

CLT等新製品・新技術利用促進事業のうち  
CLT実用化促進（強度データの収集・分析）  
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

平成 25 年度補正 林野庁委託事業 CLT 等新製品・新技術利用促進事業  
C L T 実用化促進（強度データ等収集・分析）

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	3
2.1 面外曲げ	3
2.2 面外せん断	10
2.3 面内曲げ	19
2.4 短柱圧縮	28
2.5 中間柱・長柱	45
2.6 引張り	54
2.7 面内せん断	67
2.8 まとめ	78
3. 試験体寸法が強度性能に与える影響	80
3.1 面外曲げ	80
3.2 面外せん断	97
3.3 引張り	107
3.4 まとめ	111
4. ラミナ性能の把握	112
4.1 スギ	112
4.2 カラマツ	115
4.3 まとめ	120
5. まとめ	121

## 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ことからデータ収集は十分とはいえない。

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って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。したがって、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。しかしながら、幅 1 m を超えるような大板の強度性能試験はその実施例が極めて少ないことから、実施にあたって、まず、試験装置や試験方法の検証を行う必要がある。
- 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。

### 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 を対象とした。製造に用いるラミナの樹種はスギとし、外層に M60、内層に M30 を配した。

#### 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

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	○	○	○	○	○	○
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、面外せん断、縦引張り試験とした。

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	○	○	○	○	○
面外せん断	○	○	○	○	○
縦引張り	○	○	○		

### 1.2.3 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。特にラミナ等級内の品質・材質変動幅とラミナの性能との関係を実験的に検証した。本事業でスギ（CLT 試験体の製造に用いたラミナ）と北海道産カラマツを対象とした。強度試験項目は、曲げ、圧縮、縦引張りとした。

### 1.2.4 試験体製造

外層用の M60 ラミナを選別する際の曲げヤング係数による区分は  $6.0\text{kN/mm}^2$  以上、 $9.0\text{kN/mm}^2$  以下、内層用の M30 ラミナでは  $2.5\text{kN/mm}^2$  以上  $6.0\text{kN/mm}^2$  未満とした。

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。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た。接着剤は、たて継ぎ用には主剤 MK200、硬化剤 H-30（（株）オーシカ製）、積層接着には主剤 AUX160、硬化剤 AUH16（アイカ工業(株)製）のいずれも水性高分子イソシアネート系樹脂接着剤を用いた。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  $0.6\text{MPa}$ 、それ以外では  $0.8\text{MPa}$  とし、圧縮時間は製品厚さによらず 40 分とした。表 1-3 に対象とした試験項目と試験体仕様ならびにパネルの製造番号を示す。

表 1-3 試験項目、試験体仕様とパネルの製造番号

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	A665
			圧縮(短柱)、面内せん断	90	1995	6030	A666
		弱	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	A667
							A668
							A669
							A670
	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	A671
			面内せん断	120	2110	6030	A672
		弱	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	A673
							A674
							A675
							A676
	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	A677
			面内せん断	150	2310	6030	A678
		弱	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	A679
							A733
							A734
							A735
	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	A736
							A737
		弱	面外曲げ、面外せん断、面内曲げ、 圧縮(短柱、中間柱)	210	2625	6030	A738
							A739
							A740
							A741
	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)	210	2625	6030	A742
							A743
		弱	面外曲げ、面外せん断、面内曲げ、 圧縮(短柱、中間柱)	210	2625	6030	A744
							A745
							A746
							A747
	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)	270	2625	6030	A748
							A749
		弱	面外曲げ、面外せん断、面内曲げ、 圧縮(短柱、中間柱)	270	2625	6030	A750
							A751
							A752
							A753
幅	150、300、600、1200	強	面外曲げ、面外せん断	150	2625	6030	A754
							A755
							A756
							A757
							A653
							A654
	150、300、600	強	縦引張り	150	2625	6030	A655
							A656
							A657
	2400	強	面外曲げ	150	2625	4030	A658
							A659
							A660
							A661
							A662
							A663
							A664

## 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、スギラミナを使用し 9 層 9ply の強軸及び弱軸、7 層 7ply の強軸及び弱軸、5 層 7ply の強軸である。試験体を幅 300mm、長さは厚さの 23 倍とした。

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

非破壊試験の結果を表 2.1-1 に示す。

##### (2) 破壊試験

表 2.1-2 に短期面外曲げ試験結果を、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 2.1-1 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

9層9ply 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>
A752-21-1ma	4.07	5.52	0.235
A752-21-2ma	4.15	5.43	0.220
A753-21-1ma	4.06	5.56	0.270
A753-21-2ma	4.09	5.47	0.267
A754-21-1ma	3.95	5.29	0.253
A754-21-2ma	3.98	5.43	0.251
最小値	3.95	5.29	0.220
平均値	4.05	5.45	0.250
最大値	4.15	5.56	0.270
標準偏差	0.07	0.10	0.02
変動係数%	1.8	1.7	7.6

9層9ply 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>
A755-21-1mi	3.11	2.25	0.231
A755-21-2mi	2.93	2.21	0.213
A756-21-1mi	3.13	2.22	0.244
A756-21-2mi	3.20	2.29	0.243
A757-21-1mi	2.93	2.71	0.161
A757-21-2mi	2.94	2.23	0.203
最小値	2.93	2.21	0.161
平均値	3.04	2.32	0.216
最大値	3.20	2.71	0.244
標準偏差	0.12	0.20	0.03
変動係数%	3.9	8.4	14.6

7層7ply 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>
A746-21-1ma	4.05	5.21	0.316
A746-21-2ma	4.33	6.00	0.260
A747-21-1ma	4.15	6.00	0.244
A747-21-2ma	4.42	6.09	0.255
A748-21-1ma	4.38	6.20	0.243
A748-21-2ma	4.33	6.04	0.246
最小値	4.05	5.21	0.243
平均値	4.28	5.92	0.261
最大値	4.42	6.20	0.316
標準偏差	0.15	0.36	0.03
変動係数%	3.4	6.0	10.6

7層7ply 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>
A749-21-1mi	2.88	2.37	0.166
A749-21-2mi	2.92	2.01	0.212
A750-21-1mi	2.87	1.98	0.210
A750-21-2mi	2.92	2.03	0.207
A751-21-1mi	2.85	2.00	0.195
A751-21-2mi	2.89	1.97	0.198
最小値	2.85	1.97	0.166
平均値	2.89	2.06	0.198
最大値	2.92	2.37	0.212
標準偏差	0.03	0.15	0.02
変動係数%	1.0	7.5	8.5

5層7ply 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>
A740-21-1ma	5.64	7.31	0.303
A740-21-2ma	5.49	7.44	0.281
A741-21-1ma	5.89	7.11	0.324
A741-21-2ma	5.63	7.25	0.302
A742-21-1ma	5.67	7.07	0.317
A742-21-2ma	5.72	7.96	0.263
最小値	5.49	7.07	0.263
平均値	5.68	7.36	0.298
最大値	5.89	7.96	0.324
標準偏差	0.13	0.33	0.02
変動係数%	2.3	4.4	7.6

表 2.1-2 面外曲げ試験結果

9層9ply 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
A752-21-1ma	410	90.5	130.2	22.9	4.79	5.03	19.6	105.4	6194	曲げ
A752-21-2ma	404	85.4	128.8	21.8	4.65	4.93	20.1	112.0	5830	曲げ
A753-21-1ma	417	66.7	92.2	16.9	4.63	4.86	16.9	92.2	3092	曲げ
A753-21-2ma	411	79.4	112.6	20.0	4.53	4.73	20.0	112.6	4546	曲げ
A754-21-1ma	398	81.0	123.2	20.6	4.40	4.58	18.8	110.6	5120	曲げ
A754-21-2ma	409	75.5	115.2	19.1	4.52	4.83	17.4	97.6	4610	曲げ
最小値	398	66.7	92.2	16.9	4.40	4.58	16.9	92.2	3092	
平均値	408	79.7	117.0	20.2	4.59	4.83	18.8	105.1	4899	
最大値	417	90.5	130.2	22.9	4.79	5.03	20.1	112.6	6194	
標準偏差	6.5	8.19	14.06	2.12	0.13	0.16	1.36	8.45	1101	
変動係数%	1.6	10.3	12.0	10.5	2.9	3.3	7.2	8.0	22.5	
			5%下限値	15.3	4.27	4.46				

9層9ply 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
A755-21-1mi	401	45.2	136.2	11.5	2.16	2.23	11.5	136.2	3122	曲げ
A755-21-2mi	401	45.7	149.3	11.6	2.00	2.09	11.6	149.3	3469	曲げ
A756-21-1mi	402	47.0	143.7	11.8	2.11	2.15	11.7	142.3	3424	曲げ
A756-21-2mi	402	42.4	130.2	10.8	2.11	2.12	10.8	130.2	2795	曲げ
A757-21-1mi	402	41.1	125.4	10.4	2.10	2.19	10.4	125.4	2590	曲げ
A757-21-2mi	403	37.3	118.9	9.5	2.05	2.11	9.4	118.1	2257	曲げ
最小値	401	37.3	118.9	9.5	2.00	2.09	9.4	118.1	2257	
平均値	402	43.1	133.9	10.9	2.09	2.15	10.9	133.6	2943	
最大値	403	47.0	149.3	11.8	2.16	2.23	11.7	149.3	3469	
標準偏差	0.6	3.58	11.38	0.88	0.06	0.06	0.88	11.37	481	
変動係数%	0.1	8.3	8.5	8.1	2.7	2.6	8.1	8.5	16.4	
			5%下限値	8.9	1.96	2.02				

7層7ply 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
A746-21-1ma	405	62.2	81.9	20.3	4.91	5.31	20.3	81.9	2584	曲げ
A746-21-2ma	401	76.2	93.5	24.8	5.33	5.64	24.1	90.5	3644	曲げ
A747-21-1ma	403	64.9	80.2	21.1	5.38	5.82	20.3	74.5	2709	曲げ
A747-21-2ma	405	61.0	75.3	19.9	5.21	5.73	19.9	75.3	2321	曲げ
A748-21-1ma	413	68.5	87.7	22.4	5.24	5.69	22.3	85.3	3132	曲げ
A748-21-2ma	401	60.8	79.8	19.7	5.10	5.35	17.4	66.8	2524	曲げ
最小値	401	60.8	75.3	19.7	4.91	5.31	17.4	66.8	2321	
平均値	405	65.6	83.1	21.3	5.19	5.59	20.7	79.1	2819	
最大値	413	76.2	93.5	24.8	5.38	5.82	24.1	90.5	3644	
標準偏差	4.3	5.95	6.48	1.94	0.17	0.21	2.29	8.51	486	
変動係数%	1.1	9.1	7.8	9.1	3.3	3.8	11.1	10.8	17.2	
			5%下限値	16.8	4.79	5.10				

7層7ply 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
A749-21-1mi	408	32.2	117.1	10.5	1.92	2.01	5.6	57.8	1976	曲げ
A749-21-2mi	405	32.1	112.3	10.4	1.86	1.95	10.4	111.7	1826	曲げ
A750-21-1mi	406	28.3	104.9	9.1	1.72	1.76	9.1	104.9	1502	曲げ
A750-21-2mi	406	27.4	95.6	8.9	1.83	1.86	8.9	95.6	1312	曲げ
A751-21-1mi	397	32.7	120.4	10.7	1.80	1.86	9.1	101.8	2009	曲げ
A751-21-2mi	399	34.6	129.9	11.3	1.75	1.77	10.7	122.3	2281	曲げ
最小値	397	27.4	95.6	8.9	1.72	1.76	5.6	57.8	1312	
平均値	403	31.2	113.4	10.2	1.81	1.87	9.0	99.0	1818	
最大値	408	34.6	129.9	11.3	1.92	2.01	10.7	122.3	2281	
標準偏差	4.4	2.79	12.03	0.94	0.07	0.10	1.80	22.17	355	
変動係数%	1.1	8.9	10.6	9.3	4.0	5.3	20.1	22.4	19.6	
			5%下限値	8.0	1.65	1.64				

5層7ply 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
A740-21-1ma	424	106.2	120.4	34.8	6.69	7.42	28.1	84.3	7081	曲げ
A740-21-2ma	430	95.6	102.4	31.4	6.35	6.78	26.6	84.1	5075	曲げ
A741-21-1ma	415	99.6	95.8	32.5	6.84	7.40	31.8	93.5	4877	曲げ
A741-21-2ma	418	89.7	86.7	29.2	6.71	7.31	29.2	86.7	3928	曲げ
A742-21-1ma	405	83.4	87.1	27.2	6.64	7.19	23.4	69.4	3831	曲げ
A742-21-2ma	403	91.0	88.2	29.7	6.81	7.33	29.1	84.9	4121	曲げ
最小値	403	83.4	86.7	27.2	6.35	6.78	23.4	69.4	3831	
平均値	416	94.3	96.8	30.8	6.67	7.24	28.0	83.8	4819	
最大値	430	106.2	120.4	34.8	6.84	7.42	31.8	93.5	7081	
標準偏差	10.5	8.03	13.10	2.67	0.17	0.24	2.87	7.91	1220	
変動係数%	2.5	8.5	13.5	8.7	2.6	3.3	10.2	9.4	25.3	
			5%下限値	24.6	6.27	6.68				

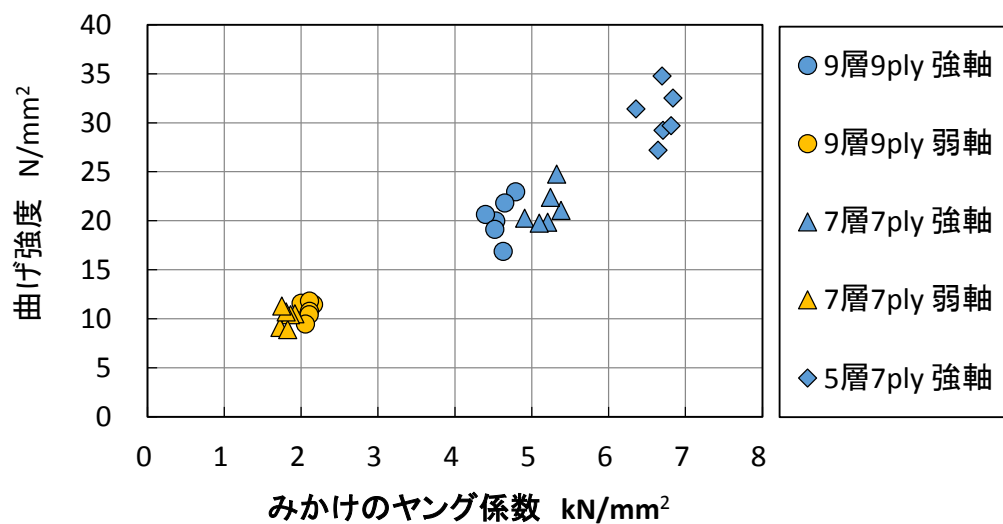


図 2.1-1 曲げヤング係数と曲げ強度の関係



写真 2.1-1 試験状況



写真 2.1-2 9層9ply 強軸の破壊状況





写真 2.1-3 9層 9ply 弱軸の破壊状況

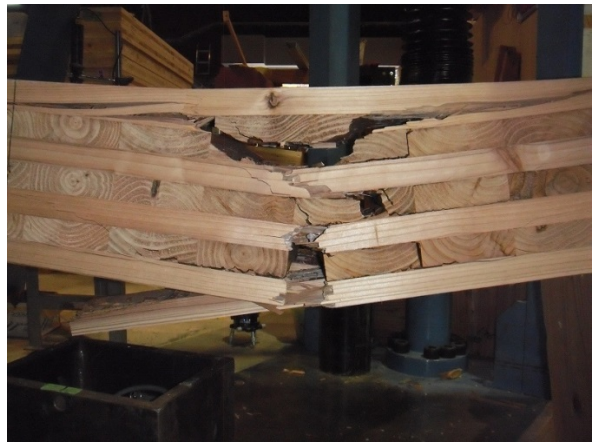


写真 2.1-4 7層 7ply 強軸の破壊状況



写真 2.1-5 7層 7ply 弱軸の破壊状況



写真 2.1-6 5層 7ply 強軸の破壊状況

### 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 30%から 40%程度低めに、弱軸試験体では縦振動ヤング係数が 25%から 30%程度高めになることが分かった。

表 2.1-1 の縦振動法、たわみ振動法 (T.G.H.法) によるヤング係数と静的曲げヤング係数を比較すると、9層 9ply、7層 7ply とともに強軸では縦振動ヤング係数より静的曲げヤング係数が高めに、たわみ振動ヤング係数より静的曲げヤング係数が低めになることがわかった。弱軸では縦振動ヤング係数より静的曲げヤング係数が低めに、たわみ振動ヤング係数と静的曲げヤング係数がほぼ同じになった。

5層 7ply 強軸では、縦振動ヤング係数より静的曲げヤング係数が低めに、たわみ振動ヤング係数と静的曲げヤング係数がほぼ同じであることがわかった。

層構成が面外曲げ強度性能に与える影響について、9層 9ply 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 1.8 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 2.2 倍程度であった。7層 7ply 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 2.1 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 2.9 倍程度であった。

9層 9ply と 7層 7ply の強軸の比較では、曲げ強度は、平均値が 5%、5%下限値は 9%、9層 9ply が低かった。みかけのヤング係数は、平均値、5%下限値とも 10%程度、9層 9ply が低かった。9層 9ply と 7層 7ply の弱軸の比較では、曲げ強度は、平均値、5%下限値とも 10%程度、9層 9ply が高かった。みかけのヤング係数は、平均値が 15%、5%下限値は 19%、9層 9ply が高かった。

また、5層 7ply と 7層 7ply の強軸の比較では、曲げ強度は、平均値、5%下限値とも 45%程度、

みかけのヤング係数は、平均値、5%下限値とも 30%程度 5 層 7ply が高かった。

なお、破壊形態は、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。

9 層 9ply の強軸と弱軸の比較では、曲げ強度性能は、強軸が弱軸の 2 倍程度あった。

7 層 7ply の強軸と弱軸の比較では、曲げ強度は、強軸が弱軸の 2 倍程度、みかけのヤング係数は、強軸が弱軸の 3 倍程度であった。

9 層 9ply と 7 層 7ply の強軸の比較では、曲げ強度性能は、9 層 9ply が低かった。9 層 9ply と 7 層 7ply の弱軸の比較では、曲げ強度性能は、9 層 9ply が高かった。

また、5 層 7ply と 7 層 7ply の強軸の比較では、曲げ強度性能は、5 層 7ply が高かった。

なお、破壊形態は、すべて曲げ破壊であった。

文献

2.1-1) 久保島吉貴：未発表資料



## 2.2 面外せん断性能

### 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。

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)	せん断スパン比*
3層3プライ	Mx60	強軸	6	d90-W300-L630	70	1.72
		弱軸	6	d90-W300-L630	70	1.72
3層4プライ	Mx60	強軸	6	d120-W300-L840	100	1.67
		弱軸	6	d120-W300-L840	100	1.67
5層5プライ	Mx60	強軸	6	d150-W300-L1,050	130	1.63
		弱軸	6	d150-W300-L1,050	130	1.63
5層7プライ	Mx60	強軸	6	d210-W300-L1,470	190	1.59
		弱軸	6	d210-W300-L1,470	190	1.59
7層7プライ	Mx60	強軸	6	d210-W300-L1,470	190	1.59
		弱軸	6	d210-W300-L1,470	190	1.59
9層9プライ	Mx60	強軸	6	d270-W300-L1,890	250	1.57
		弱軸	6	d270-W300-L1,890	250	1.57

\* せん断スパン比の算定に際しては、加圧板の幅相当分を除いた、実質的なせん断スパン比とした。

加圧板幅：試験体厚さ－20mm（面取り部：r=10mm）。

### 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。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。

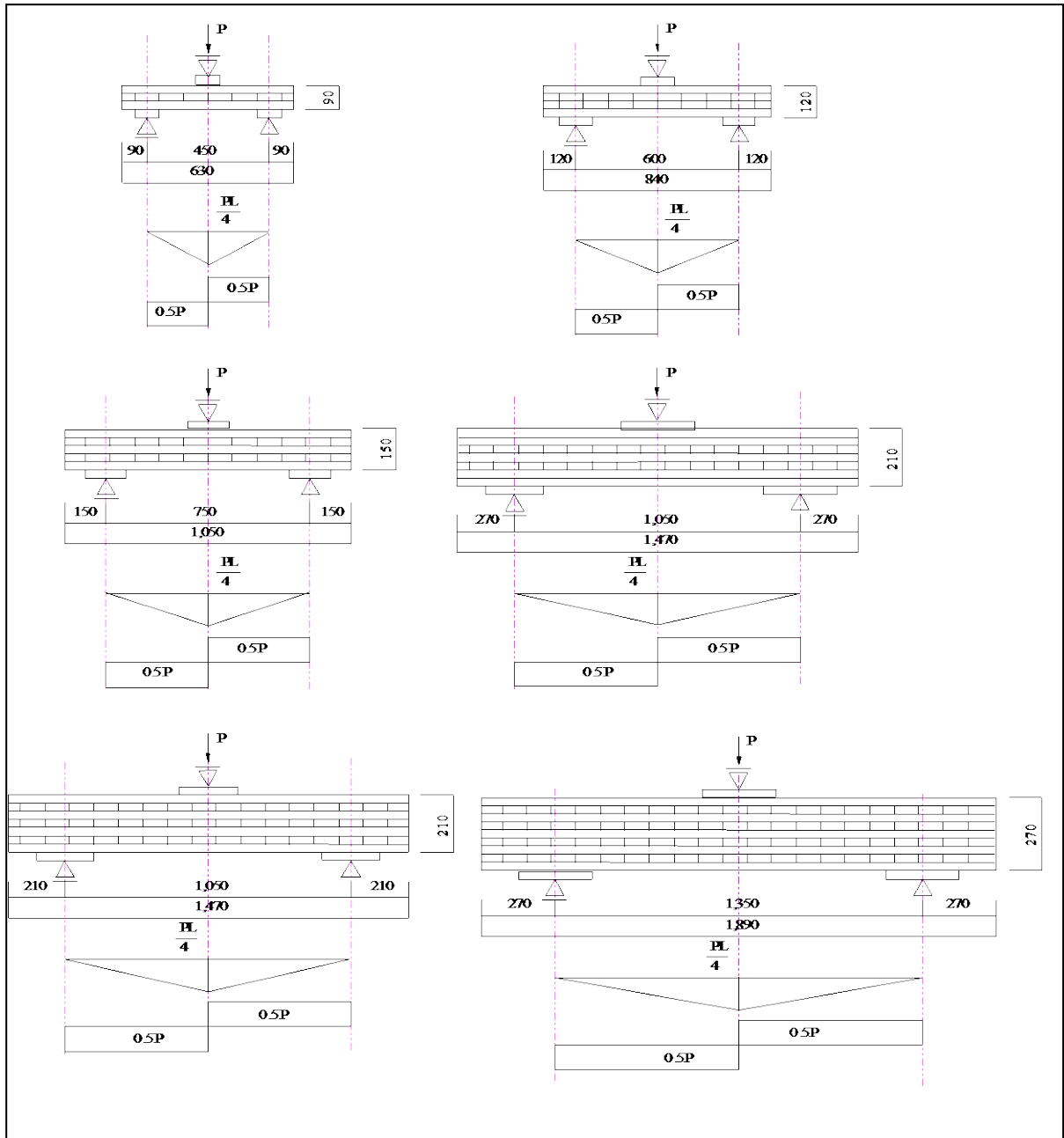


図-2.2.1 水平せん断式載荷と M 図および Q 図（上左：3 層 3 プライ、上右：3 層 4 プライ、  
中左：5 層 5 プライ、中右：5 層 7 プライ、下左：7 層 7 プライ、下右：9 層 9 プライ）

### 2.2.3 水平式せん断載荷 試験結果

試験結果を表-2.2.2に、試験体のせん断力－変位曲線を図-2.2.2～2.2.13にそれぞれ示す。

表-2.2.2 試験結果一覧（その1）

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*
A665-1	3層3プライ	Mx60	強軸	27,000	100.89	50.44	2.80	2.97	S
A665-2					105.30	52.65	2.92		S
A666-1					107.39	51.25	2.85		S
A666-2					102.50	53.70	2.98		S
A667-1					115.79	57.89	3.22		S
A667-2					108.94	54.47	3.03		S
A669-1	3層3プライ	Mx60	弱軸	27,000	28.57	(14.29)	(0.79)	0.87	B
A669-2					32.59	(16.29)	(0.91)		B
A670-1					34.68	(17.34)	(0.96)		B
A670-2					33.46	(16.73)	(0.93)		B
A671-1					26.32	(13.55)	(0.75)		B
A671-2					32.40	(16.20)	(0.90)		B
A672-1	3層4プライ	Mx60	強軸	36,000	103.92	52.53	(2.19)	2.18	B
A672-2					102.21	51.10	(2.13)		B
A673-1					96.36	48.30	2.01		S
A673-2					98.18	49.09	2.05		S
A674-1					117.61	(58.80)	(2.45)		B
A674-2					107.56	(53.78)	(2.24)		B
A675-1	3層4プライ	Mx60	弱軸	36,000	79.62	(39.31)	(1.66)	1.50	B
A675-2					75.78	(37.89)	(1.58)		B
A676-1					76.51	(38.25)	(1.59)		B
A676-2					72.42	(36.21)	(1.51)		B
A677-1					62.73	(31.36)	(1.31)		B
A677-2					61.54	(32.09)	(1.34)		B
A733-1	5層5プライ	Mx60	強軸	45,000	141.89	70.94	2.36	2.27	S
A733-2					129.87	64.93	2.16		S
A734-1					142.89	71.44	2.38		S
A734-2					124.75	62.38	2.08		S
A735-1					146.22	73.11	2.44		S
A735-2					131.04	65.52	2.18		S
A737-1	5層5プライ	Mx60	弱軸	45,000	74.66	(37.33)	(1.24)	1.23	B
A737-2					65.07	(32.54)	(1.08)		B
A738-1					89.36	(44.68)	(1.49)		B
A738-2					71.86	(32.54)	(1.08)		B
A739-1					75.75	(37.86)	(1.26)		B
A739-2					73.61	(35.93)	(1.20)		S

表-2 試験結果一覧（その2）

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
A740-1	5層7プライ	Mx60	強軸	63,000	231.79	(115.90)	(2.76)	2.59	B
A740-2					231.05	(115.53)	(2.75)		B
A741-1					205.70	(102.85)	(2.45)		B
A741-2					201.89	(100.95)	(2.40)		B
A742-1					221.65	(110.83)	(2.64)		B
A742-2					214.90	(107.45)	(2.56)		B
A743-1	5層7プライ	Mx60	弱軸	63,000	67.08	(33.54)	(0.80)	0.86	B
A743-2					64.54	(32.27)	(0.77)		B
A744-1					75.51	(37.76)	(0.90)		B
A744-2					75.64	(37.82)	(0.90)		B
A745-1					75.30	(37.65)	(0.90)		B
A745-2					75.49	(37.75)	(0.90)		B
A746-1	7層7プライ	Mx60	強軸	63,000	160.32	80.16	1.91	1.98	S
A746-2					169.13	84.56	2.01		S
A747-1					164.96	83.06	1.98		S
A747-2					174.93	87.46	2.08		S
A748-1					170.18	85.09	2.03		S
A748-2					158.96	79.48	1.89		S
A749-1	7層7プライ	Mx60	弱軸	63,000	107.78	53.89	1.28	1.39	S
A749-2					116.30	58.15	1.38		S
A750-1					111.56	(55.78)	(1.33)		B
A750-2					121.61	60.81	1.45		S
A751-1					117.32	58.66	1.40		S
A751-2					123.20	(61.60)	(1.47)		B
A752-1	9層9プライ	Mx60	強軸	81,000	167.11	83.56	1.55	1.81	S
A752-2					183.53	91.77	1.70		S
A753'-1					207.16	103.58	1.92		S
A753'-2					209.79	104.90	1.94		S
A754-1					209.84	104.92	1.94		S
A754-2					195.31	97.66	1.81		S
A737-1	9層9プライ	Mx60	弱軸	81,000	123.82	(61.91)	(1.47)	1.61	B
A737-2					146.27	73.14	1.74		S
A738-1					119.94	(59.97)	(1.43)		B
A738-2					142.11	71.06	1.69		S
A739-1					138.22	(69.11)	(1.65)		B
A739-2					140.91	70.46	1.68		S

\* 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。

せん断力 (kN)

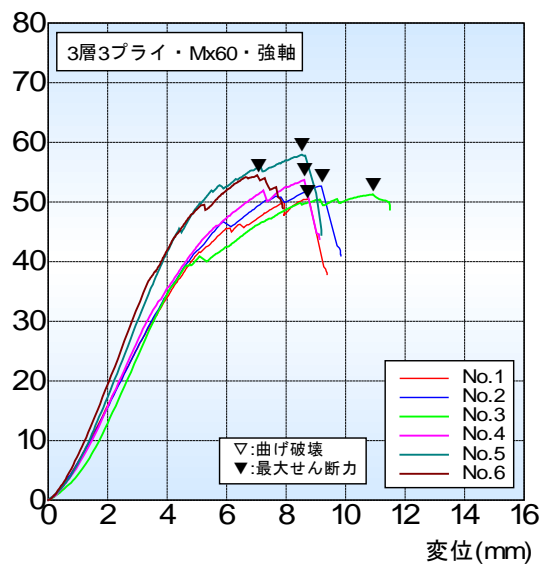


図-2.2.2 せん断力-変位曲線  
(3層3プライ・強軸・Mx60)

せん断力 (kN)

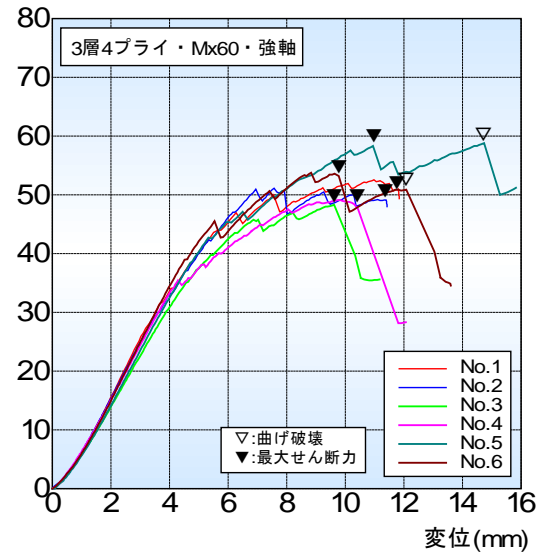


図-2.2.3 せん断力-変位曲線  
(3層4プライ・強軸・Mx60)

せん断力 (kN)

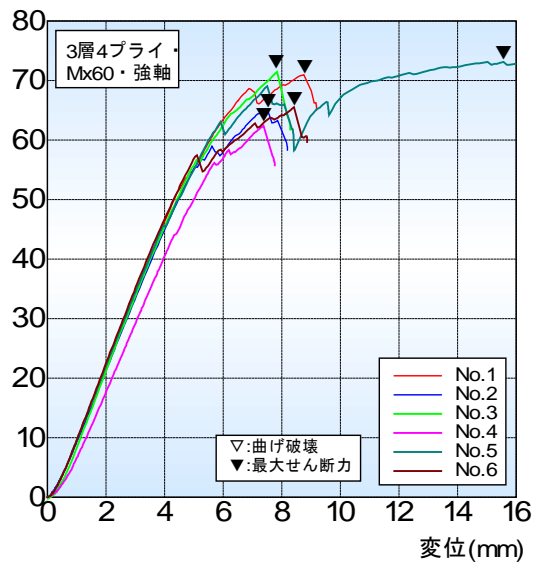


図-2.2.4 せん断力-変位曲線  
(5層5プライ・強軸・Mx60)

