カラマツ及びトドマツ CLT の面外せん断強度 (第 1 報)

荷重方式及びスパン条件がせん断強度に与える影響^{*1}

石原 亘^{*2}, 高梨隆也^{*2}, 大橋義徳^{*2}, 松本和茂^{*2},
戸田正彦^{*3}, 植松武是^{*4}

Out-of-plane Shear Strength of CLT with Japanese Larch or Sakharin Fir I.

Influence of loading methods and span conditions on shear strength^{*1}

Wataru ISHIHARA^{*2}, Ryuya TAKANASHI^{*2}, Yoshinori OHASHI^{*2},
Kazushige MATSUMOTO^{*2}, Masahiko TODA^{*3} and Takeyoshi UEMATSU^{*4}

The primary object of this study is to investigate the out-of-plane shear strength property of 5-layer 5-ply CLT (Cross-laminated timber) with Japanese larch (*Larix kaempferi*) or Sakharin fir (*Abies sachalinensis*). The secondary object is to determine how the shear strength changes as the shear span increases under different loading conditions. We carried out shear strength tests by two loading methods: a three-point bending test and an asymmetric four-point bending test. We prepared several shear span conditions for each method. Results from these tests are as follows: (1) for both test methods, the shear strength of CLT with Sakharin fir was approximately 30% lower than that of CLT with Japanese larch, (2) for the asymmetric four-point bending test, specimens showed shear fracture at all span conditions, but in the three-point bending test, several specimens of CLT with Japanese larch showed bending fracture at the maximum load, and (3) for both test methods, the shear strength decreased as shear span increased according to a power curve regression. In addition, the converged values are approximately equivalent to the rolling shear strength obtained by the compression method.

Keywords: three-point bending, asymmetric four-point bending, rolling shear, shear span.

北海道産カラマツ及びトドマツの 5 層 5 プライ CLT について、中央集中荷重法及び逆対称 4 点荷重法によってせん断試験を行い、面外せん断強度を評価した。また、試験時のスパン条件がせん断強度に与える影響を検証するために、複数のスパン条件で試験を行った。試験の結果、(1) トドマツ CLT における面外せん断強度はカラマツ CLT の概ね 7 割程度となること、(2) 破壊形態は、集中荷重法によるせん断試験では、カラマツ CLT の約半数で最大荷重時に曲げ破壊を示

^{*1} Received May 15, 2020; accepted June 17, 2020. 本研究の一部は第34回日本木材加工技術協会年次大会 (2016年10月, 宮崎), 第48回日本木材学会北海道支部会研究発表会 (2016年11月, 札幌) 及び第67回日本木材学会大会 (2017年3月, 福岡) において発表した。

^{*2} 北海道立総合研究機構林産試験場 Forest Products Research Institute, Hokkaido Research Organization, Asahikawa 071-0198, Japan

^{*3} 北海道立総合研究機構林業試験場 Forestry Research Institute, Hokkaido Research Organization, Bibai 079-0198, Japan

^{*4} 北海学園大学工学部建築学科 Department of Architecture and Building Engineering, Faculty of Engineering, Hokkai-Gakuen University, Sapporo 064-0926, Japan

Corresponding author: W. Ishihara (ishihara-wataru@hro.or.jp)

したが、逆対称4点荷重法においては全条件でせん断破壊を示すこと、(3) いずれのせん断試験方法においても、せん断スパンが長くなるに従ってCLTの面外せん断強度はべき乗則に沿って漸減し、一定値に収束する傾向が示された。逆対称4点荷重法においては、収束値は圧縮型ローリングシア試験によるせん断強度に近い値となることが明らかとなった。

1. 緒 言

国産の直交集成板 (Cross-laminated timber 以下、CLT) に関する強度性能の検討はスギを用いたCLTをベースに行われてきたが、CLTの普及が進む中で、北海道産主要樹種であるカラマツ及びトドマツを用いたCLTについても、強度データの蓄積が進められている¹⁻⁵⁾。これらは、スギCLTに比べて面外曲げ剛性が高いため、床・屋根部材として有用であると考えられる。しかし直交層を有するCLTはローリングシアによる破壊が生じやすく、水平部材として利用する場合、とりわけ面外せん断強度の把握が重要となる⁶⁾。

