

平成30年度 林野庁委託事業

CLT 等新たな木質建築部材利用促進・定着委託事業
(国による開発)
(CLT 強度データ収集)
成果報告書

平成31年3月

国立研究開発法人 森林研究・整備機構 森林総合研究所

国立研究開発法人 建築研究所

国立大学法人 宇都宮大学

地方独立行政法人 北海道立総合研究機構 林産試験場

富山県農林水産総合技術センター 木材研究所

広島県立総合技術研究所 林業技術センター

一般社団法人 日本CLT協会

公益社団法人 日本木材加工技術協会

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 28 年には CLT を一般的な建築材料として普及するための建築関係基準等が制定され、また、これに対応した「直交集成板の日本農林規格（JAS 規格）」の見直しが平成 30 年 2 月には終了した。

そのような中、直交集成板の日本農林規格に則った製造条件の範囲内であっても CLT 構造の建築関係基準等では適用外とされている製品仕様がある。より汎用性・効率性に優れた建築関係基準を整備する観点から、CLT 強度試験データの追加的収集・分析を行い、CLT のさらなる普及促進に資する。

ア 非対称構成 CLT の強度性能

CLT を利用しようとする場合の動機付けとしては、環境負荷の小さな木材を構造材として利用するメリットが代表的なものであろう。その際、構造材としての CLT を建物内部に現しで利用して見せたい場合には、防耐火設計に対応して燃えしろ設計を行う必要があるが、構造材である部分を基材としてそれに燃えしろ層を付加する考え方がある。あるいは、CLT 表面に美観等の向上を目的とした化粧層を設けたい場合もある。日本農林規格では、このような製品について「美観等を目的とした層」と表現することで排除はしていないが、その認証等の手順や基準については明確な規定はない。そのため、CLT パネル工法に関する建築基準法関連告示で基準強度等の扱いも不明瞭である。そこで、このような製品の強度性能の挙動を明らかにすることを目的として、実験的な検証を行った。

ここでは、スギ 5 層 5 プライ CLT を基材として、ラミナの繊維方向をその平行層に平行に積層する 5 層 6 プライタイプと、ラミナ繊維方向を平行層に直交させて積層する 6 層 6 プライタイプの 2 種類について、CLT の各種強度試験を行うとともに、理論的な解析を行った。対象とする強度性能は、積層方向の短期曲げ性能、温湿度非定常下における積層方向の長期曲げ変形、積層方向の短期せん断性能、座屈性能、幅方向のせん断性能、層内せん断試験に基づく直交層挙動の解明とした。

イ 長期性能における層構成の影響評価

これまで、3 層 3 プライ、5 層 5 プライに対する荷重継続時間調整係数を実験的に明らかにし、それらの成果に基づいて CLT パネル工法に関する建築基準法関連告示で 3 層 3 プライ、3 層 4 プライ、5 層 5 プライ、5 層 7 プライの強軸、弱軸、また、7 層 7 プライの弱軸に対して許容応力度が与えられてきた。ここでは、7 層 7 プライの長期荷重載荷試験によるデータを継続して収集するとともに、これらのデータのとりまとめとデータ解析や今後の長期性能データ収集の方向性について検討した。

最後に、本事業推進に有益なご助言をいただいた推進委員会の委員の皆様、複雑な試験体を作製していただいた日本 CLT 協会の CLT メーカーの方々、短期間で強度試験を実施し解析していただいた参画機関の皆様に感謝申し上げます。

成 30 年度林野庁委託事業
CLT 等新たな木質建築部材利用促進・定着委託事業（国による開発）
（CLT 強度データ収集事業）
成果報告書

目次

はじめに

1	非対称構成 CLT の各種強度性能	1
1.1	試験体の概要	1
1.2	積層方向の短期曲げ性能	4
1.3	温湿度非定常下における積層方向の長期曲げ変形	20
1.4	面外（積層）方向の短期せん断性能	34
1.5	座屈性能	44
1.6	圧縮・短柱性能	52
1.7	面内せん断性能 工型試験体による評価	63
1.8	面内せん断性能 逆対称 4 点曲げ試験等による評価	68
1.9	引張性能	95
1.10	直交層挙動の解析	105
1.11	まとめ	149
2	長期性能における層構成の影響評価	150
2.1	試験体の概要	150
2.2	結果および考察	150
3	まとめ	152

付録

1 非対称構成 CLT の各種強度性能

1.1 試験体の概要

1.1.1 試験体

i) ラミナ

樹種はスギ、ラミナの断面寸法は 25mm×105mm（幅厚さ比 3.5 倍）であった。付加ラミナの厚さは 25mm と 20mm、幅はいずれも 105mm とした。3m ラミナをフィンガージョイントによりたて継ぎした。フィンガー長は 15mm の水平型とし、接着剤には水性高分子イソシアネート系樹脂接着剤を用いた。

25mm 厚ラミナは岡山県産スギで約 3000 枚、20mm 厚ラミナは九州産スギで約 100 枚を用いた。それぞれの曲げヤング係数の分布を図 1.1-1 に示す。外層用ラミナに M60（曲げヤング係数の範囲：6kN/mm²以上）、内層用ラミナに M30 を用いた。

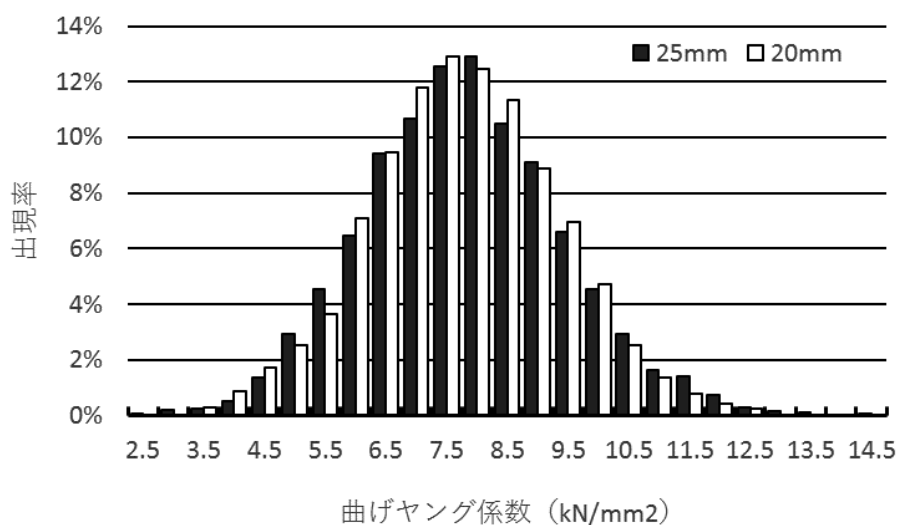


図 1.1-1 ラミナ厚さ別曲げヤング係数の分布



写真 1.1-1 試験体採材用 CLT パネル 13 枚

ii) CLT パネル

5 層 5 プライタイプ (5L5P) の CLT を基材として、ラミナの繊維方向をその平行層に平行に積層する 5 層 6 プライタイプ (5L6P) と、ラミナ繊維方向を平行層に直交させて積層する 6 層 6 プライタイプ (6L6P) とした。付加するラミナの等級は M60、厚さは 25mm を基本としたが 6 層 6 プライタイプについては付加するラミナに 20mm 厚ラミナを用いたものも製造した (図 1.1-1)。試験体を採材するためにパネルを 13 枚製造した (写真 1.1-1)。なお、基材ラミナと付加ラミナの積層接着は、CLT パネル製造時に同時に行った。

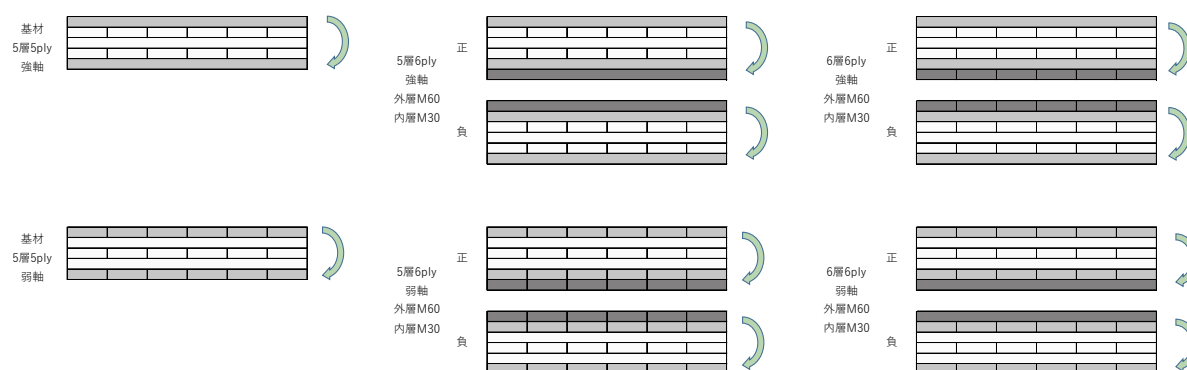


図 1.1-1 基材 CLT へのラミナ付加、荷力方向、モーメント正負の関係

表 1.1-1 試験体パネルの仕様

層構成	外層繊維方向	幅×長さ	付加ラミナ厚	パネル厚さ	曲げ積層短期	曲げ積層長期	せん断積層	圧縮 λ 25	圧縮 λ 55	圧縮 λ 90	引張	せん断幅工	せん断幅大野	せん断・層内	パネル番号
		10cm	mm	mm	OB	DOL	OSJ	C25	C55	C90	TS	IS	ISO	RSB	
5L5P	強	21×93	—	125	○	○	○		○		○				1
	強	21×87	—	125				○		○		○	○	○	2
	弱	80×21	—	125	○	○	○	○	○	○				○	7
5L6P	強	21×87	25	150			○					○	○		3
	強	21×80	25	150	○	○	○								10
	強	21×80	25	150			○	○	○	○	○				11
	弱	80×21	25	150	○	○	○								8
	弱	80×21	25	150			○	○	○	○	○				9
6L6P	強	21×87	25	150			○					○	○	○	4
	強	21×80	25	150	○	○	○								5
	強	21×80	25	150			○	○	○	○	○			○	6
	弱	80×21	20	145	○	○	○	○	○	○					13
	強	21×80	20	145	○	○	○	○	○	○					12

注：強：基材 CLT 外層ラミナ繊維方向が長尺方向、弱：基材 CLT 外層ラミナ繊維方向が短尺方向、幅：基材 CLT 外層ラミナ直交方向の辺長、長さ：基材 CLT 外層ラミナ平行方向の辺長、面内せん断工：幅方向のエ型試験体によるせん断試験、面内せん断大

野：幅方向の大野方式（逆対称 4 点曲げ）によるせん断試験

表 1.1-2 基材 CLT へのラミナ付加、荷力方向、モーメント正負の関係及び試験体記号

試験体		付加ラミナ		面外方向 荷力方向	記号	
層構成	厚さ (mm)	繊維方向	厚さ (mm)		荷重伝達方向	
					強軸	弱軸
5 層 5 プライ	125	—	—	—	5L5P	5L5P-W
5 層 6 プライ	150	平行	25	正負	5L6P-T 5L6P-F	5L6P-TW 5L6P-FW
6 層 6 プライ	150	直交	25	正負	6L6P-T 6L6P-F	— —
6 層 6 プライ	145	直交	20	正負	6L6PTN-T 6L6PTN-F	6L6PTN-TW 6L6PTN-FW

パネル仕様および各パネルからの試験体の採材状況を表 1.1-1 に示す。また、積層方向に曲げモーメントを加える際の方向とその記号による表記について表 1.1-2 に示す。

1.2 積層方向の短期曲げ性能

1.2.1 試験方法

縦振動法により動的ヤング係数、曲げたわみ振動法および T.G.H.法による非破壊測定により面外方向の曲げヤング係数とせん断弾性係数を求めた。T.G.H.法による計算ではせん断分布定数 s を 1.0 とした。

面外曲げ試験は、実大木材強度試験機（最大曲げ能力 200 kN）を用いて行った。加力方式は 3 等分点 2 点荷重、曲げスパンは 3150 mm とした。加圧板幅は支点部および載荷部ともに 200 mm とした。試験の状況を写真 1.2-1 に示す。加力速度は 10～16 mm/分とし、載荷開始から最大荷重到達までの時間は約 4～9 分であった。試験体の側面中央部においてスパン中央のたわみ量を測定するとともに、ヨークを用いて荷重点間における相対たわみ量を測定した。また、各仕様 1 体ずつで、荷重点間でラミナにひずみゲージを貼り、水平ひずみを測定した。面外曲げ試験終了後、試験体の非破壊部から含水率測定用の試験片を切り出し、全乾重量法によって含水率を測定した。試験体番号と層構成の関係を表 1.2-1 および図 1.2-1 に示す。

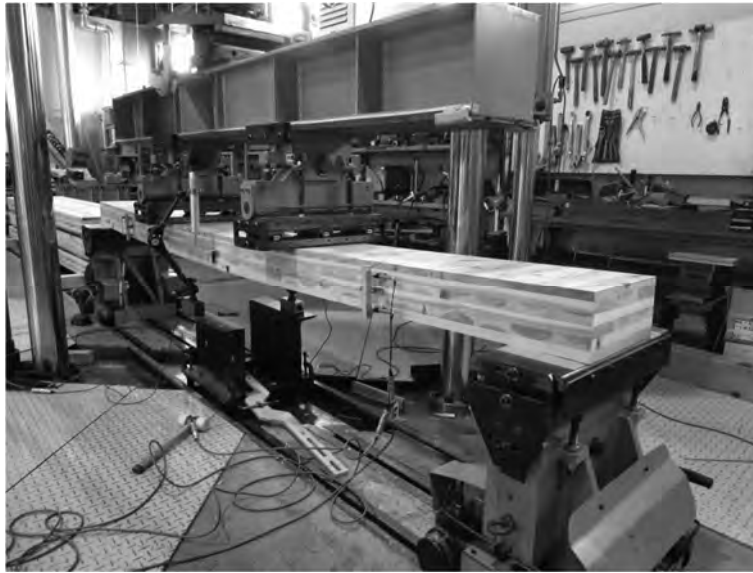


写真 1.2-1 面外曲げ試験の状況

最大荷重 P_{\max} から曲げ強さ σ_b を、比例域における荷重とスパン中央たわみの関係 $\Delta P/\Delta \delta$ からみかけの曲げ弾性係数 E_m を、比例域における荷重とヨーク相対たわみの関係 $\Delta P/\Delta \delta_y$ から純曲げ弾性係数 E_b を、次式により算出した。

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

ここで、 P_{\max} : 最大荷重

L : 試験スパン

s : 支点から荷重点までの距離

y : ヨークの測定スパン

b : 試験体の幅

h : 試験体の厚さ

ΔP : 最大荷重の 10～40%までの荷重増分

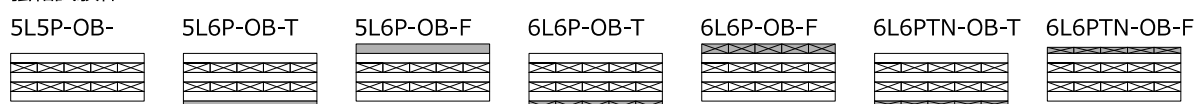
$\Delta \delta$: ΔP に対応するスパン中央たわみ δ の増分

$\Delta \delta_y$: ΔP に対応するヨーク相対たわみ δ_y の増分

表 1.2-1 試験体の層構成

No.	基本 CLT	付加ラミナの厚さ (mm)	付加ラミナの向き	付加ラミナの位置
5L5P-OB-	5 層 5 プライ 強軸	なし	-	-
5L6P-OB-T		25	平行	引張側
5L6P-OB-F				圧縮側
6L6P-OB-T			直交	引張側
6L6P-OB-F				圧縮側
6L6PTN-OB-T		20	直交	引張側
6L6PTN-OB-F				圧縮側
5L5P-OB-W	5 層 5 プライ 弱軸	なし	-	-
5L6P-OB-TW		25	直交	引張側
5L6P-OB-FW				圧縮側
6L6PTN-OB-TW		20	平行	引張側
6L6PTN-OB-FW				圧縮側

強軸試験体



弱軸試験体

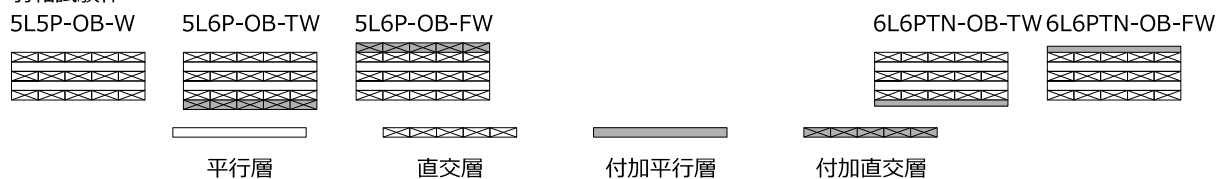


図 1.2-1 試験体の層構成の模式図

また、試験体製造に使用したラミナを用いて曲げ試験を行った。強度等級は外層用として M60、内層用として M30 としたものを使用して、それぞれ中央部にフィンガージョイントまたは節が含まれるように採材した。表 1.2-2 に試験体の仕様および試験体数を示す。

表 1.2-2 ラミナ曲げ試験体の仕様と試験体数

強度等級	仕様	試験体数	試験体記号
M60	フィンガージョイント	42	M60FJ
	節	41	M60K
M30	フィンガージョイント	34	M30FJ
	節	23	M30K

曲げ試験は、万能材料試験機（最大曲げ能力 100 kN）を用いて行った。加力方式は 3 等分点 2 点荷重、曲げスパンは 525 mm として、フラットワイズ方向に加力した。支点部の幅は 50 mm とした。試験体中央下側の絶対変位をスパン中央たわみとして測定した。試験の状況を写真 1.2-2 に示す。

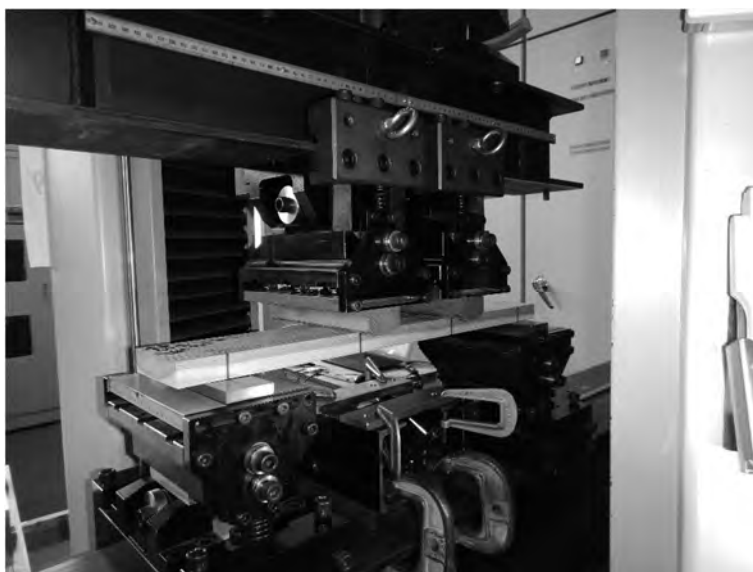


写真 1.2-2 ラミナ曲げ試験の状況

最大荷重 P_{\max} から曲げ強さ σ_b を、比例域における荷重とスパン中央たわみの関係 $\Delta P/\Delta \delta$ からみかけの曲げ弾性係数 E_m を次式により算出した。

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

ここで、 P_{\max} : 最大荷重

L : 試験スパン

s : 支点から荷重点までの距離

b : 試験体の幅

h : 試験体の厚さ

ΔP : 比例域における荷重増分

$\Delta \delta$: ΔP に対応するスパン中央たわみ δ の増分

1.2.2 結果及び考察

面外曲げ試験の結果を表 1.2-3, 1.2-4 に示す。破壊形態(写真 1.2-3)は、5 層 6 プライ強軸試験体の一部で直交層のローリングシア破壊によるせん断破壊が生じたほかは、曲げ破壊であった。曲げ破壊が生じた試験体では、荷重点間に引張側平行層ラミナのフィンガージョイントが試験体幅方向に連続して位置していた場合はフィンガージョイントを起因とした破壊であった。そのほか、節を起因とした破や無欠点部分からの破壊が生じた。

非破壊試験によるヤング係数の測定値と曲げ破壊試験によるヤング係数実測値は強軸、弱軸試験体ともにおおむね 1 対 1 の比例関係となった(図 1.2-2, 1.2-3)。各仕様の最大荷重を図 1.2-4 に示す。5 層 5 プライ強軸試験体にラミナを付加した試験体では、厚さ 25mm の直交ラミナを付加した試験体(6L6P-OB-T, 6L6P-OB-F)で最大荷重が若干低下する傾向がみられた。

図 1.2-5～1.2-7 に強軸試験体にラミナを付加した試験体で 20kN 加力時の水平ひずみの分布、図 1.2-8, 1.2-9 に弱軸試験体にラミナを付加した試験体で 10kN 加力時の水平ひずみの分布を、5 層 5 プライ試験体での結果と併せて示す。直交層を付加した場合には、5 層 5 プライ試験体とほぼ同様のひずみ分布を示していた。

ラミナ曲げ試験の結果を表 1.2-5, 表 1.2-6 に示す。フィンガージョイント試験体はフィ

ンガージョイントでの破壊（写真 1.2-6）が優占し，節試験体は節を起点とする破壊（写真 1.2-7）または，無欠点部での破壊（写真 1.2-8）となった。図 1.2-10～1.2-12 に密度，曲げ強さ，曲げ弾性係数のヒストグラムを示す。節試験体は密度および曲げ強さのばらつきが大きかった。

図 1.2-13 に各仕様 CLT 試験体の面外曲げ強さ，図 1.2-14 に各仕様 CLT 試験体の真の面外曲げ弾性係数を，計算値と併せて示す。計算値は等価断面法により求め，ラミナ曲げ試験のフィンガージョイント試験体（M60FJ および M30FJ）の試験結果平均値を用いて算出した値（FJ ラミナ），節試験体（M60K および M30K）の試験結果平均値を用いて算出した値（節ラミナ），直交集成板の日本農林規格で規定されている M60 および M30 ラミナの性能平均値を用いて算出した値（JAS ラミナ）とした。面外曲げ強さは，強軸試験体では FJ ラミナからの計算値がおおむね実験値と一致した。節ラミナからの計算値は危険側評価，JAS ラミナからの計算値は強軸および弱軸試験体ともに安全側評価となった。面外曲げ弾性係数は，FJ ラミナおよび節ラミナからの計算値がおおむね実験値と一致した。JAS ラミナからの計算値は強軸および弱軸試験体ともに安全側評価となった。

図 1.2-15 に最大荷重の 0.4 倍時の中立軸の実験値および計算値を示す。計算値はラミナ曲げ試験のフィンガージョイント試験体（M60FJ および M30FJ）の試験結果平均値を用いて等価断面法により算出した。すべての試験体でおおむね計算値と実験値は一致していた。

表 1.2-3 強軸試験体の試験結果

番号	密度 (kg/m ³)	E _{fr}	E _a	E _{TGH}	G _{TGH}	P _{max}	σ	E _m	E _b	破壊 形態	含水率 (%)
5L5P-OB-1	405	6.09	7.30	7.78	0.159	38.80	25.8	7.26	7.56	曲げ	10.6
5L5P-OB-2	386	5.66	6.62	7.26	0.139	43.00	28.4	6.56	6.71	曲げ	10.3
5L5P-OB-3	407	5.55	6.98	7.52	0.158	46.31	30.8	6.86	7.06	曲げ	10.9
5L6P-OB-T1	399	6.55	7.14	7.32	0.187	72.63	33.5	6.93	7.21	せん断	10.8
5L6P-OB-T2	394	6.43	7.05	7.70	0.195	63.52	29.2	7.02	7.44	曲げ	10.2
5L6P-OB-T3	407	6.72	6.77	7.33	0.186	72.40	33.5	6.80	7.01	せん断	11.3
5L6P-OB-T4	403	7.07	8.02	8.20	0.182	68.53	31.7	7.73	8.08	曲げ	11.1
5L6P-OB-F1	421	6.74	7.25	7.71	0.188	70.86	32.7	7.12	7.48	曲げ→ せん断	10.5
5L6P-OB-F2	388	6.63	7.44	7.75	0.187	70.61	32.6	7.30	7.74	せん断	10.4
5L6P-OB-F3	402	6.57	7.14	7.44	0.183	75.47	34.9	7.18	7.88	せん断	10.8
5L6P-OB-F4	396	7.02	7.90	8.30	0.185	76.58	35.4	7.73	8.14	曲げ→ せん断	11.4
6L6P-OB-T1	412	5.57	4.49	4.85	0.137	40.60	18.7	4.29	4.49	曲げ	10.3
6L6P-OB-T2	397	4.51	3.95	4.37	0.136	38.30	17.7	3.73	3.85	曲げ	10.1
6L6P-OB-T3	397	4.94	4.10	4.50	0.128	33.87	15.5	4.00	4.13	曲げ	10.2
6L6P-OB-T4	395	4.75	3.89	4.10	0.136	38.06	17.5	3.91	3.86	曲げ	10.1
6L6P-OB-F1	409	5.33	4.45	5.02	0.138	37.06	17.1	4.32	4.48	曲げ	10.2
6L6P-OB-F2	402	4.82	3.97	4.24	0.128	36.33	16.7	3.93	4.27	曲げ	10.1
6L6P-OB-F3	403	4.96	3.98	4.49	0.134	39.59	18.2	3.91	3.95	曲げ	10.4
6L6P-OB-F4	396	4.93	4.29	4.20	0.148	34.01	15.6	4.10	4.36	曲げ	10.1
6L6PTN-OB-T1	413	5.50	4.82	5.07	0.146	41.33	20.4	4.83	5.05	曲げ	10.5
6L6PTN-OB-T2	405	5.21	4.73	5.30	0.132	50.36	24.7	4.63	4.77	曲げ	10.3
6L6PTN-OB-T3	402	5.13	4.49	4.88	0.148	49.20	24.3	4.57	4.61	曲げ	10.3
6L6PTN-OB-F1	412	5.63	4.80	5.02	0.132	48.40	23.9	4.92	5.15	曲げ	10.7
6L6PTN-OB-F2	410	5.30	4.79	5.10	0.147	53.11	26.1	4.71	4.97	曲げ	10.5
6L6PTN-OB-F3	405	5.58	4.92	5.32	0.138	39.69	19.5	4.97	5.25	曲げ	10.6

E_{fr}：縦振動法による弾性係数（単位 kN/mm²）

E_a：たわみ振動法による曲げ弾性係数（単位 kN/mm²）

E_{TGH}：T.G.H.法による曲げ弾性係数（単位 kN/mm²）

G_{TGH}：T.G.H.法によるせん断弾性係数（単位 kN/mm²）

P_{max}：強度試験で得られた最大荷重（単位 kN）

σ：強度試験で得られた曲げ強さ（単位 N/mm²）

E_m：強度試験で得られたみかけの曲げ弾性係数（単位 kN/mm²）

E_b：強度試験で得られた純曲げ弾性係数（単位 kN/mm²）

破壊形態の「曲げ→せん断」は最大荷重を曲げ破壊により記録し、その後直交層のせん断破壊に移行したことを示す。

表 1.2-4 弱軸試験体の試験結果

番号	密度 (kg/m ³)	E _{fr}	E _a	E _{TGH}	G _{TGH}	P _{max}	σ	E _m	E _b	破壊 形態	含水率 (%)
5L5P-OB-W1	411	4.08	2.17	2.36	0.099	18.50	12.3	2.07	2.05	曲げ	10.4
5L5P-OB-W2	400	4.05	2.11	2.26	0.110	25.41	16.8	2.04	2.05	曲げ	10.2
5L5P-OB-W3	400	4.25	2.29	2.47	0.090	14.86	9.8	2.16	2.18	曲げ	10.2
5L6P-OB-TW1	400	3.35	1.36	1.56	0.083	18.55	8.5	1.33	1.38	曲げ	9.8
5L6P-OB-TW2	406	3.34	1.38	1.57	0.092	26.67	12.3	1.17	1.14	曲げ	9.9
5L6P-OB-TW3	405	3.42	1.37	1.56	0.104	27.67	12.7	1.31	1.34	曲げ	10.1
5L6P-OB-TW4	395	2.98	1.23	1.47	0.090	22.83	10.4	1.13	1.07	曲げ	10.1
5L6P-OB-FW1	395	3.24	1.33	1.56	0.091	21.18	9.7	1.32	1.34	曲げ	10.6
5L6P-OB-FW2	399	3.43	1.47	1.57	0.095	18.66	8.6	1.38	1.40	曲げ	9.8
5L6P-OB-FW3	399	3.81	1.59	1.79	0.084	28.10	12.9	1.50	1.52	曲げ	10.5
5L6P-OB-FW4	401	3.50	1.36	1.57	0.095	19.91	9.1	1.39	1.38	曲げ	10.3
6L6PTN-OB-TW1	410	4.56	3.60	3.61	0.158	42.75	21.0	3.57	3.62	曲げ	10.2
6L6PTN-OB-TW2	401	4.83	3.88	4.11	0.142	36.51	17.9	3.81	3.77	曲げ	10.0
6L6PTN-OB-TW3	407	4.59	3.77	3.98	0.150	23.66	11.6	3.77	3.91	曲げ	10.3
6L6PTN-OB-FW1	401	4.72	3.70	3.92	0.139	48.86	24.0	3.69	3.73	曲げ	10.3
6L6PTN-OB-FW2	404	4.50	3.38	3.29	0.170	43.46	21.3	3.40	3.24	曲げ	10.1
6L6PTN-OB-FW3	397	4.87	3.67	3.76	0.131	47.78	23.4	3.66	3.74	曲げ	9.9

