

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 10 日現在

機関番号：17601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420487

研究課題名(和文) 木部材ボルト接合でのボルト孔に充填された樹脂効果の設計への反映

研究課題名(英文) Reflection of the effect of resin filled into bolt hole to design of bolted connection in timber member

研究代表者

今井 富士夫 (IMAI, FUJIO)

宮崎大学・工学部・教授

研究者番号：00038077

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：木部材のボルト接合ではボルトとボルト孔の隙間のガタを防ぐために充填された樹脂がボルト接合機能を大きく向上させることが、著者らの研究で明らかにされてきた。しかしながら、これらの実験ではボルトがボルト孔の中央に挿入されたもので、施工ではボルトはボルト孔の様々な位置に偏在し、偏在により樹脂効果は低減する。

本研究ではボルト偏在による負の影響を除去できる工法を考案するとともに、樹脂もエポキシ樹脂に加えてアクリル樹脂についても検討を行っている。また、接合部の非線形解析のための精度のよい解析モデルを提案した。加えて、木材と木ねじの引抜け内部挙動を視覚化するため、CTスキャンの適用性についても検討した。

研究成果の概要(英文)：A resin has been filled into a clearance between bolt and bolt hole in a bolted connection of timber member and the resin improve a performance of the bolted connection. The bolt have been set at the center of the bolt hole in these experiments, but it was difficult to set the bolt at the center in construction and the deviation of bolts reduces the resin effect.

In this study, we first proposed the bolt hole with a taper to eliminate the negative influence by the bolt deviation. By applying the new hole, the resin effect was improved more and the concern for the bolt deviation was wiped out. The epoxy resin has been used in these experiments. So, we also carried out the experiment of an acrylic resin to examine the effect of different resins. We proposed accurate analysis model of the non-linear behavior of the bolted connection. Furthermore, we examined the applicability of CT scan to visualize the internal behavior of pull out various wood screws from wood.

研究分野：工学

キーワード：集成木部材 ボルト接合 樹脂充填 テーパー付きボルト孔 非線形解析 CTスキャン

1. 研究開始当初の背景

木橋の木部材の接合にはボルト接合が採用されており、その接合法ではボルト孔はボルトよりも大きくして、その隙間によるガタを防ぐために、隙間には樹脂が充填されている。これまでの著者らの研究で、充填した樹脂はボルト接合部の機能(初期剛性、降伏荷重、終局荷重)をボルト孔と同一サイズのボルトの設計値とほぼ同等にまで向上させることを明らかにしてきた。このことは設計でのボルト本数の削減とそれに伴う施工の省力化を可能とするものである。しかしながら、これまでの実験ではボルトはボルト孔の中央に挿入されたものであるが、実際の施工ではボルトをボルト孔の中央に配置することは極めて困難であり、ボルト孔内部で様々な位置に偏在するのが一般的で、ボルト偏在は樹脂効果を低減させることが考えられる。樹脂効果を設計に反映するためには、ボルトの偏在に関わらず、樹脂効果を維持することが重要であり、偏在の負の影響を受けないボルト挿入法を考案する必要があった。

接合部の開発には、接合部の終局に至るまでの接合部の挙動も実験と並行して捉えることは重要であるが、これまで著者らは解析モデルの開発に取り組んできたものの十分なモデルの提案には至っていない。

2. 研究の目的

本研究では樹脂効果を設計に反映させるため、前述の課題を解決することを目的に、以下の(1)~(3)の項目を当初の課題としていた。

(1) ボルト偏在の負の影響の除去

ボルト孔内部でのボルトの偏在に影響を受けることなく、樹脂効果を発揮でき、かつ樹脂型での応力集中を軽減できる新たなボルト接合法を提案する。

(2) 充填樹脂の選定

これまでの実験では、1種類のエポキシ樹脂を使用してきた。樹脂材料の選択肢を広げるため、エポキシ樹脂に加えて、土木分野で広く使用されているアクリル樹脂についても検討する。

