大径ボルトを用いたモーメント抵抗接合の木質大断面部材への適用性に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON THE APPLICABILITY TO HEAVY TIMBER OF MOMENT-RESISTING JOINT USING LARGE DIAMETER BOLTS

野口弘行 — *1 本岡淳一 — *2
岩崎誠司 — *3 浦上瑞穂 — *4

Hiroyuki NOGUCHI — *1 Junichi MOTOOKA — *2
Seiji IWASAKI — *3 Mizuho URAKAMI — *4

キーワード：
木質構造, 集成材, モーメント抵抗接合

Keywords:
Timber structure, Laminated lumber, Moment-resisting joint

In this study, bending strength of the joints and, relationship of rotation rigidity and moment of the joint were evaluated through bending-shear test of the 3 types full scale joints using large diameter bolts, and it was made clear that bending strength of the joints and, relationship of rotation rigidity and moment of the joint were able to estimated from results of rigidity and strength in simple tension tests of the joint using large diameter bolt.

1. はじめに

近年、木質ラーメン構造の開発が進み、モーメント抵抗接合に関する研究も多く行われており、引きボルト型、鋼板挿入ドリフトピンおよび鋼板添え板ボルト型、合わせ梁型、鉄筋挿入接着型などの接合工法が提案されている¹⁾。近年では、大野、荘所ら^{2),3)}のドリフトピンを用いた接合部の研究や、坂田ら⁴⁾のストレススキニング効果を用いた接合部の研究が報告されている。本研究で対象としている大径ボルトを用いた接合工法もモーメント抵抗接合の1種である。本接合部は、木質構造としては新しい接合方法であり、木材にネジ切り加工を施し、特殊大径ボルトをねじ込むことで接合する。木材とボルトの接触面積を大きくさせ、強度を確保するとともに初期のめり込みガタの低減を期待できる接合形式である。

大径ボルトを用いた接合部に関する研究は筆者ら^{5)~8)}によって行われており、大径ボルト単体での部分実験や柱脚、梁-柱接合部を想定した接合部実験などを実施している。本研究では、本接合工法を小学校建築などの大断面集成材で構成される架構で適用した場合の接合部の性能を把握するため、大断面集成材で構成される実大接合部の曲げせん断実験を行い、接合部の回転剛性および耐力の評価を行った。また、大径ボルト1本の引抜耐力より、接合部の回転剛性、耐力を推定し、その適用性について検証を行った。

2. 実大接合部の曲げせん断実験

本実験は、2方向木質ラーメン構造を前提とした躯体の実大接合部を想定し、接合部の曲げせん断実験を実施した。対象とした部位は、柱脚部、梁-柱接合部（逆 T 字型）、梁-梁接合部の3種であ

る。図1に架構における各接合部配置を示す。

2.1 試験体

木材は日本農林規格(JAS)の区分で、柱は同一等級構成集成材 E105-F345 を、梁は対称異等級構成集成材 E105-F300 を使用している。樹種はスプルースを使用している。各試験体数は4体としている。各接合部実験で使用している部材の一覧を表1に示す。

図1 架構と各接合部位置 図2 接合部構成図（梁-柱接合部）

表1 実大接合部実験 部材一覧

	試験体名	部材断面(mm)	大径ボルト長さ(mm)
柱脚部	CO	柱 420×420	柱 300
梁-柱接合部	H700	柱 420×420	柱 420
		梁 210×700	梁 300
	H900	柱 420×420	柱 420
		梁 210×900	梁 300
梁-梁接合部	Beam	梁 210×700	梁 400

*1 明治大学理工学部建築学科 教授・工博
(〒214-8571 川崎市多摩区東三田1-1-1)

*2 本岡構造設計事務所 代表

*3 明治大学 研究生・工修

*4 明治大学大学院博士前期課程 大学院生

*1 Prof., Dept. of Architecture School of Science & Technology, Meiji Univ., Dr. Eng.

*2 Motoooka Structural Design Inc.

