

## ボルトを円形配置した木質構造接合部の軸力管理に関する研究

Study on axial force management in timber joints with circularly arranged bolts

(現所属)東京農工大学大学院農学研究院 (助成時)近畿大学産業理工学部 准教授 松原独歩

### (研究計画ないし研究手法の概略)

#### 1. 背景・目的

近年、脱炭素社会の実現に向けて、中大規模建築物を木造化する機運が急速に高まっている。我々は木材同士もしくは木材と鋼板を、ボルト等により締付けることで生じる部材間の摩擦抵抗力を利用した木材摩擦接合部に関して研究を進めており、その有効性を実験・解析的に明らかにしてきた。一方で、この種の接合部を実現させる上で避けて通れない課題の一つとして、ボルトの初期締付け力管理(軸力管理)の問題が挙げられる。これまでに、直列ボルト接合部を対象に、ボルトを逐次締付けると隣接するボルトの軸力が変化するいわゆる弾性相互作用に関して実験的研究を進め、ボルト間隔を大きくするに従い、いかなる締付け順序を採用したとしても、ボルト軸力はほぼ均一となることを明らかにした(Matsubara et al., J Wood Sci., 2022)。このことは、ボルト直列配置の場合のみならず、中大規模木造建築物の木質ラーメン構造接合部においてみられる円形配置にも当てはまることが推測されるが、ボルト間隔を大きく取る事は接合部面積の増大に繋がり、コスト面で問題となる。

そこで本研究では、木材摩擦接合部の木質ラーメン構造接合部への応用展開を見据え、複数本ボルトを円形配置した接合部を対象として、弾性相互作用によるボルト軸力変動がどの程度生じるのか実験的に明らかにすると共に、弾性相互作用によるボルト軸力変動を極力回避可能な締付け手法について考察を加えた。

#### 2. 材料と実験方法

実験概要図を図1に示す。木質材料は、長さ1000mm(繊維方向)×幅300mm×厚さ55mmのオウシュウアカマツ異等級構成集成材(E105-F300)を用いた。ボルトはM12のZマーク六角ボルト(長さ150mm、ねじピッチ1.75mm)を8本用い、図1に示したように円形配置した。なお、ボルトには、軸力を測定するためにひずみゲージを挿入し、実験前に万能試験機にて軸力校正を行った。座金は、中央に13.5mmのボルト穴を空けたφ32mm×厚さ3.2mmおよび13mmのボルト穴を空けたφ45×厚さ4.5mmを用いた。ボルトの締付けは、トルクレンチを用いてφ32mm×3.2mm座金側のナットを締付け、締付け順序2パターンとし、ボルトを半時計周りに順次締付けるPattern A、ボルトを対角締めするPattern Bとした。また、弾性域(以降、弾性域締付けとする)およびφ32mm×t3.2mmの座金の厚さ分だけめり込ませる(座金と木材が面一になるまで締付け)木材の塑性域まで締付けた(以降、塑性域締付けとする)。ここで、塑性域締付けは、木材のめり込み二次剛性が初期剛性と比較すると鈍化することを利用したものである。なお、これまで我々はこの塑性域締付けによって軸力がどの程度維持するのかを把握する応力緩和実験を行った結果、50年後にも約20%程度軸力の残存が期待できることを明らかにしている(Wakashima et al., J Wood Sci., 2019)。弾性域締付けは、ボルト軸力が2kNに到達した時点で締付けをストップし、1分間待機した後順次締付けた。塑性域締付けは、Pattern Aとし、まず2kNに到達するまで順次締付け

(待機時間なし)、その後順次座金の厚さ分だけ締付けた。塑性域締付け完了後の様子を図 2 に示す。なお、軸力はデータロガーを用いて測定し、サンプリング周波数は 10Hz とした。試験体数は 6 体とした。