(3) 解析モデルの開発

終局に至るまでのボルトのめり込みを含む非線形

挙動を精度よく解析できる FEM モデルを提案し、実験との比較により、その妥当性を確認する。

(4) 木部材からの金物治具の引抜き挙動の可視化

この項目は当初の予定にはなかったが、木部材と金物治具の接触面の詳細な情報は、解析モデルに大きく寄与できる。そこで、接触面の引抜き挙動の可視化を検討するため、木ねじを例に CT スキャンの使用性について検討する。

3. 研究の方法

(1) ボルト偏在の負の影響の除去

実験で使用した供試体を図-1 に示す。断面は幅×高さ=150mm×180mm の6層のラミナから成る同一等級構成集成材で、図の左端を測定部とし、ボルトの配置は2列1本とした。

ボルトの偏在で樹脂効果が損なわれるのは、ボルトの変形方向に樹脂が充填されていないことに起因する。特に、ボルトは木部材の両端部で局部的な曲げ変形を生じ、この曲げ変形が木部材の過度な応力集中を生じる原因ともなっている。そこで、ボルト孔の両端を広げ、ボルトとボルト孔との間に必ず樹脂が充填されるように、両端を中間部のボルト孔よりも広げたテーパ域を施すことで、偏在の影響は除去でき、かつ応力集中も緩和できるものと考えた。

図-2 は供試体の接合部のボルト孔を示したもので、「打込み型」はボルトとボルト孔を同一のもの、「樹脂型」はボルト孔が一様で樹脂を充填したもので、「テーパ型」はボルト孔の両端にテーパ域を設けたものであり、 d 、 ϕ 、 T はそれぞれボルト、ボルト孔ならびにテーパを表し、 \bigcirc は直径を表すものである。

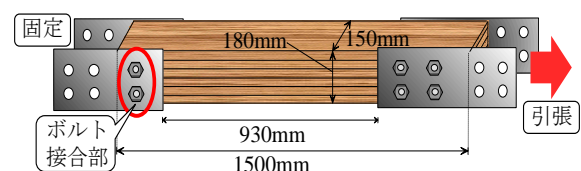


図-1 供試体の概略図

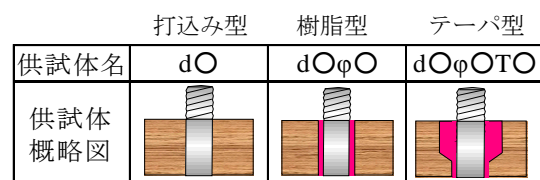


図-2 供試体概略図

表-1 供試体の種類

種類	供試体名	ボルト径 (mm)	ボルト孔 (mm)	テーパ孔 (mm)
打込み型	d16	16	16	-
	d20	20	20	-
樹脂型	d16φ20	16	20	-
テーパ型	d16φ20T26	16	20	26
	d16φ20T32	16	20	32
	d16φ20T38	16	20	38

る。表-1は作成した供試体で、テーパ型については適切なテーパ孔径を検討するために、3種類の供試体を作成している。

(2) 充填樹脂の選定

これまでの実験では、2003年に宮崎県に建設された国内最大級のキングポストトラス橋で採用されたエポキシ樹脂を使用してきた。ここでは、土木分野で多く使用されている耐候性や湿潤状態における接着性に優れるアクリル樹脂についても検討する。表-2に実験に使用した2種類のエポキシ樹脂と1種類のアクリル樹脂を示す。

E-1がこれまで使用してきたエポキシ樹脂で、E-2は粘度の低い樹脂ではあるが、降伏強度や弾性係数はE-1とほぼ同等である。A-1がアクリル樹脂で、E-1に比べて、粘度は低く、降伏強度や弾性係数のエポキシも小さいものとなっている。

表-2 樹脂の物性値

物性	樹脂	A-1 (アクリル)	E-1 (エポキシ)	E-2 (エポキシ)
粘度 (mPa・s)		300	1000~3000	200~1000
密度 (g/cm ³ 硬化物)		1.02	1.0~1.3	1.15~1.17
圧縮降伏強度 (N/mm ²)		52	99	90
圧縮弾性係数 (N/mm ²)		850	3470	3200