せん断力 (kN)

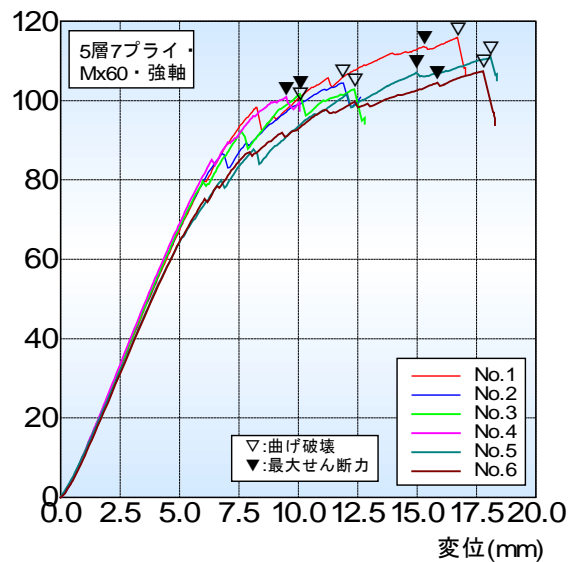


図-2.2.5 せん断力-変位曲線  
(5層7プライ・強軸・Mx60)

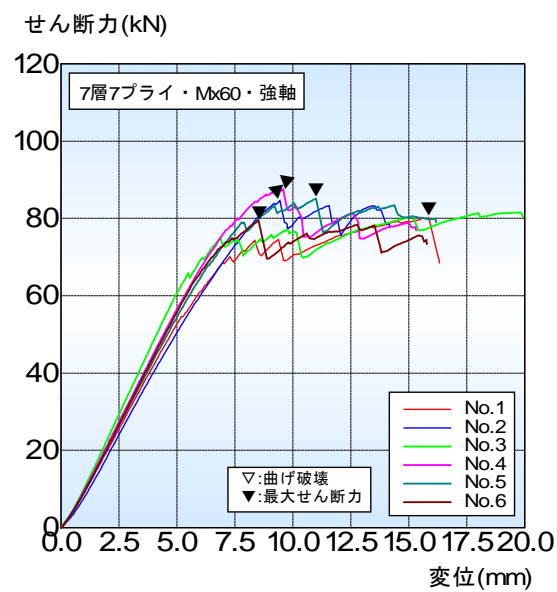


図-2.2.6 せん断力-変位曲線  
(7 層 7 プライ・強軸・Mx60)

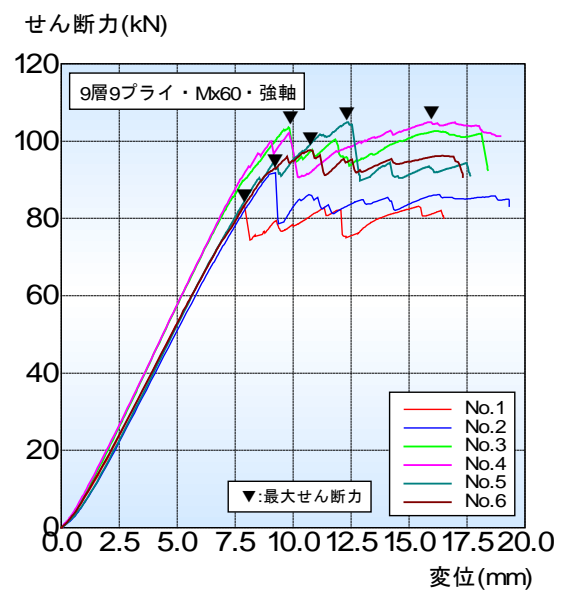


図-2.2.7 せん断力-変位曲線  
(9 層 9 プライ・強軸・Mx60)

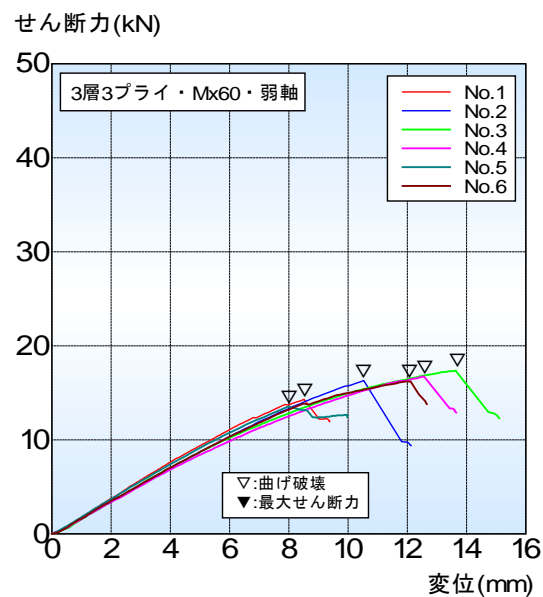


図-2.2.8 せん断力-変位曲線  
(3 層 3 プライ・弱軸・Mx60)

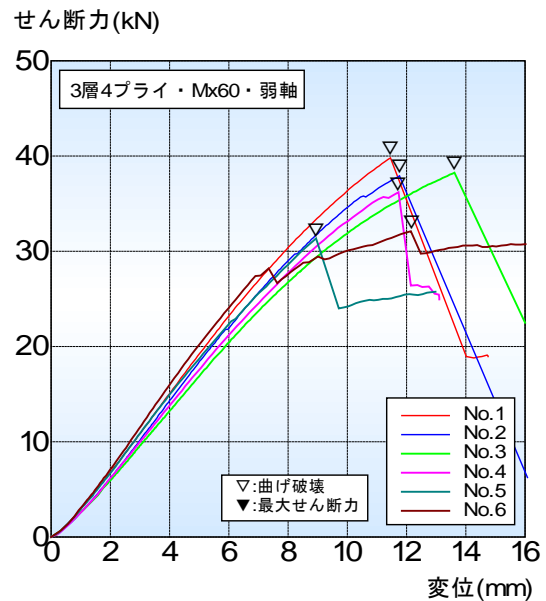


図-2.2.9 せん断力-変位曲線  
(3 層 4 プライ・弱軸・Mx60)

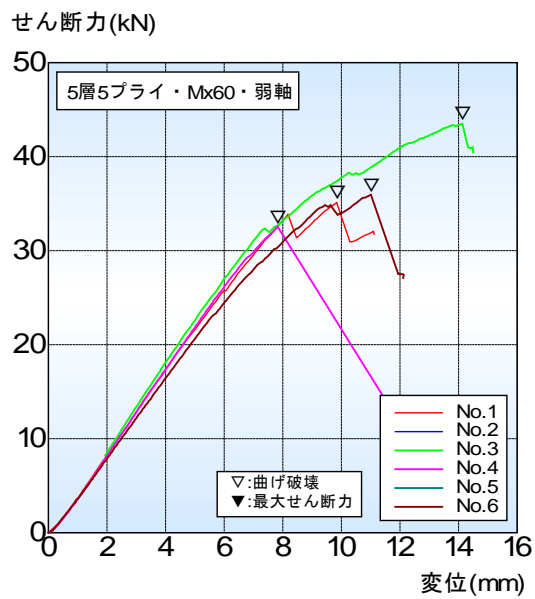


図-2.2.10 せん断力-変位曲線  
(5層5プライ・弱軸・Mx60)

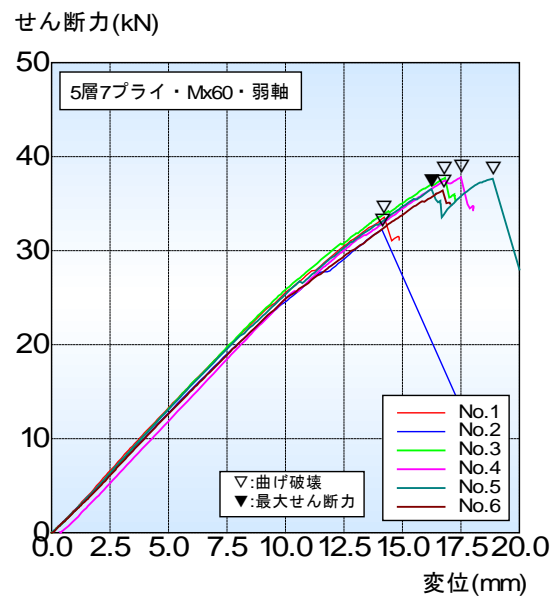


図-2.2.11 せん断力-変位曲線  
(5層7プライ・弱軸・Mx60)

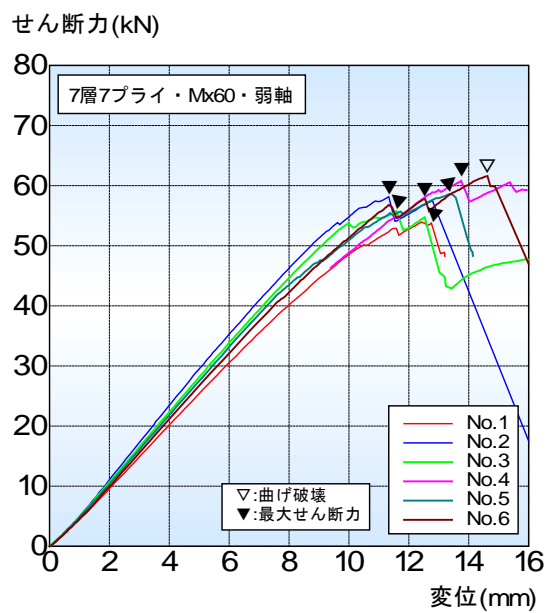


図-2.2.12 せん断力-変位曲線  
(7層7プライ・弱軸・Mx60)

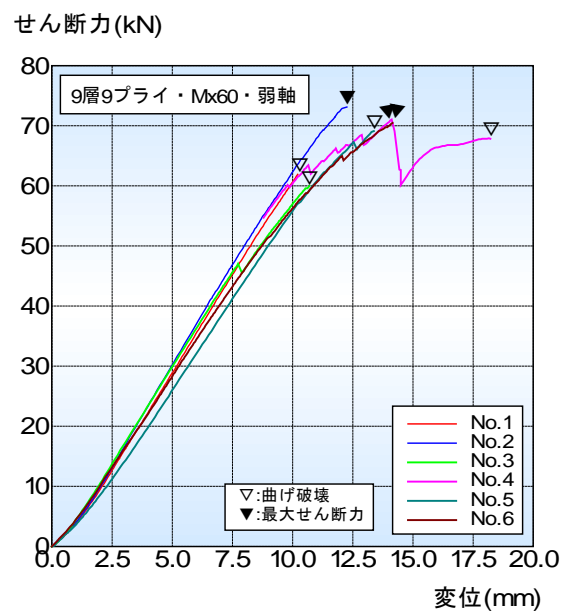


図-2.2.13 せん断力-変位曲線  
(9層9プライ・弱軸・Mx60)

せん断強さは、3層3プライが2.97だったのに対し、5層5プライ2.27、7層7プライ1.98、9層9プライ1.81(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4プライで6体中4体、5層7プライで6体全て、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3体、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る全層スギCLTの面内曲げ強度性能を求めることを目的とした。

### 2.3.2 試験体と試験方法

全層スギで構成された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Mx60）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、1～9次の曲げ固有振動数のうち明確に測定できた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材せい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。全スパン中央における変位を試験体の両面でそれぞれ変位計（東京測器研究所SDP-200D）を用いて測定し、それらの平均値を試験体の変位とした。得られた荷重、変位データを用いて曲げヤング係数、曲げ強さを算出した。また、試験後、破壊部の近傍から長さ約30 mmの材を採取し、全乾法で含水率を求めた。

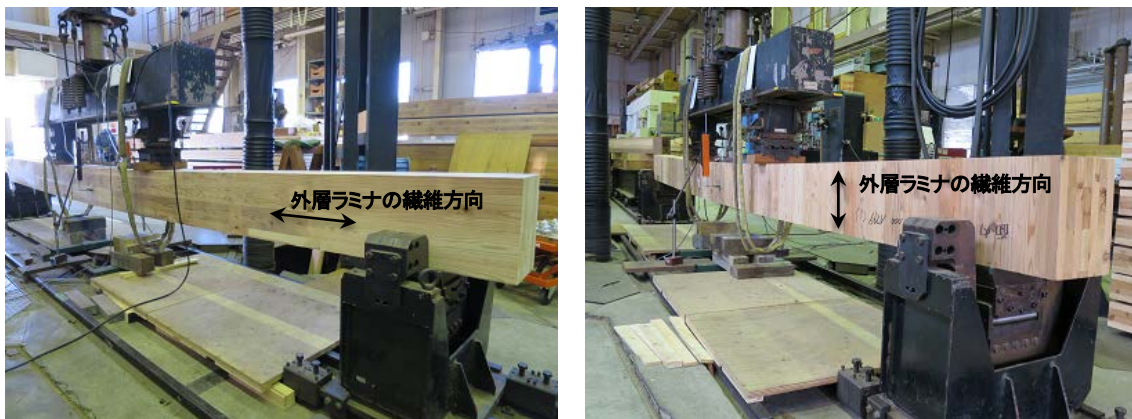


写真2.3.1 面内曲げ試験の様子（左：外層強軸方向、右：外層弱軸方向）

### 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、3層3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、0.818～0.863GPaで、層構成による差はあまり見られなかった。同様にGt-vも0.196～0.305GPaで層構成による差はあまりみられなかった。

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、 $E_{t-v}$ は $E_{t-h}$ より低い値となった。 $G_{t-h}$ は外層が強軸方向の試験体に比べて、各層構成のCLT間での差が大きく、特に5層7プライ構成の $G_{t-h}$ は他に比べて低い値となった。 $G_{t-v}$ は0.172～0.250GPaであり、外層が強軸方向の試験体と同程度であった。

#### 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2.3.11～表2.3.20に示す。

外層が強軸方向、弱軸方向のいずれの試験体も層構成によらず、面内曲げ試験による見かけの曲げヤング係数 ( $E_{a-h}$ ) のばらつきは小さかった。また、各層構成の試験体において、非破壊試験による  $E_{fr}$ 、 $E_{t-h}$ の平均値は $E_{a-h}$ の平均値の約1.1倍であった。

面内方向の $E_{a-h}$ 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。なお、 $\sigma_{b-h}$ は3層3プライ構成を除いて、各構成においてばらつきは小さかった。

#### 2.3.4 まとめ

全層スギで構成された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Mx60) について面内曲げ試験を行った。曲げ試験により求めた面内方向の見かけのヤング係数の平均値に対して、縦振動法、T.G.H.法により求めた曲げヤング係数の各平均値は約1.1倍であり、動的な非破壊試験によりCLTの面内方向の見かけのヤング係数を推定できることがわかった。面内方向の $E_{a-h}$ 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 試験体の密度および非破壊試験の結果（全層スギ、外層強軸方向）

構成	試験体番号	密度	Efr	面内方向		面外方向	
				Et-h	Gt-h	Et-v	Gt-v
		kg/m <sup>3</sup>	GPa	GPa	GPa	GPa	GPa
3-3強	A667 (1)	432	5.77	5.45	0.858	7.54	0.279
3-3強	A667 (2)	416	5.58	5.42	0.830	8.13	0.221
3-3強	A665 (1)	410	5.86	5.65	0.827	8.31	0.319
3-3強	A665 (2)	424	6.47	6.27	0.849	7.58	0.370
3-3強	A666 (1)	408	6.00	5.77	0.784	7.93	0.231
3-3強	A666 (2)	413	5.85	5.72	0.817	7.93	0.231
平均値		417	5.92	5.71	0.828	7.90	0.275
CV%		2.21	5.09	5.35	3.17	3.83	21.7

構成 層数－プライ数、外層のラミナの繊維方向

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

表2.3.2 試験体の密度および非破壊試験の結果（全層スギ、外層強軸方向）

構成	試験体番号	密度	Efr	面内方向		面外方向	
				Et-h	Gt-h	Et-v	Gt-v
		kg/m <sup>3</sup>	GPa	GPa	GPa	GPa	GPa
3-4強	A673 (1)	420	4.58	4.47	0.860	7.20	0.202
3-4強	A673 (2)	407	4.81	4.58	0.760	7.67	0.166
3-4強	A674 (1)	407	4.34	4.27	0.805	6.73	0.204
3-4強	A674 (2)	408	4.62	4.37	0.784	7.23	0.179
3-4強	A672 (1)	407	4.48	4.24	0.826	6.97	0.207
3-4強	A672 (2)	415	4.29	4.18	0.873	6.64	0.218
平均値		411	4.52	4.35	0.818	7.07	0.196
CV%		1.39	4.22	3.53	5.33	5.35	9.93

構成 層数－プライ数、外層のラミナの繊維方向

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

表2.3.3 試験体の密度および非破壊試験の結果（全層スギ、外層強軸方向）

構成	試験体番号	密度	Efr	面内方向		面外方向	
				Et-h	Gt-h	Et-v	Gt-v
		kg/m <sup>3</sup>	GPa	GPa	GPa	GPa	GPa
5-5強	A735 (1)	421	4.75	4.60	0.818	6.87	0.245
5-5強	A735 (2)	423	4.47	4.51	0.858	6.66	0.247
5-5強	A733 (1)	403	4.59	4.58	0.905	6.15	0.255
5-5強	A733 (2)	405	4.40	4.63	0.900	5.95	0.264
5-5強	A734 (1)	414	4.89	4.73	0.854	6.77	0.238
5-5強	A734 (2)	411	4.92	4.85	0.842	7.09	0.249
平均値		413	4.67	4.65	0.863	6.58	0.250
CV%		1.98	4.66	2.61	3.91	6.69	3.58

構成 層数－プライ数、外層のラミナの繊維方向

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

表2.3.4 試験体の密度および非破壊試験の結果（全層スギ、外層強軸方向）

構成	試験体番号	密度	Efr	面内方向		面外方向	
				Et-h	Gt-h	Et-v	Gt-v
		kg/m <sup>3</sup>	GPa	GPa	GPa	GPa	GPa
5-7強	A741 (2)	418	5.76	5.73	0.861	7.56	0.299
5-7強	A741 (1)	414	5.83	5.71	0.826	7.19	0.308
5-7強	A742 (2)	400	5.76	5.63	0.847	7.08	0.288
5-7強	A742 (1)	408	5.59	5.51	0.863	6.90	0.300
5-7強	A740 (2)	424	5.82	5.57	0.790	7.22	0.321
5-7強	A740 (1)	422	5.65	5.46	0.838	6.85	0.314
平均値		414	5.74	5.60	0.838	7.13	0.305
CV%		2.19	1.67	1.94	3.22	3.60	3.91

構成 層数－プライ数、外層のラミナの繊維方向

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

表2.3.5 試験体の密度および非破壊試験の結果（全層スギ、外層強軸方向）

構成	試験体番号	密度	Efr	面内方向		面外方向	
				Et-h	Gt-h	Et-v	Gt-v
		kg/m <sup>3</sup>	GPa	GPa	GPa	GPa	GPa
7-7強	A748 (2)	414	4.59	4.36	0.858	6.09	0.259
7-7強	A748 (1)	407	4.37	4.12	0.864	5.36	0.273
7-7強	A747 (2)	408	4.36	4.15	0.837	5.68	0.257
7-7強	A747 (1)	402	4.35	4.30	0.805	5.63	0.260
7-7強	A746 (2)	404	4.09	4.01	0.828	5.42	0.262
7-7強	A746 (1)	407	4.20	4.08	0.831	5.58	0.269
平均値		407	4.33	4.17	0.837	5.63	0.263
CV%		1.01	3.92	3.22	2.58	4.60	2.35

構成 層数－プライ数、外層のラミナの繊維方向

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

表2.3.6 試験体の密度および非破壊試験の結果（全層スギ、外層弱軸方向）

構成	試験体番号	密度	Efr	面内方向		面外方向	
				Et-h	Gt-h	Et-v	Gt-v
		kg/m <sup>3</sup>	GPa	GPa	GPa	GPa	GPa
3-3弱	A669 (1)	420	2.19	2.31	0.776	－	－
3-3弱	A669 (2)	409	2.49	2.29	0.712	－	－
3-3弱	A671 (1)	417	2.37	2.40	0.675	－	－
3-3弱	A671 (2)	413	2.47	2.43	0.776	－	－
3-3弱	A670 (1)	421	2.63	2.60	0.693	－	－
3-3弱	A670 (2)	417	2.58	2.49	0.759	－	－
平均値		416	2.46	2.42	0.732	－	－
CV%		1.07	6.54	4.83	6.05	－	－

構成 層数－プライ数、外層のラミナの繊維方向

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

表2.3.7 試験体の密度および非破壊試験の結果（全層スギ、外層弱軸方向）

構成	試験体番号	密度	Efr	面内方向		面外方向	
				Et-h	Gt-h	Et-v	Gt-v
		kg/m <sup>3</sup>	GPa	GPa	GPa	GPa	GPa
3-4弱	A676 (1)	413	3.31	3.06	0.991	—	—
3-4弱	A676 (2)	407	3.28	3.11	0.836	—	—
3-4弱	A677 (1)	404	3.64	3.48	0.875	—	—
3-4弱	A677 (2)	414	3.59	3.49	1.06	—	—
3-4弱	A675 (1)	415	3.16	3.18	0.937	—	—
3-4弱	A675 (2)	421	3.32	2.99	1.11	—	—
平均値		412	3.39	3.22	0.968	—	—
CV%		1.45	5.62	6.74	11.0	—	—

構成 層数—プライ数、外層のラミナの繊維方向

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

表2.3.8 試験体の密度および非破壊試験の結果（全層スギ、外層弱軸方向）

構成	試験体番号	密度	Efr	面内方向		面外方向	
				Et-h	Gt-h	Et-v	Gt-v
		kg/m <sup>3</sup>	GPa	GPa	GPa	GPa	GPa
5-5弱	A739 (1)	407	2.76	2.88	0.717	1.58	0.166
5-5弱	A739 (2)	415	2.63	2.53	1.09	1.53	0.193
5-5弱	A737 (1)	409	2.78	2.54	1.02	1.62	0.162
5-5弱	A737 (2)	401	2.82	2.69	0.882	1.60	0.163
5-5弱	A738 (1)	399	2.49	2.38	0.860	1.44	0.170
5-5弱	A738 (2)	407	2.64	2.55	0.732	1.50	0.180
平均値		406	2.69	2.60	0.882	1.55	0.172
CV%		1.41	4.53	6.58	16.8	4.38	7.00

構成 層数—プライ数、外層のラミナの繊維方向

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

表2.3.9 試験体の密度および非破壊試験の結果（全層スギ、外層弱軸方向）

構成	試験体番号	密度	Efr	面内方向		面外方向	
				Et-h	Gt-h	Et-v	Gt-v
		kg/m <sup>3</sup>	GPa	GPa	GPa	GPa	GPa
5-7弱	A745 (1)	416	2.05	2.26	0.525	0.71	0.315
5-7弱	A745 (2)	415	2.18	2.17	0.575	0.72	0.286
5-7弱	A743 (1)	412	2.12	2.07	0.554	0.73	0.216
5-7弱	A743 (2)	414	2.13	2.05	0.656	0.74	0.232
5-7弱	A744 (1)	409	1.97	2.12	0.551	0.68	0.253
5-7弱	A744 (2)	403	2.39	2.24	0.512	0.76	0.200
平均値		412	2.14	2.15	0.562	0.72	0.250
CV%		1.17	6.72	4.05	9.12	3.68	17.4

構成 層数—プライ数、外層のラミナの繊維方向

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

表2.3.10 試験体の密度および非破壊試験の結果（全層スギ、外層弱軸方向）

構成	試験体番号	密度	Efr	面内方向		面外方向	
				Et-h	Gt-h	Et-v	Gt-v
		kg/m <sup>3</sup>	GPa	GPa	GPa	GPa	GPa
7-7弱	A749 (2)	409	3.05	2.92	0.783	2.11	0.197
7-7弱	A749 (1)	408	2.95	2.83	0.828	1.94	0.218
7-7弱	A751 (2)	403	2.80	2.71	0.762	1.92	0.252
7-7弱	A751 (1)	405	2.73	2.58	0.798	1.87	0.227
7-7弱	A750 (2)	412	2.93	2.89	0.783	2.15	0.181
7-7弱	A750 (1)	406	3.07	2.97	0.761	2.05	0.202
平均値		407	2.92	2.82	0.786	2.01	0.213
CV%		0.747	4.58	5.19	3.20	5.65	11.7

構成 層数—プライ数、外層のラミナの繊維方向

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

表2.3.11 面内曲げ試験の結果（全層スギ、外層強軸方向）

構成	試験体番号	含水率	Ea-h	$\sigma$ b-h	Efr/Ea-h	Et-h/Ea-h
		%	GPa	MPa		
3-3強	A667 (1)	11.4	5.17	19.0	1.12	1.05
3-3強	A667 (2)	11.4	5.06	19.9	1.10	1.07
3-3強	A665 (1)	11.9	5.37	19.4	1.09	1.05
3-3強	A665 (2)	11.8	5.77	26.1	1.12	1.09
3-3強	A666 (1)	13.1	5.45	27.3	1.10	1.06
3-3強	A666 (2)	12.6	5.21	26.4	1.12	1.10
平均値		12.0	5.34	23.0	1.11	1.07
CV%		5.73	4.75	17.3	1.12	1.78

構成 層数—プライ数、外層のラミナの繊維方向

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

表2.3.12 面内曲げ試験の結果（全層スギ、外層強軸方向）

構成	試験体番号	含水率	Ea-h	$\sigma$ b-h	Efr/Ea-h	Et-h/Ea-h
		%	GPa	MPa		
3-4強	A673 (1)	12.5	4.18	16.0	1.10	1.07
3-4強	A673 (2)	12.0	4.36	17.6	1.10	1.05
3-4強	A674 (1)	12.1	4.00	16.5	1.08	1.07
3-4強	A674 (2)	12.1	4.11	16.6	1.13	1.07
3-4強	A672 (1)	11.5	3.99	16.0	1.12	1.06
3-4強	A672 (2)	12.0	3.87	16.4	1.11	1.08
平均値		12.0	4.08	16.5	1.11	1.07
CV%		2.80	4.20	3.61	1.42	0.870

構成 層数—プライ数、外層のラミナの繊維方向

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



表2.3.13 面内曲げ試験の結果（全層スギ、外層強軸方向）

構成	試験体番号	含水率	Ea-h	$\sigma$ b-h	Efr/Ea-h	Et-h/Ea-h
		%	GPa	MPa		
5-5強	A735 (1)	12.7	4.21	23.4	1.13	1.09
5-5強	A735 (2)	12.9	4.07	21.0	1.10	1.11
5-5強	A733 (1)	11.1	4.25	17.3	1.08	1.08
5-5強	A733 (2)	11.3	4.26	19.4	1.03	1.09
5-5強	A734 (1)	11.4	4.35	20.6	1.12	1.09
5-5強	A734 (2)	11.3	4.45	17.4	1.11	1.09
平均値		11.8	4.27	19.8	1.09	1.09
CV%		6.82	3.02	11.8	3.21	0.920

構成 層数—プライ数、外層のラミナの繊維方向

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

表2.3.14 面内曲げ試験の結果（全層スギ、外層強軸方向）

構成	試験体番号	含水率	Ea-h	$\sigma$ b-h	Efr/Ea-h	Et-h/Ea-h
		%	GPa	MPa		
5-7強	A741 (2)	11.7	5.37	21.0	1.07	1.07
5-7強	A741 (1)	12.0	5.32	21.9	1.10	1.08
5-7強	A742 (2)	11.6	5.28	21.3	1.09	1.07
5-7強	A742 (1)	11.4	5.18	20.3	1.08	1.06
5-7強	A740 (2)	12.3	5.18	23.8	1.12	1.07
5-7強	A740 (1)	12.1	5.03	20.0	1.12	1.08
平均値		11.8	5.23	21.4	1.10	1.07
CV%		2.79	2.33	6.37	1.95	0.708

構成 層数—プライ数、外層のラミナの繊維方向

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

表2.3.15 面内曲げ試験の結果（全層スギ、外層強軸方向）

構成	試験体番号	含水率	Ea-h	$\sigma$ b-h	Efr/Ea-h	Et-h/Ea-h
		%	GPa	MPa		
7-7強	A748 (2)	10.9	4.03	14.7	1.14	1.08
7-7強	A748 (1)	11.2	3.88	15.5	1.13	1.06
7-7強	A747 (2)	10.9	3.82	17.6	1.14	1.09
7-7強	A747 (1)	10.6	3.93	14.5	1.11	1.10
7-7強	A746 (2)	11.5	3.59	18.0	1.14	1.12
7-7強	A746 (1)	11.1	3.70	16.3	1.13	1.10
平均値		11.0	3.82	16.1	1.13	1.09
CV%		2.67	4.15	9.11	1.14	1.72

構成 層数—プライ数、外層のラミナの繊維方向

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



表2.3.16 面内曲げ試験の結果（全層スギ、外層弱軸方向）

構成	試験体番号	含水率	Ea-h	$\sigma$ b-h	Efr/Ea-h	Et-h/Ea-h
		%	GPa	MPa		
3-3弱	A669 (1)	12.7	2.09	9.2	1.04	1.10
3-3弱	A669 (2)	11.5	2.12	10.1	1.17	1.08
3-3弱	A671 (1)	11.8	2.24	10.3	1.06	1.07
3-3弱	A671 (2)	12.6	2.18	13.8	1.14	1.11
3-3弱	A670 (1)	12.3	2.40	10.3	1.10	1.09
3-3弱	A670 (2)	11.3	2.30	10.9	1.12	1.08
平均値		12.0	2.22	10.8	1.11	1.09
CV%		4.89	5.19	14.6	4.49	1.42

構成 層数—プライ数、外層のラミナの繊維方向

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

表2.3.17 面内曲げ試験の結果（全層スギ、外層弱軸方向）

構成	試験体番号	含水率	Ea-h	$\sigma$ b-h	Efr/Ea-h	Et-h/Ea-h
		%	GPa	MPa		
3-4弱	A676 (1)	11.6	2.83	12.8	1.17	1.08
3-4弱	A676 (2)	11.6	2.90	15.0	1.13	1.08
3-4弱	A677 (1)	11.4	3.27	11.1	1.12	1.07
3-4弱	A677 (2)	11.4	3.24	13.8	1.11	1.08
3-4弱	A675 (1)	11.0	2.95	13.0	1.07	1.08
3-4弱	A675 (2)	11.1	2.85	15.9	1.16	1.05
平均値		11.3	3.01	13.6	1.13	1.07
CV%		2.22	6.54	12.5	3.27	1.18