*3 Research Student, Meiji Univ., M. Eng.

*4 Graduate Student, Dept. of Architecture Graduate School of Science & Technology, Meiji Univ.

接合部は、雌ねじ加工を施した木材に大径ボルトをねじ込み、高力ボルトによって接合金物に固定する。図2に本工法の基本的な接合部構成図を示す。大径ボルトは、柱脚部では木材の繊維平行方向に12本配し、梁-柱接合部では、柱側は木材の繊維直交方向に4本、梁側は木材の繊維平行方向に4本配し、梁-梁接合部では両方の梁に2本ずつ配している。一部ドリフトピン接合となっている。図3に実験概要図を、図4に接合部詳細図を示す。

2.2 実験方法

加力は、柱脚部、梁-柱接合部では正負繰り返し加力を、梁-梁接合部では正方向繰り返し加力を行った。加力の制御は接合部

両端の大径ボルト配置部分で相対変位を測定している変位計の値を大径ボルト間距離で除した接合部の回転角により行い、加力スケジュールは $1/500\text{rad.}$ から $\sqrt{2}$ 倍ずつ増加させ、各サイクルを3回繰り返した。表2に各サイクルの回転角を示す。

測定方法は、水平荷重は、ロードセルを用いて測定した。試験体各点の水平変位、接合部の相対変位については変位計を用いて測定した。試験体4体のうち1体は木材の表面のひずみ度を測定するためにひずみゲージを貼り付けている。図5にひずみゲージ配置を示す。

図3 実験概要図

図4 接合部詳細図

表2 各サイクルの回転角

柱脚部、梁-柱接合部の時					
サイクル数	1	2	3	4	5
回転角 (rad.)	$\pm 1/500$	$\pm 1/350$	$\pm 1/250$	$\pm 1/180$	$\pm 1/125$
サイクル数	6	7	8	9	10
回転角 (rad.)	$\pm 1/88$	$\pm 1/63$	$\pm 1/44$	$\pm 1/31$	$\pm 1/22$

梁-梁接合部の時					
サイクル数	1	2	3	4	5
回転角 (rad.)	$+1/500$	$+1/350$	$+1/250$	$+1/180$	$+1/125$
サイクル数	6	7	8	9	10
回転角 (rad.)	$+1/88$	$+1/63$	$+1/44$	$+1/31$	$+1/22$

図5 ひずみゲージ配置

2.3 大径ボルトの単調引張性能

本研究で対象としている接合部では、部材に対称に配した大径ボルトの偶力によって曲げモーメントに対して抵抗する。そのため、大径ボルト単体の引張に対する性能が明確になることで、接合部の挙動が予測できるものと考えられる。そこで、大径ボルトの引張性能を把握するために、大径ボルト1本を木材に挿入し単調引張実験を行った。大径ボルトは、接合部実験で使用した、外径 37mm、長さは繊維平行方向に対して 300mm 及び 400mm、繊維直交方向に対して 420mm を使用している。雌ねじ加工を施した集成材に大径ボルトをねじ込み、大径ボルトと一体になっている鋼棒を試験機にとりつけ、反対側の端部をボルト及びピンを使用して試験機に設置している治具に固定し、単調引張加力を行った。

破壊性状は、繊維方向によって異なり、繊維平行方向の試験体は最大耐力時に大きな音とともに割裂を伴う大径ボルト引き抜けを示し、破壊後は急激に耐力が低下した。繊維直交方向の試験体は木部が変形に追従しながら粘りのある破壊性状を示し、耐力低下は緩やかであった。図 6 に荷重を測定したロードセル及び相対変位を測定した変位計より得られた各試験体の荷重－変形関係を、表 3 に初期剛性、最大耐力の一覧を示す。すべり剛性の値は、荷重－変形曲線上での 0.1Pmax と 0.4Pmax の点を結んだ時の傾きとしている。また、基準強度は信頼水準 75% の 95% 下限値、基準回転剛性は信頼水準 75% の 50% 下限値の値より求めている。図 6 より、繊維平行方向では剛性は高いものの、変形性能に乏しく、脆性的な破壊を示しており、繊維直交方向では剛性は繊維平行方向より低いものの、変形性能は繊維平行に比べ確保でき、緩やかな耐力低下をしている傾向が把握できた。

