

論文

木材のボルト接合における締付けトルクと耐力性状

松原 独歩*¹⁾ 島田 勝廣*²⁾The behavior of proof strength and fastening torque on
timber bolted jointDoppo Matsubara*¹⁾, Masahiro Shimada*²⁾

The conservation of fastening torque on timber bolted joints is ill-defined due to drying contraction and stress relaxation of wood. This paper is concerned with the fastening torque and strength of the double shear bolted timber-to-timber joints. In this study, we experimentally measured the fastening torque by considering the size of the metallic washer. As a result, the first slip coefficient and proof strength demonstrated an upward trend as the fastening torque and metallic washer increased. Then, deformation characteristics were obtained that showed contrasting behavior as the metallic washer was increased. Also, the existent calculation formula for the first slip coefficient and proof strength differed from the experimental results. The existent calculation formula for the First slip coefficient was higher than in the experiment, and the existent calculation formula for proof strength was lower than the experimental result.

キーワード: 木材, ボルト接合, 締付けトルク, 強度

Keywords: Wood, Bolted Joint, Fastening Torque, Strength

1. 諸言

木材は古くから工業製品や建造物など様々な用途で用いられてきた。近年の環境問題から、改めて木材の利用拡大が検討されている。農林水産省は平成22年12月に、10年後の木材自給率50%以上の目標達成を掲げており⁽¹⁾、今後益々木材の国内需要が増すものと考えられ、木材のさらなる有効利用へ向けた研究開発が期待される。

木材で構成される構造物における機械的弱点は接合部であり、接合部の適切な設計・施工が望まれる。接合において一般的な接合法はボルト接合であり、その簡便さから工業製品や建造物などに多く用いられている。ボルト接合の施工では、木材の乾燥収縮や応力緩和現象などにより、ボルトの締付け軸力は低下するものと考えられており、いわゆる締付け管理は行われていない。そのため、インパクトドライバーなど様々な工具や方法で任意に締付けられているのが実状であり、締付け過ぎや締忘れなどが生じているものと考えられる。

そこで本研究では、2面せん断ボルト接合を対象として、実際の締付け時を想定し、締付けトルクと座金寸法の変動が接合部の変形状及び機械的特性にどのような影響を与えるのかを検討する事を目的とした。さらに、日本建築学会

基準の降伏耐力及びすべり係数算定式⁽²⁾により算出される値と実験結果を比較し、算定式の妥当性を検証した。

2. 材料と実験方法

2.1 材料 試験体を図1に示す。使用した木材はスギ(*Cryptomeria japonica*)とした。主材には心持ち、側材には辺材とし、それぞれプレーナー仕上げとした。主材の平均含水率は17%、平均密度は 0.403g/cm^3 、側材の平均含水率は16%、平均密度は 0.356g/cm^3 とした。ボルトはM12六角ボルトとした。ボルトの先穴は初期ガタを排除するために直径12mmのドリルにてあけた。座金は、一辺40mm、60mm、厚さ4.5mm、6.0mmの2種類のZマーク角座金を使用した。

2.2 実験方法 実験の組み合わせを表1に示す。初期締付けトルクは3種類とし、デジタルトルクレンチ(東日製作所製, 100Nm)を用いて、表1とは別に用意した6体(各座金寸法3体ずつ)の試験体にて、トルクレンチが空回りするまでトルクを与え、その時の値を最大トルク T_{\max} 、 T'_{\max} とした。本実験では、最大トルクに対して $T_{\max} \times 0.8$ 、 $T_{\max} \times 0.4$ 、 $T_{\max} \times 0$ の3種類の締付けトルクとした。ここで、 $T_{\max} \times 0$ は、座金に対してナットを2mm浮かした状態とした。締付け方向は、板目面とした。2面せん断試験は、目標の締付けトルクで試験体を作成後、2分以内に加力開始した。ここで試験機は万能試験機(島津製作所製 AG-50TB)を用いた。すべり量は、主材に取り付けた変位計の値とした。試験速度は、 5mm/min とした。また実験後、ボルトの変形状況は、X線透過装置により観察した。