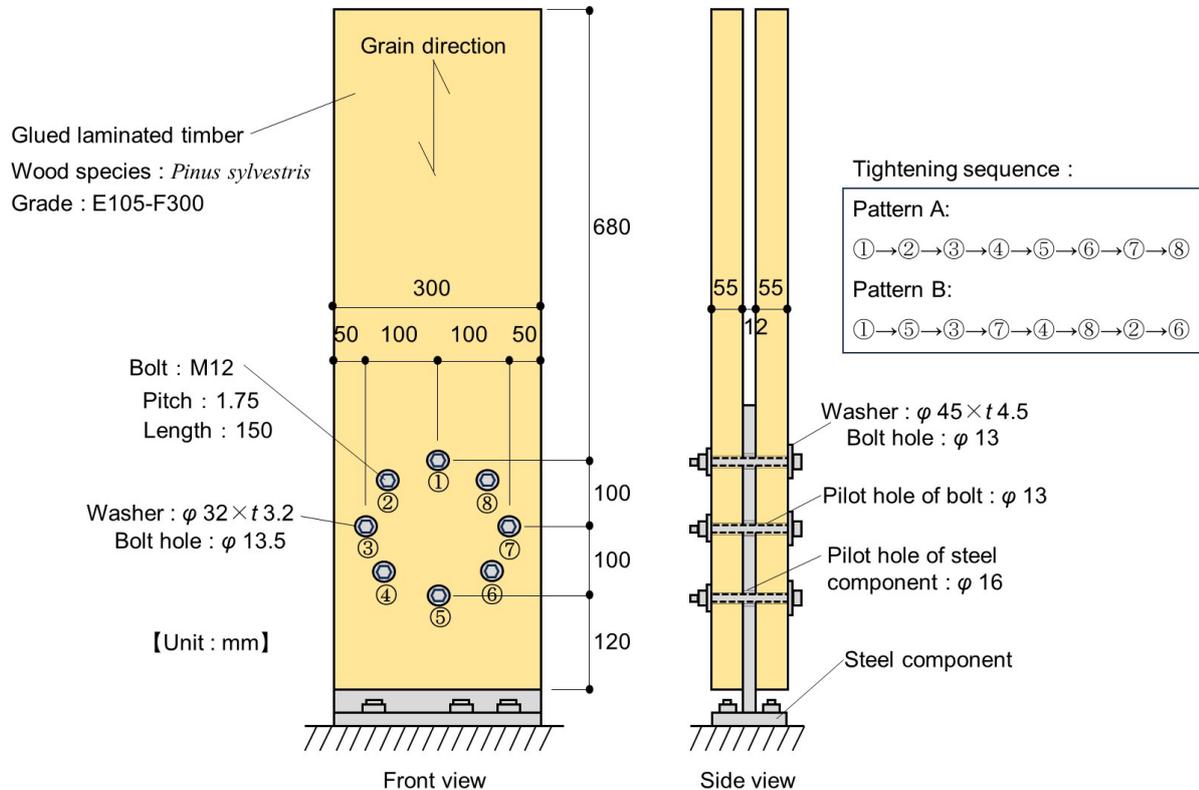


図 1 実験概要図

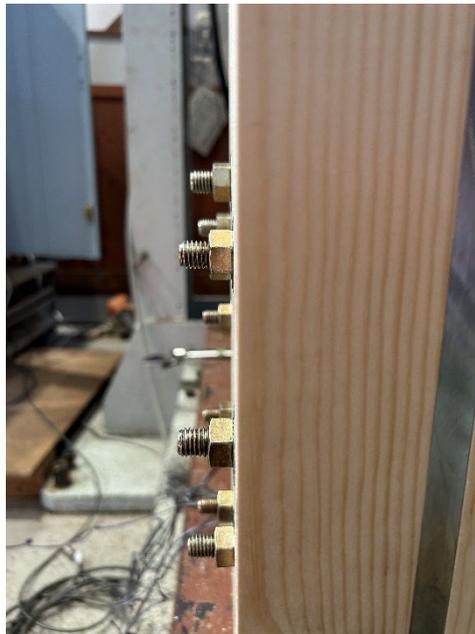


図 2 塑性域締付け完了後の様子

**(実験調査によって得られた新しい知見)**

図 3 に代表的な Pattern A の軸力比と経過時間の関係、図 4 に代表的な Pattern B の軸力比と経過時間の関係、図 5 に代表的な塑性域締付けの軸力と経過時間の関係を示す。ここで、

