

令和 4 年 5 月 27 日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K06180

研究課題名（和文）プレストレスを利用する新しい木質ラーメン用剛接合部の開発

研究課題名（英文）Development of novel rigid joint for timber frame structures employing pre-stressing

研究代表者

松原 独歩（Matsubara, Doppo）

近畿大学・産業理工学部・特任講師

研究者番号：10560154

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）：プレストレスを与えた木材接合部の長期応力緩和挙動と接合性能に関して実験的・解析的に検討し、次の知見を得た。LVLや圧縮木材の繊維方向にプレストレスを与えることで、厳しい環境条件下においても高いプレストレスを保持する可能性を発見した。また、外力に対するボルト軸力の増加分割合である内力係数が接合性能評価や設計において重要な因子であることを見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

プレストレスを与えた木材接合部は、温湿度等の環境条件によってプレストレスが減少し、長期的にプレストレスが維持できないものと考えられてきた。このような状況下で本研究により、プレストレスを長期的に維持する条件が示される共に、接合性能評価・設計において新しい考え方が示され、学術的、社会的に意義のある成果が得られた。

研究成果の概要（英文）：The long-term stress relaxation behavior and joint performance of prestressed timber joints were investigated experimentally and analytically. Our findings were as follows. By applying prestress in the fiber direction of LVL and compressed wood, we discovered the possibility of maintaining high pre-stress even under harsh environmental conditions. It was also found that the load factor, which is the ratio of the increase in the bolt axial force to the external load, is an important factor in the evaluation and design of joining performance.

研究分野：木材工学、木質構造学

キーワード：プレストレス 応力緩和 内力係数 LVL 圧縮木材 劣化促進処理

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

中大規模木造建築では、大開口が要求されることが多く、その要求を満たすと共に、魅力的な空間を創造することが可能な構造形式として木質ラーメン構造が挙げられ、近年これに関連する研究開発が活発に進められている。木質ラーメン構造の耐震性能を決定する要因は主として接合部の性能である。一般的に、接合部は剛接合を形成することは難しく、接合部自体が変形する、いわゆる半剛接合となる。そのため、接合部の変形を考慮した複雑な構造計算が必要となっている。接合部を剛接合とする手法として、木質構造以外の構造物の接合部として、プレストレス（圧縮力）を与えるプレストレス接合が挙げられる。これに習い、木質構造接合部においても木質材料同士にプレストレスを与えれば、名実共に”木質材料同士の剛接合部”の実現が期待できる。しかし、木材にプレストレスを与えたとしても、プレストレスは、木材の応力緩和や乾燥収縮によって長期的に期待できないとされてきた。

### 2. 研究の目的

前述の背景より、本研究では、プレストレスを利用する木質材料同士の新しい剛接合部を実現させることを最終目標とし、本研究期間内では、厳しい温湿度環境下におけるプレストレスを与えた接合部の長期応力緩和挙動や接合性能について、実験・解析を通じて明らかにすることを目的とした。

### 3. 研究の方法

前述の目的を達成するために、以下の実験的・解析的検討を行った。

#### (1) プレストレスを与えた接合部の長期応力緩和・劣化促進処理実験

試験体は、①木材(スギ)の繊維に対する直交方向(横圧縮)、②木材(スギ)の繊維方向(縦圧縮)、③圧縮木材をスギ材に接着挿入(圧縮木接着挿入)、④LVLをスギ材に接着挿入(LVL接着挿入)、⑤縦圧縮と横圧縮の組み合わせ、⑥圧縮木接着挿入と縦圧縮の組み合わせ、⑦LVL接着挿入と縦圧縮の組み合わせ、の試験体を用意し、ひずみゲージを挿入したボルトを用いてプレストレスを与えた。それぞれの試験体を富山県農林水産総合技術センターの屋根裏に設置し、応力緩和挙動の長期観察を行った。なお、屋根裏の温湿度の制御は行っておらず、一年を通じて温湿度環境が変動する条件となっている。また併せて、相山女学園大学にて、上記試験体の劣化促進処理実験を行い、応力緩和挙動の長期観察を行った。劣化促進処理実験は、劣化促進処理(飽水、乾燥、飽水、乾燥、静置(2日間))を順に行った。飽水処理は $20\pm 3^{\circ}\text{C}$ で4時間、乾燥処理は、 $60\pm 3^{\circ}\text{C}$ の恒温環境にて20時間、静置は室内で実施した。

