圧縮型せん断試験による国産針葉樹 CLT のローリングシアーストレングス 樹種および含水率による影響^{*1}

石原 亘^{*2}, 川合慶拓^{*2}, 高梨隆也^{*2}, 宮崎淳子^{*2}, 大橋義徳^{*2}

Rolling Shear Strength of Laminae for CLT with Four Japanese Softwood Species Obtained by the Compression Method. Influence of species and moisture content^{*1}

Wataru ISHIHARA^{*2}, Yasuhiro KAWAII^{*2}, Ryuya TAKANASHI^{*2},
Junko MIYAZAKI^{*2} and Yoshinori OHASHI^{*2}

In order to investigate the rolling shear strength of CLT with Japanese softwood species, we carried out the rolling shear test by compression method with four major Japanese softwood species (Japanese cypress (*Chamaecyparis obtusa*), Japanese larch (*Larix Kaempferi*), Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) and Sakhalin fir (*Abies sachalinensis*)). In addition, in order to determine the effect of moisture content on rolling shear strength, the test specimens were humidity-controlled under three different humidity environments (40% RH, 65% RH, and 80% RH at 20 °C). Results from the tests were as follows: (1) the rolling shear strength was higher in the order of Japanese cypress, Japanese larch, Japanese cedar and Sakhalin fir, (2). There was no significant difference in the rolling shear strength due to the difference in moisture content. (3) There were correlations between the rolling shear strength and the air-dried density of laminae in Japanese cypress and Japanese cedar. However, there were no correlations between the rolling shear strength and the air-dried density of laminae in Japanese larch and Sakhalin fir.

Keywords : CLT, air-dried density, moisture content.

国産樹種を用いた直交集成板 (CLT) のローリングシアーストレングスを把握するために、国産主要針葉樹種 4 種 (ヒノキ, カラマツ, スギ, トドマツ) のラミナについて、圧縮型のローリングシアーストレングス試験を行った。また、含水率がローリングシアーストレングスに与える影響について検証するために、試験体は 3 つの異なる湿度環境下 (20 °C・40% RH, 65% RH, 80% RH) で調湿を行った。試験の結果、ローリングシアーストレングスはヒノキ, カラマツ, スギおよびトドマツの順に高く、いずれの樹種においても、調湿条件によるローリングシアーストレングスへの有意な差は示されなかった。また、ヒノキとスギで試験体の気乾密度とローリングシアーストレングスに相関があったが、カラマツとトドマツでは相関がなかった。

^{*1} Received July 15, 2021; accepted September 5, 2021. 本研究の一部は第71回日本木材学会大会 (2021年3月, 東京 (オンライン大会)) 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

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

1. 緒 言

直交集成板 (Cross Laminated Timber, 以下 CLT) は1990年代にオーストリアで商業生産が始まった比較的新しい木質材料であるが、日本国内では利用拡大に向けて急速に法整備が進められ、2013年に農林水産省により直交集成板の日本農林規格 (以下, JAS)¹⁾ が、2016年に国土交通省により建築基準法関連告示²⁾ が公布・施行された。これらの法整備を受けて、CLT パネル工法による建築例は急速に増加している。直交層を有する CLT を屋根や床などの水平部材として使用する場合、面外方向にせん断応力が発生するため、直交層ラミナのローリングシアー強度が設計上クリティカルとなることが想定される。CLT の面外せん断強度の把握は、曲げ型のせん断試験によって求めることが一般的であり、終局時の直交層ラミナはローリングシアー破壊を示すことが一般的であるが³⁾、同試験では層構成⁴⁾ や試験スパン⁵⁾ によって得られる強度が異なる。そのため、ローリングシアー強度を的確に把握するには、要素試験によってラミナのローリングシアー強度を直接的に測定する必要がある。