構成 層数—プライ数、外層のラミナの繊維方向

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

表2.3.18 面内曲げ試験の結果（全層スギ、外層弱軸方向）

構成	試験体番号	含水率	Ea-h	$\sigma$ b-h	Efr/Ea-h	Et-h/Ea-h
		%	GPa	MPa		
5-5弱	A739 (1)	11.9	2.60	12.6	1.06	1.11
5-5弱	A739 (2)	11.6	2.43	12.3	1.08	1.04
5-5弱	A737 (1)	12.3	2.39	12.1	1.16	1.06
5-5弱	A737 (2)	11.9	2.52	10.9	1.12	1.07
5-5弱	A738 (1)	11.9	2.20	10.4	1.13	1.08
5-5弱	A738 (2)	12.2	2.36	12.2	1.12	1.08
平均値		12.0	2.42	11.7	1.11	1.07
CV%		2.11	5.69	7.31	3.23	2.05

構成 層数—プライ数、外層のラミナの繊維方向

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

表2.3.19 面内曲げ試験の結果（全層スギ、外層弱軸方向）

構成	試験体番号	含水率	Ea-h	$\sigma$ b-h	Efr/Ea-h	Et-h/Ea-h
		%	GPa	MPa		
5-7弱	A745 (1)	11.9	1.91	8.7	1.07	1.18
5-7弱	A745 (2)	11.0	1.87	9.3	1.17	1.16
5-7弱	A743 (1)	11.6	1.84	8.1	1.15	1.13
5-7弱	A743 (2)	11.7	1.82	8.4	1.17	1.13
5-7弱	A744 (1)	11.0	1.79	9.0	1.10	1.18
5-7弱	A744 (2)	11.6	1.89	8.1	1.26	1.18
平均値		11.5	1.85	8.6	1.16	1.16
CV%		3.35	2.47	5.63	5.75	2.34

構成 層数—プライ数、外層のラミナの繊維方向

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

表2.3.20 面内曲げ試験の結果（全層スギ、外層弱軸方向）

構成	試験体番号	含水率	Ea-h	$\sigma$ b-h	Efr/Ea-h	Et-h/Ea-h
		%	GPa	MPa		
7-7弱	A749 (2)	11.8	2.60	13.8	1.17	1.12
7-7弱	A749 (1)	12.3	2.51	11.0	1.17	1.13
7-7弱	A751 (2)	11.2	2.32	14.4	1.20	1.16
7-7弱	A751 (1)	11.6	2.31	13.0	1.18	1.12
7-7弱	A750 (2)	11.0	2.68	12.2	1.09	1.08
7-7弱	A750 (1)	11.2	2.70	12.2	1.14	1.10
平均値		11.5	2.52	12.8	1.16	1.12
CV%		4.06	6.86	9.69	3.40	2.57

構成 層数—プライ数、外層のラミナの繊維方向

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

## 2.4 短柱圧縮

### 2.4.1 試験方法

本試験で使用した CLT の概要を表 2.4-1 に示す。CLT に使用したラミナは 4.1 項で示されるラミナ試験と同ロットで製造したものであり、外層が M60A、内層が M30A で構成されている。

短柱圧縮試験に先立ち、縦振動法によるヤング係数を測定した。3 層 3 プライなど長さの短い試験体では特に 1 次の固有振動数の判別が困難であったため、ヤング係数の算出には、2 次の固有振動数を用いた。

短柱圧縮試験は細長比 ( $\lambda$ ) を 15 とした試験体で行った。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、荷重レンジを試験体の構成に応じて設定して載荷し、最大荷重に達するまでの時間が約 5 分になるように荷重速度を調整した。試験体の長さ方向における相対する 2 つの幅面の中央部に、標点間距離を材長の 1/2 とした、変位計 (東京測器研究所製、CDP-10) を取り付け付けた治具を設置して縮みを測定した。試験体の変形をできるだけ拘束しないように、両面の治具はばねを介して固定した。2 材面の縮みの平均値を試験体の縮みとした。ただし、特に弱軸試験体では、比例限度応力以降試験体の変形やふくらみが大きく、変位計が滑って変位の測定が困難な試験体も見られた。試験終了後、縦圧縮ヤング係数、縦圧縮比例限度応力および縦圧縮強度を算出した。3 層 3 プライ弱軸試験体および 9 層 9 プライ強軸試験体の試験後の様子をそれぞれ写真 2.4-1、2.4-2 に示す。試験後、破壊部近傍から長さが約 20mm の含水率測定用試験体を切り出し、全乾法で含水率を測定した。

表 2.4-1 短柱圧縮試験で用いたスギ CLT の概要

層構成	外層の方向	寸法 mm(h×b×L)	試験体数
3 層 3 プライ	強軸	90×300×390	6
	弱軸	90×300×390	6
3 層 4 プライ	強軸	120×300×520	6
	弱軸	120×300×520	6
5 層 5 プライ	強軸	150×300×650	6
	弱軸	150×300×650	6
5 層 7 プライ	強軸	90×300×910	6
	弱軸	90×300×910	6
7 層 7 プライ	強軸	120×300×910	6
	弱軸	120×300×910	6
9 層 9 プライ	強軸	150×300×1170	6
	弱軸	150×300×1170	6



写真 2.4-1 3層3プライ弱軸試験体の試験後の様子



写真 2.4-2 9層9プライ強軸試験体の試験後の様子

## 2.4.2 結果

### (1) 非破壊試験

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> )	
A668-Ma-1	420	3.97
A668-Ma-2	413	6.13
A668-Ma-3	405	4.19
A668-Ma-4	406	6.52
A668-Ma-5	405	5.27
A668-Ma-6	415	5.12
平均	411	5.20
最大	420	6.52
最小	405	3.97
標準偏差	6.14	1.01
変動係数 (%)	1.49	19.5

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> )	
A668-Mi-1	412	1.79
A668-Mi-2	394	1.78
A668-Mi-3	388	1.43
A668-Mi-4	399	1.43
A668-Mi-5	398	1.84
A668-Mi-6	392	1.83
平均	397	1.68
最大	412	1.84
最小	388	1.43
標準偏差	8.38	0.197
変動係数 (%)	2.11	11.7

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> )	
A672-1	425	4.96
A672-2	409	4.63
A673-1	404	5.30
A673-2	410	4.95
A674-1	412	5.06
A674-2	427	4.94
平均	415	4.97
最大	427	5.30
最小	404	4.63
標準偏差	9.47	0.216
変動係数 (%)	2.28	4.35

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> )	
A675-1	411	2.44
A675-2	408	2.69
A676-1	410	1.95
A676-2	411	1.83
A677-1	404	2.08
A677-2	423	2.11
平均	411	2.18
最大	423	2.69
最小	404	1.83
標準偏差	6.27	0.322
変動係数 (%)	1.52	14.7

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> )	
A733-1	399	4.35
A733-2	420	3.62
A734-1	410	4.69
A734-2	429	4.11
A735-1	421	3.88
A735-2	403	4.19
平均	414	4.14
最大	429	4.69
最小	399	3.62
標準偏差	11.7	0.369
変動係数 (%)	2.83	8.92

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> )	
A737-1	407	2.26
A737-2	400	2.37
A738-1	399	2.22
A738-2	410	2.19
A739-1	395	2.04
A739-2	396	2.23
平均	401	2.22
最大	410	2.37
最小	395	2.04
標準偏差	6.01	0.108
変動係数 (%)	1.50	4.89

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> )	
A740-1	413	4.37
A740-2	411	5.04
A741-1	415	4.26
A741-2	414	5.41
A742-1	413	4.31
A742-2	413	4.50
平均	413	4.65
最大	415	5.41
最小	411	4.26
標準偏差	1.32	0.468
変動係数 (%)	0.319	10.1

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> )	
A743-1	404	1.62
A743-2	411	1.25
A744-1	410	1.58
A744-2	405	1.61
A745-1	406	1.27
A745-2	421	1.38
平均	410	1.45
最大	421	1.62
最小	404	1.25
標準偏差	6.48	0.171
変動係数 (%)	1.58	11.8

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> )	
A746-1	407	4.02
A746-2	406	3.98
A747-1	405	3.31
A747-2	415	3.87
A748-1	403	4.09
A748-2	420	4.29
平均	409	3.93
最大	420	4.29
最小	403	3.31
標準偏差	6.64	0.335
変動係数 (%)	1.62	8.52

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> )	
A749-1	399	2.44
A749-2	402	2.35
A750-1	412	2.31
A750-2	409	2.08
A751-1	391	2.15
A751-2	392	2.31
平均	401	2.27
最大	412	2.44
最小	391	2.08
標準偏差	8.56	0.132
変動係数 (%)	2.14	5.80

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> )	
A752-1	408	3.45
A752-2	406	3.43
A753-1	409	3.18
A753-2	406	3.77
A754-1	402	3.31
A754-2	406	3.44
平均	406	3.43
最大	409	3.77
最小	402	3.18
標準偏差	2.50	0.195
変動係数 (%)	0.615	5.67

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> )	
A755-1	400	2.53
A755-2	403	2.51
A756-1	397	2.41
A756-2	406	2.62
A757-1	409	2.53
A757-2	402	2.37
平均	403	2.50
最大	409	2.62
最小	397	2.37
標準偏差	4.27	0.0920
変動係数 (%)	1.06	3.69

## (2) 破壊試験

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 (%)
A668-Ma-1	5.27	11.3	23.8	11.3
A668-Ma-2	5.91	11.8	24.1	10.8
A668-Ma-3	6.83	11.1	24.3	11.2
A668-Ma-4	5.94	14.9	22.7	11.0
A668-Ma-5	5.64	14.9	23.4	11.1
A668-Ma-6	5.95	12.0	24.0	11.2
平均	5.92	12.7	23.7	11.1
最大	6.83	14.9	24.3	11.3
最小	5.27	11.1	22.7	10.8
標準偏差	0.517	1.74	0.581	0.162
変動係数	8.73	13.8	2.45	1.46

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 (%)
A668-Mi-1	2.01	5.31	11.2	10.8
A668-Mi-2	1.71	5.62	10.9	10.3
A668-Mi-3	1.68	5.50	10.7	10.7
A668-Mi-4	1.99	6.44	11.0	11.1
A668-Mi-5	2.29	6.24	11.5	10.7
A668-Mi-6	2.23	6.68	11.0	10.2
平均	1.98	5.96	11.0	10.6
最大	2.29	6.68	11.5	11.1
最小	1.68	5.31	10.7	10.2
標準偏差	0.253	0.560	0.258	0.332
変動係数	12.7	9.40	2.34	3.12

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 (%)
A672-1	3.93	10.4	17.8	11.4
A672-2	3.89	10.4	16.9	11.7
A673-1	4.53	12.3	17.5	12.2
A673-2	4.28	9.57	17.6	12.3
A674-1	4.32	9.51	17.5	11.1
A674-2	4.16	9.74	18.2	11.0
平均	4.19	10.3	17.6	11.6
最大	4.53	12.3	18.2	12.3
最小	3.89	9.51	16.9	11.0
標準偏差	0.246	1.04	0.418	0.549
変動係数	5.87	10.1	2.37	4.73



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 (%)
A675-1	3.30	9.2	15.3	11.3
A675-2	3.79	9.1	15.9	11.4
A676-1	3.38	8.2	15.3	11.1
A676-2	3.19	8.5	15.3	11.2
A677-1	3.40	10.4	14.8	11.6
A677-2	3.83	9.0	15.5	11.7
平均	3.48	9.05	15.3	11.4
最大	3.83	10.4	15.9	11.7
最小	3.19	8.15	14.8	11.1
標準偏差	0.265	0.757	0.370	0.243
変動係数	7.61	8.36	2.41	2.14

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 (%)
A733-1	4.37	12.7	19.8	11.8
A733-2	4.14	11.7	19.8	11.6
A734-1	4.49	12.9	20.6	10.8
A734-2	4.62	11.0	20.9	11.6
A735-1	4.22	9.28	18.5	12.9
A735-2	4.16	10.1	18.0	12.3
平均	4.33	11.3	19.6	11.8
最大	4.62	12.9	20.9	12.9
最小	4.14	9.28	18.0	10.8
標準偏差	0.193	1.43	1.12	0.708
変動係数	4.45	12.7	5.71	5.98

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 (%)
A737-1	2.74	7.53	13.1	11.1
A737-2	2.49	6.20	12.4	11.0
A738-1	2.28	7.19	12.3	11.5
A738-2	2.36	7.40	11.6	12.5
A739-1	2.39	6.58	12.6	11.4
A739-2	2.21	7.04	12.2	12.2
平均	2.41	6.99	12.4	11.6
最大	2.74	7.53	13.1	12.5
最小	2.21	6.20	11.6	11.0
標準偏差	0.185	0.509	0.510	0.609
変動係数	7.68	7.28	4.12	5.24

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 (%)
A740-1	5.16	13.1	23.7	11.5
A740-2	5.09	13.1	23.0	11.7
A741-1	4.98	13.6	23.9	11.2
A741-2	5.42	13.2	23.3	11.7
A742-1	4.99	13.6	23.9	10.7
A742-2	5.55	13.6	24.5	10.9
平均	5.20	13.4	23.7	11.3
最大	5.55	13.6	24.5	11.7
最小	4.98	13.1	23.0	10.7
標準偏差	0.234	0.258	0.529	0.442
変動係数	4.51	1.93	2.23	3.91

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 (%)
A743-1	1.89	5.33	9.69	10.8
A743-2	1.97	4.64	9.88	12.2
A744-1	1.85	4.98	10.0	12.2
A744-2	1.98	4.66	9.91	11.8
A745-1	1.74	5.31	9.39	12.2
A745-2	1.81	5.28	9.29	11.7
平均	1.87	5.03	9.70	11.8
最大	1.98	5.33	10.0	12.2
最小	1.74	4.64	9.29	10.8
標準偏差	0.0917	0.324	0.301	0.547
変動係数	4.90	6.44	3.10	4.63

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 (%)
A746-1	4.12	10.9	19.4	10.7
A746-2	3.95	11.9	18.5	10.8
A747-1	4.10	13.3	18.8	10.5
A747-2	3.95	11.9	18.4	10.5
A748-1	3.84	13.7	18.6	10.8
A748-2	3.93	11.7	19.4	11.0
平均	3.98	12.2	18.8	10.7
最大	4.12	13.7	19.4	11.0
最小	3.84	10.9	18.4	10.5
標準偏差	0.109	1.06	0.441	0.194
変動係数	2.74	8.69	2.34	1.80

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 (%)
A749-1	2.79	8.05	13.3	11.3
A749-2	2.65	7.24	13.1	11.8
A750-1	2.47	10.1	13.8	10.9
A750-2	2.51	4.79	14.0	10.7
A751-1	2.36	5.63	13.2	10.6
A751-2	2.75	8.34	13.4	10.6
平均	2.59	7.35	13.5	11.0
最大	2.79	10.1	14.0	11.8
最小	2.36	4.79	13.1	10.6
標準偏差	0.170	1.91	0.357	0.489
変動係数	6.58	26.0	2.65	4.44

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 (%)
A752-1	3.62	11.1	18.3	10.6
A752-2	3.51	11.7	18.4	10.6
A753-1	3.40	12.1	17.9	9.94
A753-2	3.66	11.2	18.1	10.5
A754-1	3.67	10.5	17.6	10.9
A754-2	3.63	10.2	17.0	10.9
平均	3.58	11.1	17.9	10.6
最大	3.67	12.1	18.4	10.9
最小	3.40	10.2	17.0	9.94
標準偏差	0.104	0.702	0.540	0.354
変動係数	2.90	6.31	3.02	3.36

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 (%)
A755-1	2.58	9.19	14.1	11.0
A755-2	3.69	5.92	14.4	10.8
A756-1	2.86	5.30	13.6	11.1
A756-2	2.74	9.56	14.4	11.0
A757-1	2.78	8.99	14.3	10.6
A757-2	2.54	8.37	13.3	11.1
平均	2.86	7.89	14.0	10.9
最大	3.69	9.56	14.4	11.1
最小	2.54	5.30	13.3	10.6
標準偏差	0.423	1.82	0.480	0.217
変動係数	14.8	23.0	3.43	1.99

### 2.4.3 考察

各 CLT の破壊形態の例を写真 2.4-3～2.4-26 に示す。強軸試験体では、節周辺やフィンガージョイント部分に破壊が見られた試験体が多く存在した。弱軸試験体では最大荷重付近で大きく変形したものも見られた。弱軸試験体の幅面ではラミナが横方向に圧縮されるため、表面から破壊を確認することが困難であった。



写真 2.4-3 3 層 3 プライ強軸の破壊形態の例



写真 2.4-4 3 層 3 プライ強軸の破壊形態の例



写真 2.4-5 3層3プライ弱軸の破壊形態の例



写真 2.4-6 3層3プライ弱軸の破壊形態の例



写真 2.4-7 3層4プライ強軸の破壊形態の例



写真 2.4-8 3層4プライ強軸の破壊形態の例



写真 2.4-9 3層4プライ弱軸の破壊形態の例



写真 2.4-10 3層4プライ弱軸の破壊形態の例



写真 2.4-11 5層5プライ強軸の破壊形態の例



写真 2.4-12 5層5プライ強軸の破壊形態の例





写真 2.4-13 5層5プライ弱軸の破壊形態の例



写真 2.4-14 5層5プライ弱軸の破壊形態の例



写真 2.4-15 5層7プライ強軸の破壊形態の例



写真 2.4-16 5層7プライ強軸の破壊形態の例





写真 2.4-17 5層7プライ弱軸の破壊形態の例



写真 2.4-18 5層7プライ弱軸の破壊形態の例



写真 2.4-19 7層7プライ強軸の破壊形態の例



写真 2.4-20 7層7プライ強軸の破壊形態の例



写真 2.4-21 7層7プライ弱軸の破壊形態の例



写真 2.4-22 7層7プライ弱軸の破壊形態の例



写真 2.4-23 9層9プライ強軸の破壊形態の例



写真 2.4-24 9層9プライ強軸の破壊形態の例



写真 2.4-25 9層9プライ弱軸の破壊形態の例 写真 2.4-26 9層9プライ弱軸の破壊形態の例

横軸に断面内の強軸方向の割合が大きい順（割合が同じ場合は外層の割合が大きいものを優先）に並べて、縦軸に各試験体の圧縮強度をプロットしたものを図 2.4-1 に示す。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（M60A）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。

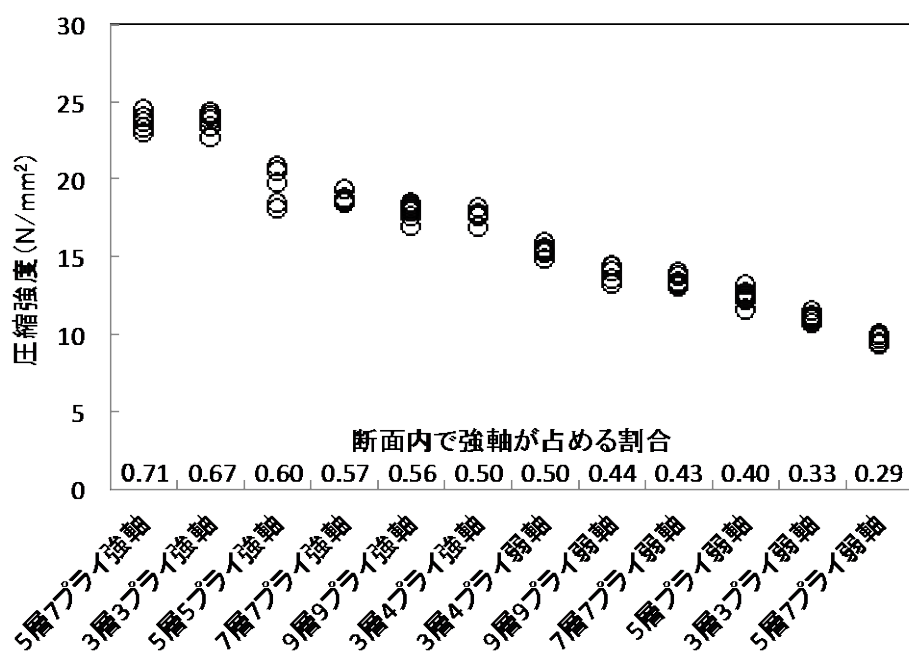


図 2.4-1 各構成の圧縮強度

#### 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。

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（M60A）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 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 Mx60-3-3、Mx60-3-4、Mx60-5-5、Mx60-5-7、Mx60-7-7、Mx60-9-9 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 3 体の場合がある）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
Mx60-3-3	3000	300	90	115.5 (96.1)	115.5 (346.4)
Mx60-3-4	3000	300	120	96.6 (65.5)	96.6 (173.2)
Mx60-5-5	3000	300	150	69.3 (60.3)	69.3 (96.1)
Mx60-5-7	3000	300	210	49.5 (43.5)	49.5 (96.1)
Mx60-7-7	3000	300	210	49.5 (44.4)	49.5 (60.3)
Mx60-9-9	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 Mx60-3-3 (強軸方向加力)、表 2.5-3 に Mx60-3-4 (強軸方向加力)、表 2.5-4 に Mx60-5-5 (強軸方向加力)、表 2.5-5 に Mx60-5-7 (強軸方向加力)、表 2.5-6 に Mx60-7-7 (強軸方向加力)、表 2.5-7 に Mx60-9-9 (強軸方向加力) の試験結果として、各試験体の座屈荷重と曲げ弾性係数を示す。また、表 2.5-8 に Mx60-3-3 (弱軸方向加力)、表 2.5-9 に Mx60-3-4 (弱軸方向加力)、表 2.5-10 に Mx60-5-5 (弱軸方向加力)、表 2.5-11 に Mx60-5-7 (弱軸方向加力)、表 2.5-12 に Mx60-7-7 (弱軸方向加力)、表 2.5-13 に Mx60-9-9 (弱軸方向加力) の試験結果として、各試験体の座屈荷重と曲げ弾性係数を示す。なお、考察において詳しくは記述するが、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  $\lambda_{eff}=100$  を直線補完した値である。

表 2.5-2 Mx60-3-3 (強軸方向加力) の試験結果

試験体名	加力方向	比重	座屈荷重 測定値 (kN)	曲げ 弾性係数 (GPa)	座屈荷重 計算値① (kN)	座屈荷重 計算値② (kN)
A666	強軸	0.43	278.5	8.16	163.0	177.1
A666-2	強軸	0.42	230.3	7.62	152.2	166.8
A665	強軸	0.43	247.8	9.01	180.1	193.5
A665-2	強軸	0.41	268.1	8.27	165.2	179.2
A667	強軸	0.41	165.6	8.44	168.8	182.6
A667-2	強軸	0.43	173.9	8.19	163.6	177.7
平均	—	0.42	227.4	8.28	165.5	179.5
最大	—	0.43	278.5	9.01	180.1	193.5
最小	—	0.41	165.6	7.62	152.2	166.8
標準偏差	—	0.009	47.7	0.45	9.06	8.70
変動係数	—	2.0	21.0	5.5	5.5	4.8

表 2.5-3 Mx60-3-4 (強軸方向加力) の試験結果

試験体名	加力方向	比重	座屈荷重 測定値 (kN)	曲げ 弾性係数 (GPa)	座屈荷重 計算値① (kN)	座屈荷重 計算値② (kN)
A672	強軸	0.41	425.0	6.80	322.1	389.4
A672-2	強軸	0.42	332.5	6.94	328.8	393.7
A674	強軸	0.41	273.7	6.50	308.0	380.3
A674-2	強軸	0.43	328.9	7.02	332.4	396.0
A673	強軸	0.41	363.3	7.12	337.3	399.2
A673-2	強軸	0.41	452.2	7.45	352.8	409.2
平均	—	0.42	362.6	6.97	330.2	394.7
最大	—	0.43	452.2	7.45	352.8	409.2
最小	—	0.41	273.7	6.50	308.0	380.3
標準偏差	—	0.007	66.1	0.32	15.02	9.67
変動係数	—	1.8	18.2	4.5	4.5	2.5

表 2.5-4 Mx60-5-5（強軸方向加力）の試験結果

試験体名	加力方向	比重	座屈荷重 測定値 (kN)	曲げ 弾性係数 (GPa)	座屈荷重 計算値① (kN)	座屈荷重 計算値② (kN)
A733	強軸	0.42	669.7	6.30	582.8	627.2
A733-2	強軸	0.43	451.4	6.71	620.5	649.4
A734	強軸	0.42	601.6	6.87	635.5	658.3
A734-2	強軸	0.41	726.3	6.13	567.2	617.9
A735	強軸	0.42	656.4	6.07	561.4	614.5
A735-2	強軸	0.41	573.5	6.44	595.6	634.7
平均	—	0.42	613.1	6.42	593.8	633.7
最大	—	0.43	726.3	6.87	635.5	658.3
最小	—	0.41	451.4	6.07	561.4	614.5
標準偏差	—	0.006	95.6	0.32	29.44	17.39
変動係数	—	1.4	15.6	5.0	5.0	2.7

表 2.5-5 Mx60-5-7（強軸方向加力）の試験結果

試験体名	加力方向	比重	座屈荷重 測定値 (kN)	曲げ 弾性係数 (GPa)	座屈荷重 計算値① (kN)	座屈荷重 計算値② (kN)
A740	強軸	0.42	1120.3	6.41	1627.7	1380.0
A740-2	強軸	0.42	1267.9	6.73	1707.6	1413.4
A742	強軸	0.41	1186.3	6.98	1772.4	1440.4
平均	—	0.42	1191.5	6.67	1692.4	1407.0
最大	—	0.42	1267.9	6.98	1772.4	1440.4
最小	—	0.41	1120.3	6.41	1627.7	1380.0
標準偏差	—	0.008	73.9	0.24	61.88	25.84
変動係数	—	1.9	6.2	3.7	3.7	1.8

表 2.5-6 Mx60-7-7（強軸方向加力）の試験結果

試験体名	加力方向	比重	座屈荷重 測定値 (kN)	曲げ 弾性係数 (GPa)	座屈荷重 計算値① (kN)	座屈荷重 計算値② (kN)
A746	強軸	0.40	1008.0	4.90	1242.8	1029.6
A746-2	強軸	0.40	1056.6	5.35	1358.3	1078.9
A748-2	強軸	0.41	1005.4	5.45	1383.7	1089.7
平均	—	0.41	1023.4	5.37	1362.4	1080.6
最大	—	0.41	1056.6	5.83	1480.7	1131.0
最小	—	0.40	1005.4	4.90	1242.8	1029.6
標準偏差	—	0.006	28.84	0.32	80.96	34.51
変動係数	—	1.5	2.8	5.9	5.9	3.2

表 2.5-7 Mx60-9-9（強軸方向加力）の試験結果

試験体名	加力方向	比重	座屈荷重 測定値 (kN)	曲げ 弾性係数 (GPa)	座屈荷重 計算値① (kN)	座屈荷重 計算値② (kN)
A752	強軸	0.41	1312.7	4.45	2403.4	1578.4
A752-2	強軸	0.41	1314.9	4.33	2337.5	1552.7
A754	強軸	0.41	1237.1	4.21	2272.8	1527.5
平均	—	0.41	1288.3	4.46	2404.1	1578.7
最大	—	0.41	1314.9	5.05	2725.5	1704.0
最小	—	0.41	1237.1	4.17	2247.4	1517.6
標準偏差	—	0.002	44.3	0.32	173.59	67.68
変動係数	—	0.5	3.4	7.2	7.2	4.3

表 2.5-8 Mx60-3-3（弱軸方向加力）の試験結果

試験体名	加力方向	比重	座屈荷重 測定値 (kN)	曲げ 弾性係数 (GPa)	座屈荷重 計算値① (kN)	座屈荷重 計算値② (kN)
A670-1	弱軸	0.42	13.3	0.44	8.9	8.9
A670-2	弱軸	0.43	10.6	0.53	10.5	10.5
A671-1	弱軸	0.40	19.1	0.50	10.1	10.1
A671-2	弱軸	0.40	20.6	0.52	10.5	10.5
A669-1	弱軸	0.42	24.2	0.47	9.5	9.5
A669-2	弱軸	0.42	17.9	0.53	10.6	10.6
平均	—	0.41	17.6	0.50	10.0	10.0
最大	—	0.43	24.2	0.53	10.6	10.6
最小	—	0.40	10.6	0.44	8.9	8.9
標準偏差	—	0.013	4.9	0.03	0.69	0.69
変動係数	—	3.0	28.1	6.9	6.9	6.9

表 2.5-9 Mx60-3-4（弱軸方向加力）の試験結果

試験体名	加力方向	比重	座屈荷重 測定値 (kN)	曲げ 弾性係数 (GPa)	座屈荷重 計算値① (kN)	座屈荷重 計算値② (kN)
A675	弱軸	0.43	43.7	1.14	53.9	53.9
A675-2	弱軸	0.42	41.2	1.14	53.9	53.9
A677	弱軸	0.42	49.9	1.19	56.6	56.6
A677-2	弱軸	0.42	94.0	1.07	50.5	50.5
A676	弱軸	0.43	117.7	1.14	54.1	54.1
A676-2	弱軸	0.41	77.6	1.11	52.5	52.5
平均	—	0.42	70.7	1.13	53.6	53.6
最大	—	0.43	117.7	1.19	56.6	56.6
最小	—	0.41	41.2	1.07	50.5	50.5
標準偏差	—	0.008	31.1	0.04	2.00	2.00
変動係数	—	2.0	44.0	3.7	3.7	3.7

表 2.5-10 Mx60-5-5（弱軸方向加力）の試験結果

試験体名	加力方向	比重	座屈荷重 測定値 (kN)	曲げ 弾性係数 (GPa)	座屈荷重 計算値① (kN)	座屈荷重 計算値② (kN)
A738	弱軸	0.40	148.6	1.33	122.8	132.4
A738-2	弱軸	0.40	207.9	1.42	131.7	140.9
A737	弱軸	0.40	241.5	1.40	129.9	139.2
A737-2	弱軸	0.41	263.9	1.46	135.1	144.2
A739	弱軸	0.41	118.1	1.37	126.7	136.1
A739-2	弱軸	0.42	138.7	1.64	151.6	160.1
平均	—	0.41	186.5	1.44	133.0	142.1
最大	—	0.42	263.9	1.64	151.6	160.1
最小	—	0.40	118.1	1.33	122.8	132.4
標準偏差	—	0.008	59.8	0.11	10.08	9.67
変動係数	—	2.1	32.1	7.6	7.6	6.8

表 2.5-11 Mx60-5-7（弱軸方向加力）の試験結果

試験体名	加力方向	比重	座屈荷重 測定値 (kN)	曲げ 弾性係数 (GPa)	座屈荷重 計算値① (kN)	座屈荷重 計算値② (kN)
A744	弱軸	0.41	190.5	0.66	167.1	174.9
A744-2	弱軸	0.41	275.0	0.67	169.1	176.8
A743	弱軸	0.41	149.1	0.73	184.1	191.2
平均	—	0.41	204.9	0.68	173.5	181.1
最大	—	0.41	275.0	0.73	184.1	191.2
最小	—	0.41	149.1	0.66	167.1	174.9
標準偏差	—	0.001	64.2	0.03	7.35	7.05
変動係数	—	0.3	31.3	4.2	4.2	3.9

表 2.5-12 Mx60-7-7（弱軸方向加力）の試験結果

試験体名	加力方向	比重	座屈荷重 測定値 (kN)	曲げ 弾性係数 (GPa)	座屈荷重 計算値① (kN)	座屈荷重 計算値② (kN)
A750	弱軸	0.41	596.8	1.93	490.0	510.5
A750-2	弱軸	0.41	562.1	1.94	492.5	512.0
A749-2	弱軸	0.41	490.4	1.75	444.3	483.5
平均	—	0.41	549.8	1.83	465.7	496.1
最大	—	0.41	596.8	1.94	492.5	512.0
最小	—	0.41	490.4	1.74	442.5	482.4
標準偏差	—	0.003	54.3	0.10	24.19	14.29
変動係数	—	0.7	9.9	5.2	5.2	2.9