#### (2) プレストレスを与えた柱脚接合部の引張・モーメント抵抗実験と有限要素解析

集成材(強度区分:E105-F300)を用いて柱脚接合部試験体を作成し、引張実験、モーメント抵抗実験に供した。引張実験においては、ひずみゲージを挿入した単一引きボルト接合部とし、部材軸方向に万能試験機を用いてボルトが破断するまで引張荷重を加えた。プレストレス(ボルト締付け力)を3水準(それぞれ、ボルトの0.2%耐力の70, 50, 30%)、ボルト定着長さを3水準とし、各条件3体とした。モーメント抵抗実験においては、ひずみゲージを挿入したボルトを集成材部材の両端に引きボルト式接合部とし、油圧ジャッキを用いて頂部に水平荷重を加え、接合部にモーメントを与えた。プレストレスを3水準(それぞれ、ボルトの0.2%耐力の70, 50, 30%)とした。実験は、 $1/150$  radに相当する変形角まで押し引き1回行った。また、引張実験・モーメント抵抗実験の有限要素解析(FEA)を実施し、実験結果と解析結果の比較を行い、解析手法の妥当性と接合性能の評価を行った。

### 4. 研究成果

#### (1) 室内環境下の接合部の応力緩和挙動と劣化促進処理による応力緩和挙動

応力緩和実験では、全試験体について湿度の影響と考えられる応力比の増減が見られた。①横圧縮の応力緩和が最も大きく、2年経過した段階でプレストレスはほぼゼロとなった。①以外の試験体に着目すると、②～④は、①よりプレストレス低下の幅が小さかった。⑤～⑦試験体について、⑤は応力比0.06となり、①と同様、プレストレスはほぼゼロとなった。また、⑥は⑤より3倍以上のプレストレスを維持することがわかった。次に、①、⑤試験体以外の5試験体(②, ③, ④, ⑥, ⑦)について、実験開始後1年後に増し締めを行い、その後約1年間の応力比を計測した。その結果、増し締め直後の応力比は②～④で概ね0.6以上、⑥、⑦で0.3以上となり増し締めによる効果が確認された。増し締めから約1年となる378日後の応力比は、増し締めを行った全試験体で軸力比が増し締め前より1.12～1.49倍上昇していた。これは、定期的な増し締めによって高いプレストレスを維持できる可能性があることを示唆している。増し締め前後で最も応力比が高かったのは④LVL挿入であった。劣化促進処理実験では、①は、静置の2日間が終わる前に応力比が0となった。また、静置2日後の応力比は、②が0.38、⑥が0.23、⑦は0.51となり、縦圧縮とLVLを組み合わせた試験体でプレストレスの残存が大きいことがわかった。また、約560日以上経過後、0.50となり、高いプレストレスを維持することがわかった。

以上のことから、LVL もしくは圧縮木材の繊維方向にプレストレスを与えることで、乾湿繰り返しおよび水の影響を受けながらも、プレストレスを維持できる可能性を見出した。