軸力比は初期軸力(2kN)に対する計測軸力と定義する。すなわち、締付け完了直後は 1.0 となる。まず、図 3 のボルト②に着目すると、③を締付けた直後に急激に軸力比が低下した。同様に、③、⑥、⑦についても急激に軸力比が低下していることが分かるが、④、⑤の低下は他と比較し僅かであった。一方で①に着目すると、②を締付け直後に僅かに上昇すると共に、対角の⑤、⑥、⑦を締付けた直後に僅かに減少した。これは、⑤、⑥、⑦の締付けによるめり込み変形が①にまで到達し、軸力が減少したものと推測される。しかし、例えば④の対角である⑧を締付けたとしても、④に影響を及ぼしているようには見えない。これらのように、ボルト位置によって、弾性相互作用の影響が異なるのは、締付けによる座金のめり込み変形の拡散距離が各ボルト位置により異なるためであると推測される。次に Pattern B の図 4 を見ると、Pattern A と同様に隣接するボルトを締付けると軸力比が急激に低下した。しかし、①に着目すると、Pattern A では⑤、⑥、⑦の締付けの影響での低下が見られたが、Pattern B では⑦の影響で低下した。次に図 5 の塑性域締付けの結果を見ると、締付け完了後の軸力は大きくばらついてはいたが、隣接するボルトの締付けによる影響、すなわち弾性相互作用による影響は認められなかった。弾性域締付けの図 3、4 と共通するが、締付け直後に軸力が低下するのは、応力緩和によるものであると考えられる。表 1 に弾性域締付けにおける軸力比を各ボルト、Pattern 毎にまとめた結果、表 2 にボルト全 8 本の締付け完了後の最大軸力  $F_{max}$  と最小軸力  $F_{min}$  の比( $F_{max} / F_{min}$ )の結果を示す。まず、表 1 の Pattern A と Pattern B の Max / Min を比較するとそれぞれ 1.38、1.30 となり、Pattern B の方が低い結果となった。同様に表 2 によれば、 $F_{max} / F_{min}$  はそれぞれ 1.54、1.36 となり Pattern B の方が低い結果となった。一方で、塑性域締付けを見ると、弾性域締付けと比較し、 $F_{max} / F_{min}$  は 1.2~1.4 倍程度高い値を示し、軸力が大きくばらついていることが分かった。

以上、本研究の範囲内で得られた知見をまとめると以下の通りであった。

- (1)ボルトを円形配置した接合部のボルトを締付けると、初期軸力は弾性相互作用による影響で軸力低下が生じる。
- (2)半時計周りに締付ける場合と対角に締付ける場合では、対角に締付ける方が、弾性相互作用による軸力の低下およびばらつきが小さくなる。
- (3)木材の塑性域まで締付けると、締付け後の軸力のばらつきが大きいが、弾性相互作用による軸力の低下は認められない。