E_{fr} : 縦振動法による弾性係数 (単位 kN/mm²)E_a : たわみ振動法による曲げ弾性係数 (単位 kN/mm²)E_{TGH} : T.G.H.法による曲げ弾性係数 (単位 kN/mm²)G_{TGH} : T.G.H.法によるせん断弾性係数 (単位 kN/mm²)P_{max} : 強度試験で得られた最大荷重 (単位 kN) σ : 強度試験で得られた曲げ強さ (単位 N/mm²)E_m : 強度試験で得られたみかけの曲げ弾性係数 (単位 kN/mm²)E_b : 強度試験で得られた純曲げ弾性係数 (単位 kN/mm²)



直交層のローリングシア破壊



引張側平行層ラミナのフィンガー
ジョイントを起点とした破壊



引張側平行層ラミナの節や無欠点箇所
での破壊

写真 1.2-3 面外曲げ試験体の破壊形態ローリングシア破壊によるせん断破壊



フィンガージョイントでの破壊



節を起点とする破壊



無欠点部での破壊

写真 1.2-4 ラミナ曲げ試験体の破壊形態

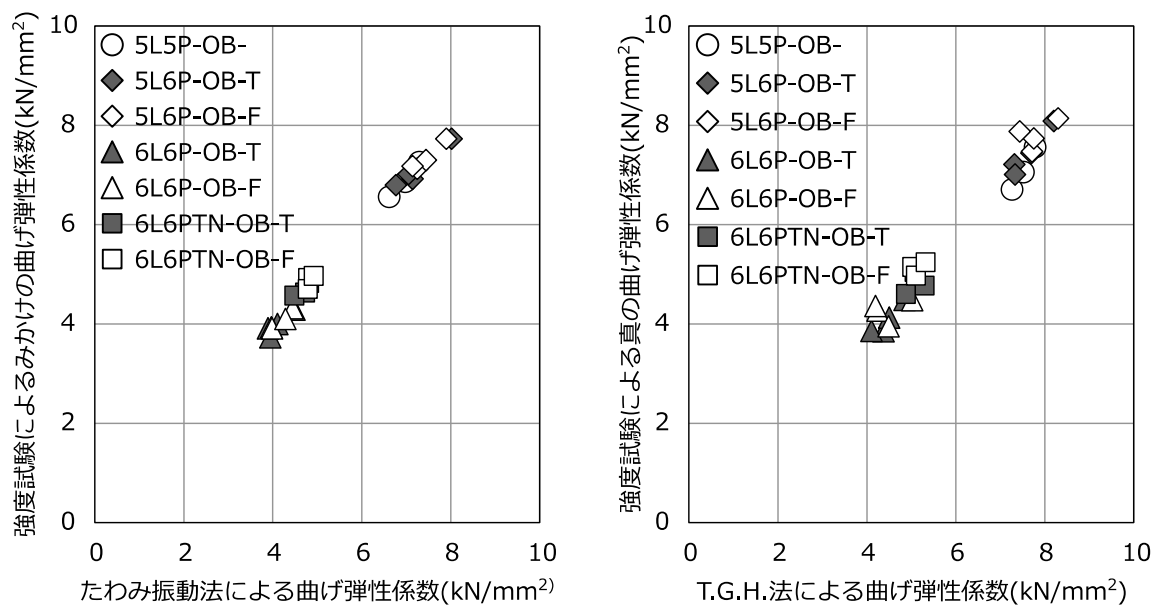


図 1.2-2 強軸試験体の非破壊および破壊試験による曲げ弾性係数の関係

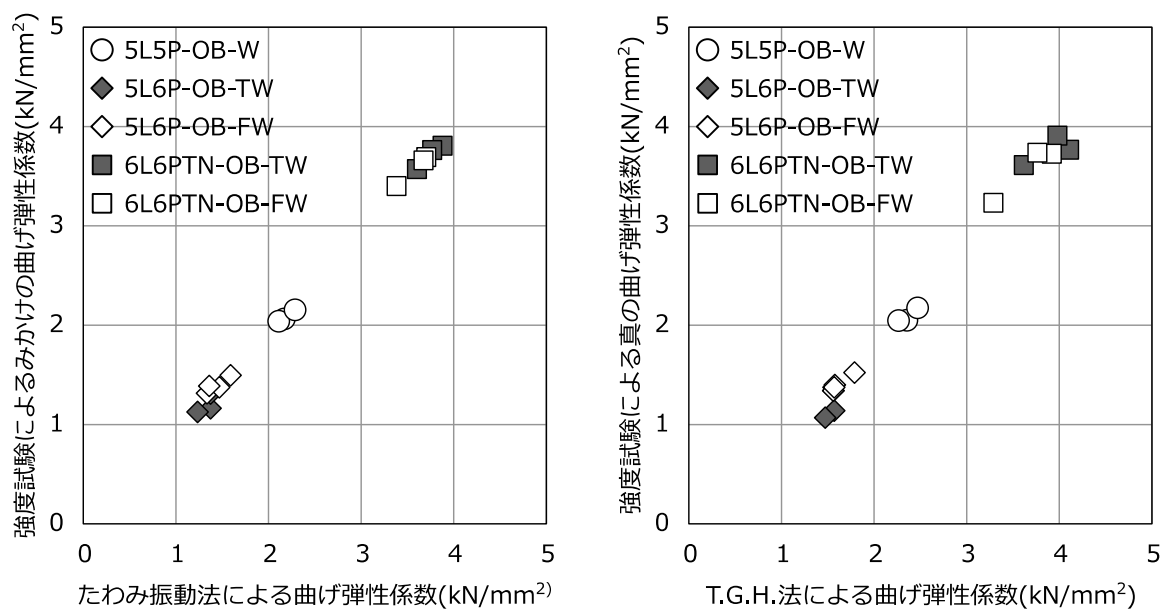


図 1.2-3 弱軸試験体の非破壊および破壊試験による曲げ弾性係数の関係

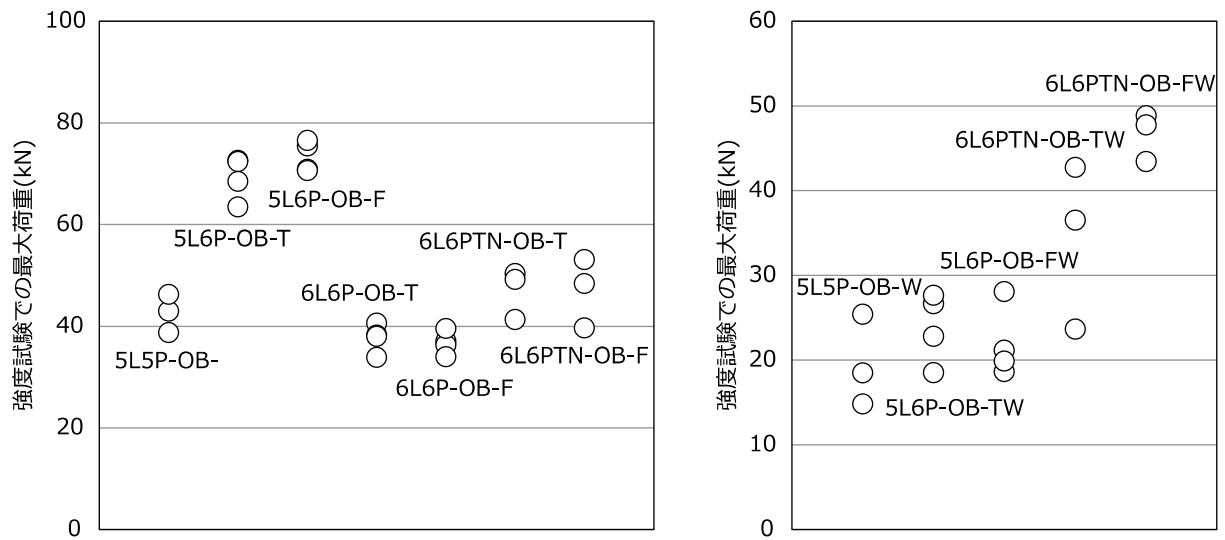


図 1.2-4 各仕様の強度試験での最大荷重

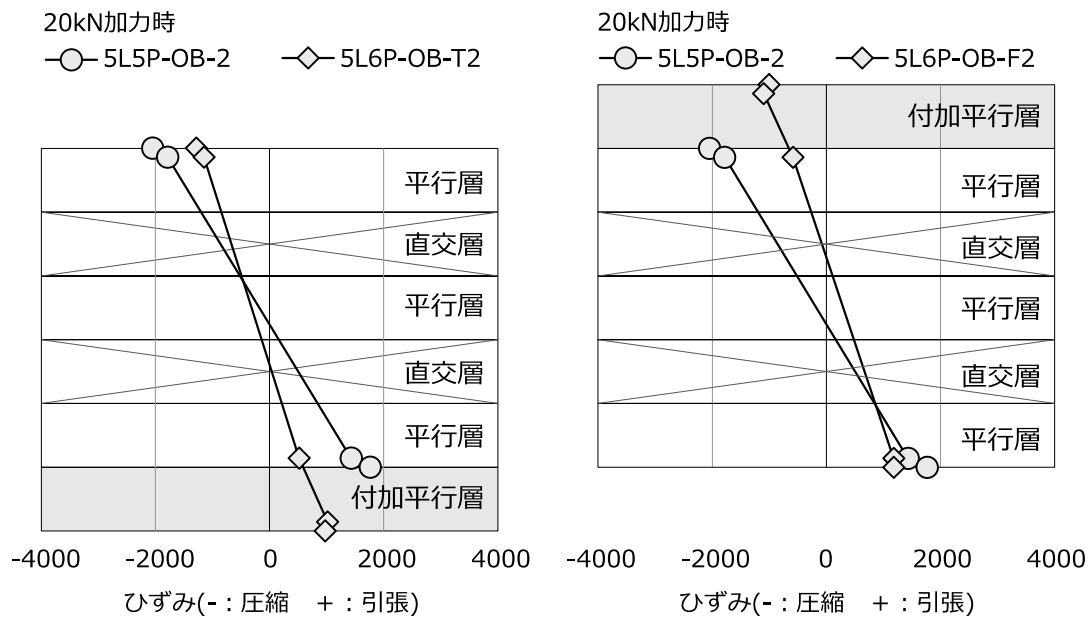


図 1.2-5 強軸試験体にラミナを付加した試験体の 20kN 加力時の水平ひずみ分布(その 1)

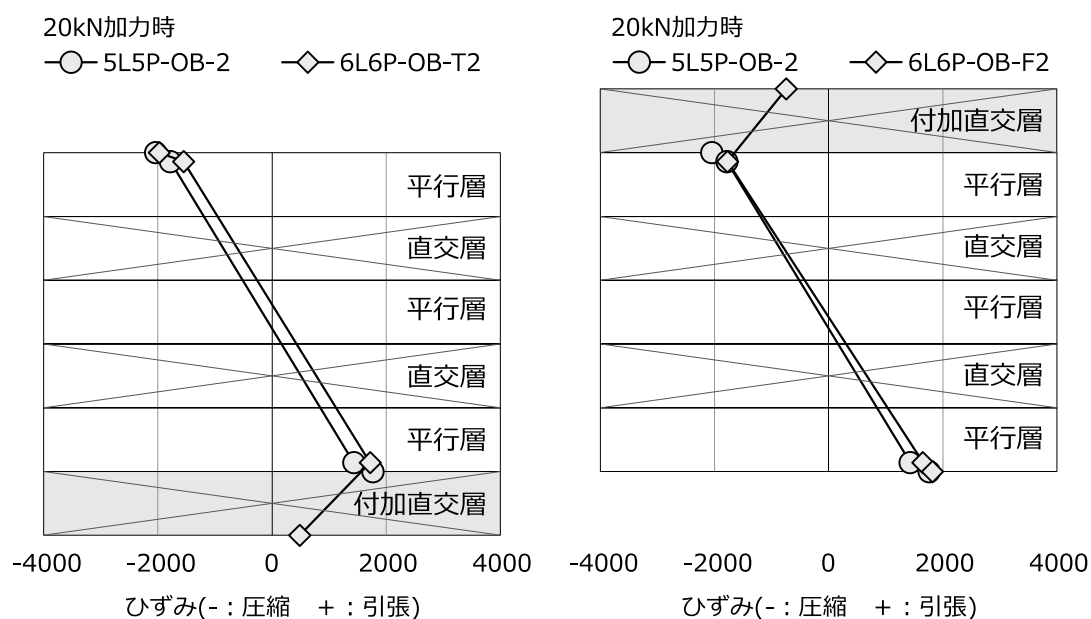


図 1.2-6 強軸試験体にラミナを付加した試験体の 20kN 加力時の水平ひずみ分布(その 2)

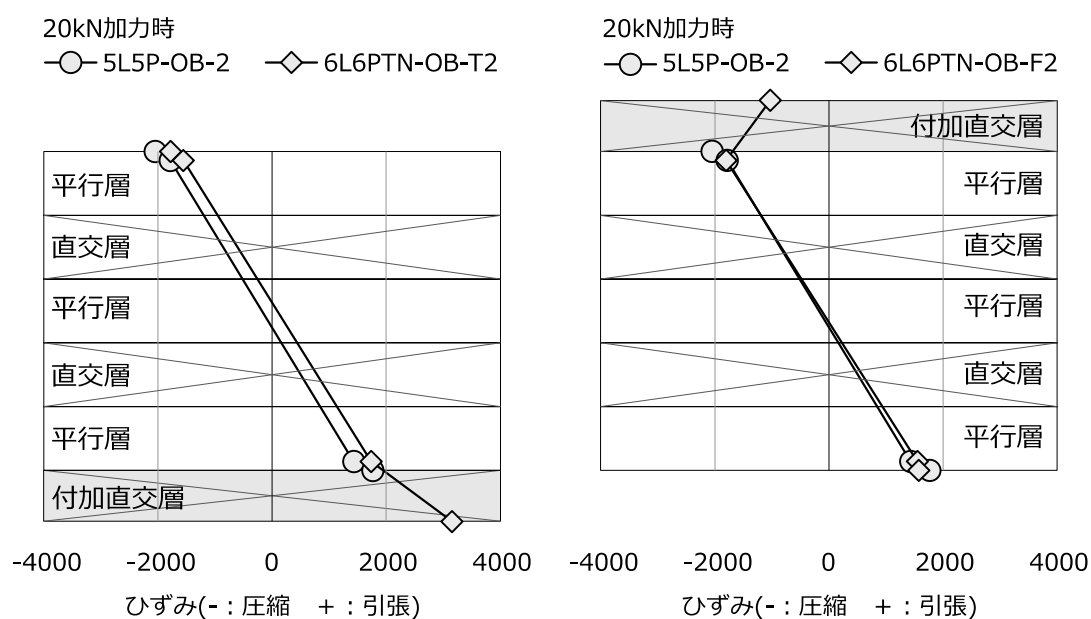


図 1.2-7 強軸試験体にラミナを付加した試験体の 10kN 加力時の水平ひずみ分布(その 3)

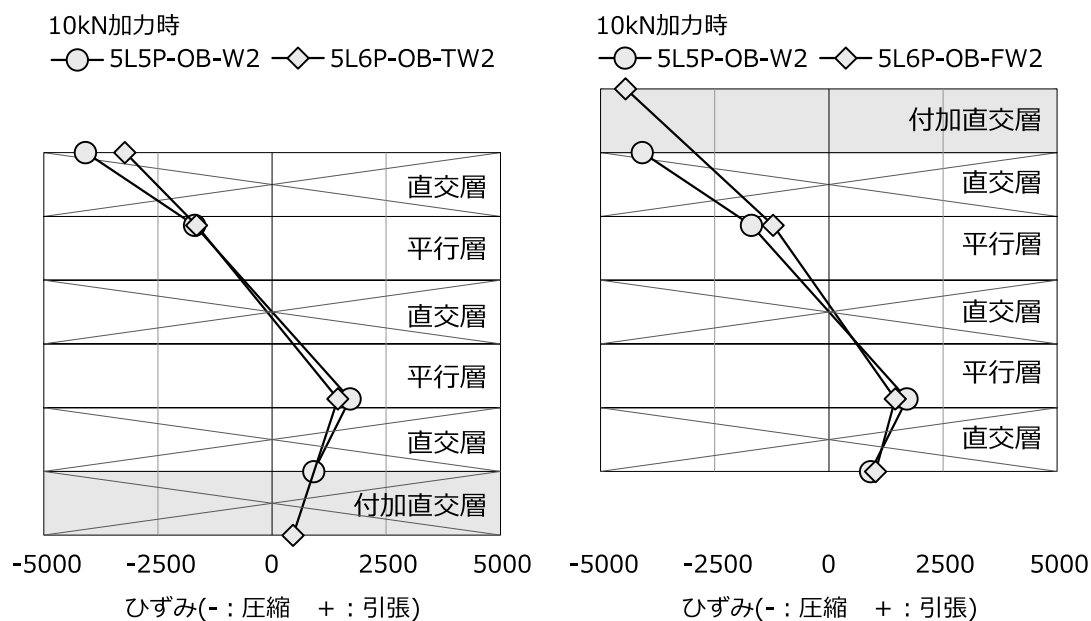


図 1.2-8 弱軸試験体にラミナを付加した試験体の 10kN 加力時の水平ひずみ分布(その 1)

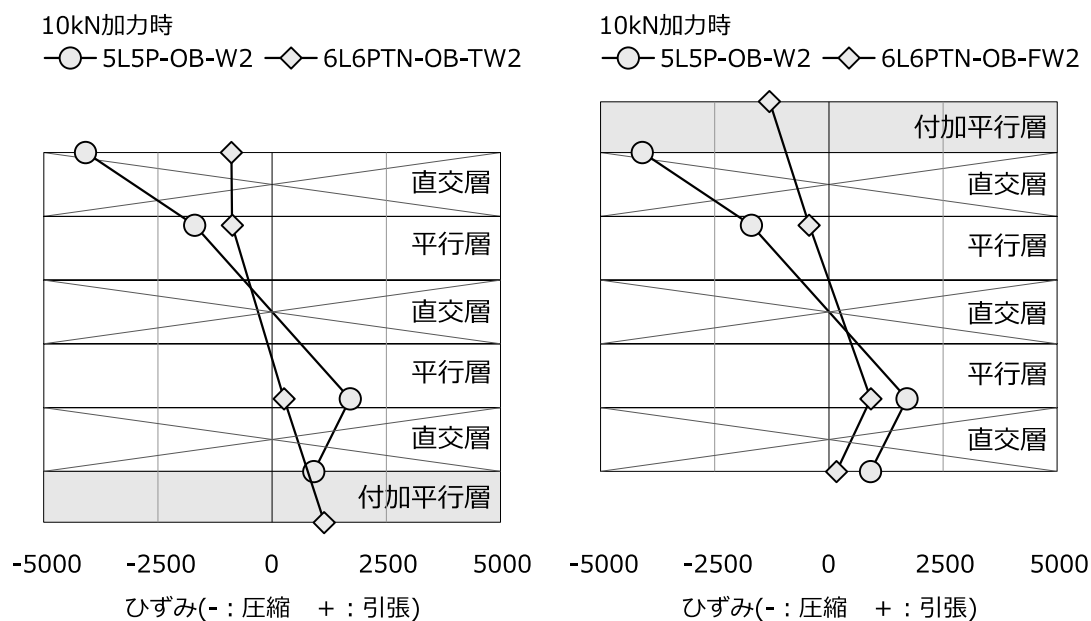


図 1.2-9 弱軸試験体にラミナを付加した試験体の 10kN 加力時の水平ひずみ分布(その 2)

表 1.2-5 ラミナ曲げ試験の結果

試験体記号	曲げ強さ(N/mm ²)				みかけの曲げ弾性係数(kN/mm ²)			
	M60FJ	M60K	M30FJ	M30K	M60FJ	M60K	M30FJ	M30K
試験体数	42	41	34	23	42	41	34	23
最大値	50.2	81.3	42.7	76.1	13.28	13.22	7.89	7.56
平均値	38.7	57.2	31.7	46.3	8.80	8.85	6.40	6.43
最小値	29.9	30.1	23.4	27.0	6.93	5.86	4.24	4.96
標準偏差	4.8	13.3	5.1	12.0	1.20	1.45	0.83	0.79
変動係数	12.4%	23.2%	16.0%	26.0%	13.6%	16.4%	13.0%	12.2%

表 1.2-6 ラミナ曲げ試験での破壊要因（試験体数）

破壊要因	M60FJ	M60K	M30FJ	M30K
FJ	40	0	24	0
節	1	31	4	17
FJ・節	1	0	5	0
無欠点部	0	10	1	6

FJ：フィンガージョイント部，FJ・節：フィンガージョイントと節の両方

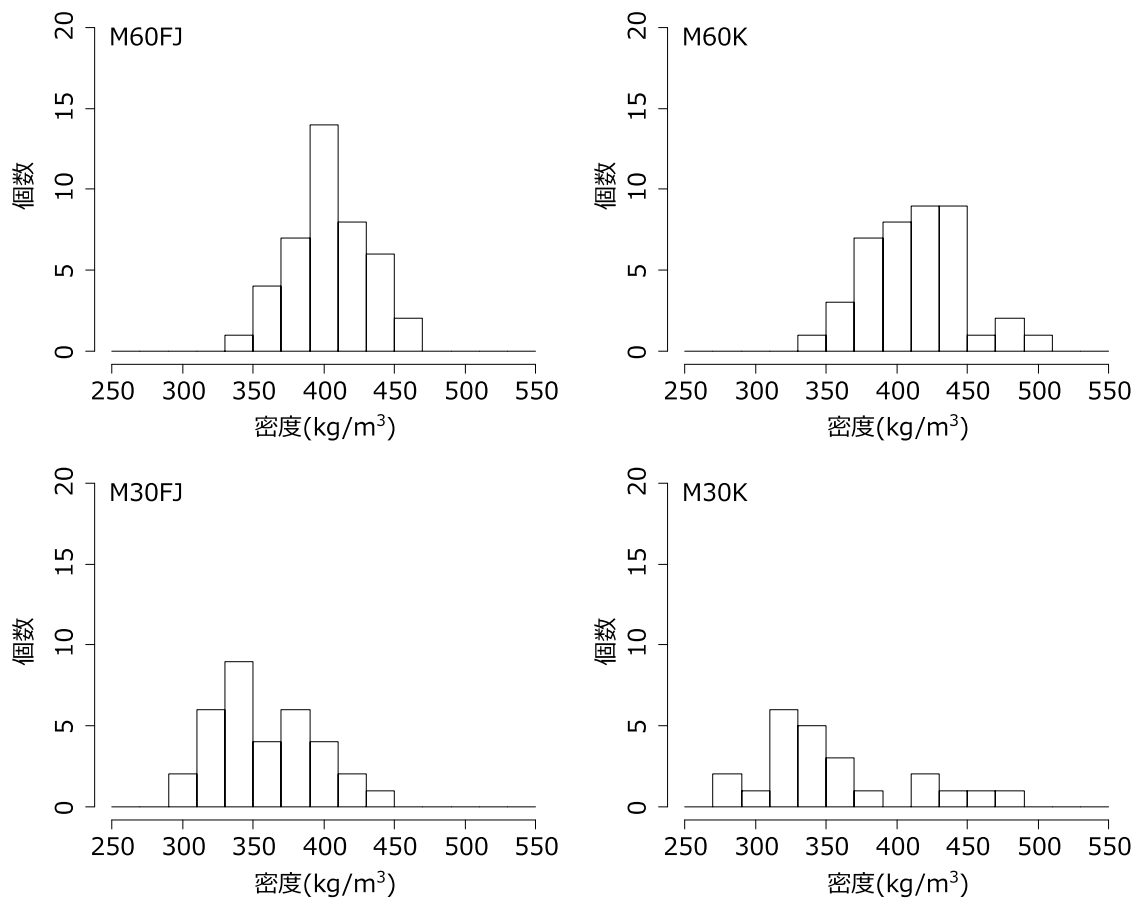


図 1.2-10 ラミナの密度のヒストグラム

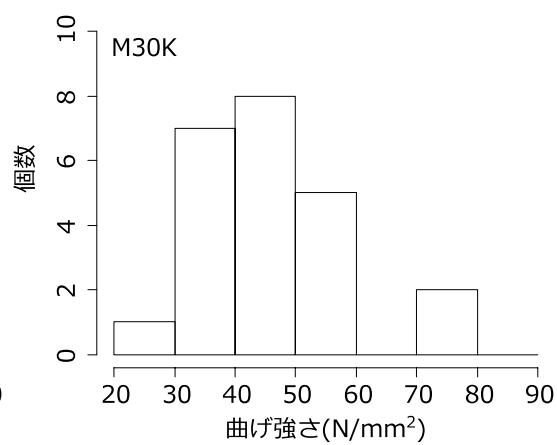
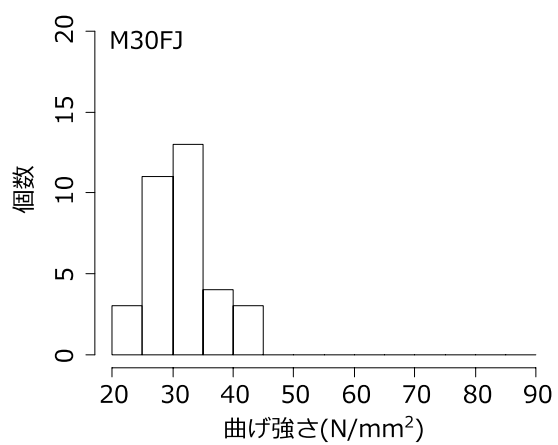
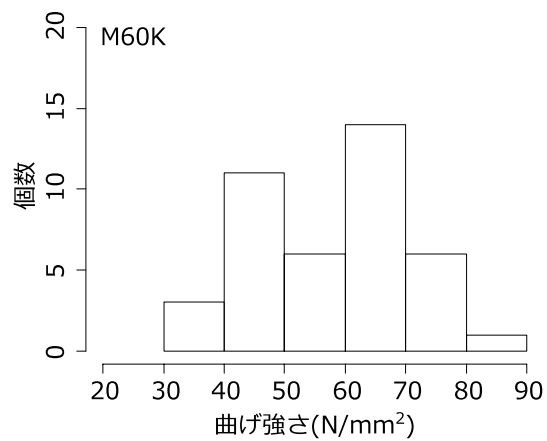
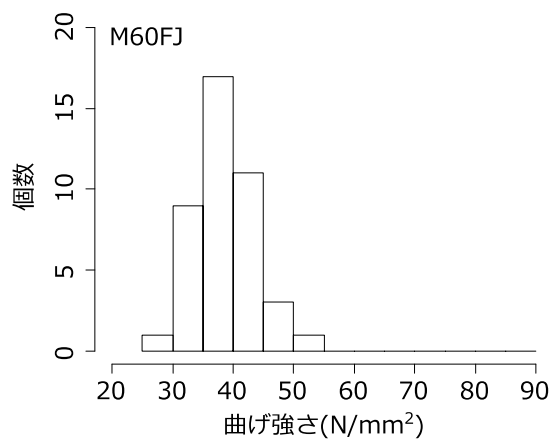


図 1.2-11 ラミナの曲げ強さのヒストグラム

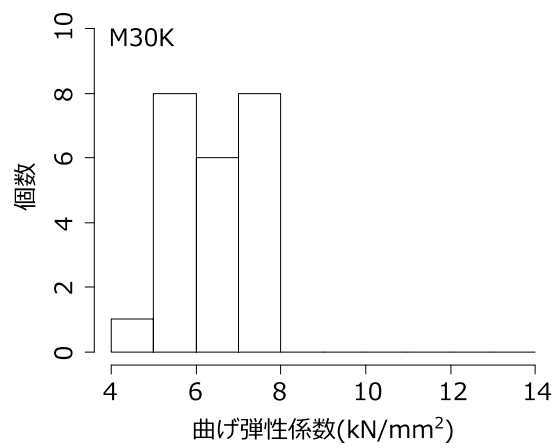
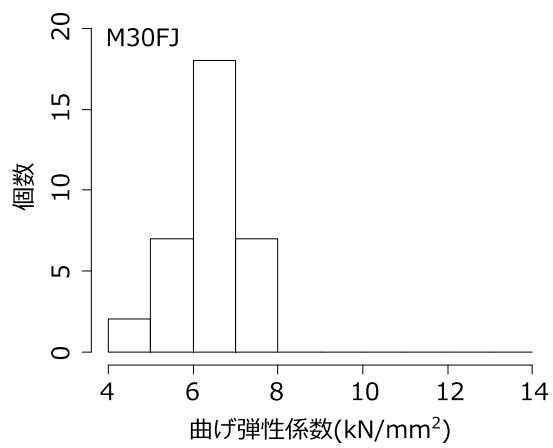
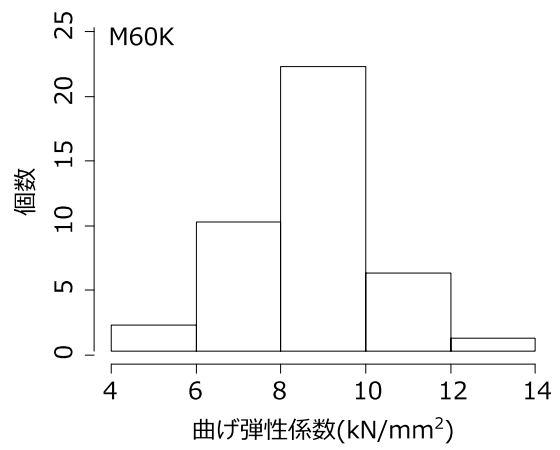
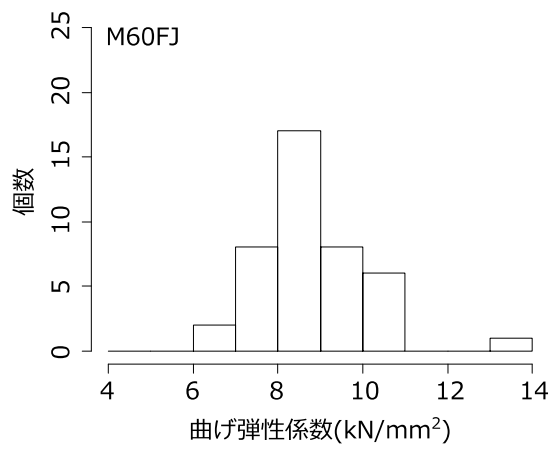