(3) 解析モデルの開発

解析モデルは実験での供試体の接合部近傍を対象としたものである(図-3)。ボルト接合部は木材が鋼よりも軟らかいため、木部材へのめり込みが生じ、反対側では離れが発生する。このような接合部を解析するために、これまでコンタクト要素等の接触要素を用いて解析を行ってきたが、十分な結果が得られなかった。

そこで、ここでは解析ソフトに準備されている接

触要素に代わる新たな解析モデルを提案した。すなわち、ボルトと接触する部分には接触要素を使用せずに、図-4のようにボルト端部の接触部には変位を与える方向とは逆の面と中間部では変位方向の面で肌離れすると仮定し、肌離れする接触面に剛度の極めて低い薄い要素を採用して、ボルト変形に伴う木部材からのボルトの肌離れを表現することにした。また、桑村の研究からボルトの支圧中心から左右それぞれ30~95°の範囲に滑りが生じることが明らかにされていることから、図-5のような滑り領域を設けて、肌離れ同様に剛性の低い材料値を適用した。肌離れと滑りの材料値は隣接する材料値の1/10,000としている。

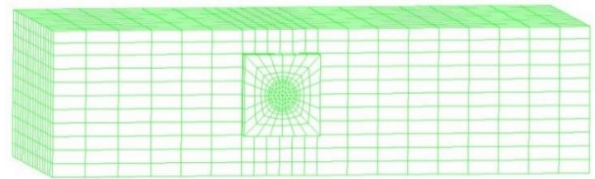


図-3 解析モデル

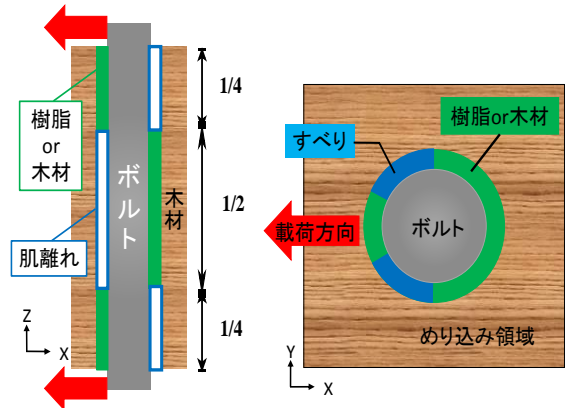


図-4 肌離れの仮

図-5 滑りの仮定

(4) 木部材からの金物治具の引抜け挙動の可視化

近年、宮崎県産スギのような軽軟材用の木ねじが開発されており、本研究ではこの木ねじを対象としたCTスキャンによる撮影を行った。写真-1にCT装置を示している。なお、通常の鋼製木ねじでは木材とのX線透過率の差が大きくなるため、アルミ製の木ねじを製作した。表-3に実験で使用した4種類のアルミ(A2017)ねじの諸元を示している。

P0(円柱型)は通常のねじ部全体が一様な平行ねじで、PP(円柱積層型)はねじ山の間で木ねじの胴部径が変化する円柱の二層構造となっている。また、T0(円錐型)は木ねじの胴部が少しずつ縮径する円

錐形になっており、TT（円錐積層型）はねじ山の間で木ねじの胴部の縮径率が変化する円錐の二層構造である。

木試験体は同一等級構成集積材 (E65-F255) の宮崎県産スギ材で、直径 25mm、高さ 30mm の円柱状に加工して、試験体中央部に各木ねじの最大胴部径の先孔を空けて木ねじをねじ込み、その後、1mm、2mm と引抜いて、その過程を X 線 CT によって撮影を行った。



写真-1 X線CT装置(LCT-200)

表-3 木ねじの諸元

	最大胴部径 (mm)	最小胴部径 (mm)	縮径率
PO	5.6	5.6	なし
PP	6.3	4.9	なし
TO	6.3	4.9	1/21.4
TT	6.2	4.8	上部1/37.5 下部1/15

