繊維直交方向荷重を受けるボルト接合に対する 支圧強度に関する実験的考察

AN EXPERIMENTAL STUDY ON EMBEDMENT STRENGTH FOR BOLTED CONNECTIONS LOADED PERPENDICULAR TO THE GRAIN

神戸 渡*, 板垣 直行**, 飯島 泰男***

Wataru KAMBE, Naoyuki ITAGAKI and Yasuo IJIMA

For bolted connections in timber structures, calculation method based on European yield theory is well known and widely used in the world. On this equation, we need some material properties, embedment strength of wood, yield strength of bolt and each size of specimens. Based on some test results, the strength on the latest standard in Japan announced in public. On the other hand, failure modes in wood aren't considered enough. On this study, we conducted bearing tests based on BS EN 383 and 3-point-bearing test, using end-distance, bolts diameter and wood species as tests parameter. We arranged the specimens with or without clearance between specimen and loaded-steel-plate to observe crack behavior. Additionally tension-loaded bolted specimens were analyzed by failure modes and the bearing strengths were calculated according to EYT equation.

As a result, 2%off-set strength was corresponding with the crack-starting-strength on bearing tests. The cracked-strength of bolted connection was almost the same with the calculation result with 2%off-set strength.

Keywords: *Structural glulam, Bolted connections, Embedment strength, Crack starting evaluation*

構造用集成材, ボルト接合, 支圧強度, き裂発生評価

1. はじめに

木質構造建築物における接合部には、ボルト・ドリフトピン等を用いることが多く、木質構造設計規準⁹⁾(以下、木規準)では、ヨーロッパ型降伏理論式(以下、EYT式)に基いた設計のための降伏耐力算出式が示されている。

先ず算出式の取り扱いについて、再確認する。算出式に必要な材料定数は、鋼材(ボルト)の降伏応力度、木材の支圧強度である。これらの他に寸法に依存する係数を用いて、耐力を求める。Yasumura等⁵⁾は、いくつかの条件を設定した実験結果と比較することで、設計式として有用であることを示しており、それが規準の基となっている。また、接合部の降伏耐力が確保できるように端距離・縁距離・接合具の相互距離の必要量が規定されている。

本研究では繊維直交方向に荷重をうけるボルト接合部とその場合の木材の割裂性状¹¹⁾に焦点を当てており、それに関連する項目を説明する。旧規準(1995年版⁹⁾)と現行規準(2000年版と2006年版はEYT式に関しては同じ)での考え方と本研究での着目点を図1に示す。同図における①-2)に当たる実験例は、接合部における寸法規定を考える上では有用であるが、現行と比較した場合、寸法規定を定めるための材料試験と捉えるべきなのか、接合部試験と捉えるべ

きなのか、ということが判断しづらいと考える。図2,3,4に本試験体を示しており、図2,3は現行規準では材料実験に相当する。図4の試験体は見かけ上、接合部であるという印象を与えると考えられ、既報⁷⁾でも接合部と捉えている。ただし、接合部としてこのような加力状態は必ずしも一般的とは考えにくいので、ここでは仮にボルト接合と呼ぶことにする。そして、このようなボルト接合のき裂発生耐力を、き裂発生を評価するための材料実験から求める、という考えに基づき検討を進める。

耐力を算出する上で支圧強度は重要な要素であるが、図1に示すように新旧の規準でその値が変わっている。この支圧強度に関して、BS EN383⁹⁾ではoff-set法で支圧強度を算出するが、川元、小松等¹⁰⁾はoff-setの値は画一的に降伏値を決定できるという利点がある反面、接合部の径が変位に差異を与える可能性があると述べている。また支圧実験では、その支圧強度にのみ着目しているが、ボルト孔の縁からなどの割裂性状は考慮されていない。更にoff-set法では2%と5%を採用することが多いが、上記の問題点などを含めて、どちらが良いかという明確な判断基準がない。

ボルトの設計耐力に関して、蒲池ら¹¹⁾は接合部においてボルトの段階的な降伏を想定した耐力の算出方法を提案している。この中で

本論文の一部は既報¹⁾²⁾³⁾にて発表しており、再構成したものである。

* 東京理科大学工学部第一部建築学科 助教・博士(工学)

** 秋田県立大学システム科学技術学部 准教授・博士(工学)

*** 秋田県立大学木材高度加工研究所 教授・農博

Assistant Prof., Dept. of Arch., Faculty of Eng., Tokyo Univ. of Sci., Dr. Eng.

Assoc. Prof., Faculty of Systems & Tech., Akita Pref. Univ., Dr. Eng.

Prof., Institute of Wood Technology, Akita Pref. Univ., Dr. Agr.

木材の割裂状態に関しては、完全破断する終局状態の式のみである。終局状態の式は van der Put, Leijten¹²⁾ の式によるもので、この式においてクラックの存在を想定しているが、初期クラックは存在するのか、存在した場合いつ進展が始まるのか、など不明確な点が挙げられる。また Smith ら¹³⁾ は木材のクラック進展はブリッジングに依存すると述べているが、そのような性状・材料定数はモデルでは考慮されていない。よって、接合部の詳細な挙動を考慮した設計式を確立するためには、上で述べたような問題点・疑問点に関する総合的な把握と検証が必要であると考ええる。

本研究では構造用集成材を用いて繊維直交方向に荷重を受けるボルト接合を対象とした、支圧強度の適用の考え方について検討を行った。具体的には支圧強度を算出するために2形式の材料実験を行い、各形式においてボルト径・端距離・樹種をパラメータとした。実験において、木材の割裂性状の観察も行い、off-set 法で算出される支圧強度と比較した。次に同材料を用いた繊維直交方向に荷重を受けるボルト接合の実験を行った。その試験体に対し、得られた支圧強度を適用した計算結果と実験結果との比較を行った。

2. 実験概要

2.1 供試材

本研究における3種類の実験の試験体には、オウシュウアカマツ (Scots Pine), カラマツ (Japanese Larch), スギ (Japanese Cedar) を用いており、同一等級のラミナによる集成材とした。オウシュウアカマツ、カラマツでは L110, スギでは L70 のラミナを用いた。厚さ 30mm, 幅 150mm、長さ約 4000mm のラミナを用いて集成材を2本ずつ作製した。それぞれの集成材のラミナのヤング係数は、ほぼ同値になるよ

うにラミナの選択をした。その集成材を2つ割りにしたものから試験体を切り出している。集成材にはフィンガージョイントは設けていない。ボルト孔を設けるラミナには、節等が少なく、ねじれ等がない材を用いた。ラミナの年輪形状に関して、木口から見ると左右対称で円弧状となっているものを用いた。試験体の密度はオウシュウアカマツでは 520 kg/m³ (標準偏差 3), カラマツでは 510 kg/m³ (標準偏差 1), スギでは 360 kg/m³ (標準偏差 2), 試験体の表面含水率は全て 15% 以下であった。

2.2 実験方法

図4に示すようなボルト接合における耐力を考える場合、端距離に影響を受けることが多い¹⁴⁾。そこで過去の報告、支圧実験方法の規格及び木規準を考慮し、本実験パラメータを設定した。特に着目した点は以下の通りである。