図 1.2-12 ラミナのみかけの曲げ弾性係数のヒストグラム

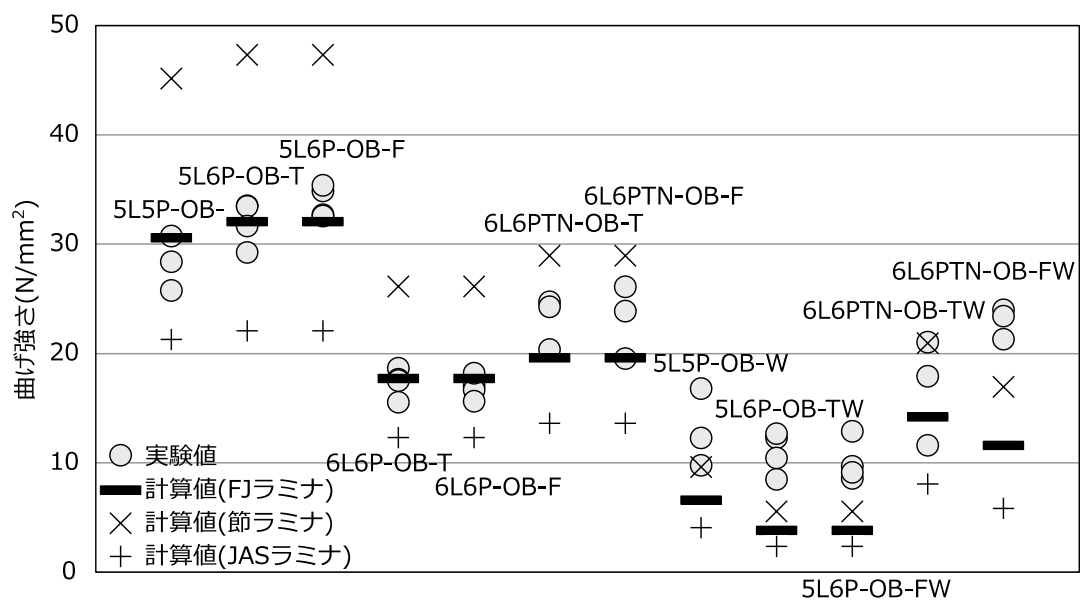


図 1.2-13 面外曲げ強さの実験値と計算値

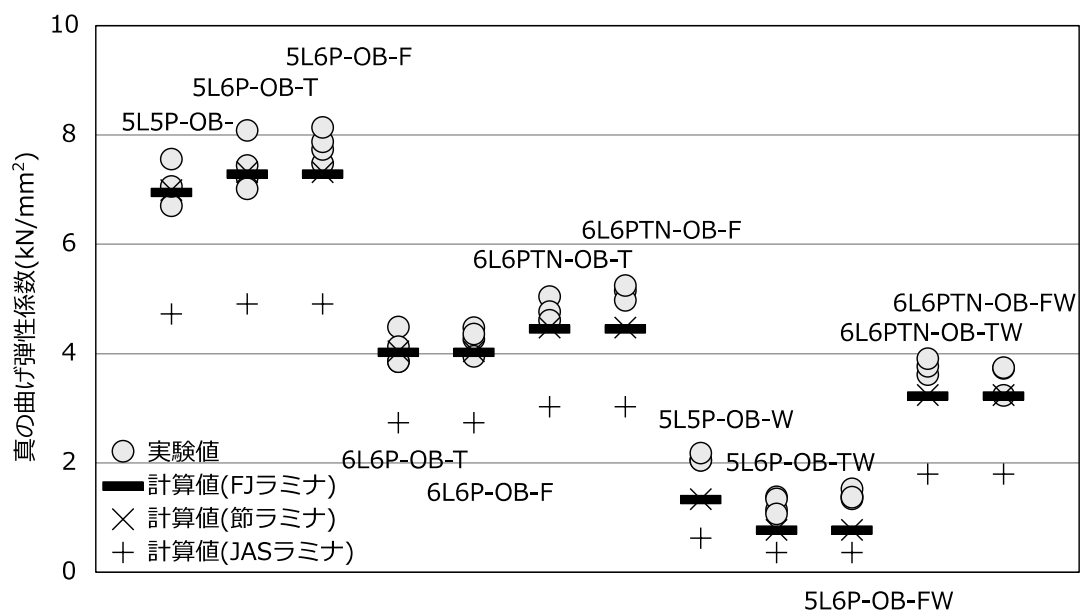


図 1.2-14 真の曲げ弾性係数の実験値と計算値

○ 実験値(最大荷重の0.4倍時)
 ── 計算値

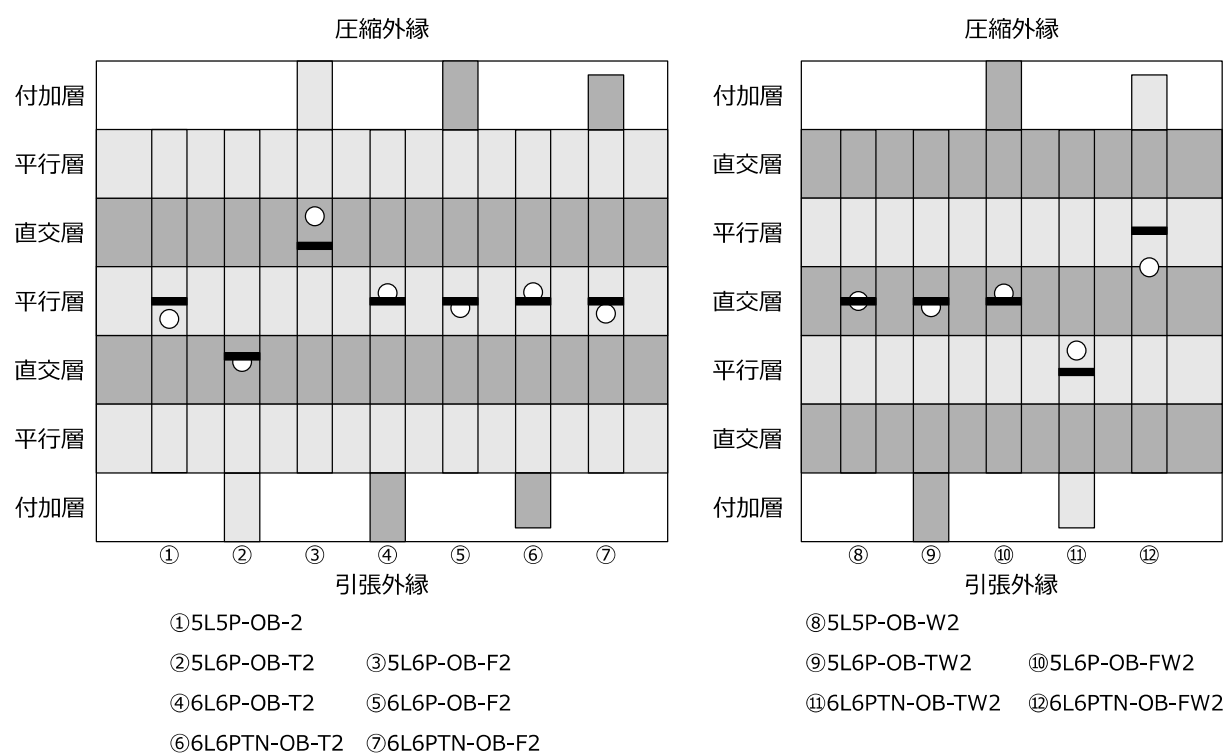


図 1.2-15 中立軸位置の実験値と計算値

1.3 温湿度非定常下における積層方向の長期曲げ変形

1.3.1 試験方法

i) 試験体

積層方向の長期曲げ変形試験に供した CLT のラミナは、内層、外層ともに M60 のスギである。ラミナの厚さは 25mm であるが、6 層 6 プライの CLT の一部には、片側の最外層に厚さ 20mm のラミナを使用した。試験体の層数×プライ数、寸法を表 1.3-1 に示す。

表 1.3-1 積層方向の長期曲げ変形試験の試験体

層数×プライ数	寸法（高さ×幅×長さ）	軸
5×5	125×300×3450	強軸
5×5	125×300×3450	弱軸(W)
5×6	150×300×3450	強軸
5×6	150×300×3450	弱軸(W)
6×6	150×300×3450	強軸
6×6	150×300×3450	弱軸(W)
6×6 20mm ラミナ (TN)	145×300×3450	強軸
6×6 20mm ラミナ (TN)	145×300×3450	弱軸(W)

ii) 非破壊試験

面外曲げクリープ破壊試験を行う前に、せん断弾性係数の簡便な非破壊評価方法として、動的弾性係数の測定を試みた。測定は、たわみ振動法(T.G.H.法)^{1.3-1)}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 倍の距離として台の上に置き、試験体中央部材面を上からハンマーで打撃し、下面方向からマイクロフォンで高次の固有振動数を測定した。

また、縦振動法による縦振動ヤング係数も測定した。

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

$$a = -1.2 \left(\frac{E_{fr-t}}{G_{fr-t}} \right), \quad c = E_{fr-t} \quad (1.3-1)$$

E_{fr-t} : 真の曲げヤング係数

G_{fr-t} : せん断弾性係数

縦振動法では次の式により縦振動ヤング係数を計算した。

$$E_{fr} = (2fl)^2 \rho \quad (1.3-2)$$

E_{fr} : 縦振動ヤング係数

f : 固有振動数

l : 材長

ρ : 密度

表 1.3-2 に非破壊試験結果を示す。

表 1.3-2 非破壊試験結果

試験体No	重量 kg	全長 mm	幅 mm	厚さ mm	周波数 Hz	密度 kg/m ³	ヤング係数 Efr kN/mm ²	Eoft kN/mm ²	Gft kN/mm ²
5L5P-DOL-1	51.760	3450	300.58	125.83	556.25	397	5.84	7.831	0.168
5L5P-DOL-2	52.500	3450	301.47	125.56	572.50	402	6.27	7.865	0.175
5L5P-DOL-3	51.200	3450	300.40	125.50	555.00	394	5.77	7.366	0.162
最小値	51.200	3450	300.40	125.50	555.00	394	5.77	7.366	0.162
平均値	51.820	3450	300.82	125.63	561.25	397	5.96	7.687	0.169
最大値	52.500	3450	301.47	125.83	572.50	402	6.27	7.865	0.175
標準偏差	0.652	0	0.57	0.18	9.76	4	0.27	0.279	0.007
変動係数%	1.3	0	0.2	0.1	1.7	1.1	4.5	3.6	3.9

試験体No	重量 kg	全長 mm	幅 mm	厚さ mm	周波数 Hz	密度 kg/m ³	ヤング係数 Efr kN/mm ²	Eoft kN/mm ²	Gft kN/mm ²
5L5P-DOL-W1	53.720	3454	298.75	126.72	477.50	411	4.47	2.490	0.118
5L5P-DOL-W2	52.460	3453	300.15	125.86	492.50	402	4.65	2.711	0.099
5L5P-DOL-W3	54.220	3454	300.56	126.66	453.75	412	4.05	2.277	0.130
最小値	52.460	3453	298.75	125.86	453.75	402	4.05	2.277	0.099
平均値	53.467	3454	299.82	126.41	474.58	408	4.39	2.493	0.116
最大値	54.220	3454	300.56	126.72	492.50	412	4.65	2.711	0.130
標準偏差	0.907	1	0.95	0.48	19.54	5	0.31	0.217	0.016
変動係数%	1.7	0	0.3	0.4	4.1	1.3	7.0	8.7	13.9

試験体No	重量 kg	全長 mm	幅 mm	厚さ mm	周波数 Hz	密度 kg/m ³	ヤング係数 Efr kN/mm ²	Eoft kN/mm ²	Gft kN/mm ²
5L6P-DOL(T)-1	61.470	3452	300.71	151.13	607.50	392	6.89	7.978	0.221
5L6P-DOL(T)-2	61.570	3452	301.33	150.81	607.50	392	6.90	8.053	0.214
5L6P-DOL(F)-1	64.200	3451	300.49	150.79	613.75	411	7.37	8.776	0.223
5L6P-DOL(F)-2	62.050	3450	300.72	151.06	607.50	396	6.96	8.386	0.216
最小値	61.470	3450	300.49	150.79	607.50	392	6.89	7.978	0.214
平均値	62.323	3451	300.81	150.95	609.06	398	7.03	8.298	0.219
最大値	64.200	3452	301.33	151.13	613.75	411	7.37	8.776	0.223
標準偏差	1.277	1	0.36	0.17	3.13	9	0.23	0.365	0.004
変動係数%	2.0	0	0.1	0.1	0.5	2.2	3.2	4.4	2.0

試験体No	重量 kg	全長 mm	幅 mm	厚さ mm	周波数 Hz	密度 kg/m ³	ヤング係数 Efr kN/mm ²	Eoft kN/mm ²	Gft kN/mm ²
5L6P-DOL(T)-W1	63.160	3452	300.00	151.65	433.75	402	3.61	1.562	0.117
5L6P-DOL(T)-W2	63.100	3452	299.43	151.25	420.00	404	3.39	1.431	0.119
5L6P-DOL(F)-W1	62.490	3451	300.27	151.85	417.50	397	3.30	1.374	0.139
5L6P-DOL(F)-W2	62.270	3452	297.85	151.33	428.75	400	3.51	1.544	0.112
最小値	62.270	3451	297.85	151.25	417.50	397	3.30	1.374	0.112
平均値	62.755	3452	299.39	151.52	425.00	401	3.45	1.478	0.122
最大値	63.160	3452	300.27	151.85	433.75	404	3.61	1.562	0.139
標準偏差	0.443	1	1.08	0.28	7.57	3	0.13	0.091	0.012
変動係数%	0.7	0	0.4	0.2	1.8	0.7	3.9	6.1	9.7

試験体No	重量 kg	全長 mm	幅 mm	厚さ mm	周波数 Hz	密度 kg/m ³	ヤング係数 Efr kN/mm ²	Eoft kN/mm ²	Gft kN/mm ²
6L6P-DOL(T)-1	62.910	3452	300.30	151.28	525.00	401	5.27	4.925	0.150
6L6P-DOL(T)-2	63.360	3452	302.70	151.10	525.00	401	5.27	4.604	0.161
6L6P-DOL(F)-1	63.250	3451	300.16	151.51	520.00	403	5.19	4.633	0.162
6L6P-DOL(F)-2	63.550	3452	301.31	151.27	536.25	404	5.54	4.640	0.155
最小値	62.910	3451	300.16	151.10	520.00	401	5.19	4.604	0.150
平均値	63.268	3452	301.12	151.29	526.56	402	5.32	4.701	0.157
最大値	63.550	3452	302.70	151.51	536.25	404	5.54	4.925	0.162
標準偏差	0.269	1	1.17	0.17	6.88	1	0.15	0.151	0.006
変動係数%	0.4	0	0.4	0.1	1.3	0.3	2.8	3.2	3.8

試験体No	重量 kg	全長 mm	幅 mm	厚さ mm	周波数 Hz	密度 kg/m ³	ヤング係数 Efr kN/mm ²	Eoft kN/mm ²	Gft kN/mm ²
6L6PTN-DOL(T)-1	60.380	3336	299.74	146.24	568.75	413	5.95	5.511	0.184
6L6PTN-DOL(F)-1	58.320	3335	299.66	145.99	550.00	400	5.38	4.838	0.164

試験体No	重量 kg	全長 mm	幅 mm	厚さ mm	周波数 Hz	密度 kg/m ³	ヤング係数 Efr kN/mm ²	Eoft kN/mm ²	Gft kN/mm ²
6L6PTN-DOL(T)-W1	59.500	3338	299.42	145.93	512.50	408	4.78	3.821	0.181
6L6PTN-DOL(F)-W1	58.840	3338	299.32	146.11	515.00	403	4.76	4.285	0.160

Efr : 縦振動法による縦弾性係数

ETGHf : たわみ振動法による面外方向の曲げヤング係数

GTGHf : たわみ振動法による面外方向のせん断弾性係数

iii) 長期面外曲げ試験

長期載荷は、図 1.3-1、写真 1.3-1 に示すモーメントアーム式の試験機を採用した。アームの長さは支点から錘をかける個所まで 4000mm とし、アームの支点から加力ビームの中央までの距離（以下 T）は、試験体に付加する荷重によって 250, 650, 750mm とした。写真 1.3-2 の加力軸のネジを回転させることでアームを水平に維持できるようにした。写真 1.3-3 はアーム及びおもり、写真 1.3-4 は荷重点である。

試験室は空調設備がなく温湿度は定常ではないため、継続的に温湿度を測定した。

試験条件は、試験体の厚みに関係なくすべての試験体において、支点間距離を 3150mm、荷重点間距離を 1050mm とし、3 等分点 4 点荷重方式で行った。載荷荷重は、非破壊試験の結果から初期のひずみが 14~16mm 程度になる荷重とした。表 1.3-3 に 12 体の試験体、面外方向に載荷した荷重を示す。ひずみの測定は、12 体すべての試験体について、せん断の影響のある区間の支点間中央の変形量（写真 1.3-5 参照）、9 体の試験体について、せん断の影響のない区間の荷重点間の変形量（写真 1.3-6 参照）、2 体の試験体について支点と荷重点中間の側面 2 か所の層間変形量（図 1.3-2、写真 1.3-7 参照）を測定した。なお、せん断の影響のない区間の荷重点間の変形量の測定では、推定した中立軸の位置にネジを入れて治具を設置した。

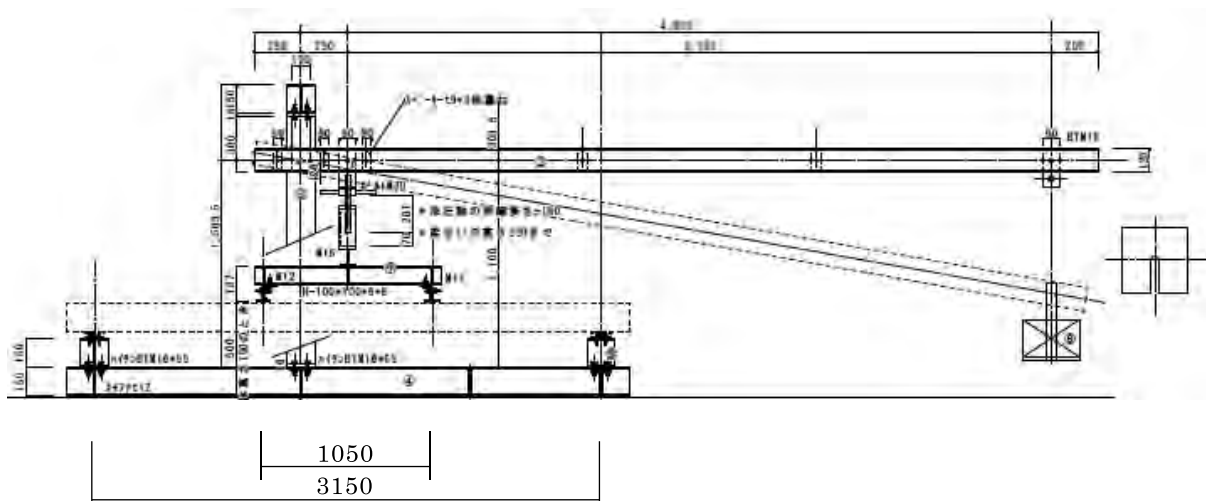


図 1.3-1 モーメントアーム方式のクリープ試験機

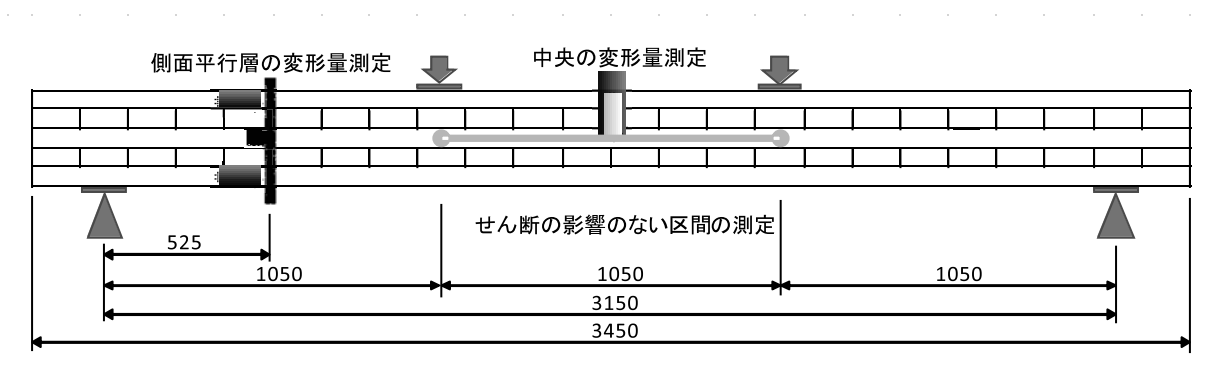


図 1.3-2 側面の変形量測定位置



写真 1.3-1 モーメントアーム式試験機



写真 1.3-2 加力軸水平調整ネジ部



写真 1.3-3 アーム及びおもりの状況



写真 1.3-4 荷重点



写真 1.3-5 支点間変形量測定



写真 1.3-6 荷重点間変形量測定



写真 1.3-7 側面平行層の変形量測定

表 1.3-3 試験体と荷重

試験体No.	モーメント 正負	追加ラミナ 厚さ (mm)	支点・加力ビーム距離 (T)mm	想定変位荷重 (N)	想定変位 (mm)	推定した中立 軸の位置 (mm)	
5L5P-DOL-1	5L5P 強軸	—	250	11027	16.1	62.5	
5L5P-DOL-V \varnothing	5L5P 弱軸	—	650	3817	16.1	62.5	
5L6P-DOL(T)-1	5L6P 強軸	正	25	650	16286	13.4	83.8
5L6P-DOL(T)-2※		負	25	250	16489	13.4	66.3
5L6P-DOL(T)-VI	5L6P 弱軸	正	25	750	3257	13.4	64.8
5L6P-DOL(F)-V \varnothing		負	25	750	3054	13.4	85.3
6L6P-DOL(T)-2	6L6P 強軸	正	25	250	9364	13.4	63.5
6L6P-DOL(F)-1		負	25	250	9364	13.4	86.5
6L6PTN-DOL(T)-1	6L6P 強軸	正	20	250	10462	13.8	63.3
6L6PTN-DOL(F)-1		負	20	250	9131	13.8	81.8
6L6PTN-DOL(T)-VI	6L6P 弱軸	正	20	250	7229	13.8	93.3
6L6PTN-DOL(F)-VI		負	20	250	8180	13.8	51.7

※：非破壊試験では「正」試験用として測定したが、長期面外曲げ試験は「負」で実施した。

1.3.2 評価方法

i) 告示法

基準法第 37 条に関する技術的基準（平成 12 年建設省告示第 1446 号）建築材料の性能評価方法 1.4.2)によると解析はつぎのとおりである。

- ① 経過時間 t 分ごとに測定されたたわみに対する載荷 1 分後のたわみの比（クリープたわみ比 K_t ）を計算し、載荷後 1 分、5 分、10 分、100 分、500 分後および 24 時間ごとに 4 週間測定して、クリープたわみ比の常用対数 $\log_{10}K_t$ と経過時間の常用対数 $\log_{10}t$ との関係について、回帰直線の切片及び傾きを算出する。
- ② 回帰直線上の時間が 50 年に相当するクリープたわみ比 K_{50year} をクリープの調整係数として求める。

$$K_t = d_{1min}/d_{tmin} \quad (1.3-3)$$

$$\log_{10}K_t = e + f \times \log_{10}t \quad (1.3-4)$$

$$K_{50year} = 10^e \times t_{50year}^f = 26280000^f \quad (1.3-5)$$

ここで、 K_t ： t 分後のクリープたわみ比

d_{1min} ：1 分後のたわみ (mm)

d_{tmin} ： t 分後のたわみ (mm)

e ： $\log_{10}K_t$ と $\log_{10}t$ の回帰直線の切片

f ： $\log_{10}K_t$ と $\log_{10}t$ の回帰直線の傾き

t_{50year} ：50 年分の時間 t で 26280000 分

ii) パワー則

パワー則の解析方法^{1.4・3)}は、つぎのとおりである。

$$\log_{10}\delta_c(t) = a\log_{10}t + b \quad (1.3-6)$$

ここで、 $\delta_c(t)$ ： 負荷 t 日経過後のクリープ

a, b ： 定数、ただし b は負荷 1 日後の点に外挿された定数

(5)式で得られた定数 a と b を変換し、次式（パワー則）を得る。

$$\delta_c(t) = At^N \quad (1.3-7)$$

ここで、 A ： $b = \log_{10}A$ により得られる定数。

ただし、 A は負荷 1 日経過後のクリープたわみを意味する。

N ： 定数、ただし、 $a = N$

(6)式をベースとした次式により、クリープ調整係数(δ_{50}/δ_0)を求める。

$$\delta_{50}/\delta_0 = 1 + ct^N \quad (1.3-8)$$

ここで、 δ_{50} ： 50 年後の曲げクリープたわみ

δ_0 ： 初期たわみ

c ： A/δ_0

1.3.3 評価結果

長期面外曲げ試験を 1 月 15 日に開始してから 14 日間の各試験体の、支点間中央変形量と温湿度を図 1.3・2 に、荷重点間中央変形量と温湿度を図 1.3・3 に、側面平行層の変形量と温湿度を図 1.3・4 に示す。支点間中央変形量および荷重点間中央変形は全体に上昇傾向である。側面平行層の変形量は加力点側（上側）外層が木口面方向に動き、支点側（下側）が中心方向に動く傾向を示した。