(2) プレストレスを与えた柱脚接合部の引張・モーメント抵抗性能

引張実験において、引張荷重と接合界面の変位の関係は、初期にほぼ剛の立上りとなり、プレストレスを大きくするに従い、荷重の第一折れ点が大きくなることがわかった。この第一折れ点は、接合界面の分離挙動に対応し、プレストレスを大きくするに従い、接合界面の分離荷重も大きくなった。また、引張外力に対するボルト軸力の増加割合である内力係数を調べたところ、プレストレスを大きくするに従い低下傾向にあること、定着長さを大きくするに従い、その低下傾向が鈍化することが明らかとなった。さらに、内力係数から算出される接合界面分離荷重を計算したところ、実験値をほぼ捉えたことから、内力係数がプレストレス接合における設計において重要な因子であることが判明した。一方、有限要素解析ソフトの Abaqus を用いて有限要素解析を実施し、引張実験結果と解析結果を比較した。その結果、ボルト軸力と外力線図の傾向を解析結果はほぼ捉え、内力係数については定着長さが大きくなるほど、解析値は実験値に近似する傾向となることが明らかとなった。また、モーメント抵抗実験においては、プレストレスを大きくするに従い、モーメント回転剛性が大きくなる傾向にあることがわかった。さらにボルト軸力とモーメントの関係を調べたところ、初期の傾きは、プレストレスを大きくするに従い小さくなる傾向にあることがわかった。この傾きは内力係数に相当するものであるが、内力係数を正しく評価するには、モーメントをボルト軸方向引張外力に換算せねばならない。そこで、有限要素解析を実施し、まずモーメント-回転角の関係を抽出し、実験結果との比較を行った。その結果、解析結果と実験結果は一致しないことが判明した。解析モデルにおける材料構成則の見直しが必要となった。

以上のことから、内力係数がプレストレス柱脚接合部の性能評価や設計において重要な因子であることを見出した。

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 2件）

1. 著者名 Matsubara Doppo, Wakashima Yoshiaki, Shimizu Hidemaru, Kitamori Akihisa	4. 巻 66
2. 論文標題 The load factor in bolted timber joints under external tensile loads	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Wood Science	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s10086-020-01857-4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Teranishi Masaki, Matsubara Doppo, Wakashima Yoshiaki, Shimizu Hidemaru, Kitamori Akihisa	4. 巻 67
2. 論文標題 Nonlinear finite-element analysis of embedment behavior of metal washer in bolted timber joints	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Wood Science	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s10086-021-01973-9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Teranishi Masaki, Matsubara Doppo	4. 巻 -
2. 論文標題 Pretension loss in bolted timber joint under external tensile load	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 European Journal of Wood and Wood Products	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s00107-022-01827-1	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4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 杉山由起, 清水秀丸, 松原独歩, 若島嘉朗, 北守顕久, 村上心
2. 発表標題 プレストレスを利用する新しい木質ラーメン用剛接合部の開発 その1 応力緩和・劣化促進実験
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松原独歩, 若島嘉朗, 寺西正輝, 清水秀丸, 北守顕久
2. 発表標題 木質構造ボルト接合部の弾性相互作用
3. 学会等名 日本木材学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 清水秀丸, 松原独歩, 若島嘉朗, 寺西正輝, 北守顕久
2. 発表標題 木質構造ボルト接合の応力緩和実験および劣化促進実験
3. 学会等名 日本木材学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松原独歩, 若島嘉朗, 清水秀丸, 北守顕久
2. 発表標題 集成材引きボルト接合部の内力係数
3. 学会等名 日本建築学会
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
研究分担者	若島 嘉朗  (Wakashima Yoshiaki)  (10446635)	富山県農林水産総合技術センター・富山県農林水産総合技術センター木材研究所・副主幹研究員    (83207)	

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
研究分担者	北守 顕久  (Kitamori Akihisa)  (10551400)	大阪産業大学・工学部・准教授    (34407)	
研究分担者	清水 秀丸  (Shimizu Hidemaru)  (70378917)	椋山女学園大学・生活科学部・講師    (33906)	
研究分担者	寺西 正輝  (Teranishi Masaki)  (80798322)	新潟大学・研究推進機構・助教    (13101)	

	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	藤澤 泰士  (Fujisawa Yasushi)		

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