木材のせん断強度を調べるための試験については様々な試験法が考案されているが⁷⁾、実大サイズの構造材を対象とする場合はショートスパンでの中央集中荷重方式曲げ型試験によりせん断強度を求めることが一般的である (以下、中央集中荷重法)。ただし、材種や樹種によってはせん断破壊が生じにくい場合が多く、構造用木材の強度試験マニュアル⁸⁾には中央集中荷重法以外に、4等分点5点荷重、逆対称4点荷重による試験法 (以下、逆対称4点荷重法) が示されている。既往の製材等の報告では、試験方法によって得られるせん断強度やせん断破壊の発生割合が異なることが指摘されており⁹⁻¹¹⁾、CLTに関しても面外せん断強度について荷重方式の違いにより、得られる強度や破壊形態に差異があることがスギCLT¹²⁻¹⁴⁾ やスギ・ヒノキ異樹種CLT¹⁵⁾ において報告されている。

試験時のスパン条件については、直交集成板の日本農林規格 (以下、JAS) では中央集中荷重法における支点間距離を材せいの5倍¹⁶⁾、ISOでは6倍¹⁷⁾ とするよう示されている。しかし、CLTの実大材試験においては、試験スパンが18倍以上となる3等分点4点荷重法による曲げ試験時でも、樹種や層構成によっては直交層のせん断破壊が生じる例が報告されており¹⁸⁾、CLTの面外せん断特性の把握にあたっては、より長いスパン条件下でも検証が必要である。一般に、材料強度は寸法効果を受けることが知られており¹⁹⁾、実大サイズの構造材のせん断試験については、得られる強度とせん断力が作用する範囲の面積 (せん断面積) との関係について、製材

や集成材などで検証されている²⁰⁻²³⁾。CLTにおいては、せん断スパン比が一定の条件下では積層数が多いほどせん断強度が低下するとの報告があるが^{3, 24)}、スパン条件に着目した研究例は見当たらない。

そこで、本研究では中央集中荷重法及び逆対称4点荷重法により、複数のスパン条件下でカラマツ及びトドマツCLTの曲げ型せん断強度試験を行い、破壊形態 (性状) 及び面外せん断強度を把握するとともに、荷重方式とスパン条件の影響を調べることとした。

また、CLTの面外せん断試験時の破壊形態は、直交層のローリングシア破壊が支配的であると報告されている¹²⁻¹⁵⁾。ラミナのローリングシア強度の測定においては様々な方法が試されており、海外ではASTMに準じた鋼板を用いた方法²⁵⁾ によるスプルスやブナでの例^{26, 27)}、鋼板の代わりにビスと鋼製治具を用いた方法によるラジアータパインでの例²⁸⁾ がある。試験体の加工が比較的容易で、特殊な治具も必要としないローリングシア強度の測定法としては、岡部らの考案した、合板のJASにおける接着力試験を参考にした圧縮型のローリングシア試験がある⁶⁾。本研究ではこれを参考に、カラマツ及びトドマツについて3層3プライCLTの圧縮型ローリングシア試験を行い、実大材の曲げ型せん断試験結果と比較することとした。

2. 実験方法

2.1 曲げ型せん断試験

2.1.1 試験体及び試験方法

試験体は厚さ30×幅105 mmのラミナを水性高分子イソシアネート系接着剤で縦縦ぎ (垂直型フィンガージョイント) 及び積層したCLT大板パネルから採取した。等級構成はカラマツCLTについてはJAS異等級構成の強度等級Mx120、トドマツCLTにおいてはMx90とし、いずれもラミナの幅はぎ接着は行わなかった。CLTの断面構成は5層5プライで、断面寸法は厚さ150×幅300 mmとし、いずれも外層ラミナの繊維方向が試験体の材軸方向と平行となる強軸試験体とした。

せん断試験は、中央集中荷重法と逆対称4点荷重法により行った。Fig. 1に両荷重法の模式図及びモーメント図とせん断力図を示す。荒川・大野らは、

Fig. 1. Diagram of shear tests by bending methods.

Legend: L: Length of specimens, P: Load, Ls: Shear span

逆対称4点荷重法においてせん断応力度が最大かつ一様に分布する区間 (L_s) をせん断スパンと定義し、これとはり有効せいとの比、即ちせん断スパン比を用いて鉄筋コンクリートはりのせん断強度を推定する実験式を導き出した²⁹⁻³¹⁾。この時、荒川は、単純はり載積荷方式のせん断スパン比を2倍にして整理した実験結果と逆対称4点荷重法より導出したせん断強度推定式との適合が良いことも検証している。その後、柴田は、このせん断強度推定式におけるせん断スパンは $2M/Q$ (M : 最大モーメント, Q : 最大せん断力) に相当することから、荒川らのせん断強度推定式を M/Q を変数とする推定式へと拡張することを提案した³²⁾。以降、荒川はこの提案に基づき、せん断スパンの定義を「曲げモーメントが0から M までになる距離」、即ち M/Q として同提案式の推定精度を再考している^{33, 34)}。本研究ではこの検証の流れを踏襲し、せん断強度が最大かつ一様に分布する区間 ($L_s = 2M/Q$) をせん断スパンと定義してせん断試験結果の整理及び考察を行うと共に、 M/Q をせん断スパンとして整理した結果の考察も試みる。