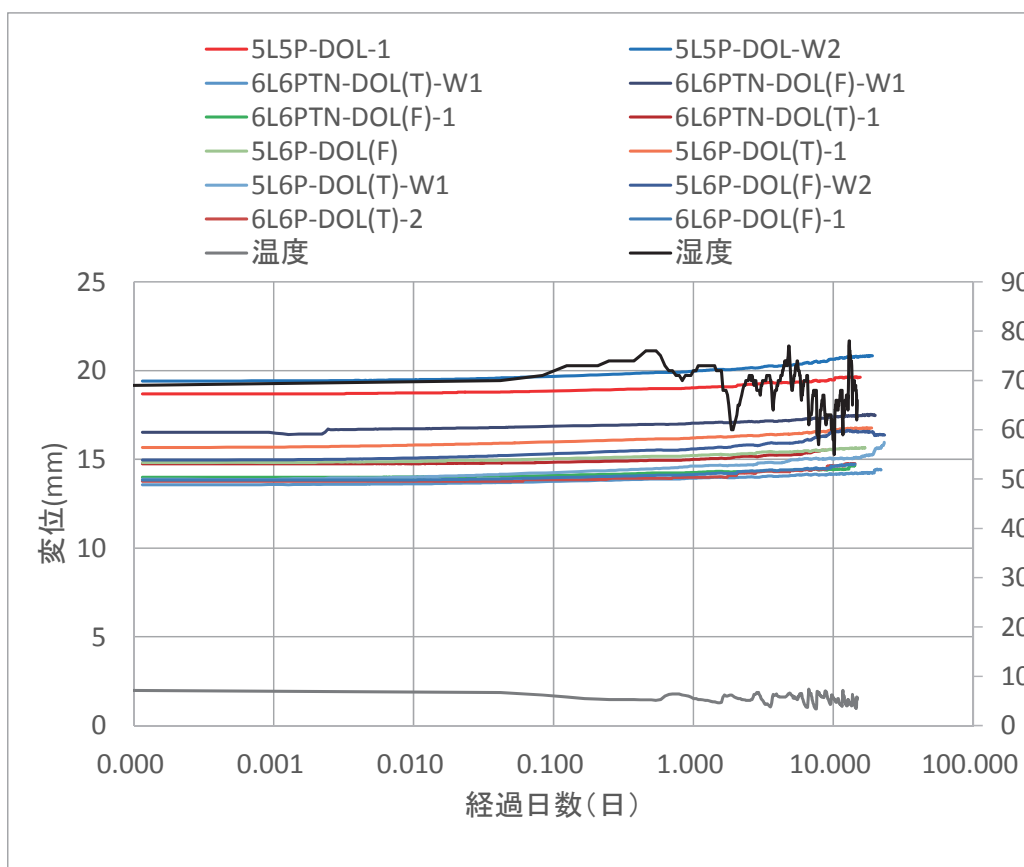


図 1.3-2 支点間中央変形量と温湿度

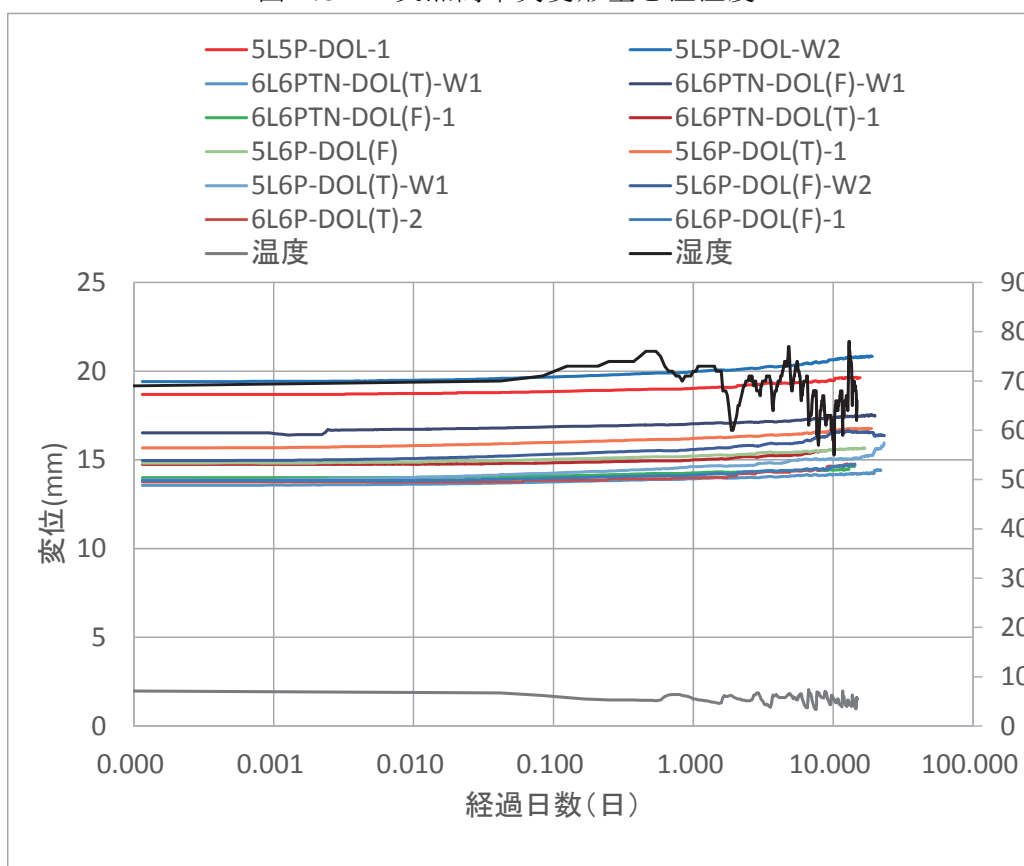


図 1.3-3 荷重点間中央変形量と温湿度

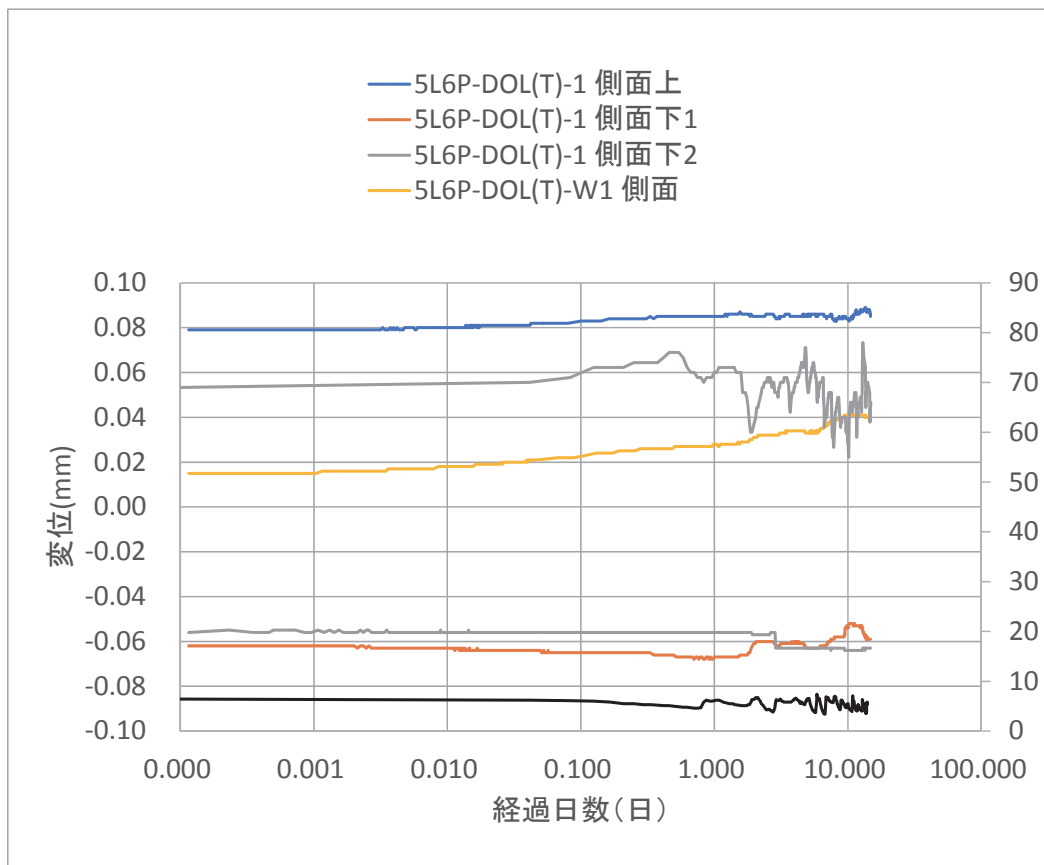


図 1.3-4 側面平行層の変形量と温湿度

つぎに、変形増大係数の評価結果について、表 1.3-4 に支点間中央変形量の解析結果を、表 1.3-5 に荷重点間中央変形量の解析結果を、表 1.3-6 に側面平行層変形量の解析結果を示す。また、それぞれの解析の根拠となった告示法におけるクリープ変形比の常用対数と経過時間の常用対数の関係、及びパワー則におけるクリープ変形量の常用対数と経過時間の常用対数の関係を図 1.3-5 から図 1.3-32 に示す。

1.3.4 まとめ

5 層 5 プライ、5 層 6 プライ、6 層 6 プライの CLT の試験を行った。長期面外曲げ試験を行う前に、縦振動法及びたわみ振動法(T.G.H.法)により非破壊試験を行った。長期面外曲げ試験は、モーメントアーム方式で、非空調の試験室において 1 月 15 日から開始し、14 日間行った。载荷は、非破壊試験の結果から初期のひずみが 14~16mm 程度になる荷重として、3 等分点 4 点荷重方式とした。たわみ量は、せん断の影響のある区間の支点間中央の変形量、せん断の影響のない区間の荷重点間の変形量を測定したが、その他、支点と荷重点中間の側面 2 か所の層間変形量も測定した。

表 1.3-4 支点間中央変形量の解析結果 (28 日間経過時点)

	No.	d_{min}	傾きN	切片logA	$10^{\text{切片logA}}$	d_{50year}	d_{min}/d_{50year}	R	R ²	d_{50year}/d_{min}
告示法	5L5P-DOL-1	18.680	-0.007	0.011	1.025	20.558	0.909	-0.954	0.909	1.101
	5L5P-DOL-W2	19.420	-0.010	0.017	1.039	22.317	0.870	-0.947	0.897	1.149
	6L6PTN-DOL(T)-W1	13.570	-0.008	0.012	1.027	15.096	0.899	-0.899	0.809	1.112
	6L6PTN-DOL(F)-W1	16.520	-0.007	0.008	1.018	18.409	0.897	-0.929	0.863	1.114
	6L6PTN-DOL(T)-1	14.750	-0.010	0.018	1.043	16.734	0.881	-0.925	0.856	1.134
	6L6PTN-DOL(F)-1	14.000	-0.008	0.015	1.035	15.448	0.906	-0.862	0.743	1.103
	5L6P-DOL(T)-1	15.690	-0.009	0.011	1.025	17.746	0.884	-0.970	0.940	1.131
	5L6P-DOL(T)-2※	14.830	-0.008	0.011	1.027	16.525	0.897	-0.966	0.932	1.114
	5L6P-DOL(T)-W1	13.870	-0.016	0.025	1.060	17.253	0.804	-0.834	0.696	1.244
	5L6P-DOL(F)-W2	14.970	-0.013	0.018	1.043	18.009	0.831	-0.927	0.859	1.203
	6L6P-DOL(T)-2	13.760	-0.011	0.022	1.051	15.920	0.864	-0.927	0.860	1.157
	6L6P-DOL(F)-1	13.840	-0.010	0.017	1.040	15.720	0.880	-0.946	0.895	1.136
	No.	δ_0	傾きN	切片logA	$10^{\text{切片logA}}$	δ_{50year}	δ_0/δ_{50year}	R	R ²	δ_{50year}/δ_0
パワー則	5L5P-DOL-1	18.680	0.346	-1.551	0.028	29.055	0.643	0.991	0.982	1.555
	5L5P-DOL-W2	19.420	0.363	-1.450	0.035	37.042	0.524	0.992	0.984	1.907
	6L6PTN-DOL(T)-W1	13.570	0.326	-1.556	0.028	20.827	0.652	0.976	0.954	1.535
	6L6PTN-DOL(F)-W1	16.520	0.217	-0.966	0.108	20.940	0.789	0.990	0.981	1.268
	6L6PTN-DOL(T)-1	14.750	0.452	-2.021	0.010	36.202	0.407	0.981	0.963	2.454
	6L6PTN-DOL(F)-1	14.000	0.389	-1.900	0.013	23.724	0.590	0.971	0.944	1.695
	5L6P-DOL(T)-1	15.690	0.285	-1.227	0.059	23.397	0.671	0.983	0.967	1.491
	5L6P-DOL(T)-2※	14.830	0.355	-1.627	0.024	25.083	0.591	0.974	0.949	1.691
	5L6P-DOL(T)-W1	13.870	0.313	-1.183	0.066	27.707	0.501	0.967	0.935	1.998
	5L6P-DOL(F)-W2	14.970	0.329	-1.267	0.054	29.904	0.501	0.974	0.948	1.998
	6L6P-DOL(T)-2	13.760	0.437	-1.930	0.012	34.377	0.400	0.992	0.984	2.498
	6L6P-DOL(F)-1	13.840	0.374	-1.700	0.020	25.738	0.538	0.993	0.985	1.860

表 1.3-5 荷重点間中央変形量の解析結果 (28 日間経過時点)

	No.	d_{min}	傾きN	切片logA	$10^{\text{切片logA}}$	d_{50year}	d_{min}/d_{50year}	R	R ²	d_{50year}/d_{min}
告示法	5L5P-DOL-1	2.144	-0.007	0.011	1.026	2.342	0.915	-0.938	0.879	1.093
	5L5P-DOL-W2	2.456	-0.010	0.018	1.042	2.778	0.884	-0.913	0.833	1.131
	6L6PTN-DOL(T)-W1	1.640	-0.007	0.014	1.032	1.787	0.918	-0.691	0.477	1.089
	6L6PTN-DOL(F)-W1	1.880	-0.005	0.011	1.026	2.007	0.937	-0.932	0.868	1.068
	6L6PTN-DOL(T)-1	1.638	-0.008	0.017	1.040	1.800	0.910	-0.918	0.842	1.099
	6L6PTN-DOL(F)-1	1.590	-0.007	0.015	1.036	1.737	0.916	-0.847	0.717	1.092
	5L6P-DOL(T)-1	1.834	-0.009	0.010	1.024	2.071	0.885	-0.940	0.884	1.129
	5L6P-DOL(T)-2※									
	5L6P-DOL(T)-W1	1.654	-0.016	0.027	1.063	2.030	0.815	-0.788	0.621	1.227
	5L6P-DOL(F)-W2									
	6L6P-DOL(T)-2	1.530	-0.010	0.019	1.045	1.728	0.885	-0.893	0.798	1.130
	6L6P-DOL(F)-1									
	No.	δ_0	傾きN	切片logA	$10^{\text{切片logA}}$	δ_{50year}	δ_0/δ_{50year}	R	R ²	δ_{50year}/δ_0
パワー則	5L5P-DOL-1	2.144	0.388	-2.724	0.002	3.576	0.600	0.992	0.985	1.668
	5L5P-DOL-W2	2.456	0.440	-2.760	0.002	5.655	0.434	0.997	0.994	2.303
	6L6PTN-DOL(T)-W1	1.640	0.416	-3.039	0.001	2.749	0.597	0.928	0.862	1.676
	6L6PTN-DOL(F)-W1	1.880	0.510	-3.490	0.000	3.854	0.488	0.982	0.965	2.050
	6L6PTN-DOL(T)-1	1.638	0.697	-4.202	0.000	10.924	0.150	0.943	0.890	6.669
	6L6PTN-DOL(F)-1	1.590	0.596	-3.812	0.000	5.663	0.281	0.987	0.974	3.562
	5L6P-DOL(T)-1	1.834	0.305	-2.249	0.006	2.860	0.641	0.971	0.944	1.559
	5L6P-DOL(T)-2※									
	5L6P-DOL(T)-W1	1.654	0.334	-2.244	0.006	3.371	0.491	0.953	0.909	2.038
	5L6P-DOL(F)-W2									
	6L6P-DOL(T)-2	1.530	0.525	-3.350	0.000	5.013	0.305	0.981	0.963	3.277
	6L6P-DOL(F)-1									

☒：測定未実施

表 1.3-6 側面平行層変形量の解析結果 (14 日間経過時点)

	No.		d_{min}	傾きN	切片logA	$10^{\text{切片logA}}$	d_{50year}	d_{min}/d_{50year}	R	R^2	d_{50year}/d_{min}
告示法	5L6P-DOL(T)-1	側面上	0.079	-0.005	-0.010	0.978	0.088	0.898	-0.491	0.241	1.113
		側面下1	-0.062	0.004	-0.015	0.965	-0.060	1.041	0.108	0.012	0.960
		側面下2	-0.055	-0.011	0.002	1.004	-0.066	0.836	-0.395	0.156	1.196
	5L6P-DOL(T)-W1		0.015	-0.106	0.046	1.112	0.083	0.182	-0.963	0.928	5.505
	No.		δ_0	傾きN	切片logA	$10^{\text{切片logA}}$	δ_{50year}	δ_0/δ_{50year}	R	R^2	δ_{50year}/δ_0
パワー則	5L6P-DOL(T)-1	側面上	0.079	0.135	-2.821	0.002	0.015	0.838	0.642	0.412	1.193
		側面下1	-0.062	—	—	—	—	—	—	—	—
		側面下2	-0.055	—	—	—	—	—	—	—	—
	5L6P-DOL(T)-W1		0.015	0.266	-2.768	0.002	0.161	0.085	0.956	0.914	11.746