事業名 平成23年度 基盤研究

*¹⁾ 城東支所

*²⁾ 技術経営支援室

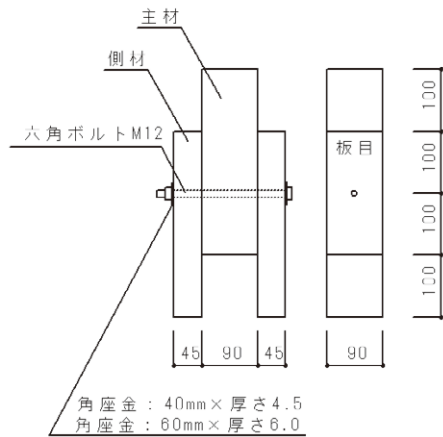


図1. 試験体

表1. 実験の組み合わせ一覧

試験名	座金寸法 mm	T_{max}, T'_{max} Nm	締付けトルク Nm	試験 体数 N
2面せん断	40角 厚さ4.5	$T_{max} : 42$	$33.6(0.8 \times T_{max})$	2
			$16.8(0.4 \times T_{max})$	3
			$0.0(0 \times T_{max})$	2
	60角 厚さ6.0	$T'_{max} : 52$	$41.6(0.8 \times T'_{max})$	3
			$20.8(0.4 \times T'_{max})$	3
			$0.0(0 \times T'_{max})$	3

3. 実験結果と考察

3.1 変形性状 図2に、実験後にX線透過装置によって撮影した試験体の状況を示す。また、図3に試験後の試験体の破壊状況を示す。試験体の変形性状は角座金 40mm, 60mm で締付けトルクの大きさに関わらず明確な違いが確認された。角座金 40mm では、主材内においてボルトが曲げ降伏するとともに、木材のめり込み降伏も確認され、座金が側材へ大きくめり込む状況となった。一方、角座金 60mm では、主材及び側材内のそれぞれにおいてボルトが曲げ降伏しているものと見られ、座金の側材へのめり込みは小さかった。また、変形量の増加に従い、ナットが角座金にひっかかりボルト軸力が増加するいわゆるロープ効果が確認できた。

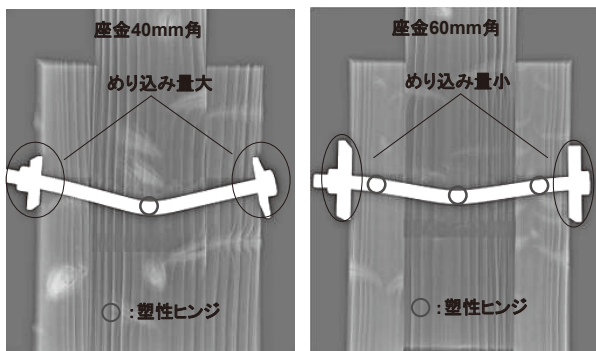


図2. 変形性状

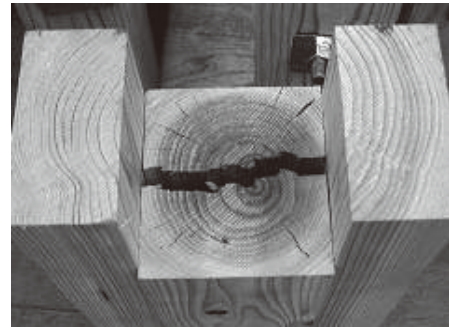


図3. 試験後の試験体の破壊状況

3.2 荷重とすべり量 図4に荷重とすべり量関係を示す。初期締付けトルクを0.0に設定した試験体は、相対すべり量5~10mmの範囲で2次剛性が出現し、その後再び荷重が上昇する性状になり、初期締付けトルクを与えた試験体と異なる性状を示した。これは、ナットを2mm浮かした状態で試験したため、2次勾配の終着点まではボルトの曲げ変形に依存し、ナット端部が座金に接した後、座金が木材へとめり込み、ボルトの軸力上昇とともに耐力上昇が生じるロープ効果^{(3),(5)~(7)}を生じたものと考えられる。初期締付けトルクを与えた試験体は初期締付けトルクを0.0に設定した試験体と比べて降伏点は高く、明確な差異が認められた。しかし、最大荷重に明確な差は認められなかった。したがって、初期締付けトルクの大小は、荷重とすべり量の関係に影響を与える因子であると推察された。