表 2.5-13 Mx60-9-9（弱軸方向加力）の試験結果

試験体名	加力方向	比重	座屈荷重 測定値 (kN)	曲げ 弾性係数 (GPa)	座屈荷重 計算値① (kN)	座屈荷重 計算値② (kN)
A757	弱軸	0.41	979.3	2.14	1152.0	904.2
A757-2	弱軸	0.38	948.2	2.04	1099.7	881.9
A756	弱軸	0.41	854.6	2.20	1185.5	918.5
平均	—	0.40	927.4	2.15	1160.1	907.6
最大	—	0.41	979.3	2.21	1189.8	920.3
最小	—	0.38	854.6	2.04	1099.7	881.9
標準偏差	—	0.016	64.9	0.06	34.49	14.70
変動係数	—	4.1	7.0	3.0	3.0	1.6

以上の結果をまとめると表 2.5-14 のようになる。

表 2.5-14 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)
Mx60-3-3	強軸	227.4	165.5	179.5
	弱軸	17.6	10.0	10.0
Mx60-3-4	強軸	362.6	330.2	<u>394.7</u>
	弱軸	70.7	53.6	53.6
Mx60-5-5	強軸	613.1	593.8	<u>633.7</u>
	弱軸	186.5	133.0	142.1
MX60-5-7	強軸	1191.5	1692.4	<u>1407.0</u>
	弱軸	204.9	173.5	181.1
Mx60-7-7	強軸	1023.4	1362.4	<u>1080.6</u>
	弱軸	549.8	465.7	496.1
Mx60-9-9	強軸	1288.3	2404.1	<u>1578.7</u>
	弱軸	927.4	1160.1	907.6

（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 2.5-15 のように定められている。

表 2.5-15 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。

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

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

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

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 E50 の圧縮強度 19.2 (N/mm<sup>2</sup>) と E70 の圧縮強度 23.4 (N/mm<sup>2</sup>) を直線補完した値 21.3 (N/mm<sup>2</sup>) を 3/4 で除した値 28.4 (N/mm<sup>2</sup>) 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 (N/mm<sup>2</sup>) 3/4 で除した値 20.0 (N/mm<sup>2</sup>) 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。

一部例外はあるものの、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が異なっている部分について、弱軸方向の実験値が計算値よりも高くなっている理由としては、計算では存在しないものと仮定している弱軸方向の外装ラミナ（特に圧縮側）が実際には座屈に寄与していたことが考えられるが、ラミナ間の隙間を大きくするなどして実験を行い確認する必要がある。一方、強軸方向については、計算値②が実測値よりも幾分大きくなる場合（アンダーライン部分）があったが、その理由としては計算に用いる曲げ弾性係数に実測値を用いたことが考えられる。

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 2.5-16 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 Mx60-5-7 と Mx60-9-9 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は、いずれの強度等級とも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。

表 2.5-16 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)
Mx60-3-3	227.4	120.4	101.2
Mx60-3-4	362.6	322.3	297.9
Mx60-5-5	613.1	512.4	468.7
MX60-5-7	1191.5	<u>1209.2</u>	1124.4
Mx60-7-7	1023.4	889.4	824.5
Mx60-9-9	1288.3	<u>1314.6</u>	1188.3

(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 一部例外はあるものの、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 弱軸方向の実験値が計算値よりも高くなる場合があった理由としては、計算では存在しないものと仮定している弱軸方向の外装ラミナ（特に圧縮側）が実際には座屈に寄与していたことが考えられるが、ラミナ間の隙間を大きくするなどして実験を行い確認する必要がある。
- ③ 強軸方向の計算値が実験値よりも幾分大きくなる場合があった理由としては、計算に用いる曲げ弾性係数に実測値を用いたことが考えられる。
- ④ 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。
- ⑤ 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 Mx60-5-7 と Mx60-9-9 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。
- ⑥ 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は、いずれの強度等級とも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 縦引張り

### 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 4.1 項で示されるラミナ試験と同ロットで製造したものであり、外層が M60A、内層が 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。T. G. H. 法の測定は材長の 0.224 倍の位置に支点を固定して行った。プラスチック製あるいは金属製のハンマーを用いて、材長の中央上部あるいは材端上部を打撃し、材長の中央上部あるいは材端上部に設置したマイクロフォンあるいは加速度ピックアップを用いて 1 次、3 次、5 次の固有振動数を測定した。

また、面外および面内方向について、スパンを梁せいの 21 倍とした 3 等分点 4 点荷重方式により、弾性域内で曲げ載荷し、静的な見かけの曲げヤング係数および真の曲げヤング係数を求めた。写真 2.6-1 に 3 層 4 プライ弱軸試験体の面内曲げの様子を示す。

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。写真 2.6-2 に 5 層 5 プライ強軸試験体の引張り試験の様子を示す。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 引張り試験で用いたスギ CLT の概要

層構成	外層の方向	寸法 mm (h×b×L)	試験体数	T. G. H. 面外	T. G. H. 面内
3 層 3 プライ	強軸	90×300×6000	6	○	○
	弱軸	90×300×6000	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 面内曲げ試験の様子（3 層 4 プライ弱軸）



写真 2.6-2 引張り試験の様子（5 層 5 プライ強軸）

## 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)
A665-1	423	5.63	6.11	1.30	5.86	0.882
A665-2	418	5.91	6.37	0.810	6.17	0.820
A666-1	407	5.71	6.71	0.198	5.82	0.781
A666-2	411	5.85	7.00	0.208	5.88	0.794
A667-1	409	-	7.81	0.169	5.59	0.828
A667-2	408	5.44	8.36	0.501	5.43	0.935
平均	413	5.71	7.06	0.531	5.79	0.840
最大	423	5.91	6.11	1.30	6.17	0.935
最小	407	5.44	8.36	0.169	5.43	0.781
標準偏差	6.47	0.186	0.868	0.451	0.254	0.0584
変動係数%	1.57	3.26	12.3	85.0	4.39	6.95

注：縦振動法によるヤング係数について、測定時の不具合により 1 体分のデータがない。

表 2.6-3 静的曲げ試験の結果 (3 層 3 プライ強軸)

3 層 3 プライ強軸	面外		面内	
番号	MOE-app (kN/mm <sup>2</sup> )	MOE-true (kN/mm <sup>2</sup> )	MOE-app (kN/mm <sup>2</sup> )	MOE-true (kN/mm <sup>2</sup> )
A665-1	6.76	7.61	5.26	5.50
A665-2	7.10	8.21	5.62	5.99
A666-1	7.66	8.17	5.21	5.52
A666-2	6.87	7.63	5.28	5.49
A667-1	6.84	8.03	5.18	5.62
A667-2	6.76	8.13	4.92	5.04
平均	7.00	7.96	5.24	5.53
最大	7.66	8.21	5.62	5.99
最小	6.76	7.61	4.92	5.04
標準偏差	0.345	0.274	0.225	0.306
変動係数%	4.93	3.44	4.30	5.53

表 2.6-4 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)
A669-1	416	2.40	-	-	2.46	0.768
A669-2	415	2.42	-	-	2.52	0.577
A670-1	414	2.34	-	-	2.41	1.07
A670-2	401	2.50	-	-	2.48	0.812
A670-1	407	2.28	-	-	2.40	1.03
A672-2	411	2.54	-	-	2.66	0.626
平均	411	2.41	-	-	2.49	0.813
最大	416	2.54	-	-	2.66	1.07
最小	401	2.28	-	-	2.40	0.577
標準偏差	5.53	0.0983	-	-	0.0956	0.202
変動係数%	1.35	4.07	-	-	3.84	24.8

表 2.6-5 静的曲げ試験の結果 (3 層 3 プライ弱軸)

3 層 3 プライ弱軸	面外		面内	
番号	MOE-app (kN/mm <sup>2</sup> )	MOE-true (kN/mm <sup>2</sup> )	MOE-app (kN/mm <sup>2</sup> )	MOE-true (kN/mm <sup>2</sup> )
A669-1	-	-	2.19	2.32
A669-2	-	-	2.18	2.17
A670-1	-	-	2.05	2.07
A670-2	-	-	2.14	2.16
A670-1	-	-	2.11	2.13
A672-2	-	-	2.27	2.48
平均	-	-	2.16	2.22
最大	-	-	2.27	2.48
最小	-	-	2.05	2.07
標準偏差	-	-	0.0750	0.149
変動係数%	-	-	3.48	6.71

表 2.6-6 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)
A672-1	409	4.56	7.94	0.161	-	-
A672-2	405	4.29	7.66	0.173	4.48	0.684
A673-1	409	4.49	8.00	0.161	4.62	0.799
A673-2	407	4.60	7.96	0.167	4.71	0.781
A674-1	397	4.21	7.48	0.154	4.41	0.726
A674-2	402	4.45	7.94	0.164	4.30	0.780
平均	405	4.43	7.83	0.163	4.50	0.754
最大	409	4.60	8.00	0.173	4.71	0.799
最小	397	4.21	7.48	0.154	4.30	0.684
標準偏差	4.50	0.154	0.211	0.00670	0.165	0.048
変動係数%	1.11	3.47	2.69	4.102	3.67	6.32

注：T. G. H. 法面内については測定時の不具合により 1 体分のデータがない。

表 2.6-7 静的曲げ試験の結果 (3 層 4 プライ強軸)

3 層 4 プライ強軸	面外		面内	
番号	MOE-app (kN/mm <sup>2</sup> )	MOE-true (kN/mm <sup>2</sup> )	MOE-app (kN/mm <sup>2</sup> )	MOE-true (kN/mm <sup>2</sup> )
A672-1	6.70	7.31	4.18	4.25
A672-2	7.00	7.54	4.00	4.24
A673-1	6.59	7.70	4.19	4.37
A673-2	6.72	7.70	4.27	4.47
A674-1	6.29	6.99	3.97	4.05
A674-2	6.60	6.98	3.97	4.26
平均	6.65	7.37	4.10	4.27
最大	7.00	7.70	4.27	4.47
最小	6.29	6.98	3.97	4.05
標準偏差	0.231	0.330	0.133	0.140
変動係数%	3.47	4.47	3.23	3.29



表 2.6-8 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)
A675-1	414	3.35	-	-	3.62	0.767
A675-2	411	3.33	-	-	3.44	0.674
A676-1	413	3.04	-	-	3.13	0.904
A676-2	411	3.44	-	-	3.44	0.747
A677-1	415	3.31	-	-	3.56	0.623
A677-2	416	3.32	-	-	3.53	0.641
平均	413	3.30	-	-	3.45	0.73
最大	416	3.44	-	-	3.62	0.90
最小	411	3.04	-	-	3.13	0.62
標準偏差	2.17	0.135	-	-	0.172	0.104
変動係数%	0.525	4.10	-	-	4.98	14.4

表 2.6-9 静的曲げ試験の結果（3 層 4 プライ弱軸）

3 層 4 プライ弱軸	面外		面内	
番号	MOE-app (kN/mm <sup>2</sup> )	MOE-true (kN/mm <sup>2</sup> )	MOE-app (kN/mm <sup>2</sup> )	MOE-true (kN/mm <sup>2</sup> )
A675-1	1.12	1.05	3.22	3.42
A675-2	1.05	1.01	3.13	3.41
A676-1	0.947	0.954	2.76	2.69
A676-2	1.11	1.13	3.07	3.24
A677-1	1.33	1.29	3.17	3.44
A677-2	1.18	1.11	3.24	3.36
平均	1.12	1.09	3.10	3.26
最大	1.33	1.29	3.24	3.44
最小	0.95	0.95	2.76	2.69
標準偏差	0.129	0.116	0.176	0.288
変動係数%	11.5	10.6	5.68	8.82

表 2.6-10 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)
A733-1	411	4.45	6.44	0.216	4.52	0.808
A733-2	406	4.49	6.24	0.266	4.66	0.816
A734-1	410	5.04	7.22	0.257	4.94	0.845
A734-2	410	4.80	6.77	0.285	4.88	0.839
A735-1	419	4.81	7.67	0.194	4.82	0.762
A735-2	416	4.67	6.77	0.236	4.67	0.848
平均	412	4.71	6.85	0.242	4.75	0.820
最大	419	5.04	7.67	0.285	4.94	0.848
最小	406	4.45	6.24	0.194	4.52	0.762
標準偏差	4.79	0.222	0.523	0.0337	0.158	0.0327
変動係数%	1.16	4.72	7.63	13.9	3.33	3.99

表 2.6-11 静的曲げ試験の結果 (5 層 5 プライ強軸)

5 層 5 プライ強軸	面外		面内	
番号	MOE-app (kN/mm <sup>2</sup> )	MOE-true (kN/mm <sup>2</sup> )	MOE-app (kN/mm <sup>2</sup> )	MOE-true (kN/mm <sup>2</sup> )
A733-1	5.59	6.20	4.06	4.35
A733-2	5.47	5.88	4.24	4.61
A734-1	6.40	6.46	4.48	4.66
A734-2	5.74	6.16	4.41	4.56
A735-1	6.18	6.98	4.45	4.72
A735-2	6.01	6.41	4.25	4.38
平均	5.90	6.35	4.31	4.55
最大	6.40	6.98	4.48	4.72
最小	5.47	5.88	4.06	4.35
標準偏差	0.360	0.370	0.161	0.149
変動係数%	6.10	5.83	3.72	3.28

表 2.6-12 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)
A737-1	400	2.59	1.27	0.251	2.55	0.895
A737-2	403	2.84	1.32	0.272	2.92	0.714
A738-1	397	2.48	1.25	0.248	2.68	0.626
A738-2	404	2.52	1.30	0.133	2.51	0.773
A739-1	401	2.62	1.39	0.187	2.83	0.685
A739-2	412	2.69	1.30	0.444	2.80	0.746
平均	403	2.62	1.31	0.256	2.72	0.740
最大	412	2.84	1.39	0.444	2.92	0.895
最小	397	2.48	1.25	0.133	2.51	0.626
標準偏差	5.13	0.129	0.0474	0.105	0.162	0.0913
変動係数%	1.27	4.92	3.63	41.198	5.97	12.3

表 2.6-13 静的曲げ試験の結果 (5 層 5 プライ弱軸)

5 層 5 プライ弱軸	面外		面内	
番号	MOE-app (kN/mm <sup>2</sup> )	MOE-true (kN/mm <sup>2</sup> )	MOE-app (kN/mm <sup>2</sup> )	MOE-true (kN/mm <sup>2</sup> )
A737-1	1.61	1.57	2.32	2.29
A737-2	1.47	1.45	2.55	2.61
A738-1	1.48	1.53	2.21	2.29
A738-2	1.53	1.61	2.18	2.27
A739-1	1.60	1.51	2.40	2.26
A739-2	1.46	1.55	2.48	2.62
平均	1.52	1.54	2.36	2.39
最大	1.61	1.61	2.55	2.62
最小	1.46	1.45	2.18	2.26
標準偏差	0.0677	0.0529	0.146	0.174
変動係数%	4.44	3.44	6.20	7.29

(2) 破壊試験

表 2.6-14 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 (%)
A665-1	4.99	11.4	15.8	12.3
A665-2	5.50	18.2	18.2	11.7
A666-1	5.23	14.1	17.9	11.9
A666-2	5.30	17.7	17.7	11.7
A667-1	5.19	12.7	16.5	11.1
A667-2	4.93	7.34	14.7	12.0
平均	5.19	13.6	16.8	11.8
最大	5.50	18.2	18.2	12.3
最小	4.93	7.34	14.7	11.1
標準偏差	0.209	4.08	1.38	0.417
変動係数%	4.03	30.0	8.20	3.54

表 2.6-15 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 (%)
A669-1	2.08	5.33	7.64	11.5
A669-2	2.09	5.98	6.03	12.2
A670-1	2.01	6.05	7.98	12.9
A670-2	2.24	3.60	5.89	11.8
A670-1	1.93	5.20	6.71	12.3
A672-2	2.38	5.40	5.71	11.4
平均	2.12	5.26	6.66	12.0
最大	2.38	6.05	7.98	12.9
最小	1.93	3.60	5.71	11.4
標準偏差	0.162	0.885	0.959	0.571
変動係数%	7.64	16.8	14.4	4.75

表 2.6-16 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 (%)
A672-1	4.10	6.82	12.9	11.4
A672-2	3.93	11.4	11.4	11.6
A673-1	4.06	8.24	10.4	11.8
A673-2	4.20	7.26	13.7	11.6
A674-1	3.82	11.8	11.9	12.7
A674-2	4.10	11.6	11.6	12.2
平均	4.04	9.52	12.0	11.9
最大	4.20	11.8	13.7	12.7
最小	3.82	6.82	10.4	11.4
標準偏差	0.136	2.33	1.15	0.470
変動係数%	3.37	24.4	9.62	3.96

表 2.6-17 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 (%)
A675-1	3.08	8.10	9.90	11.3
A675-2	3.17	9.90	11.7	11.4
A676-1	2.56	9.70	10.9	13.5
A676-2	3.12	6.18	9.06	12.6
A677-1	3.22	9.35	9.54	11.0
A677-2	2.99	8.73	9.53	11.6
平均	3.03	8.66	10.1	11.9
最大	3.22	9.90	11.7	13.5
最小	2.56	6.18	9.06	11.0
標準偏差	0.239	1.38	1.00	0.929
変動係数%	7.89	16.0	9.94	7.80

表 2.6-18 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 (%)
A733-1	4.15	5.55	15.0	11.0
A733-2	4.30	13.9	13.9	10.3
A734-1	4.63	13.2	13.2	10.8
A734-2	4.22	13.1	13.1	10.3
A735-1	4.34	14.8	14.8	11.7
A735-2	4.36	6.91	16.0	11.7
平均	4.34	11.2	14.3	11.0
最大	4.63	14.8	16.0	11.7
最小	4.15	5.55	13.1	10.3
標準偏差	0.166	3.95	1.12	0.608
変動係数%	3.83	35.2	7.79	5.54

表 2.6-19 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 (%)
A737-1	2.32	6.91	8.75	11.2
A737-2	2.36	7.25	8.67	12.2
A738-1	2.10	7.64	7.95	11.7
A738-2	2.29	6.47	8.16	11.7
A739-1	2.19	6.82	8.62	11.7
A739-2	2.19	3.14	7.85	11.3
平均	2.24	6.37	8.33	11.7
最大	2.36	7.64	8.75	12.2
最小	2.10	3.14	7.85	11.2
標準偏差	0.100	1.63	0.394	0.355
変動係数%	4.45	25.6	4.73	3.04

### 2.6.3 考察

非破壊試験の結果を表 2.6-2～2.6-13 に示す。面外方向での T.G.H.法による測定について、概して振動のピークを判別することが困難であり、特に、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できなかった。また、静的曲げ試験では、3 層 3 プライ弱軸面外の試験体では支点外のはみ出し部分が大きく（片側で 2055mm のはみ出し）、また外層が弱軸であるために、試験体を支持した時点で凸状に試験体に変形し、曲げヤング係数を測定することができなかった（写真 2.6-3）。3 層 4 プライ弱軸の試験体でも 3 層 3 プライ弱軸の試験体ほどではないものの支持時点で変形していたため、試験結果に影響を及ぼした可能性が十分考えられる。一方、面内方向では、T.G.H.法による

測定、静的曲げ試験ともに面外方向で見られたような測定上困難な点はなかった。

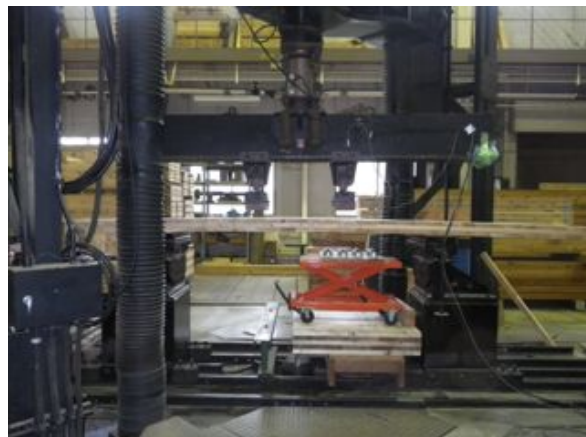


写真 2.6-3 3層3プライ弱軸試験体を試験機に設置したところ（試験は行わなかった）

「構造用木材の強度試験マニュアル」等に記載の方法により、T.G.H.法から求めた真の曲げヤング係数を静的曲げ試験の荷重条件で調整した見かけの曲げヤング係数（動的）と、静的曲げ試験による見かけの曲げヤング係数（静的）とを比較した。調整式で用いた  $E/G$  は、T.G.H.法で求めた個々の試験体の真の曲げヤング係数（ $E$ ）とせん断弾性係数（ $G$ ）とした。結果を図 2.6-1 に示す。面内曲げでは、動的と静的で求めた見かけの曲げヤング係数は良く一致した。すなわち、比較的簡便に測定することができる動的の方法によって、静的の見かけの曲げヤング係数が予測できることがわかった。一方、面外曲げでは、強軸（図の右上のプロット群）で動的と静的の見かけのヤング係数にばらつきが見られた。

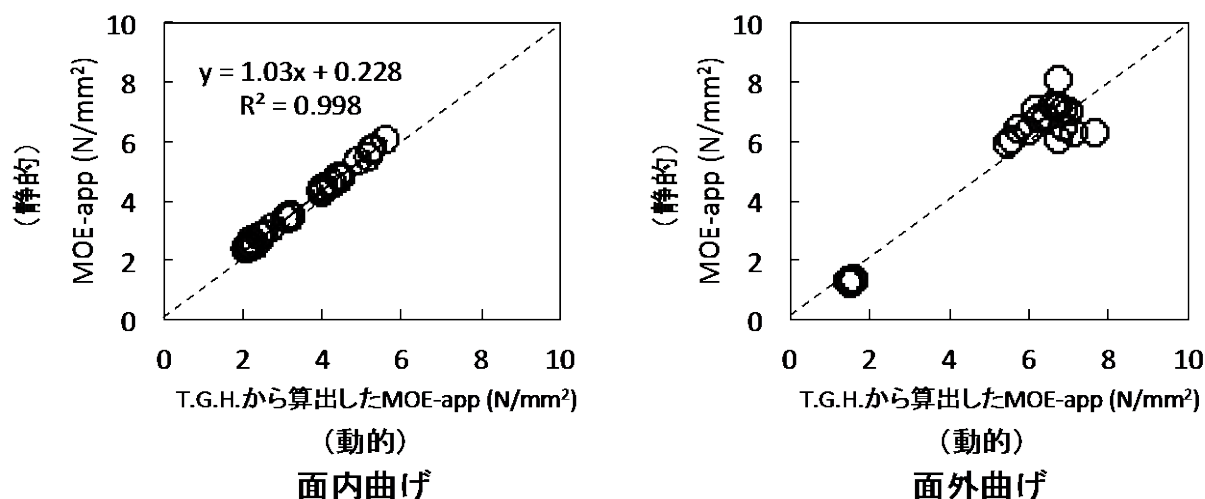


図 2.6-1 T.G.H.法と静的曲げ試験による見かけの曲げヤング係数（MOE-app）の比較

引張り試験の結果を表 2.6-14～2.6-19 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 2.6-4～2.6-9 に示す。また、構成による引張り強度の比較、および実測値と等価断面法による推定値との比較を図 2.6-2 に示す。ただし、3.3 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。

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（M60A）の割合が大きいほど、引張り強度は大きくなった。次に、等価断面法により引張り

強度を推定した。推定には4.1項で行ったラミナ試験のFJラミナの縦振動法によるヤング係数および縦引張り強度の平均値を用いた。弱軸方向のラミナはヤング係数を0と仮定した場合と、「CLT Handbook」等で用いられている、弱軸方向のラミナのヤング係数を強軸方向のその1/30とした場合との2点をプロットした。外層ラミナの縦引張り強度は、強軸の試験体はM60Aの平均値、弱軸の試験体は外層から1層分内側の強軸方向のラミナ（M30A）の平均値とした。上記の方法により得られた推定値と実測値とを比較した結果、推定値と実測値とは比較的良く一致した。



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プライ弱軸の破壊形態の例



写真 2.6-6 3層4プライ強軸の破壊形態の例



写真 2.6-7 3層4プライ弱軸の破壊形態の例



写真 2.6-8 5層5プライ強軸の破壊形態の例



写真 2.6-9 5層5プライ弱軸の破壊形態の例



- : 実測値
- : 等価断面法による推定値(弱軸方向ラミナのヤング係数を0と仮定)
- : 等価断面法による推定値(弱軸方向ラミナのヤング係数を強軸方向の1/30と仮定)

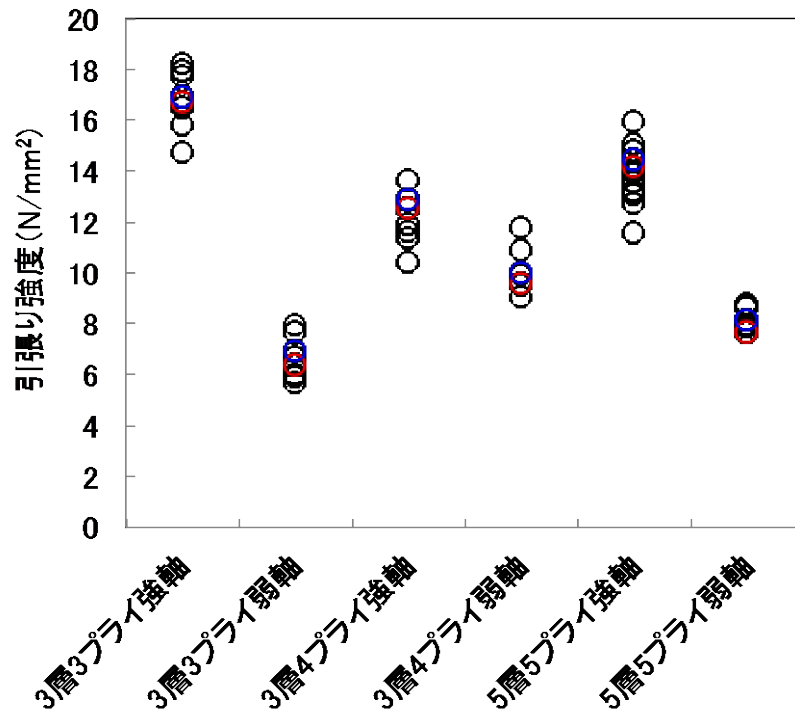


図 2.6-2 構成と引張り強度との関係、および実測値と等価断面法による推定値との比較

#### 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。

T.G.H.法から求めた真の曲げヤング係数を静的曲げ試験の荷重条件で調整した見かけの曲げヤング係数（動的）と、静的曲げ試験による見かけの曲げヤング係数（静的）とを比較した結果、面内曲げでは、動的と静的で求めた見かけの曲げヤング係数は良く一致した。すなわち、比較的簡便に測定することができる動的の方法によって、静的の見かけの曲げヤング係数が予測できることがわかった。一方、面外曲げでは、弱軸の試験体、特に 3 層 3 プライ、3 層 4 プライ試験体は、T.G.H.法および静的曲げ試験による測定は困難であり、また、強軸の試験体でも動的と静的の見かけのヤング係数にばらつきが見られた。

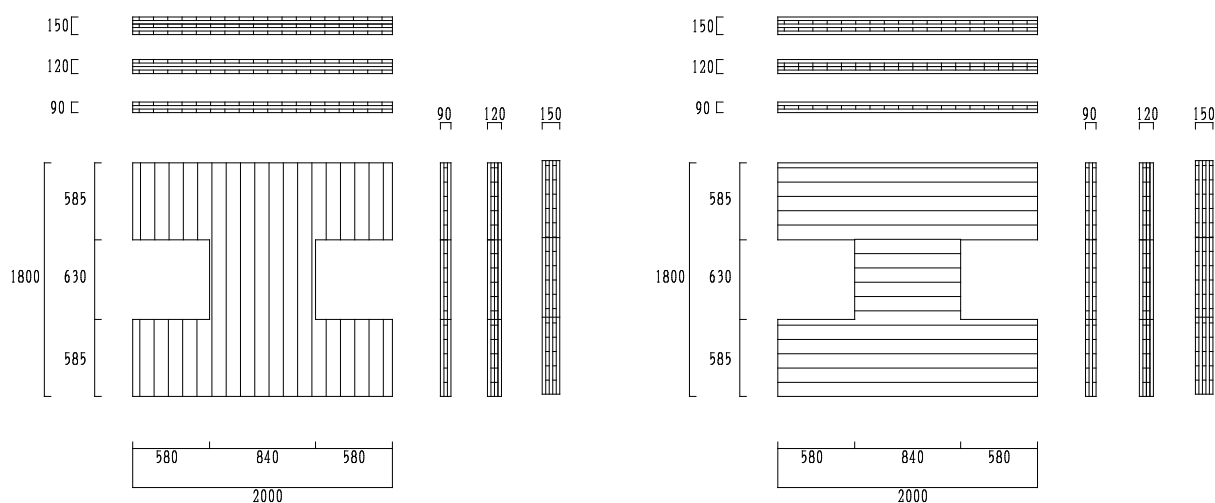
構成の違いについて、断面内の強軸方向のラミナの存在割合が大きく、かつ、外層に存在する強軸ラミナ（M60A）の割合が大きいほど、引張り強度は大きくなった。等価断面法により引張り強度を推定した結果、推定値と実測値とは比較的良く一致した。

## 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、ラミナの樹種はスギ、ラミナの強度等級は Mx60 の A 種である。パネル厚は、150mm (30mm×5 層)、120mm (30mm×4 層)、90mm (30mm×3 層) 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。



(1) 最外層強軸

(2) 最外層弱軸

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	強度区分	層構成
150K	5 層 5Ply	150mm	30mm	105mm	鉛直	Mx60A	スギ
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

