

平成 25 年度 林野庁補助事業  
木材利用技術整備等支援事業

CLT の普及のための総合的データの  
収集・蓄積および検討  
成果報告書

平成 26 年 3 月  
日本 CLT 協会

## 目次

はじめに .....	1
第1章 事業概要 .....	4
1. 1 事業の内容 .....	4
第2章 .....	6
2. 1 試験体概要 .....	6
2. 2 面外曲げ .....	11
2. 3 面外曲げクリープ .....	19
2. 4 面内曲げ .....	25
2. 5 水平せん断 .....	31
2. 6 めり込み .....	39
2. 7 圧縮性能 .....	49
2. 8 引張り0° .....	61
2. 9 ラミナ曲げ .....	65
あとがき .....	75



## はじめに

森林・林業基本計画に記載された、わが国の国産材使用量の目標達成のためには、これまでより木材使用量を増加させ、かつ、その主要な原料を国産材化するという二段階の方策が必要である。

クロス・ラミネイティド・ティンバー（CLT）は欧州で開発された製品で、ひき板（ラミナ）を並列することで単層を構成し、その単層の軸方向を直交させながら積層接着した集成加工材料である。この製品を床・壁に使用することで、木材を多用する新しい木造建築構法を実現できる。また、大径化する原木を歩留まり良く製材する上で生産される大量のひき板を利用することができる。また、利用上の観点からは、スギ等の有効利用が可能で、大規模建物、中層建物への木材利用の拡大が図れると期待されていたが、CLT は新種の製品であることから、わが国の建築基準に合致しないため、非常に限られた状況でしか使えない状況にあった。

これらのことから、CLT を対象とした材料規格の整備に対する要望が高まり、直交集成板の日本農林規格（JAS 規格）が異例の速度で制定された。しかし、現時点では、新しい JAS 規格に規定されたひき板の等級区分方法やその組合せに基づいて製造された直交集成板の強度性能に関するデータはほとんどない。したがって、JAS 規格の規定内容の妥当性や JAS 規格に従った適正な製造方法、製品性能に関する実用的知見は存在せず、現状のままでは、試行錯誤による知見の蓄積を図る必要が予測される。すなわち、今後、国内で工業的生産を開始するにあたり、多大な労力と時間を要することが危惧されている。

そこで、日本 CLT 協会では、スギ等国産材を用いて JAS 規格に基づいて製造した直交集成板の強度性能評価を実施することを計画し、森林総合研究所に研究計画の立案、各種強度試験実施への監修を要請し、他の参画機関とともに強度試験の実施を委託し、本事業を推進することとした。

本事業では、直交集成板の各種強度性能に関する基本的な特性値を明らかにすることを目的とする。具体的な検討項目は、以下の通りである。

1. 面外曲げ性能
2. 面外曲げ弾性係数に対するクリープの調整係数
3. 面内曲げ性能
4. 水平せん断性能
5. めりこみ性能
6. 圧縮性能
7. 引張性能

本事業によって得られた成果を活用することで、国産材ラミナによる直交集成板を構造的に利用するためのデータ整備が進み、直交集成板の普及が加速され、新しい材料である直交集成板の性能評価技術を開発することができる。さらに、材料規格の整備等を通じて直交集成板の実用化を促進し、国産材利用拡大につながるものと考えられる。

本研究の重要性は、国産材を用いた直交集成板の製造および評価技術を確立し、直交集成板の JAS 規格の妥当性の検証と当該 JAS 規格に基づく適正製造方法の確立が実現すれば、建築法規制の少ない公共建築物や木造住宅への国産材の需要拡大が期待できると共に木造住宅の安全性の向上に資することができ、さらに中高層木造建築物実現への足がかりとなる。また現在クロス・ラミネイティド・ティンバーの国際規格（ISO 規格）制定の動きがあるため、得られた成果は ISO 規格に提案することも可能である。

得られた成果のうち、直交集成板の製造上の影響因子と各種性能との関係に関するデータについては製品の製造者及び認定評価機関に引き渡すと共に、規格の改正・運用に関する各種委員会等に提供していく。また、強度性能に関するデータについては建築物の設計

者に、技術資料として提供する。さらに、ISO 規格案として提案することで、国際的な技術開発にも貢献することができる。

本事業で検討を行う直交集成板は、建築物の構造用途で使用することを目的とした木質材料である。建築基準法第 37 条においては、「建築物の基礎、主要構造部その他安全上、防火上又は衛生上重要である政令で定める部分に使用する木材、鋼材、コンクリートその他の建築材料として大臣が定めるもの」は指定建築材料として規定されている。指定建築材料が満たすべき性能については、JIS 規格または JAS 規格を引用する形で各規格の要求性能を満たすことが指定されている。CLT の品質を担保する材料規格は直交集成板の JAS 規格として、平成 25 年 12 月 20 日に制定された。しかしながら、現時点では建築基準法上の位置付けはなされておらず、一般的な構造材料として使用するための方策は整備されていない。

そこで、以下、指定建築材料に関する技術的基準を元に、CLT を構造材料として使用するために要求される可能性がある性能の項目について検討する。

現在、指定建築材料の対象となる木質材料は、木質接着成形軸材料（接着剤を用いて単板又はストランドを成形した軸材料＝PSL および OSL）、木質複合軸材料（製材、集成材、木質接着成形軸材料その他の木質材料を接着剤を用いて複合した軸材料＝I ビーム）、木質断熱複合パネル（平板状の有機系発泡材の両面に構造用合板その他これに類するものを接着した材料＝フォームコアパネル）、木質接着複合パネル（木材で組まれた枠組に構造用合板その他これに類するものを接着した材料＝ストレススキンパネル）の 4 種である。これらに対して、同告示に引用されている既存の材料規格は、木質接着成形軸材料に相当する構造用単板積層材の JAS 規格のみである。

その他の材料規格が存在しない材料に関しては、平成 12 年建設省告示 1446 号「建築物の基礎、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」に定められた項目について、同告示の試験方法に基づいてその性能を測定し、国土交通大臣による認定を受ければ使用することが可能となる。本事業で対象とする直交集成板は、その用途としては、木質断熱複合パネル、木質接着複合パネルに類似していると考えられる。そこで、同告示において、木質断熱複合パネル、木質接着複合パネルの両材料に要求される性能をみると、以下の 13 項目である。

1. 寸法及び曲がりの基準値
2. 各部の品質（接着剤の同等性含む）
3. 面内圧縮性能の基準値
4. 面外曲げ性能の基準値
5. むりこみの応力の生ずる部分に用いる場合は、むりこみ強さの基準値
6. せん断の応力の生ずる部分に用いる場合は、せん断性能の基準値
7. 温度による著しい変形のおそれがある部分に用いる場合にあつては、耐熱性能の基準値
8. 湿潤状態となるおそれのある部分に用いる場合は、曲げ強さ及び曲げ弾性係数に対する含水率の調整係数
9. 面内圧縮強さ、面外曲げ強さ、むり込み強さに対する荷重継続時間の調整係数
10. 曲げ弾性係数に対するクリープの調整係数
11. 面内圧縮強さ、面外曲げ強さ及び曲げ弾性係数、むり込み強さに対する事故的な水掛りを考慮した調整係数
12. 接着耐久性に関する強さの残存率が、それぞれ 0.5 以上であること
13. 防腐処理による力学特性値の低下率及び防腐処理に用いる木材防腐剤の名称

同告示は、基本的な性能として、曲げ、せん断、むりこみを挙げ、これらの性能に対し

て、実験的に求めた強度・弾性係数の統計的下限値を算出し、含水率・荷重継続時間・クリープの各因子の影響を調整係数により定量化することによって最終的な値を導出しようとするものである。試験体は、材料の全体を代表するように採取することとしており、製品内・製品間の物性の変動を考慮すると、試験体の採取方法には工夫が必要となる。曲げ以外の性能に関しては、合理的な方法によって曲げ性能の調整係数を適用できることが確認された場合には、曲げ性能における各調整係数を用いてよいこととしている。また、性能の基準値を定めているものは、項目 10 の接着耐久性に関する強さの残存率のみであり、その他の項目では、製造者が基準値を定めて宣言する形となっている。なお、防腐処理の効力に関する要求事項は同告示には定められておらず、他の制度、例えば(財)日本住宅・木材技術センターの AQ 認証制度等による保証が必要となるが、有効な防腐処理が施されている場合に、構造材料として要求される性能が、無処理の材料に対してどれだけ低下するかを数値で示すことが要求されている。

一方、2007 年枠組壁工法建築物構造計算指針では、材料の許容応力度および弾性係数の算出は長期の場合、下式によることとされている。

使用環境 I(20℃, 95%RH) :  $F_A=2/3 \times F \times K_{1-1} \times K_2$ ,  $E_A=E \times K_{a-1} \times K_b$

使用環境 II(20℃, 85%RH) :  $F_A=2/3 \times F \times K_{1-2} \times K_2$ ,  $E_A=E \times K_{a-2} \times K_b$

使用環境 III(20℃, 65%RH) :  $F_A=2/3 \times F \times K_2$ ,  $E_A=E \times K_b$

ここで、

RH : 相対湿度、 $F_A$  : 長期許容応力度、 $2/3$  : 安全率、 $F$  : 基準強度、 $K_{1-1}$  : 使用環境 I における含水率に係る強度調整係数、 $K_{1-2}$  : 使用環境 II における含水率に係る強度調整係数、 $K_2$  : 荷重継続時間に係る強度調整係数、 $E_A$  : 長期の応力に対する弾性係数、 $E$  : 基準弾性係数、 $K_{a-1}$  : 使用環境 I における含水率に係る剛性調整係数、 $K_{a-2}$  : 使用環境 II における含水率に係る剛性調整係数、 $K_b$  : クリープに係る剛性調整係数。

上式の概念は、材料のバラツキを考慮して下限値を算出可能な試験体数を用いた測定結果を元に、初期の強度・弾性係数を求め、施工時の降雨等の影響と使用される環境毎の長期使用時の性能低下を勘案し、安全を確保することである。

本事業では、直交集成板の各種強度性能に関する基本的な特性値を明らかにすることを目的としており、本事業で対象とした性能項目を上記の要求項目に当てはめると、3~6、9、10 について検討したものとなる。さらに、試験体の寸法、採取方法が性能に与える影響についても考察したものである。また、本事業で採用した測定方法は直交集成板の JAS 規格に準拠しており、同 JAS 規格に規定がない項目については、上述の告示・指針に引用されている方法に可能な限り準ずるよう配慮したものである。

## 第1章 事業概要

### 1.1 事業の内容

事業を進めるにあたって、「CLTの普及のための総合的データの収集・蓄積および検討」委員会等を設置し、調査や検討を行った。

#### 1.1.2 事業実施スケジュール

	2013年 7月 8月 9月	10月 11月 12月	2014年 1月 2月 3月
委員会	★7/29 第1回委員会	★12/9 第2回委員会	★2/27 第3回委員会
試験			
試験体製造	製造(Mx60,S30)	製造(Mx90、120)	
面外曲げ 0°		試験 @北林産試	
面外曲げ 90° (クリープ)			試験 @広島林試
面内曲げ 0°		試験 @北林産試	
水平せん断		試験 @北林産試	
めり込み		試験 @北林産試	
圧縮			試験 @森林総研・建研
引張 0°		試験 @森林総研	
ラミナ曲げ			試験 @広島林試
その他			報告書作成

1. 1. 3 CLT の普及のための総合的データの収集・蓄積および検討」委員会委員名簿

(敬称略)

委 員	宮武 敦	(独)森林総合研究所 複合材料研究領域 チーム長
	中島 史郎	(独)建築研究所 建築生産研究グループ 上席研究員
	渋沢 龍也	(独)森林総合研究所 複合材料研究領域 複合化研究室長
	大橋 義徳	(独)北海道立総合研究機構 森林研究本部 林産試験場 技術部 生産技術 G 研究主任
	藤田 和彦	広島県立総合技術研究所 林業技術センター 林業研究部 副部長
	野沢 浩二	広島県立総合技術研究所 林業技術センター 林業研究部
協力委員	門田 留美	(株)河本組 設計部長
	高畑 啓一	林野庁木材産業課 木材製品技術室課長補佐
	青井 秀樹	(独)森林総合研究所 企画部木材利用動向分析担当 チーム長
	小木曾順子	(独)森林総合研究所
事 務 局	孕石 剛志	日本 CLT 協会
	中島 洋	〃
	正木 祥子	〃



## 第2章

### 2. 1 試験体概要

#### 2. 1. 1 強度等級

JAS 規格案に則り製造された異等級構成 Mx60 (外層スギ・内層スギ)、Mx90 (外層カラマツ・内層スギ)、Mx120 (外層ヒノキ・内層スギ)、同一等級構成 S30 とした。

#### 2. 1. 2 ラミナ構成

5層5プライおよび7層7プライとした。

#### 2. 1. 3 ラミナの調達および選別条件

連続式グレーディングマシンにより測定された曲げヤング係数(ラミナ1枚毎の平均値)を用いて、表 2.1-1 に示す条件で選別した。

表 2.1-1 ラミナの選別基準と樹種

ラミナ等級	選別条件 ヤング係数下限	枚数	樹種
M120	10.0kN/mm <sup>2</sup> 以上		ヒノキ
M90	7.5kN/mm <sup>2</sup> 以上		カラマツ
M60	5.0kN/mm <sup>2</sup> 以上		スギ
M30	2.5kN/mm <sup>2</sup> 以上		スギ

#### 2. 1. 4 CLT 製造条件

##### (1) フィンガージョイント条件

フィンガーの形状は、フィンガー長：15.0mm、ピッチ：3.8mm、スカーフ傾斜比：1/12、先端厚さ：0.7mm、嵌合度：0.1mm とし、接着剤には水性高分子イソシアネート系樹脂接着剤を用いた。

##### (2) 積層接着条件

水性高分子イソシアネート系樹脂接着剤を塗布量 200~250kg/m<sup>2</sup>にてグルースプレッダ一面塗布方式で塗布し、大板プレス (2.7m×6.0m：銘建工業株式会社) を用いて行った。圧縮圧力 0.8MPa、圧縮時間約 40 分で積層方向の圧縮を行った。ラミナの幅はぎは行っていない。

## 2. 1. 5 大板の作成と試験体の採材

試験体を切り出すために製造した大板 CLT の強度等級とそのラミナの組合せ、層構成及び大板の寸法を試験体番号毎に表 2.1-2 に示す。試験体を切り出した際の採材パターンについては後述する。

表 2.1-2 大板 CLT の概要と大板番号

等級	ラミナ組合せ	層構成	寸法(m)	大板番号	採材パターン
S30	外層:スギM30 内層:スギM30	5層5プライ	2.4×4.0	A169	4
				A170	
		7層7プライ	2.4×6.0	A184	9
				A185	
Mx60	外層:スギM60 内層:スギM30	5層5プライ	2.4×4.0	A171	1
				A172	
				A173	
				A174	
				A175	2
				A176	
			2.4×4.0	A177	1
				A178	
				A179	
				A180	
			2.4×6.0	A181	2
				A182	
				A183	3
				A183	
2.4×6.0	A188	8			
	A189				
	A190				
7層7プライ	2.4×6.0	A186	9		
		A187			
Mx90	外層:カラマツM90 内層:スギM30	5層5プライ	2.4×4.0	A204	4
				A205	
		7層7プライ	2.4×6.0	A206	9
				A207	
Mx120	外層:ヒノキM120 内層:スギM30	5層5プライ	2.4×6.0	A208	8
				A209	
			2.4×4.0	A210	6
				A211	
				A212	
				A213	
		7層7プライ	2.4×6.0	A214	9
				A215	

試験項目毎の試験体数を表 2.1-3 に示す。

試験項目は、面外曲げ、水平せん断、めり込み試験については全仕様の強軸・弱軸を対象に、また、面外曲げクリープ、圧縮（短柱・座屈）、引張り、面内曲げについては、Mx60 と Mx120 を中心に試験を実施した。

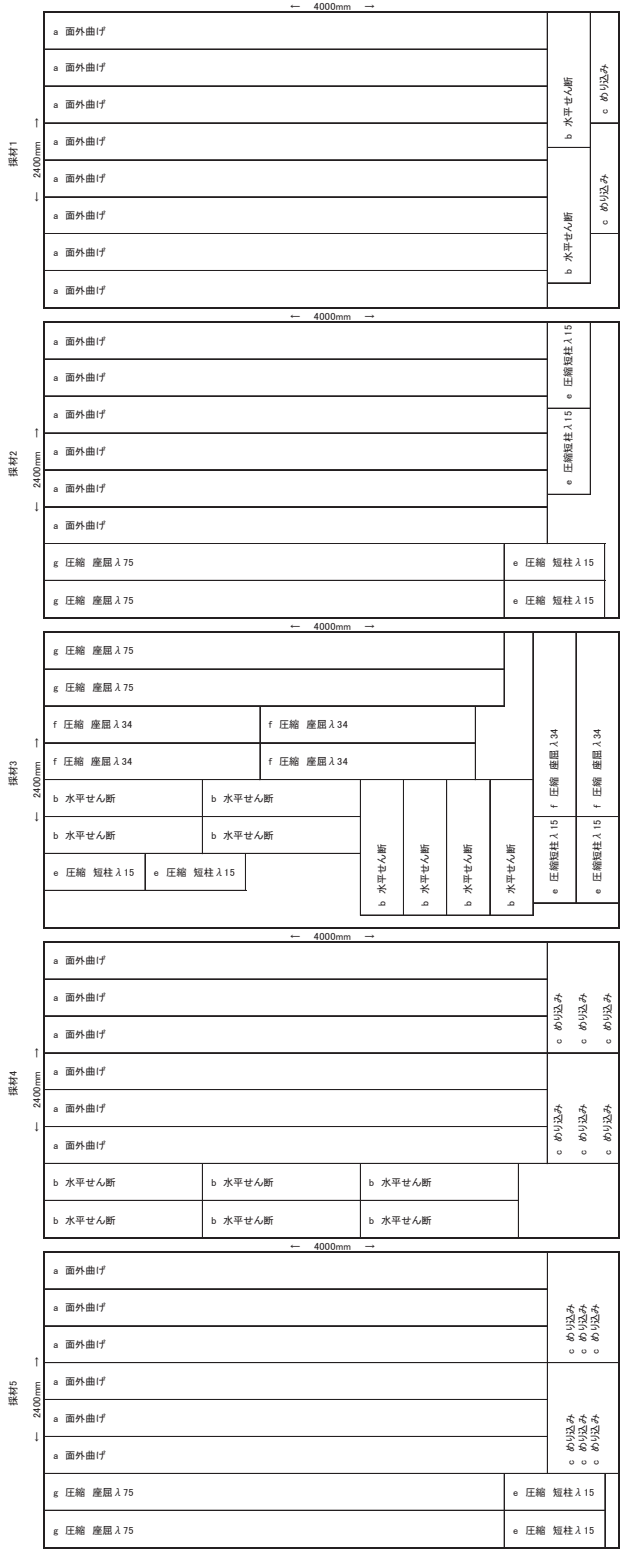
表 2.1-3 試験項目と試験体数

[1] 5層5グライ 試験体		厚	幅	長さ	強軸 試験体数				弱軸 試験体数				合計 本数
記号	試験内容				スギ	スギ	カラマツ/スギ	ヒ/キ/スギ	スギ	スギ	カラマツ/スギ	ヒ/キ/スギ	
					S30	Mx60	Mx90	Mx120	S30	Mx60	Mx90	Mx120	
a	面外曲げ	150	300	3,450	A170(6)	A171(8) A172(8) A173(8) A174(8) A175(8) A176(6)	A204(6)	A211(6)	A169(6)	A177(8) A178(8) A179(8) A180(8) A181(8) A182(6)	A205(6)	A212(6)	68
a'	面外曲げ クリープ	150	300	3,450									60
b	水平せん断	150	300	1,050	A170(6)	A178(2) A179(2) A180(2) A181(2) A183(4) A188(2) A189(2)	A204(6)	A208(2) A209(2) A210(2)	A169(6)	A171(2) A172(2) A173(2) A174(2) A175(2) A183(4) A190(2)	A205(6)	A213(6)	68
c	めり込み	150	150	900	A170(6)	A177(2) A178(2) A179(2) A180(2) A181(2)	A204(6)	A212(6)	A169(6)	A171(2) A172(2) A173(2) A174(2) A175(2)	A205(6)	A211(6)	48
e	圧縮・短柱 λ 15	150	300	650		A176(2) A182(2) A183(2)		A210(4) A211(2)		A176(2) A182(2) A183(2)		A210(2) A212(2) A213(2)	24
f	圧縮・中間柱 λ 34	150	300	1,474		A183(2) A188(2) A189(2)		A208(2) A209(2) A210(2)		A183(4) A190(2)		A210(6)	24
g	圧縮・中間柱 λ 75	150	300	3,251		A176(2) A188(2) A189(2)		A208(2) A209(2) A211(2)		A182(2) A183(2) A190(2)		A212(2) A213(4)	24
h	引張り	150	300	6,000		A188(3) A189(3)		A208(3) A209(3)					12
i	面内曲げ	150	300	6,000		A188(3) A189(3)		A208(3) A209(3)		A190(6)			18
j	圧縮・短柱 λ 10	150	300	434				A210(6)					6
k	圧縮・短柱 λ 20	150	300	867				A210(6)					6

[2] 7層7グライ 試験体		厚	幅	長さ	強軸 試験体数				弱軸 試験体数				合計 本数
記号	試験内容				スギ	スギ	カラマツ/スギ	ヒ/キ/スギ	スギ	スギ	カラマツ/スギ	ヒ/キ/スギ	
					S30	Mx60	Mx90	Mx120	S30	Mx60	Mx90	Mx120	
a	面外曲げ	210	300	4,725	A184(6)	A187(6)	A206(6)	A214(6)	A185(6)	A186(6)	A207(6)	A215(6)	48
b	水平せん断	210	300	1,470	A184(6)	A187(6)	A206(6)	A214(6)	A185(6)	A186(6)	A207(6)	A215(6)	48
c	めり込み	210	300	1,470	A184(6)	A187(6)	A206(6)	A214(6)	A185(6)	A186(6)	A207(6)	A215(6)	24

注 A○○○は大板番号、括弧内の数値は採材した本数

採材パターンについて下記の図 2.1-1 に示す。



採材パターン 1  
A171、A172、  
A173、A174、  
A175、A177、  
A178、A179、  
A180、A181

採材パターン 2  
A176、A182

採材パターン 3  
A183

採材パターン 4  
A169、A170、  
A204、A205

採材パターン 5  
A211、A212

採材6 2400mm	4000mm				採材6 2400mm	
	J 圧縮短柱λ10	J 圧縮短柱λ10	J 圧縮短柱λ10	e 圧縮短柱λ15		f 圧縮 産屈λ34
	J 圧縮短柱λ10	J 圧縮短柱λ10	J 圧縮短柱λ10	e 圧縮短柱λ15		
	k 圧縮短柱λ15	k 圧縮短柱λ15				f 圧縮 産屈λ34
	k 圧縮短柱λ15	k 圧縮短柱λ15				f 圧縮 産屈λ34
	k 圧縮短柱λ15	k 圧縮短柱λ15				f 圧縮 産屈λ34
b 水平せん断	e 圧縮短柱λ15	f 圧縮 産屈λ34		e 圧縮短柱λ15	f 圧縮 産屈λ34	
b 水平せん断	e 圧縮短柱λ15	f 圧縮 産屈λ34		e 圧縮短柱λ15	f 圧縮 産屈λ34	

採材パターン 6  
A210

採材7 2400mm	4000mm				採材7 2400mm	
	e 圧縮 産屈λ75					f 圧縮 産屈λ34
	e 圧縮 産屈λ75					
	e 圧縮 産屈λ75					
	e 圧縮 産屈λ75					
	b 水平せん断	b 水平せん断	b 水平せん断	e 圧縮短柱λ15		
b 水平せん断	b 水平せん断	b 水平せん断	e 圧縮短柱λ15			

採材パターン 7  
A213

採材8 2400mm	6000mm				採材8 2400mm	
	i 面内曲げ					f 圧縮 産屈λ34
	h 引張り					
	i 面内曲げ					b 水平せん断
	h 引張り					
	i 面内曲げ					
h 引張り						
e 圧縮 産屈λ75		f 圧縮 産屈λ34	b 水平せん断			
e 圧縮 産屈λ75		f 圧縮 産屈λ34	b 水平せん断			

採材パターン 8  
A188、A189、  
A190、A208、  
A209

採材9 2400mm	6000mm				採材9 2400mm	
	a 面外曲げ					c めり込み
	a 面外曲げ					c めり込み
	a 面外曲げ					c めり込み
	a 面外曲げ					c めり込み
	a 面外曲げ					c めり込み
b 水平せん断	b 水平せん断	b 水平せん断				
b 水平せん断	b 水平せん断	b 水平せん断				

採材パターン 9  
A184、A185、  
A186、A187、  
A206、A207、  
A214、A215

図 2.2-1 試験体の採材パターン図および対象大板

2. 1. 6 ラミナの強度性能試験

試験体製造に用いた 4 つの等級区分ラミナ (M120 : ヒノキ、M90 : カラマツ、M60 : スギ、M30 : スギ) から通しラミナおよびフィンガージョイントラミナを各 30 枚採取し、曲げ試験を行った。

## 2. 2 面外曲げ

### 2. 2. 1 目的

JAS のラミナ構成に基づいて製造された国産 CLT の面外曲げ特性を明らかにすることを目的として、スギ・カラマツ・ヒノキを用いた CLT の実大面内曲げ試験を行い、外層ラミナの繊維方向（強軸・弱軸）および強度等級，積層数と曲げ特性との関係について検討を行った。

### 2. 2. 2 試験体と試験方法

ラミナの組合せは JAS に準じて，同一等級構成 1 種類（強度等級 S30）と異等級構成 3 種類（強度等級 Mx60, Mx90, Mx120）とした。いずれも内層に用いるラミナは M30 以上のスギとし，外層に用いるラミナは S30 では M30 以上のスギ，Mx60 では M60 のスギ，Mx90 では M90 のカラマツ，Mx120 では M120 のヒノキとした。ラミナの断面寸法は厚さ 30×幅 110mm とした。CLT の断面構成は 5 層 5 プライ（厚さ 150mm）および 7 層 7 プライ（厚さ 210mm）の 2 種類とした。ラミナのたて継ぎと積層接着には水性高分子イソシアネート系接着剤を用いたが，ラミナの幅はぎ接着はしなかった。曲げ試験体（幅 300mm，長さは厚さの 23 倍）は，1 枚の CLT 大板（短辺 2.4×長辺 4～6m）から 6 体ずつ採取したが，5 層 Mx60 のみ大板 2 枚から 8 体ずつ計 16 体を採取した。

曲げ試験は，実大木材強度試験機（（株）東京衡機製造所製，最大能力 200kN）を用いて行った。試験は，直交集成板の JAS に準じて行い，加力方式は 3 等分点 2 点荷重，曲げスパンは試験体厚さの 21 倍とし，5 層 5 プライでは 3150mm，7 層 7 プライでは 4410mm とした。加圧板幅は支点部および載荷部ともに 200mm とした。加力速度は強軸試験体では 6mm/分，弱軸試験体では 8mm/分とした。試験体の両側面中央部において，スパン中央のたわみ量を測定するとともに，ヨークを用いて荷重点間スパンに対する相対たわみ量を測定し，両側面の平均値をそれぞれのたわみ量とした。加力条件を図 2.2-1 に，試験の様子を写真 2.2-1 に示す。曲げ試験終了後の試験体の非破壊部から含水率測定用の試験片を切り出し，全乾重量法によって含水率を測定した。

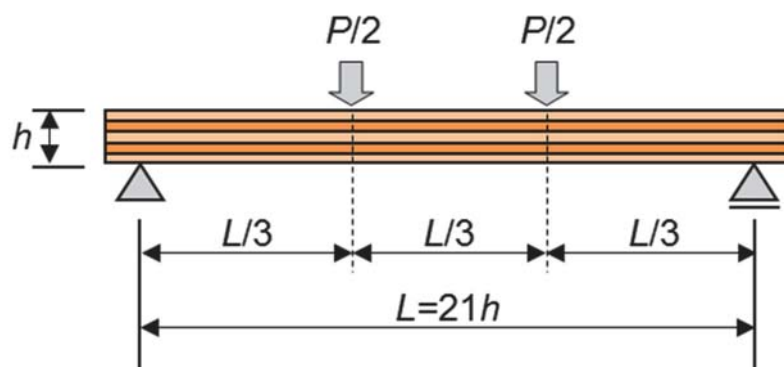


図 2.2-1 面外曲げ試験の加力条件



写真 2.2-1 面外曲げ試験の様子

最大荷重  $P_{\max}$  から曲げ強さ  $f_b$  を，比例域における荷重とスパン中央たわみの関係から見かけの曲げヤング係数  $E_m$  を，比例域における荷重とヨーク相対たわみの関係から真の曲げヤング係数  $E_b$  を，次式により算出した。

$$f_b = \frac{3P_{\max} \times s}{bh^2} \quad E_m = \frac{\Delta P \times s(3L^2 - 4s^2)}{\Delta \delta \times 4bh^3} \quad E_b = \frac{\Delta P \times 3sy^2}{\Delta \delta_y \times 4bh^3}$$

ここで、  
 $P_{\max}$  : 最大荷重  
 $L$  : スパン  
 $s$  : 支点から荷重点までの距離  
 $y$  : ヨークの測定スパン  
 $b$  : 試験体の幅 (mm)  
 $h$  : 試験体の高さ (mm)  
 $\Delta P$  : 最大荷重の 10~40%までの荷重増分  
 $\Delta \delta$  :  $\Delta P$  に対応するスパン中央たわみ  $\delta$  の増分  
 $\Delta \delta_y$  :  $\Delta P$  に対応するヨーク相対たわみ  $\delta_y$  の増分

### 2. 2. 3 結果

荷重－変形曲線と破壊形態の一例を図 2.2-2 に示す。破壊形態は，強軸では主に引張側外層ラミナのたて継ぎ部または節を起因とする引張破壊，弱軸では引張側 2 層目の内層ラミナの引張破壊が支配的となったが，いずれの試験体ともにたて継ぎおよび積層接着は良好であった。弱軸では，外層ラミナの曲げ剛性に対する寄与が小さいため，全層厚さをもとに設定した試験スパンでは破壊時の変形が著しく大きくなり，変位計の選定に注意を要した。通常，試験スパンは全層を対象とした試験体厚さをもとに決定しているが，弱軸の CLT においては，曲げ剛性への寄与が少ない外層ラミナ，特に全く寄与しない下側の外層ラミナを除外して試験体厚さを設定すれば終局時の変形を測定しやすくなると考えられる。