スパン条件は中央集中荷重法においてはせん断スパンが材せい (パネル厚) の2.5~5倍 (375~750 mm) となる範囲で6条件、逆対称4点荷重法についてはせん断スパンが材せいの3~5.8倍 (450~870 mm) となる範囲で5条件設定した。

試験は実大木材試験機 (株式会社東京衡機製造所製、曲げ容量1000 kN、加力ビーム装着時の曲げ容量200 kN) を用いて行い、いずれの方式でも加力は一方向単調載荷、加力速度はカラマツ CLT では4 mm/min、トドマツ CLT では3 mm/min とした。

変位の測定点は試験体の底面とした。既往の研究では、材せいと加圧板の長さを合わせる例が多いが^{12-15, 35)}、本研究では試験機の支点長さ (200 mm) に合わせ、荷重点での加圧板長さは全条件とも200 mmとした。試験は温湿度無調整環境下で行い、試験後に破壊部近傍より含水率測定用試験体を切り出し、全乾法により試験時含水率を求めた。

2.1.2 せん断応力度の計算

CLTのせん断応力度について、JASにおいては均一断面として計算しているが¹⁶⁾、本報ではCLT告示解説書のCLTパネルの応力度計算方法³⁶⁾に則り、せん断応力度の計算を(1)式より行った。

$$\tau = \beta \times \frac{Q}{bh} \quad (1)$$

τ : 面外せん断強さ (N/mm²), β : 応力度分布係数, Q : せん断力 (N), b : 試験体幅 (mm), h : 試験体厚さ (mm)

なお、応力度分布係数 β は(2)式から求めた。

$$\beta = \frac{bh \{E_i(x_i^2 - x^2) + \sum_{j=i+1}^m E_j(x_i^2 - x_{j-1}^2)\}}{2EI} \quad (2)$$

x : CLT中立軸からせん断応力を求める位置までの距離, i : x が位置するラミナのCLT中立軸から数えた番数, m : 最外層ラミナのCLT中立軸から数えた番数, x_n : n 番目のラミナの上面からCLT中立軸までの距離, E_n : n 番目のラミナのヤング係数

せん断応力度分布の計算については、岡部らの研究⁶⁾を参考にして直交層のヤング率を0として行った。計算の結果より、中立軸でのせん断応力度分布係数 β は、カラマツ CLT (外層ラミナのヤング率を12.0 kN/mm², 内層ラミナのヤング率を6.0 kN/

Fig. 2. Rolling shear test of cross layer by compression method.

mm²として計算)で1.256, トドマツ CLT (外層ラミナのヤング率を9.0 kN/mm², 内層ラミナのヤング率を6.0 kN/mm²として計算)で1.267となった。また, 直交層 (2層目及び4層目)における β はカラマツ CLTで1.218, トドマツ CLTで1.216となった。CLTのせん断強度が直交層の破壊で決定されると想定すると, 直交層に作用する応力度をせん断応力度の計算に採用する考え方もできるが, 本報においては両者の差が僅かに3~4%程度であることを踏まえ, 断面内での最大の応力度を β として採用した。

2.2 圧縮型ローリングシアー試験

2.2.1 試験体及び試験方法

試験体及び試験法の概略図を Fig. 2 に示す。試験体は3層3プライとし, CLT 大板パネルより, 同一の直交層ラミナが複数の試験体に入らないように採取した。試験に用いた CLT の強度等級は曲げ型せん断試験と同様に, カラマツが Mx120, トドマツが Mx90 とした。なお, ラミナのローリングシアー試験及び CLT の曲げ型せん断試験において, 直交層ラミナの幅や厚さがせん断強度に影響を与えているとの報告があるため^{28, 37-40)}, 本試験では2.1におけるせん断試験体に合わせて, 試験対象のラミナの幅は105 mm, 厚さは30 mm とした。加力は, インストロン型強度試験機(株式会社オリエンテック, 容量100 kN)を用いて行い, 加力速度は1 mm/min とした。試験にあたって, 圧縮時に生じるモーメントやそれに伴う平行層ラミナの割裂防止のためにラテラルサポートを使用した (Fig. 2)。試験は温湿度無調整環境下で行い, 試験後に破壊部近傍より含水率用試験片を切り出し, 全乾法により試験時含水率を求めた。

実験で得られた最大荷重 $P_{\max}$ より, ローリングシアー強度 $\tau_{r-\max}$ は (3) 式にて算出した。

$$\tau_{r-\max} = \frac{P_{\max}}{A} = \frac{P_{\max}}{bh} \quad (3)$$

$\tau_{r-\max}$: ラミナのローリングシアー強度 (N/mm²), $P_{\max}$: 最大荷重 (N), A : せん断面積 (mm²), b : 試験体幅 (mm), h : ラミナの幅 (mm)