図 6 荷重－変形関係[単調引張実験]

表 3 大径ボルト単調引張性能

繊維方向	大径ボルト長さ	平均値		基準値	
		初期剛性 (kN/mm)	最大耐力 (kN)	基準剛性 (kN/mm)	基準強度 (kN)
平行	300	162.4	128.4	156.2	88.1
	400	130.3	157.5	120.4	144.1
直交	420	60.9	177.9	58.0	139.5

2.4 接合部実験実験結果

2.4.1 破壊性状

破壊性状は、全試験体において、繊維平行方向に配置された大径ボルトが引張力を受けて引き抜けての破壊となった。大径ボルト引き抜け時に割裂を生じる試験体が数体見られた。引張力を負担している大径ボルトが全部引き抜けを起こした後は、耐力は急激に低下している。写真 1 に柱脚部での破壊性状を写真 2 に梁－柱接合部での破壊性状を、写真 3 に梁－梁接合部での破壊性状を示す。

写真 1 柱脚部破壊性状 (図 3a 参照)

写真 2 梁－柱接合部破壊性状 (図 3b 参照)

写真 3 梁－梁接合部破壊性状 (図 3c 参照)

2.4.2 最大曲げモーメント・回転剛性

表 4 に実験で得られた接合部の最大耐力、回転剛性、基準強度、基準回転剛性を示す。回転剛性の値は、実験データから包絡線を取り、0.1Pmax と 0.4Pmax の点を結んだ時の傾きとしている。また、基準強度は信頼水準 75% の 95% 下限値、基準回転剛性は信頼水準 75% の 50% 下限値の値より求めている。

表 4 接合部実験実験結果

		平均値		基準値	
		回転剛性 (kN・m/rad.)	最大曲げモーメント (kN・m)	基準剛性 (kN・m/rad.)	基準強度 (kN・m)
柱脚部	CO	15976.1	164.2	14980.1	117.4
梁－柱接合部	H700	9520.2	138.6	9366.1	101.0
	H900	18806.2	198.0	18350.4	151.0
梁－梁接合部	Beam	14482.5	127.9	14088.0	53.6

2.4.3 応力度分布

4体のうち1体に貼り付けたひずみゲージの値より、木材表面での応力度分布を図7に示す。図中の値は回転角 $1/125\text{rad}$ 時の値とし、横軸は図5中に示された基準点からの貼付位置を示している。

曲げ応力度分布の傾向として、柱脚部では、加力方向に平行のX面では固定端片持ち梁での曲げ応力度分布に近い形で応力が分布している。加力方向に直交のY面では大径ボルトの配置位置より上の部分では一様に応力が分布しているが、大径ボルトが配置されている部分では応力分布に偏りが見られた。梁-柱接合部では、柱面では

図7 応力度分布

は柱の断面が大きいため、表面での応力度はほとんど現れていない。梁面では、大径ボルト配置部分で応力度が大きくなっており、中間部分では応力をほとんど負担しておらず、平面保持が成り立っていないことがわかる。梁-梁接合部では、大径ボルト配置位置に応力が集中しているのがわかる（いずれも弾性範囲内）。

大径ボルト配置位置での横方向応力度分布は、どの接合形式でも接合面付近で木材を引き裂く方向に応力が分布していることがわかる。割裂はこの応力によって生じるものと推測される。

3. 検証及び考察

3.1 単調引張実験結果より接合部の最大曲げモーメントの算定

本接合部の曲げモーメントに対する抵抗機構は、部材に対称に配された大径ボルトの偶力によるものである。応力度分布からも、その傾向を把握することができる。そこで本節ではその抵抗機構を念頭に置き、大径ボルト1本での引抜耐力より接合部の最大曲げモーメントの評価を行うことができるかを検討する。

