

平成26年度 林野庁委託事業

ＣＬＴ等新たな製品・技術の開発促進事業のうち  
中高層建築物等に係る技術開発の促進  
（ＣＬＴ強度データの収集）  
成果報告書

平成27年3月

独立行政法人 森林総合研究所  
地方独立行政法人 北海道総合研究機構  
一般社団法人 日本ＣＬＴ協会  
公益社団法人 日本木材加工技術協会

平成 26 年度 林野庁委託事業 CLT 等新たな製品・技術の開発促進事業  
中高層建築物等に係る技術開発の促進（CLT 強度データの収集）

目 次

はじめに

1. 試験計画及び試験体の概要	1
2. 層構成が強度性能に与える影響	7
2.1 面外曲げ	7
2.2 面外せん断	13
2.3 面内曲げ	22
2.4 圧縮（短柱）	26
2.5 圧縮（中間柱・長柱）	42
2.6 引張り	47
2.7 面内せん断	58
2.8 まとめ	70
3. 試験体寸法が強度性能に与える影響	72
3.1 面外曲げ	73
3.2 引張り	95
3.3 まとめ	101
4. 樹種の影響解明	102
4.1 道産樹種を用いた CLT 強度性能の検討	103
4.1.1 面外曲げ	103
4.1.2 面外せん断	115
4.1.3 短柱圧縮	123
4.2 ヒノキを用いた CLT 強度性能の検討	134
4.2.1 面外曲げ	134
4.2.2 面外せん断	138
4.2.3 短柱圧縮	141
4.2.4 ラミナ試験	144
4.3 まとめ	147
5. まとめ	148

## はじめに

欧州で近年開発されたクロス・ラミネイティド・ティンバー（CLT）は、我が国でも国産材の新しい利用法として期待が高く、その製造や利用技術開発に関する研究が急速に進められている。平成 25 年 12 月には近年開発された新しい木質材料としては異例の速さで「直交集成板の日本農林規格（JAS 規格）」も制定され、構造用材料として実用化される素地も固まりつつある。

CLT は強度異方性を持つひき板をさらにその繊維方向を直交させながら積層接着した材料である。構造材料として利用するには、荷重の種類やそれが材料に加えられる面や方向の組合せによって異なるその力学的挙動を明らかにし構造設計に利用できる数値として示すことが不可欠である。しかしながら、JAS 規格に則って製造したとしてもその強度等級とひき板の構成の組合せは 42 種類あり、また、CLT に利用し得る樹種も多数ある。現在、JAS 規格に定める異等級構成 1 種類について強度データの収集を行っているが、まだ十分とは言えない。

そこで、本事業では、CLT の力学的特性の解明を目的として、JAS 規格に示される製造条件の範囲内で製造される種々の CLT について各種強度試験を行い、データ蓄積の充実を図った。

## 1. 試験計画及び試験体の概要

### 1.1 背景

これまでに試験研究により得られた CLT 強度データを俯瞰すると以下の点の検討が必要であると考えられる。

①. CLT のラミナ構成について JAS 規格には 6 種類が規定されているが、これまでの強度データ収集はその中の 2 種類（5 層 5 プライ及び 7 層 7 プライ）が中心であることから、これら以外の構成についてもデータ収集を早急に図り、ラミナ構成が強度性能に与える影響を解明する必要がある。

②. CLT はこれまでにない大きさの木質材料として利用されることが特徴である。さらに、製品の製造には多数の原料ひき板を必要とするため幅広い材質のものが使用される可能性がある。そのため欧州では幅 1500mm ほどの試験体を用いた評価を行っている。そこで、幅広い材質のラミナを用いて製造された CLT 製品の寸法が強度性能に与える影響を解明しておく必要がある。

③. CLT 製造に使用するラミナの強度等級について、JAS 規格では 4 等級が規定され、また、37 の樹種が利用可能である。これまではスギを中心とした研究が推進されているが、曲げヤング係数とせん断強さの比がスギとは異なる樹種（例えばカラマツなど）を使用した CLT の強度性能に与える影響の解明を行う必要がある。

### 1.2 試験体

本年度の事業で対象とする試験体の強度等級は、直交集成板の日本農林規格に規定される Mx60 以外を対象とした。製造に用いるラミナの樹種はスギ、ヒノキ、カラマツとし、外層にヒノキ内層にスギを配したものと、外層・内層ともヒノキ、外層・内層ともカラマツについても対象とした。

#### 1.2.1 層構成が強度性能に与える影響

対象とする強度の種類は、面外曲げ、面外せん断、面内曲げ、短柱圧縮、中間柱・長柱、縦引張り、面内せん断とした。表 1-1 に強度試験項目と対象とした層構成を示す。強軸方向、弱軸方向の両方を対象とした。

表 1-1 強度試験項目と対象層構成

樹種組合せ	外層：ヒノキ、内層スギ					
層構成	3 層 3 プライ	3 層 4 プライ	5 層 5 プライ	5 層 7 プライ	7 層 7 プライ	9 層 9 プライ
面外曲げ	○	○	○	○	○	○
面外せん断	○	○	○	○	○	○
面内曲げ	○	○	○	○	○	
短柱圧縮	○	○	○	○	○	○
中間柱・長柱	○	○	○	○	○	○
縦引張り	○	○	○			
面内せん断	○	○	○			

#### 1.2.2 試験体寸法が強度性能に与える影響

試験体寸法が強度性能に与える影響について対象とすべき項目としては、試験体の幅、厚さ及び長さがあるが、ここでは試験体幅が強度性能に与える影響について評価する試験方法について検討した。試験体幅は JAS 規格の曲げ試験体の幅 300mm を基本として、150mm、600mm、1200mm、2400mm とした。強度項目は、面外曲げ、縦引張り試験とした。

試験体は、層構成の影響の試験と共通で製造したもので、外層にヒノキ、内層にスギを用いたもの



であった。試験体の層構成は5層5プライとし、強軸試験体のみとした。表 1-2 に試験対象とした強度項目と試験体幅について示す。

表 1-2 強度試験項目と対象試験体幅

試験項目	試験体幅				
	150mm	300mm	600mm	1200mm	2400mm
面外曲げ	○	○	○	○	○
縦引張り	○	○	○		

### 1.2.3 樹種が強度性能に与える影響

樹種が強度性能に与える影響について、全てをカラマツもしくはヒノキで製造した CLT を対象とし、表 1-3 に示す試験項目と層構成について試験を実施した。

表 1-3 樹種が CLT の強度性能に与える影響に関する試験項目および試験体

樹種	試験項目	層構成					
		3層3プライ	3層4プライ	5層5プライ	5層7プライ	7層7プライ	9層9プライ
カラマツ	面外曲げ	○	○	○	○	○	○
	面外せん断	○	○	○	○	○	○
	圧縮	○	○	○	○	○	○
ヒノキ	面外曲げ	○※	○※	○	○※	○※	○※
	面外せん断	○※	○※	○	○※	○※	○※
	圧縮	○※	○※	○	○※	○※	○※

注：※は強軸試験体のみ実施したもの

### 1.2.4 ラミナ性能の把握

CLT 製造に使用するラミナの強度等級について、JAS 規格では4等級が規定された。しかしながら、その規定に則って区分されたラミナがどのような性能分布を示すことになるのかは十分に解明されているとは言えない。また、これまでのデータ収集は一部地域のスギを中心としたもので、今後供給が期待される樹種についてデータの充実を図る必要がある。本事業で用いたヒノキについて曲げ、圧縮、縦引張り試験を行った。

### 1.2.5 試験体製造

#### (1) 層構成および試験体寸法の影響検討用試験体

図 1-1 に本事業の試験体製造に用いたヒノキラミナについて連続式グレーディングマシンで測定した曲げヤング係数の分布を示す。外層用ラミナは M120 を目標として選別する際の曲げヤング係数による区分の閾値を 10.0kN/mm<sup>2</sup> 以上とした。しかしながら、図 1-1 内の表に示すように、外層用を選別した上位等級ラミナの曲げヤング係数の平均値は 10.95 kN/mm<sup>2</sup> と 12.0 kN/mm<sup>2</sup> を下回ったため、この時点では外層用に区分したラミナを M120 と確定することはできなかった。本報告書では、ラミナの強度等級や CLT の強度等級は統一した表記となっていないことに留意していただきたい。なお、内層用のスギラミナは M30 で下限を 3.0kN/mm<sup>2</sup> 上限を 6.0kN/mm<sup>2</sup> とした。

積層接着時のラミナの断面寸法は 30mm (厚さ) × 105mm (幅)、厚さに対する幅の比は 3.5 倍で、ラミナ幅方向の幅はぎ接着はしないものとした。

外層用ヒノキラミナのたて継ぎはフィンガージョイント長さ 16.2mm の水平型フィンガージョイント加工とし、接着剤には水性高分子イソシアネート系樹脂接着剤：主剤 PI-4000、硬化剤 H-3M ((株)オーシカ製) を用いた。

内層用スギラミナのたて継ぎはフィンガージョイント長さ 15.0mm の垂直型フィンガージョイント加工とし、接着剤には水性高分子イソシアネート系樹脂接着剤：主剤 MK200、硬化剤 H-30 ((株)オーシカ製) を用いた。

積層接着用の接着剤には水性高分子イソシアネート系樹脂：主剤 AUX160、硬化剤 AUH16 (アイカ工業(株)製) を用いた。積層接着時の圧縮圧力は製品厚さにより 3 層 3 プライ、3 層 4 プライについては 0.6MPa、それ以外では 0.8MPa とし、圧縮時間は製品厚さによらず 60 分とした。

表 1-4 に層構成および試験体幅影響検討用の試験体パネル製造番号と対象とした試験項目、試験体仕様を示す。

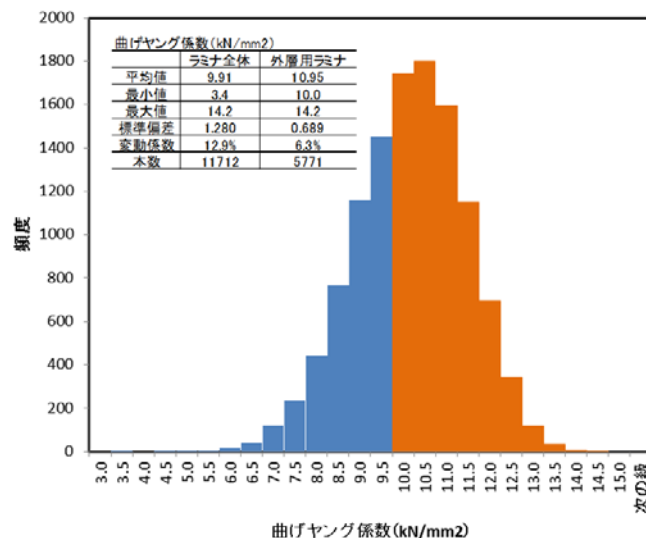


図 1-1 ヒノキラミナの曲げヤング係数の分布

表 1-4 層構成および試験体幅影響検討用の試験体パネル製造番号と対象とした試験項目、試験体仕様

試験項目			強度試験項目	パネル寸法 (mm)			パネル製造番号
				厚さ	幅	長さ	
層構成	3層3プライ	強	面外曲げ、面外せん断、面内曲げ、圧縮(中間柱)、縦引張り	90	1995	6030	B401
							B402
		弱	面内せん断	90	1995	6030	B403
							B404
	3層4プライ	強	面外曲げ、面外せん断、面内曲げ、圧縮(短柱、中間柱)、縦引張り	120	2110	6030	B433
							B434
		弱	面内せん断	120	2110	6030	B435
							B405
	5層5プライ	強	面外曲げ、面外せん断、面内曲げ、圧縮(短柱、中間柱)、縦引張り	150	2310	6030	B406
							B407
		弱	面内せん断	150	2310	6030	B408
							B436
	5層7プライ	強	面外曲げ、面外せん断、面内曲げ、圧縮(短柱、中間柱)	210	2625	6030	B437
							B438
		弱	面内せん断	210	2625	6030	B439
							B440
	7層7プライ	強	面外曲げ、面外せん断、面内曲げ、圧縮(短柱、中間柱)	270	2625	6030	B441
							B425
		弱	面内せん断	270	2625	6030	B426
							B427
	9層9プライ	強	面外曲げ、面外せん断、面内曲げ、圧縮(短柱、中間柱)	210	2625	6030	B442
							B443
		弱	面内せん断	210	2625	6030	B444
							B428
幅	150、300、600、1200	強	面外曲げ、面外せん断	150	2625	6030	B429
							B430
							B445
							B446
	2400	強	面外曲げ	150	2625	6030	B447
							B432
							B433
							B448
	150、300、600	強	縦引張り	150	2625	4030	B449
							B413
							B414
							B415

## (2) 樹種影響検討用試験体

### ア) カラマツ

外層用ラミナを選別する際の曲げヤング係数による区分値は下限を  $10.0\text{kN/mm}^2$  上限を  $16.0\text{kN/mm}^2$  とした。内層用ラミナは  $6.0\text{kN/mm}^2$  上限を  $10.0\text{kN/mm}^2$  とした。連続式グレーディングマシンで測定したカラマツラミナの曲げヤング係数を図 1-2 に示す。カラマツラミナのうち外層用に区分したものは M120、内層用に区分したものは M30 に相当したと考えられた。

積層接着時のラミナの断面寸法は  $30\text{mm}$  (厚さ)  $\times 105\text{mm}$  (幅)、厚さに対する幅の比は 3.5 倍で、ラミナ幅方向の幅はぎ接着はしないものとした。

ラミナのたて継ぎはフィンガージョイント長さ  $20\text{mm}$ 、ピッチ  $6.2\text{mm}$  の垂直型フィンガージョイント加工とした。接着剤は、たて継ぎ用には主剤 PI-4000、硬化剤 H-3M (株) オーシカ製) であった。

積層には水性高分子イソシアネート系樹脂接着剤：主剤 AUX160、硬化剤 AUH16 (アイカ工業(株)製)を用いた。積層接着時の圧縮圧力は製品厚さにより 3 層 3 プライ、3 層 4 プライについては  $0.7\text{MPa}$ 、それ以外では  $0.9\text{MPa}$  とし、圧縮時間は製品厚さによらず 60 分とした。

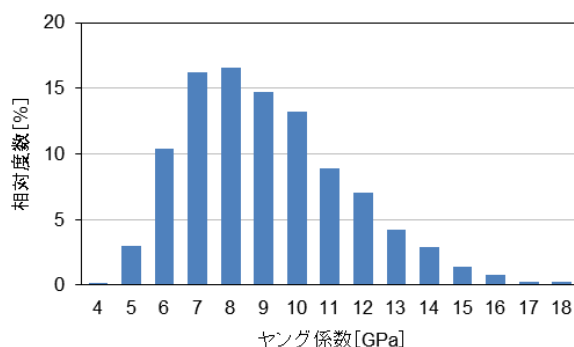


図 1-2 カラマツラミナの曲げヤング係数分布

### イ) ヒノキ

外層用と内層用を選別する際の曲げヤング係数による区分の閾値は  $10.0\text{kN/mm}^2$  であった(図 1-1)。

前述したように外層用は M120 に相当したかどうかの判断は難しかったが、内層用に区分したものは M30 に相当したと考えられた。

積層接着時のラミナの断面寸法は  $30\text{mm}$  (厚さ)  $\times 105\text{mm}$  (幅)、厚さに対する幅の比は 3.5 倍で、ラミナ幅方向の幅はぎ接着はしないものとした。

ヒノキラミナのたて継ぎはフィンガージョイント長さ  $16.2\text{mm}$  の水平型フィンガージョイント加工とした。接着剤には水性高分子イソシアネート系樹脂接着剤：主剤 PI-4000、硬化剤 H-3M (株) オーシカ製)を用いた。

積層には水性高分子イソシアネート系樹脂接着剤：主剤 AUX160、硬化剤 AUH16 (アイカ工業(株)製)を用いた。積層接着時の積層接着時の圧縮圧力は製品厚さにより 3 層 3 プライ、3 層 4 プライについては  $0.7\text{MPa}$ 、それ以外では  $0.9\text{MPa}$  とし、圧縮時間は製品厚さによらず 60 分とした。

表 1-5 に樹種影響検討用の試験体パネル製造番号と対象とした試験項目、試験体仕様を示す。

表 1-5 樹種影響検討用の試験体パネル製造番号と対象とした試験項目、試験体仕様

試験項目			強度試験項目	パネル寸法(mm)			パネル 製造番号
				厚さ	幅	長さ	
カラマツ	3層3プライ	強	面外曲げ、面外せん断、圧縮(短)	90	2100	4030	B362
	3層4プライ	強	面外曲げ、面外せん断、圧縮(短)	120	2100	6030	B363
	5層5プライ	強	面外曲げ、面外せん断、圧縮(短)	150	2100	6030	B364
	5層7プライ	強	面外曲げ、面外せん断、圧縮(短)	210	2625	6030	B365
	7層7プライ	強	面外曲げ、面外せん断、圧縮(短)	210	2625	6030	B366
	9層9プライ	強	面外曲げ、面外せん断、圧縮(短)	270	2625	6030	B367
	3層3プライ	弱	面外曲げ、面外せん断、圧縮(短)	90	2100	4030	B368
	3層4プライ	弱	面外曲げ、面外せん断、圧縮(短)	120	2100	6030	B369
	5層5プライ	弱	面外曲げ、面外せん断、圧縮(短)	150	2100	6030	B370
	5層7プライ	弱	面外曲げ、面外せん断、圧縮(短)	210	2625	6030	B371
	7層7プライ	弱	面外曲げ、面外せん断、圧縮(短)	210	2625	6030	B372
ヒノキ	9層9プライ	弱	面外曲げ、面外せん断、圧縮(短)	270	2625	6030	B373
	3層3プライ	強	面外曲げ、面外せん断、圧縮(短)	90	2100	4030	B450
	3層4プライ	強	面外曲げ、面外せん断、圧縮(短)	120	2100	6030	B451
	5層5プライ	強	面外曲げ、面外せん断、圧縮(短)	150	2100	6030	B452
	5層7プライ	強	面外曲げ、面外せん断、圧縮(短)	210	2625	6030	B453
	7層7プライ	強	面外曲げ、面外せん断、圧縮(短)	210	2625	6030	B454
	9層9プライ	強	面外曲げ、面外せん断、圧縮(短)	270	2625	6030	B455
	5層5プライ	弱	面外曲げ、面外せん断、圧縮(短)	150	2100	6030	B456

## 2. 層構成が強度性能に与える影響

### 【目的】

JAS 規格に規定されるラミナ強度等級の組合せのうち、現在、データ収集を行っている Mx60 以外の等級について 2 種類以上を選んで実施する。対象とする強度の種類は、JAS 規格に規定する面外曲げ性能と面外せん断性能を中心に下記項目について実施する。また、製造に利用したラミナの等級毎に強度試験を実施する。試験体数はこれまでに得られたバラツキを考慮して決定するが少なくとも 1 条件 3 体以上とする。

## 2. 層構成が強度性能に与える影響

### 2.1 面外曲げ試験

#### 2.1.1 試験方法

面外曲げ試験に供した CLT は表 2.1-1 のように、強度等級 Mx120 で外層にヒノキラミナ M120A、内層にスギラミナ M30B 相当を使用し、3 層 3ply の強軸及び弱軸から、9 層 9ply の強軸及び弱軸までの 6 種類の 12 条件の試験体を各 6 体用意した。どの試験体も幅 300mm、長さは厚さの 23 倍とした。

表 2.1-1 面外曲げ試験体の仕様

強度等級 Mx120						
外層ラミナ 樹種:ヒノキ、ラミナ区分:M120A						
内層ラミナ 樹種:スギ、ラミナ区分:M30B相当						
構成	積層数	厚さ(mm)	幅(mm)	長さ(mm)	本数	備考
3層3プライ	3	90	300	2070	12	強軸・弱軸各6体
3層4プライ	4	120	300	2760	12	強軸・弱軸各6体
5層5プライ	5	150	300	3450	12	強軸・弱軸各6体
5層7プライ	7	210	300	4830	12	強軸・弱軸各6体
7層7プライ	7	210	300	4830	12	強軸・弱軸各6体
9層9プライ	9	270	300	6210	12	強軸・弱軸各6体
計					72	

静的曲げ試験は、支点間を厚さの 21 倍、荷重点間を厚さの 7 倍とし、3 等分点 4 点荷重方式で行った。

なお、非破壊試験については、次のとおり行った。

#### (1) 動的試験方法

面外曲げ試験を行う前に、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>2.1-1)</sup>により行った。

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 倍の距離の台に置き、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 Fmn、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。

$$a = -1.2 \left( \frac{E_{fr-t}}{G_{fr-t}} \right), \quad c = E_{fr-t} \quad (2.1-1)$$

$E_{fr-t}$  : 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。

$$E_{fr} = (2fl)^2 \rho \quad (2.1-2)$$

$E_{fr}$  : 縦振動ヤング係数

$f$  : 固有振動数

$l$  : 材長

$\rho$  : 密度

## 2.1.2 結果

### (1) 非破壊試験

表 2.1-2 に 3 層 4ply の非破壊試験の結果を示す。

表 2.1-2 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

3層4ply 強軸 試験体No	縦振動ヤング係数 $E_{fr}$ kN/mm <sup>2</sup>	TGH $E_{fr-t}$ kN/mm <sup>2</sup>	TGH $G_{fr-t}$ kN/mm <sup>2</sup>	3層4ply 弱軸 試験体No	縦振動ヤング係数 $E_{fr}$ kN/mm <sup>2</sup>	TGH $E_{fr-t}$ kN/mm <sup>2</sup>	TGH $G_{fr-t}$ kN/mm <sup>2</sup>
B405-1	6.69	10.52	0.186	B436-1	3.80	1.48	0.337
B405-2	6.92	12.56	0.186	B436-2	3.69	1.34	0.484
B406-1	6.18	10.46	0.173	B437-1	3.68	1.45	0.410
B406-2	6.88	11.02	0.204	B437-2	3.47	1.36	0.550
B407-1	6.63	10.53	0.179	B438-1	3.45	1.45	0.359
B407-2	6.48	11.01	0.180	B438-2	3.97	1.45	0.412
最小値	6.18	10.46	0.173	最小値	3.45	1.34	0.337
平均値	6.63	11.02	0.185	平均値	3.68	1.42	0.425
最大値	6.92	12.56	0.204	最大値	3.97	1.48	0.550
標準偏差	0.27	0.80	0.01	標準偏差	0.20	0.06	0.08
変動係数%	4.1	7.2	5.8	変動係数%	5.4	4.1	18.7

### (2) 破壊試験

表 2.1-3 に 3 層 4ply の短期面外曲げ試験結果を、図 2.1-1 に TGH 法によるヤング係数とせん断変形の影響を含まない曲げヤング係数の関係を、図 2.1-2 にせん断変形の影響を含む曲げヤング係数と含まない曲げヤング係数の関係を、図 2.1-3 にせん断変形の影響を含む曲げヤング係数と曲げ強度の関係を、また、面外曲げ試験状況を写真 2.1-1 から写真 2.1-6 に示す。

表 2.1-3 面外曲げ試験結果

3層4ply 強軸 試験体No	密度 kg/m <sup>3</sup>	Pmax kN	Pmax変位量 mm	MOR N/mm <sup>2</sup>	みかけEm MOE kN/mm <sup>2</sup>	真 Eb MOE kN/mm <sup>2</sup>	比例限度強度 N/mm <sup>2</sup>	比例限度変位 mm	仕事量 kN・mm	破壊形態
B405-1	440	52.6	37.5	29.9	9.10	10.71	29.9	37.5	992	せん断
B405-2	439	52.0	36.7	29.4	9.25	11.35	27.1	33.5	976	せん断
B406-1	429	45.5	35.7	25.8	8.52	9.83	23.5	31.5	841	せん断
B406-2	461	56.9	42.7	32.3	9.43	10.96	28.9	35.1	1315	せん断
B407-1	444	46.9	37.5	26.5	8.77	10.07	21.0	27.8	924	せん断
B407-2	458	49.8	38.0	28.4	8.89	10.40	26.6	34.3	993	せん断
最小値	429	45.5	35.7	25.8	8.52	9.83	21.0	27.8	841	
平均値	445	50.6	38.0	28.7	8.99	10.55	26.2	33.3	1007	
最大値	461	56.9	42.7	32.3	9.43	11.35	29.9	37.5	1315	
標準偏差	12.0	4.13	2.43	2.37	0.33	0.57	3.36	3.36	162	
変動係数%	2.7	8.2	6.4	8.3	3.7	5.4	12.8	10.1	16.1	
			5%下限値	23.2	8.22	9.23				

3層4ply 弱軸 試験体No	密度 kg/m <sup>3</sup>	Pmax kN	Pmax変位量 mm	MOR N/mm <sup>2</sup>	みかけEm MOE kN/mm <sup>2</sup>	真 Eb MOE kN/mm <sup>2</sup>	比例限度強度 N/mm <sup>2</sup>	比例限度変位 mm	仕事量 kN・mm	破壊形態
B436-1	442	17.2	97.1	9.8	1.16	1.15	8.4	82.3	856	曲げ
B436-2	439	13.4	79.1	7.6	1.12	1.12	6.0	61.2	544	曲げ
B437-1	438	15.8	92.7	9.0	1.17	1.14	5.5	53.3	769	曲げ
B437-2	444	14.2	85.6	8.1	1.11	1.08	5.7	58.2	629	曲げ
B438-1	431	15.3	94.3	8.7	1.11	1.08	5.9	60.1	757	曲げ
B438-2	440	17.5	96.6	9.9	1.23	1.28	6.9	63.8	893	曲げ
最小値	431	13.4	79.1	7.6	1.11	1.08	5.5	53.3	544	
平均値	439	15.6	90.9	8.9	1.15	1.14	6.4	63.1	742	
最大値	444	17.5	97.1	9.9	1.23	1.28	8.4	82.3	893	
標準偏差	4.5	1.62	7.10	0.91	0.05	0.07	1.10	10.00	133	
変動係数%	1.0	10.4	7.8	10.3	4.1	6.4	17.3	15.8	18.0	
			5%下限値	6.7	1.04	0.97				

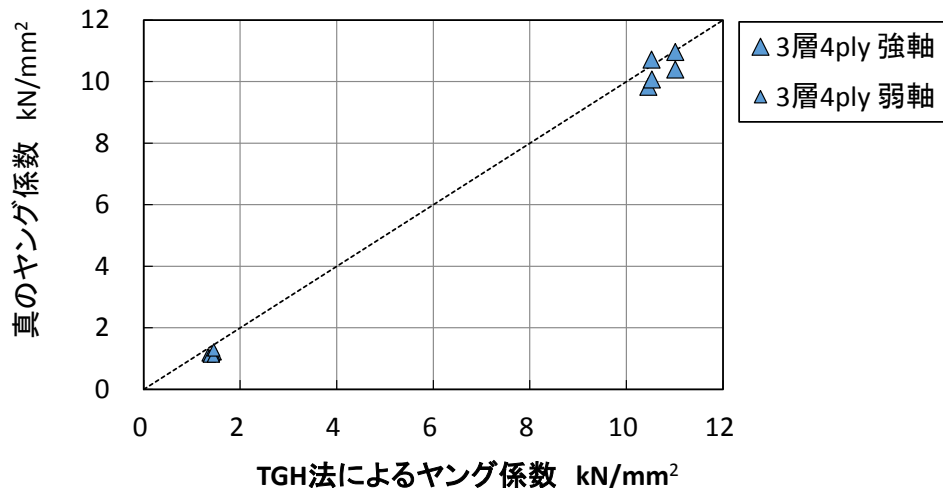


図 2.1-1 TGH 法によるヤング係数とせん断変形の影響を含まない曲げヤング係数の関係



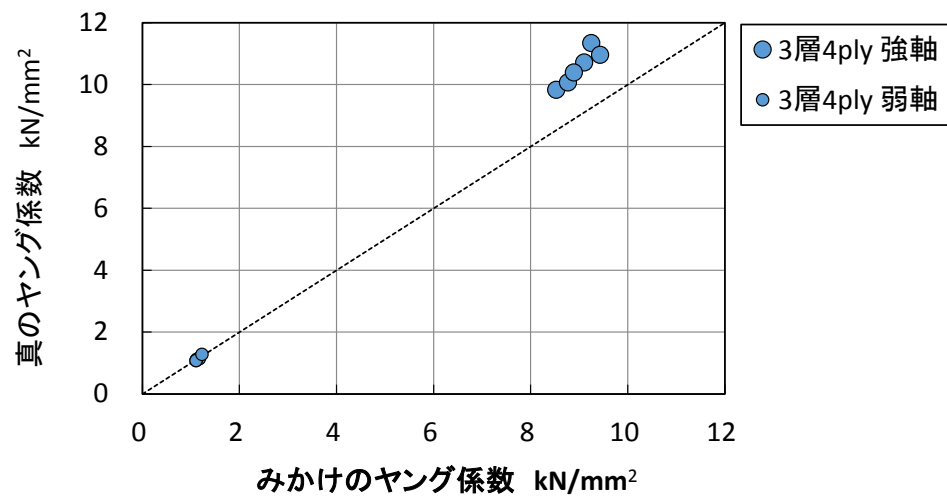


図 2.1-2 セン断変形の影響を含む曲げヤング係数と含まない曲げヤング係数の関係

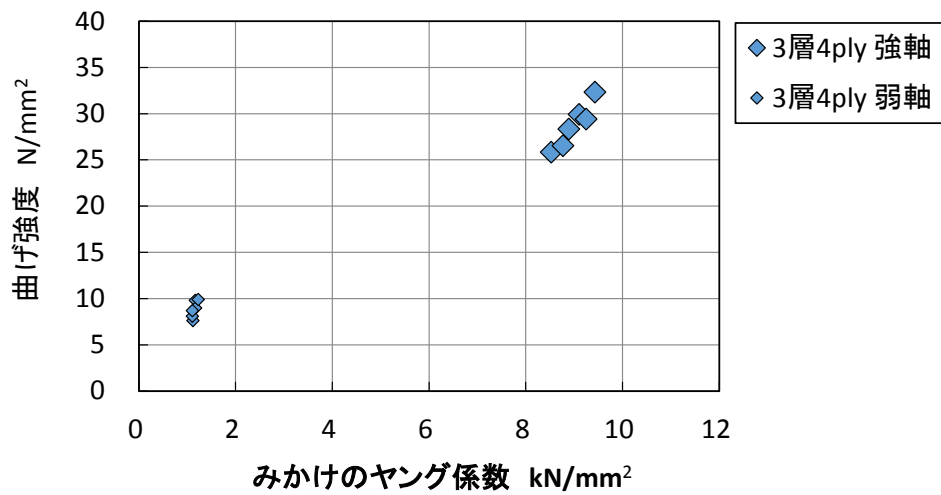


図 2.1-3 セン断変形の影響を含む曲げヤング係数と曲げ強度の関係



写真 2.1-1 試験状況

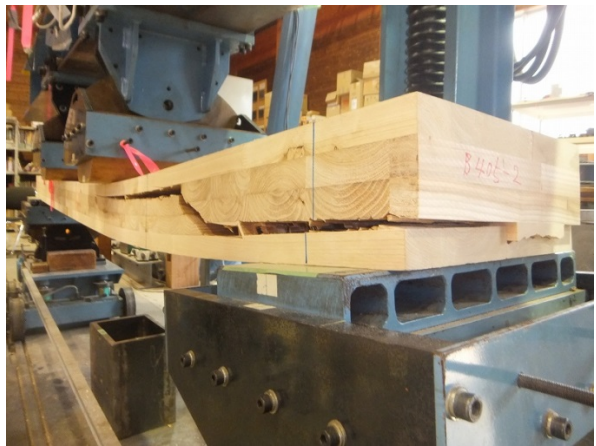


写真 2.1-2 3層 4ply 強軸の破壊状況 1

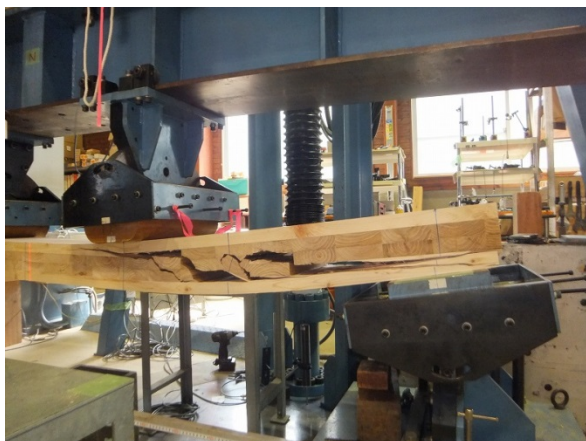


写真 2.1-3 3層 4ply 強軸の破壊状況 2



写真 2.1-4 3層 4ply 強軸の破壊状況 3

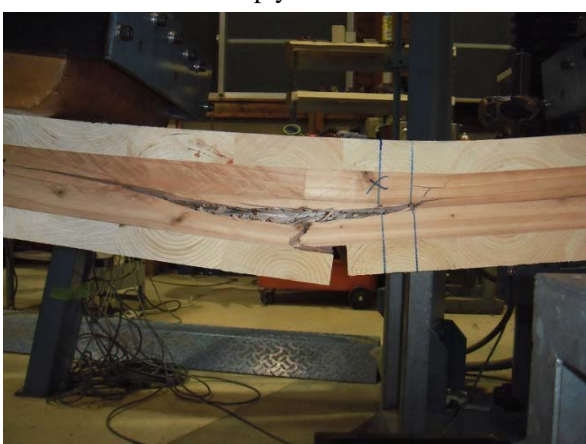


写真 2.1-5 3層 4ply 弱軸の破壊状況 1



写真 2.1-6 3層 4ply 弱軸の破壊状況 2

### 2.1.3 考察

縦振動ヤング係数とたわみ振動法(T.G.H.法)ヤング係数を比較すると、強軸試験体では、平均値で、縦振動ヤング係数が 40%程度低めに、弱軸試験体では縦振動ヤング係数が 2.6 倍程度高めになることが分かった。

表 2.1-2 の縦振動法、たわみ振動法 (T.G.H.法) によるヤング係数と表 2.1-3 の静的曲げヤング係数を比較すると、3層 4ply 強軸では、縦振動ヤング係数が静的曲げヤング係数より低めに、たわみ振動ヤング係数が静的曲げヤング係数より高めになることがわかった。3層 4ply 弱軸では、縦振動ヤング係数が静的曲げヤング係数の 2 倍高めに、たわみ振動ヤング係数が静的曲げヤング係数よりわずかに高めの値となった。図 2.1-1 のたわみ振動ヤング係数とせん断変形の影響を含まない曲げヤング係数の関係から、非破壊試験の TGH 法たわみ振動ヤング係数とせん断変形の影響を含まない曲げヤング係数（真の曲げヤング係数）が近い値となることが分かった。図 2.1-2 のせん断変形の影響を含む曲げヤング係数と含まない曲げヤング係数の関係では、弱軸がほぼ同じ値、強軸が 17%程度真の曲げヤング係数が高めとなった。

層構成が面外曲げ強度性能に与える影響について、表 2.1-3 の面外曲げ試験結果及び図 2.1-2 のせん断変形の影響を含む曲げヤング係数と曲げ強度の関係から、3層 4ply の強軸と弱軸の比較では、曲げ強度は、平均値、5%下限値とも強軸が弱軸の 3.3 倍程度、みかけのヤング係数は、平均値、5%下限値とも強軸が弱軸の 7.9 倍程度であった。また、比例限度強度は、平均値で強軸が 90%、弱軸が 70%程度と弱軸が低くなった。

なお、破壊形態は、3層 4ply の強軸がすべてせん断破壊であり、外層にヤング係数の高いヒノキを使用した、曲げ強度はあまり高くならなかった。弱軸はすべて曲げ破壊であった。

#### 2.1.4 まとめ

面外曲げ強度性能において、層構成が面外曲げ強度性能に与える影響を評価検討した。

3 層 4ply の強軸と弱軸の比較では、曲げ強度は、平均値、5%下限値とも強軸が弱軸の 3.3 倍程度、みかけのヤング係数は、平均値、5%下限値とも強軸が弱軸の 7.9 倍程度であった。

破壊形態は、3 層 4ply の強軸がすべてせん断破壊であり、外層にヤング係数の高いヒノキを使用した、曲げ強度はあまり高くはならなかった。弱軸はすべて曲げ破壊であった。

また、たわみ振動ヤング係数とせん断変形の影響を含まない曲げヤング係数の関係から、非破壊試験 TGH 法のたわみ振動ヤング係数とせん断変形の影響を含まない曲げヤング係数（真の曲げヤング係数）が近い値となることが分かった。

文献

2.1-1) 久保島吉貴：未発表資料

## 2.2 面外せん断

### 2.2.1 はじめに

CLTのJASに準拠し、短スパンでの中央集中1点式（水平せん断式） 載荷試験を実施する。試験体一覧を表-2.2.1に示す。

### 2.2.2 試験体・載荷方法

水平せん断載荷におけるM図、Q図を図-2.2.1に示す。載荷方法は、直交集成板のJASに準拠した短スパンの中央集中1点式（水平せん断式）、支点間距離はいずれも試験体厚の5倍とし、面外方向に載荷した。試験体は3層3プライ、3層4プライ、5層5プライ、5層7プライ、7層7プライ、9層9プライの計6種類とし、それぞれ最外層ラミナが強軸方向および弱軸方向のものを設定した。試験体のラミナ厚は30mmとし、幅はいずれも300mm、試験体長さはいずれも厚さ(d)の7倍とした。樹種は外層ヒノキ、内層スギとし、強度等級はMx120とした。

加圧板の幅はいずれも試験体の厚さ(d)と同じとした。ただし、いずれも面取り部の半径は10mmとし、試験体に接する幅（長さ）は、試験体厚さ-20mmとなっている。このため、面取り部を考慮しなければ、せん断スパン比は全て1.50で統一されている。

表-2.2.1 試験体一覧

層構成	強度等級	外層ラミナ	試験体数	水平式サイズ(mm)	加圧板幅(mm) <sup>*1</sup>	せん断スパン比 <sup>*2</sup>
3層3プライ	Mx120	強軸	6	d90-W300-L630	90	1.72
		弱軸	6	d90-W300-L630	90	1.72
3層4プライ	Mx120	強軸	6	d120-W300-L840	120	1.67
		弱軸	6	d120-W300-L840	120	1.67
5層5プライ	Mx120	強軸	6	d150-W300-L1,050	150	1.63
		弱軸	6	d150-W300-L1,050	150	1.63
5層7プライ	Mx120	強軸	6	d210-W300-L1,470	210	1.59
		弱軸	6	d210-W300-L1,470	210	1.59
7層7プライ	Mx120	強軸	6	d210-W300-L1,470	210	1.59
		弱軸	6	d210-W300-L1,470	210	1.59
9層9プライ	Mx120	強軸	6	d270-W300-L1,890	270	1.57
		弱軸	6	d270-W300-L1,890	270	1.57

\*1 加圧板上面（試験体設置側）はr=10mmの面取りをした。試験体接触長さは加圧板幅-20mm。

\*2 せん断スパン比の算定に際しては、加圧板の面取り部を除いた実質的なせん断スパン比とした。

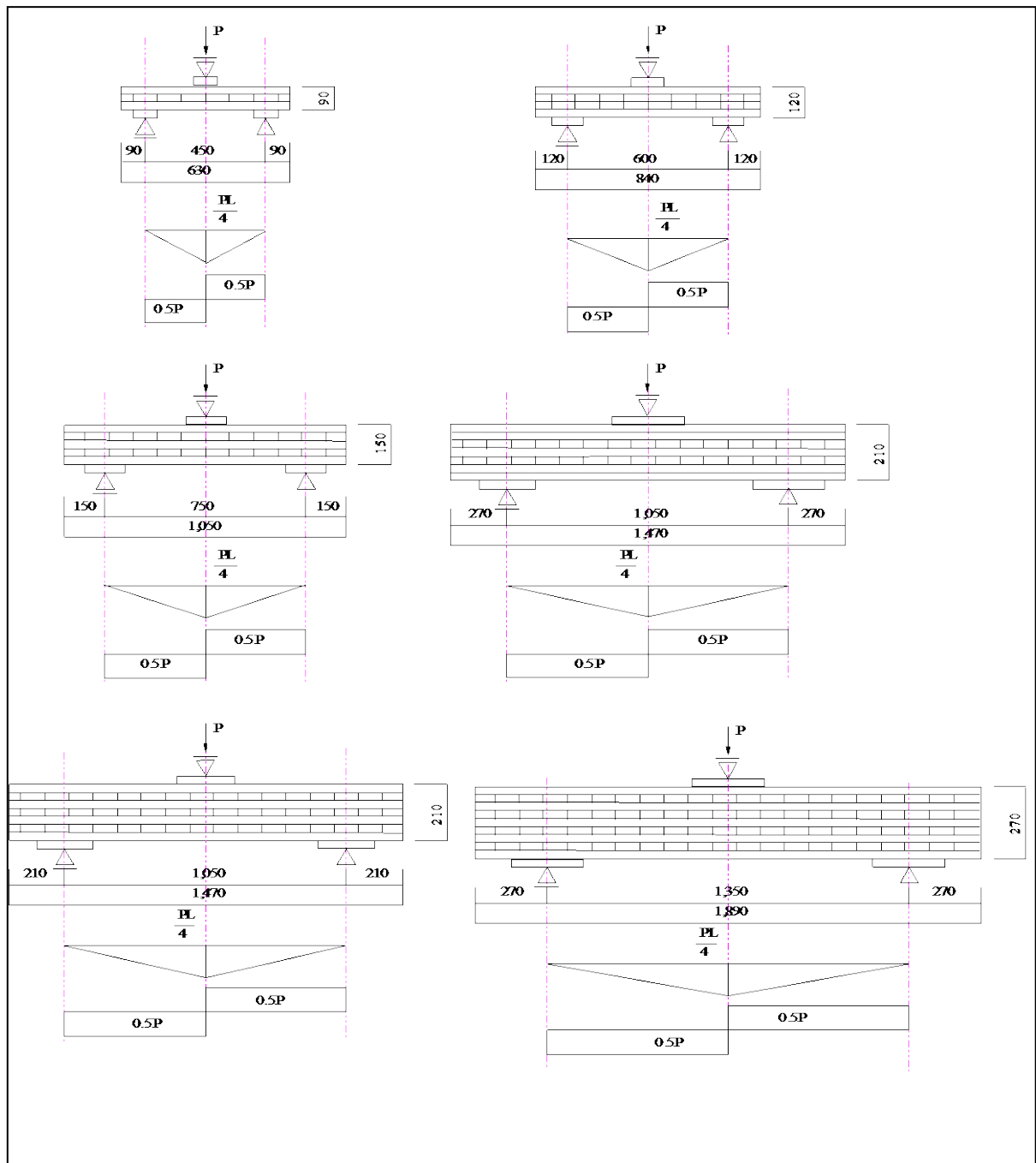


図-2.2.1 水平せん断式載荷とM図およびQ図（上左：3層3プライ、上右：3層4プライ、  
中左：5層5プライ、中右：5層7プライ、下左：7層7プライ、下右：9層9プライ）

### 2.2.3 水平式せん断載荷 試験結果

試験結果の例を表-2.2.2に、試験体のせん断力－変位曲線の例を図-2.2.2～2.2.4にそれぞれ示す。

表-2.2.1 (その1) 試験結果一覧

試験体名	層構成	強度等級	外層ラミナ	せん断面積 (mm <sup>2</sup> )	最大荷重 (kN)	せん断力 (kN)*	せん断強さ* (N/mm <sup>2</sup> )	Av.	最終破壊性状
B401-1	3層3プライ	Mx120	強軸	63,000	128.11	64.06	3.56	3.44	S
B401-2					132.76	66.06	3.67		S
B402-1					(116.18)	(58.01)	(3.22)		B
B402-2					136.43	67.87	3.77		S
B403-1					114.28	57.14	3.17		S
B403-2					118.26	58.78	3.27		S
B433-1	3層3プライ	Mx120	弱軸	63,000	(36.80)	(18.40)	(1.02)	0.92	B
B433-2					(24.29)	(11.73)	(0.65)		B
B434-1					(36.18)	(18.09)	(1.00)		B
B434-2					(32.36)	(15.39)	(0.86)		B
B435-1					(36.95)	(17.97)	(1.00)		B
B435-2					(35.97)	(17.30)	(0.96)		B
B405-1	3層4プライ	Mx120	強軸	63,000	114.77	57.39	2.39	2.32	S
B405-2					104.36	52.18	2.17		S
B406-1					108.70	54.40	2.27		S
B406-2					101.86	50.93	2.12		S
B407-1					112.90	56.45	2.35		S
B407-2					126.31	63.15	2.63		S
B436-1	3層4プライ	Mx120	弱軸	63,000	(62.89)	(31.45)	(1.31)	1.27	B
B436-2					(59.37)	(29.68)	(1.24)		B
B437-1					(73.24)	(36.62)	(1.53)		B
B437-2					(61.71)	(30.85)	(1.29)		B
B438-1					(58.52)	(29.26)	(1.22)		B
B438-2					(47.94)	(23.97)	(1.00)		B
B409-1	5層5プライ	Mx120	強軸	81,000	156.77	78.38	2.61	2.47	S
B409-2					(146.15)	(73.08)	(2.44)		B
B410-1					134.26	67.13	2.24		S
B410-2					150.85	75.42	2.51		S
B411-1					(151.90)	(75.95)	(2.53)		B
B411-2					(147.53)	(73.77)	(2.46)		B
B439-1	5層5プライ	Mx120	弱軸	81,000	74.82	37.41	1.25	1.27	S
B439-2					71.20	35.60	1.19		S
B440-1					78.53	39.27	1.31		S
B440-2					75.31	37.66	1.26		S
B441-1					(85.56)	(42.78)	(1.43)		B
B441-2					(71.20)	(35.60)	(1.19)		B

\* 最終破壊性状において、"S：せん断破壊"、"B：曲げ破壊"を表す。B：曲げ破壊した試験体については、せん断力、せん断強さが評価できないため、これらの値にいずれも（カッコ）を付した。

表-2.2.1（その2） 試験結果一覧

試験体名	層構成	強度等級	外層ラミナ	せん断面積 (mm <sup>2</sup> )	最大荷重 (kN)	せん断力 (kN)*	せん断強さ* (N/mm <sup>2</sup> )	Av.	最終破壊性状
B425-1	5層7プライ	Mx120	強軸	63,000	223.52	111.76	2.66	2.74	S
B425-2					(216.60)	(108.30)	(2.58)		B
B426-1					246.52	123.26	2.93		S
B426-2					229.31	114.66	2.73		S
B427-1					230.02	115.01	2.74		S
B427-2					236.42	118.21	2.81		S
B442-1	5層7プライ	Mx120	弱軸	63,000	(59.60)	(29.80)	(0.71)	0.80	B
B442-2					82.67	41.34	0.98		S
B443-1					63.51	31.76	0.76		S
B443-2					(55.56)	(27.78)	(0.66)		B
B444-1					(64.80)	(32.40)	(0.77)		B
B444-2					79.32	39.66	0.94		S
B428-1	7層7プライ	Mx120	強軸	63,000	193.42	96.71	2.30	2.17	S
B428-2					(181.65)	(90.83)	(2.16)		B
B429-1					(175.44)	(87.72)	(2.09)		B
B429-2					169.25	84.63	2.01		S
B430-1					187.01	93.51	2.23		S
B430-2					188.34	94.17	2.24		S
B445-1	7層7プライ	Mx120	弱軸	63,000	(91.74)	(45.87)	(1.09)	1.28	B
B445-2					99.56	49.78	1.19		S
B446-1					111.00	55.50	1.32		S
B446-2					127.06	63.53	1.51		S
B447-1					(106.23)	(53.12)	(1.26)		B
B447-2					110.44	55.22	1.31		S
B431-1	9層9プライ	Mx120	強軸	81,000	177.27	88.64	1.64	1.77	S
B431-2					196.75	98.38	1.82		S
B431-3					201.69	100.85	1.87		S
B432-1					191.24	95.62	1.77		S
B432-2					189.82	94.91	1.76		S
B432-3					186.80	93.40	1.73		S
B448-1	9層9プライ	Mx120	弱軸	81,000	147.73	73.87	1.37	1.28	S
B448-2					136.79	68.39	1.27		S
B448-3					(138.07)	(69.04)	(1.28)		B
B449-1					(110.07)	(55.04)	(1.02)		B
B449-2					(139.29)	(69.64)	(1.29)		B
B449-3					(153.91)	(76.95)	(1.43)		B

\* 最終破壊性状において、"S：せん断破壊"、"B：曲げ破壊"を表す。B：曲げ破壊した試験体については、せん断力、せん断強さが評価できないため、これらの値にいずれも（カッコ）を付した。



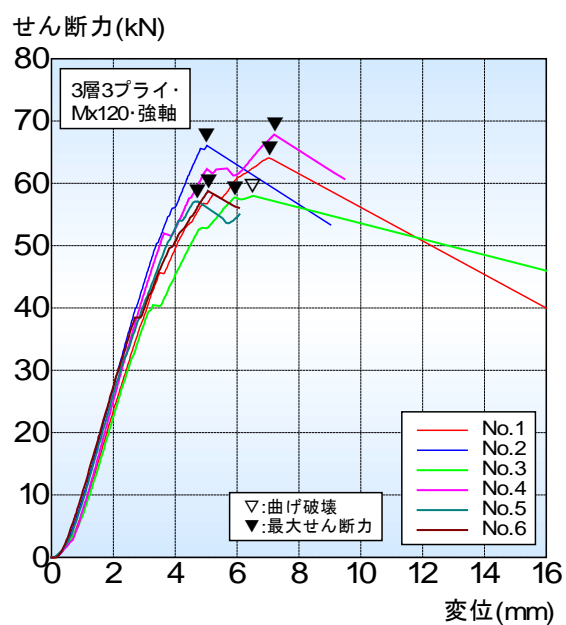


図-2.2.2 せん断力-変位曲線  
(3層3プライ・強軸・Mx120)

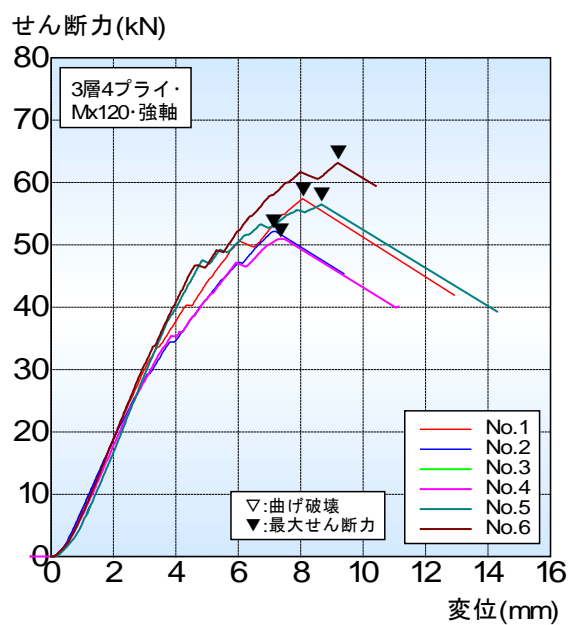


図-2.2.3 せん断力-変位曲線  
(3層4プライ・強軸・Mx120)

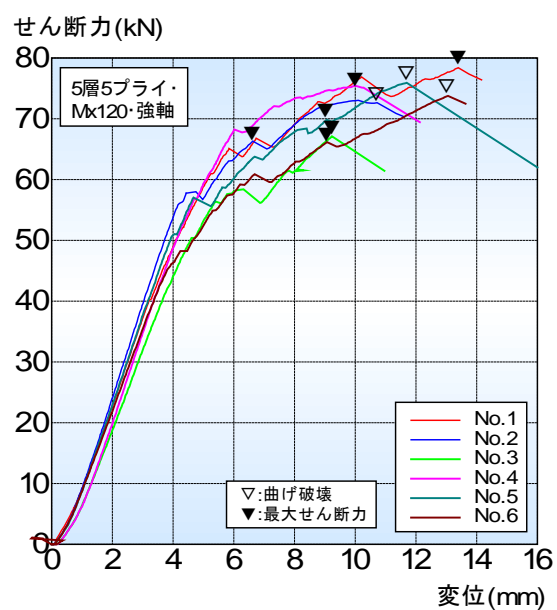


図-2.2.4 せん断力-変位曲線  
(5層5プライ・強軸・Mx120)