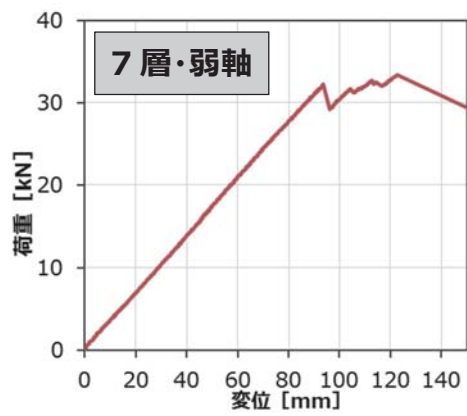
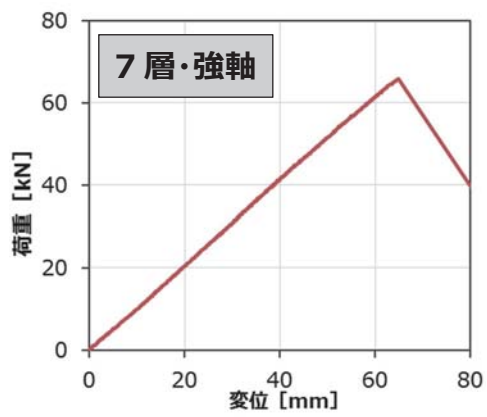
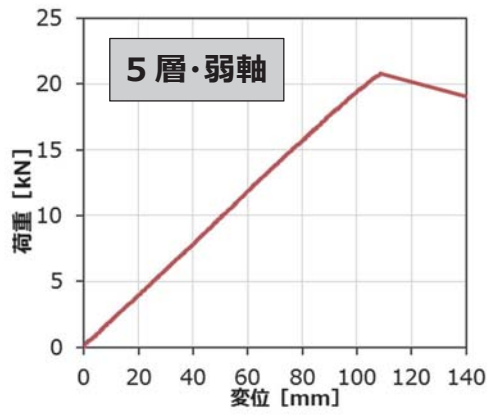
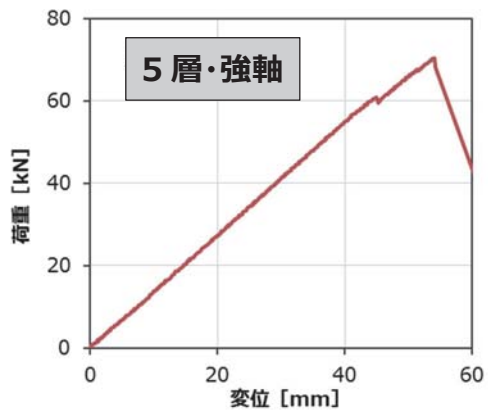


図 2.2-2 荷重－変位曲線と破壊形態の一例



次に、静的な曲げ試験と非破壊測定試験から得られた面外曲げ特性の結果を表 2.2-1～2.2-4 に示す。非破壊法と曲げ試験のヤング係数を比較すると、強軸より弱軸のほうがやや大きくなるものの、全体として見かけの曲げヤング係数、真の曲げヤング係数ともに近い値となった。

表 2.2-1 面外曲げ試験結果 (同一等級 S30・外層スギ×内層スギ)

層数	軸	No.	含水率 %	密度 kg/m <sup>3</sup>	$E_{fr}$ kN/mm <sup>2</sup>	$E_{afb}$ kN/mm <sup>2</sup>	$E_{ofb}$ kN/mm <sup>2</sup>	$G_{fb}$ kN/mm <sup>2</sup>	$E_{ofb}/G_{fb}$	$E_m$ kN/mm <sup>2</sup>	$E_{afb}/E_m$	$E_b$ kN/mm <sup>2</sup>	$E_{ofb}/E_b$	$f_b$ N/mm <sup>2</sup>
5層	強軸	aA170強1	12.1	435	4.50	5.43	5.78	0.272	21.2	5.22	1.04	5.14	1.13	19.7
		aA170強2	12.8	436	4.39	5.24	5.60	0.276	20.3	5.08	1.03	5.28	1.06	19.0
		aA170強3	13.1	431	4.73	5.75	6.09	0.269	22.7	5.59	1.03	5.87	1.04	26.9
		aA170強4	13.8	432	4.63	5.49	5.84	0.254	23.0	5.40	1.02	5.61	1.04	20.8
		aA170強5	13.0	414	4.45	5.32	5.62	0.240	23.4	5.26	1.01	5.52	1.02	20.8
		aA170強6	14.0	427	4.73	5.32	5.61	0.245	22.9	5.18	1.03	5.45	1.03	20.1
		平均値	13.2	429	4.57	5.42	5.76	0.259	22.2	5.29	1.03	5.48	1.05	21.2
	変動係数	5.2%	1.9%	3.2%	3.3%	3.4%	5.8%		3.4%		4.7%		13.5%	
	弱軸	aA169弱1	13.3	419	2.91	1.51	1.55	0.174	8.9	1.42	1.07	1.45	1.07	9.9
		aA169弱2	13.7	419	3.01	1.56	1.65	0.195	8.5	1.44	1.08	1.47	1.12	9.6
		aA169弱3	12.3	428	2.69	1.39	1.43	0.199	7.2	1.40	0.99	1.40	1.02	11.2
		aA169弱4	14.0	427	2.90	1.49	1.63	0.190	8.6	1.41	1.06	1.43	1.14	10.7
		aA169弱5	13.2	428	3.45	1.70	1.76	0.160	11.0	1.70	1.00	1.66	1.06	15.0
		aA169弱6	12.6	425	2.84	1.49	1.49	0.200	7.4	1.48	1.00	1.45	1.02	12.7
平均値		13.2	424	2.97	1.52	1.58	0.186	8.6	1.47	1.04	1.48	1.07	11.5	
変動係数	4.6%	1.0%	8.7%	6.7%	7.7%	8.5%		7.7%		6.4%		17.6%		
7層	強軸	aA184強1	12.5	427	3.58	3.87	4.09	0.259	15.8	3.75	1.03	3.85	1.06	16.7
		aA184強2	12.5	426	3.04	3.15	3.24	0.256	12.7	3.07	1.03	3.07	1.06	15.5
		aA184強3	12.4	425	3.59	3.64	3.97	0.307	12.9	3.59	1.01	3.48	1.14	13.4
		aA184強4	12.4	424	3.39	3.43	3.63	0.281	13.0	3.46	0.99	3.44	1.06	14.4
		aA184強5	12.5	418	2.85	3.28	3.44	0.261	13.2	3.38	0.97	3.52	0.98	15.7
		aA184強6	12.3	420	3.03	3.39	3.53	0.230	15.4	3.23	1.05	3.33	1.06	15.3
		平均値	12.4	423	3.25	3.46	3.65	0.265	13.8	3.41	1.01	3.45	1.06	15.2
	変動係数	0.6%	0.9%	9.7%	7.4%	8.8%	9.8%		7.2%		7.5%		7.6%	
	弱軸	aA185弱1	12.3	419	2.33	1.57	1.67	0.200	8.4	1.58	1.00	1.61	1.04	12.3
		aA185弱2	12.5	426	2.42	1.54	1.61	0.200	8.0	1.45	1.06	1.47	1.09	10.3
		aA185弱3	12.4	423	2.41	1.65	1.74	0.182	9.5	1.53	1.08	1.55	1.12	8.5
		aA185弱4	12.0	420	2.35	1.51	1.61	0.213	7.5	1.41	1.07	1.45	1.11	8.5
		aA185弱5	12.0	415	2.35	1.56	1.60	0.191	8.4	1.44	1.08	1.47	1.09	9.9
		aA185弱6	12.9	418	2.36	1.57	1.63	0.183	8.9	1.49	1.05	1.51	1.08	9.5
平均値		12.4	420	2.37	1.57	1.64	0.195	8.5	1.48	1.06	1.51	1.09	9.8	
変動係数	2.9%	0.9%	1.6%	3.0%	3.3%	6.1%		4.2%		4.1%		14.4%		

※ $E_{fr}$ ：縦振動法によるヤング係数， $E_{afb}$ ：たわみ振動法による見かけの曲げヤング係数， $E_{ofb}$ ：TGH 法による真の曲げヤング係数， $G_{fb}$ ：TGH 法によるせん断弾性係数， $E_m$ ：見かけの曲げヤング係数， $E_b$ ：真の曲げヤング係数， $f_b$ ：曲げ強さ。

表 2.2-2 面外曲げ試験結果 (異等級 Mx60・外層スギ×内層スギ)

層数	軸	No.	含水率 %	密度 kg/m <sup>3</sup>	E <sub>fr</sub> kN/mm <sup>2</sup>	E <sub>afb</sub> kN/mm <sup>2</sup>	E <sub>ofb</sub> kN/mm <sup>2</sup>	G <sub>fb</sub> kN/mm <sup>2</sup>	E <sub>ofb</sub> /G <sub>fb</sub>	E <sub>m</sub> kN/mm <sup>2</sup>	E <sub>afb</sub> /E <sub>m</sub>	E <sub>b</sub> kN/mm <sup>2</sup>	E <sub>ofb</sub> /E <sub>b</sub>	f <sub>b</sub> N/mm <sup>2</sup>
5層	強軸	aA174強1	13.9	425	4.53	5.19	5.54	0.284	19.5	5.38	0.97	5.63	0.98	22.1
		aA174強2	12.4	428	4.63	5.80	6.17	0.272	22.7	5.76	1.01	6.07	1.02	18.5
		aA174強3	12.9	423	4.73	5.57	5.96	0.277	21.5	5.51	1.01	5.86	1.02	18.7
		aA174強4	13.4	429	4.64	5.54	5.95	0.306	19.5	5.51	1.01	5.68	1.05	17.2
		aA174強5	13.2	428	4.64	5.25	5.57	0.322	17.3	5.05	1.04	5.18	1.08	21.4
		aA174強6	12.8	441	4.98	6.06	6.46	0.300	21.6	5.85	1.04	6.21	1.04	21.0
		aA174強7	13.0	430	4.57	5.36	5.71	0.284	20.1	5.14	1.04	5.23	1.09	17.3
		aA174強8	14.2	422	4.30	5.08	5.38	0.276	19.5	4.92	1.03	5.01	1.07	17.8
	強軸	aA175強1	13.7	425	4.40	4.94	5.22	0.319	16.4	4.85	1.02	4.92	1.06	18.7
		aA175強2	13.2	410	4.68	5.43	5.79	0.304	19.0	5.30	1.03	5.49	1.05	16.6
		aA175強3	12.7	442	4.51	5.16	5.45	0.327	16.7	5.01	1.03	5.01	1.09	24.8
		aA175強4	13.3	417	4.27	4.85	5.10	0.318	16.0	4.66	1.04	4.62	1.10	17.1
		aA175強5	13.1	418	4.10	4.84	5.10	0.295	17.3	4.84	1.00	5.06	1.01	16.3
		aA175強6	13.6	424	4.50	5.31	5.59	0.318	17.6	5.13	1.03	5.36	1.04	21.6
		aA175強7	13.7	426	4.39	5.15	5.46	0.277	19.7	5.09	1.01	5.32	1.03	21.2
		aA175強8	13.1	436	4.85	5.41	5.74	0.308	18.6	5.34	1.01	5.59	1.03	22.8
	平均値		13.3	427	4.54	5.31	5.64	0.299	18.9	5.21	1.02	5.39	1.05	19.6
	変動係数		3.7%	1.9%	4.9%	6.2%	6.7%	6.3%		6.4%		8.1%		13.1%
	弱軸	aA177弱1	13.9	436	3.66	1.85	1.90	0.169	11.2	1.79	1.04	1.92	0.99	11.5
		aA177弱2	14.5	432	3.36	1.73	1.85	0.187	9.9	1.67	1.04	1.72	1.08	11.8
		aA177弱3	14.2	433	3.47	1.73	1.76	0.194	9.1	1.69	1.03	1.73	1.01	10.9
		aA177弱4	13.7	435	3.30	1.68	1.74	0.170	10.3	1.72	0.98	1.79	0.98	13.3
		aA177弱5	13.6	434	2.95	1.53	1.59	0.209	7.6	1.46	1.05	1.48	1.07	10.3
		aA177弱6	14.6	430	3.00	1.56	1.61	0.193	8.3	1.51	1.03	1.51	1.06	9.6
		aA177弱7	13.8	430	2.95	1.52	1.51	0.200	7.6	1.58	0.96	1.59	0.95	9.1
		aA177弱8	13.5	434	3.13	1.64	1.73	0.182	9.5	1.56	1.05	1.61	1.08	13.5
		aA179弱1	13.4	426	3.26	1.65	1.75	0.170	10.3	1.61	1.03	1.76	0.99	10.3
		aA179弱2	13.6	438	3.59	1.85	1.98	0.178	11.1	1.80	1.03	1.83	1.08	10.7
aA179弱3		13.3	430	3.09	1.56	1.62	0.189	8.6	1.58	0.99	1.53	1.05	11.7	
aA179弱4		14.2	431	3.48	1.72	1.78	0.175	10.2	1.77	0.97	1.75	1.01	12.6	
aA179弱5		13.7	430	3.42	1.72	1.77	0.159	11.1	1.64	1.05	1.68	1.05	11.4	
aA179弱6		13.1	422	3.28	1.68	1.81	0.162	11.1	1.58	1.07	1.59	1.14	10.9	
aA179弱7		13.4	437	3.72	1.86	1.97	0.162	12.2	1.84	1.01	1.89	1.04	16.5	
aA179弱8		13.1	431	3.32	1.73	1.85	0.154	12.0	1.70	1.02	1.80	1.03	13.4	
平均値		13.7	432	3.31	1.69	1.76	0.178	10.0	1.66	1.02	1.70	1.04	11.7	
変動係数		3.2%	0.9%	7.3%	6.5%	7.6%	8.9%		6.6%		7.9%		15.6%	
7層	強軸	aA187強1	14.5	428	4.31	4.64	4.99	0.278	17.9	4.58	1.01	4.81	1.04	19.0
		aA187強2	13.5	431	4.65	5.54	5.90	0.246	23.9	5.35	1.04	5.98	0.99	17.8
		aA187強3	14.1	425	4.77	5.45	5.87	0.259	22.6	5.43	1.00	5.73	1.02	19.8
		aA187強4	14.2	425	4.26	4.59	4.95	0.285	17.3	4.50	1.02	4.78	1.03	14.5
		aA187強5	14.0	426	4.62	4.98	5.35	0.261	20.5	4.74	1.05	5.07	1.06	18.8
		aA187強6	14.4	431	4.91	5.55	5.90	0.251	23.5	5.30	1.05	5.68	1.04	16.8
	平均値		14.1	428	4.58	5.13	5.49	0.263	21.0	4.99	1.03	5.34	1.03	17.8
	変動係数		2.4%	0.6%	5.6%	8.7%	8.3%	5.8%		8.5%		9.7%		10.7%
	弱軸	aA186弱1	11.5	429	3.33	2.20	2.34	0.191	12.2	2.11	1.04	2.22	1.06	11.9
		aA186弱2	12.2	433	3.47	2.39	2.53	0.180	14.0	2.33	1.03	2.44	1.04	13.2
		aA186弱3	12.3	424	2.93	1.94	2.04	0.188	10.9	1.83	1.06	1.89	1.08	9.8
		aA186弱4	11.8	434	3.16	2.06	2.16	0.187	11.5	1.88	1.10	1.98	1.09	13.6
aA186弱5		11.7	425	3.06	2.18	2.27	0.193	11.8	2.02	1.08	2.02	1.12	10.2	
aA186弱6		12.1	425	2.68	1.79	1.88	0.207	9.1	1.65	1.09	1.68	1.12	9.3	
平均値		11.9	428	3.11	2.09	2.20	0.191	11.6	1.97	1.07	2.04	1.08	11.3	
変動係数		2.8%	1.0%	9.1%	10.1%	10.4%	4.6%		12.1%		12.9%		16.2%	

※E<sub>fr</sub>：縦振動法によるヤング係数， E<sub>afb</sub>：たわみ振動法による見かけの曲げヤング係数， E<sub>ofb</sub>：TGH 法による真の曲げヤング係数，  
G<sub>fb</sub>：TGH 法によるせん断弾性係数， E<sub>m</sub>：見かけの曲げヤング係数， E<sub>b</sub>：真の曲げヤング係数， f<sub>b</sub>：曲げ強さ。

表 2.2-3 面外曲げ試験結果（異等級 Mx90・外層カラマツ×内層スギ）

層数	軸	No.	含水率 %	密度 kg/m <sup>3</sup>	E <sub>fr</sub> kN/mm <sup>2</sup>	E <sub>afb</sub> kN/mm <sup>2</sup>	E <sub>ofb</sub> kN/mm <sup>2</sup>	G <sub>fb</sub> kN/mm <sup>2</sup>	E <sub>ofb</sub> /G <sub>fb</sub>	E <sub>m</sub> kN/mm <sup>2</sup>	E <sub>afb</sub> /E <sub>m</sub>	E <sub>b</sub> kN/mm <sup>2</sup>	E <sub>ofb</sub> /E <sub>b</sub>	f <sub>b</sub> N/mm <sup>2</sup>
5層	強軸	aA204強1	11.5	467	6.67	9.48	10.30	0.301	34.2	9.11	1.04	9.87	1.04	32.3
		aA204強2	11.2	456	6.19	8.77	9.43	0.320	29.5	8.43	1.04	9.32	1.01	32.1
		aA204強3	11.5	462	6.13	8.62	9.23	0.297	31.1	8.28	1.04	8.82	1.05	28.2
		aA204強4	11.9	458	6.21	8.55	9.30	0.312	29.8	8.25	1.04	8.61	1.08	29.7
		aA204強5	11.3	461	6.12	8.85	9.51	0.298	32.0	8.54	1.04	9.27	1.03	36.1
		aA204強6	11.5	458	6.03	8.81	9.53	0.287	33.3	8.49	1.04	9.29	1.03	32.3
		平均値	11.5	460	6.23	8.85	9.55	0.302	31.6	8.52	1.04	9.20	1.04	31.8
	変動係数	1.9%	0.9%	3.7%	3.8%	4.0%	3.9%		3.7%		4.8%			8.5%
	弱軸	aA205弱1	11.3	453	2.36	1.24	1.33	0.192	6.9	1.17	1.06	1.16	1.15	6.1
		aA205弱2	11.6	457	2.49	1.30	1.36	0.197	6.9	1.25	1.04	1.27	1.08	6.6
		aA205弱3	11.5	456	2.56	1.35	1.48	0.199	7.4	1.28	1.05	1.30	1.14	6.8
		aA205弱4	11.5	463	2.50	1.32	1.37	0.207	6.6	1.25	1.05	1.26	1.08	6.5
		aA205弱5	11.4	451	2.25	1.19	1.27	0.208	6.1	1.10	1.08	1.08	1.17	6.6
		aA205弱6	11.9	459	2.47	1.30	1.43	0.197	7.3	1.25	1.04	1.22	1.18	9.5
平均値		11.5	456	2.44	1.28	1.37	0.200	6.9	1.22	1.05	1.21	1.13	7.0	
変動係数	1.7%	0.9%	4.6%	4.4%	5.4%	3.2%		5.6%		6.8%			17.9%	
7層	強軸	aA206強1	11.1	438	5.17	6.99	7.55	0.281	26.9	6.95	1.01	7.57	1.00	23.8
		aA206強2	10.7	435	5.06	6.66	7.16	0.302	23.7	6.55	1.02	6.76	1.06	22.2
		aA206強3	11.1	444	5.30	7.08	7.74	0.268	28.9	6.97	1.02	7.17	1.08	23.9
		aA206強4	11.1	445	5.15	6.94	7.52	0.289	26.0	6.89	1.01	7.14	1.05	21.8
		aA206強5	11.2	444	5.21	6.95	7.51	0.290	25.9	6.83	1.02	7.21	1.04	23.6
		aA206強6	10.7	436	4.93	6.81	7.39	0.279	26.5	6.75	1.01	7.15	1.03	20.9
		平均値	11.0	440	5.14	6.91	7.48	0.285	26.3	6.82	1.01	7.16	1.04	22.7
	変動係数	2.2%	1.0%	2.5%	2.1%	2.6%	4.0%		2.3%		3.6%			5.5%
	弱軸	aA207弱1	11.2	447	3.51	2.20	2.41	0.246	9.8	2.19	1.01	2.26	1.07	11.0
		aA207弱2	11.0	449	3.48	2.22	2.38	0.245	9.7	2.24	0.99	2.29	1.04	9.9
		aA207弱3	10.9	447	3.37	2.21	2.44	0.252	9.7	2.21	1.00	2.29	1.06	11.5
		aA207弱4	11.2	454	3.39	2.16	2.37	0.262	9.0	2.13	1.01	2.19	1.08	7.7
		aA207弱5	11.2	451	3.48	2.23	2.46	0.242	10.2	2.19	1.02	2.25	1.10	9.7
		aA207弱6	11.0	449	3.29	2.14	2.34	0.234	10.0	2.10	1.02	2.21	1.06	9.1
平均値		11.1	450	3.42	2.19	2.40	0.247	9.7	2.18	1.01	2.25	1.07	9.8	
変動係数	1.4%	0.6%	2.5%	1.7%	1.8%	3.8%		2.3%		1.8%			14.0%	

※E<sub>fr</sub>：縦振動法によるヤング係数， E<sub>afb</sub>：たわみ振動法による見かけの曲げヤング係数， E<sub>ofb</sub>：TGH 法による真の曲げヤング係数，  
G<sub>fb</sub>：TGH 法によるせん断弾性係数， E<sub>m</sub>：見かけの曲げヤング係数， E<sub>b</sub>：真の曲げヤング係数， f<sub>b</sub>：曲げ強さ。

表 2.2-4 面外曲げ試験結果 (異等級 Mx120・外層ヒノキ×内層スギ)

層数	軸	No.	含水率 %	密度 kg/m <sup>3</sup>	E <sub>fr</sub> kN/mm <sup>2</sup>	E <sub>afb</sub> kN/mm <sup>2</sup>	E <sub>ofb</sub> kN/mm <sup>2</sup>	G <sub>fb</sub> kN/mm <sup>2</sup>	E <sub>ofb</sub> /G <sub>fb</sub>	E <sub>m</sub> kN/mm <sup>2</sup>	E <sub>afb</sub> /E <sub>m</sub>	E <sub>b</sub> kN/mm <sup>2</sup>	E <sub>ofb</sub> /E <sub>b</sub>	f <sub>b</sub> N/mm <sup>2</sup>
5層	強軸	aA211強1	11.3	437	6.76	9.94	10.96	0.288	38.1	9.70	1.02	10.95	1.00	40.0
		aA211強2	11.3	439	6.78	9.65	10.47	0.297	35.3	9.42	1.02	9.90	1.06	43.2
		aA211強3	11.0	438	6.71	9.48	10.38	0.271	38.3	9.17	1.03	9.90	1.05	33.3
		aA211強4	11.1	435	6.34	9.66	10.58	0.285	37.1	9.32	1.04	10.22	1.04	44.9
		aA211強5	11.4	442	6.77	9.55	10.33	0.279	37.1	9.33	1.02	9.88	1.05	40.5
		aA211強6	10.9	438	6.66	9.56	10.45	0.268	39.0	9.35	1.02	9.84	1.06	34.1
		平均値	11.2	438	6.67	9.64	10.53	0.281	37.5	9.38	1.03	10.11	1.04	39.4
	変動係数	1.6%	0.5%	2.5%	1.7%	2.2%	3.9%		1.9%		4.3%		11.9%	
	弱軸	aA212弱1	10.9	438	2.58	1.43	1.54	0.200	7.7	1.30	1.09	1.33	1.16	9.7
		aA212弱2	11.0	436	2.43	1.33	1.42	0.249	5.7	1.24	1.07	1.25	1.14	8.2
		aA212弱3	11.2	439	2.28	1.29	1.32	0.197	6.7	1.20	1.07	1.26	1.05	6.7
		aA212弱4	11.2	437	2.53	1.47	1.48	0.189	7.8	1.33	1.11	1.36	1.09	10.5
		aA212弱5	11.0	436	2.51	1.42	1.52	0.210	7.3	1.31	1.08	1.33	1.14	7.9
		aA212弱6	10.9	427	2.46	1.36	1.45	0.193	7.5	1.28	1.07	1.31	1.11	8.1
平均値		11.0	436	2.46	1.38	1.46	0.206	7.1	1.28	1.08	1.31	1.12	8.5	
変動係数	1.2%	1.0%	4.2%	4.9%	5.5%	10.6%		3.7%		3.4%		15.8%		
7層	強軸	aA214強1	10.8	426	6.02	8.39	9.25	0.278	33.3	8.25	1.02	9.02	1.03	28.3
		aA214強2	10.8	423	5.99	8.32	9.14	0.284	32.2	8.13	1.02	8.52	1.07	27.1
		aA214強3	10.5	435	6.13	8.40	9.20	0.288	32.0	8.24	1.02	8.81	1.05	27.5
		aA214強4	10.6	427	5.89	8.25	9.02	0.294	30.7	8.22	1.00	8.77	1.03	25.8
		aA214強5	10.7	429	5.93	8.13	8.89	0.287	31.0	7.96	1.02	8.39	1.06	28.8
		aA214強6	10.7	434	5.82	8.07	8.79	0.289	30.4	8.04	1.00	8.55	1.03	32.6
		平均値	10.7	429	5.96	8.26	9.05	0.286	31.6	8.14	1.01	8.68	1.04	28.4
	変動係数	0.9%	1.1%	1.8%	1.7%	2.0%	1.9%		1.5%		2.6%		8.2%	
	弱軸	aA215弱1	10.8	428	3.08	2.02	2.17	0.223	9.7	1.98	1.02	1.98	1.10	9.6
		aA215弱2	10.3	422	3.08	2.07	2.25	0.220	10.2	2.03	1.02	2.03	1.11	10.8
		aA215弱3	10.7	426	2.96	1.94	2.11	0.234	9.0	1.91	1.02	1.92	1.10	9.4
		aA215弱4	10.7	423	2.90	2.00	2.19	0.221	9.9	1.90	1.05	1.88	1.16	9.3
		aA215弱5	10.9	427	3.19	2.02	2.23	0.249	8.9	2.02	1.00	2.00	1.11	9.8
		aA215弱6	10.5	421	3.22	2.14	2.31	0.198	11.7	2.05	1.05	2.14	1.08	10.9
平均値		10.7	424	3.07	2.03	2.21	0.224	9.9	1.98	1.03	1.99	1.11	10.0	
変動係数	1.9%	0.7%	4.1%	3.3%	3.1%	7.5%		3.1%		4.6%		7.1%		

※E<sub>fr</sub> : 縦振動法によるヤング係数, E<sub>afb</sub> : たわみ振動法による見かけの曲げヤング係数, E<sub>ofb</sub> : TGH 法による真の曲げヤング係数, G<sub>fb</sub> : TGH 法によるせん断弾性係数, E<sub>m</sub> : 見かけの曲げヤング係数, E<sub>b</sub> : 真の曲げヤング係数, f<sub>b</sub> : 曲げ強さ。

次に、見かけの曲げヤング係数 E<sub>m</sub> の平均値、曲げ強さの統計的下限值 TL として対数正規分布仮定による信頼水準 75% の 95% 下側許容限界値を図 2.2-3 に示す。

静的試験による E<sub>m</sub> および曲げ強さの TL を見ると、両者ともに異等級構成の強軸試験体では外層ラミナの等級に応じて性能向上することが示された。なお、同一等級構成の S30 については、同一樹種の Mx60 の曲げ性能とほとんど差が見られなかったが、これは今回の CLT が A 種構成（曲げヤング係数の上限値を定めないラミナを用いるもの）として試作されたために、S30 と Mx60 の外層に用いたラミナの性能に差がなかったためと水された。次に、弱軸試験体においては、平行層理論のとおり、外層ラミナが曲げ性能に寄与しないことが示されている。また、5 層と 7 層の比較では、特に強軸試験体では E<sub>m</sub> および TL ともに性能が低下する傾向が見られたが、その要因としては、寸法効果のほかに、梁せいの増加に伴い外層ラミナの引張応力状態が変化することも考えられた。

また、強軸のみ設定されている JAS 基準値との比較では、見かけの曲げヤング係数および曲げ強さともに実験値が基準値を上回ること、特に曲げ強さでは基準値がかなり安全側に設定されていることが明らかとなった。

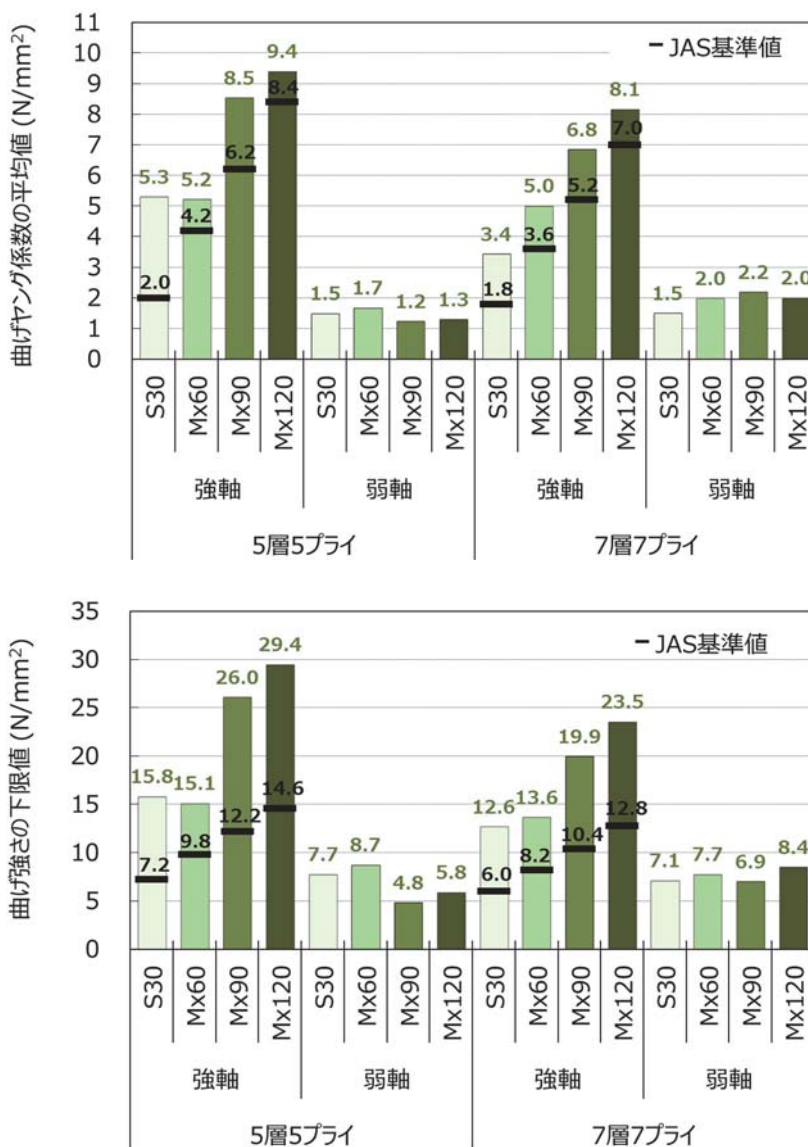


図 2.2-3 見かけの曲げヤング係数の平均値と曲げ強さの統計的下限值

#### 2. 2. 4 まとめ

面外曲げ試験の結果、見かけの曲げヤング係数、真の曲げヤング係数ともに非破壊測定法による測定値が静的試験の実験値と近い値となること、強軸方向では見かけの曲げヤング係数、曲げ強さともに外層ラミナの等級に応じて性能が向上すること、強軸方向では曲げ特性はすべて JAS の基準値を大幅に上回ることが明らかとなった。