—：計算不可

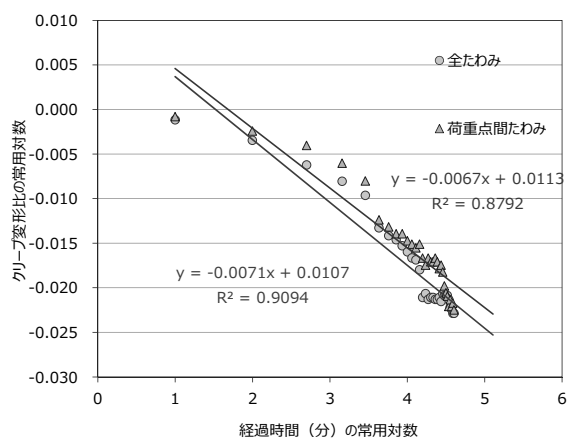


図 1.3-5 5L5P-DOL-1 の告示法評価

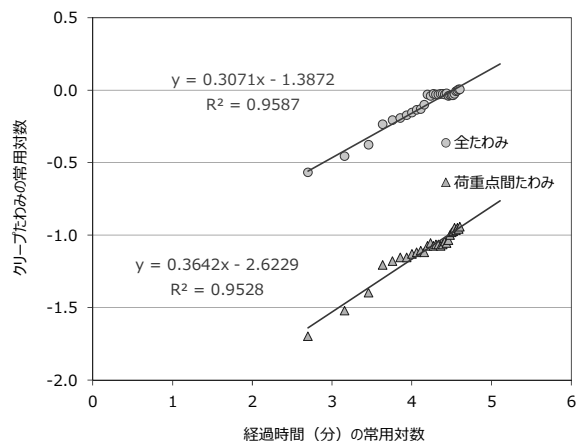


図 1.3-6 5L5P-DOL-1 のパワー則評価

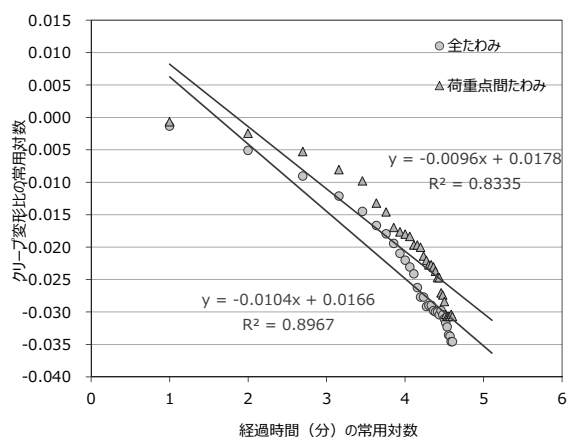


図 1.3-7 5L5P-DOL-W2 の告示法評価

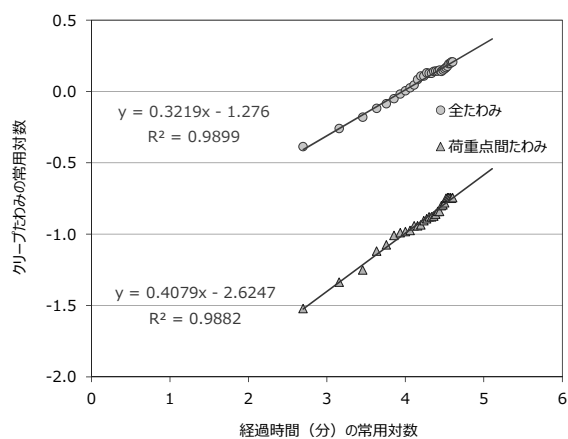


図 1.3-8 5L5P-DOL-W2 のパワー則評価

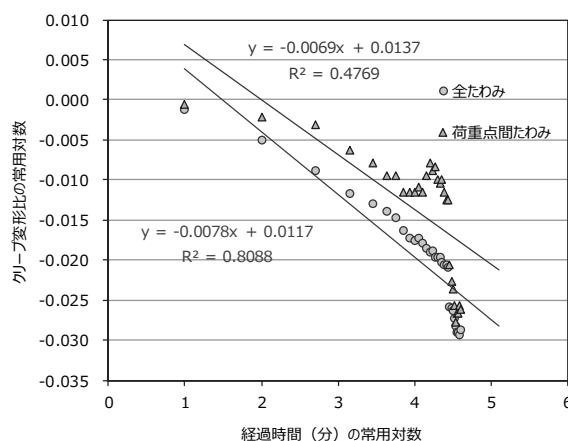


図 1.3-9 6L6PTN-DOL(T)-W1 の告示法評価

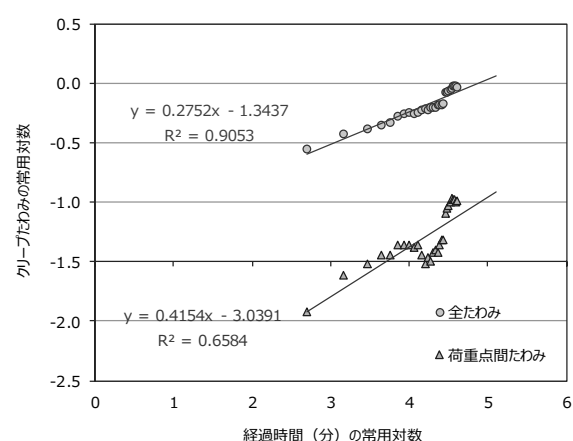


図 1.3-10 6L6PTN-DOL(T)-W1 のパワー則評価

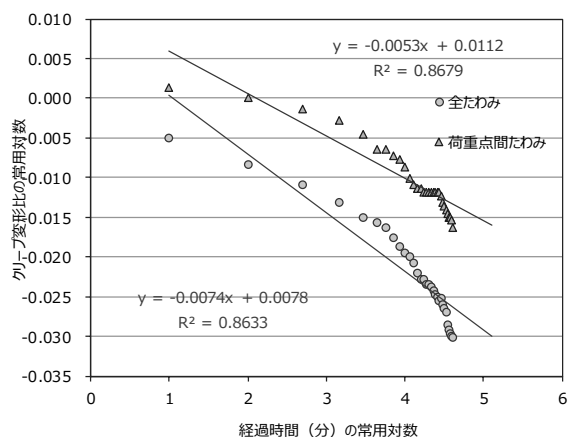


図 1.3-11 6L6PTN-DOL(F)-W1 の告示法評価

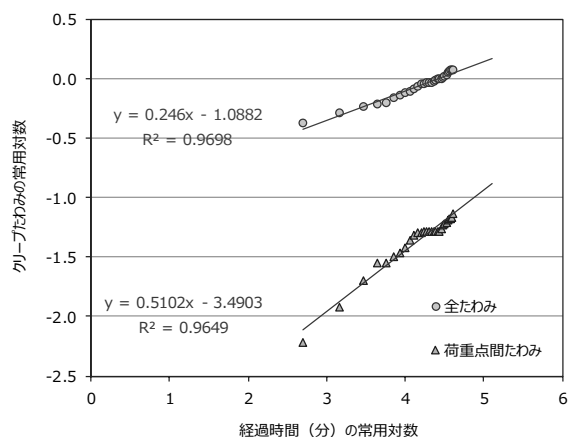


図 1.3-12 6L6PTN-DOL(F)-W1 のパワー則評価

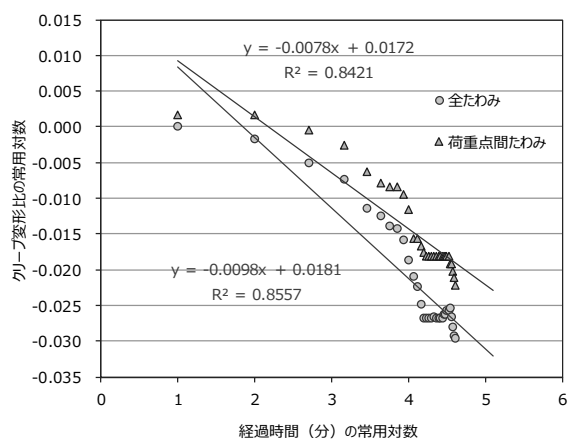


図 1.3-13 6L6PTN-DOL(T)-1 の告示法評価

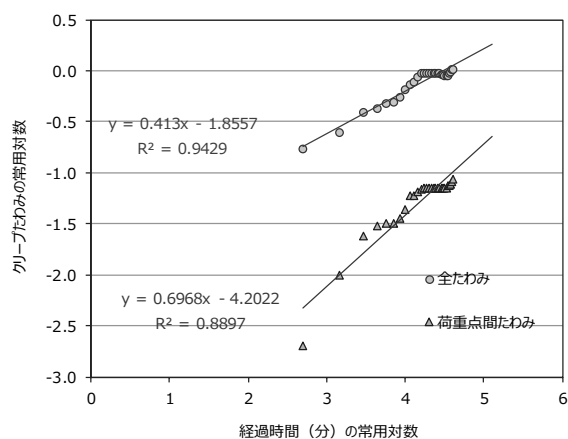


図 1.3-14 6L6PTN-DOL(T)-1 のパワー則評価

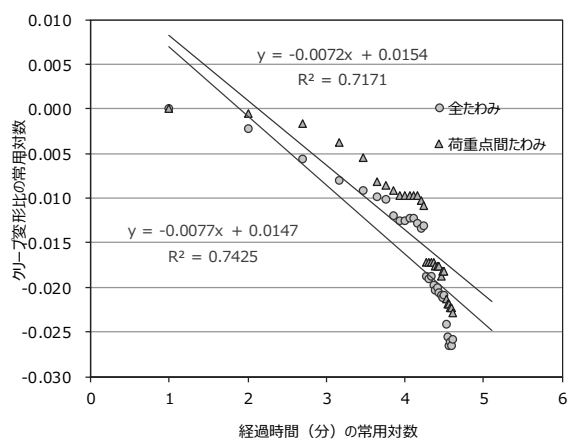


図 1.3-15 6L6PTN-DOL(F)-1 の告示法評価

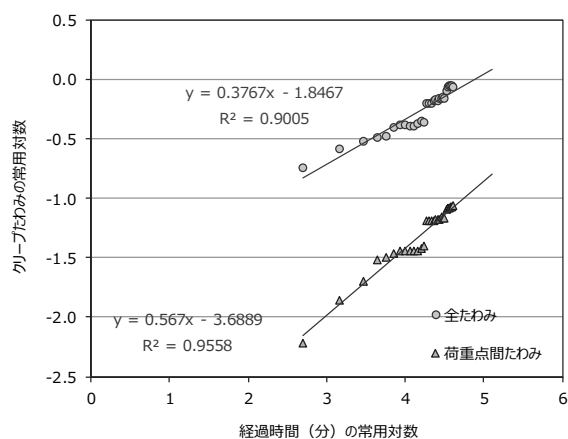


図 1.3-16 6L6PTN-DOL(F)-1 のパワー則評価

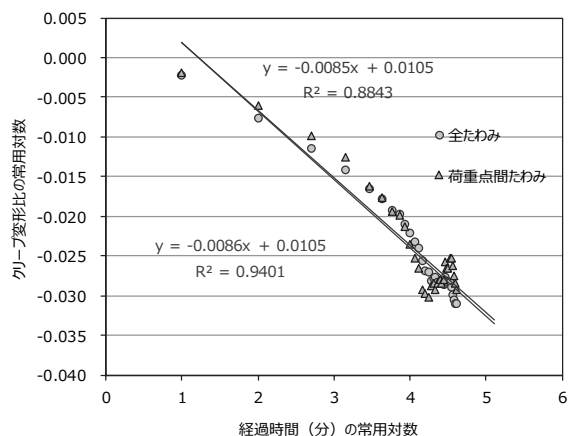


図 1.3-17 5L6P-DOL(T)-1 の告示法評価

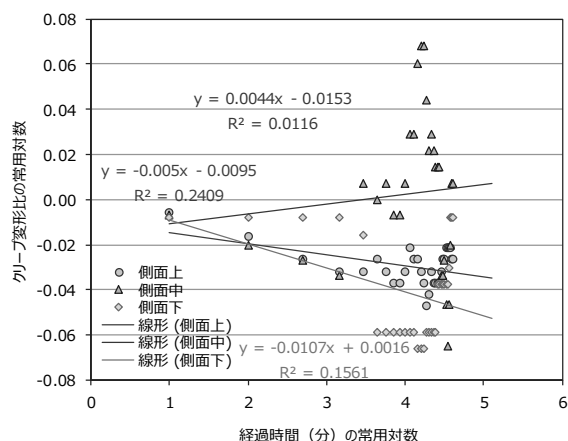


図 1.3-18 5L6P-DOL(T)-1 の側面変形告示法評価

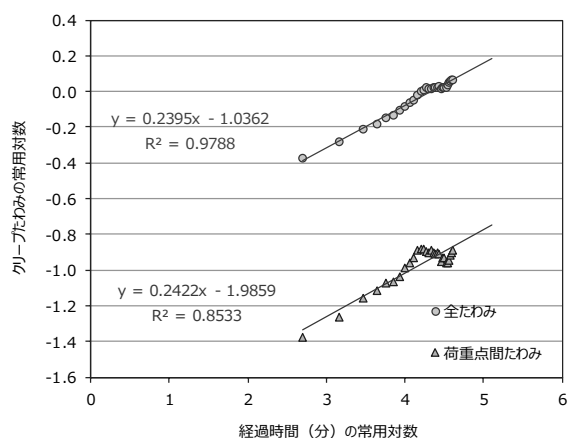


図 1.3-19 5L6P-DOL(T)-1 のパワー則評価

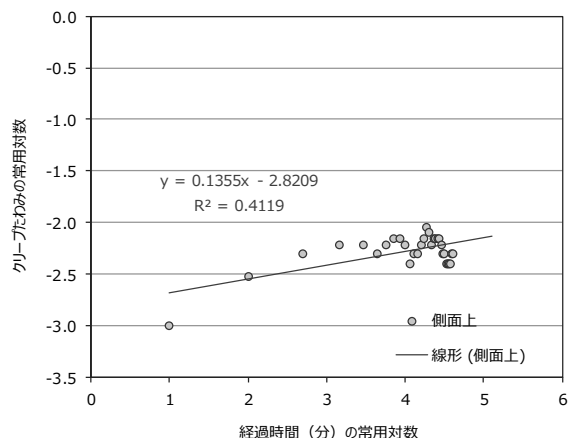


図 1.3-20 5L6P-DOL(T)-1 の側面変形パワー則評価

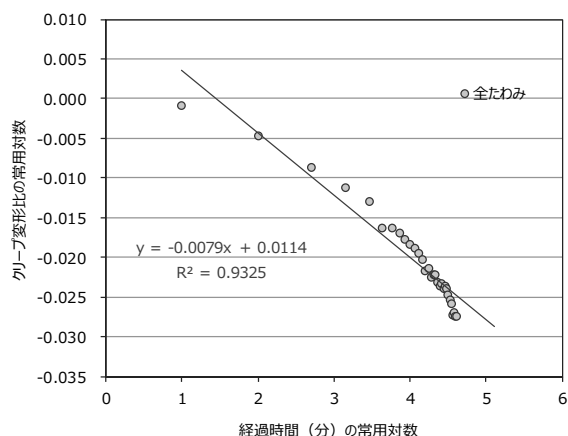


図 1.3-21 5L6P-DOL(F)の告示法評価

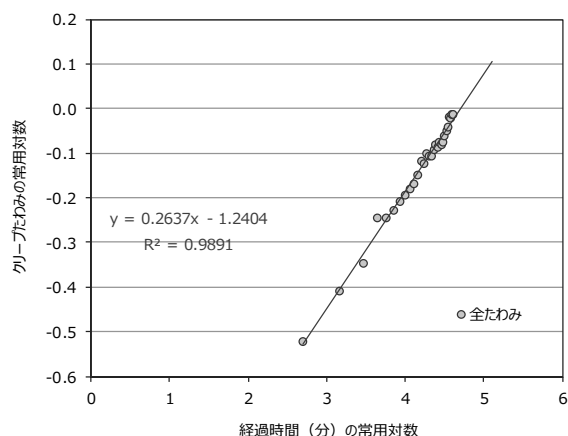


図 1.3-22 5L6P-DOL(F)のパワー則評価

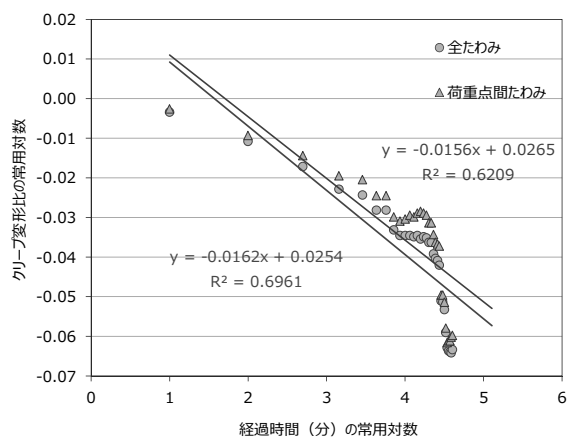


図 1.3-23 5L6P-DOL(T)-W1 の告示法評価

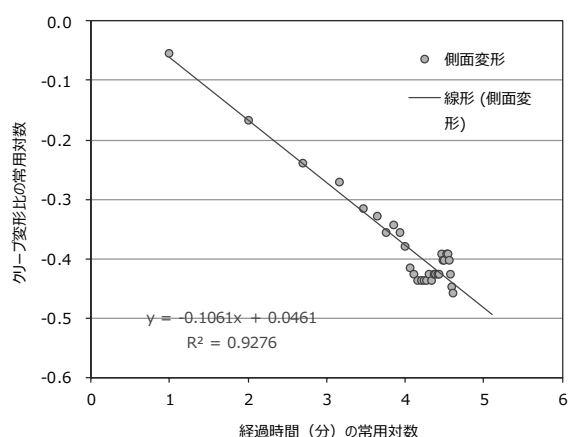


図 1.3-24 5L6P-DOL(T)-W1 の側面変形告示法評価

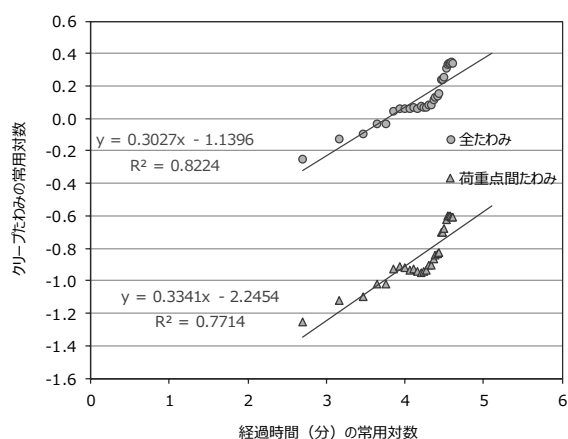


図 1.3-25 5L6P-DOL(T)-W1 のパワー則評価

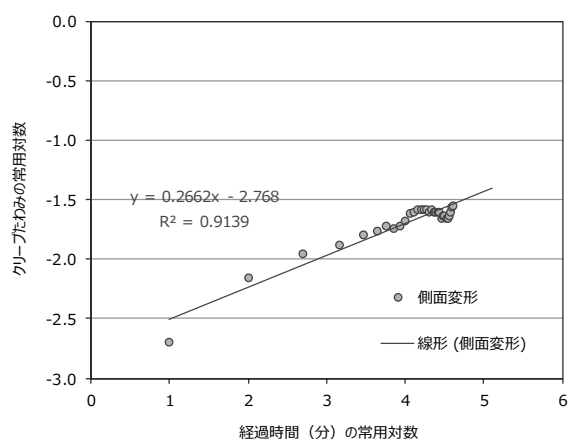


図 1.3-26 5L6P-DOL(T)-W1 の側面変形 パワー則評価

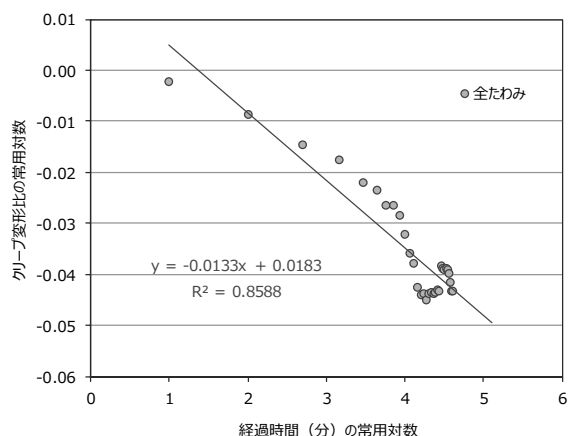


図 1.3-27 5L6P-DOL(F)-W2 の告示法評価

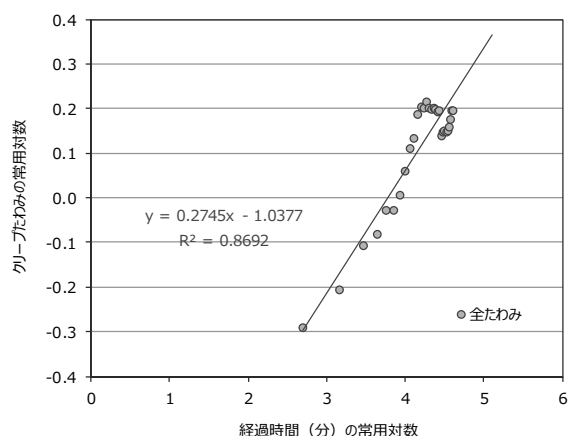


図 1.3-28 5L6P-DOL(F)-W2 のパワー則評価

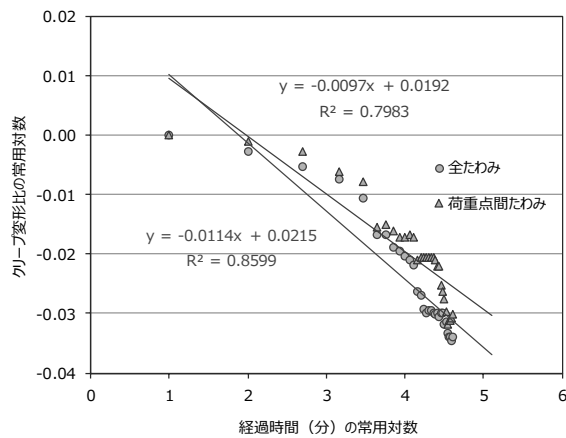


図 1.3-29 6L6P-DOL(T)-2 の告示法評価

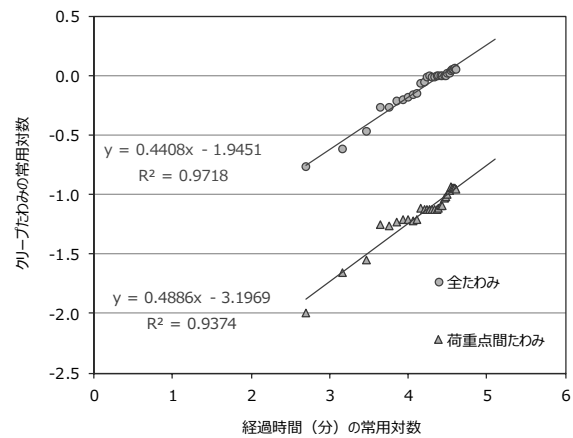


図 1.3-30 6L6P-DOL(T)-2 のパワー則評価

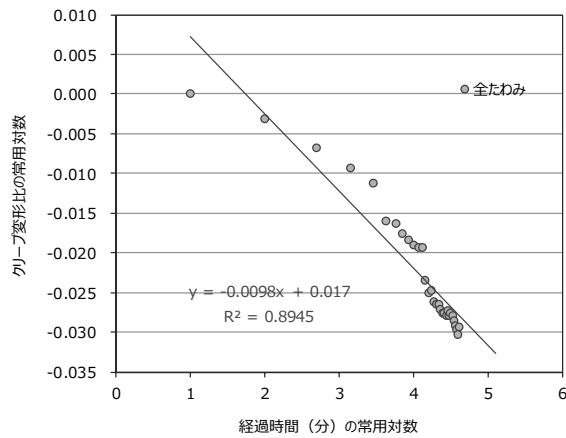


図 1.3-31 6L6P-DOL(F)-1 の告示法評価

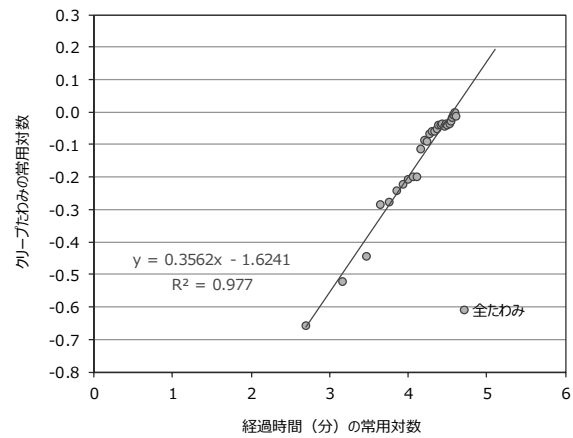


図 1.3-32 6L6P-DOL(F)-1 のパワー則評価

文献

- 1.3-1) 久保島吉貴：未発表資料
- 1.3-2) 日本ツーバイフォー建築協会：“2002 年枠組壁工法建築物構造計算指針”，工業調査会，東京，2002，p187.
- 1.3-3) 日本・住宅木材技術センター：“構造用木材の強度試験マニュアル”，2011. 3, p49-p54

1.4 面外（積層）方向の短期せん断性能

層構成を変動させた CLT の、面外方向への短期せん断性能について、CLT の日本農林規格（JAS）に定める水平せん断試験（短スパン 3 点曲げ型試験）を行った。

載荷の際の加圧板幅は、原則として試験体厚さ(t)と同一とした。せん断スパン比は、加圧板端部間の距離(s)を試験体厚さ(t)で除した値である。

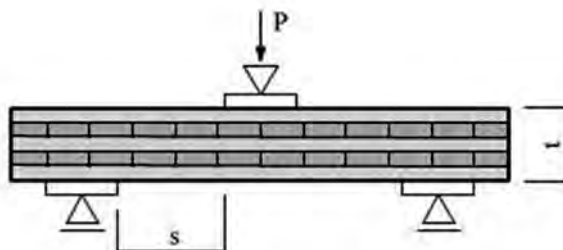
せん断強度 τ (N/mm²)を算出する際は、矩形断面の断面係数 1.5 を乗じた。せん断強度を算出する際のせん断面積は、便宜上、全断面とした。しかしながら例えば 6 層 6 プライ T 方向加力の際の最下層直交層は、直上の平行層にはり付いている状態であり、有効断面積という観点では、除外するなどの考慮が必要であろう。

曲げ破壊した試験体や、曲げ割れ発生にともない載荷を中止した試験体のせん断強度 (τ)については、直前のせん断割れ発生にともなうピーク荷重とした (*を付したせん断強度)。よって最大荷重値ではない。同様に曲げ破壊した試験体でせん断割れ発生によるピーク荷重のないものについてはカッコ書きで最大荷重値を示した ((0.91)*)。

同一ロットで製造された CLT パネルの含水率は、10.4～11.5%であった。

TGH 法による非破壊試験の計算においては、せん断応力分布定数 $S=1.0$ とした。

表 1-4-1 水平せん断試験結果（5 層 5 プライ・強軸・t=125mm・長さ 875mm）



番号	密度 (kg/m ³)	E _{fr}	E _{TGHf}	G _{TGHf}	s/t	τ	破壊 モード
OSJ-5L5P-7-1	387	5.74	7.13	0.147	1.50	2.30	S
OSJ-5L5P-7-2	395	5.59	6.20	0.172	1.50	2.35	S
OSJ-5L5P-7-3	381	5.27	6.25	0.150	1.50	2.49	S
平均値	388	5.53	6.53	0.156	—	2.38	—
標準偏差	7	0.24	0.52	0.014	—	0.099	—
変動係数	1.7	4.3	8.0	8.7	—	4.17	—

E_{fr}：縦振動法による縦弾性係数（単位：kN/mm²）

E_{TGHf}：たわみ振動法による面外方向の曲げヤング係数（単位：kN/mm²）

G_{TGHf}：たわみ振動法による面外方向のせん断弾性係数（単位：kN/mm²）

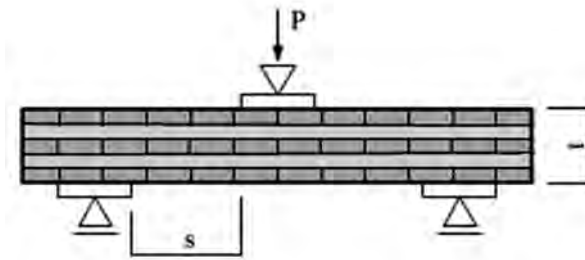
s/t：せん断スパン比（M/Qd に同じ）

τ ：せん断強度（単位：N/mm²）

破壊モード S：せん断破壊，B：曲げ破壊

加圧板幅：125mm

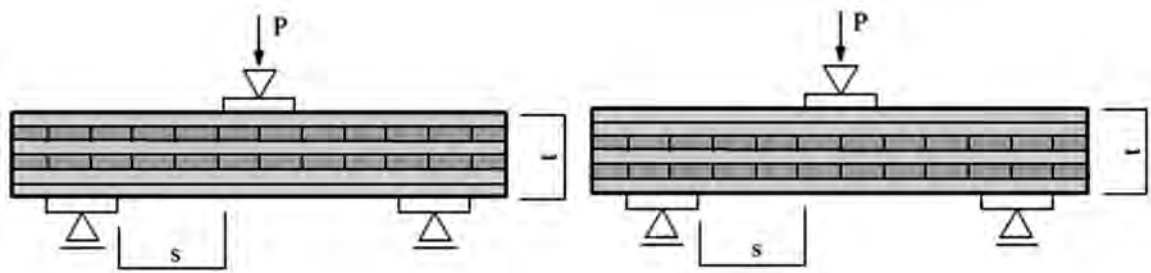
表 1-4-2 水平せん断試験結果（5 層 5 プライ・弱軸・ $t=125\text{mm}$ ・長さ 875mm）



番号	密度 (kg/m^3)	E _{fr}	E _{TGHf}	G _{TGHf}	s/t	τ	破壊 モード
OSJ-5L5P-7W-1	417	4.17	1.99	0.148	1.50	1.29	S
OSJ-5L5P-7W-2	401	3.52	1.74	0.151	1.50	1.35*	B
OSJ-5L5P-7W-3	405	3.42	1.65	0.149	1.50	1.03*	S
平均値	408	3.70	1.79	0.149	—	1.22	—
標準偏差	8	0.41	0.17	0.002	—	0.170	—
変動係数	2.0	11.0	9.7	1.2	—	13.84	—

加圧板幅：125mm，（脚注は表 1-4-1 に同じ），*：せん断割れ発生時のピーク荷重

表 1-4-3 水平せん断試験結果（5 層 6 プライ・強軸・ $t=150\text{mm}$ ・長さ 875mm）



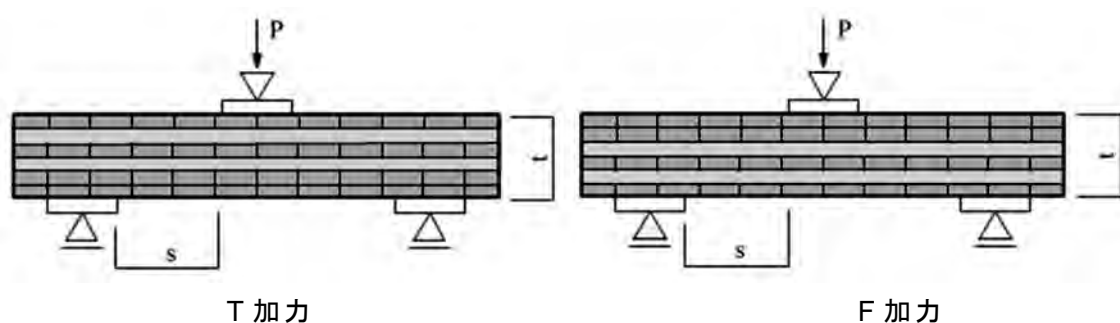
T 加力

F 加力

番号	密度 (kg/m^3)	E _{fr}	E _{TGHf}	G _{TGHf}	s/t	τ	破壊 モード
OSJ-5L6P-7T-1	399	6.44	6.33	0.232	1.25	2.83	S
OSJ-5L6P-7T-2	404	6.07	6.11	0.239	1.25	2.46	S
OSJ-5L6P-7T-3	410	6.57	6.42	0.238	1.25	2.60	S
OSJ-5L6P-7T-4	401	6.36	6.80	0.241	1.25	2.69	S
平均値	403	6.36	6.41	0.237	—	2.65	—
標準偏差	5	0.21	0.29	0.004	—	0.157	—
変動係数	1.3	3.3	4.5	1.6	—	5.92	—
OSJ-5L6P-7F-1	397	6.15	5.97	0.229	1.25	2.69*	S
OSJ-5L6P-7F-2	410	6.14	6.07	0.239	1.25	2.80	S
OSJ-5L6P-7F-3	407	6.26	4.55	0.304	1.25	3.03	S
OSJ-5L6P-7F-4	407	6.77	7.99	0.224	1.25	3.06	S
平均値	405	6.33	6.14	0.249	—	2.89	—
標準偏差	6	0.30	1.42	0.037	—	0.180	—
変動係数	1.4	4.7	23.0	14.8	—	6.23	—

加圧板幅：125mm，（脚注は表 1-4-1 に同じ）*：せん断割れ発生時のピーク荷重

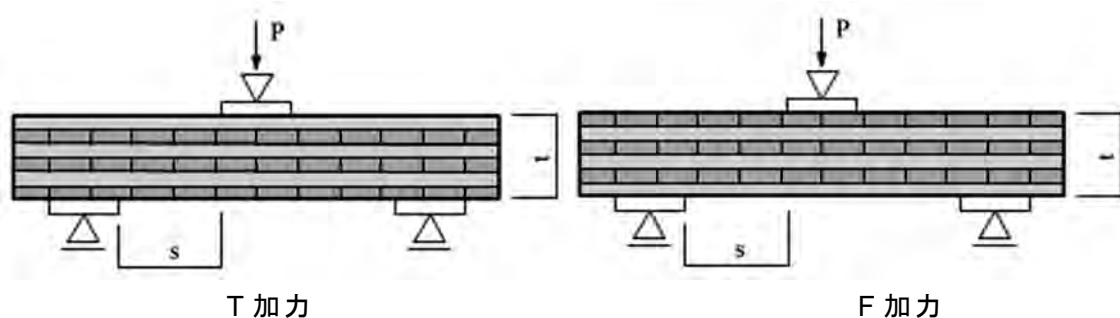
表 1-4-4 水平せん断試験結果 (5 層 6 プライ・弱軸・ $t=150\text{mm}$ ・長さ 875mm)



番号	密度 (kg/m^3)	E _{fr}	E _{TGHf}	G _{TGHf}	s/t	τ	破壊 モード
OSJ-5L6P-7TW-1	388	2.13	0.95	0.118	1.25	0.96	S
OSJ-5L6P-7TW-2	408	3.00	1.17	0.133	1.25	1.05	S
平均値	398	2.57	1.06	0.125	—	1.01	—
標準偏差	—	—	—	—	—	—	—
変動係数	—	—	—	—	—	—	—
OSJ-5L6P-7FW-1	389	2.11	0.95	0.109	1.25	(0.91)*	B
OSJ-5L6P-7FW-2	399	2.84	1.07	0.130	1.25	1.07	S
平均値	394	2.48	1.01	0.120	—	—	—
標準偏差	—	—	—	—	—	—	—
変動係数	—	—	—	—	—	—	—

加圧板幅：125mm，(脚注は表 1-4-1 に同じ)，(*)：曲げ破壊・せん断割れピークなし

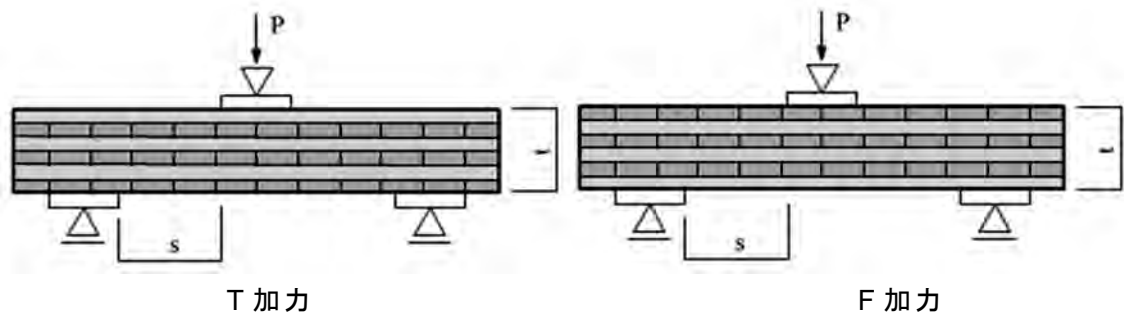
表 1-4-5 水平せん断試験結果 (6 層 6 プライ・強軸・ $t=150\text{mm}$ ・長さ 875mm)



番号	密度 (kg/m^3)	E _{fr}	E _{TGHf}	G _{TGHf}	s/t	τ	破壊 モード
OSJ-6L6P-7T-1	397	4.75	3.48	0.175	1.25	2.06	S
OSJ-6L6P-7T-2	410	4.76	3.23	0.171	1.25	1.95	S
OSJ-6L6P-7F-1	407	4.81	3.65	0.166	1.25	2.09	S
平均値	410	4.77	3.45	0.171	—	2.03	—
標準偏差	5	0.03	0.21	0.004	—	0.072	—
変動係数	1.3	0.6	6.2	2.5	—	3.55	—

加圧板幅：125mm，(脚注は表 1-4-1 に同じ)

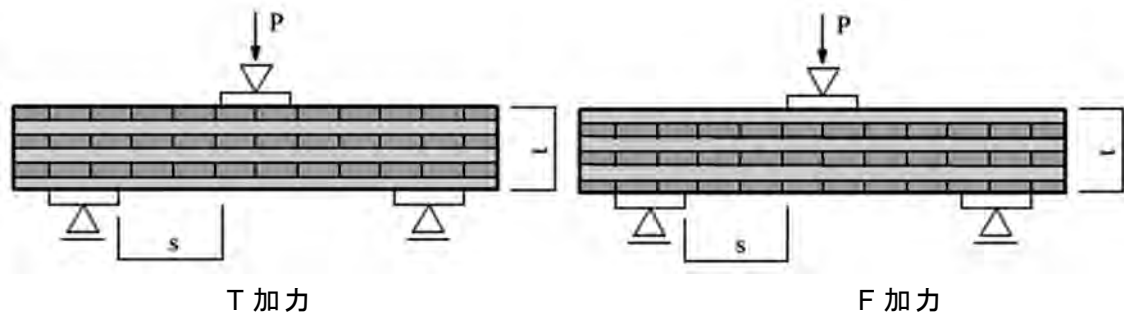
表 1-4-6 水平せん断試験結果（6層6プライ・強軸・ $t=145\text{mm}$ ・長さ 875mm）



番号	密度 (kg/m^3)	E _{fr}	E _{TGHf}	G _{TGHf}	s/t	τ	破壊 モード
OSJ-6L6P-7TNT-1	412	4.99	3.60	0.190	1.29	2.05	S
OSJ-6L6P-7TNF-1	409	4.86	3.07	0.200	1.29	2.11	S
平均値	411	4.93	3.34	0.195	—	—	—
標準偏差	—	—	—	—	—	—	—
変動係数	—	—	—	—	—	—	—

加圧板幅：125mm，（脚注は表 1-4-1 に同じ）

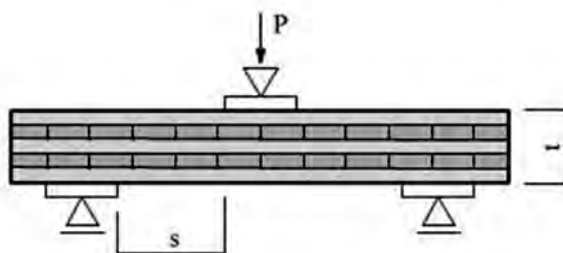
表 1-4-7 水平せん断試験結果（6層6プライ・弱軸・ $t=145\text{mm}$ ・長さ 875mm）



番号	密度 (kg/m^3)	E _{fr}	E _{TGHf}	G _{TGHf}	s/t	τ	破壊 モード
OSJ-6L6P-7TNTW-1	407	4.63	3.29	0.171	1.29	2.14	S
OSJ-6L6P-7TNFW-1	410	4.57	3.00	0.180	1.29	1.91	S
平均値	408	4.60	3.15	0.176	—	—	—
標準偏差	—	—	—	—	—	—	—
変動係数	—	—	—	—	—	—	—

加圧板幅：125mm，（脚注は表 1-4-1 に同じ）

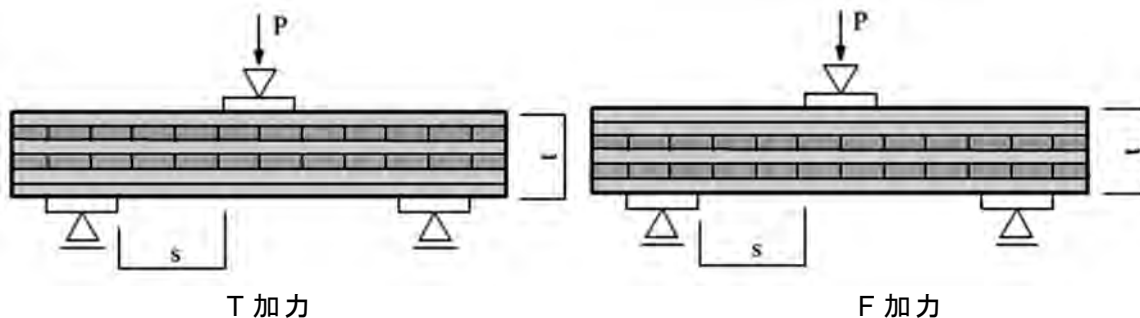
表 1-4-8 水平せん断試験結果 (5 層 5 プライ・強軸・ $t=125\text{mm}$ ・長さ 1,050mm)



番号	密度 (kg/m^3)	E_{fr}	E_{TGHf}	G_{TGHf}	s/t	τ	破壊 モード
OSJ-5L5P-8.4-1	420	5.57	6.44	0.214	1.8	2.36	S
OSJ-5L5P-8.4-2	411	5.77	7.08	0.192	1.8	2.33	S
OSJ-5L5P-8.4-3	407	5.25	6.75	0.180	1.8	1.97*	S
平均値	413	5.53	6.76	0.195	—	2.22	—
標準偏差	6	0.26	0.32	0.018	—	0.218	—
変動係数	1.6	4.7	4.7	9.1	—	9.82	—

* 試験スパン：750mm(5 層 5 プライ 125mm 厚に 25mm 厚の外層を追加した 150mm 厚の 5 倍)
加圧板幅：150mm, (脚注は表 1-4-1 に同じ), *: せん断割れ発生時のピーク荷重

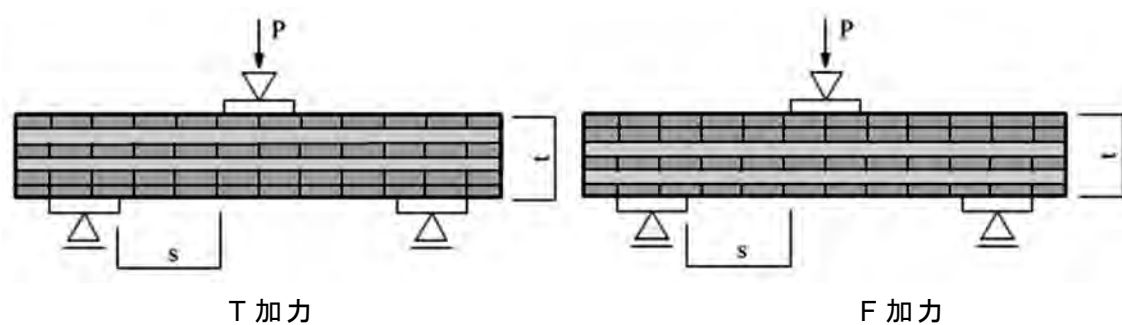
表 1-4-9 水平せん断試験結果 (5 層 6 プライ・強軸・ $t=150\text{mm}$ ・長さ 1,050mm)



番号	密度 (kg/m^3)	E_{fr}	E_{TGHf}	G_{TGHf}	s/t	τ	破壊 モード
OSJ-5L6P-8.4T-1	410	6.09	4.94	0.254	1.5	2.18	S
OSJ-5L6P-8.4T-2	400	6.33	5.38	0.253	1.5	2.41	S
OSJ-5L6P-8.4T-3	411	6.51	6.04	0.252	1.5	2.08	S
平均値	407	6.31	5.45	0.253	—	2.22	—
標準偏差	6	0.21	0.55	0.001	—	0.172	—
変動係数	1.6	3.3	10.2	0.4	—	7.74	—
OSJ-5L6P-8.4F-1	397	6.25	5.59	0.243	1.5	2.51	S
OSJ-5L6P-8.4F-2	406	6.12	5.31	0.258	1.5	2.50	S
OSJ-5L6P-8.4F-3	401	6.42	5.70	0.247	1.5	2.39	S
平均値	401	6.27	5.54	0.249	—	2.47	—
標準偏差	4	0.15	0.20	0.007	—	0.066	—
変動係数	1.1	2.4	3.6	3.0	—	2.69	—