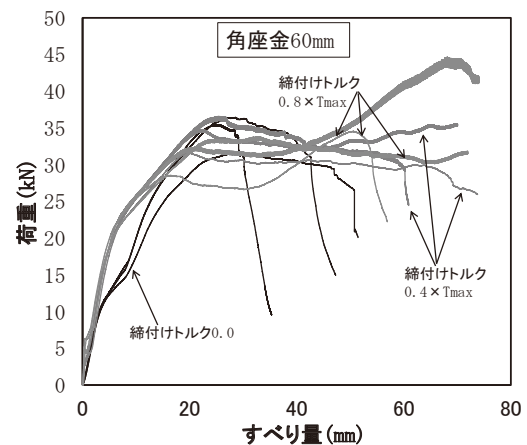
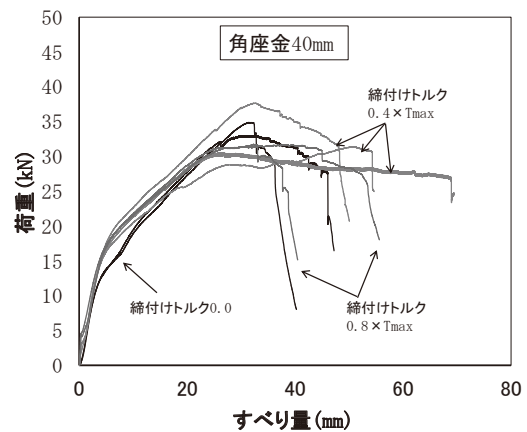


図4. 荷重とすべり量の関係

3.3 初期締付けトルクが剛性及び耐力に与える影響

初期締付けトルクが初期すべり係数, 降伏耐力及び終局耐力に与える影響を調べるために, 図5のような方法にて, 各特性値を算出した。初期すべり係数は, 初期弾性勾配であり, 降伏耐力は, 初期勾配直線と2次勾配直線の交点とした。終局耐力は最大荷重とした。初期締付けトルクと各特性値の関係を図6に示す。

締付けトルクの増加, また座金面積の増加により, ばらつきが若干大きい, 初期すべり係数及び降伏耐力は上昇傾向を示した。これは, 締付けトルクの増大に従い, 主材と側材間の摩擦力の増大による影響であると考えられる^{(3)~(4)}。ばらつきの要因の一つとしては, デジタルトルクレンチによる締付け速度の違いから起因するボルトに生じる軸力が変動したことにより, 主材と側材間の摩擦力に影響を及ぼしたものと考えられる。終局耐力は, ばらつきが大きく, 明確な傾向は認められなかった。

3.4 日本建築学会基準の降伏耐力及びすべり係数算定値⁽²⁾と実験結果の比較

日本建築学会基準の降伏耐力及びすべり係数算定値⁽²⁾と実験結果の比較を行った。降伏耐力算定式は, ヨーロッパ降伏型理論(EYT式)より, すべり係数算定式は弾性床上の梁曲げ理論より構築されている。

せん断ボルト接合の降伏耐力はヨーロッパ降伏型理論より以下の(1)式にて算出した。

$$P_y = C F_e d l \quad \dots (1)$$

ここで, P_y : 降伏耐力, C : 接合形式係数, F_e : 主材の基準支圧強度 (19.4N/mm^2), d : 接合具径 (11.75mm), l : 主材厚 (90mm)である。

また, 接合形式係数 C は, 以下の4式のうち最小値とした。

$$C = \min \left\{ \begin{array}{l} 2\alpha\beta \\ 1 \\ \sqrt{\frac{8\alpha^2\beta^2(1+\beta)}{(2\beta+1)^2} + \frac{8\beta\gamma\left(\frac{d}{l}\right)^2}{3(2\beta+1)}} - \frac{2\alpha\beta}{2\beta+1} \\ \frac{d}{l} \sqrt{\frac{8\beta\gamma}{3(1+\beta)}} \end{array} \right.$$

ここで, α : 側材厚/主材厚 (0.5), β : 側材と主材の支圧強度の比 (側材及び主材は同種材なので 1), γ : 接合具の基準材料強度と主材の基準支圧強度の比 (12.11)である。

