



Title	CLT直交層におけるローリングシアーおよび北海道産CLTの面外せん断強度に関する研究
Author(s)	石原, 亘
Citation	北海道大学. 博士(農学) 甲第15150号
Issue Date	2022-09-26
DOI	10.14943/doctoral.k15150
Doc URL	<a href="http://hdl.handle.net/2115/87221">http://hdl.handle.net/2115/87221</a>
Type	theses (doctoral)
File Information	Ishihara_Wataru.pdf



[Instructions for use](#)

CLT 直交層におけるローリングシアー  
および北海道産 CLT の面外せん断強度に関する研究

北海道大学 大学院農学院  
農学専攻／環境フロンティアコース 博士後期課程  
石原 亘

## 目次

第1章 緒論 .....	1
1.1 研究の背景 .....	1
1.2 本論文の概要 .....	6
第2章 国産ラミナのローリングシアー強度 .....	13
2.1 ラミナのローリングシアー強度に関する既往の研究 .....	13
2.2 国産主要針葉樹ラミナのローリングシアー試験 .....	18
2.2.1 研究の概要 .....	18
2.2.2 試験体および試験方法 .....	18
2.2.2.1 試験体の製作 .....	18
2.2.2.2 ローリングシアー試験 .....	19
2.2.3 試験結果 .....	19
2.2.4 考察 .....	20
2.3 流通寸法の道産ラミナにおけるローリングシアー試験 .....	27
2.3.1 研究の概要 .....	27
2.3.2 試験体および試験方法 .....	27
2.3.2.1 試験体の製作 .....	27
2.3.2.2 ローリングシアー試験 .....	28
2.3.3 試験結果 .....	28
2.3.4 考察 .....	28
2.4 まとめ .....	32
第3章 カラマツおよびトドマツ CLT の面外せん断強度 .....	33
3.1 CLT の面外せん断強度に関する既往の研究 .....	33

3.2. カラマツおよびトドマツ CLT の面外せん断試験.....	35
3.2.1 研究の概要 .....	35
3.2.2 試験体および試験方法.....	35
3.2.2.1 試験体の製作 .....	35
3.2.2.2 せん断強度試験 .....	35
3.2.2.3 せん断スパンの定義.....	36
3.2.2.4 せん断応力度の計算.....	37
3.2.3 試験結果.....	38
3.2.4 考察 .....	39
3.2.4.1 試験方法の影響 .....	39
3.2.4.2 せん断スパンの影響.....	39
3.3 まとめ .....	49
第4章 促進劣化処理を行ったカラマツおよびトドマツ CLT の面外せん断強度 .....	51
4.1 促進劣化処理を行った CLT の強度に関する既往の研究.....	51
4.1.1 既往の研究および建設省告示における接着耐久性の検証方法.....	51
4.1.2 建設省告示における接着耐久性および使用環境の定義.....	52
4.1.2.1 接着耐久性の解釈.....	52
4.1.2.2 使用環境の定義 .....	53
4.2 促進劣化処理を行ったカラマツおよびトドマツ CLT の面外せん断試験..	54
4.2.1 研究の概要 .....	54
4.2.2 試験体および試験方法.....	54
4.2.2.1 試験体の製作 .....	54
4.2.2.2 促進劣化処理.....	55



4.2.2.3	剝離試験 .....	56
4.2.2.4	せん断試験体の観察 .....	57
4.2.2.5	せん断強度試験 .....	58
4.2.3	結果 .....	58
4.2.3.1	剝離試験およびせん断試験体の観察結果 .....	58
4.2.3.2	せん断試験結果 .....	59
4.2.4	考察 .....	59
4.2.4.1	告示による接着耐久性の評価 .....	59
4.2.4.2	劣化処理方法の比較 .....	60
4.2.4.3	剝離試験と強度残存率の比較 .....	61
4.3.	まとめ .....	76
第5章	国産 CLT の直交接着層に生じるせん断強度とその評価方法 .....	77
5.1	CLT の接着層に生じるせん断強度に関する既往の研究 .....	77
5.2	CLT 直交層のブロックせん断およびねじり試験による接着せん断強度の評価 .....	80
5.2.1	本章の概要 .....	80
5.2.2	試験片および試験方法 .....	80
5.2.2.1	CLT パネルおよび試験片の製作 .....	80
5.2.2.2	剝離試験 .....	81
5.2.2.3	ブロックせん断試験および45度ブロックせん断試験 .....	82
5.2.2.4	ねじり試験 .....	82
5.2.3.	結果 .....	83
5.2.3.1	剝離試験 .....	83
5.2.3.2	ブロックせん断試験および45度ブロックせん断試験 .....	83

5.2.4. 考察 .....	85
5.3 まとめ .....	96
第6章 総括 .....	97
6.1 本論文のまとめ .....	97
6.2 提案および提言 .....	100
6.3 結び .....	102
参考論文 .....	103
引用文献 .....	104
謝辞 .....	118

# 第1章 緒論

## 1.1 研究の背景

わが国において、住宅全体の着工数に占める木造の割合（以下、木造率）は 2019（平成 30）年度実績で 57%、一戸建住宅においては 90%と高い水準にあり、住宅建築は木材の大きな需要先となっている<sup>1)</sup>。しかし、新設住宅の年間着工数は、1973（昭和 48）年の 191 万戸（うち木造 112 万戸）をピークに、いわゆるバブル時代（1985（昭和 60）～1991（平成 2）年）を除いて、概して減少傾向にある<sup>1,2)</sup>。今後は、急激な少子高齢化を受け、2030（令和 12）年度の年間着工数は 63 万戸にまで減少するとの試算がなされている<sup>3)</sup>。このため、建築用の木材需要の中期的な維持および拡大にあたっては、木造率が 1 割以下（2019（平成 30）年度）に留まっている中高層建築および非住宅建築への積極的な木材利用が必要であると考えられる。

こうした背景から、公共建築物等における木材の利用の促進に関する法律（以下、木促法）<sup>4)</sup> が 2010（平成 22）年に施行され、主に低層（3 階建て以下）の公共建築の積極的な木造化が進められることとなった。木促法の施行後、低層の公共建築物に占める木造率は緩やかながら上昇傾向にあり、林野庁は同法による木材需要の拡大には一定の成果があったものと総括している<sup>5)</sup>。その後、木促法は 2021（令和 3）年に、「脱炭素社会の実現に資する等のための建築物等における木材の利用の促進に関する法律」に改正され、木材の利用の促進に取り組む対象が公共建築物から民間建築物を含む建築物一般に拡大された<sup>5,6)</sup>。これにより、大型商業施設や会社事務所など、中大規模の非住宅建築物への積極的な木材利用が期待されている。

木造建築の用途の拡大と中大規模化の需要が高まる中、これに応じた木質建築材料として直交集成板（Cross Laminated Timber, 以下 CLT）が注目されている。CLT は、挽き板（以下、ラミナ）を繊維方向が直交するように積層接着した木質材料（パネル）であり、寸法安定性が高いこと、強度異方性が小さいこと、大面積および大断面を有することで高

耐力を実現できることなどの特徴を有している<sup>7)</sup>。Fig. 1.1 に、CLT の概要を示す。CLT において、ラミナを幅方向に並べたものを“プライ”と称し、繊維方向の平行な単一または連続する複数のプライを“層”、最も外側にある層を“外層”、それ以外の層を“内層”と呼ぶ<sup>8)</sup>。このほか、外層ラミナに対して、繊維方向が平行な層を“平行層”、直交する層を“直交層”と呼んでいる (Fig. 1.2)。CLT の断面構成は層とプライの数で規定されており、一般的には Fig. 1.3 に示す 6 種類 (3 層 3 プライ、3 層 4 プライ、5 層 7 プライ、7 層 7 プライ、9 層 9 プライ) の断面構成 (層構成) がある。

CLT はグラーツ工科大学による研究プロジェクトにおいて、KLH マッシュホルツ社の協力により 1996 (平成 8) 年に最初の製品が開発され<sup>9)</sup>、以降、欧州および北米を中心に急速に普及が進み、中大規模建築を中心に利用が進んでいる。欧州では、商業生産開始後しばらくの間、CUAP (Common Understanding of Assessment Procedure)<sup>10)</sup> と呼ばれる性能評価基準によって CLT の製品性能を担保してきたが、2015 (平成 27) 年に CLT の欧州規格 (以下、EN16351)<sup>11)</sup> が制定され、2021 (令和 3) 年の改訂を経て今現在に至っている。このほか、2011 (平成 23 年) 年に CLT の北米における性能規定 (ANSI/APA PRG 320)<sup>12)</sup> が制定されており、以降 2019 (令和元) 年まで毎年改定がなされている。

国内では CLT の利用拡大に向け、2010 年代以降、生産体制の整備と CLT に関連する法整備が異例のスピードで進められた。国内における CLT の生産体制は 2012 (平成 24) 年に銘建工業(株) (岡山県) によってテストプラントが整備されて以降<sup>13)</sup>、急速に整備が進められ、2021 (令和 3) 年現在では国内 8 か所に生産拠点 (JAS 認定工場) がある<sup>14)</sup>。

CLT の規格化は欧州より早く、2013 (平成 25) 年に農林水産省により直交集成板の日本農林規格 (以下、CLT の JAS)<sup>15)</sup> が制定され、同年に CLT の JAS<sup>15)</sup> の内容を補完する直交集成板の適正製造基準 (以下、適正製造基準)<sup>16)</sup> が業界団体 (一般社団法人日本 CLT 協会) により制定された。その後、2019 (令和 2) 年に CLT の JAS<sup>15)</sup> は改正され、規格の正式名称も“直交集成板の日本農林規格”から JAS3079 : 2019<sup>17)</sup> (以下、JAS3079) と改められた。また、これに呼応して、同年に適正製造基準<sup>16)</sup> も改訂されている。

建築設計に関する法整備としては、2016（平成 28）年に、国土交通省による改正告示（平成 28 年国土交通省告示第 562 号<sup>18)</sup>、以下、国交省告示 562 号）により、特殊な許容応力度及び特殊な材料強度を定める告示（平成 13 年国土交通省告示第 1024 号<sup>19)</sup>、以下、国交省告示 1024 号）に CLT が追加された。国交省告示 562 号<sup>18)</sup>により、CLT について様々な応力状態に対応した基準強度が制定され、許容応力度計算による構造計算が可能となり、中大規模建築に CLT を構造材として利用しやすくなった。国交省告示第 1024 号<sup>19)</sup>は 2018（平成 30）年に再度の改正告示（平成 30 年国土交通省告示第 1324 号<sup>20)</sup>、以下、国交省告示 1324 号）が公布され、内容の増補および改訂が行われている。このほか、2016（平成 30）年に公布された平成 28 年国土交通省告示第 561 号<sup>21)</sup>（以下、国交省告示 561 号）により、CLT の JAS<sup>15)</sup>（現在の JAS3079<sup>17)</sup>）に適合した製品以外であっても、平成 12 年建設省告示第 1446 号<sup>22)</sup>（以下、建設省告示 1446 号）による性能評価によって建築基準法に基づく大臣認定を取得できる制度が整えられた。これによって、使用状況に応じた特殊な仕様の CLT（たとえば、非等厚ラミナを使用した CLT など）についても認定取得により、いわゆる指定建築材料<sup>23)</sup>として使用できるようになった。

CLT に関連する法整備が進み、国内における利用促進が図られる中、北海道においても、2017（平成 29）年 3 月に北海道水産林務部によって「道産 CLT 利用拡大に向けた推進方針」（以下、道産 CLT 推進方針）が制定され<sup>24)</sup>、北海道産（以下、道産）人工木材の CLT への積極的な利用、および北海道内（以下、道内）における CLT の供給体制の整備が進められている。ここで、全国および道内における CLT を利用した建築物の 2015（平成 27）年度より 2019（令和元）年度までの竣工数の推移を **Fig. 1.4** に、2020（令和 2）年 7 月時点における道内における CLT を利用した建築物（非構造部材、内装材としての利用も含む）の一覧を **Table 1.1** に、道内の CLT 建築の例を **Fig. 1.5** に示す<sup>25)</sup>。道内における CLT の商業生産の開始は 2016（平成 28）年、本格的な製造ラインの稼働は 2019（令和元）年であり<sup>26)</sup>、本州と比較すると供給体制の整備がわずかに遅れたものの、CLT を利用した道内の建築物は 2017（平成 29）年度以降、漸増傾向にある（**Fig. 1.4**）。

また、Table 1.1 に示す建築物に使用された CLT は、一部の例で道産スギ（道南スギ）CLT を使用しているものの、ほとんどはカラマツ(*Larix kaempferi*)およびトドマツ(*Abies sachalinensis*)CLT を使用している。2016（平成 28）年に制定された CLT の基準強度（国交省告示 562 号<sup>18)</sup>、国交省告示 1024 号<sup>19)</sup>）では、スギ (*Cryptomeria japonica*) CLT より得られた試験データ<sup>27-29)</sup> をベースに各基準値が規定された。このため、スギに比べて剛性、強度の高いカラマツおよびトドマツの使用にあたっては、樹種の特性を反映させた設計がしにくい面があった。そこで、道産 CLT 推進方針の制定と前後して、北海道立総合研究機構・林産試験場（以下、林産試験場）を中心に、2014（平成 26）年以降、道産カラマツおよびトドマツを用いた CLT の短期強度<sup>30-38)</sup> および長期強度<sup>39-42)</sup> のデータ収集が行われ、2018（平成 30）年の基準強度の改正（国交省告示 1324 号<sup>20)</sup>）にあたっては、ここで得られた強度データを反映し、カラマツおよびトドマツ CLT を想定した基準強度が新たに設けられた<sup>43,44)</sup>。たとえば、国交省告示 562 号<sup>18)</sup> による改正時点では、ラミナの樹種を問わずの面外せん断の基準強度は 0.9 N/mm<sup>2</sup>となっていたのが、国交省告示 1324 号<sup>20)</sup> による改正で、カラマツが 1.2 N/mm<sup>2</sup>、トドマツが 1.0 N/mm<sup>2</sup>、スギが 0.9 N/mm<sup>2</sup>というように、樹種の特性に配慮した基準値が設けられた（なお、せん断強度の基準値は層構成に関係なく一律で設けられている）。

以上に述べたように、実用の面から、カラマツおよびトドマツ CLT を含めた国産 CLT に関する強度データの収集が進んだが、未だに検証すべき課題も多い。その一つとして、直交層ラミナのローリングシア（転がりせん断，rolling shear）によって引き起こされる破壊現象が挙げられる。

CLT を水平部材（床・屋根など）として使用する場合、面外方向からの曲げ強度について評価する必要があるが、短スパンでの使用を想定した場合は面外せん断強度（out-of-plane shear strength）についても評価する必要がある（Fig. 1.6）。面外方向からのせん断力が生じる際、CLT は異方性の解消を目的として直交層を有しているため（Fig. 1.2）、直交層のラミナにローリングシア破壊が生じ、これが面外せん断強度の決定要因となる（Fig.

1.7)。このため、CLT の面外せん断強度について検証する場合、ラミナのローリングシア一強度の把握が重要であると考えられるが、国産針葉樹材を対象としたラミナのローリングシア一強度に関する報告は限定的であり、ラミナの材料条件（樹種、寸法、含水率）がローリングシア一強度にどの程度影響しているのかなどの検証はなされていない（2.1）。また、CLT の面外せん断破壊は、前述したように短スパンの CLT に面外方向から大きな荷重が加わった際に生じるが、具体的にどの程度のスパンで生じるのか、またスパンによってせん断強度がどのように変化するかについては未解明である（3.1）。

このほか、CLT 建築の実例をみると、CLT を外装“現し”仕上げとして使用する例も多い（Fig. 1.5）。建設省告示 1446 号<sup>22)</sup>における木質接着材料の性能評価においては、このような常時あるいは断続的な湿潤環境下での使用を想定した場合、促進劣化処理による耐久性（接着耐久性）の検証を行うことを求めている。促進劣化処理が CLT の面外せん断強度や破壊形態にどのような影響を与えるのかを報告した例は非常に少なく、検証が必要である（4.1）。

ラミナのローリングシア一破壊は面外せん断強度のみならず、接着性能の評価においても課題となる。CLT は接着材料であるため、接着部分の強度を評価することは品質管理の上で重要である。集成材の JAS<sup>45)</sup>においては、接着層がせん断面となるような椅子型の小型試験片を製作し、圧縮せん断試験（以下、ブロックせん断試験）によって接着せん断強度および木部破断率（木破率）を評価することが規定されている。JAS3079<sup>17)</sup>においても、集成材と同様にブロックせん断試験による接着性能の評価求められているが、CLT 直交層の接着面（直交接着面）の評価においては試験片がローリングシア一破壊を呈することが多く、接着層の近傍で破壊しないことも多い（Fig. 1.8）。このため、現行の JAS3079<sup>17)</sup>では直交層については木破率のみを評価対象としており、接着部分の強度を適切に評価できる、ローリングシア一の発生を抑えた接着せん断試験方法の提案が待たれている（5.1）。

## 1.2 本論文の概要

先に述べた背景 (1.1) を踏まえ、本論文では、“直交層ラミナのローリングシア破壊”という、CLT に特有の現象に焦点を当て、CLT の面外せん断強度と接着せん断強度に関する実験的なデータ収集と考察を行った。また、面外せん断強度に関する実験については、道産 CLT 推進方針<sup>24)</sup> の下で利用拡大が予想されるカラマツおよびトドマツ CLT を主な対象とした。以下に、第 2 章以降の内容について概要を記す。

第 2 章では、主要な国産針葉樹 4 種 (ヒノキ (*Chamaecyparis obtusa*), カラマツ, スギ, トドマツ) のラミナについて、断面寸法および木取り、試験方法を統一した上で、ローリングシア強度の樹種間比較を行った。また、複数の環境下で調湿した試験体を用意し、含水率がローリングシア強度に与える影響について検証した。このほか、カラマツおよびトドマツのラミナについては、国内における一般的な断面寸法のラミナについてもローリングシア強度を測定した。

第 3 章および第 4 章では、カラマツおよびトドマツ CLT を対象に、実大サイズの試験体による面外せん断強度の評価を行った。第 3 章では、試験方法やスパン条件によってせん断強度がどのように変化するかを実験的に明らかにするとともに、第 2 章の実験より得られたカラマツおよびトドマツラミナのローリングシア強度との比較を行った。第 4 章では、促進劣化処理により面外せん断強度がどの程度低下するのか、接着層および直交層ラミナの劣化状態の観察と併せて検証した。

第 5 章では、CLT 直交層における接着せん断強度に焦点を当てた。JAS3079<sup>17)</sup> に規定されているブロックせん断試験によって直交層の接着せん断強度を評価するとともに、ローリングシアの発生を抑えた試験方法 (加力方向を繊維方向に対して 45 度傾けたブロックせん断試験, 直交層のねじり試験) による評価を行い、これらから得られる強度値や破壊形態の相違について検証した。

第 6 章では、第 2 章から第 5 章で収集したデータを総括した。また、得られたデータを現行の国内規格等に定められている基準や試験方法与照合し、提言および提案を行った。



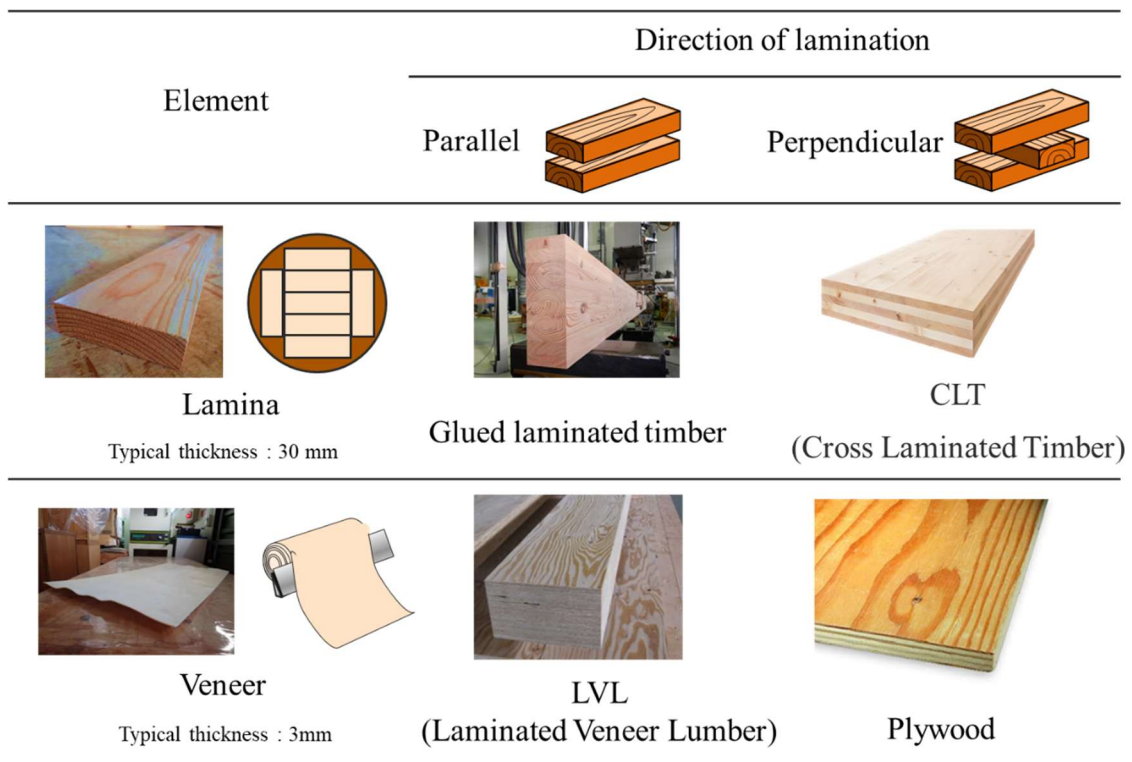


Fig. 1.1. Overview of CLT (Cross Laminated Timber).

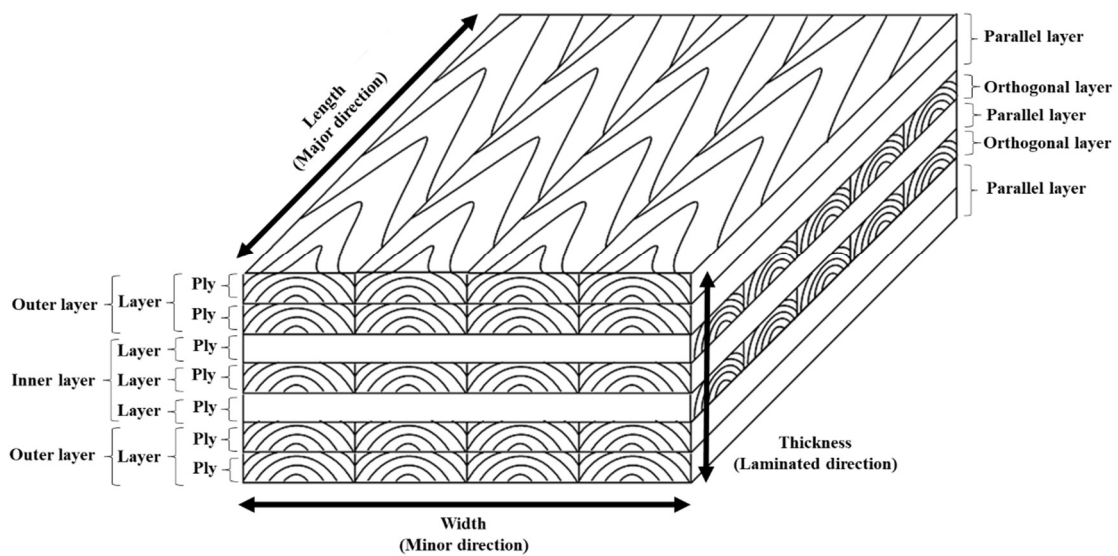
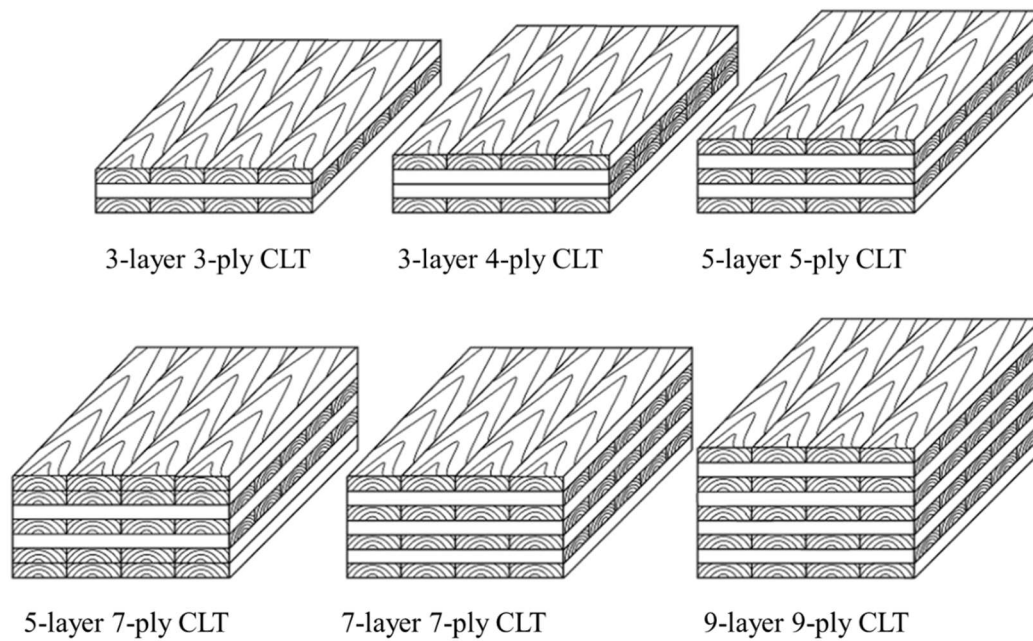
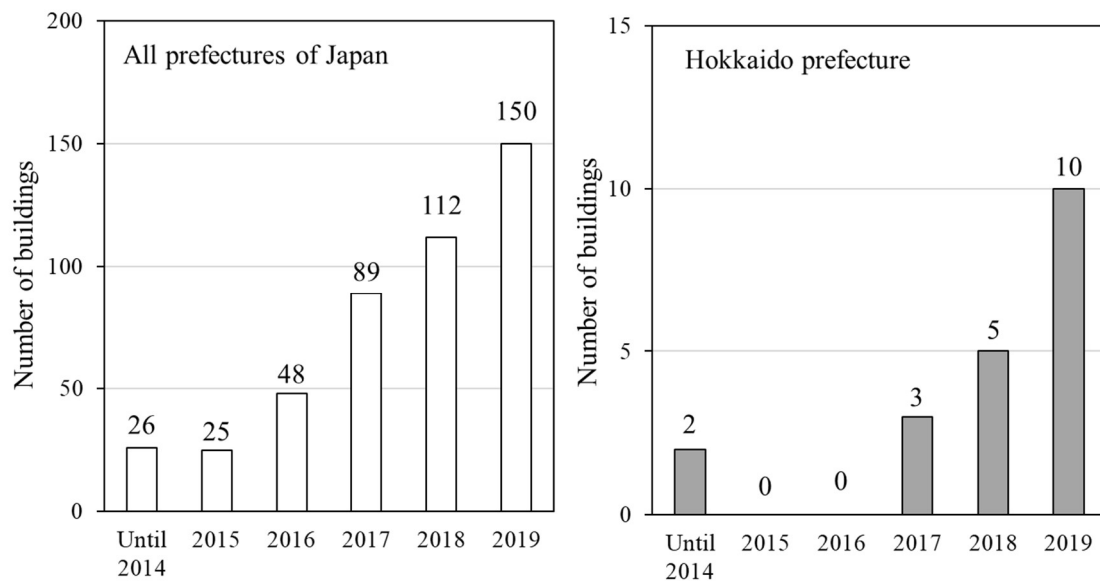


Fig. 1.2. Definitions of “layer” and “ply” in CLT<sup>8</sup>.



**Fig. 1.3. Typical layer compositions of CLT<sup>8)</sup>.**



**Fig. 1.4. Transition of the number of buildings with CLT in Japan and Hokkaido<sup>25)</sup>.**

Note: Including partial use.

**Table 1.1. List of buildings with CLT in Hokkaido (2015.3 - 2020.7) <sup>25)</sup>.**

Municipality	Purpose of the building	Used part						Quantity (m <sup>3</sup> )	Completion date
		Structural material				Part of structural material	Interior material		
		Floor	2nd Floor Ceiling	Roof	Wall				
Sapporo	Temporary store	○	○	-	○	-	-	34.8	2015.3
Kitami	Training facility		○	○	○	-	-	74.7	2015.3
Hokuto	Meeting facility	-	-	-	-	-	○	8.2	2017.7
Nayoro	Dormitory	-	-	-	-	○	-	3.5	2018.11
Tobetsu	Town hall	-	-	-	-	○	-	4.0	2018.11
Kushiro	Public toilet	-	-	-	-	-	○	0.6	2018.3
Shiraiuchi	Dormitory / Training facility	-	-	-	○	-	-	51.7	2018.3
Kitami	Office	-	-	○	○	-	-	103.2	2019.12
Asahikawa	Experimental building	○	-	○	○	-	-	64.3	2019.3
Oketo	Meeting facility	-	-	-	-	-	○	8.0	2019.3
Ashyoro	Nursing home	-	-	-	-	-	○	5.3	2019.3
Sapporo	Office	-	-	-	-	○	-	3.2	2019.4
Sapporo	University / Multipurpose facility	-	-	-	-	-	○	0.8	2019.9
Asahikawa	Multipurpose facility	-	-	-	-	○	-	10.0	2019.9
Niki	Office / Garage	-	-	-	-	○	-	4.9	2020.12
Shibetsu	Office	-	○	○	○	-	-	152.4	2020.2
Shirai	Restaurant	-	-	-	-	○	-	37.0	2020.2
Shirai	Roof of park	-		○	○	-	-	15.4	2020.3
Shirai	Roof of park	-		○	○	-	-	9.2	2020.3
Nayoro	Nursery school / Meeting facility	-	-	-	-	○	-	158.0	2020.3
Kitami	Smoking booth	○		○	○	-	-	4.9	2020.4
Kitami	Smoking booth	○		○	○	-	-	2.6	2020.4
Tobetsu	Evacuation hut	-	-	○	○	-	-	10.1	2020.7



**Fig. 1.5. Examples of buildings with CLT in Hokkaido.**

Note: The left side show the exterior of the building and the right side show the interior.

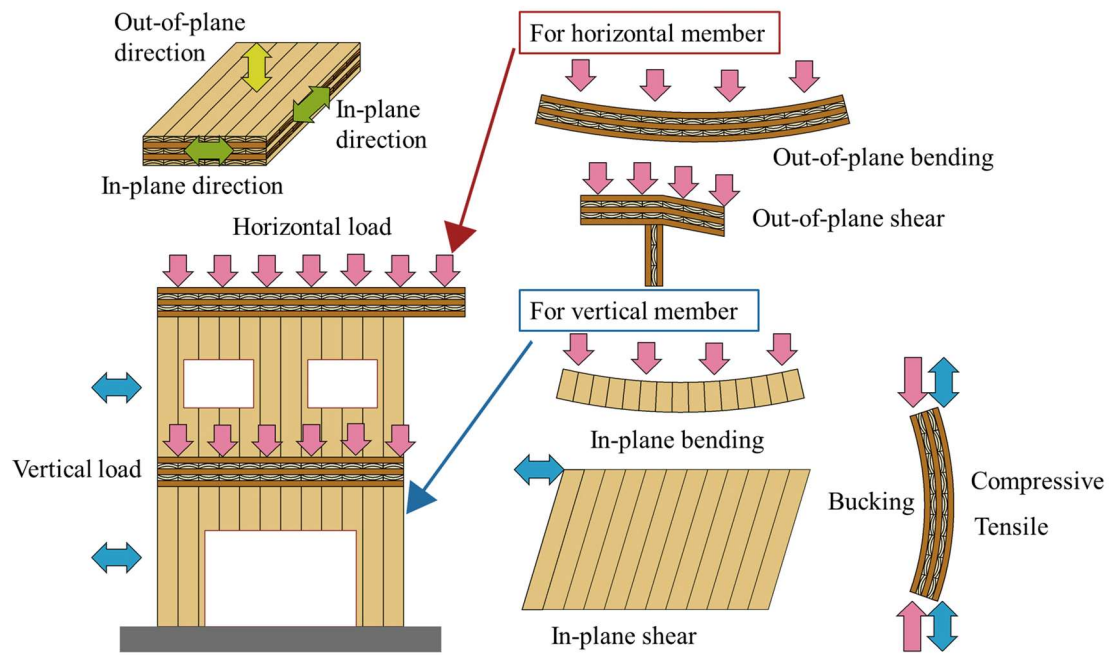


Fig. 1.6. Various stresses on horizontal and vertical CLT elements<sup>44</sup>).