- 1) Sawata 等¹⁵⁾ の報告時における BS EN 規格での必要端距離は 7d であり、現行の BS EN 規格⁹⁾ での必要端距離は 20d。
- 2) ボルト接合の試験体の最大耐力は、端距離が 15d 以上において一定となる傾向が見られる¹⁴⁾。
- 3) ボルト接合の試験体で脆性破壊することの多い試験体の端距離は 4d¹⁴⁾。
- 4) 木規準⁴⁾ におけるボルト接合の端距離の最低距離は 7d。また、過去の実験で破壊性状が延性的に移行する場合の端距離は 7d 近辺。

その他に本研究で考慮したパラメータは、ボルト径 (M16 と M20) と、樹種 (3 種)、隙間の有無 (後述) である。

2.2.1 支圧実験

図2、写真1に BS EN 形式の実験の概要と風景、図3、写真2に3点曲げ形式の実験の概要と風景、試験体寸法一覧を表1、2に示す。

図1 ボルト接合部の耐力式の位置づけと本研究での着目点の概念図

前述の考えに基づき、BS EN 形式の実験では端距離を 4d, 7d, 15d, 20d とした。BS EN 形式の実験結果と材料の制限を踏まえ、3 点曲げ形式の実験では端距離を 7d, 15d とした。すべての試験体の縁距離 85mm とした。これは、孔が接着層にかからないこと、木規準での必要量を満たすこと、以上を考慮して決定した。ボルト用の孔は全ての試験体において、同じ位置にあるラミナに空けた。試験体の幅はボルト接合試験体の幅と同様とし、M16 では 64mm, M20 では 70mm とした。BS EN 383⁹⁾ では幅は 1.5d から 4d と規定されているため、M16 では 24 から 64mm, M20 では 30 から 80mm となり、規格の範囲となっている。Sawata 等¹⁵⁾ の実験では 32mm であり、それと比べると倍以上の幅となる。

変位の測定に関して、“加力治具と木材の相対変位”と示されている報告が多く、実験の簡便性を考えれば縁とボルト孔の中間部分に変位計用の板を留め付けているものと推察される。その場合、留め付ける位置が支圧変形により影響を受ける可能性があるため、縁距離の影響を把握するためにも、測定方法に統一性を持たせるべきと考えた。そこで本研究では、図 2,3,4 に示すように加力用治具と試験体の縁との相対変位を測定した(図 4 では、変位計 2)。

支持方法に関して、BS EN 形式の実験では試験体を H 型鋼の上に配置した。3 点曲げ形式の実験では、ローラー支持の部分に 70 × 70 × 15mm の鋼板を貼付し、支点のめり込み変位が著しくならないようにした。載荷速度は 0.5mm/min とし、検討には左右の変位計の平均値を用いた。先に数体の実験を行い、き裂発生点は相対変位が 10mm 程度であったことから、両実験において目標とする相対変位を 10mm とした。

図 2 BS EN 形式の実験の概要 (単位: mm)

図 3 3 点曲げ形式の実験の概要 (単位: mm)

図 4 ボルト接合の実験の概要

実験では鋼板と木材の間に隙間を設けず、接するようにすべきであるが、これではき裂発生を観測できない。筆者の一人はボルト接合試験体に対して隙間を設けた実験を行っており¹⁴⁾、それと同様に隙間がある場合と無い場合の支圧実験を行った。試験体とその両側の鋼板の間に、それぞれ 20mm, 計 40mm の隙間を設けた(図 2,3 は隙間がある場合の例。図 4 中では図(右)。図中の 20mm が隙間。)。そして 4 台の市販のビデオカメラを用いて、その隙間を通してボルト孔縁の 4 面から発生するき裂を観察を行った(隙間を設けた 3 点曲げ形式の実験は、ビデオ観察を失念してしまった)。

ボルト孔は卓上ボール盤で、新規のショートビットタイプの刃を用いて加工した。回転数は 1600 回/min である。使用したボルトは強度区分が 10.9 のものとした。

試験体数は、BS EN 形式の実験が樹種 3 × 端距離 4 × ボルト径 2 × 隙間の有無 2 × 各パラメータ 3 体(切り出しの都合で 2 体の場合もある)の合計 142 体、3 点曲げ形式の実験が樹種 3 × 端距離 2 × ボルト径 2 × 隙間の有無 2 × 各パラメータ 3 の合計 72 体である。

2.2.2 ボルト接合の実験

ボルト接合の実験方法の概要と風景を図 4、写真 3、試験体寸法の一覧を表 3 に示す。実験は図 4 に示すように引張り型とした。試験体のパラメータは前述の考えに基づき、端距離を 4d, 7d, 9d, 15d とした。加力速度、き裂発生の確認方法に関しては、支圧実験と同様

写真 1 BS EN 形式の実験の風景

写真 2 3 点曲げ形式の実験の風景

写真 3 ボルト接合の実験の風景と相対変位の測定方法

である。加力用のボルトは2種類用いており、上部のボルト孔部分で割裂させるために、ボルトが降伏しないように強度区分10.9のものをを用いた。下部の加力部分には15mm厚合板を貼付し(図中、斜線部)、SS400のボルトを用いた。変位計は図4に示すように計7カ所に設置した。

試験体数は、樹種3×端距離4×ボルト径2×各試験体3の72体である(隙間の無いものは行っていない)。

3. 実験結果

3.1. BS EN形式の実験の結果

BS EN形式の実験結果について説明する。全試験体の応力-変位関係を図5,6, き裂発生時の観察結果を図7, 表4, 実験結果の一覧を表5,6に示す。表5,6に, "5mm変位までの加力"という項を設けている。BS EN383³⁾に示すoff-set法では基準強度として相対変位が5mm時の応力度を用いている。3点曲げ形式の実験で, 5mmに達する前に荷重低下する場合があったので, 同内容を表中に示した。

実験における破壊性状として, 1) ボルト孔から繊維方向に沿ってき裂が進展するもの(写真4), 2) ほぼ45度の方向にき裂が進展するもの(写真5), 以上2種類が見られた。表5,6に示すように, 試験パラメータと破壊性状の相関性は見られなかった。

き裂発生に関して図7から分かるように, 目視による最初のき裂発生点は見かけの降伏点近傍であることが見て取れた。ここでボルトの縁の4面の中で最初にき裂が発生した際の応力度を $f_{init.}$ とし, off-set法で得られた支圧強度と比較したものを表4に示す。その結果, $f_{init.}$ は2%off-set強度($f_{90,2\%}$)とほぼ同値である