## 2. 3 面外曲げクリープ

### 2. 3. 1 目的

M60 ラミナを外層に用いたスギ CLT については、面外曲げ強度の荷重継続時間の調整係数が不明である。このため、クリープ破壊試験により調整係数を求める。

### 2. 3. 2 試験方法

面外曲げクリープ破壊試験に供した CLT は、ラミナの組合せを JAS に準じて異等級構成強度等級 Mx60 とした。いずれも内層に用いるラミナは M30 以上のスギとし、外層に用いるラミナは M60 のスギである。ラミナの断面寸法は厚さ 30×幅 110mm で、CLT の断面構成は 5 層 5 プライ (厚さ 150mm) とした。なお、フィンガー (以下 FJ) 長は 15mm、傾斜 1/12、接着剤は水性高分子イソシアネート系樹脂であった。ラミナの幅はぎ接着はしなかった。クリープ破壊試験体 (幅 300mm、長さは厚さの 23 倍) は、外層ラミナの繊維方向が試験体と平行な強軸試験体と、直交である弱軸試験体を、それぞれ 6 枚の CLT 大板 (短辺 2.4×長辺 4~6m) から 30 体ずつ採取した。

### 2. 3. 2. 1 非破壊検査方法

#### 動的試験

#### (1)動的試験方法

面外曲げクリープ破壊試験を行う前に、せん断弾性係数の簡便な非破壊評価方法として、動的弾性係数の測定を試みた。測定は、たわみ振動法 (T.G.H.法)<sup>2,3-1)</sup>により行った。試験体は試験に供する強軸試験体 30 体及び弱軸試験体 30 体である。

たわみ振動法 (T.G.H.法) では、スパンを試験体の長さの 0.552 倍の距離として台の上に置き、試験体中央部材面を上からハンマーで打撃し、下面方向からマイクロフォンで高次の固有振動数を測定した。

また、縦振動法による縦振動ヤング係数も測定した。

#### (2)動的試験評価方法

たわみ振動法 (T.G.H.法) では、試験体長さ、断面 2 次半径、密度を求め、せん断分布定数 (1.2)、せん断弾性係数の初期値 (0.8Gpa) を設定する。次に、振動次数  $n$  に依存する係数  $mn$  と  $F_{mn}$ 、1 から 6 次程度までの曲げ固有振動数、各  $n$  における見かけの曲げヤング係数を求める。さらに各  $n$  におけるプロット用の系列  $X$ 、 $Y$  を求め、その 1 次回帰式  $Y=aX+c$  とプロットが一致するとき、傾き  $a$  と切片  $c$  が次の関係となる。

$$a = -1.2 \left( \frac{E_{fr-t}}{G_{fr-t}} \right), \quad c = E_{fr-t} \quad (2.3-1)$$

$E_{fr-t}$  : 真の曲げヤング係数

$G_{fr-t}$  : せん断弾性係数

縦振動法では次の式により縦振動ヤング係数を計算した。

$$E_{fr} = (2fl)^2 \rho \quad (2.3-2)$$

$E_{fr}$  : 縦振動ヤング係数

$f$  : 固有振動数

$l$  : 材長

$\rho$  : 密度

### 2. 3. 2. 2 面外曲げクリープ破壊試験条件

#### (1)短期静的面外曲げ試験

長期載荷試験の荷重レベルを決定するためには、短期の静的面外曲げ試験平均値を求める必要がある。この値は 2. 2. 面外曲げ試験により求めた。表 2.3-1 に短期面外曲げ試験結果を示す。

表 2.3-1 短期面外曲げ試験結果 (2.2.面外曲げ試験より)

No	密度 kg/m <sup>3</sup>	E <sub>fr</sub> kN/mm <sup>2</sup>	E <sub>afb</sub> kN/mm <sup>2</sup>	E <sub>ofb</sub> kN/mm <sup>2</sup>	G <sub>fb</sub> kN/mm <sup>2</sup>	E <sub>ofb</sub> /G <sub>fb</sub>	E <sub>m</sub> kN/mm <sup>2</sup>	E <sub>afb</sub> /E <sub>m</sub>	E <sub>b</sub> kN/mm <sup>2</sup>	E <sub>ofb</sub> /E <sub>b</sub>	f <sub>b</sub>	P <sub>max</sub> kN	含水率 %
a174強1	425	4.53	5.19	5.54	0.284	19.5	5.38	0.97	5.63	0.98	22.1	47.9	13.9
a174強2	428	4.63	5.80	6.17	0.272	22.7	5.76	1.01	6.07	1.02	18.5	40.0	12.4
a174強3	423	4.73	5.57	5.96	0.277	21.5	5.51	1.01	5.86	1.02	18.7	40.4	12.9
a174強4	429	4.64	5.54	5.95	0.306	19.5	5.51	1.01	5.68	1.05	17.2	37.1	13.4
a174強5	428	4.64	5.25	5.57	0.322	17.3	5.05	1.04	5.18	1.08	21.4	46.5	13.2
a174強6	441	4.98	6.06	6.46	0.300	21.6	5.85	1.04	6.21	1.04	21.0	45.5	12.8
a174強7	430	4.57	5.36	5.71	0.284	20.1	5.14	1.04	5.23	1.09	17.3	37.6	13.0
a174強8	422	4.30	5.08	5.38	0.276	19.5	4.92	1.03	5.01	1.07	17.8	38.9	14.2
a175強1	425	4.40	4.94	5.22	0.319	16.4	4.85	1.02	4.92	1.06	18.7	40.6	13.7
a175強2	410	4.68	5.43	5.79	0.304	19.0	5.30	1.03	5.49	1.05	16.6	36.3	13.2
a175強3	442	4.51	5.16	5.45	0.327	16.7	5.01	1.03	5.01	1.09	24.8	53.7	12.7
a175強4	417	4.27	4.85	5.10	0.318	16.0	4.66	1.04	4.62	1.10	17.1	37.3	13.3
a175強5	418	4.10	4.84	5.10	0.295	17.3	4.84	1.00	5.06	1.01	16.3	35.5	13.1
a175強6	424	4.50	5.31	5.59	0.318	17.6	5.13	1.03	5.36	1.04	21.6	46.7	13.6
a175強7	426	4.39	5.15	5.46	0.277	19.7	5.09	1.01	5.32	1.03	21.2	45.8	13.7
a175強8	436	4.85	5.41	5.74	0.308	18.6	5.34	1.01	5.59	1.03	22.8	49.5	13.1
平均値	427	4.54	5.31	5.64	0.299	18.9	5.21	1.02	5.39	1.05	19.6	42.5	13.3
変動係数%	1.9	4.9	6.2	6.7	6.3		6.4		8.1		13.1	12.9	3.7
a177弱1	436	3.66	1.85	1.90	0.169	11.2	1.79	1.04	1.92	0.99	11.5	24.9	13.9
a177弱2	432	3.36	1.73	1.85	0.187	9.9	1.67	1.04	1.72	1.08	11.8	25.5	14.5
a177弱3	433	3.47	1.73	1.76	0.194	9.1	1.69	1.03	1.73	1.01	10.9	23.5	14.2
a177弱4	435	3.30	1.68	1.74	0.170	10.3	1.72	0.98	1.79	0.98	13.3	28.7	13.7
a177弱5	434	2.95	1.53	1.59	0.209	7.6	1.46	1.05	1.48	1.07	10.3	22.3	13.6
a177弱6	430	3.00	1.56	1.61	0.193	8.3	1.51	1.03	1.51	1.06	9.6	20.8	14.6
a177弱7	430	2.95	1.52	1.51	0.200	7.6	1.58	0.96	1.59	0.95	9.1	19.6	13.8
a177弱8	434	3.13	1.64	1.73	0.182	9.5	1.56	1.05	1.61	1.08	13.5	29.1	13.5
a179弱1	426	3.26	1.65	1.75	0.170	10.3	1.61	1.03	1.76	0.99	10.3	22.3	13.4
a179弱2	438	3.59	1.85	1.98	0.178	11.1	1.80	1.03	1.83	1.08	10.7	23.2	13.6
a179弱3	430	3.09	1.56	1.62	0.189	8.6	1.58	0.99	1.53	1.05	11.7	25.5	13.3
a179弱4	431	3.48	1.72	1.78	0.175	10.2	1.77	0.97	1.75	1.01	12.6	27.3	14.2
a179弱5	430	3.42	1.72	1.77	0.159	11.1	1.64	1.05	1.68	1.05	11.4	24.7	13.7
a179弱6	422	3.28	1.68	1.81	0.162	11.1	1.58	1.07	1.59	1.14	10.9	23.5	13.1
a179弱7	437	3.72	1.86	1.97	0.162	12.2	1.84	1.01	1.89	1.04	16.5	35.7	13.4
a179弱8	431	3.32	1.73	1.85	0.154	12.0	1.70	1.02	1.80	1.03	13.4	29.0	13.1
平均値	432	3.31	1.69	1.76	0.178	10.0	1.66	1.02	1.70	1.04	11.7	25.3	13.7
変動係数%	0.9	7.3	6.5	7.6	8.9		6.6		7.9		15.6	15.5	3.2

\*E<sub>fr</sub>: 縦振動法によるヤング係数, E<sub>afb</sub>: たわみ振動法による見かけの曲げヤング係数, E<sub>ofb</sub>: TGH法による真の曲げヤング係数,  
G<sub>fb</sub>: TGH法によるせん断弾性係数, E<sub>m</sub>: 見かけの曲げヤング係数, E<sub>b</sub>: 真の曲げヤング係数, f<sub>b</sub>: 曲げ強さ, P<sub>max</sub>: 最大荷重。

この結果、クリープ破壊試験による荷重レベルの 100% 荷重値を強軸試験体 42.5kN、弱軸試験体 25.3kN と決定した。

## (2)面外曲げクリープ破壊試験

クリープ破壊試験における長期荷重は図 2.3-1、写真 2.3-1 に示すようにモーメントアーム式を採用した。アームの長さは支点から錘をかける個所まで 4000mm、支点から荷重点まで 250mm である。写真 2.3-2 の加力点軸のネジを回転させることでアームを持ち上げ荷重できるようにした。荷重中でもゆっくりネジを回転させてアームを水平に保つことが可能である。写真 2.3-3 は荷重したときのアームの様子、写真 2.3-4 は弱軸試験体の錘の状況である。

荷重の荷重レベルを、強軸試験体では短期静的面外曲げ試験の最大荷重平均値の 90%、85%、80%、75%、70%、65% (各 5 体)、弱軸試験体では前年度のクリープ破壊試験で破壊時間が短時間であった結果から、80%、75%、70%、65%、60%、55% (各 5 体) とした。荷重条件は短期静面外的曲げ試験と同じで、スパン 3150mm モーメント一定区間 1050mm とした。試験室は温度湿度が調整できないため、継続的に温湿度を測定することとした。

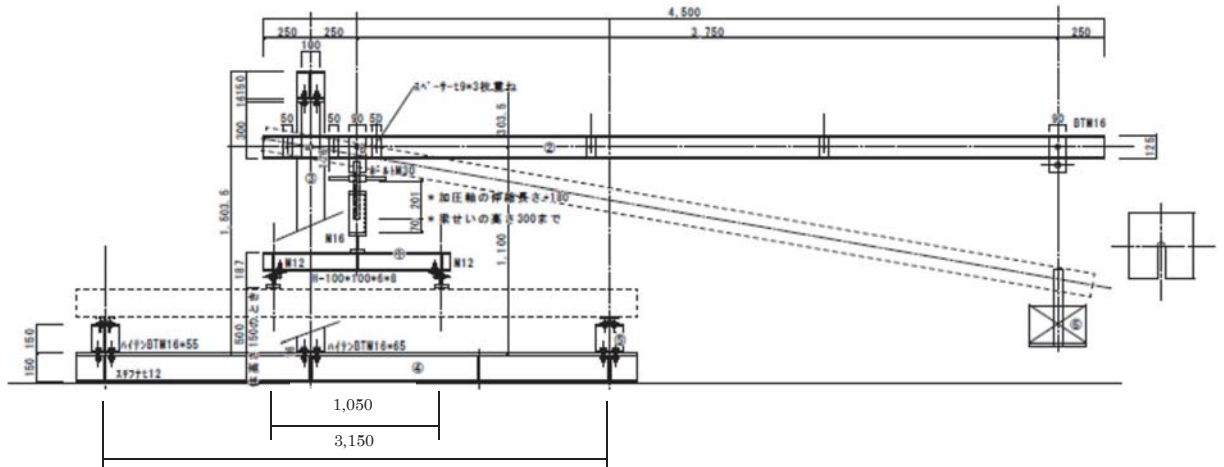


図 2.3-1 モーメントアーム方式のクリープ破壊試験機



写真 2.3-1 モーメントアーム式試験機



写真 2.3-2 加力点軸ネジ部



写真 2.3-3 アームの状況



写真 2.3-4 弱軸試験体の錘の状況

### (3) 長期载荷試験の評価方法

荷重継続時間の調整係数は、応力レベルを 3 以上選択し、応力レベルごとの破壊荷重継続時間の常用対数と応力レベルとの関係について回帰直線を求め、回帰直線上において破壊



継続時間が 50 年に相当する応力レベルとして求める<sup>2.3-2)</sup>。ちなみに、製材の荷重継続時間の調整係数は 0.55 (Wood のカーブ、Madison Curve) とされている。

### 2. 3. 3 結果

#### 2. 3. 3. 1 非破壊検査

非破壊検査の結果を表 2.3-2、表 5-2 に示す。

表 2.3-2 縦振動法、たわみ振動法 (T.G.H.法) によるヤング係数とせん断弾性係数

No	密度 kg/m <sup>3</sup>	E <sub>fr</sub> kN/mm <sup>2</sup>	E <sub>ofb</sub> kN/mm <sup>2</sup>	G <sub>fb</sub> kN/mm <sup>2</sup>	E <sub>ofb</sub> /G <sub>fb</sub>	No	密度 kg/m <sup>3</sup>	E <sub>fr</sub> kN/mm <sup>2</sup>	E <sub>ofb</sub> kN/mm <sup>2</sup>	G <sub>fb</sub> kN/mm <sup>2</sup>	E <sub>ofb</sub> /G <sub>fb</sub>
a171強1	435	4.45	5.85	0.259	22.6	a178弱1	434	3.50	1.95	0.147	13.2
a171強2	437	4.15	5.24	0.288	18.2	a178弱2	428	3.46	1.83	0.145	12.6
a171強3	428	4.40	5.44	0.272	20.0	a178弱3	442	3.67	1.99	0.160	12.4
a171強4	434	4.41	5.67	0.260	21.8	a178弱4	431	3.55	1.92	0.175	10.9
a171強5	436	4.76	5.90	0.275	21.5	a178弱5	428	3.49	1.92	0.174	11.0
a171強6	424	4.09	4.78	0.276	17.3	a178弱6	427	3.12	1.90	0.160	11.9
a171強7	433	4.18	5.26	0.283	18.6	a178弱7	431	3.33	1.87	0.168	11.1
a171強8	432	4.72	6.39	0.247	25.9	a178弱8	434	3.10	1.72	0.188	9.2
a172強1	431	4.88	6.31	0.276	22.9	a180弱1	446	3.72	1.99	0.180	11.1
a172強2	436	4.55	5.69	0.303	18.8	a180弱2	435	3.26	1.85	0.186	10.0
a172強3	422	4.49	5.79	0.293	19.7	a180弱3	424	3.13	1.72	0.183	9.4
a172強4	424	4.35	5.67	0.302	18.8	a180弱4	441	3.60	1.96	0.177	11.1
a172強5	432	4.47	5.49	0.313	17.6	a180弱5	432	3.18	1.76	0.194	9.1
a172強6	431	4.90	6.05	0.297	20.4	a180弱6	425	3.19	1.82	0.166	11.0
a172強7	431	4.92	5.91	0.305	19.3	a180弱7	439	3.36	1.89	0.177	10.6
a172強8	432	5.07	6.47	0.299	21.7	a180弱8	446	3.74	2.08	0.174	12.0
a173強1	425	5.00	6.23	0.275	22.7	a181弱1	425	3.10	1.76	0.171	10.3
a173強2	442	4.52	5.62	0.277	20.3	a181弱2	424	3.16	1.76	0.175	10.1
a173強3	423	4.89	6.33	0.263	24.1	a181弱3	425	3.15	1.82	0.152	12.0
a173強4	442	5.27	6.99	0.286	24.4	a181弱4	426	3.23	1.74	0.200	8.7
a173強5	434	5.11	6.38	0.280	22.8	a181弱5	415	2.97	1.70	0.164	10.4
a173強6	423	4.81	5.86	0.280	20.9	a181弱6	437	3.19	1.75	0.136	12.8
a173強7	429	4.86	5.66	0.309	18.3	a181弱7	420	3.20	1.83	0.179	10.3
a173強8	431	4.96	6.34	0.283	22.4	a181弱8	425	3.28	1.82	0.168	10.8
a176強1	451	4.87	6.59	0.280	23.6	a182弱1	431	2.89	1.66	0.212	7.8
a176強2	439	4.79	6.46	0.272	23.8	a182弱2	423	2.73	1.63	0.163	10.0
a176強3	443	4.89	6.51	0.282	23.1	a182弱3	436	3.02	1.70	0.207	8.2
a176強4	444	4.82	6.46	0.254	25.4	a182弱4	420	3.01	1.67	0.179	9.3
a176強5	445	4.68	6.47	0.298	21.7	a182弱5	434	3.11	1.76	0.153	11.5
a176強6	432	4.48	5.64	0.298	18.9	a182弱6	436	2.79	1.62	0.165	9.8
平均値	433	4.69	5.98	0.283	21.2	平均値	431	3.24	1.81	0.173	10.6
変動係数%	1.6	6.3	8.3	5.9		変動係数%	1.8	8.0	6.4	10.1	

※E<sub>fr</sub>: 縦振動法によるヤング係数, E<sub>ofb</sub>: TGH法による真の曲げヤング係数, G<sub>fb</sub>: TGH法によるせん断弾性係数。

縦振動ヤング係数とたわみ振動法(T.G.H.法)ヤング係数について平均値では、強軸試験体では、縦振動ヤング係数が 20%程度低めに、弱軸試験体では縦振動ヤング係数が 80%程度高めになることが分かった。

また、表 2.3-1 短期面外曲げ試験結果と比べて、縦振動ヤング係数、たわみ振動ヤング係数ともほとんど同じ値であった。

#### 2. 3. 3. 2 面外曲げクリープ破壊試験強度試験

最初に荷重の荷重レベルを強軸試験体で 90% (2 体)、80% (1 体)、75% (1 体)、弱軸試験体で 75% (1 体)、70% (1 体)、65% (1 体)、60% (1 体)、55% (1 体) で始めたが、

現在 (平成 26 年 2 月 26 日) までに強軸試験体 2 体破壊した (図 2.3-2 参照)。弱軸試験体は、破壊に至っていない。また、写真 2.3-5 に強軸試験体破壊(左荷重レベル 90%)、写真 2.3-6 にはその破壊状況詳細、写真 2.3-7 に荷重レベル 80%破壊 FJ 破壊状況詳細を示す。破壊箇所は FJ 引張り破壊であった。なお、各荷重レベルにおける破壊時間が決定後に試験に荷重継続時間の調整係数を評価する予定である。

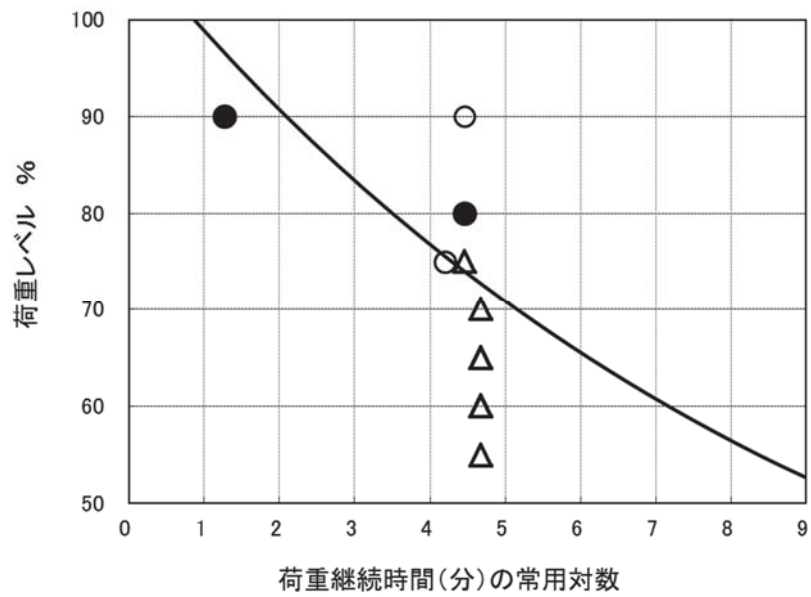


図 2.3-2 荷重から破壊に至るまでの時間（継続中も含む）  
 (解説) ●：破壊に至った強軸試験体  
 ○：破壊に至っていない強軸試験体  
 ▲：破壊に至った弱軸試験  
 △：破壊に至っていない弱軸試験体  
 —：Madison Curve



写真 2.3-5 強軸試験体破壊(左荷重レベル 90%) 写真 2.3-6 荷重レベル 90%FJ 破壊状況詳細



写真 2.3-7 荷重レベル 80%破壊 FJ 破壊状況詳細

#### 2.3.4 まとめ

荷重継続時間の調整係数を求めるために、外層に M60 ラミナ、内層に M30 ラミナを配置した CLT の面外曲げクリープ破壊試験を行った。

まず、供試体の非破壊試験においては、2.2.面外曲げ試験における結果と比較して縦振動ヤング係数及びたわみ振動法によるヤング係数はほとんど同じであり、短期静的面外曲げ試験体と同等であると判断した。

次に、CLT の面外曲げクリープ破壊試験において载荷の荷重レベルを、強軸試験体では短期静的面外曲げ試験の最大荷重平均値の 90%から 65%まで 5%ごとに各 5 体、弱軸試験体では 80%から 55%まで 5%ごとに各 5 体試験を行うこととした。载荷条件は短期静的曲げ試験と同じで、スパン 3150mm モーメント一定区間 1050mm であった。現在までに強軸試験体の荷重レベルが 90%1 体のみが Madison Curve において想定した破壊に至る時間よりも短い時間で破壊した。同じく 80%試験体は想定よりも長い時間で破壊した。その他の試験体は破壊しておらず継続中である。今後、順次試験を行い、荷重継続時間の調整係数を求める予定である。

#### 文献

2.3-1) 久保島吉貴：未発表資料

2.3-2) 日本ツーバイフォー建築協会：2002 年枠組壁工法建築物構造計算指針、工業調査会、東京、2002、pp. 186.

## 2. 4 面内曲げ

### 2. 4. 1 目的

5層5プライ構成で、外層が強軸方向あるいは弱軸方向である全層スギ CLT、および外層が強軸方向である外層ヒノキ・内層スギ CLT の面内曲げ強度性能を求めることを目的とした。

### 2. 4. 2 試験体と試験方法

2.1の試験体概要に記載されている5層5プライのCLT大板から面内曲げ試験体を18体採取した。そのうち12体は全層スギで構成された強度等級 Mx60-5-5 の CLT で、6体は外層が強軸方向、6体は外層が弱軸方向であった。また、試験体18体のうち6体は外層がヒノキ、内層がスギで構成された強度等級 Mx120-5-5 の CLT で、外層はすべて強軸方向であった。試験体の断面は150 mm×300 mm、長さは6,000 mm であった。

非破壊試験として、縦振動法によるヤング係数および、T.G.H.法による曲げヤング係数、せん断弾性係数を求めた。T.G.H.法による測定は面内方向、面外方向の2方向とし、1～5次の曲げ固有振動数から各弾性係数を求めた。

面内曲げ試験の様子を写真2.4-1に示す。試験は、最大容量が200 kNの実大強度試験機（東京衡機製造所）を用いて3等分点4点荷重方式で実施した。全スパンは試験体の材せい300 mmの18倍の5,400 mmとし、荷重点間距離は1,800 mmとした。荷重点の幅は150 mm、支点の幅は180 mmであった。全スパン中央における変位を試験体の両面でそれぞれ変位計（東京測器研究所 SDP-200D）を用いて測定し、それらの平均値を試験体の変位とした。試験開始から破壊までに要した時間は、強軸方向の試験体で3～7分、弱軸方向で3～6分であった。得られた荷重、変位データを用いて曲げヤング係数、曲げ強さを算出した。また、試験後、破壊部の近傍から長さ約30 mmの材を採取し、全乾法で含水率を求めた。

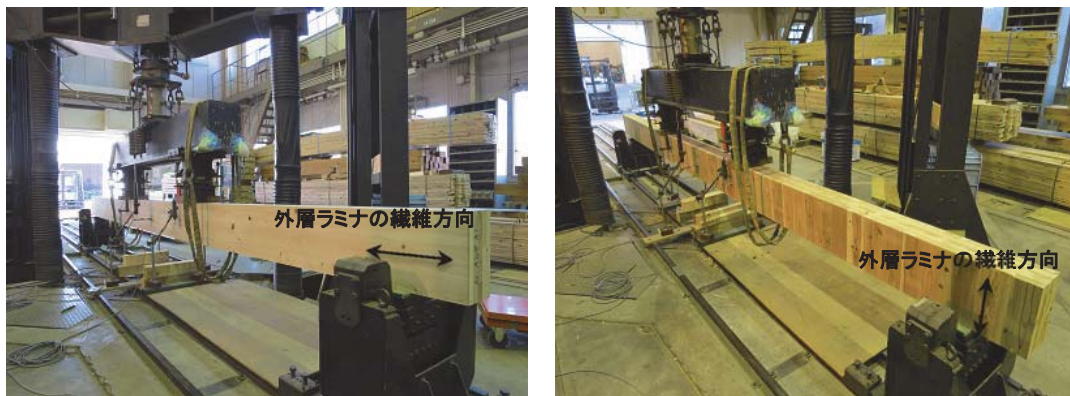


写真 2.4-1 面内曲げ試験の様子（左：外層強軸方向、右：外層弱軸方向）

### 2. 4. 3 結果

#### 2. 4. 3. 1 非破壊試験の結果

試験体の密度および非破壊試験の結果を試験体の種類別に表2.4-1～表2.4-3に示す。

外層が強軸方向の試験体においては、全層スギ、外層ヒノキ・内層スギの両試験体とも、密度、縦振動法によるヤング係数、面内方向および面外方向の曲げヤング係数およびせん断弾性係数のすべての項目の値はばらつきが小さかった。また、縦振動法によるヤング係数、面内方向の曲げヤング係数、面外方向の曲げヤング係数の各平均値は外層ヒノキ・内層スギの値が全層スギの値を上回っていた。外層のヒノキラミナのヤング係数はスギラミナのそれよりも高いためだと考えられる。せん断弾性係数の平均値は面内方向、面外方向ともに同程度であった。

一方、外層が弱軸方向の試験体においては、せん断弾性係数のばらつきが大きくなった。また、縦振動法によるヤング係数、面内方向の曲げヤング係数、面外方向の曲げヤング係数の各平均値は、全層スギ、外層強軸方向の試験体に比べて小さかった。せん断弾性係数は、外層強軸方向の試験体に比べて面内方向は大きく、面外方向は小さかった。

#### 2. 4. 3. 2 面内曲げ試験の結果

面内曲げ試験の結果を試験体の種類別に表 2.4.4～表 2.4.6 に、試験時の荷重と変位の関係を図 2.4-1～図 2.4-3 に示す。また、全層スギの試験体の破壊の様子を写真 2.4-2 に、外層ヒノキ・内層スギの試験体の破壊の様子を写真 2.4-3 に示す。

外層が強軸方向の試験体においては、全層スギ、外層ヒノキ・内層スギの両試験体とも、曲げヤング係数のばらつきは小さかった。縦振動法によるヤング係数、T.G.H.法による面内方向の曲げヤング係数は、面内方向の見かけの曲げヤング係数の約 1.1 倍であった。面内方向の曲げ強さの平均値は外層ヒノキ・内層スギ、全層スギの試験体でそれぞれ 25.7 MPa、14.8 MPa で、外層ヒノキ・内層スギが全層スギの試験体の約 1.7 倍であった。

一方、外層が弱軸方向の試験体においても曲げヤング係数のばらつきは小さかった。縦振動法によるヤング係数、T.G.H.法による面内方向の曲げヤング係数は、面内方向の見かけの曲げヤング係数の約 1.1 倍であった。面内方向の曲げ強さの平均値は 12.8 MPa で、外層が強軸方向の試験体の曲げ強さ 14.8 MPa の 0.86 倍であった。

#### 2. 4. 4 まとめ

5 層 5 プライ構成で、外層が強軸方向あるいは弱軸方向である全層スギの CLT、および外層が強軸方向である外層ヒノキ・内層スギの CLT の面内曲げ試験を行った。曲げ試験により求めた面内方向の見かけのヤング係数の平均値に対して、縦振動法、T.G.H.法により求めた曲げヤング係数の各平均値は約 1.1 倍であり、動的な非破壊試験により CLT の面内方向の見かけのヤング係数を推定できることがわかった。外層ヒノキ・内層スギの試験体の曲げ強さは全層スギの試験体の約 1.7 倍であり、強度特性値の高いヒノキを外層に用いることで CLT の強度性能を向上させられることがわかった。外層が弱軸方向の全層スギの試験体の面内方向の曲げ強さの平均値は、外層が強軸方向の全層スギの試験体の曲げ強さの 0.86 倍であった。

表 2.4-1 試験体の密度および非破壊試験の結果（全層スギ、外層強軸方向）

試験体番号	密度	Efr	面内方向		面外方向	
			Et-h	Gt-h	Et-v	Gt-v
	kg/m <sup>3</sup>	GPa	GPa	GPa	GPa	GPa
hiA188強 1	429	4.24	4.10	0.865	5.07	0.262
hiA188強 3	430	4.20	4.19	0.818	5.53	0.237
hiA188強 5	426	4.25	4.41	0.912	5.66	0.222
hiA189強 1	425	4.28	4.15	0.898	5.69	0.250
hiA189強 3	427	4.34	4.46	0.956	5.59	0.261
hiA189強 5	424	4.43	4.46	0.853	5.87	0.231
平均値	427	4.29	4.29	0.884	5.57	0.244
CV%	0.54	1.9	3.9	5.5	4.9	6.7

記号 Efr：縦振動法によるヤング係数、Et-h：面内方向の曲げヤング係数、Gt-h：面内方向のせん断弾性係数、Et-v：面外方向の曲げヤング係数、Gt-v：面外方向のせん断弾性係数、CV：変動係数

表 2.4-2 試験体の密度および非破壊試験の結果（全層スギ、外層弱軸方向）

試験体番号	密度	Efr	面内方向		面外方向	
			Et-h	Gt-h	Et-v	Gt-v
	kg/m <sup>3</sup>	GPa	GPa	GPa	GPa	GPa
iA190弱 1	429	3.36	3.45	0.807	1.84	0.132
iA190弱 2	432	2.99	3.10	0.892	1.68	0.142
iA190弱 3	431	3.17	3.05	1.25	1.76	0.155
iA190弱 4	419	2.92	2.92	0.867	1.69	0.137
iA190弱 5	422	3.16	3.06	1.29	1.87	0.151
iA190弱 6	426	3.47	3.34	0.906	1.96	0.174
平均値	427	3.18	3.15	1.001	1.80	0.148
CV%	1.19	6.6	6.4	20.9	6.1	10.3