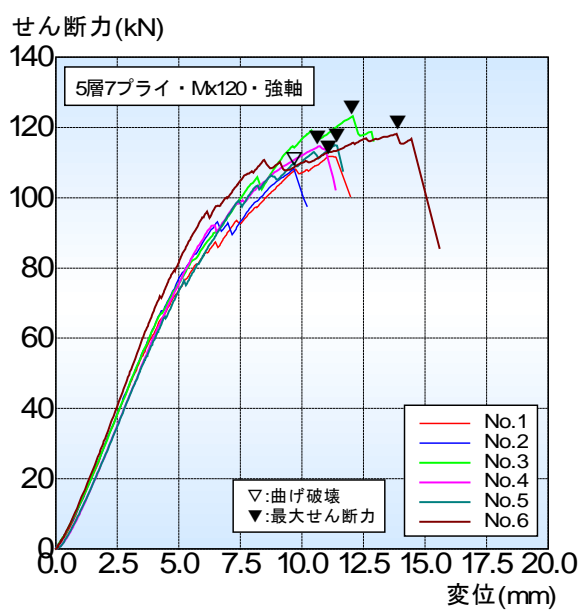
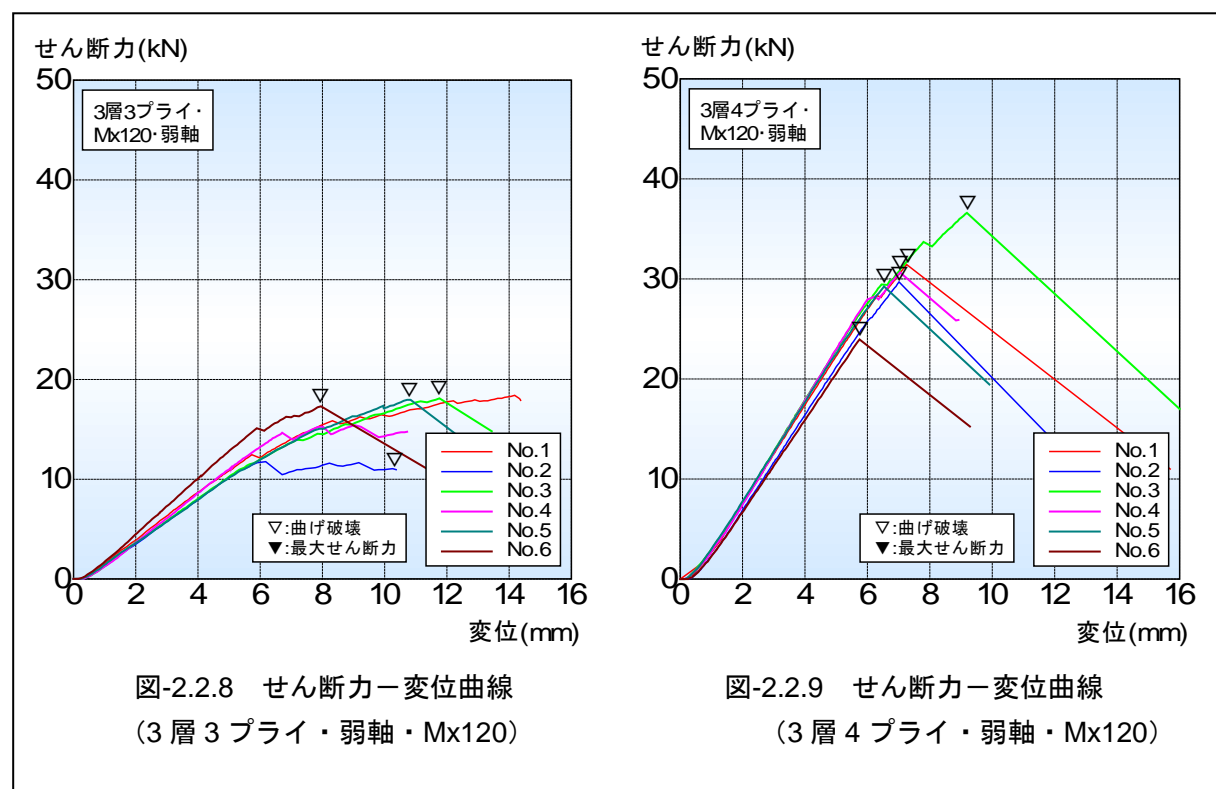
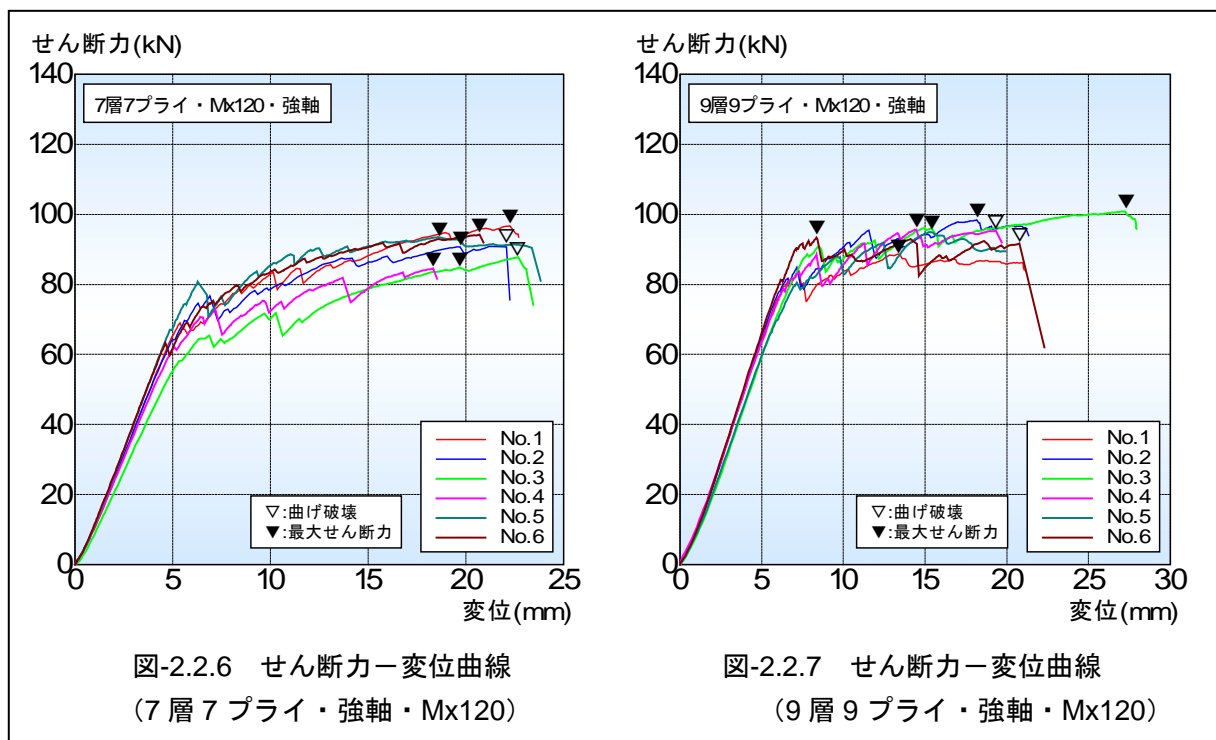


図-2.2.5 せん断力-変位曲線  
(5層7プライ・弱軸・Mx120)





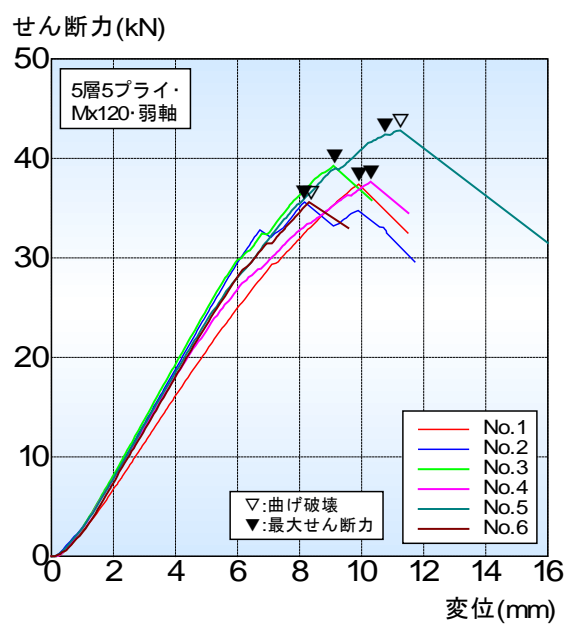


図-2.2.10 せん断力-変位曲線  
(5層5プライ・弱軸・Mx120)

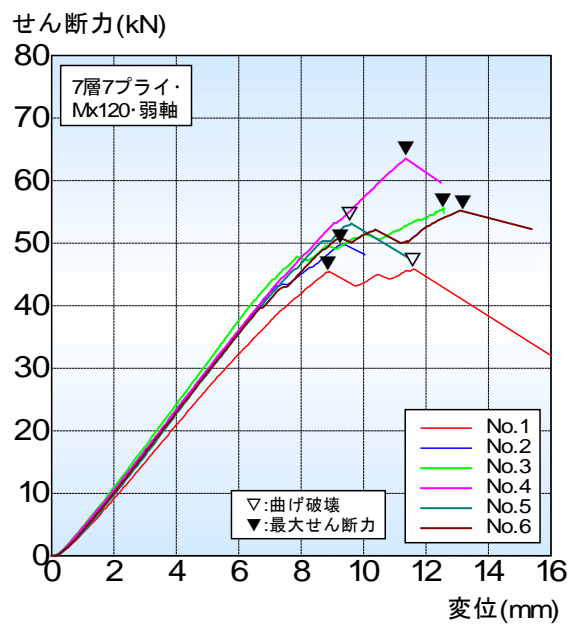


図-2.2.11 せん断力-変位曲線  
(5層7プライ・弱軸・Mx120)

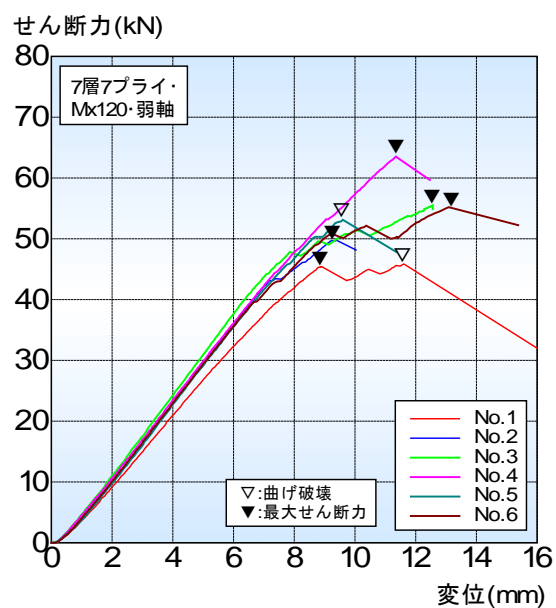


図-2.2.12 せん断力-変位曲線  
(7層7プライ・弱軸・Mx120)

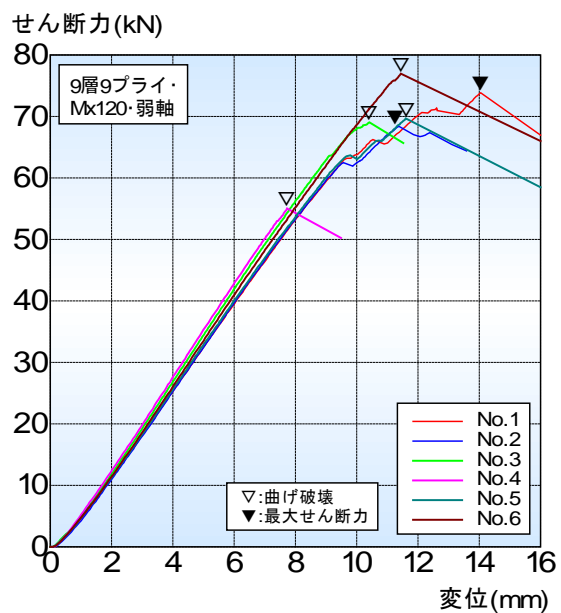


図-2.2.13 せん断力-変位曲線  
(9層9プライ・弱軸・Mx120)

せん断強さは、3層3プライが3.44だったのに対し、5層5プライ2.47、7層7プライ2.17、9層9プライ1.77(単位はいずれも $\text{N/mm}^2$ )と低下する傾向が認められた。これは寸法効果のほか、すべての層に対する強軸方向ラミナの比が、3層3プライ66.7%、5層5プライ60.0%、9層9プライ55.6%と低下することにも影響しているものと考えられる。また今回、加圧板の幅をすべて試験体厚と同じとし、加圧板幅を除いたせん断スパン比を約1.5と統一したことで、加力スパンの影響を考慮しなくてよいため、層構成の異なる試験体のせん断強さを直接比較することが可能になった。

また強軸試験体における最終破壊性状の例を写真-2.2.1～2.2.6に示す。強軸試験体においてはせん断破壊したものもあったが、3層3プライで6体中1体、5層5プライで6体中3体、5層7プライで6体中1体、7層7プライで6体中曲げ破壊であった。また弱軸試験体においては、3層3プライで6体全て、3層4プライで6体全て、5層5プライで6体中5体、5層7プライで6体全て、7層7プライで6体中2体、9層9プライで6体中4体が、曲げ破壊であった。この場合、最大荷重値でせん断強さを評価できないため、最大荷重値以前のせん断割れ発生時の荷重からせん断強さを算出するか、もしくは最大荷重値に何らかの低減係数を乗じるなどの注意が必要である。

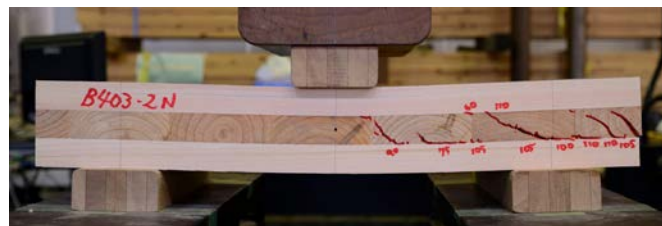


写真-2.2.1 最終破壊性状 (3層3プライ, 強軸)

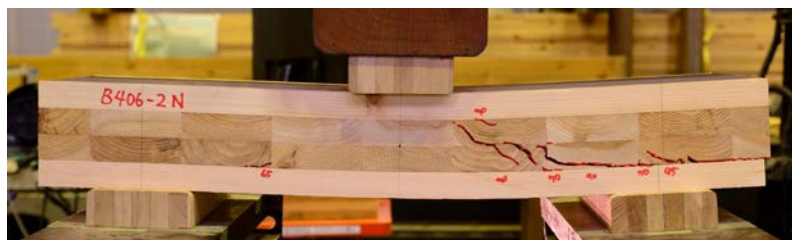


写真-2.2.2 最終破壊性状 (3層4プライ, 強軸)

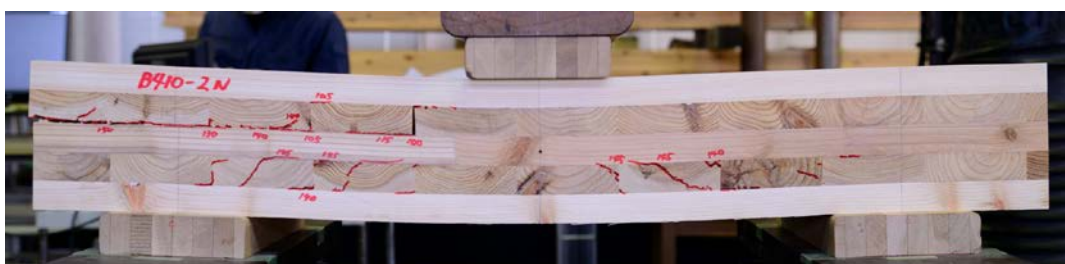


写真-2.2.3 最終破壊性状 (5層5プライ, 強軸)



写真-2.2.4 最終破壊性状 (5 層 7 プライ, 強軸)



写真-2.2.5 最終破壊性状 (7 層 7 プライ, 強軸)



写真-2.2.6 最終破壊性状 (9 層 9 プライ, 強軸)



## 2.3 面内曲げ

### 2.3.1 目的

ラミナの積層数や構成が異なり、外層にヒノキ、内層にスギを用いた CLT の面内曲げ強度性能を求めることを目的とした。

### 2.3.2 試験体と試験方法

外層がヒノキ、内層がスギで構成された 3 層 3 プライ、3 層 4 プライ、5 層 5 プライ、5 層 7 プライ、7 層 7 プライ CLT（強度等級 Mx90）について、外層が強軸方向の試験体をそれぞれ 6 体、外層が弱軸方向の試験体をそれぞれ 6 体準備した。

各試験体について、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、3、5、7 次の曲げ固有振動数を用いて各弾性係数を求めた。

面内曲げ試験の様子を写真 2.3.1 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せい 300mm の 18 倍の 5400 mm とし、荷重点間距離は 1800 mm とした。荷重点の幅は 150 mm、支点の幅は 180 mm であった。得られた荷重データを用いて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。

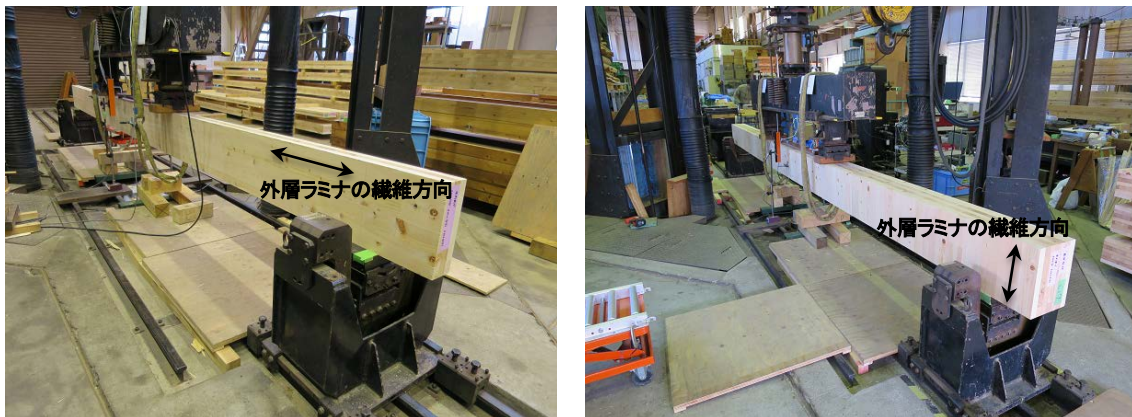


写真 2.3.1 面内曲げ試験の様子（左：外層強軸方向、右：外層弱軸方向）

### 2.3.3 結果

#### 2.3.3.1 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 2.3.1～表 2.3.10 に示す。

外層が強軸方向の試験体においては、密度、縦振動法によるヤング係数（Efr）、T.G.H.法による面内方向の曲げヤング係数（Et-h）、面外方向の曲げヤング係数（Et-v）、面内方向のせん断弾性係数（Gt-h）、面外方向のせん断弾性係数（Gt-v）は、7 層 7 プライ構成の Gt-v をのぞいて、すべての項目の値のばらつきは小さかった。それぞれの層構成の CLT において、Efr と Et-h はほぼ同じ値であった。外層のラミナの影響により Et-v は Et-h よりも高い値となった。Gt-h は Gt-v よりも高く、0.736～0.951GPa であった。Gt-v は 0.178～0.262GPa であった。

外層が弱軸方向の試験体においては、密度、Efr、Et-h、Et-v、Gt-h、Gt-v は 5 層 5 プライ構成の Gt-h、5 層 7 プライ構成の Gt-v をのぞいて、すべての項目の値のばらつきは小さかった。また、3 層 3 プライ構成、3 層 4 プライ構成の Et-v、Gt-v は測定できなかった。それぞれの層構成の CLT において、Efr と Et-h はほぼ同じ値であった。外層ラミナが弱軸方向のため、Et-v は Et-h より低い値となった。Gt-h

は外層が強軸方向の試験体と同程度で 0.771～0.852GPa であった。Gt-v も外層が強軸方向の試験体と同程度で 0.183～0.202GPa であった。

### 2.3.3.2 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 2.3.1～表 2.3.10 に示す。面内方向の曲げ強さ ( $\sigma$  b-h) は層構成により異なり、それらはおおむね強軸方向のラミナの等級（強度性能）と枚数の影響を受けると考えられた。なお、 $\sigma$  b-h は 3 層 3 プライ構成の弱軸方向の試験体を除いて、各構成においてばらつきは小さかった。

### 2.3.4 まとめ

外層がヒノキ、内層がスギで構成された 3 層 3 プライ、3 層 4 プライ、5 層 5 プライ、5 層 7 プライ、7 層 7 プライ CLT（強度等級 Mx90）について面内曲げ試験を行った。面内方向の Ea-h および曲げ強さ ( $\sigma$  b-h) は層構成により異なり、それらは強軸方向のラミナの等級（強度性能）と枚数の影響を受けると考えられた。

表 2.3.1 試験体の非破壊試験および面内曲げ試験の結果（外層ヒノキ、内層スギ、外層強軸方向）

構成	試験体番号	含水率(%)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Efr-L(GPa)	Et-h(GPa)	Gt-h(GPa)	Et-v(GPa)	Gt-v(GPa)	$\sigma$ b-h(MPa)	
3-3強	B401	1	10.9	462	8.90	8.44	0.941	12.1	0.256	31.2
3-3強	B401	2	10.4	467	8.57	8.82	0.958	12.0	0.250	28.3
3-3強	B402	1	10.1	461	8.46	8.38	0.997	11.8	0.267	26.7
3-3強	B402	2	9.85	458	8.76	8.41	0.952	11.9	0.273	31.9
3-3強	B403	1	10.3	464	9.02	8.96	0.943	12.2	0.290	26.7
3-3強	B403	2	10.1	458	9.16	8.90	0.915	12.9	0.238	32.5
平均			10.3	462	8.81	8.65	0.951	12.2	0.262	29.6
変動係数(%)			3.36	0.772	3.01	3.11	2.83	3.34	7.03	8.91

構成 層数－プライ数、外層のラミナの繊維方向

記号  $\rho$  : 密度、Efr-L : 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、 $\sigma$  b-h : 面内方向の曲げ強さ

表 2.3.2 試験体の非破壊試験および面内曲げ試験の結果（外層ヒノキ、内層スギ、外層強軸方向）

構成	試験体番号	含水率(%)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Efr-L(GPa)	Et-h(GPa)	Gt-h(GPa)	Et-v(GPa)	Gt-v(GPa)	$\sigma$ b-h(MPa)	
3-4強	B405	1	10.4	435	6.35	6.27	0.859	10.7	0.184	22.4
3-4強	B405	2	9.88	441	6.51	6.34	0.830	11.1	0.174	19.5
3-4強	B406	1	9.82	446	6.66	6.74	0.845	11.1	0.177	22.0
3-4強	B406	2	10.2	442	6.54	6.32	0.847	10.9	0.182	22.0
3-4強	B407	1	10.0	444	6.57	6.42	0.863	10.9	0.169	23.0
3-4強	B407	2	10.0	451	6.62	6.49	0.892	11.1	0.179	22.3
平均			10.0	443	6.54	6.43	0.856	11.0	0.178	21.9
変動係数(%)			2.05	1.24	1.63	2.63	2.46	1.41	3.26	5.59

構成 層数－プライ数、外層のラミナの繊維方向

記号  $\rho$  : 密度、Efr-L : 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、 $\sigma$  b-h : 面内方向の曲げ強さ

表 2.3.3 試験体の非破壊試験および面内曲げ試験の結果（外層ヒノキ、内層スギ、外層強軸方向）

構成	試験体番号	含水率(%)	$\rho$ (kg/m3)	Efr-L(GPa)	Et-h(GPa)	Gt-h(GPa)	Et-v(GPa)	Gt-v(GPa)	$\sigma$ b-h(MPa)
5-5強	B409	1	11.3	428	6.39	6.25	0.892	9.63	0.260
5-5強	B409	2	10.7	429	6.51	6.49	0.854	10.1	0.245
5-5強	B410	1	11.0	434	6.65	6.63	0.788	10.2	0.242
5-5強	B410	2	11.0	438	6.34	6.24	0.877	9.68	0.238
5-5強	B411	1	10.6	430	6.64	6.58	0.777	10.1	0.243
5-5強	B411	2	9.63	430	6.73	6.57	0.843	10.1	0.241
平均			10.7	432	6.54	6.46	0.838	10.0	0.245
変動係数(%)			5.48	0.885	2.38	2.68	5.59	2.35	3.19

構成 層数－プライ数、外層のラミナの繊維方向

記号  $\rho$  : 密度、Efr-L : 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、 $\sigma$  b-h : 面内方向の曲げ強さ

表 2.3.4 試験体の非破壊試験および面内曲げ試験の結果（外層ヒノキ、内層スギ、外層強軸方向）

構成	試験体番号	含水率(%)	$\rho$ (kg/m3)	Efr-L(GPa)	Et-h(GPa)	Gt-h(GPa)	Et-v(GPa)	Gt-v(GPa)	$\sigma$ b-h(MPa)	
5-7強	B425	1	9.73	449	8.60	8.66	0.803	12.0	0.285	26.3
5-7強	B425	2	9.70	459	8.36	8.45	0.883	11.8	0.298	21.8
5-7強	B426	1	9.56	449	8.38	8.20	0.813	11.6	0.285	24.1
5-7強	B426	2	9.13	452	8.65	8.35	0.823	11.7	0.286	27.8
5-7強	B427	1	10.3	447	8.64	8.75	0.726	11.6	0.282	24.7
5-7強	B427	2	9.83	454	8.59	8.39	0.825	11.7	0.274	29.9
平均		9.70	452	8.54	8.47	0.812	11.7	0.285	25.8	
変動係数(%)		3.80	1.01	1.57	2.39	6.24	1.37	2.77	11.1	

構成 層数－プライ数、外層のラミナの繊維方向

記号  $\rho$  : 密度、Efr-L : 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、 $\sigma$  b-h : 面内方向の曲げ強さ

表 2.3.5 試験体の非破壊試験および面内曲げ試験の結果（外層ヒノキ、内層スギ、外層強軸方向）

構成	試験体番号	含水率(%)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Efr-L(GPa)	Et-h(GPa)	Gt-h(GPa)	Et-v(GPa)	Gt-v(GPa)	$\sigma$ b-h(MPa)	
7-7強	B428	1	10.4	423	5.86	6.64	0.659	6.44	0.337	18.3
7-7強	B428	2	10.1	414	5.97	5.92	0.772	9.03	0.217	21.1
7-7強	B429	1	9.56	409	5.56	5.62	0.746	8.34	0.226	18.5
7-7強	B429	2	9.43	408	5.93	5.87	0.763	9.00	0.222	23.4
7-7強	B430	1	10.2	418	5.83	5.97	0.752	8.71	0.248	17.8
7-7強	B430	2	9.85	417	6.02	5.98	0.722	9.19	0.236	21.1
平均			9.92	415	5.86	6.00	0.736	8.45	0.248	20.0
変動係数(%)			3.78	1.35	2.76	5.63	5.59	12.2	18.2	10.9

構成 層数－プライ数、外層のラミナの繊維方向

記号  $\rho$  : 密度、Efr-L : 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、 $\sigma$  b-h : 面内方向の曲げ強さ

表 2.3.6 試験体の非破壊試験および面内曲げ試験の結果（外層ヒノキ、内層スギ、外層弱軸方向）

構成	試験体番号	含水率(%)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Efr-L(GPa)	Et-h(GPa)	Gt-h(GPa)	Et-v(GPa)	Gt-v(GPa)	$\sigma$ b-h(MPa)	
3-3弱	B433	1	9.15	461	2.90	2.74	0.773	-	-	9.11
3-3弱	B433	2	8.86	466	2.69	2.63	0.989	-	-	7.99
3-3弱	B434	1	8.84	464	2.79	2.60	0.743	-	-	10.5
3-3弱	B434	2	9.58	474	2.82	2.75	0.873	-	-	8.92
3-3弱	B435	1	9.68	478	2.64	2.54	0.820	-	-	10.8
3-3弱	B435	2	9.51	482	2.78	2.68	0.873	-	-	12.9
平均		9.27	471	2.77	2.66	0.845	-	-	10.0	
変動係数(%)		3.99	1.76	3.34	3.05	10.4	-	-	17.6	

構成 層数－プライ数、外層のラミナの繊維方向

記号  $\rho$  : 密度、Efr-L : 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、 $\sigma$  b-h : 面内方向の曲げ強さ

表 2.3.7 試験体の非破壊試験および面内曲げ試験の結果（外層ヒノキ、内層スギ、外層弱軸方向）

構成	試験体番号	含水率(%)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Efr-L(GPa)	Et-h(GPa)	Gt-h(GPa)	Et-v(GPa)	Gt-v(GPa)	$\sigma$ b-h(MPa)	
3-4弱	B436	1	9.94	440	3.72	3.58	0.849	—	—	15.1
3-4弱	B436	2	10.7	439	3.77	3.55	0.983	—	—	14.6
3-4弱	B437	1	10.3	439	3.69	3.61	0.821	—	—	12.5
3-4弱	B437	2	9.27	430	3.60	3.74	0.764	—	—	12.1
3-4弱	B438	1	9.87	443	3.83	3.72	0.842	—	—	12.9
3-4弱	B438	2	10.0	436	3.94	3.80	0.758	—	—	14.6
平均		10.0	438	3.76	3.67	0.836	—	—	13.7	
変動係数(%)		4.75	1.05	3.22	2.67	9.76	—	—	9.36	

構成 層数－プライ数、外層のラミナの繊維方向

記号  $\rho$  : 密度、Efr-L : 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、 $\sigma$  b-h : 面内方向の曲げ強さ

表 2.3.8 試験体の非破壊試験および面内曲げ試験の結果（外層ヒノキ、内層スギ、外層弱軸方向）

構成	試験体番号	含水率(%)	$\rho$ (kg/m3)	Efr-L(GPa)	Et-h(GPa)	Gt-h(GPa)	Et-v(GPa)	Gt-v(GPa)	$\sigma$ b-h(MPa)	
5-5弱	B439	1	9.21	433	3.18	3.08	0.834	1.78	0.208	10.2
5-5弱	B439	2	9.48	433	3.03	3.05	0.760	1.78	0.167	12.7
5-5弱	B440	1	9.56	439	3.32	3.11	0.864	1.90	0.159	13.3
5-5弱	B440	2	9.04	434	3.12	3.05	0.914	1.79	0.200	12.8
5-5弱	B441	1	9.62	437	3.30	3.11	0.798	1.99	0.161	10.9
5-5弱	B441	2	10.2	438	3.20	3.09	0.944	1.81	0.203	11.0
平均		9.52	436	3.19	3.08	0.852	1.84	0.183	11.8	
変動係数(%)		4.14	0.625	3.45	0.910	8.15	4.55	12.61	10.6	

構成 層数－プライ数、外層のラミナの繊維方向

記号  $\rho$  : 密度、Efr-L : 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、 $\sigma$  b-h : 面内方向の曲げ強さ

表 2.3.9 試験体の非破壊試験および面内曲げ試験の結果（外層ヒノキ、内層スギ、外層弱軸方向）

構成	試験体番号	含水率(%)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Efr-L(GPa)	Et-h(GPa)	Gt-h(GPa)	Et-v(GPa)	Gt-v(GPa)	$\sigma$ b-h(MPa)	
5-7弱	B442	1	9.79	463	2.67	2.52	0.817	1.12	0.204	10.8
5-7弱	B442	2	11.3	454	2.46	2.32	0.863	1.10	0.164	7.74
5-7弱	B443	1	10.3	452	2.47	2.36	0.711	1.02	0.273	9.21
5-7弱	B443	2	10.5	455	2.58	2.37	0.871	1.14	0.167	8.62
5-7弱	B444	1	9.86	453	2.51	2.53	0.657	1.05	0.225	9.43
5-7弱	B444	2	9.91	461	2.45	2.37	0.707	1.06	0.177	8.86
平均		10.3	456	2.52	2.41	0.771	1.08	0.202	9.11	
変動係数(%)		5.63	0.950	3.40	3.73	11.8	4.33	20.9	11.1	

構成 層数－プライ数、外層のラミナの繊維方向

記号  $\rho$  : 密度、Efr-L : 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、 $\sigma$  b-h : 面内方向の曲げ強さ

表 2.3.10 試験体の非破壊試験および面内曲げ試験の結果（外層ヒノキ、内層スギ、外層弱軸方向）

構成	試験体番号	含水率(%)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Efr-L(GPa)	Et-h(GPa)	Gt-h(GPa)	Et-v(GPa)	Gt-v(GPa)	$\sigma$ b-h(MPa)	
7-7弱	B445	1	10.3	424	3.03	3.02	0.928	2.22	0.185	11.1
7-7弱	B445	2	10.3	428	3.19	3.06	0.937	2.28	0.200	10.1
7-7弱	B446	1	10.5	436	3.35	3.28	0.881	2.31	0.214	12.4
7-7弱	B446	2	9.25	430	3.46	3.34	0.731	2.47	0.187	13.2
7-7弱	B447	1	8.98	421	3.36	3.13	0.777	2.41	0.182	11.6
7-7弱	B447	2	9.39	421	3.23	3.15	0.822	2.24	0.210	11.2
平均		9.77	427	3.27	3.16	0.846	2.32	0.196	11.6	
変動係数(%)		6.52	1.39	4.69	3.90	9.85	4.12	6.88	9.38	

構成 層数－プライ数、外層のラミナの繊維方向

記号  $\rho$  : 密度、Efr-L : 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、 $\sigma$  b-h : 面内方向の曲げ強さ



## 2.4 圧縮（短柱）

### 2.4.1 試験方法

短柱圧縮試験に用いた CLT の概要を表 2.4-1 に示す。試験体は、縦振動法によって非破壊的にヤング係数(E 縦振動)を測定したのち、最大容量が 3000kN の圧縮試験機(前川試験機製作所製、A-300-B4)を用いて圧縮強度試験に供した。圧縮試験機の荷重レンジは試験体のラミナの構成に応じて設定し、試験速度は最大荷重に達するまでの時間が約 5 分になるように調整して、最大荷重の 2% の荷重低下をもって試験終了とした。変位は、変位計(東京測器研究所製、CDP-25)を取り付けた治具を用いて、標点間距離を材長の 1/2 として試験体中央の縮みを幅面の表裏で測定し、その平均値を試験体の圧縮変位とした。変位の計測に用いた治具は、ナイフエッジで試験体に接触させ、試験体の厚さ方向の変形をできるかぎり拘束しないようにスプリングを介して両側から引き寄せることで取り付けた。試験の様子を 3 層 3 プライ弱軸試験体および 9 層 9 プライ強軸試験体を例として写真 2.4-1、2.4-2 に示す。試験終了後、荷重と圧縮変位の関係における傾きから縦圧縮ヤング係数 (E) を、比例限度荷重ならびに最大荷重から縦圧縮比例限度応力および縦圧縮強度を算出した。

表 2.4-1 短柱圧縮試験に用いた CLT の概要

層構成	外層の方向	寸法 mm(h×b×L)	試験体数
3 層 3 プライ	強軸	90×300×400	6
	弱軸	90×300×400	6
3 層 4 プライ	強軸	120×300×530	6
	弱軸	120×300×530	6
5 層 5 プライ	強軸	150×300×660	6
	弱軸	150×300×660	6
5 層 7 プライ	強軸	210×300×920	6
	弱軸	210×300×920	6
7 層 7 プライ	強軸	210×300×920	6
	弱軸	210×300×920	6
9 層 9 プライ	強軸	270×300×1014	6
	弱軸	270×300×1014	6



写真 2.4-1 3層3プライ弱軸試験体の試験の様子（左：幅面、右：側面）

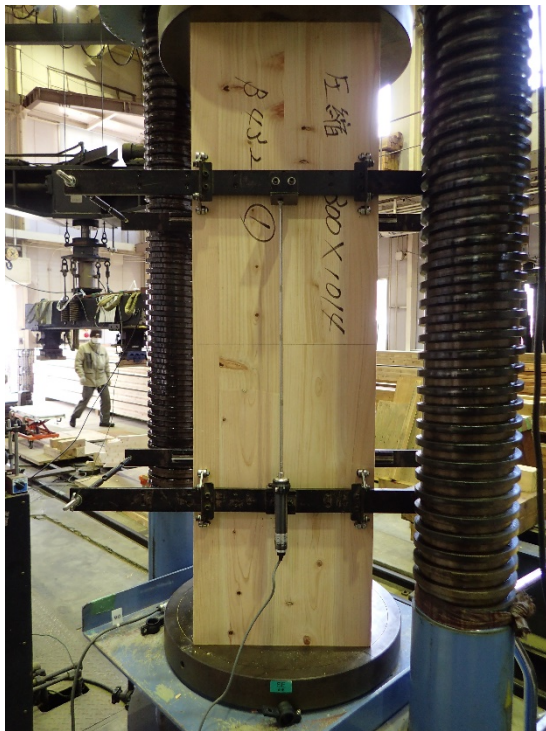


写真 2.4-2 9層9プライ強軸試験体の試験の様子（左：幅面、右：側面）

## 2.4.2 結果

### （1）非破壊試験

強度試験前に計測した密度および、縦振動法によるヤング係数（E 縦振動）を表 2.4-2～2.4-13 に示す。なお、3層4プライ強軸（表 2.4-4）においてはラミナの構成から推測される1次モードの振動数付近で明確なピークが得られず、2次モードの振動数付近においてもピークが不明瞭であるものもあったため、2次モードのピークであると判別できたものについてのみ、それを採用して記した。

表 2.4-2 非破壊試験の結果 (3 層 3 プライ強軸)

3 層 3 プライ強軸		E 縦振動 (kN/mm <sup>2</sup> )
番号	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	
B401-1	460	7.40
B401-2	451	7.36
B402-1	444	6.18
B402-2	456	6.73
B403-1	459	6.26
B403-2	461	6.59
平均	455	6.75
最大	461	7.40
最小	444	6.18
標準偏差	6.66	0.527
変動係数 (%)	1.46	7.80

表 2.4-3 非破壊試験の結果 (3 層 3 プライ弱軸)

3 層 3 プライ弱軸		E 縦振動 (kN/mm <sup>2</sup> )
番号	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	
B433-1	472	2.15
B433-2	460	2.23
B434-1	479	2.35
B434-2	465	2.17
B435-1	488	2.09
B435-2	461	2.13
平均	471	2.18
最大	488	2.35
最小	460	2.09
標準偏差	11.3	0.0911
変動係数 (%)	2.41	4.17

表 2.4-4 非破壊試験の結果 (3 層 4 プライ強軸)

3 層 4 プライ強軸		E 縦振動 (kN/mm <sup>2</sup> )
番号	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	
B405-1	442	-
B405-2	438	5.14※
B406-1	452	-
B406-2	449	-
B407-1	439	5.64※
B407-2	457	5.53※
平均	446	5.44
最大	457	5.64
最小	438	5.14
標準偏差	7.83	0.267
変動係数 (%)	1.76	4.90

表 2.4-5 非破壊試験の結果 (3 層 4 プライ弱軸)

3 層 4 プライ弱軸		E 縦振動 (kN/mm <sup>2</sup> )
番号	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	
B436-1	432	3.00
B436-2	448	2.99
B437-1	430	2.84
B437-2	442	3.32
B438-1	427	3.03
B438-2	441	2.89
平均	436	3.01
最大	448	3.32
最小	427	2.84
標準偏差	8.24	0.169
変動係数 (%)	1.89	5.62

※2 次モードのピークを用いて算出

表 2.4-6 非破壊試験の結果 (5 層 5 プライ強軸)

5 層 5 プライ強軸		E 縦振動 (kN/mm <sup>2</sup> )
番号	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	
B409-1	444	5.35
B409-2	432	5.39
B410-1	428	5.47
B410-2	430	5.14
B411-1	451	5.63
B411-2	428	5.23
平均	435	5.37
最大	451	5.63
最小	428	5.14
標準偏差	9.90	0.173
変動係数 (%)	2.27	3.22

表 2.4-7 非破壊試験の結果 (5 層 5 プライ弱軸)

5 層 5 プライ弱軸		E 縦振動 (kN/mm <sup>2</sup> )
番号	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	
B439-1	441	2.73
B439-2	441	3.09
B440-1	439	3.01
B440-2	436	2.88
B441-1	427	2.68
B441-2	411	2.74
平均	432	2.85
最大	441	3.09
最小	411	2.68
標準偏差	11.8	0.165
変動係数 (%)	2.72	5.80

表 2.4-8 非破壊試験の結果 (5 層 7 プライ強軸)

5 層 7 プライ強軸		E 縦振動 (kN/mm <sup>2</sup> )
番号	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	
B425-1	457	7.05
B425-2	445	7.09
B426-1	448	7.24
B426-2	455	7.34
B427-1	454	7.37
B427-2	444	7.34
平均	451	7.24
最大	457	7.37
最小	444	7.05
標準偏差	5.69	0.138
変動係数 (%)	1.26	1.91

表 2.4-9 非破壊試験の結果 (5 層 7 プライ弱軸)

5 層 7 プライ弱軸		E 縦振動 (kN/mm <sup>2</sup> )
番号	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	
B442-1	448	2.22
B442-2	464	2.00
B443-1	460	2.12
B443-2	465	2.14
B444-1	457	2.13
B444-2	457	2.03
平均	459	2.11
最大	465	2.22
最小	448	2.00
標準偏差	6.02	0.0797
変動係数 (%)	1.31	3.78

表 2.4-10 非破壊試験の結果 (7 層 7 プライ強軸)

7 層 7 プライ強軸		E 縦振動 (kN/mm <sup>2</sup> )
番号	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	
B428-1	419	5.29
B428-2	430	5.31
B429-1	413	4.76
B429-2	408	4.90
B430-1	419	5.14
B430-2	425	5.27
平均	419	5.11
最大	430	5.31
最小	408	4.76
標準偏差	7.64	0.229
変動係数 (%)	1.82	4.49

表 2.4-11 非破壊試験の結果 (7 層 7 プライ弱軸)

7 層 7 プライ弱軸		E 縦振動 (kN/mm <sup>2</sup> )
番号	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	
B445-1	426	2.92
B445-2	428	3.13
B446-1	420	3.08
B446-2	434	3.24
B447-1	413	2.93
B447-2	417	3.08
平均	423	3.06
最大	434	3.24
最小	413	2.92
標準偏差	7.98	0.123
変動係数 (%)	1.89	4.01

表 2.4-12 非破壊試験の結果 (9 層 9 プライ強軸)

9 層 9 プライ強軸		E 縦振動 (kN/mm <sup>2</sup> )
番号	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	
B431-1	410	4.58
B431-2	428	4.69
B431-3	413	4.53
B432-1	427	4.50
B432-2	407	4.71
B432-3	420	4.54
平均	418	4.59
最大	428	4.71
最小	407	4.50
標準偏差	8.8	0.0882
変動係数 (%)	2.11	1.92

表 2.4-13 非破壊試験の結果 (9 層 9 プライ弱軸)

9 層 9 プライ弱軸		E 縦振動 (kN/mm <sup>2</sup> )
番号	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	
B448-1	429	3.19
B448-2	428	3.08
B448-3	438	3.04
B449-1	424	3.19
B449-2	425	3.18
B449-3	424	3.06
平均	428	3.13
最大	438	3.19
最小	424	3.04
標準偏差	5.45	0.0721
変動係数 (%)	1.27	2.31

(2) 破壊試験

圧縮試験の結果を表 2.4-14～表 2.4-25 に示す。いくつか試験において局所的な厚さ方向の膨らみによって治具のナイフエッジがずれ、載荷終了まで変位を追従できなかったものがあったが、弾性係数、比例限度応力および圧縮強度の値に影響はないものとして記した。

表 2.4-14 短柱圧縮試験の結果 (3 層 3 プライ強軸)

3 層 3 プライ強軸				
番号	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	比例限度応力 (N/mm <sup>2</sup> )	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	含水率 (%)
B401-1	7.97	29.9	34.4	10.9
B401-2	7.94	31.2	35.5	10.2
B402-1	8.29	31.2	34.2	10.1
B402-2	7.45	29.4	34.2	10.4
B403-1	7.93	29.5	32.9	10.7
B403-2	8.40	30.0	32.4	10.2
平均	8.00	30.2	33.9	10.4
最大	8.40	31.2	35.5	10.9
最小	7.45	29.4	32.4	10.1
標準偏差	0.333	0.819	1.13	0.313
変動係数 (%)	4.16	2.71	3.34	3.00

表 2.4-15 短柱圧縮試験の結果 (3 層 3 プライ弱軸)

3 層 3 プライ弱軸				
番号	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	比例限度応力 (N/mm <sup>2</sup> )	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	含水率 (%)
B433-1	3.19	10.3	15.7	9.39
B433-2	2.39	11.5	15.9	9.17
B434-1	2.40	10.9	15.5	10.2
B434-2	2.66	10.8	16.5	9.73
B435-1	2.49	11.1	17.1	9.95
B435-2	2.31	11.1	14.9	9.45
平均	2.57	11.0	15.9	9.65
最大	3.19	11.5	17.1	10.2
最小	2.31	10.3	14.9	9.17
標準偏差	0.326	0.399	0.79	0.392
変動係数 (%)	12.7	3.64	4.97	4.06

表 2.4-16 短柱圧縮試験の結果（3 層 4 プライ強軸）

3 層 4 プライ強軸				
番号	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	比例限度応力 (N/mm <sup>2</sup> )	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	含水率 (%)
B405-1	5.73	20.0	23.6	10.2
B405-2	6.66	23.8	25.9	10.2
B406-1	5.37	20.1	25.4	9.91
B406-2	6.24	20.7	26.0	8.84
B407-1	4.95	20.7	24.3	9.49
B407-2	6.36	17.7	25.8	9.94
平均	5.89	20.5	25.2	9.76
最大	6.66	23.8	26.0	10.2
最小	4.95	17.7	23.6	8.84
標準偏差	0.652	1.96	1.00	0.519
変動係数 (%)	11.1	9.59	3.97	5.32

表 2.4-17 短柱圧縮試験の結果（3 層 4 プライ弱軸）

3 層 4 プライ弱軸				
番号	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	比例限度応力 (N/mm <sup>2</sup> )	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	含水率 (%)
B436-1	3.49	14.4	19.6	10.8
B436-2	3.16	13.4	21.4	10.8
B437-1	2.97	13.7	19.7	9.29
B437-2	3.65	15.4	21.4	9.42
B438-1	3.45	14.6	19.0	9.91
B438-2	3.29	13.6	21.3	9.32
平均	3.33	14.2	20.4	9.92
最大	3.65	15.4	21.4	10.8
最小	2.97	13.4	19.0	9.29
標準偏差	0.248	0.767	1.09	0.703
変動係数 (%)	7.43	5.41	5.37	7.09

表 2.4-18 短柱圧縮試験の結果（5 層 5 プライ強軸）

5 層 5 プライ強軸				
番号	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	比例限度応力 (N/mm <sup>2</sup> )	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	含水率 (%)
B409-1	6.02	22.0	27.1	10.4
B409-2	5.99	20.2	25.4	9.46
B410-1	6.76	23.2	26.6	9.83
B410-2	6.00	22.9	26.5	9.83
B411-1	6.12	20.7	24.8	10.4
B411-2	5.95	18.6	26.0	9.69
平均	6.14	21.3	26.0	9.94
最大	6.76	23.2	27.1	10.4
最小	5.95	18.6	24.8	9.46
標準偏差	0.312	1.75	0.84	0.397
変動係数 (%)	5.08	8.24	3.24	4.00

表 2.4-19 短柱圧縮試験の結果 (5 層 5 プライ弱軸)

5 層 5 プライ弱軸				
番号	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	比例限度応力 (N/mm <sup>2</sup> )	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	含水率 (%)
B439-1	2.71	11.3	16.7	9.50
B439-2	2.89	11.7	15.7	10.0
B440-1	2.70	11.8	16.7	9.84
B440-2	3.16	12.8	16.9	9.82
B441-1	3.01	12.6	17.5	9.65
B441-2	2.87	11.6	17.0	9.98
平均	2.89	12.0	16.7	9.80
最大	3.16	12.8	17.5	10.0
最小	2.70	11.3	15.7	9.50
標準偏差	0.177	0.593	0.60	0.198
変動係数 (%)	6.11	4.96	3.57	2.02

表 2.4-20 短柱圧縮試験の結果 (5 層 7 プライ強軸)

5 層 7 プライ強軸				
番号	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	比例限度応力 (N/mm <sup>2</sup> )	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	含水率 (%)
B425-1	7.35	24.5	33.0	9.21
B425-2	7.74	24.7	32.7	9.70
B426-1	7.82	22.8	33.2	9.26
B426-2	8.13	21.1	33.8	9.39
B427-1	8.10	26.4	33.2	10.2
B427-2	8.08	26.6	32.4	10.4
平均	7.87	24.4	33.1	9.69
最大	8.13	26.6	33.8	10.4
最小	7.35	21.1	32.4	9.21
標準偏差	0.301	2.11	0.485	0.503
変動係数 (%)	3.82	8.65	1.47	5.19

表 2.4-21 短柱圧縮試験の結果 (5 層 7 プライ弱軸)

5 層 7 プライ弱軸				
番号	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	比例限度応力 (N/mm <sup>2</sup> )	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	含水率 (%)
B442-1	2.32	9.61	14.3	9.21
B442-2	1.97	7.75	14.2	8.78
B443-1	2.12	8.97	14.6	8.74
B443-2	2.06	8.66	14.5	9.23
B444-1	2.34	9.01	14.1	9.76
B444-2	2.05	8.1	13.6	10.2
平均	2.14	8.68	14.2	9.33
最大	2.34	9.61	14.6	10.2
最小	1.97	7.75	13.6	8.74
標準偏差	0.152	0.673	0.341	0.585
変動係数 (%)	7.07	7.75	2.40	6.28

表 2.4-22 短柱圧縮試験の結果（7 層 7 プライ強軸）

7 層 7 プライ強軸				
番号	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	比例限度応力 (N/mm <sup>2</sup> )	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	含水率 (%)
B428-1	5.97	18.2	25.1	9.69
B428-2	5.50	20.0	25.3	10.2
B429-1	4.92	16.4	23.6	10.2
B429-2	5.25	17.7	23.5	10.0
B430-1	5.29	18.7	24.7	9.70
B430-2	5.18	17.4	24.4	10.2
平均	5.35	18.0	24.4	9.99
最大	5.97	20.0	25.3	10.2
最小	4.92	16.4	23.5	9.69
標準偏差	0.356	1.22	0.745	0.243
変動係数 (%)	6.65	6.73	3.05	2.43

表 2.4-23 短柱圧縮試験の結果（7 層 7 プライ弱軸）

7 層 7 プライ弱軸				
番号	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	比例限度応力 (N/mm <sup>2</sup> )	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	含水率 (%)
B445-1	2.63	9.64	16.3	10.2
B445-2	3.03	10.4	17.1	11.1
B446-1	2.92	11.5	17.2	10.2
B446-2	3.02	12.1	18.5	9.84
B447-1	2.96	13.1	16.5	9.34
B447-2	2.85	11.5	16.8	9.5
平均	2.90	11.4	17.1	10.0
最大	3.03	13.1	18.5	11.1
最小	2.63	9.64	16.3	9.34
標準偏差	0.150	1.22	0.771	0.614
変動係数 (%)	5.17	10.7	4.52	6.11

表 2.4-24 短柱圧縮試験の結果（9 層 9 プライ強軸）

9 層 9 プライ強軸				
番号	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	比例限度応力 (N/mm <sup>2</sup> )	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	含水率 (%)
B431-1	5.02	17.5	22.9	9.46
B431-2	5.02	15.9	23.2	9.46
B431-3	4.91	16.6	23.2	9.84
B432-1	4.81	16.2	22.6	10.0
B432-2	4.86	15.6	23.0	9.35
B432-3	4.81	15.2	21.2	10.0
平均	4.90	16.2	22.7	9.69
最大	5.02	17.5	23.2	10.0
最小	4.81	15.2	21.2	9.35
標準偏差	0.097	0.797	0.763	0.301
変動係数 (%)	1.97	4.93	3.37	3.10



表 2.4-25 短柱圧縮試験の結果（9 層 9 プライ弱軸）

9 層 9 プライ弱軸				
番号	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	比例限度応力 (N/mm <sup>2</sup> )	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	含水率 (%)
B448-1	3.18	12.1	18.6	9.70
B448-2	2.91	11.8	19.2	9.24
B448-3	3.17	8.3	18.9	9.46
B449-1	2.93	11.9	18.1	10.2
B449-2	3.13	11.3	18.7	9.56
B449-3	2.73	10.7	17.8	9.6
平均	3.01	11.0	18.5	9.62
最大	3.18	12.1	19.2	10.2
最小	2.73	8.3	17.8	9.24
標準偏差	0.181	1.416	0.527	0.328
変動係数 (%)	6.00	12.84	2.84	3.41

### 2.4.3 考察

代表的な破壊形態を各層構成の強軸と弱軸の別に写真 2.4-3～2.4-14 に示す。写真中の赤色マジックで着色した部分は最大荷重到達前に確認できた破壊で、青色マジックで着色した部分は加力終了後に確認した破壊である。強軸試験体では、幅面において、フィンガージョイントや抜け節などの断面欠損となっているところを起点として、局部的な繊維座屈によるしわが比例限度荷重あたりで確認された。側面においても強軸方向に配置されたラミナに局部座屈が見受けられ、それが複数個所で生じるものもあった。終局的には、内層の弱軸ラミナ側で接着層に沿って縦に割れ裂けるものが多かった（写真 2.4-5、写真 2.4-7）が、外層ラミナが分離し、フィンガージョイントを起点として曲げ破壊するもの（写真 2.4-11）もあった。これは、外層ラミナのフィンガージョイントが水平フィンガーであり、圧壊を伴いながらフィンガーの嵌合が進行することでラミナ厚さが局所的に膨らむことに起因するものと考えている。

弱軸試験体は、幅面の破壊を目視で判別する限りでは割れは確認されなかったが、木目に沿った凹凸が材面に生じていることを触診によって確認した。側面においては、内層の強軸ラミナの局部座屈が比例限度荷重あたりで見受けられたのち、外層ラミナで接着層に沿った割れが生じるものが多かったが、強軸ラミナが縦に割れ裂ける場合（写真 2.4-8）も確認された。3 層 4 プライにおいては、比例限度荷重以降で全体座屈が生じるものもあった（写真 2.4-6）。

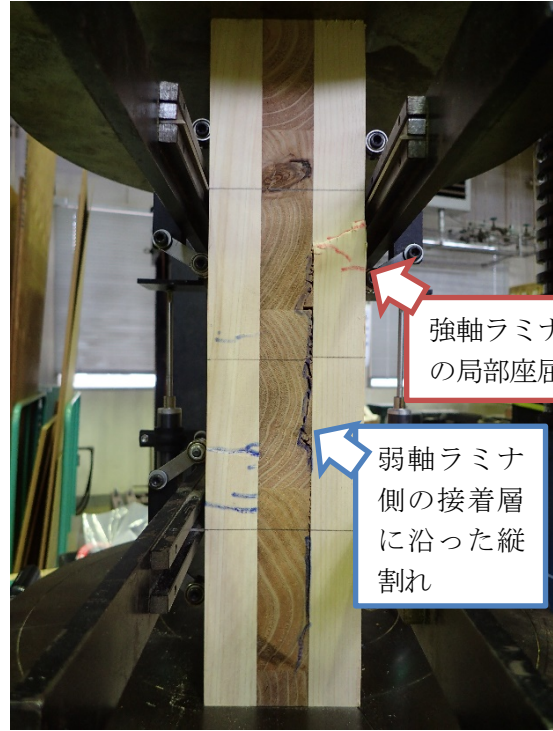


写真 2.4-3 3層3プライ強軸の破壊形態の例（左：幅面、右：側面）

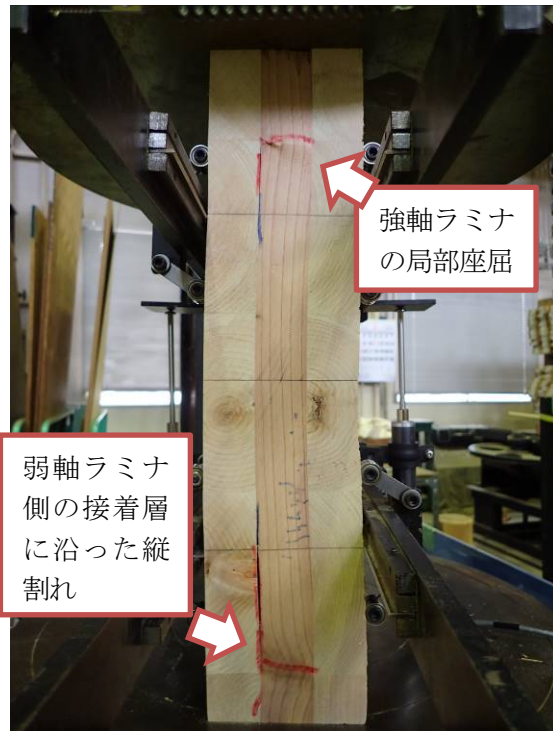


写真 2.4-4 3層3プライ弱軸の破壊形態の例（左：幅面、右：側面）

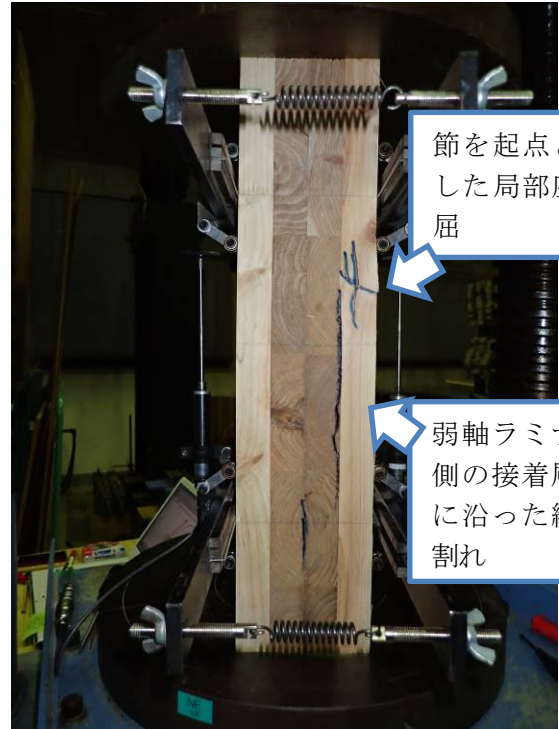
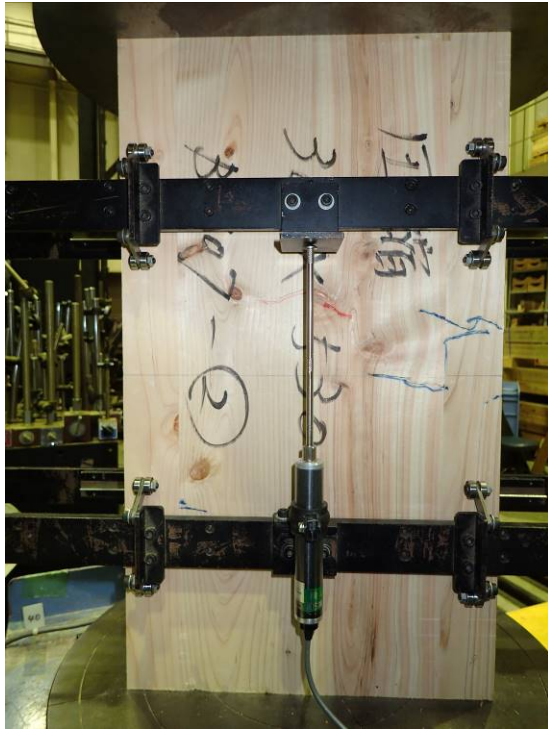