4. 研究の成果

(1) ボルト偏在の負の影響の除去

① テーパのない場合のボルト偏在の影響

ボルト孔が一樣（テーパ域のないモデル）でボルトが偏在するときの影響を整理したものが、表-4 である。ボルトが下偏在すると、接合部の機能は低下することが判る。

表-4 初期剛性と荷重(ボルト偏在)

供試体	初期剛性 (kN/mm)	降伏荷重 (kN)	終局荷重 (kN)
d16	26	63	84
d16φ22	49	75	87
d16φ22 上	55	80	92
d16φ22 下	49	68	77
d16φ22 左	52	80	90
d16φ22 右	54	75	87

② 偏在テーパ孔の効果

図-6 はボルトが中央に配置されたモデルと下偏在モデルを示している。下偏在した場合にはボルト孔が均一であれば、ボルト下部には樹脂が存在しないために、樹脂効果が発揮できない。ボルト孔の両縁端にテーパ域を設けることにより、ボルトの曲げ変形が生じる部分に樹脂が充填されることになる。本実験ではテーパ孔の適切な口径を検討するために、中間部の均一なボルト孔の 20mm (φ20) に対して、テーパ口径は 26mm(T26)、32mm(T32)、38mm (T38) の 3 種類について検討した。

図-7 は各形式の終局荷重を示したもので、図中の○は個々の供試体から得られた結果であり、●は各形式での平均値を示している。また、3本の横線はボルト径の設計終局耐力を示している。実験から得られた結果はバラツキが大きい。これは木部材が木目などから均一でないことに起因している。よって、以降は平均値を用いて考察する。

テーパ口径を 32mm 以上とすると、下偏在の影響

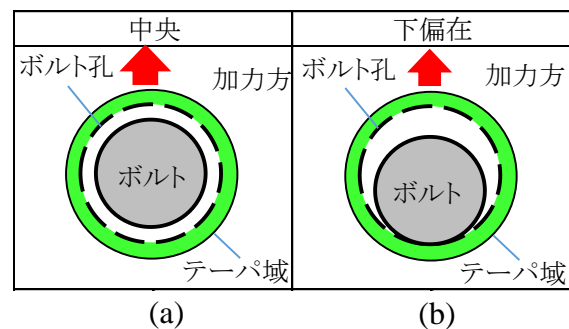


図-6 ボルト位置

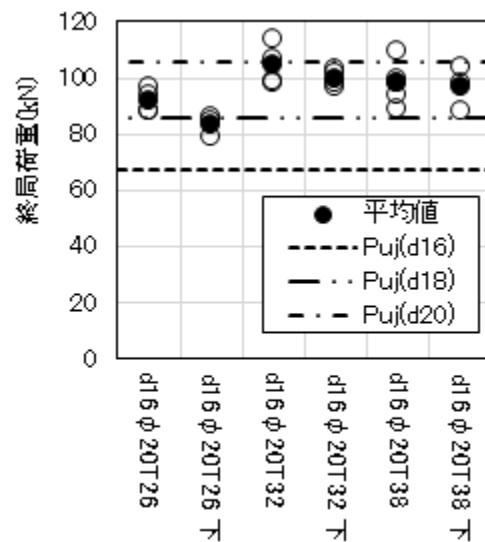


図-7 終局荷重(ボルト偏在)

を受けることなく、偏在のない場合と同等の終局荷重が得られ、d20 の設計終局耐力に達している。

以上から、テーパ域を施すとボルト偏在の負の影響が除去できることが明らかにされた。

樹脂型は打込み型に比べてボルト近傍に大きな応力集中が発生するが、テーパ域により打込み型とほぼ同等までに応力集中は低下しており、この低下により終局荷重が高い値を示したものと考えられる。

③ 樹脂効果の設計への反映

以上の結果から、ボルト孔の両端にテーパ域を施せば、使用ボルト径 16mm に対して、ボルト径 18mm の設計耐力は維持でき、テーパ口径を 32mm とすればボルト径 20mm に匹敵する効果を産み出している。このことは、ボルト本数の低減をもたらすものである。