記号 Efr：縦振動法によるヤング係数、Et-h：面内方向の曲げヤング係数、Gt-h：面内方向のせん断弾性係数、Et-v：面外方向の曲げヤング係数、Gt-v：面外方向のせん断弾性係数、CV：変動係数

表 2.4-3 試験体の密度および非破壊試験の結果（外層ヒノキ・内層スギ、外層強軸方向）

試験体番号	密度	Efr	面内方向		面外方向	
			Et-h	Gt-h	Et-v	Gt-v
	kg/m <sup>3</sup>	GPa	GPa	GPa	GPa	GPa
hiA208強 1	434	6.77	6.75	0.799	10.5	0.263
hiA208強 3	439	6.78	6.71	0.878	10.2	0.276
hiA208強 5	435	6.84	6.74	0.834	10.4	0.271
hiA209強 1	440	6.31	6.26	0.888	9.84	0.274
hiA209強 3	434	6.62	6.55	0.848	10.6	0.257
hiA209強 5	435	6.54	6.63	0.896	10.3	0.269
平均値	436	6.64	6.60	0.857	10.29	0.268
CV%	0.60	3.0	2.8	4.3	2.5	2.6

記号 Efr：縦振動法によるヤング係数、Et-h：面内方向の曲げヤング係数、Gt-h：面内方向のせん断弾性係数、Et-v：面外方向の曲げヤング係数、Gt-v：面外方向のせん断弾性係数、CV：変動係数

表 2.4-4 面内曲げ試験の結果（全層スギ、外層強軸方向）

試験体番号	含水率	Ea-h	$\sigma_{b-h}$	Efr/Ea-h	Et-h/Ea-h
hiA188強 1	13.3	3.76	13.1	1.13	1.09
hiA188強 3	14.1	3.85	16.7	1.09	1.09
hiA188強 5	13.5	4.12	14.9	1.03	1.07
hiA189強 1	12.6	3.91	14.3	1.10	1.06
hiA189強 3	13.9	4.14	11.9	1.05	1.08
hiA189強 5	12.5	4.11	17.8	1.08	1.09
平均値	13.3	3.98	14.8	1.08	1.08
CV%	5.0	4.1	15.0	3.1	1.0

記号 Ea-h：面内方向の見かけの曲げヤング係数、 $\sigma_{b-h}$ ：面内方向の曲げ強さ、Efr：縦振動法によるヤング係数、Et-h：面内方向の曲げヤング係数、CV：変動係数

表 2.4-5 面内曲げ試験の結果（全層スギ、外層弱軸方向）

試験体番号	含水率	Ea-h	$\sigma$ b-h	Efr/Ea-h	Et-h/Ea-h
	%	GPa	MPa		
iA190弱 1	13.6	3.18	13.5	1.06	1.08
iA190弱 2	13.4	2.79	13.5	1.07	1.11
iA190弱 3	13.6	2.74	12.4	1.16	1.11
iA190弱 4	13.7	2.69	12.3	1.09	1.09
iA190弱 5	12.3	2.82	13.7	1.12	1.09
iA190弱 6	12.9	3.06	11.3	1.13	1.09
平均値	13.3	2.88	12.8	1.10	1.09
CV%	4.2	6.8	7.5	3.5	1.1

記号 Ea-h：面内方向の見かけの曲げヤング係数、 $\sigma$  b-h：面内方向の曲げ強さ、Efr：縦振動法によるヤング係数、Et-h：面内方向の曲げヤング係数、CV：変動係数

表 2.4-6 面内曲げ試験の結果（外層ヒノキ・内層スギ、外層強軸方向）

試験体番号	含水率	Ea-h	$\sigma$ b-h	Efr/Ea-h	Et-h/Ea-h
	%	GPa	MPa		
hiA208強 1	11.3	6.16	26.6	1.10	1.09
hiA208強 3	11.1	6.20	27.9	1.09	1.08
hiA208強 5	11.1	6.21	22.3	1.10	1.09
hiA209強 1	11.2	5.83	21.5	1.08	1.07
hiA209強 3	11.0	6.00	26.4	1.10	1.09
hiA209強 5	11.1	6.10	29.4	1.07	1.09
平均値	11.1	6.08	25.7	1.09	1.09
CV%	1.0	2.4	12.1	1.1	0.7

記号 Ea-h：面内方向の見かけの曲げヤング係数、 $\sigma$  b-h：面内方向の曲げ強さ、Efr：縦振動法によるヤング係数、Et-h：面内方向の曲げヤング係数、CV：変動係数

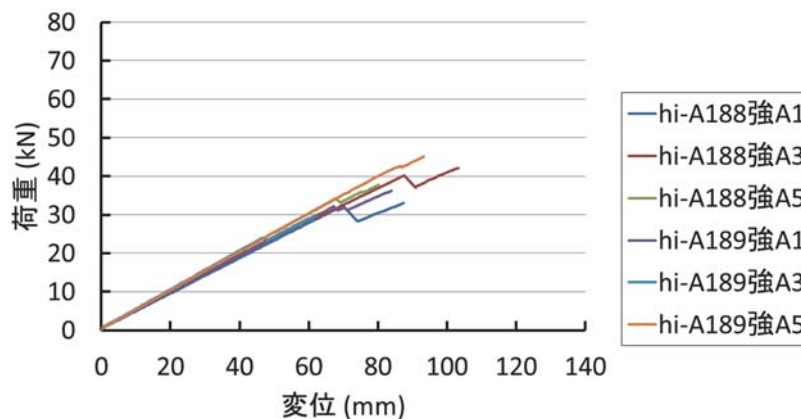


図 2.4-1 面内曲げ試験時の荷重と変位の関係（全層スギ、外層強軸方向）

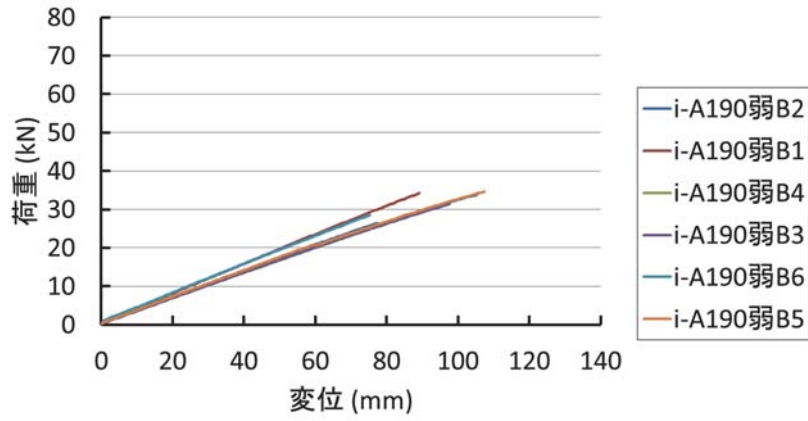


図 2.4-2 面内曲げ試験時の荷重と変位の関係  
(全層スギ、外層弱軸方向)

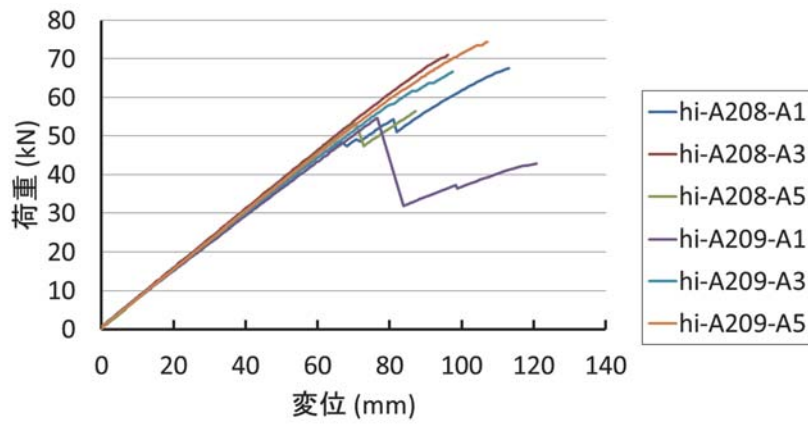


図 2.4-3 面内曲げ試験時の荷重と変位の関係  
(外層ヒノキ、内層スギ、外層強軸方向)

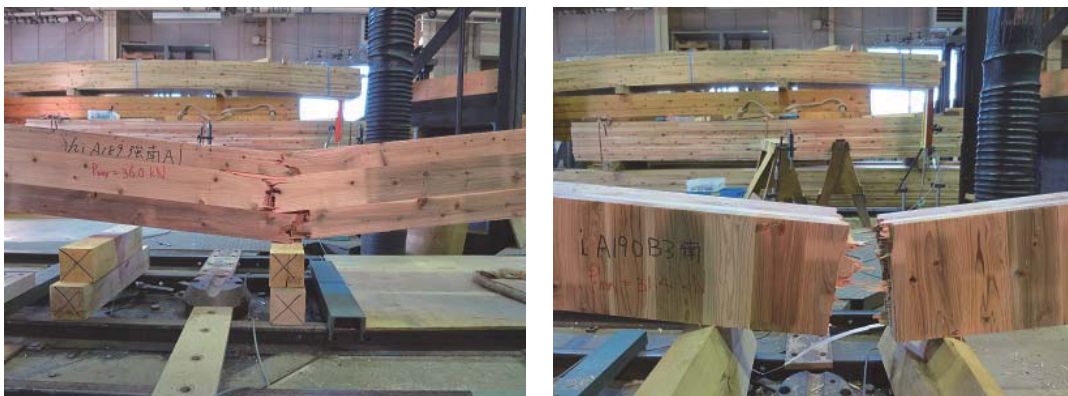


写真 2.4-2 全層スギの試験体の破壊の様子の一例  
(左：外層強軸方向、右：外層弱軸方向)



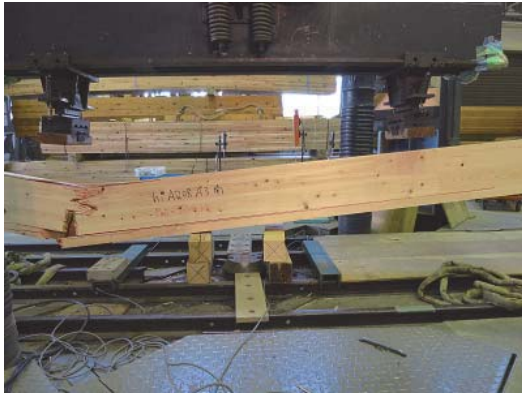


写真 2.4-3 外層ヒノキ・内層スギの試験体の破壊の様子の一例  
(いずれも外層強軸方向)

## 2. 5 水平せん断

### 2. 5. 1 目的

JAS のラミナ構成に基づいて製造された国産 CLT のせん断特性を明らかにすることを目的として、短スパンの中央集中荷重による水平せん断試験を行い、外層プライの繊維方向（強軸、弱軸）および強度等級、積層数とせん断特性との関係について検討した。

### 2. 5. 2 試験体と試験方法

せん断試験体の仕様については、等級構成は同一等級構成 1 種類（強度等級 S30）と異等級構成 3 種類（強度等級 Mx60, Mx90, Mx120）とした。いずれも内層に用いるラミナは M30 以上のスギとし、外層に用いるラミナは S30 では M30 以上のスギ, Mx60 では M60 のスギ, Mx90 では M90 のカラマツ, Mx120 では M120 のヒノキとした。また、積層数（5 層 5 プライ・7 層 7 プライ）、外層ラミナの繊維方向（強軸・弱軸）、加力方向（縦使い・平使い）の組み合わせ 32 通りについて検討し、1 条件 3 体ずつ試験を行った。

水平せん断試験は実大木材強度試験機（(株) 東京衡機製造所製、最大能力 1000kN）を用いて行った。試験スパンは材せいの 5 倍とし、中央集中荷重曲げ方式によって単調に加力し破壊に至らしめた。加圧板幅は支点部 150mm, 中央荷重部 200mm とした。試験体数は 6（5 層 Mx60 のみ 16）とした。試験方法を図 2.5-1 に、試験の様子を写真 2.5-1 に示す。せん断強度（ $f_s$ ）は以下の式から計算した。

$$f_s = \frac{3P_{\max}}{4bh}$$

ここで、 $P_{\max}$ ：最大荷重、 $b$ ：材幅、 $h$ ：材せい

全たわみは支点間の両側面ヨークの平均値としたが、終局状態までの変位を計測するため下面変位および加圧板上面変位も測定した。

また、せん断弾性係数（ $G$ ）を以下の式から計算した。

$$G = \frac{6L}{\frac{20bh}{\Delta P/\Delta \delta} - E_b h^2}$$

ここで、 $L$ ：スパン、 $\Delta P/\Delta \delta$ ：比例域での単位変位当りの荷重、 $E_b$ ：曲げヤング係数  
ただし  $E_b$  は、各グループの試験体を採取した CLT 原板の値を用いた。

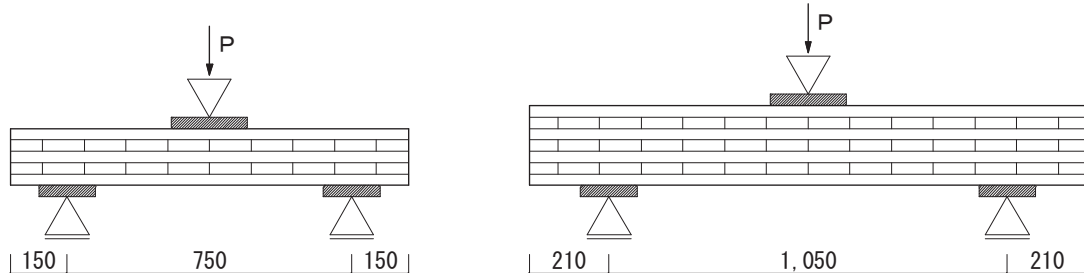


図 2.5-1 水平せん断試験方法



5層5プライ



7層7プライ

写真 2.5-1 水平せん断試験の様子

### 2. 5. 3 結果

荷重－変形曲線と破壊後の様子を図 2.5-3～2.5-6 に示す。強軸方向での破壊形態は既報<sup>2)</sup>と同様に 5 層, 7 層ともに直交層のせん断破壊（ローリングシア）であるが, 5 層の等級が低いものでは最終的に曲げ破壊を生じたものもみられた。一方, 弱軸方向では直交層のせん断破壊と引張側平行層の曲げ破壊とが混在しており, 層数による差は明確ではなかった。

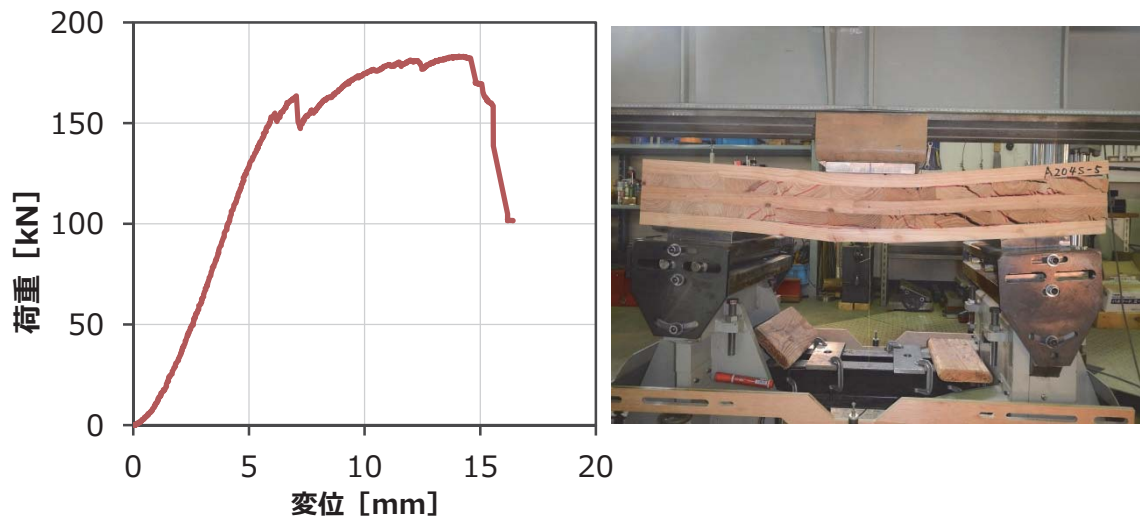


図 2.5-3 荷重－変位曲線と破壊後の様子（5層強軸）



図 2.5-4 荷重-変位曲線と破壊後の様子 (5層弱軸)

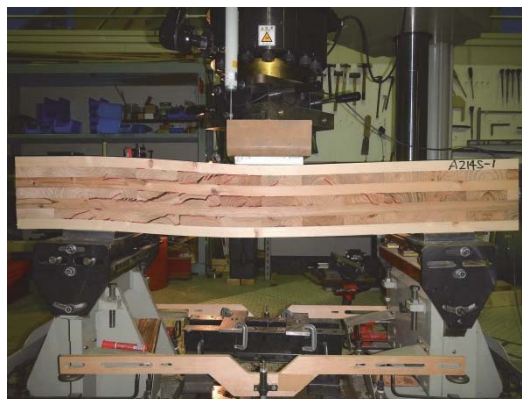
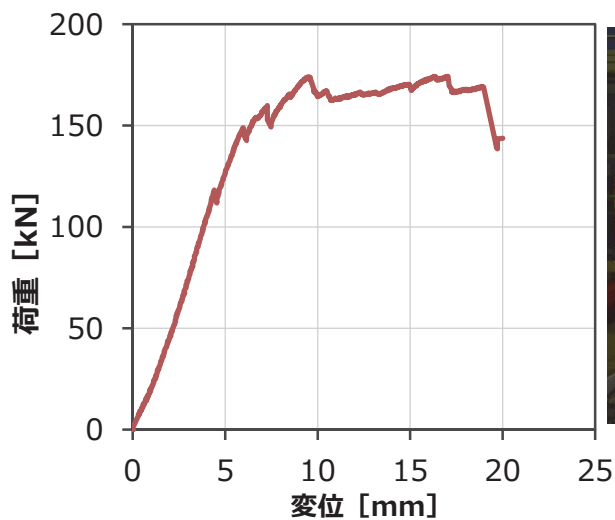


図 2.5-5 荷重-変位曲線と破壊後の様子 (7層強軸)

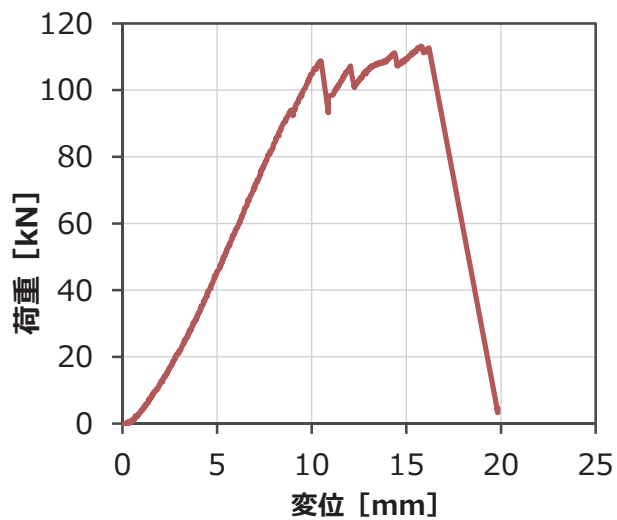


図 2.5-6 荷重-変位曲線と破壊後の様子 (7層弱軸)

次に、水平せん断試験の結果を表 2.5-1～2.5-4 に示す。

表 2.5-1 水平せん断試験結果（同一等級 S30・外層スギ×内層スギ）

層数	軸	No.	含水率 %	密度 kg/m <sup>3</sup>	E <sub>fr</sub> kN/mm <sup>2</sup>	E <sub>b-AV</sub> kN/mm <sup>2</sup>	G <sub>fb-AV</sub> kN/mm <sup>2</sup>	G kN/mm <sup>2</sup>	f <sub>s</sub> N/mm <sup>2</sup>	破壊形態
5層	強軸	bA170強1	13.4	433	4.46	5.48	0.259	0.370	2.62	せん断
		bA170強2	12.5	425	4.18			0.283	2.55	せん断
		bA170強3	13.0	432	4.34			0.333	2.79	せん断
		bA170強4	12.8	428	4.56			0.328	2.76	せん断
		bA170強5	13.0	422	4.52			0.295	2.02	せん断
		bA170強6	13.4	427	4.45			0.323	2.49	せん断
		平均値	13.0	428	4.42				0.322	2.54
	変動係数	2.8%	0.9%	3.2%		9.6%	11.0%			
	弱軸	bA169弱1	12.1	420	2.93	1.48	0.186	0.250	1.46	せん断
		bA169弱2	11.8	418	2.81			0.266	1.36	せん断
		bA169弱3	12.4	423	3.07			0.372	1.59	せん断
		bA169弱4	12.9	427	2.72			0.225	1.56	せん断
		bA169弱5	12.5	426	3.02			0.291	1.69	せん断
		bA169弱6	12.2	413	2.86			0.232	1.57	せん断
平均値		12.3	421	2.90				0.273	1.54	
変動係数	3.1%	1.3%	4.5%		19.8%	7.5%				
7層	強軸	bA184強1	12.3	424	3.39	3.45	0.265	0.282	1.82	せん断
		bA184強2	12.8	430	3.43			0.290	1.78	せん断
		bA184強3	12.9	417	2.99			0.253	1.81	せん断
		bA184強4	12.5	421	3.36			0.454	1.76	せん断
		bA184強5	13.0	415	3.16			0.369	1.89	せん断
		bA184強6	12.4	415	3.23			0.393	1.86	せん断
		平均値	12.7	420	3.26				0.340	1.82
	変動係数	2.3%	1.5%	5.2%		22.8%	2.7%			
	弱軸	bA185弱1	14.5	420	2.23	1.51	0.195	0.200	1.04	曲げ
		bA185弱2	14.0	416	2.33			0.233	1.05	曲げ
		bA185弱3	14.1	425	2.38			0.333	1.31	せん断
		bA185弱4	14.6	418	2.28			0.241	1.21	曲げ
		bA185弱5	14.5	423	2.31			0.368	1.32	せん断
		bA185弱6	14.9	428	2.29			0.349	1.45	せん断
平均値		14.4	422	2.30				0.287	1.23	
変動係数	2.3%	1.1%	2.2%		24.7%	13.2%				

※E<sub>fr</sub>：縦振動法によるヤング係数、E<sub>b-AV</sub>：曲げ試験の真の曲げヤング係数の各等級平均値、G<sub>fb-AV</sub>：TGH 法によるせん断弾性係数の各等級平均値、G：せん断弾性係数、f<sub>s</sub>：せん断強さ

表 2.5-2 水平せん断試験結果 (異等級 Mx60・外層スギ×内層スギ)

層数	軸	No.	含水率 %	密度 kg/m <sup>3</sup>	E <sub>fr</sub> kN/mm <sup>2</sup>	E <sub>b-AV</sub> kN/mm <sup>2</sup>	G <sub>fb-AV</sub> kN/mm <sup>2</sup>	G kN/mm <sup>2</sup>	f <sub>s</sub> N/mm <sup>2</sup>	破壊形態
5層	強軸	bA178強1	13.4	441	4.52	5.61	0.290	0.298	2.52	せん断
		bA178強2	14.0	452	4.66			0.321	2.09	曲げ
		bA179強1	13.0	408	4.61			0.324	2.47	せん断
		bA179強2	12.8	430	4.92			0.346	2.52	せん断
		bA180強1	12.5	412	4.22			0.339	2.42	せん断
		bA180強2	12.6	428	4.35			0.384	2.39	せん断
		bA181強1	13.3	431	4.24			0.333	2.72	せん断
		bA181強2	13.3	429	4.27	0.364	2.60	せん断		
		bA183強1	12.7	407	4.22	5.17	0.308	0.301	2.47	せん断
		bA183強2	13.2	411	4.25			0.355	2.59	せん断
		bA183強3	13.0	421	4.95			0.524	2.50	せん断
		bA183強4	13.0	410	3.94			0.341	2.40	せん断
		bA188強1	12.0	427	4.27			0.472	2.35	せん断
		bA188強2	12.8	423	3.55			0.345	2.41	せん断
	bA189強1	12.4	444	4.32	0.307			2.46	せん断	
	bA189強2	12.5	446	4.24	0.263	2.64	せん断			
	平均値	12.9	426	4.35			0.351	2.47		
	変動係数	3.7%	3.4%	7.9%			18.5%	5.8%		
	弱軸	bA171弱1	11.1	447	3.32	1.67	0.188	0.262	1.66	せん断
		bA171弱2	10.7	442	3.24			0.348	1.47	せん断
		bA172弱1	11.0	432	2.15			0.145	1.39	曲げ
		bA172弱2	11.1	422	2.38			0.140	1.51	曲げ
		bA173弱1	11.5	449	2.45			0.198	1.51	せん断
		bA173弱2	11.8	413	2.53			0.151	1.46	曲げ
		bA174弱1	12.2	422	2.45			0.144	1.21	曲げ
		bA174弱2	12.1	427	2.34	0.164	1.12	曲げ		
		bA175弱1	11.8	423	2.09	1.73	0.169	0.122	1.27	曲げ
		bA175弱2	12.6	424	2.18			0.101	1.13	せん断
bA183弱1		13.3	417	2.89	0.190			1.21	曲げ	
bA183弱2		13.1	421	3.10	0.170			1.41	曲げ	
bA183弱3		12.9	412	2.70	0.112			1.42	せん断	
bA183弱4		13.0	402	2.81	0.125			1.35	せん断	
bA190弱1	12.9	418	2.52	0.141	1.45			せん断		
bA190弱2	12.6	434	2.87	0.176	1.32	せん断				
平均値	12.1	425	2.63			0.168	1.37			
変動係数	7.0%	3.0%	14.6%			36.8%	10.9%			
7層	強軸	bA187強1	12.8	424	4.43	5.34	0.263	0.268	1.98	せん断
		bA187強2	12.5	436	4.30			0.295	2.00	せん断
		bA187強3	13.0	445	4.46			0.284	1.78	せん断
		bA187強4	13.1	427	4.36			0.281	2.00	せん断
		bA187強5	13.2	421	3.92			0.306	1.93	せん断
		bA187強6	13.0	420	4.19			0.262	1.82	せん断
		平均値	12.9	429	4.28					0.283
	変動係数	2.0%	2.3%	4.6%			5.7%	4.9%		
	弱軸	bA186弱1	12.1	432	2.98	2.04	0.191	0.268	1.58	せん断
		bA186弱2	13.0	422	2.77			0.188	1.31	せん断
		bA186弱3	13.1	418	2.59			0.210	1.33	せん断
		bA186弱4	13.0	428	3.32			0.405	1.27	せん断
		bA186弱5	12.9	424	2.63			0.168	1.37	せん断
		bA186弱6	13.1	419	3.20			0.377	1.36	せん断
平均値		12.9	424	2.91					0.269	1.37
変動係数	2.9%	1.3%	10.4%			37.3%	8.0%			

※E<sub>fr</sub>: 縦振動法によるヤング係数、E<sub>b-AV</sub>: 曲げ試験の真の曲げヤング係数の各等級平均値、G<sub>fb-AV</sub>: TGH 法によるせん断弾性係数の各等級平均値、G: せん断弾性係数、f<sub>s</sub>: せん断強さ

表 2.5-3 水平せん断試験結果 (異等級 Mx90・外層カラマツ×内層スギ)

層数	軸	No.	含水率 %	密度 kg/m <sup>3</sup>	E <sub>fr</sub> kN/mm <sup>2</sup>	E <sub>b-AV</sub> kN/mm <sup>2</sup>	G <sub>fb-AV</sub> kN/mm <sup>2</sup>	G kN/mm <sup>2</sup>	f <sub>s</sub> N/mm <sup>2</sup>	破壊形態
5層	強軸	bA204強1	11.1	463	5.86	9.20	0.302	0.294	2.79	せん断
		bA204強2	11.0	441	5.50			0.271	2.88	せん断
		bA204強3	11.1	457	5.79			0.351	3.09	せん断
		bA204強4	11.5	449	5.54			0.333	2.80	せん断
		bA204強5	11.6	461	6.27			0.298	3.03	せん断
		bA204強6	11.2	457	5.51			0.305	2.92	せん断
		平均値	11.3	455	5.75				0.309	2.92
	変動係数	2.3%	1.8%	5.2%		9.3%	4.1%			
	弱軸	bA205弱1	10.7	445	2.37	1.21	0.200	0.398	1.34	せん断
		bA205弱2	11.2	450	2.23			0.246	1.17	曲げ
		bA205弱3	11.1	444	2.36			0.413	1.07	せん断
		bA205弱4	11.0	457	2.20			0.284	1.40	せん断
		bA205弱5	11.2	433	2.38			0.192	1.01	せん断
		bA205弱6	11.1	444	2.30			0.219	0.99	曲げ
平均値		11.1	446	2.31				0.292	1.17	
変動係数	1.7%	1.8%	3.4%		31.9%	14.8%				
7層	強軸	bA206強1	10.7	431	4.88	7.16	0.285	0.309	1.67	せん断
		bA206強2	10.9	438	5.08			0.324	1.86	せん断
		bA206強3	11.2	420	4.83			0.255	1.66	せん断
		bA206強4	11.2	439	5.04			0.268	1.66	せん断
		bA206強5	11.2	441	5.04			0.325	2.00	せん断
		bA206強6	11.1	434	5.30			0.324	2.13	せん断
		平均値	11.1	434	5.03				0.301	1.83
	変動係数	2.0%	1.7%	3.3%		10.4%	11.0%			
	弱軸	bA207弱1	11.0	452	3.40	2.25	0.247	0.282	1.40	せん断
		bA207弱2	11.2	451	3.28			0.245	1.37	せん断
		bA207弱3	10.9	460	3.38			0.298	1.33	曲げ
		bA207弱4	11.3	450	3.12			0.274	1.28	曲げ
		bA207弱5	11.3	450	3.30			0.217	1.33	せん断
		bA207弱6	11.4	442	3.25			0.217	1.17	曲げ
平均値		11.1	451	3.29				0.255	1.31	
変動係数	1.8%	1.3%	3.0%		13.5%	6.4%				

※E<sub>fr</sub>：縦振動法によるヤング係数、E<sub>b-AV</sub>：曲げ試験の真の曲げヤング係数の各等級平均値、G<sub>fb-AV</sub>：TGH 法によるせん断弾性係数の各等級平均値、G：せん断弾性係数、f<sub>s</sub>：せん断強さ

表 2.5-4 水平せん断試験結果 (異等級 Mx120・外層ヒノキ×内層スギ)