* 試験スパン：750mm, 加圧板幅：150mm, (脚注は表 1-4-1 に同じ)

表 1-4-10 水平せん断試験結果（5層6プライ・弱軸・ $t=150\text{mm}$ ・長さ 1,050mm）

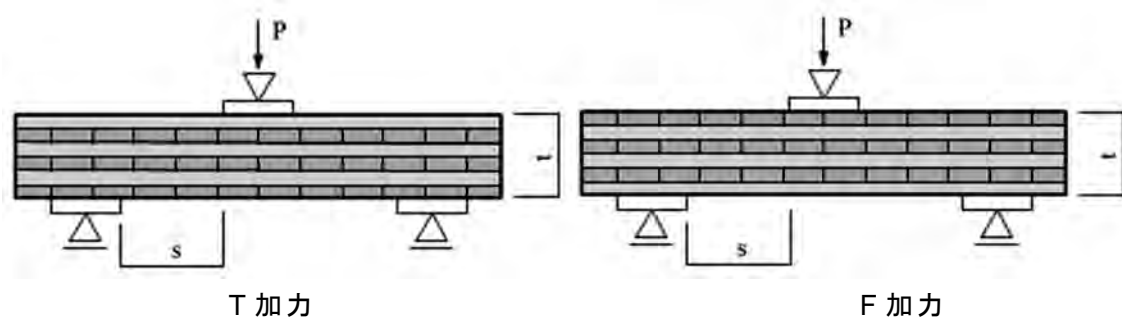


番号	密度 (kg/m^3)	E _{fr}	E _{TGHf}	G _{TGHf}	s/t	τ	破壊 モード
OSJ-5L6P-8.4TW-1	397	2.76	1.29	0.131	1.5	0.99	S
OSJ-5L6P-8.4TW-2	401	2.77	1.29	0.129	1.5	1.01	S
OSJ-5L6P-8.4TW-3	395	2.70	1.28	0.128	1.5	0.93	S
平均値	398	2.75	1.29	0.129	—	0.98	—
標準偏差	3	0.04	0.005	0.001	—	0.041	—
変動係数	0.8	1.3	0.4	1.1	—	4.18	—
OSJ-5L6P-8.4FW-1	391	2.67	1.29	0.126	1.5	1.11	S
OSJ-5L6P-8.4FW-2	398	2.63	1.22	0.127	1.5	1.11	S
OSJ-5L6P-8.4FW-3	403	2.61	1.24	0.130	1.5	1.02	S
平均値	397	2.63	1.25	0.128	—	1.08	—
標準偏差	6	0.03	0.03	0.002	—	0.053	—
変動係数	1.6	1.3	2.7	1.8	—	4.9	—

* 試験スパン：750mm,

加圧板幅：150mm,（脚注は表 1-4-1 に同じ）

表 1-4-11 水平せん断試験結果（6 層 6 プライ・強軸・ $t=150\text{mm}$ ・長さ 1,050mm）



番号	密度 (kg/m^3)	E_{fr}	E_{TGHf}	G_{TGHf}	s/t	τ	破壊 モード
OSJ-6L6P-8.4T-1	394	4.84	3.32	0.139	1.5	1.70	S
OSJ-6L6P-8.4T-2	408	6.00	3.97	0.146	1.5	1.80	S
OSJ-6L6P-8.4T-3	389	4.71	3.61	0.143	1.5	1.57	S
平均値	397	5.18	3.63	0.143	—	1.69	—
標準偏差	10	0.71	0.32	0.003	—	0.116	—
変動係数	2.5	13.7	8.8	2.4	—	6.85	—
OSJ-6L6P-8.4F-1	394	4.77	3.45	0.140	1.5	1.66	S
OSJ-6L6P-8.4F-2	389	4.75	3.68	0.140	1.5	1.86	S
OSJ-6L6P-8.4F-3	396	5.12	3.59	0.143	1.5	1.62	S
平均値	393	4.88	3.57	0.141	—	1.71	—
標準偏差	4	0.21	0.11	0.002	—	0.128	—
変動係数	1.0	4.2	3.2	1.3	—	7.49	—

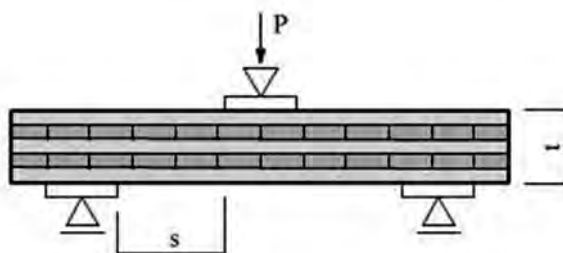
* 試験スパン：750mm(5 層 5 プライ 125mm 厚に 25mm 厚の外層を追加した 150mm 厚の 5 倍)
加圧板幅：150mm, (脚注は表 1-4-1 に同じ)

ここで、5 層 6 プライ・強軸試験体のせん断強度について加力方向別に比較すると、以下の傾向が認められた。

875mm : T 方向 (引張(下)側に平行層 2 層) 2.65 (N/mm^2)
F 方向 (圧縮(上)側に平行層 2 層) 2.89 (N/mm^2) 9%UP
1,050mm : T 方向 (引張(下)側に平行層 2 層) 2.22 (N/mm^2)
F 方向 (圧縮(上)側に平行層 2 層) 2.47 (N/mm^2) 11%UP

解析においては、ラミナ各層に作用するせん断応力の分布は同一であったが、どちらの長さの試験体でも圧縮側に平行層ラミナが配置された F 方向加力の方が、約 1 割程度せん断強度の上昇が認められた。この理由としては、中立軸位置との関係から、T 加力の方が特定の直行層に破壊が集中したからではないかと推測されるが、詳細は不明である。

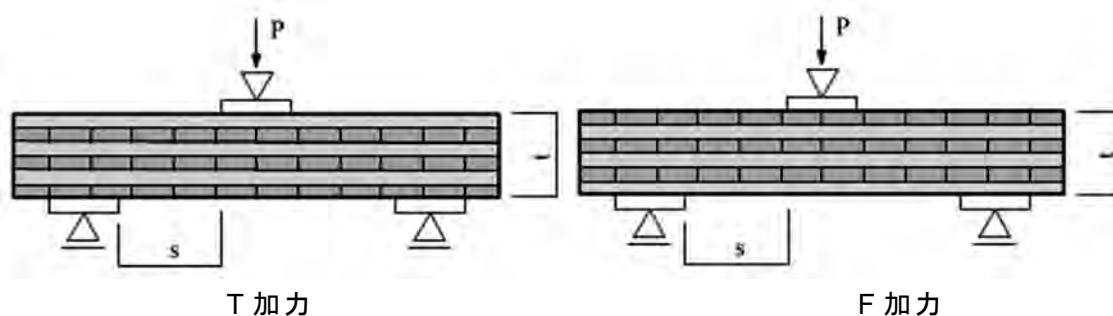
表 1-4-12 水平せん断試験結果（5 層 5 プライ・強軸・ $t=125\text{mm}$ ・長さ 1,050mm）



番号	密度 (kg/m^3)	E_{fr}	E_{TGHf}	G_{TGHf}	s/t	τ	破壊 モード
OSJ-5L5P-8.1-1	394	5.60	5.87	0.181	1.7	2.09*	S
OSJ-5L5P-8.1-2	389	5.62	5.51	0.177	1.7	1.89	S
OSJ-5L5P-8.1-3	386	5.49	5.86	0.184	1.7	2.04	S
平均値	390	5.57	5.75	0.181	—	2.01	—
標準偏差	4.04	0.07	0.21	0.004	—	0.106	—
変動係数	1.0	1.3	3.6	1.9	—	5.3	—

* 試験スパン：725mm(5 層 5 プライ 125mm 厚に 20mm 厚の外層を追加した 145mm 厚の 5 倍)
加圧板幅：150mm, (脚注は表 1-4-1 に同じ), *: せん断割れ発生時のピーク荷重

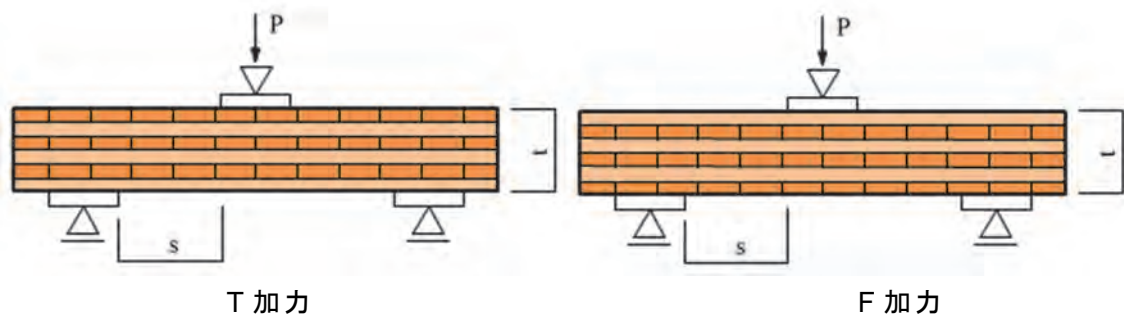
表 1-4-13 水平せん断試験結果（6 層 6 プライ・強軸・ $t=145\text{mm}$ ・長さ 1,015mm）



番号	密度 (kg/m^3)	E_{fr}	E_{TGHf}	G_{TGHf}	s/t	τ	破壊 モード
OSJ-6L6P-8.1TNT-1	413	5.39	4.23	0.176	1.47	1.75	S
OSJ-6L6P-8.1TNT-2	417	5.33	4.17	0.187	1.47	2.02	S
平均値	415	5.36	4.20	0.181	—	1.88	—
標準偏差	—	—	—	—	—	—	—
変動係数	—	—	—	—	—	—	—
OSJ-6L6P-8.1TNF-1	396	5.18	3.75	0.166	1.47	2.04	S
OSJ-6L6P-8.1TNF-2	415	5.15	4.15	0.188	1.47	2.12	S
平均値	406	5.17	3.95	0.177	—	2.08	—
標準偏差	—	—	—	—	—	—	—
変動係数	—	—	—	—	—	—	—

* 試験スパン：725mm, 加圧板幅：150mm, (脚注は表 1-4-1 に同じ)

表 1-4-14 水平せん断試験結果（6層6プライ・弱軸・ $t=145\text{mm}$ ・長さ 1,015mm）



番号	密度 (kg/m^3)	E_{fr}	E_{TGHf}	G_{TGHf}	s/t	τ	破壊 モード
OSJ-6L6P-8.1TNTW-1	410	4.55	3.46	0.171	1.47	1.84	S
OSJ-6L6P-8.1TNTW-2	408	4.76	3.45	0.171	1.47	1.73	S
平均値	409	4.66	3.46	0.171	—	1.78	—
標準偏差	—	—	—	—	—	—	—
変動係数	—	—	—	—	—	—	—
OSJ-6L6P-8.1TNFW-1	408	4.53	3.47	0.171	1.47	1.65	S
OSJ-6L6P-8.1TNFW-2	403	4.65	3.37	0.161	1.47	1.65	S
平均値	406	4.59	3.42	0.166	—	1.65	—
標準偏差	—	—	—	—	—	—	—
変動係数	—	—	—	—	—	—	—

* 試験スパン：725mm，加圧板幅：150mm，（脚注は表 1-4-1 に同じ）

[加力スパン 625mm]



写真 1-4-1 5L5P 強軸・875mm



写真 1-4-2 5L5P 弱軸・875mm



写真 1-4-3 5L6P 強軸 T 方向・875mm



写真 1-4-4 5L6P 強軸 F 方向・875mm

[加力スパン 750mm]

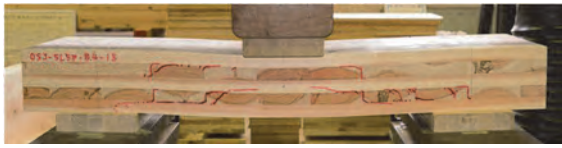


写真 1-4-5 5L5P 強軸・1,050mm

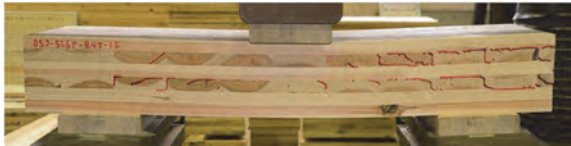


写真 1-4-6 5L6P 強軸 T 方向・1,050mm

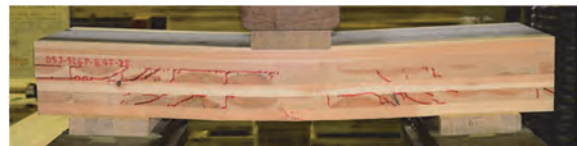


写真 1-4-7 5L6P 強軸 F 方向・1,050mm



写真 1-4-8 5L6P 弱軸 T 方向・1,050mm



写真 1-4-9 5L6P 弱軸 F 方向・1,050mm

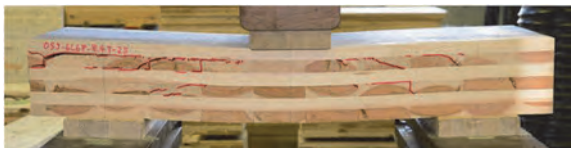


写真 1-4-10 6L6P 強軸 T 方向・1,050mm



写真 1-4-11 6L6P 強軸 F 方向・1,050mm

[加力スパン 725mm]



写真 1-4-12 5L5P 強軸・1,050mm



写真 1-4-13 6L6P 強軸 T 方向・1,015mm

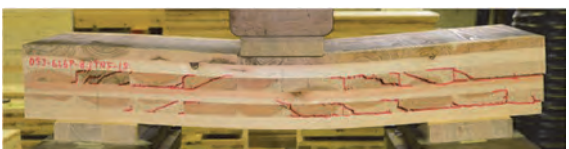


写真 1-4-14 6L6P 強軸 F 方向・1,015mm



写真 1-4-15 6L6P 弱軸 T 方向・1,015mm



写真 1-4-16 6L6P 弱軸 F 方向・1,015mm

1.5 座屈性能

1.5.1 概要

CLT を CLT パネル工法等の壁を構成する要素として用いる場合、その外層の片面に燃えしろに相当する挽板を付加したり、意匠上の役割を有する仕上げの木材を付加したりする可能性がある。このように CLT の片面に挽板などの材を付加することにより、CLT の断面構成は非対称となる。一般に座屈耐力は、荷重が部材の剛心に作用する場合（偏心がない場合）のほうが、荷重が部材の剛心からずれた位置に作用する場合（偏心がある場合）よりも高くなる。言い換えると、荷重の作用点が剛心に対して偏心している場合の座屈荷重は、偏心していない場合の座屈荷重よりも小さくなる。

本節では、非対称断面構成を有する CLT の座屈性状を実験により確認し、当該 CLT を鉛直荷重を支持する壁要素として用いる場合の座屈耐力の考え方について検討した。

1.5.2 試験方法

(1)試験体

試験体は 14 種類であり、以下のように整理される。

細長比：55、CLT：強軸方向

- ① 5 層 5 プライ強軸の試験体（ $\lambda=55$ ）
- ② 5 層 5 プライ強軸の外層片側に M60 の挽板（厚さ 25mm）を強軸方向に付加した試験体
- ③ 5 層 5 プライ強軸の外層片側に M60 の挽板（厚さ 25mm）を弱軸方向に付加した試験体
- ④ 5 層 5 プライ強軸の外層片側に M60 の挽板（厚さ 20mm）を弱軸方向に付加した試験体

細長比：55、CLT：弱軸方向

- ⑤ 5 層 5 プライ弱軸の試験体
- ⑥ 5 層 5 プライ弱軸の外層片側に M60 の挽板（厚さ 25mm）を弱軸方向に付加した試験体
- ⑦ 5 層 5 プライ弱軸の外層片側に M60 の挽板（厚さ 20mm）を弱軸方向に付加した試験体

細長比：90、CLT：強軸方向

- ⑧ 5 層 5 プライ強軸の試験体
- ⑨ 5 層 5 プライ強軸の外層片側に M60 の挽板（厚さ 25mm）を強軸方向に付加した試験体
- ⑩ 5 層 5 プライ強軸の外層片側に M60 の挽板（厚さ 25mm）を弱軸方向に付加した試験体
- ⑪ 5 層 5 プライ強軸の外層片側に M60 の挽板（厚さ 20mm）を弱軸方向に付加した試験体

細長比：90、CLT：弱軸方向

- ⑫ 5 層 5 プライ弱軸の試験体
- ⑬ 5 層 5 プライ弱軸の外層片側に M60 の挽板（厚さ 25mm）を弱軸方向に付加した試験体

⑭ 5層5プライ弱軸の外層片側に M60 の挽板（厚さ 20mm）を弱軸方向に付加した試験体

試験体の概念図を図 1.5-1 に示す。図 1.5-1(a)は強軸方向の 5 層 5 プライの CLT であり、図 1.5-1(c)はその外層に 25mm 厚の挽き板を強軸方向に付加した試験体、図 1.5-1(e)は 25mm 厚または 20mm 厚の挽き板を弱軸方向に付加した試験体となる。また、図 1.5-1(b)は弱軸方向の 5 層 5 プライの CLT であり、図 1.5-1(d)はその外層に 25mm 厚の挽き板を弱軸方向に付加した試験体である。

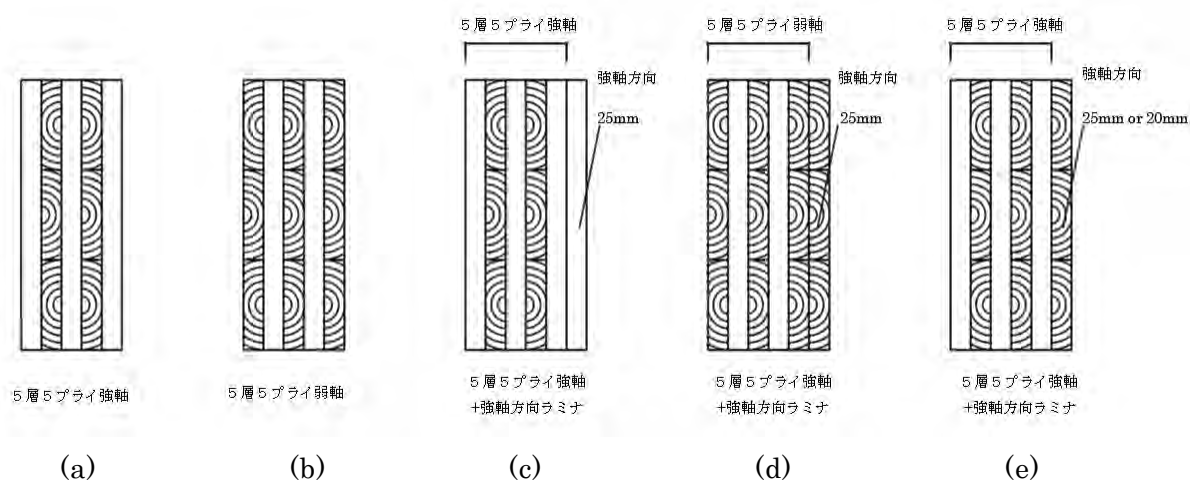


図 1.5-1 試験体の概念図

試験体を構成する 5 層 5 プライの CLT の強度等級は Mx60-5-5 であり、ラミナ厚は 25mm である。表 1.5-1 に各試験体の諸元を示す。

表 1.5-1 各試験体の諸元(1)

	試験体名	5層5プライ 部分の加力方向	付加した ラミナ	長さ (mm)	幅 (mm)	厚さ (mm)	細長 比	採材時記号
①	(5-5S)-55	強軸方向	なし	1985	300.1	126.0	55	5L5P-C55
②	(5-5S)+(25S)-55	強軸方向	強軸方向 25mm	2385	300.5	151.0	55	5L6P-C55
③	(5-5S)+(25W)-55	強軸方向	弱軸方向 25mm	2382	300.0	150.9	55	6L6P-C55
④	(5-5S)+(20W)-55	強軸方向	弱軸方向 20mm	2302	300.5	146.4	55	6L6PTN-C55
⑤	(5-5S)-90	強軸方向	なし	3249	299.5	125.9	90	5L5P-C90
⑥	(5-5S)+(25S)-90	強軸方向	強軸方向 25mm	3898	300.5	151.0	90	5L6P-C90
⑦	(5-5S)+(25W)-90	強軸方向	弱軸方向 25mm	3897	299.0	151.1	90	6L6P-C90
⑧	(5-5S)+(20W)-90	強軸方向	弱軸方向 20mm	3897	299.0	151.3	90	6L6PTN-C90
⑨	(5-5W)-55	弱軸方向	なし	1987	300.0	125.9	55	5L5P-C55-W
⑩	(5-5W)+(20S)-55	弱軸方向	強軸方向 20mm	2304	300.0	146.3	55	6L6PTN-C55-W
⑪	(5-5W)+(25W)-55	弱軸方向	弱軸方向 25mm	2382	299.0	151.1	55	5L6P-C55-W
⑫	(5-5W)-90	弱軸方向	なし	3250	299.5	126.2	90	5L5P-C90-W
⑬	(5-5W)+(20S)-90	弱軸方向	強軸方向 20mm	3768	300.5	146.8	90	6L6PTN-C90-W
⑭	(5-5W)+(25W)-90	弱軸方向	弱軸方向 25mm	3897	299.0	151.3	90	5L6P-C90-W

表 1.5-2 各試験体の諸元(2)

	試験体名	5 層 5 プライ 部分の加力方 向	付加した ラミナ	密度 (kg/m ³)	含水率 (%)	E _{fr} (kN/mm ²)	E _{TGHf} (kN/mm ²)	採材時記号
①	(5-5S)-55	強軸方向	なし	391	10.2	5.89	6.04	5L5P-C55
②	(5-5S)+(25S)-55	強軸方向	強軸方向 25mm	405	10.5	6.99	6.64	5L6P-C55
③	(5-5S)+(25W)-55	強軸方向	弱軸方向 25mm	409	10.7	5.42	4.13	6L6P-C55
④	(5-5S)+(20W)-55	強軸方向	弱軸方向 20mm	399	8.8	5.29	4.16	6L6PTN-C55
⑤	(5-5S)-90	強軸方向	なし	386	10.3	5.39	7.01	5L5P-C90
⑥	(5-5S)+(25S)-90	強軸方向	強軸方向 25mm	403	11.3	6.79	7.36	5L6P-C90
⑦	(5-5S)+(25W)-90	強軸方向	弱軸方向 25mm	400	9.5	5.16	4.24	6L6P-C90
⑧	(5-5S)+(20W)-90	強軸方向	弱軸方向 20mm	406	11.8	5.31	4.86	6L6PTN-C90
⑨	(5-5W)-55	弱軸方向	なし	417	8.8	4.49	2.30	5L5P-C55-W
⑩	(5-5W)+(20S)-55	弱軸方向	強軸方向	401	9.5	4.78	3.48	6L6PTN-C55-W
⑪	(5-5W)+(25W)-55	弱軸方向	弱軸方向	410	12.8	3.83	1.57	5L6P-C55-W
⑫	(5-5W)-90	弱軸方向	なし	418	10.0	4.69	2.46	5L5P-C90-W
⑬	(5-5W)+(20S)-90	弱軸方向	強軸方向	408	8.7	4.61	4.02	6L6PTN-C90-W
⑭	(5-5W)+(25W)-90	弱軸方向	弱軸方向	403	11.7	3.42	1.46	5L6P-C90-W

なお、試験体の名称は、以下のルールに従い命名した。

5-5S：元の 5 層 5 プライの CLT の方向（強軸方向：S）

5-5W：元の 5 層 5 プライの CLT の方向（弱軸方向：W）

+(25S)：付加するラミナの厚さと方向（25mm 厚、S：強軸方向）

+(25W)：付加するラミナの厚さと方向（25mm 厚、W：弱軸方向）

+(20S)：付加するラミナの厚さと方向（20mm 厚、S：強軸方向）

+(20W)：付加するラミナの厚さと方向（20mm 厚、W：弱軸方向）

(2)試験方法

図 1.5-2 に座屈試験の様子を示す。各試験体の厚さ方向の図心に鉛直荷重を載荷し、座屈試験を行った。座屈試験における両端の支持条件はピン・ピンとした。荷重時の試験体頂部の鉛直変位、試験体中央部の水平変位を測定した。



図 1.5-2 座屈試験の様子

また、材のせん断変形を測定することを目的として、材自体のせん断変形量（図 1.5-3 参照）、強軸方向のラミナ（平行層ラミナ）のひずみ量（図 1.5.4 参照）、及び、弱軸方向のラミナ（直交層ラミナ）のせん断変形量をそれぞれ測定した。

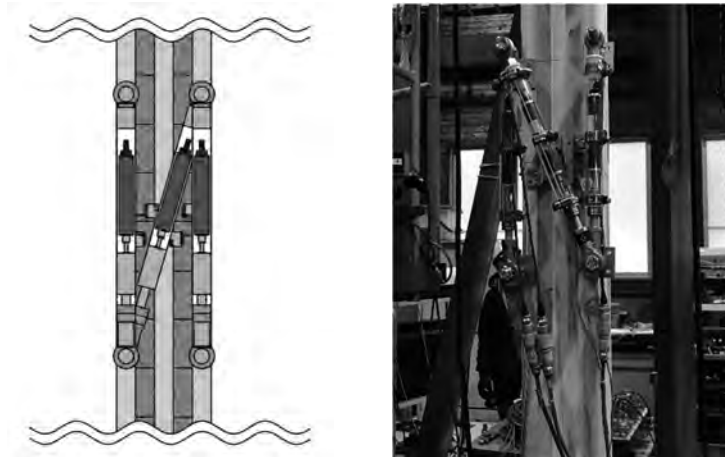


図 1.5-3 材自体のせん断変形量の測定の様子

(解説)変位計により CLT 全層のせん断変形を測定し、パイ型変位計にて 1 つの直交層のせん断変形量を測定している。パイ型変位計は変位計の下に設置されている。

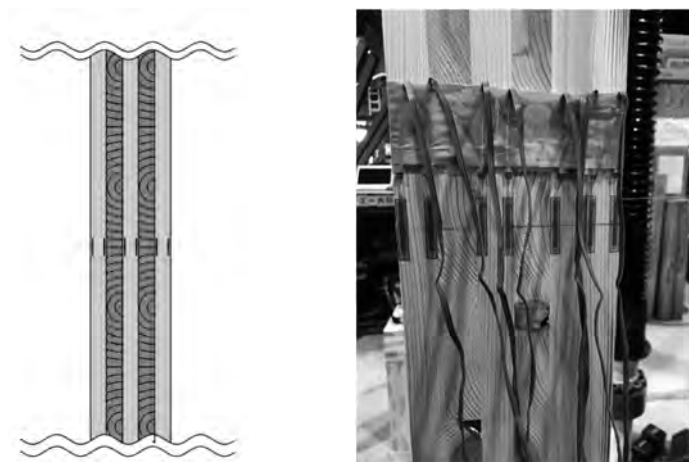


図 1.5-4 強軸方向のラミナ（平行層ラミナ）のひずみ量の測定の様子

1.5.3 試験結果

表 1.5-3 に座屈試験の結果として各仕様について、その最大荷重（座屈荷重）を示す。なお、試験体の長さは、全断面を用いて計算した細長比が 90、または、55 となるように定めたため、外層に 1 枚ラミナを付加した試験体（6 プライの試験体）のほうが、ラミナを付加しない試験体（5 プライの試験体）よりも長い。このため、ラミナを付加した試験体の座屈荷重がラミナを付加しない試験体の座屈荷重よりも低く評価されている可能性がある。そこで、オイラーの座屈荷重式（式 1.5-1）を用いて、見かけの剛性（ EI ）を各試験体について求め、求めた剛性を用いて、試験体の長さを細長比 55 の試験体は 1985mm、

細長比 90 の試験体は 3250mm とした場合の座屈荷重を求め（座屈荷重を補正し）て、相互に比較した。表 1.5-4 に補正した座屈荷重の値を示す。

$$P_k = \frac{\pi EI}{l^2} \quad \cdots \text{ (式 1.5-1)}$$

ここで、 P_k は座屈荷重

E は弾性係数

I は断面二次モーメント

l は座屈長さ

表 1.5-3 試験結果

	試験体名	5 層 5 プライ 部分の 加力方向	付加したラミナ	細長比	最大荷重 (kN)	採材時記号
①	(5-5S)-55	強軸方向	なし	55	578	5L5P-C55
②	(5-5S)+(25S)-55	強軸方向	強軸方向 25mm	55	656	5L6P-C55
③	(5-5S)+(25W)-55	強軸方向	弱軸方向 25mm	55	379	6L6P-C55
④	(5-5S)+(20W)-55	強軸方向	弱軸方向 20mm	55	396	6L6PTN-C55
⑤	(5-5S)-90	強軸方向	なし	90	283	5L5P-C90
⑥	(5-5S)+(25S)-90	強軸方向	強軸方向 25mm	90	335	5L6P-C90
⑦	(5-5S)+(25W)-90	強軸方向	弱軸方向 25mm	90	288	6L6P-C90
⑧	(5-5S)+(20W)-90	強軸方向	弱軸方向 20mm	90	202	6L6PTN-C90
⑨	(5-5W)-55	弱軸方向	なし	55	217	5L5P-C55-W
⑩	(5-5W)+(20S)-55	弱軸方向	強軸方向	55	370	6L6PTN-C55-W
⑪	(5-5W)+(25W)-55	弱軸方向	弱軸方向	55	157	5L6P-C55-W
⑫	(5-5W)-90	弱軸方向	なし	90	96	5L5P-C90-W
⑬	(5-5W)+(20S)-90	弱軸方向	強軸方向	90	187	6L6PTN-C90-W
⑭	(5-5W)+(25W)-90	弱軸方向	弱軸方向	90	62	5L6P-C90-W