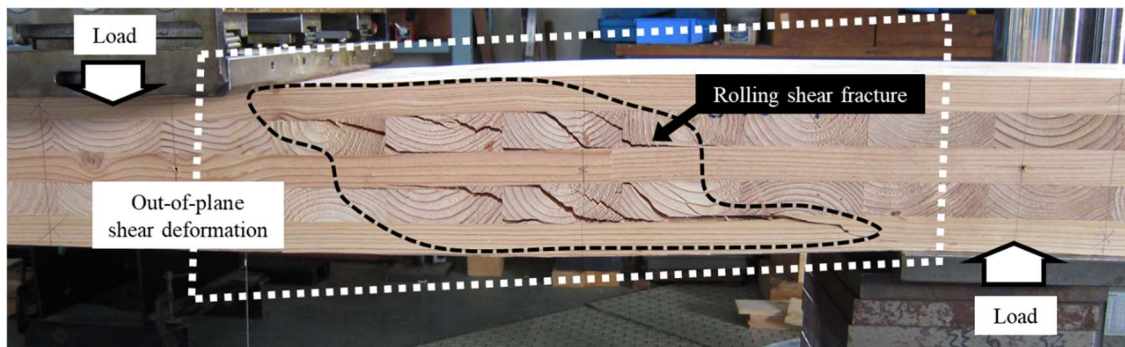
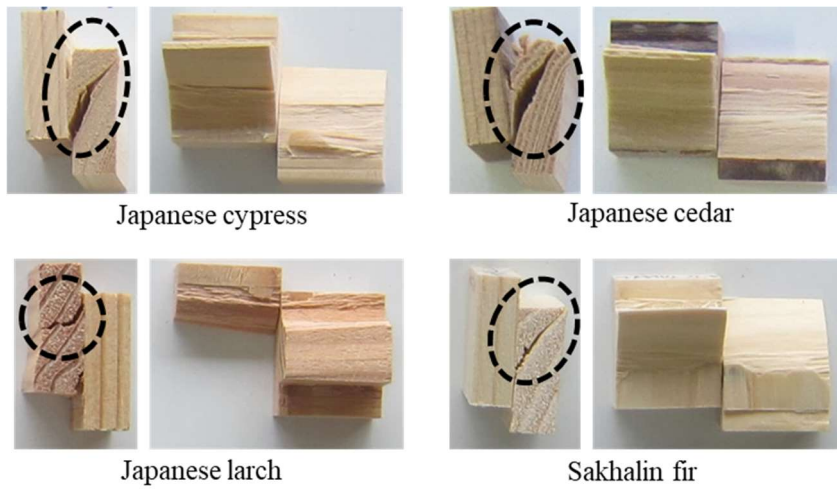


Fig. 1.7. Rolling shear failure of cross layer laminae under out-of-plane shear deformation (Japanese larch CLT).





**Fig. 1.8. Rolling shear failure of block shear test specimens (JAS3079<sup>17</sup>).**

## 第2章 国産ラミナのローリングシア強度

### 2.1 ラミナのローリングシア強度に関する既往の研究

CLT は面外せん断試験時に、直交層ラミナのローリングシア破壊が支配的となるため、面外せん断強度はラミナのローリングシア強度に大きく依存すると考えられる<sup>46)</sup>。ローリングシア強度を的確に把握するには、要素試験によってローリングシア強度を直接的に測定する必要がある。ローリングシアは合板などではよく知られた現象であり<sup>47)</sup>、合板の日本農林規格（以下、合板の JAS）<sup>48)</sup>では縦引張による接着せん断試験によって、単板のローリングシア強度の評価がなされている（**Fig. 2.1**）。しかし、ラミナのローリングシア試験に関しては、JAS3079<sup>17)</sup>などの国内規格では試験方法が規定されておらず、国内における試験例は多くない。

ラミナのローリングシア強度の測定方法として、EN16351<sup>11)</sup>では3層3プライのCLTを用いた圧縮型のローリングシア試験が規定されている（**Fig. 2.2**）。この試験方法による報告例もあるが<sup>49)</sup>、特殊な治具が必要となるため、EN16351<sup>11)</sup>における試験体寸法を参考に、試験体端部を斜めにカットし、荷重方向に対して14度傾けて圧縮する例<sup>50-53)</sup>が多い。しかし、これらの報告において、試験体の長さは250~300mm程度であり（なお、EN16351<sup>11)</sup>においては、試験体の長さは試験体幅を $\tan 14^\circ$ で除した値としている）、いずれも直交層ラミナが3枚程度含まれている。Wangら<sup>52)</sup>はEN16351<sup>11)</sup>に準じた試験において、直交層ラミナ間の空隙や、幅はぎ接着の有無によって、得られるローリングシア強度が異なることを報告している。このため、以上で述べた報告例はラミナ単体のローリングシア強度を評価しているとは言い難い。

ラミナ単体のローリングシア試験としては、鋼板でラミナを挟むように接着し、EN16351<sup>11)</sup>と同様に荷重方向に対して14度傾けて圧縮させる試験方法がある。これは欧州規格（EN408<sup>54)</sup>）に規定されている木材の繊維方向のせん断試験方法を繊維直交方向に応用したものである（**Fig. 2.3**）。これと同様の試験方法は北米規格（ASTM D 2718<sup>55)</sup>）にも定

められており、海外ではこの方法による報告例も多い<sup>56-58)</sup>。また、これに類似した試験方法として、鋼板の代わりに試験対象のラミナよりも高強度の樹種を用いた例<sup>59-61)</sup>や、ビスと鋼製治具により外層ラミナの破壊を防ぎつつ圧縮する方法<sup>62-64)</sup>も考案されている。

国内規格では、先述したようにラミナのローリングシア強度を測定する試験の規定はないが、岡部ら<sup>46)</sup>は、合板の JAS<sup>48)</sup>における接着せん断試験を参考にした圧縮型のローリングシア試験方法を考案している。岡部らの考案した方法は、EN408<sup>54)</sup>などの試験法と異なり、異種材料（あるいは異樹種）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、国内におけるいくつかの研究で準用されている<sup>65,66)</sup>。

以上に述べたように、ラミナのローリングシアに関する既往の研究例は少なくないが、試験方法が多岐に渡っているほか、各報告において試験対象の樹種が限定的である場合が多く、また、ラミナ寸法や木取りといった試験条件が統一されていない。このため、各報告におけるデータを単純に比較することはできない。

複数の樹種を対象とした報告例には、Ehrhart ら<sup>59)</sup>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<sup>50)</sup>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<sup>65,66)</sup>のみである。

ラミナ寸法とローリングシア強度との関係については、ラミナの断面寸法（アスペクト比）が強度に影響を及ぼしていることが指摘されている<sup>59,60,61-63)</sup>。たとえば、Ehrhart ら<sup>59)</sup>や Ukyo<sup>60)</sup>らは、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、Li<sup>62)</sup>は、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。最近では、Li ら<sup>64)</sup>がラミナのアスペクト比と強度の現れ方が直線回帰することを指摘している。

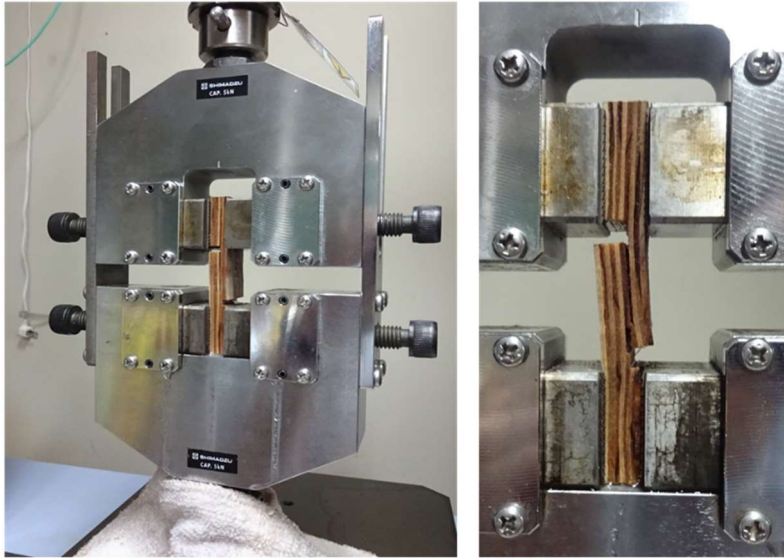
木取りについては、岡部ら<sup>46)</sup>や川合ら<sup>65)</sup>が、年輪接線角がローリングシア強度に影響を与えていること、Ukyo ら<sup>60)</sup>が、ラミナの採材位置が髓に近いほど得られるせん断弾性係数が高いことを報告している。一方で、Ehrhart ら<sup>59)</sup>は、心去りラミナについては、



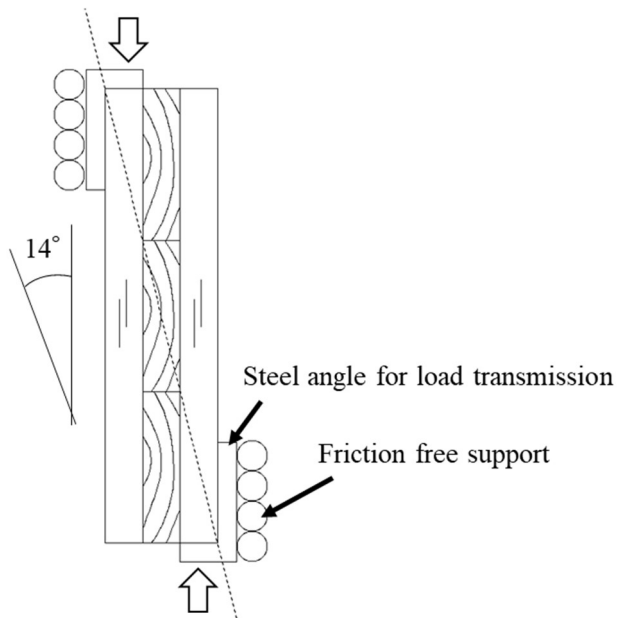
採材位置がせん断弾性係数には影響を及ぼすものの、ローリングシア強度には顕著な影響を与えないことを報告している。

また、直交集成板の適正製造基準<sup>16)</sup>では、構造用集成材の適正製造基準<sup>67)</sup>と同様に、試験時の含水率によって面外せん断強度を補正することが求められているが、含水率がローリングシア強度に及ぼす影響について検証した例は国内外ともに見当たらない。

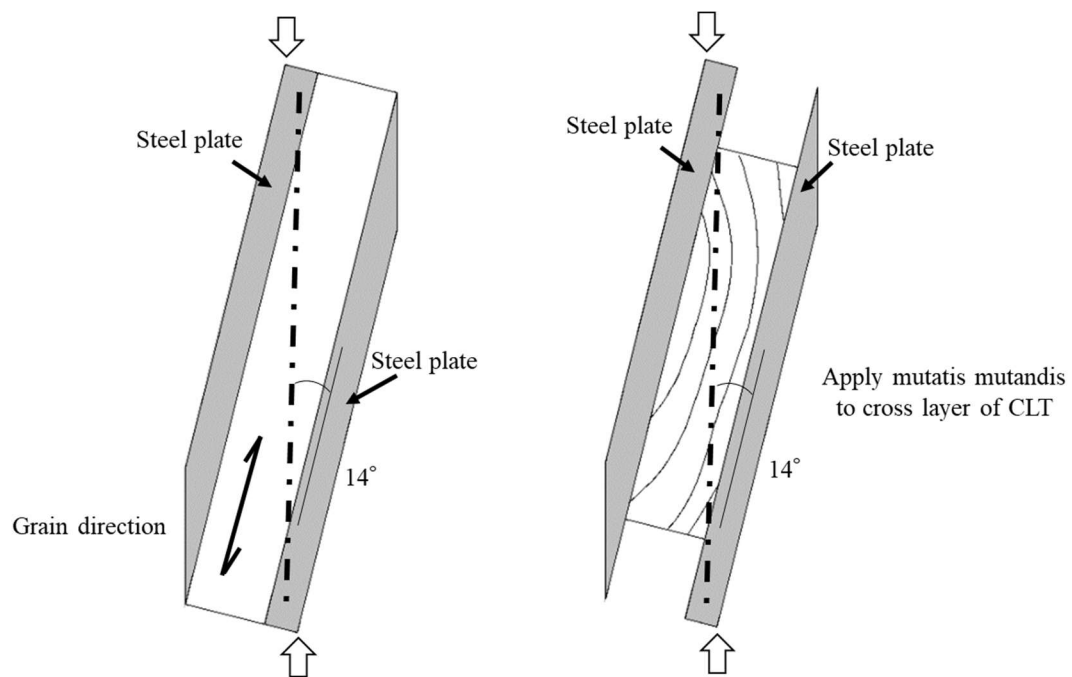
なお、現行の CLT の基準強度（国交省告示 1324 号<sup>20)</sup>）において、ラミナのローリングシア強度の値は樹種別に規定されているが、この値は幅方向のせん断強度を求める際のパラメーターとして引用されるもので、面外せん断強度との関連付けはなされていない。



**Fig. 2.1. Tensile shear test of plywood according to JAS<sup>48)</sup>.**



**Fig. 2.2. Rolling shear test of cross laminated timber according to EN16351<sup>11)</sup>.**



**Fig. 2.3. Shear test of timber according to EN408<sup>54</sup>.**

Note: The left figure shows test for shear strength parallel to the grain (the original method), The right figure shows test for rolling shear strength of laminae (apply mutatis mutandis).

## 2.2 国産主要針葉樹ラミナのローリングシア試験

### 2.2.1 研究の概要

本項では、複数の国産樹種におけるラミナのローリングシア試験について、統一された条件（試験方法、断面寸法、樹種）で実施、比較した例がないことに着目し（2.1）、岡部ら<sup>46)</sup>の考案した圧縮型の試験方法により、断面寸法および木取りを統一したうえで、主要な国産針葉樹材 4 樹種（ヒノキ、カラマツ、スギ、トドマツ）のラミナのローリングシア強度を評価した。

また、ラミナの含水率とローリングシア強度の関係を検証した報告例が見当たらないため、複数の湿度環境下で調湿した試験体を用意することで、含水率がローリングシア強度に与える影響について検証した。

### 2.2.2 試験体および試験方法

#### 2.2.2.1 試験体の製作

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 °C・65%RH の環境下で約 1 ヶ月間養生した。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、ヒノキおよびカラマツが 1.0 MPa、トドマツおよびスギが 0.8 MPa とし、接着剤塗布量は全樹種とも 230 g/m<sup>2</sup>、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<sup>46,65,66)</sup>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<sup>66)</sup>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 ヶ月以上調湿した。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。製作した 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. 2.4 に示す。

### 2.2.2.2 ローリングシア試験

強度試験は、インストロン型強度試験機（株式会社オリエンテック、荷重容量 100 kN）による一方向単調加力により行い、载荷速度は 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. 2.5 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(2.1)にて算出した。

$$\tau_{r-\max} = \frac{P_{\max}}{A} = \frac{P_{\max}}{bh} \quad (2.1)$$

$\tau_{r-\max}$  : ラミナのローリングシア強度 (N/mm<sup>2</sup>),  $P_{\max}$  : 最大荷重 (N),  $A$  : せん断面積 (mm<sup>2</sup>),  $b$  : 試験体幅 (mm),  $h$  : ラミナの幅 (mm)

### 2.2.3 試験結果

Fig. 2.6 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 : 破壊面が年輪を横断して生じる場合、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も破壊に至らなかった場合の 5 つに分類した。Table 2.1 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。また、カラマツでは I の破壊形態も比較的多く示した。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 2.1 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 2.1 に示すローリングシア強度において、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)<sup>68)</sup> 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強度は，高い順にヒノキ，カラマツ，スギ・トドマツとなった。

各条件におけるローリングシア強度の分布を **Fig. 2.7** に示す。**Fig. 2.7** 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. 2.4**)。マッチングした試験体間であっても，ローリングシア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強度は，**Fig. 2.7** で示した値よりも高いと推察されるため，**Table 2.1** 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強度への影響が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および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 **Fig. 2.8** に示す。統計解析ソフト R (version 4.1.0)<sup>68)</sup> 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。

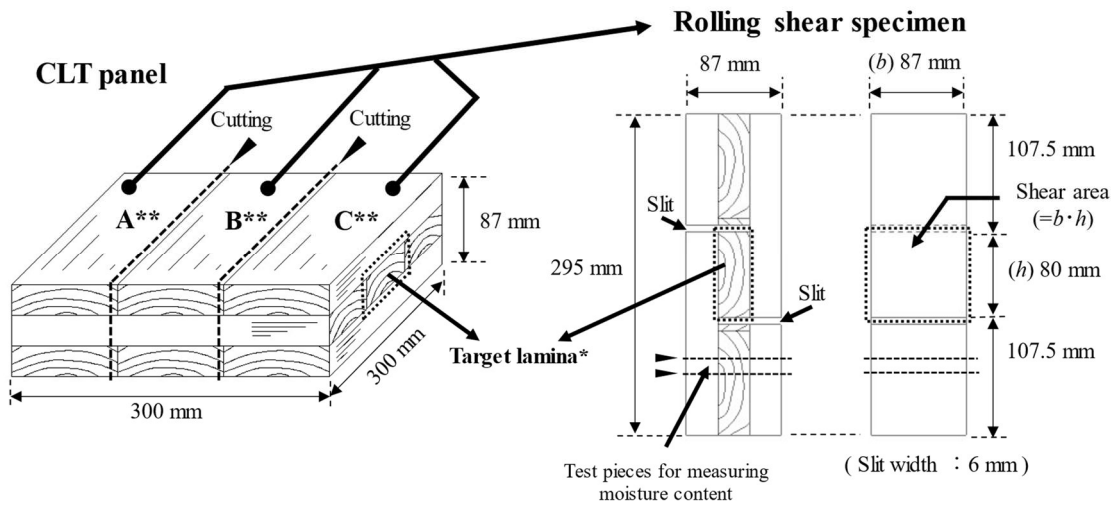
#### 2.2.4 考察

本章におけるローリングシア試験では岡部ら<sup>46)</sup> や中島ら<sup>66)</sup> 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<sup>46,66)</sup>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ー試験を行う際には、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。

気乾密度とローリングシアー強度の関係に着目すると、両者に相関がある樹種（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った（**Fig. 2.8**）。Ehrhart ら<sup>59)</sup>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ー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ー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<sup>69-71)</sup>、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<sup>71-73)</sup>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、ローリングシアー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. 2.6**）、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、本章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ー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% の範囲において、水分条件がラミナのローリングシアー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ー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. 2.7**）。現行の直交集成板の適正製造基準<sup>16)</sup>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、ローリングシアー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。

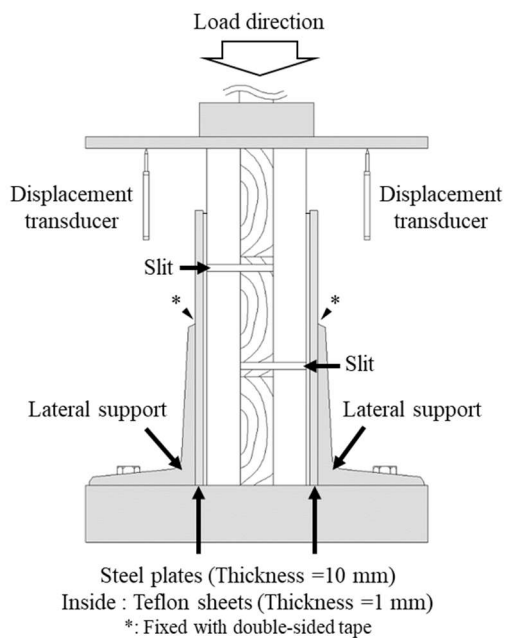


**Fig. 2.4. Dimension of rolling shear specimens.**

Note: \*: The air-dried density of target laminae was determined before gluing the CLT panels.

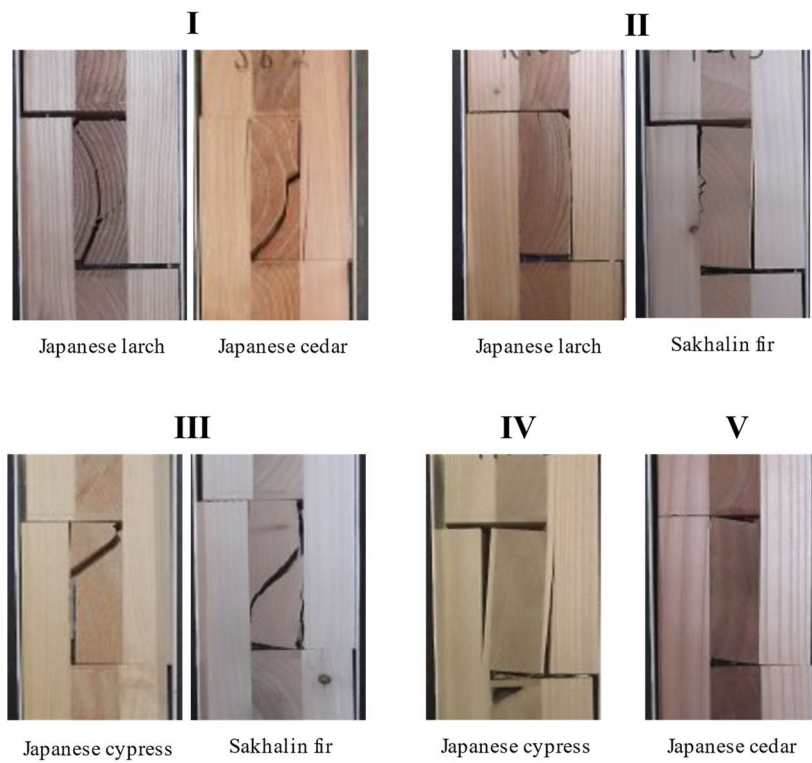
Moisture content of target laminae was conditioned at the 20 °C and 65% RH before lamination.

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



**Fig. 2.5. Set-up for the rolling shear specimen.**





**Fig. 2.6. Examples of failure types of rolling shear specimens.**

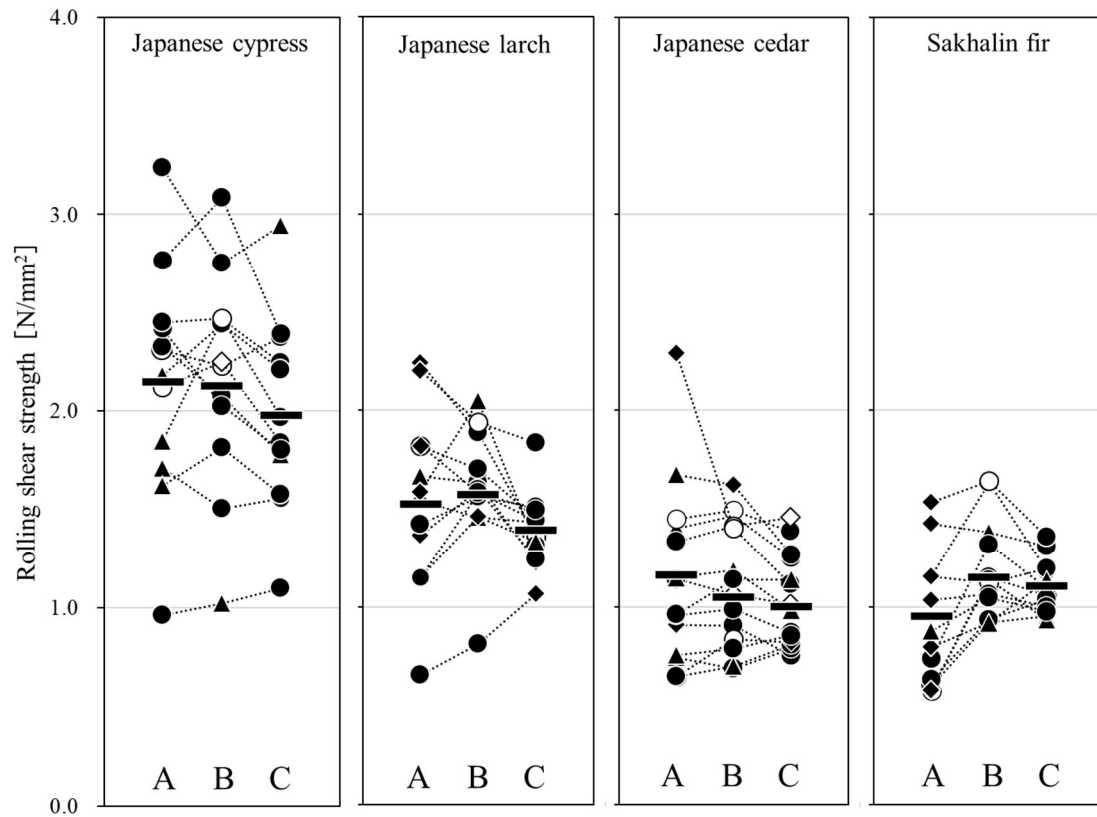
Note: (I) Cracks occurred along growth rings, (II) Cracks occurred along the adhesive layer, (III) Cracks occurred across of growth rings, (IV) Splitting failures occurred at the parallel layers. (V) The failure did not occur (Shear deformation was larger than slit width).

**Table 2.1. Results of rolling shear tests (2.2).**

Species	Air-dried density [kg/m <sup>3</sup> ]			Humidity conditions	Number of specimens	MC [%]		Rolling shear strength* [N/mm <sup>2</sup> ]				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

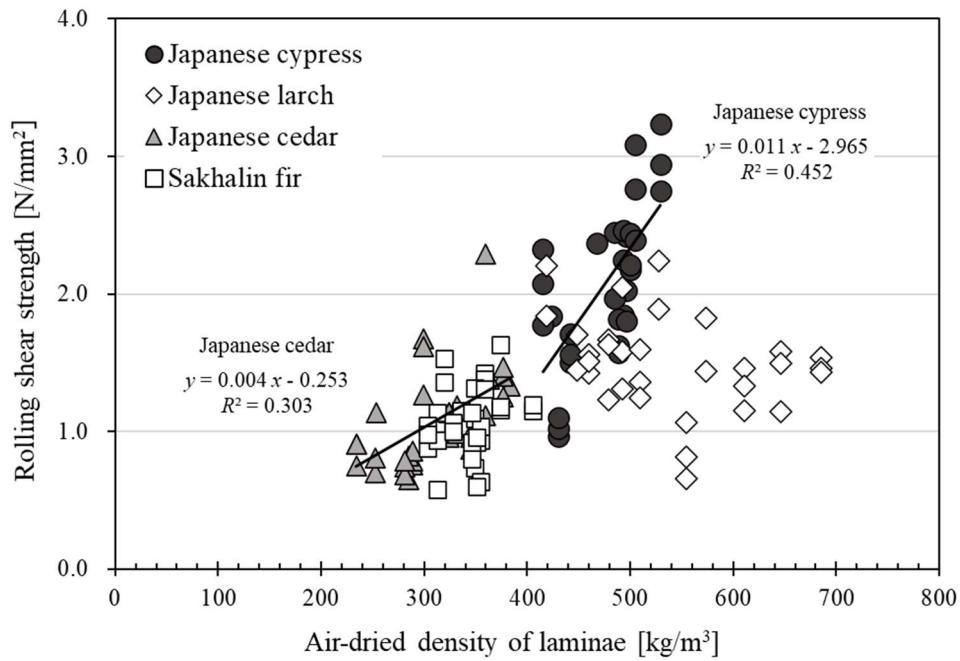
Legend: MC: Moisture content, SD: Standard deviation, A · B · C: See in Fig. 2.4.

Note: \* Mean and standard deviation of shear strength was calculated excluding results with failure type IV and V (See in Fig. 2.6).



**Fig. 2.7. Rolling shear strength on each moisture content.**

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. 2.6), — : Mean ( Calculated excluding failure types IV and V), Dotted line: End-matched specimens.



**Fig. 2.8. Relationships between rolling shear strength and air-dried density.**

Note: In this figure, the specimens with failure type IV and V are excluded. Air-dried density of laminae was measured before bonding CLT.