層数	軸	No.	含水率 %	密度 kg/m <sup>3</sup>	E <sub>fr</sub> kN/mm <sup>2</sup>	E <sub>b-AV</sub> kN/mm <sup>2</sup>	G <sub>fb-AV</sub> kN/mm <sup>2</sup>	G kN/mm <sup>2</sup>	f <sub>s</sub> N/mm <sup>2</sup>	破壊形態
5層	強軸	bA208強5	11.1	454	6.47	10.11	0.281	0.324	3.14	せん断
		bA208強6	10.8	429	6.06			0.290	2.94	せん断
		bA209強3	10.4	442	6.09			0.313	3.37	せん断
		bA209強4	10.8	441	6.33			0.339	3.27	せん断
		bA210強1	10.7	436	6.31			0.306	3.22	せん断
		bA210強2	10.9	437	6.57			0.336	3.04	せん断
		平均値	10.8	440	6.31			0.318	3.16	
	変動係数	2.1%	1.8%	3.2%	5.8%	5.0%				
	弱軸	bA213弱1	10.9	431	2.55	1.31	0.206	0.678	1.16	曲げ
		bA213弱2	10.8	429	2.21			0.260	1.20	曲げ
		bA213弱3	11.0	448	2.62			5.230	1.45	曲げ
		bA213弱4	11.0	442	2.44			1.026	1.33	曲げ
		bA213弱5	10.2	438	2.53			1.484	1.27	曲げ
		bA213弱6	11.1	443	2.35			1.490	1.31	曲げ
平均値		10.8	438	2.45	1.695			1.29		
変動係数	3.1%	1.7%	6.3%	106.0%	7.9%					
7層	強軸	bA214強1	10.7	418	5.93	8.68	0.286	0.298	2.05	せん断
		bA214強2	10.9	434	5.96			0.289	2.07	せん断
		bA214強3	10.9	433	5.84			0.309	2.18	せん断
		bA214強4	10.9	430	5.89			0.311	2.16	せん断
		bA214強5	11.0	431	5.92			0.323	2.25	せん断
		bA214強6	10.6	429	5.92			0.306	2.25	せん断
		平均値	10.8	429	5.91			0.306	2.16	
	変動係数	1.6%	1.3%	0.7%	3.9%	4.0%				
	弱軸	bA215弱1	10.5	417	3.12	1.99	0.224	0.276	1.46	せん断
		bA215弱2	10.6	431	2.85			0.299	1.33	せん断
		bA215弱3	10.6	428	2.98			0.268	1.39	せん断
		bA215弱4	10.6	422	2.86			0.258	1.34	曲げ
		bA215弱5	11.1	419	3.06			0.271	1.34	せん断
		bA215弱6	10.6	419	2.96			0.212	1.24	曲げ
平均値		10.7	423	2.97	0.264			1.35		
変動係数	1.9%	1.4%	3.6%	11.0%	5.5%					

※E<sub>fr</sub>: 縦振動法によるヤング係数、E<sub>b-AV</sub>: 曲げ試験の真の曲げヤング係数の各等級平均値、G<sub>fb-AV</sub>: TGH 法によるせん断弾性係数の各等級平均値、G: せん断弾性係数、f<sub>s</sub>: せん断強さ

次に、試験体仕様とせん断強度の比較を図 2.5-2 に示す。せん断強度については、強軸方向では強度等級が大きいほどせん断強度も大きくなる傾向が認められ、特に 5 層仕様で顕著であった。これに対して弱軸方向では強度等級とのはっきりした関係は認められなかった。これは、異等級構成では強度等級は外層ラミナの品質に大きく依存しているが、弱軸方向の場合はそれがせん断強度にあまり影響を及ぼさないためと考えられる。

せん断強度の対数正規分布仮定による統計的下限值と JAS 基準値との比較を図 2.5-3 に示す。せん断強度の JAS 基準値は、規定外の板幅となるラミナを用いる場合に確保すべきせん断強度 (1.5N/mm<sup>2</sup>) と設定されており、5 層の強軸方向の下限值は大きく上回っている。一方、7 層の強軸では全体に余裕度が少なく、Mx90 の下限値が基準値を下回っている。5 層より 7 層の方がせん断強度が低くなっている要因としては、寸法効果のほかに、試験体厚さとせん断スパンの増加により弱軸方向の内層ラミナの回転が生じやすくなるものと考えられる。より大きな試験体厚さや内層ラミナの異なる樹種なども検討する必要がある。



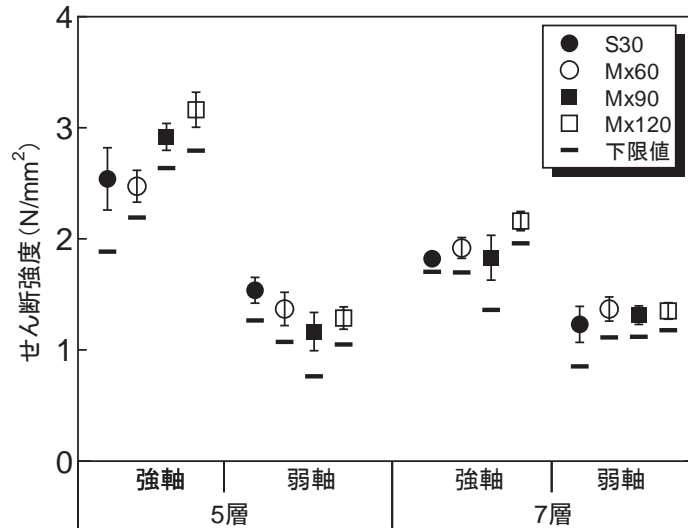


図 2.5-2 CLT の等級，積層数，強軸・弱軸によるせん断強度の比較

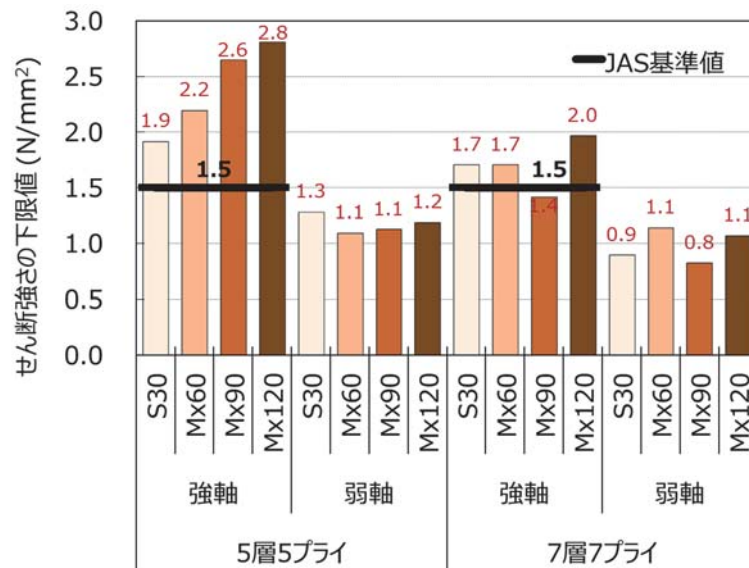


図 2.5-3 せん断強度の統計的下限值と JAS 基準値

#### 2. 5. 4 まとめ

水平せん断試験の結果，せん断強度は，強軸方向では強度等級が大きいほどせん断強度も大きくなる傾向が認められたのに対して，弱軸方向では強度等級とのはっきりした関係は認められなかった。せん断強度の下限值と JAS 基準値との比較では，5 層の強軸方向では基準値を上回ったが，7 層の強軸方向では一部が下回り，試験体厚さや樹種の影響についてさらなる検討が必要と考えられた。

#### 参考文献

- 1) 直交集成板の日本農林規格：農林水産省告示第 3079 号. 2)新藤健太ほか：日本木材学会大会要旨集，2013(CD-ROM).

## 2. 6 むり込み

### 2. 6. 1 目的

JAS のラミナ構成に基づいて製造された国産 CLT のむり込み特性を明らかにすることを目的として、加力条件の異なる実大むり込み試験を行い、外層プライの繊維方向（強軸、弱軸）および強度等級、積層数とむり込み特性との関係について検討した。

### 2. 6. 2 試験体と試験方法

むり込み試験体の仕様については、新たに制定された JAS の同一等級構成 1 種類（強度等級 S30）と異等級構成 3 種類（強度等級 Mx60, Mx90, Mx120）とした。いずれも内層に用いるラミナは M30 以上のスギとし、外層に用いるラミナは S30 では M30 以上のスギ、Mx60 では M60 のスギ、Mx90 では M90 のカラマツ、Mx120 では M120 のヒノキとした。ラミナのたて継ぎと積層接着には水性高分子イソシアネート系接着剤を用いた。なお、ラミナの幅はぎ接着は行っていない。積層数（5 層 5 プライ・7 層 7 プライ）、外層ラミナの繊維方向（強軸・弱軸）、加力方向（縦使い・平使い）の組み合わせ 32 通りについて検討し、1 条件 3 体ずつ試験を行った。加力条件を図 2.6-1 に示す。

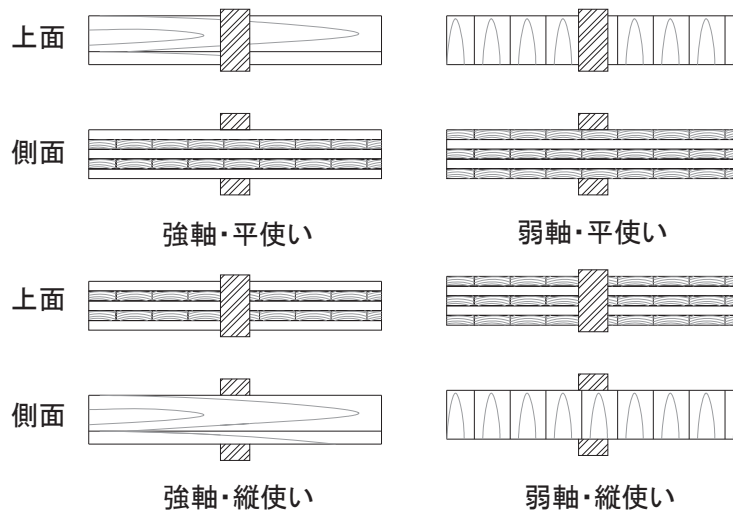


図 2.6-1 むり込み試験の加力条件

むり込み試験は ISO 13910 に準じて行った。試験の様子を図 2.6-2 に示す。加力は、油圧式強度試験機（(株)東京衡機製造所、容量 1000kN）を用いて行い、試験体の材央の上下面に加力板（厚さ 50×幅 300×長さ 90mm、面取り半径=3mm）を設置した。むり込み量の計測は、加力板下面の 2 か所でひずみゲージ式変位変換器（東京測器、CDP-25M、容量 25mm）を用いて行い、2 点の平均値をむり込み量とした。試験体の断面寸法は、5 層では 150×150mm、7 層では 150×210mm とし、長さは各加力条件において試験体厚さとなる寸法の 6 倍とした。加力速度は 1.5mm/分とした。

各種むり込み特性値の算定方法を図 2.6-3 に示す。ISO 13910 に準じて目視で求めた荷重曲線との最初の接線の傾きを初期剛性  $K_{c,90}$  とし、初期剛性を 2mm オフセットした線と荷重変形曲線との交点に相当する荷重  $P_y$  を受圧面積（試験体幅×加力板長さ）で除した値をむり込み降伏強さ  $F_{c,90,y}$  とした。むり込み強さ  $F_{c,90}$  については、ISO 13910 では試験体が破壊したときの荷重あるいは 20mm 変形したときの荷重  $P_{20mm}$  の小さい方の荷重値から求めることとしているが、縦使いの CLT では、図 2.6-3 のように  $P_y$  と  $P_{20mm}$  の間に極小値  $P_{min}$  を取る場合が多かったため、本報では  $P_y$ 、 $P_{min}$ 、 $P_{20mm}$  のうち最小となる荷重値を受圧面積で除

して求めた。



【平使い】

【縦使い】

図 2.6-2 めり込み試験の様子

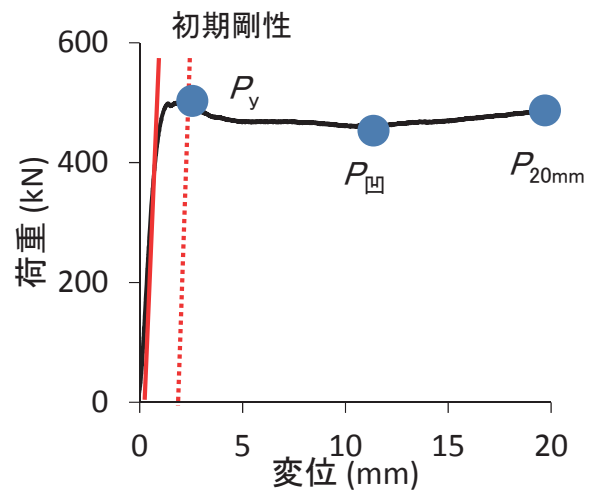


図 2.6-3 各種特性値の算出方法

### 2. 6. 3 結果

各仕様の代表的な荷重変形曲線と破壊状況を図 2.4-6～2.6-11 に示す。

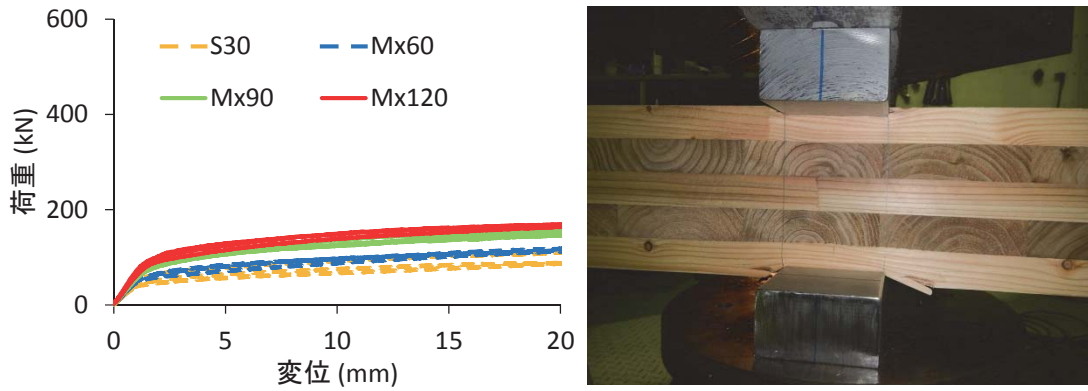


図 2.6-4 荷重変形曲線と破壊状況 (5層\_強軸\_平使い)

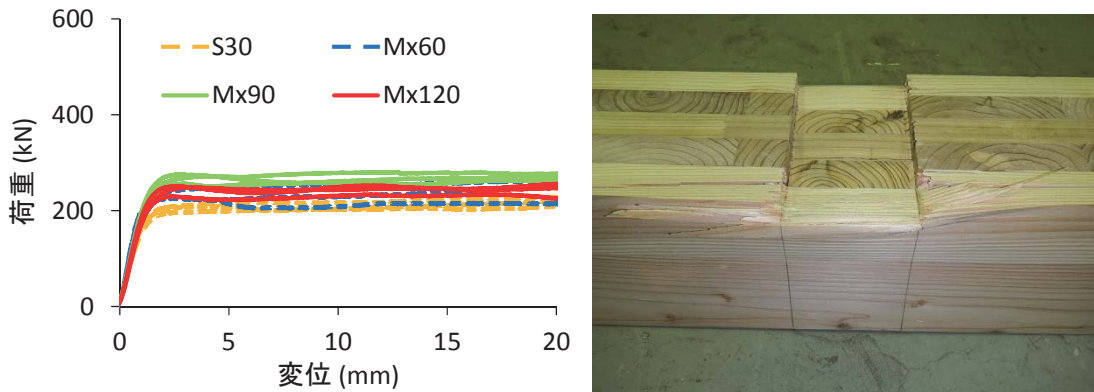


図 2.6-5 荷重変形曲線と破壊状況 (5層\_強軸\_縦使い)

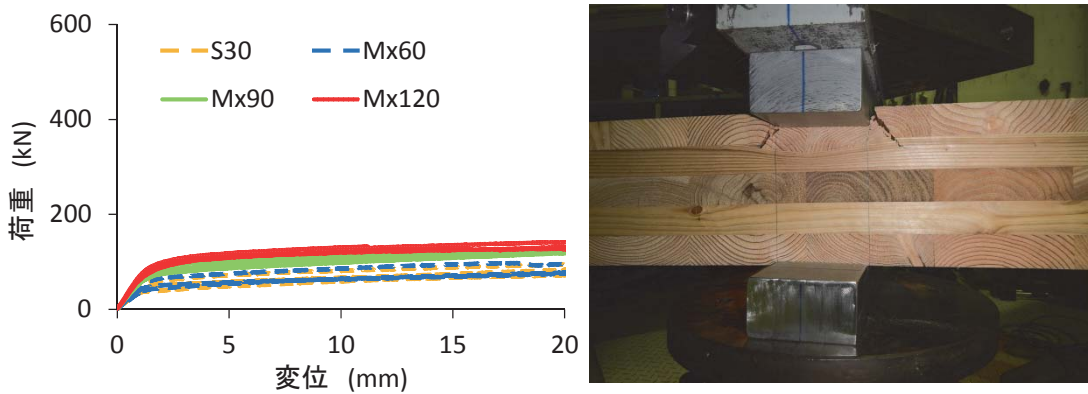


図 2.6-6 荷重変形曲線と破壊状況 (5層\_弱軸\_平使い)

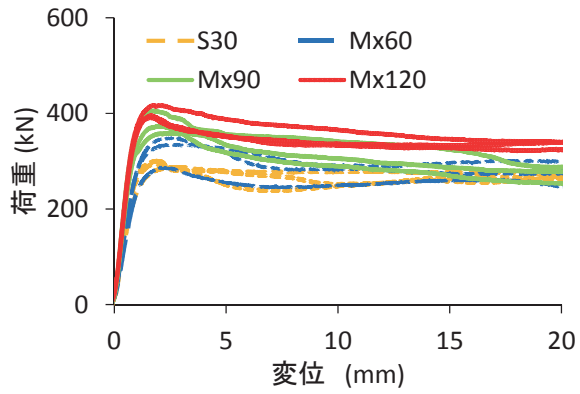


図 2.6-7 荷重変形曲線と破壊状況 (5層\_弱軸\_縦使い)

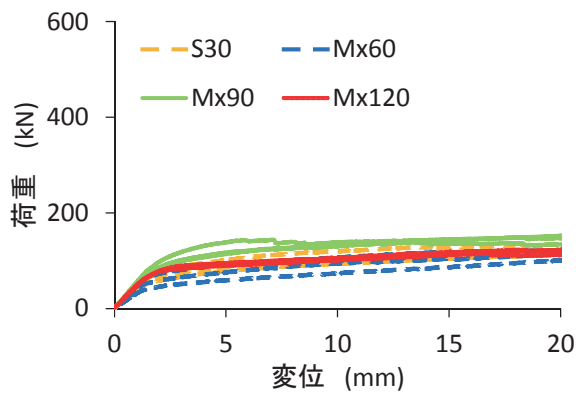


図 2.6-8 荷重変形曲線と破壊状況 (7層\_強軸\_平使い)

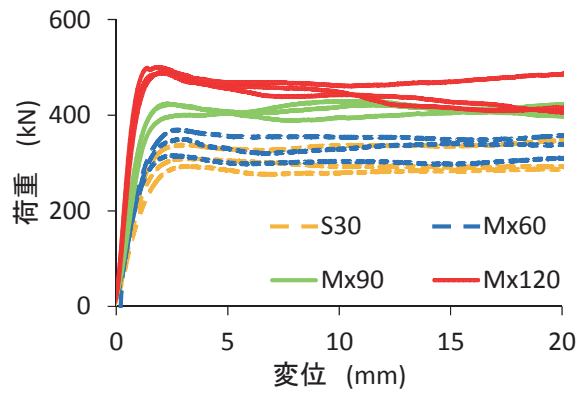


図 2.6-9 荷重変形曲線と破壊状況 (7層\_強軸\_縦使い)

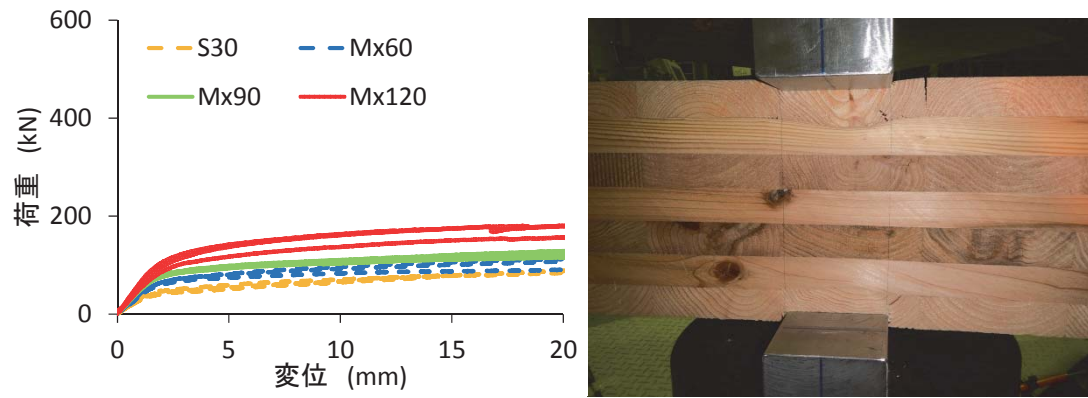


図 2.6-10 荷重変形曲線と破壊状況 (7層\_弱軸\_平使い)

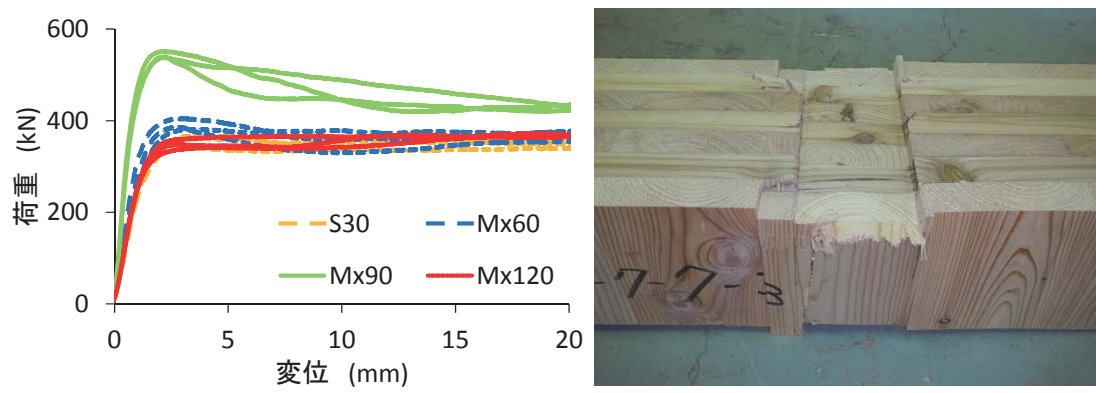


図 2.6-11 荷重変形曲線と破壊状況 (7層\_弱軸\_縦使い)

次に、めり込み試験の結果を表 2.6-1～2.6-4 に示す。

表 2.6-1 めり込み試験結果（同一等級 S30・外層スギ×内層スギ）

加力方向	層数	軸	No.	含水率 %	密度 kg/m <sup>3</sup>	$E_{fr}$ kN/mm <sup>2</sup>	$K_{c,90}$ N/mm <sup>3</sup>	$f_{c,90,y}$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{c,90,極小}$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{c,90,20mm}$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{c,90}$ N/mm <sup>2</sup>
平使い	5層	強軸	cA169強1	13.8	432	4.03	3.23	4.38		6.51	6.51
			cA169強3	14.2	431	4.06	4.10	5.35	8.11	8.11	
			cA169強5	14.5	405	4.56	3.16	3.78	6.40	6.40	
		平均値	14.2	422	4.22	3.49	4.50	7.01	7.01		
		変動係数	2.5%	3.7%	7.1%	15.0%	17.6%	13.6%	13.6%		
		弱軸	cA170弱1	13.5	413	3.03	2.97	3.22	5.30	5.30	
	cA170弱3		14.3	424	2.73	4.01	4.88	6.98	6.98		
	cA170弱5		14.4	443	3.25	4.00	3.96	6.13	6.13		
	平均値	14.0	427	3.00	3.66	4.02	6.14	6.14			
	変動係数	3.6%	3.6%	8.8%	16.3%	20.7%	13.7%	13.7%			
	7層	強軸	cA184強1	12.2	427	2.63	3.31	7.03	9.90	9.90	
			cA184強3	12.9	420	3.26	2.80	5.34	8.32	8.32	
			cA184強5	12.4	421	3.09	2.96	5.95	8.80	8.80	
		平均値	12.5	423	3.00	3.02	6.11	9.00	9.00		
変動係数		2.7%	1.0%	11.0%	8.5%	14.0%	9.0%	9.0%			
弱軸		cA185弱1	14.8	419	2.65	2.14	3.43	6.44	6.44		
	cA185弱3	14.8	415	2.11	2.17	3.72	6.26	6.26			
	cA185弱5	14.3	416	2.30	2.33	4.02	6.46	6.46			
平均値	14.6	417	2.35	2.21	3.73	6.39	6.39				
変動係数	2.0%	0.5%	11.5%	4.6%	7.9%	1.7%	1.7%				
縦使い	5層	強軸	cA169強2	14.2	446	4.78	14.11	15.31	14.77	15.35	14.77
			cA169強4	13.2	421	4.29	13.23	14.50	16.10	16.10	
			cA169強6	13.8	440	4.90	14.38	15.53	16.78	16.78	
		平均値	13.7	436	4.66	13.91	15.11	16.08	15.89		
		変動係数	3.6%	3.0%	6.9%	4.3%	3.6%	4.4%	6.4%		
		弱軸	cA170弱2	13.6	428	2.56	24.37	20.58	18.41	19.47	18.41
	cA170弱4		13.2	426	2.86	24.23	20.76	17.49	19.74	17.49	
	cA170弱6		13.6	453	2.69	20.79	21.07	19.92	19.95	19.92	
	平均値	13.5	436	2.70	23.13	20.81	19.72	18.61			
	変動係数	1.5%	3.5%	5.6%	8.8%	1.2%	1.2%	6.6%			
	7層	強軸	cA184強2	13.1	419	3.15	11.83	16.22	15.28	15.41	15.28
			cA184強4	13.0	434	3.17	13.68	17.78	17.14	18.32	17.14
			cA184強6	12.3	403	3.02	10.58	15.44	14.54	15.18	14.54
		平均値	12.8	419	3.11	12.03	16.48	16.30	15.65		
変動係数		3.4%	3.7%	2.6%	12.9%	7.2%	10.7%	8.6%			
弱軸		cA185弱2	14.2	404	1.97	16.06	18.92	18.37	18.65	18.37	
	cA185弱4	14.7	410	2.39	13.71	17.98	17.53	17.97	17.53		
	cA185弱6	15.3	423	2.30	12.78	19.36	18.27	18.43	18.27		
平均値	14.7	412	2.22	14.18	18.76	18.35	18.06				
変動係数	3.8%	2.4%	10.0%	11.9%	3.8%	1.9%	2.6%				

※ $E_{fr}$ ：縦振動法によるヤング係数， $K_{c,90}$ ：めり込み剛性， $f_{c,90,y}$ ：めり込み降伏強さ， $f_{c,90,20mm}$ ：20mm 変形時のめり込み強さ， $f_{c,90}$ ：めり込み強さ

表 2.6-2 りり込み試験結果 (異等級 Mx60・外層スギ×内層スギ)

加力方向	層数	軸	No.	含水率 %	密度 kg/m <sup>3</sup>	$E_r$ kN/mm <sup>2</sup>	$K_{c,90}$ N/mm <sup>3</sup>	$f_{c,90,y}$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{c,90,層小}$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{c,90,20mm}$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{c,90}$ N/mm <sup>2</sup>
平 使 い	5 層	強 軸	cA178強2	13.9	437	4.13	3.80	5.65		8.36	8.36
			cA179強1	13.2	415	4.61	3.90	5.39		8.66	8.66
			cA181強1	13.3	428	3.89	3.67	4.70		8.28	8.28
		平均値	13.5	427	4.21	3.79	5.25		8.43	8.43	
		変動係数	2.7%	2.5%	8.7%	3.0%	9.4%		2.4%	2.4%	
		弱 軸	cA171弱1	12.1	434	3.04	3.51	5.19		7.06	7.06
	cA173弱1		11.9	438	2.00	3.43	3.94		5.55	5.55	
	cA175弱1		13.3	423	2.39	2.67	3.62		5.68	5.68	
	平均値	12.4	431	2.48	3.20	4.25		6.10	6.10		
	変動係数	6.1%	1.8%	21.3%	14.5%	19.6%		13.7%	13.7%		
	7 層	強 軸	cA187強1	12.9	446	4.43	3.50	6.29		8.99	8.99
			cA187強3	12.4	417	4.39	2.38	3.99		7.44	7.44
			cA187強5	12.3	437	4.97	3.22	5.06		8.32	8.32
		平均値	12.5	433	4.59	3.03	5.12		8.25	8.25	
変動係数		2.9%	3.4%	7.0%	19.3%	22.5%		9.4%	9.4%		
弱 軸		cA186弱1	12.9	428	2.84	3.09	5.69		8.29	8.29	
	cA186弱3	12.2	422	3.32	3.09	5.61		7.90	7.90		
	cA186弱5	11.4	424	2.46	2.62	5.30		6.69	6.69		
平均値	12.2	425	2.87	2.93	5.53		7.63	7.63			
変動係数	6.2%	0.7%	15.1%	9.1%	3.7%		10.9%	10.9%			
縦 使 い	5 層	強 軸	cA178強1	14.2	443	4.31	18.18	16.47	15.06	18.40	18.40
			cA179強2	13.5	410	4.43	18.38	16.66	15.06	15.79	15.06
			cA181強2	13.9	433	4.01	16.57	18.00	15.06	19.39	19.39
		平均値	13.9	429	4.25	17.71	17.04	15.06	17.86	17.62	
		変動係数	2.4%	3.9%	5.1%	5.6%	4.9%	15.06	10.4%	12.9%	
		弱 軸	cA171弱2	11.7	427	3.02	23.41	25.36	20.04	20.18	20.04
	cA173弱2		12.5	445	2.13	23.61	24.46	21.18	21.99	21.18	
	cA175弱2		13.2	417	2.64	19.45	20.28	17.97	18.07	17.97	
	平均値	12.4	430	2.60	22.16	23.37	19.04	20.08	19.73		
	変動係数	6.2%	3.4%	17.2%	10.6%	11.6%	19.04	9.8%	8.2%		
	7 層	強 軸	cA187強2	13.1	441	4.17	13.32	16.44	15.64	16.29	15.64
			cA187強4	11.9	420	4.13	13.65	18.25	16.79	17.81	16.79
			cA187強6	13.0	425	4.14	13.58	19.27	18.33	18.88	18.33
		平均値	12.7	428	4.15	13.52	17.99	17.99	17.66	16.92	
変動係数		5.2%	2.5%	0.5%	1.3%	8.0%	17.99	7.4%	8.0%		
弱 軸		cA186弱2	12.2	430	3.74	18.76	21.24	19.50	19.85	19.50	
	cA186弱4	12.7	421	2.56	17.06	20.03	17.27	18.68	17.27		
	cA186弱6	13.2	433	2.97	14.92	20.07	18.75	19.75	18.75		
平均値	12.7	428	3.09	16.91	20.45	18.75	19.43	18.51			
変動係数	3.8%	1.4%	19.5%	11.4%	3.4%	18.75	3.3%	6.1%			

※ $E_r$ ：縦振動法によるヤング係数， $K_{c,90}$ ：りり込み剛性， $f_{c,90,y}$ ：りり込み降伏強さ， $f_{c,90,20mm}$ ：20mm 変形時のりり込み強さ， $f_{c,90}$ ：りり込み強さ