3. 結果と考察

3.1 CLT せん断試験結果

各条件におけるせん断試験結果を Table 1 に示す。荷重方法やスパン条件によって多少の差はあるが, トドマツ CLT のせん断強度はカラマツ CLT のせん断強度の概ね70%程度の値を示した。

中央集中荷重法における荷重-変位曲線を Fig. 3 に, 逆対称4点荷重法における荷重-変位曲線を Fig. 4 に示す。カラマツ CLT 試験体の破壊形態の例を Fig. 5 に, トドマツ CLT の試験体の破壊例を Fig. 6 に示す。

中央集中荷重法においては, カラマツ CLT は, せん断スパンが少なくとも750 mm ($5h$) を超えると明確な曲げ破壊に移行し, 現れる強度も大きく低下することが示された。せん断スパンが375~675 mm ($2.5h \sim 4.5h$) の範囲では, 最大荷重時に曲げ破壊を示した試験体であっても, 荷重-変位曲線 (Fig. 3) と破壊時の破壊線の性状 (Fig. 5) から, 直交層のせん断破壊も併行して生じていることが看取された。トドマツ CLT は全スパン条件においてせん断破壊を示した (Fig. 6)。

逆対称4点荷重法においては, 両樹種共に全スパン条件において最大荷重時にせん断破壊を示した。しかし, 荷重-変位曲線 (Fig. 4) に着目すると, 両

Table 1. Results of shear tests by bending methods.

Species	Load method	Shear span [mm]	Number of specimens	Shear strength [N/mm ²]			C.V. [%]	Fracture mode S / SB / B
				Max.-Mean-Min.				
CLT with Japanese larch (Mx120) (MC : 12.4%) (Density*: 523 kg/m ³)	Three-point bending	375 (2.5 <i>h</i>)	8	2.59	2.76	2.87	2.9	4 / 4 / 0
		450 (3 <i>h</i>)	4	1.83	2.03	2.13	5.9	0 / 4 / 0
		525 (3.5 <i>h</i>)	4	1.70	1.85	1.99	5.9	4 / 0 / 0
		600 (4 <i>h</i>)	4	1.52	1.75	1.87	7.8	2 / 2 / 0
		675 (4.5 <i>h</i>)	4	1.70	1.76	1.89	4.4	4 / 0 / 0
		750 (5 <i>h</i>)	4	1.08	1.32	1.52	11.9	0 / 0 / 4
	Asymmetric four-point bending	450 (3 <i>h</i>)	4	2.63	2.67	2.77	2.3	4 / 0 / 0
		525 (3.5 <i>h</i>)	4	2.15	2.21	2.26	2.2	4 / 0 / 0
		600 (4 <i>h</i>)	4	1.81	1.94	2.10	5.3	4 / 0 / 0
		750 (5 <i>h</i>)	4	1.67	1.82	1.91	5.1	4 / 0 / 0
		870 (5.8 <i>h</i>)	4	1.74	1.83	1.93	3.7	4 / 0 / 0
CLT with Sakharin fir (Mx90) (MC : 10.3%) (Density*: 380 kg/m ³)	Three-point bending	375 (2.5 <i>h</i>)	4	1.88	2.01	2.21	6.3	4 / 0 / 0
		450 (3 <i>h</i>)	4	1.48	1.57	1.62	3.3	4 / 0 / 0
		525 (3.5 <i>h</i>)	4	1.29	1.36	1.41	3.3	4 / 0 / 0
		600 (4 <i>h</i>)	4	1.13	1.20	1.23	3.5	4 / 0 / 0
		675 (4.5 <i>h</i>)	4	1.09	1.14	1.19	4.4	4 / 0 / 0
		750 (5 <i>h</i>)	4	0.93	0.99	1.05	5.3	4 / 0 / 0
	Asymmetric four-point bending	450 (3 <i>h</i>)	4	2.03	2.17	2.27	4.0	4 / 0 / 0
		525 (3.5 <i>h</i>)	4	1.64	1.70	1.80	3.7	4 / 0 / 0
		600 (4 <i>h</i>)	4	1.35	1.39	1.43	2.2	4 / 0 / 0
		750 (5 <i>h</i>)	4	1.11	1.18	1.28	5.7	4 / 0 / 0
		870 (5.8 <i>h</i>)	4	1.15	1.18	1.22	2.7	4 / 0 / 0

Legend: C.V.: Coefficient of variation, *h*: Thickness of specimen, MC: Mean of moisture content, S: Number of specimens which showed shear fracture, SB: Number of specimens which showed bending fracture at maximum load, but also showed shear fracture, B: Number of specimens which showed bending fracture, *: Mean density of all specimens in this test.