実験での破壊性状より、本接合形式では繊維平行方向に挿入された大径ボルト接合部での破壊により最大耐力が決定していることが把握できた。よって、最大曲げモーメントについては繊維平行方向側で評価を行うこととした。

単調引張実験で得られた最大引抜耐力より、接合部実験の最大曲げモーメントを評価する算定方法として、(1)式を示す。(1)式は、接合部において圧縮力負担側と引張力負担側が同等に耐力を負担していると仮定した上で算定している。

$$M = T \times N \times B \quad (1)$$

M : 接合部推定曲げモーメント、 T : 大径ボルト単体の引抜耐力、 B : 大径ボルト間距離、 N : 接合部の引張力負担側に配置されている大径ボルト本数

大径ボルト単体の引抜耐力は実験で得られた表3での平均値を使用した。大径ボルト間距離は図4中に示した、圧縮側と引張側の大径ボルトの間での距離である。ただし、梁-梁接合部に関しては、他の接合部と抵抗機構が異なるため、変形より求めた反曲点をもとにボルト間距離に当たる値を設定した。接合部の引張力を負担している大径ボルトは、梁-柱接合部、梁-梁接合部では図4のように

表5 最大曲げモーメントの比較

		推定値 (kN・m)	接合部実験値 (kN・m)	実験値/推定値
柱脚部	CO 1	154.0	147.0	95%
	CO 2		194.3	126%
	CO 3		127.6	82%
	CO 4		185.1	120%
梁-柱 接合部	H700 1	141.2	137.6	97%
	H700 2		130.8	92%
	H700 3		136.6	96%
	H700 4		140.0	99%
	H900 1	205.3	236.1	115%
	H900 2		235.3	114%
	H900 3		185.5	90%
	H900 4		181.8	88%
梁-梁 接合部	Beam 1	146.7	141.0	94%
	Beam 2		98.3	67%
	Beam 3		111.2	75%
	Beam 4		160.9	109%

2本としている。柱脚部では、引張側の大径ボルトは計6本あるが、応力度分布より、4本に大きく応力が作用していることが確認できているため、本数を4本とした。(1)式にそれぞれの数値を代入し、求めた推定曲げモーメントと、実験で得られた曲げモーメントとの比較を表5に示す。実験値/推定値の値は柱脚部で83%~126%（平均106%）、梁-柱接合部では梁せい700mmで93%~99%（平均97%）、梁せい900mmで89%~115%（平均102%）、梁-梁接合部で71%~116%（平均92%）となった。(1)式を用いて大径ボルト単体の結果から接合部最大曲げモーメントを推測する際、柱脚部では梁-柱接合部と比べて大径ボルトの本数が多いため、精度にばらつきが出たと思われるが、柱脚部で精度20%、梁-柱接合部では精度10%以内で推定できることが把握できた。梁-梁接合部については一部にドリフトピン接合部を用いているので精度上の問題もあり若干のばらつきが認められるが概ね推定が可能と言える。

3.2 木材のせん断強度より接合部最大耐力の推定

本接合部では、繊維平行方向に挿入された大径ボルトが木部から引き抜けることにより耐力が急激に低下する。そのため、最大耐力は、引き抜ける直前の木部せん断耐力に依存しているものと推定される。そこで、木部でせん断力を負担する部分（以後せん断負担面積 A と称する）を計算し、日本農林規格で与えられている集成材のせん断強度 F_s をせん断負担面積 A で乗じた T_{FsA} を求め、この値より接合部の最大耐力を推定可能であるかを実験結果と比較することにより検証する。