ラミナのローリングシアー強度の測定にあたっては様々な方法が考案されている。EN⁶⁾ や ASTM⁷⁾ では、鋼板でラミナを挟むように接着し、荷重方向に対して14度傾けて圧縮させる方法が定められており、この方法による多くの報告がある⁸⁻¹⁰⁾。また、これに準じた報告例として、鋼板ではなく、試験対象のラミナよりも高強度の樹種を代用した例¹⁰⁻¹²⁾、LSL (Laminated Strand Lumber) を代用した例¹¹⁾ があり、接着剤を使用せずにビスと鋼製治具を用いた方法¹³⁾ も考案されている。JAS¹⁾ などの国内規格ではラミナのローリングシアー強度を測定する試験の規定はないが、岡部ら³⁾ は、合板の JAS¹⁴⁾ 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ー試験方法を考案している。岡部らの考案した方法は、EN⁶⁾ などの試験法と異なり、異種材料の接着を伴わないため接着層付近の破壊も再現できること、汎用的な装置で実験が可能で、試験体の製作が容易であることから、国内における多くの研究で採用されている^{5, 15-17)}。しかし、これらの報告では、試験対象の樹種が限定的であり、ラミナ寸法、木取り、含水率といった試験条件が統一されていない。

複数の樹種を対象とした報告例には、Ehrhart ら¹⁰⁾ の欧州産の針葉樹2種および広葉樹4種を対象とした例、Gong ら¹¹⁾ の北米産の SPF および広葉樹3種を対象とした例があるが、国産樹種につい

ての報告例は、カラマツとトドマツの比較例^{5, 16)} のみである。ラミナ寸法とローリングシアー強度との関係については、Ehrhart ら¹⁰⁾ や Ukyo¹²⁾ らが、ラミナ厚さが同一の場合にはラミナ幅が小さいほど強度が低くなること、Li¹³⁾ が、ラミナ幅が同一の場合はラミナ厚さが大きいほど強度が低く現れることを報告している。このため、樹種間でのせん断強度を比較する場合には、ラミナの断面寸法を揃える必要がある。木取りについては、岡部ら³⁾ が、年輪接線角がローリングシアー強度に影響を与えていること、Ukyo ら¹²⁾ が、EN⁶⁾ に準じたローリングシアー試験において、ラミナの採材位置が髓に近いほど得られるせん断弾性係数が高いことを報告している。一方で、Ehrhart ら¹⁰⁾ は、心去りラミナについては、採材位置がせん断弾性係数には影響を及ぼすものの、せん断強度には顕著な影響を与えないことを報告している。なお、含水率条件がラミナのローリングシアー強度に及ぼす影響についての報告例は見当たらないが、直交集成板の適正製造基準¹⁸⁾ では、含水率によってせん断強度を補正することが求められているため、検討が必要である。

本報では以上の背景を踏まえ、主要な国産針葉樹材4樹種 (ヒノキ (*Chamaecyparis obtusa*), カラマツ (*Larix kaempferi*), スギ (*Cryptomeria japonica*), トドマツ (*Abies sachalinensis*)) を用いた3層3プライ CLT を対象として、寸法および木取りを統一したうえで、岡部ら³⁾ の考案した圧縮型せん断試験によってローリングシアー強度を測定し、樹種間の強度を比較することとした。また、試験体を複数の湿度環境下で調湿することで、試験時の含水率がローリングシアー強度に与える影響についても検証した。

2. 実験方法

2.1 CLT および試験体の作製

厚さ29 mm × 幅100 mm × 長さ298 mm のラミナを用いて、厚さ87 mm で、投影面積が幅300 mm × 長さ300 mm の3層3プライの試験用 CLT を製作した。ラミナの樹種はヒノキ、カラマツ、スギ、トドマツの4樹種とし、接着前に20℃・65% RH の環境下で約1ヵ月間養生した。CLT に用いたラミナは心去り材とし、貼り合わせ時に木表面と木裏面が接着面となるように仕組みを行った。使用した接着剤は水性高分子-イソシアネート系接着剤 (API) とし、幅はぎ接着はしていない。CLT 製作時の圧縮圧力は、ヒノキ及びカラマツが1.0 MPa、トドマツ及びスギが0.8 MPa とし、接着剤塗布量は全樹種

Fig. 1. Method for preparation of specimens.