すべり係数は弾性床上の梁曲げ理論より以下の(2)式にて算出した。

$$K = \frac{1}{\left\{ L_1 + L_2 - \frac{(J_1 - J_2)^2}{2(K_1 + K_2)} \right\}} \quad \dots (2)$$

ここで, $L_1, L_2, J_1, J_2, K_1, K_2$ は, ボルトの断面2次モーメント, ヤング係数, 木材のめり込み剛性から算出され

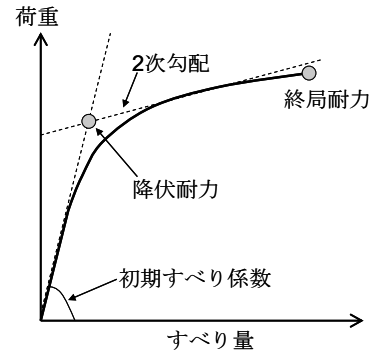


図5. 各特性値の算出方法

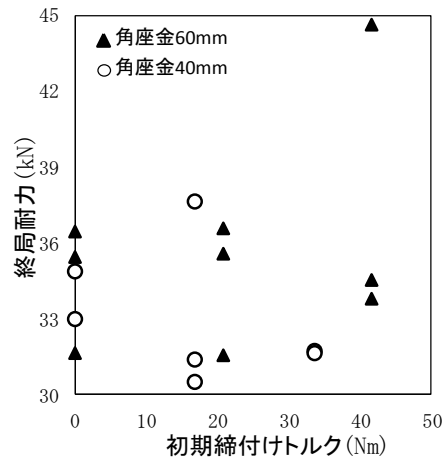
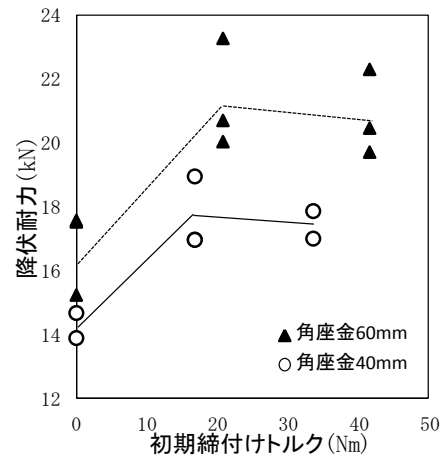
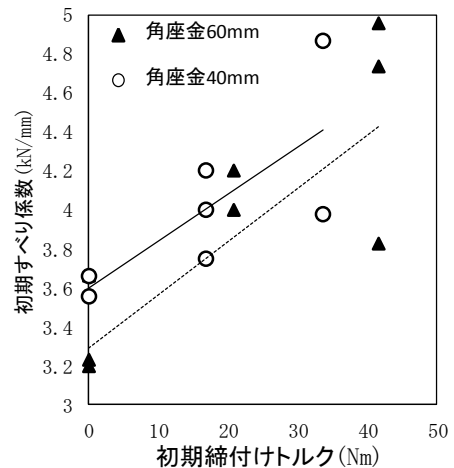


図6. 初期締付けトルクと各特性値の関係

る値であり、 $L1 : 5.62 \times 10^{-5}$, $L2 : 8.85 \times 10^{-5}$, $J1 : 1.35 \times 10^{-6}$, $J2 : 3.15 \times 10^{-6}$, $K1 : 4.79 \times 10^{-8}$, $K2 : 8.54 \times 10^{-8}$ とした。