傾向が見て取れた。5%off-set強度($f_{90,5\%}$)に関しても, き裂が発生して著しく変形が進んだ後ではないので, 比較的近い値であった。

隙間の有無が応力-変位関係に与える影響に関して, 図5,6に示すようにオウシュウアカマツでは両条件はほぼ重なっている。M16のスギ(図5下), M20のカラマツ(図6中), M20のスギ(図6下)を見ると, 隙間有りの方が傾きが小さくなるもののがいくつか見られた。隙間ありの試験体はボルトが長くなるため, 曲げ変形による局所的なめり込みの影響が推察される。カラマツの場合, 隙間の有無の影響が見られるのはoff-set法で得られる強度には大きく影響しない範囲であったが, スギの場合, 違いは比較的早い段階から見られた。また, スギ(M20, 隙間有り), カラマツ(M20, 隙間有り), それぞれの半数以上で, 3次勾配に移行するものが見られた。このような問題に関して, 棚橋等¹⁶⁾は歪硬化の検討を行っており, 大歪領域での硬化の要因として木材組織の空隙が無くなった後の硬化を挙げている。このモデルでは3次勾配の因子として γH を挙げており, H は本研究での縁距離に相当し, γ は鉛直はね定数と関連する材料定数である。以上を考慮すると, 2次勾配は接合具が局所的にめり込むことによって発生し, その後加力が進むに従って接合具が全面的にめり込むことで, 組織が圧密される部分が形成され, 3次勾配に移行するという機構であると考えることができる。ただし隙間無しの方が全面的なめり込みに移行しやすいと考えると, 隙間無しの方が3次剛性に移行しやすいこととなり, 本結果の傾向は逆である。よって2次剛性の起因となった局所的なめり込みは3次勾配にも影響していると考えることができる。本研究では各ボルト径に対して1

表1 BS EN形式の実験の試験体概要

試験体名	樹種	試験体数	ボルト径	端距離	材長さ[mm]	幅[mm]	縁距離[mm]	せい[mm]
				e1	L	b	e2	h
16-4d-bear	オウシュウアカマツ(L110) (試験体名の頭にRを付す)	隙間有り を3体ずつ	M16	64	128	64	85	165
16-7d-bear				112	224			
16-15d-bear				240	480			
16-20d-bear				320	640			
20-4d-bear	スギ(スギ) (試験体名の頭にCを付す)	隙間無し を3体ずつ	M20	80	160	70	85	185
20-7d-bear				140	280			
20-15d-bear				300	600			
20-20d-bear				400	800			

表2 3点曲げ形式の実験の試験体概要

試験体名	樹種	試験体数	ボルト径	端距離	中心から 材端までの 距離	材長さ	幅	縁距離	せい
				e1	[mm]	L	b	e2	h
16-7d-3PB	オウシュウアカマツ(L110) (試験体名の頭にRを付す) カラマツ(L110) (試験体名の頭にLを付す) スギ(スギ) (試験体名の頭にCを付す)	隙間有り を3体ずつ	M16	112	150	300	64	85	165
16-15d-3PB				240	280	560			
20-7d-3PB				140	180	360			
20-15d-3PB				300	340	680			

表3 ボルト接合の試験体概要

試験体名	試験体数	樹種	ボルト径	材せい[mm]	材長さ[mm]	材幅[mm]	端距離[mm]	縁距離[mm]
				h	L	b	e1	e2
M16-4d	3	オウシュウアカマツ (L110) カラマツ (L110) スギ (L70)	M16	400	128	64	64(4d)	85 (5.3d)
M16-7d					224		112(7d)	
M16-9d					228		114(9d)	
M16-15d					480		240(15d)	
M20-4d			M20	440	160	70	80(4d)	85 (4.3d)
M20-7d					280		140(7d)	
M20-9d					360		180(9d)	
M20-15d					600		300(15d)

写真4 支圧実験の破壊性状 (その1)

写真5 支圧実験の破壊性状 (その2)

図5 BS EN形式の実験における応力-変位関係
(M16: 上から, オウシュウアカマツ, カラマツ, スギ)

図6 BS EN形式の実験における応力-変位関係
(M20: 上から, オウシュウアカマツ, カラマツ, スギ)

つの縁距離・試験体幅しか設定していないため、それらの寸法が変わることによる影響を明言することはできない。このメカニズムは接合部における塑性変形能力の解明に重要な事項であると思われるので、今後検討したいと考える。図6のスギ・7dで1体、応力度が大きい試験体がみられた。これは縁方向の内側に節等が存在したものであるため、本研究の考察には加えないこととする。

以上よりオウシュウアカマツ・カラマツでは、隙間の有無はoffset法で得られる強度にほとんど影響を及ぼさないことがわかる。よって、き裂の発生状況も同程度であると考えられる。一方スギの場合は、隙間の有無が影響するという結果であった。

3.2. 3 点曲げ形式の実験結果

3点曲げ形式の実験結果について説明をする。実験結果の一覧を表7、全試験体の応力-変位関係を図8に示す。

実験における破壊性状は前述のBS EN形式の実験と同様の2種類であり、この破壊性状と試験パラメータとは相関が見られなかった。3点曲げ形式の実験では相対変位が5mmに達する前に、破壊音と共に大きく荷重が低下するものが見られた。表7に示すように全

図7 応力-変位関係上におけるき裂発生点の例
(M16: 左から, オウシュウアカマツ, カラマツ, スギ)

表4 BS EN形式の実験におけるき裂発生測定

試験体名		算出強度		f_{lim}	1番目		2番目	3番目	4番目
		$f_{90,2\%}$	$f_{90,5\%}$		比率 ($f_{lim}/f_{90,0\%}$)				
		[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	2%の場合	5%の場合			
R16-4d bear	1	16.4	18.9	18.2	1.1	1.0	20.7	21.0	21.1
	-2	14.2	16.0	15.6	1.1	1.0	16.7	17.1	20.0
	-3	17.5	21.4	21.8	1.2	1.0	21.9	23.0	25.9
R16-7d-bear	-1	17.4	20.6	16.2	0.9	0.8	21.9	22.4	24.5
	-2	14.1	16.2	16.5	1.2	1.0	17.8	17.8	19.7
	-3	15.3	17.7	17.6	1.1	1.0	17.7	17.8	19.6
R16-15d-bear	-1	14.9	17.4	12.0	0.8	0.7	13.8	16.4	19.8
	-2	18.1	20.8	19.7	1.1	0.9	20.1	22.1	
	-3	15.8	18.8	16.4	1.0	0.9	16.8	18.7	20.5
R16-20d-bear	-1	15.9	18.5	15.1	1.0	0.8	15.4	21.8	
	-2	11.1	12.8	13.3	1.2	1.0	13.5	13.8	13.9
	-3	11.6	13.3	12.8	1.1	1.0	13.3	13.7	13.7
L16-4d-bear	-1	14.4	16.6	16.7	1.2	1.0	17.2	17.6	17.9
	-2	13.6	16.0	16.9	1.2	1.1	17.5	19.7	19.8
	-3	14.8	17.1	15.3	1.0	0.9	19.2	21.4	
L16-7d-bear	-1	15.6	18.7	13.0	0.8	0.7	14.5	15.5	18.3
	-2	16.1	18.5	12.0	0.7	0.6	14.9	15.0	19.6
	-3	13.4	16.7	16.9	1.3	1.0	17.3	18.5	19.0
L16-15d-bear	-1	16.5	18.7	12.8	0.8	0.7	14.6	15.5	17.0
	-2	14.8	17.4	16.1	1.1	0.9	18.1	18.2	19.0
	-3	19.8	22.1	18.3	0.9	0.8	18.7	21.1	22.4
L16-20d-bear	-1	17.8	21.6	18.7	1.1	0.9	19.4	20.8	21.0
	-2	16.9	20.4	13.0	0.8	0.6	13.5	15.5	17.3
	-3	16.4	18.6	9.8	0.6	0.5	14.9	16.7	17.9
C16-4d-bear	-1	7.1	8.4	6.2	0.9	0.7	7.4	9.0	9.2
	-2	6.5	7.7	7.5	1.2	1.0	7.6	8.3	8.6
	-3	6.3	7.7	5.3	0.8	0.7	5.7	7.0	8.0
C16-7d-bear	-1	7.4	8.9	9.0	1.2	1.0	9.8	10.0	10.2
	-2	8.1	10.0	8.6	1.1	0.9	9.1	9.4	12.0
	-3	7.9	9.8	8.6	1.1	0.9	9.9	10.9	11.0
C16-15d-bear	-1	7.5	8.8	7.0	0.9	0.8	7.9	9.2	
	-2	7.3	8.7	8.1	1.1	0.9	8.7	9.2	9.3
	-3	7.3	8.6	7.3	1.0	0.9	7.6	8.9	10.6
C16-20d-bear	-1	7.1	8.9	7.4	1.1	0.8	8.1	8.3	9.4
	-2	7.2	9.1	6.6	0.9	0.7	8.3	8.5	8.5
	-3	6.0	7.5	5.3	0.9	0.7	6.0	6.3	8.6