Fig. 3. Load-displacement curve in the three-point bending test.

Legend: Dashed line: The specimen showed bending fracture at maximum load, P: Maximum load, δ : Displacement between fulcrums

Fig. 4. Load-displacement curve in the asymmetric four-point bending test.

Legend: P : Maximum load, δ : Displacement between fulcrums

Fig. 5. Examples of fracture modes of CLT with Japanese larch.

Note: In the three-point bending test, several specimens showed bending fracture at maximum load. All specimens showed bending fracture at $L_s = 750$ mm (5h). In the asymmetric four-point bending test, all specimens showed shear fracture.

Fig. 6. Examples of fracture modes of CLT with Sakharin fir.

Note: In both methods, all specimens showed shear fracture.

樹種共にせん断スパンが750 mm (5*h*) を超えると最大荷重時のピーク値が明瞭になり、荷重-変位曲線の性状が変化することが看取された。

ローリングシア破壊した直交層ラミナの性状に着目すると、カラマツ CLT では破壊線が主に半径方向や年輪界に沿って生じたのに対し (Fig. 5), トドマツ CLT では積層面に沿った破壊線が多くみられた (Fig. 6)。

3.2 圧縮型ローリングシア試験結果

圧縮型ローリングシア試験の結果を Table 2 に示す。トドマツのローリングシア強度はカラマツのローリングシア強度の63%の値を示した。

圧縮型ローリングシア試験の破壊性状を Fig. 7 に示す。破壊線の進展する方向は、(1) 半径方向、(2) 年輪界、(3) 積層面の三つに分類された。カラマツでは (2) 年輪界に沿った破壊線が最も多いが、トドマツでは (3) 積層面に破壊線が入る性状が特に多く、実大材の曲げ型せん断試験における直交層ラミナの破壊性状と同様の傾向がみられた。

3.3 考察

製材などにおいては、中央集中荷重法ではショートスパンでも最大荷重時に曲げ破壊を示す例が多いことが知られており^{9, 41, 42)}、せん断破壊が生じやすい CLT であっても、スギ及びヒノキ CLT では一部の試験体が最大荷重時に曲げ破壊を示すことが報告されている^{12, 13, 39)}。本研究においても、カラマツ CLT については一部の試験体で最大荷重時に曲げ破壊を示した。一方、逆対称4点荷重点法においては、樹種やスパン条件に関わらず全ての試験体が最大荷重時にせん断破壊を示していることから、試験時にせん断破壊を先行して生じさせるには最大曲げモーメントを半減できる逆対称4点荷重点法の方が有利であることが示された。

Fig. 8 に各荷重点法におけるせん断強度とせん断スパンとの関係を図示する。RC 梁の設計に準じて、

斜めひび割れもしくはせん断破壊線と中立軸の交点が、加力点とモーメントが0になる位置との間に生じることを想定し³⁴⁾、逆対称4点荷重点法におけるせん断区間 (*L_s*) を *M/Q* とした場合、同一のせん断スパンにおけるせん断強度の値は逆対称4点荷重点法のほうが低くなり、これは新藤らのスギ CLT における報告と同様となった^{12, 13, 35)}。しかしながら、CLT の場合は、Fig. 5 及び Fig. 6 に示すように直交層ラミナのローリングシア破壊が加力点間に一様に生じないことから、せん断区間が一樣かつ最大に分布するスパンをせん断スパン *L_s* = 2*M/Q* として

Japanese larch

Sakharin fir

Fig. 7. Examples of fracture modes of rolling shear test by compression method.

Legend: (1) Fracture lines occurred in the radial direction of the annual rings, (2) Fracture lines occurred along the limit between annual rings, (3) Fracture lines occurred along the adhesive layer, *n*: Number of specimens showed each fracture mode

Table 2. Results of rolling shear test of cross layer by compression method.

Species	Number of specimens	Rolling shear strength [N/mm ²] Max.-Mean-Min.			C.V. [%]
Japanese larch (MC: 9.3%) (Density*: 511 kg/m ³)	20	1.09	1.87	2.48	16.8
Sakharin fir (MC: 9.3%) (Density*: 382 kg/m ³)	20	0.84	1.18	1.64	18.5

Legend: C.V.: Coefficient of variation, MC: Mean of moisture content, *: Mean density of all specimens in this test.