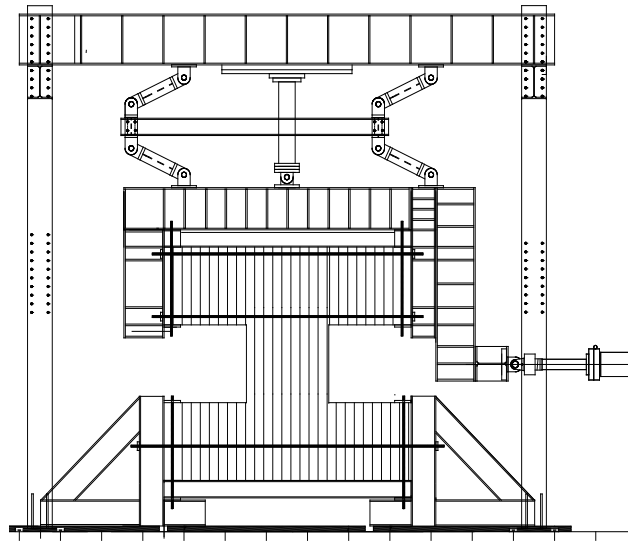


図 2.7.2 試験装置概要

### (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。

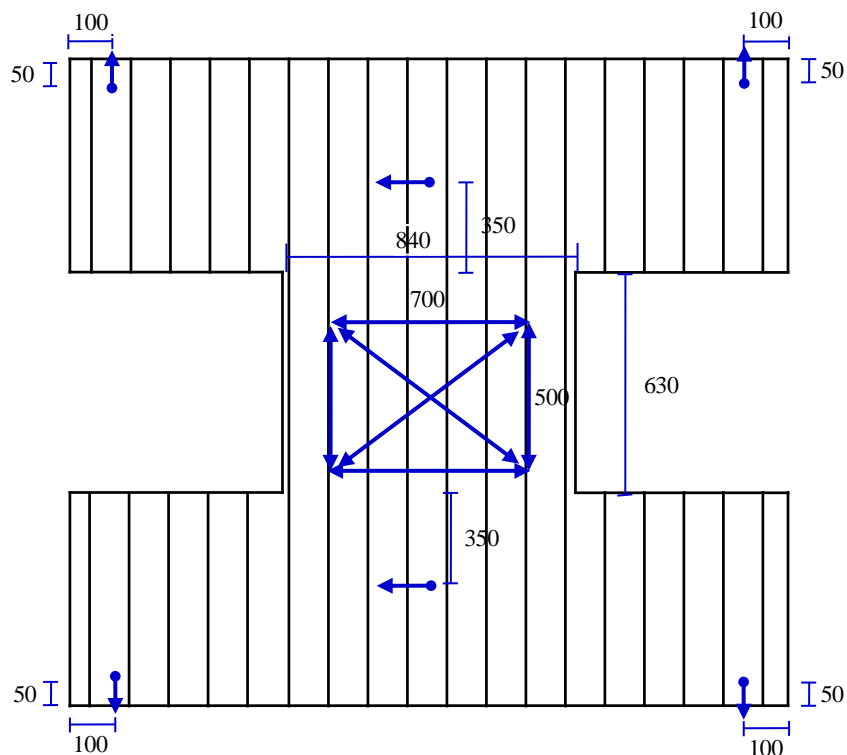


図 2.7.3 計測位置図 (← : 変位計位置)

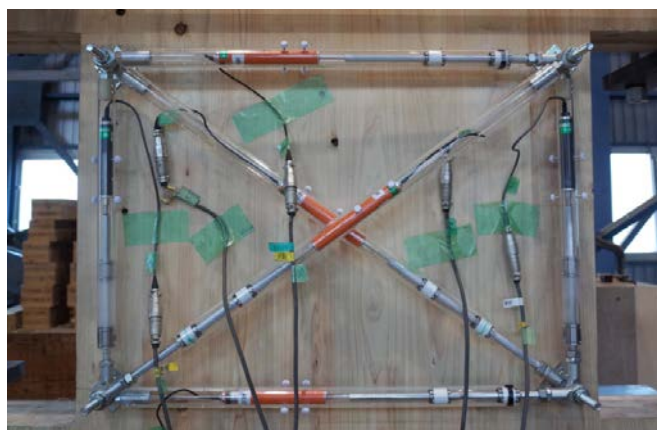


図 2.7.4 くびれ部分の計測方法

## 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。最外層面のラミナでは、ラミナ間のずれが確認された（写真 2.7.2～2.7.4）。3層 4Ply 試験体では、内層 2Ply が一体となって挙動していた。

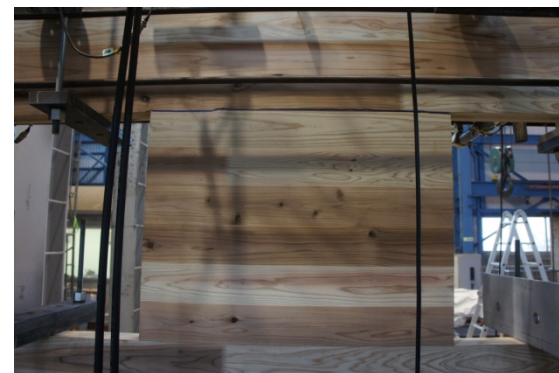
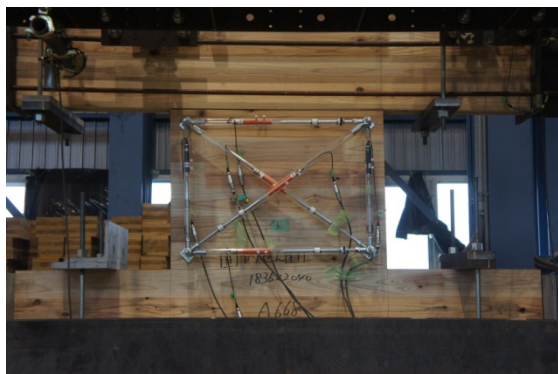


写真 2.7.2 破壊性状 (90J)



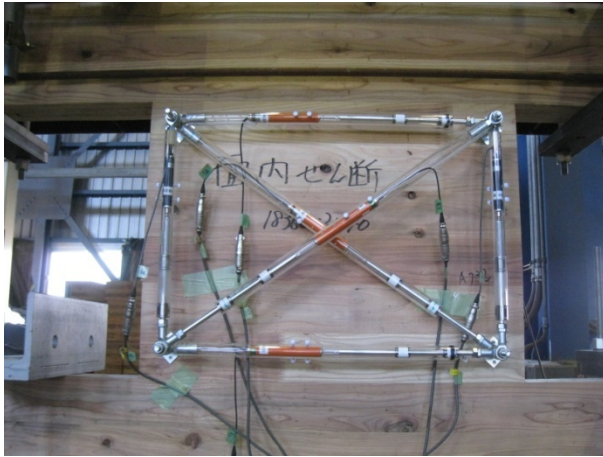


写真 2.7.3 破壊性状 (120J)

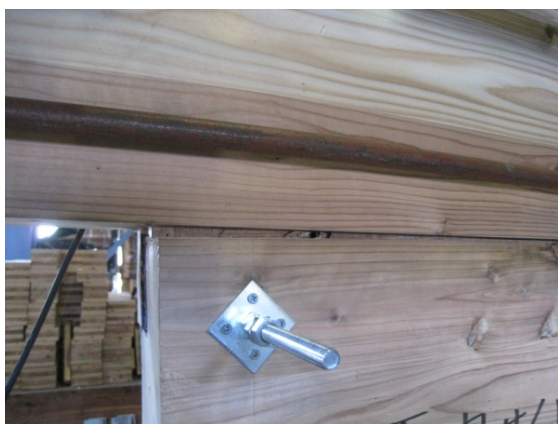


写真 2.7.4 破壊性状 (150J)



## 2) 強軸方向

3層 3Ply、5層 5Ply 試験体では、加力方向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。

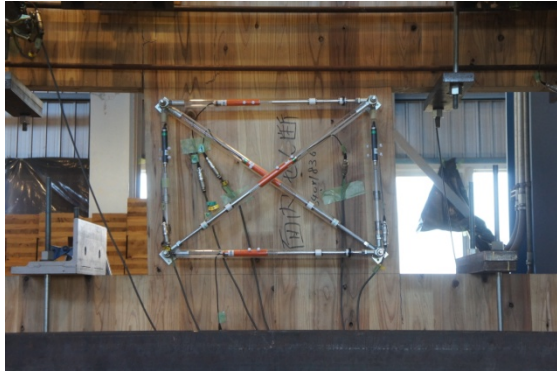


写真 2.7.5 破壊性状 (90K)



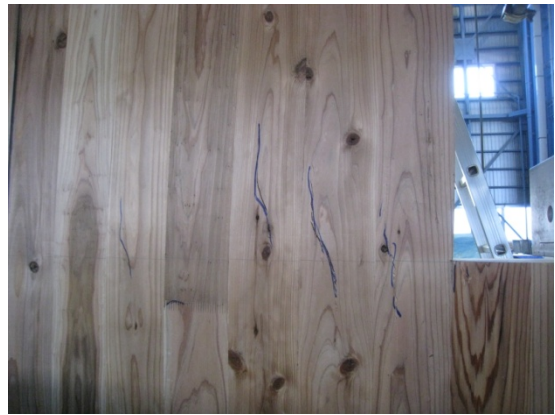
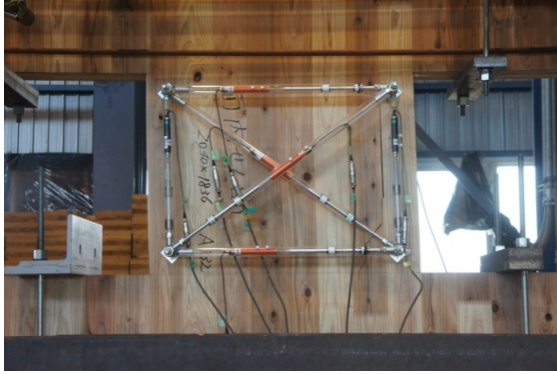


写真 2.7.6  
(120K)



破壊性状



写真 2.7.7 破壊性状 (150K)

(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、せん断変形角 ( $\gamma$ ) 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。

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

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

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)

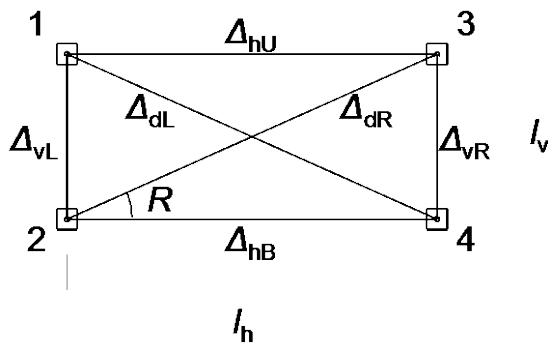


図 2.7.5 くびれ部分の計測変位と寸法の定義

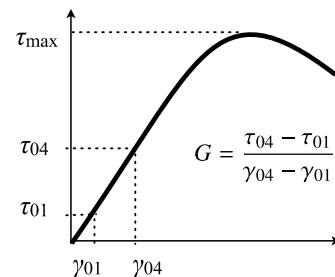


図 2.7.6 セン断弾性係数 ( $G$ ) の定義

図 2.7.7 にせん断応力度-せん断変形角関係を示す。縦軸は、荷重を全断面で除した値である。いずれの試験体も最大せん断応力度は 3N/mm<sup>2</sup> となった。また、強軸と弱軸で剛性及び最大せん断応力度に大きな差は見られなかった。

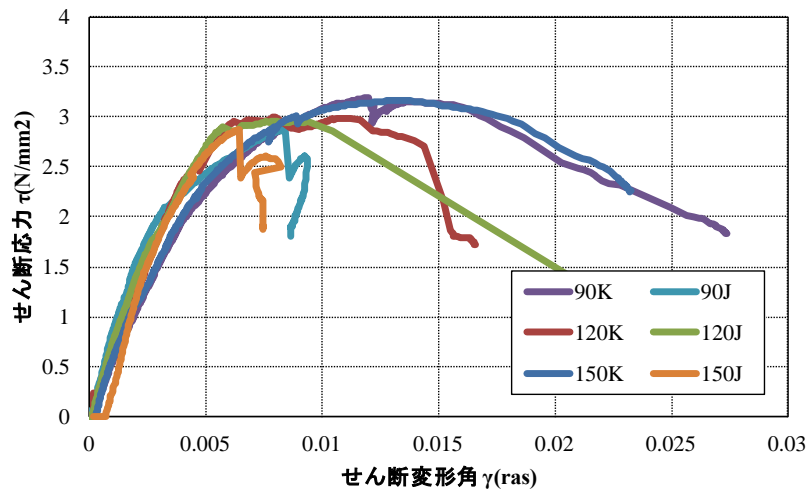


図 2.7.7 せん断応力度せん断変形角関係

### 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  $2.87 \sim 3.19 \text{ N/mm}^2$  程度、せん断剛性は  $521 \sim 797 \text{ GPa}$  程度となった。

表 2.7.2 せん断弾性係数、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	3.16	536	5.27	898
150J	2.87	577	7.16	1450
120K	3.00	607	6.01	1220
120J	2.96	706	5.92	1419
90K	3.19	521	4.79	787
90J	2.87	797	8.62	2399
平均値	3.01	624	6.30	1362
標準偏差	0.14	107	1.39	575
変動係数	5%	17%	22%	42%

### 2.7.4 まとめ

最外層内層がスギ (M60A) の CLT パネルの面内せん断試験を行った。その結果、以下の知見が明らかになった。

- 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  $3 \text{ N/mm}^2$  程度であった。
- ②せん断剛性は  $600 \text{ GPa}$  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は M60、M30 の縦弾性係数を、また、曲げ強度には M60 ラミナの平均値を式に代入し、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。E については強軸・弱軸ともに実験値が若干推定値より大きく安全側で推定できそうである。一方、面外曲げ強度について、強軸は安全側の推定となったが、弱軸は危険側の推定であった。

### 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は M60、M30 の縦弾性係数を、また、曲げ強度には M60 ラミナの平均値を式に代入し、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、強軸はいずれも実験値が若干推定値より大きく安全側で推定できそうであるが、弱軸については 5 層 5 プライよりプライ数が多い場合に危険側の推定となった。一方、MORv については、強軸はいずれ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曲げヤング係数には M60、M30 の縦弾性係数を、また、圧縮強度には M60 ラミナの平均値を式に代入し、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、強軸はいずれも実験値が若干推定値より大きく安全側で推定できそうであるが、弱軸については 5 層 5 プライと 5 層 7 プライで危険側の推定となった。一方、CS については、弱軸の 7 層 7 プライを除いていずれ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曲げヤング係数には M60、M30 の縦弾性係数を、また、引張り強度には M60 ラミナの平均値を式に代入し、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、強軸はいずれも実験値が推定値より大きく安全側で推定できたが、弱軸については 5 層 5 プライが危険側の推定となった。一方、TS については、いずれも推定値が実験値を下回るかほぼ同じで危険側の推定となりそうである。

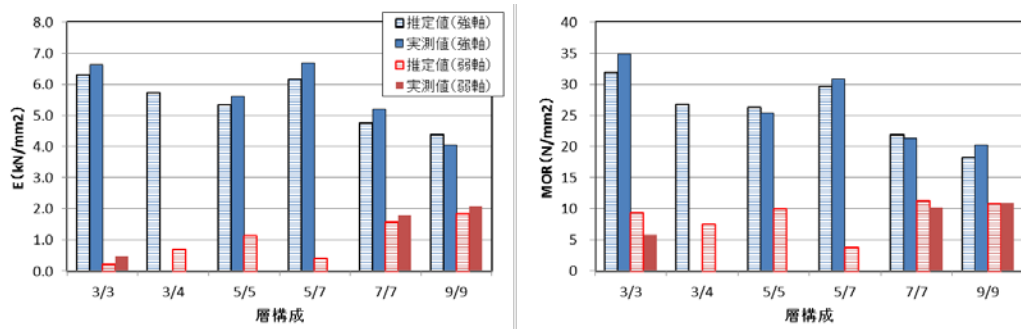


図 2.8-1 面外曲げ性能の推定

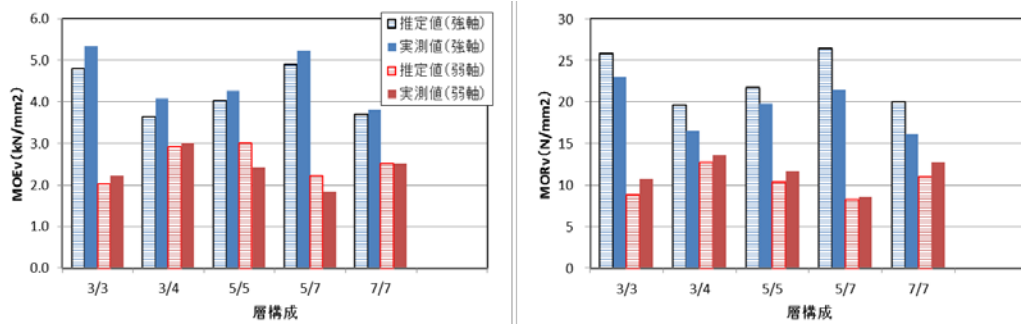


図 2.8-2 面内曲げ性能の推定

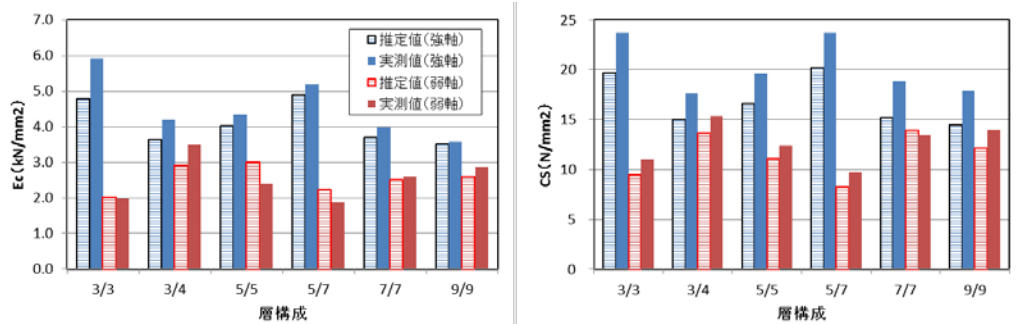


図 2.8-3 圧縮性能の推定

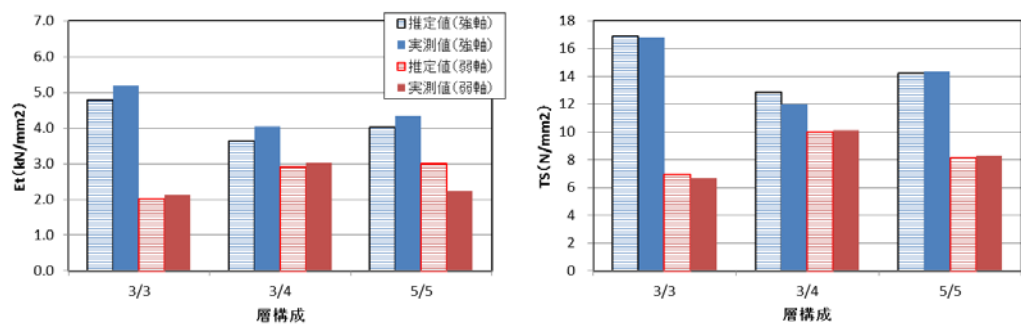


図 2.8-4 縦引張り性能の推定

### 3. 試験体寸法が強度性能に与える影響

#### 3.1 面外曲げ

##### 3.1.1 試験方法

面外曲げ試験には厚さ 30mm 幅 105mm のラミナを積層接着した厚さ 150mm の 5 層 5 プライのスギ CLT (強度等級: Mx60-5-5) を用いた。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 に示すように載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載荷されるように、H 形鋼の載荷梁 (H200×200×8×12) を介して 2 本の油圧ジャッキ (容量 500kN/本) で載荷した (写真 3.1-2)。載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 の試験体では、載荷梁の長さを短いものに変えて試験を行った。載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、載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載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 本の載荷梁を順に試験体に載荷し、最後に油圧ジャッキを降下させて荷重を加えた。なお、載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、線載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)。

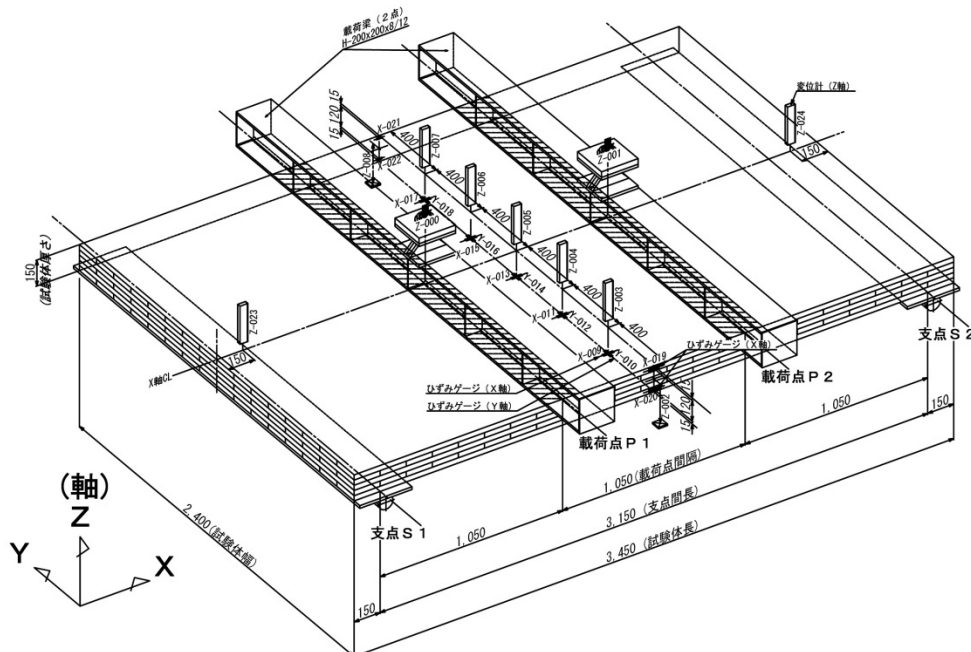


図 3.1-1 2400mm 幅の面外曲げ試験

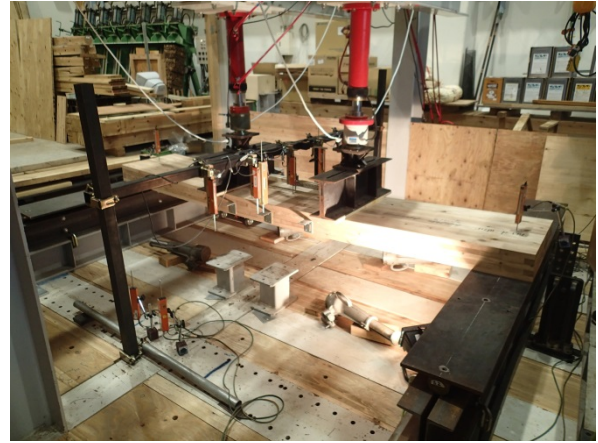
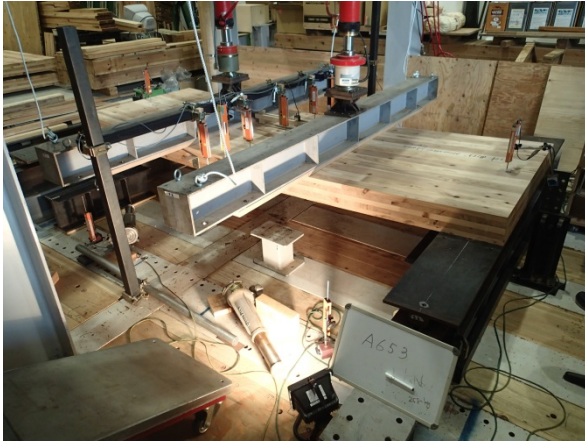


写真 3. 1-1 曲げ試験の様子（左：幅 1200mm、右：幅 600mm）



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



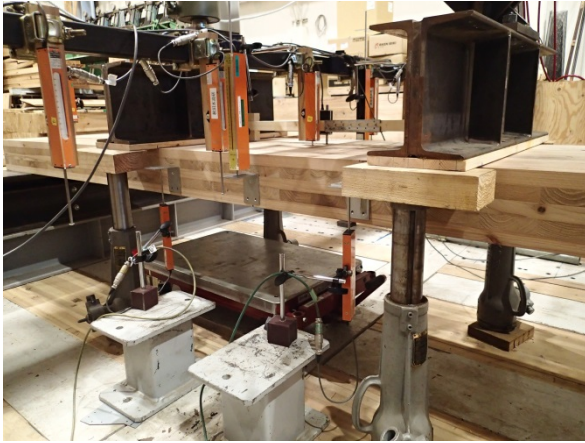


写真 3.1-4 手動ジャッキによる載荷梁の支持

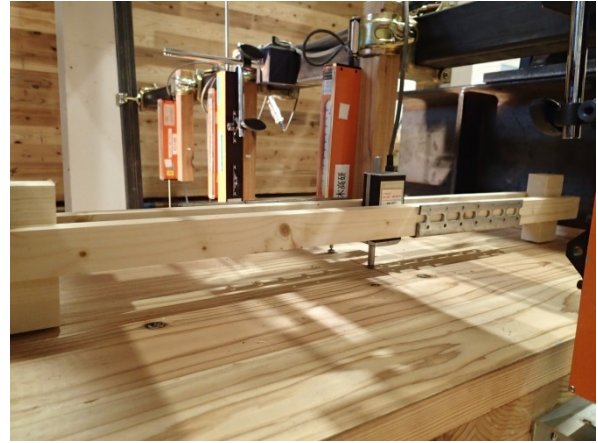


写真 3.1-5 ヨーク

### 3.1.2 結果

面外曲げ試験の結果一覧を幅の小さい順から表 3.1-1～表 3.1-5 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。

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

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

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

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

見かけの曲げヤング係数の算出に用いた荷重-変位関係を図 3.1-2 から、各試験体の破壊状況を写真 3.1-6 から順に示した。

表 3.1-1 面外曲げ試験結果（試験体幅 150mm）

試験体幅：150						
番号	密度 $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	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> )	破壊形態	含水率 (%)
A653	414	6.52	6.19	23.0	曲げ	11.3
A654	404	6.11	6.28	30.7	曲げ	9.7
A655	410	6.04	6.02	30.0	曲げ	10.3
A656	428	6.39	6.59	29.8	曲げ	11.8
A657	405	7.14	7.45	23.2	曲げ	10.2
A658	420	5.67	5.49	27.6	曲げ	10.3
平均	414	6.30	6.34	27.4		10.6
最大	428	7.09	7.45	30.7		11.8
最小	404	5.67	5.49	23.0		9.7
標準偏差	9.14	0.49	0.66	3.48		0.81
変動係数	2.2%	12.7%	7.7%	10.4%		7.6%

表 3.1-2 面外曲げ試験結果（試験体幅 300mm）

試験体幅：300						
番号	密度 $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	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> )	破壊形態	含水率 (%)
A653	415	6.37	6.66	29.8	曲げ	10.8
A654	405	6.36	6.44	21.8	曲げ	10.7
A655	450	6.19	6.71	26.2	曲げ	10.7
A656	415	6.81	7.10	24.5	曲げ	11.7
A657	411	6.25	6.35	23.4	曲げ	11.2
A658	403	6.33	6.77	30.7	曲げ	11.8
平均	417	6.38	6.67	26.1		11.1
最大	450	6.81	7.10	30.7		11.8
最小	403	6.19	6.35	21.8		10.7
標準偏差	17.1	0.22	0.27	3.5		0.51
変動係数	4.1%	3.5%	4.0%	13.6%		4.6%

表 3.1-3 面外曲げ試験結果（試験体幅 600mm）

試験体幅：600						
番号	密度 $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	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> )	破壊形態	含水率 (%)
A653	412	6.32	7.04	29.9	曲げ	10.8
A654	412	6.26	6.90	23.8	曲げ	10.7
A655	409	6.46	7.02	24.3	曲げ	10.7
A656	419	6.64	6.88	29.7	曲げ	11.7
A657	406	6.36	6.92	24.4	曲げ	11.2
A658	419	6.01	6.86	22.9	曲げ	11.8
平均	413	6.34	6.94	25.8		11.1
最大	419	6.64	7.04	29.9		11.8
最小	406	6.01	6.86	22.9		10.7
標準偏差	5.16	0.21	0.08	3.12		0.51
変動係数	1.3%	3.3%	1.1%	12.1%		4.6%

表 3.1-4 面外曲げ試験結果（試験体幅 1200mm）

試験体幅：1200						
番号	密度 $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	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> )	破壊形態	含水率 (%)
A653	415	6.47	6.91	24.1	曲げ	11.3
A654	407	6.28	6.86	19.5	曲げ	10.0
A655	407	6.44	-	25.3	曲げ	10.2
A656	417	6.21	-	27.3	曲げ	11.0
A657	415	6.49	-	27.5	曲げ	11.0
A658	406	6.28	6.86	25.8	曲げ	11.8
平均	411	6.36	6.88	24.9		10.9
最大	417	6.49	6.91	27.5		11.8
最小	406	6.21	6.86	19.5		10.0
標準偏差	5.07	0.12	0.03	2.9		0.7
変動係数	1.2%	1.9%	0.4%	11.8%		6.4%

表 3.1-5 面外曲げ試験結果（試験体幅 2400mm）

試験体幅：2400						
番号	密度 $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	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> )	破壊形態	含水率 (%)
A662	424	6.30	-	23.2	曲げ	10.5
A663	418	6.49	-	24.0	曲げ	10.5
A664	410	6.33	-	23.1	曲げ	9.7
平均	417	6.37	-	23.4		10.2
最大	424	6.49	-	24.0		10.5
最小	410	6.30	-	23.1		9.7
標準偏差	6.9	0.52	-	0.52		0.1
変動係数	1.7%	2.2%	-	1.6%		1.6%

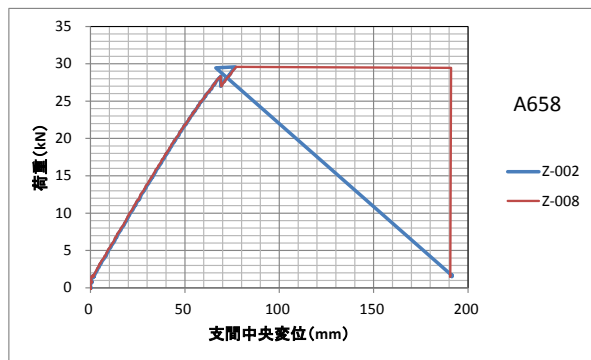
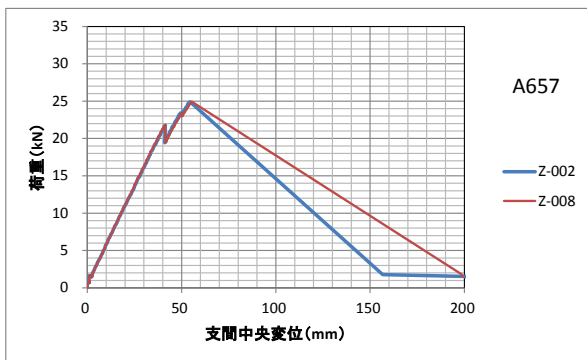
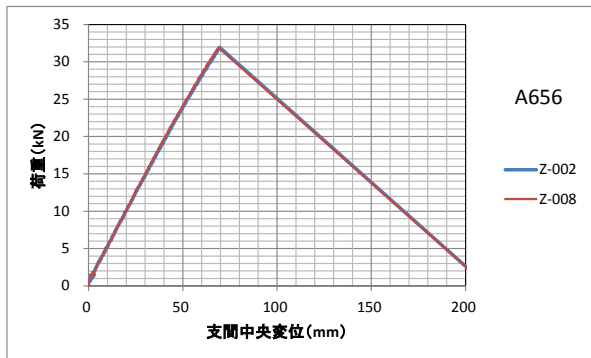
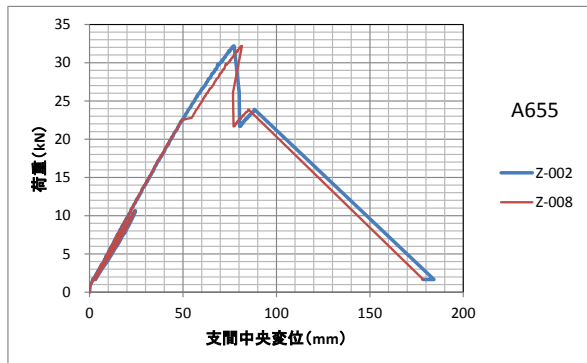
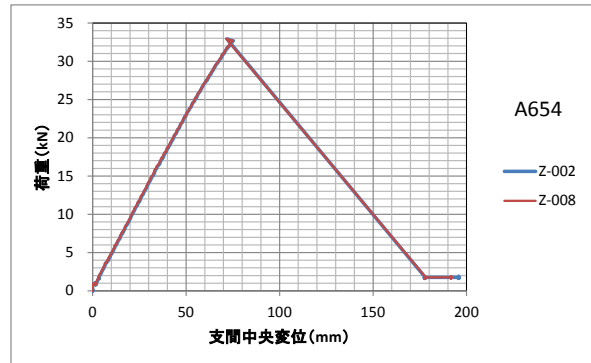
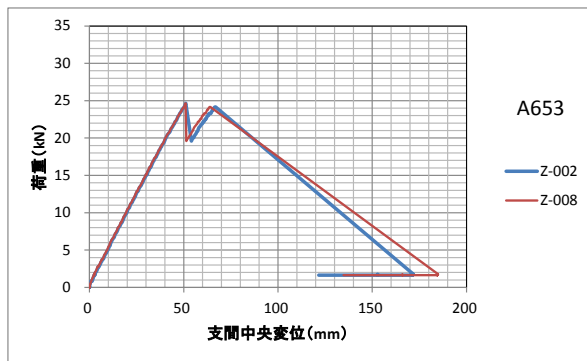