表 1.5-4 試験結果

	試験体名	5 層 5 プライ 部分の 加力方向	付加したラミナ	細長比	最大荷重(補正) (kN)	採材時記号
①	(5-5S)-55	強軸方向	なし	55	578	5L5P-C55
②	(5-5S)+(25S)-55	強軸方向	強軸方向 25mm	55	974	5L6P-C55
③	(5-5S)+(25W)-55	強軸方向	弱軸方向 25mm	55	546	6L6P-C55
④	(5-5S)+(20W)-55	強軸方向	弱軸方向 20mm	55	533	6L6PTN-C55
⑤	(5-5S)-90	強軸方向	なし	90	283	5L5P-C90
⑥	(5-5S)+(25S)-90	強軸方向	強軸方向 25mm	90	482	5L6P-C90
⑦	(5-5S)+(25W)-90	強軸方向	弱軸方向 25mm	90	414	5L6P-C90
⑧	(5-5S)+(20W)-90	強軸方向	弱軸方向 20mm	90	290	6L6PTN-C90
⑨	(5-5W)-55	弱軸方向	なし	55	217	5L5P-C55-W
⑩	(5-5W)+(20S)-55	弱軸方向	強軸方向	55	498	6L6PTN-C55-W
⑪	(5-5W)+(25W)-55	弱軸方向	弱軸方向	55	605	5L6P-C55-W
⑫	(5-5W)-90	弱軸方向	なし	90	96	5L5P-C90-W
⑬	(5-5W)+(20S)-90	弱軸方向	強軸方向	90	251	6L6PTN-C90-W
⑭	(5-5W)+(25W)-90	弱軸方向	弱軸方向	90	89	5L6P-C90-W

図 1.5-4 に座屈荷重を比較した結果を示す。5 層 5 プライの強軸方向の CLT にラミナを付加した場合、付加するラミナが強軸方向の場合には、座屈荷重はラミナを付加する前の CLT よりも高くなるであろうという結果が得られた。一方、付加するラミナが弱軸方向の場合には、座屈荷重はラミナを付加する前の CLT よりも僅かではあるが低くなるであろうという結果が得られた。なお、試験体(5-5S)+(25W)-90 については、実験方法に何らかの問題があり、座屈荷重が大きく想定されているので、考察の対象外とする。

5 層 5 プライの弱軸方向の CLT にラミナを付加した場合、付加するラミナが強軸方向の場合には、座屈荷重はラミナを付加する前の CLT よりも高くなるであろうという結果が得られた。また、付加するラミナが弱軸方向の場合には、座屈荷重はラミナを付加する前の CLT よりも僅かではあるが低くなるか、または、同等の座屈荷重になるであろうという結果が得られた。

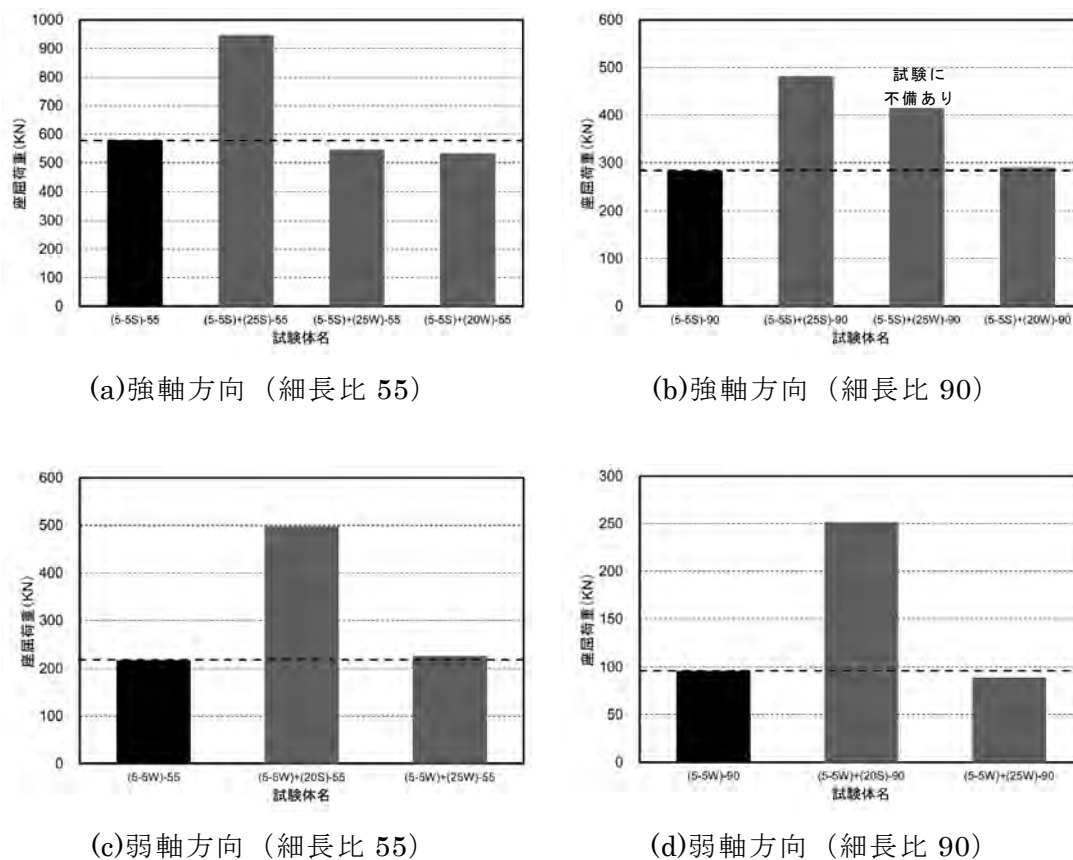


図 1.5-4 座屈荷重の比較

以上の結果より、

- ① CLT の鉛直方向が強軸方向となる場合も弱軸方向になる場合もいずれも、強軸方向のラミナを外層に付加することによって座屈荷重はラミナを付加する前の CLT の座屈荷重よりも大きくなること
- ② CLT の鉛直方向が強軸方向となる場合も弱軸方向になる場合もいずれも、弱軸方向のラミナを外層に付加することによって座屈荷重はラミナを付加する前の CLT の座屈荷重よりも小さくなる可能性があること
- ③ ラミナ厚が異なることによって、座屈荷重が大きくなったり小さくなったりする程度は異なったが、強軸方向のラミナを付加することにより座屈荷重が大きくなることと弱軸ラミナを付加することにより座屈荷重が小さくなる可能性があるという傾向

向は同じであったことが結論づけられる。

1.5.4 考察

CLT の鉛直方向が強軸方向となる場合も弱軸方向になる場合もいずれも、弱軸方向のラミナを外層に付加することによって座屈荷重はラミナを付加する前の CLT の座屈荷重よりも小さくなる可能性があることを実験により確認した。このことは、例えば 5 層 5 プライの CLT の外層片側に燃えしろなどを目的とする挽板を、挽板が弱軸方向になる向きで付加した上で、5 層 5 プライの CLT（外層にラミナの付加あり）の強軸方向を鉛直方向に配置して、壁要素として用いた場合、5 層 5 プライ（外層にラミナの付加なし）の CLT の強軸方向の座屈荷重が得られない場合があることを意味する。その原因は、図心と加力軸がずれることによる偏心座屈によるものであり、付加した挽板が燃えてはじめて、挽板を付加する前の 5 層 5 プライの CLT の強軸方向の座屈荷重が得られることになる。実建物においては、壁要素としての CLT パネルには床版などを介して鉛直荷重が作用するので、図心と加力軸が同じとなるように力の軸がずれる可能性があるので、実験で得られたような耐力低下は生じない可能性があるが、設計時には留意が必要である。

1.5.5 直交層のせん断弾性係数

図 1.5-3 に示す変位計とパイ型変位計を用いて測定した試験体のせん断変形量、並びに、図 1.5-4 に示すひずみゲージを用いて測定したひずみ量を用いて、直交層のせん断弾性係数を求めた。直交層のせん断弾性係数は、CLT の長さ方向に対して端部から 1/4 の位置に対角に設置した変位計により測定したせん断変形量を用いて求めた値（G1）、CLT の長さ方向に対して端部から 1/4 の位置に設置したパイ型変位計により測定したせん断変形量を用いて求めた値（G2）、CLT の端部に設置したパイ型変位計により測定したせん断変形量を用いて求めた値（G3）の 3 通りの方法で求めた。表 1.5-5 に求めたせん断弾性係数の値を示す。直交層のせん断弾性係数は概ね 0.040（kN/rad）から 0.090（kN/rad）の範囲にあった。

表 1.5-5 直交層のせん断弾性係数

	試験体名	G1 (kN/rad)	G2 (kN/rad)	G3 (kN/rad)	Gave (kN/rad)	採材時記号
①	(5-S)-55	0.074	<u>0.163</u>	<u>0.176</u>	0.074	5L5P-C55
②	(5-S)+(25S)-55	0.096	0.072	0.064	0.069	5L6P-C55
③	(5-S)+(25W)-55	0.069	0.079	0.078	0.075	6L6P-C55
④	(5-S)+(20W)-55	<u>0.420</u>	0.077	0.057	0.067	6L6PTN-C55
⑤	(5-S)-90	0.079	0.067	0.099	0.082	5L5P-C90
⑥	(5-S)+(25S)-90	0.050	<u>0.102</u>	<u>0.144</u>	0.050	5L6P-C90
⑦	(5-S)+(25W)-90	0.046	<u>0.192</u>	0.029	0.037	6L6P-C90
⑧	(5-S)+(20W)-90	<u>0.362</u>	0.090	0.084	0.087	6L6PTN-C90
⑨	(5-W)-55	0.047	0.058	0.050	0.052	5L5P-C55-W
⑩	(5-W)+(20S)-55	0.038	0.036	<u>0.214</u>	0.044	6L6PTN-C55-W
⑪	(5-W)+(25W)-55	<u>0.448</u>	0.041	0.051	0.046	5L6P-C55-W
⑫	(5-W)-90	0.066	0.078	0.064	0.069	5L5P-C90-W
⑬	(5-W)+(20S)-90	0.014	0.051	0.024	0.041	6L6PTN-C90-W
⑭	(5-W)+(25W)-90	<u>0.115</u>	<u>0.112</u>	0.059	0.059	5L6P-C90-W

(注)Gave は G1、G2、G3 の平均値。アンダーラインが付してある値は平均値を求める際に除外した。

1.5.6 まとめ

- ① CLT の鉛直方向が強軸方向となる場合も弱軸方向になる場合もいずれも、強軸方向のラミナを外層に付加することによって座屈荷重はラミナを付加する前の CLT の座屈荷重よりも大きくなる。
- ② CLT の鉛直方向が強軸方向となる場合も弱軸方向になる場合もいずれも、弱軸方向のラミナを外層に付加することによって座屈荷重はラミナを付加する前の CLT の座屈荷重よりも小さくなる可能性がある。
- ③ ラミナ厚が異なることによって、座屈荷重が大きくなったり小さくなったりする程度は異なったが、強軸方向のラミナを付加することにより座屈荷重が大きくなることと弱軸ラミナを付加することにより座屈荷重が小さくなる可能性があるという傾向は同じであった。
- ④ CLT の強軸方向を鉛直方向にして、外層片側に燃えしろなどを目的とする挽板を、挽板が弱軸方向になる向きで付加した場合、挽き板を付加する前の CLT の座屈荷重が得られない場合がある。
- ⑤ 座屈試験より得られた直交層のせん断弾性係数は、概ね 0.040 (kN/rad) から 0.090 (kN/rad) の範囲にあった。

付記：

本報告における試験体図の作成、直交方向のせん断弾性係数の算定は宇都宮大学工学部建設学科建築学コース松尾光氏が行ったものである。

1.6 圧縮・短柱性能

1.6.1 試験体

細長比 λ が25であるCLTの短柱圧縮試験を実施した。試験体の概要を表1.6-1に示す。試験体数は合計19体である。

表 1.6-1 圧縮・短柱試験体の概要

層構成	ラミナの構成*	付加ラミナ	試験体名	寸法 (mm) (厚さ×幅×長さ)	試験体数
5層	強-弱-強-弱-強	なし	S5L5P-C25-1~3	125×300×902	3
5プライ	弱-強-弱-強-弱	なし	S5L5P-C25-W1~W3	125×300×902	3
6層	強-弱-強-弱-強-付弱	25mm厚	S6L6P-C25-1~3	150×300×1083	3
6プライ	強-弱-強-弱-強-付弱	20mm厚	S6L6PTN-C25-1, 2	145×300×1046	2
	弱-強-弱-強-弱-付強	20mm厚	S6L6PTN-C25-W1, W2	145×300×1046	2
5層	強-弱-強-弱-強-付強	25mm厚	S5L6P-C25-1~3	150×300×1075	3
6プライ	弱-強-弱-強-弱-付弱	25mm厚	S5L6P-C25-W1~W3	150×300×1075	3

* 強：繊維方向が加力方向と平行であるラミナ、弱：繊維方向が加力方向と直交するラミナ、付：5層5プライのラミナに追加したラミナ

1.6.2 試験方法

短柱圧縮試験の様子を写真1.6-1に示す。短柱圧縮試験の前に、試験体のみかけの密度、寸法、縦振動法による縦弾性係数(E_{tr})を測定した。短柱圧縮試験には圧縮試験機（前川試験機製作所製、A-300-B4、最大容量3000kN）を用いた。試験機の上側加圧盤については球座とし下側加圧盤については固定した。縦圧縮応力度(σ_c)は試験機の荷重を試験体の断面積で割って求めた。縦圧縮強度(σ_{cmax})は最大荷重時の縦圧縮応力度とした。縦圧縮ひずみ(ε)は、試験体にナイフエッジを有する治具を取り付け、ナイフエッジ間の距離を標点間距離(l)とし、標点間距離の変位(Δl)を試験体の両側に取り付けた変位計（東京測器研究所製、CDP-25、精度0.002mm）により測定して $\Delta l/l$ を算出することにより求めた。縦圧縮ヤング係数(E_c)は縦圧縮応力度(σ_c)－縦圧縮ひずみ(ε)関係の直線域の傾きにより算出した。写真1.6-1の正面に写っている幅広の面を面1と名付け、面1より時計周りに順次現れる面をそれぞれ面2、面3、面4とした（図1.6-1）。



写真 1.6-1 試験の様子（S5L5P-C25-1）

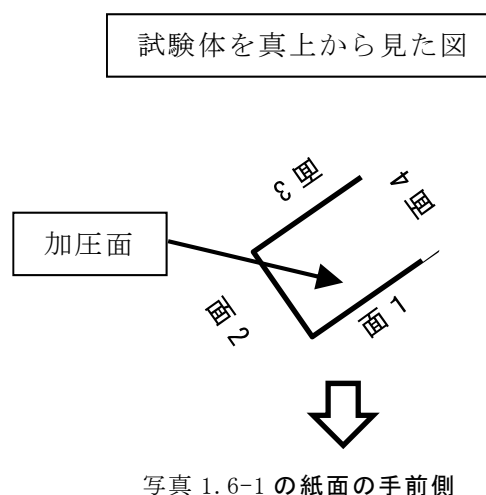


図 1.6-1 試験体の面の名称

1.6.3 結果および考察

表 1.6-1 に短柱圧縮試験結果を示す。

表 1.6-1 短柱圧縮試験の全結果（試験体名の末尾の数字は試験体番号を示す）

試験体名	みかけの 密度 (kg/m^3)	縦弾性係数 (E_f) (kN/mm^2)	縦圧縮ヤング係数 (E_c) (kN/mm^2)	E_f/E_c	最大荷重 (kN)	縦圧縮強度 (σ_c) (N/mm^2)	含水率 (%)
S5L5P-C25-1	387	5.60	5.43	1.03	953	25.3	10.3
S5L5P-C25-2	384	5.27	5.18	1.02	875	23.3	10.5
S5L5P-C25-3	389	4.89	4.72	1.04	866	23.0	10.5
平均値	387	5.25	5.11	1.03	898	23.9	10.4
標準偏差	2.0	0.3	0.3	0.01	39.0	1.0	0.1
変動係数(%)	0.5	5.5	5.8	0.8	4.3	4.4	0.7
S5L5P-C25-W1	403	3.93	3.89	1.01	673	17.9	9.6
S5L5P-C25-W2	411	3.81	3.73	1.02	636	16.9	10.4
S5L5P-C25-W3	401	3.84	3.70	1.04	651	17.3	10.0
平均値	405	3.86	3.77	1.02	653	17.4	10.0
標準偏差	4.3	0.05	0.1	0.01	15.2	0.4	0.3
変動係数(%)	1.1	1.3	2.2	1.1	2.3	2.3	3.3
S6L6P-C25-1	409	5.23	4.95	1.06	961	21.2	10.3
S6L6P-C25-2	409	5.25	4.98	1.06	1019	22.6	10.1
S6L6P-C25-3	398	5.28	5.22	1.01	949	21.0	10.2
平均値	405	5.25	5.05	1.04	976	21.6	10.2
標準偏差	5.5	0.02	0.1	0.02	30.4	0.7	0.1
変動係数(%)	1.3	0.4	2.4	2.1	3.1	3.2	0.6
S6L6PTN-C25-1	396	5.72	5.38	1.06	981	22.5	10.2
S6L6PTN-C25-2	394	4.84	4.83	1.00	902	20.7	10.4
平均値	395	5.28	5.10	1.03	941	21.6	10.3
S6L6PTN-C25-W1	413	4.75	4.74	1.00	885	20.3	10.1
S6L6PTN-C25-W2	418	4.97	4.78	1.04	921	21.0	10.1
平均値	416	4.86	4.76	1.02	903	20.7	10.1
S5L6P-C25-1	408	7.15	7.09	1.01	1270	28.2	11.2
S5L6P-C25-2	422	6.76	6.37	1.06	1241	27.3	11.2
S5L6P-C25-3	398	6.87	6.69	1.03	1166	25.9	10.9
平均値	409	6.93	6.72	1.03	1226	27.1	11.1
標準偏差	9.9	0.16	0.3	0.02	43.7	0.9	0.1
変動係数(%)	2.4	2.4	4.4	2.1	3.6	3.4	1.0
S5L6P-C25-W1	391	3.07	3.54	0.87	605	13.4	9.8
S5L6P-C25-W2	389	3.10	3.72	0.83	707	15.6	10.2
S5L6P-C25-W3	386	2.93	3.49	0.84	694	15.4	10.0
平均値	388	3.04	3.59	0.85	669	14.8	10.0
標準偏差	2.2	0.07	0.1	0.01	45.1	1.0	0.2
変動係数(%)	0.6	2.4	2.8	1.8	6.7	6.7	1.5

試験体のみかけの密度は 384～422 kg/m^3 、含水率は 10～11%であった。

i) 付加ラミナが短柱圧縮強度に及ぼす影響

付加ラミナが短柱圧縮強度に及ぼす影響をみるために、最大荷重の平均値を比較する。

【5層5プライの強軸と弱軸との比較】

S5L5P-C25 と S5L5P-C25-W とでは、S5L5P-C25 の方が S5L5P-C25-W よりも 38%大きかった。

【付加ラミナの影響－強軸の場合】

S5L5P-C25 と S6L6P-C25 とでは、S6L6P-C25 の方が S5L5P-C25 よりも 9%大きかった。S6L6PTN-C25 は S5L5P-C25 に対して 5%大きく、S6L6P-C25 に対しては 4%小さかった。

S5L5P-C25 と S5L6P-C25 とでは、S5L6P-C25 の方が S5L5P-C25 よりも 37%大きかった。

【付加ラミナの影響－弱軸の場合】

S5L5P-C25-W と S6L6PTN-C25-W とでは、S6L6PTN-C25-W の方が S5L5P-C25-W よりも 38%大きかった。

S5L6P-C25-W は S5L5P-C25-W より 2%だけ大きく、両者はほとんど変わらない。

ii) 縦圧縮ヤング係数と縦弾性係数との比較

縦圧縮ヤング係数に対する縦弾性係数の比をとると、S5L6P-C25-W 以外の試験体では 1.02~1.04 (平均値の最小値~最大値) で縦弾性係数の方が若干高かったが、S5L6P-C25-W のみ 0.85 (平均値) で縦弾性係数の方が約 15%小さかった。S5L6P-C25-W がその他の試験体と異なるところは、荷重方向と繊維方向が直交するラミナが 4 層あることであるが、そのことがこのような結果の要因となったかどうかについてはわからない。

iii) 付加ラミナが縦弾性ヤング係数に及ぼす影響

ii)で触れたように、S5L6P-C25-W については縦圧縮ヤング係数と縦弾性係数との間に差があるため、ここでは縦圧縮ヤング係数を考察の対象とする。

ラミナを付加したことによって縦圧縮ヤング係数がどう変化するかをみるために、縦圧縮ヤング係数の平均値を比較する。

【5 層 5 プライの強軸と弱軸との比較】

S5L5P-C25 と S5L5P-C25-W とを比較すると、S5L5P-C25 の方が S5L5P-C25-W よりも 36%大きかった。

【付加ラミナの影響－強軸の場合】

S5L5P-C25 と S6L6P-C25、S6L6PTN-C25 はほぼ同じであった。S5L5P-C25 と S5L6P-C25 とでは、S5L6P-C25 の方が S5L5P-C25 よりも 32%大きかった。

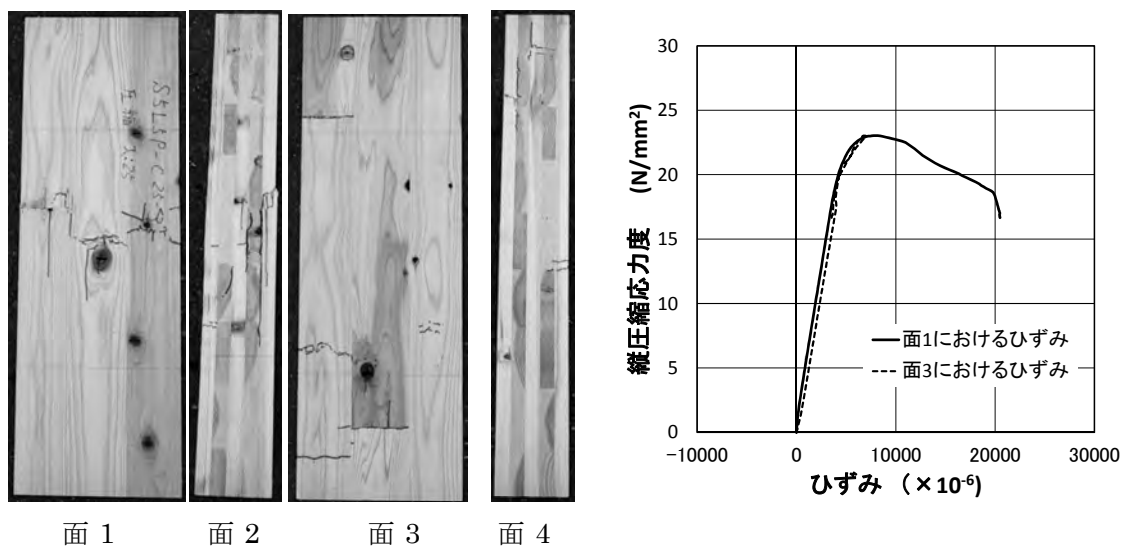
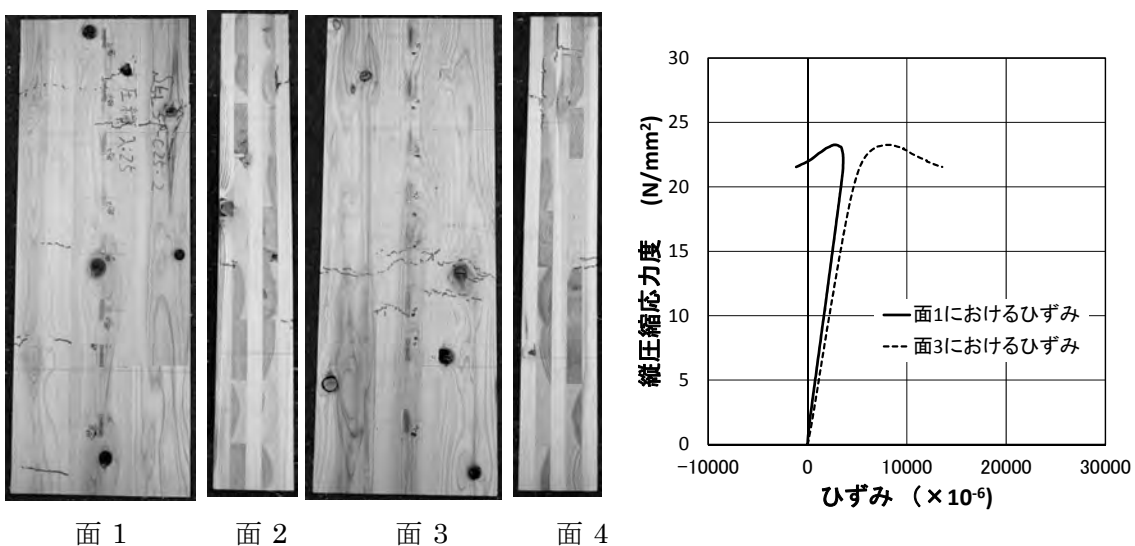
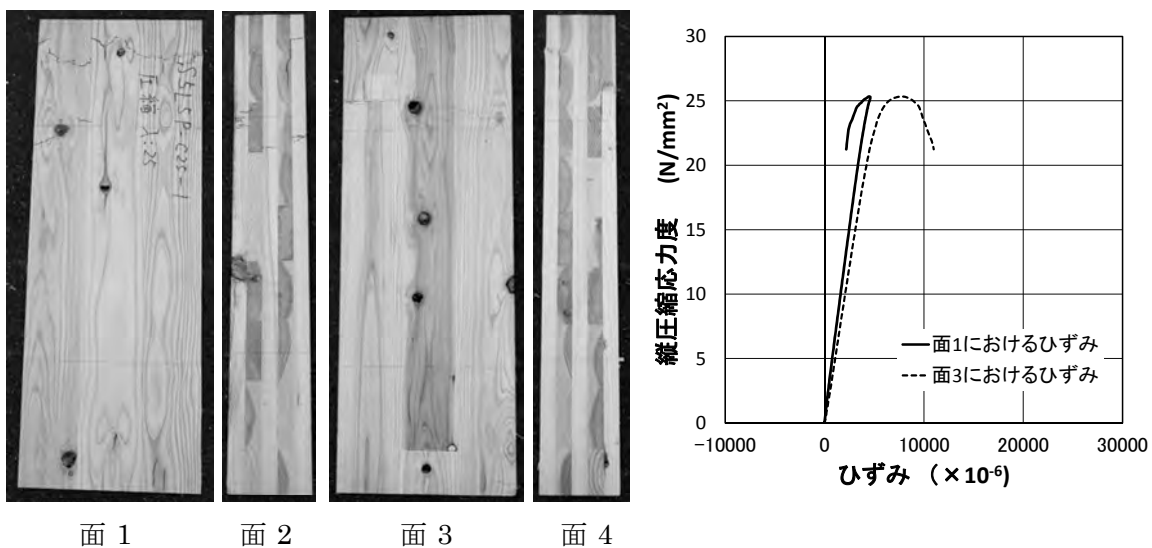
【付加ラミナの影響－弱軸の場合】

S5L5P-C25-W と S6L6PTN-C25-W とでは S6L6PTN-C25-W の方が S5L5P-C25-W よりも 26%大きかった。

S5L6P-C25-W は S5L5P-C25-W と比較して 5%小さかった。

iv) 破壊性状および荷重－ひずみ関係

破壊した試験体の写真、および縦圧縮応力度と標点距離間の変位から求めたひずみとの関係を図 1.6-2~図 1.6-20 に示す。図 1.6-18 (S5L6P-C25-W1) の縦圧縮応力度－ひずみ曲線は縦圧縮応力度が 9N/mm² 付近でひずみが大きく変動しているが、この時点で試験体に損傷は生じていなかった。