F_s は、 3.0N/mm^2 （樹種：スプルース）を使用し、 A は実験で確認された破壊位置より、大径ボルト歯間の木部の面積と仮定する。大径ボルト1本あたりの最大耐力 T_{FsA} は(2)式によって推定し、(1)式の T に T_{FsA} を代入することによって接合部での最大曲げモーメントを算出した。

$$A = d \pi (l - h \cdot l / b)$$

$$T_{FsA} = F_s \times A \quad (2)$$

A : せん断負担面積、 d : 大径ボルト外径、 l : 大径ボルト長さ、 h : 大径ボルト歯の厚さ、 b : 大径ボルト歯の間隔、 T_{FsA} : 引抜耐力推定値、 F_s : 木材のせん断強度

表6に実大接合部実験結果と FsA を用いて推定した接合部耐力の

表6 FsA からの推定値と接合部実験最大曲げモーメントとの比較

		推定値 (kN・m)	接合部実験値 (kN・m)	実験値/推定値
柱脚部	CO 1	112.3	147.0	130%
	CO 2		194.3	173%
	CO 3		127.6	113%
	CO 4		185.1	164%
梁-柱 接合部	H700 1	102.9	137.6	133%
	H700 2		130.8	127%
	H700 3		136.6	132%
	H700 4		140.0	136%
	H900 1	149.7	236.1	157%
	H900 2		235.3	157%
	H900 3		185.5	123%
	H900 4		181.8	121%
梁-梁 接合部	Beam 1	116.3	141.0	121%
	Beam 2		98.3	84%
	Beam 3		111.2	96%
	Beam 4		160.9	138%

比較を示す。ほとんどの試験体で実験値が推定値を上回っており、(2)式で最大曲げモーメントを安全側に評価できていることがわかる。よって、接合部の最大曲げモーメントは木材のせん断強度により概ね20%~30%安全側に耐力の推測ができることが把握できた。

3.3 単調引張実験結果より実大接合部の回転剛性の算定

本節では、大径ボルト1本でのすべり剛性より接合部の回転剛性の評価が可能であるかを検討する。

単調引張実験では、初期滑りの現象が確認されているが、実大接合部実験では最初に高力ボルトで接合部分の締め付けを行っているため、初期滑りは生じないものと考えられる。よって単調引張実験でのすべり剛性の値は初期滑りを含まない0.1Pmaxと0.4Pmaxを結んだときの傾きより得られた表3での値を使用した。

推定方法としては、接合部で作用する曲げモーメントに対しての回転角の予測を行っている。単調引張実験から接合部での回転角を推定は、(3)式のように算定した。なお、接合部実験では圧縮側においてめり込みなどの影響が入ると考えられるため、圧縮側のめり込み量については実験値を代入した。

$$\theta = \{A + M / (K \cdot B \cdot N)\} / B \quad (3)$$

θ : 回転角、 A : 大径ボルトめり込み変位、 M : 接合部に作用した曲げモーメント、 K : 単調引張実験でのすべり剛性、 B : 大径ボルト間距離、 N : 引張側に配置された大径ボルト本数

回転角 1/500rad.での接合部実験における回転剛性と(3)式で得られた推定値とを比較したものを表7に示す。また、図8に接合部実験で得られた曲げモーメント-回転角曲線において、実験値と推定値の推移を示す。図中の太線が推定値を示している。図8における推定値は、単調引張実験での変位で制御したため、推定が最大変位に至った時点で終了している。表7、図8より、1/500rad.付近の値では推定値と実験値が近い値を示している。実験値/推定値の値は、柱脚部では75%~83%、梁-柱接合部では66%~102%、梁-梁接合部では96%~105%を示しており、柱脚部や梁-柱接合部の一部で実験値が大きく下回る試験体も見られるが概ね精度20%の範囲にあることが把握できた。変形が大きくなるにつれ、全体的に推定値が実験値を上回る傾向が見られる。接合部実験では繰り返し載荷を行っており、その影響が回転剛性に表われていると考えられる。