両荷重法を比較すると、せん断スパンの長さが同一の場合、中央集中荷重法で得られるせん断強度は、逆対称荷重法により得られる値よりも低い傾向にあることが示された。中央集中荷重法は逆対称4点荷重法と比べて、せん断スパン内において曲げモーメントが大きく作用しており (Fig.1)、このことが結果に影響していると考えられる。

Fig.8の図中に示す実験式は、せん断破壊が先行または併存する範囲内 (中央集中荷重法ではカラマツ CLT が $L_s=2.5\sim4.5h$ 、トドマツ CLT が $L_s=2.5\sim5h$ 、逆対称4点荷重法では両樹種共に $L_s=3\sim5.8h$) において、累乗則に沿ってせん断強度が一定値に収束するモデルとし、統計分析フリーソフト R version 3.6.0⁴³⁾ を用いて非線形最小二乗法により求めた。いずれの荷重法、また樹種においても、せん断スパンが長くなるに伴ってせん断強度が漸減する傾向が看取された。Rammer らは製材及び集成材について、せん断面積 (試験体幅とせん断スパンとの積) が増大するに伴って得られるせん断強度が漸減する傾向を報告しており²⁰⁻²³⁾、荷重方法が異なるものの、本研究で得られた結果も概ねこれらの既報と同様の傾向を示した。特に、逆対称4点荷重法においては、両樹種共にせん断スパンが600 mm (4h) を超えると一定値に近づいた。このときの値は、せん断スパンが450 mm (3h) の場合と比較して、カラマツ CLT では70%、トドマツ CLT では50%ほどの値となり、樹種間で比較すると、トドマツ CLT

はカラマツ CLT の65%ほどの値を示した。Table 2 より、圧縮型ローリングシアー試験で得られた強度は Fig.8 に示した実験式の定数項の値と概ね一致した。両試験における試験体の含水率に差異があるため、比較には注意を要するものの、せん断スパンを長くすると、せん断試験時に現れる強度は、ラミナ1枚のローリングシアー強度に近似する傾向にあることが推察された。

CLT については、試験体の幅寸法を変えた場合にはせん断強度がさほど低下せず、顕著な寸法効果はみられないとの報告があり、林らはせん断スパン内に存在する直交層ラミナの枚数が影響している可能性があると指摘している⁴⁴⁾。本研究では、試験体の幅及び層構成は変えていないため、せん断スパンを長くすることはスパン内に含まれるラミナの枚数が多くなることを意味しており、ラミナの枚数がせん断強度に影響を与えていることを示唆する結果を得た。しかし、荷重-変位曲線の性状が変化し、せん断強度が一定値に収束するメカニズムについては不明な点が多く、今後のさらなる実験と解析が必要である。

4. 結 論

本研究では、5層5プライのカラマツ及びトドマツ CLT について、中央集中荷重法及び逆対称4点荷重法によって実大材の面外せん断試験を行った。また、スパン条件をいくつか設定し、試験スパンと

Fig.8. Relationship between shear strength and shear span.

Legend: ●: CLT with Japanes Larch (showed the shear fracture at the maximum load), ▲: CLT with Japanese larch (showed the bending fracture at the maximum load), ○: CLT with Sakharin fir (showed the shear fracture at the maximum load)

Dashed line (a): The mean of rolling shear strength by compression method in Japanese larch (1.87 N/mm²),
Dashed line (b): The mean of rolling shear strength by compression method in Sakharin fir (1.18 N/mm²)

現れるせん断強度との関係について検証した。さらに、ラミナの圧縮型ローリングシアースタビリティ試験を行い、実大材の試験結果と比較した。以下に、本研究で得られた知見を示す。

1. トドマツ CLT のせん断強度は、荷重方法及びスパン条件によって多少の差はあるが、概してカラマツ CLT の7割程度であった。
2. カラマツ CLT は、中央集中荷重法において半数程度が最大荷重時に最外層の曲げ破壊を示したが、最もスパンの長い条件（せん断スパン：750 mm (5*h*)）を除いて、せん断破壊も併行して生じた。逆対称4点荷重法については全てのスパン条件で最大荷重時に直交層のせん断破壊を示した。
3. トドマツ CLT は両荷重法ともに、今回設定した全てのスパン条件において、最大荷重時に直交層のせん断破壊を示した。
4. 中央集中荷重法において、カラマツ CLT はトドマツ CLT よりも短いスパン条件下（せん断スパン：750 mm (5*h*)）で曲げ破壊に移行した。
5. CLT のせん断性状に基づき、逆対称4点荷重法のせん断スパン (*L*_s) をせん断力が最大かつ一定に加わるスパン長 (=2*M*/*Q*) と定義した場合、中央集中方式の値は逆対称4点曲げよりも小さい値が得られる傾向が認められた。
6. カラマツ、トドマツ CLT とともに、試験体のスパンが長くなり、せん断スパンが長くなるに従い、せん断強度が漸減し一定値に収束する傾向がみられた。特に、逆対称4点荷重法においては、両樹種共にせん断スパンが長くなるに伴って、現れるせん断強度は一定値に収束する傾向が示された。また、その値は圧縮型ローリングシアースタビリティ試験で得られたラミナのローリングシアースタビリティ強度と概ね一致した。