Note: *: The air-dried density of target laminae was determined before gluing the CLT panels. Moisture content of target laminae was conditioned at the 20 °C and 65% RH before lamination.

** : Humidity controlled at 20 °C·40% RH (A), 20 °C·65% RH (B), and 20 °C·80% RH (C).

とも230 g/m², 圧縮時間は60分とした。ローリングシア強度の測定対象となる直交層中央部のラミナについては、無節で繊維が通直なラミナを使用することとし、接着前に予め気乾密度を測定した。

試験体の形状は既報^{3, 15, 16)}を参考にし、せん断面積を規定するスリット間の距離は中島ら¹⁶⁾の報告に合わせ80 mmとした。試験体は、各CLTより3体を採取し、それぞれ異なる3つの恒温恒湿環境下((A)20 °C・40% RH, (B)20 °C・65% RH, (C)20 °C・80% RH)で恒量に達するまで1ヵ月以上調湿した。試験体数は、ヒノキ、カラマツ、トドマツは各36体(各調湿条件につき12体)、スギは42体(各調湿条件につき14体)とした。作製したCLTの概要とローリングシア試験体の採取方法および寸法形状をFig. 1に示す。

2.2 試験方法

強度試験は、インストロン型強度試験機(TENSILON RTD 2410, (株)オリエンテック, ロードセル容量100 kN)による一方向単調加力により行い、載荷速度は0.5~0.7 mm/minとした。試験にあたって、圧縮時に生じる面外方向のモーメントを防止するためにラテラルサポートを使用し、加力は球座を介さずに行った。試験の状況をFig. 2に示す。試験後に非破壊部より含水率測定用試験片を切り出し、全乾法により試験時の含水率を求めた。

試験で得られた最大荷重 $P_{\max}$ より、ローリングシア強度 $\tau_{r-\max}$ を以下の式にて算出した。

$$\tau_{r-\max} = \frac{P_{\max}}{A} = \frac{P_{\max}}{bh}$$

Fig. 2. Set-up for the rolling shear specimen.

$\tau_{r-\max}$: ラミナのローリングシア強度 (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

Fig. 3に破壊形態の例を示す。試験体の破壊形態を、Ⅰ: 破壊面が年輪境界に沿って生じる場合、Ⅱ: 破壊面が接着層に沿って生じる場合、Ⅲ: 破壊面が年輪半径方向に生じる場合、Ⅳ: 平行層が割裂破壊する場合、Ⅴ: 直交層の変形がスリット幅に達して

Fig.3. Examples of failure types of the rolling shear test.
Legend: (I) Cracks occurred along growth rings, (II) Cracks occurred along the adhesive layer, (III) Cracks occurred in the radial direction of growth rings, (IV) Splitting failures occurred at the parallel layers. (V) The failure did not occur (Shear deformation was larger than slit width).

も破壊に至らなかった場合の5つに分類した。Table 1 に破壊形態と出現数を示す。II の破壊形態を示した試験体が多数を占め、特にヒノキでは全体の2/3の試験体がIIの破壊形態を示した。なお、破壊形態IIを示した全ての試験体は接着層近傍の木部で破断しており、接着不良による剥離はみられなかった。スギにおいては、変形がスリット幅(6 mm)よりも大きいために破壊に至らない試験体(V)がいくつかみられた。

試験結果を Table 1 に示す。各樹種において、A ~ C の調湿条件より3水準の含水率の試験体を得た。なお、Table 1 に示すローリングシアー強度において、IVの破壊形態を示した試験体、Vの破壊に至らなかった試験体については平均値および標準偏差の計算から除外した。統計解析ソフト R (version 4.0.4)¹⁹⁾ を用いて、樹種および調湿条件の2つを因子とした二元配置分散分析 ($p < 0.05$) を行った結果、樹種のみが有意であり、調湿条件および交互作用は有意ではなかった。樹種別のローリングシアー強度は、高い順にヒノキ、カラマツ、スギ及びトドマツとなった。