## 2.3 流通寸法の道産ラミナにおけるローリングシア試験

### 2.3.1 研究の概要

前項(2.2)の研究において、試験対象としたラミナの断面寸法は厚さ 29 mm×幅 80 mm となるが (Fig. 2.4), これは国内で集成材用に流通しているラミナの標準的な仕上がり寸法 (厚さ 30~31 mm, 幅 105 mm もしくは 120 mm) と比較してやや小さい断面寸法である。

2.1 で述べたように、ラミナの断面寸法はローリングシア強度に影響を及ぼしていることが指摘されている<sup>59,60,62-64</sup>。

1章(1.1)で述べたように、林産試験場では2014(平成26)年以降、今後の利用拡大が期待されるカラマツおよびトドマツ CLT の強度データ<sup>30-42</sup>を収集しているが、ここでのデータの多くは公称寸法で厚さ 30 mm×幅 105 mm のラミナを使用した CLT を対象としている。また、本論文の第3章と第4章において実験対象としたカラマツおよびトドマツ CLT も上記寸法のラミナを使用しており、これらのデータとの比較、検討を行うには同寸法のラミナのローリングシア強度を測定する必要がある。

そこで本項では、カラマツおよびトドマツの一般的な断面寸法 (厚さ 30 mm×幅 105 mm) のラミナについて、圧縮型ローリングシア試験によりローリングシア強度を測定した。

### 2.3.2 試験体および試験方法

#### 2.3.2.1 試験体の製作

試験体は市販のカラマツおよびトドマツの3層3プライ CLT パネルより製作した。カラマツ CLT の等級構成は JAS 異等級構成の強度等級 Mx120 (外層 M120B, 内層 M90B), トドマツ CLT の等級構成は Mx90 (外層 M90B, 内層 M60B) であり、接着剤は水性高分子-イソシアネート系接着剤 (API) を使用し、幅はぎ接着はしていない。試験対象のラミナの幅は 105 mm, 厚さは 30 mm であり、これはカラマツおよびトドマツ CLT の面外せん断試験に関する既報<sup>36</sup>や、第3章で使用する CLT のラミナ寸法と同一である。

試験体の製作にあたり、同一の直交層ラミナが複数の試験体に入らないようにした。また、2.2 と異なり、ラミナの木取り条件 (柾目, 追柾目, 心持ちなど) の統一はしていない。

各試験体におけるラミナの年輪接触角について、画像解析ソフト（画像カラスンポ Free）を用いて5度単位で測定した。

### 2.3.2.2 ローリングシアー試験

ローリングシアー試験は 2.2 と同じく、圧縮型せん断試験により行った。ただし、載荷部のモーメントによって平行層が割裂するのを抑制するために、ラテラルサポートの設置の他、試験体の形状について若干の変更を加えた。試験体の寸法形状および試験方法の概略を Fig. 2.9 に示す。

強度試験は、2.2 と同様にインストロン型強度試験機（株式会社オリエンテック、荷重容量 100 kN）による一方向単調加力により行い、載荷速度は 1.0 mm/min とした。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。なお、試験体の調湿は行っていない。

ローリングシアー強度は、2.2 と同様に式 (1.2) によって算出した。

### 2.3.3 試験結果

Fig. 2.10 に破壊形態の例を示す。2.2 の試験結果 (Fig. 2.6) を参考に、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：破壊面が年輪を横断して生じる場合に分類した。得られたローリングシアー強度および各破壊形態の出現数を Table 2.2 に示す。樹種別に、破壊形態に着目すると、カラマツは I～III の破壊形態を大きな偏りなく示したが、トドマツは 2.2 の結果 (Table 2.1) と同様に大半が II の破壊形態を示した。

2.3 で得たローリングシアー強度の平均値は、カラマツで 1.87 N/mm<sup>2</sup>、トドマツは 1.18 N/mm<sup>2</sup> であり (Table 2.1)、これは 2.2 で得られた平均値 (カラマツ：1.40～1.57 N/mm<sup>2</sup>、トドマツ：0.96～1.15 N/mm<sup>2</sup>) と比較してやや高い値であった。

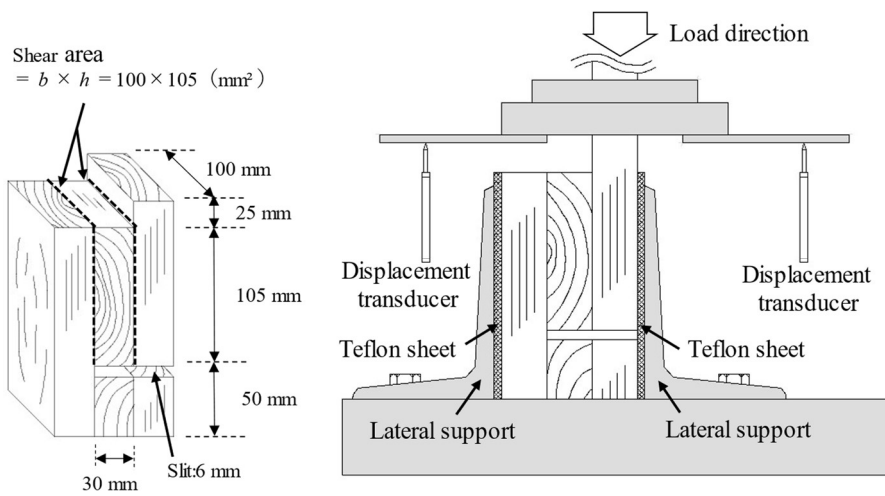
### 2.3.4 考察

既往の研究では、ラミナの厚さが同一の場合、ローリングシアー強度はラミナ幅が広がると増大することが報告されている<sup>59,60</sup>。2.3 および 2.2 で得られた結果は、これらの既報

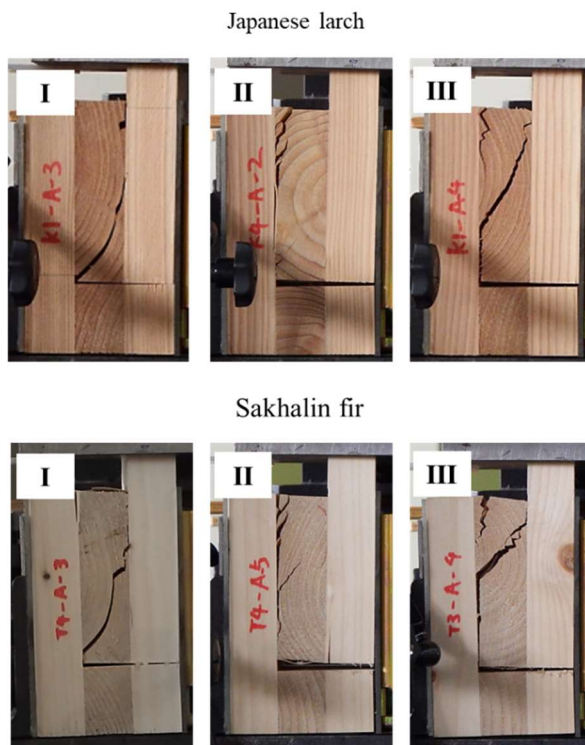
に沿った傾向となったが、カラマツとトドマツの強度比は **2.3** の結果の方がやや大きかった。

年輪接触角とローリングシアー強度の比較を **Fig. 2.11** に示す。岡部ら<sup>46)</sup> や川合ら<sup>65)</sup> は、ラミナの年輪接触角が  $0^\circ$  (柾目) となる場合にローリングシアー強度がわずかに低くなること、Ukyo ら<sup>60)</sup> は、髓に近くなるほど (すなわち、年輪接触角が  $90^\circ$  に近くなり、幅方向の材面が柾目になるほど) ローリングシアー強度が高くなる傾向があることを報告している。本章における結果においても、年輪接触角が  $0^\circ$  に近い試験体は強度がわずかに低くなる傾向がみられた (**Fig. 2.11**)。 **2.3** において試験したラミナは、トドマツの年輪接触角が  $15\sim 50^\circ$  だったのに対し、カラマツでは  $20\sim 90^\circ$  であり、これが **2.2** よりも両樹種の強度比を大きくした可能性として考えられる。

なお、本論文では、第 3 章において、同一の強度等級のカラマツおよびトドマツ CLT (Mx120 および Mx90) の実大材の面外せん断試験を行っている。カラマツおよびトドマツの流通寸法におけるローリングシアー強度と面外せん断強度との比較は第 3 章の考察 (**3.2.5.2**) に記述することとした。



**Fig. 2.9. Set-up for the rolling shear specimen with one slit.**



**Fig. 2.10. Examples of failure types of the rolling shear specimens with one slit.**

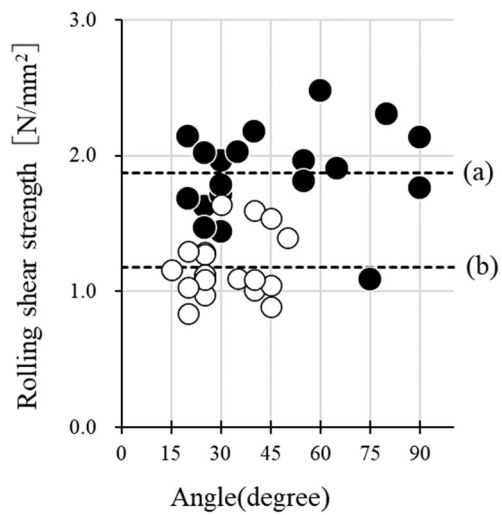
Legend: (I) Cracks occurred along growth rings, (II) Cracks occurred along the adhesive layer, (III) Cracks occurred across of growth rings.



**Table 2.2. Results of rolling shear test using specimens with one slit.**

Species	Air-dried density [kg/m <sup>3</sup> ]		Number of specimens	MC [%]		Rolling shear strength [N/mm <sup>2</sup> ]				Failure type
	Mean	SD		Mean	SD	Max.-Mean-Min.	SD	I / II / III		
Japanese larch	511	20	20	9.3	0.2	2.48	1.87	1.09	0.32	9 / 5 / 6
Sakhalin fir	382	16	20	9.3	0.2	1.64	1.18	0.84	0.22	4 / 14 / 2

Legend: MC: Mean of moisture content.



**Fig. 2.11. Relationships between rolling shear strength and angle of annual rings to cut surface.**

Legend: ●: Japanese larch, ○: Sakhalin fir, Broken line (a): Mean rolling shear strength of Japanese larch, Broken line (b): Mean rolling shear strength of Sakhalin fir

## 2.4 まとめ

本章(2.2)では、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・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。

また、カラマツおよびトドマツについて、市販のCLTより製作した試験体より、流通寸法におけるラミナのローリングシア強度を測定した(2.3)。その結果、強度はラミナ寸法の影響を受けること、心持ちラミナの強度はやや高くなる可能性があることが示され、これはローリングシア強度に関する既報の傾向に沿ったものだった。流通寸法におけるラミナより得られたローリングシア強度は、第3章における実大材の面外せん断試験の結果と比較することとした(3.4)。

### 第3章 カラマツおよびトドマツ CLT の面外せん断強度

#### 3.1 CLT の面外せん断強度に関する既往の研究

実大サイズにおける CLT の面外せん断強度は、構造用集成材等と同様に<sup>45,74)</sup>、ショートスパンでの曲げ試験で求めることが一般的である。EN16351<sup>11)</sup> ではせん断スパンを材せいの3倍とした4点曲げ試験が、JAS3079<sup>17)</sup> では支点間距離（以下、試験スパン）を材せいの5倍（すなわち、せん断スパンを材せいの2.5倍）とした中央集中荷重による曲げ試験（以下、中央集中荷重法）が規定されている。国内の CLT の面外せん断強度に関する報告は JAS3079<sup>17)</sup> による方法が主であり、本州産の樹種を用いた CLT（スギ CLT<sup>27,29,75-81)</sup>、ヒノキ CLT<sup>82,83)</sup>）をはじめ、カラマツ CLT およびトドマツ CLT<sup>30,33,36)</sup> についても複数の報告がある。このほか、木質材料全般の試験に運用されている、構造用木材の強度試験マニュアル（HOWTEC）<sup>84)</sup> では、中央集中荷重法以外に、4等分点5点荷重による曲げ型のせん断試験法、逆対称4点荷重による曲げ型のせん断試験法（以下、逆対称4点荷重法）が示されており、このうち逆対称4点荷重法を用いて CLT のせん断強度試験を実施した例も多い<sup>75,76,79,85)</sup>。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いるが<sup>86-88)</sup>、CLT の面外せん断強度についても、試験方法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 CLT<sup>75,76,79)</sup> やスギ-ヒノキ異樹種 CLT<sup>85)</sup> において報告されている。

なお、JAS3079<sup>17)</sup> による CLT の曲げ試験（試験スパンが材せいの21倍となる3等分点4点荷重法）時において、樹種や層構成によっては曲げ破壊ではなく直交層のローリングシア破壊によるせん断破壊が生じるとの報告がある<sup>30,32,34,89)</sup>。このため、CLT の面外せん断強度の詳細な把握にあたっては、JAS3079<sup>17)</sup> によるせん断試験（試験スパン＝材せいの5倍）よりも長い試験スパン下での検証が必要である。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<sup>90)</sup>、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<sup>91-94)</sup>。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<sup>30,33,36,77,95)</sup>、スパンに着目した研究例は非常に少なく、3層3プライ CLT を用いた報告<sup>96)</sup>と、EN16351<sup>11)</sup>の規定スパンによる曲げとせん断試験の比較例<sup>95)</sup>があるのみである。

また、高梨ら<sup>34)</sup>は、カラマツおよびトドマツ CLT の曲げ強度において、最外層ラミナの引張強度および曲げ強度から、国交省告示 562 号<sup>18)</sup>における算出式を用い概ね推定できることを実験的に確認しているが、面外せん断強度については要素試験（すなわち、ラミナのローリングシアー強度）から強度を推定する方法は確立されておらず、同告示においても実験的に求めた値を参照している。ローリングシアー強度から面外せん断強度の推定を試みた例として、たとえば、岡部ら<sup>46)</sup>がローリングシアー強度と JAS3079<sup>17)</sup>で得られるせん断強度を、Li<sup>49)</sup>らがローリングシアー強度と EN16351<sup>11)</sup>で得られるせん断強度をそれぞれ比較した例などがあるが、規格試験（JAS3079<sup>17)</sup>および EN16351<sup>11)</sup>とは異なる試験方法や試験スパンで得られた値との比較例はない。

## 3.2. カラマツおよびトドマツ CLT の面外せん断試験

### 3.2.1 研究の概要

本稿では、今後の利用拡大が予想されるカラマツおよびトドマツ CLT について、実大材による面外せん断強度試験を行った。CLT は、水平部材（床，屋根）へ使用する際の一般的な層構成である 5 層 5 プライとした。

面外せん断強度に関する既往の研究（3.1）を踏まえ、異なる試験方法と試験スパンを設定し試験を行った。試験方法は、CLT の面外せん断試験において、国内での実績が多い中央集中荷重法および逆対称 4 点荷重法とした。試験スパンは、中央集中荷重法については、JAS3079<sup>17)</sup> に規定されているスパンを含む 6 条件、逆対象 4 点荷重法においては 5 条件を設定した。

また、試験により得られた面外せん断強度を、第 2 章（2.3）におけるカラマツおよびトドマツのローリングシア強度と比較し、両者の関係について検証した。

### 3.2.2 試験体および試験方法

#### 3.2.2.1 試験体の製作

試験体は市販の 5 層 5 プライ CLT パネルより採取した。カラマツ CLT の等級構成は JAS 異等級構成の強度等級 Mx120（外層 M120B，内層 M90B），トドマツ CLT の等級構成は Mx90（外層 M90B，内層 M60B）とした。CLT に使用しているラミナの断面寸法は厚さ 30 mm×幅 105 mm で、第 2 章（2.3）におけるラミナと同一の断面寸法である。縦継ぎ（垂直型フィンガージョイント）および積層に用いた接着剤は水性高分子イソシアネート系接着剤（API）で、ラミナの幅はぎ接着はしていない。試験体の断面寸法は厚さ 150 mm×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。

#### 3.2.2.2 せん断強度試験

面外せん断試験（以下，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. 3.1 に両荷重法の模式図およびモーメント図とせん断力図を示す。

本章では、**Fig. 3.1**における $L_s$ をせん断スパンと定義したが、逆対象4点荷重法におけるせん断スパンについての定義、解釈には注意を要するため、**3.2.2.3**にて補足する。

せん断スパン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）東京衡機製造所製、曲げ容量200kN）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3～4 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<sup>75-79,85,97)</sup>、本章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。

### 3.2.2.3 せん断スパンの定義

逆対称4点荷重法はRC梁の研究において古くより用いられており、その過程でせん断スパンの定義、解釈は変遷しているため、以下に補足する。

逆対称4点荷重法の考案者である、荒川・大野らは、同試験法においてせん断強度が最大かつ一様に分布する区間（**Fig. 3.1**における $L_s$ ）をせん断スパンと定義し、これと梁有効せいとの比、即ちせん断スパン比を用いてせん断強度を推定する実験式を導き出した<sup>98-100)</sup>。この時、荒川は、単純梁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<sup>101)</sup>。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<sup>102,103)</sup>。

本章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（ $L_s=2$

M/Q) をせん断スパンと定義してせん断試験結果の整理およ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た。

### 3.2.2.4 せん断応力度の計算

CLT の面外せん断強度（以下、せん断強度）について、JAS3079<sup>23)</sup> においては均一断面として計算しているが、本章では CLT 告示解説書の CLT パネルの応力度計算方法<sup>104)</sup> に則り、せん断強度の計算を (3.1) 式より行った。

$$\tau = \beta \cdot \frac{Q}{bh} \quad (3.1)$$

$\tau$  : (面外) せん断強度(N/mm<sup>2</sup>),  $\beta$  : 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  $\beta$  は (3.2) 式から求めた。

$$\beta = \frac{bh\{E_i(x_i^2 - x^2) + \sum_{j=i+1}^m E_j(x_i^2 - x_{i-1}^2)\}}{2EI} \quad (3.2)$$

$x$  : 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<sup>46)</sup> を参考にして直交層のヤング率を 0 として行った。**Fig. 3.2** に、CLT 断面内のせん断応力度分布のイメージを示す。計算の結果より、中立軸でのせん断応力度分布係数  $\beta$  は、カラマツ CLT（外層ラミナのヤング率を 12.0 kN/mm<sup>2</sup>, 内層ラミナのヤング率を 6.0 kN/mm<sup>2</sup>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/mm<sup>2</sup>, 内層ラミナのヤング率を 6.0 kN/mm<sup>2</sup>として計算）で 1.267 となった。また、直交層（2層目および4層目）における  $\beta$  はカラマツ CLT で 1.218, トドマツ CLT で 1.216 となった (**Fig. 3.2**)。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、本章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  $\beta$  として採用した。

### 3.2.3 試験結果

各条件におけるせん断試験結果を **Table 3.1** に示す。試験方法やせん断スパン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. 3.3** に、逆対称 4 点荷重法における荷重-変位曲線を **Fig. 3.4** に示す。カラマツ CLT 試験体の破壊例を **Fig. 3.5** に、トドマツ CLT の試験体の破壊例を **Fig. 3.6** 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 (**Fig. 3.5, B**)、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、大半の試験体で、最大荷重時に直交層のローリングシアを伴うせん断破壊を示した (**Fig. 3.5, S**)。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. 3.3**) と破壊時の破壊線の性状から、直交層のローリングシアによるせん断破壊 (以下、せん断破壊) も併行して生じていることが看取された (**Fig. 3.5, SB**)。トドマツ CLT は全せん断スパンにおいてせん断破壊を示した (**Fig. 3.6, S**)。

逆対称 4 点荷重法においては、両樹種ともに全せん断スパンにおいて最大荷重時にせん断破壊を示した (**Fig. 3.5** および **Fig. 3.6, S**)。しかし、荷重-変位曲線 (**Fig. 3.4**) に着目すると、両樹種ともにせん断スパンが 750 mm ( $5h$ ) 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 では破壊線が主に放射方向や年輪界に沿って生じたのに対し (**Fig. 3.5**)、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. 3.6**)。これは、ローリングシア試験の結果 (第 2 章) における傾向と同様であった。



### 3.2.4 考察

#### 3.2.4.1 試験方法の影響

中央集中荷重法によるせん断試験では、製材などにおいて最大荷重時に曲げ破壊を示す例が多いことが知られている<sup>84,105,106</sup>。せん断破壊が生じやすいCLTにおいても、スギおよびヒノキ 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<sup>75,76,81</sup>。本章での検証においても、中央集中荷重法では、カラマツ CLT において一部の試験体で最大荷重時に曲げ破壊を示し、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することが示された。ただし、トドマツ CLT についてはせん断スパンが 750 mm (5h) の時点でもせん断破壊しており、曲げ破壊に移行するスパンは樹種によって異なることが示された。

逆対称 4 点荷重法においては、樹種やせん断スパン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。

#### 3.2.4.2 せん断スパンの影響

**Fig. 3.7** に各試験方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。

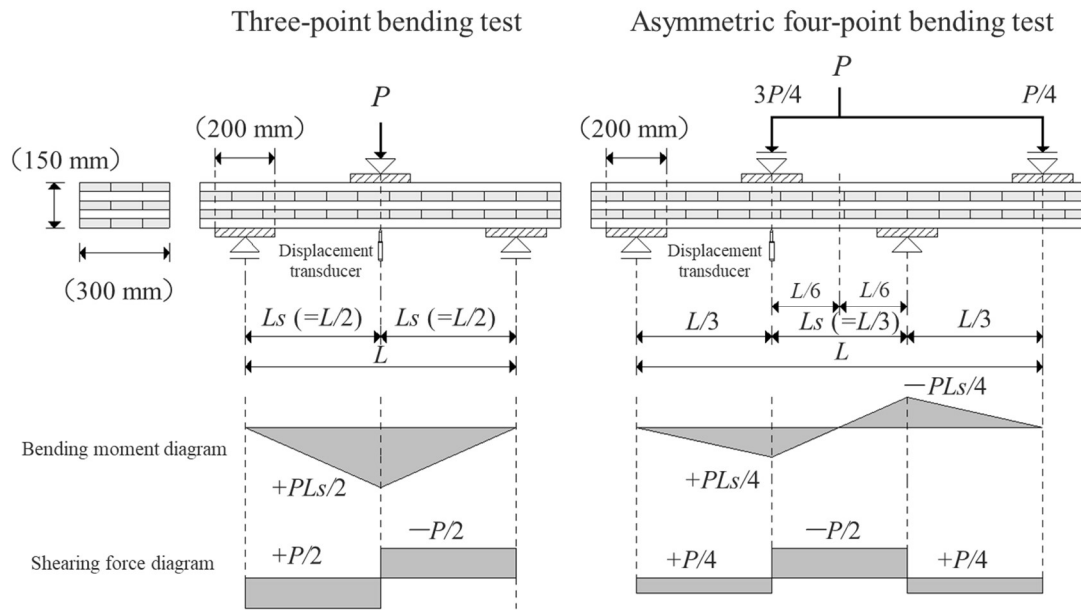
RC 梁の設計に準じて、逆対称 4 点荷重法におけるせん断区間 ( $L_s$ ) を  $M/Q$  とした場合 (**3.2.2.3**)、同一のせん断スパンにおけるせん断強度の値は逆対称 4 点荷重法のほうが低くなり、これは新藤らのスギ CLT における報告と同様となった<sup>75,76,79,97</sup>。ただし、せん断破壊線 (斜めひび割れ) と中立軸の交点が、加力点とモーメントが 0 になる位置との間に生じることを想定している RC 梁とは異なり<sup>103</sup>、CLT の場合は **Fig. 3.5** および **Fig. 3.6** に示すように直交層ラミナのローリングシア破壊が加力点間に一様に生じている。こうした破壊実況に基づき、せん断区間が一様かつ最大に分布するスパンをせん断スパン  $L_s=2M/Q$  として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. 3.1), このことが結果に影響していると考えられる。

Fig. 3.7 の図中に, せん断強度とせん断スパンとの関係を表す実験式を示す。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  $L_s=2.5\sim 4.5h$ , トドマツ CLT が  $L_s=2.5\sim 5h$ , 逆対称 4 点荷重法では両樹種ともに  $L_s=3\sim 5.8h$ ) 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 4.1.0<sup>68)</sup>を用いて非線形最小二乗法により求めた。いずれの試験方法, 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 らは製材および集成材について, 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<sup>92-94)</sup>, 試験方法が異なるものの, 本章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, 両樹種ともにせん断スパンが 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。ここで, 得られた実験式と第 2 章 (2.3) で得られたカラマツおよびトドマツのローリングシア強度 (Table 2.2) を比較すると, ローリングシア強度は実験式の定数項の値と概ね一致した (Fig. 3.7, 破線(a)(b))。すなわち, 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強度に近似する傾向がみられた。このことは, ラミナのローリングシア強度から任意のせん断スパン時のせん断強度が推定できる可能性を示唆している。

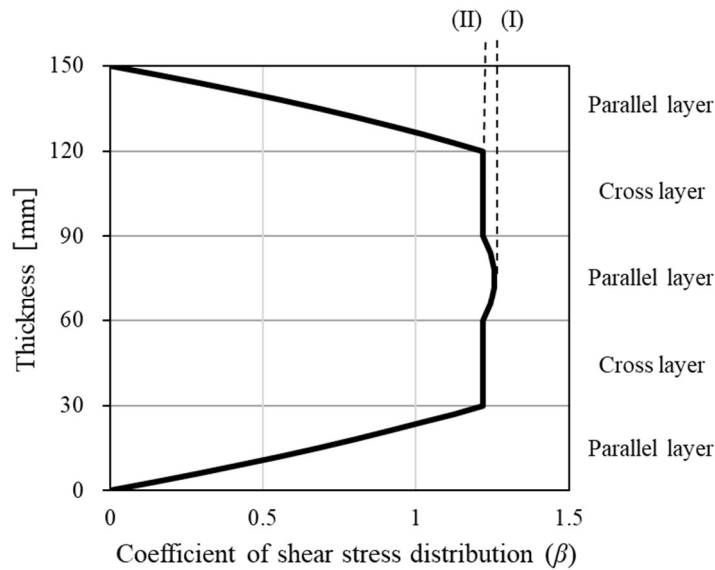
CLT については, 試験体の幅寸法を変えた場合にはせん断強度がさほど低下せず, 顕著な寸法効果はみられないとの報告があり, 林らはせん断スパン内に存在する直交層ラミナの枚数が影響している可能性があるとして指摘している<sup>108)</sup>。この指摘に沿うと, 本章で得られた実験式 (Fig. 3.7) を含む知見は, 試験体幅の影響は大きく受けないものと推測される。ただし, せん断スパンが同一であっても, 層構成が異なればスパン内に含まれるラミナの枚数は異なってくるため, 異なる層構成の CLT については別途の検討が必要である。また,

ラミナを幅はぎ接着した場合，面外せん断強度がやや高くなるとの報告もあるため<sup>81,107)</sup>，  
こうした製造条件にも考慮する必要がある。



**Fig. 3.1. Diagram of out-of-plane shear tests of CLT.**

Legend:  $L$ : Length of specimens,  $P$ : Load,  $L_s$ : Shear span.



**Fig. 3.2. Coefficient of shear stress distribution in 5-layer 5-ply CLT cross section.**

Legend: I: Japanese larch CLT (Mx120) = 1.256, Sakhalin fir CLT (Mx90) = 1.267,

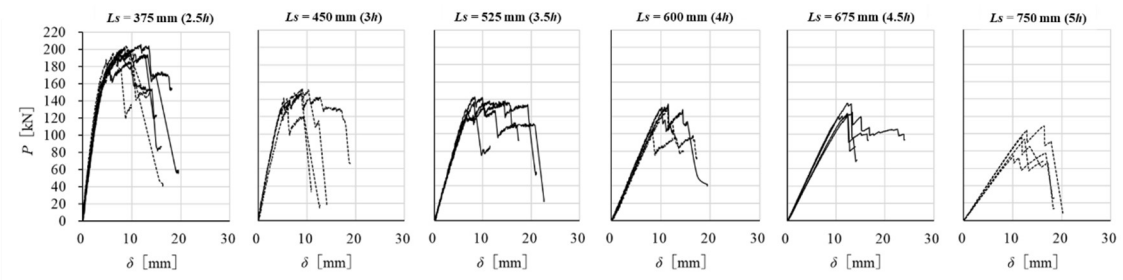
II: Japanese larch CLT (Mx120) = 1.218, Sakhalin fir CLT (Mx90) = 1.216.

**Table 3.1. Results of shear tests of CLT.**

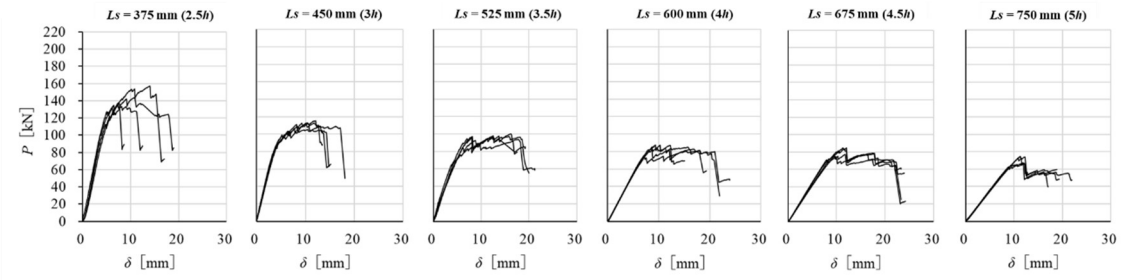
Species	Load method	Shear span [mm]	Number of specimens	Shear strength [N/mm <sup>2</sup> ]			C.V. [%]	Fracture mode S / SB / B
				Max.	Mean	Min.		
Japanese larch (Mx120)  MC: 12.4% Density*: 523 kg/m <sup>3</sup>	Three-point bending	375 (2.5 <i>h</i> )	8	2.87	2.76	2.59	2.9	4 / 4 / 0
		450 (3 <i>h</i>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

Japanese larch CLT



Sakhalin fir CLT

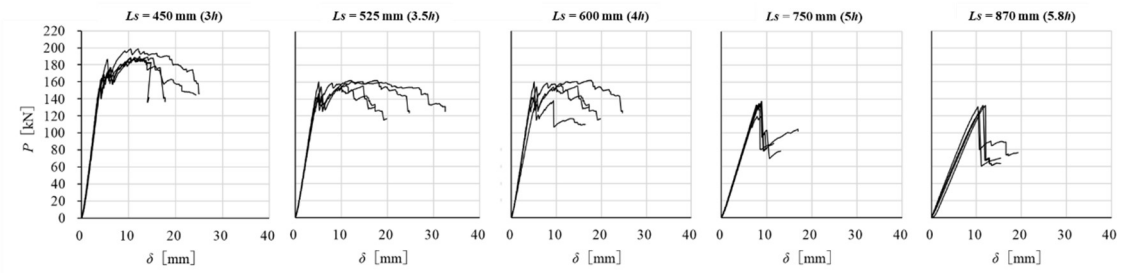


**Fig. 3.3. Load-displacement curves obtained from three-point bending tests.**

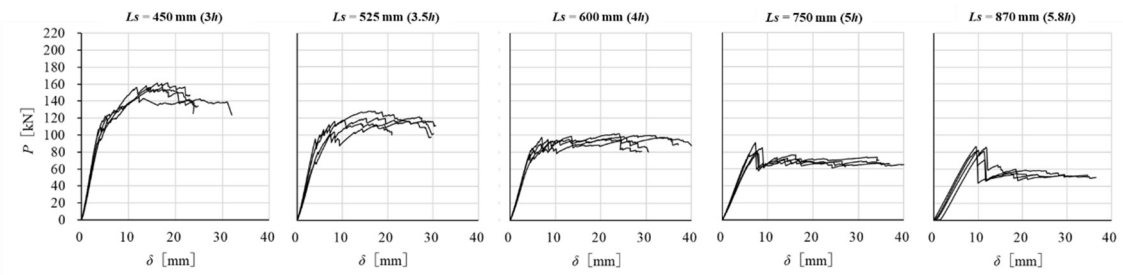
Legend: Dashed line: The specimen showed bending failure at maximum load (Fig. 3.5, SB and B),

$P$ : Maximum load,  $\delta$ : Displacement between fulcrums.

Japanese larch CLT

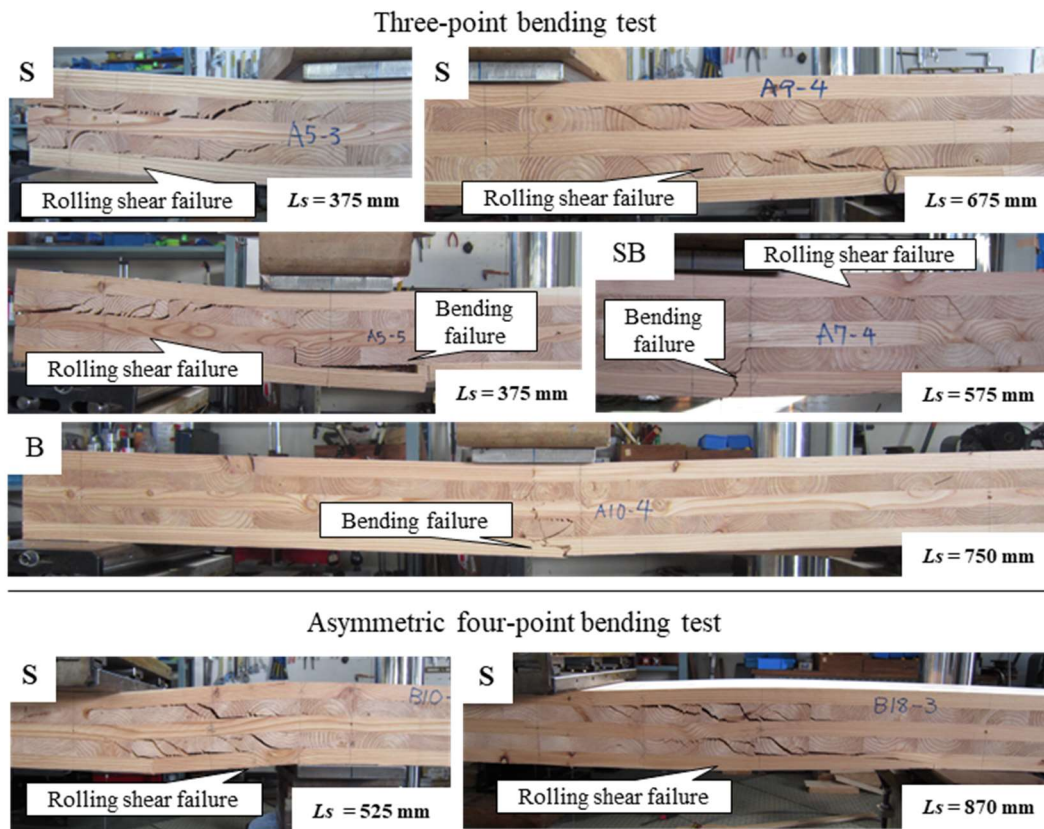


Sakhalin fir CLT



**Fig. 3.4. Load-displacement curves obtained from asymmetric four-point bending tests.**

Legend:  $P$ : Maximum load,  $\delta$ : Displacement between fulcrums.