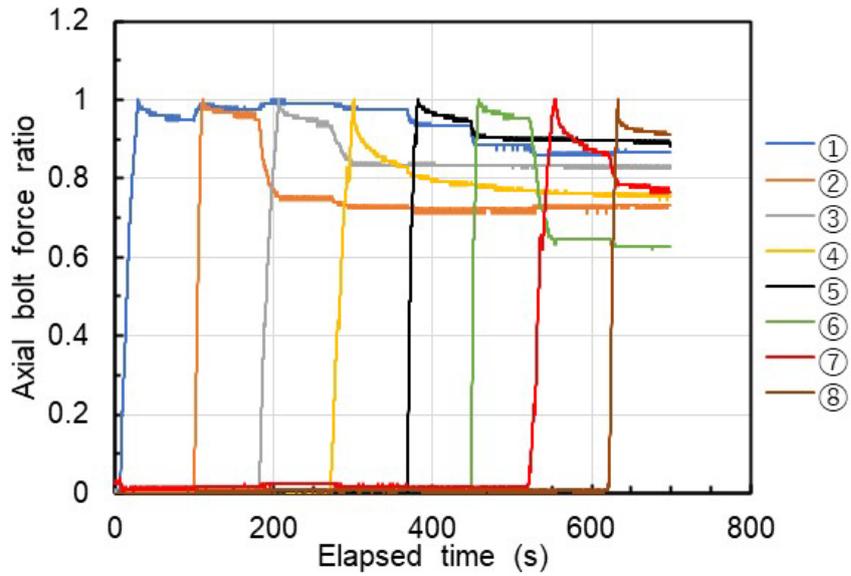


図 3 代表的な Pattern A の軸力比と経過時間の関係

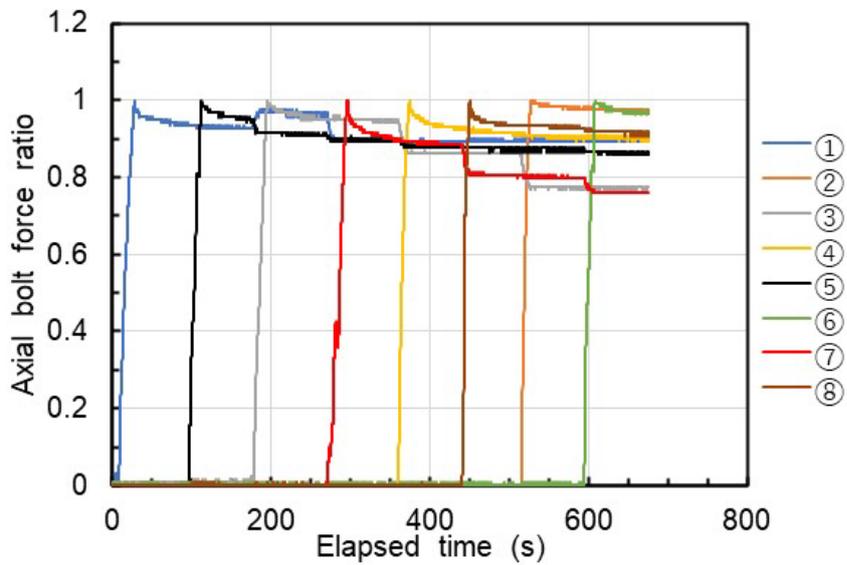


図 4 代表的な Pattern B の軸力比と経過時間の関係

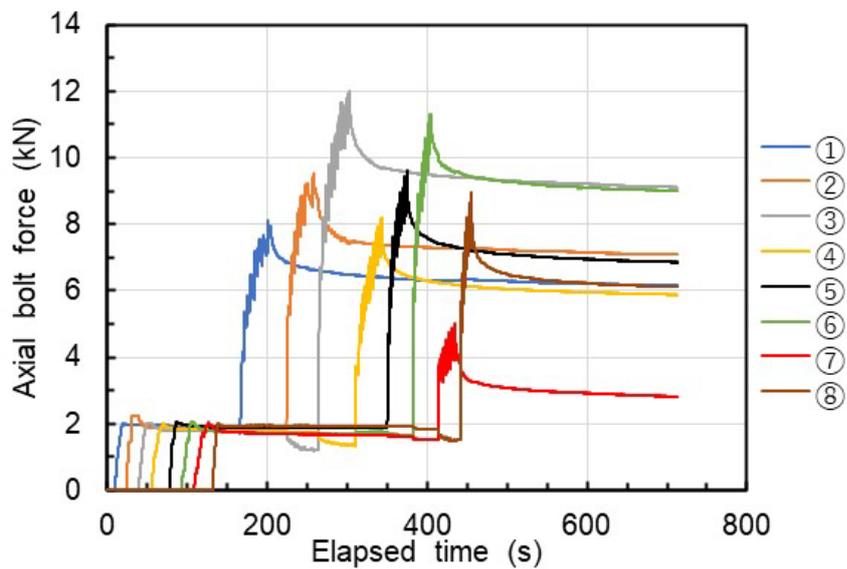


図 5 代表的な塑性域締付けの軸力と経過時間の関係

表 1 弾性域締付けにおける軸力比の結果

Region	Bolt number	Tightening sequence	Axial bolt force ratio	
			Avg.	S.D.
Elastic	①	Pattern A	0.81	0.05
	②		0.68	0.11
	③		0.79	0.06
	④		0.84	0.05
	⑤		0.82	0.08
	⑥		0.69	0.12
	⑦		0.84	0.05
	⑧		0.93	0.02
	Max./Min.		1.38	-
	①	Pattern B	0.88	0.02
	②		0.94	0.02
	③		0.73	0.04
	④		0.91	0.02
	⑤		0.86	0.04
	⑥		0.95	0.02
	⑦		0.77	0.06
	⑧		0.91	0.01
	Max./Min.		1.30	-

表 2 締付け完了後の最大軸力  $F_{max}$  と最小軸力  $F_{min}$  の比

Region	Tightening sequence	$F_{max} / F_{min}$	
		Avg.	S.D.
Elastic	Pattern A	1.54	0.15
	Pattern B	1.36	0.11
Plastic	Pattern A	1.97	0.70

( 発 表 論 文 )

Doppo Matsubara, et al, Evaluation method for embedment stiffness of metal washers in bolted timber joints using torque gradient and nut factor, Journal of Wood Science, 70(10), 2024, doi : 10.1186/s10086-024-02123-7

他 投稿準備中