文 献

- 1) 高梨隆也, 大橋義徳, 石原 亘, 松本和茂, 宮武 敦: トドマツ・カラマツCLTの強度性能評価 その1 面外曲げ性能, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅲ, 2017, pp. 114-115.
- 2) 松本和茂, 高梨隆也, 大橋義徳, 石原 亘, 宮武 敦: トドマツ・カラマツCLTの強度性能評価 その2 面内曲げ性能, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅲ, 2017, pp. 116-117.
- 3) 石原 亘, 大橋義徳, 高梨隆也, 松本和茂: トドマツ・カラマツCLTの強度性能評価 その3 面外せん断強さ, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅲ, 2017, pp. 118-119.
- 4) 原田真樹, 長尾博文, 宮武 敦, 井道裕史, 加藤英雄, 大橋義徳, 松本和茂, 高梨隆也, 石原 亘: トドマツ・カラマツCLTの強度性能評価 その4 圧縮・引張り, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅲ, 2017, pp. 120-121.
- 5) 工藤雄大, 中島史郎, 大橋義徳, 松本和茂, 宮武 敦, 亀山雄揮, 荒木康弘, 大塚紘平, 吉田智玲, 木野元亮: トドマツ・カラマツCLTの強度性能評価 その5 座屈強度, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅲ, 2017, pp. 122-123.
- 6) 岡部 実, 安村 基, 小林研治: スギCLTパネル層内せん断力の推定, 木材学会誌 60(3), 169-176 (2014).
- 7) 吉原 浩: 木材及び木質材料のせん断特性の評価法, 材料 55(4), 349-355 (2006).
- 8) 構造用木材の強度試験マニュアル (第4版), (公財) 日本住宅・木材技術センター編, 東京, 2013, pp. 18-19.
- 9) 井道裕史, 長尾博文, 加藤英雄: 試験方法の違いによる製材品のせん断強度の評価, 木材学会誌 52(5), 293-302 (2006).
- 10) Yoshihara, H., Furushima, T.: Shear strength of wood measured by various short beam shear test methods. *Wood Sci. Technol.* 37, 189-197 (2003).
- 11) 森田秀樹, 藤本嘉安, 小松幸平, 村瀬安英: 実大構造用木材のせん断試験法の開発, 木材学会誌 52(6), 376-382 (2006).
- 12) 新藤健太, 平松 靖, 宮武 敦, 孕石剛志, 中島洋, 正木祥子, 渡部 博: スギを用いたCLTの面外せん断性能, 木材工業 68(11), 544-549 (2013).
- 13) 新藤健太, 宇京斉一郎, 宮武 敦, 平松 靖, 軽部正彦: スギを用いたCLTの面外せん断強度性能, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅲ, 2014, pp. 321-322.
- 14) 新藤健太, 宇京斉一郎, 宮武 敦, 平松 靖: CLTの面外方向加力におけるせん断性能 その2 ラミナ幅を変動させた場合の影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅲ, 2017, pp. 99-100.
- 15) 新藤健太, 宇京斉一郎, 宮武 敦, 平松 靖, 玉置教司: ヒノキ・スギ異樹種CLTの面外せん断性能, 第66回日本木材学会大会研究発表要旨集, 名古屋, 2016, D28-P-11 (CD-ROM).
- 16) 直交積層板の日本農林規格: 平成25年農林水産省告示第3079号 (2013).