写真 2.4-5 3層4プライ強軸の破壊形態の例（左：幅面、右：側面）

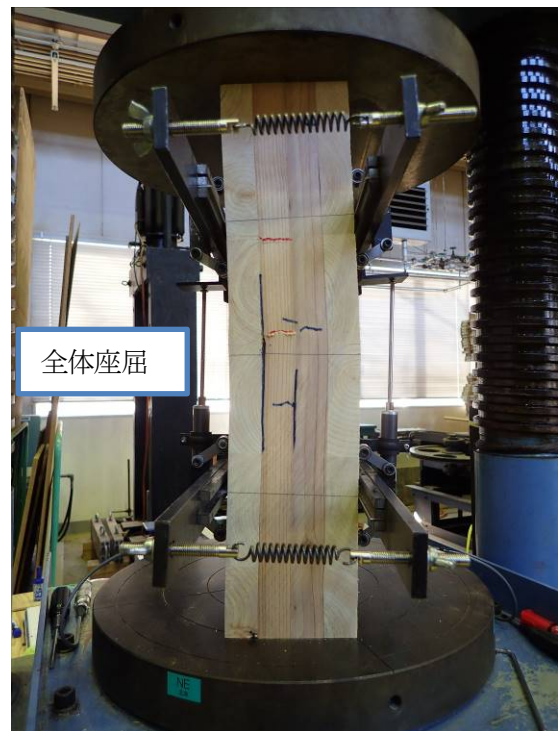


写真 2.4-6 3層4プライ弱軸の破壊形態の例（左：幅面、右：側面）



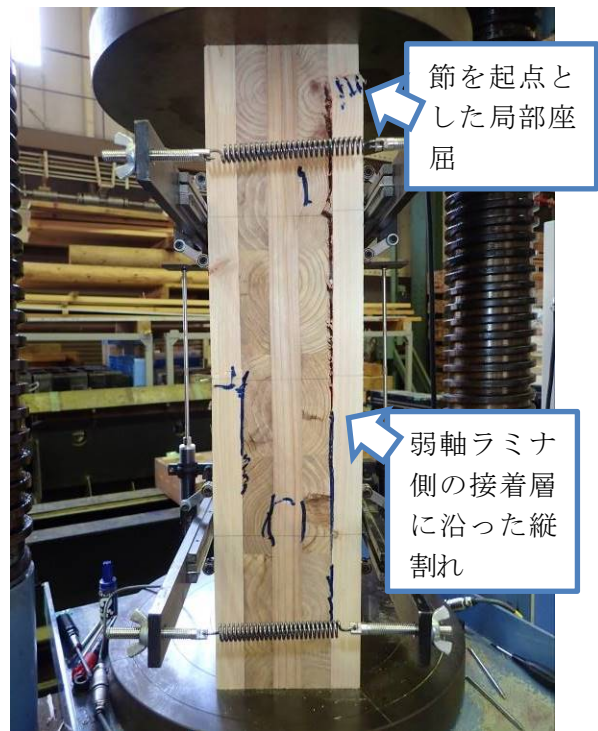
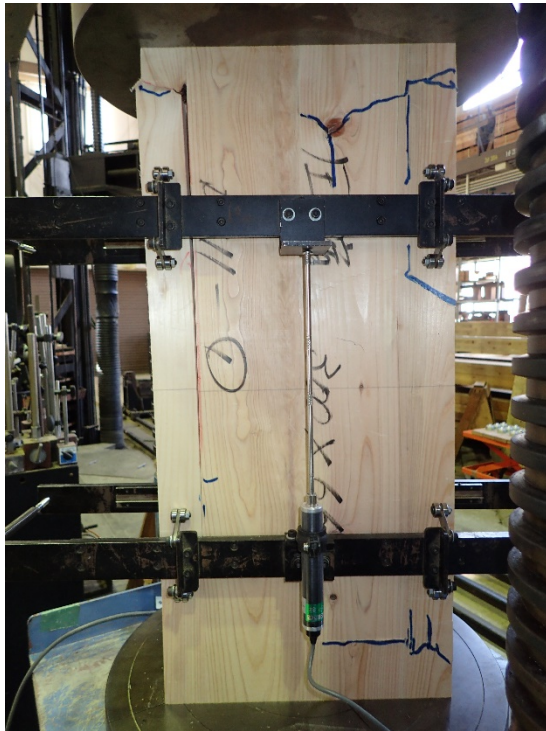


写真 2.4-7 5層5プライ強軸の破壊形態の例（左：幅面、右：側面）

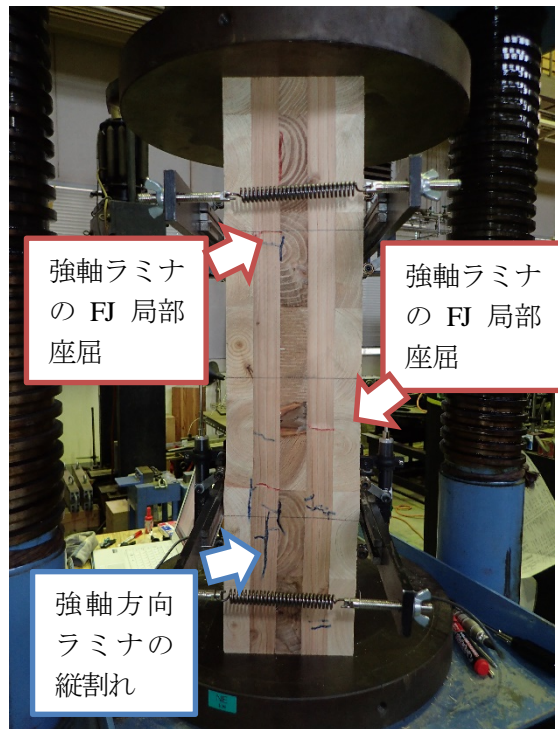


写真 2.4-8 5層5プライ弱軸の破壊形態の例（左：幅面、右：側面）



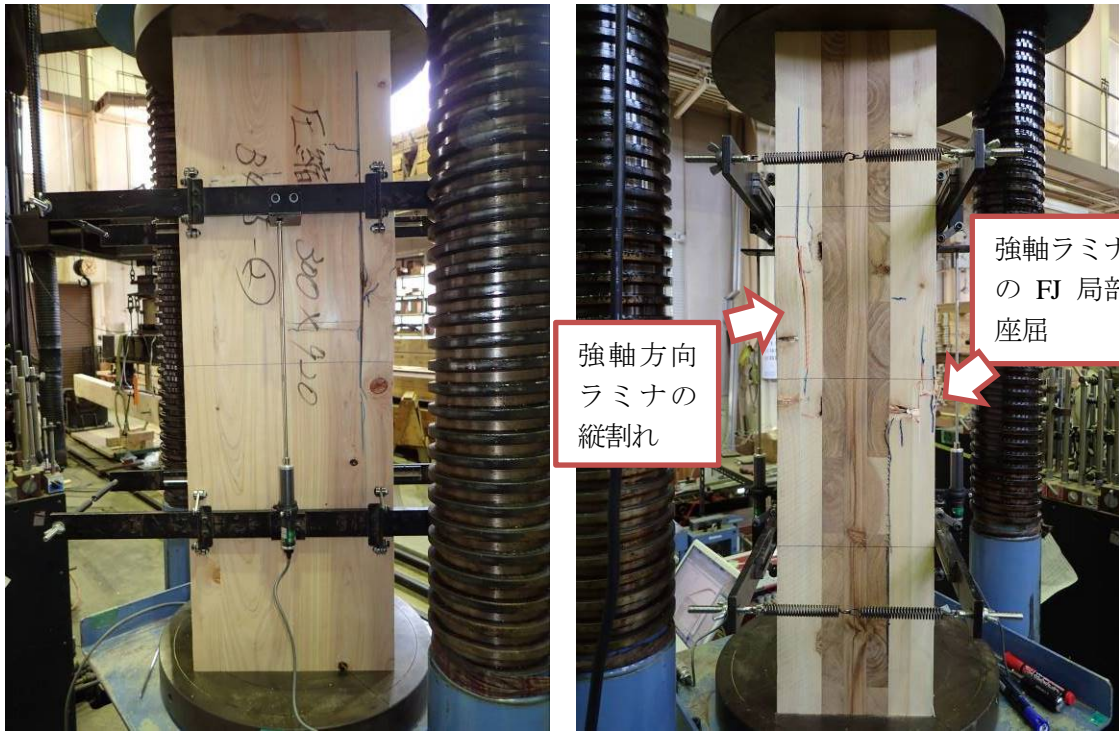


写真 2.4-9 5層7プライ強軸の破壊形態の例（左：幅面、右：側面）

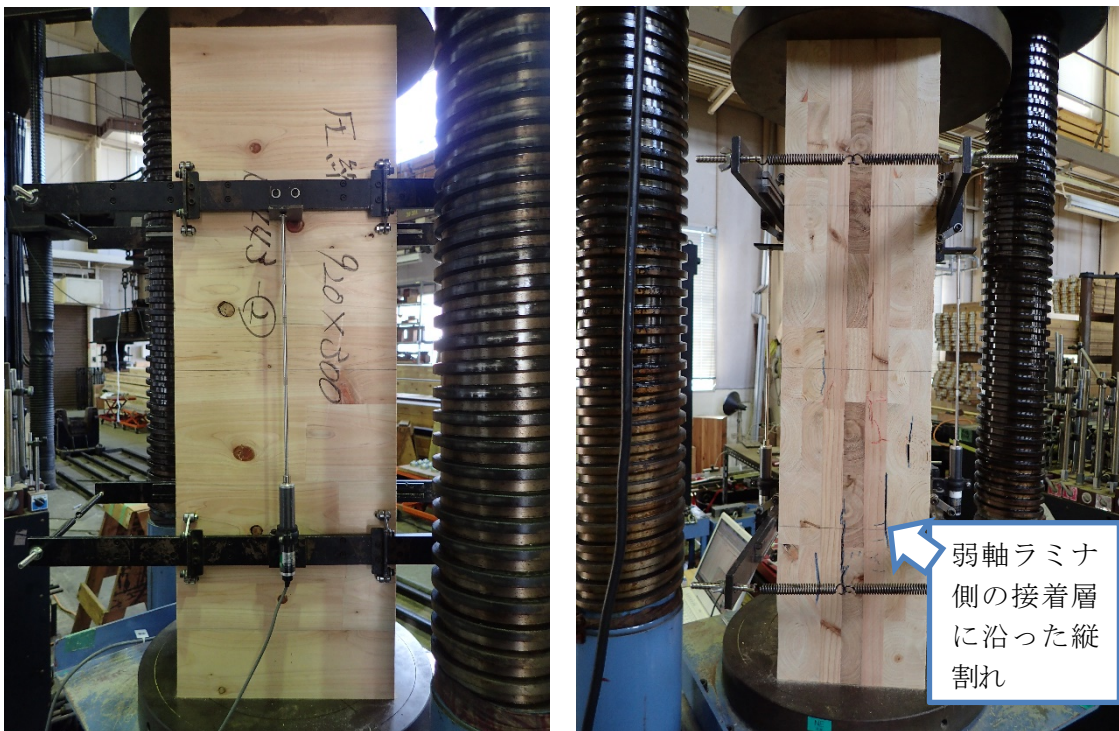


写真 2.4-10 5層7プライ弱軸の破壊形態の例（左：幅面、右：側面）



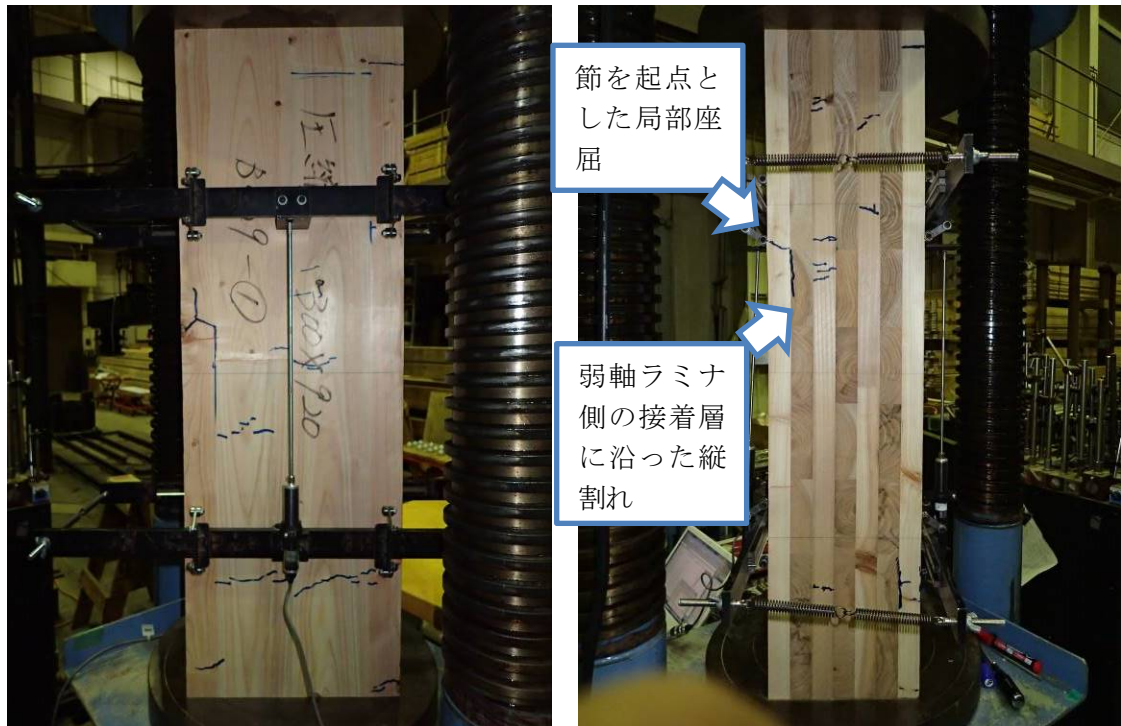


写真 2.4-11 7層7プライ強軸の破壊形態の例（左：幅面、右：側面）

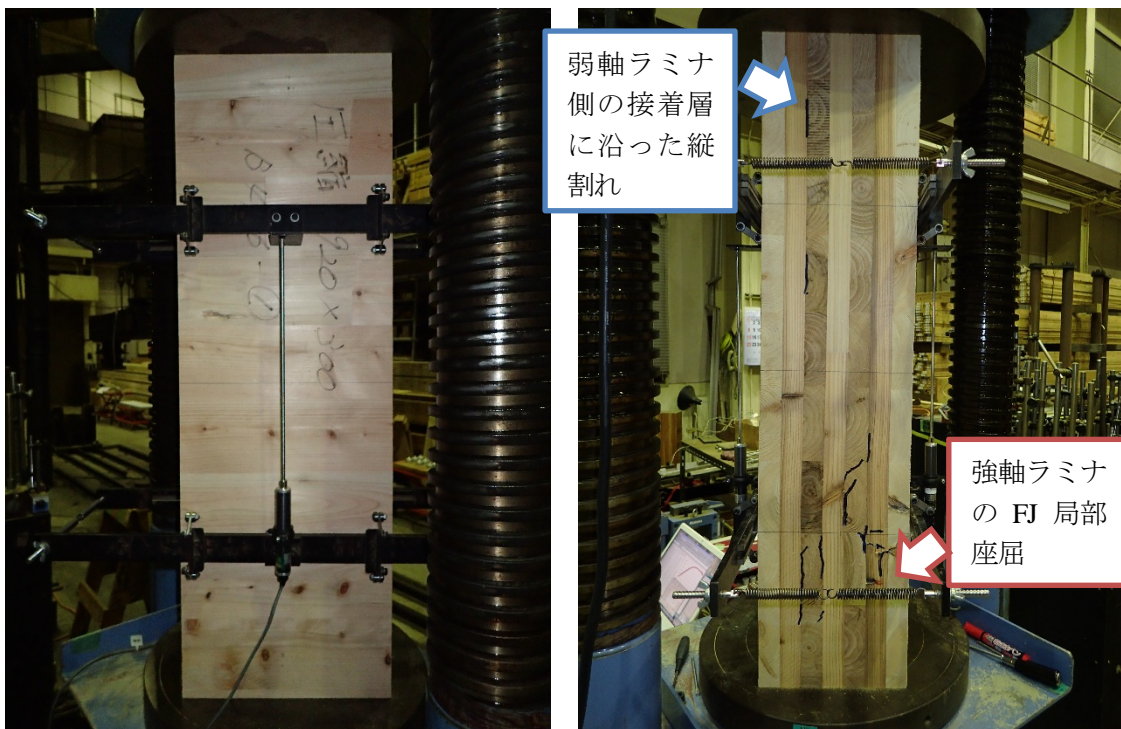


写真 2.4-12 7層7プライ弱軸の破壊形態の例（左：幅面、右：側面）

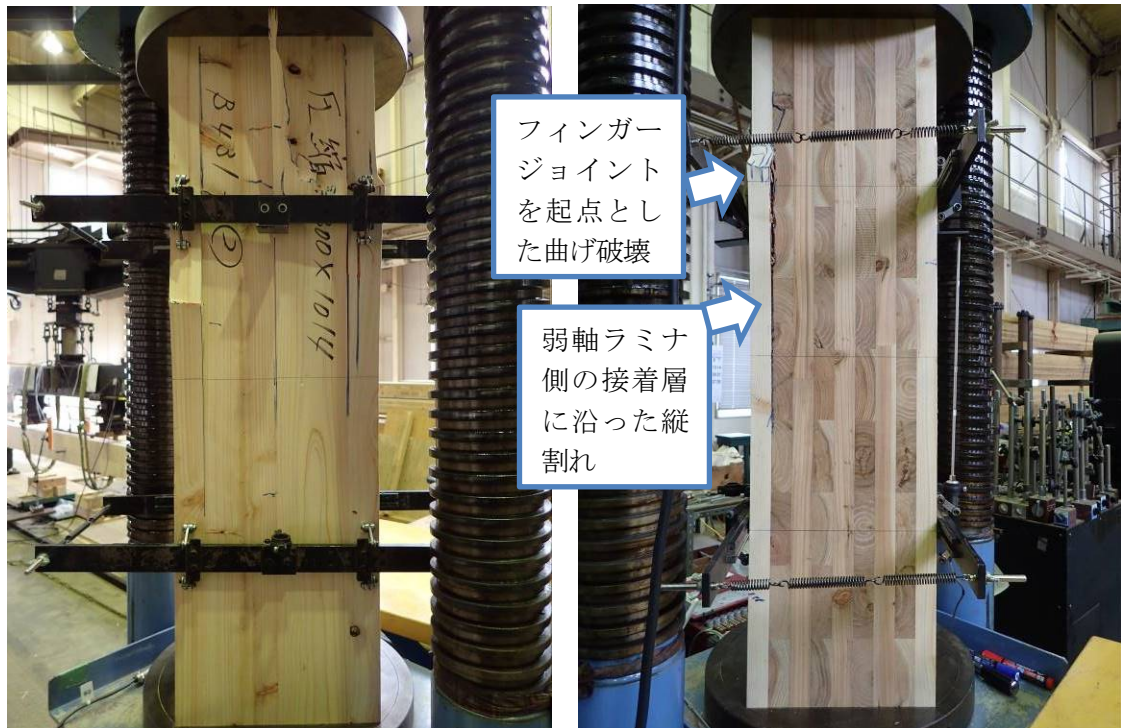


写真 2.4-13 9層9プライ強軸の破壊形態の例（左：幅面、右：側面）

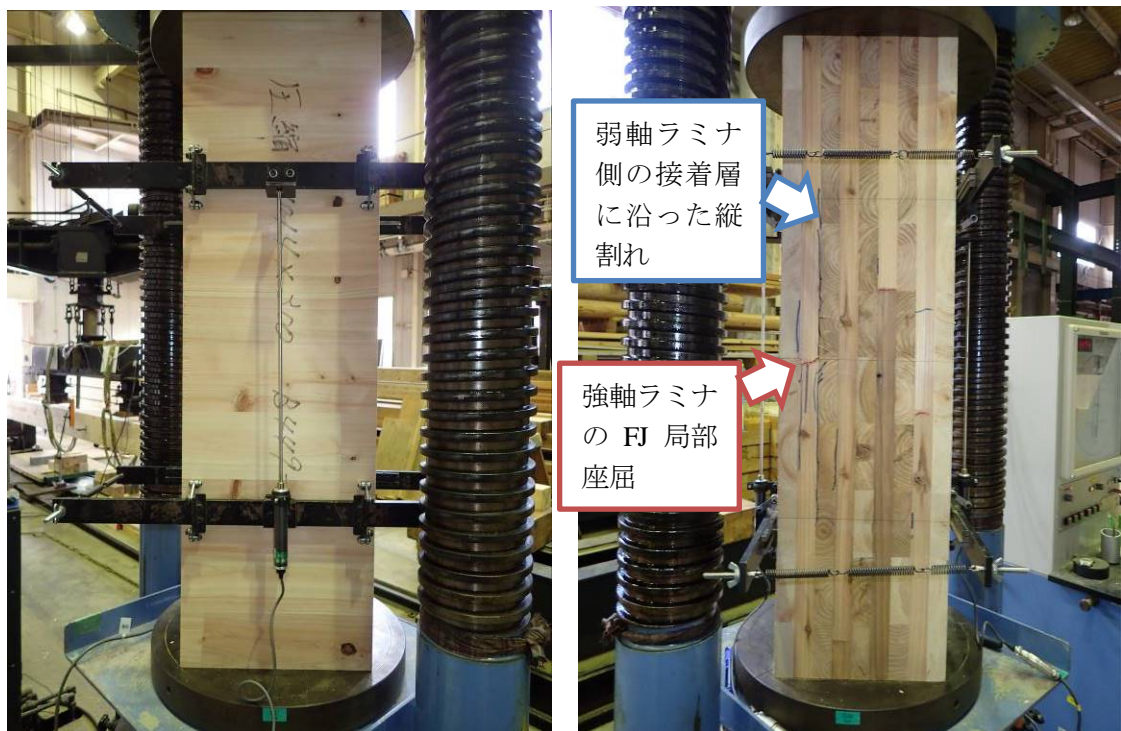


写真 2.4-14 9層9プライ弱軸の破壊形態の例（左：幅面、右：側面）



図 2.4-1 に縦振動によるヤング係数と圧縮試験によるヤング係数の比較結果を示す。圧縮試験によるヤング係数の方が若干ながら大きい値を示す傾向が看取される。図 2.4-2 に各試験体の強軸ラミナの比率と圧縮強度の関係を示す。3 層 4 プライ強軸と 3 層 4 プライ弱軸の差に表れているとおり、ヒノキとスギのグレードを考慮した補正の必要性があるが、断面内の強軸ラミナの比率が大きいほど、圧縮強度は大きくなる傾向が得られた。

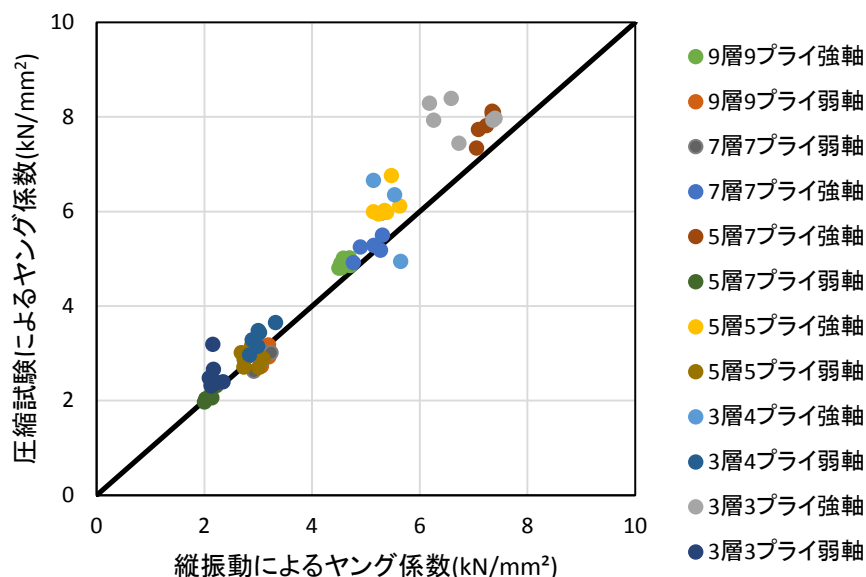


図 2.4-1 縦振動によるヤング係数と圧縮試験によるヤング係数を比較

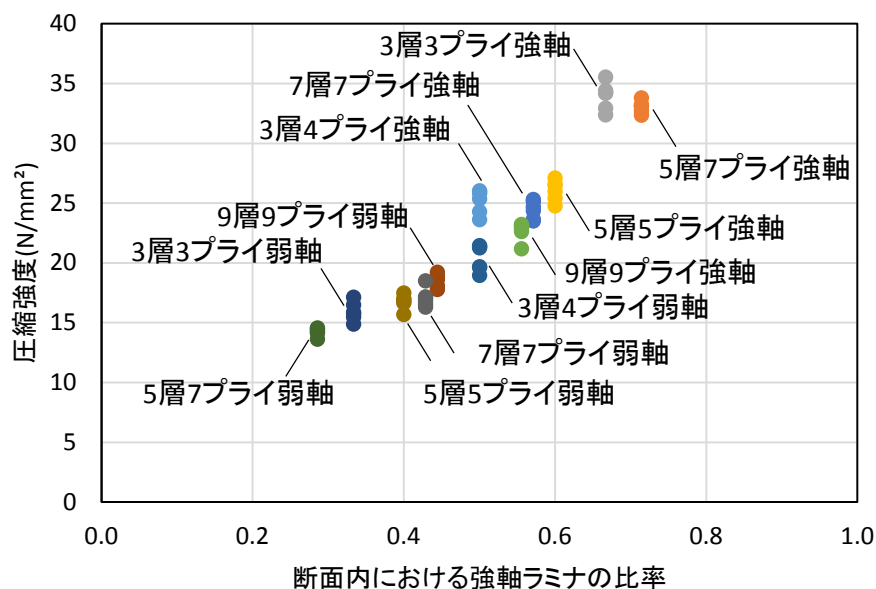


図 2.4-2 断面内における強軸ラミナの比率と圧縮強度の関係

#### 2.4.4 まとめ

構成が異なる 12 種類の CLT の非破壊試験および短柱圧縮試験を行った。縦振動によるヤング係数と圧縮試験によるヤング係数とはおおよそ一致した。構成の違いについて、断面内の強軸方向のラミナの存在割合が大きく、外層のヒノキラミナの割合が大きいほど、圧縮強度は大きくなる傾向にあった。



## 2.5 圧縮（中間柱・長柱）

### 2.5.1 試験方法

#### (1) 試験体

座屈試験に供した試験体の強度等級は、直交集成板の日本農林規格に定める Mx120-3-3、Mx120-3-4、Mx120-5-5、Mx120-5-7、Mx120-7-7、Mx120-9-9 の 6 種類とした。上記の 6 種類の強度等級に対して加力方向（試験体の長手方向）が、強軸方向となる試験体と弱軸方向となる試験体を用意し、試験に供した。試験体の諸元を表 2.5-1 に示す。なお、全ての試験体について、接着剤は水性高分子イソシアネート系接着剤（API）とし、ラミナの幅はぎは行っていない。また、試験体数は各仕様原則 6 体（仕様によっては 6 体以下の場合がある）とした。

表 2.5.1 試験体の諸元

試験体名 (強度等級)	寸法			細長比	
	長さ(mm)	幅(mm)	厚さ(mm)	強軸	弱軸
Mx120-3-3	3000	300	90	115.5 (96.1)	115.5 (346.4)
Mx120-3-4	3000	300	120	96.6 (65.5)	96.6 (173.2)
Mx120-5-5	3000	300	150	69.3 (60.3)	69.3 (96.1)
Mx120-5-7	3000	300	210	49.5 (43.5)	49.5 (96.1)
Mx120-7-7	3000	300	210	49.5 (44.4)	49.5 (60.3)
Mx120-9-9	3000	300	270	38.5 (40.8)	38.5 (44.4)

(注) 括弧内の値は有効断面積と有効断面二次モーメントを用いて求めた細長比である。

#### (2) 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する中心軸上の位置において、試験体に軸力を与え加力した。荷重速度は 1mm/min とし、試験体の頂部の鉛直変位と試験体の中央部の水平変位を測定した。また、繊維方向が鉛直方向（加力方向）と平行なラミナについては、その中央部と 4 等分点の歪みを測定した。加力は荷重が低下した時点をもって終了とした。写真 2.5-1 に座屈試験を行っている様子を示す。

一方、座屈試験を行う前に各試験体について、小荷重載荷により曲げ弾性係数を測定した。曲げ弾性係数を求めるための曲げ試験は、スパン 2800mm、中央集中により荷重を載荷し、中立軸上のたわみ量を測定した。



(a) 強軸方向



(b) 弱軸方向

写真 2.5-1 座屈試験の様子

## 2.5.2 結果

表 2.5-2 に試験結果を概要を示す。

表 2.5-2 座屈試験結果（平均値総括）

強度等級	加力方向	座屈荷重 測定値 (kN)	座屈荷重 計算値① (kN)	座屈荷重 計算値② (kN)
Mx120-5-5	強軸	861.3	834.7	908.5
	弱軸	201.0	168.5	176.3
MX120-5-7	強軸	1499.3	<u>2327.0</u>	<u>2049.4</u>
	弱軸	234.9	227.5	232.8
Mx120-7-7	強軸	1150.7	<u>1798.0</u>	<u>1452.2</u>
	弱軸	528.7	562.5	553.3

(注) 計算値①はオイラーの座屈荷重式によって計算した値、計算値②は有効細長比  $\lambda_{eff}=30$  から  $\lambda_{eff}=100$  を直線補完した値。

## 2.5.3 考察

### (1) 平成 13 年国交省告示第 1024 号第 2 の二のイにおける座屈の材料強度

平成 13 年国交省告示第 1024 号第 2 の二のイにおける圧縮材の座屈の材料強度は、有効細長比 ( $\lambda$ ) に応じて、表 2.5-3 のように定められている。

表 2.5-3 圧縮材の座屈の材料強度

有効細長比	圧縮材の座屈の材料強度 (N/mm <sup>2</sup> )
$\lambda \leq 30$ の場合	$F_C$
$30 < \lambda \leq 100$ の場合	$(1.3 - 0.01\lambda)F_C$
$100 < \lambda$ の場合	$\frac{3000}{\lambda^2} F_C$

(注)  $\lambda$  : 有効細長比

$F_C$ : 圧縮の基準強度

#### ① $100 < \lambda$ の場合の座屈の材料強度

$100 < \lambda$  の場合の座屈の材料強度  $\sigma_{cb} = \frac{3000}{\lambda^2} F_C$  は、オイラーの座屈荷重式より誘導されている。

オイラーの座屈荷重式は式 2.5-1 による。

$$P_{CB} = \frac{\pi^2 EI}{l^2} \quad \text{----- (式 2.5-1)}$$

ここで、  
 $E$ : 曲げ弾性係数  
 $I$ : 断面二次モーメント  
 $l$ : 座屈長さ

座屈強度は座屈荷重を部材の断面積で除した値になるので、式 2.5-2 となる。

$$\sigma_{cb} = \frac{P_{CB}}{A} = \frac{\pi^2 EI}{l^2 A} \quad \text{---- (式 2.5-2)}$$

ここで、 $A$ ：有効断面積

また、断面二次半径と細長比は式 2.5-3 と式 2.5-4 で表されるので、座屈強度は式 2.5-5 で表される。

$$\text{断面二次半径：} k = \sqrt{\frac{I_{eff}}{A}} \quad \text{---- (式 2.5-3)}$$

$$\text{細長比} \quad : \lambda = \frac{l}{k} \quad \text{---- (式 2.5-4)}$$

$$\text{座屈強度} \quad : \sigma_{cb} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \quad \text{---- (式 2.5-5)}$$

製材等（製材、集成材、単板積層材）については、圧縮強度と曲げ弾性係数との間に式 2.5-6 の関係があることが、過去の研究により知られているため、式 2.5-6 を式 2.5-5 に代入して、細長比が 100 より大きい場合の座屈強度の告示式（式 2.5-7）が得られている。

$$E \cong 300F_C \quad \text{---- (式 2.5-6)}$$

$$\sigma_{cb} = \frac{3000}{\lambda^2} F_C \quad \text{---- (式 2.5-7)}$$

## ② $\lambda \leq 30$ の場合の座屈の材料強度

$\lambda \leq 30$  の場合の座屈の材料強度は、材の圧縮の基準強度となる。

## ③ $30 < \lambda \leq 100$ の場合の座屈の材料強度

$30 \leq \lambda < 100$  の場合の座屈の材料強度は、 $(\lambda, \sigma_{cb}) = (30, F_C)$  と  $(\lambda, \sigma_{cb}) = (100, 0.3F_C)$

を直線回帰した値となる。

## （２）CLT の座屈の材料強度の算定

### ① $100 < \lambda$ の場合の座屈の材料強度

細長比  $100 < \lambda$  の場合の CLT の座屈の材料強度を求めるにあたっては、製材等（製材、集成材、単板積層材）について定めている圧縮強度と曲げ弾性係数との関係（式 2.5-6）が必ずしも成り立つとは言えないので、オイラーの座屈荷重式（式 2.6-1）を用いるのが適当と考えられる。ちなみに、CLT に対して行った曲げ試験の結果からは、 $E \cong 200F_C$  という結果も得られている。

オイラーの座屈荷重式（式 2.5-1）を CLT に適用するにあたっては、以下に記すように幾つか検討すべき事項がある。

イ)  $EI$  には、有効曲げ剛性を用いることが妥当か

ロ) 断面二次半径を求める際の  $A$  と  $I$  には、有効断面積と有効断面二次モーメントを用いる

ことが妥当か

②  $\lambda \leq 30$  の場合の座屈の材料強度

$\lambda \leq 30$  の場合の座屈の材料強度は、圧縮方向に対して繊維方向が平行なラミナのみが圧縮力を負担すると仮定して、部材の耐圧縮荷重を求め、これを全断面積で除した値とする。

③  $30 < \lambda \leq 100$  の場合の座屈の材料強度

$30 \leq \lambda < 100$  の場合の座屈の材料強度は、 $\lambda = 30$  のときの座屈の材料強度  $\sigma_{cb}$  と  $\lambda = 100$  のときの座屈の材料強度  $\sigma_{cb}$  を直線回帰した値とする。

(3) 座屈荷重の算定

実測した曲げ弾性係数の値を用いて各試験体について、座屈荷重を算出した結果を上記各表に示す。なお、座屈荷重を算定するにあたっては、 $EI$  は全断面有効として求めた曲げ弾性係数に全断面に対する断面二次モーメントを乗じた値を採用した。上記各表の計算値①は、細長比の違いによる場合分けを考慮せずに、上記の方法によって座屈荷重を求めたものである。

一方、上記各表の計算値②は、細長比の違いによる場合分けを考慮して計算した値である。なお、細長比（断面二次半径）を計算するにあたっては、有効断面積と有効断面二次モーメントを用いている。また、細長比が 30 以下の場合の圧縮耐力は、各ラミナの圧縮強度に当該ラミナの断面積を乗じて求めた各ラミナの圧縮耐力を加算した値としている。各ラミナの圧縮強度について、外装ラミナは機械等級区分による構造用製材のうち樹種スギの E110 の圧縮強度  $32.4 \text{ (N/mm}^2\text{)}$  と E130 の圧縮強度  $37.2 \text{ (N/mm}^2\text{)}$  を直線補完した値  $34.8 \text{ (N/mm}^2\text{)}$  を  $3/4$  で除した値  $46.4 \text{ (N/mm}^2\text{)}$  を用いている。また、内層ラミナは、機械等級区分による構造用製材に E30 の強度等級がないため、E70 と E50 を直線補完して外挿し、E30 の圧縮強度を求めた値  $15.0 \text{ (N/mm}^2\text{)}$   $3/4$  で除した値  $20.0 \text{ (N/mm}^2\text{)}$  を用いている。各試験体ともに、強軸方向のラミナのみ有効として圧縮耐力を算定している。

Mx120-5-7 の強軸と Mx7-7 の強軸を除き、座屈荷重の計算値②は座屈荷重の測定値と概ね同じ値となった。実験値と計算値②が異なっている Mx120-5-7 の強軸と Mx7-7 の強軸については、内層のスギラミナのうち直交方向に配置されたものに層内のせん断破壊が生じており（写真 2.5-2）、このことが座屈耐力の実測値が曲げ弾性係数から求めた座屈耐力よりも小さくなった一因と考えられるが、今後、要因については精査する必要がある。

座屈強度を求める方法を定めるにあたっては、曲げ弾性係数に直交集成板の日本農林規格に定める曲げヤング係数の平均値を用いるか、下限値を用いるか今後検討する必要がある。表 2.5-4 に直交集成板の日本農林規格の曲げヤング係数（平均値）を用いて計算した値として計算値③、直交集成板の日本農林規格の曲げヤング係数（下限値）を用いて計算した値として計算値④を占めす。平均値を用いて計算した座屈荷重は、せん断の影響が大きくなると考えられる Mx120-5-7 と Mx120-7-7 を除き、計算値よりも実験値が幾分大きくなったが、実験値と計算値は概ね同じ値であった。一方、下限値を用いて計算した座屈荷重についても、Mx120-5-7 と Mx120-7-7 を除き、計算値が実験値よりも小さくなり、安全側の評価となったが、計算により得られる値が過小評価となる可能性を有していた。



写真 2.5-2 Mx120-5-7 強軸の破壊形状

表 2.5-4 座屈荷重の推定結果（曲げ弾性係数の採用値の比較）

強度等級	座屈荷重 測定値 (kN)	座屈荷重 計算値③ (kN)	座屈荷重 計算④ (kN)
Mx120-5-5	861.3	874.6	798.1
MX120-5-7	1499.3	<u>2116.7</u>	<u>1925.9</u>
Mx120-7-7	1150.7	<u>1443.3</u>	<u>1313.4</u>

（注）計算値③は直交集成板の日本農林規格の曲げヤング係数（平均値）を用いて計算した値、計算値④は直交集成板の日本農林規格の曲げヤング係数（下限値）を用いて計算した値。

#### 2.5.4 まとめ

- ① Mx120-5-7 の強軸と Mx7-7 の強軸を除き、細長比の違いによる場合分けを考慮して計算した座屈荷重は、座屈荷重の測定値と概ね同じ値となった。
- ② 実験値と計算値が異なっている Mx120-5-7 の強軸と Mx7-7 の強軸については、内層のスギラミナのうち直交方向に配置されたものに層内のせん断破壊が生じており、このことが座屈耐力の実測値が曲げ弾性係数から求めた座屈耐力よりも小さくなった一因と考えられるが、今後、要因については精査する必要がある。
- ③ 座屈強度を求める方法を定めるにあたっては、曲げ弾性係数に直交集成板の日本農林規格に定める曲げヤング係数の平均値を用いるか、下限値を用いるか今後検討する必要がある。
- ④ 直交集成板の日本農林規格の曲げヤング係数の平均値を用いて計算した座屈荷重は、せん断の影響が大きくなると考えられる Mx120-5-7 と Mx120-7-7 を除き、計算値よりも実験値が幾分大きくなったが、実験値と計算値は概ね同じ値であった。
- ⑤ 直交集成板の日本農林規格の曲げヤング係数の下限値を用いて計算した座屈荷重についても、Mx120-5-7 と Mx120-7-7 を除き、計算値が実験値よりも小さくなり、安全側の評価となったが、計算により得られる値が過小評価となる可能性を有していた。

## 2.6 引張り

### 2.6.1 試験方法

本試験で使用した CLT の概要を表 2.6-1 に示す。CLT に使用したラミナは、外層がヒノキ M120A、内層がスギ M30A で構成されている。

引張り試験に先立ち、縦振動法によるヤング係数および面外・面内方向の T. G. H. 法（曲げたわみ振動法）による曲げヤング係数・せん断弾性係数を測定した。以上の非破壊測定は 2.3 項に示された面内曲げ試験体の測定方法と同様とした。すなわち、縦振動法は材端をプラスチック製のハンマーで打撃し、反対側の材端に近接したマイクロフォンにより 1 次の固有振動数を収録した。T. G. H. 法はプラスチック製のハンマーを用いて、材長の中央上部を打撃し、材端上部に設置した加速度ピックアップを用いて 1 次、3 次、5 次、7 次の固有振動数を測定した。支点の位置はそれぞれ材長の 0.224 倍（1 次）、0.094 倍（3～7 次）とした。縦振動法および T. G. H. 法による非破壊測定の様子を写真 2.6-1、2.6-2 に示す。

引張り試験には、最大容量が 2000kN の横型引張り試験機（前川試験機製作所製、HZS-200-LB4）を用いた。引張り試験時のスパンチャック間距離は 3000mm とした。相対する 2 材面に設置した変位計（東京測器研究所製、CDP-25）を取り付けたヨークを用いて 1000mm 当たりの伸びを測定した。チャックの移動速度は 7mm/min とした。5 層 5 プライ強軸試験体の引張り試験の様子を写真 2.6-3 に示す。試験終了後、破壊部近傍から長さが約 30mm 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。

表 2.6-1 本試験で用いた CLT の概要

層構成	外層の方向	寸法 mm (h×b×L)	試験体数	T. G. H. 面外	T. G. H. 面内
3 層 3 プライ	強軸	90×300×5500	6	○	○
	弱軸	90×300×5500	6	×	○
3 層 4 プライ	強軸	120×300×6000	6	○	○
	弱軸	120×300×6000	6	×	○
5 層 5 プライ	強軸	150×300×6000	6	○	○
	弱軸	150×300×6000	6	○	○

注：h は試験体の厚さ（積層方向）、b は試験体の幅、L は試験体の長さ。

試験体の長さ方向と外層ラミナの繊維方向が平行なものを強軸、直交なものを弱軸とする。

積層面と加力方向が直交するものを面外、平行するものを面内とする。

T. G. H. 法について、○は測定できた、×は測定できなかった。



写真 2.6-1 縦振動法による非破壊測定の様子



写真 2.6-2 T.G.H.法による非破壊測定の様子



写真 2.6-3 5層5プライ強軸試験体の引張り試験の様子

## 2.6.2 結果

### (1) 非破壊試験

表 2.6-2 非破壊試験の結果 (3層3プライ強軸)

3層3プライ強軸		E 縦振動 (kN/mm <sup>2</sup> )	たわみ振動法 (kN/mm <sup>2</sup> )		たわみ振動法 (kN/mm <sup>2</sup> )	
番号	密度 (kg/m <sup>3</sup> )		E (面外)	G (面外)	E (面内)	G (面内)
3-3-Ma-B401-1	455	8.85	11.9	0.253	8.46	0.899
3-3-Ma-B401-2	469	8.57	12.1	0.254	8.71	0.950
3-3-Ma-B402-1	467	8.72	12.0	0.254	8.69	0.979
3-3-Ma-B402-2	461	8.22	11.2	0.284	8.17	0.961
3-3-Ma-B403-1	461	8.69	12.0	0.243	8.65	1.03
3-3-Ma-B403-2	456	8.59	11.9	0.254	8.47	0.899
平均	461	8.61	11.8	0.257	8.52	0.953

最大	469	8.85	12.1	0.284	8.71	1.03
最小	455	8.22	11.2	0.243	8.17	0.899
標準偏差	5.42	0.212	0.344	0.0138	0.207	0.0504
変動係数%	1.18	2.47	2.90	5.37	2.43	5.28

表 2.6-3 非破壊試験の結果（3 層 3 プライ弱軸）

3 層 3 プライ弱軸		E 縦振動 (kN/mm <sup>2</sup> )	たわみ振動法 (kN/mm <sup>2</sup> )		たわみ振動法 (kN/mm <sup>2</sup> )	
番号	密度 (kg/m <sup>3</sup> )		E (面外)	G (面外)	E (面内)	G (面内)
3-3-Mi-B433-1	456	2.68	-	-	2.72	0.736
3-3-Mi-B433-2	463	2.77	-	-	2.67	0.758
3-3-Mi-B434-1	463	2.80	-	-	2.64	0.884
3-3-Mi-B434-2	467	2.71	-	-	2.59	0.775
3-3-Mi-B435-1	483	2.62	-	-	2.57	0.876
3-3-Mi-B435-2	474	2.75	-	-	2.88	0.798
平均	468	2.72	-	-	2.68	0.805
最大	483	2.80	-	-	2.88	0.884
最小	456	2.62	-	-	2.57	0.736
標準偏差	9.68	0.0640	-	-	0.111	0.0618
変動係数%	2.07	2.35	-	-	4.16	7.68

表 2.6-4 非破壊試験の結果（3 層 4 プライ強軸）

3 層 4 プライ強軸		E 縦振動 (kN/mm <sup>2</sup> )	たわみ振動法 (kN/mm <sup>2</sup> )		たわみ振動法 (kN/mm <sup>2</sup> )	
番号	密度 (kg/m <sup>3</sup> )		E (面外)	G (面外)	E (面内)	G (面内)
3-4-Ma-B405-1	436	6.55	10.8	0.180	6.32	0.847
3-4-Ma-B405-2	437	6.85	11.1	0.183	6.67	0.748
3-4-Ma-B406-1	442	6.87	11.2	0.179	6.69	0.756
3-4-Ma-B406-2	446	6.45	11.0	0.175	6.06	0.896
3-4-Ma-B407-1	445	6.44	10.9	0.180	6.74	0.847
3-4-Ma-B407-2	445	6.56	10.6	0.180	6.44	0.876
平均	442	6.62	10.9	0.179	6.49	0.828
最大	446	6.87	11.2	0.183	6.74	0.896
最小	436	6.44	10.6	0.175	6.06	0.748
標準偏差	4.47	0.191	0.213	0.00238	0.265	0.0620
変動係数%	1.01	2.88	1.96	1.33	4.09	7.49

表 2.6-5 非破壊試験の結果（3 層 4 プライ弱軸）

3 層 4 プライ弱軸		E 縦振動 (kN/mm <sup>2</sup> )	たわみ振動法 (kN/mm <sup>2</sup> )		たわみ振動法 (kN/mm <sup>2</sup> )	
番号	密度 (kg/m <sup>3</sup> )		E (面外)	G (面外)	E (面内)	G (面内)
3-4-Mi-B436-1	436	3.64	-	-	3.66	0.789
3-4-Mi-B436-2	444	3.83	-	-	3.87	0.882
3-4-Mi-B437-1	429	3.75	-	-	3.57	0.756
3-4-Mi-B437-2	436	3.69	-	-	3.64	0.812
3-4-Mi-B438-1	444	3.91	-	-	3.82	0.776



3-4-Mi-B438-2	430	3.47	-	-	3.47	0.767
平均	436	3.71	-	-	3.67	0.797
最大	444	3.91	-	-	3.87	0.882
最小	429	3.47	-	-	3.47	0.756
標準偏差	6.47	0.156	-	-	0.152	0.0460
変動係数%	1.48	4.19	-	-	4.14	5.77

表 2.6-6 非破壊試験の結果（5 層 5 プライ強軸）

5 層 5 プライ強軸		E 縦振動 (kN/mm <sup>2</sup> )	たわみ振動法 (kN/mm <sup>2</sup> )		たわみ振動法 (kN/mm <sup>2</sup> )	
番号	密度 (kg/m <sup>3</sup> )		E (面外)	G (面外)	E (面内)	G (面内)
5-5-Ma-B409-1	433	6.53	10.1	0.243	6.21	0.928
5-5-Ma-B409-2	434	6.56	10.0	0.256	6.55	0.870
5-5-Ma-B410-1	434	6.54	10.1	0.243	6.59	0.847
5-5-Ma-B410-2	437	6.83	9.80	0.252	6.60	0.846
5-5-Ma-B411-1	442	6.44	9.81	0.242	6.45	0.844
5-5-Ma-B411-2	435	6.74	10.2	0.238	6.66	0.854
平均	436	6.61	10.0	0.246	6.51	0.865
最大	442	6.83	10.2	0.256	6.66	0.928
最小	433	6.44	9.80	0.238	6.21	0.844
標準偏差	3.31	0.147	0.175	0.00661	0.161	0.0323
変動係数%	0.760	2.23	1.75	2.69	2.47	3.74

表 2.6-7 非破壊試験の結果（5 層 5 プライ弱軸）

5 層 5 プライ弱軸		E 縦振動 (kN/mm <sup>2</sup> )	たわみ振動法 (kN/mm <sup>2</sup> )		たわみ振動法 (kN/mm <sup>2</sup> )	
番号	密度 (kg/m <sup>3</sup> )		E (面外)	G (面外)	E (面内)	G (面内)
5-5-Mi-439-1	432	3.02	1.79	0.185	2.92	0.962
5-5-Mi-439-2	428	3.14	1.78	0.194	2.99	0.885
5-5-Mi-440-1	436	3.26	1.83	0.200	3.22	0.775
5-5-Mi-440-2	429	3.08	1.77	0.215	2.88	0.904
5-5-Mi-441-1	436	3.25	1.85	0.221	3.09	0.972
5-5-Mi-441-2	438	3.21	1.82	0.189	3.07	0.878
平均	433	3.16	1.81	0.201	3.03	0.896
最大	438	3.26	1.85	0.221	3.22	0.972
最小	428	3.02	1.77	0.185	2.88	0.775
標準偏差	4.08	0.0972	0.0321	0.0147	0.122	0.0711
変動係数%	0.943	3.08	1.78	7.31	4.04	7.94

## （2）破壊試験

表 2.6-8 引張り試験の結果（3 層 3 プライ強軸）

3 層 3 プライ強軸				
番号	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	比例限度応力 (N/mm <sup>2</sup> )	強度 (N/mm <sup>2</sup> )	含水率 (%)
3-3-Ma-B401-1	8.74	21.8	24.0	9.55

3-3-Ma-B401-2	8.10	14.0	17.2	9.81
3-3-Ma-B402-1	8.40	15.2	18.2	10.5
3-3-Ma-B402-2	7.11	20.1	21.2	10.5
3-3-Ma-B403-1	8.18	22.5	22.5	9.66
3-3-Ma-B403-2	8.54	20.1	20.1	10.2
平均	8.18	19.0	20.5	10.0
最大	8.74	22.5	24.0	10.5
最小	7.11	14.0	17.2	9.55
標準偏差	0.571	3.55	2.60	0.414
変動係数%	6.98	18.7	12.7	4.13

表 2.6-9 引張り試験の結果 (3 層 3 プライ弱軸)

3 層 3 プライ弱軸				
番号	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	比例限度応力 (N/mm <sup>2</sup> )	引張り強度 (N/mm <sup>2</sup> )	含水率 (%)
3-3-Mi-B433-1	2.29	4.95	5.05	8.96
3-3-Mi-B433-2	2.37	5.93	5.93	8.49
3-3-Mi-B434-1	2.18	5.65	5.65	9.97
3-3-Mi-B434-2	2.82	4.08	5.96	8.74
3-3-Mi-B435-1	2.09	7.61	7.61	10.6
3-3-Mi-B435-2	2.42	6.51	6.63	9.71
平均	2.36	5.79	6.14	9.41
最大	2.82	7.61	7.61	10.6
最小	2.09	4.08	5.05	8.49
標準偏差	0.256	1.22	0.883	0.818
変動係数%	10.9	21.1	14.4	8.69

表 2.6-10 引張り試験の結果 (3 層 4 プライ強軸)

3 層 4 プライ強軸				
番号	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	比例限度応力 (N/mm <sup>2</sup> )	引張り強度 (N/mm <sup>2</sup> )	含水率 (%)
3-4-Ma-B405-1	6.33	15.7	15.9	9.35
3-4-Ma-B405-2	6.46	15.9	18.1	10.5
3-4-Ma-B406-1	6.45	15.8	17.4	10.5
3-4-Ma-B406-2	6.30	16.0	16.0	9.88
3-4-Ma-B407-1	6.30	16.1	16.2	9.62
3-4-Ma-B407-2	5.75	14.3	15.7	10.1
平均	6.26	15.6	16.6	9.98
最大	6.46	16.1	18.1	10.5
最小	5.75	14.3	15.7	9.35
標準偏差	0.261	0.646	0.960	0.454
変動係数%	4.16	4.14	5.80	4.55

表 2.6-11 引張り試験の結果 (3 層 4 プライ弱軸)

3 層 4 プライ弱軸				
番号	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	比例限度応力 (N/mm <sup>2</sup> )	引張り強度 (N/mm <sup>2</sup> )	含水率 (%)
3-4-Mi-B436-1	3.29	6.49	9.79	9.25
3-4-Mi-B436-2	3.41	9.38	10.2	9.13
3-4-Mi-B437-1	3.60	8.95	8.95	8.91
3-4-Mi-B437-2	3.39	9.30	9.30	9.96
3-4-Mi-B438-1	3.75	7.53	7.72	9.21
3-4-Mi-B438-2	3.14	8.70	8.77	9.01
平均	3.43	8.39	9.12	9.24
最大	3.75	9.38	10.2	10.0
最小	3.14	6.49	7.72	8.91
標準偏差	0.218	1.15	0.863	0.372
変動係数%	6.36	13.7	9.47	4.02

表 2.6-12 引張り試験の結果 (5 層 5 プライ強軸)

5 層 5 プライ強軸				
番号	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	比例限度応力 (N/mm <sup>2</sup> )	引張り強度 (N/mm <sup>2</sup> )	含水率 (%)
5-5-Ma-B409-1	5.98	16.2	16.4	9.99
5-5-Ma-B409-2	5.76	15.0	15.1	10.6
5-5-Ma-B410-1	5.94	6.22	15.6	10.7
5-5-Ma-B410-2	6.51	18.1	18.2	10.3
5-5-Ma-B411-1	5.88	11.5	16.0	9.48
5-5-Ma-B411-2	6.31	16.6	16.6	9.72
平均	6.06	13.9	16.3	10.1
最大	6.51	18.1	18.2	10.7
最小	5.76	6.22	15.1	9.48
標準偏差	0.283	4.38	1.07	0.489
変動係数%	4.67	31.4	6.59	4.83

注：5-5-Ma-B410-1 は試験中の振動により変位計の 1 つが外れたため、比例限度応力が他の試験体に比べて小さくなっている。

表 2.6-13 引張り試験の結果 (5 層 5 プライ弱軸)

5 層 5 プライ弱軸				
番号	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	比例限度応力 (N/mm <sup>2</sup> )	引張り強度 (N/mm <sup>2</sup> )	含水率 (%)
5-5-Mi-B439-1	2.69	7.73	7.79	8.98
5-5-Mi-B439-2	2.76	5.61	5.67	9.13
5-5-Mi-B440-1	2.87	5.25	8.84	9.89
5-5-Mi-B440-2	2.75	4.95	8.27	9.20
5-5-Mi-B441-1	2.86	8.40	8.40	9.28

5-5-Mi-B441-2	2.89	8.18	8.24	9.01
平均	2.80	6.69	7.87	9.25
最大	2.89	8.40	8.84	9.89
最小	2.69	4.95	5.67	8.98
標準偏差	0.0792	1.58	1.13	0.334
変動係数%	2.82	23.7	14.4	3.61