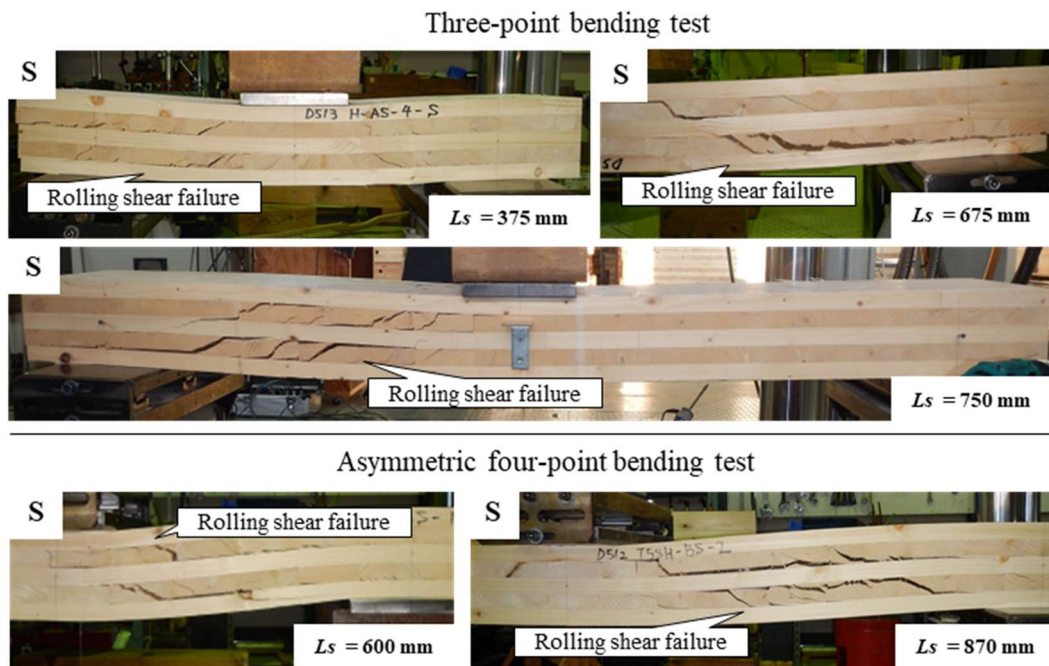


**Fig. 3.5. Examples of fracture of Japanese larch CLT specimens.**

Legend: S: The specimen which showed rolling shear failure, SB: The specimen which showed bending and rolling shear failure, B: The specimen which showed bending failure.

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

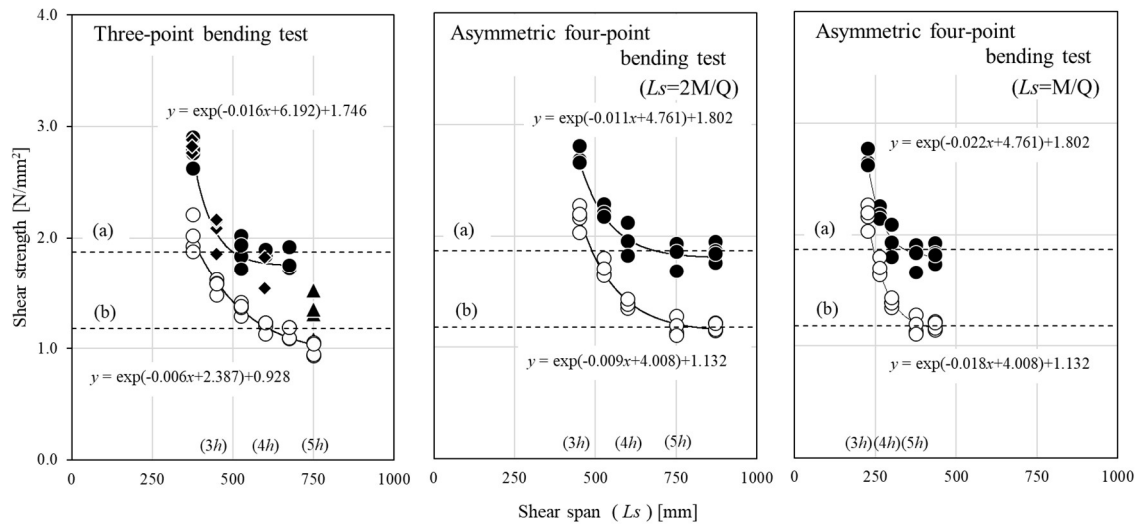




**Fig. 3.6. Examples of fracture of Sakhalin fir CLT specimens.**

Legend: S: The specimen which showed rolling shear failure.

Note: All specimens showed rolling shear failure.



**Fig. 3.7. Relationship between shear strength and shear span.**

Legend: ●: Japanese larch CLT (S\*), ◆: Japanese larch CLT (SB\*), ▲: Japanese larch CLT (B\*), ○: Sakhalin fir CLT (S\*), Broken line (a): The mean rolling shear strength of Japanese larch obtained from compression method (1.87 N/mm<sup>2</sup>, as shown in Table 2.2), Broken line (b): The mean rolling shear strength of Sakhalin fir obtained from compression method (1.18 N/mm<sup>2</sup>, as shown in Table 2.2).

\*: S, SB, B: See in Fig. 3.5 and Fig. 3.6.

### 3.3 まとめ

本章では、カラマツおよびトドマツ CLT について、中央集中荷重法および逆対称 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、せん断スパンを中央集中荷重法において 6 条件、逆対称 4 点荷重法において 5 条件設定し、せん断スパンとせん断強度との関係について検証した。以下に、本章で得られた知見を示す。

- 1) トドマツ CLT のせん断強度は、試験方法およびせん断スパン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せん断スパンで最大荷重時に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せん断スパンにおいて、最大荷重時に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 はせん断スパンが少なくとも 750 mm (5*h*) を超えると曲げ破壊に移行した。一方で、トドマツ CLT は同スパンにおいてもせん断破壊を示し、曲げ破壊に移行するスパンは樹種によって差異があることが示唆された。
- 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 ( $=2M/Q$ ) 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 ともに、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、両樹種ともにせん断スパンが長くなるに伴って、せん断強度は一定値に収束する傾向が示された。

また、せん断スパンが長くなるのに従い収束する値は、第 2 章 (2.3) の圧縮型ローリングシアー試験で得られたラミナのローリングシアー強度と概ね一致した。

現行の CLT の基準強度（国交省告示 1324 号<sup>20)</sup>）において、ラミナのローリングシア強度の値は、幅方向のせん断強度を求める際のパラメーターとして引用されるものの、面外せん断強度との関連付けはなされていない (2.1)。しかし、本章の結果より、ラミナのローリングシア強度から任意のせん断スパン時のせん断強度が推定できる可能性が示唆された。

なお、本章では両者の関係を現した実験式 (Fig.3.7) を示したが、これは 5 層 5 プライで一般的な断面寸法のラミナを使用した CLT を対象としたものであり、断面が大きく異なるラミナや、層構成が異なる場合、またラミナの幅はぎ接着を行った場合については、データの収集および検証が必要である。

## 第4章 促進劣化処理を行ったカラマツおよびトドマツ CLT の面外せん断強度

### 4.1 促進劣化処理を行った CLT の強度に関する既往の研究

#### 4.1.1 既往の研究および建設省告示における接着耐久性の検証方法

CLT は直交層と平行層の収縮方向が異なることから、収縮膨潤時に接着層に大きな負荷が生じると考えられており<sup>109,110)</sup>、屋外・半屋外などの湿度変動環境下における CLT の長期間の使用を想定した場合、接着層の剥離や接着層近傍での割れなどが生じるおそれがある。これらは、実質的な接着面積を減じさせると考えられるため、最外層ラミナの強度に大きく依存する曲げ強度<sup>34)</sup>に比べて、面外および面内せん断強度への影響が大きいと考えられる。また、第2章で示したように、ラミナのローリングシア破壊時には、接着層近傍に破壊線が生じることも少なくないため (Fig. 2.6 および Fig. 2.10)、接着層および接着層近傍への負荷はローリングシア強度の低下を招くおそれがある。

促進劣化処理を行った木質接着材料の強度評価については、指定建築材料の大臣認定基準<sup>23)</sup>である建設省告示 1446 号<sup>22)</sup>における“(木質接着材料の)接着耐久性の検証”において規定がある。建設省告示 1446 号<sup>22)</sup>では、材料の含水率に着目した使用環境(乾燥環境、断続湿潤環境、常時湿潤環境)に応じて促進劣化処理方法(煮沸法、減圧加圧法、加熱冷却法)と処理回数が規定され、処理後の強度残存率が 50%以上となることが求められている。具体的には、乾燥環境の場合は煮沸法および減圧加圧法を 1 回行い得られる数値のうちいずれか小さい方、断続湿潤環境の場合は煮沸法および減圧加圧法を 2 回行い得られる数値のうちいずれか小さい方、常時湿潤環境の場合は加熱冷却法を 6 回行い得られた数値から、強度残存率を求めることとしている。

第1章(1.1)で述べたように、2016(平成28)年に公布された国交省告示 561 号<sup>21)</sup>により、CLT は JAS3079<sup>17)</sup>に適合した製品以外であっても、建設省告示 1446 号<sup>22)</sup>による評価によって、指定建築材料として大臣認定を取得できるようになった。しかし、CLT における建設省告示 1446 号<sup>22)</sup>に則った接着耐久性の検証例は、煮沸法によるカラマツ CLT の

報告<sup>111)</sup>と減圧加圧法による防腐処理 CLT の報告<sup>112)</sup>があるのみで、建設省告示 1446 号<sup>22)</sup>に規定されている全ての使用環境に対応した検証はなされていない。CLT 以外の木質材料においても、建設省告示 1446 号<sup>22)</sup>に則った接着耐久性の検証例は少なく、公表データとしては正角たて継材<sup>113)</sup>と木質 I 形梁<sup>114)</sup>における例があるのみであり、いずれにおいても常時湿潤環境を想定した促進劣化処理（加熱冷却法 6 回）は実施されていない。

#### 4.1.2 建設省告示における接着耐久性および使用環境の定義

##### 4.1.2.1 接着耐久性の解釈

建設省告示 1446 号<sup>22)</sup>における“接着耐久性”の解釈については、JAS3079<sup>17)</sup>など他の国内規格とやや異なるため、以下に補足する。

接着耐久性とは“被着材を接着剤で接着した部分が、暴露された周囲の環境条件あるいは時間経過にともなう劣化に対して耐える程度”のことであり<sup>115)</sup>、接着耐久性の評価試験は一義的に規定されているものではない。

たとえば木材工業ハンドブック<sup>116)</sup>などでは、JAS3079<sup>17)</sup>や集成材の JAS<sup>45)</sup>などの規格で定められている接着性能の評価方法（促進劣化処理による剥離試験および常態におけるブロックせん断試験）のうち、特に剥離試験を指して接着耐久性の試験としているが、一般的には促進劣化後の接着強度の評価をもって、接着耐久性の試験とすることが多い。国内規格であれば合板の JAS<sup>48)</sup>に規定されている引張せん断試験（**Fig. 2.1**）がこれに当たる<sup>117)</sup>。また、集成材の JAS<sup>45)</sup>では、常態でのブロックせん断試験のみが規定されているが、柳川らは促進劣化処理<sup>118,119)</sup>や屋外暴露<sup>119-123)</sup>などを経てからブロックせん断試験による接着強度の評価を行い、接着耐久性の評価としている。

しかし、これらの評価方法があくまで“被着材を接着剤で接着した部分”を試験対象とし、接着剤あるいは接着性能の検証に重きを置いているのに対し、建設省告示 1446 号<sup>22)</sup>における“接着耐久性の検証”では、実大材によって試験を行うことや、強度残存率を曲げ試験によって評価することが記載されている（ただし、告示の解説文献<sup>124)</sup>では、せん断を含めたそれ以外の強度試験による評価も可能としている）。

すなわち、建設省告示 1446 号<sup>22)</sup>における“接着耐久性の検証”は、(結果として)接着部分の耐久性というよりも、接着部分を含めた材料全体の耐久性の評価と捉えた方がよいと考えられる。

#### 4.1.2.2 使用環境の定義

建設省告示 1446 号<sup>22)</sup>における“使用環境”の定義については、JAS3079<sup>17)</sup>や集成材の JAS<sup>45)</sup>など他の国内規格とやや異なるため、以下に補足する。

建設省告示 1446 号<sup>22)</sup>による性能評価では、短期強度試験(曲げ・せん断・圧縮など)と長期荷重試験(クリープや荷重継続時間)のデータのほかに、4.1.1にて概要を記載した、使用環境(乾燥環境、断続湿潤環境(気温 20 °C±2°Cおよび 85%±5%)、常時湿潤環境(気温 20 °C±2°Cおよび 95%±5%))に応じた接着耐久性の検証や、各使用環境および使用状態(断続または常時湿潤環境、事故的水掛かりとなる状態、防腐処理が施される状態)における基準強度の調整係数(低減率)を求めることが規定されている。ここで、建設省告示 1446 号<sup>22)</sup>における使用環境は、いずれも湿度環境(すなわち、材料の含水率)にのみに着目して規定されていることに留意する必要がある。

JAS3079<sup>17)</sup>および集成材の JAS<sup>45)</sup>においても、3つの使用環境(使用環境 A~C)が規定されており、それぞれの環境において使用できる接着剤の種類が規定されているが、これらの使用環境は、含水率のほか、耐候性、耐水性、耐熱性、耐火性についても考慮しており、建設省告示 1446 号<sup>22)</sup>における3つの使用環境と対応していない。

すなわち、建設省告示 1446 号<sup>22)</sup>による性能評価を経て、指定建築材料の大臣認定を取得した場合であっても、同告示内で想定している環境(高い含水率状態(断続および常時湿潤環境)、事故的水掛かり状態、防腐処理状態)以外の環境(例えば、高温となる環境、火災時に高度な接着性能が求められる環境など)における性能は担保されておらず、そのような環境において認定製品の使用を目指す場合、(ラミナ製品の場合は)JAS3079<sup>17)</sup>および集成材の JAS<sup>45)</sup>における使用環境 A(火災時のみ高度な接着性を求める場合は使用環境 B)で使用が認められている接着剤を使用する必要があると考えられる。

## 4.2 促進劣化処理を行ったカラマツおよびトドマツ CLT の面外せん断試験

### 4.2.1 研究の概要

CLT を屋外や半屋外で使用する場合、層ごとに主な収縮膨潤方向が異なるため、長期の使用に当たっては接着層やその近傍に負荷が生じると考えられる。しかしながら、CLT の接着耐久性の検証例は少ない。そこで、本章では複数の圧縮条件で製造した道産カラマツおよびトドマツ CLT の実大試験体について、建設省告示 1446 号<sup>22)</sup> に規定されている全ての促進劣化処理を行い、処理後に面外せん断試験（以下、せん断試験）により強度残存率を求め、接着耐久性の評価を行った。

また、併せて促進劣化処理後の CLT の接着層や直交層ラミナの劣化状況を観察し、これらと面外せん断強度との関係を検証した。

### 4.2.2 試験体および試験方法

#### 4.2.2.1 試験体の製作

せん断試験体は、カラマツおよびトドマツ CLT の接着性能評価を目的とした既報<sup>125,126)</sup>にて製造した圧縮条件の異なる 7 枚の CLT パネルから採取した。ラミナの断面寸法は幅 105 mm×厚さ 30 mm、CLT パネルの層構成は 5 層 5 プライ（厚さ 150 mm）とし、強度等級をカラマツでは Mx120（外層 M120B、内層 M60B）、トドマツでは Mx90（外層 M90B、内層 M60B）とした。接着剤は国内において CLT に汎用的に使用される水性高分子ー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。なお、試験に用いた CLT は JAS3079<sup>17)</sup> に沿った減圧加圧剥離試験の結果、すべての条件で使用環境 C の基準をクリアしている<sup>125,126)</sup>。

試験体の製作にあたり、まず強軸方向に幅 75 mm、長さ 1000～1100 mm の材料を切り出し、切り出した材料の中間部から幅 75 mm×厚さ 150 mm×長さ 930 mm のせん断試験体を採取した。また、促進劣化処理による接着層の剥離を調べるため、せん断試験体を切り出した残りの両端から幅 75 mm×厚さ 150 mm×長さ 75 mm の剥離試験片を採取した。剥離試験片の一方は直交層ラミナに幅はぎ部分が含まれるようにし、もう一方は幅はぎ部分が含ま



れないようにした (Fig. 4.1)。ただし、トドマツ CLT のうち、煮沸法による処理を行った試験体の一部、減圧加圧法 2 回による処理を行った試験体の一部では片端のみから製作した。

製作した試験体の圧縮条件と試験体数を Table 4.1 に示す。

なお、カラマツ CLT は 2015 年 5 月に、トドマツ CLT は同年 7 月に製造し、屋内（温湿度変動環境下）にて保管後、せん断試験体および剥離試験片を 2016 年 4 月から 5 月にかけて製作した。

#### 4.2.2.2 促進劣化処理

促進劣化処理はマッチングしたせん断試験体と剥離試験片に対し同時に行った。促進劣化処理は建設省告示 1446 号<sup>22)</sup> に規定されている (1) 煮沸法, (2) 減圧加圧法, (3) 加熱冷却法に準拠して行った。以下に各処理方法について記載し, Fig. 4.2 に手順を, Fig. 4.3 に劣化処理中の様子を示す。

(1) 煮沸法は, 試験体を, ①沸騰水中において 4 時間浸漬, ②常温水中において 1 時間浸漬, ③処理前重量を下回るまで  $70\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$  で乾燥させる。以上の①~③を 1 サイクルとして 1 回および 2 回行った。乾燥処理 (③) は蒸気式木材乾燥機 (HD74/I-H 型, ヒルデブランド株式会社) にて行い, 処理前重量比で 0.9~1.0 となるまで乾燥させた。

(2) 減圧加圧法は, 試験体を, ①常温水中において 635 mmHg ( $\approx 847\text{ hPa}$ ) で 5 分間減圧, ②常温水中において  $51\pm 2.9\text{ N/cm}^2$  ( $\approx 0.51\text{ MPa}$ ) で 1 時間加圧, ③処理前重量を下回るまで  $70\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$  で乾燥させた。以上の①~③を 1 サイクルとして 1 回および 2 回行った。乾燥処理 (③) は蒸気式木材乾燥機および定温恒温器 (DF810, ヤマト科学株式会社) にて行い, 処理前重量比で 0.9~1.0 となるまで乾燥させた。

煮沸法 (1 サイクルおよび 2 サイクル), 減圧加圧法 (1 サイクルおよび 2 サイクル) とともに, 処理前後にせん断試験体の重量を測定し, 処理前後の重量差を処理前重量で除すことで, 吸水による重量増加率 (以下, 重量増加率) を算出した。

煮沸法および減圧加圧法における乾燥処理 (③) について, 建設省告示 1446 号<sup>22)</sup> では

サイドマッチング用試験体の重量を下回るまで乾燥することと規定しているが、本章においてはサイドマッチングを行っていないため、試験体の重量が処理前重量比 0.9~1.0 となるまで、と読み替えて処理を行った。また、煮沸法および減圧加圧法は JAS3079<sup>17)</sup> に規定されている煮沸剥離試験および減圧加圧剥離試験に類似した処理方法であるが、細部の規定（乾燥処理や減圧加圧の処理回数など）に異なる部分があり、既報<sup>11,12)</sup> の剥離試験における処理と同一ではない。

(3) 加熱冷却法は、試験体を、①49 °C±2 °Cの温水中で1時間浸漬、②93 °C±3 °Cの水蒸気中に3時間静置、③-12 °C±3 °Cの空気中に20時間静置、④99 °C±2 °Cの乾燥空気中に3時間静置、⑤93 °C±3 °Cの水蒸気中に3時間静置、⑥99 °C±2 °Cの乾燥空気中に18時間静置させた。以上の①~⑥を1サイクルとして6回行った。水蒸気中での処理（②および⑤）は乾湿球温度差0 °C、乾燥空気中での処理（④および⑥）は乾湿球温度差47 °C（乾球温度99 °C±2 °C、乾湿球温度差47 °C時の平衡含水率≒1.5%）とした。水蒸気および乾燥空気中での処理は蒸気式木材乾燥機（HD74II型、ヒルデブランド株式会社）により行い、④~⑥の工程はプログラム運転により連続的に行った。せん断試験体の重量を、温水への浸漬処理（①）の前 ( $w_{0,i}$ ,  $i=0\sim6$ )、浸漬処理（①）後 ( $w_{1,i}$ )、1回目の水蒸気中への静置（②）後 ( $w_{2,i}$ )、凍結処理（③）後 ( $w_{3,i}$ ) に測定した。サイクルごとに、 $w_0\sim w_3$ を比較すると  $w_2$  が最も大きかった。そこで、 $w_2$  と  $w_0$  の重量差を  $w_0$  で除し、各サイクルにおける重量増加率とした。

なお、せん断試験体については、無処理試験体（コントロール）を用意した。促進劣化処理後のせん断試験体およびコントロールは、20 °C・65%RH で2ヶ月以上調湿し、恒量に達したことを確認した後、せん断試験を行った。

#### 4.2.2.3 剥離試験

剥離試験片について、各劣化処理の実施後に、接着層の剥離長さを計測し、全接着層の長さに対する百分率を算出し、剥離率とした。剥離長さの測定は、JAS3079<sup>17)</sup> の評価方法を参考に、接着層自体の剥離（界面近傍での剥離および接着剤の凝集破壊により剥離した

部分)を評価の対象とし、すき間が 0.05 mm 未満で剥離長さが 3 mm 未満のものは除外した。多くの試験片で、接着層界面のごく浅い部分での木部破断(以下、界面木破)が認められた。剥離した部分はノミで割り開き(ナイフテスト)、木部破断の有無を観察し、剥離と界面木破を判別し、界面木破は剥離とみなさなかった。**Fig. 4.4**に両樹種における剥離(**Fig. 4.4** (a), (c), (e), Delamination)および界面木破(**Fig. 4.4** (b), (c), (d), (f), Shallow wood failure)の例を示す。**Fig. 4.4** (a)~(d)はマイクロスコープ(Dino-Lite AM4113, ANMO社)、(e), (f)は走査型電子顕微鏡(SEM)(JSM-6510LA, 日本電子株式会社, 加速電圧 10 kV)によって撮影したものである。

なお、本章における界面木破のような現象は、CLTの剥離試験における既往の研究においても報告されており<sup>127-129)</sup>、宮本らはこれを疑似剥離と呼称している<sup>129)</sup>。ただし、文献<sup>130)</sup>によっては疑似剥離の定義に若干の相違があるため、本章では界面木破と呼称した。

#### 4.2.2.4 せん断試験体の観察

促進劣化処理後のせん断試験体の例を**Fig. 4.5**に示す。促進劣化処理を施したせん断試験体では、木材の膨潤収縮に伴い、剥離と界面木破(**Fig. 4.5**, DS)の他に、接着層近傍に接着層と平行した木部の割れが生じた(**Fig. 4.5**, WF)。ここで、WFは、界面木破と異なり、ナイフテストを用いなくても、目視にて木部破段を確認できる割れを対象としている。

せん断試験体の観察においては、接着層の剥離と界面木破(**Fig. 4.5**, DS)、接着層近傍に接着層と平行に生じた木部の割れ(**Fig. 4.5**, WF)を合わせて、接着層・木部破断と称する。促進劣化処理を施した試験体を対象に、せん断試験体の全側面の4つの接着層について、接着層・木部破断の長さを計測し、全接着層の長さに対する百分率を算出し、接着層・木部破断の発生率とした。直交層ラミナの放射割れ(**Fig. 4.5**, CR)は実質的な接着面積の減少には寄与しないと考えられるため、本章では計測の対象とせず、写真による記録にとどめた。なお、接着層・木部破断の計測はせん断試験の直前(20℃・65%RHでの調湿後)に行った。

#### 4.2.2.5 せん断強度試験

せん断試験は JAS3079<sup>17)</sup> を参考に中央集中荷重法によって行い、支点間距離を  $5h$  (= 750 mm) とし、加圧板の長さは 150 mm、支点の長さは 130 mm とした。加力は、インストロン型強度試験機 (TENSION RTD2410, 株式会社オリエンテック, ロードセル容量 100 kN) を用いて行い、加力ヘッドの移動速度は 3 mm/min とした。

せん断強さは JAS3079<sup>17)</sup> に則り、以下の式(4.1)から求めた。

$$\tau = \frac{3P_{\max}}{4bh} \quad (4.1)$$

ここで、 $\tau$ : せん断強さ、 $P_{\max}$ : 最大荷重、 $b$ : 材幅、 $h$ : 材せい、とする。なお、せん断以外のモードで破壊した試験体でも式(1)より破壊時せん断応力を求めて集計した。

せん断強度の強度残存率は建設省告示 1446 号<sup>22)</sup> に則り、以下の式(4.2)から求めた。

$$R = \frac{\tau_{t,av}}{\tau_{c,av}} \quad (4.2)$$

ここで、 $R$ : 強度残存率、 $\tau_{t,av}$ : 促進劣化処理後のせん断強さの平均値、 $\tau_{c,av}$ : コントロールのせん断強さの平均値とする。

### 4.2.3 結果

#### 4.2.3.1 剝離試験およびせん断試験体の観察結果

各処理条件における剝離率の平均値を Fig. 4.6 に示す。なお、剝離試験片は幅はぎを含む試験片と含まない試験片を用意したが (Fig. 4.1)、剝離率の高低に明確な傾向がみられなかったため、両者の平均値を示した。

煮沸法および減圧加圧法ともに、サイクル数の違いによる顕著な剝離率の差はみられなかった。また、これらより得られた剝離率の値は、JAS3079<sup>17)</sup> に規定されている減圧加圧剝離試験で得られた値と同程度であった<sup>125,126)</sup>。加熱冷却法であっても剝離率は 5% 以下であり、いずれの樹種および処理方法においても、剝離率は低い水準であった。

促進劣化処理を行ったせん断試験体における試験前の接着層・木部破断の発生率を Fig. 4.7 に示す。加熱冷却法を 6 回行った場合、剝離率が低水準であっても (Fig. 4.6)、接着層近傍の木部の劣化が大きく進むことが示された。

試験直前における直交層ラミナの放射割れの状況を **Fig. 4.8** に示す。煮沸法、減圧加圧法とも、サイクル数の増加に伴い直交層ラミナの放射割れは増加する傾向がみられた。加熱冷却法を 6 回行った試験体においては、著しい割れの増加がみられた。

#### 4.2.3.2 せん断試験結果

せん断試験体の破壊例を **Fig. 4.9** に示す。いずれの条件においても、第 3 章での結果と同様に、試験体の破壊形態は直交層のローリングシアーによるせん断破壊が支配的であり、せん断破壊線は直交層ラミナの斜め方向（放射方向および接線方向）と、接着層に沿って生じた。促進劣化処理によって破壊形態が大きく変化する傾向はみられなかった。一部の試験体で、最大荷重時に曲げ破壊を示したが、直交層のせん断破壊が生じる前に曲げ破壊を示す試験体はみられなかった。

せん断試験の結果を **Table 4.2** および **Table 4.3** に示す。コントロールにおけるトドマツのせん断強度はカラマツの 7 割程度であり、これは第 3 章で得られた結果と同様であった。樹種ごとに全ての圧縮条件と処理条件（7×6 条件=42 条件）を対象として、統計解析ソフトウェア R version 4.1.0<sup>68)</sup>を用いた二元配置分散分析を行った。その結果、圧縮条件と処理条件の交互作用はなかった。また、Tukey-Kramer 検定では両樹種ともに圧縮条件による有意差はみられなかった ( $p > 0.05$ )。

#### 4.2.4 考察

##### 4.2.4.1 告示による接着耐久性の評価

結果より、圧縮条件間での有意差がみられなかったため (**4.2.3.2**)、強度残存率は全ての圧縮条件の試験体の平均値から求めた。各樹種における強度残存率を **Fig. 4.10** に示す。カラマツにおける強度残存率は、煮沸法、減圧加圧法、加熱冷却法の順に小さい値となった。また、煮沸法および減圧加圧法ともに、処理回数の増加に伴い強度残存率は低くなった。トドマツにおける強度残存率は、煮沸法と減圧加圧法で大差はなく、処理回数の増加に伴う強度の減少幅はカラマツより小さかった。

建設省告示 1446 号<sup>22)</sup> の接着耐久性の評価法に従って、樹種別に各使用環境における強

度残存率を求めると、乾燥環境（煮沸法および減圧加圧法を 1 回行い得られる数値のうちいずれか小さい方）ではカラマツが 84%、トドマツが 83%、断続湿潤環境（煮沸法および減圧加圧法を 2 回行い得られる数値のうちいずれか小さい方）ではカラマツが 77%、トドマツが 80%、常時湿潤環境（加熱冷却法を 6 回行い得られた数値）では、カラマツが 64%、トドマツが 62%となった。建設省告示 1446 号<sup>22)</sup>の評価基準上では、樹種による強度残存率の差異はほぼみられなかった。また、建設省告示 1446 号<sup>22)</sup>の接着耐久性の評価基準では強度残存率が 50%以上であることが求められており、本章で用いた CLT は両樹種ともに各使用環境における建設省告示 1446 号<sup>22)</sup>の要求を満たすことが明らかとなった。

#### 4.2.4.2 劣化処理方法の比較

Fig. 4.11 に、煮沸法および減圧加圧法による処理を行った際のせん断試験体の重量増加率を示す。両処理方法ともに、サイクル数の増加に伴い重量増加率が大きくなる傾向がみられた。また、煮沸法よりも減圧加圧法の方が試験体の重量増加率が大きく、せん断試験における強度の低減は、煮沸法よりも減圧加圧法の方がやや大きい傾向にあった (Fig. 4.10)。これらの傾向より、促進劣化処理時の吸水はせん断強度の低減に影響を与えている可能性がある。

Fig. 4.12 に、加熱冷却法を行った際のせん断試験体の平均重量の変化と、処理中の重量増加率を示す。加熱冷却法においても、煮沸法および減圧加圧法と同様に、処理回数の増加に伴って、吸水による重量増加率が大きくなる傾向が看取された。ただし、加熱冷却法による処理では、両樹種ともに他の方法に比べてせん断強度が大きく低下したものの (Fig. 4.10)、各サイクルにおける重量増加率は 3~10%程度であり、これは煮沸法および減圧加圧法における重量増加率よりも低い水準であった (Fig. 4.11)。煮沸法および減圧加圧法は吸水と乾燥による膨潤収縮を生じさせるが、乾燥後の試験体は概ね初期重量に戻される。対して、加熱冷却法では、極端な低湿度環境下（平衡含水率≒1.5%）で長時間乾燥させることにより大きな収縮負荷をかけるプロセスと、凍結融解作用によって負荷をかけるプロセスが含まれている。過乾燥環境に暴露した CLT は接着性能が低下するとの報告<sup>13)</sup>や、

凍結融解作用による集成材の強度低下が報告<sup>132)</sup>されており、吸水による膨潤以外にも、こうしたプロセスが接着層や木部の劣化を進めた要因であると考えられる。

なお、本章ではせん断試験体の幅を、JAS3079<sup>17)</sup>に定められている300 mmではなく、剝離試験片に合わせて75 mmとしたが、試験体のサイズが大きい場合には、促進劣化処理時の強度低下がやや緩和される可能性もある<sup>111)</sup>。また、層構成によっても各促進劣化処理方法が接着層に与える影響は異なるものと考えられる。促進劣化処理による影響が、サイズおよび層構成の違いによってどのように関連するのか、さらなるデータの収集と検証が必要であると考えられる。

#### 4.2.4.3 剝離試験と強度残存率の比較

剝離試験片より得られた剝離率 (**Fig. 4.6**) と比較して、せん断試験体における接着層・木部破断 (**Fig. 4.7**) の発生率は大幅に高かった。剝離試験片とせん断試験体とでは寸法が異なるため直接の比較はできないが、このことは、接着性能が良好であっても、促進劣化による収縮膨潤により接着層近傍の木部が劣化することを示している。**Fig. 4.13** にせん断強度と接着層・木部破断の発生率の関係を示す。両樹種とも、接着層・木部破断の発生率が高い試験体は、せん断強度が低くなる傾向がみられた。これらは実質的な接着面積を減少させているほか、破壊線に沿って生じていることから (**Fig. 4.9**)、せん断強度を低下させる一因になっていると考えられる。