各条件におけるローリングシアー強度の分布を Fig. 4 に示す。Fig. 4 において、破壊に至らなかった試験体(V)については、目視でスリット部が閉じたと判断した時点の荷重より求めた値を参考値として示した。図中の破線は、同一のパネルから採取し、内層をエンドマッチングさせた試験体を示している (Fig. 1)。マッチングした試験体間であっても、ローリングシアー強度のばらつきは大きく、含水率の違いによる強度への影響は顕著ではなかった。また、直交層の破壊形態 (I ~ III) と強度の高低に明瞭な関係性はみられなかったが、平行層が割裂破壊した試験体 (IV) は、参考値ではあるものの比較的高い強度を示すものが多かった。なお、IVおよびVの破壊形態を示した試験体のローリングシアー強度は、Fig. 4 で示した値よりも高いと推察されるため、Table 1 で示した平均値は安全側の評価となっていると考えられる。

調湿条件によるローリングシアー強度への影響が

Table 1. Results of rolling shear tests.

Species	Air-dried density [kg/m ³]			Humidity conditions	Number of specimens	MC [%]		Rolling shear strength* [N/mm ²]				Failure type I / II / III / IV / V
	Max.	Mean	Min.			Mean	SD	Max.	Mean	Min.	SD	
Japanese cypress	529	473	415	A	12	9.5	0.9	3.24	2.15	0.96	0.61	0 / 6 / 4 / 2 / 0
				B	12	12.9	1.2	3.08	2.13	1.02	0.60	0 / 8 / 1 / 2 / 1
				C	12	15.5	1.0	2.94	1.98	1.10	0.46	0 / 10 / 2 / 0 / 0
Japanese larch	686	534	419	A	12	10.0	0.1	2.24	1.53	0.66	0.44	7 / 3 / 1 / 1 / 0
				B	12	12.9	0.1	2.05	1.57	0.81	0.31	1 / 7 / 2 / 2 / 0
				C	12	16.1	0.2	1.84	1.40	1.06	0.19	2 / 8 / 1 / 1 / 0
Japanese cedar	384	313	234	A	14	8.9	0.1	2.29	1.16	0.65	0.44	2 / 5 / 5 / 2 / 0
				B	14	11.1	0.1	1.62	1.05	0.69	0.31	2 / 5 / 2 / 4 / 1
				C	14	14.4	0.2	1.38	1.00	0.75	0.21	1 / 9 / 2 / 0 / 2
Sakhalin fir	405	345	303	A	12	9.5	0.3	1.53	0.96	0.58	0.31	7 / 3 / 1 / 1 / 0
				B	12	11.8	0.4	1.63	1.15	0.92	0.22	1 / 7 / 2 / 2 / 0
				C	12	15.4	0.3	1.36	1.11	0.94	0.14	0 / 8 / 3 / 1 / 0

Legend: MC: Moisture content, SD: Standard deviation, A · B · C: See in Fig. 1.

Note: * Mean and standard deviation of shear strength was calculated excluding results with failure type IV and V (See in Fig. 3).

Fig. 4. Rolling shear strength and failure types of all specimens.

Legends: A · B · C: See in Fig. 1, ◆: Failure type I, ●: Failure type II, ▲: Failure type III, ○: Failure type IV, ◇: Failure type V (See in Fig. 3), —: Mean (Calculated excluding failure types IV and V), Dashed line: End-matched specimens.

みられなかったことから、全ての調湿条件における試験体（ただし、破壊形態Ⅳ及びⅤを示した試験体を除く）について、試験体製作時の内層ラミナの気乾密度とローリングシア強度の関係について検証した。気乾密度とローリングシア強度の関係を図5に示す。統計解析ソフトR (version 4.0.4)¹⁹⁾を用いた無相関検定 ($p < 0.05$) を行った結果、ヒ

ノキおよびスギについては気乾密度とローリングシア強度に相関があることが示唆された一方で、カラマツについては相関がなかった。トドマツについては、気乾密度の範囲が狭く、明確な傾向は看取できなかった。