### 2.6.3 考察

非破壊試験の結果を表 2.6-2～2.6-7 に示す。面外方向での T.G.H.法による測定について、3 層 3 プライ弱軸および 3 層 4 プライ弱軸の試験体はピークの判別が困難であったため、T.G.H.法によるヤング係数とせん断弾性係数の算出ができなかった。縦振動法によるヤング係数と面外方向および面内方向の T.G.H.法によるヤング係数との関係を図 2.6-1 に示す。また、3.2 項で行った幅影響・5 層 5 プライ強軸 b300 試験体と、構成影響・5 層 5 プライ強軸試験体とは実質的には同じ寸法・構成となるため、図 2.6-1 中では両者を併せて (12 体) プロットしている。縦振動法によるヤング係数と面外方向の T.G.H.法によるヤング係数とを比較すると、強軸の試験体で T.G.H.法によるヤング係数が縦振動法によるヤング係数よりも大きな値となった。縦振動法によるヤング係数は材料の平均的なヤング係数を示すのに対して、面外方向の曲げたわみ振動では外層の影響が大きく出たためと考えられる。一方、弱軸の試験体は 5 層 5 プライ試験体の結果しかないが、縦振動法によるヤング係数の方が T.G.H.法によるヤング係数よりも大きい結果となった。また、縦振動法によるヤング係数と面内方向の T.G.H.法によるヤング係数の両ヤング係数は、ほぼ同等の値となった。面内方向の曲げたわみ振動では振動方向に対して強軸と弱軸とが平行に並列しているため、縦振動法によるヤング係数に近い値となったと考えられる。

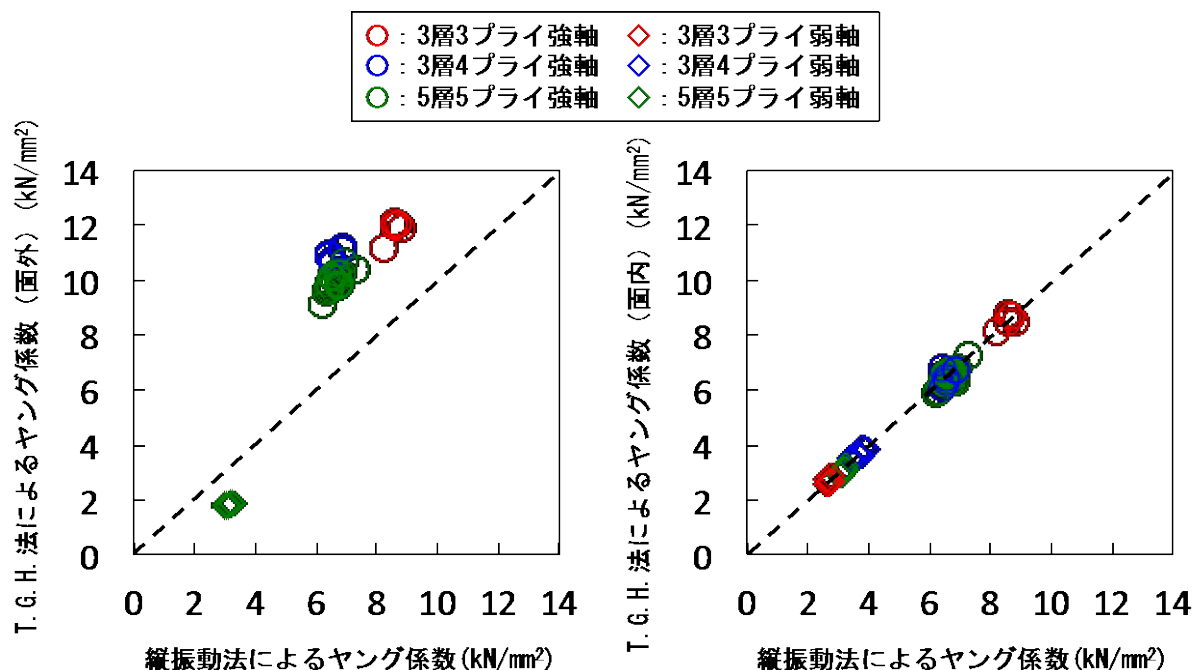


図 2.6-1 縦振動法によるヤング係数と面外・面内方向の T.G.H.法によるヤング係数との関係

引張り試験の結果を表 2.6-8～2.6-13 に示すとともに、各構成の引張り試験後の破壊形態の例を写真 2.6-4～2.6-15 に示す。強軸の試験体では、外層に存在するいくつかのフィンガージョイントが破壊するなど、破壊は試験体長さ方向に広い範囲に渡った。一方、弱軸の試験体では、内層に存在する強軸

の試験体の破壊が大きく長さ方向に渡ることはなく、内層の1つの破壊したフィンガージョイントの隣接部分で破壊が見られ、試験体全体としては短い範囲で切れたような破壊形態が特徴的であった。



写真 2.6-4 3層3プライ強軸の破壊形態の例

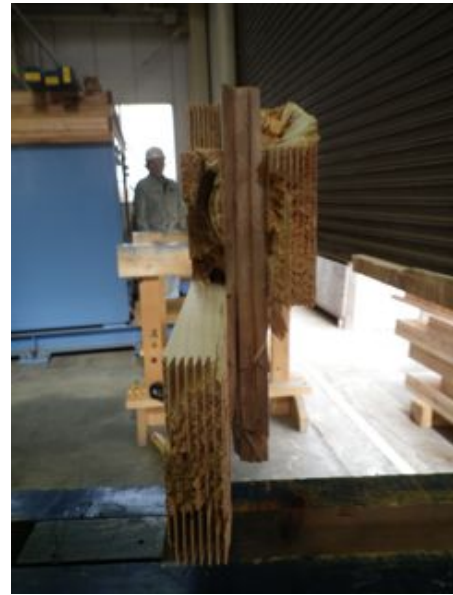


写真 2.6-5 3層3プライ強軸の破壊形態の例



写真 2.6-6 3層3プライ弱軸の破壊形態の例

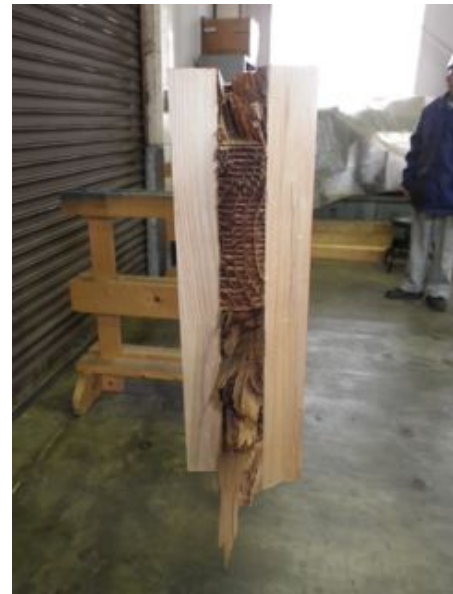


写真 2.6-7 3層3プライ弱軸の破壊形態の例



写真 2.6-8 3層4プライ強軸の破壊形態の例



写真 2.6-9 3層4プライ強軸の破壊形態の例



写真 2.6-10 3層4プライ弱軸の破壊形態の例



写真 2.6-11 3層4プライ弱軸の破壊形態の例





写真 2.6-12 5層5プライ強軸の破壊形態の例



写真 2.6-13 5層5プライ強軸の破壊形態の例



写真 2.6-14 5層5プライ強軸の破壊形態の例



写真 2.6-15 5層5プライ弱軸の破壊形態の例

構成と縦引張り強度との関係を図 2.6-2 に示す。横軸は断面内での強軸方向のラミナの存在割合が大きい順に並べてある。ただし、強軸・弱軸とも断面内の強軸方向のラミナの存在割合が等しい3層4プライ試験体は、強軸、弱軸の順とした。また、3.2項で行った幅影響・5層5プライ強軸 b300 試験体と、構成影響・5層5プライ強軸試験体とは実質的には同じ寸法・構成となるため、図 2.6-2 中では両者を併せて（12体）プロットしている。グラフから、断面内の強軸方向のラミナの存在割合が大きく、かつ、外層に存在する強軸ラミナ（M120A）の割合が大きいほど、引張り強度は大きくなる傾向が見られた。

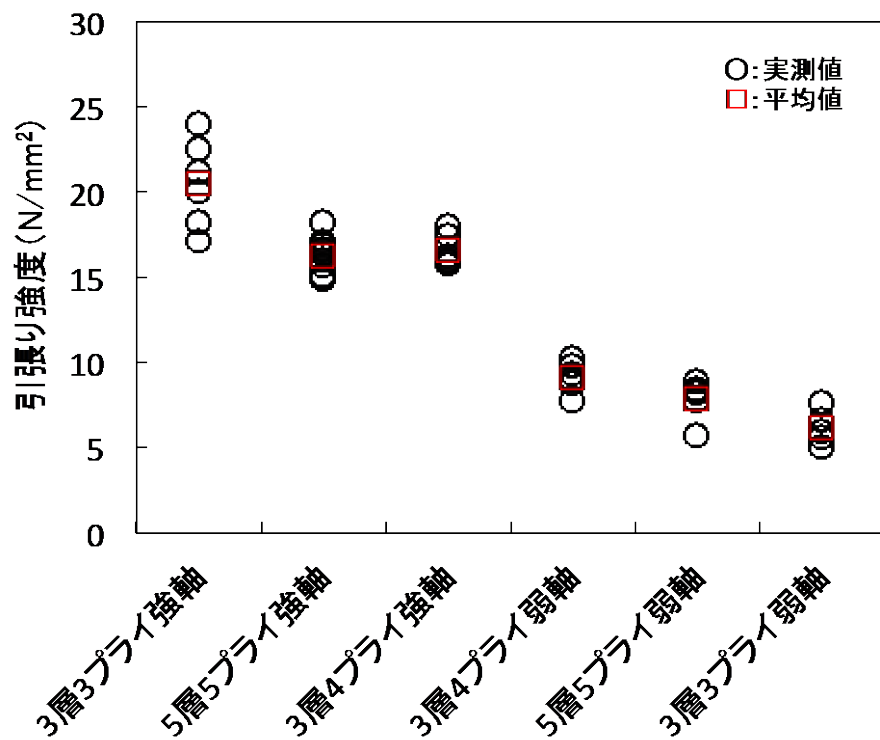


図 2.6-2 構成と引張り強度との関係

#### 2.6.4 まとめ

構成が異なる 6 種類の CLT の非破壊試験および引張り試験を行った。

非破壊試験の結果、面外方向のヤング係数と縦振動法によるヤング係数とを比較すると、強軸の試験体で T.G.H.法によるヤング係数が縦振動法によるヤング係数よりも大きな値となり、弱軸の試験体では逆の結果となった。面内方向のヤング係数と縦振動法によるヤング係数とを比較すると、T.G.H.法によるヤング係数と縦振動法によるヤング係数は、ほぼ同等の値となった。

引張り試験の結果、構成の違いについて、断面内の強軸方向のラミナの存在割合が大きく、かつ、外層に存在する強軸ラミナ（M120A）の割合が大きいほど、引張り強度は大きい傾向にあった。



## 2.7 面内せん断

### 2.7.1 試験方法

#### (1) 試験体概要

CLT パネルの面内せん断性能の把握を目的とするため、試験体は図 2.7.1 に示すような工形とした。ラミナ厚は 30mm、ラミナ幅は 102mm、ラミナの樹種は、最外層がヒノキ、内層はスギ、ラミナの強度等級はヒノキが M120 の A 種、スギが M30 の A 種である。パネル厚は、150mm (30mm×5 Ply)、120mm (30mm×4 Ply)、90mm (30mm×3 Ply) の 3 種類とし、最外層強軸方向と弱軸方向の各 1 体、合計 6 体である。接着剤には水性高分子イソシアネート系接着剤 (API) を用いている。幅はぎはしておらず、また任意の位置に縦継ぎを有する。

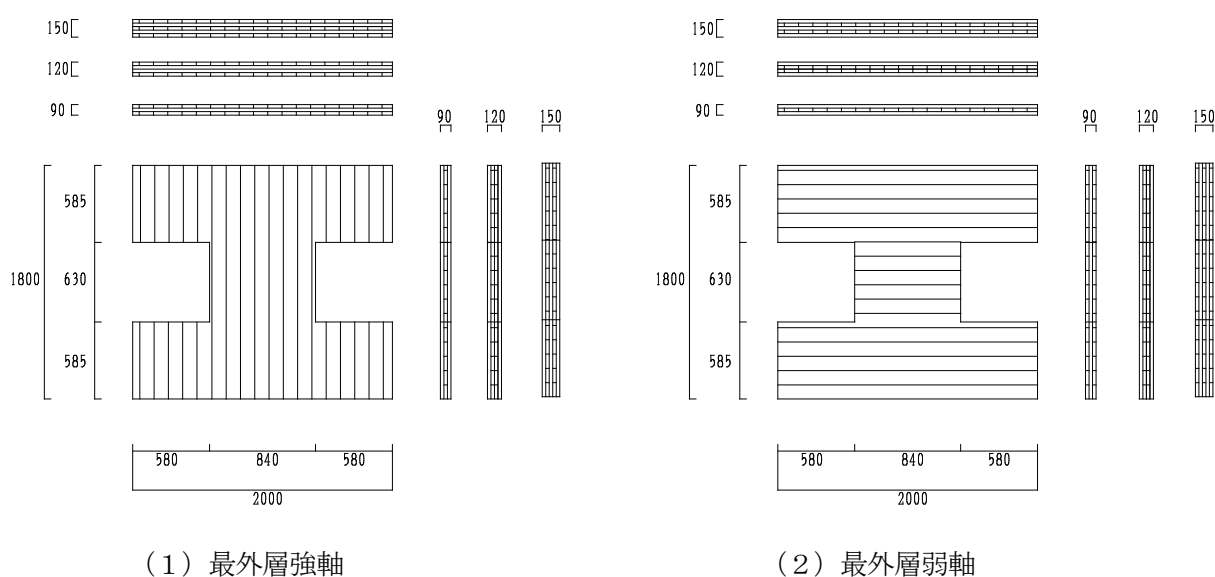


図 2.7.1 試験体図

表 2.7.1 試験体仕様

	層数	CLT 厚	ラミナ厚	ラミナ幅	最外層のラミナ方向	材料種別	層構成
150K	5 層 5Ply	150mm	30mm	102mm	鉛直	ヒノキ： M120A	最外層： ヒノキ
150J					水平		
120K	3 層 4Ply	120mm			鉛直		
120J					水平		
90K	3 層 3Ply	90mm			鉛直		
90J					水平		

## (2) 試験方法

図 2.7.2 及び写真 2.7.1 に試験装置を示す。試験体のくびれ部分にせん断力が加わるように加力を行った。試験体上部の油圧ジャッキは試験装置の重量を支持するためのもので、試験体に鉛直荷重は加えていない。加力は1方向単調载荷とした。



写真 2.7.1 加力の様子

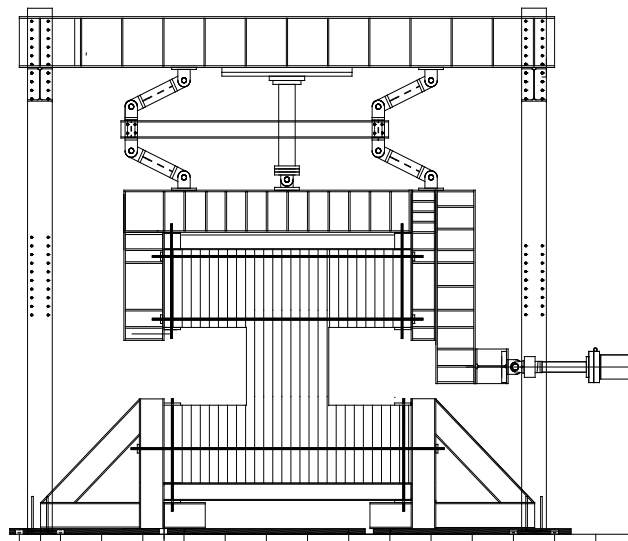


図 2.7.2 試験装置概要

### (3) 計測計画

油圧ジャッキに取り付けた荷重計により荷重を計測した。また試験体に取り付けた変位計により、試験体の浮き上がりやせん断変形を計測した。図 2.7.3 に計測位置図を示す。せん断変形は図 2.7.4 に示す方法で計測した。せん断変形の算出方法については、後述する。

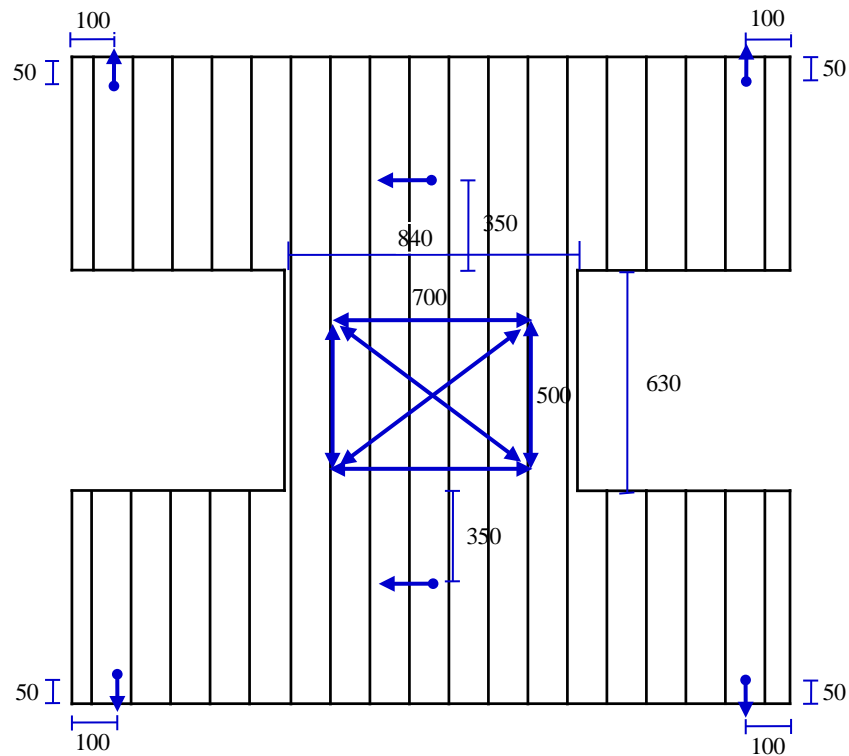


図 2.7.3 計測位置図 (← : 変位計位置)

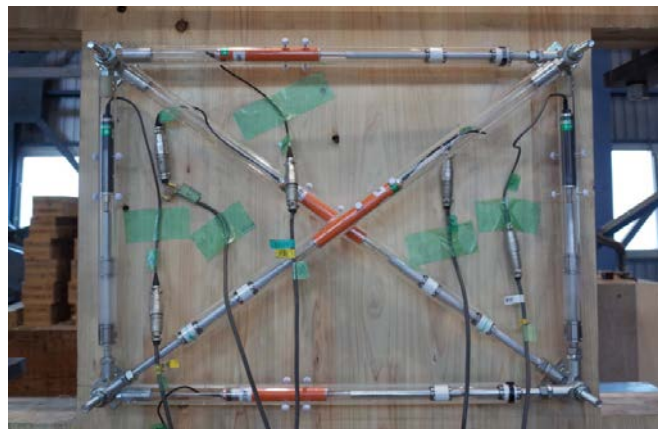


図 2.7.4 くびれ部分の計測方法

## 2.7.2 結果

### (1) 破壊性状

#### 1) 弱軸方向

3層 3Ply 試験体、3層 4Ply 試験体、5層 5Ply 試験体ともに、変形の進展に伴い、層間の接着界面付近での木部破壊が確認された。3層 4Ply 試験体では、内層 2Ply が一体となって挙動していた。3層 3Ply、3層 4Ply 試験体では、最外層上部のくびれ境界付近に「のみ亀裂が発生したが、5層 5Ply 試験体では、最外層ラミナ間でずれが確認された

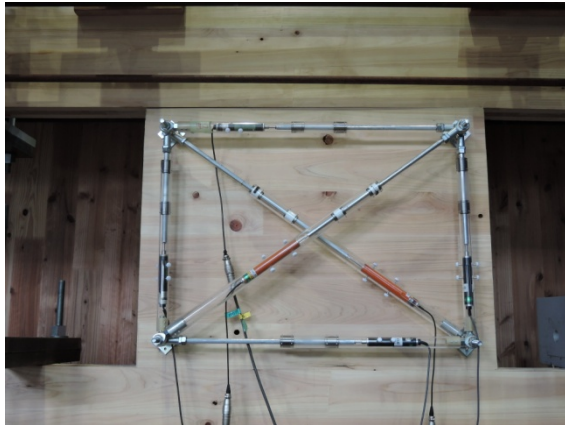


写真 2.7.1 90J 試験体の破壊性状

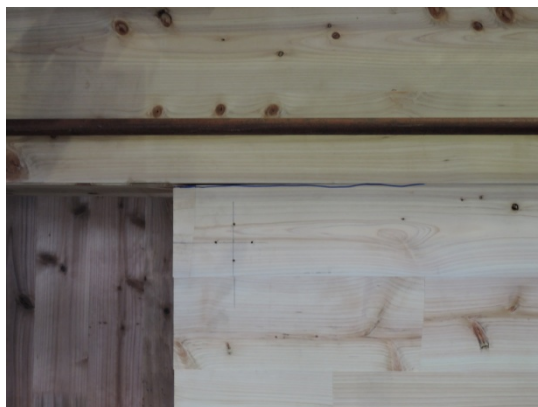
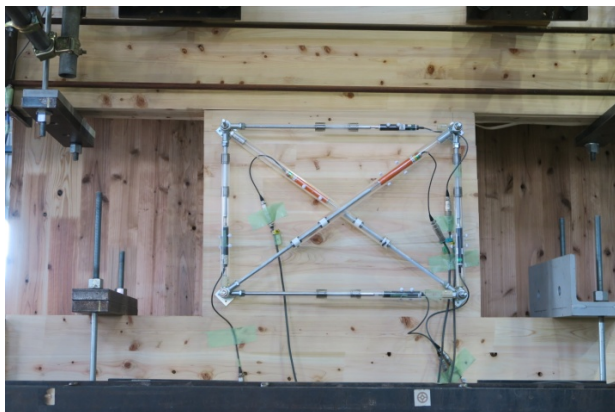


写真 2.7.2 120J 試験体の破壊性状





写真 2.7.3 150J 試験体の破壊性状

## 2) 強軸方向

3層 3Ply、5層 5Ply 試験体では、加力に平行な層と直交する層の間の接着界面で木部破壊が確認された。また加力する方向と平行な層は、同一層内のラミナ間でずれが生じていた。最外層のラミナには一部亀裂が観察された。3層 4Ply 試験体では、内層 2Ply が一体となって挙動していた。3層 3Ply、3層 4Ply 試験体では最外層に目だった亀裂は確認されなかったが、5層 5Ply 試験体では、最外層のラミナの面外方向へはらみが確認された。



写真 2.7.4 90K 試験体の破壊性状





写真 2.7.5 120K 試験体の破壊性状



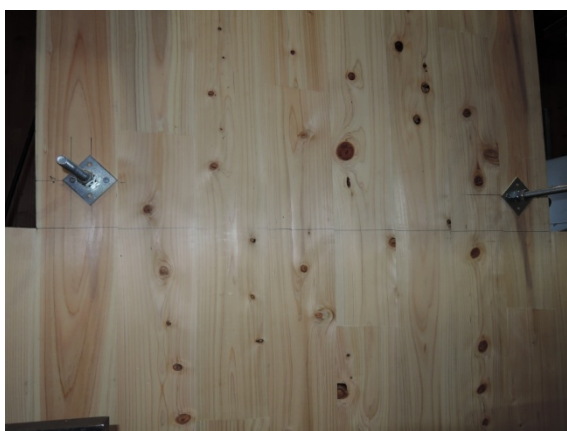
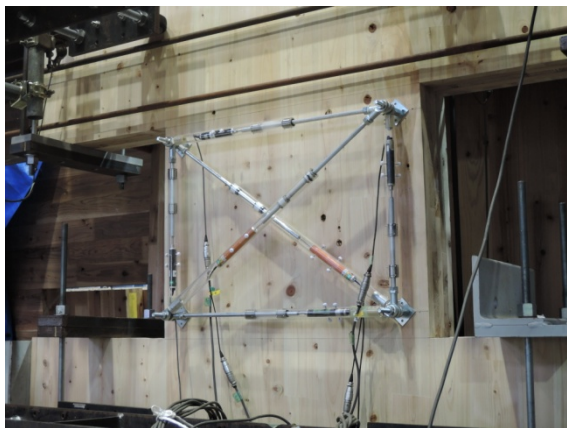


写真 2.7.5 150K 試験体の破壊性状

(2) セン断応力-せん断歪関係

図 2.7.5 に、くびれ部分の計測変位と寸法の定義を、図 2.7.6 にせん断弾性係数の定義を示す。パネル中央部に 4 つの標点を設け標点間の鉛直、水平、対角の計 6 つの相対変位を計測した。パネル中央の平均せん断水平変位を求め、標点間の鉛直方向の長さで除し、せん断ひずみ ( $\gamma$ ) を求めた。

せん断応力度の計算には 2 つの方法を用いた。ひとつは水平荷重をパネル中央部の全断面積で除し、せん断応力度 ( $\tau_n$ ) とした。もうひとつは水平荷重を鉛直方向の層 (有効層) の断面積で除し、せん断応力度 ( $\tau_e$ ) とした。

せん断応力 ( $\tau$ )、せん断変形角 ( $\gamma$ ) は次式で表される。

$$\tau = \frac{P}{Bt} \quad (1)$$

$$\gamma = \frac{\Delta_{hs}}{l_v} \quad (2)$$

ここで、 $P$ : 水平荷重 (N)、 $B$ : 試験体幅 (mm)、 $t$ : 試験体厚さ (mm)、 $\Delta_{hs}$ : せん断水平変位 (mm)、 $l_v$ : 計測部高さ (mm) である。 $\Delta_{hs}$  は次式で表される。記号の定義は図 1 に示す。

$$\Delta_{hs} = \frac{\Delta_{dS}}{\cos R} \quad (3)$$

$$\Delta_{dS} = \frac{\Delta_{dL} - \Delta_{dR}}{2} - \frac{\Delta_{hU} + \Delta_{hB}}{2 * \cos R} - \frac{\Delta_{vL} + \Delta_{vR}}{2 * \sin R} \quad (4)$$

得られた  $\tau$ - $\gamma$  曲線より、せん断弾性係数は次のように定義した。

$$G = \frac{\tau_{04} - \tau_{01}}{\gamma_{04} - \gamma_{01}} \quad (5)$$

ここで、 $\tau_{04}$ : 最大せん断応力度  $\tau_{max}$  の 40% の応力度 (N/mm<sup>2</sup>)、 $\tau_{01}$ : 最大せん断応力度  $\tau_{max}$  の 10% の応力度 (N/mm<sup>2</sup>)、 $\gamma_{04}$ :  $\tau_{04}$  のときのせん断変形角 (rad)、 $\gamma_{01}$ :  $\tau_{01}$  のときのせん断変形角 (rad)

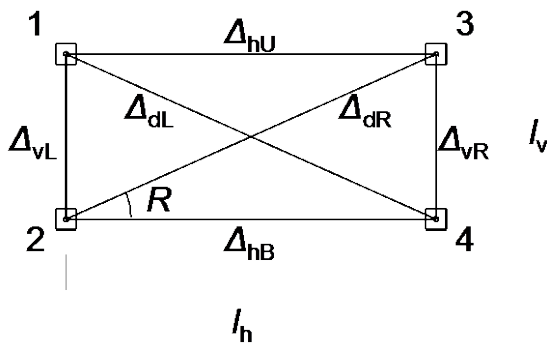


図 2.7.5 くびれ部分の計測変位と寸法の定義

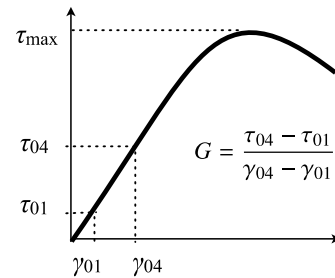


図 2.7.6 セン断弾性係数 ( $G$ ) の定義

図 2.7.7 にせん断応力度-せん断ひずみ関係を示す。縦軸は、荷重を全断面で除した値である。最大せん断応力度は、120K,120J で若干低めで  $2.4\text{N/mm}^2$  程度、その他の試験体で  $2.7\sim 3.3\text{N/mm}^2$  となった。

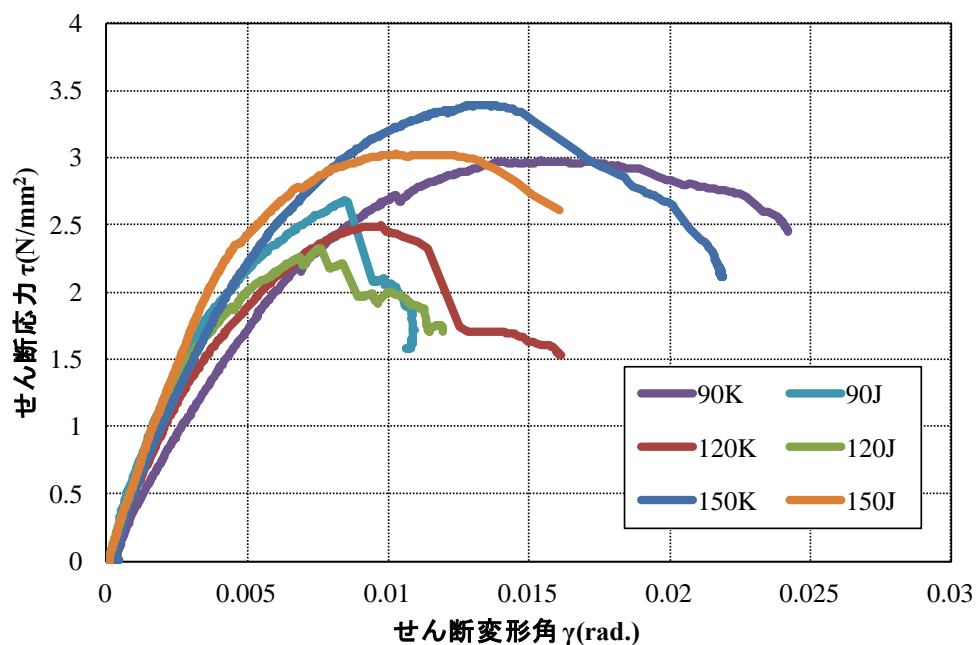


図 2.7.7 せん断応力度せん断ひずみ関係

### 2.7.3 考察

#### (1) せん断剛性・せん断応力度

表 2.7.2 に、実験結果から算出した最大せん断応力度及びせん断剛性を示す。最大せん断応力度及びせん断剛性は、全断面有効と見なした場合と強軸層のみ有効とした場合について算出した。全断面有効と見なした場合の最大せん断応力度は  $2.33\sim 3.39\text{N/mm}^2$  程度、せん断剛性は  $363\sim 607\text{GPa}$  程度となった。表 2.7.3 に参考として全層スギ CLT 試験体の結果を示す。全層スギ CLT に比べ、最大せん断応力度は若干高いが、ばらつきが多い結果となった。

表 2.7.2 セン断弾性係数、最大せん断応力度

	せん断応力度=荷重を 全断面積で除した値		せん断応力度=荷重を 有効断面積で除した値	
	$\tau_{\max}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$G_n$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\tau_{\max}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$G_n$ [N/mm <sup>2</sup> ]
150K	3.39	493	8.48	1232
150J	3.02	586	5.04	977
120K	2.50	477	4.99	954
120J	2.33	576	4.65	1152
90K	2.98	363	4.46	544
90J	2.68	607	4.02	911
平均値	2.76	494	5.39	978
標準偏差	0.44	97	1.31	298
変動係数	16%	20%	24%	30%

表 2.7.2 セン断弾性係数、最大せん断応力度

	せん断応力度=荷重を 全断面積で除した値		せん断応力度=荷重を 有効断面積で除した値	
	$\tau_{\max}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$G$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\tau_{\max}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$G$ [N/mm <sup>2</sup> ]
150K	3.06	521	5.09	868.61
150J	2.77	448	6.93	1120.85
120K	3.00	577	6.01	1153.05
120J	2.86	630	5.73	1260.03
90K	3.09	473	4.63	709.69
90J	2.78	766	8.34	2296.70
平均値	2.93	569	6.12	1235
標準偏差	0.14	117	1.34	558
変動係数	5%	21%	22%	45%

## 2.7.4 まとめ

①面内せん断性能について、全断面有効と見なした場合の最大せん断応力度は、3層 4Ply 試験体の強軸、弱軸で 2.4N/mm<sup>2</sup> 程度、3層 3Ply、5層 5Ply 試験体 90mm 厚、150mm 厚で 2.5～3.3N/mm<sup>2</sup> 程度であった。

②せん断剛性は 400～600GPa 程度であった。

## 2.8 まとめ

CLT の強度推定精度について検討した。対象は、面外曲げ、面内曲げ、短柱圧縮、縦引張りで、各弾性係数と強度とした。

### 2.8.1 面外曲げ

曲げヤング係数 (E) の推定にはせん断解析法、曲げ強度 (MOR) の推定には機械的接合梁理論を用いた。推定に必要な繊維方向の曲げヤング係数について、ヒノキ上位等級ラミナは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の平均値、スギ下位等級については H25 補正事業における M30 ラミナ曲げ試験において測定した曲げヤング係数の平均値を用いた。また、曲げ強度についてはヒノキ上位等級ラミナの曲げ試験で得た平均値と H25 補正事業における M30 ラミナの曲げ試験で得た平均値を用いた。これらの数値を算出式に代入して得た推定値を CLT の性能値の平均値とみなした。なお、直交方向の曲げヤング係数はラミナの縦弾性係数の  $1/30$ 、柃目面もしくは板目面のせん断弾性係数はラミナの縦弾性係数の  $1/16$ 、木口面のせん断弾性係数はラミナの縦弾性係数の  $1/160$  とした。

図 2.8-1 に推定結果と実験値を示す。面外曲げ強度について、強軸はせん断破壊が生じる場合は実験値が推定値を大幅に下回る可能性が示唆された。

### 2.8.2 面内曲げ

曲げヤング係数 (MOEv) および曲げ強度 (MORv) の推定には等価断面法を用いた。推定に必要なラミナの繊維方向の曲げヤング係数については、面外曲げの推定に用いた数値と同じとした。また、曲げ強度についても、面外曲げの推定に用いた数値と同じとした。これらの数値を算出式に代入して得た推定値を CLT の性能値の平均値とみなした。なお、直交方向の曲げヤング係数はラミナの縦弾性係数の  $1/30$  とした。

図 2.8-2 に推定結果と実験値を示す。MOEv については、強軸、弱軸ともに層構成にかかわらず実験値が推定値より大きく安全側で推定できた。一方、MORv については、強軸はいずれの層構成についても危険側の推定となった一方で、弱軸は全て安全側の推定となった。強軸の推定に寸法効果を導入すると推定精度が向上すると思われるが、その場合、弱軸の方は推定精度が低くなると想定される。

### 2.8.3 圧縮 (短柱)

圧縮ヤング係数 (Ec) および圧縮強度 (CS) の推定には等価断面法を用いた。推定に必要なラミナの繊維方向の弾性係数については、面外曲げと同じ数値を用いた。圧縮強度については、ヒノキ上位等級ラミナの曲げ試験で得た曲げ強度の平均値に  $0.9$  を乗じた数値と H25 補正事業における M30 ラミナ圧縮試験で得た平均値を用いた。これらの数値を算出式に代入して得た推定値を CLT の性能値の平均値とみなした。なお、直交方向の曲げヤング係数はラミナの縦弾性係数の  $1/30$  とした。

図 2.8-3 に推定結果と実験値を示す。Ec については、強軸、弱軸ともにいずれの層構成でも実験値が若干推定値より大きく安全側で推定できた。また、CS についても同様の傾向を示し、強軸、弱軸ともにいずれの層構成でも安全側の推定となった。

### 2.8.4 縦引張り

引張りヤング係数 (Et) および引張り強度 (TS) の推定には等価断面法を用いた。推定に必要なラミナの繊維方向の弾性係数については、面外曲げと同じ数値とした。また、引張り強度についてはヒノキ上位等級ラミナの引張り試験で得た平均値と H25 補正事業における M30 ラミナ引張り試験で得た平均値を式に代入した。これらの数値算出式に代入して得た推定値を CLT の性能値の平均値とみなした。なお、直交方向の曲げヤング係数はラミナの縦弾性係数の  $1/30$  とした。

図 2.8-4 に推定結果と実験値を示す。Et については、強軸、弱軸ともにいずれの層構成も実験値が推定値より大きく安全側で推定できた。一方、TS については、いずれも推定値が実験値を若干下回る危険側の推定となった。

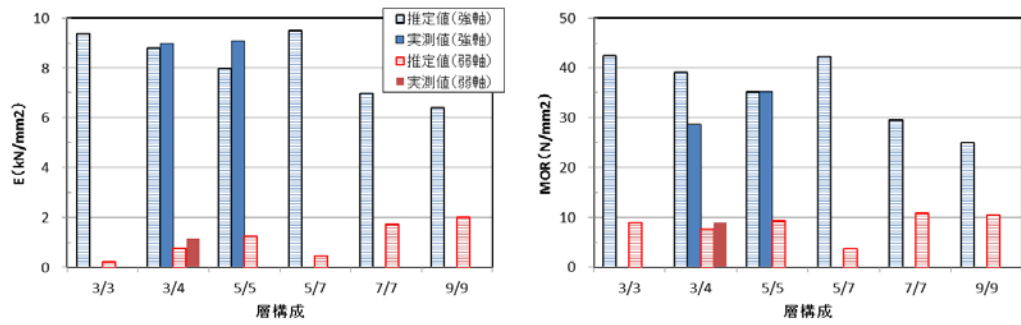


図 2.8-1 面外曲げ性能の推定 (左：弾性係数、右：強度)

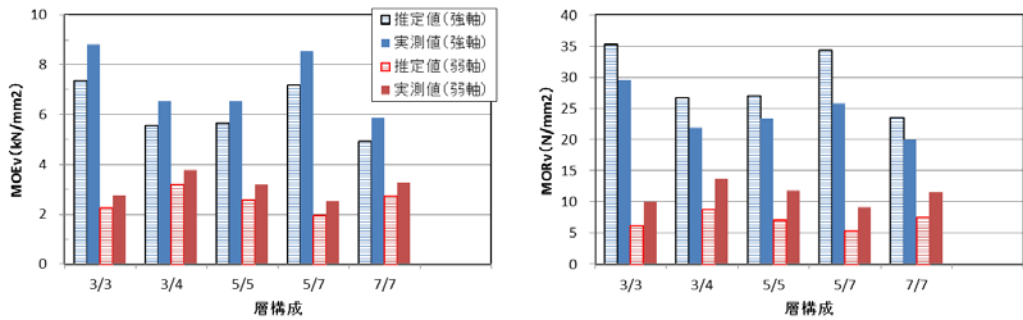


図 2.8-2 面内曲げ性能の推定 (左：弾性係数、右：強度)

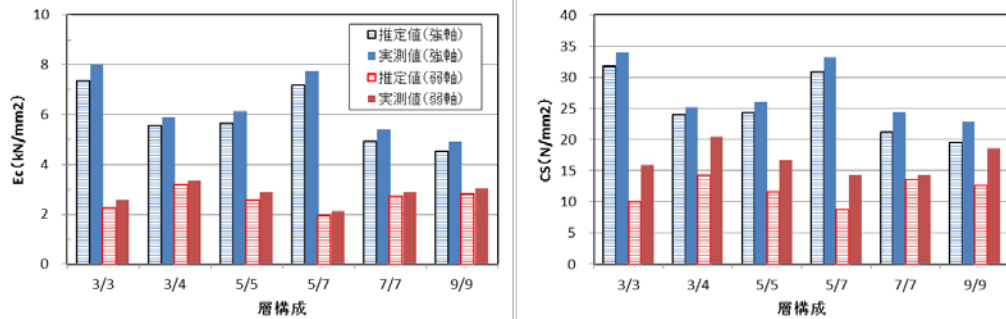


図 2.8-3 圧縮性能の推定 (左：弾性係数、右：強度)

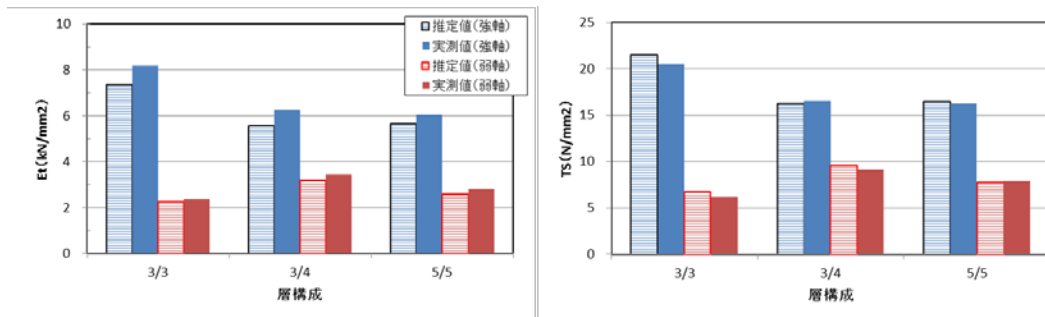


図 2.8-4 縦引張り性能の推定 (左：弾性係数、右：強度)

### 3. 試験体寸法が強度性能に与える影響

#### 【目的】

考慮すべき項目として試験体の幅、厚さ及び長さがあるが、製品幅が強度性能に与える影響について、現在、検討中の評価試験方法に基づいて検討する。JAS 規格の曲げ試験体の幅 300mm を基本として幅 600mm 等試験体の面外曲げ及び引張り試験を試行する。

### 3.1 面外曲げ

#### 3.1.1 試験方法

内層3層にスギ、最外層にヒノキを用いた5層5プライの異樹種構成のCLTを対象に、JAS規格の曲げ試験体の幅300mmを基本として、幅1000mmを超える試験体の面外曲げ試験を実施し、試験方法の検証および寸法効果の検討を行った。

スギおよびヒノキのラミナは、厚さ30mm幅105mmであった。なお、各ラミナの幅方向の接着（幅はぎ接着）はされていない。曲げ試験に用いた試験体の長さは3450mm、幅は150mm、300mm、600mm、1200mm、2400mmであった。試験体数は幅2400mmを3体、幅150mm～1200mmを各6体とした。

面外曲げ試験では、図3.1-1および写真3.1-1に示すように载荷フレーム内に設置した支点（支間3150mm）上に設置した試験体の3等分点で幅方向にそれぞれ線载荷されるように、H形鋼の载荷梁（H200×200×8×12）を介して2本の油圧ジャッキ（容量500kN/本）で载荷した（写真3.1-2）。载荷梁の下面には試験体へのめり込みを考慮して、10mm程度の面取りをしたナラ集成材等を取り付けた。なお、幅150mm～600mmの試験では、载荷梁の長さを短いものに変えて試験を行った。载荷梁や支点は試験体の曲げ変形に追従できるように、写真3.1-3に示すようなピン構造とした。

曲げ試験ではまず、载荷梁が試験開始前に試験体に載らないように手動ジャッキで支持したまま、油圧ジャッキの先端が载荷梁に触れない状態で計測器類の初期値を計測した（写真3.1-4）。次に、手動ジャッキを降下させることで2本の载荷梁を順に試験体に载荷し、最後に油圧ジャッキを降下させて荷重を加えた。なお、载荷梁の重量はデータ整理の際にロードセルの値に加えた。

試験体の変形は、支間中央の両側面の高さ1/2点に設置した変位計により鉛直変位を測定した。また、支点の沈下量を補正するための変位計を両端部に設置した。幅2400mmの試験体では、線载荷の状態を確認するために、幅方向に複数の変位計を設置した（図3.1-1）。一部の試験体を除き、試験体上面の荷重点間にヨークを設置して、純曲げ区間の変位を測定した（写真3.1-5）。

なお、曲げ試験の前に、縦振動法により試験体の縦振動ヤング係数 $E_{\text{ff}}$ を測定した。また、曲げたわみ振動法（T.G.H法）により高次（1次～5次）の固有振動数を測定することで、可能な範囲で試験体のせん断弾性係数 $G_{\text{fb}}$ と真の曲げヤング係数 $E_{\text{ofb}}$ を求めた（写真3.1-6）。

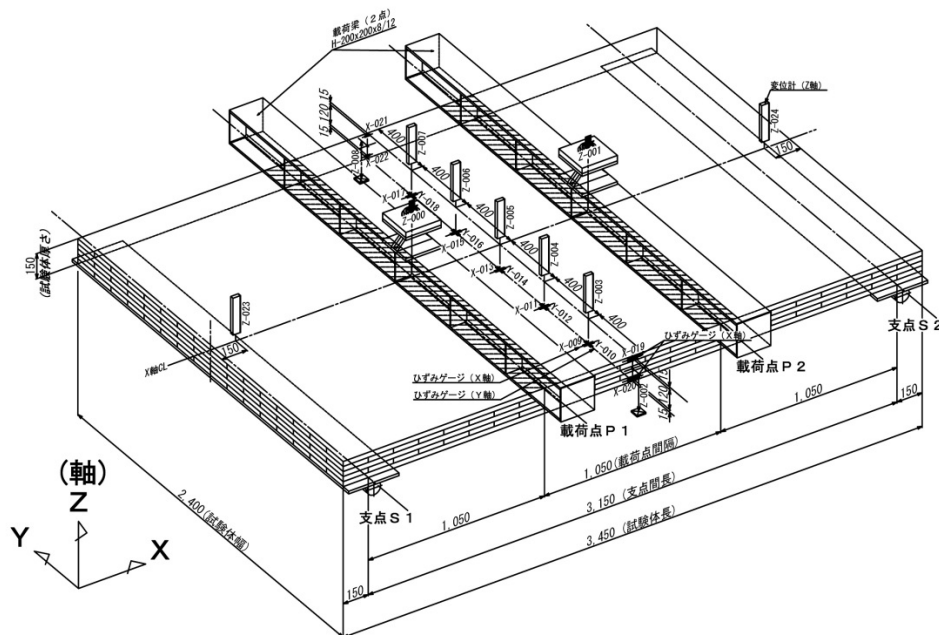


図 3.1-1 2400mm 幅の面外曲げ試験



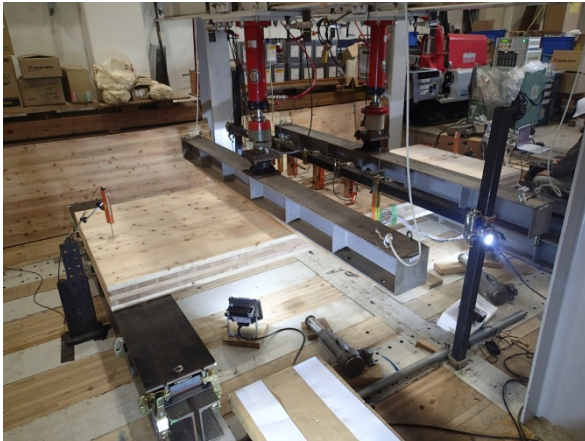


写真 3.1-1 曲げ試験の様子（左：幅 1200mm、右：幅 600mm）

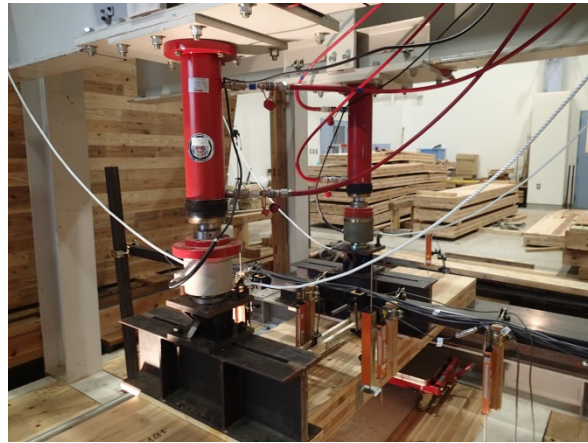


写真 3.1-2 油圧ジャッキ（理研精機製 容量：500kN/本）



写真 3.1-3 載荷点および支点の構造



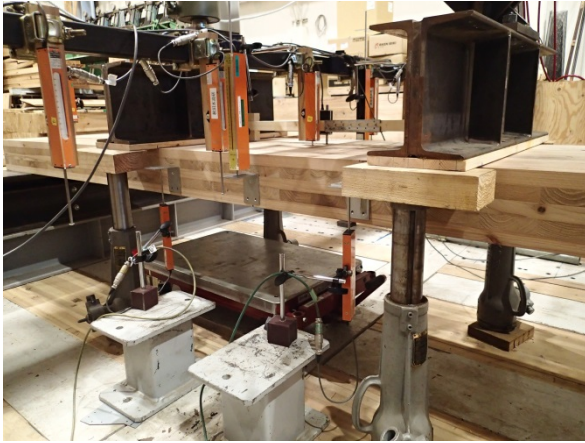


写真 3.1-4 手動ジャッキによる載荷梁の支持

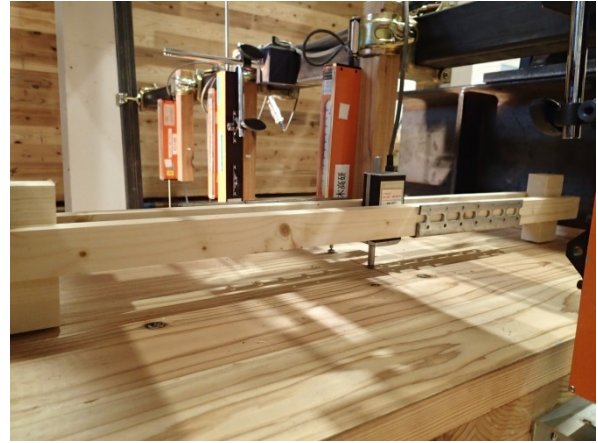


写真 3.1-5 ヨーク



写真 3.1-6 曲げたわみ振動法 (T. G. H 法) による固有振動数の測定



### 3.1.2 結果

非破壊試験の結果および面外曲げ試験の結果一覧を幅の小さい順から表 3.1-1 (1) ～表 3.1-5 (2) にそれぞれ示す。

ここでは、試験で得られた最大荷重  $P_{\max}$  から曲げ強さ  $f_b$  を(3.1-1)式より求めた。また、比例域における荷重と支間中央たわみの関係から見かけの曲げヤング係数  $E_m$  を(3.1-2)式より求めた。なお、ヨークを設置した試験体については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(3.1-3)式より算出した。

なお、面内曲げ試験では、曲げ破壊が先行せずせん断破壊が生じた試験体や、曲げ破壊が先行したが終局時の破壊がせん断破壊の試験体もあった。せん断破壊した試験体については、参考としてせん断強度を表中に示した。このときのせん断強度は (3.1-4)式より求めた。

各試験体の荷重と支間中央の変位の関係を図 3.1-2 から、破壊状況を写真 3.1-7 から順に示した。

$$f_b = \frac{3P_{\max} \times s}{bh^2} \quad (3.1-1)$$

$$E_m = \frac{\Delta P \times s(3L^2 - 4s^2)}{\Delta \delta \times 4bh^3} \quad (3.1-2)$$

$$E_b = \frac{\Delta P \times 3sy^2}{\Delta\delta_y \times 4bh^3} \quad (3.1-3)$$

ここで、 $P_{\max}$  : 最大荷重

$L$  : スパン ( $L=3,150\text{mm}$ )

$s$  : 支点から荷重点までの距離 ( $s=1,050\text{mm}$ )

$y$  : ヨークの測定スパン ( $y=700\text{mm}$ )

$b$  : 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

$$f_s = \frac{3 \times P_{\max} / 2}{2bh} \quad (3.2-3)$$

ここで、 $P_{\max}$  : 最大荷重、 $b$  : 試験体の幅 (mm)、 $h$  : 試験体の高さ (mm)

表 3. 1-1 (1) 非破壊試験結果 (試験体幅 150mm)

試験体幅 : 150					
番号	密度 $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	縦振動ヤング 係数 $E_{fr}$ (kN/mm <sup>2</sup> )	たわみ振動法 (T.G.H 法)		含水率 (%)
			ヤング係数 $E_{ofb}$ (kN/mm <sup>2</sup> )	せん断弾性係数 $G_{fb}$ (N/mm <sup>2</sup> )	
B413①	451	6.20	9.88	232	12.7
B413②	443	6.46	9.86	241	12.7
B416①	447	6.12	9.48	248	11.8
B416②	440	6.11	9.78	242	11.5
B418①	443	6.50	9.75	257	10.3
B418②	438	6.59	10.05	246	11.3
平均	444	6.33	9.80	244	11.7
最大	451	6.59	10.05	257	12.7
最小	438	6.11	9.48	232	10.3
標準偏差	4.8	0.21	0.19	8.16	0.89
変動係数	1.1%	1.1%	3.4%	1.9%	7.6%

表 3. 1-1 (2) 面外曲げ試験結果 (試験体幅 150mm)

試験体幅 : 150						
番号	最大荷重 $P$ (kN)	曲げヤング 係数 $E_m$ (kN/mm <sup>2</sup> )	曲げヤング 係数 $E_b$ (kN/mm <sup>2</sup> )	曲げ強度 $f_b$ (N/mm <sup>2</sup> )	せん断強度 $f_s$ (N/mm <sup>2</sup> )	破壊 形態
B413①	41.82	8.93	9.83	39.0	1.39	せん断
B413②	42.20	9.06	9.81	39.4		曲げ
B416①	36.64	8.66	-	34.2	1.22	せん断
B416②	38.62	8.88	-	36.0		曲げ
B418①	39.73	9.04	-	37.1		曲げ
B418②	31.44	9.43	10.45	29.3		曲げ
平均	38.41	9.00	10.03	35.8		
最大	42.20	9.43	10.45	39.4		
最小	31.44	8.66	9.81	29.3		
標準偏差	3.99	0.25	0.36	3.72		
変動係数	10.4%	2.8%	3.6%	10.4%		

表 3. 1-2(1) 非破壊試験結果（試験体幅 300mm）

試験体幅：300					
番号	密度 $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	縦振動ヤング 係数 $E_{fr}$ (kN/mm <sup>2</sup> )	たわみ振動法（T.G.H 法）		含水率 (%)
			ヤング係数 $E_{ofb}$ (kN/mm <sup>2</sup> )	せん断弾性係数 $G_{fb}$ (N/mm <sup>2</sup> )	
B413	444	6.52	10.20	235	12.0
B414	438	6.57	-	-	11.2
B415	444	6.34	-	-	11.3
B416	444	6.31	-	-	12.8
B417	438	6.69	10.42	253	10.7
B418	438	6.28	-	-	10.8
平均	441	6.45	10.31	244	11.5
最大	444	6.69	10.42	253	12.8
最小	438	6.28	10.20	235	10.7
標準偏差	3.5	0.16	-	-	0.81
変動係数	0.8%	2.5%	-	-	7.1%

表 3. 1-2(2) 面外曲げ試験結果（試験体幅 300mm）

試験体幅：300						
番号	最大荷重 $P$ (kN)	曲げヤング 係数 $E_m$ (kN/mm <sup>2</sup> )	曲げヤング 係数 $E_b$ (kN/mm <sup>2</sup> )	曲げ強度 $f_b$ (N/mm <sup>2</sup> )	せん断強度 $f_s$ (N/mm <sup>2</sup> )	破壊 形態
B413	73.23	9.21	9.45	34.2		曲げ
B414	77.06	9.42	9.99	36.0	1.28	せん断
B415	67.92	8.71	9.41	31.7		曲げ
B416	76.19	8.84	9.71	35.6		曲げ
B417	80.90	9.48	8.27	37.8	1.35	せん断
B418	77.05	8.75	9.88	36.0		曲げ
平均	75.39	9.07	9.45	35.2		
最大	80.90	9.48	9.99	37.8		
最小	67.92	8.71	8.27	31.7		
標準偏差	4.40	0.34	0.62	2.06		
変動係数	5.8%	3.8%	6.6%	5.8%	-	

表 3. 1-3 (1) 非破壊試験結果 (試験体幅 600mm)