ての樹種において M20 の端距離 15d のものが、この破壊性状であった。この試験体は端距離が 300mm、幅も他より大きく、それら寸法が破壊モードに影響したと考えられる。

隙間の有無が応力 - 変位関係に与える影響に関して、図 8 に示すように、オウシュウアカマツでは両条件が重なっていることがわかる。カラマツの M20 の場合とスギの M16 の場合では重なっているが、その他では隙間有りの方が若干傾きが小さいものが見られた。ここでは、必ずしも一定の傾向でないことを考慮すると、材のバラツキが影響したと考える。

3.3. 両実験結果の考察

BS EN 形式の実験より、最初のき裂発生応力度と 2%off-set 強度が最も近い値を示した。そこで両支圧実験の 2%off-set 強度の平均値の

分布を図 9 に示す。オウシュウアカマツ、カラマツでは多少のバラツキはあるものの、端距離・実験方法の違いによる顕著な傾向は見られなかった。よって両タイプの実験は降伏点に至るまでは、同様の傾向を示すものと考えられる。つまり、き裂の発生に関しても、両実験は同様の傾向を示すと言える。またその値は径が大きい方が若干値が小さく、これは既往の研究¹⁵⁾でも指摘されている傾向である。BS EN 形式の実験のスギ・端距離 4d, 7d のように部分的に差が見られる場合があるが、必ずしも一定の傾向ではないことから、材のバラツキの影響と考える。

以上のことを総合的に考えた場合、支圧実験から得られる 2%off-set 強度は端距離が変化しても一定の傾向を示し、その応力度はボルト孔縁からき裂が発生する時の応力度とほぼ同値になると結論づ

表 5 BS EN 形式の実験の結果一覧 (M16)

試験体名	隙間の有無	f _{90,5mm}		f _{90,2%} [N/mm ²]		f _{90,5%} [N/mm ²]		5mm変位までの加力	破壊性状**
		[N/mm ²]	各実験値	統計値*	各実験値	統計値*	各実験値		
R16-4d-bear	-1	有	22.6	16.4	16.0	18.9	18.8	○	1
	-2		20.1	14.2	1.7	16.0	2.7	○	1
	-3		26.9	17.5	10.7%	21.4	14%	○	1
	-4	無	23.7	18.7	19.3	21.1	22.2	○	1
	-5		27.1	18.5	1.2	21.6	1.4	○	1
	-6		26.6	20.6	6.1%	23.8	6.5%	○	1
R16-7d-bear	-1	有	25.2	17.4	15.6	20.6	18.2	○	1
	-2		20.1	14.1	1.7	16.2	2.2	○	1
	-3		22.9	15.3	10.9%	17.7	12%	○	1
	-4	無	25.9	18.5	15.1	21.0	17.5	○	1
	-5		22.9	13.5	2.9	16.2	3.1	○	1
	-6		21.2	13.3	19.5%	15.2	18%	○	1
R16-15d-bear	-1	有	21.2	14.9	16.3	17.4	19.0	○	1
	-2		24.8	18.1	1.7	20.8	1.7	○	2
	-3		23.4	15.8	10.3%	18.8	9%	○	1
	-4	無	22.0	13.4	15.0	16.1	17.7	○	1
	-5		22.9	15.9	1.3	18.8	1.5	○	1
	-6		24.7	15.6	9.0%	18.3	8%	○	1
R16-20d-bear	-1	有	23.5	15.9	12.9	18.5	14.9	○	1
	-2		15.8	11.1	2.6	12.8	3.1	○	2
	-3		16.7	11.6	20.5%	13.3	21%	○	1
	-4	無	24.5	15.0	13.1	17.7	15.5	○	1
	-5		18.6	12.5	1.7	14.8	2.0	○	1
	-6		18.8	11.8	12.8%	13.9	13%	○	1
L16-4d-bear	-1	有	18.7	14.4	14.3	16.6	16.6	○	1
	-2		19.2	13.6	0.6	16.0	0.5	○	1
	-3		20.2	14.8	4.3%	17.1	3%	○	1
	-4	無	19.9	16.3	16.0	18.3	18.2	○	1
	-5		20.5	14.6	1.3	17.1	1.1	○	1
	-6		22.1	17.2	8.1%	19.4	6%	○	1
L16-7d-bear	-1	有	21.9	15.6	15.0	18.7	18.0	○	1
	-2		21.5	16.1	1.4	18.5	1.1	○	1
	-3		20.7	13.4	9.6%	16.7	6%	○	1
	-4	無	21.4	13.6	13.9	17.1	16.9	○	1
	-5		22.6	13.4	0.7	16.0	0.8	○	1
	-6		22.1	14.8	5.2%	17.5	5%	○	1
L16-15d-bear	-1	有	20.2	16.5	17.1	18.7	19.4	○	1
	-2		20.5	14.8	2.5	17.4	2.4	○	1
	-3		23.4	19.8	14.9%	22.1	13%	○	1
	-4	無	21.4	13.9	15.7	16.5	18.1	○	1
	-5		22.9	18.8	2.7	20.8	2.4	○	1
	-6		21.9	14.4	17.1%	17.0	13%	○	1
L16-20d-bear	-1	有	26.3	17.8	17.0	21.6	20.2	○	1
	-2		25.3	16.9	0.7	20.4	1.5	○	2
	-3		21.1	16.4	4.4%	18.6	7%	○	2
	-4	無	21.0	14.4	13.8	16.5	16.1	○	1
	-5		20.4	13.0	0.7	15.3	0.7	○	1
	-6		20.3	14.1	5.2%	16.5	4%	○	1
C16-4d-bear	-1	有	9.2	7.1	6.6	8.4	7.9	○	1
	-2		9.5	6.5	0.4	7.7	0.4	○	1
	-3		8.9	6.3	5.6%	7.7	5%	○	1
	-4	無	16.4	13.1	13.1	14.7	14.7	○	1
	-5		13.0	8.8	8.8	10.5	10.5	○	1
	-6		14.2	10.1	10.1	11.7	11.7	○	1
C16-7d-bear	-1	有	11.2	7.4	7.8	8.9	9.6	○	1
	-2		12.6	8.1	0.4	10.0	0.6	○	1
	-3		12.5	7.9	4.5%	9.8	6%	○	1
	-4	無	13.3	8.0	13.1	9.6	14.7	○	1
	-5		14.6	11.8	8.8	13.2	10.5	○	2
	-6		14.8	7.5	10.1	9.3	11.7	○	2
C16-15d-bear	-1	有	10.9	7.5	7.4	8.8	8.7	○	1
	-2		10.9	7.3	0.1	8.7	0.1	○	1
	-3		10.9	7.3	1.1%	8.6	1%	○	1
	-4	無	11.4	8.1	7.7	9.6	9.0	○	1
	-5		13.2	7.8	0.4	9.0	0.5	○	1
	-6		12.5	7.2	5.4%	8.5	6%	○	1
C16-20d-bear	-1	有	10.7	7.1	6.8	8.9	8.5	○	2
	-2		11.9	7.2	0.7	9.1	0.9	○	1
	-3		9.1	6.0	9.7%	7.5	10%	○	2
	-4	無	14.5	7.8	7.8	9.3	9.4	○	1
	-5		12.1	7.7	0.1	9.2	0.2	○	1
	-6		12.7	7.9	1.2%	9.6	2%	○	1