4. 考 察

本報では岡部ら³⁾や中島ら¹⁶⁾の既報には報告されていない、平行層の割裂破壊(Ⅳ)がみられた。これは、直交層ラミナのローリングシア耐力が平行層ラミナの割裂耐力より高かったために生じたと考えられる。既報^{3, 16)}における試験体は、市販のCLTより製作したものと推定され、外層ラミナの強度が内層ラミナに比べて高く、こうした破壊が生じなかったものと考えられる。圧縮型のローリングシア試験を行う際には、同一樹種であっても、相対的に高密度のラミナを外層にするなどの工夫が必要であると考えられる。

著者らは既報²⁰⁾にて、国産針葉樹種4種におけるCLT直交層のねじりせん断強度およびブロックせん断強度について、樹種によって回帰直線の傾きおよび切片に差異はあるものの、試験体の気乾密度と強度に相関があることを報告している。しかし、本報においては、気乾密度とローリングシア強度

Fig. 5. Relationship between air-dried density and rolling shear strength.

Note: In this figure, the specimens with failure type IV and V are excluded.

Air-dried density of laminae was measured before bonding CLT.

の相関がある樹種（ヒノキ、スギ）がある一方で、カラマツのように相関がない樹種があり（Fig. 5）、ねじりせん断強度およびブロックせん断強度の結果とは異なる傾向が示唆された。Ehrhart ら¹⁰⁾ は、複数の欧州産樹種を対象としてラミナのローリングシア強度を測定した結果、多くの樹種で試験体の気乾密度とローリングシア強度の相関があった一方で、一部の針葉樹（Norway spruce, pine）と広葉樹（beech）においては相関がなく、樹種特有の組織構造（たとえば Norway spruce などでは早晚材の密度差が大きいこと）がこれに影響している可能性があるとして述べている。この知見を参考に、カラマツの組織構造に着目すると、カラマツは同程度の密度であるヒノキと比較して早晚材の密度差が大きく²¹⁻²³⁾、同様に早晚材密度差の大きいスギと比較して晩材率が高い²³⁻²⁵⁾ という特徴を有している。このため、気乾密度は晩材部に大きく依存していると考えられるが、ローリングシア試験時の破壊形態に着目すると、破壊線は年輪境界の早材部側や、接着層近傍の早材部を起点としており（Fig. 3）、早材部の密度が最終的な強度に大きく影響しているものと推察される。

また、本報では複数の調湿条件（A～C）を設定することで、含水率がラミナのローリングシア強度に与える影響について検証した。その結果、含水率が9～16%の範囲内において、水分条件がラミナのローリングシア強度に及ぼす影響は、マッチングした試験体間のローリングシア強度のばらつきに内包される程度であるものと示唆された（Fig. 4）。現行の直交集成板の適正製造基準¹⁸⁾ では、強度試験で得られた実験値は試験時の含水率によって補正することが定められているが、ローリングシア破壊によって強度が決定される条件下であれば、含水率による補正を必要としない可能性が示唆された。

5. 結 論

主要な国産針葉樹種4種（ヒノキ、カラマツ、スギ、トドマツ）のラミナについて、3種類の湿度環境下で調湿を行い、圧縮型のローリングシア試験を行った。その結果、以下の知見が得られた。

1. ローリングシア強度を樹種間で比較すると、強度の高い順に、ヒノキ、カラマツ、スギ及びトドマツとなった。
2. ローリングシア強度と試験体の気乾密度には相関がある樹種（ヒノキ、スギ）がある一方で、相関がない樹種（カラマツ、トドマツ）もあった。
3. 調湿条件間でローリングシア強度に顕著な差