試験体幅 : 600					
番号	密度 $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	縦振動ヤング 係数 $E_{fr}$ (kN/mm <sup>2</sup> )	たわみ振動法 (T.G.H 法)		含水率 (%)
			ヤング係数 $E_{ofb}$ (kN/mm <sup>2</sup> )	せん断弾性係数 $G_{fb}$ (N/mm <sup>2</sup> )	
B413	448	6.74	10.1	237	12.3
B414	444	6.43	9.81	252	12.8
B415	441	6.38	9.69	213	12.5
B416	448	6.36	9.94	235	11.2
B417	444	6.52	9.93	253	12.3
B418	448	6.36	9.65	230	11.3
平均	446	6.46	9.86	237	12.1
最大	448	6.74	10.1	253	12.8
最小	441	6.36	9.65	213	11.2
標準偏差	2.6	0.15	0.18	14.9	0.67
変動係数	0.6%	2.3%	1.8%	6.3%	5.6%

表 3. 1-3 (2) 面外曲げ試験結果 (試験体幅 600mm)

試験体幅 : 600						
番号	最大荷重 $P$ (kN)	曲げヤング 係数 $E_m$ (kN/mm <sup>2</sup> )	曲げヤング 係数 $E_b$ (kN/mm <sup>2</sup> )	曲げ強度 $f_b$ (N/mm <sup>2</sup> )	せん断強度 $f_s$ (N/mm <sup>2</sup> )	破壊 形態
B413	123.18	9.25	10.7	28.7		曲げ
B414	120.94	8.81	9.75	28.2		曲げ
B415	133.93	8.63	9.56	31.3	1.12	せん断
B416	114.88	8.88	9.44	26.8		曲げ
B417	127.99	8.95	9.85	29.9		曲げ
B418	126.26	8.76	9.70	29.5		曲げ
平均	124.53	8.88	9.84	29.1		
最大	133.93	9.25	10.7	31.3		
最小	114.88	8.63	9.44	26.8		
標準偏差	6.50	0.21	0.46	1.52		
変動係数	5.2%	2.4%	4.7%	5.2%		



表 3. 1-4(1) 非破壊試験結果 (試験体幅 1200mm)

試験体幅：1200					
番号	密度 $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	縦振動ヤング 係数 $E_{fr}$ (kN/mm <sup>2</sup> )	たわみ振動法 (T.G.H 法)		含水率 (%)
			ヤング係数 $E_{ofb}$ (kN/mm <sup>2</sup> )	せん断弾性係数 $G_{fb}$ (N/mm <sup>2</sup> )	
B413	441	6.47	9.79	242	12.2
B414	444	6.43	10.2	256	11.3
B415	448	6.48	10.4	238	17.5
B416	448	6.48	9.98	259	12.3
B417	435	6.38	9.26	262	11.5
B418	446	6.34	9.64	274	11.7
平均	444	6.43	9.87	255	12.8
最大	448	6.48	10.4	274	17.5
最小	435	6.34	9.26	238	11.3
標準偏差	5.0	0.06	0.39	13.2	2.36
変動係数	1.1%	0.9%	4.0%	5.2%	18.5%

表 3. 1-4(2) 面外曲げ試験結果 (試験体幅 1200mm)

試験体幅：1200						
番号	最大荷重 $P$ (kN)	曲げヤング 係数 $E_m$ (kN/mm <sup>2</sup> )	曲げヤング 係数 $E_b$ (kN/mm <sup>2</sup> )	曲げ強度 $f_b$ (N/mm <sup>2</sup> )	せん断強度 $f_s$ (N/mm <sup>2</sup> )	破壊 形態
B413	271.20	8.74	10.0	31.6	1.13	曲げ+せん断
B414	252.89	8.76	10.5	29.5		曲げ
B415	266.74	8.97	10.8	31.1		曲げ
B416	278.49	8.98	10.1	32.5		曲げ
B417	290.60	8.74	9.55	33.9		曲げ
B418	271.32	8.73	10.0	31.7		曲げ
平均	271.87	8.82	10.2	31.7		
最大	290.60	8.98	10.8	33.9		
最小	252.89	8.73	9.55	29.5		
標準偏差	12.51	0.12	0.43	1.46		
変動係数	4.6%	1.4%	4.2%	4.6%		

表 3. 1-5 (1) 非破壊試験結果 (試験体幅 2400mm)

試験体幅：2400					
番号	密度 $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	縦振動ヤング 係数 $E_{fr}$ (kN/mm <sup>2</sup> )	たわみ振動法 (T.G.H 法)		含水率 (%)
			ヤング係数 $E_{ofb}$ (kN/mm <sup>2</sup> )	せん断弾性係数 $G_{fb}$ (N/mm <sup>2</sup> )	
B419	548.0	441	6.21	—	12.0
B420	543.0	437	6.70	—	13.0
B421	543.0	437	6.15	—	11.8
平均	545	439	6.36	—	12.3
最大	548	441	6.70	—	13.0
最小	543	437	6.15	—	11.8
標準偏差	2.89	2.3	0.30	—	0.63
変動係数	0.5%	0.5%	4.8%	—	5.1%

表 3. 1-5 (2) 面外曲げ試験結果 (試験体幅 2400mm)

試験体幅：2400						
番号	最大荷重 $P$ (kN)	曲げヤング 係数 $E_m$ (kN/mm <sup>2</sup> )	曲げヤング 係数 $E_b$ (kN/mm <sup>2</sup> )	曲げ強度 $f_b$ (N/mm <sup>2</sup> )	せん断強度 $f_s$ (N/mm <sup>2</sup> )	破壊 形態
B419	491.35	9.12	10.1	28.7		曲げ
B420	545.26	8.85	9.78	31.8	1.14	曲げ+せん断
B421	487.40	9.05	10.3	28.4		曲げ
平均	508.00	9.01	10.0	29.6		
最大	545.26	9.12	10.3	31.8		
最小	487.40	8.85	9.78	28.4		
標準偏差	32.33	0.14	0.25	1.89		
変動係数	6.4%	1.6%	2.5%	6.4%		

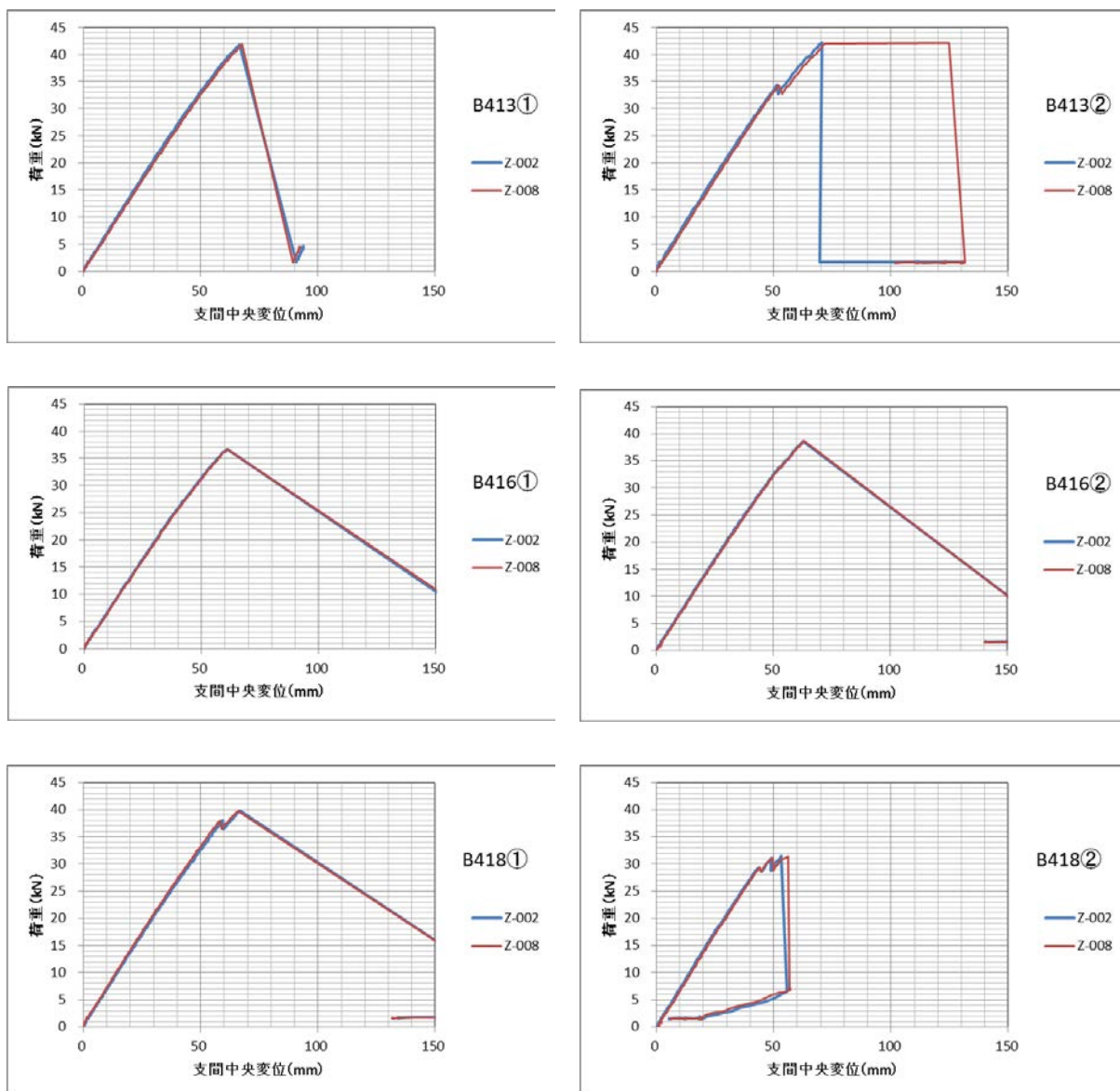


図 3.1-2 荷重-変位関係 (幅 150mm)



写真 3.1-7 面外曲げ試験状況 (幅 150mm)



写真 3. 1-8 破壊形態（幅 150mm、側面）

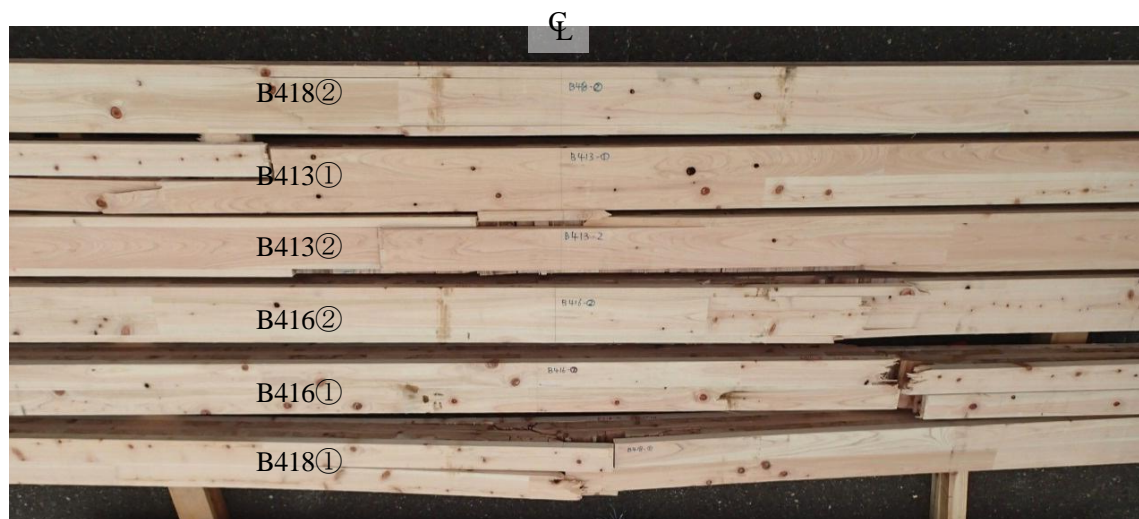


写真 3. 1-9 破壊形態（幅 150mm、下面）



写真 3. 1-10 せん断破壊例（幅 150mm、B413①）



写真 3. 1-11 曲げ破壊例（幅 150mm、B418①）



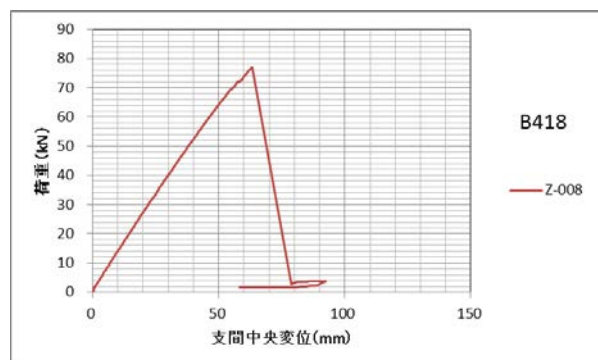
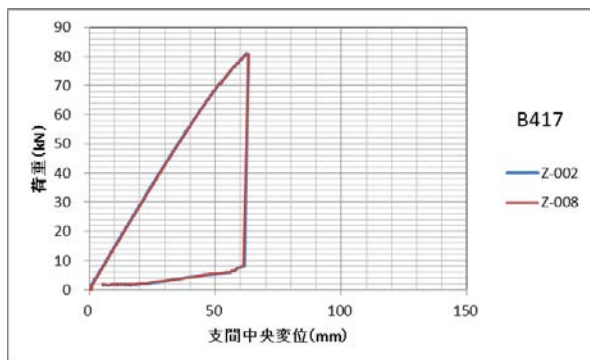
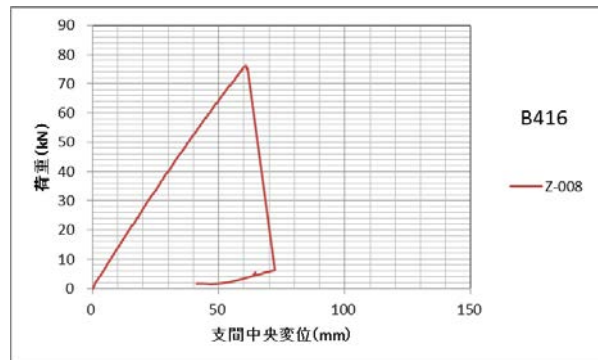
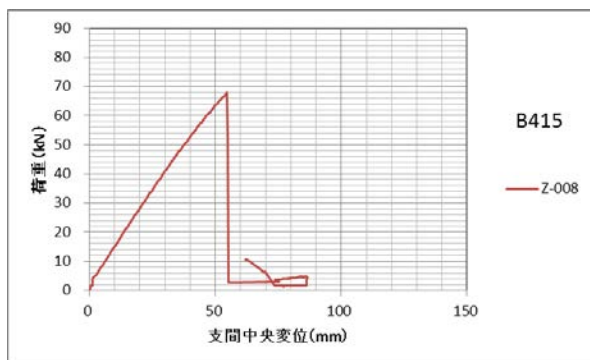
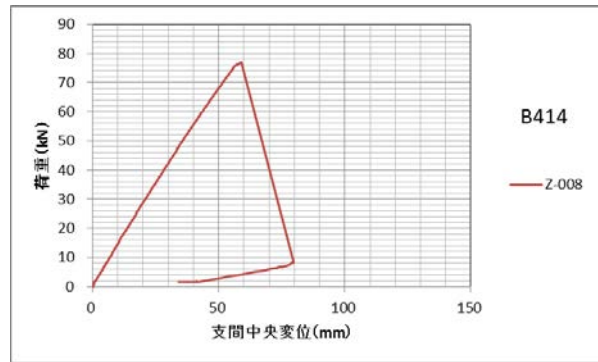
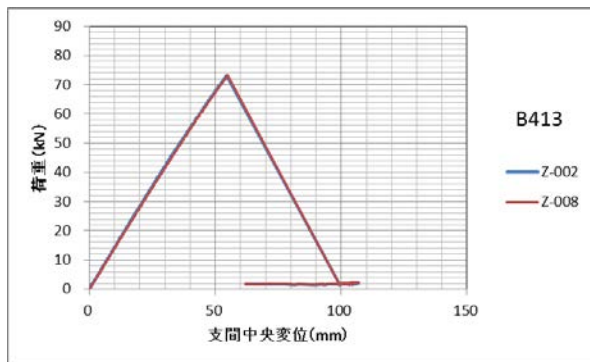


図 3.1-3 荷重-変位関係 (幅 300mm)

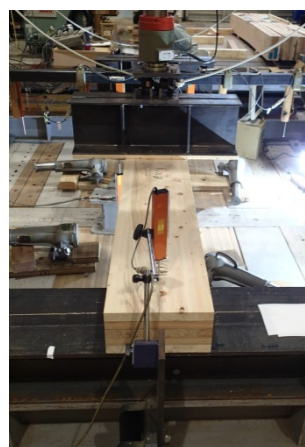
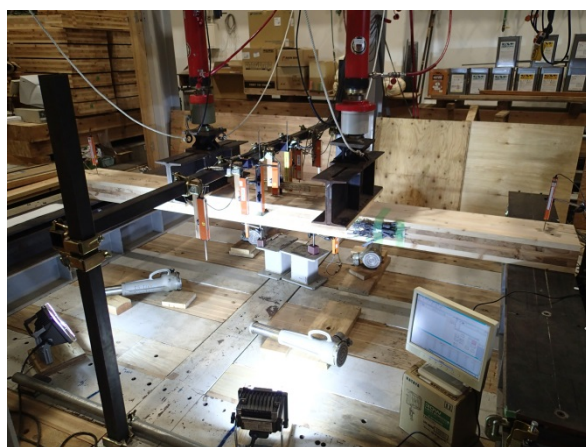


写真 3.1-12 面外曲げ試験状況 (幅 300mm)



写真 3. 1-13 破壊形態（幅 300mm、側面）

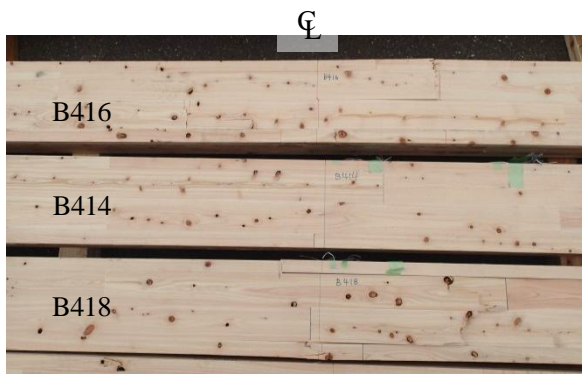


写真 3. 1-14 破壊形態（幅 300mm、下面）



写真 3. 1-15 せん断破壊例（幅 300mm）



写真 3. 1-16 曲げ破壊例（幅 300mm、B416）



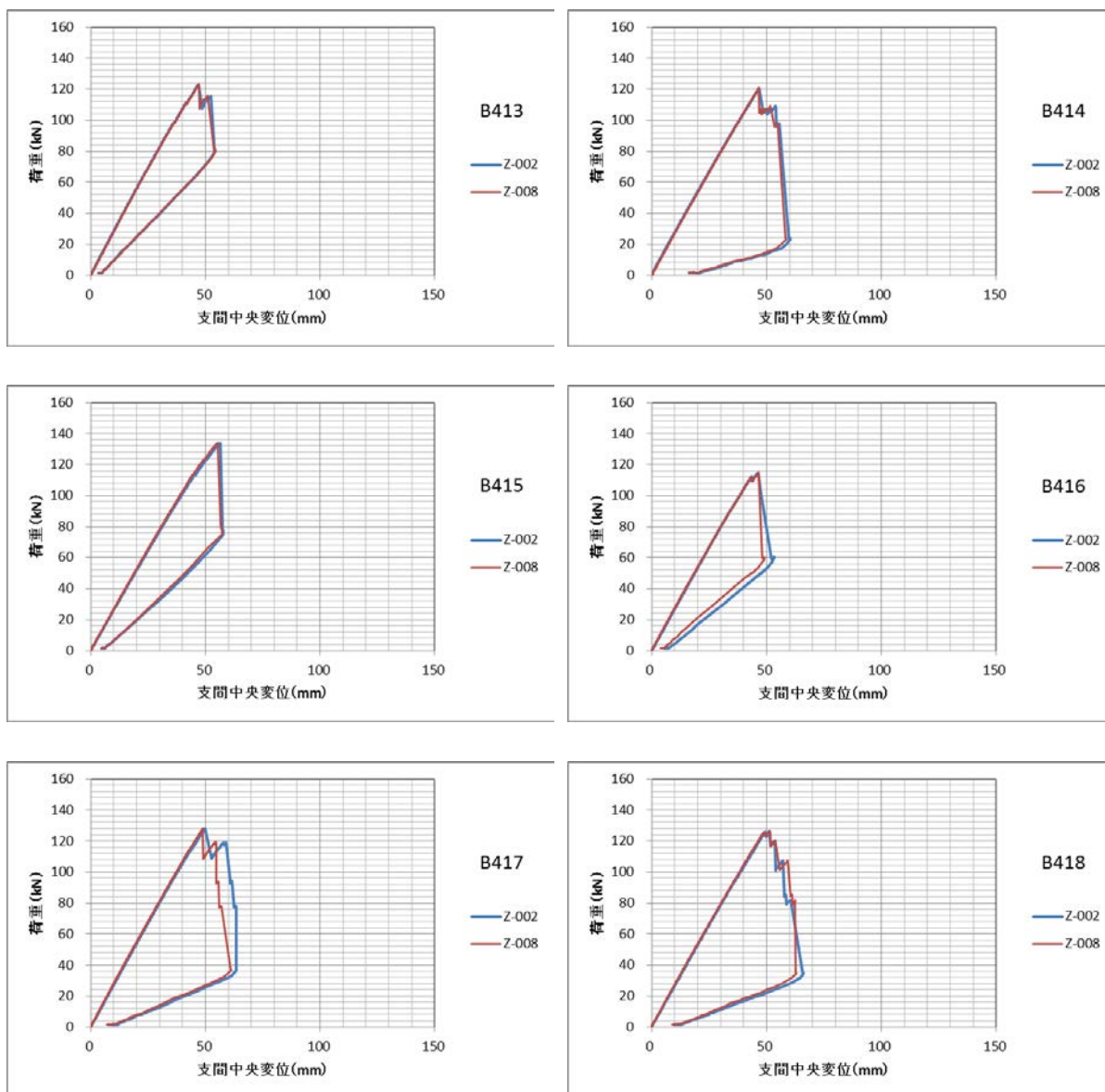


図 3.1-4 荷重-変位関係 (幅 600mm)

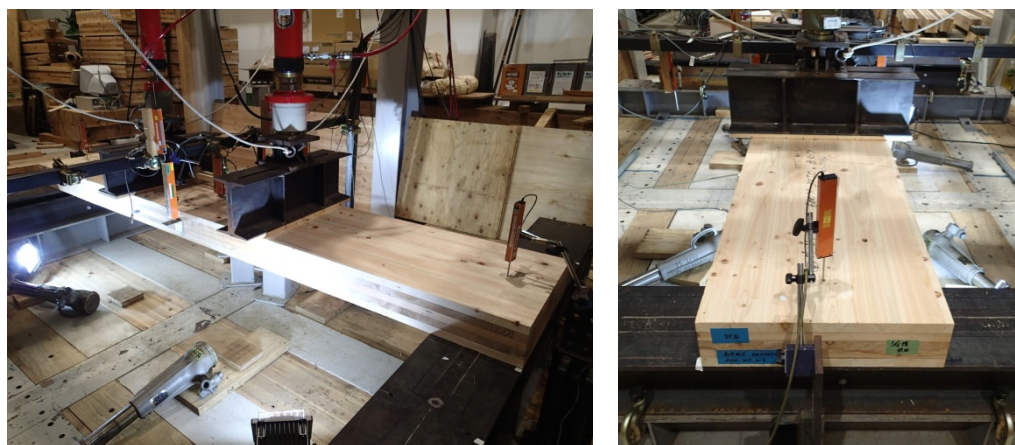


写真 3.1-17 面外曲げ試験状況 (幅 600mm)



写真 3. 1-18 破壊形態（幅 600mm、側面）



写真 3. 1-19 破壊形態（幅 600mm、下面）



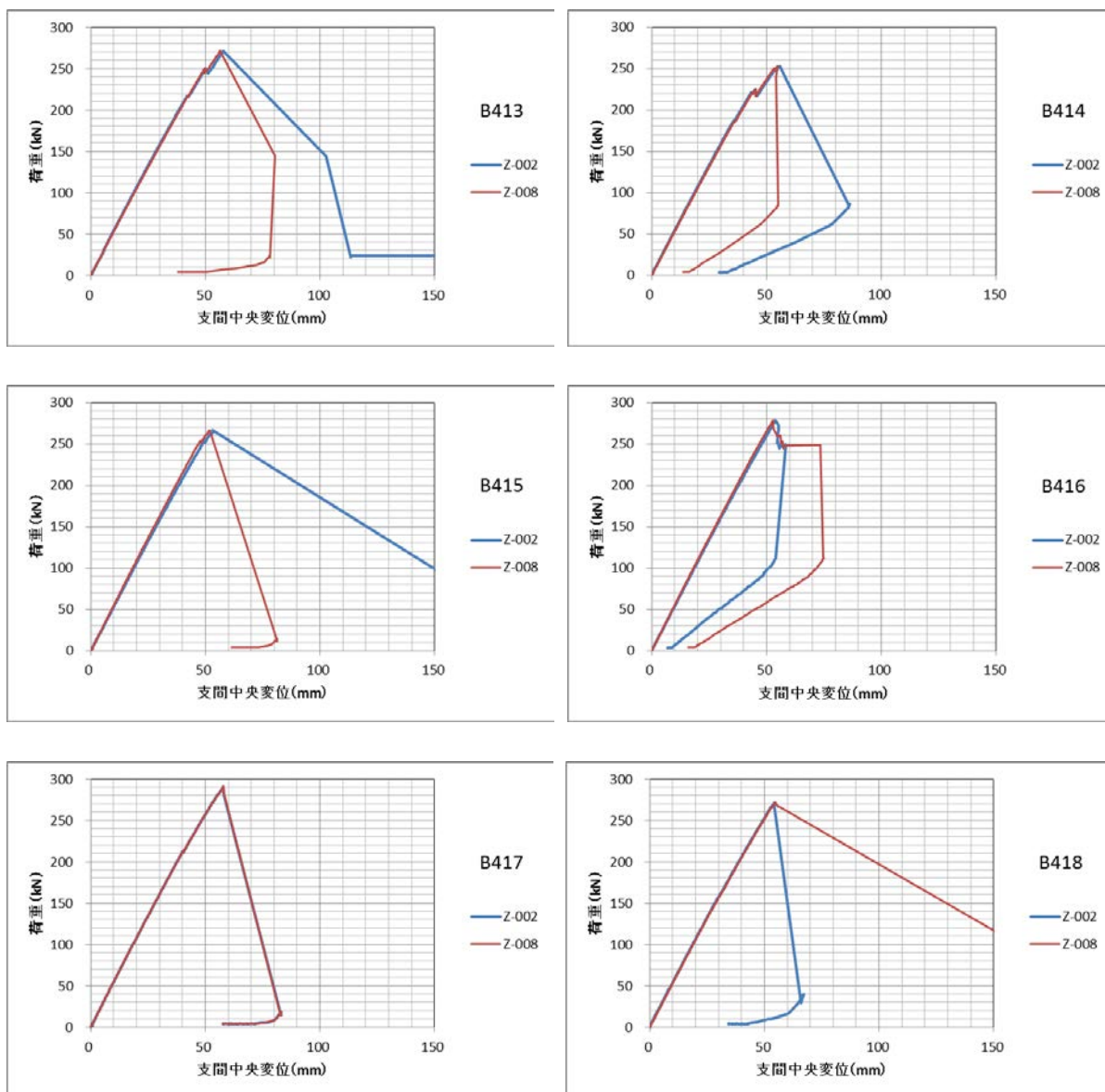


図 3.1-5 荷重-変位関係 (幅 1200mm)

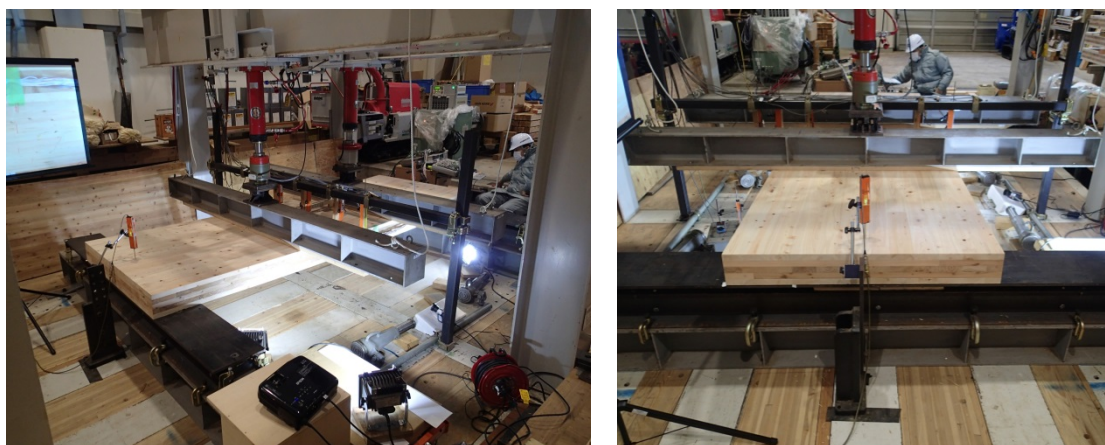


写真 3.1-20 面外曲げ試験状況 (幅 1200mm)



写真 3.1-21 破壊形態（幅 1200mm、側面）



写真 3.1-22 破壊形態（幅 1200mm、下面）（1）





写真 3.1-23 破壊形態（幅 1200mm、下面）（2）

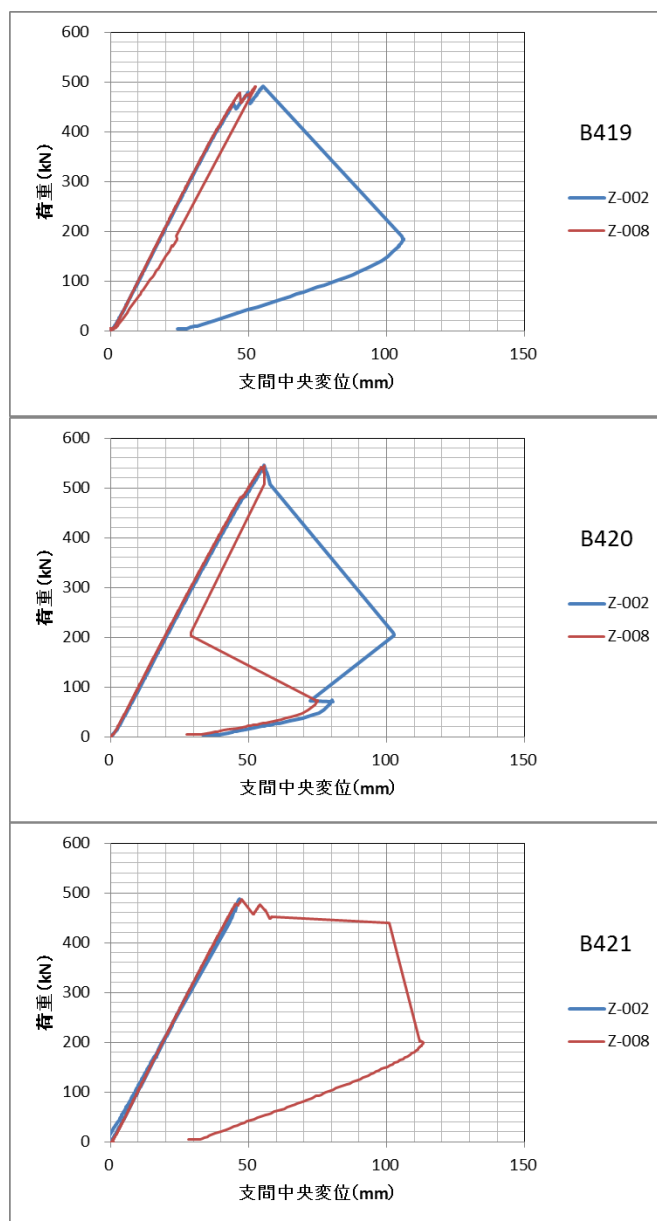


図 3.1-6 荷重-変位関係（幅 2400mm）



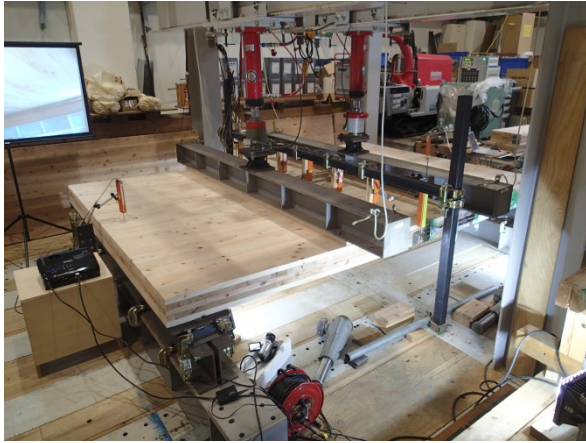


写真 3. 1-24 面外曲げ試験状況（幅 2400mm）



写真 3. 1-25 破壊形態（幅 2400mm、側面）



写真 3. 1-26 破壊形態（幅 2400mm、下面）（1）



写真 3.1-27 破壊形態（幅 2400mm、下面）（2）

### 3.1.3 考察

面外曲げ試験では、150mm～2400mm 幅の全ての試験条件において、せん断破壊が先行した試験体や、曲げ破壊が先行したが終局時にせん断破壊が生じた試験体があった。これは、内層のスギラミナと外層のヒノキラミナの強度差に起因する現象であると推察され、今回の試験条件では曲げ破壊とせん断破壊のどちらが生じてもおかしくない強度バランスになっていると考えられる。幅の広い試験体では、断面の半分が曲げ破壊し、残りの半分がせん断破壊を生じた試験体もあった（写真 3.1-28）。

なお、せん断破壊した試験体の一部を切断し、内層ラミナと外層ラミナの接着界面を観察したところ、高い木破率と十分な接着状況が確認できた（写真 3.1-29）。





写真 3.1-28 曲げ破壊とせん断破壊が同時に生じた試験体 (1200 幅、B413)



写真 3.1-29 せん断破壊が同時に生じた試験体の接着界面 (2400 幅、B420)

曲げ強度に関しては、写真 3.1-30 に示すように、荷重点間の引張側最外層ラミナのフィンガージョイントや節の有無が曲げ強度に及ぼす影響が示唆され、幅の小さい試験体ほどばらつきが大きくなる傾向が認められた。図 3.1-7 に試験体幅と曲げ強度との関係を示す。同図より曲げ強度には寸法効果が認められ、JAS 規格の基本となる 300mm 幅に対して 2400mm 幅では約 15% 曲げ強度が低下することが確認された。同図から、幅 600mm の試験体の強度が低く分布していることが分かる。この要因は明らかではないが、写真 3.1-19 で確認できるように、最外層や中間層の強軸方向のラミナの幅が試



写真 3.1-30 試験前後の引張側最外層 (1200 幅、B415、赤線は FJ)

験体の幅方向に対して対称でなく、片側端部のラミナ幅が 20mm しかなく、反対側の端部のラミナ幅が 55mm となっていたことが、強度低下の要因の一つではないかと推察される。

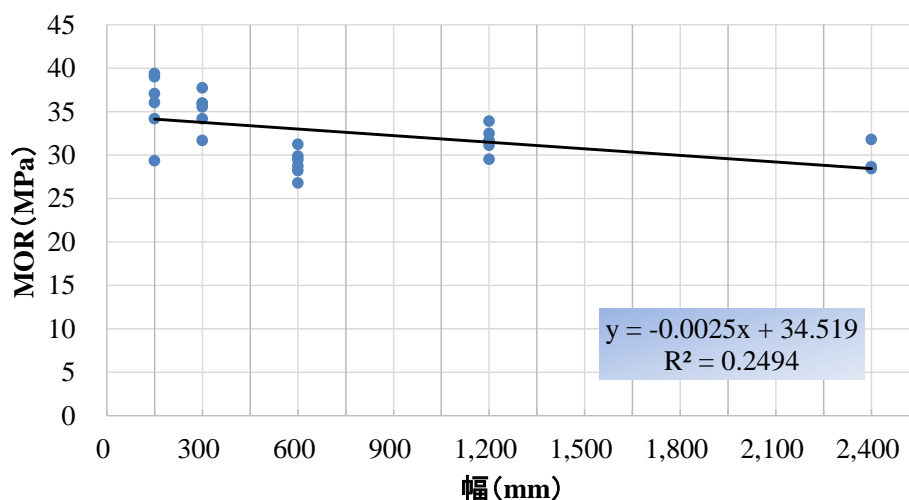


図 3.1-7 試験体幅と曲げ強度の関係

#### 3.1.4 まとめ

本実験では、内層 3 層にスギ、最外層にヒノキを用いた 5 層 5 プライの異樹種構成の CLT を対象に、JAS 規格の曲げ試験体の幅 300mm を基本として、幅 1000mm を超える試験体の面外曲げ試験を実施し、試験方法の検証および寸法効果の検討を行った。

面外曲げ試験では、150mm～2400mm 幅の全ての試験条件において、せん断破壊が先行した試験体や、曲げ破壊が先行したが終局時にせん断破壊が生じた試験体があった。したがって、異樹種構成の CLT の曲げ試験においては本試験の载荷条件よりもスパンを長くするなどして、曲げ試験破壊が先行するような条件を検討する必要があると考えられる。

曲げ破壊は荷重点間の引張側最外層のフィンガージョイントや節がきっかけとなっており、隣り合うラミナ同士でフィンガージョイントの位置が近接している場合などは、これらが連鎖的に破壊して進行していくようであった。したがって、幅の小さい試験体では荷重点間のフィンガージョイントの有無が曲げ強度に及ぼす影響が大きくなり、ばらつきが大きくなるものと推察された。

## 3.2 引張り

### 3.2.1 試験方法

本試験で使用した CLT の概要を表 3.2-1 に示す。CLT に使用したラミナは、外層がヒノキ M120A、内層がスギ M30A で構成されている。

引張り試験に先立ち、縦振動法によるヤング係数および面外・面内方向の T. G. H. 法（曲げたわみ振動法）による曲げヤング係数・せん断弾性係数を測定した。以上の非破壊測定は 2.3 項および 2.6 項に示された面内曲げ試験体および引張り試験体の測定方法と同様とした。

引張り試験には、最大容量が 2000kN の横型引張り試験機（前川試験機製作所製、HZS-200-LB4）を用いた。引張り試験時のスパンチャック間距離は 3000mm とした。相対する 2 材面に設置した変位計（東京測器研究所製、CDP-25）を取り付けたヨークを用いて 1000mm 当たりの伸びを測定した。チャックの移動速度は 7mm/min とした。5 層 5 プライ強軸試験体の引張り試験の様子および変位計の設置の様子をそれぞれ写真 3.2-1 および 3.2-2 に示す。試験終了後、破壊部近傍から長さが約 30mm 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。

表 3.2-1 本試験で用いたスギ CLT の概要

層構成	外層の方向	寸法 mm (h×b×L)	試験体数
5 層 5 プライ	強軸	150×150×6000	12
		150×300×6000	6
		150×600×6000	6

注：h は試験体の厚さ（積層方向）、b は試験体の幅、L は試験体の長さ。

試験体の長さ方向と外層ラミナの繊維方向が平行なものを強軸とする。



写真 3.2-1 幅 600mm 試験体の引張り試験の様子



写真 3.2-2 変位計の設置の様子

### 3.2.2 試験結果

#### (1) 非破壊試験

表 3.2-2 非破壊試験の結果（試験体幅 150mm）

試験体幅 150mm		E 縦振動 (kN/mm <sup>2</sup> )	たわみ振動法 (kN/mm <sup>2</sup> )		たわみ振動法 (kN/mm <sup>2</sup> )	
番号	密度(kg/m <sup>3</sup> )		E (面外)	G (面外)	E (面内)	G (面内)
5-5-b150-Ma-B422-1	431	6.94	10.7	0.222	6.77	0.867
5-5-b150-Ma-B422-2	443	6.76	9.80	0.232	6.50	0.976
5-5-b150-Ma-B422-3	438	6.73	9.76	0.236	6.30	1.19
5-5-b150-Ma-B422-4	433	7.33	10.4	0.225	7.26	0.798
5-5-b150-Ma-B423-1	431	6.77	10.0	0.232	6.43	1.06
5-5-b150-Ma-B423-2	432	6.45	9.62	0.237	6.30	0.889
5-5-b150-Ma-B423-3	428	6.31	9.57	0.233	5.94	1.16
5-5-b150-Ma-B423-4	428	6.86	10.2	0.214	6.31	1.21
5-5-b150-Ma-B424-1	435	6.70	10.3	0.229	6.72	0.755
5-5-b150-Ma-B424-2	431	6.50	9.67	0.229	6.34	1.01
5-5-b150-Ma-B424-3	435	6.21	9.11	0.235	5.89	0.989
5-5-b150-Ma-B424-4	425	6.73	9.86	0.229	6.57	0.960
平均	433	6.69	9.92	0.229	6.45	0.989
最大	443	7.33	10.7	0.237	7.26	1.21
最小	425	6.21	9.11	0.214	5.89	0.755
標準偏差	4.81	0.299	0.428	0.00664	0.369	0.148
変動係数%	1.112	4.47	4.31	2.89	5.73	15.0

表 3.2-3 非破壊試験の結果（試験体幅 300mm）

試験体幅 300mm		E 縦振動 (kN/mm <sup>2</sup> )	たわみ振動法 (kN/mm <sup>2</sup> )		たわみ振動法 (kN/mm <sup>2</sup> )	
番号	密度(kg/m <sup>3</sup> )		E (面外)	G (面外)	E (面内)	G (面内)
5-5-b300-Ma-B422-1	432	6.70	9.65	0.229	6.56	0.839
5-5-b300-Ma-B422-2	438	6.96	9.81	0.229	6.77	0.902
5-5-b300-Ma-B423-1	436	6.71	10.2	0.224	6.66	0.917
5-5-b300-Ma-B423-2	434	6.74	9.66	0.230	6.63	0.897
5-5-b300-Ma-B424-1	434	6.81	10.2	0.232	6.59	0.871
5-5-b300-Ma-B424-2	433	6.80	10.1	0.224	6.71	0.829
平均	435	6.78	9.94	0.228	6.65	0.876
最大	438	6.96	10.2	0.232	6.77	0.917
最小	432	6.70	9.65	0.224	6.56	0.829
標準偏差	2.10	0.0950	0.260	0.00306	0.0780	0.0358
変動係数%	0.484	1.40	2.62	1.34	1.17	4.09



表 3.2-4 非破壊試験の結果（試験体幅 600mm）

試験体幅 600mm		E 縦振動 (kN/mm <sup>2</sup> )	たわみ振動法 (kN/mm <sup>2</sup> )		たわみ振動法 (kN/mm <sup>2</sup> )	
番号	密度(kg/m <sup>3</sup> )		E (面外)	G (面外)	E (面内)	G (面内)
5-5-b600-Ma-B422-1	431	6.84	10.1	0.232	6.57	0.920
5-5-b600-Ma-B422-2	436	6.73	10.2	0.236	6.46	0.931
5-5-b600-Ma-B423-1	437	6.59	9.68	0.246	6.42	0.933
5-5-b600-Ma-B423-2	428	6.79	9.88	0.234	6.88	0.869
5-5-b600-Ma-B424-1	431	6.70	9.70	0.239	6.62	0.927
5-5-b600-Ma-B424-2	427	6.68	10.0	0.234	6.38	0.903
平均	432	6.72	9.94	0.237	6.55	0.914
最大	437	6.84	10.2	0.246	6.88	0.933
最小	427	6.59	9.68	0.232	6.38	0.869
標準偏差	4.19	0.0880	0.223	0.00516	0.185	0.0246
変動係数%	0.970	1.31	2.24	2.18	2.83	2.69

## (2) 破壊試験

表 3.2-5 引張り試験の結果（試験体幅 150mm）

試験体幅 150mm				
番号	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	比例限度応力 (N/mm <sup>2</sup> )	引張り強度 (N/mm <sup>2</sup> )	含水率 (%)
5-5-b150-Ma-B422-1	6.73	14.3	15.1	10.2
5-5-b150-Ma-B422-2	6.63	9.64	16.5	9.23
5-5-b150-Ma-B422-3	5.64	15.4	16.3	9.63
5-5-b150-Ma-B422-4	6.90	16.8	16.8	9.52
5-5-b150-Ma-B423-1	6.28	8.58	15.4	9.97
5-5-b150-Ma-B423-2	5.98	15.3	15.3	9.45
5-5-b150-Ma-B423-3	5.56	17.1	17.1	10.1
5-5-b150-Ma-B423-4	6.23	14.3	17.2	10.3
5-5-b150-Ma-B424-1	6.35	13.3	14.0	10.1
5-5-b150-Ma-B424-2	5.62	7.52	13.5	9.69
5-5-b150-Ma-B424-3	5.56	16.9	16.9	10.1
5-5-b150-Ma-B424-4	6.62	16.5	16.6	9.68
平均	6.17	13.8	15.9	9.83
最大	6.90	17.1	17.2	10.3
最小	5.56	7.52	13.5	9.23
標準偏差	0.493	3.39	1.22	0.345
変動係数%	7.99	24.5	7.69	3.51

表 3.2-6 引張り試験の結果（試験体幅 300mm）

試験体幅 300mm				
番号	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	比例限度応力 (N/mm <sup>2</sup> )	引張り強度 (N/mm <sup>2</sup> )	含水率 (%)
5-5-b300-Ma-B422-1	6.41	15.7	16.4	9.61
5-5-b300-Ma-B422-2	6.30	12.7	14.9	8.84
5-5-b300-Ma-B423-1	6.26	12.0	16.6	9.39
5-5-b300-Ma-B423-2	6.55	13.8	14.9	9.70
5-5-b300-Ma-B424-1	6.48	16.8	16.9	10.0
5-5-b300-Ma-B424-2	6.58	15.8	17.1	9.53
平均	6.43	14.5	16.1	9.52
最大	6.58	16.8	17.1	10.0
最小	6.26	12.0	14.9	8.84
標準偏差	0.131	1.92	0.978	0.397
変動係数%	2.03	13.3	6.06	4.17

表 3.2-7 引張り試験の結果（試験体幅 600mm）

試験体幅 600mm				
番号	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	比例限度応力 (N/mm <sup>2</sup> )	引張り強度 (N/mm <sup>2</sup> )	含水率 (%)
5-5-b600-Ma-B422-1	6.50	10.2	15.2	8.91
5-5-b600-Ma-B422-2	6.42	14.0	16.6	9.38
5-5-b600-Ma-B423-1	6.06	14.9	15.0	9.08
5-5-b600-Ma-B423-2	6.64	17.3	17.3	9.22
5-5-b600-Ma-B424-1	6.03	14.3	14.4	9.27
5-5-b600-Ma-B424-2	6.29	16.2	16.2	9.14
平均	6.32	14.5	15.8	9.17
最大	6.64	17.3	17.3	9.38
最小	6.03	10.2	14.4	8.91
標準偏差	0.244	2.44	1.08	0.164
変動係数%	3.86	16.8	6.85	1.79

### 3.2.3 考察

非破壊試験の結果、引張り試験の結果、各構成の引張り試験後の破壊形態の例をそれぞれ表 3.2-2～3.2-4、表 3.2-5～3.2-7、写真 3.2-3～3.2-8 に示す。

試験体幅と引張り強度との関係を図 3.2-1 に示す。ただし、2.6 項で行った構成影響・5 層 5 プライ強軸試験体と、幅影響・5 層 5 プライ強軸 b300 試験体とは実質的には同じ寸法・構成となるため、図 3.2-1 中では両者を併せて（12 体）プロットしている。幅の違いについて、Tukey-Kramer の HSD 検定を行った結果、5%水準で引張り強度の平均値に有意な差は認められなかった。そのため今回行った試験体幅の範囲では、試験体幅が引張り強度に及ぼす影響は小さいと考えられる。



写真 3.2-3 幅 150mm 試験体の破壊形態の例



写真 3.2-4 幅 150mm 試験体の破壊形態の例



写真 3.2-5 幅 300mm 試験体の破壊形態の例



写真 3.2-6 幅 300mm 試験体の破壊形態の例



写真 3.2-7 幅 600mm 試験体の破壊形態の例



写真 3.2-8 幅 600mm 試験体の破壊形態の例

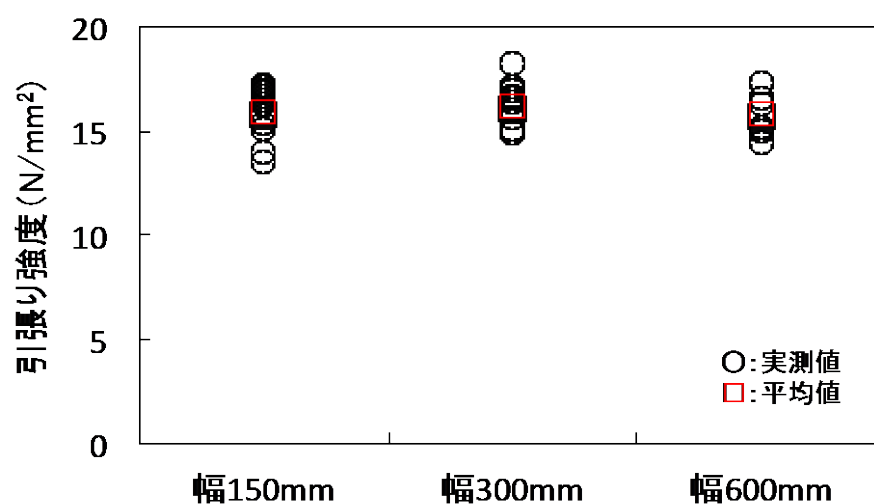


図 3.3-1 試験体幅と引張り強度との関係

### 3.2.4 まとめ

試験体幅をそれぞれ 150mm、300mm、600mm である 5 層 5 プライ強軸の試験体の引張り試験を行った。引張り試験時のスパンチャック間距離は試験体幅に関わらず 3000mm とした。引張り試験の結果、幅の違いに関して引張り強度の平均値に有意な差は認められなかった。そのため今回行った試験体幅の範囲では、試験体幅が引張り強度に及ぼす影響は小さいと考えられた。

### 3.3 まとめ

試験体幅が面外曲げ及び縦引張り強度に与える影響を確認した。

- 1) 面外曲げ強度試験を、試験体幅 150mm、300mm、600mm、1200mm、2400mm で行ったところ、平均値が徐々に低下するとともにバラツキも減少する傾向が確認された。面外曲げ強度に対する試験体幅の寸法調整係数としては、0.070 が得られた。なお、600mm 幅の数値が低いあるいは 1200mm 幅、2400mm 幅の数値が高い点については試験データを精査する必要があるが、これを考慮して 150mm、300mm、600mm のみで寸法調整係数を算出すると 0.149 となった(図 3.4-1)。
- 2) 縦引張り強度試験を、試験体幅 150mm、300mm、600mm で行ったところ、統計的に優位な差異は確認されず、平均値、バラツキについても特徴は得られなかった。

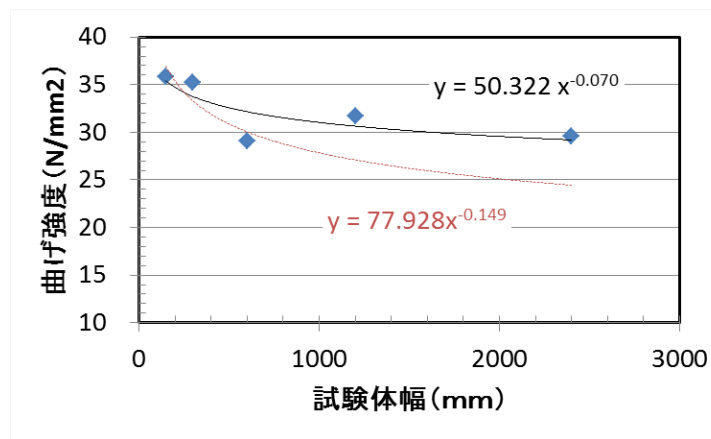


図 3.4-1 試験体幅と面外曲げ強度の関係

#### 4. 樹種の影響解明

##### 【目的】

曲げヤング係数とせん断強さの比がスギとは異なる樹種としてカラマツとヒノキを使用した CLT を製造し、その強度性能評価を行う。



## 4.1 道産樹種を用いた CLT 強度性能の検討

### 4.1.1 面外曲げ

#### (1) 試験方法

試験体の断面寸法と試験スパン、試験体数を外層ラミナの繊維方向（強軸・弱軸）および層構成ごとに表 4.1.1-1 に示す。

表 4.1.1-1 面外曲げ試験体の仕様

軸方向	層構成	厚さ mm	幅 mm	試験スパン mm	試験体数
強軸	3 層 3 プライ	90	300	1890	6
	3 層 4 プライ	120	300	2520	6
	5 層 5 プライ	150	300	3150	6
	5 層 7 プライ	210	300	4410	6
	7 層 7 プライ	210	300	4410	6
	9 層 9 プライ	270	300	5670	6
弱軸	3 層 3 プライ	90	300	1890	6
	3 層 4 プライ	120	300	2520	6
	5 層 5 プライ	150	300	3150	6
	5 層 7 プライ	210	300	4410	6
	7 層 7 プライ	210	300	4410	6
	9 層 9 プライ	270	300	5670	6

面外曲げ試験は、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 6～8mm/分、弱軸試験体では 12～15mm/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 4.1.3-1 に示す。

曲げ試験前には、非破壊試験法による動的弾性係数の測定を行い、曲げたわみ振動法により見かけの曲げヤング係数、T.G.H 法により真の曲げヤング係数とせん断弾性係数を求めた。

曲げ試験終了後には、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、全乾重量法により含水率を測定した。

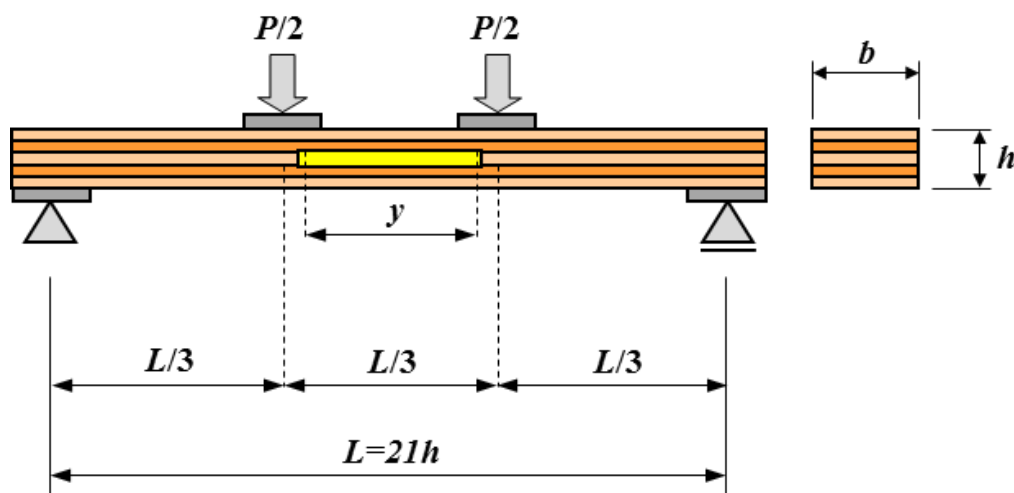


図 4.1.1-1 面外曲げ試験の加力条件

## (2) 結果

非破壊試験結果および面外曲げ試験から算出した面外曲げ性能値を表 4.1.1-2～表 4.1.1-7 に、荷重変位曲線を図 4.1.1-2～図 4.1.1-3 に示す。

表 4.1.1-2 面外曲げ試験結果 (3 層 3 プライ)