※統計値は、平均値、標準偏差、変動係数の順。
※※破壊性状。1:写真4、2:写真5

表 6 BS EN 形式の実験の結果一覧 (M20)

試験体名	隙間の有無	f _{90,5mm}		f _{90,2%} [N/mm ²]		f _{90,5%} [N/mm ²]		5mm変位までの加力の可否	破壊性状
		[N/mm ²]	各実験値	統計値*	各実験値	統計値*	各実験値		
R20-4d-bear	-1	有	17.6	12.4	13.3	14.7	15.5	○	1
	-2		19.3	14.7	1.2	16.8	1.1	○	1
	-3		18.4	12.9	9.1%	15.2	7%	○	1
	-4	無	21.8	13.4	12.5	16.1	14.7	○	1
	-5		16.6	17.0	0.8	13.8	1.2	○	1
	-6		17.6	12.1	6.1%	14.2	8.4%	○	1
R20-7d-bear	-1	有	19.7	13.6	14.1	16.0	16.2	○	1
	-2		18.5	13.9	0.7	15.8	0.5	○	1
	-3		18.8	14.9	4.8%	16.7	3%	○	1
	-4	無	18.0	11.8	14.5	13.9	16.9	○	1
	-5		21.1	15.3	2.5	18.0	2.6	○	2
	-6		22.1	16.6	17.1%	18.8	15%	○	1
R20-15d-bear	-1	有	17.0	12.2	12.4	14.2	14.5	○	1
	-2		17.4	12.4	0.2	14.4	0.3	○	1
	-3		17.9	12.7	1.9%	14.8	2%	○	1
	-4	無	17.9	13.6	12.5	15.8	14.7	○	1
	-5		17.2	11.6	1.0	13.7	1.1	○	1
	-6		17.9	12.4	8.3%	14.5	7%	○	1
R20-20d-bear	-1	有	17.5	12.5	12.6	14.5	14.7	○	1
	-2		17.3	12.0	0.7	14.0	0.8	○	1
	-3		18.9	13.4	5.6%	15.5	5%	○	1
	-4	無	19.7	13.6	13.0	16.0	15.3	○	1
	-5		20.9	13.8	1.2	16.2	1.4	○	1
	-6		16.9	11.7	9.0%	13.7	9%	○	1
L20-4d-bear	-1	有	18.5	14.4	13.9	16.4	15.5	○	1
	-2		15.7	13.1	0.8	14.7	0.9	○	2
	-3		16.2	14.3	5.4%	15.4	6%	○	2
	-4	無	20.9	15.8	14.7	18.3	16.7	○	1
	-5		17.5	14.1	1.0	15.5	1.5	○	2
	-6		18.3	14.1	6.6%	16.2	9%	○	2
L20-7d-bear	-1	有	16.8	13.8	13.9	15.4	15.5	○	2
	-2		17.1	13.3	0.6	15.0	0.6	○	2
	-3		17.7	14.4	4.2%	16.1	4%	○	2
	-4	無	17.2	12.4	14.3	14.7	16.7	○	1
	-5		18.9	14.5	1.9	16.9	1.9	○	1
	-6		20.0	16.1	13.2%	18.5	12%	○	1
L20-15d-bear	-1	有	16.3	10.6	11.1	12.6	13.2	○	1
	-2		16.6	11.3	0.4	13.3	0.6	○	1
	-3		17.1	11.4	3.9%	13.8	5%	○	1
	-4	無	18.4	13.2	15.2	15.8	17.7	○	1
	-5		19.2	15.8	1.9	17.7	2.0	○	1
	-6		22.3	16.8	12.3%	19.7	11%	○	1
L20-20d-bear	-1	有	15.4	10.6	12.0	12.3	13.7	○	1
	-2		14.5	12.7	1.2	13.9	1.3	○	2
	-3		17.9	12.8	10.1%	15.0	10%	○	2
	-4	無	19.1	13.9	15.3	16.3	17.6	○	1
	-5		20.5	14.9	1.6	17.3	1.5	○	1
	-6		19.9	17.0	10.4%	19.3	9%	○	1
C20-4d-bear	-1	有	10.3	6.8	7.9	8.1	9.2	○	1
	-2		12.3	8.6	0.9	10.0	0.9	○	1
	-3		11.3	8.2	12.0%	9.4	10%	○	1
	-4	無	11.9	8.5	9.1	10.3	10.9	○	1
	-5		13.5	10.2	1.0	12.0	0.9	○	1
	-6		12.8	8.7	0.1	10.5	0.1	○	2
C20-7d-bear	-1	有	9.6	5.9	7.5	7.2	8.9	○	1
	-2		12.3	8.4	1.4	9.9	1.5	○	2
	-3		11.8	8.3	18.6%	9.7	17%	○	1
	-4	無	21.7	9.6	10.3	11.7	11.7	○	2
	-5		12.6	9.6	11.1	12.3	12.3	○	1
	-6		13.8	10.9				○	1
C20-15d-bear	-1	有	10.6	6.6	7.6	7.9	9.1	○	1

けられる。そこで次節で述べるボルト接合試験体に対して、ここで得られた支圧強度をEYT式に入力し、実験値と計算値との比較を第4章にて行う。上記のようにスギでは隙間の有無で2%強度の値に差が見られたので、共通した取り扱いとするために、3樹種とも隙間有り試験体から得られた値を用いることとする。