各ボルト間の設計耐力比はボルト径の 2 乗比となることから、ボルト径 16mm を使用しても、ボルト孔を 20mm とし、さらに、その両端に口径 32mm のテーパ域を設ければ、少なくともボルト径 18mm での設計は可能となり、ボルト本数は打込み型 d16 に比べて 20% 程度の、ボルト径 20mm で設計した場合には 36% 程度のボルト本数を削減が可能となる。さらに、施工でのボルト挿入に際して、ボルトの偏在に対する配慮が要らなくなるので、施工面での効率化にも寄与できる。

(2) 充填樹脂の選定

図-8 は表-2 に示す 2 種類のエポキシ樹脂と 1 種類のアクリル樹脂を充填とした供試体の終局荷重を示したものである。アクリル樹脂はエポキシ樹脂に比べて低く、d18 の終局設計荷重と同等程度に留まっている。これは表-2 で明らかなようにアクリル樹脂の材料値がエポキシ樹脂に比べて低いことに起因している。また、エポキシ樹脂では粘度の低い E-2 も材料値では E-1 と同等であることから、エポキシ樹脂での差異はほとんど観られなかった。

以上から、充填樹脂としてはエポキシ樹脂が適切であると考えられる。

(3) 解析モデルの開発

図-9 は解析と実験から得られた荷重-変位曲線

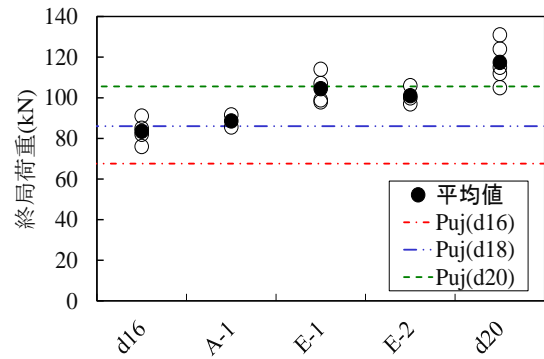


図-8 終局荷重

を示している。解析値は実験値に比べ初期剛性がやや高く出ているが、終局までの挙動はテーパ型を除けば、ボルト孔が一般的な打込み型や樹脂型については概ね捉えていることが判る。テーパ型については更なる検討が必要である。実験で充填樹脂は接合機能を向上させることが明らかにされており、解析でも充填樹脂の効果が示された。

実験から得られる降伏荷重は荷重-変位曲線に基づく接合部全体のものとなるが、実際にはボルトや木部材に局所的な降伏が生じる。解析はこの事象を捉えており、d16 φ20 は d16 よりもボルトやボルト周りの局所的な降伏荷重が大きくなることを明らかにしている。この差異は樹脂が緩衝材のような役割を果たしているために生じると推測される。

本法はボルト孔が両端で変化するテーパ型を除く、打込み型や樹脂型のようにボルト孔が一般的なボルト接合についての解析には十分に適用できると考えられる。

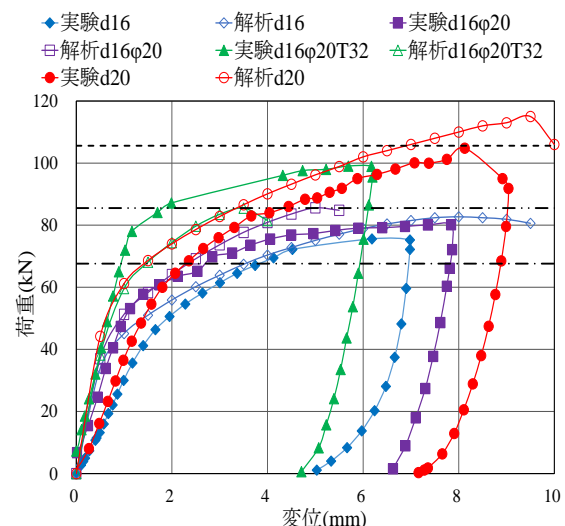


図-9 荷重-変位曲線

(4) 木部材からの金物治具の引抜き挙動の可視化

実験で最大荷重を示した TT (円錐積層型) のねじ込み時と 2mm 引抜き時の状況を例として図-10 に示す。

各種の撮影から、先孔より小さなねじ径でも先孔の縮径により、木ねじ胴部は木部と密着し、木ねじには木部からの締め付け力が作用することが考えられる。また、木ねじの抵抗は上端部だけに集中するが、抵抗域は円錐型の方が広く、引抜き耐荷力は円錐型の方が有利となる。木ねじの引抜きでは、ねじ部には密着部と離れ部があり、加えて胴部は滑っているように思われる。