ただし、接着層・木部破断が顕著にみられない試験体においても、劣化処理を行った試験体のせん断強度がコントロールの平均値を上回る例はほとんどみられなかった (**Fig. 4.13**)。促進劣化処理により、接着層・木部破断のほかに直交層ラミナの放射割れの増加がみられた (**Fig. 4.8**)。せん断破壊線は接着層の近傍以外にも生じていることから (**Fig. 4.9**)、これらの割れがせん断破壊、すなわち直交層ラミナのローリングシア破壊を生じさせやすくしているとも考えられる。

以上より、接着層自体の剝離よりも接着層近傍の木部破断および直交層ラミナの割れといった木部の劣化が、面外せん断強度の低下に影響を与えている可能性が示唆された。

なお、本章では放射割れについて定量的な評価を行っていないほか、接着層・木部破断の深さも計測していないため、実質的な接着面積がどの程度減少しているのかは不明である。また、コントロールについても、CLT は製造から試験体製作までに温湿度変動環境下（4.2.2.1）に保管されていたため、この間に多少の割れが生じていた可能性がある。木部の劣化状況と強度低下との関係については、詳細な検証が必要である。

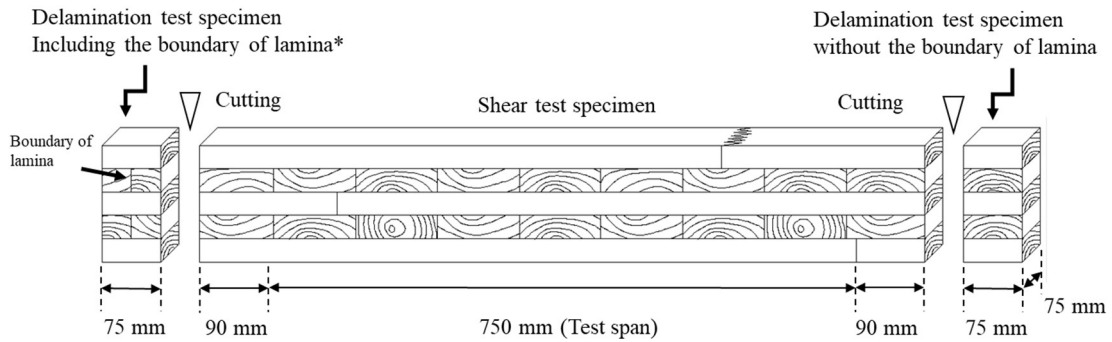


**Table 4.1. Adhesive conditions and number of specimens.**

Species [JAS grade]	Adhesion Conditions		Control N <sub>S</sub> <sup>2)</sup>	Methods of accelerated deterioration treatment <sup>1)</sup>				
	Pressing pressure [N/mm <sup>2</sup> ] / Pressing time [min.]			Boiling [1 cycle] N <sub>S</sub> / N <sub>D</sub> <sup>2)</sup>	Boiling [2 cycle] N <sub>S</sub> / N <sub>D</sub>	V. and P. [1 cycle] N <sub>S</sub> / N <sub>D</sub>	V. and P. [2 cycle] N <sub>S</sub> / N <sub>D</sub>	S. and F. [6 cycle] N <sub>S</sub> / N <sub>D</sub>
Japanese larch [Mx120]	0.7 / 40		3	3 / 6	3 / 6	3 / 6	3 / 6	3 / 6
	0.7 / 60		3	3 / 6	3 / 6	3 / 6	3 / 6	3 / 6
	0.8 / 60		3	3 / 6	3 / 6	3 / 6	3 / 6	3 / 6
	0.9 / 40		3	3 / 6	3 / 6	3 / 6	3 / 6	3 / 6
	0.9 / 60		3	3 / 6	3 / 6	3 / 6	3 / 6	3 / 6
	1.0 / 40		3	3 / 6	3 / 6	3 / 6	3 / 6	3 / 6
	1.0 / 60		3	3 / 6	3 / 6	3 / 6	3 / 6	3 / 6
Sakhalin fir [Mx90]	0.5 / 40		4	4 / 8	4 / 7	4 / 8	4 / 7	4 / 8
	0.6 / 40		4	4 / 7	4 / 7	4 / 8	4 / 7	4 / 8
	0.7 / 30		4	4 / 8	4 / 7	4 / 8	4 / 7	4 / 8
	0.7 / 40		4	4 / 8	4 / 7	4 / 8	4 / 7	4 / 8
	0.8 / 30		4	4 / 8	4 / 7	4 / 8	4 / 7	4 / 8
	0.8 / 40		4	4 / 8	4 / 7	4 / 8	4 / 7	4 / 8
	0.9 / 40		4	4 / 8	4 / 7	4 / 8	4 / 7	4 / 8

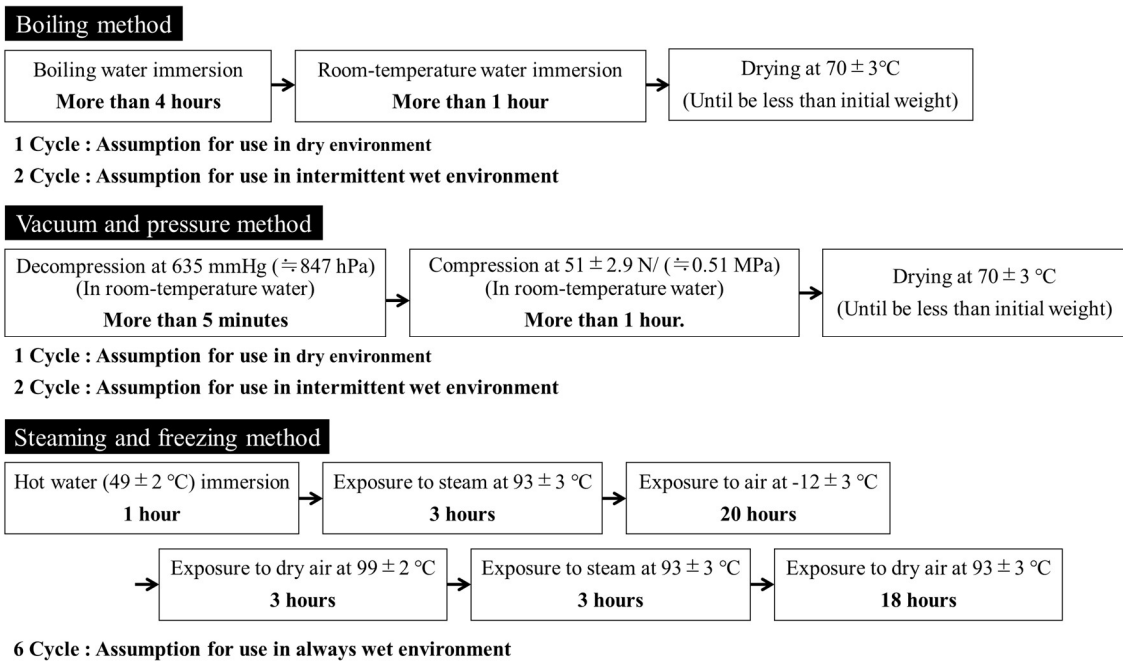
Legend for <sup>1)</sup>: V. and P., vacuum and pressure method; S. and F., steaming and freezing method.

Legend for <sup>2)</sup>: N<sub>S</sub>, number of specimens for shear test; N<sub>D</sub>, number of specimens for delamination test.

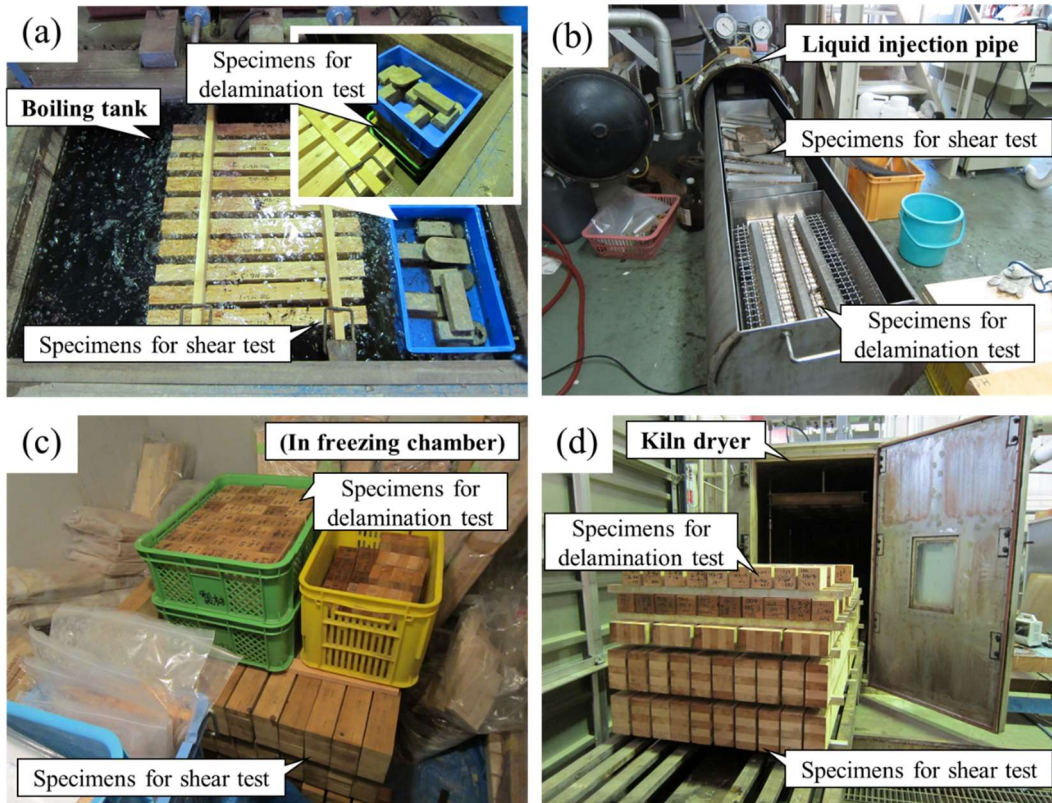


**Fig. 4.1. Dimensions of shear and delamination test specimens.**

Note: \* Some delamination test specimens were omitted (See Table 4.1).

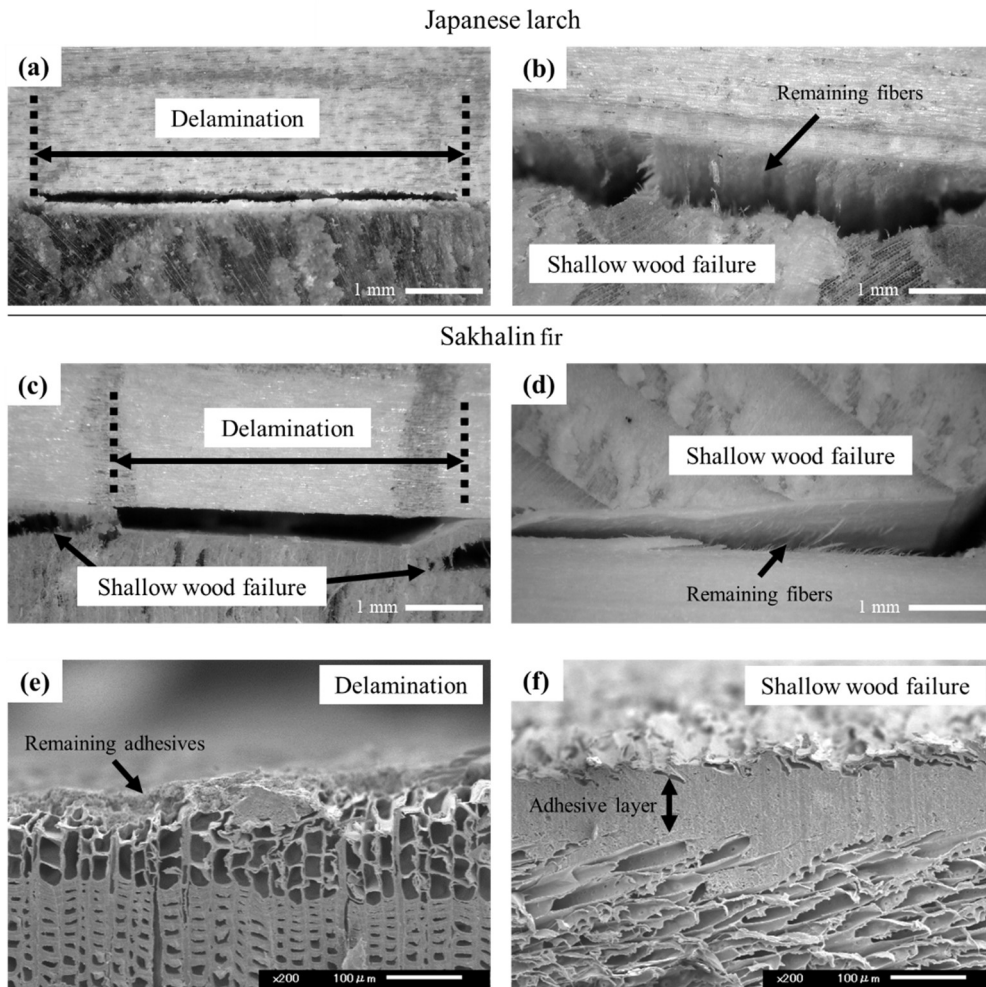


**Fig. 4.2. Accelerated aging test according to The Notification No.1446 of The Ministry of Construction<sup>22)</sup>.**



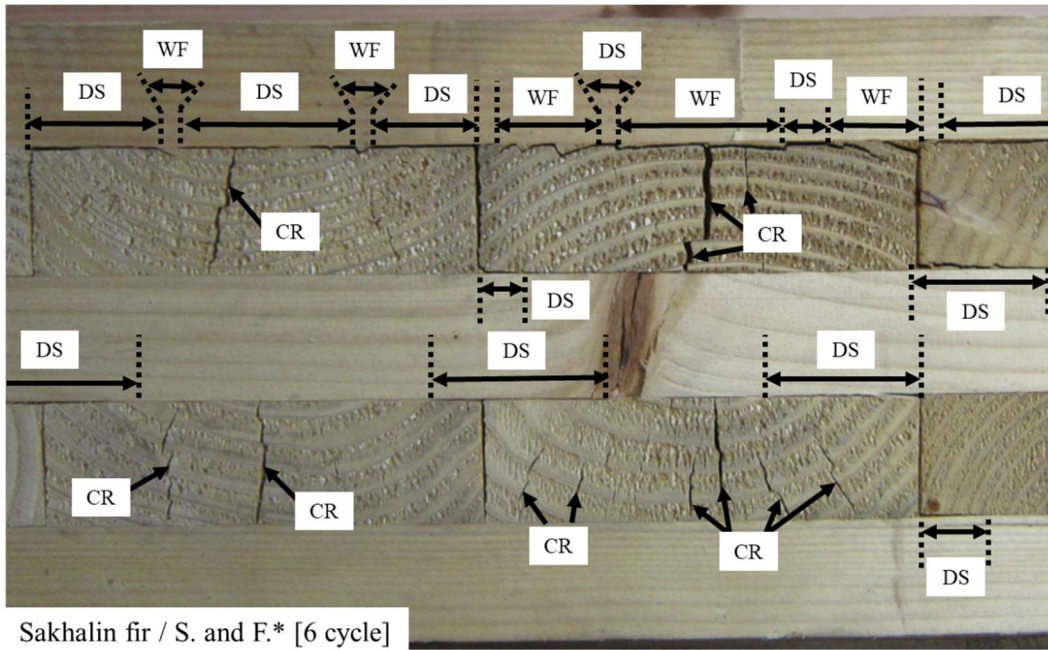
**Fig. 4.3. Accelerated aging treatments.**

Legend: (a): Immersion in boiling water, (b): Decompression and compression, (c): Exposure in cold air at below freezing, (d): Exposure in steam or dry air.



**Fig. 4.4. Delamination and shallow wood failure.**

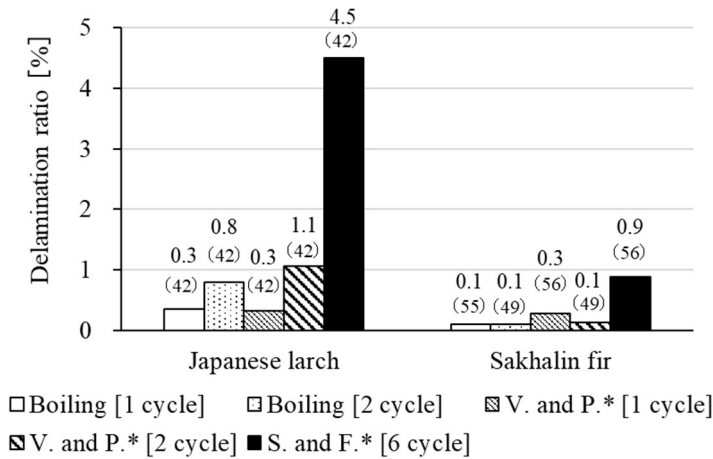
Legend: (a)~(d): Microscope images, (e) and (f): SEM images.



**Fig. 4.5. Example of side view of the shear test specimen after accelerated aging treatments.**

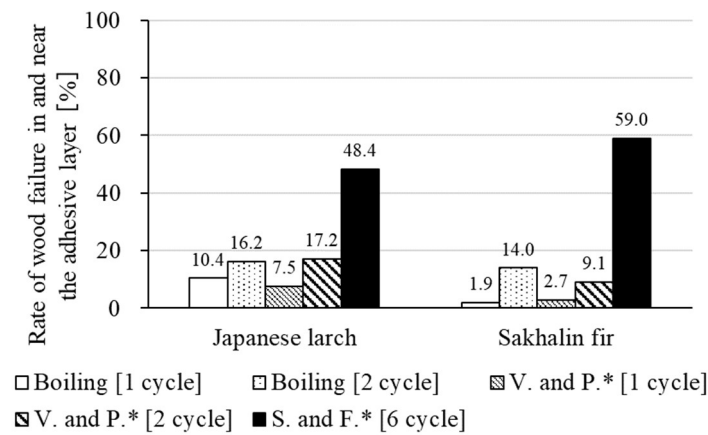
Legend: WF: Wood failure near the adhesive layer, DS: Delamination (according to JAS3079<sup>17)</sup>) and shallow wood failure, CR: Radial check.

Note: \*: Abbreviations are defined in Table 4.1.



**Fig. 4.6. Delamination ratio of delamination test specimens.**

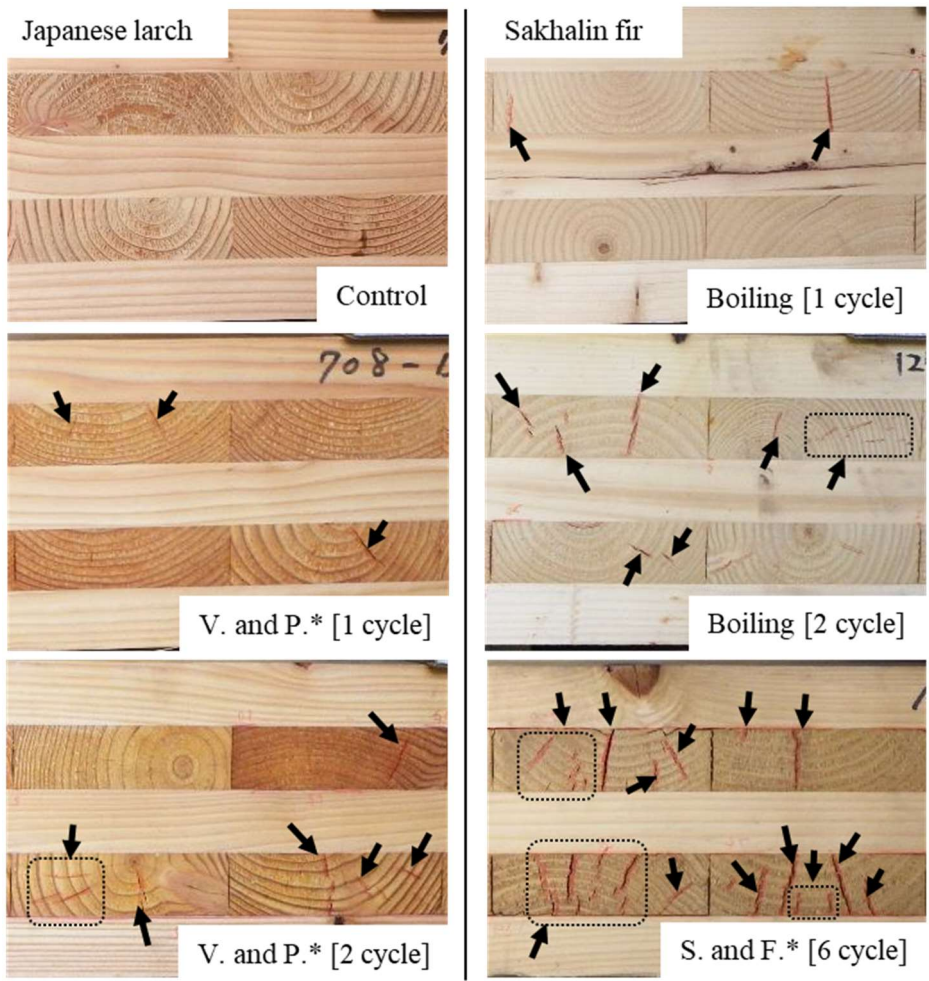
Note: The numbers in the figure are the mean delamination rate. Numerals in the parentheses indicate the number of specimens. \*: Abbreviations are defined in Table 4.1.



**Fig. 4.7. Rate of wood failure in and near the adhesive layer of shear test specimens.**

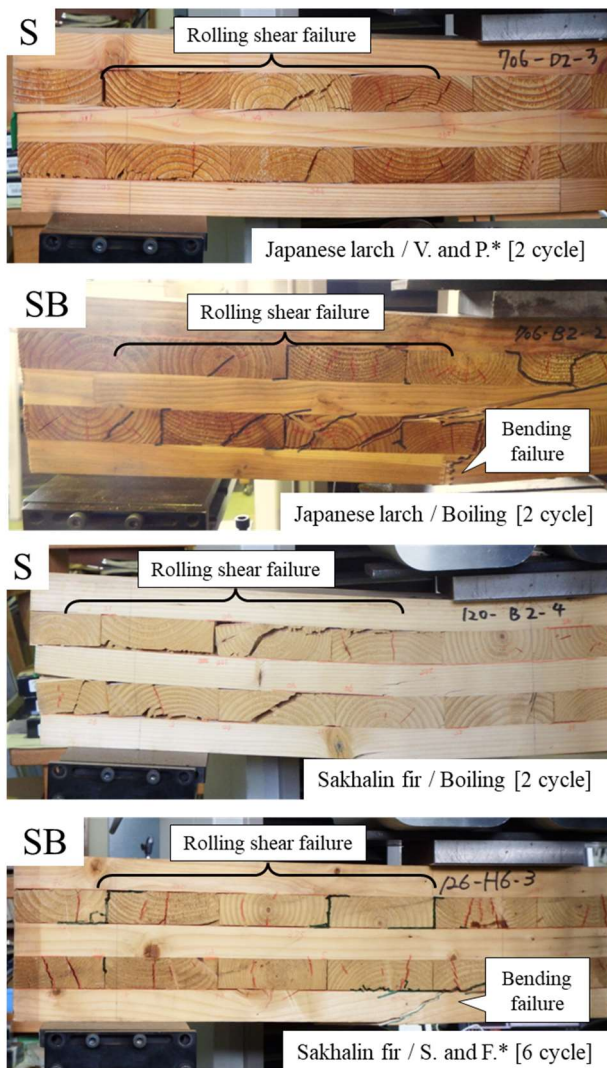
Note: Wood failure in and near the adhesive layer includes delamination and shallow wood failure (Fig. 4.5 WF and DS). The numbers in the figure denote the mean rates. Number of specimens, 21 for each for Japanese larch and 28 for each for Sakhalin fir. \*: Abbreviations are defined in Table 4.1.





**Fig. 4.8. Radial checks of shear test specimens.**

Note: \*: Abbreviations are defined in Table 4.1.



**Fig. 4.9. Examples of fracture of shear test specimens.**

Legend: S: The specimen which showed rolling shear failure, SB: The specimen which showed bending and rolling shear failure.

Note: \*: Abbreviations are defined in Table 4.1.



**Table 4.2. Results of shear test on accelerated aging treated Japanese larch CLT.**

Adhesion Conditions		Control				Methods of accelerated deterioration treatment							
Pressing pressure						Boiling [1 cycle]				Boiling [2 cycle]			
[N/mm <sup>2</sup> ]	$\tau$	C.V.	Mode	MC	$\tau$	C.V.	Mode	MC	$\tau$	C.V.	Mode	MC	
/ Pressing time [min]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]	S / SB	[%]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]	S / SB	[%]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]	S / SB	[%]	
0.7/40	2.71	4.1	2/1	13.3	2.50	8.9	3/0	12.8	2.16	2.9	3/0	12.9	
0.7/60	2.53	4.1	3/0	13.5	2.46	3.9	3/0	12.7	2.07	6.2	2/1	12.9	
0.8/60	2.85	2.2	3/0	13.4	2.48	6.6	3/0	12.6	2.26	8.2	2/1	12.9	
0.9/40	2.83	2.7	3/0	13.4	2.75	1.4	3/0	13.1	2.48	8.4	3/0	12.8	
0.9/60	2.57	8.2	2/1	13.2	2.60	5.4	3/0	12.8	2.46	5.2	2/1	13.0	
1.0/40	2.79	4.3	3/0	12.7	2.61	4.2	2/1	12.6	2.42	4.0	3/0	12.9	
1.0/60	2.72	3.8	3/0	13.2	2.49	4.9	2/1	13.0	2.44	2.1	3/0	12.8	
All adhesion conditions	2.71	6.1	19/2	13.3	2.56	6.5	19/2	12.8	2.33	8.7	18/3	12.9	

Adhesion Conditions		Methods of accelerated deterioration treatment										
Pressing pressure		V. and P.* [1 cycle]				V. and P.* [2 cycle]				S. and F.* [6 cycle]		
[N/mm <sup>2</sup> ]	$\tau$	C.V.	Mode	MC	$\tau$	C.V.	Mode	MC	$\tau$	C.V.	Mode	MC
/ Pressing time [min]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]	S / SB	[%]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]	S / SB	[%]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]	S / SB	[%]
0.7/40	2.20	10.2	3/0	13.1	1.99	6.5	3/0	13.2	1.69	4.4	3/0	9.8
0.7/60	2.15	13.4	3/0	13.0	2.08	3.7	3/0	13.2	1.61	1.7	3/0	10.0
0.8/60	2.34	8.8	2/1	13.4	2.02	9.2	3/0	13.4	1.69	9.6	3/0	9.8
0.9/40	2.45	0.1	2/1	13.2	2.21	4.4	3/0	13.3	1.90	0.4	3/0	9.9
0.9/60	2.18	1.6	3/0	13.1	2.12	3.2	3/0	13.2	1.78	2.5	3/0	9.7
1.0/40	2.26	5.2	3/0	13.2	2.10	3.3	3/0	13.2	1.80	3.3	3/0	9.9
1.0/60	2.44	3.1	3/0	12.9	2.06	9.1	3/0	13.2	1.74	6.7	3/0	9.9
All adhesion conditions	2.29	8.9	19/2	13.1	2.08	6.9	21/0	13.2	1.74	7.0	21/0	9.9

Legend:  $\tau$ : Shear strength, C.V.: Coefficient of variation, Mode: Fracture mode, S: Number of specimens which showed rolling shear failure, SB: Number of specimens which showed bending and rolling shear failure, MC: mean of moisture content.

Note: \*: Abbreviations are defined in Table 4.1.

**Table 4.3. Results of shear test on accelerated aging treated Sakhalin fir CLT.**

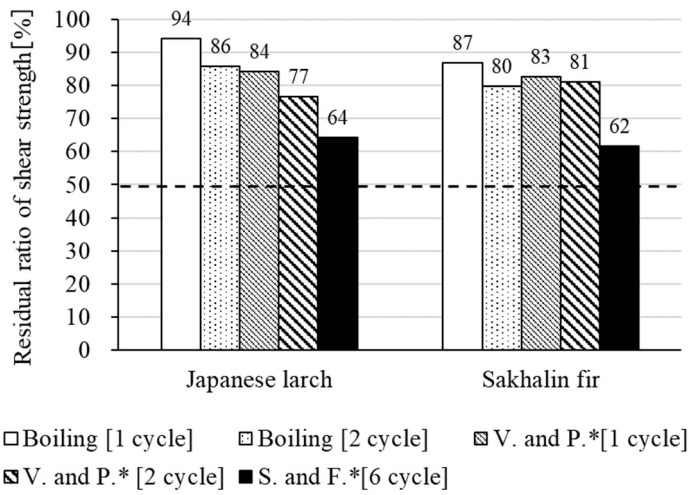
Adhesion Conditions		Control				Methods of accelerated deterioration treatment							
Pressing pressure						Boiling [1 cycle]				Boiling [2 cycle]			
[N/mm <sup>2</sup> ]	$\tau$	C.V.	Mode	MC	$\tau$	C.V.	Mode	MC	$\tau$	C.V.	Mode	MC	
/ Pressing time [min]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]	S / SB	[%]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]	S / SB	[%]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]	S / SB	[%]	
0.5/40	1.95	4.7	3/1	11.4	1.71	8.2	4/0	12.9	1.57	9.7	4/0	12.9	
0.6/40	1.96	12.3	4/0	11.6	1.82	3.3	4/0	13.2	1.62	3.9	4/0	13.0	
0.7/30	2.13	2.4	4/0	11.3	1.82	7.9	4/0	12.9	1.61	5.3	4/0	12.7	
0.7/40	1.96	1.6	4/0	11.7	1.73	8.6	4/0	12.6	1.61	5.9	4/0	12.7	
0.8/30	2.02	6.1	4/0	11.4	1.73	2.0	4/0	12.5	1.57	2.5	4/0	12.7	
0.8/40	1.95	4.8	3/1	11.4	1.66	4.4	4/0	12.2	1.62	5.4	4/0	12.5	
0.9/40	2.07	4.3	4/0	11.1	1.73	5.7	4/0	13.3	1.59	7.8	4/0	13.2	
All adhesion conditions	2.01	6.8	26/2	11.4	1.74	7.0	28/0	12.8	1.60	6.3	28/0	12.8	

Adhesion Conditions		Methods of accelerated deterioration treatment											
Pressing pressure		V. and P.* [1 cycle]				V. and P.* [2 cycle]				S. and F.* [6 cycle]			
[N/mm <sup>2</sup> ]	$\tau$	C.V.	Mode	MC	$\tau$	C.V.	Mode	MC	$\tau$	C.V.	Mode	MC	
/ Pressing time [min]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]	S / SB	[%]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]	S / SB	[%]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]	S / SB	[%]	
0.5/40	1.58	8.7	3/1	12.6	1.44	1.4	4/0	12.5	1.06	7.8	1/3	10.2	
0.6/40	1.78	8.7	4/0	12.7	1.50	13.6	4/0	12.4	1.22	9.2	4/0	10.3	
0.7/30	1.71	8.2	4/0	13.1	1.67	8.1	4/0	12.6	1.15	2.9	3/1	10.4	
0.7/40	1.68	9.0	4/0	13.1	1.67	7.5	4/0	12.5	1.41	7.7	4/0	10.2	
0.8/30	1.61	5.9	4/0	12.5	1.56	8.5	4/0	12.4	1.24	10.4	4/0	10.1	
0.8/40	1.54	10.1	4/0	12.8	1.75	9.4	4/0	12.3	1.24	7.8	4/0	10.1	
0.9/40	1.71	6.6	4/0	12.9	1.78	6.4	4/0	12.8	1.32	13.1	4/0	10.2	
All adhesion conditions	1.66	9.6	27/1	12.8	1.62	11.2	28/0	12.5	1.23	12.3	24/4	10.2	

Legend:  $\tau$ : Shear strength, C.V.: Coefficient of variation, Mode: Fracture mode, S: Number of specimens which showed rolling shear failure, SB: Number of specimens which showed bending and rolling shear failure, MC: mean of moisture content.

Note: \*: Abbreviations are defined in Table 4.1.