- 17) ISO 1390: Timber structures – Strength graded timber – Test methods for structural properties: International Organization for Standardization (2014).
- 18) 高梨隆也, 大橋義徳, 松本和茂, 石原 亘: 北海道産木材を用いたCLTの材料性能 その1 面外曲げ性能, 第67回日本木材学会大会研究発表要旨集, 福岡, 2017, D18-P1-15 (CD-ROM).
- 19) 鈴木直之: 木材強度の寸法効果. 木材工業 **52** (6), 278-282 (1979).
- 20) Rammer, D.R., Lebow, P.K.: Shear strength of Solid-Sawn Douglas-Fir beams. *J. Mater. Civil Eng.* **9**(3), 130-138 (1997).
- 21) Rammer, D.R., Soltis, L.A., Lebow, P.K.: Experimental shear strength of unchecked solid-sawn Douglas-fir, *Forest Service Research paper FPL-RP-553*, Madison, Department of Agriculture, Forest Products Laboratory, WI, USA, 1996. (1996).
- 22) Soltis, L.A., Rammer, D.R.: Shear strength of unchecked glued-laminated beams. *Forest Prod. J.* **44**(1), 51-57 (1994).
- 23) Rammer, D.R., Soltis, L.A.: Experimental shear strength of glued-laminated beams. *Forest Service FPL-RP-527*, Madison, WI: U. S. Department of Agriculture, Forest Products Laboratory (1994).
- 24) 新藤健太, 宇京斉一郎, 宮武 敦, 藤田和彦, 野沢浩二, 玉置教司: CLTの面外せん断性能 その1 層構成とラミナ等級の影響. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅲ, 2015, pp. 19-20.
- 25) ASTM D2718-00: Standard test methods for structural panels in planar shear (rolling shear), American Society for Testing and Materials (2006).
- 26) Zhou, Q.Y., Gong, M., Chui, Y.H., Mohammad, M.: Measurement of rolling shear modulus and strength of cross-laminated timber using bending and two-plate shear test. *Wood Fiber Sci.* **46**(2), 259-269 (2014).
- 27) Aicher, S., Christian, Z., Hirsch, M.: Rolling shear modulus and strength of beech wood laminations. *Holzforschung* **70**(8), 773-781 (2016).
- 28) Li, M.: Evaluating rolling shear strength properties of cross-laminated timber by short-span bending tests and modified planar shear tests. *J. Wood Sci.* **63**(4), 331-337 (2017).
- 29) 荒川 卓, 大野和男: 新載荷方式による鉄筋コンクリート梁の剪断抵抗について. 日本建築学会論文報告集 **57**, 581-584 (1957).
- 30) 荒川 卓: 鉄筋コンクリート梁のせん断抵抗に関する研究 (実験結果の総括). 建築学会論文報告集 **66**, 437-440 (1960).
- 31) 荒川 卓: 鉄筋コンクリートはりのせん断抵抗に関する研究. 北海道大学工学部研究報告 **25**, 1-84 (1961).
- 32) 柴田拓二: 鉄筋コンクリート梁の曲げ及び剪断の耐力に関する研究. 北海道大学工学部研究報告 **30**, 51-152 (1962).
- 33) 荒川 卓: 鉄筋コンクリートはりのせん断補強について. 日本建築学会北海道支部第32回研究発表会論文集, 1969, pp. 21-24.
- 34) 荒川 卓: 鉄筋コンクリートばりの許容せん断応力度とせん断補強について – 実験結果による再検討 –. コンクリートジャーナル **8**(7), 11-20 (1970).
- 35) 新藤健太: CLT等実大材のせん断試験法. 木材工業 **70**(8), 366-369 (2015).
- 36) 2016年版CLTを用いた建築物の設計施工マニュアル. CLT設計施工マニュアル編集委員会編, (公財) 日本住宅・木材技術センター, 東京, 2016, pp. 187-189.
- 37) 宇京斉一郎, 新藤健太, 宮武 敦, 藤田和彦, 渡辺靖崇, 中原 亨: CLTの面外方向加力におけるせん断性能 その1 ラミナ厚さの影響について. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅲ, 2017, pp. 97-98.
- 38) 高梨隆也, 大橋義徳, 石原 亘: カラマツCLTの面外せん断性能に与える直交層ラミナの寸法形状および幅はぎ接着の影響. 第69回日本木材学会大会研究発表要旨集, 函館, 2019, D15-P-19 (CD-ROM).
- 39) 玉置教司, 中川美幸, 宮武 敦, 藤田和彦: ヒノキCLTのせん断及び曲げ強さにラミナ幅及び幅はぎ接着が与える影響について. 第67回日本木材学会大会研究発表要旨集, 福岡, 2017, D17-07-1645 (CD-ROM).
- 40) 玉置教司, 中川美幸, 宮武 敦, 園田里見, 藤田和彦: ヒノキCLTの面外方向のせん断強さにラミナ幅が与える影響. 第69回日本木材学会大会研究発表要旨集, 函館, 2019, D14-01-1600

- (CD-ROM).
- 41) 長尾博文, 加藤英雄: スギ製材品のせん断強度に関する予備的検討. 第48回日本木材学会大会研究発表要旨集, 静岡, 1998, p. 106.
 - 42) Riyanto, D.S., Gupta, R.: A comparison of test methods for evaluating shear strength of structural timber. *Forest Prod J.* 48(2), 83-90 (1998).
 - 43) R Core Team (2019). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>. 2019年4月26日参照.
 - 44) 林 知行, 佐々木貴信: スギCLT (直交集成板) の実大試験 - 曲げ及びせん断強度に及ぼす試験体幅の寸法効果 -. 秋田県立大学ウェブジャーナル B(2), 138-143 (2015).