3.4. ボルト接合の実験結果

ボルト接合の実験結果について説明する。実験結果の一覧を表8に示す。全ての試験体において、ボルト孔の縁からき裂は発生し、繊維方向に破断するものであった。破壊性状は、き裂の挙動によって特徴づけることができ、本研究では3つに分類した。それらは以下の通りである。

1. 脆性的：き裂の発生と同時に破断したもの
2. 延性的：き裂の進展がはっきりと確認できたもの
3. ほぼ脆性的：き裂が表面に発生したが明確に進展せず、その後加力が進んだ後に一気に破断したもの

端距離が4dの場合のみ、脆性的な破壊がみられた。それに対して端距離が9d以上であると、き裂の発生と進展が確認できた。端距離が7dの場合、延性的とほぼ脆性的が混在しており、端距離が9d以上となると全て延性的な破壊であった。これは既往の報告¹⁴⁾と同程度の傾向であった。

図10に各樹種、各ボルト径の端距離毎の最大荷重とき裂発生荷重の分布を示す。同図(右・上)のオウシュウアカマツ・M20・端距離15dの場合、端距離が9dのものより最大荷重が小さかった。この試験体では両端方向に均等にき裂が発生せず一方にのみ進展した後に破断しており、その影響である。最大荷重の分布を見るとM16では端距離が9dより大きくなっても、最大荷重はあまり大

図8 3点曲げ形式の実験における応力 - 変位関係
(上から、オウシュウアカマツ、カラマツ、スギ)

きくなっていない傾向が見て取れた。一方M20では端距離が大きくなるにつれて最大荷重が大きくなる傾向が見て取れた。き裂発生荷重に関して、表8より端距離7d以上になると全ての試験体でき裂発生荷重が存在していることが分かる。その値を最大荷重との比率で表すと、M16では0.48～0.97、M20では0.46～0.94であった。

4. ボルト接合の実験結果と設計式との関係

前章までにボルト接合試験体に対して、同じ幅・同樹種を用いた実験から支圧強度を得た。本章では、隙間有りの試験体の2%off-set強度を元にEYT式より耐力を算出し、ボルト接合試験体の耐力と

表7 3点曲げ形式の実験の結果一覧

試験体	隙間の有無	f_{5mm}	$f_{90,2\%}$ [N/mm ²]		$f_{90,5\%}$ [N/mm ²]		5mm変位までの加力※※	破壊性状※※※	
		[N/mm ²]	各実験値	統計値※	[N/mm ²]	統計値※			
R3PB-16-7d	-1	有	15.5	13.8	13.3	17.0	16.1	○	1
	-2		17.0	13.4	0.6	16.7	1.3	○	1
	-3		13.9	12.6	5%	14.7	8%	○	1
	-5	無	12.0	17.8	15.6	20.5	18.3	○	1
	-6		11.4	15.0	2.0	17.1	1.9	○	1
	-7		8.8	14.0	13%	17.2	10%	○	1
R3PB-16-15d	-1	有	16.4	16.7	15.1	19.9	17.9	○	1
	-2		20.5	15.7	2.1	18.8	2.4	○	1
	-3		12.3	12.7	14%	15.2	14%	○	1
	-4	無	10.6	13.2	13.9	15.3	16.1	○	1
	-5		11.8	15.3	1.3	18.0	1.6	○	1
	-6		10.5	13.1	9%	15.0	10%	○	1
R3PB-20-7d	-1	有	13.3	13.3	12.2	15.6	14.3	○	1
	-2		11.0	12.2	1.0	14.2	1.2	○	1
	-3		11.7	11.3	8%	13.3	8%	○	1
	-4	無	9.5	11.6	11.6	13.6	13.8	○	1
	-5		11.3	11.5	0.1	13.5	0.3	○	1
	-6		9.6	11.7	1%	14.2	3%	○	1
R3PD-20-15d	-1	有	13.8	11.6	11.4	13.7	13.5	×	1
	-2		14.3	11.2		13.3		×	1
	-3	無	10.2	11.3	11.3	13.1	13.1	×	1
	-4		10.5	11.2		13.2		×	1
L3PB-16-7d	-1	有	14.6	13.2	14.4	15.9	17.2	○	2
	-2		15.3	13.5	1.9	16.1	2.1	○	2
	-3		19.1	16.6	13%	19.5	12%	○	1
	-5	無	8.1	11.4	11.7	13.4	13.7	○	1
	-6		10.3	12.2	0.5	14.3	0.5	○	1
	-7		8.5	11.4	4%	13.4	4%	○	1
L3PB-16-15d	-1	有	14.1	12.5	15.4	15.5	18.5	○	1
	-2		18.3	15.5	2.9	18.3	3.2	×	1
	-3		21.2	18.2	19%	21.8	17%	×	1
	-4	無	10.7	13.3	12.9	15.1	14.9	○	1
	-5		8.7	12.7	0.3	14.8	0.2	○	1
	-6		10.0	12.7	3%	14.9	1%	○	1
L3PB-20-7d	-1	有	12.7	12.3	11.9	14.0	14.1	○	1
	-2		10.3	11.0	0.8	14.1	0.1	○	1
	-3		10.7	12.4	6%	14.3	1%	○	1
	-4	無	12.6	12.5	12.6	14.1	14.5	○	1
	-5		10.3	13.0	0.3	14.7	0.3	○	1
	-6		11.7	12.5	2%	14.7	2%	○	1
L3PB-20-15d	-1	有	11.9	11.0	12.5	13.4	14.1	×	1
	-2		17.3	14.3	1.7	13.7	1.0	×	1
	-3		13.5	12.3	13%	15.2	7%	×	1
	-4	無	12.7	15.2	12.9	15.6	14.1	×	1
	-5		10.0	12.6	2.2	14.3	1.6	×	1
	-6		9.4	10.9	17%	12.4	11%	○	1
C3PB-16-7d	-1	有	8.3	7.5	7.9	9.1	9.3	○	2
	-3		9.9	8.7	0.7	10.0	0.6	○	1
	-4		8.9	7.5	9%	8.8	7%	○	1
	-5	無	7.2	8.4	8.1	10.1	9.6	○	1
	-6		7.4	8.0	0.3	9.1	0.5	○	1
	-7		6.7	7.9	3%	9.7	5%	○	1
C3PB-16-15d	-1	有	10.8	7.3	7.5	8.8	8.9	○	1
	-2		7.6	7.6	0.1	9.0	0.1	○	1
	-3		8.6	7.5	2%	9.0	1%	○	1
	-4	無	7.4	7.0	7.3	8.5	8.9	○	1
	-5		7.4	7.5	0.3	9.0	0.4	○	1
	-6		6.1	7.6	5%	9.2	4%	○	1
C3PB-20-7d	-1	有	16.2	11.8	10.7	13.7	12.1	○	1
	-2		10.6	10.6	1.1	11.6	1.5	○	1
	-3		12.1	9.7	10%	10.9	12%	○	1
	-6	無	8.1	8.9	7.3	10.5	8.5	○	1
	-7		7.8	6.3	1.4	7.5	1.7	○	1
	-8		7.1	6.6	19%	7.7	20%	○	1
C3PB-20-15d	-1	有	10.2	9.1	8.5	10.4	9.8	×	1
	-7		10.3	9.4	1.3	11.0	1.5	×	1
	-8		9.7	6.9	16%	8.1	16%	○	1
	-4	無	8.9	9.5	9.9	11.1	11.3	○	1
	-5		8.7	11.1	1.1	12.5	1.0	○	1
	-6		9.6	9.0	11%	10.4	9%	○	1