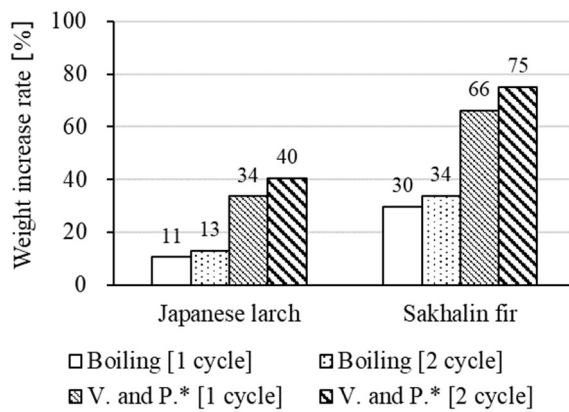


**Fig. 4.10. Residual ratio of shear strength of control specimens.**

Legend: Dashed line: The baseline according to The Notification No. 1446 of The Ministry of Construction<sup>22)</sup>.

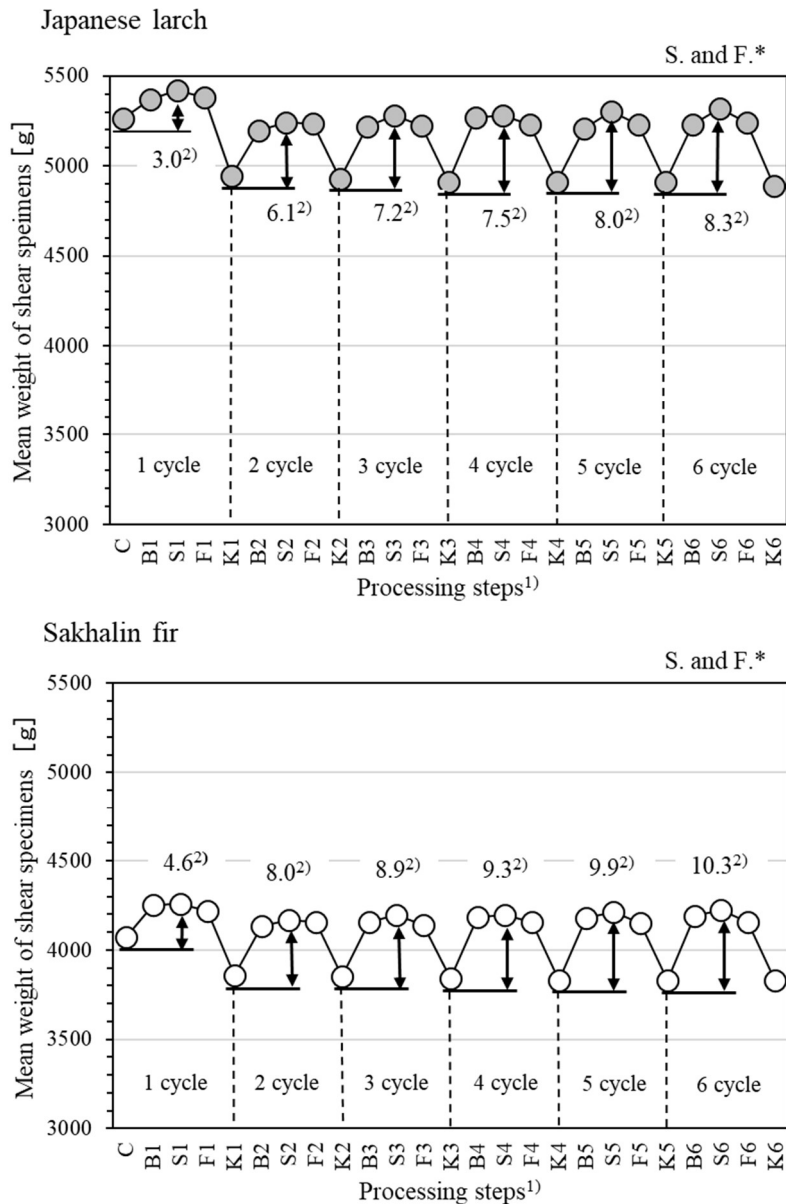
Note: These values were calculated using the mean values of specimens under all adhesive conditions.

\*: Abbreviations are defined in Table 4.1.



**Fig. 4.11. Weight increase rate of shear test specimens by water absorption.**

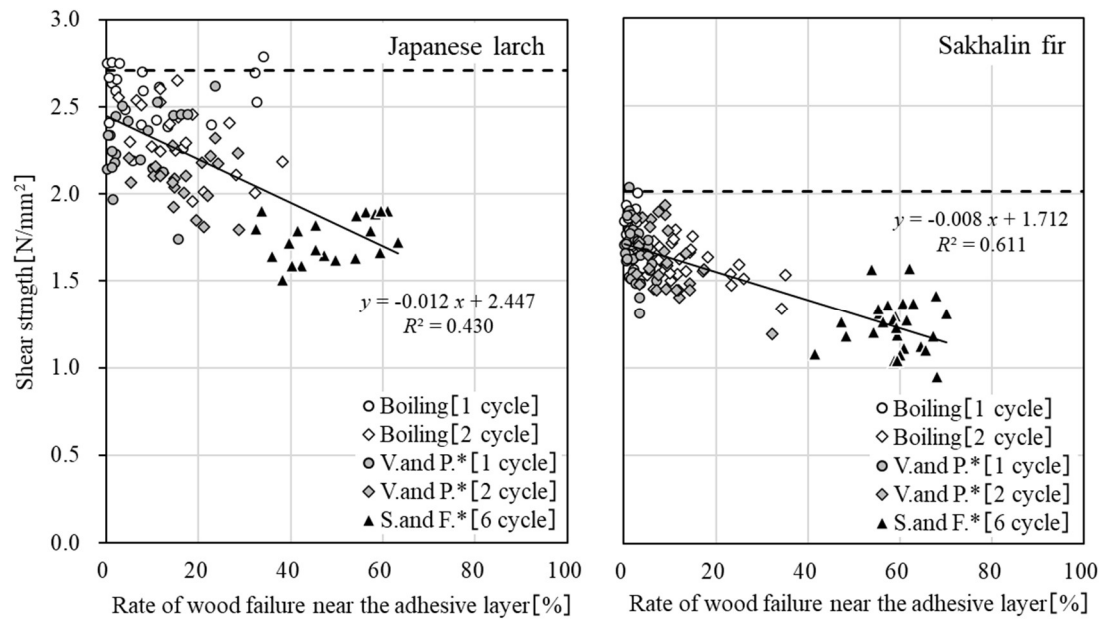
Note: \*: Abbreviations are defined in Table 4.1.



**Fig. 4.12. Mean weight of shear test specimens after each step of steaming and freezing methods (S. and F.) and weight increases by water absorption.**

Legend for <sup>1)</sup>: C: Initial weight, Bi: Warm water immersion, Si: 1st steaming, Fi: Freezing, Ki: Kiln drying (1st drying, 2nd steaming, and 2nd drying were carried out continuously by program operation.).

Note: <sup>2)</sup>: Weight increase rate (%) after 1st steaming. \*: Abbreviations are defined in Table 4.1.



**Fig. 4.13. Relationships between shear strength and rate of wood failure in and near the adhesive layer.**

Legend: Dashed line: mean of shear strength of control (Japanese larch, 2.71 kN/mm<sup>2</sup>; Sakhalin fir, 2.01 kN/mm<sup>2</sup>).

Note: Wood failure in and near the adhesive layer includes delamination and shallow wood failure (WF and DS in Fig. 4.5). \*: Abbreviations are defined in Table 4.1.

### 4.3. まとめ

本章では、複数の圧縮条件により製造された、5層5プライの道産カラマツおよびトドマツ CLT について、建設省告示第 1446 号<sup>22)</sup>の接着耐久性の検証方法に則り、促進劣化処理を行った。促進劣化処理は建設省告示第 1446 号<sup>22)</sup>で規定されている全ての方法について行い、処理後に面外せん断試験によって強度残存率を評価した。また、せん断試験体とマッチングさせた剥離試験片により JAS3079<sup>17)</sup>に準じた剥離試験を行い、促進劣化処理後の接着性能を検証した。これらの試験より、以下の結果を得た。

- 1) 建設省告示第 1446 号<sup>22)</sup>の定める各使用環境における強度残存率は、両樹種ともに乾燥環境で約 90%、断続湿潤環境で約 80%、常時湿潤環境で約 60%となり、同告示の性能評価基準 (50%) を上回った。また、本章で設定した圧縮条件 (Table 4.1) による差はみられなかった。
- 2) JAS3079<sup>17)</sup>に準じた剥離試験により、促進劣化処理後の接着層の剥離状況を確認した結果、いずれの処理方法においても接着層の剥離率は低かった。
- 3) 剥離試験とせん断試験との結果の比較より、界面木破を含めた接着層近傍の木部破断および直交層ラミナの割れといった木部の劣化が、面外せん断強度の低下、すなわち直交層ラミナのローリングシア強度の低下に大きく影響を与えている可能性が示唆された。

これら結果より、(適切に接着がなされている CLT においては) ローリングシア強度の低下は接着層の劣化、すなわち接着性能の低下に先立って生じることが示唆された。

## 第5章 国産 CLT の直交接着層に生じるせん断強度とその評価方法

### 5.1 CLT の接着層に生じるせん断強度に関する既往の研究

CLT は接着材料であるため、接着強度の評価は品質管理の観点から重要である。接着強度は、接着層に生じるせん断強度（以下、接着せん断強度）と言い換えることができ、接着せん断強度は椅子型に加工したブロック状の試験片を用いた圧縮せん断試験（以下、ブロックせん断試験）によって評価するのが一般的である（Fig. 5.1）。集成材の JAS<sup>45)</sup> では、接着剝離試験（以下、剝離試験）による接着層の剝離率の評価と併せて、常態におけるブロックせん断によって接着せん断強度と木部破断率（以下、木破率）を評価し、これらの結果から接着性能を評価している。JAS3079<sup>17)</sup> においても、接着性能の評価方法には集成材の JAS<sup>45)</sup> が準用されており、基準値等に差異はあるものの、同様に剝離試験とブロックせん断試験によって CLT 接着層（平行接着層および直交接着層）の接着性能を評価している。CLT 接着層におけるブロックせん断試験のうち、平行接着層（以下、平行層）のブロックせん断試験は集成材のそれと同一であるが、直交接着層（以下、直交層）のブロックせん断試験は CLT に特有のものである。

CLT 直交層のブロックせん断に関する公表データとしては、Kim ら<sup>133)</sup> のポリウレタン接着剤を用いたレッドパイン CLT における報告、Choi ら<sup>134)</sup> の合板層を有する CLT (Ply-CLT) における報告、Gong ら<sup>135)</sup> の中国産カラマツ CLT における報告などがあり、国内では塔村ら<sup>128)</sup>、宮本ら<sup>127,136)</sup> が複数の接着剤（水性高分子—イソシアネート系接着剤、レゾルシノール樹脂系接着剤、1 液性ポリウレタン接着剤）によって接着されたスギおよびカラマツ CLT についての報告、地下ら<sup>137)</sup> の繊維方向や樹種の違いによる影響を検証した報告など、複数の例がある。

ただし、CLT 直交層のブロックせん断試験においては、片側に繊維直交方向への加力面が存在するため、加力時に加圧部がめり込みやすいほか、木部のローリングシア破壊が生じやすいという課題がある。このため、直交層のブロックせん断試験で得られるせん断

強度の値は平行層のそれに比較して1/3程度であり<sup>134,137,138)</sup>、接着部分の強度を適切に評価できているのか疑義がある。こうした背景から、JAS3079<sup>17)</sup>における接着性能評価では、直交層のブロックせん断強度については基準値を設けておらず、木破率のみを評価対象としている<sup>139)</sup>。日常的な品質管理においては、JAS3079<sup>17)</sup>における木破率の測定による接着性能の評価で満足するものと考えられるが、未利用の樹種や使用実績の少ない接着剤をCLTに利用する場合、接着強度に関する検証は必須であるため、接着部分の強度評価方法は再考する余地がある。

そこで、ローリングシアアの発生を抑えつつ圧縮せん断試験を行う試験法として、Bettiら<sup>140)</sup>はブロック状の試験片を繊維方向に対して45度の方向から加力する圧縮型のせん断試験を提案している(**Fig.5.2**)。これを応用し、JAS3079<sup>17)</sup>で規定されているような椅子型の試験片についても、試験片を採取する際の方向を工夫することで、加力方向を45度傾けたブロックせん断試験(以下、45度ブロックせん断試験)を行うことが可能と考えられる。

そのほか、ブロックせん断試験以外にCLT直交層のせん断強度を評価する手法としては、直交接着面にねじりトルクを与える試験(ねじり試験)が考えられる。ねじり試験により得られる強度(ねじりせん断強度)は、CLTを垂直部材として使用する際に検討を要する面内せん断強度(in-plane shear strength)を規定するパラメーターのひとつであり<sup>20,141,142)</sup>、設計上重要な値であるが、試験に際して専用の機械(ねじり試験機)が必要となるため、CLT直交層のねじりせん断強度に関する報告は少なく、使用している樹種および接着剤の種類も限定的である<sup>66,143)</sup>。



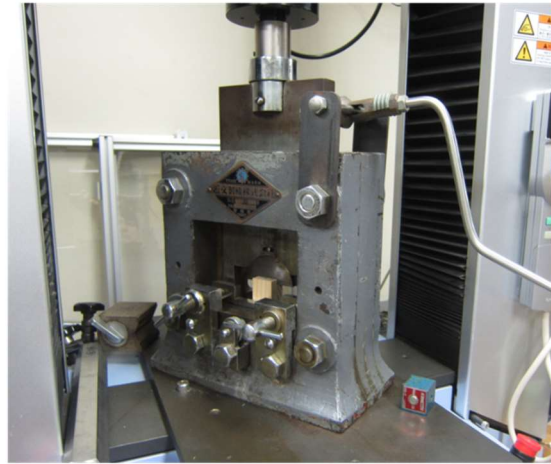
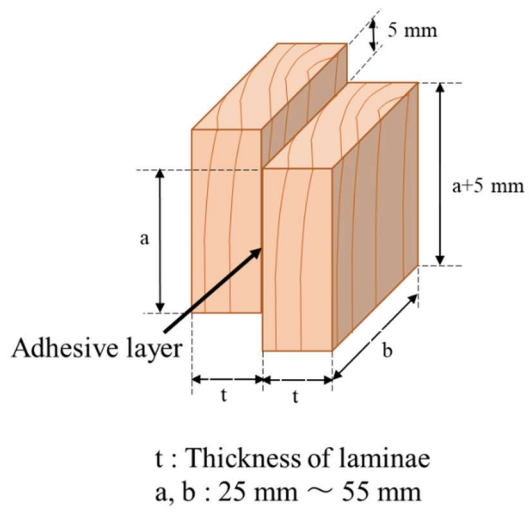


Fig. 5.1. Block shear (bond strength) test according to JAS for glued laminated timber<sup>45)</sup>.

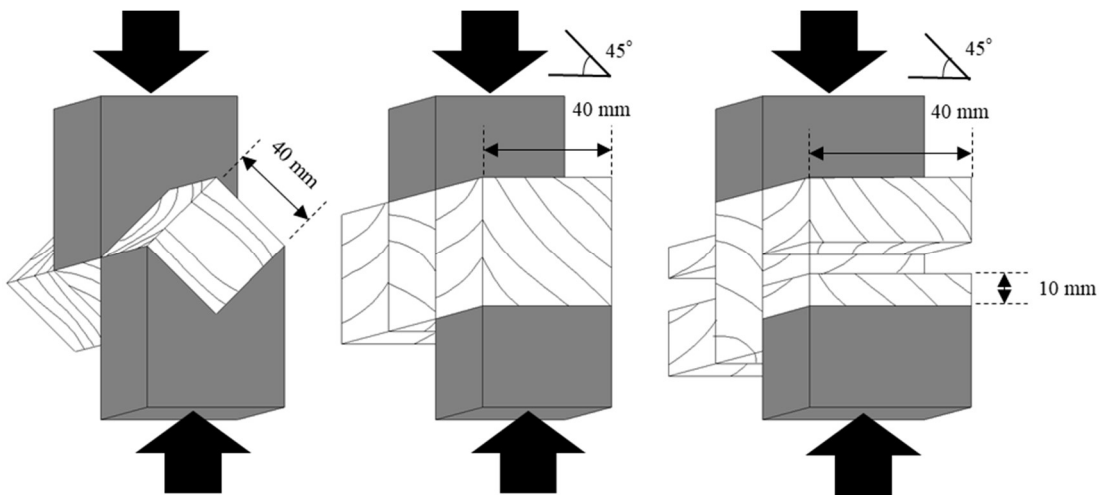


Fig. 5.2. Bond strength test of CLT orthotropic layers devised by Betti *et al.*<sup>140)</sup>.

## 5.2 CLT 直交層のブロックせん断およびねじり試験による接着せん断強度の評価

### 5.2.1 本章の概要

本章では、JAS3079<sup>17)</sup>に規定されている CLT 直交層の椅子型のブロックせん断試験（以下、JAS ブロックせん断試験）について、国産 CLT を対象としたデータの蓄積が少ないことに着目し、国内で一般的な 2 種の接着剤（水性高分子-イソシアネート系接着剤（以下、API）、およびフェノール-レゾルシノール共縮合樹脂接着剤（以下、PRF））によってそれぞれ積層接着された国産針葉樹 4 種（ヒノキ、カラマツ、スギ、トドマツ）の CLT について、直交層を対象に JAS3079<sup>17)</sup>によるブロックせん断試験（以下、ブロックせん断試験）を行った。また、加力中のローリングシアアの発生に配慮し、Betti ら<sup>140)</sup>の手法を参考に新たに提案する、加力方向を 45 度傾けた椅子型のブロックせん断試験（以下、45 度ブロックせん断試験）を行った。また、JAS3079<sup>17)</sup>における接着性能の評価基準を参照し、ブロックせん断試験および 45 度ブロックせん断試験による木破率の測定のほか、剥離試験（減圧加圧剥離試験）を行い、CLT の接着性能評価および各評価方法における結果の比較を行った。

これに加え、ねじり試験（ねじりせん断強度）によるねじりせん断強度の評価を行い、ブロックせん断試験および 45 度ブロックせん断試験における接着せん断強度との比較を行った。

### 5.2.2 試験片および試験方法

#### 5.2.2.1 CLT パネルおよび試験片の製作

厚さ 29 mm×幅 100 mm×長さ 298 mm のラミナを用いて、投影面積が幅 300 mm×長さ 300 mm、厚さ 116 mm の 4 層 4 プライ CLT を製作し、各試験片を採取した（JAS3079<sup>17)</sup>では、ブロックせん断試験および剥離試験におけるサンプルについては、試験体ではなく“試験片”と呼称しているため、以下 JAS3079<sup>17)</sup>に則って表記する）。ラミナの樹種は主要な国産針葉樹種 4 種（ヒノキ、カラマツ、スギ、トドマツ）とし、20 °C・65%RH の環境下で約 1 ヶ月間養生した。使用した接着剤は水性高分子-イソシアネート系接着剤（以下、API）、

フェノール-レゾルシノール共縮合樹脂接着剤（以下、PRF）の2種類とし、幅はぎ接着はしていない。CLT製作の際の接着条件を **Table 5.1** に示す。CLTは各条件（4樹種×接着剤2種=8条件）につき3枚、計24枚を製作した。使用したラミナはあらかじめ密度を測定し、接着剤（API、PRF）の条件間で密度に偏りがないように留意した。

製作した各試験の試験片の採取位置を **Fig. 5.3** に示す。ブロックせん断試験の試験片は各CLTパネルの2カ所から6個ずつ、計12個を採取した。試験片の形状および寸法はJAS3079<sup>17)</sup> に拠って製作し、接着部分の面積は25×25 mmとした。45度ブロックせん断試験の試験片はラミナの繊維方向に対して45度の角度をつけて採材し、各CLTパネルから9個ずつを採取した。ただし、スギAPIおよびトドマツPRFの2条件については2体のパネルより8~9個ずつ採取した。形状および寸法はブロックせん断試験片と同一とした（**Fig. 5.4**）ねじり試験片は各CLTパネルから3体ずつ採材した。試験片の断面寸法は80×80 mmとした。また、剝離試験片を各パネルにつき3体ずつ製作した。試験片の断面寸法はJAS3079<sup>17)</sup> に拠って75×75 mmとした。

各試験片は試験直前に気乾密度を測定した。含水率は、ブロックせん断および45度ブロックせん断試験片については各条件より無作為に抽出した6~9体を、ねじり試験片については全数を、試験終了後に全乾法により求めた。

#### 5.2.2.2 剝離試験

製作したCLTパネルの接着の状態を評価するため、JAS3079<sup>17)</sup> に拠って剝離試験を行った。劣化処理方法はJAS3079<sup>17)</sup> における減加圧剝離試験に則り、常温水中で0.085 MPaの減圧を5分間、その後に0.51±0.03 MPaの加圧を1時間行い、この処理を2回繰り返した。処理後に70±3°Cの恒温乾燥器に入れ、試験片の質量が初期重量の100~110%になるまで乾燥させた。4側面の接着層の剝離長さより剝離率を算出し、剝離については、すき間が0.05 mm未満で剝離長さが3 mm未満のものは除外した。

なお、第4章（**4.2.2.3**）で述べたように、CLTは剝離試験時に接着層のごく近傍において木破が生じることが多いが<sup>127-129)</sup>、本章においてもこれを剝離とはみなさず、界面破壊お

よび接着剤の凝集破壊を評価の対象とした。

### 5.2.2.3 ブロックせん断試験および45度ブロックせん断試験

ブロックせん断試験および45度ブロックせん断試験はJAS3079<sup>17)</sup>に準拠して行った。試験片に回転モーメント等が生じないようにせん断治具を用い、載荷は精密万能試験機（島津製作所製AG-Xplus, 容量10kN）により行った。載荷速度は1mm/minとした。試験片は試験直前まで20℃・65%RH環境下に1ヵ月間以上保管し、試験前に同環境下で試験片の密度を測定した。破壊までの最大荷重を計測し、最大荷重をせん断面積で除した値をブロックせん断強度とした。

また、川上の方法<sup>144)</sup>を参考に、2.5×2.5mm方眼の10×10マスを描いた透明なシートを用いて、破断面において木部で破断しているマスをカウントし、木破率を1%単位で求めた。木破率の測定の様子をFig. 5.5に示す。

### 5.2.2.4 ねじり試験

ねじり試験方法は、中島らの報告<sup>66,143)</sup>を参考に行った。試験はねじり試験機（島津製作所製SS2000）を用いて行い、試験片の上下40mmを固定し、CLTの2-3層目の接着層にねじりモーメントを与えた。載荷速度は0.001~0.002rad/minとした。試験の様子をFig. 5.6に示す。ねじり試験は20℃・65%RH環境下で実施し、試験前に同環境下で試験片の密度を測定した。得られた最大ねじりモーメント $M_t$ を極断面係数で除して、試験片の最外縁に生じるねじりせん断強度( $\tau_{\max}$ )を算出した。せん断強度は、木材科学実験書<sup>145)</sup>より以下の式(5.1)を用いて求めた。

$$\tau_{\max} = \frac{M_t}{\alpha b h^2} \quad (5.1)$$

ここで、 $\tau_{\max}$ : 最大せん断強度 [N/mm<sup>2</sup>],  $M_t$ : 最大ねじりモーメント [N・mm],  $\alpha$ : 定数,  $b$ : 試験片断面の一片の長さ [mm],  $h$ : 試験片断面の一片の長さ [mm] (ただし  $b > h$ ), 定数  $\alpha$  は比  $b/h$  に応じて決まり、本試験では  $b/h = 1.0$ ,  $\alpha = 0.208$  として計算した。

### 5.2.3. 結果

#### 5.2.3.1 剥離試験

剥離試験の結果を **Table 5.2** に示す。API の剥離率が PRF のそれよりもわずかに低い傾向にあったが、全ての樹種において剥離率は低い水準にあった。また、JAS3079<sup>17)</sup> の適合評価基準（平均剥離率が 10%未満、もしくは 4 側面における同一接着層の剥離長さの合計がそれぞれの接着層の長さの 40%未満）を満たしているか判定を行った結果、全ての剥離試験片が JAS3079<sup>17)</sup> の適合基準を満たしていた。

#### 5.2.3.2 ブロックせん断試験および 45 度ブロックせん断試験

**Fig. 5.7** に、試験片の破壊例を示す。ブロックせん断試験においては、いくつかの試験片で、載荷時に木部のローリングシア破壊や加力点・支点におけるめり込みが生じており、特にカラマツではこの傾向が顕著であった。45 度ブロックせん断試験においては、目立ったローリングシアやめり込みなどは生じておらず、より接着層に近い部分で木破しやすい傾向がみられた。

**Table 5.2** に試験片の木破率の測定結果を示す。ブロックせん断試験における木破率を樹種別に平均すると、90~100%と高い値を示した。JAS3079<sup>17)</sup> では直交層における木破率の基準を、ヒノキ、カラマツおよびトドマツで 65%以上、スギで 70%以上としており<sup>1)</sup>、これらの基準を満たした。従って、剥離およびブロックせん断試験の結果から、接着が適正に行われていることが示された。また、API の木破率が PRF のそれよりもわずかに高い傾向にあり、これは剥離試験の傾向と概ね一致していた。45 度ブロックせん断試験とブロックせん断試験を比較すると、試験片の破壊形態は異なるものの (**Fig. 5.7**)、木破率については両者に顕著な差は見られず、45 度ブロックせん断試験はブロックせん断試験と同様に木破率の評価が可能であることが示唆された。

ブロックせん断試験および 45 度ブロックせん断試験の結果を **Table 5.3** および **Fig. 5.8** に示す。スギ以外の樹種については、いずれの試験においても接着剤の違いによる有意差はみられなかった ( $p>0.05$ )。スギのブロックせん断試験において、接着剤の違いによる有

意差がみられたが ( $p < 0.05$ ), 木破率は 99%と非常に高い値を示していることから, この結果は接着剤の違いではなく, 木理などに要因があると考えられる。各樹種において, 得られたせん断強度の平均値をねじりせん断強度の平均値と比較すると, 45度ブロックせん断試験はブロックせん断試験より概ね6割ほど高い値を示した。

全樹種における試験片の気乾密度とブロックせん断強度との関係を **Fig. 5.9** に示す。両者には正の相関関係がみられたが, 同程度の密度であるスギとトドマツが重なるように分布する一方, カラマツは同程度の密度であるヒノキよりもやや下側にプロットされる傾向がみられた。

### 5.2.3.3 ねじり試験

**Fig. 5.10** に, 試験片の破壊例を示す。破壊線は, ねじりモーメントを与えた2~3層目の端点付近から生じ, 主に接着層の近傍と放射方向に入る傾向がみられた。一部の試験片では外側の接着層(1~2層もしくは3~4層間)にまで破壊線が進展した。また, カラマツでは年輪界の早材側(イニシャル部)に沿って破壊線が生じることが多かった。

ねじり試験の結果を **Table 5.3** および **Fig. 5.11** に示す。接着剤の違いによるねじりせん断強度に有意差はみられなかった ( $p > 0.05$ )。ねじりせん断強度はブロックせん断より高く, 45度ブロックせん断強度よりわずかに高い値を示した。

各樹種において, 得られたせん断強度の平均値をねじりせん断強度の平均値と比較すると, ブロックせん断試験が50~60%, 45度ブロックせん断試験が90~100%程度の値を示した (**Table 5.3**)。

全樹種における試験片の気乾密度とねじりせん断強度との関係を **Fig. 5.12** に示す。両者には正の相関関係がみられたが, 同程度の密度であるスギとトドマツが重なるように分布する一方, カラマツは同程度の密度であるヒノキよりもやや下側にプロットされる傾向がみられ, これはブロックせん断試験および45度ブロックせん断試験と同様であった。なお, 回帰直線の決定係数は, ねじり試験と45度ブロックせん断試験に比べ, ブロックせん断試験はやや低かった (**Fig. 5.8** および **Fig. 5.11**)。

#### 5.2.4. 考察

第2章(2.3)におけるラミナのローリングシア強度に関しては、気乾密度と強度に相関がある樹種とそうでない樹種がみられたが(Fig. 2.8)、第5章で実施したいずれの試験(接着せん断試験)においては、全樹種の試験片の気乾密度とせん断強度に正の相関がみられた。回帰直線より得られるせん断強度を比較すると、ねじりせん断：ブロックせん断：45度ブロックせん断=1：0.45~0.57：0.90~0.94となった(Fig. 5.9 および Fig. 5.12)。破壊形態に着目すると、ブロックせん断試験に比べて45度ブロックせん断試験では、ローリングシア破壊の発生が抑えられたため、せん断強度が大きくなったと考えられる。ねじり試験においては、応力が集中する試験片隅角部から破壊線が生じているが、微視的には隅角部で繊維方向に対して45度方向に力が加わっていると考えられる。

また、樹種別に破壊形態に着目すると(Fig. 5.7 および Fig. 5.10)、カラマツは年輪界の木表側に沿って破壊線が入る例が比較的多くみられ、ブロックせん断試験においてローリングシア破壊した試験片についてはその傾向が顕著であった。全ての試験においてカラマツ試験片は密度とせん断強度の回帰直線の下側にプロットされることが多く(Fig. 5.9 および Fig. 5.12)、特にブロックせん断試験ではその傾向が顕著であった(Fig. 5.9)。ヒノキは早晚材の密度差が小さく、早材部の密度が高い一方で<sup>70)</sup>、カラマツは国産針葉樹種の中では早晚材の密度差が大きく、年輪内の晩材率も高い<sup>69,71)</sup>。すなわち、カラマツは早材部と晩材部の強度差が大きく、早晚材の境界部において破壊が生じやすいものと考えられ、このことが試験片の密度に比して低い強度を示した要因であると推測される。ただし、カラマツにおいて、密度とローリングシア強度には相関がみられないため(Fig. 2.8)、接着せん断強度の決定にあたっては、ローリングシア強度ほど早材部の影響は大きくないと推察される。

また、全ての試験においてスギとトドマツは重なるように分布した(Fig. 5.9 および Fig. 5.12)。トドマツの早晚材の密度差が小さい一方で<sup>69)</sup>、スギはカラマツと同様に早晚材の密度差が大きい樹種であるが<sup>69,146)</sup>、スギは年輪内の晩材率が低く<sup>72)</sup>、両者の早材部の密度に

大きな差がないことが<sup>146)</sup>、同程度の強度を示した理由として考えられる。

ブロックせん断および45度ブロックせん断試験の木破率を比べると、両者の傾向と判定結果は一致した (**Table 5.2**)。ねじり試験においては、最大荷重時においても試験片が完全に分離することは稀であるため (**Fig. 5.10**)、木破率の測定が難しいが、本章で実施した45度ブロックせん断試験は、ブロックせん断試験と同様に木破率の測定が容易であった。また、同試験は木部内のローリングシアア破壊や加力点等のめり込みが抑えられ、ブロックせん断試験と比べて接着層の近傍で破壊することから、接着の良否を判別する品質管理上の手法として有用であると考えられる。

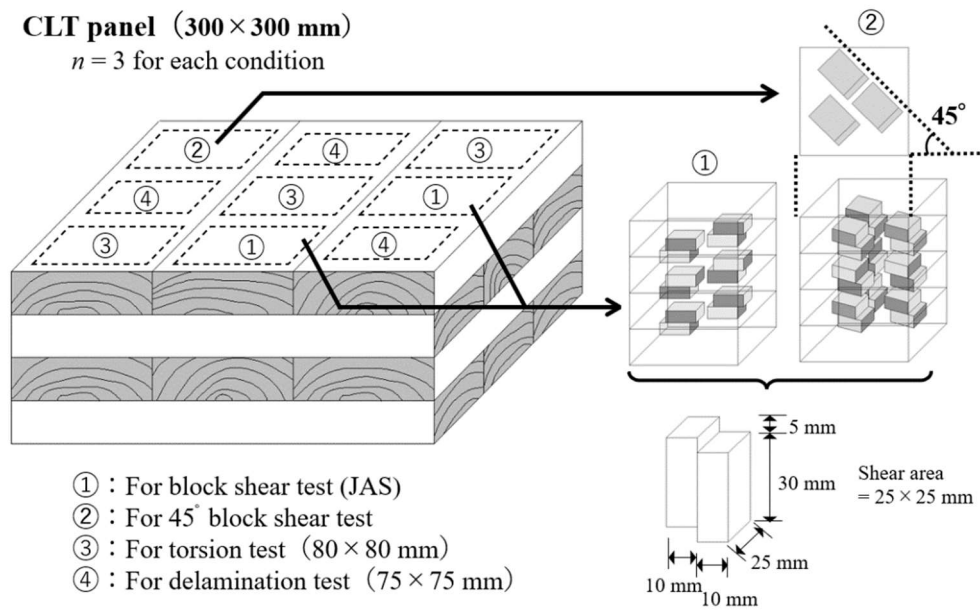
さらに、45度ブロックせん断試験より得られるせん断強度は、設計上重要な指標であるねじりせん断強度に近い値を示した。ただし、本章において、ねじり試験片のせん断面積 (80 mm×80 mm) はブロックせん断試験片のそれ (25 mm×25 mm) よりも大きかった。一般に、試験体のサイズが大きくなれば強度は小さくなる (寸法効果) とされ<sup>90)</sup>、集成材のブロックせん断試験においても、寸法効果がみられるとの報告例がある<sup>118,147)</sup>。一方で、CLT直交層のねじり試験においては、寸法効果はあまりみられないという報告がある<sup>143)</sup>。今後は、各試験におけるせん断部分の面積が強度にどのような影響を及ぼすのか、詳細な検証が必要であると考えられる。



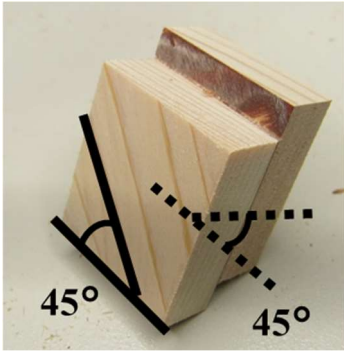
**Table 5.1. Adhesive conditions.**

Species	API		PRF	
	Pressure [N/mm <sup>2</sup> ]	Time [min]	Pressure [N/mm <sup>2</sup> ]	Time [hour]
Japanese cypress	1.0	60	1.0	16
Japanese larch	1.0	60	1.0	16
Japanese cedar	0.8	60	0.8	16
Sakhalin fir	0.8	60	0.8	16
Glue spread	230 g/m <sup>2</sup>		250 g/m <sup>2</sup>	

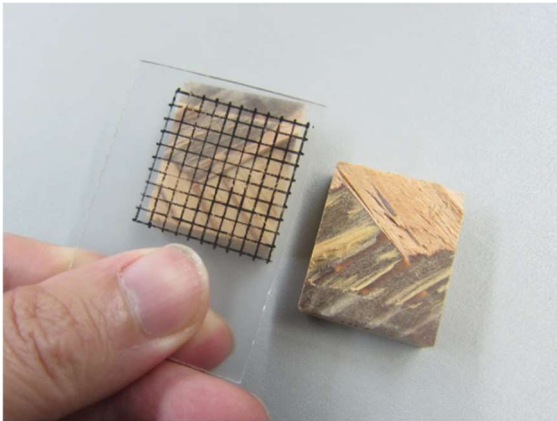
Legend: API: Aqueous polymer-isocyanate-based adhesive, PRF: Phenol-resorcinol formaldehyde adhesive.