3 層 3 プライ		密度 kg/m <sup>3</sup>	含水率 %	$E_{fr}$ 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>	$E_b$ kN/mm <sup>2</sup>	$f_b$ N/mm <sup>2</sup>	破壊 形態
強軸	B362S-1	516	12.3	8.9	11.5	12.4	0.38	32.8	11.1	11.5	34.7	曲げ
	B362S-2	539	13.0	8.6	11.3	12.2	0.39	31.4	10.7	12.8	49.5	せん断
	B362S-3	533	11.8	9.3	11.9	12.7	0.38	33.6	11.7	11.7	45.5	曲げ
	B362S-4	529	12.2	9.2	11.8	12.5	0.36	34.6	11.0	11.4	38.6	曲げ
	B362S-5	533	12.6	8.9	11.4	12.4	0.39	32.0	10.6	10.9	36.2	曲げ
	B362S-6	531	12.0	9.5	11.8	13.0	0.39	33.2	11.3	11.8	48.9	曲げ
	AV	530	12.3	9.1	11.6	12.6	0.38	32.9	11.1	11.7	42.2	
	CV(%)	1.4	3.3	3.5	2.0	2.4	2.9	3.5	3.6	5.4	15.5	
弱軸	B368W-1	538	11.7	3.7	1.9	1.7	0.051	33.5	0.64	0.60	6.4	曲げ
	B368W-2	537	10.0	3.7	2.0	1.8	0.052	35.1	0.63	0.59	6.5	曲げ
	B368W-3	524	11.2	3.4	2.0	1.9	0.046	40.5	0.62	0.58	6.5	曲げ
	B368W-4	537	10.4	3.7	2.1	1.9	0.052	37.3	0.65	0.64	7.6	曲げ
	B368W-5	523	11.2	3.8	2.4	2.3	0.047	48.9	0.71	0.70	9.1	曲げ
	B368W-6	533	10.4	3.8	2.0	1.8	0.056	32.8	0.61	0.58	9.2	曲げ
	AV	532	10.8	3.7	2.1	1.9	0.051	38.0	0.64	0.62	7.5	
	CV(%)	1.3	6.0	4.7	9.3	10.3	7.4	15.8	5.6	7.7	17.6	

表 4.1.1-3 面外曲げ試験結果 (3 層 4 プライ)

3 層 4 プライ		密度 kg/m <sup>3</sup>	含水率 %	$E_{fr}$ 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>	$E_b$ kN/mm <sup>2</sup>	$f_b$ N/mm <sup>2</sup>	破壊 形態
強軸	B363S-1	546	11.7	7.2	10.9	12.1	0.26	47.2	10.4	11.3	28.4	曲げ
	B363S-2	537	12.8	7.3	11.0	12.4	0.24	51.2	10.5	11.9	28.7	曲げ
	B363S-3	524	12.2	7.7	11.6	13.0	0.24	54.6	11.2	12.1	34.8	せん断
	B363S-4	528	12.8	7.5	11.1	12.4	0.24	50.8	10.8	11.7	41.5	せん断
	B363S-5	537	12.8	7.5	11.0	12.3	0.25	48.3	10.6	11.6	29.4	曲げ
	B363S-6	523	12.5	7.4	11.0	12.3	0.24	51.0	10.8	11.6	33.1	曲げ
	AV	533	12.5	7.4	11.1	12.4	0.25	50.5	10.7	11.7	32.7	
	CV(%)	1.7	3.5	2.2	2.2	2.5	3.0	5.1	2.5	2.5	15.4	
弱軸	B369W-1	510	11.3	5.7	2.6	2.6	0.15	17.2	1.6	1.6	11.2	曲げ
	B369W-2	516	12.4	5.1	2.5	2.4	0.15	16.5	1.5	1.4	11.6	曲げ
	B369W-3	514	13.3	4.8	2.4	2.3	0.14	16.7	1.3	1.3	9.8	曲げ
	B369W-4	525	12.3	5.6	2.7	2.5	0.15	16.7	1.6	1.6	11.9	曲げ
	B369W-5	533	12.3	6.0	2.3	2.3	0.20	11.6	1.6	1.6	11.4	曲げ
	B369W-6	526	12.1	5.6	2.6	2.5	0.16	15.7	1.6	1.6	11.6	曲げ
	AV	521	12.3	5.5	2.5	2.4	0.16	15.7	1.5	1.5	11.2	
	CV(%)	1.7	5.2	8.1	5.9	5.2	13.8	13.2	7.5	7.2	6.8	

※ $E_{fr}$  : 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、AV : 平均値、CV : 変動係数。

表 4.1.1-4 面外曲げ試験結果 (5 層 5 プライ)

5 層 5 プライ		密度 kg/m <sup>3</sup>	含水率 %	$E_{fr}$ 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>	$E_b$ kN/mm <sup>2</sup>	$f_b$ N/mm <sup>2</sup>	破壊 形態
強軸	B364S-1	523	12.8	7.6	9.6	10.4	0.34	30.6	9.4	9.9	37.5	曲げ
	B364S-2	540	13.4	7.9	10.2	11.0	0.34	32.6	10.1	10.6	29.6	曲げ
	B364S-3	528	12.2	8.2	10.4	11.1	0.33	33.3	10.0	10.7	34.2	曲げ
	B364S-4	525	12.1	8.4	10.7	11.5	0.34	33.6	10.5	11.3	32.7	曲げ
	B364S-5	526	13.2	8.1	10.0	10.8	0.33	32.3	9.8	10.2	29.7	曲げ
	B364S-6	527	13.0	7.7	9.7	10.5	0.34	30.9	9.4	9.8	35.0	曲げ
	AV	528	12.8	8.0	10.1	10.9	0.34	32.2	9.9	10.4	33.1	
	CV(%)	1.2	4.4	4.0	4.1	3.9	0.9	3.8	4.2	5.4	9.4	
弱軸	B370W-1	520	12.5	4.3	2.2	2.4	0.27	8.8	2.2	2.3	10.8	曲げ
	B370W-2	522	12.6	4.3	2.2	2.4	0.26	9.4	2.1	2.1	12.2	曲げ
	B370W-3	517	11.3	4.6	2.4	2.6	0.23	11.4	2.3	2.3	15.1	曲げ
	B370W-4	519	13.0	4.3	2.2	2.4	0.28	8.4	2.2	2.2	12.2	曲げ
	B370W-5	515	12.2	4.4	2.4	2.5	0.22	11.2	2.4	2.4	15.3	曲げ
	B370W-6	513	11.5	4.3	2.2	2.4	0.26	9.0	2.2	2.2	14.5	曲げ
	AV	517	12.2	4.4	2.3	2.4	0.25	9.7	2.2	2.3	13.4	
	CV(%)	0.7	5.5	2.8	3.4	3.5	9.5	13.3	3.8	4.3	13.8	

表 4.1.1-5 面外曲げ試験結果 (5 層 7 プライ)

5 層 7 プライ		密度 kg/m <sup>3</sup>	含水率 %	$E_{fr}$ 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>	$E_b$ kN/mm <sup>2</sup>	$f_b$ N/mm <sup>2</sup>	破壊 形態
強軸	B365S-1	529	12.7	9.6	11.8	12.8	0.37	34.9	11.4	12.8	34.4	曲げ
	B365S-2	543	13.5	9.8	12.1	13.0	0.40	33.0	11.5	11.9	33.7	曲げ
	B365S-3	526	13.6	9.7	11.7	12.6	0.38	33.4	11.3	11.9	39.1	曲げ
	B365S-4	526	13.1	9.5	11.7	12.6	0.41	31.0	11.4	12.3	32.4	曲げ
	B365S-5	538	13.0	9.9	12.0	12.9	0.40	31.8	11.4	12.2	33.9	曲げ
	B365S-6	528	13.3	9.8	11.8	12.7	0.40	31.8	11.4	12.2	29.7	曲げ
	AV	532	13.2	9.7	11.8	12.8	0.39	32.6	11.4	12.2	33.9	
	CV(%)	1.3	2.8	1.6	1.3	1.3	4.0	4.3	0.7	2.7	9.1	
弱軸	B371W-1	545	12.9	3.3	3.0	3.2	0.05	63.3	0.92	0.90	6.2	曲げ
	B371W-2	542	12.2	3.2	3.0	3.1	0.05	59.4	0.97	0.94	7.6	曲げ
	B371W-3	621	12.4	3.7	3.8	4.0	0.06	67.1	1.00	1.07	6.1	曲げ
	B371W-4	543	12.6	2.9	2.7	2.8	0.05	59.7	0.86	0.83	5.1	曲げ
	B371W-5	555	12.2	3.6	3.1	3.1	0.06	55.1	0.96	0.96	5.9	曲げ
	B371W-6	547	12.1	3.5	2.8	2.8	0.06	46.1	1.06	1.05	6.8	曲げ
	AV	559	12.4	3.3	3.1	3.2	0.05	58.5	0.96	0.96	6.3	
	CV(%)	5.5	2.4	8.6	12.1	13.7	9.5	12.4	7.1	9.5	13.5	

※ $E_{fr}$  : 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、AV : 平均値、CV : 変動係数。

表 4.1.1-6 面外曲げ試験結果 (7 層 7 プライ)

7 層 7 プライ		密度 kg/m <sup>3</sup>	含水率 %	$E_{fr}$ 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>	$E_b$ kN/mm <sup>2</sup>	$f_b$ N/mm <sup>2</sup>	破壊 形態
強軸	B366S-1	518	13.1	7.6	9.5	10.3	0.36	28.6	9.4	10.1	26.7	曲げ
	B366S-2	524	12.5	7.5	9.6	10.5	0.33	31.2	9.3	10.1	29.9	曲げ
	B366S-3	523	13.1	7.3	9.1	9.8	0.35	28.1	8.8	9.4	21.2	曲げ
	B366S-4	515	12.4	7.4	9.5	10.3	0.32	31.9	9.0	9.8	26.8	曲げ
	B366S-5	520	12.6	7.6	9.5	10.2	0.35	29.0	9.1	9.9	24.6	曲げ
	B366S-6	515	12.6	7.6	9.0	9.7	0.36	26.8	8.8	9.3	24.4	曲げ
	AV	519	12.7	7.5	9.4	10.1	0.35	29.2	9.1	9.8	25.6	
	CV(%)	0.7	2.4	1.8	2.6	2.9	4.6	6.6	2.6	3.4	11.4	
弱軸	B372W-1	517	12.1	4.7	3.2	3.4	0.26	13.2	3.0	3.1	11.6	曲げ
	B372W-2	517	12.8	5.0	3.1	3.4	0.26	12.9	3.2	3.3	14.5	曲げ
	B372W-3	530	12.3	4.5	3.5	3.7	0.20	19.1	2.7	2.8	12.3	曲げ
	B372W-4	522	13.0	4.6	3.2	3.4	0.25	13.8	3.1	3.2	12.2	曲げ
	B372W-5	519	12.7	5.0	3.2	3.4	0.29	11.6	3.1	3.2	15.0	曲げ
	B372W-6	532	12.9	4.7	3.2	3.5	0.28	12.2	3.1	3.1	15.1	曲げ
	AV	523	12.6	4.8	3.2	3.5	0.26	13.8	3.0	3.1	13.5	
	CV(%)	1.2	2.7	4.4	4.5	4.0	13.4	19.6	5.0	5.1	11.6	

表 4.1.1-7 面外曲げ試験結果 (9 層 9 プライ)

9 層 9 プライ		密度 kg/m <sup>3</sup>	含水率 %	$E_{fr}$ 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>	$E_b$ kN/mm <sup>2</sup>	$f_b$ N/mm <sup>2</sup>	破壊 形態
強軸	B367S-1	522	11.9	7.2	8.8	9.6	0.34	28.1	8.5	9.8	22.3	曲げ
	B367S-2	511	12.2	6.8	8.1	8.8	0.34	25.6	8.1	8.7	22.4	曲げ
	B367S-3	509	12.4	7.0	8.6	9.3	0.32	29.0	8.2	9.0	20.9	曲げ
	B367S-4	508	12.7	6.5	7.6	8.1	0.35	23.0	7.5	8.0	20.0	曲げ
	B367S-5	518	12.0	7.1	8.8	9.5	0.32	29.4	8.3	9.2	20.0	曲げ
	B367S-6	518	12.3	7.3	8.8	9.4	0.34	27.5	8.3	8.7	22.9	曲げ
	AV	514	12.3	7.0	8.5	9.1	0.34	27.1	8.2	8.9	21.4	
	CV(%)	1.1	2.4	4.1	6.0	6.1	3.8	8.9	4.4	6.8	5.9	
弱軸	B373W-1	514	12.2	5.1	3.4	3.7	0.33	11.2	3.7	3.9	13.6	曲げ
	B373W-2	515	12.0	5.0	3.4	3.7	0.31	11.9	3.4	3.6	13.8	曲げ
	B373W-3	513	12.2	4.9	3.1	3.3	0.38	8.9	3.4	3.5	13.0	曲げ
	B373W-4	513	12.1	4.8	3.4	3.7	0.30	12.1	3.5	3.7	12.4	曲げ
	B373W-5	517	12.0	5.2	3.8	4.1	0.29	14.2	3.7	3.9	13.7	曲げ
	B373W-6	521	11.9	5.1	3.5	3.7	0.33	11.4	3.5	3.7	12.8	曲げ
	AV	516	12.1	5.0	3.4	3.7	0.32	11.6	3.5	3.7	13.2	
	CV(%)	0.6	1.2	3.3	6.6	6.2	9.8	14.8	3.5	4.4	4.4	

※ $E_{fr}$  : 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、AV : 平均値、CV : 変動係数。

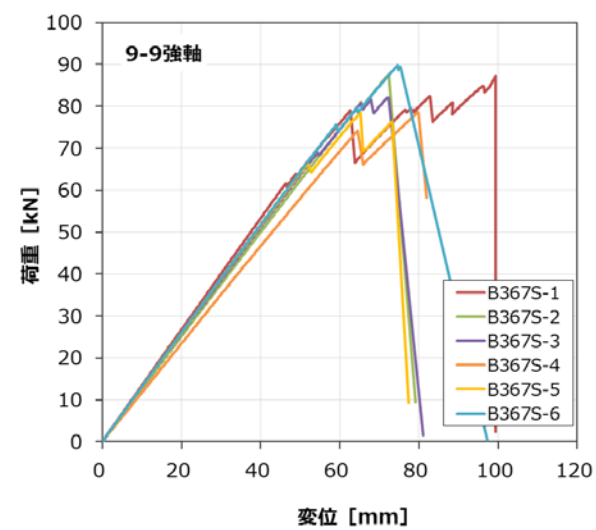
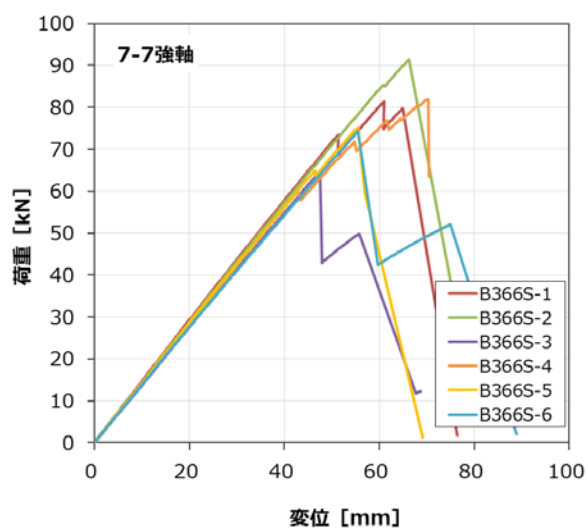
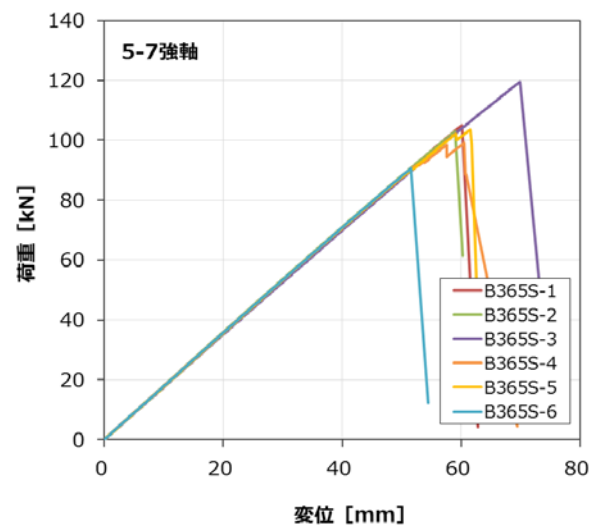
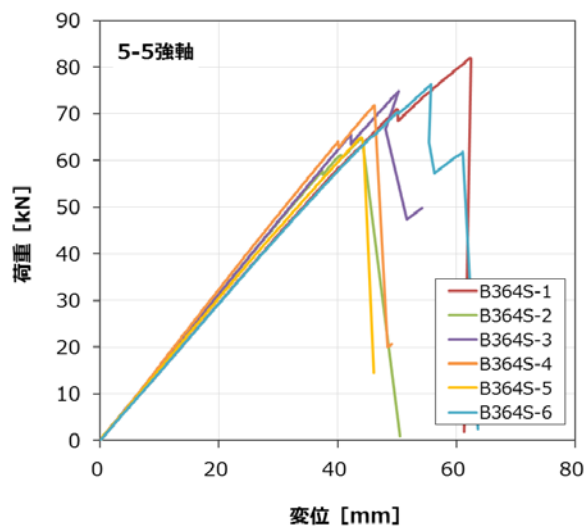
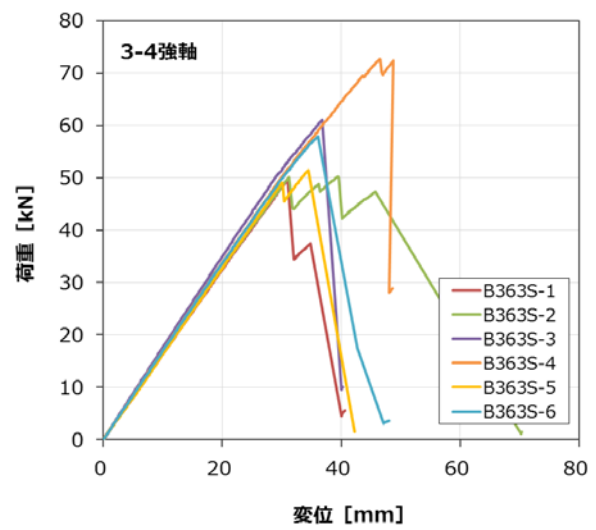
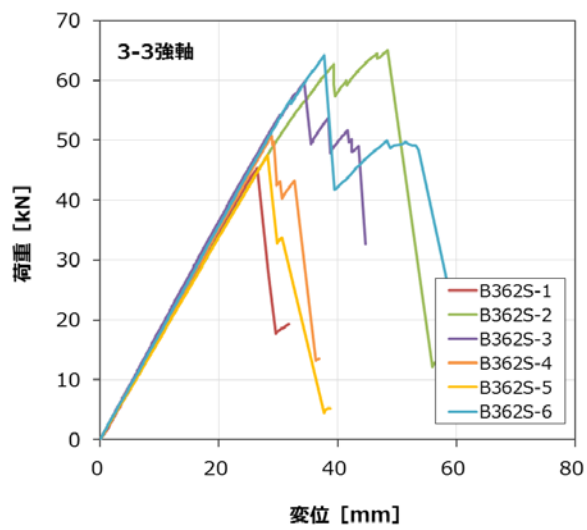


図 4.1.1-2 荷重変位曲線（面外曲げ・強軸試験体）



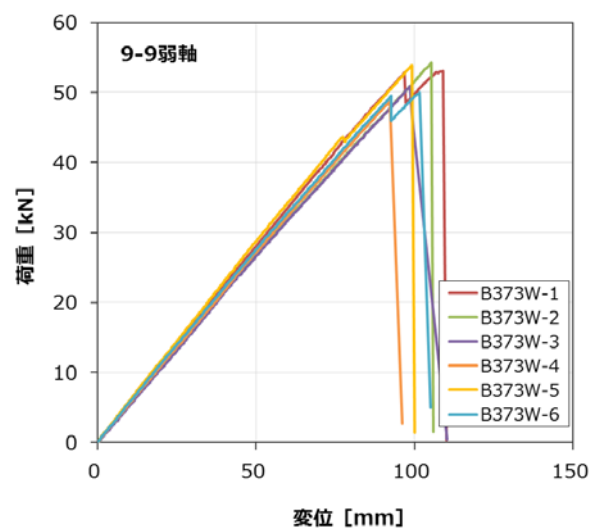
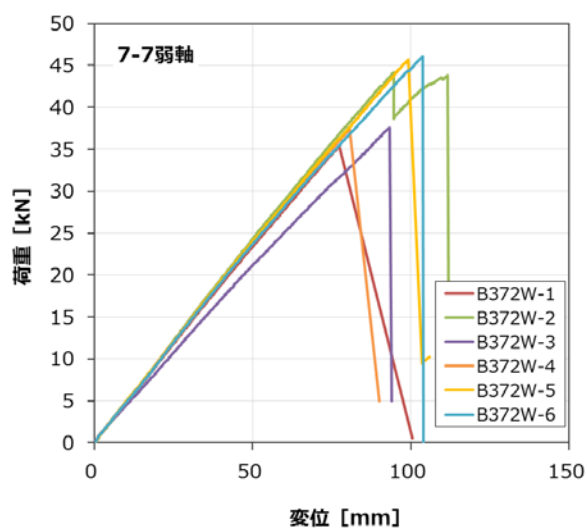
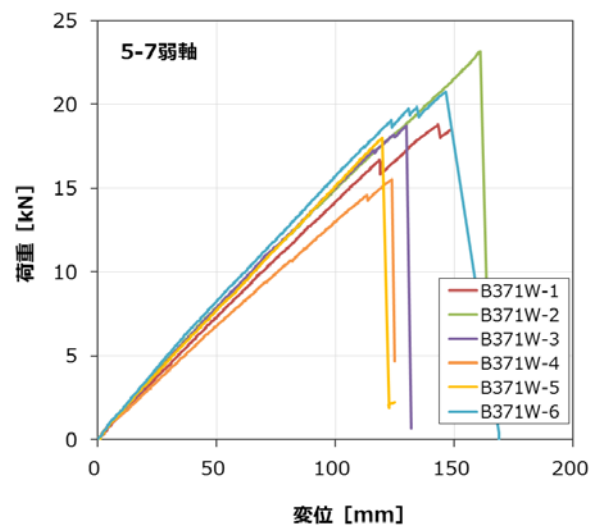
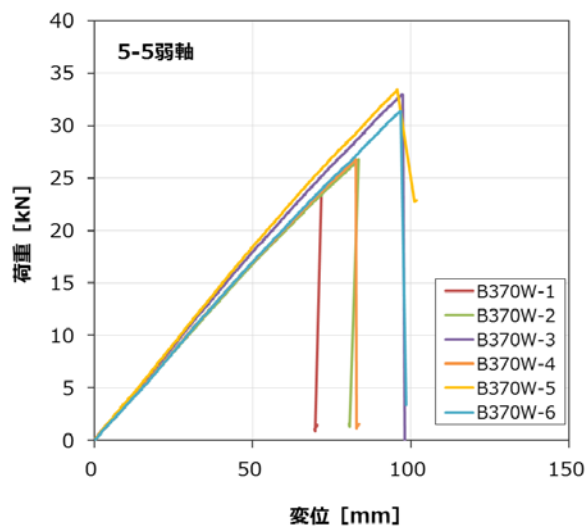
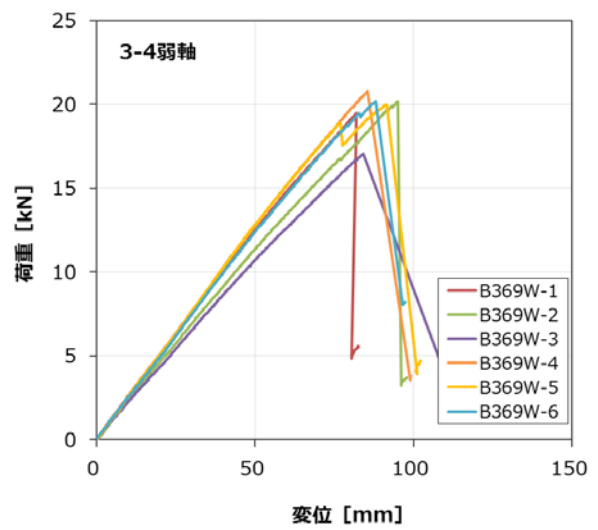
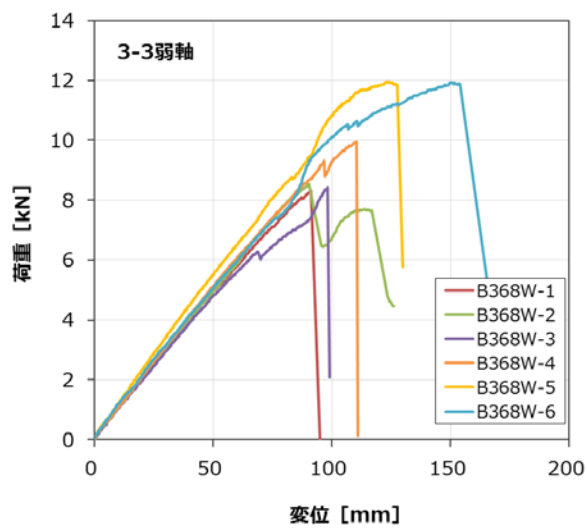
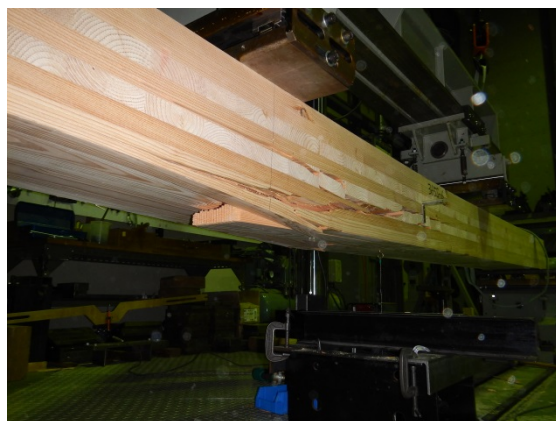


図 4.1.1-3 荷重変位曲線（面外曲げ・弱軸試験体）

次に、破壊の様子を写真 4.1.1-1～4.1.1-2 に示す。破壊形態は、基本的には曲げ破壊が生じた。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。3 層 3 プライと 3 層 4 プライの強軸の一部の試験体では、直交層ラミナのローリングシアによるせん断破壊が生じたが、破壊荷重は曲げ破壊が生じた試験体よりも高めであり、曲げ耐力の高い試験体で曲げ応力よりもせん断応力が先にクリティカルになったものと推察された。それらの荷重変位曲線を見ると、曲げ破壊と同様に急激に荷重が低下しており、脆性的なせん断破壊が生じたことが看取された。



【5 層 5 プライの曲げ破壊】



【5 層 7 プライの曲げ破壊】



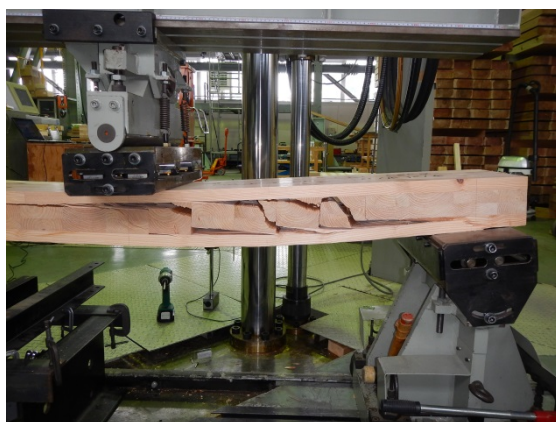
【7 層 7 プライの曲げ破壊】



【9 層 9 プライの曲げ破壊】



【3 層 3 プライのせん断破壊】



【3 層 4 プライのせん断破壊】

写真 4.1.1-1 破壊の様子（強軸試験体）





【3層3プライの曲げ破壊】



【3層4プライの曲げ破壊】



【5層5プライの曲げ破壊】



【5層7プライの曲げ破壊】



【7層7プライの曲げ破壊】



【9層9プライの曲げ破壊】

写真 4.1.1-2 破壊の様子（弱軸試験体）

### (3) 考察

非破壊測定と静的試験による曲げヤング係数の比較を図 4.1.1-4 に示す。見かけの曲げヤング係数については、強軸では各層構成ともに非破壊法と静的試験の測定値が近い値となり、非破壊測定により曲げヤング係数を精度良く評価できることが確かめられた。一方、弱軸では 5 層 5 プライと 9 層 9 プライで両測定法による値が近似したもの、他のタイプでは非破壊測定値が過大となり、特に 3 層 3 プライと 5 層 7 プライで顕著であった。真の曲げヤング係数についても同様の傾向となった。

非破壊測定によるヤング係数とせん断弾性係数の比率 ( $E/G$ 、強軸試験体のみ) を図 4.1.1-5 に示す。いずれのタイプにおいても  $E/G$  は製材や集成材の比率 (15 倍) より大きな値となり、特に 3 層 4 プライの  $E/G$  が顕著に大きく、直交層を含む CLT の特徴である、曲げたわみに占めるせん断たわみが大きな材料であることが示された。

カラマツ CLT の曲げ強さと真の曲げヤング係数の関係を図 4.1.1-6 に示す。曲げヤング係数と曲げ強さには正の相関が認められた。

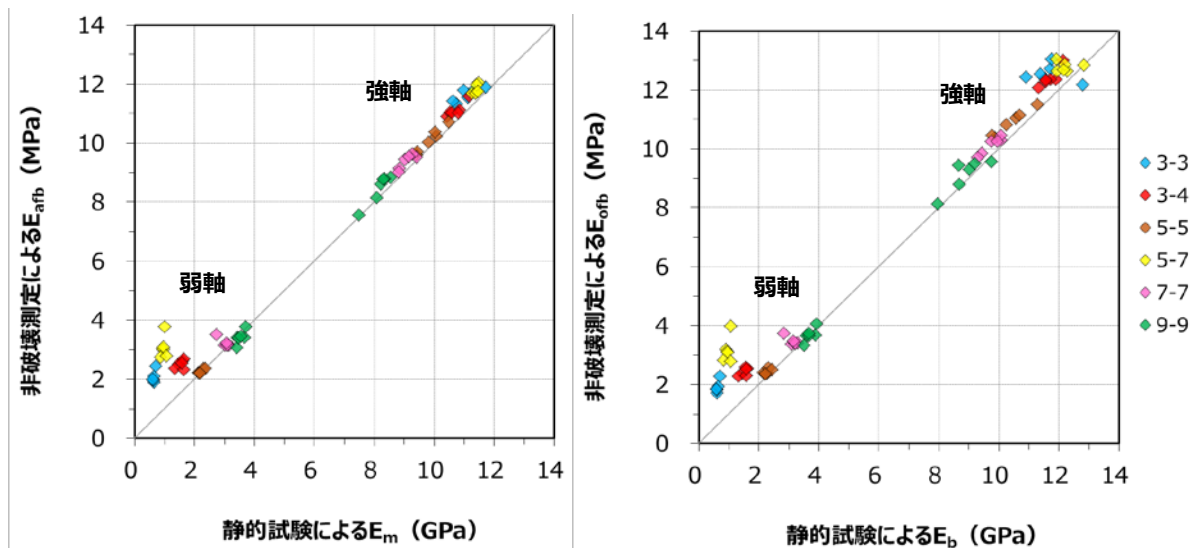


図 4.1.1-4 非破壊法測定と静的試験による曲げヤング係数の測定値

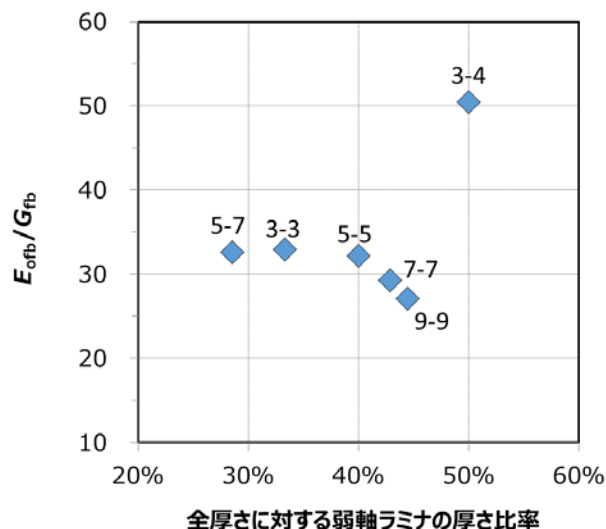


図 4.1.1-5 非破壊測定による真のヤング係数とせん断弾性係数の比率 (強軸試験体のみ)

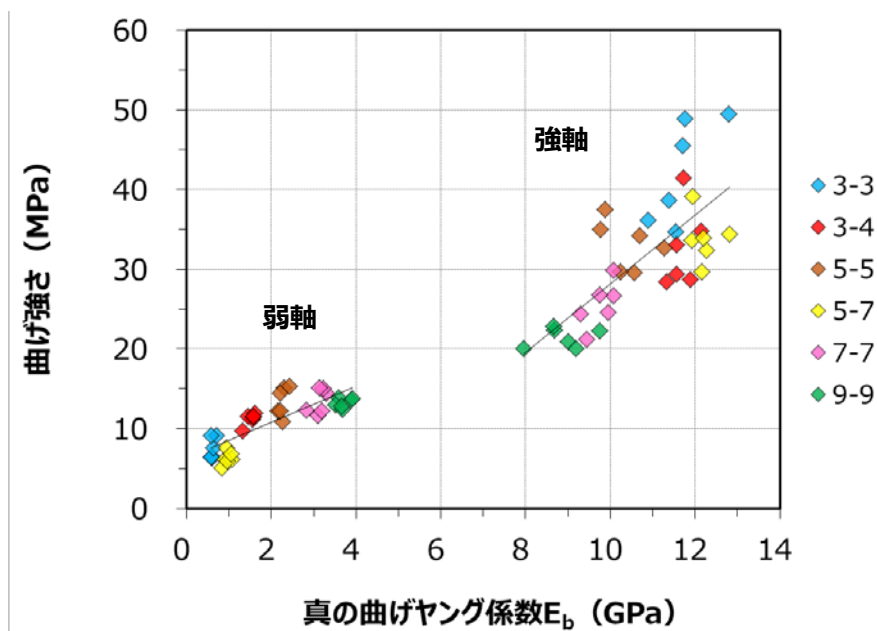


図 4.1.1-6 カラマツ CLT の曲げ強さと真の曲げヤング係数の関係

静的試験による見かけの曲げヤング係数  $E_m$  の平均値および曲げ強さの統計的下限值（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 JAS 基準値（Mx120）と併せて図 4.1.1-7 および図 4.1.1-8 に示す。強軸試験体では 5 層 7 プライを除くと、プライ数が増えるにつれて曲げヤング係数は低下している。強軸のみ設定されている JAS 基準値との比較では、曲げヤング係数および曲げ強さともに測定値が Mx120 の基準値を上回ることが確かめられた。

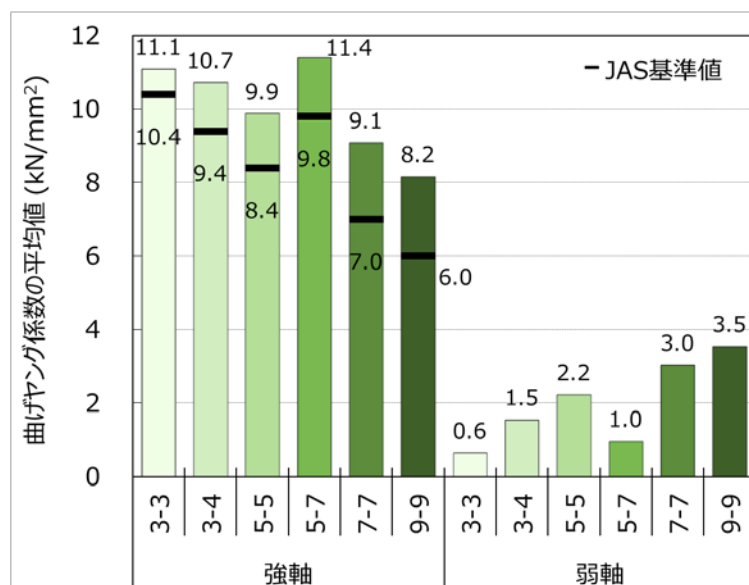


図 4.1.1-7 見かけの曲げヤング係数の平均値



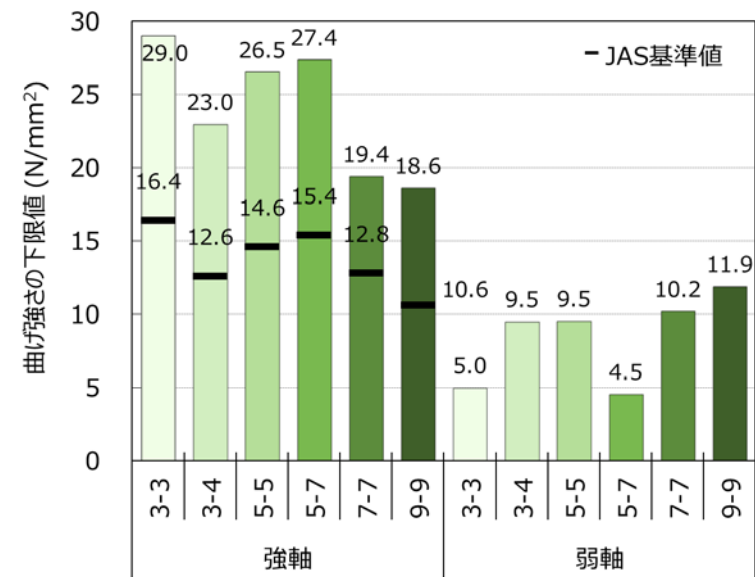


図 4.1.1-8 曲げ強さの統計的下限值

なお、JAS 算定式（式 1）による曲げ強さは均一断面仮定であり、ラミナ構成と実際のヤング係数を考慮するために等価断面法（式 2）により最外縁応力を試算した（図 4.1.1-9）。その結果、均一断面よりも等価断面で計算するほうが層構成による差が小さくなっており、引張強度に近づいていると考えられる。カラマツラミナの試験データ<sup>1)</sup>によれば M120 相当のたて継ぎ材の引張強さの平均値は 37.2MPa であり、3 層 3 プライや 5 層 5 プライ以外のタイプでは試算値に近い値となっている。外層ラミナに生じる応力状態が引張試験に近づくような多層タイプでは、引張強さと等価断面法により CLT の曲げ強さを精度良く推定可能であることが示されている。

$$(式 1) \quad \sigma_b = \frac{M}{bh^2/6}$$

$$(式 2) \quad \sigma_t = \frac{M \times h/2 \times E_0}{\sum E_i I_i}$$

ここで、 $M$ ：曲げモーメント、 $b$ ：幅、 $h$ ：厚さ、 $E_0$ ：外層のヤング係数、 $\sum E_i I_i$ ：曲げ剛性の総和

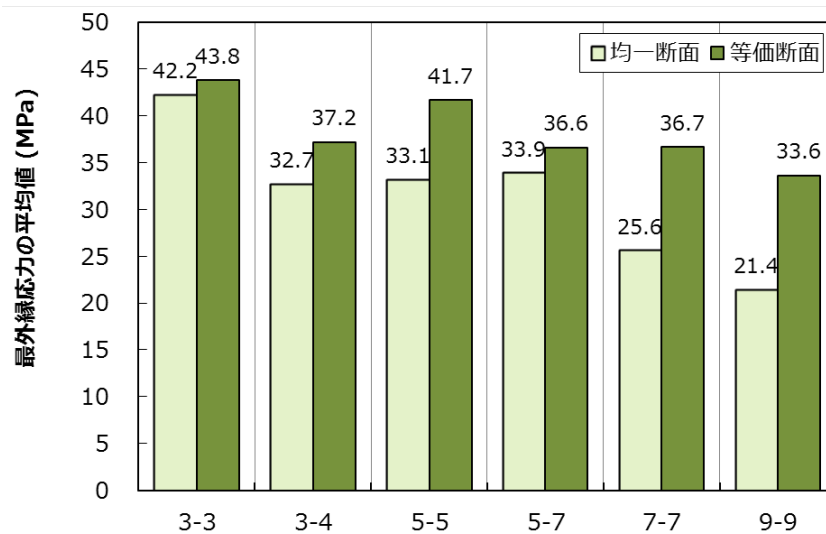


図 4.1.1-9 最外縁応力の計算結果

#### （４）まとめ

北海道産カラマツを用いた CLT（MX120 相当）の面外曲げ性能を検討した。その結果，強軸試験体では，非破壊測定法による曲げヤング係数の測定値が静的試験の実験値と近い値となること，非破壊測定によるヤング係数とせん断弾性係数の比率（E/G）は製材や集成材の比率（15 倍）より大きな値となり特に 3 層 4 プライで顕著であること、曲げ特性はすべて MX120 の JAS 基準値を上回ること、等価断面法と引張強さから多層タイプの曲げ強さが推定可能であることが確かめられた。

#### 参考文献

- 1) 平成 25 年度補正 CLT 短期強度報告書

#### 4.1.2 面外せん断

##### (1) 試験方法

試験体の断面寸法と試験スパン、試験体数を外層ラミナの繊維方向（強軸・弱軸）および層構成ごとに表 4.1.2-1 に示す。

表 4.1.2-1 面外せん断試験体の仕様

軸方向	層構成	厚さ mm	幅 mm	支点板幅 mm	載荷板幅 mm	試験スパン mm	試験体数
強軸	3層3プライ	90	300	90	90	1890	6
	3層4プライ	120	300	120	120	2520	6
	5層5プライ	150	300	150	200	3150	6
	5層7プライ	210	300	150	200	4410	4
	7層7プライ	210	300	150	200	4410	4
	9層9プライ	270	300	200	200	5670	4
弱軸	3層3プライ	90	300	90	90	1890	6
	3層4プライ	120	300	120	120	2520	6
	5層5プライ	150	300	150	200	3150	6
	5層7プライ	210	300	150	200	4410	4
	7層7プライ	210	300	150	200	4410	4
	9層9プライ	270	300	200	200	5670	4

面外せん断試験は、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。試験は、直交集成板の JAS に準じて行い、加力方式は中央集中荷重方式、スパンは試験体厚さの 5 倍とした。加圧板幅は支点部 150mm、中央載荷部 200mm としたが、9 層 9 プライでは支点部も 200mm とし、3 層 4 プライでは支点部と載荷部ともに 120mm、3 層 3 プライでは支点部と載荷部ともに 90mm とした。加力速度は 2mm/分とした。スパン中央のたわみ量は、支点のめり込み量を含めないように試験体の両側面中央部においてヨークを用いて測定した値の平均値とした。また、終局状態までの変位を計測するために試験体の下面変位も測定した。加力条件を図 4.1.2-1 に示す。

曲げ試験終了後には、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、全乾重量法により含水率を測定した。

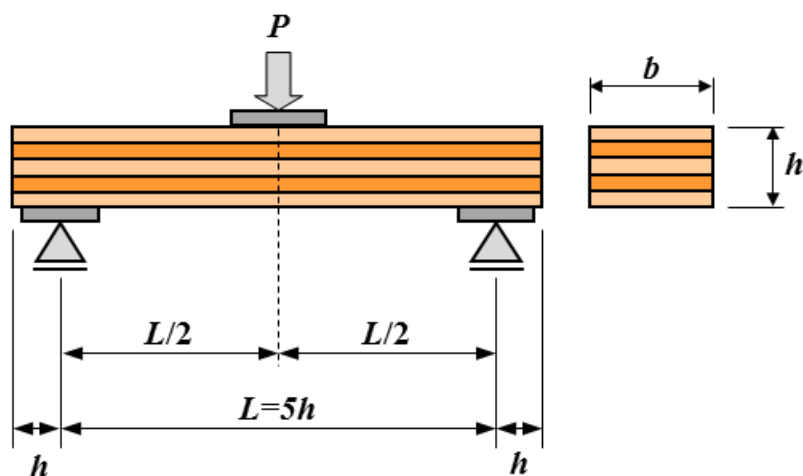


図 4.1.2-1 面外せん断試験の加力条件

## (2) 結果

非破壊試験結果および面外せん断試験から算出した面外せん断性能値を表 4.1.2-2～表 4.1.2-4 に、荷重変位曲線を図 4.1.2-2～図 4.1.2-3 に示す。

表 4.1.2-2 面外せん断試験結果 (3 層 3 プライおよび 3 層 4 プライ)

3 層 3 プライ		密度 kg/m <sup>3</sup>	含水率 %	$f_s$ N/mm <sup>2</sup>	破壊 形態	3 層 4 プライ		密度 kg/m <sup>3</sup>	含水率 %	$f_s$ N/mm <sup>2</sup>	破壊 形態
強軸	B362S-1	516	12.1	3.80	せん断	強軸	B363S-1	546	12.6	2.75	せん断
	B362S-2	539	13.2	3.71	せん断		B363S-2	537	12.8	2.85	せん断
	B362S-3	533	12.4	3.96	せん断		B363S-3	524	12.8	2.75	せん断
	B362S-4	529	12.5	3.95	せん断		B363S-4	528	12.1	2.78	せん断
	B362S-5	533	12.2	4.07	せん断		B363S-5	537	12.8	2.74	せん断
	B362S-6	531	13.1	3.76	せん断		B363S-6	523	12.7	2.71	せん断
	平均値	530	12.6	3.87			平均値	533	12.6	2.76	
	変動係数	1.4%	3.7%	3.7%			変動係数	1.7%	2.2%	1.8%	
弱軸	B368W-1	538	10.7	1.15	曲げ	弱軸	B369W-1	510	11.9	1.39	曲げ
	B368W-2	537	10.8	1.15	曲げ		B369W-2	516	11.4	0.92	曲げ
	B368W-3	524	10.8	1.21	曲げ		B369W-3	514	11.7	1.28	曲げ
	B368W-4	537	10.7	1.21	圧縮		B369W-4	525	11.4	1.14	曲げ
	B368W-5	523	10.4	1.04	曲げ		B369W-5	533	11.2	1.37	曲げ
	B368W-6	533	10.5	1.22	曲げ		B369W-6	526	11.6	1.58	曲げ
	平均値	532	10.7	1.16			平均値	521	11.5	1.28	
	変動係数	1.3%	1.4%	5.9%			変動係数	1.7%	2.1%	17.8%	

表 4.1.2-3 面外せん断試験結果 (5 層 5 プライおよび 5 層 7 プライ)

5 層 5 プライ		密度 kg/m <sup>3</sup>	含水率 %	$f_s$ N/mm <sup>2</sup>	破壊 形態	5 層 7 プライ		密度 kg/m <sup>3</sup>	含水率 %	$f_s$ N/mm <sup>2</sup>	破壊 形態
強軸	B364S-1	523	12.3	3.19	せん断	強軸	B365S-1	529	13.4	3.37	せん断
	B364S-2	540	13.1	3.48	せん断		B365S-2	543	12.7	3.27	せん断
	B364S-3	528	12.8	3.38	せん断		B365S-3	526	12.3	3.19	せん断
	B364S-4	525	12.7	3.59	せん断		B365S-4	526	12.8	3.24	せん断
	B364S-5	526	12.6	3.44	せん断						
	B364S-6	527	12.1	3.33	せん断						
	平均値	528	12.6	3.40			平均値	531	12.8	3.27	
	変動係数	1.2%	2.9%	4.0%			変動係数	1.5%	3.5%	2.2%	
弱軸	B370W-1	520	12.3	1.87	曲げ	弱軸	B371W-1	545	12.6	0.95	せん断
	B370W-2	522	11.5	1.78	曲げ		B371W-2	542	11.2	1.07	せん断
	B370W-3	517	13.0	1.65	曲げ		B371W-3	621	11.5	0.81	曲げ
	B370W-4	519	11.8	1.66	せん断		B371W-4	543	12.1	0.70	曲げ
	B370W-5	515	11.7	1.40	曲げ						
	B370W-6	513	11.7	1.48	曲げ						
	平均値	517	12.0	1.64			平均値	563	11.9	0.88	
	変動係数	0.7%	4.7%	10.7%			変動係数	6.9%	5.5%	18.4%	

※ $f_s$  : 面外せん断強さ。

表 4.1.2-4 面外せん断試験結果（7層7プライおよび9層9プライ）

7層7プライ		密度 kg/m <sup>3</sup>	含水率 %	$f_s$ N/mm <sup>2</sup>	破壊 形態	9層9プライ		密度 kg/m <sup>3</sup>	含水率 %	$f_s$ N/mm <sup>2</sup>	破壊 形態
強軸	B366S-1	518	12.8	2.46	せん断	強軸	B367S-1	522	12.6	2.03	せん断
	B366S-2	524	11.4	2.44	せん断		B367S-2	511	12.3	2.03	せん断
	B366S-3	523	12.7	2.39	せん断		B367S-3	509	12.2	2.09	せん断
	B366S-4	515	12.4	2.39	せん断		B367S-4	508	12.5	2.09	せん断
	平均値	520	12.3	2.42			平均値	512	12.4	2.06	
	変動係数	0.8%	5.0%	1.5%			変動係数	1.2%	1.4%	1.7%	
弱軸	B372W-1	517	11.5	1.55	せん断	弱軸	B373W-1	514	11.3	1.54	せん断
	B372W-2	517	11.6	1.29	曲げ		B373W-2	515	13.0	1.57	曲げ
	B372W-3	530	11.7	1.28	せん断		B373W-3	513	12.3	1.51	曲げ
	B372W-4	522	11.3	1.53	せん断		B373W-4	513	12.3	1.58	せん断
	平均値	522	11.5	1.41			平均値	514	12.2	1.55	
	変動係数	1.1%	1.6%	10.4%			変動係数	0.2%	5.7%	2.1%	

※ $f_s$ ：面外せん断強さ。



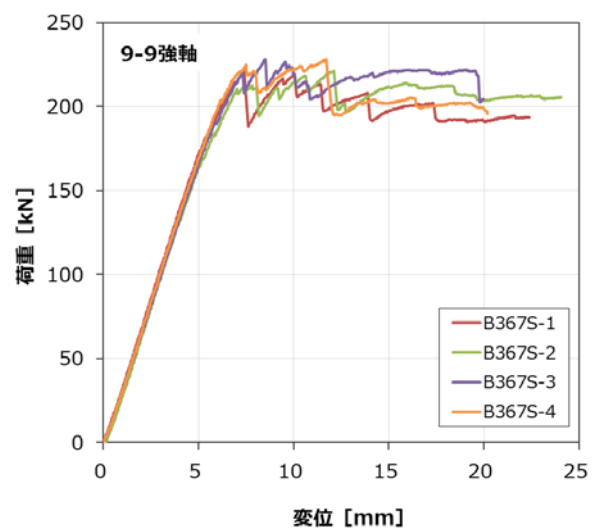
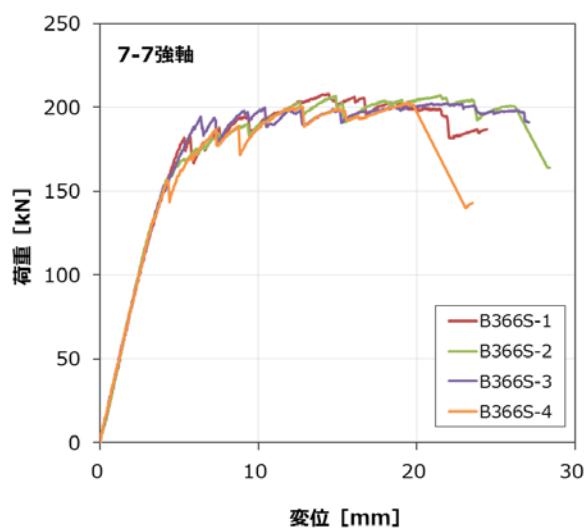
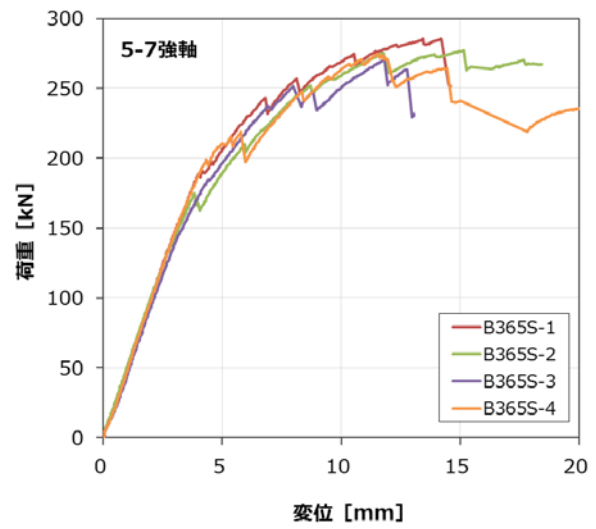
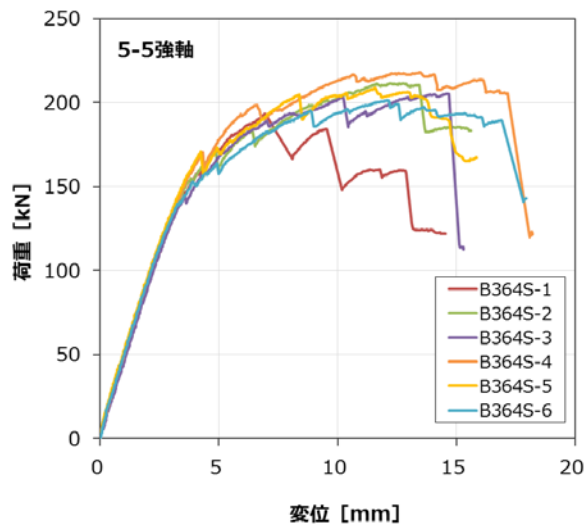
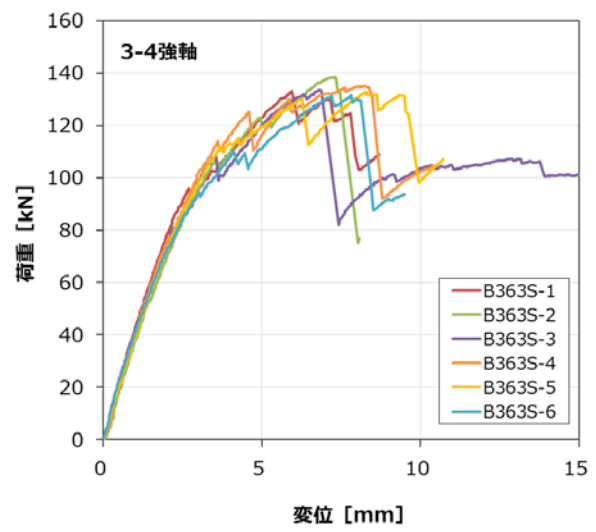
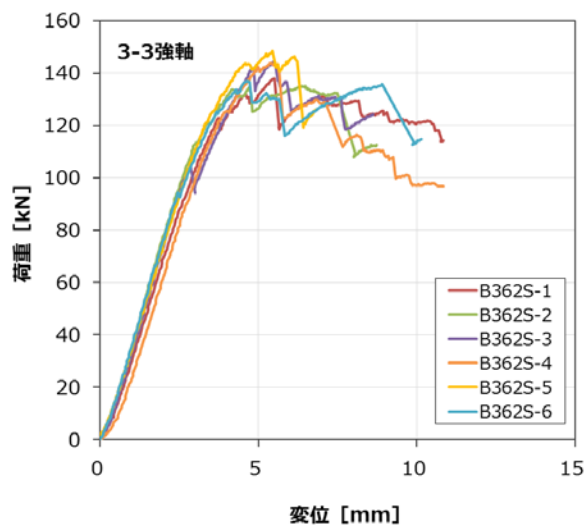