表7 回転剛性の比較

		推定値 (kN・m/rad.)	接合部実験値 (kN・m/rad.)	実験値/推定値
柱脚部	CO 1	30223.8	22774.1	75%
	CO 2	31250.8	24288.8	78%
	CO 3	35392.7	26314.1	74%
	CO 4	30639.5	25290.9	83%
梁-柱 接合部	H700 1	10892.3	8762.3	80%
	H700 2	14606.5	9658.5	66%
	H700 3	14321.0	11638.1	81%
	H700 4	12606.1	10390.0	82%
	H900 1	23407.1	18040.0	77%
	H900 2	25326.2	25824.4	102%
	H900 3	28446.5	24790.1	87%
	H900 4	28383.3	23720.5	84%
梁-梁 接合部	Beam 1	5112.4	5088.2	100%
	Beam 2	7738.9	8140.5	105%
	Beam 3	4129.7	3969.0	96%
	Beam 4	4759.9	4735.5	99%

図8 回転剛性の比較 [曲げモーメントー回転角関係]

(3)式では若干の誤差は見られるが概ね回転剛性の評価が可能である。

4. まとめ

本研究では、3種類の接合部実験を行い、それぞれの接合部での挙動を把握することができた。また、大径ボルトを用いたモーメント抵抗接合を大断面部材に適用する際に、大径ボルト1本の最大耐力、初期剛性より接合部の力学的挙動を推測できることが把握できた。最大曲げモーメントについては、木材のせん断強度より概ね20%~30%安全側に耐力の推定ができることが把握できた。

最後に、本研究における実験の実施に際し御協力頂いた IIWC の雨宮陸男氏、石森屋材木店、千代田製作所に感謝の意を表します。また本研究に関し実験、データ整理等において御助力頂いた明治大学木質構造研究室 2003 年度卒業生の武藤隆博氏、横山和則氏をはじめとする卒業生諸氏に感謝致します。なお、本研究は平成 15 年度文部省学術フロンティア推進事業重点研究 (平成 15 年度選定、研究代表者: 野口弘行) 及び平成 15 年度文部科学省科学研究費補助金基盤研究 A (研究代表者: 野口弘行) の一部として行われたものである。

参考文献

- 1) 日本建築学会: 木質構造設計ノート、木質ラーメン構造、pp.235-304、1995.1
- 2) 大野義昭、横島裕二、荘所直哉、乃込寛之、藤谷義信、大橋好光: ドリフトピンを用いた木質ラーメン構造の柱-梁接合部に関する研究、日本建築学会構造系論文集、No.567、pp.85-92、2003.5
- 3) 荘所直哉、藤谷義信、横島裕二、乃込寛之、大野義昭、大橋好光: ドリフトピンを用いた木質ラーメン構造の柱-梁接合部に関する研究 その2 モーメント抵抗要素の実験と実大構造物での検討、日本建築学会構造系論文集、No.578、pp.91-98、2004.4
- 4) 坂田弘安、松原洋介、和田章: ストレススキップ効果を用いた木質モーメント抵抗接合部の力学的特性に関する実験研究、日本建築学会構造系論文集、No.574、pp.143-150、2003.12
- 5) 小林幹大、野口弘行、本岡淳一、鈴木博: 大径ボルト剛接合法 (SPC 工法) 接合部の実験的研究 (その 1) (その 2)、日本建築学会学術講演梗概集 C-1 分冊、pp.45-48、1999.9
- 6) 小林幹大、野口弘行、萩生田秀之: 二重ねじ構造を持つ大径ボルトを用いた木質剛接合部の単体引張挙動に関する研究 (その 1) (その 2)、日本建築学会学術講演梗概集 C-1 分冊、pp.327-330、2000.9
- 7) 渡辺英幸、野口弘行、萩生田秀之: 大径ボルト剛接合法 (SPC 工法) 接合部の実験的研究 (その 3) (その 4)、日本建築学会学術講演梗概集 C-1 分冊、pp.71-74、2002.8
- 8) 浦上瑞穂、野口弘行、岩崎誠司: 大径ボルト剛接合法 (SPC 工法) 接合部の実験的研究 (その 5) (その 6)、日本建築学会学術講演梗概集 C-1 分冊、pp.71-74、2003.9

[2004年4月20日原稿受理 2004年7月29日採用決定]