図 3.1-2 荷重-変位関係（幅 150mm）

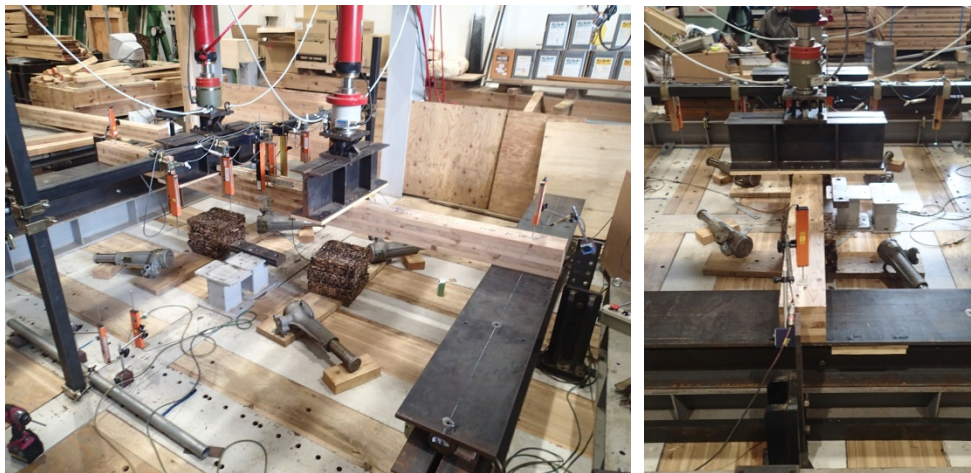


写真 3.1-6 面外曲げ試験状況 (幅 150mm)



写真 3.1-7 破壊形態 (幅 150mm、側面)



写真 3.1-8 破壊形態 (幅 150mm、下面)

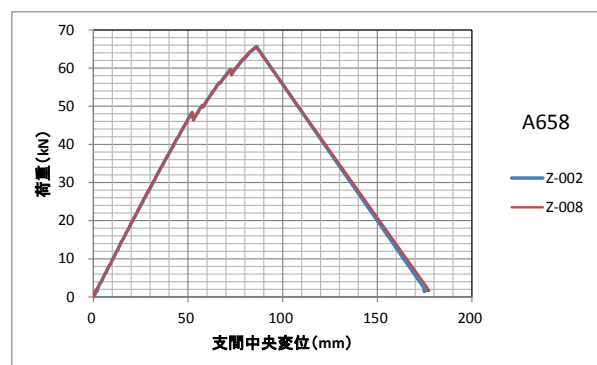
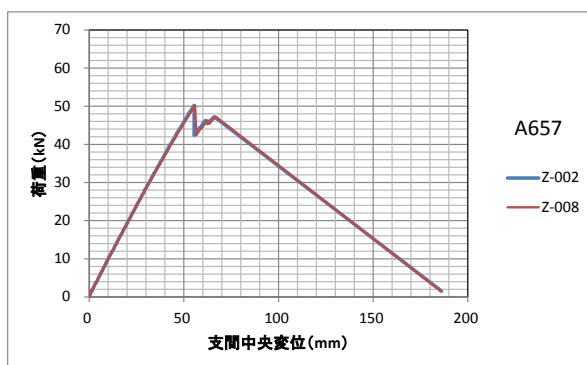
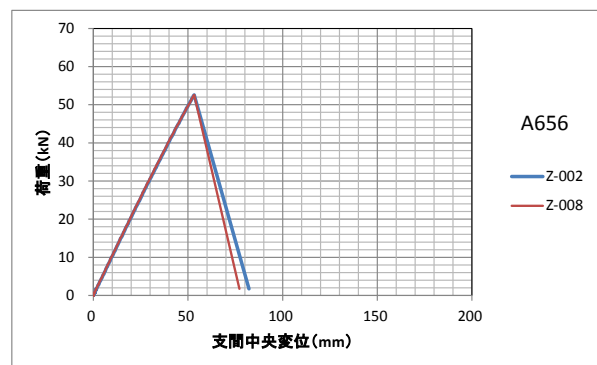
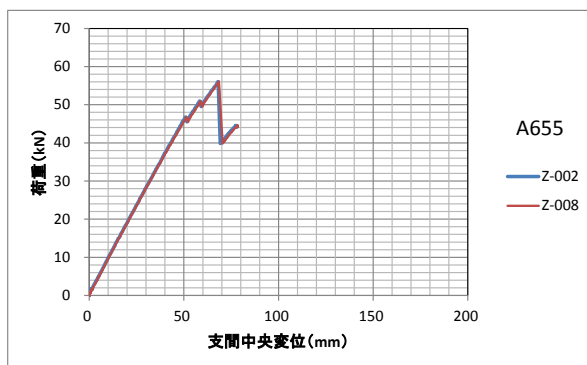
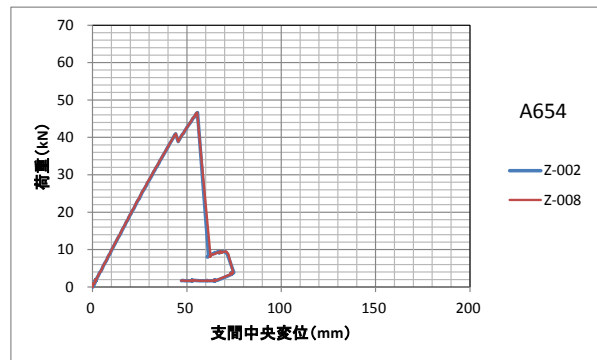
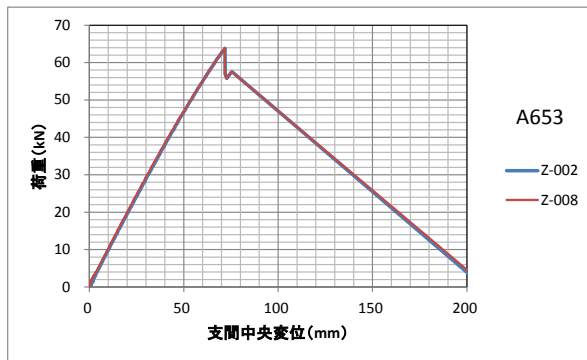


図 3.1-3 荷重-変位関係 (幅 300mm)





写真 3. 1-9 面外曲げ試験状況 (幅 300mm)



写真 3. 1-10 破壊形態 (幅 300mm、側面)



写真 3. 1-11 破壊形態 (幅 300mm、下面)

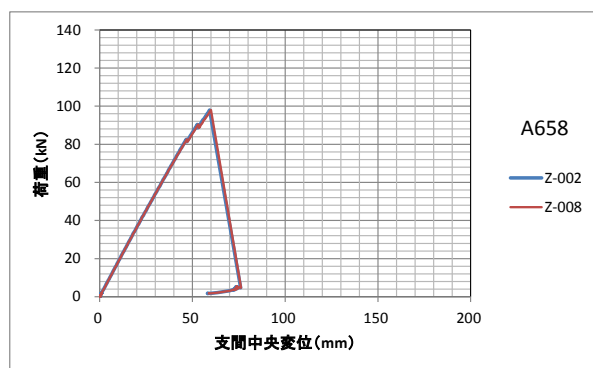
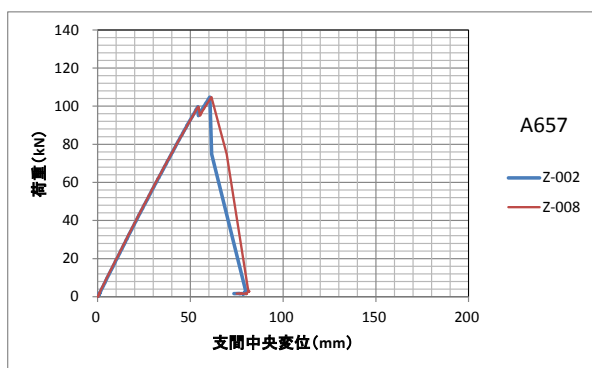
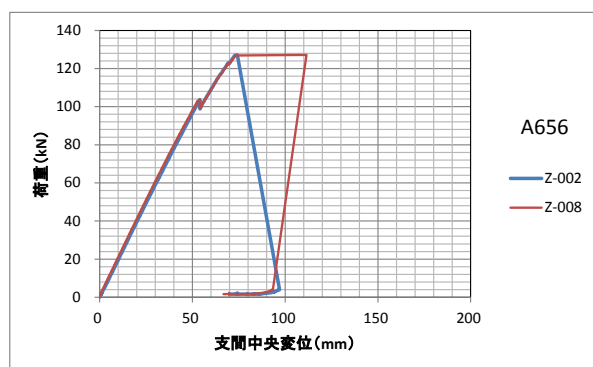
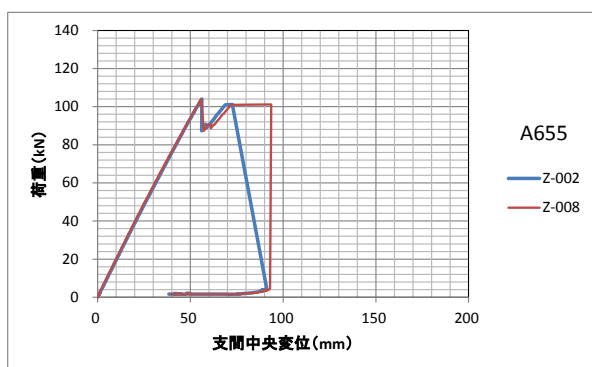
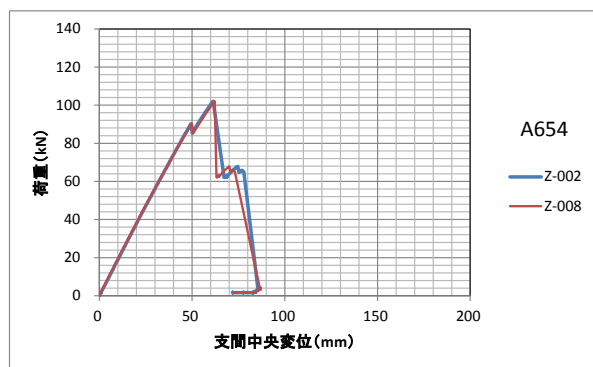
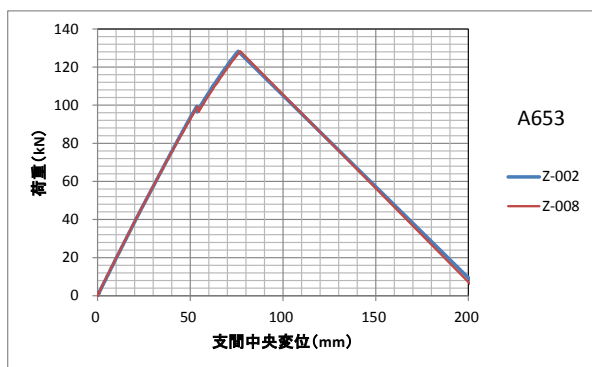


図 3.1-4 荷重-変位関係 (幅 600mm)

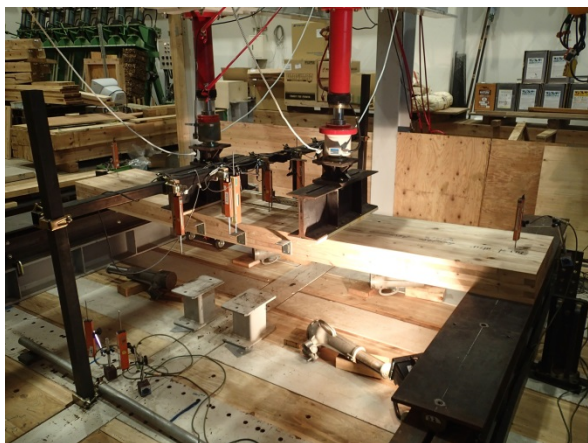


写真 3.1-12 面外曲げ試験状況 (幅 600mm)





写真 3.1-13 破壊形態（幅 600mm、側面）



写真 3.1-14 破壊形態（幅 600mm、下面）

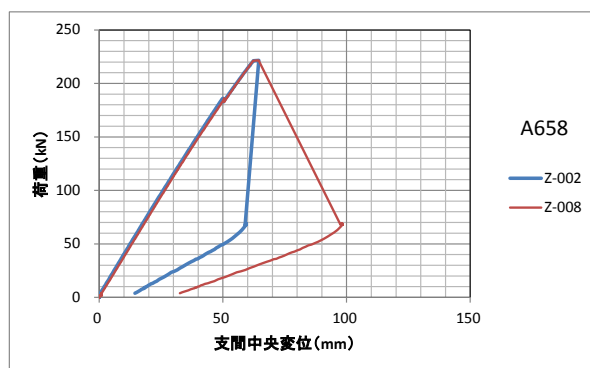
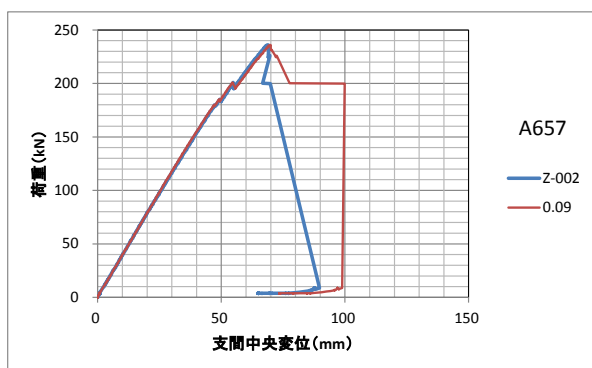
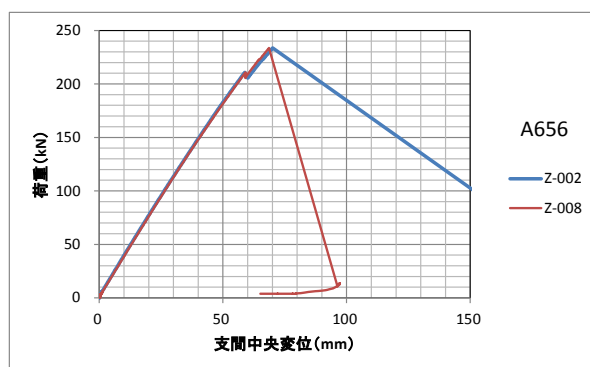
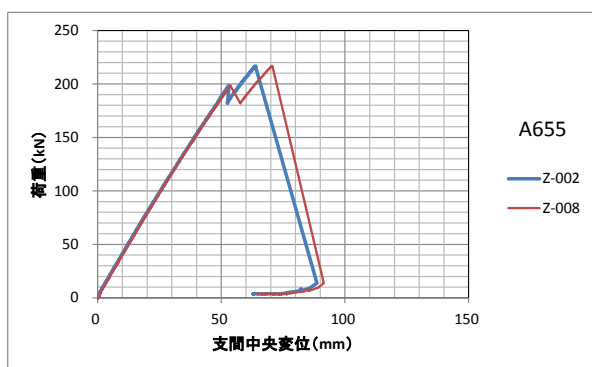
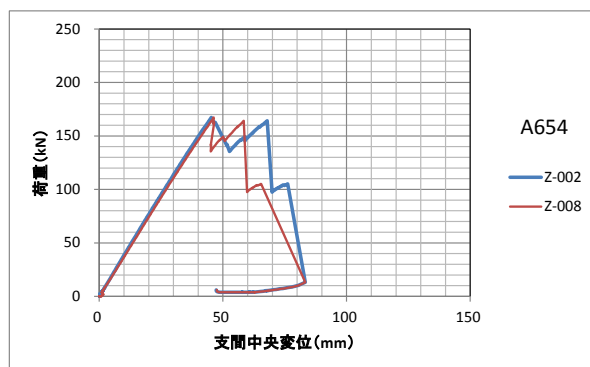
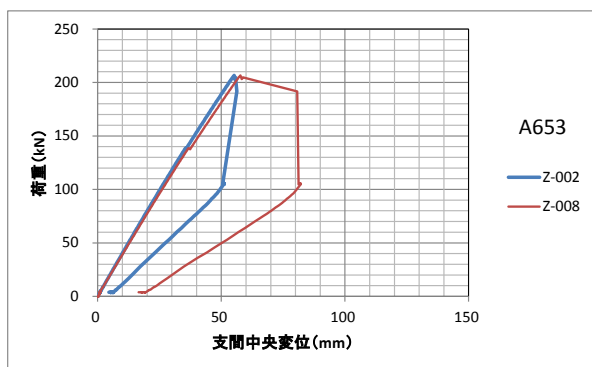


図 3.1-5 荷重-変位関係 (幅 1200mm)



写真 3.1-15 面外曲げ試験状況 (幅 1200mm)





写真 3. 1-16 破壊形態（幅 1200mm、側面）



写真 3. 1-17 破壊形態（幅 1200mm、下面）（1）



写真 3.1-18 破壊形態（幅 1200mm、下面）（2）

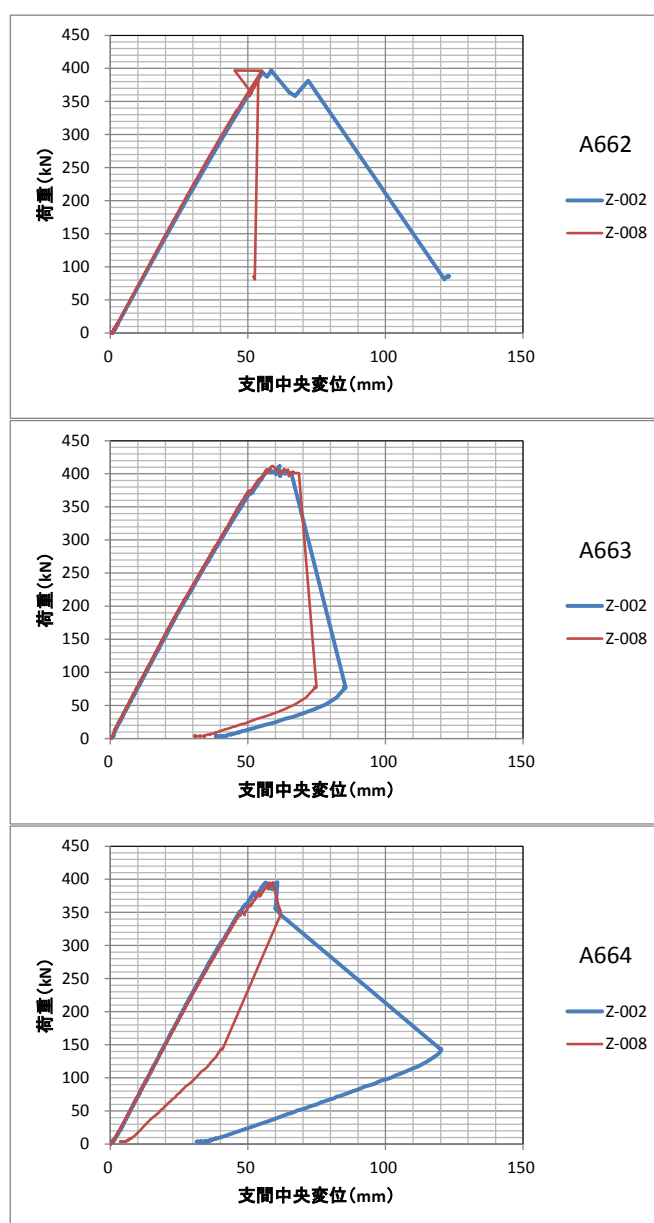


図 3.1-6 荷重-変位関係（幅 2400mm）



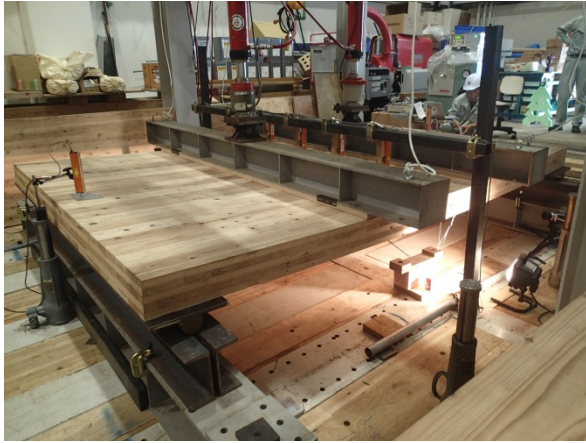


写真 3. 1-19 面外曲げ試験状況（幅 2400mm）



写真 3. 1-20 破壊形態（幅 2400mm、側面）



写真 3. 1-21 破壊形態（幅 2400mm、下面）（1）



写真 3.1-21 破壊形態（幅 2400mm、下面）（2）

### 3.1.3 考察

面外曲げ試験では、全ての試験体で曲げ破壊が先行し、せん断破壊が生じた試験体はなかった。曲げ性能に関しては、荷重点間に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 3.1-3 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 10%曲げ強度が低下することが確認された。

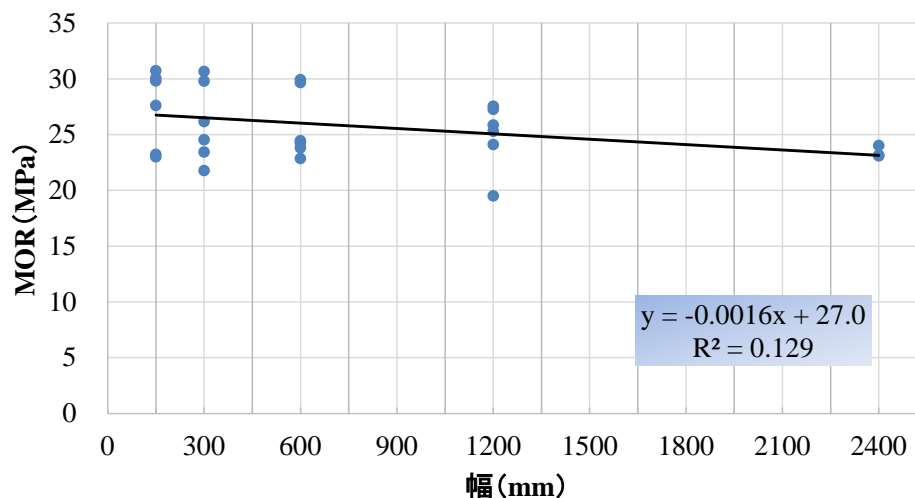


図 3.1-7 試験体幅と曲げ強度の関係

本実験では、試験体幅の異なる試験体を対象に曲げ試験を行い、曲げ強度の寸法効果の有無を確認することを目的としており、幅の広い試験体においても幅方向に均等な線荷重を作用させる必要があった。そこで、2400mm 幅の試験体を対象に支間中央において、試験体上面に並べた変位計と試験体裏面に一定間隔で貼付した 2 軸ゲージ（長さ方向と幅方向）により、試験時の載荷状態を確認した。

図 3.1-8 に示すように、支間中央における幅方向の変位分布は一定となっており、均等に線載荷されていることが確認できる。また、図 3.1-9 に示した支間中央における試験体裏面の長さ方向のひずみ分布からも試験体が均等に変形していることが確認できる。一方、幅方向のひずみは小さく幅はぎのされていない CLT の特徴が現れているといえる。

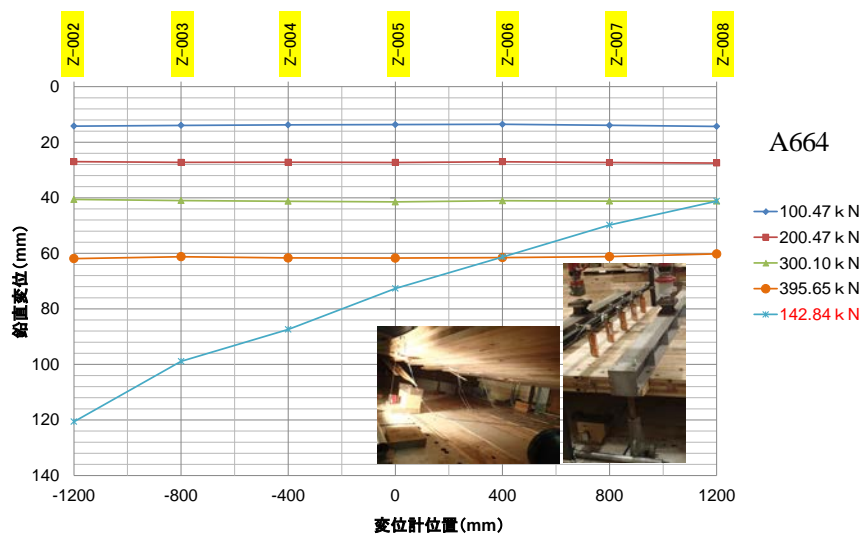


図 3.1-8 支間中央における幅方向の変位分布

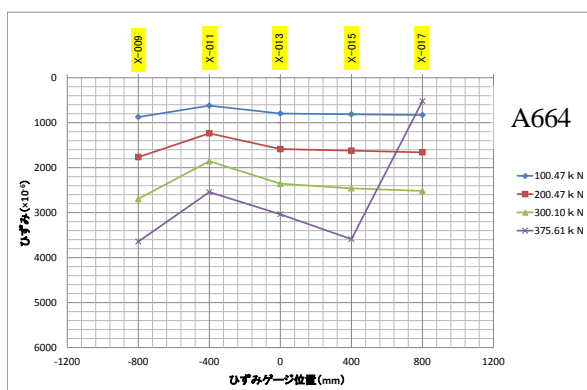


図 3.1-9 支間中央におけるひずみ分布 (x 軸)

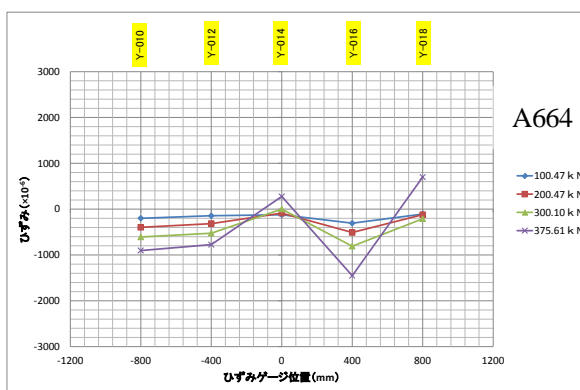


図 3.1-10 支間中央におけるひずみ分布 (y 軸)

### 3.1.4 まとめ

本実験では、5 層 5 プライのスギ CLT を対象に、JAS 規格の曲げ試験体の幅 300mm を基本として、幅 150mm～2400 mm までの 5 種類の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。

載荷梁に剛性の高い H 形鋼を用いることで、幅の広い試験体においても線載荷の状態を保っていることが確認できた。

破壊形態は全ての試験体において曲げ破壊であった。したがって、同一樹種の構成であれば本試験の載荷条件で曲げ試験を行っても問題ないと考えられる。

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 面外せん断

### 3.2.1 試験方法

面外曲げ試験には厚さ 30mm 幅 105mm のラミナを積層接着した厚さ 150mm の 5 層 5 プライのスギ CLT (強度等級 : Mx60-5-5) を用いた。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。試験体の長さは 1050mm、幅は 150mm、300mm、600mm、1200mm であり、試験体数は各 6 体とした。

面外せん断試験は、図 3.2-1 および写真 3.2-1 に示すように支間 750mm の中央に線載荷する 3 点曲げ方式で行った。なお、幅 2400mm では予想最大荷重が 1200kN 程度になり油圧ジャッキの容量 (500kN × 2) を超えるため、本実験では 150mm~1200mm 幅までを対象とした。

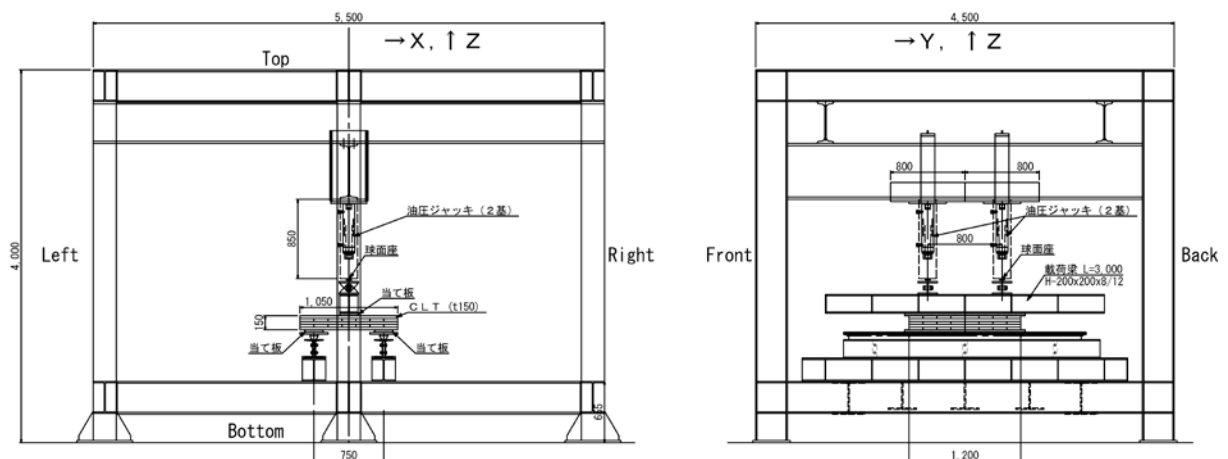


図 3.2-1 面外せん断試験方法



写真 3.2-1 面外せん断試験状況

### 3.2.2 試験結果

面外せん断試験の結果一覧を幅の小さい順から表 3.2-1~表 3.2-4 にそれぞれ示す。ここでは、試験で得られた最大荷重  $P_{\max}$  からせん断強さ  $f_s$  を(3.2-1)式より求めた。

$$f_s = \frac{3 \times P_{\max} / 2}{2bh} \quad (3.2-1)$$

ここで、 $P_{\max}$  : 最大荷重、 $b$  : 試験体の幅 (mm)、 $h$  : 試験体の高さ (mm)  
各試験体の荷重-変位関係を図 3.2-2 から、各試験体の破壊状況を写真 3.2-2 から順に示した。