図 4.1.2-2 荷重変位曲線（面外せん断・強軸試験体）

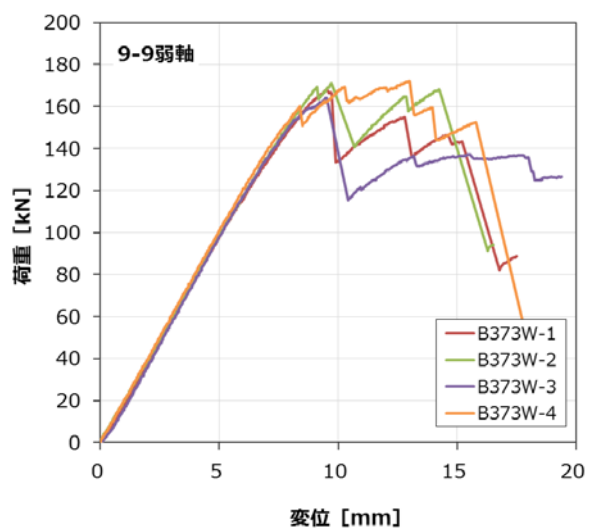
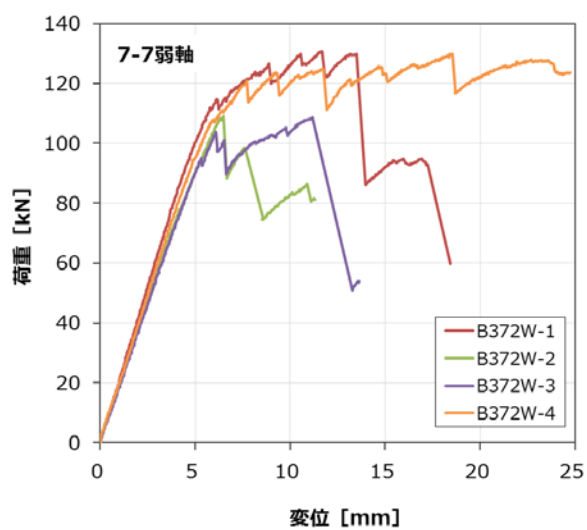
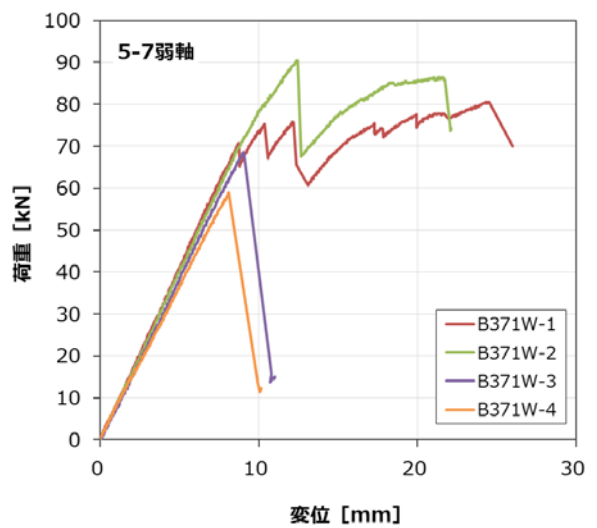
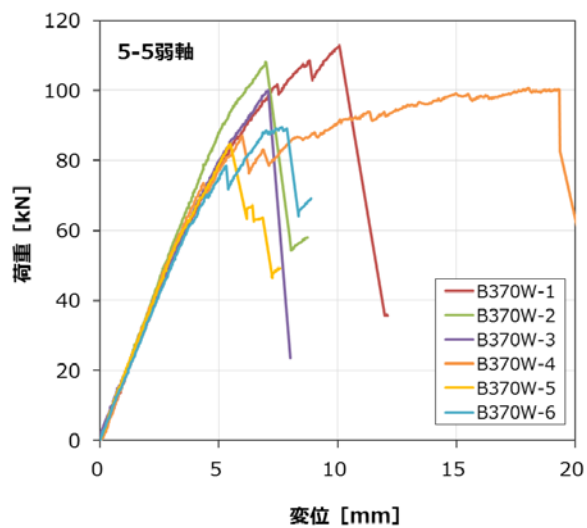
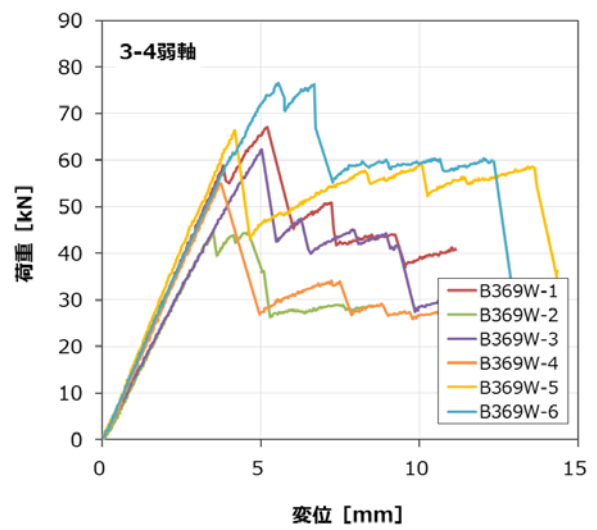
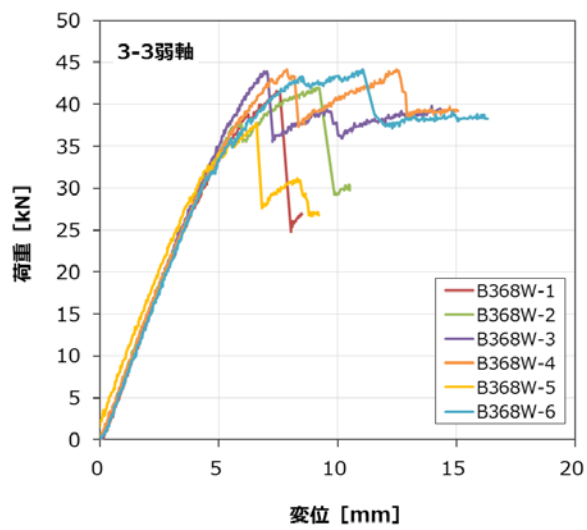


図 4.1.2-3 荷重変位曲線（面外せん断・弱軸試験体）

次に、破壊の様子を写真 4.1.2-1～4.1.2-2 に示す。破壊形態は、強軸ではすべて直交層ラミナのローリングシアによるせん断破壊が生じた。弱軸では7プライ以上のタイプではせん断破壊が半数以上であったが、5 プライ以下のタイプではほとんどが曲げ破壊であった。せん断破壊した試験体の荷重変位曲線を見ると、比例限を超えてから荷重が横ばいとなる延性破壊を示すものが多かった。せん断亀裂が広がりながら変形が進むと終局では曲げ破壊により大きく荷重低下するが、曲げ破壊時に最大荷重に達した場合でもせん断応力を負担していると考えられることから、ここでは終局の破壊形態に関わらず、最大荷重時のせん断応力をせん断強さとして算出することとした。



【3 層 3 プライのせん断破壊】



【3 層 4 プライのせん断破壊】



【5 層 5 プライのせん断破壊】



【5 層 7 プライのせん断破壊】



【7 層 7 プライのせん断破壊】



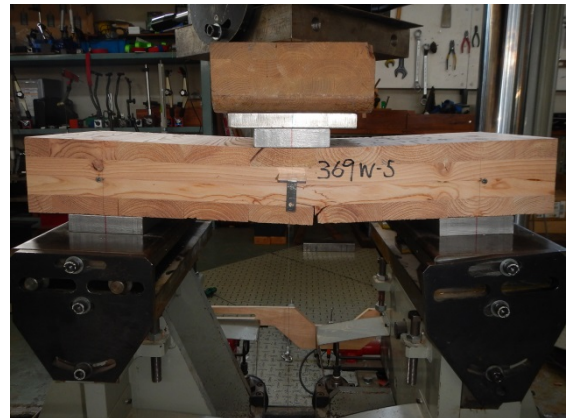
【9 層 9 プライのせん断破壊】

写真 4.1.2-1 破壊の様子（強軸試験体）

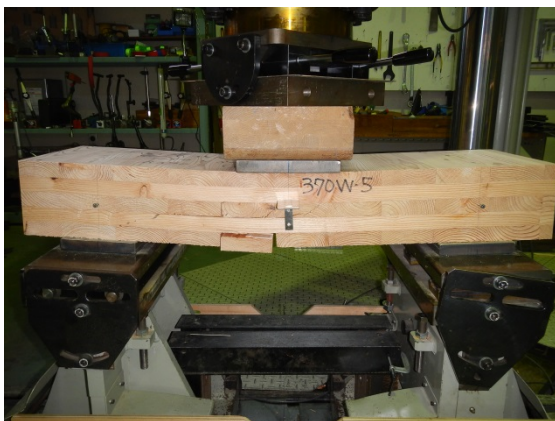




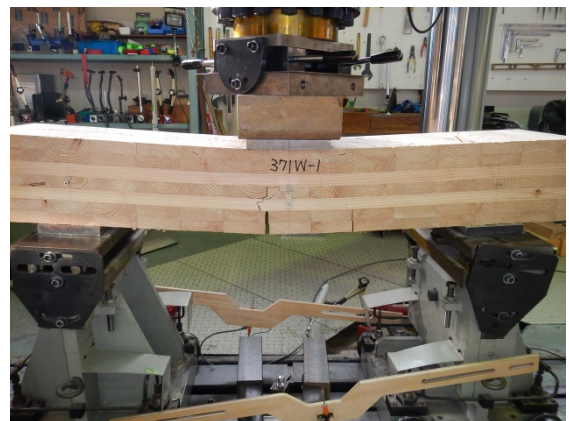
【3層3プライの曲げ破壊】



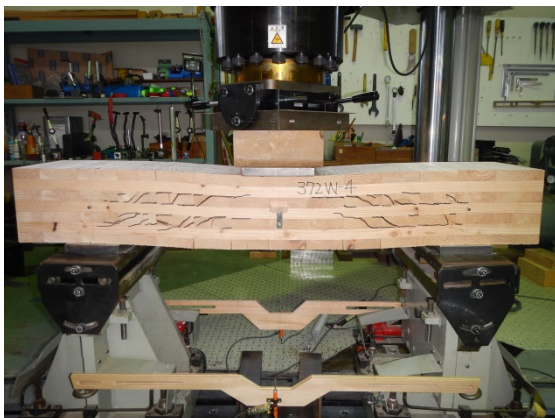
【3層4プライの曲げ破壊】



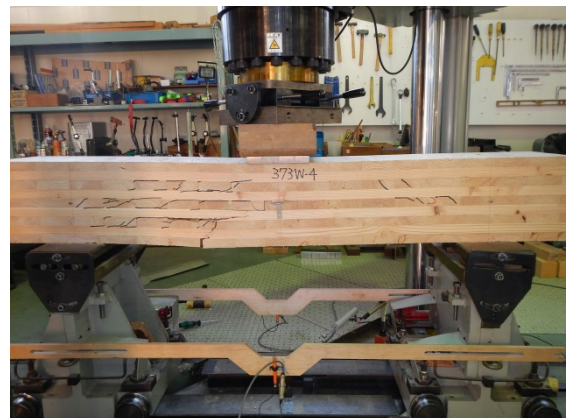
【5層5プライの曲げ破壊】



【5層7プライの曲げ破壊】



【7層7プライのせん断破壊】



【9層9プライのせん断破壊】

写真 4.1.2-2 破壊の様子（弱軸試験体）

### (3) 考察

せん断強さの統計的下限值（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 JAS 基準値と併せて図 4.1.2-6 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（ $1.5\text{N/mm}^2$ ）と設定されているものである。強軸では各層構成ともに下限値が基準値を上回った。層構成ではプライ数が増えるほどせん断強度が低くなっており、その要因としては、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内層の弱軸ラミナが回転しやすくなるためと考えられる。特に内層の直交層が隣接して積層される 3 層 4 プライでは他よりも弱軸ラミナの回転が起こりやすく、さほど試験体厚さに差がない 3 層 3 プライや 5 層 5 プライよりも低いせん断強度となるものと推察された。

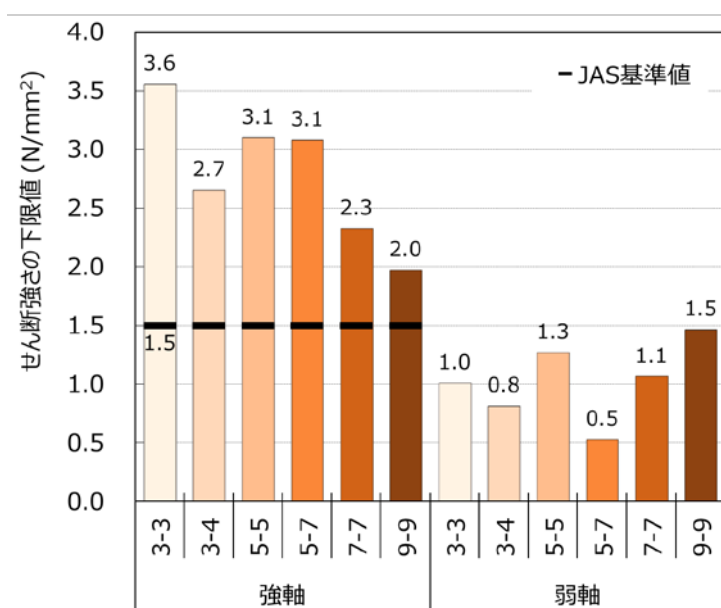


図 4.1.2-6 せん断強さの統計的下限值

### (4) まとめ

北海道産カラマツを用いた CLT (Mx120 相当) の面外せん断性能を検討した。その結果、強軸では各層構成ともにせん断破壊が支配的となること、せん断強さの下限值が JAS 基準値を上回ること、プライ数が増えるほどせん断強度が低くなること、その要因としては、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内層の弱軸ラミナが回転しやすくなること、特に内層の直交層が隣接して積層される 3 層 4 プライでは他よりも弱軸ラミナの回転が起こりやすくなることが推察された。



### 4.1.3 短柱圧縮

#### (1) 試験方法

試験体の等級構成は、異等級構成の強度等級  $M_{x120}$  とした。外層に用いるラミナは  $M_{120}$  とし、内層に用いるラミナは  $M_{60}$  とした。試験体寸法、試験体数、細長比を外層ラミナの繊維方向(強軸・弱軸)、層構成ごとに表 4.1.3-1 に示す。

表 4.1.3-1 短柱圧縮試験体の仕様

軸	層構成	厚さ mm	幅 mm	長さ mm	細長比	試験体 数
強軸	3層3プライ	90	300	400	15	6
	3層4プライ	120	300	530	15	6
	5層5プライ	150	300	660	15	6
	5層7プライ	210	300	920	15	4
	7層7プライ	210	300	920	15	4
	9層9プライ	270	300	1014	13	4
弱軸	3層3プライ	90	300	400	15	6
	3層4プライ	120	300	530	15	6
	5層5プライ	150	300	660	15	6
	5層7プライ	210	300	920	15	4
	7層7プライ	210	300	920	15	4
	9層9プライ	270	300	1014	13	4

非破壊試験は、密度および縦振動法による 1 次共振周波数からヤング係数を求めた。圧縮試験は、圧縮試験機((株) 前川試験機製作所製 最大容量 3000kN)を用いて行った。標点間距離を試験体長さの 1/2 として変位計((株) 東京測器研究所製、CDP-25)を試験体の幅広 2 面に取り付け、圧縮変形量を測定した。また、試験終了後に試験体中央部から含水率測定用切片を切り出し、全乾法で含水率を測定した。圧縮試験の様子を写真 4.1.3-1 に示す。



写真 4.1.3-1 圧縮試験の様子

## (2) 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、圧縮強度を表 4.1.3-2～表 4.1.3-7 に、荷重変位曲線を図 4.1.3-1、 4.1.3-2 に示す。

表 4.1.3-2 圧縮試験結果(3 層 3 プライ)

3 層 3 プライ $\lambda 15$		密度 kg/m <sup>3</sup>	$E_r$ kN/mm <sup>2</sup>	$E_c$ kN/mm <sup>2</sup>	$\sigma_c$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_{p1\%}$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_{p2\%}$ N/mm <sup>2</sup>	試験時間	含水率 %	破壊 形態
強軸	B362S_1	530	7.36	8.36	31.6	13.8	14.7	4'32"	11.9	圧縮
	B362S_2	546	7.87	8.43	35.0	27.9	27.9	2'54"	12.1	圧縮
	B362S_3	545	7.89	7.41	34.9	16.1	18.4	3'12"	12.3	圧縮
	B362S_4	542	7.72	9.38	34.0	14.7	15.2	4'04"	12.4	圧縮
	B362S_5	542	8.13	8.32	34.8	24.8	26.3	8'58"	12.4	圧縮
	B362S_6	537	8.23	10.11	34.6	18.0	20.1	4'16"	12.5	圧縮
	平均 変動係数	540 1.1%	7.87 3.9%	8.67 10.9%	34.1 3.8%	19.3 30.1%	20.4 27.3%			
弱軸	B368W_1	543	2.46	2.97	15.9	7.5	8.0	7'42"	10.8	座屈
	B368W_2	540	2.67	3.15	15.5	7.8	8.9	5'50"	10.6	圧縮
	B368W_3	527	2.70	3.27	15.3	8.8	9.7	3'37"	10.5	圧縮
	B368W_4	548	2.69	3.58	16.7	8.8	9.9	5'54"	11.2	圧縮
	B368W_5	543	2.40	3.55	14.8	6.4	7.0	6'35"	10.5	圧縮
	B368W_6	514	2.56	3.62	15.3	7.9	8.9	4'15"	10.5	座屈
	平均 変動係数	536 2.4%	2.58 5.0%	3.35 7.9%	15.6 4.2%	7.9 11.3%	8.7 12.2%			

表 4.1.3-3 圧縮試験結果(3 層 4 プライ)

3 層 4 プライ $\lambda 15$		密度 kg/m <sup>3</sup>	$E_r$ kN/mm <sup>2</sup>	$E_c$ kN/mm <sup>2</sup>	$\sigma_c$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_{p1\%}$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_{p2\%}$ N/mm <sup>2</sup>	試験時間	含水率 %	破壊 形態
強軸	B363S_1	534	5.46	7.15	24.8	12.4	13.8	3'38"	11.8	圧縮
	B363S_2	538	5.38	7.09	26.0	13.0	14.2	5'02"	12.1	圧縮
	B363S_3	526	5.36	7.04	27.6	13.3	15.1	4'31"	11.7	圧縮
	B363S_4	528	5.42	8.00	26.1	11.9	13.4	4'14"	12.6	圧縮
	B363S_5	533	4.49	5.48	25.7	21.3	21.8	5'13"	12.8	圧縮
	B363S_6	518	4.42	7.54	26.3	13.4	14.8	2'46"	12.4	圧縮
	平均 変動係数	529 1.3%	5.09 9.6%	7.05 12.1%	26.1 3.4%	14.2 24.7%	15.5 20.1%			
弱軸	B369W_1	524	4.55	5.84	21.8	13.4	15.2	4'24"	11.1	圧縮
	B369W_2	499	3.66	4.79	20.0	9.1	10.1	6'28"	10.9	圧縮
	B369W_3	526	4.39	5.31	21.6	11.5	13.3	4'37"	11.3	圧縮
	B369W_4	510	3.97	4.95	21.0	10.0	10.7	5'29"	11.1	圧縮
	B369W_5	518	3.76	4.80	20.7	14.1	15.1	4'32"	10.9	圧縮
	B369W_6	531	4.36	5.85	23.1	10.8	13.3	4'58"	11.0	圧縮
	平均 変動係数	518 2.2%	4.12 8.9%	5.26 9.4%	21.4 5.0%	11.5 16.9%	13.0 16.6%			

表 4.1.3-4 圧縮試験結果(5層5プライ)

5層5プライ λ15		密度 kg/m <sup>3</sup>	$E_r$ kN/mm <sup>2</sup>	$E_c$ kN/mm <sup>2</sup>	$\sigma_c$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_{p1\%}$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_{p2\%}$ N/mm <sup>2</sup>	試験時間	含水率 %	破壊 形態
強軸	B364S_1	533	7.67	7.68	29.6	13.5	14.8	4'51"	11.6	圧縮
	B364S_2	536	7.43	7.85	29.5	13.7	15.0	4'37"	12.5	圧縮
	B364S_3	517	6.84	7.01	28.3	15.2	17.4	5'28"	12.6	圧縮
	B364S_4	519	6.90	7.14	29.6	15.0	17.5	3'48"	12.0	圧縮
	B364S_5	547	7.66	7.57	31.2	15.2	16.8	4'01"	12.7	圧縮
	B364S_6	513	6.89	7.25	28.1	14.5	16.5	3'47"	12.6	圧縮
	平均 変動係数	527 2.5%	7.23 5.5%	7.42 4.5%	29.4 3.8%	14.5 5.1%	16.3 7.1%			
弱軸	B370W_1	511	4.20	4.10	17.8	11.6	12.5	5'54"	11.6	圧縮
	B370W_2	510	3.93	4.27	17.4	8.5	9.3	4'15"	11.8	圧縮
	B370W_3	532	4.11	4.01	19.3	10.8	12.0	5'40"	11.5	圧縮
	B370W_4	506	3.85	3.74	17.0	7.7	8.7	5'10"	11.8	圧縮
	B370W_5	507	3.67	3.62	17.1	8.2	9.2	5'19"	11.9	圧縮
	B370W_6	517	4.16	4.63	18.3	8.9	10.0	3'42"	11.8	圧縮
	平均 変動係数	514 1.9%	3.98 5.2%	4.06 9.0%	17.8 4.8%	9.3 16.9%	10.3 15.4%			

表 4.1.3-5 圧縮試験結果(5層7プライ)

5層7プライ λ15		密度 kg/m <sup>3</sup>	$E_r$ kN/mm <sup>2</sup>	$E_c$ kN/mm <sup>2</sup>	$\sigma_c$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_{p1\%}$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_{p2\%}$ N/mm <sup>2</sup>	試験時間	含水率 %	破壊 形態
強軸	B365S_1	545	8.95	9.27	34.2	17.4	19.9	5'54"	13.2	圧縮
	B365S_2	537	8.82	9.82	32.3	20.0	22.4	4'08"	12.8	圧縮
	B365S_3	538	9.12	10.01	35.1	16.5	19.2	5'23"	12.6	圧縮
	B365S_4	537	9.27	9.34	34.0	16.4	19.2	3'42"	12.5	圧縮
	平均 変動係数	539 0.7%	9.04 2.2%	9.61 3.8%	33.9 3.5%	17.6 9.6%	20.2 7.6%			
弱軸	B371W_1	546	2.86	3.30	16.0	8.0	9.1	4'31"	12.2	圧縮
	B371W_2	537	2.48	3.11	14.2	8.9	9.6	7'28"	12.0	圧縮
	B371W_3	544	2.69	2.77	15.2	8.8	9.7	5'58"	11.8	圧縮
	B371W_4	543	2.43	2.55	14.0	8.8	9.5	6'02"	11.9	圧縮
	平均 変動係数	542 0.7%	2.61 7.6%	2.93 11.4%	14.8 6.4%	8.7 4.9%	9.5 3.1%			

表 4.1.3-6 圧縮試験結果(7 層 7 プライ)

7 層 7 プライ $\lambda 15$		密度 kg/m <sup>3</sup>	$E_{fr}$ kN/mm <sup>2</sup>	$E_c$ kN/mm <sup>2</sup>	$\sigma_c$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_{p1\%}$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_{p2\%}$ N/mm <sup>2</sup>	試験時間	含水率 %	破壊 形態
強軸	B366S_1	522	6.80	6.70	27.4	12.6	14.0	4'43"	11.5	圧縮
	B366S_2	535	7.44	8.11	28.3	13.6	15.9	8'15"	12.1	圧縮
	B366S_3	520	7.00	7.34	29.0	15.3	17.3	6'06"	12.0	圧縮
	B366S_4	519	6.36	6.63	27.0	12.7	14.2	5'12"	12.4	圧縮
	平均	524	6.90	7.20	27.9	13.5	15.4			
	変動係数	1.4%	6.5%	9.6%	3.3%	9.3%	10.3%			
弱軸	B372W_1	537	4.36	4.07	19.5	10.1	11.5	9'29"	12.3	圧縮
	B372W_2	522	4.05	3.63	19.2	9.7	10.9	4'59"	12.4	圧縮
	B372W_3	538	4.11	4.76	19.5	9.5	10.6	8'28"	11.6	圧縮
	B372W_4	510	4.57	4.96	20.0	10.3	11.6	4'04"	11.5	圧縮
	平均	527	4.27	4.35	19.5	9.9	11.1			
	変動係数	2.6%	5.6%	14.1%	1.7%	3.7%	4.1%			

表 4.1.3-7 圧縮試験結果(9 層 9 プライ)

9 層 9 プライ $\lambda 13$		密度 kg/m <sup>3</sup>	$E_{fr}$ kN/mm <sup>2</sup>	$E_c$ kN/mm <sup>2</sup>	$\sigma_c$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_{p1\%}$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_{p2\%}$ N/mm <sup>2</sup>	試験時間	含水率 %	破壊 形態
強軸	B367S_1	507	6.14	6.36	25.6	12.0	13.7	7'18"	11.8	圧縮
	B367S_2	517	6.55	7.75	26.9	13.7	15.7	6'17"	11.7	圧縮
	B367S_3	518	6.65	6.89	27.2	13.0	14.7	8'48"	11.6	圧縮
	B367S_4	515	6.09	6.35	24.6	11.6	13.1	20'58"	12.1	圧縮
	平均	514	6.36	6.84	26.1	12.6	14.3			
	変動係数	1.0%	4.4%	9.6%	4.7%	7.6%	7.9%			
弱軸	B373W_1	519	4.35	4.33	19.8	9.4	10.4	7'18"	11.4	圧縮
	B373W_2	525	5.03	5.23	20.9	9.9	11.2	5'22"	12.1	圧縮
	B373W_3	522	4.80	4.55	21.3	11.8	13.4	7'25"	12.0	圧縮
	B373W_4	507	4.49	4.36	20.1	10.7	12.1	8'55"	11.7	圧縮
	平均	518	4.67	4.62	20.5	10.4	11.8			
	変動係数	1.5%	6.6%	9.1%	3.3%	10.0%	10.9%			

$E_{fr}$  : 縦振動法で測定されたヤング係数

$E_c$  : 最大荷重を  $P_{max}$  とし、荷重変位曲線の  $0.1P_{max}$  時と  $0.4P_{max}$  時を結ぶ直線の傾きから算出したヤング係数

$\sigma_c$  : 圧縮強度 :  $P_{max}$  から算出した圧縮応力

$\sigma_{p1\%}$ 、 $\sigma_{p2\%}$  ; 比例限度応力 : 荷重変位曲線で、 $E_c$  を求めた直線から荷重が 1% および 2% 離れた時の圧縮応力

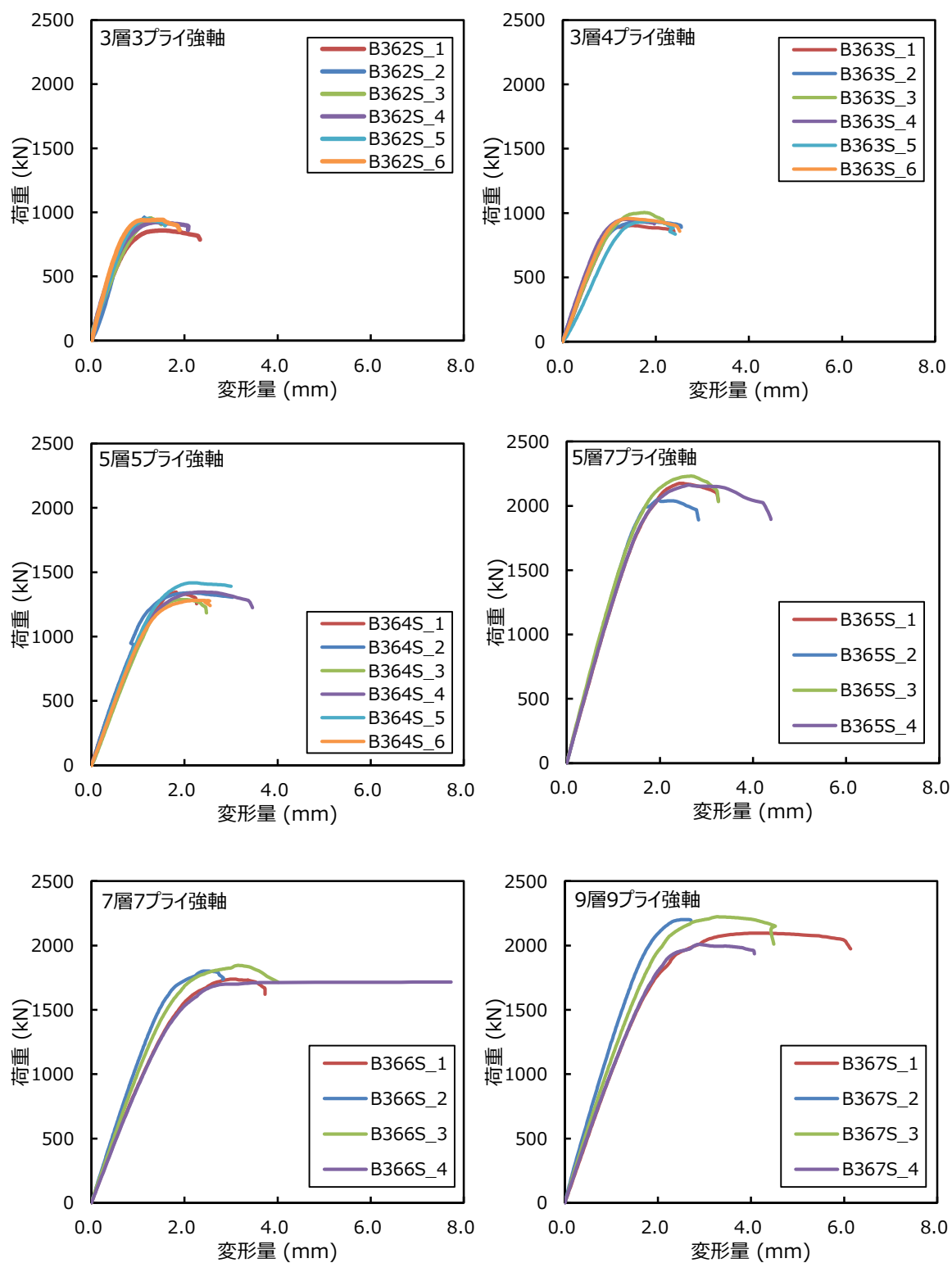


図 4.1.3-1 荷重変位曲線(強軸試験体)



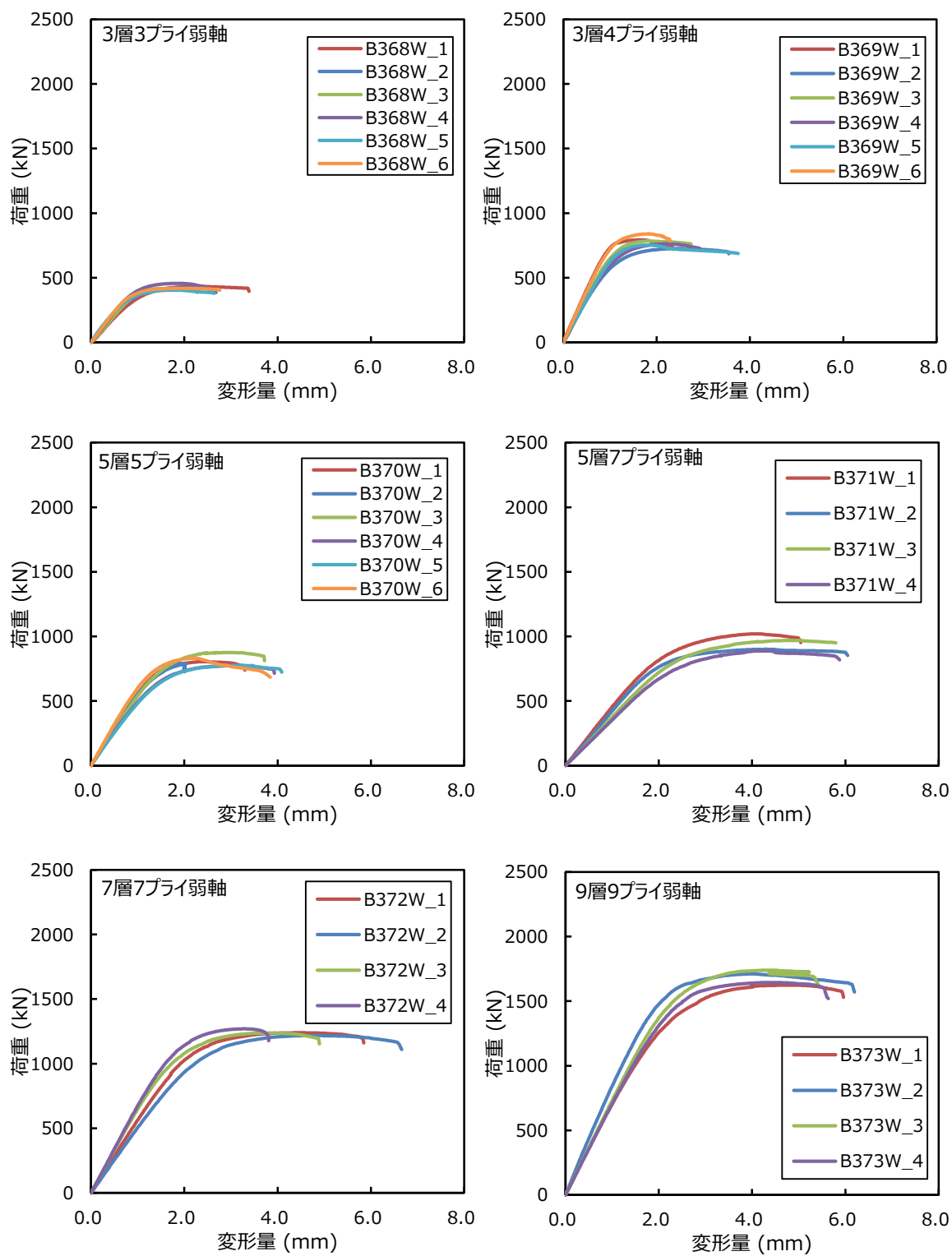


図 4.1.3-2 荷重変位曲線(弱軸試験体)

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荷重方向別に図 4.1.3-3 に示す。どちらの荷重方向でも 3 層試験体以外ではおおむね両者は一致していたが、縦振動法から求めたヤング係数の方が低い傾向が見られた。

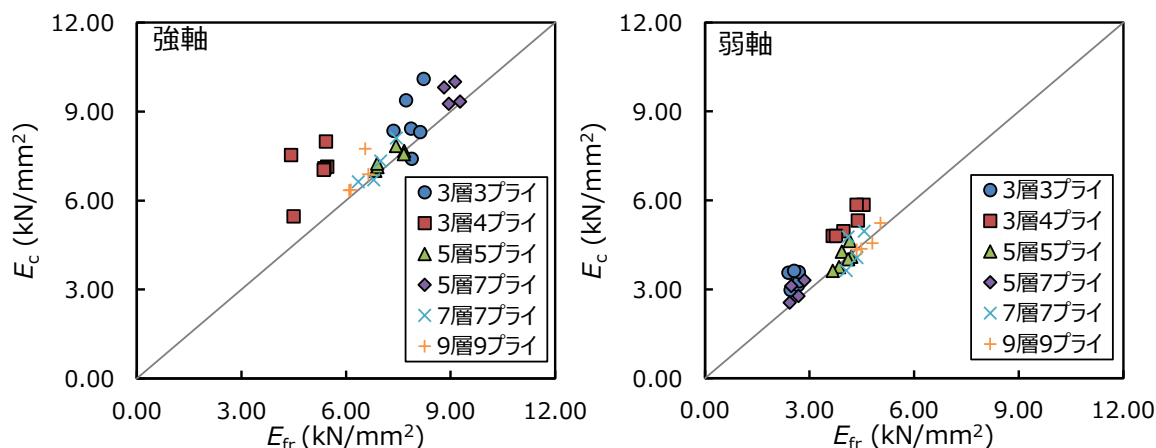


図 4.1.3-3 縦振動法のヤング係数( $E_{fr}$ )と圧縮試験時のヤング係数( $E_c$ )の関係

層構成、荷重方向別の最大応力と比例限度応力(2%時)を図 4.1.3-4 に、圧縮ヤング係数の平均値を図 4.1.3-5 に示す。強軸試験体では、圧縮応力と圧縮ヤング係数は 3 層 3 プライと 5 層 7 プライで圧縮強度が 30 N/mm<sup>2</sup> を超える大きな値となった。弱軸試験体ではその逆の傾向となり、3 層 3 プライと 5 層 7 プライ試験体では比較的小さな値となった。

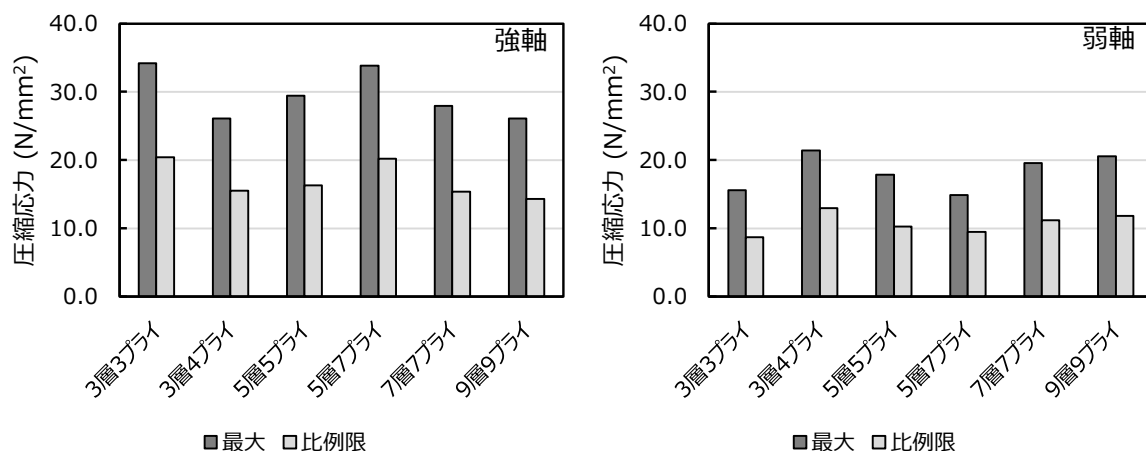


図 4.1.3-4 圧縮応力

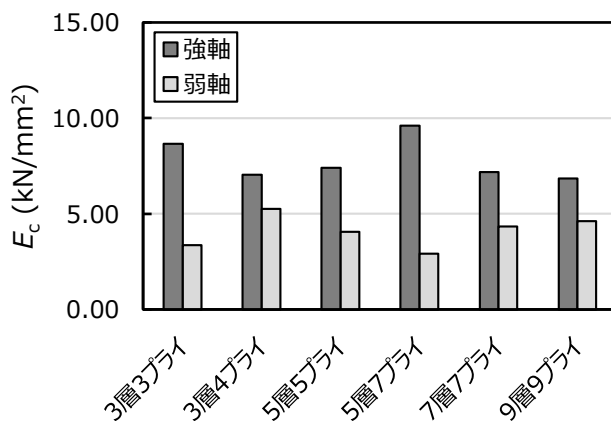


図 4.1.3-5 圧縮ヤング係数

次に、破壊の様子を写真 4.1.3-2、4.1.3-3 に示す。破壊形態は 3 層 3 プライ弱軸試験体で 2 体が座屈破壊だった以外は、すべて圧縮破壊であった。強軸試験体では外層ラミナに、フィンガージョイント部や節を起点とする破壊が多く見られた。また、内層の平行層ラミナにもフィンガージョイント部や節を起点として破壊が生じたのが確認された。内層の直交層ラミナには顕著な破壊が確認されなかったが、接着層に沿った破壊が見られるものもあった。弱軸試験体では内層の平行層ラミナに、フィンガージョイント部や節を起点とする破壊が観察された。また、強軸試験体と同様、接着層に沿った破壊も観察された。



a) 3 層 3 プライ強軸



b) 3 層 4 プライ強軸



c) 5 層 5 プライ強軸



d) 5 層 7 プライ強軸



e) 7 層 7 プライ強軸



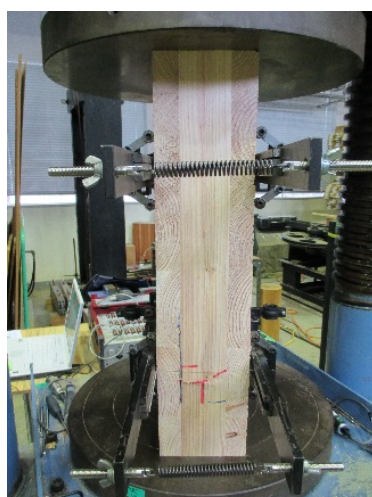
f) 9 層 9 プライ強軸

写真 4.1.3-2 破壊の様子(強軸試験体)

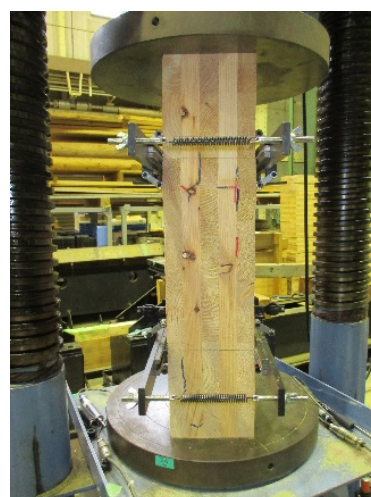




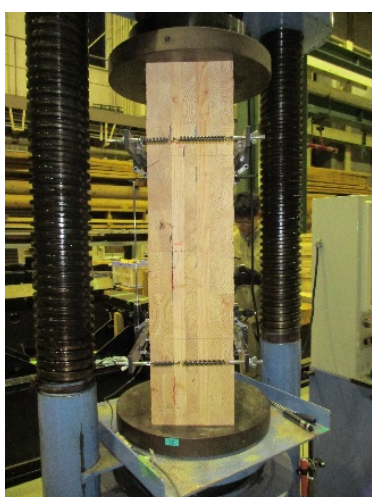
g) 3 層 3 プライ弱軸



h) 3 層 4 プライ弱軸



i) 5 層 5 プライ弱軸



j) 5 層 7 プライ弱軸



k) 7 層 7 プライ弱軸



l) 9 層 9 プライ弱軸

写真 4.1.3-3 破壊の様子(弱軸試験体)

### (3) 考察

縦振動法によるヤング係数測定では、試験体断面寸法に対して一定以上の試験体長さが必要となる。そのため、試験体長さが比較的短い3層試験体では圧縮ヤング係数と一致しなかったと考えられる。次に、図 4.1.3-6 に各試験体の強軸ラミナの比率と圧縮強度の関係を示す。断面内の強軸ラミナの比率が大きいほど圧縮強度が大きくなる傾向が得られた。

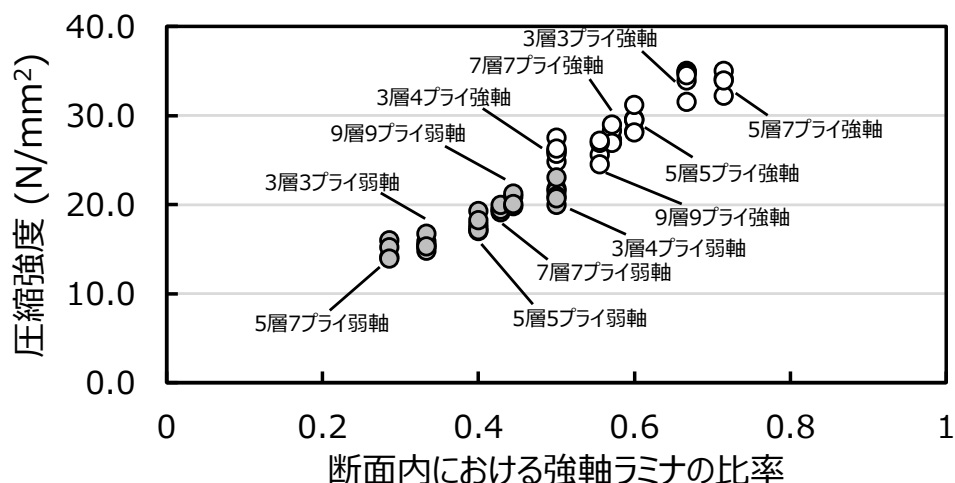


図 4.1.3-6 断面内の強軸ラミナの比率と圧縮強度の関係

また、等価断面法による縦圧縮ヤング係数と縦圧縮強度の推定を行った。M120 ラミナと M60 ラミナの各ラミナ等級の性能値はカラマツラミナの試験データ<sup>1)</sup>を使用した。繊維直交方向の性能値は「CLT handbook」を参考に、圧縮ヤング係数には繊維方向の 1/30 の値、圧縮強度には 0 を用いた。使用したラミナ性能値を表 4.1.3-8 に、推定値と実測値との関係を図 4.1.3-7 に示す。

表 4.1.3-8 縦圧縮性能値の一般式に代入したラミナ性能値

荷重方向	強軸方向		弱軸方向	
等級	M120	M60	M120	M60
ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	11.9	8.4	0.40	0.28
強度 (N/mm <sup>2</sup> )	50.6	42.5	0	0

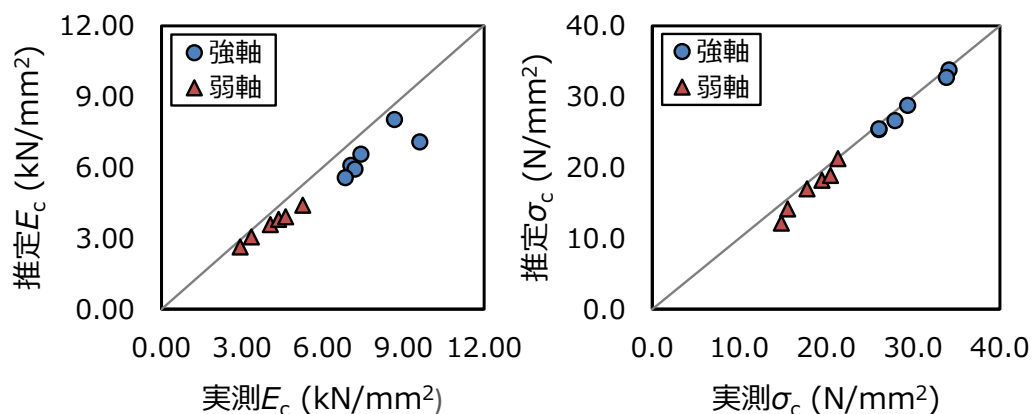


図 4.1.3-7 縦圧縮性能値の実測値と推定値の関係



圧縮ヤング係数は推定値が過小評価となった。圧縮強度は実測値と推定値がおおむね一致した。

#### （４）まとめ

北海道産カラマツを用いた CLT の縦圧縮性能を明らかにすることを目的として実験を行った。3 層 3 プライや 5 層 7 プライの強軸試験体で圧縮強度が 30 (kN/mm<sup>2</sup>)を超える高い値となった。また、試験体長さが確保されている場合では縦振動法から縦圧縮ヤング係数を推定することが可能であり、さらにラミナの性能値から縦圧縮強度を推定できる可能性が示された。

#### 参考文献

- 1) 平成 25 年度補正 CLT 短期強度報告書

## 4.2 ヒノキを用いた CLT 強度性能の検討

直交集成板の JAS に準じて、全層ヒノキの異等級 A 種、層構成 6 種の直交集成板（大板）（表 4.2-1）を製造し、そこから各試験体を採取した。

ラミナは連続式グレーディングマシン（飯田工業㈱MGFE-25 1 T）により測定された曲げヤング係数により表 4.2-2 に示す条件で選別し、M120A のものを外層用、M30A から M90A までは内層用とした。なお、今回、外層 M120A ラミナ用に選別された原板ヤング係数の平均値は、JAS の基準値  $12.0\text{N/mm}^2$  を下回り、縦継ぎ後のラミナのヤング係数については測定していない。

フィンガージョイントは、水平型、フィンガー長：16.2 mm、ピッチ：5 mm、スカーフ傾斜比：1/9.3、先端厚さ：0.8 mm、嵌合度：0.1 mmとし、縦継ぎ接着には水性高分子イソシアネート系接着剤を使用し、仕上げ断面寸法は  $30 \times 105\text{ mm}$ とした。

積層接着には、水性高分子イソシアネート系接着剤を使用し、大板プレス（銘建工業㈱）により行った。なお、ラミナの幅はぎは行っていない。

表 4.2-1 ヒノキ直交集成板 大板の概要

構成・等級	層構成	軸	直交集成板（大板） の寸法（mm）		
			厚さ	短辺	長辺
ヒノキ 異等級構成 A種構成 Mx120	3層3プライ	強	90	2,100	4,030
	3層4プライ	強	120	2,100	4,030
	5層5プライ	強・弱	150	2,100	6,030
	5層7プライ	強	210	2,625	6,030
	7層7プライ	強	210	2,625	6,030
	9層9プライ	強	270	2,625	6,030

表 4.2-2 ラミナの選別基準

ラミナ等級	曲げヤング係数 下限値 (Gpa)	使用層
M120A	10.0以上	外層用
M90A	7.5以上	内層用
M60A	5.0以上	
M30A	2.5以上	
	2.5未満	

### 4.2.1 面外曲げ

#### （１）試験方法

試験体は各大板から 6 体ずつ採取し、幅は 300 mm、長さは厚みの 23 倍、9 層 9 プライのみ長さを 6,000 mmとした。面外曲げ試験の前に、各試験体について、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及びせん断弾性係数を求めた。T.G.H.法による測定は面外方向のみとした。

面外曲げ試験は、実大木材強度試験機（㈱東京試験機、最大容量 1,000 k N）を用いて、直交集成板

の JAS に準じて行い、加力は 3 等分点 4 点荷重方式、全スパンは試験体の材せいの 21 倍とした。荷重点及び支点の幅はともに 100 mm であった。各試験体の両側面で全スパン中央におけるたわみを変位計（東京測器研究所 SDP-200D）を用いて測定し、その平均値をそれぞれのたわみとした。さらに、荷重点間のたわみを袴型治具により変位計（東京測器研究所 CDP-10）を用いて測定した。得られた結果から、曲げヤング係数、曲げ強さを算出し、試験終了後は、破壊部の近傍から長さ約 30 mm の材を採取し、全乾重量法で含水率を求めた。試験の様子を写真 4.2.1-1 に示す。



写真 4.2.1-1 面外曲げ試験の様子（5 層 7 プライ強軸方向）

## （２）結果

試験の荷重－変位曲線と破壊形態の一例を図 4.2.1-1 に、試験結果を表 4.2.1-2 に示す。曲げ試験により得た曲げヤング係数及び曲げ強さは、いずれも JAS の曲げ性能基準を上回った。曲げヤング係数について、3 層 3 プライと 3 層 4 プライは JAS 下限値の約 1.2 倍、5 層 5 プライと 5 層 7 プライは約 1.3 倍、7 層 7 プライと 9 層 9 プライは約 1.4 倍となった。曲げヤング係数の平均値は 3 層 3 プライと 3 層 4 プライで、JAS 平均値と同程度、5 層 5 プライと 5 層 7 プライでは約 1.1 倍、7 層 7 プライと 9 層 9 プライでは約 1.2 倍程度となった。

非破壊測定から得られた縦振動法によるヤング係数 ( $E_{fr}$ )、T.G.H.法による真の曲げヤング係数 ( $E_{ofb}$ ) とせん断弾性係数 ( $G_b$ ) については、ばらつきが小さかった。曲げ試験で得られた見かけのヤング係数 ( $E_m$ ) と真の曲げヤング係数 ( $E_b$ ) はばらつきが小さく、曲げ強さについては、全体的にバラつきが少ないが、5 層 5 プライ強軸と 5 層 7 プライにおいて値の低い試験体があり変動係数 15% を超えた。

非破壊測定と曲げ試験によるヤング係数を比較すると、見かけのヤング係数 ( $E_m$ ) は、縦振動法によるヤング係数 ( $E_{fr}$ ) の 1.2 倍程度であった。真のヤング係数 ( $E_b$ ) は、T.G.H.法による真の曲げヤング係数 ( $E_{ofb}$ ) とほぼ同程度であった。

破壊形態は、主に引張側ラミナのフィンガージョイントまたは節を起因とし、そのうちの最弱部が破壊するとそのまま試験体が破断に至る場合と、最初に材縁部の最弱部が破壊した後、他のフィンガージョイント又は節部の破壊と同時に試験体が破断する場合があります、いずれも脆的な破壊形態であった。弱軸試験体では、引張側 2 層目ラミナのフィンガージョイント又は節を起因とし、その最弱部の破壊とともに試験体が破断する形態であった。

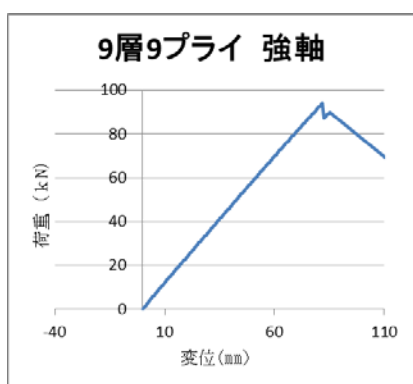
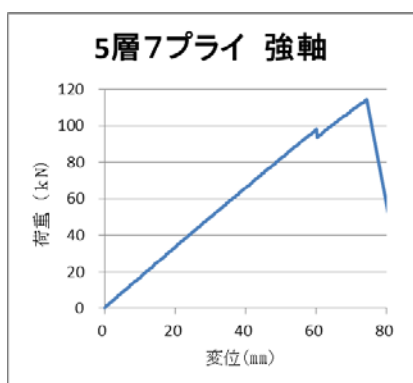
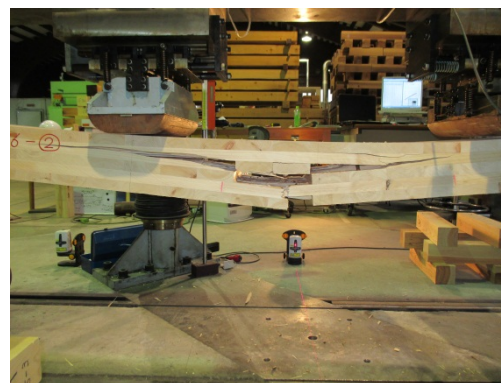
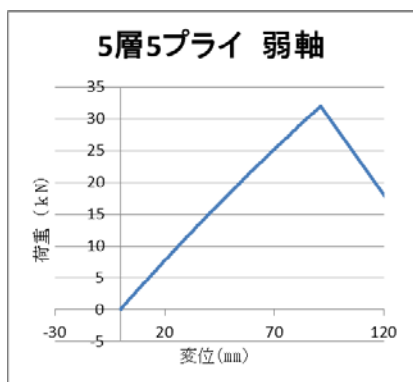
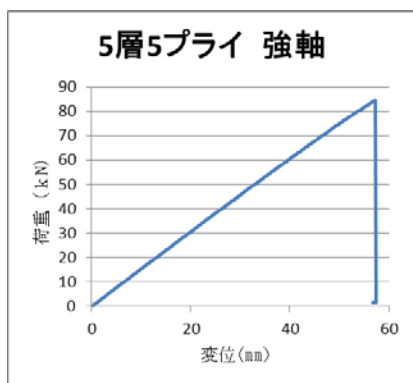