※：統計値は、平均値、標準偏差、変動係数の順。※※：○は、5mmの変位まで荷重が上昇続けたもの、×は5mmの変位までに、大きく荷重低下したものを。※※※破壊性状。1:写真4、2:写真5

の比較を行う。EYT 式を式 1) に示すが、本試験体は全て支圧破壊モードと判定される。入力する支圧強度に関して、木規準に示されている信頼水準 75% の 95% 下側許容限界値を式 2) より算出した⁴⁾。更に比較のために、現行規準と旧規準の支圧強度を用いた耐力も算出した。ここでは各算出値を次のように定義する。

P_{y1} : 本実験での支圧強度を用いた算出値

P_{y2} : 現行規準の支圧強度を用いた算出値

P_{y3} : 旧規準の支圧強度を用いた算出値

算出結果の一覧を表 9、実験結果との比較を図 10 に示す。同図に示すように、カラマツ・スギでは P_{y1} はボルト接合試験体のき裂発生耐力をほぼ推定できていることが分かる。前述の通り M20 のオ

ウシュアカマツのボルト接合試験体は端距離が 20d の場合、き裂の進展が一方に偏るという他と異なる性状であったため判断が難しいが、M16 では大凡き裂発生耐力を推定できていることがわかる。つまり、支圧実験から得られた応力度によってボルト接合のき裂発生を予測可能ということである。ボルト接合試験体の端距離が 7d 以上では、き裂が徐々に進展し、この性状は支圧実験でも同様であることから、破壊形式の再現性もあることが分かる。一方、端距離が短い場合はボルト接合は脆性的に破断しており、これは材料試験ではほとんど見られない性状である。その破壊性状に適したクライテリア¹⁴⁾が必要であるということが再認識できる。

P_{y3} は全てのケースにおいて低めの値を算出した。現行の支圧強度を用いた P_{y2} に関して、実験の最大荷重よりも高い値を推定するケースが見られた。そこで安村ら⁷⁾の実験結果を用いて、同じように P_{y2} と P_{y3} を求めた結果を表 10 に示す。同表のイタリックで示すように現行規準の値を用いた場合、実験の最大荷重より高い数値を推定してしまう場合が見られた。ただし現在の一般的な接合部を考

図 9 隙間の有無による 2% 強度の比較

表 8 ボルト接合の実験結果一覧

樹種	M16				M20			
	試験体名	破壊性状	Pmax kN	Pini. kN	試験体名	破壊性状	Pmax kN	Pini. kN
オウシュアカマツ	R16-4d-1	脆性的	4.45	-	R20-4d-1	脆性的	12.45	-
	-2	ほぼ脆性的	8.90	8.40	-2	ほぼ脆性的	13.22	13.15
	-4	脆性的	10.77	-	-3	脆性的	13.12	-
	7d-1	延性的	15.55	11.57	7d-1	延性的	17.15	12.10
	-2	延性的	13.15	12.25	-2	ほぼ脆性的	16.82	16.67
	-3	延性的	13.65	12.05	-3	ほぼ脆性的	15.92	15.75
	9d-1	延性的	17.60	8.50	9d-1	延性的	18.75	15.37
	-2	延性的	17.42	9.60	-2	延性的	16.97	13.90
	-3	延性的	18.27	13.50	-3	延性的	13.12	11.90
	15d-1	延性的	18.52	13.90	15d-1	延性的	15.35	10.85
	-2	延性的	18.05	16.10	-2	延性的	13.95	13.08
	-3	延性的	15.55	13.08	-3	延性的	13.82	11.55
カラマツ	L16-4d-1	脆性的	10.00	-	L20-4d-1	脆性的	7.80	-
	-2	延性的	7.25	3.65	-2	ほぼ脆性的	9.10	8.10
	-3	ほぼ脆性的	7.20	7.20	-3	ほぼ脆性的	12.15	11.05
	7d-1	延性的	12.80	12.20	7d-1	ほぼ脆性的	16.35	15.95
	-2	延性的	12.45	11.65	-2	延性的	15.32	14.00
	-3	延性的	13.40	12.97	-3	ほぼ脆性的	16.27	15.67
	-4	延性的	13.40	11.47				
	9d-1	延性的	16.20	11.87	9d-1	延性的	17.22	14.27
	-2	延性的	20.05	12.85	-2	延性的	18.90	16.70
	-3	延性的	15.25	12.10	-3	延性的	17.62	15.67
	15d-1	延性的	16.40	12.07	15d-1	延性的	21.75	15.65
	-2	延性的	16.40	11.70	-2	延性的	22.35	18.83
スギ	C16-4d-1	ほぼ脆性的	6.07	4.47	C20-4d-1	脆性的	11.01	-
	-2	脆性的	5.05	-	-2	ほぼ脆性的	11.07	10.77
	-3	ほぼ脆性的	5.50	5.30	-3	脆性的	10.01	-
	-4	脆性的	6.95	-				
	7d-1	延性的	7.80	7.17	7d-1	延性的	14.35	12.00
	-2	延性的	8.05	7.40	-2	ほぼ脆性的	12.87	12.55
	-3	延性的	7.80	7.32	-3	延性的	16.00	7.32
	9d-1	延性的	9.30	4.85	9d-1	延性的	14.15	7.65
	-2	延性的	9.65	7.15	-2	延性的	13.12	10.40
	-3	延性的	9.82	6.57	-3	延性的	14.07	10.40
	15d-1	延性的	9.90	6.85	15d-1	延性的	17.45	15.45
	-2	延性的	10.17	8.15	-2	延性的	18.40	9.45
	-3	延性的	11.07	6.22	-3	延性的	17.40	9.22

図 10 ボルト接合の実験における最大荷重、き裂発生荷重の分布と設計式との関係

$$P_y = C \times F_e \times d \times l \quad \cdots \text{式 1)}$$

ここで、
 F_e : 木材の基準支圧強度、 F : 接合具の基準材料強度、 γ : (F/F_e) 、 d : 接合具径、 l : 主材厚、 C : 右より定まる係数

$$C = \min \left\{ \begin{array}{l} 1 \\ \frac{d}{l} \sqrt{\frac{8\gamma}{3}} \end{array} \right.$$

$$5\% \text{ 下限値} = \text{平均値} - K \times \text{標本標準偏差} \quad \cdots \text{式 2)}$$

