の大きい試験体で割裂破壊が生じることが分かった。また，割裂は画像相関法の表面ひずみより木口面付近の横引張力が原因であることが観察された。割裂を防止するためには木口面付近の横引張力を補強することが有用であり，全ねじの木質構造用ねじを打ち込むことで防止できた。

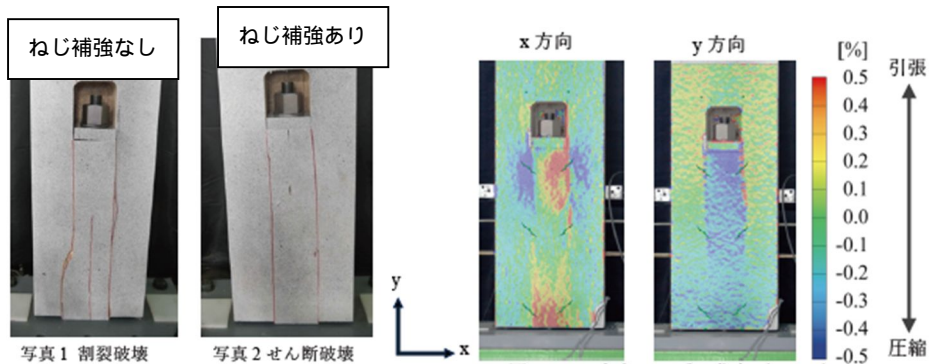


図8 ねじ補強なし・あり試験体の破壊状況と割裂破壊した試験体の表面ひずみ

##### (3) 引きボルト式接合部の有限要素法を用いた数値解析

引きボルト式接合部の数値解析によるひずみ分布と実験中の画像相関法による表面ひずみは応力集中部分が一致し解析の妥当性が示された。また，解析結果から横引張ひずみが最も大きく出ているのは木口面付近のボルト孔周りであった。よって，割裂破壊の原因は木口面付近のボルト孔周りに生じる横引張応力の集中であることが分かった。さらに，この応力集中は座金下木部の長さが小さいほど大きくなることが分かった。

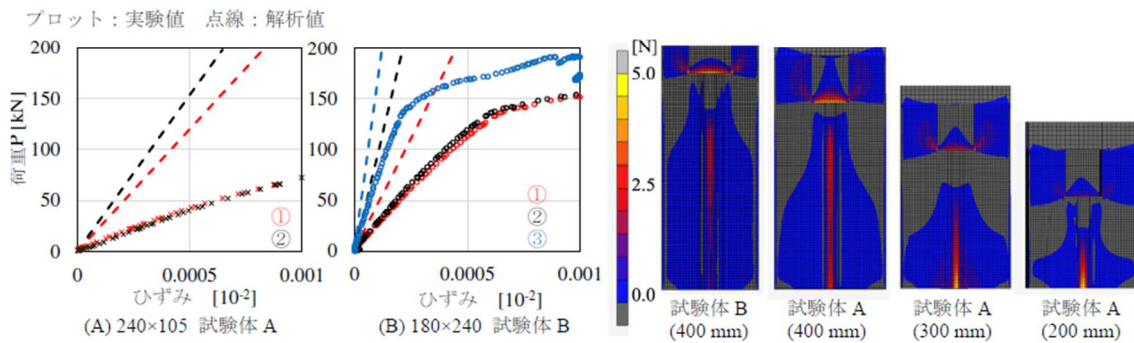
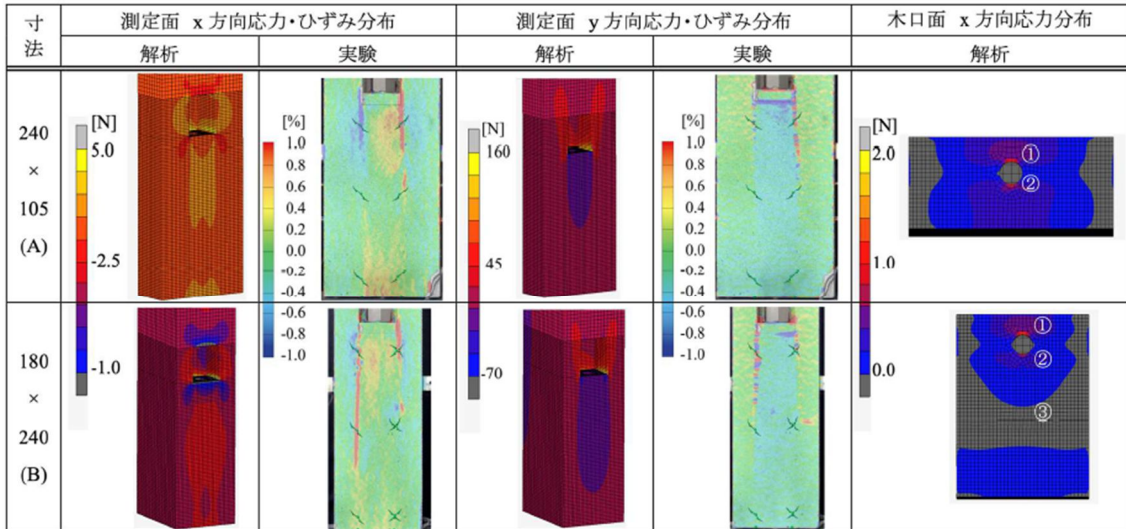


図9 数値解析による結果と実験の比較および座金下木部長さが異なる場合の応力集中

(4) 割裂破壊の評価法構築

提案する評価法は実験値の0.7~1.3倍であり、実験値を概ね評価出来ていた。

(5) 接合部の木材の繊維方向圧縮変形と既存式の適応性検討

ドリフトピン接合部のすべり変形を算出するための実験式を引きボルト接合部の木材の繊維方向圧縮変位に当てはめると、計算値は実験値の約3倍（座金下の変形）と2倍（柱脚の三角縦圧縮）であった。よって引きボルト式接合部の繊維方向圧縮変形にドリフトピン接合部のすべり変形の評価法を適用することは難しく、新たな評価法の必要性が示された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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 TOTSUKA Marina, HAYAKAWA Jun, AOKI Kenji, INAYAMA Masahiro	4. 巻 87
2. 論文標題 EVALUATION OF STIFFNESS PARALLEL TO GRAIN OF WOOD BASED ON STRONGEST LINK MODEL	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)	6. 最初と最後の頁 770～779
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3130/aijs.87.770	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 Totsuka Marina, Jockwer Robert, Kawahara Hiro, Aoki Kenji, Inayama Masahiro	4. 巻 68
2. 論文標題 Experimental study of compressive properties parallel to grain of glulam	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Wood Science	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） 10.1186/s10086-022-02040-7	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

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 鈴木みなみ, 中山征人, 戸塚真里奈, 平島岳夫, 山崎義弘
2. 発表標題 引きボルト接合部の耐力・剛性及び破壊モード
3. 学会等名 日本建築学会関東支部
4. 発表年 2023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
---------	---------