図 4.2.1-1 荷重－変位曲線と破壊形態の一例

表 4.2.1-1 面外曲げ試験結果（異等級 Mx120・全層ヒノキ）

構成	軸	試験体 No	含水率 %	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>m</sub> kN/mm <sup>2</sup>	E <sub>fr</sub> /E <sub>m</sub>	E <sub>ofb</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>
3-3 h:90	強 軸	B450-1	10.5%	506	9.20	12.22	0.43	11.03	0.83	1.11	12.29	0.99	49.67
		B450-2	10.3%	498	8.97	11.99	0.45	10.79	0.83	1.11	12.21	0.98	53.01
		B450-3	9.4%	492	8.85	11.93	0.44	10.77	0.82	1.11	11.93	1.00	54.64
		B450-4	9.6%	493	8.79	11.86	0.43	10.59	0.83	1.12	12.23	0.97	55.16
		B450-5	10.4%	504	9.34	12.25	0.41	11.04	0.85	1.11	12.19	1.00	54.02
		B450-6	9.8%	488	8.46	12.03	0.40	10.3	0.82	1.17	11.34	1.06	39.69
		平均	10.0%	496.8	8.94	12.05	0.43	10.75	0.83	1.12	12.03	1.00	51.03
		最大	10.5%	506.0	9.34	12.25	0.45	11.04			12.29		55.16
		最小	9.4%	488.0	8.46	11.86	0.40	10.30			11.34		39.69
		標準偏差	0.46%	7.1	0.31	0.16	0.02	0.28			0.36		5.89
		変動係数	4.7%	1.4%	3.5%	1.3%	4.9%	2.6%			3.0%		11.5%
3-4 h:120	強 軸	B451-1	9.83%	485	6.53	10.84	0.29	9.13	0.72	1.19	9.77	1.11	35.14
		B451-2	9.61%	519	6.68	10.48	0.32	9.52	0.70	1.10	10.80	0.97	35.93
		B451-3	9.52%	498	6.52	10.35	0.30	9.42	0.69	1.10	10.13	1.02	41.95
		B451-4	10.30%	503	6.98	11.38	0.29	9.89	0.71	1.15	11.11	1.02	34.07
		B451-5	9.50%	493	6.25	9.91	0.31	9.14	0.68	1.08	10.19	0.97	37.36
		B451-6	10.35%	506	6.71	11.14	0.30	9.59	0.70	1.16	10.44	1.07	35.99
		平均	9.85%	500.7	6.61	10.68	0.30	9.45	0.70	1.13	10.41	1.03	36.74
		最大	10.35%	519.0	6.98	11.38	0.32	9.89			11.11		41.95
		最小	9.50%	485.0	6.25	9.91	0.29	9.13			9.77		34.07
		標準偏差	0.39%	11.7	0.24	0.54	0.01	0.29			0.49		2.77
		変動係数	3.9%	2.3%	3.7%	5.1%	3.6%	3.1%			4.7%		7.5%
5-5 h:150	強 軸	B452-1	10.06%	500	7.33	10.41	0.38	9.46	0.77	1.10	10.62	0.98	40.35
		B452-2	10.01%	501	7.48	11.07	0.40	9.79	0.76	1.13	10.77	1.03	38.75
		B452-3	9.79%	502	7.57	11.12	0.39	9.8	0.77	1.13	10.58	1.05	31.12
		B452-4	9.92%	501	7.35	10.98	0.41	9.56	0.77	1.15	10.34	1.06	35.17
		B452-5	9.91%	510	7.48	10.52	0.40	9.22	0.81	1.14	9.95	1.06	40.46
		B452-6	9.99%	494	7.18	10.21	0.41	9.34	0.77	1.09	9.76	1.05	26.69
		平均	9.95%	501.3	7.40	10.72	0.40	9.53	0.78	1.12	10.34	1.04	35.42
		最大	10.06%	510.0	7.57	11.12	0.41	9.80			10.77		40.46
		最小	9.79%	494.0	7.18	10.21	0.38	9.22			9.76		26.69
		標準偏差	0.10%	5.1	0.14	0.39	0.02	0.24			0.40		5.58
		変動係数	1.0%	1.0%	1.9%	3.6%	3.8%	2.5%			3.9%		15.7%
5-5 h:150	弱 軸	B456-1	10.10%	503	4.27	2.39	0.32	2.20	1.94	1.09	2.22	1.08	15.62
		B456-2	10.21%	501	4.51	2.67	0.26	2.36	1.91	1.13	2.36	1.13	14.66
		B456-3	11.04%	505	4.14	2.39	0.27	2.15	1.93	1.11	2.23	1.07	13.60
		B456-4	10.02%	501	4.11	2.34	0.28	2.09	1.97	1.12	2.14	1.09	10.16
		B456-5	10.27%	507	4.31	2.62	0.26	2.2	1.96	1.19	2.11	1.24	13.68
		B456-6	9.33%	501	4.52	2.65	0.26	2.34	1.93	1.13	2.41	1.10	14.68
		平均	10.16%	503.0	4.31	2.51	0.28	2.22	1.94	1.13	2.25	1.12	13.73
		最大	11.04%	507.0	4.52	2.67	0.32	2.36			2.41		15.62
		最小	9.33%	501.0	4.11	2.34	0.26	2.09			2.11		10.16
		標準偏差	0.55%	2.5	0.18	0.15	0.02	0.11			0.12		1.90
		変動係数	5.4%	0.5%	4.1%	6.0%	8.1%	4.8%			5.3%		13.9%

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 4.2.1-2 面外曲げ試験結果（異等級 Mx120・全層ヒノキ）

構成	軸	試験体 No	含水率 %	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>m</sub> kN/mm <sup>2</sup>	E <sub>fr</sub> /E <sub>m</sub>	E <sub>ofb</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>
5-7 h:210	強 軸	B453-1	7.68%	500	9.08	12.31	0.45	10.89	0.83	1.13	11.64	1.06	38.64
		B453-2	7.74%	514	8.97	12.49	0.44	10.55	0.85	1.18	11.22	1.11	37.34
		B453-3	7.75%	490	8.95	10.97	0.47	10.15	0.88	1.08	11.14	0.98	38.07
		B453-4	7.34%	500	9.09	12.01	0.45	10.35	0.88	1.16	11.32	1.06	49.91
		B453-5	7.55%	499	8.87	11.86	0.43	10.27	0.86	1.15	11.16	1.06	29.85
		B453-6	7.88%	497	9.18	12.36	0.43	10.42	0.88	1.19	11.33	1.09	39.57
		平均	7.66%	500.0	9.02	12.00	0.45	10.44	0.86	1.15	11.30	1.06	38.90
		最大	7.88%	514.0	9.18	12.49	0.47	10.89			11.64		49.91
		最小	7.34%	490.0	8.87	10.97	0.43	10.15			11.14		29.85
		標準偏差	0.19%	7.8	0.11	0.56	0.02	0.26			0.18		6.43
		変動係数	2.5%	1.6%	1.3%	4.6%	3.7%	2.5%			1.6%		16.5%
7-7 h:210	強 軸	B454-1	7.51%	495	6.58	9.58	0.40	8.36	0.79	1.15	9.07	1.06	26.64
		B454-2	7.43%	495	6.68	9.33	0.40	8.05	0.83	1.16	8.67	1.08	28.02
		B454-3	7.99%	493	6.59	8.94	0.40	7.91	0.83	1.13	8.58	1.04	28.00
		B454-4	7.26%	492	6.29	8.74	0.41	7.77	0.81	1.12	8.22	1.06	24.74
		B454-5	8.03%	502	6.85	9.38	0.40	8.25	0.83	1.14	9.37	1.00	30.56
		B454-6	8.01%	500	6.61	9.17	0.39	7.96	0.83	1.15	8.64	1.06	34.12
		平均	7.71%	496.2	6.60	9.19	0.40	8.05	0.82	1.14	8.76	1.05	28.68
		最大	8.03%	502.0	6.85	9.58	0.41	8.36			9.37		34.12
		最小	7.26%	492.0	6.29	8.74	0.39	7.77			8.22		24.74
		標準偏差	0.34%	4.0	0.18	0.31	0.01	0.22			0.40		3.28
		変動係数	4.5%	0.8%	2.8%	3.3%	1.9%	2.7%			4.6%		11.4%
9-9 h:270	強 軸	B455-1	7.81%	503	5.94	8.39	0.39	7.22	0.82	1.16	7.87	1.07	25.46
		B455-2	7.51%	504	5.95	8.38	0.40	7.44	0.80	1.13	8.34	1.00	24.03
		B455-3	9.81%	500	6.06	8.51	0.39	7.19	0.84	1.18	7.65	1.11	25.27
		B455-4	10.47%	499	6.04	8.52	0.40	7.4	0.82	1.15	8.09	1.05	28.77
		B455-5	9.59%	498	5.87	8.05	0.42	7.09	0.83	1.14	7.39	1.09	24.60
		B455-6	9.50%	504	6.05	8.41	0.41	7.28	0.83	1.16	7.90	1.06	24.37
		平均	9.11%	501.3	5.99	8.38	0.40	7.27	0.82	1.15	7.87	1.07	25.42
		最大	10.47%	504.0	6.06	8.52	0.42	7.44			8.34		28.77
		最小	7.51%	498.0	5.87	8.05	0.39	7.09			7.39		24.03
		標準偏差	1.18%	2.7	0.08	0.17	0.01	0.13			0.33		1.73
		変動係数	12.9%	0.5%	1.3%	2.0%	2.8%	1.8%			4.2%		6.8%

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

### （３）まとめ

全層ヒノキで構成された全6種の層構成の直交集成板について、面外曲げ試験を行った。試験の結果、見かけと真の曲げヤング係数ともに、非破壊測定による縦振動法及びT.G.H法によるヤング係数と近い値となり、見かけのヤング係数平均値に対し、縦振動法による平均値は約0.8倍程度、TGH法による平均値は約1.1倍で、非破壊測定により面外方向の見かけのヤング係数を推定できることが確認できた。曲げ性能の平均値はJASの基準をいずれも超え、曲げ強さは大幅に上回った。曲げヤング係数については、その平均値が5層以上の層構成ではJAS基準を十分に上回ったが、3層3プライと3層4プライでは同程度となり、外層ラミナに性能の低いものが重なるとJAS基準を超えないことが想像でき、安全なラミナの性能管理が必要と思われた。

## 4.2.2 面外せん断

### （１）試験方法

試験体は、表 4.2.2-1 に示すとおり各大板から採取し、幅 300 mm、長さは厚みの 7 倍とした。面外せん断試験の様子を写真 4.2.2-1 に示す。面外せん断試験は、実大木材強度試験機（㈱東京試験機、最大容量 1,000 k N）を用いて、直交集成板の JAS に準じて、支点間距離は厚さの 5 倍とし、中央集中

1点式（水平せん断式）により面外に載荷した。加圧板の幅はいずれも試験体の厚さに20mmを加えたものとし、いずれも半径10mmで両側面取り加工し、試験体に接する有効幅は試験体の厚みと同じとした。得られた結果から、せん断強さを求め、破壊部の近傍から長さ約30mmの材を採取し、全乾重量法で含水率を求めた。

表 4.2.2-1 せん断試験 試験体一覧

構成	軸	試験体数	寸法 (mm)	加圧板幅 (mm)	せん断 スパン比*
3層3プライ	強軸	6	h90*w300*L630	90	1.5
3層4プライ	強軸	6	h120*w300*L840	120	1.5
5層5プライ	強軸	6	h150*w300*L1,050	150	1.5
	弱軸	6	h150*w300*L1,050	150	1.5
5層7プライ	強軸	4	h210*w300*L1,470	210	1.5
7層7プライ	強軸	4	h210*w300*L1,470	210	1.5
9層9プライ	強軸	4	h270*w300*L1,890	270	1.5
*加圧板の幅分を除いた、実質的なせん断スパン比					

写真 4.2.2-1 面外せん断試験の様子



## (2) 結果

面外せん断試験の結果を表 4.2.2-2 に示す。せん断強さは、5層7プライが  $3.38\text{N/mm}^2$  と最も高く、次いで5層5プライ 3.04、7層7プライ 2.73、9層9プライ 2.43 と低下しており、既報と同様に全層に対する強軸プライ比の低下に伴ってせん断強さが低下する結果となった。また、層構成ごとのばらつきは少なかった。

破壊形態の一例を写真 4.2.2-2 から 4.2.2-5 に示す。荷重はせん断破壊の発生に伴って若干の荷重低下を複数回繰り返しながら増加し、最終破壊した。最終破壊については、5層5プライ強軸で6体中1体、同弱軸で6体中4体が曲げ破壊となった。

また、今回の試験では、9層9プライ、5層5プライ弱軸で、せん断破壊が片側に偏った。载荷初期には、両側から破壊のきしみ音が発生したが、若干の荷重低下を伴う最初のせん断破壊以降は、その際にせん断破壊が発生した一方に破壊が集中する結果となった。これは、試験機の载荷部先端部の自在構成と支点のスライドにより、せん断破壊が発生し強度低下した一方に破壊が偏ったものと思われる。なお、いずれの試験体も縦継ぎ及び積層接着は良好であった。

表 4.2.2-2 面外せん断試験結果 (異等級 Mx120・全層ヒノキ)

構成	軸	試験体 No	含水率 %	密度 kg/m <sup>3</sup>	最大荷重 kN	せん断強さ* N/mm <sup>2</sup>	最終破壊性状
3-4 h:120	強軸	B451-1	9.55%	476	141.1	2.90	せん断
		B451-2	10.45%	487	160.3	3.3	せん断
		B451-3	9.95%	501	139.2	2.87	せん断
		B451-4	10.16%	478	156	3.21	せん断
		B451-5	10.42%	511	143.3	2.95	せん断
		B451-6	9.58%	506	145.2	2.99	せん断
		平均	10.02%	493	147.52	3.04	
		最大	10.45%	511	160.30	3.30	
		最小	9.55%	476	139.20	2.87	
		標準偏差	0.40%	14.9	8.59	0.18	
		変動係数	4.0%	3.0%	5.8%	5.8%	
5-5 h:150	強軸	B452-1	10.18%	494	186.2	3.07	せん断
		B452-2	9.65%	501	189.6	(3.13)	曲げ
		B452-3	9.37%	500	175.2	2.89	せん断
		B452-4	9.60%	490	175.4	2.89	せん断
		B452-5	9.53%	490	194.6	3.21	せん断
		B452-6	9.60%	490	184	3.03	せん断
		平均	9.66%	494	184.17	3.04	
		最大	10.18%	501	194.60	3.21	
		最小	9.37%	490	175.20	2.89	
		標準偏差	0.28%	5.2	7.74	0.13	
		変動係数	2.8%	1.0%	4.2%	4.2%	
5-5 h:150	弱軸	B456-1	10.10%	508	111.4	1.84	せん断
		B456-2	9.62%	497	98	(1.62)	曲げ
		B456-3	9.83%	485	98.4	(1.62)	曲げ
		B456-4	10.05%	498	108.4	(1.79)	曲げ
		B456-5	9.99%	493	111.3	1.83	せん断
		B456-6	10.14%	496	100.4	(1.66)	曲げ
		平均	9.96%	496	104.65	1.73	
		最大	10.14%	508	111.40	1.84	
		最小	9.62%	485	98.00	1.62	
		標準偏差	0.20%	7.5	6.41	0.10	
		変動係数	2.0%	1.5%	6.1%	6.1%	
5-7 h:210	強軸	B453-1	9.31%	499	272.8	3.22	せん断
		B453-2	9.84%	508	296	3.49	せん断
		B453-3	10.12%	492	302.6	3.57	せん断
		B453-4	9.37%	496	276.2	3.25	せん断
		平均	9.66%	499	286.90	3.38	
		最大	10.12%	508	302.60	3.57	
		最小	9.31%	492	272.80	3.22	
		標準偏差	0.39%	6.8	14.64	0.17	
		変動係数	4.0%	1.4%	5.1%	5.1%	
7-7 h:210	強軸	B454-1	9.47%	486	227.4	2.68	せん断
		B454-2	9.36%	494	235.2	2.77	せん断
		B454-3	9.33%	498	244.4	2.88	せん断
		B454-4	9.94%	491	219.8	2.59	せん断
		平均	9.53%	492	231.70	2.73	
		最大	9.94%	498	244.40	2.88	
		最小	9.33%	486	219.80	2.59	
		標準偏差	0.28%	5.1	10.5	0.12	
		変動係数	3.0%	1.0%	4.6%	4.5%	
9-9 h:270	強軸	B455-1	9.23%	502	258.8	2.38	せん断
		B455-2	9.27%	504	279.4	2.56	せん断
		B455-3	9.32%	502	267	2.45	せん断
		B455-4	9.56%	514	253.8	2.33	せん断
		平均	9.35%	506	264.75	2.43	
		最大	9.56%	514	279.40	2.56	
		最小	9.23%	502	253.80	2.33	
		標準偏差	0.15%	5.7	11.18	0.10	
		変動係数	1.6%	1.1%	4.2%	4.1%	

\*最終破壊性状が曲げ破壊の試験体については、せん断強さが評価できないため、値に(カッコ)を付した。

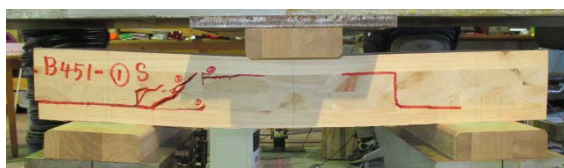


写真 4.2.2-2 3層4プライ最終破壊

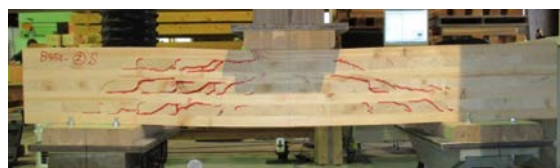


写真 4.2.2-3 7層7プライ最終破壊



写真 4.2.2-4 5層5プライ（強軸）最終破壊

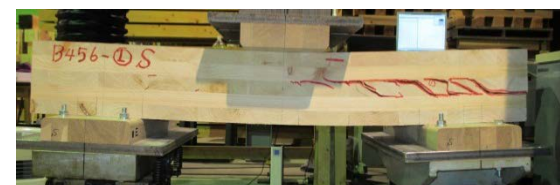


写真 4.2.2-5 5層5プライ（弱軸）最終破壊

### (3) まとめ

全層ヒノキで構成された全6種の層構成の直交集成板について、面外せん断試験を行った。試験の結果、いずれも JAS の性能基準を大幅に上回り、ばらつきも少なかった。3層4プライを除き、全層に対する強軸プライの比の低下に伴ってせん断強さも低下することが確認できた。5層5プライ弱軸試験体は、最終曲げ破壊したものが多く、適正なせん断強さの評価ができず、さらなる検証が必要とおもわれる。

## 4.2.3 短柱圧縮

### (1) 試験方法

試験体は各大板から表 4.2.3-1 のとおり幅 300 mm、長さは細長比  $\lambda$  15、9 プライのみ  $\lambda$  13 とした。圧縮試験の前に、各試験体について、縦振動法によるヤング係数を求めた。

圧縮試験の様子を写真 4.2.3-1 に示す。圧縮試験は、最大容量 300 kN の圧縮試験機（株式会社前川試験機製作所）を用いて行った。各試験体の幅広両側面で標点間距離を試験体の長さの 1/2 として、変位計（東京測器研究所 CDP-25D）を用いて圧縮時の変位を測定し、得られた結果から、圧縮げヤング係数、圧縮強さを求めた。また、破壊部の近傍から長さ約 30 mm の材を採取し、全乾重量法で含水率を求めた。

表 4.2.3-1 短柱圧縮試験体一覧

構成	軸	試験体数	細長比 $\lambda$	寸法(mm) 厚み*幅*長さ
3層3プライ	強軸	6	15	90*300*400
3層4プライ	強軸	6	15	120*300*530
5層5プライ	強軸	6	15	150*300*660
	弱軸	6	15	150*300*660
5層7プライ	強軸	4	15	210*300*920
7層7プライ	強軸	4	15	210*300*920
9層9プライ	強軸	4	13	270*300*1,014



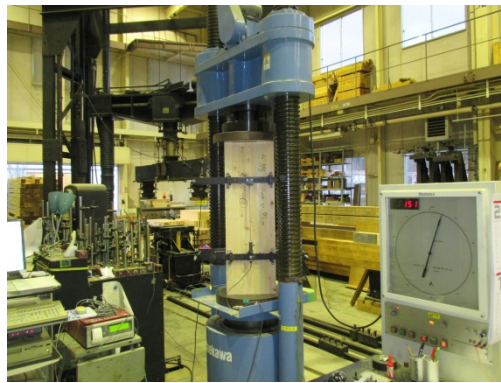


写真 4.2.3-1 圧縮試験の様子

## (2) 結果

圧縮試験の結果を表 4.2.3-2 に示す。圧縮強さは、5 層 7 プライが  $335.68\text{N/mm}^2$  と最も高く、次いで 3 層 3 プライ  $34.0$ 、5 層 5 プライ強軸  $29.22$ 、と低下し、圧縮ヤング係数も同様に 7 層 7 プライ  $8.73\text{kN/mm}^2$ 、3 層 3 プライ  $8.16$ 、5 層 5 プライ強軸  $6.75$  と低下しており、全層に対する強軸プライ比の低下に伴ってせん断強さが低下する結果となった。また、層構成ごとのばらつきは少なかった。

縦振動法によるヤング係数 ( $E_{fr}$ ) と圧縮試験から求めた圧縮ヤング係数 ( $E_c$ ) の関係については、縦振動ヤング係数のほうが少し低い値を示したが、その比は  $0.9$  前後と同程度であった。

破壊形態を写真 4.2.3-2 に示す。いずれも目視で確認できる外層ラミナに破壊が顕著で、内層については、平行層は破壊が見られたが、直交層は顕著な破壊がみられなかった。外層におけるフィンガージョイントや節を起因とした破壊は、载荷が進むにつれて顕著となり、最終的にラミナが接着層に沿って座屈する破壊があった。5 層 5 プライ弱軸試験体では、2 層目（荷重方向と繊維方向が同じ層）の破壊顕著で、弱軸方向は接着層に沿って座屈した破壊が見られた。

また、破壊形態の観察について、幅狭面（層構成が見え断面側）において、鋸の挽き跡や年輪などで破壊状況が見にくかった。このため、試験前にプレーナーをかけるなど表面を平滑にすると、幅狭面の破壊状況をもう少し詳細に確認できたと思われる。

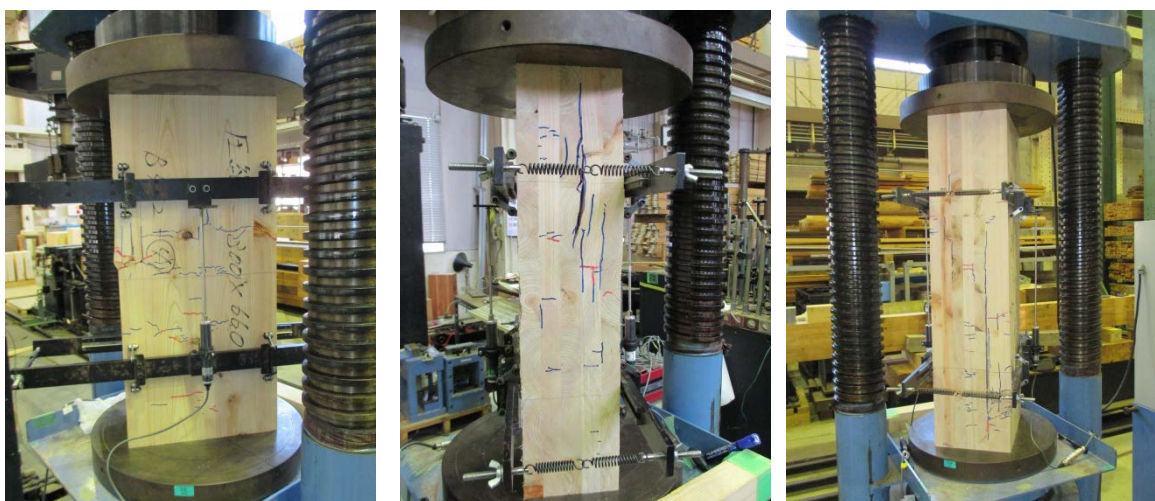


写真 4.2.3-2 圧縮試験 破壊の様子（左から 5 層 5 プライ、5 層 5 プライ弱軸、5 層 7 プライ）



表 4.2.3-2 圧縮試験結果（異等級 Mx120・全層ヒノキ）

構成	試験体 No	密度	縦振動 ヤング係数	圧縮 ヤング係数	Efr/Ec	最大荷重	圧縮強さ	最大荷重時 の変位	最大変位時 のひずみ	荷重 変位 曲線の 形状*	含水率
		$\rho$	Efr	Ec		Pmax	fc	dmax	$\epsilon$		MC
		kg/m <sup>3</sup>	kN/mm <sup>2</sup>	kN/mm <sup>2</sup>		kN	N/mm <sup>2</sup>	mm	%		%
3層3ブライ 強軸	B450-1	510	7.540	8.59	0.88	970	35.73	1.3	0.66%	B	10.10%
	B450-2	476	7.320	8.26	0.89	905	33.24	0.9	0.47%	A	9.98%
	B450-3	481	7.260	8.92	0.81	895	32.85	1.1	0.57%	A	9.52%
	B450-4	509	6.940	7.98	0.87	941	34.53	1.3	0.64%	B	10.03%
	B450-5	512	7.460	7.62	0.98	953	34.98	1	0.52%	A	10.44%
	B450-6	486	6.980	7.6	0.92	890	32.68	1.7	0.86%	A	10.26%
	平均	496	7.250	8.16	0.89	926	34.00	1.22	0.62%		10.1%
	最大	512	7.540	8.92		970	35.73	1.70	0.86%		10.4%
	最小	476	6.940	7.60		890	32.68	0.90	0.47%		9.5%
	標準偏差	16.4	0.25	0.53		33.4	1.26	0.29	0.14%		0.31%
	変動係数	3.3%	3.4%	6.5%		3.6%	3.7%	23.5%	22.2%		3.1%
3層4ブライ 強軸	B451-1	504	4.84	5.9	0.82	916	25.17	-0.6	-0.23%	B	10.39%
	B451-2	502	5.23	6.01	0.87	964	26.51	1.6	0.60%	B	9.71%
	B451-3	503	5.00	5.77	0.87	995	27.26	1.9	0.72%	A	9.39%
	B451-4	503	4.99	5.97	0.84	984	27.03	1.8	0.68%	A	10.99%
	B451-5	524	5.19	6.31	0.82	967	26.54	1.2	0.44%	B	9.66%
	B451-6	501	4.92	5.78	0.85	961	26.39	1.7	0.63%	B	9.79%
	平均	506	5.03	5.96	0.84	965	26.48	1.27	0.47%		9.99%
	最大	524	5.23	6.31		995	27.26	1.90	0.72%		10.99%
	最小	501	4.84	5.77		916	25.17	-0.60	-0.23%		9.39%
	標準偏差	8.8	0.15	0.20		27.1	0.73	0.95	0.36%		0.59%
	変動係数	1.7%	3.0%	3.3%		2.8%	2.7%	74.7%	75.6%		5.9%
5層5ブライ 強軸	B452-1	494	6.13	6.81	0.90	1289	28.37	1.9	0.57%	A	9.62%
	B452-2	503	5.98	6.29	0.95	1282	28.25	2.4	0.72%	A	9.35%
	B452-3	504	6.40	6.84	0.94	1349	29.74	2.4	0.72%	A	9.84%
	B452-4	504	6.36	6.75	0.94	1360	29.97	2.2	0.67%	B	9.48%
	B452-5	482	7.04	7.23	0.97	1374	30.29	1.9	0.57%	B	9.74%
	B452-6	478	6.50	6.57	0.99	1303	28.70	1.9	0.58%	0	9.49%
	平均	494	6.40	6.75	0.95	1326	29.22	2.12	0.64%		9.59%
	最大	504	7.04	7.23		1374	30.29	2.40	0.72%		9.84%
	最小	478	5.98	6.29		1282	28.25	1.90	0.57%		9.35%
	標準偏差	11.7	0.37	0.31		39.6	0.88	0.25	0.07%		0.18%
	変動係数	2.4%	5.7%	4.6%		3.0%	3.0%	11.7%	11.5%		1.9%
5層5ブライ 弱軸	B456-1	505	3.63	3.60	1.01	971	21.38	4	1.21%	A	9.18%
	B456-2	496	3.95	4.07	0.97	912	20.07	2.3	0.69%	B	9.59%
	B456-3	485	4.16	4.19	0.99	950	20.89	3.1	0.93%	A	9.30%
	B456-4	497	4.03	3.93	1.03	946	20.86	2.9	0.89%	A	8.96%
	B456-5	500	4.33	4.71	0.92	962	21.18	2.6	0.79%	A	9.27%
	B456-6	495	4.27	4.79	0.89	925	20.37	2.2	0.67%	A	8.99%
	平均	496	4.06	4.22	0.97	944	20.79	2.85	0.86%		9.22%
	最大	505	4.33	4.79		971	21.38	4.00	1.21%		9.59%
	最小	485	3.63	3.60		912	20.07	2.20	0.67%		8.96%
	標準偏差	6.6	0.25	0.46		22.3	0.49	0.66	0.20%		0.23%
	変動係数	1.3%	6.3%	10.9%		2.4%	2.4%	23.1%	23.1%		2.5%
5層7ブライ 強軸	B453-1	498	8.07	8.22	0.98	2241	35.29	2.6	0.56%	A	9.11%
	B453-2	506	8.30	8.32	1.00	2317	36.48	3.1	0.67%	A	9.30%
	B453-3	502	8.28	9.03	0.92	2182	34.37	2.2	0.49%	A	9.87%
	B453-4	505	8.80	9.36	0.94	2324	36.58	2.3	0.50%	B	9.25%
	平均	503	8.36	8.73	0.96	2266	35.68	2.55	0.56%		9.38%
	最大	506	8.80	9.36		2324	36.58	3.10	0.67%		9.87%
	最小	498	8.07	8.22		2182	34.37	2.20	0.49%		9.11%
	標準偏差	3.6	0.31	0.55		67.4	1.05	0.40	0.08%		0.33%
	変動係数	0.7%	3.7%	6.3%		3.0%	2.9%	15.8%	14.9%		3.6%
7層7ブライ 強軸	B454-1	500	5.80	5.96	0.97	1718	27.05	3.7	0.81%	A	9.22%
	B454-2	491	5.88	5.92	0.99	1694	26.67	3.1	0.68%	A	8.82%
	B454-3	493	5.80	5.82	1.00	1696	26.70	3	0.64%	A	9.21%
	B454-4	494	5.65	5.72	0.99	1709	26.88	2.9	0.63%	B	9.43%
	平均	495	5.78	5.86	0.99	1704	26.83	3.18	0.69%		9.17%
	最大	500	5.88	5.96		1718	27.05	3.70	0.81%		9.43%
	最小	491	5.65	5.72		1694	26.67	2.90	0.63%		8.82%
	標準偏差	3.9	0.10	0.11		11.3	0.18	0.36	0.08%		0.25%
	変動係数	0.8%	1.7%	1.8%		0.7%	0.7%	11.3%	12.0%		2.8%
9層9ブライ 強軸	B455-1	508	5.43	5.83	0.93	2110	25.89	3.1	0.62%	A	9.22%
	B455-2	498	5.45	5.64	0.97	2156	26.38	3.9	0.77%	B	9.33%
	B455-3	502	5.20	5.62	0.93	2111	25.90	5.7	1.12%	B	9.37%
	B455-4	509	5.87	6.22	0.94	2179	26.69	4.6	0.91%	A	9.20%
	平均	504	5.49	5.83	0.94	2139	26.22	4.33	0.86%		9.28%
	最大	509	5.87	6.22		2179	26.69	5.70	1.12%		9.37%
	最小	498	5.20	5.62		2110	25.89	3.10	0.62%		9.20%
	標準偏差	5.2	0.28	0.28		34.2	0.39	1.10	0.21%		0.08%
	変動係数	1.0%	5.1%	4.8%		1.6%	1.5%	25.5%	24.9%		0.9%

\*A:両側の変位計の変位が最大荷重に到達するまで同じ向きのもの。

B:両側の変位計の変位が最大荷重に到達する前に、それぞれ反対向きになったもの。

### (3) まとめ

全層ヒノキで構成された全6種の層構成の直交集成板について、圧縮試験を行った。試験の結果、ばらつきは少なく、曲げ強さと同様に、全層に対する強軸方向プライの比が増加するにつれて圧縮強度も増加した。

#### 4.2.4 ラミナ試験

##### (1) 試験方法

ヒノキのラミナの強度性能を把握するため、曲げ及び引張り試験を行った。

ラミナは連続式グレーディングマシン（飯田工業(株)MGFE-25 1 T）により測定された曲げヤング係数により表 4.2.4-1 に示す条件で挽き板を選別し、M120 のものを外層用、M30 から M90 までは内層用として縦継ぎした。フィンガージョイントは、水平型、フィンガー長：16.2 mm、ピッチ：5 mm、スカーフ傾斜比：1/9.3、先端厚さ：0.8 mm、嵌合度：0.1 mmとし、縦継ぎ接着には水性高分子イソシアネート系接着剤を使用した。試験体は断面寸法 34×111 mm、長さ 4,000 mmのラミナから採取した。なお、接着積層時の仕上げ断面寸法は、30×105 mmである。

##### ① 曲げ試験

試験体は、厚さ 34 mm、幅 111 mm、長さは厚みの 25 倍の 850 mmとし、中央にフィンガージョイントを一か所配置したものを 30 体用意した。曲げ試験は、万能圧縮引張試験機（(株)A&D、最大容量 100 k N）を用いて、スパンは短辺の 21 倍の 712 mm、3 等分 4 点荷重方式により載荷し、スパン中央で変位計（東京測器研究所 CDP-50）によりたわみを測定した。また、試験の前に縦振動法によりヤング係数を求めた。

##### ② 引張り試験

試験体は、厚さ 34 mm、幅 111 mm、長さ 1,800 mmとし、引張りグリップ間中央にフィンガージョイントを一か所配置したものを 30 体用意した。引張り試験は、実大木材強度試験機（(株)東京試験機、引張最大容量 400 k N）を用い、グリップ間は 880 mmとし、引張荷重をかけて最大荷重を測定し、引張り強さを求めた。

### (2) 結果

#### ① 曲げ試験

曲げ試験の結果を表 4.2.4-1 に、曲げヤング係数の曲げ強さ関係を図 4.2.4-1 に示す。なお、含水率補正はしていない。外層用ラミナの曲げヤング係数の平均値は 12.31kN/mm<sup>2</sup>、曲げ強さの平均値は 52.51N/mm<sup>2</sup>となった。内層用ラミナのヤング係数の平均値は 10.041kN/mm<sup>2</sup>、曲げ強さの平均値は 45.27N/mm<sup>2</sup>となった。ラミナ製造の際は、外層用を曲げヤング率 10.0 kN/mm<sup>2</sup>以上、内層用をそれ未満 2.5 kN/mm<sup>2</sup>としていたが、いずれも下限値以上となり安全側に選別がされていた結果となった。また、内層用ラミナのヤング係数の変動係数は 8.2%となり、選別範囲は 2.5~10.0 kN/mm<sup>2</sup>と幅広い範囲であったがばらつきがすくなかった。破壊形態は、ほぼフィンガージョイントの破壊によるものであった。

表 4.2.4-1 ヒノキラミナ曲げ試験 結果

外層用 試験体数：30	密度 kg/mm <sup>3</sup>	Efr kN/mm <sup>2</sup>	fm N/mm <sup>2</sup>	Em kN/mm <sup>2</sup>	Efr/Em
最小値	434.67	11.18	41.16	10.77	1.03
平均	505.31	12.66	52.51	12.31	
最大値	585.64	14.12	65.34	13.67	
標準偏差	29.73	0.87	6.65	0.84	
変動係数	5.9%	6.9%	12.7%	6.9%	
5%下限値	正規分布として		40.08	10.73	

内層用 試験体数：30	密度 kg/mm <sup>3</sup>	Efr kN/mm <sup>2</sup>	fm N/mm <sup>2</sup>	Em kN/mm <sup>2</sup>	Efr/Em
最小値	449.37	8.78	30.41	8.25	1.02
平均	510.97	10.25	45.27	10.04	
最大値	588.89	11.74	57.99	11.16	
標準偏差	39.79	0.72	7.48	0.82	
変動係数	7.8%	7.0%	16.5%	8.2%	
5%下限値	正規分布として		31.28	8.50	

Efr：縦振動法によるヤング係数， fm：曲げ強さ， Em：見かけのヤング係数

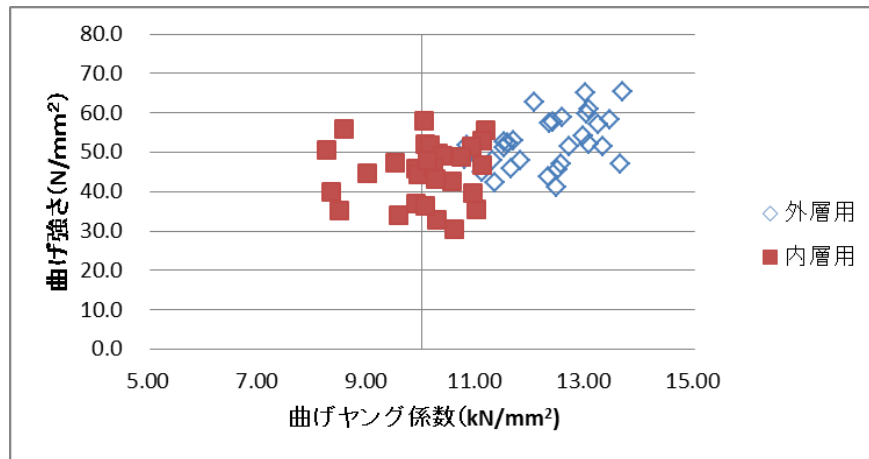


図 4.2.4-1 ヒノキラミナの曲げヤング係数と曲げ強さ

## ② 引張り試験

曲げ試験の結果を表 4.2.4-2 に示す。外層用ラミナの引張り強さの平均値は 31.93N/mm<sup>2</sup>、内層用ラミナで 27.87N/mm<sup>2</sup>となった。ラミナの破壊を写真 4.2.4-1 に示す。破壊はフィンガージョイント又は節が起因するものがほとんどで、フィンガージョンと節の破壊がつながる形態が多かった。



写真 4.2.4-1 ラミナの引張り破壊状況

表 4.2.4-2 ヒノキラミナの引張り試験結果

外層用 試験体数：30	密度 kg/mm <sup>3</sup>	Efr kN/mm <sup>2</sup>	引張り強さ N/mm <sup>2</sup>
最小値	439	11.06	21.30
平均	507	12.71	31.93
最大値	598	15.17	45.46
標準偏差	38.54	0.96	5.72
変動係数	7.60%	7.55%	17.92%
5%下限値	正規分布として		21.23

内層用 試験体数：30	密度 kg/mm <sup>3</sup>	Efr kN/mm <sup>2</sup>	引張り強さ N/mm <sup>2</sup>
最小値	423	8.58	18.33
平均	515	10.26	27.87
最大値	576	13.64	37.71
標準偏差	38.75	0.90	4.81
変動係数	7.53%	8.81%	17.27%
5%下限値	正規分布として		18.87

Efr:縦振動法によるヤング係数

### (3) まとめ

ラミナ製造時に外層 M120A 用として選別した原板の曲げヤング係数は、工場測定値で JAS の基準値 12.0N/mm<sup>2</sup>を下回ったが、今回の縦継ぎ後のラミナ 30 体の曲げ試験の結果では、JAS 基準値を超える結果となった。JAS の基準では、すべてのラミナの曲げヤング係数が、定める下限値以上でなければならないこととなっており、今回のような縦継ぎの後のラミナで曲げヤング係数を管理しないケースでは、原板と縦継ぎ後の曲げヤング係数の性能変化の確認が必要と思われる。

曲げ強さはいずれも大きく JAS 基準を上回った。

また、ラミナ製造時の原板の約 95%は曲げヤング係数が JAS の M90 A ラミナの下限值以上であったこと、縦継ぎラミナと無縦継ぎラミナの両方を使う可能性があるとする、今回の結果では、強度等級 Mx90 又は S90 が歩留まりや製造効率のうえで優位であったと思われる。

### 4.3 まとめ

道産樹種としてのカラマツおよびヒノキを用いて外層及び内層を同樹種で構成した CLT を製造し、面外方向の曲げおよびせん断の強度試験と短柱の圧縮試験を行った。

1) カラマツ CLT の強軸の各強度を表 4.3-1 に、弱軸を表 4.3-2 に示す。

表 4.3-1 層構成毎の強軸方向の各種強度性能（平均値と変動係数） 単位：N/mm<sup>2</sup>

試験項目	層構成					
	3層3プライ	3層4プライ	5層5プライ	5層7プライ	7層7プライ	9層9プライ
面外曲げ	42.2 (15.5%)	32.7 (15.4%)	33.1 (9.4%)	33.9 (9.1%)	25.6 (11.4%)	21.4 (5.9%)
面外せん断	3.84 (3.7%)	2.76 (1.8%)	3.40 (4.0%)	3.27 (2.2%)	2.42 (1.5%)	2.06 (1.7%)
短柱圧縮	34.1 (3.8%)	26.1 (3.4%)	29.4 (3.8%)	33.9 (3.5%)	27.9 (3.3%)	26.1 (4.7%)

表 4.3-2 層構成毎の弱軸方向の各種強度性能（平均値と変動係数） 単位：N/mm<sup>2</sup>

試験項目	層構成					
	3層3プライ	3層4プライ	5層5プライ	5層7プライ	7層7プライ	9層9プライ
面外曲げ	7.5 (17.6%)	11.2 (6.8%)	13.4 (13.8%)	6.3 (13.5%)	13.5 (11.6%)	13.2 (4.4%)
面外せん断	曲げ破壊	曲げ破壊	1.64 (10.7%)	0.88 (18.4%)	1.41 (10.4%)	1.55 (2.1%)
短柱圧縮	15.6 (4.2%)	21.4 (5.0%)	17.8 (4.8%)	14.8 (6.4%)	19.5 (1.7%)	20.5 (3.3%)

2) ヒノキ CLT の強軸の各強度を表 4.3-3 に示す。

表 4.3-3 層構成毎の強軸方向の各種強度性能（平均値と変動係数） 単位：N/mm<sup>2</sup>

試験項目	層構成					
	3層3プライ	3層4プライ	5層5プライ	5層7プライ	7層7プライ	9層9プライ
面外曲げ	51.0 (11.5%)	36.7 (7.5%)	35.4 (15.7%)	38.9 (16.5%)	28.7 (11.4%)	25.4 (6.8%)
面外せん断	3.04 (5.8%)	3.04 (4.2%)	3.40 (4.0%)	3.38 (5.1%)	2.73 (4.5%)	2.43 (4.1%)
短柱圧縮	34.0 (3.7%)	26.5 (2.7%)	29.2 (3.0%)	35.7 (2.9%)	26.8 (0.7%)	26.2 (1.5%)

3) ヒノキラミナの強度試験結果を表 4.3-4 に示す。

表 4.3-4 ヒノキラミナの強度試験結果

区分	密度※ (kg/m <sup>3</sup> )	縦弾性係数※ (kN/mm <sup>2</sup> )	曲げ強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張り強度 (N/mm <sup>2</sup> )
上位	506	12.66	52.5 (12.7%)	31.9 (17.9%)
下位	513	10.25	45.3 (16.5%)	27.9 (17.3%)
下位/上位	1.01	0.81	0.86	0.87
曲げに対する比：上位等級				0.61
曲げに対する比：下位等級				0.62

※曲げ試験体と引張り試験体各 30 体の平均値



## 5. まとめ

JAS規格に示される製造条件で製造されるCLTの力学的特性に関連する各種強度試験を行ってデータ蓄積を行った。以下に得られた結果を項目別に述べる。

本事業の試験体製造において外層用に用いたヒノキのラミナ等級には、当初 M120 を目標とした。ただし、グレーディング時のデータでは平均値が  $11\text{kN/mm}^2$ 、一方、ラミナ試験では  $12\text{kN/mm}^2$  を超える数値も記録されており、ラミナ等級が M90 だったのか M120 だったかの判断は難しい。そこで、本報告書では CLT の強度等級はあえて統一しないこととした。

### ①層構成が CLT の強度性能に与える影響

外層用にヒノキ、内層用にスギを用いた仕様で、3層3プライ、3層4プライ、5層5プライ、5層7プライ、7層7プライ、9層9プライの6種類のラミナ構成の試験体を製造し各種強度試験を行った。対象とする強度の種類は、面外曲げ、面外せん断、面内曲げ、短柱圧縮、中間柱・長柱、縦引張り、面内せん断とした。表 5-1 に強軸、表 5-2 に弱軸方向の強度値（平均値と変動係数）を層構成別に示す。いずれの強度性能値も層構成の影響を受けることが明らかになった。

表 5-1 層構成毎の強軸方向の各種強度性能（平均値） 単位： $\text{N/mm}^2$

試験項目	層構成					
	3層3プライ	3層4プライ	5層5プライ	5層7プライ	7層7プライ	9層9プライ
面外せん断	3.44 (7.5%)	2.32 (7.9%)	2.47 (5.2%)	2.74 (4.5%)	2.17 (4.9%)	1.77 (4.4%)
面内曲げ	29.6 (8.9%)	21.9 (5.6%)	23.4 (9.0%)	25.8 (11.1%)	20.0 (10.9%)	
短柱圧縮	33.9 (3.3%)	25.2 (4.0%)	26.0 (3.2%)	33.1 (1.5%)	24.4 (3.1%)	22.7 (3.4%)
縦引張り	20.5 (12.7%)	16.6 (5.8%)	16.3 (6.6%)			
面内せん断	2.83	2.42	3.21			

表 5-2 層構成毎の弱軸方向の各種強度性能（平均値） 単位： $\text{N/mm}^2$

試験項目	層構成					
	3層3プライ	3層4プライ	5層5プライ	5層7プライ	7層7プライ	9層9プライ
面外せん断	(0.92)	(1.27)	1.27 (7.1%)	0.80 (16.2%)	1.28 (11.1%)	1.28 (10.9%)
面内曲げ	10.0 (17.6%)	13.7 (9.4%)	11.8 (10.6%)	9.1 (11.1%)	11.6 (9.4%)	
短柱圧縮	15.9 (5.0%)	20.4 (5.4%)	16.7 (3.6%)	14.2 (2.4%)	17.1 (4.5%)	18.5 (2.8%)
縦引張り	6.1 (14.4%)	9.1 (9.5%)	7.9 (14.4%)			

これらの強度値の推定精度について、面外曲げ、面内曲げ、圧縮（短柱）、縦引張りについて、弾性係数と強度の推定値と実験値の関係を図 5-1～5-4 に示す。

#### 1) 面外曲げ

曲げヤング係数については、せん断解析法で層構成の影響を精度よく推定可能である。一方、曲げ強度については、全体的に危険側の推定となることから精度の向上を図る必要がある。

#### 2) 面内曲げ

曲げヤング係数については、等価断面法で層構成の影響を精度よく推定可能である。一方、曲げ強度については、強軸が危険側の推定、弱軸安全側の推定となることから精度の向上を図る必要がある。

#### 3) 圧縮（短柱）

ヤング係数と強度の推定は、等価断面法で強軸、弱軸とも層構成の影響について推定可能だが、若干の精度向上が必要である。

#### 4) 縦引張り

ヤング係数と強度ともに、精度よく推定できる。層数、プライ数が増加した場合については必要に応じて確認する。

ラミナ性能からの推定対象ではない、中間柱・長柱に対する座屈性能、面外せん断、面内せん断に関しては以下のとおりである。

#### 5) 中間柱・長柱に対する座屈性能

平成 25 年度補正事業では安全側で推定することが可能な方法が示されたが、今年度対象としたラミナ構成において、一部に危険側の推定となる可能性が示唆された。引き続き検討する必要がある。

#### 6) 面外せん断及び面内せん断

面外せん断強度、面内せん断強度ともに層構成の影響を受けることがわかった。これらの強度発現機構については、ラミナ等級の組合せなどを変えた試験体のデータなども加えて引き続き検討する必要がある。

### ② 試験体寸法が CLT の強度性能に与える影響

試験体幅が面外曲げ、縦引張り強度性能に与える影響を実験的に検証し、次の結果を得た。

- 1) 面外曲げ強度は、試験体幅の増加にともない平均値が徐々に低下するとともにバラツキも減少した。600mm 幅の試験データが低かったことについて精査が必要であるが、面外曲げ強度に対する試験体幅の寸法調整係数として 0.070 が得られた。
- 2) 縦引張り強度は、試験体幅の増加にともなう変化はなかった。

### ③ 樹種が CLT の強度性能に与える影響

面外曲げ、面内曲げ、圧縮（短柱）、縦引張りについてはラミナの層構成の影響を受けるものの、ラミナのヤング係数や強度値から強度推定できる可能性が示された。しかしながら、面外せん断と面内せん断については樹種の影響を受ける可能性も示された。面外せん断強度について表 5-3 に、また、面内せん断強度について表 5-4 示す。

表 5-3 面外・強軸方向のせん断性能に及ぼす樹種の影響

外層	内層	3 層 3 プライ		3 層 4 プライ		5 層 5 プライ		5 層 7 プライ		7 層 7 プライ		9 層 9 プライ	
		G	$\tau$	G	$\tau$	G	$\tau$	G	$\tau$	G	$\tau$	G	$\tau$
スギ	スギ	0.275	2.97	0.180	2.18	0.246	2.27	0.305	2.59	0.263	1.98		1.81
ヒノキ	スギ	0.260	3.44	0.179	2.24	0.246	2.47	0.285	2.74	0.248	2.17		1.77
ヒノキ	ヒノキ	0.430	4.00	0.300	3.04	0.400	3.04	0.450	3.38	0.400	2.73	0.400	2.43
カラマツ	カラマツ	0.381	3.87	0.246	2.76	0.338	3.40	0.392	3.27	0.347	2.42	0.337	2.06

G：TGH 法により測定された面外方向のせん断弾性係数 (kN/mm<sup>2</sup>)

スギースギ、ヒノキースギは面内曲げ及び引張り試験体 (6m 長さ) の測定値

ヒノキーヒノキ、カラマツーカラマツは面外曲げ試験体 (長さは試験体厚さの 23 倍) の測定値

$\tau$ ：面外方向のせん断強度 (N/mm<sup>2</sup>)

スギースギのデータは平成 25 年度補正事業による

表 5-4 面内せん断性能に及ぼす樹種の影響

層構成	スギースギ			ヒノキースギ		
	G	$\tau$	G(TGH)	G	$\tau$	G(TGH)
3 層 3 プライ	0.659	3.03	0.803	0.479	2.83	0.926
3 層 4 プライ	0.657	2.98	0.827	0.549	2.42	0.837
5 層 5 プライ	0.557	3.02	0.826	0.551	3.21	0.855

G：面内せん断試験で得られたせん断弾性係数 (kN/mm<sup>2</sup>)

$\tau$ ：面内せん断試験で得られた面内せん断強度 (N/mm<sup>2</sup>)

G (TGH)：面内曲げ及び引張り試験体で TGH 法により得た面内せん断弾性係数 (kN/mm<sup>2</sup>)

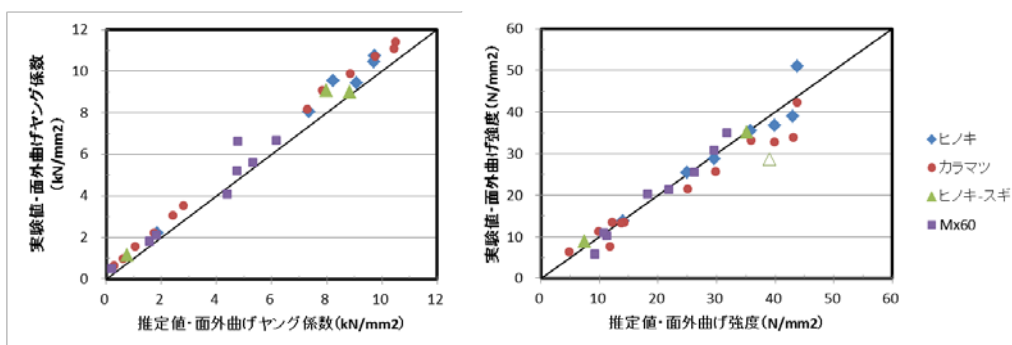


図 5-1 面外曲げ性能の推定と実験値の関係 (左：ヤング係数、右：強度)

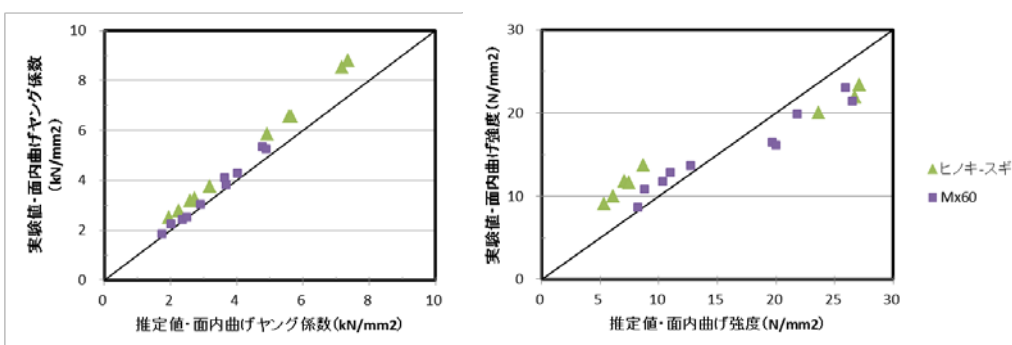


図 5-2 面内曲げ性能の推定と実験値の関係 (左：ヤング係数、右：強度)

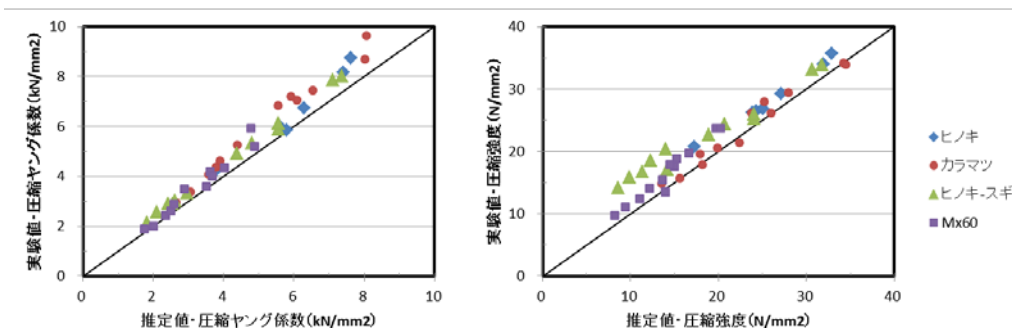


図 5-3 短柱圧縮性能の推定と実験値の関係 (左：ヤング係数、右：強度)

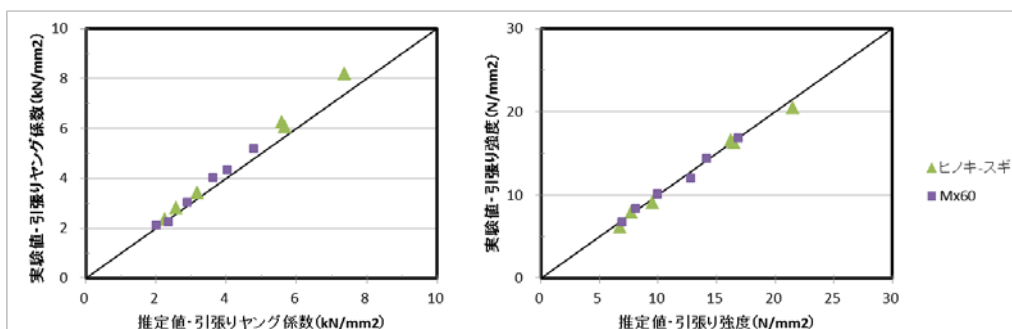


図 5-4 縦引張り性能の推定と実験値の関係 (左：ヤング係数、右：強度)