この実験から、CT スキャンは木材から金属治具の引抜きに対する内部挙動の視覚化が可能と考えられる。

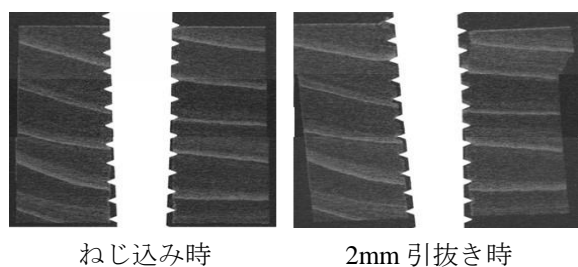


図-10 撮影断面画像(TT型)

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 7 件)

- ① 岩吉絢子、今井富士夫、安井賢太郎、尾上幸造、ボルト部材のボルト孔に充填された樹脂が設計に与える効果、木材利用研究論文報告集 14、査読無、2015、pp. 1-6
- ② 安井賢太郎、山子剛、岩吉絢子、今井富士夫、X線 CT を用いた木ねじと木材の接触部の可視化、木材利用研究論文報告集 14、査読無、2015、pp. 7-12
- ③ 渡邊敬史、安井賢太郎、今井富士夫、尾上幸造、樹脂が充填されたボルト孔両端のテーパによる木部材接合部機能の向上効果、構造工学論文集、査読有、Vol. 61A, 2015、pp. 562-569
- ④ 岩吉絢子、今井富士夫、簡易モデルによる木部材のボルト接合部の非線形解析、木材利用研究論文報告集 13、査読無、2014、pp. 42-47

- ⑤ 渡邊敬史、安井賢太郎、今井富士夫、尾上幸造、テーパを有するボルト孔の樹脂が木部材接合部の機能に与える影響、究論文報告集 13、査読無、2014、pp. 99-104
- ⑥ 渡邊敬史、飯村豊、尾上幸造、今井富士夫、テーパ形状が木部材ボルト接合部の機能に与える影響、木材利用研究論文報告集 12、査読有、2013、pp. 129-136
- ⑦ 松岡幸士朗、安井賢太郎、今井富士夫、尾上幸造、木部材の内部腐朽検査に対するサーモグラフィー法の適用について、木材利用研究論文報告集 12、査読有、2013、pp. 151-156

[学会発表] (計 3 件)

- ① 岩吉絢子、今井富士夫、木ボルト接合部の引抜き挙動に関する非線形解析、平成 27 年度土木学会西部支部研究発表会、2016. 3. 16、九州産業大学 (福岡県福岡市)
- ② 安井賢太郎、黒木雄大、金田晃平、今井富士夫、アクリル樹脂を用いた木橋部材接合部の引抜き抵抗力向上に関する研究、平成 27 年度土木学会西部支部研究発表会、2016. 3. 16、九州産業大学 (福岡県福岡市)
- ③ 渡邊敬史、安井賢太郎、岩吉絢子、今井富士夫、ボルト孔端部のテーパ域と充填樹脂が木部材ボルト接合部の耐荷力に与える影響、平成 26 年度土木学会西部支部研究発表会、2015. 3. 7、琉球大学 (沖縄県西原町)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

今井 富士夫 (IMAI FUJIO)

宮崎大学・工学部・教授

研究者番号：00038077

(2) 研究分担者

尾上 幸造 (ONOE KOZO)

宮崎大学・工学部・助教

研究者番号：50435111