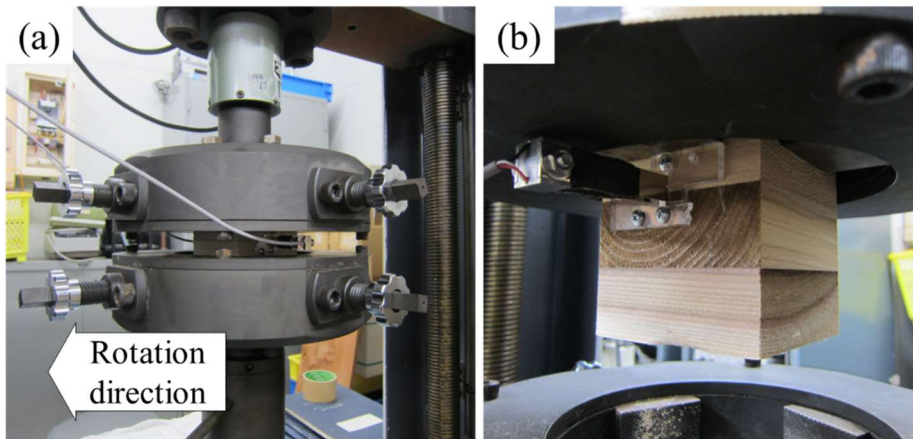
**Fig. 5.3. Preparation of adhesive shear tests specimens.**



**Fig. 5.4. Specimen for block shear test at 45° loading direction to the grain.**



**Fig. 5.5. Measurement of wood failure rate.**



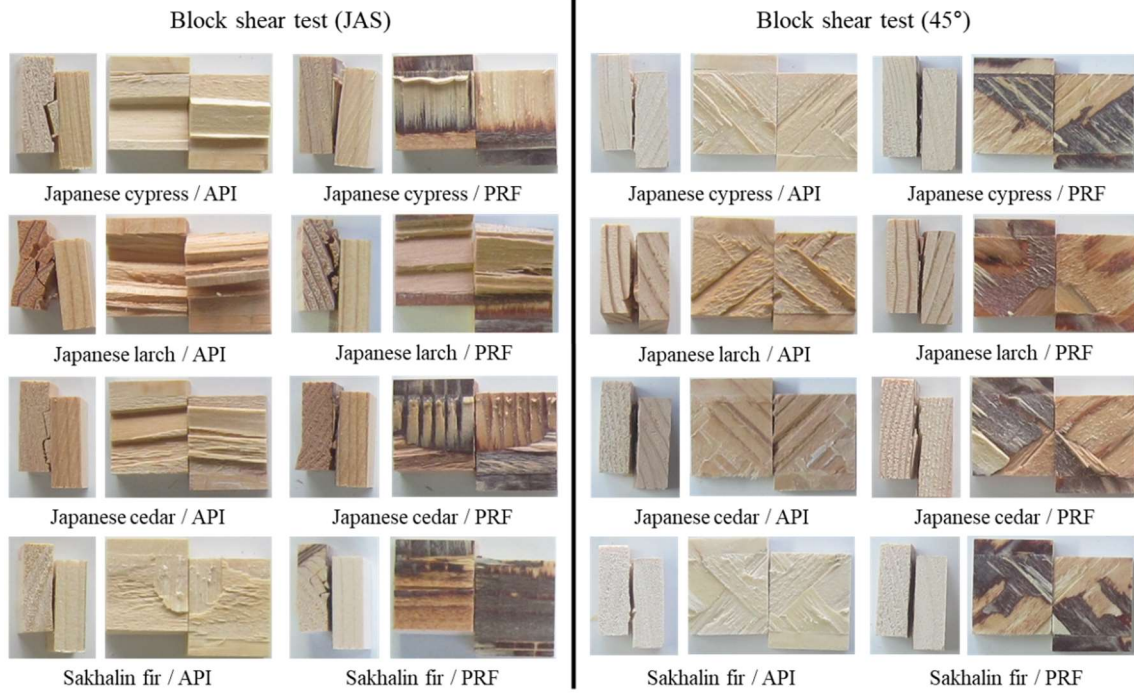
**Fig. 5.6. Torsion test.**

Legend: (a): Torsion test equipment, (b): Mounting state of the specimen.

**Table 5.2. Delamination test results and wood failure percentage obtained from block shear tests.**

Species	Adhesive types	Delamination test		Block shear test (JAS)		Block shear test (45°)	
		Delamination (%)	Conformity with JAS	Wood failure (%)	Conformity with JAS	Wood failure (%)	Conformity with JAS
Japanese cypress	API	0.0	9/9	98	36/36	100	27/27
	PRF	3.0	9/9	90	33/36	96	27/27
Japanese larch	API	0.0	9/9	98	36/36	97	27/27
	PRF	4.3	9/9	97	36/36	95	27/27
Japanese cedar	API	0.0	9/9	99	36/36	100	18/18
	PRF	1.6	9/9	98	36/36	99	27/27
Sakhalin fir	API	2.0	9/9	100	36/36	100	27/27
	PRF	5.0	9/9	96	35/36	99	17/17

Legend: API: Aqueous polymer-isocyanate-based adhesive, PRF: Phenol-resorcinol formaldehyde adhesive.



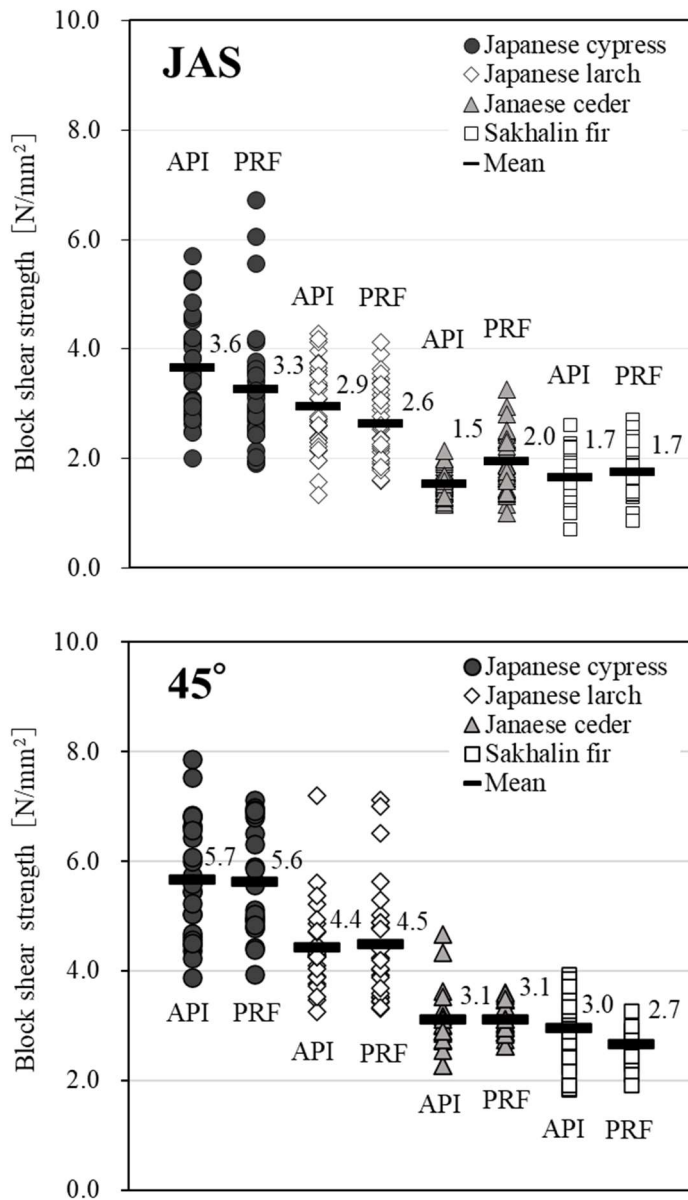
**Fig. 5.7. Examples of fracture characteristics of block shear specimens.**

Legend: API: Aqueous polymer-isocyanate-based adhesive, PRF: Phenol-resorcinol formaldehyde adhesive.

**Table 5.3. Air-dried density of specimens and results of shear tests.**

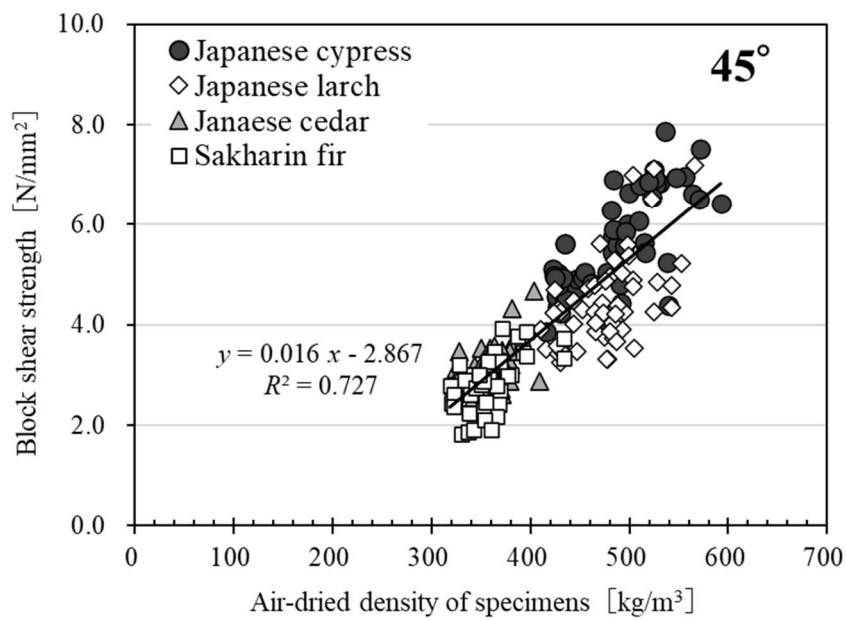
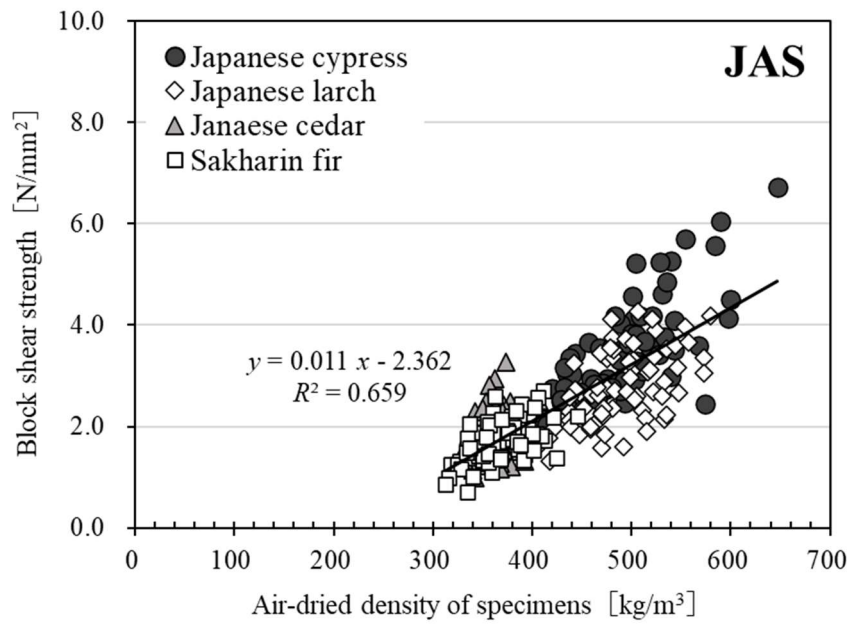
Species	Adhesive type	Test methods	Number of Specimens	Air-dried density		Shear strength		Ratio*	MC [%]
				Mean [kg/m <sup>3</sup> ]	C.V. [%]	Mean [kg/m <sup>3</sup> ]	C.V. [%]		
Japanese cypress	API	Block shear	36	485	8.9	3.6	24.9	0.60	11.7
		45°block shear	27	490	10.1	5.7	18.6	0.94	11.8
		Torsional	9	482	7.5	6.0	17.7	-	11.9
	PRF	Block shear	36	490	12.2	3.3	32.0	0.52	12.3
		45°block shear	27	482	9.0	5.6	16.8	0.90	11.7
		Torsional	9	481	8.7	6.2	13.4	-	11.8
Japanese larch	API	Block shear	36	481	7.5	2.9	25.3	0.62	13.9
		45°block shear	27	482	7.8	4.4	17.5	0.93	12.9
		Torsional	9	474	5.4	4.8	14.9	-	13.7
	PRF	Block shear	36	488	7.5	2.6	25.2	0.54	14.3
		45°block shear	27	472	7.3	4.5	23.3	0.92	13.0
		Torsional	9	469	6.7	4.9	6.9	-	13.8
Japanese cedar	API	Block shear	36	362	3.5	1.5	16.3	0.50	11.9
		45°block shear	18	357	5.5	3.1	19.4	1.02	11.5
		Torsional	9	356	3.3	3.0	16.2	-	11.9
	PRF	Block shear	36	358	4.3	2.0	26.2	0.61	12.2
		45°block shear	27	360	4.7	3.1	9.0	0.98	11.7
		Torsional	9	353	3.1	3.2	12.1	-	12.2
Sakhalin fir	API	Block shear	36	362	7.4	1.7	24.6	0.53	12.4
		45°block shear	27	363	8.6	3.0	20.9	0.94	11.9
		Torsional	9	355	5.8	3.1	13.7	-	12.8
	PRF	Block shear	36	367	7.1	1.7	23.5	0.53	12.9
		45°block shear	17	346	3.9	2.7	12.4	0.81	11.9
		Torsional	9	361	6.8	3.3	15.1	-	13.1

Legend: API: Aqueous polymer-isocyanate-based adhesive, PRF: Phenol-resorcinol formaldehyde adhesive, SD: Standard deviation, C.V.: coefficient variation, MC: Mean of moisture content, \*: Ratio of mean shear strength to torsion test.

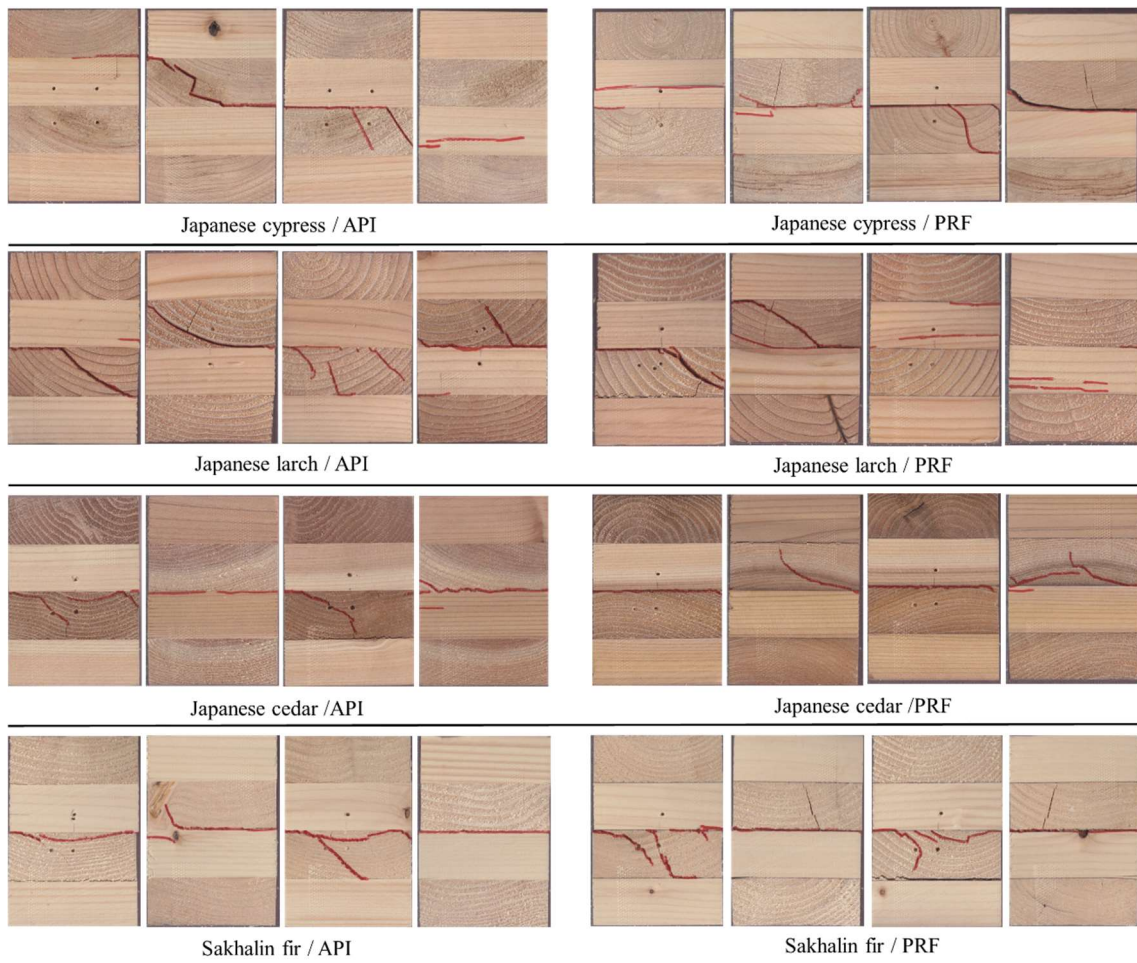


**Fig. 5.8. Comparisons of block shear strength.**

Legend: API: Aqueous polymer-isocyanate-based adhesive, PRF: Phenol-resorcinol formaldehyde adhesive.



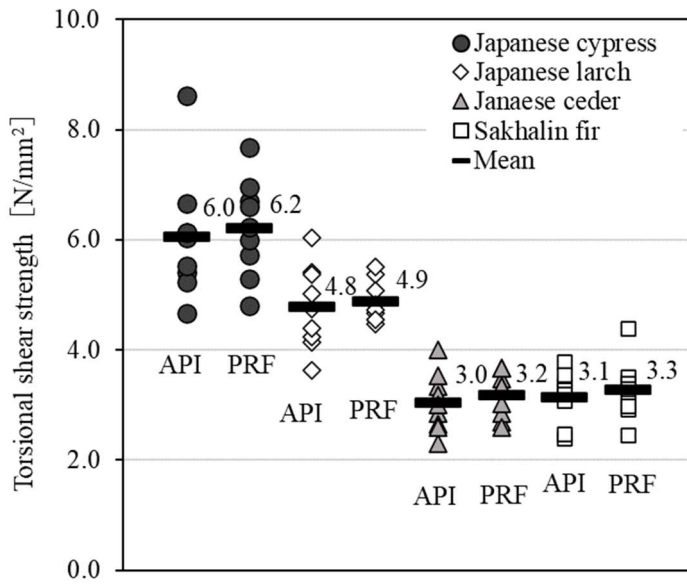
**Fig. 5.9. Relationships between block shear strength and air-dried density.**



**Fig. 5.10. Examples of fracture characteristics of torsional shear specimens.**

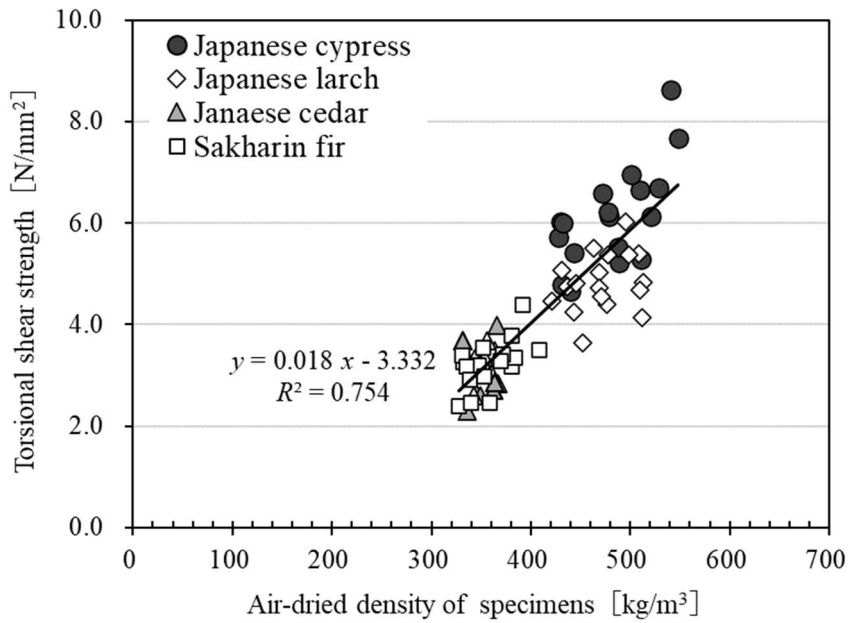
Legend: API: Aqueous polymer-isocyanate-based adhesive, PRF: Phenol-resorcinol formaldehyde adhesive.





**Fig. 5.11. Comparisons of torsional shear strength.**

Legend: API: Aqueous polymer-isocyanate-based adhesive, PRF: Phenol-resorcinol formaldehyde adhesive.



**Fig. 5.12. Relationships between torsional shear strength and air-dried density.**

### 5.3 まとめ

国産針葉樹 4 樹種（ヒノキ，カラマツ，スギ，トドマツ）を用いた CLT について，それぞれ直交層の接着せん断強度を，ブロックせん断試験，45 度ブロックせん断試験，ねじり試験によって評価した。これらの試験より，以下の結果を得た。

- 1) いずれの試験においても，使用した接着剤（API，PRF）の違いによるせん断強度の顕著な差はみられなかった。
- 2) ブロックせん断試験および 45 度ブロックせん断試験による木破率の評価結果に顕著な差はみられなかった。
- 3) いずれの試験においても，試験片の気乾密度とせん断強度には正の相関がみられた。これは，樹種によって密度と強度との相関の有無があるローリングシアア強度（第 2 章）とは異なる傾向であった。ただし，同程度の密度であるスギとトドマツが重なるように分布する一方，カラマツは同程度の密度であるヒノキよりもやや下側にプロットされる傾向がみられた。
- 4) 回帰直線より得られる強度を比較すると，せん断強度は，ねじりせん断：ブロックせん断：45 度ブロックせん断 = 1 : 0.45~0.57 : 0.90~0.94 であり，ねじりせん断強度と 45 度ブロックせん断強度は近い値を示した。また，45 度ブロックせん断試験は木部内のローリングシア破壊や加力点等でのめり込みが生じにくく，接着層の近傍で破壊する傾向がみられた。この結果より，45 度ブロックせん断試験は CLT の接着強度の評価方法として有用であることが示された。

なお，2018（平成 30）年における CLT の基準強度の改正（国交省告示 1324 号<sup>20)</sup>）の際，新たに樹種別にねじりせん断強度が定められたが，これには本章における試験結果の一部（ねじり試験）が参照されている。

## 第6章 総括

### 6.1 本論文のまとめ

本論文では、CLT における直交層ラミナのローリングシアー破壊という現象に着目し、実験データの収集および考察を行った。第2章では、国産針葉樹ラミナを対象としたローリングシアー強度の測定を行った。第3章および第4章では、利用拡大が期待されるカラマツおよびトドマツ CLT を対象として、面外せん断強度に関するデータの収集、検証を行った。第5章では、CLT 直交層の接着せん断強度をブロックせん断試験およびねじり試験により評価し、得られた強度値や破壊性状の比較を行った。以下に各章より得られた知見をまとめる。

第2章(2.1)では、国産針葉樹4種(ヒノキ、カラマツ、スギ、トドマツ)のラミナについて、岡部ら<sup>46)</sup>の考案した圧縮型のローリングシアー試験によって、樹種および含水率がローリングシアー強度に与える影響について検証した。その結果、ローリングシアー強度は高い順に、ヒノキ、カラマツ、スギ・トドマツとなった。ローリングシアー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)もあり、これは樹種特有の組織構造に依るものと考察された。また、含水率がローリングシアー強度に与える影響は顕著ではないことが示唆された。このほか、第2章(2.2)ではカラマツおよびトドマツについて、国内での一般的な寸法のラミナ(ラミナ寸法：厚さ 30 mm, 幅 105 mm)におけるローリングシアー強度を測定し、第3章での実大材におけるせん断強度試験の結果との比較を行った。なお、このときのローリングシアー強度(2.2)は、2.1におけるローリングシアー強度(ラミナ寸法：厚さ 29 mm, 幅 80 mm)よりもやや高い値を示した。

第3章では、5層5プライのカラマツおよびトドマツ CLT について、中央集中荷重法および逆対称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(せん断スパン)と現れるせん断強度との関係について検証し

た。その結果、カラマツは中央集中荷重法において、直交層のローリングシア破壊を呈しつつも最大荷重時に曲げ破壊を生じやすいこと、トドマツよりも短いスパン条件で曲げ破壊に移行することが示された。対して、トドマツは両荷重法ともに、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ローリングシア破壊によるせん断破壊を示し、カラマツと比較してせん断破壊しやすい傾向が看取された。逆対称4点荷重法についてはカラマツおよびトドマツの双方において、全てのスパン条件で最大荷重時に直交層のローリングシア破壊によるせん断破壊を示した。スパン条件に着目すると、両樹種ともに、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、この傾向は逆対象4点荷重法において顕著であった。この時のせん断強度の値を第2章(2.2)で得られたローリングシア強度の値と比較すると、両者は概ね一致することが示された。

第4章(4.1)では、複数の圧縮条件により製造された5層5プライの道産カラマツおよびトドマツCLTについて、建設省告示第1446号<sup>22)</sup>の接着耐久性の検証方法に則り、促進劣化処理を行った後に面外せん断試験を行った。その結果、設定した全ての条件(樹種および圧縮条件)において、同告示の接着耐久性に関する評価基準をクリアした。また、せん断試験体とマッチングさせた剥離試験片により、促進劣化処理後の接着層をJAS3079<sup>17)</sup>に準じて評価し、剥離率を求めた。処理方法によってはせん断強度が4割程度低下したのに対し、接着層の剥離率は最大でも5%程度であり、接着層近傍の木部破断や直交層ラミナの割れなど、木部の劣化が面外せん断強度の低下に影響を与えていること、すなわち、ローリングシア強度の低下は接着層の劣化(接着性能の低下)に先立って生じることが示唆された。

第5章では、国産針葉樹4樹種(ヒノキ、カラマツ、スギ、トドマツ)および接着剤2種(水性高分子イソシアネート系樹脂接着剤およびフェノール-レゾルシノール共縮合樹脂接着剤)を用いたCLT直交層について、ブロックせん断試験、新たに提案する45度ブロックせん断試験、ねじり試験により接着せん断強度の評価を行った。ここで、45度ブロックせん断試験とは、Bettiら<sup>140)</sup>の研究を参考に本論文で提案する、JAS3079<sup>17)</sup>におけるプロ

ックせん断試験片を繊維方向に対して45度傾けて製作したものである。その結果、いずれの試験においても、せん断強度は高い順に、ヒノキ、カラマツ、スギ・トドマツとなり、使用した接着剤の違いによる顕著な強度の差はみられなかった。せん断強度を比較すると、ねじりせん断：ブロックせん断：45度ブロックせん断=1：0.45～0.57：0.90～0.94であり、ねじりせん断強度と45度ブロックせん断強度は近い値を示した。45度ブロックせん断試験は、CLT直交層のブロックせん断試験における課題であったローリングシア破壊が生じにくく、ブロックせん断試験と比較して接着層に近い位置で破壊する傾向がみられた。また、各試験において試験片の気乾密度とせん断強度には正の相関がみられたが、同程度の密度であるスギとトドマツが重なるように分布する一方、カラマツは同程度の密度であるヒノキよりもやや下側にプロットされる傾向がみられた。

## 6.2 提案および提言

一連の研究で得られた知見（6.1）を，現行の CLT の国内規格等に定められている評価方法と照合し，以下に提案および提言し，課題についても整理する。

[面外せん断試験における含水率の補正について]

現行の直交集成板の適正製造基準<sup>17)</sup>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おり，面外せん断強度についても補正の対象となっている。しかし，第 2 章の結果より，ラミナの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。このことより，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された。

[CLT の面外せん断試験について]

第 3 章の結果より，CLT の面外せん断強度については，試験方法（荷重法）や試験スパンによって得られる値が異なることが示された。しかし，第 3 章で示した各荷重法におけるスパン条件とせん断強度の関係より求めた実験式（Fig. 3.7）により，ラミナのローリングシア強度から，任意のスパン（JAS3079<sup>17)</sup>に規定されているスパン条件を含む）におけるせん断強度を推定できる可能性が示唆された。現行の基準強度（国交省告示 1324 号<sup>20)</sup>では，ラミナのローリングシア強度の値は幅方向のせん断強度を求める際のパラメータとして引用されるものの，面外せん断強度との関連付けはなされていない。ここで，実験式を一般化し，両者を関連付けることができれば，より合理的な設計が可能になる可能性がある。ただし，実験式の一般化にあたっては，層構成や製造条件（ラミナ寸法，幅はぎ接着の有無）が異なる場合について，追加の検証が必要である。

[促進劣化処理を行った CLT の面外せん断強度について]

第 4 章の結果より，屋外あるいは半屋外において CLT を長期間供用した場合，面外せん断強度（ラミナのローリングシア強度）の低下は接着層の劣化（接着性能の低下）に先立って生じることが示唆された。このことは，JAS3079<sup>17)</sup>における接着性能の評価から CLT の耐久性を予測するのが困難であることを示唆しており，両者は分けて評価，検証す

べきと考えられる。

[45度ブロックせん断試験について]

第5章で実施した45度ブロックせん断試験により得られるせん断強度は、CLTパネルの幅方向のせん断強度を求める際のパラメーターのひとつである<sup>20)</sup>、ねじりせん断強度に近い値を示し、ねじりせん断強度を近似的に求める試験方法として有用であると考えられる。国交省告示1324号<sup>20)</sup>において、CLTのねじりせん断強度は“告示内に規定された樹種別のねじりせん断強度の値”か、“調査研究等により適切に評価された値”を採用することとしているが、後者におけるねじりせん断強度の評価方法について、現行の国内規格（JAS3079<sup>17)</sup>など）では特に定められていない。EN16351<sup>11)</sup>では2021（令和3）年の改正時に、CLTパネルを45度方向に傾けて採取した短柱を圧縮することで、近似的にねじりせん断強度を求める方法が定められた。ただし、試験体（試験片）のサイズが小さく容量の小さい加力装置で試験が可能なこと、強度と木破率を同時に測定できる点において、本章で提案する45度ブロックせん断試験に利点がある。寸法効果の検証に関して課題が残るものの（5.2.4）、45度ブロックせん断試験が、接着せん断強度およびねじりせん断強度の評価方法として普及する可能性は大きいと考えられる。

### 6.3 結び

以上のように、本論文ではカラマツおよびトドマツ CLT を主な対象に、国産 CLT のローリングシア強度および面外せん断強度、接着せん断強度に関する多くの実験データを収集、解析した。その結果、現行の製造基準への提言（第 2 章）、5 層 5 プライ CLT におけるせん断強度とせん断スパンの関係を表す実験式の提示（第 3 章）、直交層の接着せん断強度の評価方法に関する提案（第 5 章）など、実用に即した提言および提案を行うことができた。

そのほか、ラミナのローリングシア試験（第 2 章）と直交層の接着せん断試験（第 5 章）といった、CLT 特有の要素試験を通じて、樹種の組織構造の違いが物理的な性質に影響を与えていることが示唆された。とりわけカラマツは、ローリングシア強度と気乾密度に相関が無い一方で、接着せん断強度と気乾密度には相関があり、特徴的な傾向がみられた。

本論文が、国産 CLT のさらなる応用、利用拡大を企図した研究の土台に、また、組織構造を踏まえた基礎研究の足掛かりとなれば幸甚である。



## 参考論文

### [第2章]

石原 亘, 川合慶拓, 高梨隆也, 宮崎淳子, 大橋義徳: 圧縮型せん断試験における国産針葉樹 CLT のローリングシア強度 樹種および含水率による影響, 木材学会誌 **68**(1), 36-42 (2022) .