表 2.6-3 むり込み試験結果（異等級 Mx90・外層カラマツ×内層スギ）

加力方向	層数	軸	No.	含水率 %	密度 kg/m <sup>3</sup>	$E_{fr}$ kN/mm <sup>2</sup>	$K_{c,90}$ N/mm <sup>3</sup>	$f_{c,90,y}$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{c,90,層小}$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{c,90,20mm}$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{c,90}$ N/mm <sup>2</sup>
平 使 い	5 層	強 軸	cA205強4	11.5	462	6.15	4.11	7.26		11.33	11.33
			cA205強5	11.3	450	6.31	4.47	7.34		10.83	10.83
			cA205強6	11.4	457	6.34	4.67	7.67		11.52	11.52
		平均値	11.4	457	6.27	4.42	7.42		11.22	11.22	
		変動係数	0.5%	1.3%	1.7%	6.4%	2.9%		3.2%	3.2%	
		弱 軸	cA204弱3	11.8	484	3.04	4.93	7.21		9.38	9.38
	cA204弱4		11.7	472	3.04	4.84	6.53		9.29	9.29	
	cA204弱5		11.3	454	3.23	4.46	6.01		8.81	8.81	
	平均値	11.6	470	3.10	4.74	6.59		9.16	9.16		
	変動係数	2.2%	3.2%	3.6%	5.2%	9.1%		3.4%	3.4%		
	7 層	強 軸	cA206強4	11.0	438	5.00	3.96	8.17		10.84	10.84
			cA206強5	11.1	439	4.81	3.89	7.96		9.92	9.92
			cA206強6	11.2	443	4.95	4.18	9.90	9.89	11.23	9.89
		平均値	11.1	440	4.92	4.01	8.68		10.66	10.22	
変動係数		0.8%	0.5%	1.9%	3.8%	12.3%		6.3%	5.3%		
弱 軸		cA207弱4	10.8	454	3.23	3.97	6.93		9.52	9.52	
	cA207弱5	10.8	443	3.20	3.62	6.59		8.59	8.59		
	cA207弱6	10.9	453	3.19	3.71	6.74		8.90	8.90		
平均値	10.8	450	3.21	3.77	6.75		9.00	9.00			
変動係数	0.5%	1.3%	0.7%	4.8%	2.6%		5.3%	5.3%			
縦 使 い	5 層	強 軸	cA205強1	11.6	464	6.10	13.39	18.73	18.42	19.81	18.42
			cA205強2	11.5	469	6.03	15.13	20.15	18.62	19.29	18.62
			cA205強3	11.3	448	5.83	15.89	19.81		20.34	20.34
		平均値	11.5	460	5.99	14.80	19.56		19.82	19.13	
		変動係数	1.4%	2.3%	2.4%	8.6%	3.8%		2.7%	5.5%	
		弱 軸	cA204弱1	11.1	459	3.12	30.07	26.59		18.62	18.62
	cA204弱2		11.3	449	3.20	34.34	28.65		21.17	21.17	
	cA204弱6		11.4	478	3.12	30.55	26.23		20.48	20.48	
	平均値	11.3	462	3.15	31.65	27.16		20.09	20.09		
	変動係数	1.3%	3.2%	1.4%	7.4%	4.8%		6.6%	6.6%		
	7 層	強 軸	cA206強1	10.8	440	4.91	15.42	21.09		21.47	21.47
			cA206強2	11.1	437	4.82	18.70	22.05	20.44	20.98	20.44
			cA206強3	11.2	448	5.46	19.30	21.97	21.29	22.30	21.29
		平均値	11.0	442	5.07	17.81	21.70		21.58	21.07	
変動係数		1.7%	1.3%	6.8%	11.7%	2.5%		3.1%	2.6%		
弱 軸		cA207弱1	11.1	464	3.46	31.92	28.07		22.78	22.78	
	cA207弱2	11.0	453	3.49	29.77	27.49	22.10	22.28	22.10		
	cA207弱3	10.9	456	3.39	33.35	28.80	22.05	22.89	22.05		
平均値	11.0	458	3.45	31.68	28.12		22.65	22.31			
変動係数	1.1%	1.3%	1.5%	5.7%	2.3%		1.4%	1.8%			

※ $E_{fr}$ ：縦振動法によるヤング係数， $K_{c,90}$ ：むり込み剛性， $f_{c,90,y}$ ：むり込み降伏強さ， $f_{c,90,20mm}$ ：20mm 変形時のむり込み強さ， $f_{c,90}$ ：むり込み強さ

表 2.6-4 りり込み試験結果 (異等級 Mx120・外層ヒノキ×内層スギ)

加力方向	層数	軸	No.	含水率 %	密度 kg/m <sup>3</sup>	$E_{fr}$ kN/mm <sup>2</sup>	$K_{c,90}$ N/mm <sup>3</sup>	$f_{c,90,y}$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{c,90,層小}$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{c,90,20mm}$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{c,90}$ N/mm <sup>2</sup>
平 使 い	5 層	強 軸	cA212強4	10.6	425	6.10	5.45	8.48		12.44	12.44
			cA212強5	10.7	430	5.77	4.66	7.82		12.15	12.15
			cA212強6	10.5	428	5.83	4.79	9.03		12.46	12.46
			平均値	10.6	428	5.90	4.96	8.44		12.35	12.35
		変動係数	0.7%	0.6%	3.0%	8.5%	7.2%		1.4%	1.4%	
		弱 軸	cA211弱4	11.1	439	2.63	4.92	7.82		9.72	9.72
			cA211弱5	11.0	443	2.44	5.61	8.34		10.49	10.49
			cA211弱6	10.4	443	2.38	4.96	7.67		9.39	9.39
	平均値		10.8	442	2.49	5.16	7.95		9.87	9.87	
	変動係数	3.2%	0.6%	5.4%	7.6%	4.4%		5.8%	5.8%		
	7 層	強 軸	cA214強4	11.0	444	5.91	4.84	9.52		13.30	13.30
			cA214強5	10.9	442	5.49	4.59	10.06		13.32	13.32
			cA214強6	10.6	429	5.92	3.87	8.25		11.51	11.51
			平均値	10.8	438	5.77	4.43	9.28		12.71	12.71
変動係数		1.8%	1.9%	4.2%	11.4%	10.0%		8.2%	8.2%		
弱 軸		cA215弱4	10.8	434	2.94	3.71	6.54		9.00	9.00	
		cA215弱5	10.5	421	2.92	3.55	6.78		8.27	8.27	
		cA215弱6	10.3	428	2.88	3.77	6.36		9.08	9.08	
	平均値	10.5	428	2.91	3.68	6.56		8.79	8.79		
変動係数	2.1%	1.5%	1.0%	3.0%	3.2%		5.1%	5.1%			
縦 使 い	5 層	強 軸	cA212強1	10.9	429	6.02	15.12	18.30	17.36	18.77	17.36
			cA212強2	10.8	414	5.93	13.51	16.59	16.29	16.53	16.29
			cA212強3	10.6	413	5.86	13.31	18.21	17.75	18.09	17.75
			平均値	10.8	419	5.93	13.98	17.70		17.80	17.13
		変動係数	1.4%	2.2%	1.3%	7.1%	5.4%		6.5%	4.4%	
		弱 軸	cA211弱1	11.0	435	2.58	34.06	29.93		24.96	24.96
			cA211弱2	11.4	447	2.75	33.42	27.00	23.58	23.82	23.58
			cA211弱3	10.5	441	2.82	31.27	27.32	24.41	24.94	24.41
	平均値		11.0	441	2.72	32.92	28.08		24.57	24.32	
	変動係数	4.0%	1.3%	4.6%	4.4%	5.7%		2.7%	2.9%		
	7 層	強 軸	cA214強1	10.8	425	5.74	13.91	17.82	17.75	19.39	17.75
			cA214強2	10.8	427	5.55	14.91	18.99		19.22	19.22
			cA214強3	11.1	428	5.65	13.52	18.21	17.98	19.15	17.98
			平均値	10.9	426	5.65	14.11	18.34		19.26	18.32
		変動係数	1.5%	0.4%	1.7%	5.1%	3.3%		0.6%	4.3%	
		弱 軸	cA215弱1	10.8	433	2.98	30.57	25.56	24.16	25.51	24.16
			cA215弱2	10.7	417	2.98	29.43	24.94		21.33	21.33
			cA215弱3	10.8	436	3.02	26.22	25.13	21.45	21.75	21.45
平均値	10.8		429	2.99	28.74	25.21		22.86	22.31		
変動係数	0.4%	2.3%	0.8%	7.9%	1.2%		10.1%	7.2%			

※ $E_{fr}$  : 縦振動法によるヤング係数,  $K_{c,90}$  : りり込み剛性,  $f_{c,90,y}$  : りり込み降伏強さ,  $f_{c,90,20mm}$  : 20mm 変形時のりり込み強さ,  $f_{c,90}$  : りり込み強さ

次に、各試験体仕様のりり込み強さの比較を図 2.6-12~2.6-13 に、りり込み剛性の比較を図 2.6-14~2.6-15 に示す。平使いと縦使いの比較では、縦使いのほうがりり込み性能が顕著に高くなっており、りり込み強さでは約 2 倍、りり込み剛性では約 5 倍であった。縦使いでは、一部のラミナの繊維方向が鉛直となり、横圧縮よりも性能の高い縦圧縮性能が発揮されているためである。そして、縦使いでは、強軸試験体よりも弱軸試験体の方が、繊維方向が鉛直となるラミナの枚数、すなわち、試験体全幅に占める割合が多くなるため、りり込み性能が高くなっている。一方、平使いでは、強軸試験体よりも弱軸試験体の方がりり込み強さが低くなっている。これは、強軸試験体では外層ラミナの曲げ性能と余長効果が発揮されるのに対して、弱軸試験体では外層ラミナの曲げ性能が低く、割裂しやすいためにそれらの効果が十分に発揮されないものと考えられる。

CLT の強度等級とめり込み強さの関係については、外層ラミナの等級が上がるにつれて、概ね強度が向上する傾向が示されている。特に、全層スギの Mx60 と外層カラマツの Mx90 は、外層ラミナの密度の違いによって関係が明瞭であった。一方、外層ヒノキの Mx120 と Mx90 では一部で関係が逆転していたが、めり込み強さと相関が高い密度は樹種や採材位置によって異なること、樹種によってはヤング係数の高い成熟材の密度が未成熟材より低くなる場合があること、軸方向と層数によっては内層ラミナの材質が影響することも考えられる。異樹種構成の CLT のめり込み性能には複合的な因子が影響することが示唆された。

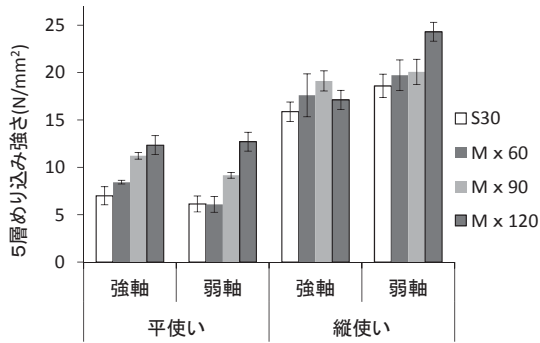


図 2.6-12 5層 CLT のめり込み強さ

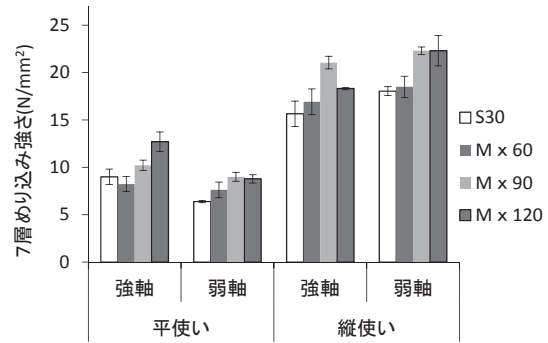


図 2.6-13 7層 CLT のめり込み強さ

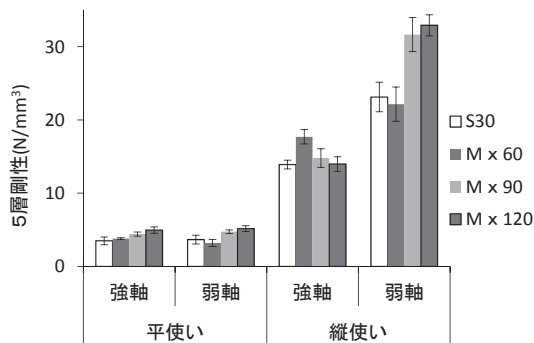


図 2.6-14 5層 CLT の剛性

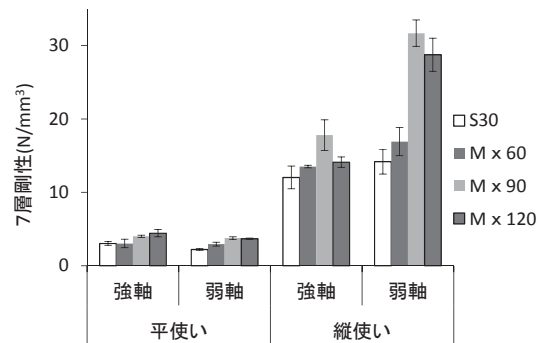


図 2.6-15 7層 CLT の剛性

#### 2. 6. 4 まとめ

縦使いでは、繊維方向が鉛直となるラミナの縦圧縮性能が発揮されるため、平使いよりもめり込み性能が極めて高くなることが示された。とりわけ、弱軸試験体では、繊維方向が鉛直となるラミナの枚数が多くなるため、強軸試験体よりも性能向上が顕著であった。

平使いでは、強軸試験体よりも弱軸試験体のほうが外層ラミナの割裂が生じやすく、余長効果も少ないため、めり込み強さが低くなることが示された。

CLT の強度等級とめり込み強さの関係については、外層ラミナの等級が上がるにつれて、概ね強度が向上する傾向が示された。異樹種構成の CLT のめり込み性能には外層の樹種や密度、加力方向によっては内層ラミナの材質も影響し、さらなる検討が必要と考えられた。

## 2. 7 圧縮性能

### 2. 7. 1 短柱圧縮

#### (1) 概要

JAS 規格案に則り製造された Mx60 (外層スギ・内層スギ) および Mx120 (外層ヒノキ・内層スギ) の 5 層 5 プライの CLT の圧縮強度性能およびこれに及ぼす細長比 ( $\lambda$ ) や荷重方向の影響を明らかにする。

#### (2) 試験体

CLT 大板から圧縮試験体を採取した。内訳を表 2.7.1-1 に示す。

表 2.7.1-1 短柱圧縮試験体の仕様

等級	外層	内層	細長比	長さ	荷重方向	個数
Mx120	M120 ヒノキ	M30 スギ	20	863mm	強軸	5
			15	646mm	強軸	5
					弱軸	5
10	432mm	強軸	5			
Mx60	M60 スギ	M30 スギ	15	646mm	強軸	5
					弱軸	5

#### (3) 試験方法

等級は Mx120 と Mx60、細長比 (以下 $\lambda$ ) は 10、15、20 とし、 $\lambda$  15 についてのみ強軸方向に加えて弱軸にも加力した。

非破壊試験として、密度および縦振動法による 1 次の共振周波数からヤング係数を求めた。圧縮試験は、最大容量 3000kN の圧縮試験機 (株式会社 前川試験機製作所製) を用いて行った。試験体の幅広面 2 面に、標点間距離を試験体長さの 1/2 として変位計 (東京測器研究所製、CDP-25) を取り付け、圧縮変形量を測定した。また、破壊部近傍から含水率測定用試験体を切り出し、全乾法で含水率を測定した。圧縮試験の様子を写真 2.7.1-1 に示す。



写真 2.7.1-1 圧縮試験の様子

#### (4) 結果

非破壊試験結果および圧縮試験から算出した圧縮ヤング係数、圧縮比例限度応力および圧縮強度を表 2.7.1-2 に、荷重変位曲線を図 2.7.1-1 に示す。

表 2.7.1-2 圧縮試験結果

Mx120 圧縮 λ20	密度 kg/m <sup>3</sup>	縦振動 kN/mm <sup>2</sup>	E <sub>c</sub> N/mm <sup>2</sup>	σ <sub>c</sub> N/mm <sup>2</sup>	ε max μ	σ <sub>p1</sub> % N/mm <sup>2</sup>	ε <sub>p1</sub> % μ	σ <sub>p2</sub> % N/mm <sup>2</sup>	ε <sub>p2</sub> % μ	試験 時間	含水率 %
k1 A210	447.0	6.30	6542	25.9	5740	15.3	2350	17.2	2665	6' 35"	
k3 A210	448.0	6.21	6845	27.6	6660	16.8	2440	19.2	2834	6' 00"	
k4 A210	440.0	5.99	6573	26.5	5290	15.9	2414	18.9	2910	4' 30"	
k5 A210	446.0	6.10	6480	25.8	4584	12.9	1964	14.5	2245	5' 15"	
k6 A210	444.0	6.00	6438	26.3	6479	15.3	2381	17.8	2799	5' 30"	
平均	444.0	6.14	6576	26.4	5751	15.2	2310	17.5	2691		
最大	448.0	6.30	6845	27.6	6660	16.8	2440	19.2	2910		
最小	439.0	5.99	6438	25.8	4584	12.9	1964	14.5	2245		
標準偏差	3.7	0.13	159.4	0.7	856	1.4	196	1.9	265		
変動係数	0.8%	2.1%	2.4%	2.7%	14.9%	9.5%	8.5%	10.7%	9.8%		

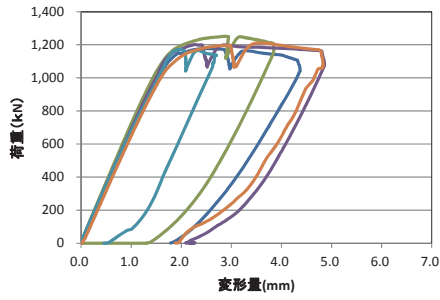
Mx120 圧縮 λ15	密度 kg/m <sup>3</sup>	縦振動 kN/mm <sup>2</sup>	E <sub>c</sub> N/mm <sup>2</sup>	σ <sub>c</sub> N/mm <sup>2</sup>	ε max μ	σ <sub>p1</sub> % N/mm <sup>2</sup>	ε <sub>p1</sub> % μ	σ <sub>p2</sub> % N/mm <sup>2</sup>	ε <sub>p2</sub> % μ	試験 時間	含水率 %
e2 A210	435.0	5.17	6436	26.3	8437	15.3	2353	18.3	2848	3' 45"	
e3 A210	441.0	5.40	6262	26.1	7245	18.3	2910	20.7	3344	5' 40"	
e4 A210	447.0	5.37	5820	26.2	7767	13.2	2248	15.3	2636	4' 55"	
e5 A210	452.0	5.59	6949	27.6	8063	11.9	1702	15.3	2213	3' 15"	
e6 A210	456.0	5.88	6457	28.2	6832	16.3	2494	19.2	2959	4' 05"	
平均	445.3	5.44	6385	26.9	7669	15.0	2342	17.7	2800		
最大	456.0	5.88	6949	28.2	8437	18.3	2910	20.7	3344		
最小	435.0	5.17	5820	26.1	6832	11.9	1702	15.3	2213		
標準偏差	7.8	0.26	406	0.9	639	2.5	437	2.4	417		
変動係数	1.8%	4.8%	6.4%	3.5%	8.3%	16.8%	18.7%	13.6%	14.9%		

Mx120 圧縮 λ10	密度 kg/m <sup>3</sup>	縦振動 kN/mm <sup>2</sup>	E <sub>c</sub> N/mm <sup>2</sup>	σ <sub>c</sub> N/mm <sup>2</sup>	ε max μ	σ <sub>p1</sub> % N/mm <sup>2</sup>	ε <sub>p1</sub> % μ	σ <sub>p2</sub> % N/mm <sup>2</sup>	ε <sub>p2</sub> % μ	試験 時間	含水率 %
eB1 A210	431.0	2.32	2261	15.3	17496	6.8	3097	7.9	3608	4' 30"	
eB2 A210	437.0	2.23	2219	15.0	15411	7.6	3423	8.3	3779	4' 45"	
eB3 A212	438.0	2.44	2391	16.4	15139	8.4	3560	9.5	4071	4' 50"	
eB4 A212	432.0	2.30	2334	15.1	14181	7.8	3363	8.9	3874	8' 00"	
eB5 A213	414.0	2.30	2276	15.1	11898	6.9	3036	7.9	3517	5' 45"	
平均	427.7	2.26	2296	15.4	14825	7.5	3296	8.5	3770		
最大	438.0	2.44	2391	16.4	17496	8.4	3560	9.5	4071		
最小	414.0	1.95	2219	15.0	11898	6.8	3036	7.9	3517		
標準偏差	10.9	0.17	67	0.6	2035	0.7	222	0.7	219		
変動係数	2.6%	7.3%	2.9%	3.9%	13.7%	8.8%	6.7%	8.2%	5.8%		

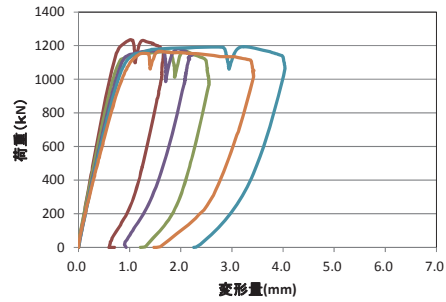
Mx120 圧縮 λ10	密度 kg/m <sup>3</sup>	縦振動 kN/mm <sup>2</sup>	E <sub>c</sub> N/mm <sup>2</sup>	σ <sub>c</sub> N/mm <sup>2</sup>	ε max μ	σ <sub>p1</sub> % N/mm <sup>2</sup>	ε <sub>p1</sub> % μ	σ <sub>p2</sub> % N/mm <sup>2</sup>	ε <sub>p2</sub> % μ	試験 時間	含水率 %
j2 A210	446.6	3.91	7882	27.2	6016	18.1	2253	20.0	2532	4' 25"	
j3 A210	434.4	3.81	7185	25.6	7837	14.7	1953	17.6	2395	4' 05"	
j4 A210	429.6	3.88	6914	25.8	7401	12.0	1740	15.3	2251	4' 15"	
j5 A210	445.5	4.24	6744	26.3	12002	9.6	1416	11.9	1788	5' 45"	
j6 A210	433.5	3.55	5968	25.5	5900	10.4	1649	12.6	2021	5' 40"	
平均	438.6	3.82	6938	26.1	7831	13.0	1802	15.5	2197		
最大	446.6	4.24	7882	27.2	12002	18.1	2253	20.0	2532		
最小	429.6	3.52	5968	25.5	5900	9.6	1416	11.9	1788		
標準偏差	7.0	0.26	695	0.7	2480	3.5	317	3.4	297		
変動係数	1.6%	6.9%	10.0%	2.7%	31.7%	26.8%	17.6%	22.0%	13.5%		

Mx60 圧縮 λ15	密度 kg/m <sup>3</sup>	縦振動 kN/mm <sup>2</sup>	E <sub>c</sub> N/mm <sup>2</sup>	σ <sub>c</sub> N/mm <sup>2</sup>	ε max μ	σ <sub>p1</sub> % N/mm <sup>2</sup>	ε <sub>p1</sub> % μ	σ <sub>p2</sub> % N/mm <sup>2</sup>	ε <sub>p2</sub> % μ	試験 時間	含水率 %
e1-A176	427.0	4.46	4914	22.2	10283	12.2	2481	13.7	2831	5' 40"	
e2-A176	417.0	4.45	4675	22.0	8868	10.5	2225	11.8	2540	5' 20"	
e3-A182	415.0	4.23	4581	21.0	8200	10.9	2404	12.4	2751	8' 30"	
e5-A183	428.0	5.34	5988	24.3	5037	14.6	2430	18.1	3052	6' 05"	
e6-A183	417.0	3.90	3787	20.4	10269	10.4	2712	12.0	3161	5' 25"	
平均	423.5	4.43	4789	22.0	8531	11.7	2450	13.6	2867		
最大	437.0	5.34	5988	24.3	10283	14.6	2712	18.1	3161		
最小	415.0	3.90	3787	20.4	5037	10.4	2225	11.8	2540		
標準偏差	8.6	0.49	793	1.5	2152	1.8	175	2.6	246		
変動係数	2.0%	11.0%	16.5%	6.8%	25.2%	15.1%	7.2%	19.3%	8.6%		
eB1-A176	448.0	2.22	2182	14.1	13081	6.7	3064	7.4	3430	6' 10"	
eB2-A176	439.0	2.36	2370	14.8	13438	7.7	3295	8.4	3636	10' 30"	
eB3-A182	440.0	2.53	2389	14.4	15632	7.8	3297	8.4	3588	9' 40"	
eB4-A182	437.0	2.93	2765	15.2	10426	9.6	3502	10.5	3880	8' 00"	
eB5-A183	425.0	2.59	2622	14.5	15318	6.8	2636	7.9	3092	8' 10"	
平均	437.2	2.55	2466	14.6	13579	7.7	3159	8.5	3525		
最大	448.0	2.93	2765	15.2	15632	9.6	3502	10.5	3880		
最小	425.0	2.22	2182	14.1	10426	6.7	2636	7.4	3092		
標準偏差	7.6	0.24	229	0.4	2088	1.2	331	1.2	291		
変動係数	1.7%	9.6%	9.3%	3.0%	15.4%	15.0%	10.5%	13.9%	8.3%		

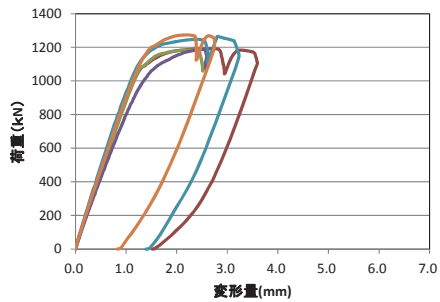
a) Mx120 λ 20 強軸



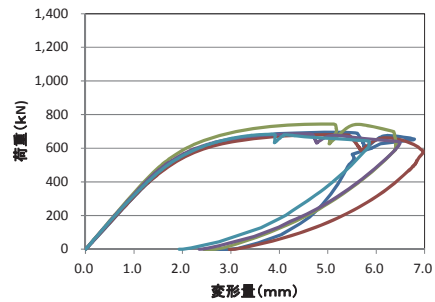
d) Mx120 λ 10 強軸



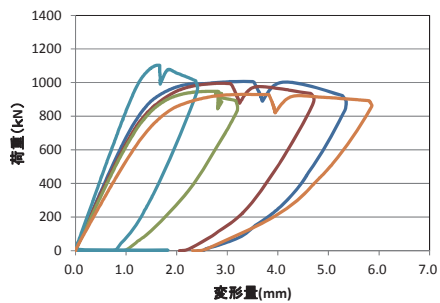
b) Mx120 λ 15 強軸



c) Mx120 λ 15 弱軸



e) Mx60 λ 15 強軸



f) Mx60 λ 15 弱軸

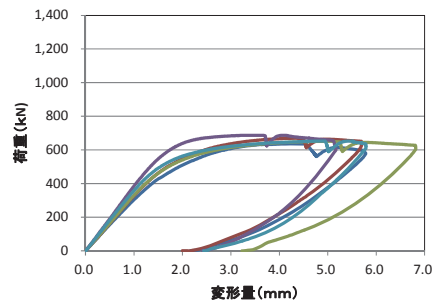


図 2.7.1-1 荷重—変位曲線

なお、表 2.7.1-2 の各項目の算出方法は以下の通り。

$\sigma_c$  ; 圧縮強度 : 最大荷重  $P_{max}$  から算出

$E_c$  ; 圧縮ヤング係数 :  $0.1P_{max}$  時と  $0.4P_{max}$  時を結ぶ直線の傾きから算出

$E_{max}$  ; 最大ひずみ :  $P_{max}$  時の変形量を標点間距離で除した数値

比例限度応力については、 $E_c$  を求めた直線から荷重が 1%離れた時の数値 ( $\sigma_{p1\%}$ 及び  $\varepsilon_{p1\%}$ ) と 2%離れた時の数値 ( $\sigma_{p2\%}$ 及び  $\varepsilon_{p2\%}$ ) を示す。

### 1) 非破壊試験の結果

縦振動法で測定されたヤング係数と圧縮試験から求めた圧縮ヤング係数の関係を図 2.7.1.2 に示す。Mx120 の  $\lambda 10$  を除いて両者はおおよそ一致を見せたが、縦振動法のヤング係数の方が低い傾向にある。試験体長さの影響あるいはヤング係数の異なる樹種の影響が考えられる。

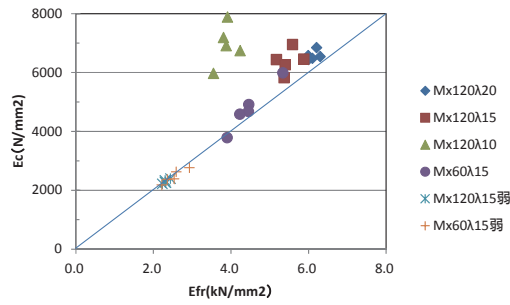


図 2.7.1-2 縦振動法のヤング係数 (Efr) と圧縮試験時のヤング係数 (Ec) の関係

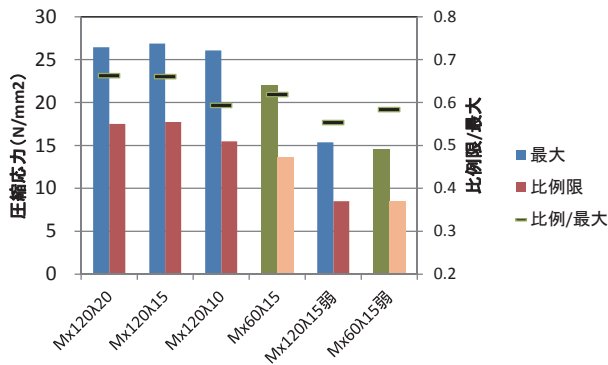


図 2.7.1-3 圧縮応力

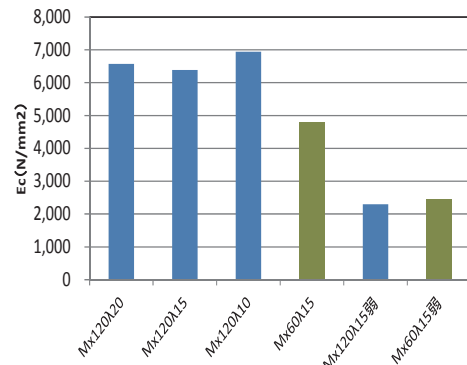


図 2.7.1-4 圧縮ヤング係数

## 2) 圧縮試験の結果

等級、荷重方向別の最大応力、比例限度時応力（2%時）及び比例限度に対する最大応力の比の平均値を図 2.7.1-3 に、また、圧縮ヤング係数を図 2.7.1-4 に示す。

### イ) 細長比

Mx120 の強軸の最大応力については、細長比 $\lambda$ の影響はなかった。比例限度応力については $\lambda 10$  で若干低下した。最大応力に対する比例限度応力の比は、 $\lambda 15$  及び  $20$  で  $0.67$ 、 $\lambda 10$  で  $0.59$  であった。圧縮ヤング係数は $\lambda 10$  で若干高い数値が測定された。