表 3. 2-1 面外せん断試験結果（試験体幅 150mm）

試験体幅：150						
番号	密度 $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	最大荷重 (kN)	せん断強度 $f_s$ (N/mm <sup>2</sup> )	曲げ強度 $f_b$ (N/mm <sup>2</sup> )	破壊形態	含水率 (%)
A653-1	396	62.2	2.07	20.7	せん断＋曲げ	10.00
A654-3	397	75.8	2.53	25.3	曲げ	10.50
A655-5	410	72.9	2.43	24.3	せん断	10.00
A656-8	425	71.2	2.37	23.7	せん断	10.33
A657-9	393	65.5	2.18	21.8	せん断	10.50
A658-11	427	80.4	2.68	26.8	せん断	9.83
平均	408	71.3	2.38			10.2
最大	427	80.4	2.68			10.5
最小	393	62.2	2.07			9.8
標準偏差	15.1	6.68	0.22			0.29
変動係数	3.7%	9.4%	9.4%			2.8%

表 3. 2-2 面外せん断試験結果（試験体幅 300mm）

試験体幅：300						
番号	密度 $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	最大荷重 (kN)	せん断強度 $f_s$ (N/mm <sup>2</sup> )	曲げ強度 $f_b$ (N/mm <sup>2</sup> )	破壊形態	含水率 (%)
A653-1	404	147.9	2.46	24.6	せん断	11.8
A654-4	424	155.2	2.59	25.9	せん断	11.2
A655-6	423	141.2	2.35	23.5	せん断	11.7
A656-8	419	159.4	2.66	26.6	せん断＋曲げ	14.0
A657-10	406	130.9	2.18	21.8	せん断	14.7
A658-12	411	149.0	2.48	24.8	せん断＋曲げ	12.8
平均	414	147.2	2.45			12.7
最大	424	159.4	2.66			14.7
最小	404	130.9	2.18			11.2
標準偏差	8.66	10.2	0.17			1.4
変動係数	2.1%	6.9%	6.9%			11%

表 3. 2-3 面外せん断試験結果（試験体幅 600mm）

試験体幅：600						
番号	密度 $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	最大荷重 (kN)	せん断強度 $f_s$ (N/mm <sup>2</sup> )	曲げ強度 $f_b$ (N/mm <sup>2</sup> )	破壊形態	含水率 (%)
A654-3	419	305.4	2.54	25.4	せん断+曲げ	11.7
A654-4	412	282.0	2.35	23.5	せん断	10.3
A655-5	403	287.9	2.40	24.0	せん断	11.3
A655-6	410	275.5	2.30	23.0	せん断	11.7
A656-7	411	300.0	2.50	25.0	曲げ	11.2
A656-8	402	296.9	2.47	24.7	せん断	12.5
平均	409	291.3	2.43			11.4
最大	419	305.4	2.54			12.5
最小	402	275.5	2.3			10.3
標準偏差	6.31	11.5	0.1			0.71
変動係数	1.5%	3.9%	3.9%			6.2%

表 3. 2-4 面外せん断試験結果（試験体幅 1200mm）

試験体幅：1200						
番号	密度 $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	最大荷重 (kN)	せん断強度 $f_s$ (N/mm <sup>2</sup> )	曲げ強度 $f_b$ (N/mm <sup>2</sup> )	破壊形態	含水率 (%)
A653-1	412	563.7	2.35	23.5	せん断	9.8
A653-2	416	521.6	2.17	21.7	せん断	9.8
A654-3	409	572.1	2.38	23.8	せん断	10.7
A654-4	402	561.4	2.34	23.4	せん断	11.2
A658-11	410	580.5	2.42	24.2	せん断	11.3
A658-12	409	569.4	2.37	23.7	せん断	10.0
平均	410	561.4	2.34			10.5
最大	416	580.5	2.42			11.3
最小	402	521.6	2.17			9.8
標準偏差	4.63	20.7	0.09			0.68
変動係数	1.1%	3.7%	3.7%			6.5%

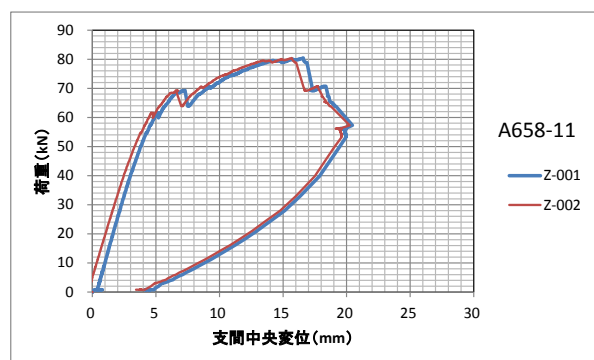
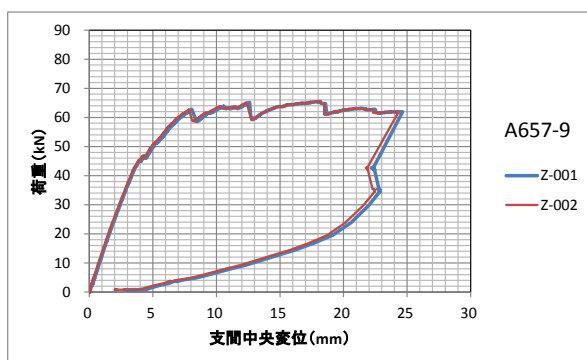
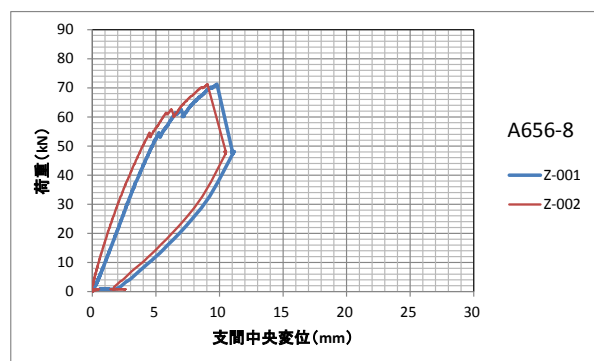
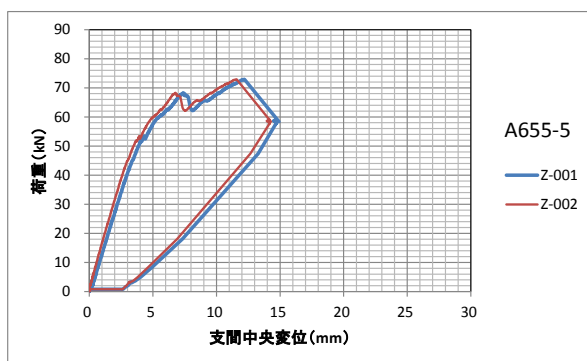
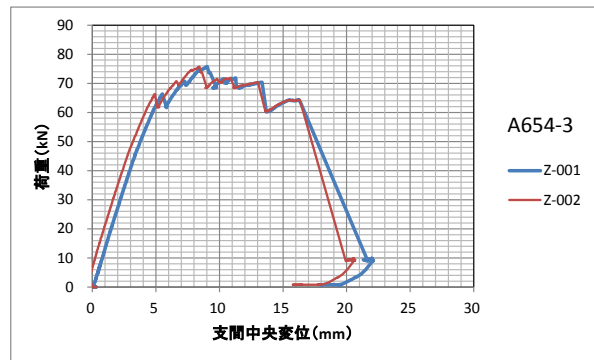
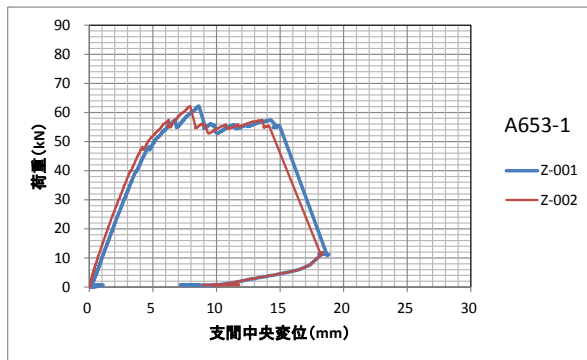


図 3.2-2 荷重-変位関係 (幅 150mm)



写真 3.2-2 破壊形態 (幅 150mm、側面)



写真 3.2-3 破壊形態 (幅 150mm、下面)

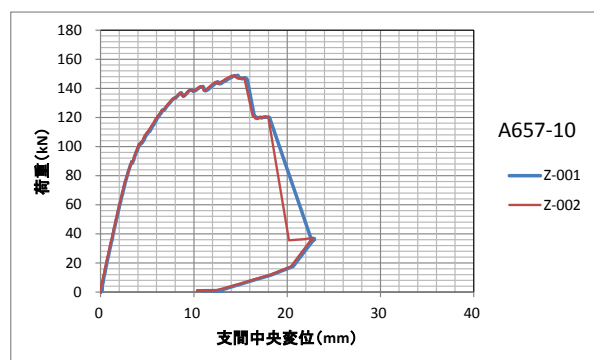
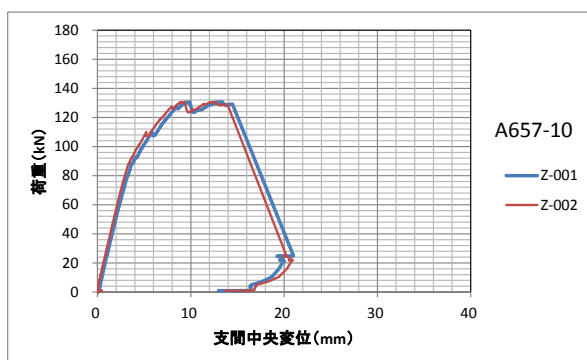
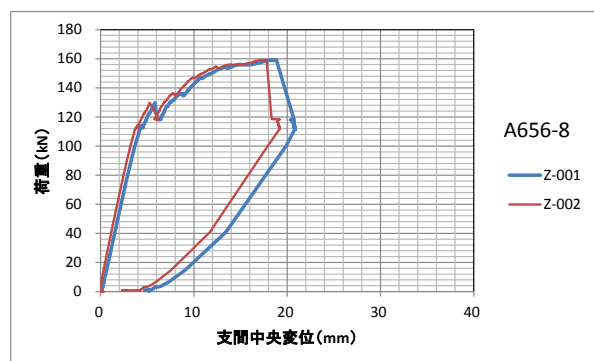
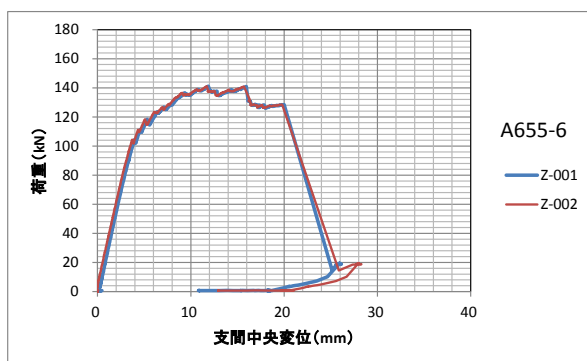
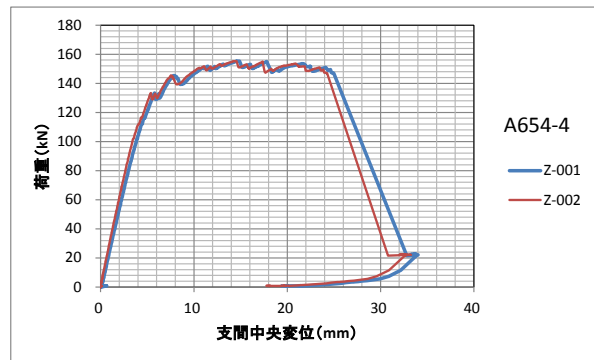
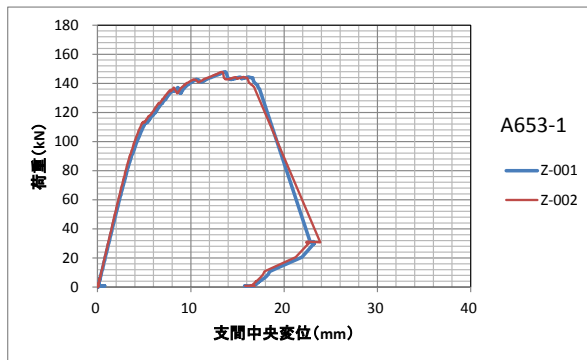


図 3.2-3 荷重-変位関係 (幅 300mm)



写真 3.2-4 破壊形態 (幅 300mm、側面)



写真 3.2-5 破壊形態 (幅 300mm、下面) (1)



写真 3. 2-6 破壊形態（幅 300mm、下面）（2）

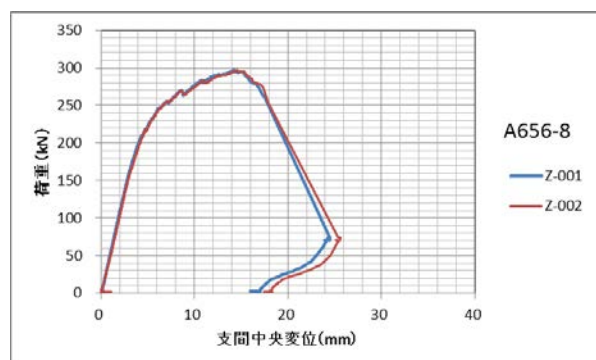
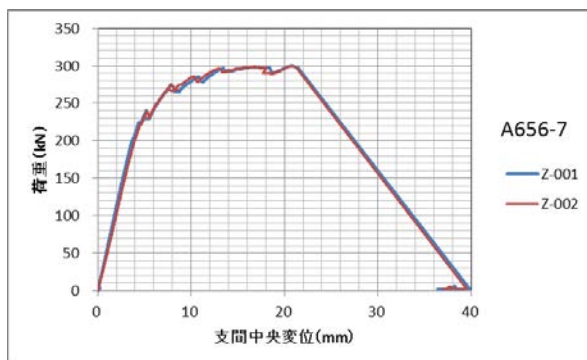
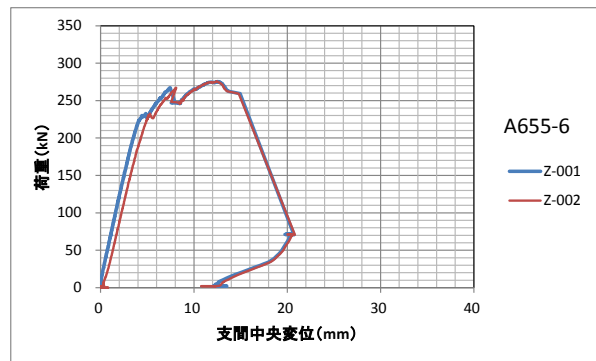
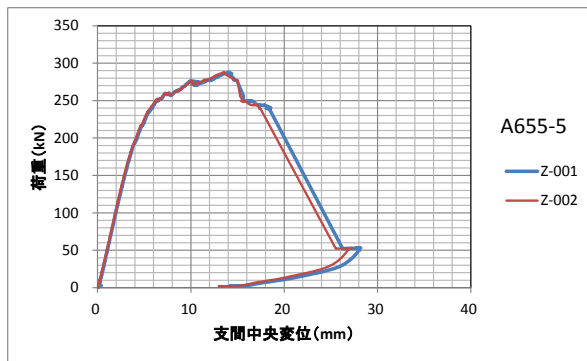
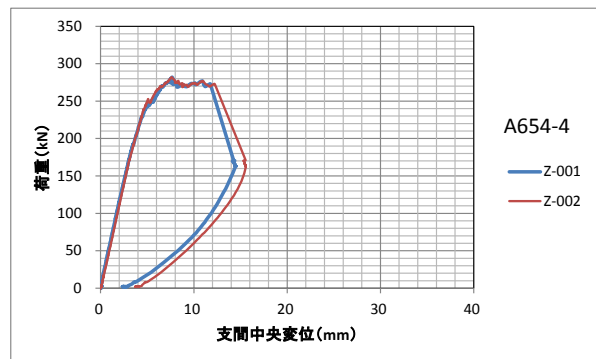
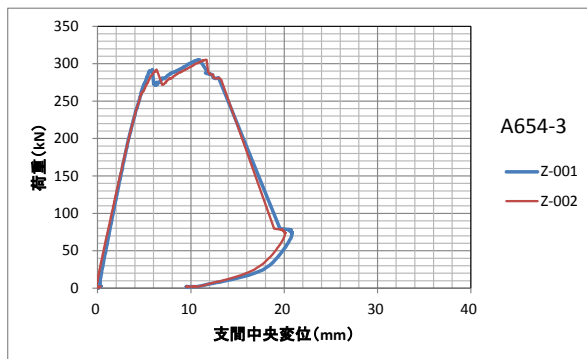


図 3. 2-4 荷重-変位関係（幅 600mm）





写真 3.2-7 破壊形態（幅 600mm、側面）



写真 3.2-8 破壊形態（幅 600mm、下面）

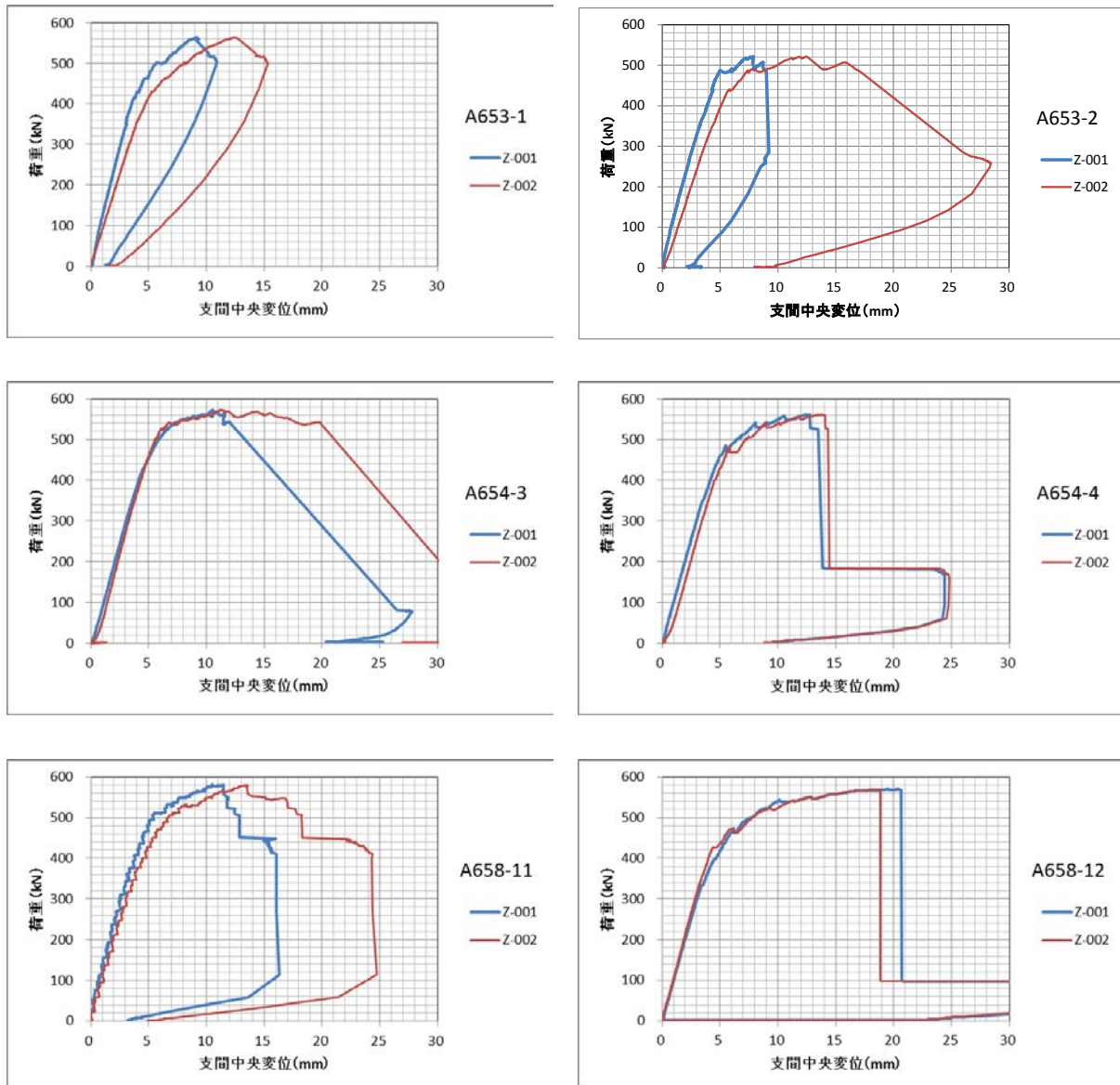


図 3.2-5 荷重-変位関係 (幅 1200mm)



写真 3.2-9 破壊形態 (幅 1200mm、側面)





写真 3.2-10 破壊形態（幅 1200mm、下面）

### 3.2.3 考察

面外せん断試験では、殆どの試験体でせん断破壊が先行したが、幅 150mm および幅 600mm の各 1 体ずつで曲げ破壊が生じた。また、せん断破壊と同時に曲げ破壊が生じているようなケースも認められた。表 3.2-1～表 3.2-4 には参考として最大荷重から求めた曲げ強度の値も示してあるが、これらの値は 3.1 の曲げ試験で得られた曲げ強度の値に近いことから、本実験の条件では曲げ破壊の可能性もあり得ると推察される。

曲げ試験と同様に、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。また、図 3.2-6 に試験体幅とせん断強度との関係を示す。同図よりせん断強度には寸法効果が認められなかった。

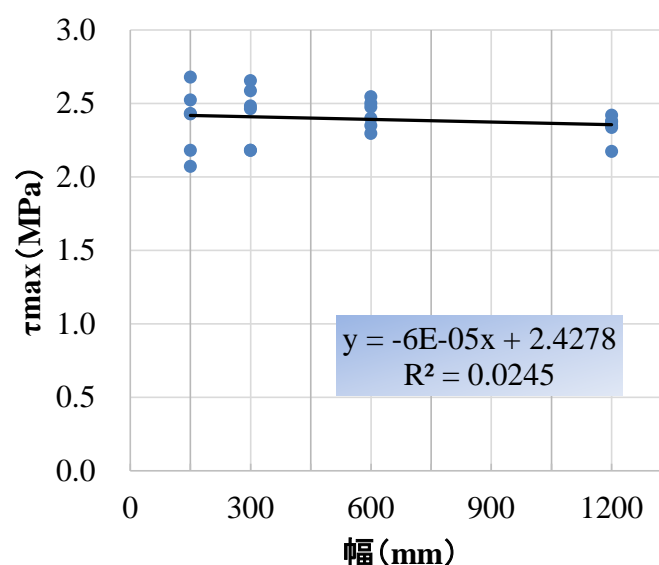


図 3. 2-6 試験体幅とせん断強度の関係

### 3.2.4 まとめ

本実験では、5 層 5 プライのスギ CLT を対象に、JAS 規格の曲げ試験体の幅 300mm を基本として、幅 150mm～1200 mm までの 4 種類の試験体の面外せん断試験を実施し、試験方法の検証および寸法効果の検討を行った。

面外せん断試験では、殆どの試験体でせん断破壊が先行したが、幅 150mm および幅 600mm の各 1 体ずつで曲げ破壊が生じた。また、せん断破壊と同時に曲げ破壊が生じているようなケースも認められた。全ての試験体を確実にせん断破壊させるためには、逆対称 4 点曲げ試験等の方法が考えられるが、これらの異なる試験方法の結果と比較して、本実験で用いた 3 点曲げ試験での評価の妥当性について検討する必要があると考えられる。

曲げ試験と同様に、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が、平均値と比較すると試験体幅によらずせん断強度は一定の値を示しており、せん断強度には明確な寸法効果は認められなかった。

### 3.3 縦引張り

#### 3.3.1 試験方法

本試験で使用した CLT の概要を表 3.3-1 に示す。CLT に使用したラミナは 4.1 項で示されるラミナ試験と同ロットで製造したものであり、外層が M60A、内層が 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を測定した。

引張り試験には、最大容量が 2000kN の横型引張り試験機を用いた。構成影響の引張り試験と同様、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、相対する 2 材面に設置した変位計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。

表 3.3-1 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	6
		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。

#### 3.3.2 試験結果

##### （1）非破壊試験

表 3.3-2 非破壊試験の結果（試験体幅 150mm）

幅 150mm		E 縦振動 (kN/mm <sup>2</sup> )
番号	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	
A659-150-1	416	4.60
A659-150-2	421	4.83
A660-150-1	415	4.43
A660-150-2	408	4.58
A661-150-1	417	4.55
A661-150-2	412	4.52
平均	415	4.59
最大	421	4.83
最小	408	4.43
標準偏差	4.76	0.136
変動係数%	1.15	2.97

表 3.3-3 非破壊試験の結果（試験体幅 300mm）

幅 300mm		E 縦振動 (kN/mm <sup>2</sup> )
番号	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	
A659-300-1	405	4.74
A659-300-2	404	4.64
A660-300-1	404	4.64
A660-300-2	413	5.05

A661-300-1	408	4.81
A661-300-2	417	4.59
平均	409	4.74
最大	417	5.05
最小	404	4.59
標準偏差	5.54	0.170
変動係数%	1.36	3.59

表 3.3-4 非破壊試験の結果（試験体幅 600mm）

幅 600mm		E 縦振動 (kN/mm <sup>2</sup> )
番号	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	
A659-600-1	417	4.68
A659-600-2	416	4.91
A660-600-1	406	4.79
A660-600-2	419	4.57
A661-600-1	403	4.69
A661-600-2	403	4.62
平均	411	4.71
最大	419	4.91
最小	403	4.57
標準偏差	7.32	0.122
変動係数%	1.78	2.58

（２）破壊試験

表 3.3-5 引張り試験の結果（試験体幅 150mm）

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 (%)
A659-150-1	4.11	7.96	11.9	10.4
A659-150-2	4.14	5.20	14.6	11.1
A660-150-1	3.85	13.2	13.3	11.2
A660-150-2	4.01	7.73	13.1	11.5
A661-150-1	3.82	10.2	11.8	10.2
A661-150-2	3.86	8.28	14.0	10.8
平均	3.97	8.76	13.1	10.9
最大	4.14	13.2	14.6	11.5
最小	3.82	5.20	11.8	10.2
標準偏差	0.140	2.69	1.09	0.495
変動係数%	3.53	30.7	8.28	4.56

表 3.3-6 引張り試験の結果（試験体幅 300mm）

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 (%)
A659-300-1	3.96	11.4	13.6	11.5
A659-300-2	4.39	10.3	13.1	10.5
A660-300-1	4.23	5.97	11.6	11.1
A660-300-2	4.94	6.75	11.6	11.1
A661-300-1	4.33	6.60	13.9	10.9
A661-300-2	4.08	12.7	12.7	11.1
平均	4.32	8.95	12.7	11.0
最大	4.94	12.7	13.9	11.5
最小	3.96	5.97	11.6	10.5
標準偏差	0.341	2.87	1.00	0.339
変動係数%	7.88	32.1	7.81	3.08

表 3.3-7 引張り試験の結果（試験体幅 600mm）

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 (%)
A659-300-1	4.42	13.2	13.3	11.0
A659-300-2	4.41	13.0	13.0	11.3
A660-300-1	4.35	9.78	13.1	10.9
A660-300-2	4.16	10.6	11.2	11.0
A661-300-1	4.37	8.16	12.4	11.0
A661-300-2	4.40	11.6	12.5	10.9
平均	4.35	11.1	12.6	11.0
最大	4.42	13.2	13.3	11.3
最小	4.16	8.16	11.2	10.9
標準偏差	0.0991	1.95	0.756	0.164
変動係数%	2.28	17.6	6.00	1.48

### 3.3.3 考察

非破壊試験の結果および引張り試験の結果を、それぞれ表 3.3-2～3.3-4 および表 3.3-5～3.3-7 に示す。また、各試験体幅の引張り試験後の破壊形態の例を写真 3.3-1～3.3-4 に示す。

試験体幅による引張り強度の比較、および実測値と等価断面法による推定値との比較を図 3.3-1 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 3.3-1 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 3.3-1 幅 150mm 試験体の破壊形態の例

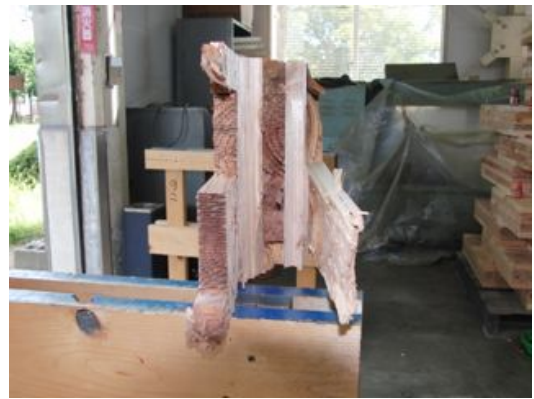


写真 3.3-2 幅 300mm 試験体の破壊形態の例

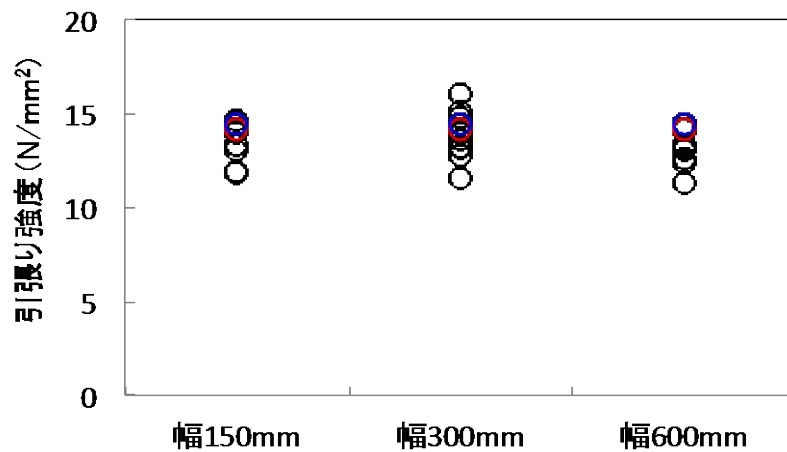


写真 3.3-3 幅 600mm 試験体の破壊形態の例



写真 3.3-4 幅 600mm 試験体の破壊形態の例

- : 実測値
- : 等価断面法による推定値(弱軸方向ラミナのヤング係数を0と仮定)
- : 等価断面法による推定値(弱軸方向ラミナのヤング係数を強軸方向の1/30と仮定)



### 3.3.4 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。

### 3.4 まとめ

試験体幅が面外曲げ、面外せん断、縦引張り強度性能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、0.052 が得られた (図 3.4-1)。なお、最大荷重時の破壊形態は全て曲げであった。
- 2) 面外せん断強度試験を、試験体幅 150mm、300mm、600mm、1200mm で行ったところ、バラツキが減少する傾向は確認されたが、平均値には変動はなかった。なお、最大荷重時の破壊形態は主としてせん断破壊であったが曲げ破壊したものもあった。
- 3) 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ではないが、平均値、バラツキともにわずかに減少する傾向は確認された。参考値までに縦引張り強度に対する試験体幅の寸法調整係数を求めると 0.028 が得られた (図 3.4-2)。