### [第2章および第3章]

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) .

### [第4章]

石原 亘, 宮崎淳子, 高梨隆也, 大橋義徳, 土橋英亮, 兵野 篤: カラマツ及びトドマツ CLT の面外せん断強度 (第 2 報) 促進劣化処理がせん断強度及び接着性能に与える影響, 木材学会誌 **68**(2), 77-87 (2022) .

### [第5章]

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) .

## 引用文献

- 1) 農林水産省林野庁: 令和元年度森林・林業白書. 2020.
- 2) 国土交通省: 住宅着工統計. 2021.
- 3) 株式会社野村総合研究所 (NRI): 2040年の住宅市場と課題.  
<https://www.nri.com/jp/knowledge/report/lst/2020/cc/mediaforum/forum287/> 2021年6月10日参照.
- 4) 平成二十二年法律第三十六号: 公共建築物等における木材の利用推進に関する法律 (2010).
- 5) 農林水産省林野庁: 公共建築物木材利用促進法の改正について. 林野 **172**, 14-15 (2021).
- 6) 令和三年法律第七十七号: 公共建築物等における木材の利用の促進に関する法律の一部を改正する法律 (2021).
- 7) 宮武 敦: CLT・直交集成板の定義. 木材工業 **68**, 468-471 (2013).
- 8) 高梨隆也: Q&A 先月の技術相談から・CLTの日本農林規格について教えてください. 林産誌だより 2017年1月号, pp.11-12 (2017).
- 9) 武川朋子: 欧州におけるCLTの普及と使用例. 木材工業 **68**, 474-475 (2013).
- 10) Common Understanding of Assessment Procedure: Solid wood slab element to be used as a structural element in buildings. European Technical Assessments (ETA) (2005).
- 11) EN Standard 16351-2021: Timber structures -Cross laminated timber- Requirements. European Committee for Standardization (2021).
- 12) APA PRG 320-2019: Standard for Performance-Rated Cross-Laminated Timber. American National Standards Institute (ANSI) (2019).
- 13) 孕石剛志: CLTを木材工業の新メニューに. 木材工業 **68**, 472-473 (2013).
- 14) 一般社団法人日本CLT協会: 国内CLT製造企業一覧表.  
<https://clta.jp/wp-content/uploads/2021/09/Jas-Approved-CLT-Factory20210610.pdf> 2021年10

月 10 日参照.

- 15) 直交集成板の日本農林規格 (JAS). 農林水産省 (2013).
- 16) 直交集成板の適正製造基準 (第 2 版). 一般社団法人日本 CLT 協会 (2019).
- 17) JAS3079-2019: 直交集成板の日本農林規格. 農林水産省 (2019).
- 18) 平成 28 年国土交通省告示第 562 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 (2016).
- 19) 平成 13 年国土交通省告示第 1024 号: 特殊な許容応力度及び特殊な材料強度を定める件. 国土交通省 (2001).
- 20) 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).
- 21) 平成 28 年国土交通省告示第 561 号: 建築物基礎, 主要構造部等に使用する建築材料並びにこれらの建築材料が適合すべき日本工業規格又は日本農林規格及び品質に関する技術的基準を定める件 (平成 12 年建設省告示第 1446 号)の一部を改正する件. 国土交通省 (2016).
- 22) 平成 12 年建設省告示第 1446 号: 建築物基礎, 主要構造部等に使用する建築材料並びにこれらの建築材料が適合すべき日本工業規格又は日本農林規格及び品質に関する技術的基準を定める件. 建設省 (2000).
- 23) 昭和二十五年法律第二百一十号, 令和三年法律第四十四号による改正: 建築基準法第 37 条 (建築材料の品質). 国土交通省 (2021).
- 24) 北海道水産林務部: 道産 CLT の利用拡大に向けた推進方針 (平成 29 年 3 月).  
[https://www.pref.hokkaido.lg.jp/sr/rrm/02\\_riyousuisin/clt\\_indexi.html](https://www.pref.hokkaido.lg.jp/sr/rrm/02_riyousuisin/clt_indexi.html) 2021 年 10 月 10 日参照.
- 25) 内閣官房: CLT 活用促進のための政府一元窓口.  
<https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/cltmadoguchi/index.html> 2021 年 10 月 10 日参照.
- 26) 大橋義徳: 道産カラマツ CLT の効率的な製造技術と接合技術の開発. 林産試だより 2021

年 8 月号, p.1 (2021).

- 27) CLT 等新製品・新技術利用促進事業: CLT 実用化促進 (強度データの収集・分析) 成果報告書 (2015).

<http://www.ffpri.affrc.go.jp/pubs/various/documents/h25cltkyoudo.pdf> 2021 年 10 月 10 日参照.

- 28) CLT 等新製品・新技術利用促進事業: CLT 実用化促進 (長期挙動データの収集・分析) 成果報告書 (2015).

<http://www.ffpri.affrc.go.jp/pubs/various/documents/h25cltchouki.pdf> 2021 年 10 月 10 日参照.

- 29) CLT 等新製品・技術の開発促進事業: 中高層建築物等に係る技術開発の促進 (CLT 強度データの収集) 成果報告書 (2015).

<http://www.ffpri.affrc.go.jp/pubs/various/documents/h26cltkyoudo.pdf> 2021 年 10 月 10 日参照.

- 30) 高梨隆也, 大橋義徳, 松本和茂, 戸田正彦: 北海道産カラマツを用いた CLT の製造と性能評価 その 2 短期材料性能. 第 65 回日本木材学会大会研究発表要旨集, 東京, 2015, H17-P-F01 (CD-ROM).

- 31) 松本和茂, 大橋義徳, 高梨隆也: 北海道産トドマツを用いた CLT の性能評価 その 1 非破壊測定. 第 66 回日本木材学会大会研究発表要旨集, 名古屋, 2015, H28-P-F01 (CD-ROM).

- 32) 高梨隆也, 松本和茂, 大橋義徳: 北海道産トドマツを用いた CLT の性能評価 その 2 曲げ性能. 第 66 回日本木材学会大会研究発表要旨集, 名古屋, 2015, H28-P-F01 (CD-ROM).

- 33) 大橋義徳, 高梨隆也, 松本和茂: 北海道産トドマツを用いた CLT の性能評価 その 3 セン断性能. 第 66 回日本木材学会大会研究発表要旨集, 名古屋, 2015, H28-P-F01 (CD-ROM).

- 34) 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.

- 35) 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.
- 36) 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.
- 37) 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.
- 38) 工藤雄大, 中島史郎, 大橋義徳, 松本和茂, 宮武 敦, 亀山雄掙, 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.
- 39) 大橋義徳, 松本和茂, 宮崎淳子, 古田直之, 高梨隆也: 北海道産カラマツを用いた CLT の製造と性能評価 その3 長期曲げ性能. 第65回日本木材学会大会研究発表要旨集, 東京, 2015, H17-P-F02 (CD-ROM).
- 40) 大橋義徳, 松本和茂, 宮崎淳子, 古田直之, 高梨隆也: 北海道産トドマツを用いた CLT の長期曲げ性能. 第68回日本木材学会大会研究発表要旨集, 京都, 2018, D14-04-1630 (CD-ROM).
- 41) 高梨隆也, 大橋義徳, 石原 亘, 松本和茂: クリーブ関数によるカラマツ CLT のクリープ限度の推定. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造III, 2018, pp.351-352.
- 42) Takanashi, R., Ohashi, Y., Ishihara, W., Matsumoto, K.: Long-term bending properties of cross-laminated timber made from Japanese larch under constant environment. *J. Wood Sci.* **67**:65 (2021).
- 43) 高梨隆也, 大橋義徳, 石原 亘, 松本和茂: 北海道産木材を用いた CLT の材料性能データ整備. 日本木材加工技術協会年次大会講演要旨集 **37**, 広島, 2019, pp.7-8.
- 44) 高梨隆也: CLT の基準強度とは. 林産試だより 2020年11月号, pp.5-9 (2020).

- 45) 構造用集成材の日本農林規格 (JAS): 農林水産省 (2003).
- 46) 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).
- 47) 木材工業ハンドブック編集委員会編: 合板の性質.“木材工業ハンドブック (第 3 版)”, 東京, 丸善, 1982, p.58.
- 48) 合板の日本農林規格 (JAS): 農林水産省 (2014).
- 49) Li, X., Ashraf, M., Subhani, M., Kremer, P., Li, H., Anwar-Us-Saadat, M.: Rolling shear properties of cross-laminated timber (CLT) made from Australian Radiata Pine – An experimental study. *Structures* **33**, 423-432 (2021).
- 50) Gong, M., Tu, D., Li, L., Chui, Y. H.: 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.
- 51) Wang, Z., Fu, H., Gong, M., Luo, J., Dong, W., Wang, T., Chui, Y.H.: Planar shear and bending properties of hybrid CLT fabricated with lumber and LVL. *Constr. Build. Mater.* **151**, 172-177 (2017).
- 52) Wang, Z., Zhou, J., Dong, W., Yao, Y., Gong, M.: Influence of technical characteristics on the rolling shear properties of cross laminated timber by modified planar shear test. *Maderas. Cienc. Tecnol.* **20**(3) (2018).
- 53) Shahhosseini, S., Crovella, L.P., Smith, B.W.: Comparing the effect of presence of the knot and the size of the knot on the rolling shear properties in cross laminated timber (CLT) by modified planar shear test and FEM analysis. Proceedings of 16th World Conference on Timber Engineering (WCTE 2021), Santiago, Chile, August 9-12, 2021, p.7 (CD-ROM).
- 54) EN Standard 408-2010+A1-2012: Timber structures - Structural timber and glued laminated timber - Determination of some physical and mechanical properties. European Committee for Standardization (2012).

- 55) ASTM D 2718-00 (Reapproved 2006): Standard test methods for structural panels in planar shear (rolling shear). ASTM (2006).
- 56) 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).
- 57) Zhou, Q.Y., Gong, M., Chui, Y.H., Mohammad, M.: Measurement of rolling shear modulus and strength of cross laminated timber fabricated with black spruce. *Constr. Build. Mater.* **64**(14), 379-386 (2014).
- 58) Aicher, S., Christian, Z., Hirsch, M.: Rolling shear modulus and strength of beech wood laminations. *Holzforschung* **70**(8), 773-781 (2016).
- 59) 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.
- 60) 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).
- 61) Wang, R., Shi, J.J., Xia, M.K., Li, Z.: Rolling shear performance of cross-laminated bamboo-balsa timber panels. *Constr. Build. Mater.* **699**, 123973 (2021).
- 62) 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).
- 63) Li, M., Dong, W., Lim, H.: Influence of lamination aspect ratios and test methods on rolling shear strength evaluation of cross-laminated timber. *J. Mater. Civ. Eng.* **31**: 12,040193102019 (2019).
- 64) Sun, X., He, M., Li, Z.: Experimental investigation on the influence of lamination aspect ratios on rolling shear strength of cross-laminated timber. *Arch. Civ. Eng.* **22**: 22 (2022).
- 65) 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).
- 66) 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).
- 67) 構造用集成材の適正製造基準 (平成 25 年改正版): 公益財団法人日本合板検査会, (2013).
- 68) R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria (2021). <http://www.R-project.org/>. 2021 年 5 月 31 日参照.
- 69) 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.
- 70) 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).
- 71) 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).
- 72) 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).
- 73) 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).
- 74) 井道裕史, 長尾博文, 加藤英雄, 吉田徳之: ラミナ構成の異なる集成材のせん断試験 破壊形態とせん断強度. 木材学会誌 **55**(5), 316-321 (2009).
- 75) 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).
- 76) 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.
- 77) 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.
- 78) 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.
- 79) 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.
- 80) CLT 等新たな製品・技術の開発・普及事業: (CLT 強度データ収集) 成果報告書 (平成 28 年 3 月). <http://www.ffpri.affrc.go.jp/pubs/various/documents/h27cltkyoudo.pdf> 2022 年 2 月 15 日参照.
- 81) 都市の木質化等に向けた 新たな製品・技術の開発・普及事業: (CLT 強度データ収集) 成果報告書 (平成 29 年 3 月).  
<http://www.ffpri.affrc.go.jp/pubs/various/documents/h28cltkyoudo.pdf> 2022 年 2 月 15 日参照.
- 82) 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).
- 83) 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).
- 84) 公益財団法人日本住宅・木材技術センター編: I. 構造用木材の強度試験法. “構造用木材の強度試験マニュアル”, 東京, 2011, pp.18-19.
- 85) 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).

- 86) 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).
- 87) Yoshihara, H., Furushima, T.: Shear strength of wood measured by various short beam shear test methods. *Wood Sci. Technol.* **37**, 189-197 (2003).
- 88) 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).
- 89) 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).
- 90) 鈴木直之: 木材強度の寸法効果. 木材工業 **52** (6), 278-282 (1979).
- 91) Soltis, L.A., Rammer, D.R.: Shear strength of unchecked glued-laminated beams. *Forest Prod. J.* **44**(1), 51-57 (1994).
- 92) 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).
- 93) Rammer, D.R., Soltis, L.A., Lebow, P.K.: Experimental shear strength of unchecked Solid-Sawn Douglas-fir. *Forest Service FPL-RP-553*, Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Products Laboratory (1996).
- 94) Rammer, D.R., Lebow, P.K.: Shear strength of Solid-Sawn Douglas-Fir beams. *J. Mater. Civil Eng.* **9**(3), 130-138 (1997).
- 95) Pang, S., Young Jeong, G.: Effects of combinations of lamina grade and thickness, and span-to-depth ratios on bending properties of cross-laminated timber (CLT) floor. *Constr. Build. Mater.* **222**, 142-151 (2019).
- 96) 川台慶拓, 澤田 圭, 佐々木貴信, 佐々木義久: スパンを変えた道産 CLT の破壊性状と強度変化の検討. 日本木材学会北海道支部講演集 **51**, pp.36-38 (2019).

- 97) 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).
- 98) 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).
- 99) 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).
- 100) 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).
- 101) 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).
- 102) 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.
- 103) 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).
- 104) CLT 設計施工マニュアル編集委員会編: 材料と耐久性. “2016年版 CLT を用いた建築物の設計施工マニュアル”, 公益財団法人日本住宅・木材技術センター, 東京, 2016, pp.187-189.
- 105) 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.
- 106) 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).
- 107) 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).
- 108) 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).

- 109) 塔村真一郎: CLT の接着性能評価に関する課題. 木材工業 **68**(11), 506-511 (2013).
- 110) 宮本康太: 木質材料における木材接着研究の重要性. 木材学会誌 **61**(3), 191-195 (2014).
- 111) 石原 亘, 高梨隆也, 大橋義徳: 試験体幅が CLT の促進劣化処理による強度低下に及ぼす影響. 日本建築学会大会梗概集, 構造III, 関東, 2020, pp25-26.
- 112) 松尾瑠菜, 森 拓郎, 高梨隆也, 宮内輝久, 大橋義徳, 石原 亘: 薬剤処理及び促進劣化処理を施したスギ CLT の面外せん断性能. 第 70 回日本木材学会大会要旨集, 鳥取, 2020, D16-04-1515 (CD-ROM).
- 113) 矢永国良, 相原庸夫, 藤田和彦, 槌本敬大: 再生正角縦継ぎ材の製造と性能に関する研究 (第 2 報)工場端材を原料とした縦継ぎ材の性能評価. 第 56 回日本木材学会大会要旨集, 秋田, 2006, PJ016 (CD-ROM).
- 114) 大橋義徳, 戸田正彦, 藤原拓哉, 佐藤 司, 平井卓郎: 道産材を用いた木質 I 形梁の力学特性 (第 4 報) 種々の環境条件が力学特性に及ぼす影響. 木材学会誌 **56**(1), 9-16 (2010).
- 115) 作野友康: 木材・木質材料の接着耐久性と耐朽性. 木材保存 **19**(2), 50-57 (1993).
- 116) 木材工業ハンドブック編集委員会編: 接着, 塗装, 化学加工. “木材工業ハンドブック (第 3 版)”, 東京, 丸善, 1982, pp.432-433 .
- 117) 作野友康, 高谷政広, 梅村研二, 藤井一郎編: 木材接着の性能評価と耐久性. “木材接着の科学”, 滋賀, 海青社, 2010, pp.114-115.
- 118) 柳川靖夫, 増田勝則: 促進劣化処理および屋外暴露試験で評価した木材保存剤処理集成材の接着耐久性 (第 1 報) 促進劣化試験で評価した接着耐久性. 木材学会誌 **57**(4), 211-222 (2011).
- 119) 柳川靖夫, 増田勝則: 促進劣化処理および屋外暴露試験で評価した木材保存剤処理集成材の接着耐久性 (第 2 報) 屋外暴露試験で評価した接着耐久性および促進劣化試験との関係. 木材学会誌 **57**(5), 265-275 (2011).
- 120) 柳川靖夫: スギ集成材の 10 年間屋外暴露の結果 (第 1 報) せん断強度および木部破断率. 木材学会誌 **59**(5), 255-260 (2013).

- 121) 柳川靖夫: スギ集成材の 10 年間屋外暴露の結果 (第 2 報) セン断強度の分布形と低下速度. 木材学会誌 **60**(1), 28-34 (2014).
- 122) 柳川靖夫, 原田充祥: 7 種類の接着剤で作製したスギ集成材の屋外暴露試験 (第 1 報) セン断強度および木部破断率. 木材学会誌 **63**(1), 34-40 (2017).
- 123) 柳川靖夫, 和田 博, 満名香織: スギ集成材の 15 年屋外暴露後の接着性能. 木材工業 **73**(4), 145-150 (2018).
- 124) 枠組壁工法建築物設計の手引・構造計算指針編集委員会 (社団法人日本ツーバイフォー建築協会): 建築基準法第 37 条に規定する指定建築材料及び建築基準法施行規則第 8 条の 3 に基づく耐力壁の試験・評価方法. “枠組壁工法建築物構造計算指針”, 株式会社工業調査会, 東京, 2007, pp.200-207.
- 125) 宮崎淳子, 大橋義徳, 石原 亘, 田中修平, 二宗要一: 北海道産カラマツを用いた実大 CLT の最適な圧縮条件の検討. 第 67 回日本木材学会大会要旨集, 福岡, 2017, J19-13-1000 (CD-ROM).
- 126) Miyazaki, J., Ohashi, Y., Ishihara, W., Tanaka, S., Nishu, Y.: Bond quality of Cross-Laminated Timber Manufactured using emulsion polymer isocyanate adhesive. Proceeding of international conference on wood adhesives, Atlanta, (2017).
- 127) 宮本康太, 塔村真一郎, 宮武 敦, 井上明生, 平松 靖, 新藤健太: CLT (Cross laminated timber)の試作と接着性能の評価 (1)—評価方法の検討—. 日本木材加工技術協会年次大会講演・研究発表要旨集 **30**, 東京, 2012, pp.13-14.
- 128) 塔村真一郎, 宮本康太, 宮武 敦, 井上明生, 平松 靖, 新藤健太, 孕石剛志, 中島 洋, 濱井篤志, 植田成治: CLT (Cross laminated timber)の試作と接着性能の評価 (2)—製造条件の検討—. 日本木材加工技術協会年次大会講演・研究発表要旨集 **30**, 東京, 2012, pp.61-62.
- 129) 宮本康太, 塔村真一郎, 宮武 敦, 平松 靖, 新藤健太: 促進劣化試験及び屋内暴露試験における剝離の測定による CLT の接着性能評価. 木材工業 **74**(3), 104-109 (2019).

- 130) 塔村真一郎: 構造用木質材料に使用される接着剤の性能とその評価法. 木材学会誌 **62**(2), 27-41 (2016).
- 131) 石原 亘, 宮崎淳子, 大橋義徳: 低湿度環境に暴露したカラマツおよびトドマツ CLT の接着性能. 木材工業 **77**(1), 14-20 (2022).
- 132) 宮崎淳子, 中野隆人: 構造用集成材に使用される接着剤の低温耐久性. 第 53 回日本木材学会要旨集, 福岡, 2003, p.293.
- 133) Kim, H.K., Oh, J.K., Jeong, G.Y., Yeo, H.M., Lee, J.J.: Shear performance of PUR adhesive in cross laminating of red pine. *J. Korean Wood Sci. & Tech.* **41**(2), 158-163 (2013).
- 134) Choi, G.W., Yang, S.M., Lee, H.J., Kim, J.H., Choi, K.H., Kang, S.G.: A study on the block shear strength according to layer composition of and adhesive type of Ply-lam CLT. *J. Korean Wood Sci. & Tech.* **48**(6), 791-806 (2020).
- 135) Gong, Y., Wu, G., Ren, H.: Block shear strength and delamination Cross-laminated timber fabricated with Japanese larch. *BioResources.* **11**(4), 10240-10250 (2016).
- 136) 宮本康太, 塔村真一郎, 林誠二郎, 濱井篤志, 池田尊子: 木質構造材料用接着剤の空隙重点性能の評価. 第 65 回日本木材学大会要旨集, 東京, 2015, J18-08-1045 (CD-ROM).
- 137) 地下久美子, 小堀 光, 小島陽一, 鈴木滋彦, 宮本康太, 渋谷龍也, 塔村真一郎: 木材の繊維方向が接着性能に及ぼす影響—樹種, 木取りの影響について—. 第 65 回日本木材学大会要旨集, 東京, 2015, J18-08-1015 (CD-ROM).
- 138) 作野友康, 高谷政広, 梅村研二, 藤井一郎編: 木材接着の工程と影響する因子. “木材接着の科学”, 滋賀, 海青社, 2010, pp.84-85.
- 139) 中田 直: 直交集成板の日本農林規格の概要. 木材工業 **68**(11), 500-505 (2013).
- 140) Betti, M., Brunetti, M., Lauriola, M.P., Nocetti, M., Ravalli, F., Pizzo, B: Comparison of newly proposed test methods to evaluate the bonding quality of Cross-Laminated Timber (CLT) panels by mean of experimental data and finite element (FE) analysis. *Constr. Build. Mater.* **125**, 952-963 (2016).

- 141) Flaig, M., Blaß, H.J.: Shear strength and shear stiffness of CLT-beams loaded in plane. Proceeding of the International Council for Research and Innovation in Building and Construction, Working Commission W18 - Timber Structures, Vancouver, Canada, 2013, pp.243-258.
- 142) CLT 設計施工マニュアル編集委員会編: 材料と耐久性. “2016 年版 CLT を用いた建築物の設計施工マニュアル”, 公益財団法人日本住宅・木材技術センター, 東京, 2016, pp.190-191.
- 143) 中島昌一, 荒木康弘, 中島史郎, 新藤健太, 宮武 敦: CLT 面内せん断強度評価のための接着層ねじり試験. 第 66 回日本木材学大会要旨集, 名古屋, 2016 , H27-07-1445 (CD-ROM).
- 144) 川上敬介: 国産針葉樹による構造用 LVL の製造と接着 (その 2). 日本木材学会第 36 回木材接着研究会講演要旨集, 東京, 2015, pp.5-8.
- 145) 日本木材学会編: 木材の力学的性質. “木材科学実験書 1.物理・工学編”, 東京, 有限会社中外産業調査会, 1985, p.200.
- 146) 矢沢亀吉: 針葉樹材に於ける春材と秋材の比重並びに体積収縮率について. 岐阜大学農学部研究報告 2, 42-46 (1952).
- 147) Strickler, M.D.: Specimen designs for accelerated tests. *Forest Prod. J.* 14(1), 84-90 (1968).

## 謝辞

本論文の執筆にあたっては、非常に多くの方々からご指導、ご支援を頂きました。

まず、本論文の執筆にあたり、多大なるご指導を賜りました北海道大学大学院農学研究院の佐々木貴信教授に心より感謝申し上げます。また、懇切丁寧なご指導とご助言を賜りました、北海道大学大学院農学研究院の佐野雄三教授、澤田圭講師、小泉章夫元教授に厚く御礼申し上げます。

本論文で実施した実験の計画・遂行、データの解析については、(地独)北海道立総合研究機構森林研究本部林産試験場(以下、林産試験場)の上司、同僚の皆様にも多大なご協力を頂きました。特に、私が入庁以来、2022年現在まで所属している同試験場技術部・生産技術グループの皆様(伊藤洋一博士(部長)、中畠厚氏(前部長、現・同試験場企業支援部)、大橋義徳博士(主幹)、松本和茂氏(前主幹、現・同試験場企業支援部)、土橋英亮氏、宮崎淳子博士、古田直之博士、松本久美子氏、中村神衣氏、川合慶拓氏(現・同試験場性能部))には、本論文(および参考論文)の執筆にあたって、業務の調整、アドバイス、応援など、多くの面からサポートして頂きました。

大橋義徳博士には各章における実験の指導、監修のほか、CLTをはじめとする木質材料に関する豊富な知見を丁寧にご教授頂きました(なお、博士号の取得を目指す契機は、同博士によるところが大きく、重ねて感謝申し上げます)。高梨隆也博士には、各章における実験データの解析にあたって、多大なるご助力を頂いたほか、統計解析等における幅広い知識をご教授頂きました(私の理解力が低く、多々のご迷惑をおかけしたかと思いますが)。宮崎淳子博士には、第2章・第5章において、CLTの接着に関する技術指導をして頂いたほか、第4章の執筆の際には、木材の接着科学に関する多くの知見をご教授頂きました。土橋英亮氏には、第4章における木材乾燥装置を使用した促進劣化処理において、多くのアドバイスを頂きました。川合慶拓氏には、第2章の国産針葉樹種のロ



ローリングシア試験の実施において、多大なご協力を頂きました。

林産試験場においては、自身の所属部署以外の方々にも、多くのご協力を頂きました。戸田正彦博士（同試験場性能部）には、第2章の流通寸法ラミナにおけるローリングシア試験において有益な助言をして頂きました。第3章における試験体の調湿においては、朝倉靖弘博士（同試験場技術部（製品開発グループ））、伊佐治信一博士（同試験場性能部）のご協力を頂きました。第2章～第5章に関わる参考論文の投稿にあたっては、松本和茂氏（同試験場企業支援部）、前田典昭氏（同試験場性能部、2020年度ご退職）に場内査読を担当して頂きました。平館亮一氏（同試験場企業支援部）には、各章の試験において、技術職員の皆様（技術職員の皆様については、以下に改めて謝辞を記します）によるサポート体制の調整をして頂きました。

そして、林産試験場企業支援部・研究調整グループに所属する技術職員の皆様（中川伸一氏、横幕辰美氏、北澤康博氏、清水光弘氏、小川尚久氏、東数高氏、岡安孝弘氏、加藤哲朗氏、住吉和希氏、山村明光氏、佐久間澄夫氏（2018年度ご退職）、栗林茂氏（2018年度ご退職））には、各章における試験の実施にあたり、計り知れないご協力を頂きました。内規で、投稿論文等での連名ができないのが心苦しい限りです。第3章における試験体の製作には、佐久間澄夫氏（2018年度ご退職）、第4章における促進劣化処理については、中川伸一氏に多大なご協力を頂きました。第2章、第5章における小型CLTの接着作業では、準備作業を含め、北澤康博氏、住吉和希氏に多大なご協力を頂きました。第5章における、せん断試験片の製作にあたっては、岡安孝弘氏に手厚い支援を頂きました。精度の高い小試験片の製作は、氏の高水準の技量なくしては不可能でした。各試験における含水率試験片の製作、測定には加藤哲朗氏、小川尚久氏、東数高氏はじめ、同グループの多くの職員にご協力を頂きました（なお、以上に記載した、林産試験場職員諸氏の所属部署は、2022年7月現在のものです。また、ご退職年度は、定年後の再雇用期間が終了した年度としました）。

また、林産試験場・契約職員の皆様（山田織江氏、松原慎吾氏、宮本孝志氏）にも、試

験時の実施にあたってご協力を頂きました。特に、山田織江氏には、ほぼ全ての試験の実施にあたって、(涙ぐましいほどの)甚大なるサポートをして頂きました。氏の存在なくして、膨大なデータの収集はできませんでした。改めて感謝申し上げます。

このほか、林産試験場の若手の研究職員の皆様、同試験場に勤務する行政職員の皆様には、研究のモチベーションの維持を含め、身に余る応援を頂きました。

本論文では、林産試験場以外の研究機関の先生方にも、多くの助言、支援を頂きました。北海学園大学の植松武是教授には、第3章のせん断試験方法の解釈にあたり、多くのご助言、また貴重な資料の紹介をして頂きました。第4章のSEM画像の撮影にあたっては、旭川工業高等専門学校 of 兵野篤助教にご指導を、古崎睦教授、富樫巖名誉教授にご協力を頂きました。第5章のねじり試験については、(国研)建築研究所の中島昌一博士に、試験方法の丁寧なご指導をして頂いたほか、関連する資料の紹介をして頂きました。また、同試験の実施にあたり、(国研)森林研究・整備機構(森林総研)の宮武敦氏、新藤健太博士に多大なご協力を頂きました。

このほか、北海道大学農学部木材工学研究室の学生諸君には、若く澆漓としたエネルギーを分けてもらい、研究をする上での良い刺激となりました。

最後に、精神的なサポートをしてくれた、友人、家族、本論文での研究に関わって頂いた全ての方々に、改めて深甚なる謝意を表します。