### ロ) 等級

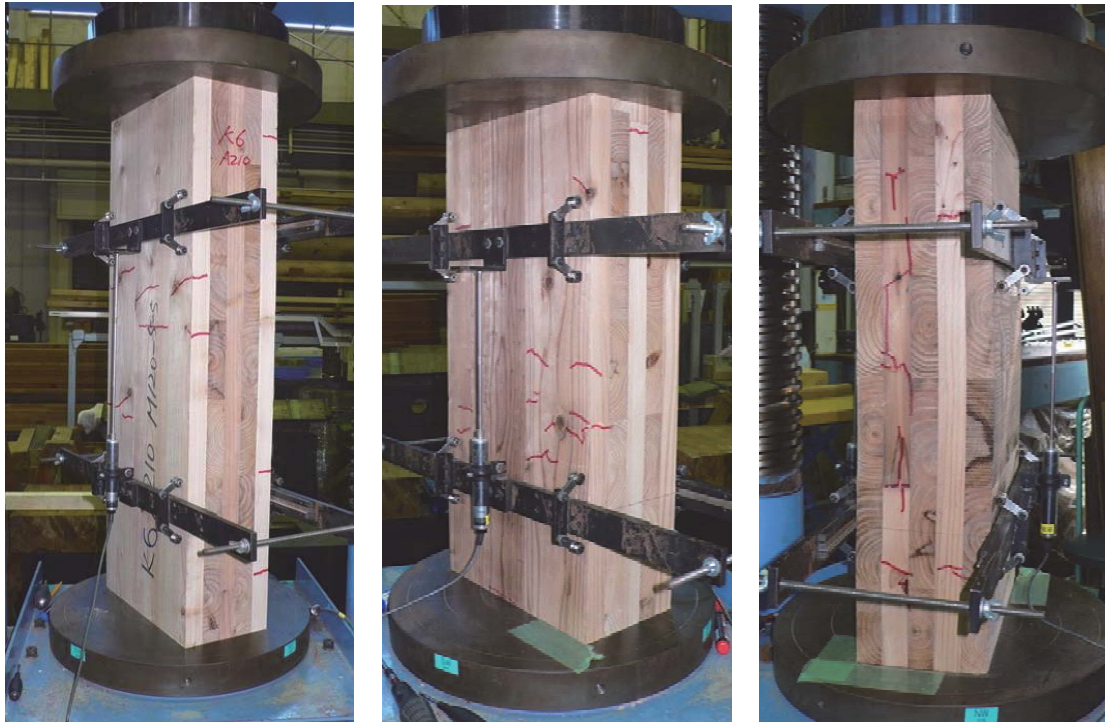
$\lambda 15$  の荷重方向強軸について Mx60 に対する Mx120 の比は、最大応力で  $1.22$ 、比例限度で  $1.30$ 、圧縮ヤング係数で  $1.33$  であった。また、荷重方向弱軸については、最大応力で  $1.05$ 、比例限度で  $1.00$ 、圧縮ヤング係数で  $0.93$  であった。

### ハ) 荷重方向

$\lambda 15$  の Mx60 について、強軸に対する弱軸の比は最大応力で  $0.66$ 、比例限度応力で  $0.63$ 、圧縮ヤング係数で  $0.51$  であった。また、 $\lambda 15$  の Mx120 について、最大応力で  $0.57$ 、比例限度応力で  $0.48$ 、圧縮ヤング係数で  $0.36$  であった。

## 3) 破壊の様子

破壊の様子を写真 2.7.1-1 に示す。Mx120 強軸では、外層のヒノキラミナに破壊が集中して生じる一方で、内層の平行層・直交層には顕著な破壊は観察されなかった。これに対して Mx60 強軸では外層とともに内層の平行層ラミナにも破壊が見られた。これらの破壊はフィンガージョイント部や節を起点とするものがほとんどであった。Mx60 弱軸では内層の直交層（荷重方向に繊維が平行な層）ラミナに破壊が観察された。また、最大荷重に近づくとしたがって直交層ラミナが座屈するものもあり、その場合には接着層に沿った破壊が見られるものもあった。



a) Mx120 強軸                      b) Mx60 強軸                      c) Mx60 弱軸

写真 2.7.1-2 破壊の様子

#### 4) 考察

M120、M60、M30 各ラミナ等級の繊維方向の性能値を  $x$ 、 $y$ 、 $z$ 、繊維直交方向の性能値を  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  とすると、次の連立方程式となる。

$$\text{Mx120 強軸の性能} = 0.4x + 0.2z + 0.4y$$

$$\text{Mx120 弱軸の性能} = 0.4z + 0.4\alpha + 0.2\gamma$$

$$\text{Mx60 強軸の性能} = 0.4y + 0.2z + 0.4\gamma$$

$$\text{Mx60 弱軸の性能} = 0.4z + 0.4\beta + 0.2\gamma$$

変数が 6 個に式が 4 つであるが、①M30 の繊維方向の性能値を変更して代入する、②  $\beta = \gamma$  と仮定することで解を得ることができる。

こうして得られた各等級毎のラミナの性能値を表 2.7.1.3 に示す。

表 2.7.1-3 CLT の圧縮試験から推定したラミナの圧縮強度性能値

荷重方向 等級	繊維方向			繊維直交方向		
	M120	M60	M30	M120	M60	M30
ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	13.0	9.0	5.5	0.15	0.57	0.57
強度 (N/mm <sup>2</sup> )	48.0	35.7	32.0	4.8	2.9	2.9

#### (5) まとめ

- 1) 細長比 10~20 の間では、圧縮最大応力、比例限度応力ともに細長比の影響はなかった。
- 2) 荷重方向強軸の圧縮強度性能は、外層に強度性能の高いラミナを利用することで圧縮最大応力、比例限度応力、圧縮ヤング係数は向上した。
- 3) 荷重方向弱軸の圧縮強度性能には、外層に強度性能の高いラミナを利用する効果は認められなかった。



## 2. 7. 2 座屈

### (1) 概要

クロス・ラミネーテッド・ティンバー（以下、CLT と呼ぶ）は、ラミナの繊維方向を隣り合う層で互いに直交させているという点と、同じ層の中でラミナの幅はぎを行わずに平面的に並べているという点において、製材や集成材と構造が異なっており、このことにより CLT の座屈性状が製材や集成材と異なる可能性がある。本研究では、CLT の座屈性状に関する知見を得ることを目的として、仕様の異なる 2 種類の CLT に対して座屈試験を実施した。

### (2) 試験体

表 2.7.2-1 に試験体の諸元を示す。試験に供した CLT は、全断面有効とみなした場合の細長比が 34 となる寸法形状の中間柱（中間柱 A）、及び、同じく全断面有効とみなした場合の細長比が 75 となる寸法形状の中間柱（中間柱 B）の 2 種類とした。両寸法形状について、直交集成板の日本農林規格（案）に示されている強度等級 Mx60-5-5 及び Mx120-5-5 の 2 種類の強度等級を有する 5 層 5 プライ（各層のラミナ厚は全て 30mm）の CLT を試験体とした。各強度等級について、最外層の繊維方向が長手方向となる試験体（以下、強軸試験体）と、最外層の繊維方向が短手方向となる試験体（以下、弱軸試験体）を作成し、試験に供した。試験体数は各仕様 6 体とした。

なお、加力方向と繊維方向が平行なラミナのみ有効として算定した細長比を表 1 の最右列に示す。中間柱 A について、最外層の繊維方向が長手方向となる強軸試験体の場合は  $\lambda=29.6$ 、短手方向となる弱軸試験体の場合は  $\lambda=47.2$ 、中間柱 B について、強軸試験体の場合は  $\lambda=65.3$ 、弱軸試験体の場合は  $\lambda=104.1$  となる。また、Mx60-5-5 の外層ラミナと内層ラミナはいずれもスギ、Mx120-5-5 の外層ラミナはヒノキ、内層ラミナはスギとした。

表 2.7.2-1 試験体の諸元

長手方向	規格	寸法			試験体数	細長比	
		幅 (mm)	厚さ (mm)	長さ (mm)		全断面	有効断面
強軸	Mx120-5-5	300	150	3251	6	75.1	65.3
弱軸		300	150	3251	6	75.1	104.1
強軸	Mx60-5-5	300	150	3251	6	75.1	65.3
弱軸		300	150	3251	6	75.1	104.1
強軸	Mx120-5-5	300	150	1474	6	34.0	29.6
弱軸		300	150	1474	6	34.0	47.2
強軸	Mx60-5-5	300	150	1474	6	34.0	29.6
弱軸		300	150	1474	6	34.0	47.2

### (3) 試験方法

試験体の両端をピン支持し、試験体の厚さ方向に対して 1/3 偏心させた位置において、試験体に軸力を与え加力した。写真 2.7.2.1 に試験の様子を示す。加力は 2000kN サーボ型万能試験機を用いて行い、荷重速度は 1mm/min とした。また、試験体の頂部、中央部、下部の鉛直変位と、同じく頂部、中央部、下部の水平変位を測定した。さらに、一部の試験体については、繊維方向が鉛直方向（加力方向）と平行なラミナについて、材中央部の歪みを測定した。写真 2.7.2-1 に試験の様子を示す。

### (4) 結果

表 2.7.2-2 に長さ 3251mm ( $\lambda=75.1$ ) の試験体の諸元を示す。また、表 2.7.2-3 に全試験体について、座屈試験における最大耐力の値を示す。さらに図 2.7.2-1 に荷重変形直線の典型例を示す。同図には試験体中央部の水平変位を実線、試験体頂部の鉛直変位を破線にて示す。なお、安全上の理由により、载荷は試験体が破壊するまで行わず、1 秒間あたりの荷重

の増加量が概ね 0.05kN よりも小さくなった時点をもって加力を終了した。



写真 2.7.2-1 試験の様子

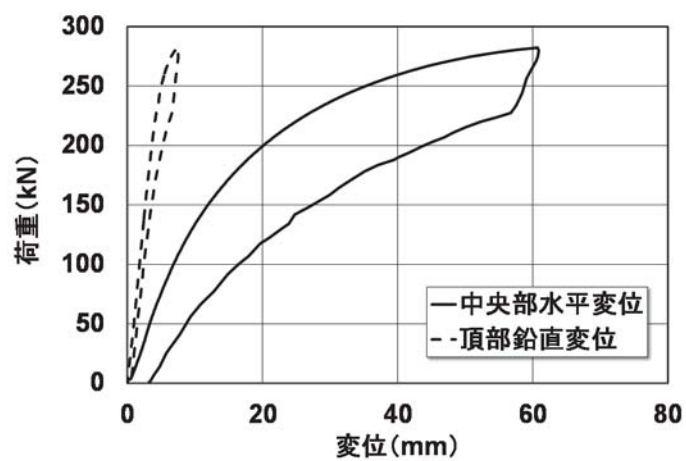


図 2.7.2-1 荷重変形直線の典型例

座屈耐力の平均値は以下の通り通りであった。

[外層ラミナ繊維方向 // 加力方向]

長さ 1474mm (Mx60-5-5)	: 549kN
長さ 1474mm (Mx120-5-5)	: 687kN
長さ 3251mm (Mx60-5-5)	: 269kN
長さ 3251mm (Mx120-5-5)	: 430kN

[外層ラミナ繊維方向 ⊥ 加力方向]

長さ 1474mm (Mx60-5-5)	: 214kN
長さ 1474mm (Mx120-5-5)	: 218kN
長さ 3251mm (Mx60-5-5)	: 78kN
長さ 3251mm (Mx120-5-5)	: 73kN

外層ラミナの繊維方向が加力方向と平行の場合、外層ラミナの強度等級が高い Mx120-5-5 の座屈耐力の方が、外層ラミナの強度等級が低い Mx60-5-5 の座屈耐力よりも高かった。外層ラミナの繊維方向が加力方向と垂直な試験体については、強度等級による座屈耐力の違いは認められなかった。外層ラミナの繊維方向が加力方向と垂直の場合には、2層目と4層目のラミナが加力方向と平行となるが、同層のラミナの強度等級は Mx60-5-5 と Mx120-5-5 において同じとなるため、座屈耐力がほぼ同じになったものと考えられる。

表 2.7.2-2 長さ 3251mm ( $\lambda=75.1$ ) の試験体の諸元

試験体			密度 kg/m <sup>3</sup>	縦振動			面内曲げ		面外曲げ	
				E1 kN/mm <sup>2</sup>	E2 kN/mm <sup>2</sup>	G kN/mm <sup>2</sup>	E2 kN/mm <sup>2</sup>	G kN/mm <sup>2</sup>		
Mx60-5-5	強軸	gA1-A176	439.2	4.61	4.49	0.898	6.08	0.283		
		gA2-A176	433.4	4.81	4.80	0.867	6.18	0.288		
		gA3-A189	433.7	4.66	4.67	0.939	5.77	0.267		
		gA4-A189	432.2	4.52	4.32	0.888	5.79	0.263		
		gA5-A188	429.7	4.39	4.42	0.937	5.87	0.246		
		gA6-A188	433.2	4.46	4.05	0.916	6.04	0.264		
		平均	433.6	4.58	4.46	0.908	5.95	0.269		
		最大	439.2	4.81	4.80	0.939	6.18	0.288		
		最小	429.7	4.39	4.05	0.867	5.77	0.246		
		標準偏差	3.1	0.15	0.27	0.029	0.17	0.015		
	変動係数	0.7%	3.3%	6.0%	3.2%	2.8%	5.6%			
	弱軸	gB1-A190	432.9	3.53	3.51	0.835	2.01	0.156		
		gB2-A190	421.7	2.70	2.57	0.759	1.49	0.171		
		gB3-A183	426.7	3.12	3.13	0.774	1.65	0.148		
		gB4-A183	422.6	2.95	3.02	0.630	1.65	0.133		
		gB5-A182	444.6	3.25	3.18	0.831	1.79	0.157		
		gB6-A182	436.6	2.99	2.93	0.693	1.64	0.148		
		平均	430.8	3.09	3.06	0.754	1.70	0.152		
		最大	444.6	3.53	3.51	0.835	2.01	0.171		
		最小	421.7	2.70	2.57	0.630	1.49	0.133		
標準偏差		8.9	0.29	0.31	0.080	0.18	0.013			
変動係数	2.1%	9.3%	10.1%	10.6%	10.5%	8.5%				
Mx120-5-5	強軸	gA1-A211	441.5	6.58	6.58	0.889	10.25	0.287		
		gA2-A211	443.3	6.88	6.88	0.915	10.57	0.281		
		gA3-A208	442.1	6.62	6.58	0.836	10.21	0.297		
		gA4-A208	428.6	6.83	6.82	0.832	10.32	0.279		
		gA5-A209	438.9	6.67	6.60	0.795	10.62	0.296		
		gA6-A209	435.5	6.38	6.74	0.853	10.36	0.281		
		平均	438.3	6.66	6.70	0.853	10.39	0.287		
		最大	443.3	6.88	6.88	0.915	10.62	0.297		
		最小	428.6	6.38	6.58	0.795	10.21	0.279		
		標準偏差	5.5	0.18	0.13	0.043	0.17	0.008		
	変動係数	1.3%	2.7%	2.0%	5.0%	1.6%	2.7%			
	弱軸	gB1-A212	439.2	2.39	2.23	0.839	1.40	0.169		
		gB2-A212	441.0	2.53	2.54	0.894	1.44	0.178		
		gB3-A213	431.8	2.48	2.43	0.844	1.44	0.165		
		gB4-A213	438.8	2.37	2.22	0.809	1.39	0.150		
		gB5-A213	435.0	2.67	2.73	0.896	1.52	0.199		
		gB6-A213	437.0	2.76	2.62	0.857	1.59	0.178		
		平均	437.1	2.53	2.46	0.857	1.46	0.173		
		最大	441.0	2.76	2.73	0.896	1.59	0.199		
		最小	431.8	2.37	2.22	0.809	1.39	0.150		
標準偏差		3.3	0.15	0.21	0.034	0.08	0.016			
変動係数	0.8%	6.1%	8.5%	4.0%	5.3%	9.4%				

(注) E1 は弾性係数、E2 は曲げ弾性係数、G はせん断弾性係数

表 2.7.2-3 最大耐力

試験体長さ		3251mm		1474mm	
加力方向	規格	試験体No.	最大荷重 (kN)	試験体No.	最大荷重 (kN)
強軸	Mx120-5-5	gA3-A208	426	No.1-A208	699
		gA4-A208	421	No.2-A208	794
		gA5-A209	441	No.1-A209	653
		gA6-A209	435	No.2-A209	671
		gA1-A211	422	No.1-A210	657
		gA2-A211	432	No.2-A210	696
		平均	430	平均	695
		標準偏差	8.0	標準偏差	52.0
		変動係数	1.9%	変動係数	7.5%
	Mx60-5-5	gA1-A176	282	No.1-A183	537
		gA2-A176	273	No.2-A183	657
		gA5-A188	272	No.1-A188	552
		gA6-A188	255	No.2-A188	470
		gA3-A189	260	No.1-A189	518
		gA4-A189	270	No.2-A189	557
		平均	269	平均	549
		標準偏差	9.8	標準偏差	61.8
		変動係数	3.7%	変動係数	11.3%
弱軸	Mx120-5-5	gB1-A212	65	No.1-A210	225
		gB2-A212	69	No.1-A210	211
		gB6-A213	85	No.2-A210	216
		gB3-A213	71	No.2-A210	210
		gB4-A213	69	No.3-A210	232
		gB5-A213	80	No.4-A210	214
		平均	73	平均	218
		標準偏差	7.6	標準偏差	8.6
		変動係数	10.3%	変動係数	3.9%
	Mx60-5-5	gB5-A182	83	No.1-A183	214
		gB6-A182	71	No.2-A183	238
		gB3-A183	76	No.3-A183	185
		gB4-A183	77	No.4-A183	206
		gB1-A190	90	No.1-A190	212
		gB2-A190	73	No.2-A190	229
		平均	78	平均	214
		標準偏差	7.0	標準偏差	18.5
		変動係数	8.9%	変動係数	8.6%

(5) 座屈耐力の推定

1) 偏心座屈をさせた軸材の座屈荷重の計算

材軸から  $e$  (mm) ずれた位置において座屈荷重  $P$  (N) が作用する軸材に生じる最大曲げモーメント  $M_{\max}$  (Nm) は、両端の支持条件がピン・ピンの場合、式 2.7.2-1 で表される。

$$M_{\max} = P e \sec\left(\frac{\alpha l}{2}\right) \quad 2.7.2-1$$

ここで、 $\alpha = \sqrt{\frac{P}{EI}}$

$l$  : 軸材の座屈長さ (mm)  
 $E$  : 軸材の曲げ弾性係数 (N/mm<sup>2</sup>)  
 $I$  : 軸材の有効断面 2 次モーメント (mm<sup>4</sup>)

また、軸材に生じる材縁の最大曲げ応力  $\sigma_{\max}$  (N/mm<sup>2</sup>) は式 2.7.2-2 で表される。

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{I} y \quad 2.7.2-2$$

ここで、 $y$  : 中立軸から有効断面の外縁までの距離

## 2) 計算に用いた各種特性値

座屈耐力の計算に用いた各特性値は以下の通りである。

### ① ラミナの MOE

Mx60-5-5 外層ラミナの MOE : 6 (kN/mm<sup>2</sup>)  
 Mx60-5-5 内層ラミナの MOE : 3 (kN/mm<sup>2</sup>)  
 Mx120-5-5 外層ラミナの MOE : 12 (kN/mm<sup>2</sup>)  
 Mx120-5-5 内層ラミナの MOE : 3 (kN/mm<sup>2</sup>)

### ② 荷重の偏心位置

加力点の偏心距離  $e = 25(\text{mm})$

### ③ 材縁距離

中立軸から有効断面の材縁までの距離 (強軸方向) :  $y = 150(\text{mm})$

中立軸から有効断面の材縁までの距離 (弱軸方向) :  $y = 90(\text{mm})$

## 3) 計算結果と実験結果

計算結果と実験結果を比較した結果を以下に記す。

### 強軸

[Mx60-5-5 L=3251mm]	計算 : 256kN	実験 : 269kN
[Mx120-5-5 L=3251mm]	計算 : 471kN	実験 : 430kN
[Mx60-5-5 L=1474mm]	計算 : 597kN	実験 : 549kN
[Mx120-5-5 L=1474mm]	計算 : 1010kN	実験 : 687kN

### 弱軸

[Mx60-5-5 L=3251mm]	計算 : 43kN	実験 : 78kN
[Mx120-5-5 L=3251mm]	計算 : 43kN	実験 : 73kN
[Mx60-5-5 L=1474mm]	計算 : 145kN	実験 : 214kN
[Mx120-5-5 L=1474mm]	計算 : 145kN	実験 : 218kN

## 4) 考察

- ① Mx60-5-5 (弱軸) L=3251mm、Mx120-5-5 (強軸) L=3251mm、Mx60-5-5 (強軸) L=1474mm については、実験結果と計算結果は概ね等しくなった。ただし、Mx120-5-5 (強軸) L=3251mm、Mx60 (強軸) L=1474mm については、実験結果の方がやや低い。直交層のせん断変形により、見かけの MOE が小さくなっていることがその一因と考えられる。
- ② 同様に Mx120 (強軸) L=1474mm については、計算結果が実験結果よりも大きくなる。これも、直交層のせん断変形により、見かけの MOE が小さくなっていることがその一因と考えられる。見かけの MOE を 70% に低減すると計算結果と実験結果は同じになる。
- ③ 弱軸方向については、実験結果の方が計算結果よりも高くなる。弱軸方向に配置された外層を計算上は無視しているが、実際には、特に圧縮側で外層が寄与していることが、その一因と考えられる。

(6) まとめ

CLT の座屈性状に関する知見を得ることを目的として、仕様の異なる 2 種類の CLT に対して座屈試験を実施した。試験の結果、外層ラミナの繊維方向が加力方向と平行な場合、外層ラミナの強度等級が高い CLT (強度等級 : Mx120-5-5) の座屈耐力の方が、外層ラミナの強度等級が低い CLT (強度等級 : Mx60-5-5) の座屈耐力よりも高い値となった。一方、外層ラミナの繊維方向が加力方向と垂直の場合には、加力方向と繊維方向が同じになるラミナが内層にのみ存在することになるため、外層ラミナの強度等級のみが異なる Mx60-5-5 と Mx120-5-5 において、座屈耐力に違いは認められなかった。

## 2. 8 引張り 0°

### 8. 1 目的

ともに 5 層 5 プライ構成で外層が強軸方向である、外層スギ・内層スギおよび外層ヒノキ・内層スギの CLT の引張り強度性能を求めることを目的とした。

### 8. 2 試験体と試験方法

1. 試験体概要に記載されている CLT 大板から引張り試験体を 12 体採取した。そのうち 6 体は外層・内層ともにスギ、6 体は外層がヒノキ、内層がスギで構成されている。外層はすべて強軸方向である。試験体の厚さは 150mm、幅は 300mm、長さは 6000mm である。

非破壊試験として、縦振動法によるヤング係数および、T.G.H.法<sup>1)</sup>による曲げヤング係数、せん断弾性係数を求めた。T.G.H.法による測定は面内方向、面外方向の 2 方向とし、1～5 次の曲げ固有振動数から各弾性係数を求めた。T.G.H.法による固有振動数の測定の様子を写真 8-1 に示す。



写真 8-1 T.G.H.法による固有振動数の測定の様子

引張り試験は、最大容量が 2000kN の横型引張り試験機（株式会社 前川試験機製作所製 HZS-200-LB4）により行った。チャック間距離は 3000mm（試験体幅の 10 倍）、両チャックのつかみ部分の長さは 1200mm とした。試験体の長さ方向における相対する 2 材面の中央部に、標点間距離を 1000mm とした、変位計（東京測器研究所製、CDP-10）を取り付けた治具を設置して伸びを測定した。2 材面の伸びの平均値を試験体の伸びとした。試験終了後、引張りヤング係数、引張り比例限度応力および引張り強度を算出した。

また、破壊部近傍から長さが約 20mm の含水率測定用試験体を切り出し、全乾法で含水率を測定した。引張り試験の様子を写真 8-2 に示す。

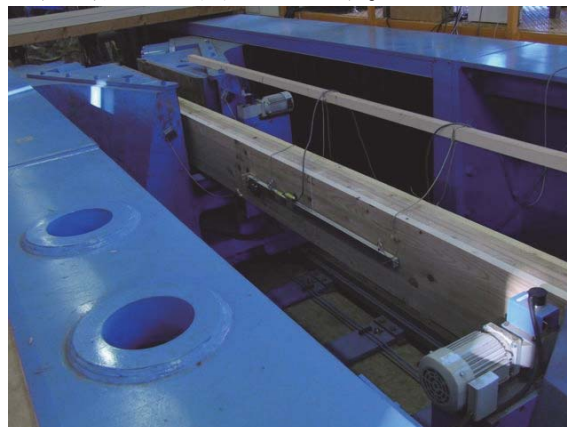


写真 8-2 引張り試験の様子



### 8. 3 結果

#### 8. 3. 1 非破壊試験の結果

試験体の密度および動的試験の結果を試験体の種類別に表 8-1、8-2 に示す。外層スギ・内層スギ、外層ヒノキ・内層スギの両試験体とも、密度、縦振動法によるヤング係数、面内方向および面外方向の曲げヤング係数およびせん断弾性係数のすべての項目の値は非常にばらつきが小さかった。縦振動法によるヤング係数、面内方向の曲げヤング係数、面外方向の曲げヤング係数の各平均値は外層ヒノキ・内層スギの値が外層スギ・内層スギの値を上回っていた。外層に貼ったヒノキラミナのヤング係数はスギラミナのそれよりも高いため、この影響が出たと考えられる。一方、せん断弾性係数は、面内方向では外層スギ・内層スギの平均値が外層ヒノキ・内層スギのそれよりも高く、面外方向では逆の結果となった。この原因については現在明らかではない。ただし、T.G.H.法によるせん断弾性係数の測定では、測定時に支点到に置いたクッションの厚さ等により各次の固有振動数が微妙に変化し、これらの得られる直線が若干ずれることにより、結果的にせん断弾性係数の算出に大きな影響を及ぼすことも測定の結果明らかとなった。

表 8-1 試験体の密度および動的試験の結果（外層スギ・内層スギ）

試験体番号	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	Efr (kN/mm <sup>2</sup> )	面内方向		面外方向	
			Et-h (kN/mm <sup>2</sup> )	Gt-h (kN/mm <sup>2</sup> )	Et-v (kN/mm <sup>2</sup> )	Gt-v (kN/mm <sup>2</sup> )
hiA188 強 2	435	4.36	4.29	0.896	5.37	0.240
hiA188 強 4	429	4.47	4.30	0.888	5.45	0.256
hiA188 強 6	422	3.93	3.74	1.027	5.03	0.313
hiA189 強 2	429	4.74	4.69	0.977	6.23	0.257
hiA189 強 4	434	4.40	4.36	0.992	5.90	0.292
hiA189 強 6	437	4.46	4.27	0.988	6.02	0.236
平均値	431	4.39	4.28	0.961	5.67	0.266
CV(%)	1.3	6.0	7.1	5.8	8.1	11

記号 Efr：縦振動法によるヤング係数、Et-h：面内方向の曲げヤング係数、Gt-h：面内方向のせん断弾性係数、Et-v：面外方向の曲げヤング係数、Gt-v：面外方向のせん断弾性係数、CV：変動係数

表 8-2 試験体の密度および動的試験の結果（外層ヒノキ・内層スギ）

試験体番号	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	Efr (kN/mm <sup>2</sup> )	面内方向		面外方向	
			Et-h (kN/mm <sup>2</sup> )	Gt-h (kN/mm <sup>2</sup> )	Et-v (kN/mm <sup>2</sup> )	Gt-v (kN/mm <sup>2</sup> )
hiA208 強 2	437	6.70	6.66	0.862	10.1	0.276
hiA208 強 4	440	6.80	6.60	0.867	10.4	0.268
hiA208 強 6	441	6.80	6.60	0.806	10.7	0.260
hiA209 強 2	436	6.62	6.45	0.872	10.3	0.268
hiA209 強 4	440	6.57	6.52	0.865	10.2	0.267
hiA209 強 6	437	6.59	6.52	0.861	10.4	0.282
平均値	438	6.68	6.56	0.855	10.3	0.270
CV(%)	0.46	1.5	1.1	2.9	2.0	2.9

記号 Efr：縦振動法によるヤング係数、Et-h：面内方向の曲げヤング係数、Gt-h：面内方向のせん断弾性係数、Et-v：面外方向の曲げヤング係数、Gt-v：面外方向のせん断弾性係数、CV：変動係数

#### 8. 3. 2 引張り試験の結果

引張り試験の結果を試験体の種類別に表 8-3、8-4 に示す。また、外層スギ・内層スギの試験体の破壊の様子を写真 8-3、8-4 に、外層ヒノキ・内層スギの試験体の破壊の様子を写

真 8-5、8-6 に示す。含水率は外層スギ・内層スギの試験体の方が、外層ヒノキ・内層スギの試験体に比べて、平均値で2%程高かった。現在乾燥スケジュール等についての情報はないが、樹種が異なることによる影響が考えられる。外層スギ・内層スギ、外層ヒノキ・内層スギの引張りヤング係数は、両者ともばらつきは小さく、縦振動法によるヤング係数とほぼ同等の値となった。引張り比例限度応力については、外層スギ・内層スギの試験体のばらつきが外層ヒノキ・内層スギの試験体よりも大きかったが、その原因は、機械的に決定した（本試験体では弾性域内において引いた直線から荷重-変形曲線が3%変形側にずれた点を採用している）比例限度応力の決定点のほんのわずかなずれによるものであり、実際の試験では、すべての試験体でほぼ直線的に荷重変形曲線を描いた後、弾性域をほとんど示さずに破壊に達した。破壊に至る様子は、最大荷重に達した際に一瞬で全層が破壊する試験体が大部分であり、外層に3枚ずつ存在するラミナが1枚破壊した後に全層が破壊する試験体もわずかに存在した。引張り強度の平均値は外層スギ・内層スギ、外層ヒノキ・内層スギの試験体でそれぞれ10.8N/mm<sup>2</sup>、18.9N/mm<sup>2</sup>となり、外層ヒノキ・内層スギの試験体の方が外層スギ・内層スギの試験体よりも1.8倍大きかった。

表 8-3 引張り試験の結果（外層スギ・内層スギ）

試験体番号	含水率 (%)	Et (kN/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{tp}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_t$ (N/mm <sup>2</sup> )
hiA188 強 2	12.7	4.11	10.4	11.5
hiA188 強 4	13.0	4.35	5.61	9.79
hiA188 強 6	13.0	3.32	6.20	9.50
hiA189 強 2	13.1	4.40	11.3	11.4
hiA189 強 4	13.6	3.62	4.89	10.9
hiA189 強 6	12.2	3.81	4.57	11.6
平均値	12.9	3.95	7.16	10.8
CV(%)	3.5	11	41	8.5

記号 Et：引張りヤング係数、 $\sigma_{tp}$ ：引張り比例限度応力、 $\sigma_t$ ：引張り強度

表 8-4 引張り試験の結果（外層ヒノキ・内層スギ）

試験体番号	含水率 (%)	Et (kN/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{tp}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_t$ (N/mm <sup>2</sup> )
hiA208 強 2	10.8	6.46	18.3	18.3
hiA208 強 4	10.8	6.49	18.5	18.9
hiA208 強 6	11.0	6.43	17.0	18.6
hiA209 強 2	11.0	6.06	14.9	17.5
hiA209 強 4	10.6	6.09	18.1	20.0
hiA209 強 6	11.0	6.13	17.1	20.0
平均値	10.9	6.28	17.3	18.9
CV(%)	1.5	3.2	7.6	5.1