異はなく、含水率がローリングシア強度に与える影響は顕著ではないことが示唆された。

文 献

- 1) JAS 3079-2019：直交集成板の日本農林規格。農林水産省（2019）。
- 2) 平成30年国土交通省告示第1324号：特殊な許容応力度及び特殊な材料強度を定める件（平成13年国土交通省告示第1024号）の一部を改正する件。国土交通省（2018）。
- 3) 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）。
- 4) 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。
- 5) 石原 亘, 高梨隆也, 大橋義徳, 松本和茂, 戸田正彦, 植松武是：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－。木材学会誌 66(4), 214-224（2020）。
- 6) EN Standard 408：Timber structures-Structural timber and glued laminated timber-Determination of some physical and mechanical properties. CEN（2012）。
- 7) ASTM D 2718-00：Standard test methods for structural panels in planar shear (rolling shear). ASTM（2006）。
- 8) 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 tests. *Wood Fiber Sci.* 46(2), 259-269（2014）。
- 9) Aicher, S., Christian, Z., Hirsch, M.: Rolling shear modulus and strength of beech wood laminations. *Holzforschung* 70(8), 773-781（2016）。
- 10) Ehrhart, T., Brandner, R., Shickhofer G., Frangi A.: Rolling shear properties of some European timber species with focus on cross laminated timber (CLT): test configuration and parameter study. Conference paper of International Network on Timber Engineering Research (INTER 2015), Volume: 2nd meeting, Šibenik, Croatia, August 24-27, 2015, pp. 61-76。

- 11) Gong, M., Tu, D., Li, L., Chui, H.I.: Planar shear properties of hardwood cross layer in hybrid cross laminated timber. Proceedings of 5th International Scientific Conference on Hardwood Processing (ISCHP 2015), Québec City, Canada, September 15-17, 2015, pp. 85-90.
- 12) Ukyo, S., Shindo, K., Miyatake, A.: Evaluation of rolling shear modulus and strength of Japanese cedar cross-laminated timber (CLT) laminae. *J. Wood Sci.* **65**(31), (2019).
- 13) 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).
- 14) JAS 233-2014: 合板の日本農林規格. 農林水産省 (2014).
- 15) 川合慶拓, 小泉章夫, 澤田 圭, 佐々木義久: 道産材を用いたCLTの直交層構成の違いによる面外せん断強度への影響について. 第68回日本木材学大会要旨集, 京都, 2018, I15-P-09 (CD-ROM).
- 16) 中島昌一, 荒木康弘, 大橋義徳, 中島史郎, 宮武敦: 実大水平載荷実験によるCLTの幅方向のせん断強度の評価—樹種の違いが幅方向のせん断強度に与える影響—. 日本建築学会構造系論文集 **84**, 834-849 (2019).
- 17) CLT等新たな木質建築部材用促進・定着委託事業 (CLT強度データ収集): 成果報告書, <https://www.ffpri.affrc.go.jp/pubs/various/documents/h30cltkyoudo.pdf/> 2021年 4 月 1 日参照.
- 18) 一般社団法人日本CLT協会: 直交集成板の適正製造基準 (第 2 版). 日本CLT協会, 東京, 2019, p. 45.
- 19) R Core Team (2021). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>. 2021年 2 月15日参照.
- 20) 石原 亘, 高梨隆也, 大橋義徳, 宮崎淳子, 中島昌一, 宮武 敦, 新藤健太: ねじり試験およびブロックせん断試験によるCLTの接着強度の評価. 木材学会誌 **67**(2), 100-108 (2021).
- 21) 木材工業ハンドブック編集委員会編: 木材の性質. “木材工業ハンドブック (第 3 版)”, 東京, 丸善, 1982, p. 58.
- 22) 佐伯 浩: 針葉樹材における構造の年輪内変移に関する研究. 京都大学博士論文 (1968).
- 23) 安久津久, 松本和茂, 藤本高明, 大野泰之, 滝谷美香, 八坂通泰: カラマツにおける間伐強度の違いが年輪構造や丸太のヤング係数に及ぼす影響. 木材学会誌 **58**(5), 249-259 (2012).
- 24) 伊東隆夫, 山口和穂, 黒田宏之, 島地 謙, 角谷和男: ヒノキおよびスギの材質におよぼす植栽密度の影響. 木材研究・資料 **15**, 45-60 (1980).
- 25) 藤原新二: スギおよびヒノキ材の年輪幅による細胞寸法と年輪構造の変動. 木材学会誌 **41**(8), 774-779 (1995).