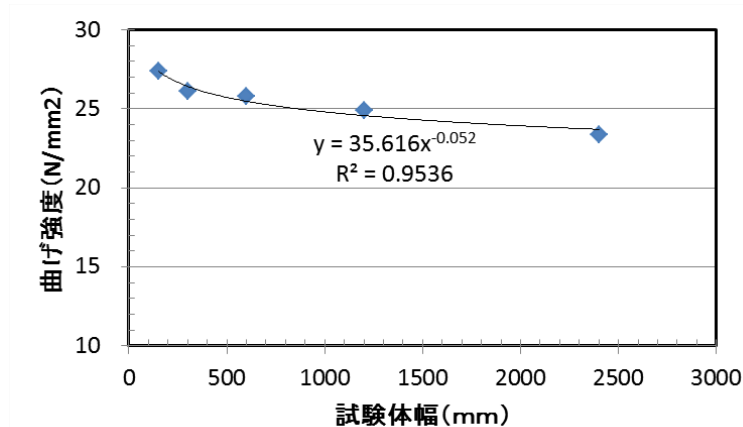


図 3.4-1 試験体幅と面外曲げ強度の関係

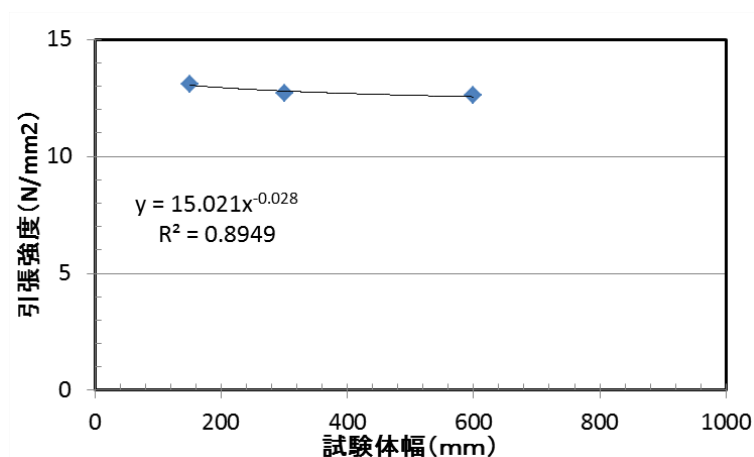


図 3.4-2 試験体幅と引張強度の関係



#### 4. ラミナ性能の把握

【目的】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。特にラミナ等級内の品質・材質変動幅とラミナの性能との関係を実験的に検証する。

##### 4.1 スギ

###### 4.1.1 試験方法

スギラミナは等級をM30A、M60Aとして選別し、試験体は中央でフィンガージョイント(以下「FJ」)加工したラミナを各30体用意した。寸法は、曲げ試験体が断面30mm×110mm、長さは690mm、縦圧縮試験体が断面30mm×110mm、材長180mm、縦引張り試験体が断面30mm×110mm、長さ1000mmとした。縦振動法によるヤング係数を測定した後、曲げ、縦圧縮、縦引張りの各種強度試験を行った(ただし、縦圧縮試験体については、材長500mm時に密度と縦振動法によるヤング係数を測定)。

曲げ試験は、直交集成板JAS規格に基づき支点間距離を材せいの21倍として3等分点4点荷重方式で載荷し、荷重及び試験体中央部のたわみ量を測定して曲げヤング係数及び曲げ強度を算出した。

縦圧縮試験は、最大荷重を測定し、断面積で除して縦圧縮強度を算出した。

縦引張り試験は、チャック間距離500mm、両端のチャックづかみをそれぞれ250mmとし、一定の変位速度下における最大荷重を測定し、縦引張り強度を算出した。試験の様子を写真4.1-1,2,3に示す。

また、試験終了後、すべての試験体について、破壊部近傍から厚さ約30mmの試験体を採取し、全乾法による含水率を測定した。

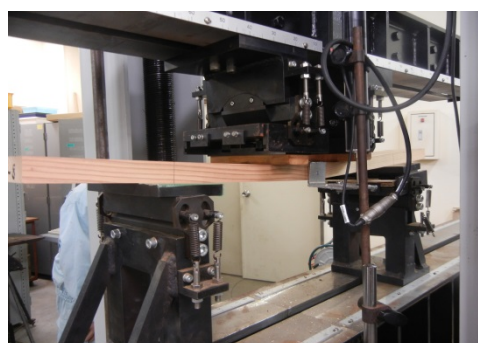


写真 4.1-1 曲げ試験の様子



写真 4.1-2 縦圧縮試験の様子



写真 4.1-3 縦引張り試験の様子

###### 4.1.2 試験結果

###### (1) 曲げ

非破壊試験及び曲げ試験結果を表 4.1-1 に示す。また、縦振動法によるヤング係数と曲げヤング係数の関係を図 4.1-1 に、曲げヤング係数と曲げ強度の関係を図 4.1-2 に示す。

表 4.1-1 スギラミナ曲げ試験結果

ラミナ種類	試験体数	項目	含水率 (%)	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	縦振動法によるヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	曲げヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	曲げ強度 (N/mm <sup>2</sup> )	曲げヤング下限値		曲げ強度下限値	
M30A	30	平均値	9.9	354	6.15	5.58	31.1	正規	4.6	正規	22.2
		最小値	9.1	279	5.34	4.70	21.3	対数	4.7	対数	23.0
		最大値	10.9	407	7.36	6.82	40.4	NPE	4.7	NPE	21.5
		変動係数 (%)	4.2	8.7	8.7	8.9	15.1	JAS	2.5	JAS	14.5
M60A	30	平均値	10.6	403	7.92	7.09	38.4	正規	5.4	正規	28.5
		最小値	9.3	347	5.92	5.45	26.2	対数	5.5	対数	29.0
		最大値	12.9	486	10.47	9.43	49.6	NPE	5.5	NPE	26.5
		変動係数 (%)	7.0	7.1	13.0	12.6	13.6	JAS	5.0	JAS	20.0

※正規：正規分布による下限値、対数：対数正規分布による下限値、NPE：ノンパラメトリック法による下限値、JAS：JAS 規格における下限値

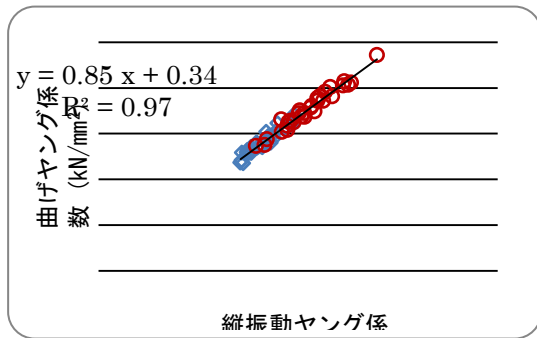


図 4.1-1 縦振動ヤング係数と曲げヤング係数

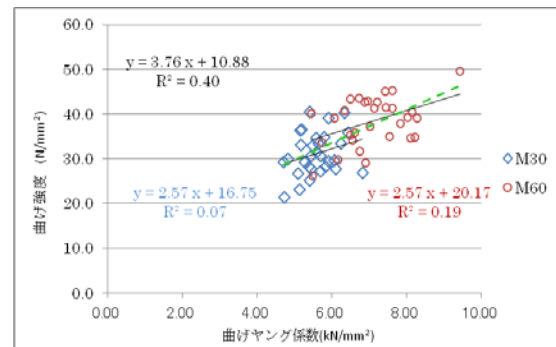


図 4.1-2 曲げヤング係数と曲げ強度

縦振動ヤング係数と曲げヤング係数との相関はきわめて強く、非破壊的手法による曲げヤング係数の測定が高精度で可能であることが確認できた。

M60A における曲げヤング係数及び曲げ強度の平均値は、M30A のそれに比べ高い値を示しており、t 検定により両等級の平均値間に有意差が認められた (p 値<0.0001)。破壊形態を観察したところ、9 割以上が FJ での破壊であった。また、M60A、M30A いずれについても、曲げヤング係数と曲げ強度の平均値及び下限値は JAS の基準値を上回っていた。

## (2) 縦圧縮

非破壊試験及び縦圧縮試験結果を表 4.1-2 に示す。また、縦振動法によるヤング係数と縦圧縮強度の関係を図 4.1-3 に示す。M60A における縦圧縮強度の平均値は、M30A のそれに比べ高い値を示しており、t 検定により両等級の平均値間に有意差が認められた (p 値<0.0001)。また、ほぼ全ての試験体が FJ 部で破壊した。

表 4.1-2 スギラミナ縦圧縮試験結果

ラミナ種類	試験体数	項目	含水率 (%)	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	縦振動法によるヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	縦圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	縦圧縮強度下限値	
M30A	30	平均値	10.1	380	5.72	26.2	正規	22.4
		最小値	9.2	300	4.48	21.2	対数	22.5
		最大値	11.4	429	7.43	29.5	NPE	21.3
		変動係数 (%)	4.4	7.6	11.7	7.7		
M60A	30	平均値	11.3	423	7.30	29.3	正規	24.5
		最小値	9.8	356	5.49	25.0	対数	24.8
		最大値	13.9	489	8.81	35.2	NPE	25.1
		変動係数 (%)	8.2	7.9	11.4	8.7		

※密度及び縦振動法によるヤング係数は材長 500mm 時における数値

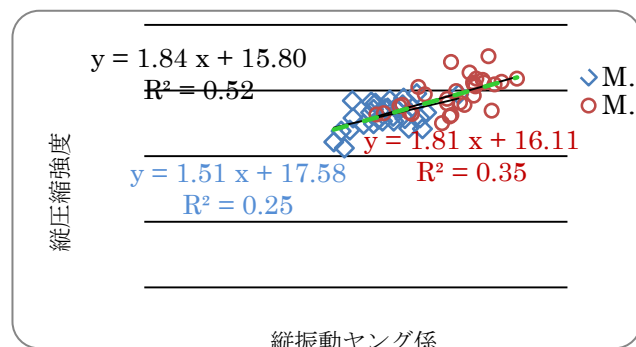


図 4.1-3 縦振動法によるヤング係数と縦圧縮強度

### (3) 縦引張り

非破壊試験及び縦引張り試験結果を表 4.1-3 に示す。また、縦振動法によるヤング係数と縦引張り強度の関係を図 4.1-4 に示す。

表 4.1-3 スギラミナ縦引張り試験結果

ラミナ種類	試験体数	項目	含水率 (%)	密度 (kg/m³)	縦振動法によるヤング係数 (kN/mm²)	縦引張り強度 (N/mm²)	引張り強度下限値	
M30A	30	平均値	9.7	368	5.93	19.2	正規	12.7
		最小値	9.1	323	3.96	12.2	対数	13.2
		最大値	10.5	410	7.14	26.2	NPE	12.6
		変動係数 (%)	3.6	5.8	9.7	17.8	JAS	8.5
M60A	30	平均値	10.5	408	7.14	25.0	正規	16.4
		最小値	9.4	357	4.42	13.1	対数	17.0
		最大値	13.1	487	8.87	34.4	NPE	13.6
		変動係数 (%)	7.4	8.4	16.1	18.1	JAS	12.0

M60A における縦引張り強度の平均値は、M30A のそれに比べて高い値を示しており、t 検定により両等級の平均値間に有意差が認められた (p 値<0.0001)。破壊形態を観察すると、FJ による破壊が約 6 割、節による破壊が 3 割であった。また、いずれの縦引張り強度の平均値及び下限値も JAS の基準値を上回っていた。縦引張り強度においては、曲げ強度や縦圧縮強度に比べ変動係数が高い値を示した。

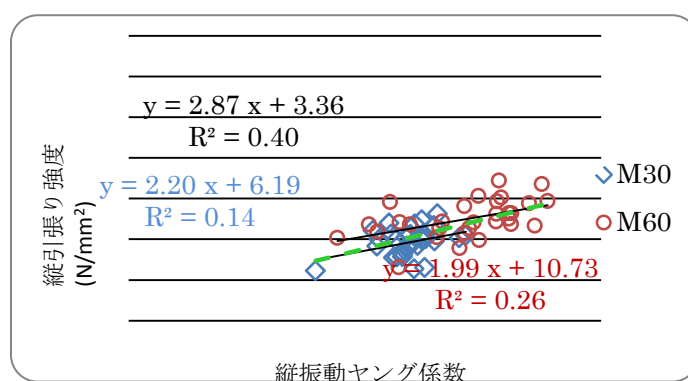


図 4.1-4 縦振動法によるヤング係数と縦引張り強度

### 4.1.3 まとめ

曲げ、縦圧縮、縦引張りの各種強度について、いずれの場合も M60A と M30A の平均値間に有意差が認められた。



## 4.2 カラマツ

### 4.2.1 試験方法

北海道産カラマツラミナのヤング係数分布を把握するために、北海道内の製材工場で製材、人工乾燥されたカラマツラミナ 4304 枚のヤング係数を測定した。ラミナの内訳は、H26 CLT 短期の強度試験用 CLT を製造するためのラミナ 2812 枚、H25 補正 CLT 短期のフィンガージョイント (FJ) ラミナを製造するためのラミナ 1492 枚である。ラミナの寸法は  $37 \times 119 \times 4000\text{mm}$  である。CLT 製造用ラミナは、集成材工場においてグレーディングマシンにより曲げヤング係数を測定した。FJ ラミナ製造用のラミナは、林産試験場において打撃音法により動的ヤング係数を測定した。

次に、得られたラミナのヤング係数分布に基づき、ヤング係数のグループ区分を、①全体、②平均値以上、③平均値以下とし、各グループ 200 枚を抽出した。その際、グループ内におけるラミナ等級の枚数割合は、全ラミナの相対度数分布と等しくなるよう配慮した。

グループ内のラミナをランダムに組み合わせ、集成材工場にてフィンガージョイント加工し、曲げ、引張、縦圧縮の各試験体を作製した。試験体の断面寸法は  $30 \times 110\text{mm}$ 、材長は、曲げ 750mm、引張 2400mm、縦圧縮 180mm とし、材長方向の中央にフィンガージョイントが位置するよう配慮した。試験体数は、曲げ 321 体 (①104、②108、③109)、引張 321 体 (①104、②108、③109)、縦圧縮 150 体 (①50、②50、③50) である。

#### 【曲げ試験】

試験は「集成材の日本農林規格」の曲げ C 試験に準拠して行った。試験にはインストロン型強度試験機 (ORIENTEC 製 RTD-2410、曲げ試験容量 50kN) を用い、スパンは試験体の厚さの 21 倍である 630mm、荷重点間の距離は厚さの 7 倍である 210mm とした 2 点荷重方式で行った。荷重は、容量 100kN のロードセルを用いて計測した。スパン中央たわみは、分解能 1/100mm、測定範囲 50mm のレーザー変位センサを用いて、試験体下面の変位を計測した。加力速度は 3.5mm/分とした。試験時間 (荷重開始～最大荷重までの時間) は 2.4～4.8 分の範囲であった。曲げ試験の様子を図 4.2.1-1 に示す。

#### 【引張試験】

試験は「集成材の日本農林規格」の引張試験に準拠して行った。加力は、実大引張試験機 (容量 100tf、油圧式チャック) を用いて行い、荷重は容量 50tf のロードセルを用いて計測した。試験体の両端のグリップ部分の長さを 800mm、スパンを 800mm とした。試験時間 (荷重開始～最大荷重までの時間) は 3 分以上とした。引張試験の様子を図 4.2.1-2 に示す。

#### 【縦圧縮試験】

試験は油圧式強度試験機 (東京衡機製造所製、容量 1000kN) を用いて行った。変形量の計測は、試験体上面に設置した加力板下面の 2 箇所でストローク 25mm のひずみゲージ式変位変換器を用いて行い、2 点の平均値を変形量とした。加力速度は 1mm/分とした。試験時間 (荷重開始～最大荷重までの時間) は 1.5～3.1 分の範囲であった。縦圧縮試験の様子を図 4.2.1-3 に示す。

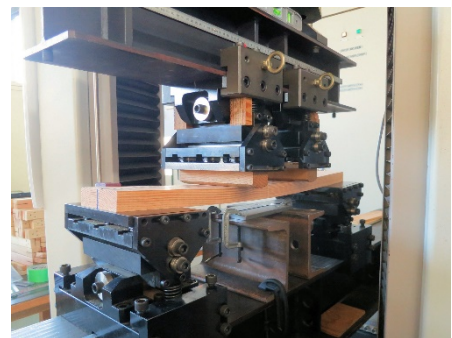


図 4.2.1-1 曲げ試験の様子

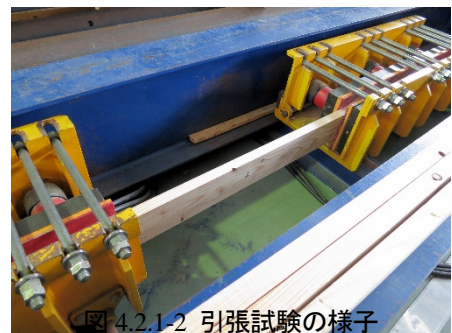


図 4.2.1-2 引張試験の様子



図 4.2.1-3 縦圧縮試験の様子

#### 4.2.2 試験結果

北海道産カラマツラミナ 4304 枚のヤング係数測定結果を表 4.2.2-1 に示す。

CLT 製造用のラミナ 2812 枚はグレーディングマシンによる曲げヤング係数であり、FJ ラミナ製造用のラミナ 1492 枚は打撃音法による動的ヤング係数であることから、後者の値は 0.93 倍した後集計した。密度は打撃音法によるラミナのみ測定した。全ラミナの相対度数分布を図 4.2.2-1 に示す。

表 4.2.2-1 全ラミナのヤング係数

	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
試験体数	1492	4304
平均	542	9.4
最大	729	18.6
最小	365	4.5
標準偏差	71	2.4
変動係数	13.4%	25.5%

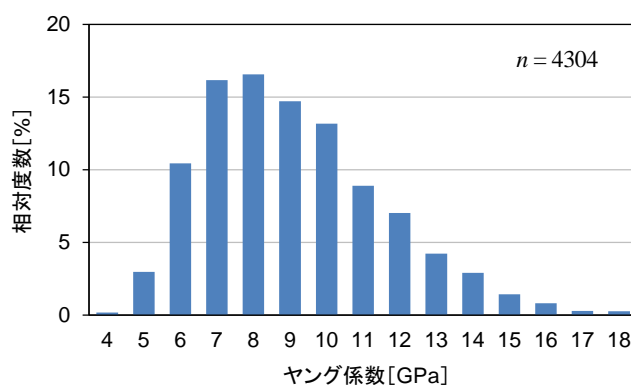


図 4.2.2-1 全ラミナのヤング係数の相対度数分布

ラミナのヤング係数平均値は 9.4 kN/mm<sup>2</sup> となった。事前の調査で、集成材工場のグレーディングマシンによる評価値がやや低め（安全側）である傾向がみられたことなどから、ヤング係数のグループ区分のしきい値を 10GPa として、グループ区分を、①全体（6GPa 以上～16GPa 未満）、②10GPa 以上～16GPa 未満、③6GPa 以上～10GPa 未満とした。

グループ内におけるラミナ等級の枚数割合は、全ラミナの相対度数分布と等しくなるよう配慮して、上記の区分のとおり各グループ 200 枚を抽出した。各グループのヤング係数、密度を表 4.2.2-2 に示す。

表 4.2.2-2 各グループのヤング係数と密度

		グループ		
		①全体	②E10 以上	③E10 未満
試験体数		200	200	200
密度 (kg/m <sup>3</sup> )	平均	503	538	466
	最大	729	693	644
	最小	392	424	365
	標準偏差	70	57	46
	変動係数	14.0%	10.6%	9.8%
ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	平均	9.8	11.9	8.4
	最大	15.7	15.9	9.9
	最小	6.0	10.0	6.1
	標準偏差	2.1	1.5	1.0
	変動係数	21.9%	12.3%	12.1%

グループ内のラミナをランダムに組み合わせ、集成材工場にてフィンガージョイントし製造した試験体の、曲げ、引張、縦圧縮の各試験結果をそれぞれ表 4.2.2-3、表 4.2.2-4、表 4.2.2-5 に示す。いずれの試験も、破壊形態を観察し、節や目切れなどの欠点が破壊要因となっている試験体についてはデータの集計から除外した。

表 4.2.2-3 カラマツ FJ ラミナの曲げ試験結果

		グループ		
		①全体	②E10 以上	③E10 未満
試験体数		57	72	66
密度 (kg/m <sup>3</sup> )	平均	522	536	472
	最大	660	618	552
	最小	406	464	391
	標準偏差	49	36	34
	変動係数	9.4%	6.7%	7.3%
曲げ ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	平均	10.6	12.5	9.0
	最大	13.9	15.8	12.7
	最小	7.6	9.5	6.8
	標準偏差	1.4	1.3	1.0
	変動係数	13.5%	10.7%	10.8%
曲げ強さ (N/mm <sup>2</sup> )	平均	47.1	54.8	40.8
	最大	70.4	69.7	53.1
	最小	30.5	38.6	28.8
	標準偏差	8.3	7.1	5.6
	変動係数	17.7%	12.9%	13.7%
含水率 (%)	平均	11.0	11.2	10.4
	最大	12.3	12.7	11.8
	最小	9.2	9.4	7.9
	標準偏差	0.7	0.6	0.8
	変動係数	6.6%	5.7%	7.4%



表 4.2.2-4 カラマツ FJ ラミナの引張試験結果

		グループ		
		①全体	②E10 以上	③E10 未満
試験体数		37	47	27
密度 (kg/m <sup>3</sup> )	平均	519	556	465
	最大	634	614	520
	最小	445	473	427
	標準偏差	46	34	22
	変動係数	8.9%	6.0%	4.8%
引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	平均	29.9	37.2	24.4
	最大	47.8	60.9	32.5
	最小	15.8	21.1	16.1
	標準偏差	8.4	7.3	3.9
	変動係数	28.1%	19.7%	16.0%
含水率 (%)	平均	11.4	11.5	10.4
	最大	12.7	13.1	11.8
	最小	9.3	9.8	8.4
	標準偏差	0.8	0.8	1.0
	変動係数	6.8%	6.7%	9.3%

表 4.2.2-5 カラマツ FJ ラミナの縦圧縮試験結果

		グループ		
		①全体	②E10 以上	③E10 未満
試験体数		42	48	46
密度 (kg/m <sup>3</sup> )	平均	517	546	474
	最大	623	644	556
	最小	410	467	400
	標準偏差	43	42	32
	変動係数	8.3%	7.6%	6.7%
縦圧縮強さ (N/mm <sup>2</sup> )	平均	44.3	50.8	42.8
	最大	58.1	67.0	53.2
	最小	32.6	41.0	34.8
	標準偏差	5.1	4.7	4.4
	変動係数	11.6%	9.3%	10.2%
含水率 (%)	平均	10.1	10.4	9.9
	最大	11.3	11.4	10.9
	最小	8.0	9.4	8.9
	標準偏差	0.8	0.5	0.5
	変動係数	8.0%	4.6%	5.2%

#### 4.2.3 まとめ

各強度試験結果のまとめを表 4.2.3-1 に示す。北海道産カラマツについて、区分した等級グループごとの各強度性能分布を把握することができた。

表 4.2.3-1 各強度試験結果のまとめ

		グループ		
		①全体	②E10 以上	③E10 未満
曲げヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	平均	10.6	12.5	9.0
	変動係数	13.5%	10.7%	10.8%
曲げ強さ (N/mm <sup>2</sup> )	平均	47.1	54.8	40.8
	変動係数	17.7%	12.9%	13.7%
引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	平均	29.9	37.2	24.4
	変動係数	28.1%	19.7%	16.0%
縦圧縮強さ (N/mm <sup>2</sup> )	平均	44.3	50.8	42.8
	変動係数	11.6%	9.3%	10.2%

### 4.3 まとめ

強度試験結果、各強度の数値における上位に対する下位の比、また、曲げ強度に対する圧縮あるいは引張り強度の比について、表 4.3-1 にスギラミナ、表 4.3-2 にカラマツラミナの結果を示す。

上位等級と下位等級に区分することによる影響が大きいのは、スギの場合、引張り強度＞縦弾性係数＝曲げ強度＞圧縮強度＝密度であった。また、カラマツの場合、引張り強度＞縦弾性係数＞曲げ強度＞圧縮強度＞密度であった。影響を受ける傾向はスギとカラマツではほぼ同じであるが、影響の大きさはカラマツの方がスギより大きく受ける傾向であった。

曲げ強度に対する圧縮強度の比は、スギが 0.75～0.84 であるのに対してカラマツは 0.93～1.04 と 1 に近く、樹種により異なることがわかった。ただし、樹種によらず上位等級の方が下位等級より小さい傾向にあった。

曲げ強度に対する引張り強度の比は、スギで 0.62～0.65、カラマツで 0.60～0.68 であり区分による影響は樹種によらず圧縮強度より大きかった。また、圧縮強度の傾向と異なり下位等級の方が上位等級より大きく影響を受ける傾向にあった。

表 4.3-1 スギ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 (N/mm <sup>2</sup> )	圧縮 (N/mm <sup>2</sup> )	引張り (N/mm <sup>2</sup> )
上位 M60	405	7.53	38.4 (13.6%)	29.3 (8.7%)	25.0 (18.1%)
下位 M30	361	6.04	31.1 (15.1%)	26.2 (7.7%)	19.2 (17.8%)
下位/上位	0.89	0.80	0.81	0.89	0.77
曲げに対する比：上位等級				0.76	0.65
曲げに対する比：下位等級				0.84	0.62

※曲げ試験体と引張り試験体各 30 体の平均値

表 4.3-2 カラマツラミナの強度試験結果

	区分 (kN/mm <sup>2</sup> )	密度※ (kg/m <sup>3</sup> )	縦弾性係数※ (kN/mm <sup>2</sup> )	曲げ (N/mm <sup>2</sup> )	圧縮 (N/mm <sup>2</sup> )	引張り (N/mm <sup>2</sup> )
全体	なし	503	9.8	47.1 (17.7%)	44.3 (11.6%)	29.9 (28.1%)
上位区分	10 以上	538	11.9	54.8 (12.9%)	50.8 ( 9.3%)	37.2 (19.7%)
下位区分	10 未満	466	8.4	40.8 (13.7%)	42.8 (10.2%)	24.4 (16.0%)
下位/上位		0.87	0.71	0.75	0.84	0.66
曲げに対する比：上位等級					0.93	0.68
曲げに対する比：下位等級					1.05	0.60

## 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以下の 3 点について解明することを目的として、各種強度試験を行ってデータ蓄積を行った。

- ① 層構成が CLT の強度性能に与える影響
- ② 試験体寸法が CLT の強度性能に与える影響
- ③ CLT 製造用ラミナの強度性能に等級区分が与える影響

以下に得られた結果を項目別に述べる。

### ①層構成が CLT の強度性能に与える影響

外層用にスギ M60、内層用にスギ M30 のラミナを用いた強度等級 Mx60 の仕様で、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）を層構成別に示す。面内せん断強度を除いて、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。

これらの強度値のうち面外曲げ、面内曲げ、圧縮（短柱）、縦引張りについて、ラミナの強度値から推定を試みた。

#### 1) 面外曲げ

曲げヤング係数の推定をせん断解析法で行った結果、強軸・弱軸ともに実験値が若干推定値より大きく安全側での推定が可能であった。曲げ強度の推定を機械的接合梁理論で行った結果、強軸は安全側の推定となったが、弱軸は危険側の推定であった。

#### 2) 面内曲げ

曲げヤング係数の推定を等価断面法で行った結果、強軸はいずれも実験値が若干推定値より大きく安全側で推定できたが、弱軸については 5 層 5 プライよりプライ数が多い場合に危険側の推定となった。曲げ強度の推定を等価断面法で行った結果、強軸はいずれ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。強軸の推定精度向上の確認のためには、ラミナの縦使いの曲げ強度の確認や寸法効果を導入する必要があることが示唆された。

#### 3) 圧縮（短柱）

圧縮ヤング係数の推定を等価断面法で行った結果、強軸はいずれも実験値が推定値より大きく安全側で推定できたが、弱軸については 5 層 5 プライと 5 層 7 プライで危険側の推定となった。圧縮強度の推定を等価断面法で行った結果、弱軸の 7 層 7 プライを除いていずれも安全側の推定となった。

#### 4) 縦引張り

引張りヤング係数の推定を等価断面法で行った結果、強軸はいずれも実験値が推定値より大きく安全側で推定できたが、弱軸については 5 層 5 プライが危険側の推定となった。引張り強度の推定を等価断面法で行った結果、いずれも推定値が実験値を下回るかほぼ同じで危険側の推定となった。

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お通りである。

### 5) 中間柱・長柱に対する座屈性能

見かけ断面の断面二次モーメントと見かけの曲げヤング係数、有効断面積と有効断面二次モーメントから求めた細長比による国交省告示 1024 号に示される座屈に関する計算式に直交集成板の日本農林規格に示される製品の曲げヤング係数の下限値を代入して得られる推定値が試験結果と適合し安全側となる可能性が示唆された。

### 6) 面外せん断及び面内せん断

面外せん断強度は層構成の影響を受ける一方、面内せん断強度は 3 層 3 プライ、3 層 4 プライ、5

層 5 プライの間では層構成の影響を受けないことがわかった。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。

表 5-1 層構成毎の強軸方向の各種強度性能（平均値） 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	34.9		25.4	30.8	21.3	20.2
面外せん断	2.97	2.18	2.27	2.59	1.98	1.81
面内曲げ	23.0	16.5	19.8	21.4	16.1	
短柱圧縮	23.7	17.6	19.6	23.7	18.8	17.9
縦引張り	16.8	12.0	14.3			
面内せん断	2.94	2.95	2.93			

表 5-2 層構成毎の強軸方向の各種強度性能（平均値） 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	5.8				10.2	10.9
面外せん断	(0.87)	(1.50)	1.23	0.86	1.39	1.61
面内曲げ	10.8	13.6	11.7	8.6	12.8	
短柱圧縮	11.0	15.3	12.4	9.70	13.5	14.0
縦引張り	6.66	10.1	8.33			

## 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、面外せん断、縦引張り強度性能に与える影響を実験的に確認し、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。面外曲げ強度に対する試験体幅の寸法調整係数として 0.052 が得られた。
- 2) 面外せん断強度は、試験体幅の増加にともないバラツキが減少する傾向は確認されたが、平均値には変動はなかった。
- 3) 縦引張り強度は、試験体幅の増加にともない統計的な有意差はないものの平均値、バラツキともにわずかに減少する傾向が確認された。参考値ながら縦引張り強度に対する試験体幅の寸法調整係数として 0.028 が得られた。

## ③ CLT 製造用ラミナの強度性能に等級区分が与える影響

スギもカラマツも上位等級と下位等級に区分することにより上位等級の強度性能は下位等級のそれより大きくなることが確認された。その差の比率は、スギの場合は引張り強度＞縦弾性係数＝曲げ強度＞圧縮強度＝密度、カラマツの場合は引張り強度＞縦弾性係数＞曲げ強度＞圧縮強度＞密度であった。影響の大きさはカラマツの方がスギより大きく受ける傾向であった。

曲げ強度に対する圧縮強度の比は、スギが 0.75～0.84 であるのに対してカラマツは 0.93～1.04 と 1 に近く、樹種により異なることがわかった。ただし、比の数値は樹種によらず上位等級の方が下位等級より小さい傾向にあった。

曲げ強度に対する引張り強度の比は、スギで 0.62～0.65、カラマツで 0.60～0.68 であり区分による影響は樹種によらず圧縮強度より大きかった。また、圧縮強度の傾向と異なり下位等級の方が上位等級より大きく影響を受ける傾向にあった。