(1) 式及び (2) 式より算出された値と実験結果の比較を図7、表2に示す。

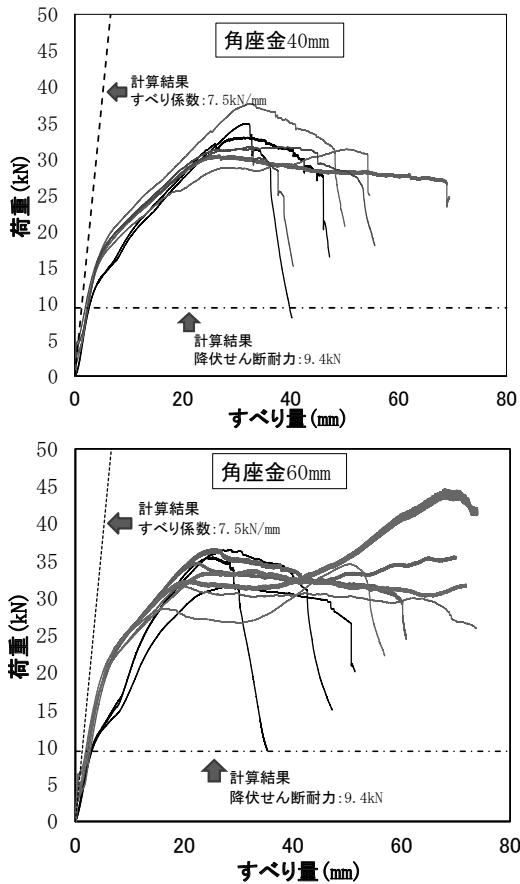


図7. 計算結果と実験結果の比較

表2. 計算結果

座金寸法 mm	締付けトルク Nm	すべり係数 実験平均値/ 計算値	降伏耐力 実験平均 値/計算値
40角 厚さ4.5	$33.6(0.8 \times T_{max})$	0.59	1.85
	$16.8(0.4 \times T_{max})$	0.53	1.87
	$0.0(0 \times T_{max})$	0.48	1.52
60角 厚さ6.0	$41.6(0.8 \times T'_{max})$	0.60	2.21
	$20.8(0.4 \times T'_{max})$	0.49	2.27
	$0.0(0 \times T'_{max})$	0.45	1.78

すべり係数は、計算結果は実験結果と比較して高めに評価され、降伏耐力は低めに評価された。初期締付けトルクを大きくするに従い、計算結果と実験結果の解離が確認された。これは、一連の算定式は、締付けによるボルト軸力の増加、すなわち摩擦抵抗力を考慮していないためであると考えられる。初期締付けによる摩擦抵抗力増加分を考慮することで算定式はより実験結果を再現できるものと推察された。

4. 結言

2面せん断ボルト接合を対象として、実際の締付け時を想定し、締付けトルクと座金寸法の変動が接合部の変形状及び機械的特性に与える影響について調べた。さらに現日本建築学会基準のすべり係数、降伏耐力算定式より得られる値と実験値を比較し、算定式の妥当性を検証した。得られた知見を以下に示す。

- 1) 座金の大きさは、変形状に影響を与える因子の一つであり、座金を大きくすることで、木材へのめり込みが減少した。
- 2) 初期締付けトルクがゼロの状態は、接合部の降伏耐力を低下させた。
- 3) 初期締付けトルク及び座金寸法を大きくするに従い、初期すべり係数及び降伏耐力は増加傾向を示した。
- 4) 日本建築学会基準の算定式は、実験結果と比較して解離がみられ、初期締付けトルクの増大に従い、それは顕著になることがわかった。

これらの結果より、木材のボルト接合において、初期締付けトルクは機械的特性に与える影響が大きい。そのため、ボルト接合工程においては適切な締付け管理が必要である。

(平成24年5月24日受付、平成24年7月6日再受付)

文 献

- (1) 農林水産省：「新農林水産省木材利用推進計画」, 平成22年12月策定
- (2) 日本建築学会：「木質構造設計基準・同解説」, pp.30-35, pp.232-233 (2006)
- (3) 松原独歩, 島田勝廣：「座金寸法と締付けトルクを変動させた2面せん断ボルト接合部における耐力性状」, 第62回日本木材学会大会, pp.37.(2012)
- (4) 平井卓郎：「鋼板サイドウェブを持つ木材ボルト接合部のせん断耐力に及ぼす摩擦抵抗の影響」, 木材学会誌, 37(6), pp.517-522.(1991)
- (5) 蒲池健, 安藤直人, 稲山正弘, 村上雅英：「2面せん断木-木ボルト接合部における荷重-すべり特性の新評価法」, 日本建築学会構造系論文集, No.619, pp.119-126.(2007)
- (6) 西山誕生, 安藤直人：「ローブ効果を考慮したボルト接合部の2面せん断特性の予測」, 木材学会誌, Vol.49, No.5, pp.355-364(2003)
- (7) 野口昌宏, 小松幸平：「木-木ボルト接合部における剛性・耐力評価法の新提案と実験による検証」, 木材学会誌, Vol.49, No.2, pp.92-103(2003)