記号 Et：引張りヤング係数、 $\sigma_{tp}$ ：引張り比例限度応力、 $\sigma_t$ ：引張り強度



写真 8-3、8-4 外層スギ・内層スギの試験体の破壊の様子（幅方向と厚さ方向）



写真 8-5、8-6 外層ヒノキ・内層スギの試験体の破壊の様子（幅方向と厚さ方向）

#### 8. 4 まとめ

ともに 5 層 5 プライ構成で外層が強軸方向である、外層スギ・内層スギおよび外層ヒノキ・内層スギの CLT の非破壊試験および引張り試験を行った。その結果、引張り強度の平均値は外層スギ・内層スギ、外層ヒノキ・内層スギの試験体でそれぞれ  $11.0\text{N/mm}^2$ 、 $18.9\text{N/mm}^2$  となり、外層ヒノキ・内層スギの試験体の方が外層スギ・内層スギの試験体よりも 1.7 倍大きかった。

#### 文献

- 1) (財) 日本住宅木材・技術センター、構造用木材の強度試験マニュアル、68-71、2003

## 2. 9 ラミナ曲げ

### 2. 9. 1 目的

日本においてスギを用いた CLT 製造の試みが始まり、構造材としての利用を目的として様々な試験が行われている。CLT パネルのエレメントであるラミナについて、異等級構成や異樹種構成も想定される。外層及び内層に使用されるスギラミナは、歩留まりを考慮してヤング係数の下限を 2 種類に分けて広く選別すること、また、外層に使用されるヒノキ及びカラマツは、強度やヤング係数の分布を考慮して、1 種類で選別することが考えられる。また、歩留まり向上のためにはフィンガージョイント（以下 FJ）が必要となるが、ヤング係数の分布が幅広く選別されるラミナでは、その有無による強度性能の差については知見が少ない。そこで、今回はそれぞれのラミナにおいて、FJ の有無による面外曲げ強度性能を把握することとした。

### 2. 9. 2 試験方法

スギラミナは、等級を M30（ヤング係数下限を 2.5kN/mm<sup>2</sup> 以上）、M60（ヤング係数下限を 5.0kN/mm<sup>2</sup> 以上）、カラマツラミナは等級を M90（ヤング係数下限を 7.5kN/mm<sup>2</sup> 以上）、ヒノキラミナは等級を M120（ヤング係数下限を 10.0kN/mm<sup>2</sup> 以上）として選別した。試験体の寸法は、厚さ 30mm、幅 120mm、長さ 690mm とし、FJ 加工をしない（以下 NJ）ラミナを各 30 体、中央で FJ 加工したラミナを各 30 体用意した。なお、フィンガー長は 15mm、傾斜 1/12、接着剤は水性高分子イソシアネート系樹脂であった。

#### 2. 9. 2. 1 非破壊検査方法

動的試験

(1)動的試験方法

縦振動法による縦振動ヤング係数を測定した。

(2)動的試験評価方法

縦振動法では次の式により縦振動ヤング係数を計算した。

$$E_{fr} = (2fl)^2 \rho \quad (2.9-1)$$

$E_{fr}$  : 縦振動ヤング係数

$f$  : 固有振動数

$l$  : 材長

$\rho$  : 密度

#### 2. 9. 2. 2 静的曲げ試験条件

ラミナの曲げ試験は、スパン 630mm モーメント一定区間 210mm の 3 等分点 4 点荷重方式で行った。支点間スパンにおける中央変形量を測定した。

#### 2. 9. 2. 3 静的曲げ試験結果

縦振動ヤング係数と曲げヤング係数の関係を図 2.9-1 から図 2.9-4 に示す。スギ M30 及び M60 では NJ 材が FJ 材に比べて全体的にヤング係数が高い傾向にあった。また、FJ 材及び NJ 材とも縦振動ヤング係数の方が 7% から 10%、曲げヤング係数よりも高い値であった。カラマツ M90 では FJ 材と NJ 材は、ヤング係数はほとんど同じであった。また、FJ 材及び NJ 材とも縦振動ヤング係数の方が 7% 程度曲げヤング係数よりも高い値であった。ヒノキ M120 では、FJ 材と NJ 材は縦振動ヤング係数と曲げヤング係数の関係が異なっていた。

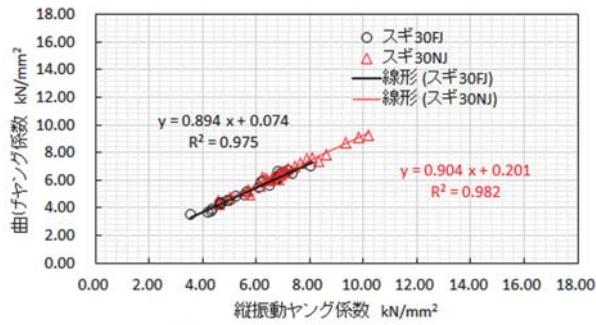


図2.9-1 スギM30ラミナの動的と静的ヤング係数

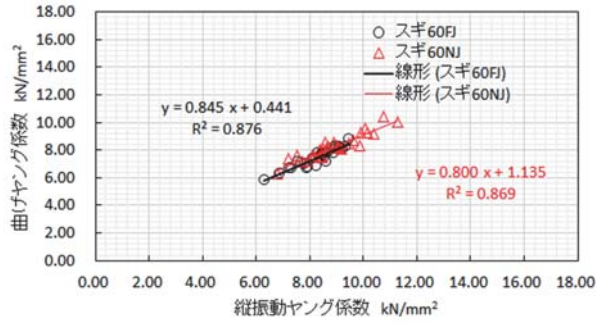


図2.9-2 スギM60ラミナの動的と静的ヤング係数

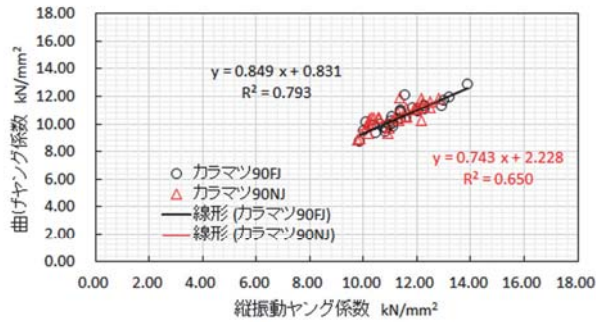


図2.9-3 カラマツM90ラミナの動的と静的ヤング係数

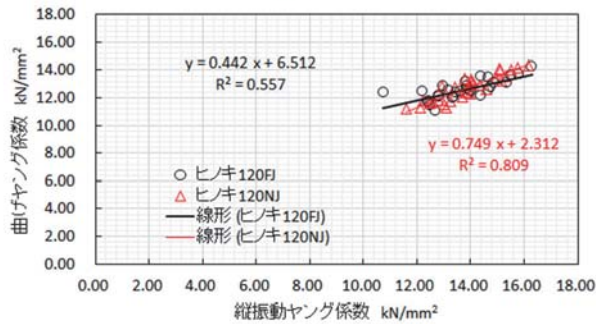


図2.9-4 ヒノキM120ラミナの動的と静的ヤング係数

NJ材は曲げヤング係数が高くなるほど縦振動ヤング係数も高めの値となった。また、FJ材及びNJ材とも縦振動ヤング係数の方が8%程度曲げヤング係数よりも高い値となった。

表 2.9-1 ラミナ曲げ試験結果

スギM30FJ	密度	Pmax	Pmax 実位置	MOR	MOE	変形動 E <sub>f</sub>	比例限度 荷重	比例限度 強度	比例限度 変位	仕事量	ヤンカ比 仕事量	テトマイ ヤ-係数	ヤンカ 靱性係数
	kg/m <sup>3</sup>	kN	mm	N/mm <sup>2</sup>	kN/mm <sup>2</sup>	kN/mm <sup>2</sup>	kN	N/mm <sup>2</sup>	mm	mm <sup>2</sup> ・kN	α kN	η	Z mm/kN
最小値	324	3.53	10.4	19.9	3.46	3.56	3.53	19.9	10.4	208	1.82	0.486	0.00
平均値	403	5.01	15.6	28.3	5.39	5.95	4.77	26.9	14.4	41.2	2.55	0.509	2.00
最大値	449	6.81	30.4	39.0	7.00	8.06	6.70	38.4	20.4	101.8	3.52	0.544	7.79
標準偏差	32.0	0.87	4.65	4.99	1.07	1.18	0.75	4.30	2.94	19.6	0.5	0.014	2.64
変動係数%	7.9	17.3	29.8	17.6	19.9	19.9	15.7	16.0	20.4	47.5	18.7	2.7	131.9
5%下限値	正規分布あてはめ			19.0	3.39								
接合効率	平均値比較			0.556	0.828								
スギM30NJ	密度	Pmax	Pmax 実位置	MOR	MOE	変形動 E <sub>f</sub>	比例限度 荷重	比例限度 強度	比例限度 変位	仕事量	ヤンカ比 仕事量	テトマイ ヤ-係数	ヤンカ 靱性係数
	kg/m <sup>3</sup>	kN	mm	N/mm <sup>2</sup>	kN/mm <sup>2</sup>	kN/mm <sup>2</sup>	kN	N/mm <sup>2</sup>	mm	mm <sup>2</sup> ・kN	α kN	η	Z mm/kN
最小値	340	5.03	12.2	28.3	4.28	4.60	5.03	28.3	12.2	40.4	2.54	0.497	0.00
平均値	409	9.00	25.4	50.9	6.51	6.98	7.14	40.4	18.0	128.2	4.88	0.540	3.59
最大値	516	13.27	33.6	75.4	9.29	10.19	11.34	64.4	24.6	247.3	7.48	0.617	6.43
標準偏差	39.8	1.79	5.68	10.28	1.24	1.36	1.36	7.85	2.49	49.6	1.1	0.028	1.53
変動係数%	9.7	19.8	22.3	20.2	19.1	19.5	19.1	19.4	13.9	38.7	22.4	5.1	42.7
5%下限値	正規分布あてはめ			31.7	4.19								
接合効率	平均値比較			0.50	0.91								
スギM60FJ	密度	Pmax	Pmax 実位置	MOR	MOE	変形動 E <sub>f</sub>	比例限度 荷重	比例限度 強度	比例限度 変位	仕事量	ヤンカ比 仕事量	テトマイ ヤ-係数	ヤンカ 靱性係数
	kg/m <sup>3</sup>	kN	mm	N/mm <sup>2</sup>	kN/mm <sup>2</sup>	kN/mm <sup>2</sup>	kN	N/mm <sup>2</sup>	mm	mm <sup>2</sup> ・kN	α kN	η	Z mm/kN
最小値	398	4.07	9.3	23.0	5.87	6.30	4.07	23.0	8.9	19.2	2.04	0.482	0.00
平均値	444	5.60	12.1	31.8	7.51	8.36	5.56	31.6	11.9	34.9	2.85	0.509	1.17
最大値	497	7.23	15.4	41.1	8.77	9.46	7.23	41.1	15.4	53.7	3.61	0.610	2.617
標準偏差	26.5	0.76	1.72	4.34	0.69	0.76	0.77	4.43	1.67	8.8	0.4	0.023	4.81
変動係数%	6.0	13.5	14.2	13.7	9.2	9.1	13.9	14.0	14.0	25.3	13.2	4.6	411.2
5%下限値	正規分布あてはめ			23.7	6.22								
接合効率	平均値比較			0.50	0.91								
スギM60NJ	密度	Pmax	Pmax 実位置	MOR	MOE	変形動 E <sub>f</sub>	比例限度 荷重	比例限度 強度	比例限度 変位	仕事量	ヤンカ比 仕事量	テトマイ ヤ-係数	ヤンカ 靱性係数
	kg/m <sup>3</sup>	kN	mm	N/mm <sup>2</sup>	kN/mm <sup>2</sup>	kN/mm <sup>2</sup>	kN	N/mm <sup>2</sup>	mm	mm <sup>2</sup> ・kN	α kN	η	Z mm/kN
最小値	370	8.23	18.7	46.3	6.29	6.79	7.15	40.5	14.8	80.3	4.30	0.508	0.00
平均値	435	11.24	26.0	63.5	8.24	8.88	8.51	48.1	16.8	168.6	6.26	0.555	3.26
最大値	545	15.68	44.7	89.2	10.48	11.28	9.87	55.9	19.8	413.2	9.48	0.604	6.23
標準偏差	45.3	1.61	6.37	9.16	0.90	1.05	0.74	4.16	1.37	73.6	1.1	0.027	1.04
変動係数%	10.4	14.3	24.4	14.4	10.9	11.8	8.6	8.6	8.1	43.6	17.7	4.8	32.0
5%下限値	正規分布あてはめ			46.4	6.55								
接合効率	平均値比較			0.78	1.00								
カラマツM90FJ	密度	Pmax	Pmax 実位置	MOR	MOE	変形動 E <sub>f</sub>	比例限度 荷重	比例限度 強度	比例限度 変位	仕事量	ヤンカ比 仕事量	テトマイ ヤ-係数	ヤンカ 靱性係数
	kg/m <sup>3</sup>	kN	mm	N/mm <sup>2</sup>	kN/mm <sup>2</sup>	kN/mm <sup>2</sup>	kN	N/mm <sup>2</sup>	mm	mm <sup>2</sup> ・kN	α kN	η	Z mm/kN
最小値	468	6.49	11.2	37.2	8.73	9.87	6.10	35.0	10.0	37.4	3.33	0.493	0.00
平均値	519	8.90	14.6	51.0	10.53	11.43	7.83	44.9	12.4	68.0	4.61	0.517	1.80
最大値	558	11.01	18.2	63.3	12.89	13.89	9.39	53.9	15.3	95.7	5.89	0.539	2.80
標準偏差	22.6	1.13	1.72	6.50	0.93	0.98	1.03	5.93	1.40	15.7	0.7	0.012	0.86
変動係数%	4.4	12.7	11.8	12.7	8.9	8.6	13.2	13.2	11.3	23.0	14.2	2.4	48.0
5%下限値	正規分布あてはめ			38.9	8.78								
接合効率	平均値比較			0.78	1.00								
カラマツM90NJ	密度	Pmax	Pmax 実位置	MOR	MOE	変形動 E <sub>f</sub>	比例限度 荷重	比例限度 強度	比例限度 変位	仕事量	ヤンカ比 仕事量	テトマイ ヤ-係数	ヤンカ 靱性係数
	kg/m <sup>3</sup>	kN	mm	N/mm <sup>2</sup>	kN/mm <sup>2</sup>	kN/mm <sup>2</sup>	kN	N/mm <sup>2</sup>	mm	mm <sup>2</sup> ・kN	α kN	η	Z mm/kN
最小値	454	6.45	10.9	36.9	8.89	9.78	6.45	36.9	10.3	34.9	3.22	0.475	0.00
平均値	514	11.43	22.0	65.4	10.56	11.22	8.38	47.9	13.4	151.9	6.41	0.554	2.50
最大値	567	15.10	38.1	86.6	11.92	12.80	11.44	65.8	16.6	353.6	9.74	0.651	5.25
標準偏差	25.4	2.38	6.86	13.51	0.82	0.90	1.02	5.77	1.63	86.2	1.7	0.043	1.15
変動係数%	5.0	20.8	31.3	20.7	7.8	8.0	12.2	12.0	12.2	56.7	27.3	7.7	45.9
5%下限値	正規分布あてはめ			40.2	9.02								
接合効率	平均値比較			0.80	0.99								
ヒノキM120FJ	密度	Pmax	Pmax 実位置	MOR	MOE	変形動 E <sub>f</sub>	比例限度 荷重	比例限度 強度	比例限度 変位	仕事量	ヤンカ比 仕事量	テトマイ ヤ-係数	ヤンカ 靱性係数
	kg/m <sup>3</sup>	kN	mm	N/mm <sup>2</sup>	kN/mm <sup>2</sup>	kN/mm <sup>2</sup>	kN	N/mm <sup>2</sup>	mm	mm <sup>2</sup> ・kN	α kN	η	Z mm/kN
最小値	451	6.82	9.7	37.1	11.06	10.75	5.94	33.3	8.7	32.5	3.34	0.504	1.60
平均値	478	11.62	17.0	66.4	12.59	13.76	9.54	54.5	12.5	109.8	6.36	0.546	2.17
最大値	514	13.76	22.9	78.7	14.24	16.29	11.32	64.5	15.6	196.1	8.55	0.622	3.02
標準偏差	17.6	1.24	2.18	7.23	0.71	1.20	1.19	6.95	1.40	26.9	0.9	0.024	0.36
変動係数%	3.7	10.7	12.8	10.9	5.7	8.7	12.4	12.7	11.2	24.5	13.6	4.5	16.4
5%下限値	正規分布あてはめ			52.8	11.26								
接合効率	平均値比較			0.80	0.99								
ヒノキM120NJ	密度	Pmax	Pmax 実位置	MOR	MOE	変形動 E <sub>f</sub>	比例限度 荷重	比例限度 強度	比例限度 変位	仕事量	ヤンカ比 仕事量	テトマイ ヤ-係数	ヤンカ 靱性係数
	kg/m <sup>3</sup>	kN	mm	N/mm <sup>2</sup>	kN/mm <sup>2</sup>	kN/mm <sup>2</sup>	kN	N/mm <sup>2</sup>	mm	mm <sup>2</sup> ・kN	α kN	η	Z mm/kN
最小値	402	10.94	15.9	61.9	11.23	11.60	9.01	51.2	12.0	97.7	6.14	0.515	1.73
平均値	472	14.57	28.6	83.0	12.73	13.90	10.50	59.8	13.6	271.4	9.31	0.638	3.79
最大値	547	17.47	36.9	99.0	14.38	16.16	12.39	71.1	15.3	420.1	12.02	0.710	6.31
標準偏差	43.1	1.67	5.09	9.58	0.96	1.15	0.84	4.84	0.75	79.8	1.3	0.044	1.13
変動係数%	9.1	11.5	17.8	11.5	7.5	8.3	8.0	8.1	5.6	29.4	14.3	6.9	29.9
5%下限値	正規分布あてはめ			65.1	10.93								
接合効率	平均値比較			0.80	0.99								

注: 材長690mm、幅120mm、厚30mm、支点間距離630mm、荷重点間距離210mm  
ヤンカ比仕事量(kN): 最大荷重までの仕事量/最大荷重時変形量  
テトマイヤ-係数: 最大荷重までの仕事量/(最大荷重時変形量×最大荷重)  
ヤンカ靱性係数(mm/kN): (最大荷重時変形量-比例限度変形量)/(最大荷重-比例限度荷重)

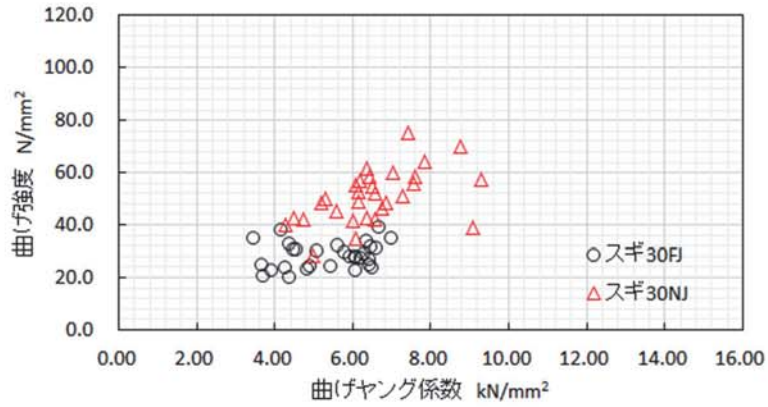


図2.9-5 スギM30ラミナの曲げヤング係数と曲げ強度

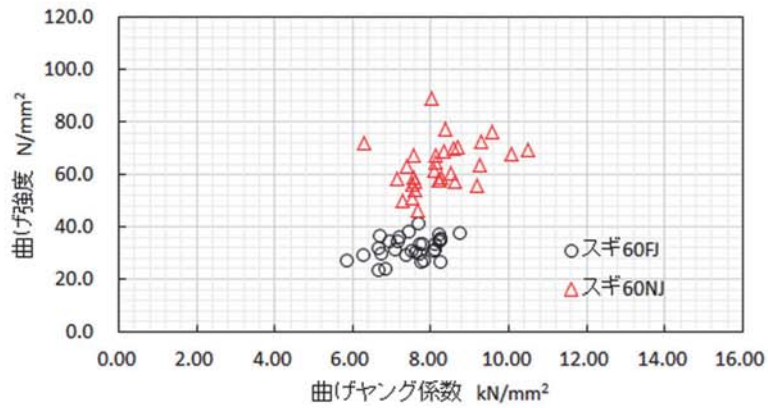


図2.9-6 スギM60ラミナの曲げヤング係数と曲げ強度

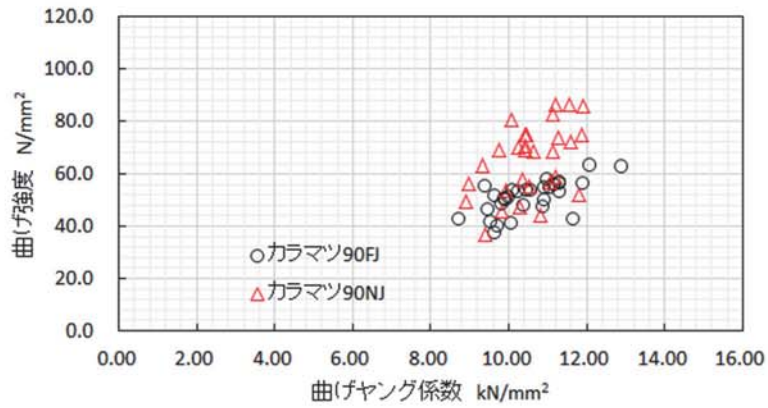


図2.9-7 カラマツM90ラミナの曲げヤング係数と曲げ強度

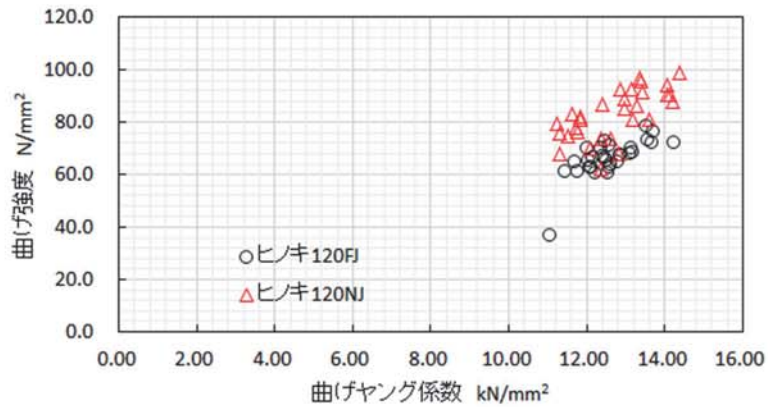


図2.9-8 ヒノキM120ラミナの曲げヤング係数と曲げ強度

また、表 2.9-1 に静的曲げ試験結果及び図 2.9-5 から図 2.9-8 に曲げ強度と曲げヤング係数の関係を示す。なお、含水率補正はしていない。また、ラミナ曲げ試験状況を写真 2.9-1 及び写真 2.9-2 に示す。

ラミナ曲げ試験では、FJ 材の破壊形態はほとんど FJ の破壊であったが、NJ 材はスギ M30 で試験体の繊維方向と直角に直線的に折れた形状を示すものもあるが、ほとんどが粘り強く、目切れから部分的な破壊が始まる（写真 2.9-3 から写真 2.9-10 参照）。

スギ M30 では、曲げ強度接合効率（FJ 材曲げ強度平均値÷NJ 材曲げ強度平均値）は 0.56 と大きな差となった。曲げヤング係数においても、曲げヤング係数接合効率（FJ 材曲げヤング係数平均値÷NJ 材曲げヤング係数平均値）は 0.83 と差があった。ラミナの選別にヤング係数の上限値を設定していないため、曲げヤング係数や曲げ強度の高いラミナが含まれているからであると考えられる。また信頼水準 75% の 95% 下側許容限界値（以下 5% 下限値）は正規分布として計算した結果、FJ 材で 19.0N/mm<sup>2</sup>、NJ 材で 31.7 N/mm<sup>2</sup> と差が大きかった。

スギ M60 では選別時にヤング係数下限を 5.0kN/mm<sup>2</sup> 以上としていたが、曲げヤング係数もそれ以上で、よく選別されていた。曲げ強度接合効率は 0.50、曲げヤング係数接合効率は 0.91 と差があった。5% 下限値は FJ 材で 23.7N/mm<sup>2</sup>、NJ 材で 46.4N/mm<sup>2</sup> とこちらも差が大きかった。

カラマツ M90 では、曲げ強度接合効率は 0.78、曲げヤング係数接合効率は 1.00 と集成材用ラミナと同様な値であった。5% 下限値は FJ 材で 38.9N/mm<sup>2</sup>、NJ 材で 40.2 N/mm<sup>2</sup> とあまり差がなかった。これは NJ 材曲げ強度のばらつきが大きかったためである。

ヒノキ M120 では、曲げ強度接合効率は 0.80、曲げヤング係数接合効率は 0.99 とカラマツと同様な傾向があった。5% 下限値は FJ 材で 52.8N/mm<sup>2</sup>、NJ 材で 65.1 N/mm<sup>2</sup> と差が開いた。FJ 材で 1 体のみ低い曲げ強度の試験体があるが、破壊が節からであった。

カラマツ及びヒノキラミナは低い曲げヤング係数が少なかったが、選別時の下限設定値と実際のラミナヤング係数の分布の下限あたりに差がなかったと考えられる。

なお、NJ 材は載荷方向（木表からまたは木裏から）によって曲げ強度に差があると考えられるため、今後詳細に検討を行いたい。



写真 2.9-1 ラミナ曲げ試験状況

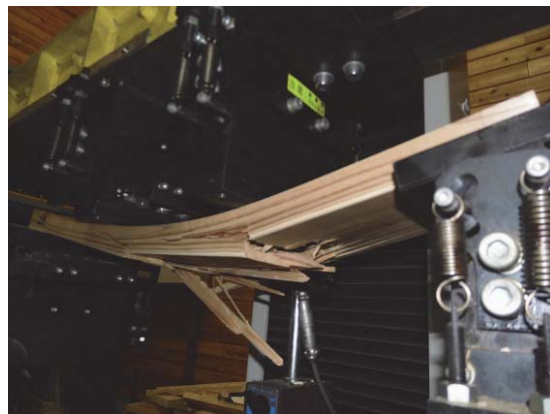


写真 2.9-2 M60NJ ラミナ破壊状況





写真 2.9-3 M30FJ ラミナ破壊状況例

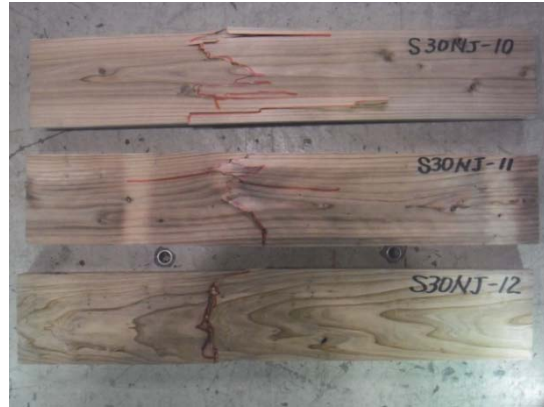


写真 2.9-4 M30NJ ラミナ破壊状況例



写真 2.9-5 M60FJ ラミナ破壊状況例

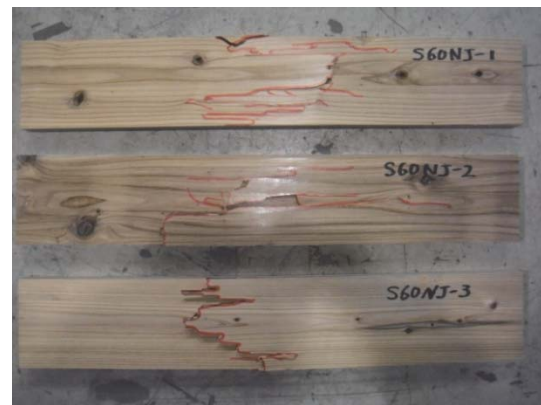


写真 2.9-6 M60NJ ラミナ破壊状況例



写真 2.9-7 M90FJ ラミナ破壊状況例



写真 2.9-8 M90NJ ラミナ破壊状況例



写真 2.9-9 M120FJ ラミナ破壊状況例



写真 2.9-10 M120NJ ラミナ破壊状況例

### 2. 9. 3 まとめ

CLT パネルでは異等級構成や異樹種構成も想定される。外層及び内層に使用されるスギラミナでは、歩留まりを考慮してヤング係数の下限を 2 種類に分けて広く選別し、また、外層に使用されるヒノキ及びカラマツは、強度やヤング係数の分布を考慮して、1 種類で選別した。また、歩留まり向上のためには FJ 材が必要であるが、ヤング係数の範囲を広く選別したラミナでは、その有無による強度性能の差については知見が少ないため、FJ の有無による面外曲げ強度性能を把握した。

スギ M30 及び M60 では曲げ強度接合効率は 0.50 から 0.56 程度、曲げヤング係数接合効率は 0.83 から 0.90 と差があった。選別にヤング係数の上限値を設定していないため、曲げヤング係数や曲げ強度の高いラミナも含まれているからであると考えられる。5%下限値でも差が大きかった。

カラマツ M90 及びヒノキ M120 では曲げ強度接合効率は 0.80 程度、曲げヤング係数接合効率は 1.00 程度で、集成材用ラミナと同様の傾向があった。カラマツ M90 の NJ 材曲げ強度はばらつきが大きく 5%下限値は FJ 材に近かった。







## あとがき

この1年でCLTを取り巻く状況は大きく前進し、CLTへの関心は、行政や研究機関、木材関係の企業にとどまらず、他分野にまで広がり始めた。

本年1月19日にはCLTのJAS規格である「直交集成板の日本農林規格」が施行された。要望を上げてから2年で規格化されたことは、今までに例を見ないスピードといえる。

しかしながら、CLTが一般に利用できるまで普及させるためには、法整備等の課題が山積している。本事業で行った実験は、JASに記載されるCLTの仕様の一部であり、今後も範囲を広げて、もしくはさらに掘り下げてデータを集めることが必要である。

本事業の進行にあたっては、様々な研究者、事業者、行政担当者等のご尽力をいただき、事業の推進に関するご助言・ご協力をいただいた。この場をお借りして、関係各位に厚くお礼申し上げます。特に、試験実施および報告書の作成にご尽力いただいた(独)森林総合研究所、(独)建築研究所、広島県立総合技術研究所・林業技術センター、(地独)北海道立総合研究機構・林産試験場の皆様には重ねてお礼申し上げます。

日本でのCLTの実用化に向けて本事業の成果が役立てられるよう、今後とも情報の収集・発信を続けていくとともに、引き続き、多くの方々の助言・ご協力をいただければ幸いです。

平成26年3月

日本CLT協会  
会長 中島 浩一郎