ここで K : 定数。本研究では 1 標本の試験体数が 21 なので、文献 4) p.374 の表より 20 体に当たる 1.932 を用いた。

表 9 各支圧強度を用いたボルト接合耐力の算出値

樹種	ボルト径	算出値の種類	入力した支圧強度 [N/mm ²]	算出値 [kN]
オウシュウアカマツ	M16	P_{y1}	10.9	11.2
		P_{y2}	12.7	13.0
		P_{y3}	7.4	7.5
	M20	P_{y1}	10.7	15.0
		P_{y2}	12.7	17.8
		P_{y3}	7.4	10.3
カラマツ	M16	P_{y1}	11.7	12.0
		P_{y2}	12.7	13.0
		P_{y3}	7.4	7.5
	M20	P_{y1}	9.9	13.9
		P_{y2}	12.7	17.8
		P_{y3}	7.4	10.3
スギ	M16	P_{y1}	6.1	6.2
		P_{y2}	9.7	9.9
		P_{y3}	5.9	6.0
	M20	P_{y1}	4.9	6.9
		P_{y2}	9.7	13.6
		P_{y3}	5.9	8.2

表 10 安村ら⁷⁾の実験結果に新旧の支圧強度より求めた算出値との比較

ボルト径	最大荷重 [kN]	現行の規準		旧規準	
		支圧強度 [N/mm ²]	算出値 [kN]	支圧強度 [N/mm ²]	算出値 [kN]
16	10.2	11.2	11.4	7.35	7.5
	16.4		23.0		15.1
	11.6		11.4		7.5
	22.7		23.0		15.1
20	16.9	11.2	17.9	7.35	11.8
	33.8		35.8		23.5
	18.0		17.9		11.8
	36.0		35.8		23.5

えると、図 1 ①-2 のような接合部は見られない。よって現実的には、ここで述べた危険性は生じないと考えられる。

本研究では材料実験からき裂発生点を定義し、ボルト接合への適用性について検討した。ただし縁距離・材幅の違う場合及びボルト径の影響に関する検討が不足している。また 3 点曲げ形式で端距離の長いものは脆性的に破壊したことから、このような場合のクライテリア¹⁴⁾に関する検討も必要であると考えられる。

5. 結論

本研究では構造用集成材を用いて、繊維直交方向に荷重を受けるボルト接合、き裂発生を観察を含めた支圧実験を行った。得られた支圧強度のボルト接合の降伏耐力算定式に適用し、実験結果との比較により、その適合性に関する検討を行った。本研究で得られた知見は以下の通りである。

- 1) 端距離、樹種、ボルト径をパラメータとした支圧実験を行った結果、端距離は off-set 法から求まる支圧強度に大きく影響しないことがわかった。き裂発生観測と off-set 法による算出値の比較より、2%off-set 支圧強度はボルト孔の縁から最初にき裂が発生する時点の応力度に相当することがわかった。隙間の有無を比較した結果、オウシュウアカマツ、カラマツではその応力-変位関係に顕著な差が見られなかったことから、今回の隙間の範囲であれば、き裂発生は同様であると考えられる。
- 2) 支圧実験から得られた、き裂発生に相当すると判断した 2%off-set 支圧強度を用いて、木規準の方法に準拠して 5% 下限値を求め、EYT 式に従ってボルト接合に適用した。その結果、ボルト接合における、き裂発生点を推定できることがわかった。ただし、脆性的に破断するボルト接合には適用できない事も確認できた。
- 3) 2 種類の支圧実験を行った結果、3 点曲げ形式で端距離が長い場

合、その破壊モードが他とは異なり脆性的になりやすい傾向が見られた。この要因を今後は明らかにすべきと考える。

謝 辞

本研究は平成 19 年度科学研究費補助金・若手研究(スタートアップ)、課題番号:19860061、研究代表者:神戸渡、および平成 21 年前田記念工学振興財団 助成金、研究代表者:神戸渡、の一環として行ったものである。試験体作製にあたり、秋田グルーラム(株)の佐藤加奈子さん、実験を行うにあたり、秋田県立大学システム科学技術学部 田中祐介さん(当時)に協力頂きました。この場にて感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 神戸渡, 板垣直行, 木村彰孝, 飯島泰男: 繊維直交方向に引張加力を受ける木質構造ボルト接合部の破壊性状と支圧特性に関する実験的研究, 日本建築学会東北支部研究報告集, 第 72 号, 構造, pp.39-44, 2009.6
- 2) 神戸渡, 板垣直行, 飯島泰男: 構造用集成材を用いた 3 点曲げ形式のボルト支圧実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C 構造 III, pp.71-72, 2009
- 3) 神戸渡, 板垣直行, 飯島泰男: 繊維直交方向に引張荷重を受けるボルト接合部の破壊性状, 第 59 回 日本木材学会大会 研究発表要旨集, p.125, 2009
- 4) 日本建築学会: 木質構造設計規準・同解説, 丸善, 2006.12
- 5) M. Yasumura, T. Murota, T. Sakai: Ultimate properties of bolted joints in glued laminated timber, Proceedings of CIB-W18, 20-7-3, 1987
- 6) 日本建築学会: 木質構造設計規準・同解説, 丸善, pp.251-261, 1995
- 7) 安村基, 坂井英明: 木材の繊維に直交する方向の加力を受けるボルト接合部の耐力, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C 構造 II, pp.1419-1420, 1987
- 8) (財) 日本住宅・木材技術センター: 大断面木造建築物接合部設計マニュアル, 太平印刷社, 1996
- 9) BS EN 383: Determination of embedment strength and foundation values for dowel type fasteners, 2007
- 10) 川元紀雄, 小松幸平, 原田真樹: ドリフトピン接合部の繊維に直交する方向のせん断耐力(第 3 報), 木材学会誌, Vol.39, No.12, pp.1386-1392, 1993
- 11) 蒲池健, 稲山正弘, 井上雅文, 安藤直人: 鋼板添え板式ボルト接合部における荷重-すべり特性の評価法, 日本建築学会構造系論文集, Vol.73, No.631, pp.1599-1606, 2008.9
- 12) T.A.C.M van der Put, A.J.M Leijten: Evaluation of perpendicular to grain failure of beams caused by concentrated loads of joints, CIB-W18, paper33-7-7, 2000
- 13) I. Smith, E. Landis, M. Gong: Fracture and fatigue in wood, John Wiley & Sons Ltd, 2003
- 14) 神戸渡, 中込忠男, 伊倉裕人: 繊維直交方向荷重を受けるカラマツ集成材ボルト接合部の脆性破壊に対するローカルクライテリアの適用, 日本建築学会構造系論文集, No.611, pp.111-118, 2007.1
- 15) K. Sawata, M. Yasumura: Determination of embedding strength of wood for dowel type fasteners, J. Wood Sci., 48, pp.138-146, 2002
- 16) 棚橋秀光, 清水秀丸, 鈴木祥之: 歪硬化を考慮した直交異方性木材の弾塑性めり込み性能, 第 12 回 日本地震工学シンポジウム, pp.822-825, 2006.11

注

注 1) 本論文で用いる, "割裂", "き裂", "クラック" とは, 破壊力学における引張り型(モード I)に起因するものを意味している。

(2010 年 1 月 27 日原稿受理, 2010 年 7 月 23 日採用決定)