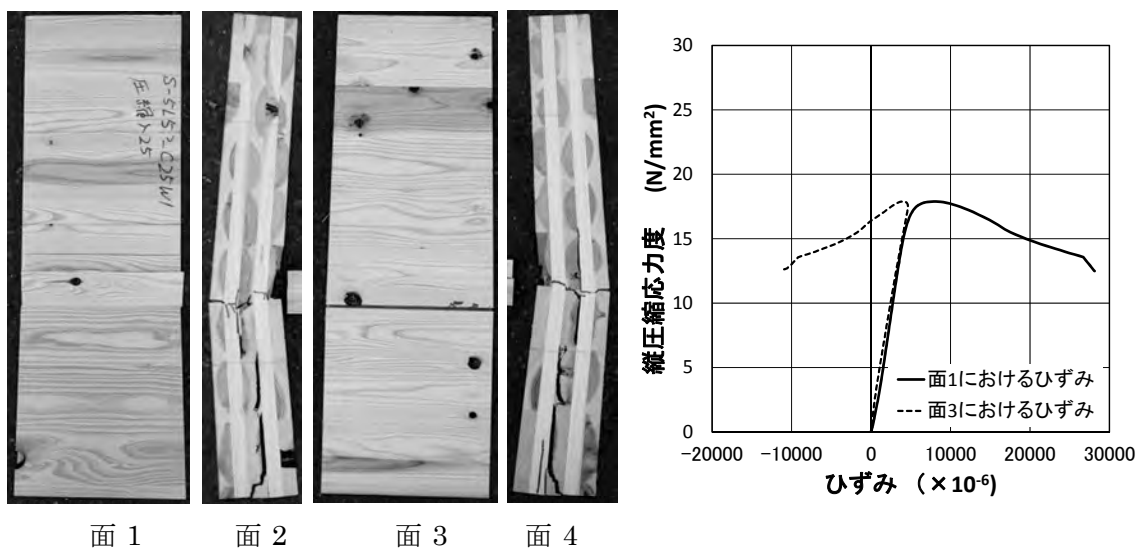


図 1.6-5 S5L5P-C25-W1 の破壊性状および縦圧縮応力度－ひずみ曲線

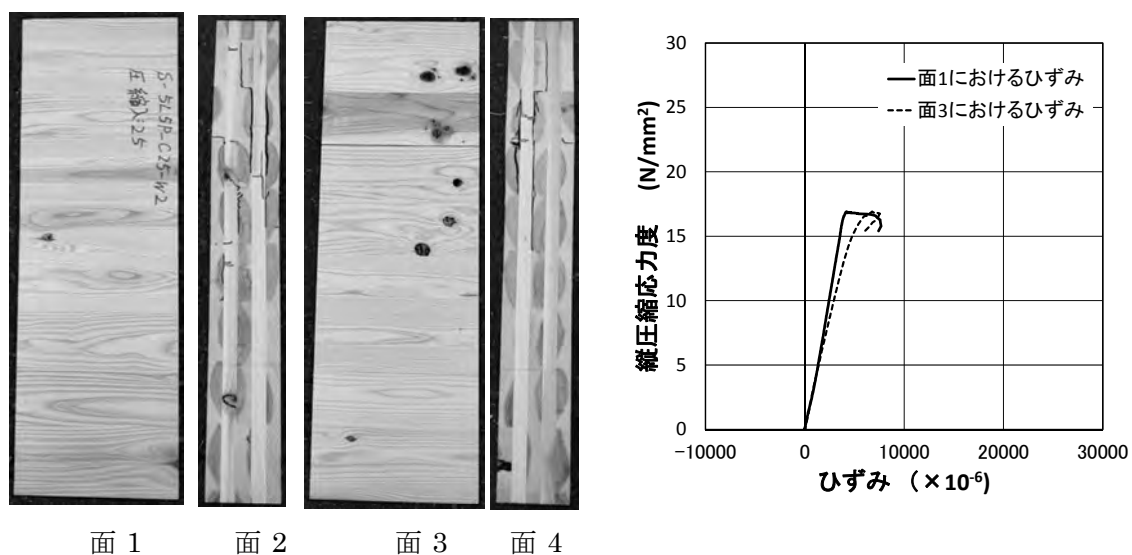


図 1.6-6 S5L5P-C25-W2 の破壊性状および縦圧縮応力度－ひずみ曲線

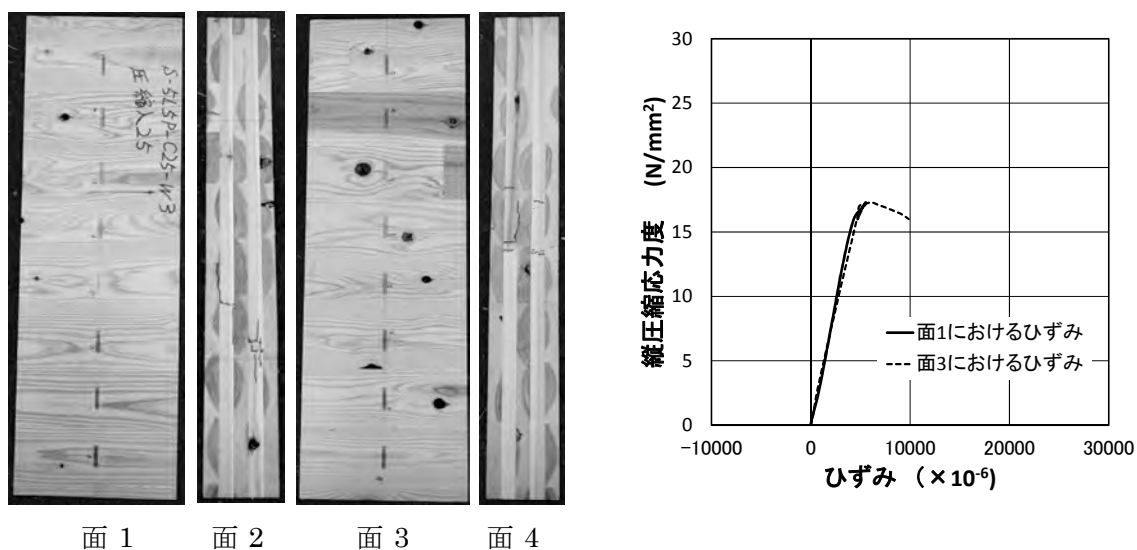


図 1.6-7 S5L5P-C25-W3 の破壊性状および縦圧縮応力度－ひずみ曲線



面 1 面 2 面 3 面 4

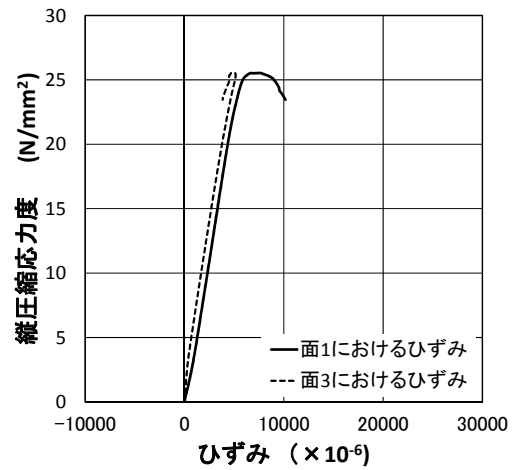


図 1.6-8 S6L6P-C25-1 の破壊性状および縦圧縮応力度－ひずみ曲線



面 1 面 2 面 3 面 4

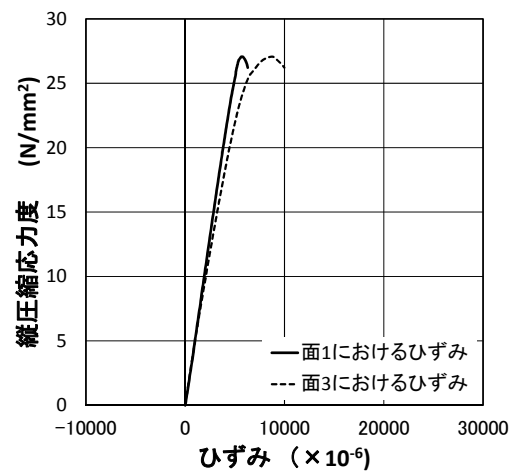


図 1.6-9 S6L6P-C25-2 の破壊性状および縦圧縮応力度－ひずみ曲線



面 1 面 2 面 3 面 4

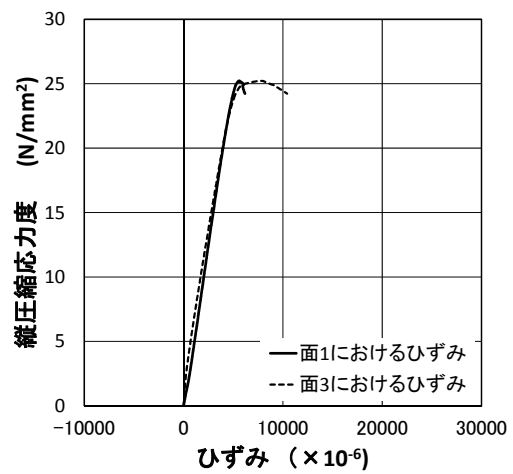
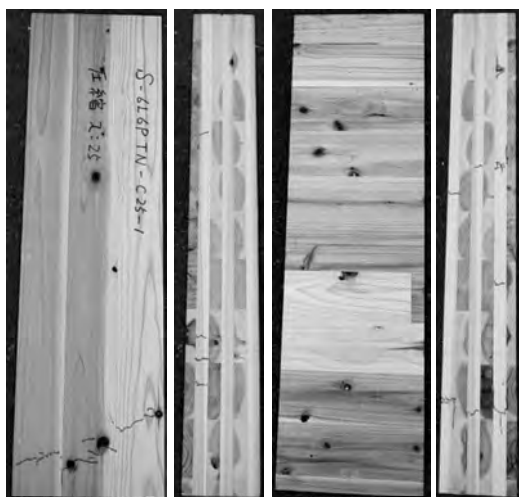
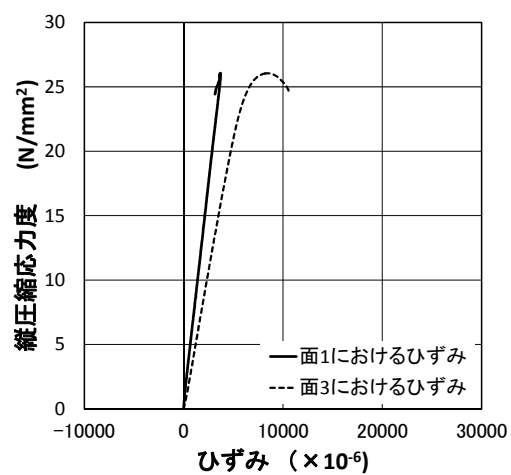


図 1.6-10 S6L6P-C25-3 の破壊性状および縦圧縮応力度－ひずみ曲線



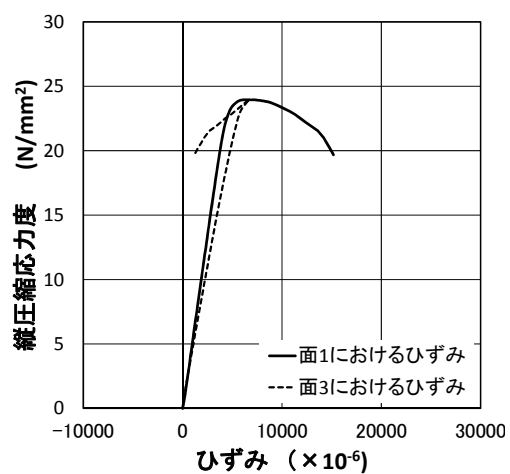
面 1 面 2 面 3 面 4

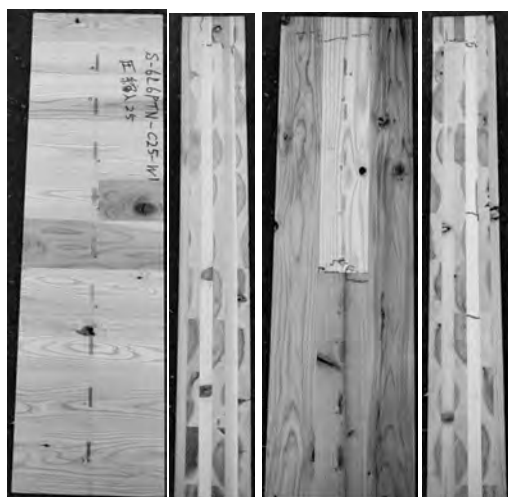
図 1.6-11 S6L6PTN-C25-1 の破壊性状および縦圧縮応力度－ひずみ曲線



面 1 面 2 面 3 面 4

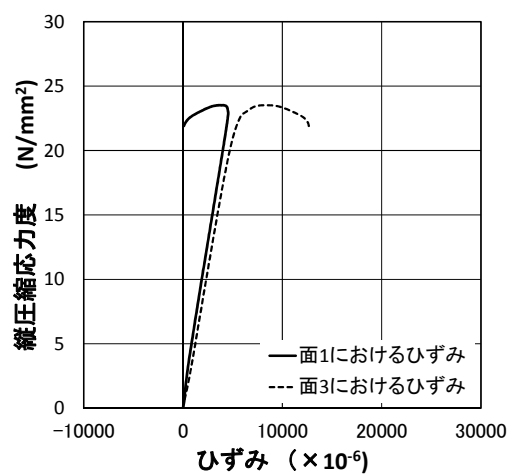
図 1.6-12 S6L6PTN-C25-2 の破壊性状および縦圧縮応力度－ひずみ曲線





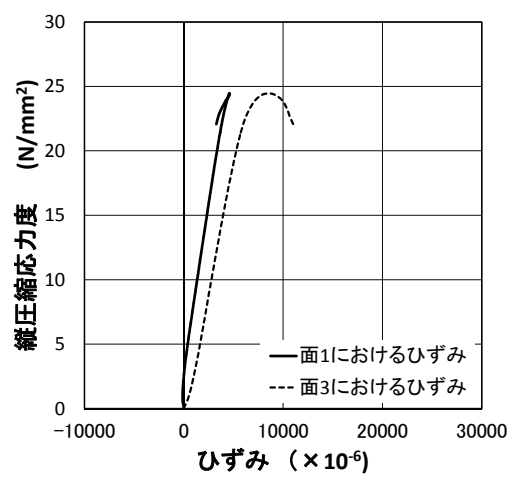
面 1 面 2 面 3 面 4

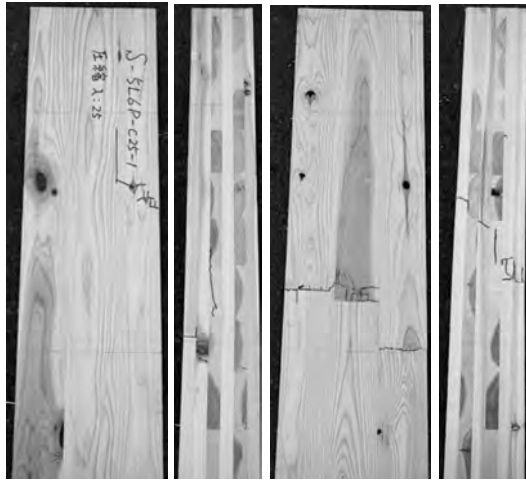
図 1.6-13 S6L6PTN-C25-W1 の破壊性状および縦圧縮応力度－ひずみ曲線



面 1 面 2 面 3 面 4

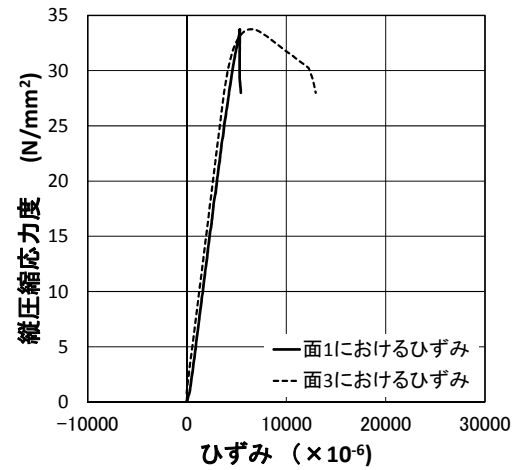
図 1.6-14 S6L6PTN-C25-W2 の破壊性状および縦圧縮応力度－ひずみ曲線





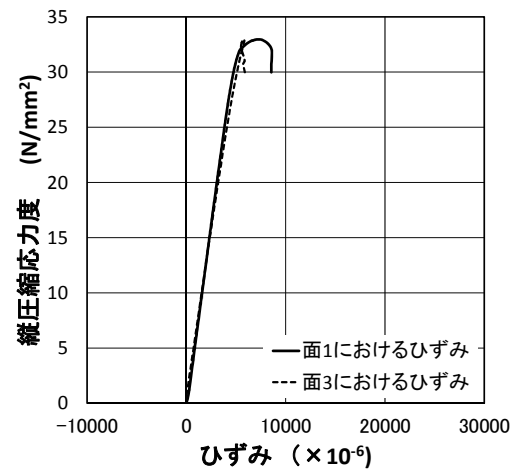
面 1 面 2 面 3 面 4

図 1.6-15 S5L6P-C25-1 の破壊性状および縦圧縮応力度－ひずみ曲線



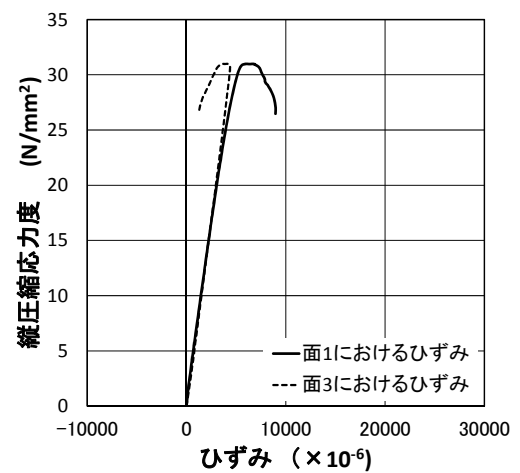
面 1 面 2 面 3 面 4

図 1.6-16 S5L6P-C25-2 の破壊性状および縦圧縮応力度－ひずみ曲線



面 1 面 2 面 3 面 4

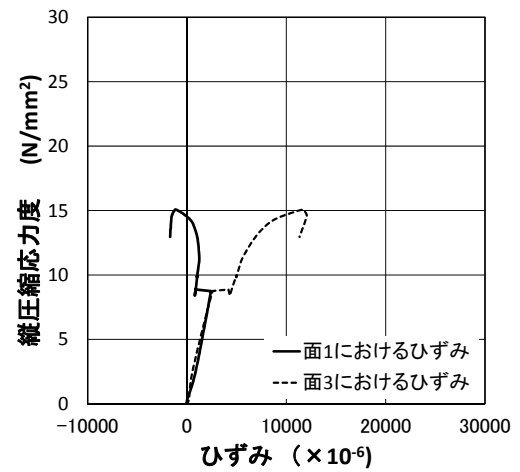
図 1.6-17 S5L6P-C25-3 の破壊性状および縦圧縮応力度－ひずみ曲線





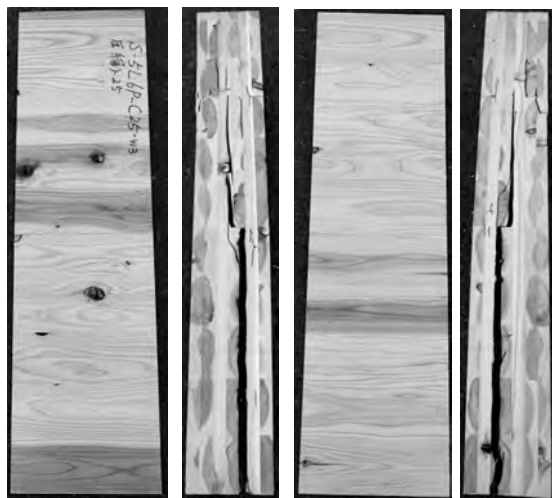
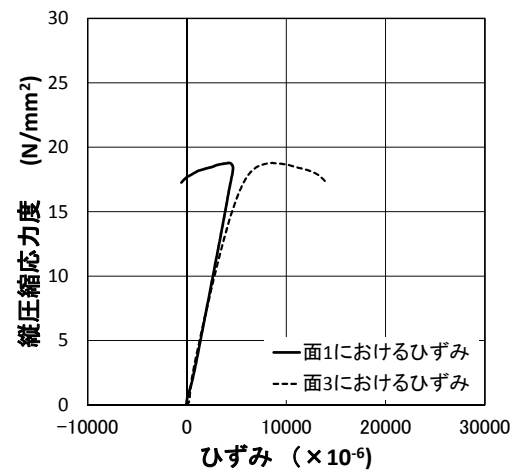
面 1 面 2 面 3 面 4

図 1.6-18 S5L6P-C25-W1 の破壊性状および縦圧縮応力度－ひずみ曲線



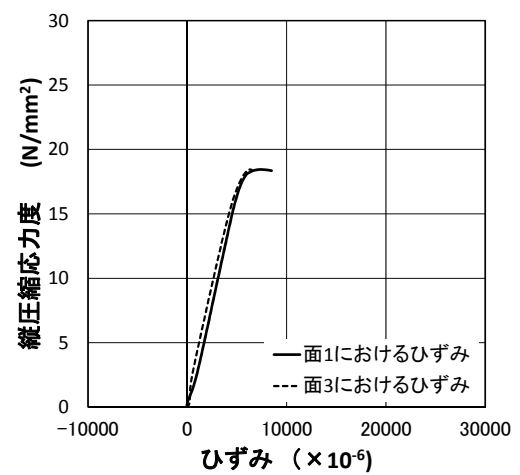
面 1 面 2 面 3 面 4

図 1.6-19 S5L6P-C25-W2 の破壊性状および縦圧縮応力度－ひずみ曲線



面 1 面 2 面 3 面 4

図 1.6-20 S5L6P-C25-W3 の破壊性状および縦圧縮応力度－ひずみ曲線



5層5プライ、6層6プライ、5層6プライのCLTの短柱（細長比 $\lambda=25$ ）の圧縮試験を行った結果、次のことがわかった。

- ・ラミナ厚 25mm であり、最外層の繊維方向が加力方向と平行（以下、強軸と略）である5層5プライのCLTの最大荷重に対して、25mm 厚もしくは 20mm 厚の繊維方向が加力方向と直交（以下、弱軸と略）するラミナを1層付加したラミナの最大荷重は 5~9%大きかった。

- ・5層5プライ（ラミナ厚 25mm）の強軸 CLT の最大荷重に対し、これに強軸のラミナ（25mm 厚）を1層付加した5層6プライのCLTの最大荷重は 37%大きかった。

- ・5層5プライ（ラミナ厚 25mm）の弱軸 CLT の最大荷重に対して、これに 20mm 厚の強軸ラミナを1層付加したラミナの最大荷重は 38%大きかった。

- ・5層5プライ（ラミナ厚 25mm）の弱軸 CLT の最大荷重と、これに 25mm 厚の弱軸ラミナを1層付加した5層6プライのCLTの最大荷重との差は 2%で、ほとんど変わらなかった。

- ・5層5プライの強軸 CLT の縦圧縮ヤング係数と、5層5プライの強軸 CLT に 25mm 厚もしくは 20mm 厚の弱軸ラミナを1層付加した6層6プライのCLTの縦圧縮ヤング係数はほぼ同じであった。

- ・5層5プライ（ラミナ厚 25mm）の強軸 CLT に強軸ラミナ（25mm 厚）1層を付加した5層6プライのCLTの縦圧縮ヤング係数は、5層5プライの強軸 CLT の縦圧縮ヤング係数よりも 32%大きかった。

- ・5層5プライ（ラミナ厚 25mm）の弱軸 CLT に 20mm 厚の強軸ラミナを1層付加した6層6プライのCLTの縦圧縮ヤング係数は、5層5プライの弱軸 CLT の縦圧縮ヤング係数よりも 26%大きかった。

- ・5層5プライ（ラミナ厚 25mm）の弱軸 CLT に弱軸ラミナ（25mm 厚）1層を付加した5層6プライのCLTの縦圧縮ヤング係数は、5層5プライの弱軸 CLT の縦圧縮ヤング係数と比較して 5%小さかった。

1.7 面内せん断性能 工型試験体による評価

1.7.1 概要

CLT の面内せん断性能のうち、せん断強度は、(1)ラミナの繊維方向のせん断強度、(2)ラミナの繊維に直交する方向のせん断強度、(3)接着層のせん断強度によって計算されるパネルのせん断強度のうち、最も小さいものとして評価される。非対称断面の場合でも、対称断面の場合と同様に上記の方法で評価できることを確認するため、エ型試験体の実大水平面内せん断実験による評価を実施した。

1.7.2 試験方法

(1)試験体

試験体には CLT（樹種：スギ、強度区分：Mx60-6-6、Mx60-5-6、Mx60-5-5）を用いた。幅 2000mm、高さ 1800mm のパネル中央に幅 840mm（ラミナ 8 枚分）、高さ 420mm（ラミナ 4 枚分）のくびれを設けた。パラメータは強度区分 3 種と最外層ラミナの繊維方向（強軸、弱軸）の 2 種の合計 6 種とし、各 1 体試験した。

表 1.7.1 試験体一覧

試験体名	試験体数	樹種	層構成	最外層の繊維方向	ラミナ厚 [mm]	ラミナ幅 [mm]
6 層 6 プライ強軸	1	スギ Mx60	6 層 6 プライ	鉛直	25	105
6 層 6 プライ弱軸	1			水平		
5 層 6 プライ強軸	1		5 層 6 プライ	鉛直		
5 層 6 プライ弱軸	1			水平		
5 層 5 プライ強軸	1		5 層 5 プライ	鉛直		
5 層 5 プライ弱軸	1			水平		

(2)加力方法

図 1.7.1 に試験のセットアップを示す。試験体下部は、治具を介し反力床に固定した。試験体上部は、平行移動装置を介し、鋼製フレームに固定されており、水平な状態を維持したまま、面内に自由に移動できるように支持した。治具の重量が鉛直荷重として試験体に負荷されないよう、上部治具は図 1.7.1 のように鉛直ジャッキを用いて上方向に吊り上げた。鉛直ジャッキは水平方向に自由移動できるよう、スライダを介し固定した。

水平加力は水平ジャッキの押し方向のみの単調載荷とした。

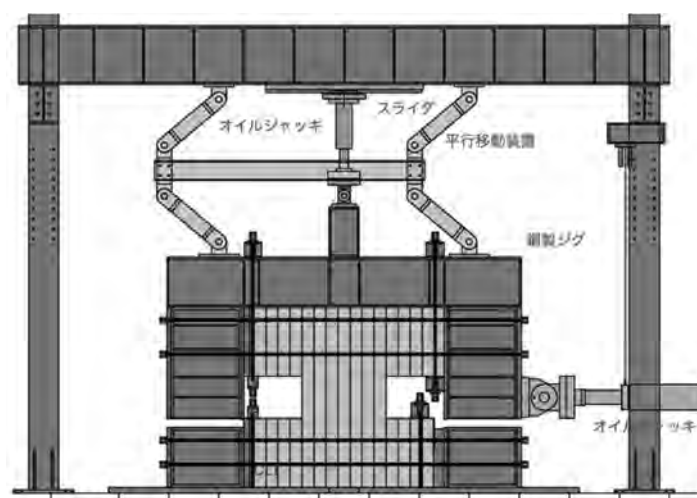


図 1.7.1 試験セットアップ

(3)計測方法

写真 1.7.1 に変位計の設置の様子を示す。非対称断面については、試験体の両面に写真 1.7.1 のように変位計を取り付け、表裏の計測値の平均を計測変位とした。



写真 1.7.1 変位計の設置

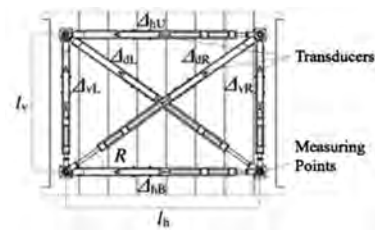


図 1.7.2 変位の定義

図 1.7.2 に計測変位の定義を示す。せん断応力度 (τ) は水平荷重をくびれ部分の断面積で除して求めた。せん断変形角 (γ) はせん断水平変位 (Δ_{hs}) を計測部高さ (l_v) で除し求めた。

$$\tau = \frac{P}{Bt}, \quad \gamma = \frac{\Delta_{hs}}{l_v}$$

$$\Delta_{hs} = \frac{\Delta_{ds}}{\cos R}$$

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

ここで、

P : 水平荷重 (N)、

B : 試験体幅 (mm)、

t : 試験体厚さ (mm)、

Δ_{hs} : せん断水平変位 (mm)、

l_v : 計測部高さ (mm)

せん断弾性係数は次のように定義した。

$$G = \frac{\tau_{04} - \tau_{01}}{\gamma_{04} - \gamma_{01}}$$

ここで、

τ_{04} : 最大せん断応力度 τ_{max} の 40% の応力度 (N/mm²)

τ_{01} : 最大せん断応力度 τ_{max} の 10% の応力度 (N/mm²)

γ_{04} : τ_{04} のときのせん断変形角 (rad)

γ_{01} : τ_{01} のときのせん断変形角 (rad)

比例限度応力度は目視により定め、せん断強度は最大せん断応力度と定めた。

1.7.3 実験結果

写真 1.7.2 に破壊の様子を示す。表 1.7.2 に試験結果を示す。図 1.7.3 にせん断応力度変形角関係を示す。いずれの試験体でも接着層のねじりせん断およびローリングシアせん断による破壊、いわゆるモード III の破壊が生じた。6 層 6 プライおよび 5 層 5 プライの強軸では最外層の鉛直方向のラミナに繊維に平行する方向に生じるせん断破壊、いわゆるモード I の破壊が生じた。



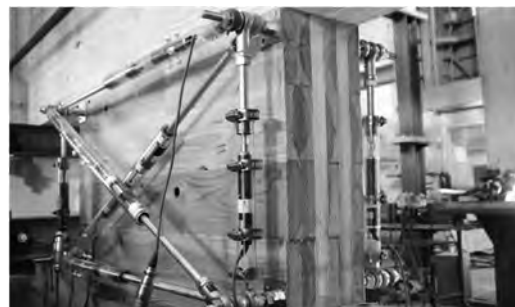
6層6プライ強軸



6層6プライ弱軸



5層6プライ強軸



5層6プライ弱軸



5層5プライ強軸



5層5プライ弱軸

写真 1.7.2 破壊の様子

表 1.7.2 実験値

試験体名	τ_{\max}	τ_{limit}	G	破壊モード
6層6プライ強軸	3.56	2.31	513	I, III
6層6プライ弱軸	3.58	1.91	716	I, III
5層6プライ強軸	3.24	1.96	351	III
5層6プライ弱軸	2.60	1.68	703	III
5層5プライ強軸	3.70	2.24	415	I, III
5層5プライ弱軸	3.38	2.50	600	III

τ_{\max} : CLT のせん断強度 (最大せん断応力度) (N/mm^2)

τ_{limit} : CLT の比例限度応力度 (N/mm^2)

G : CLT の面内せん断弾性係数 (N/mm^2)

破壊モード : モード I 外層ラミナの繊維に平行する方向のせん断破壊、モード II 内層ラミナの繊維に直交する方向のせん断破壊、モード III 接着層のねじりせん断破壊、もしくはローリングシア破壊

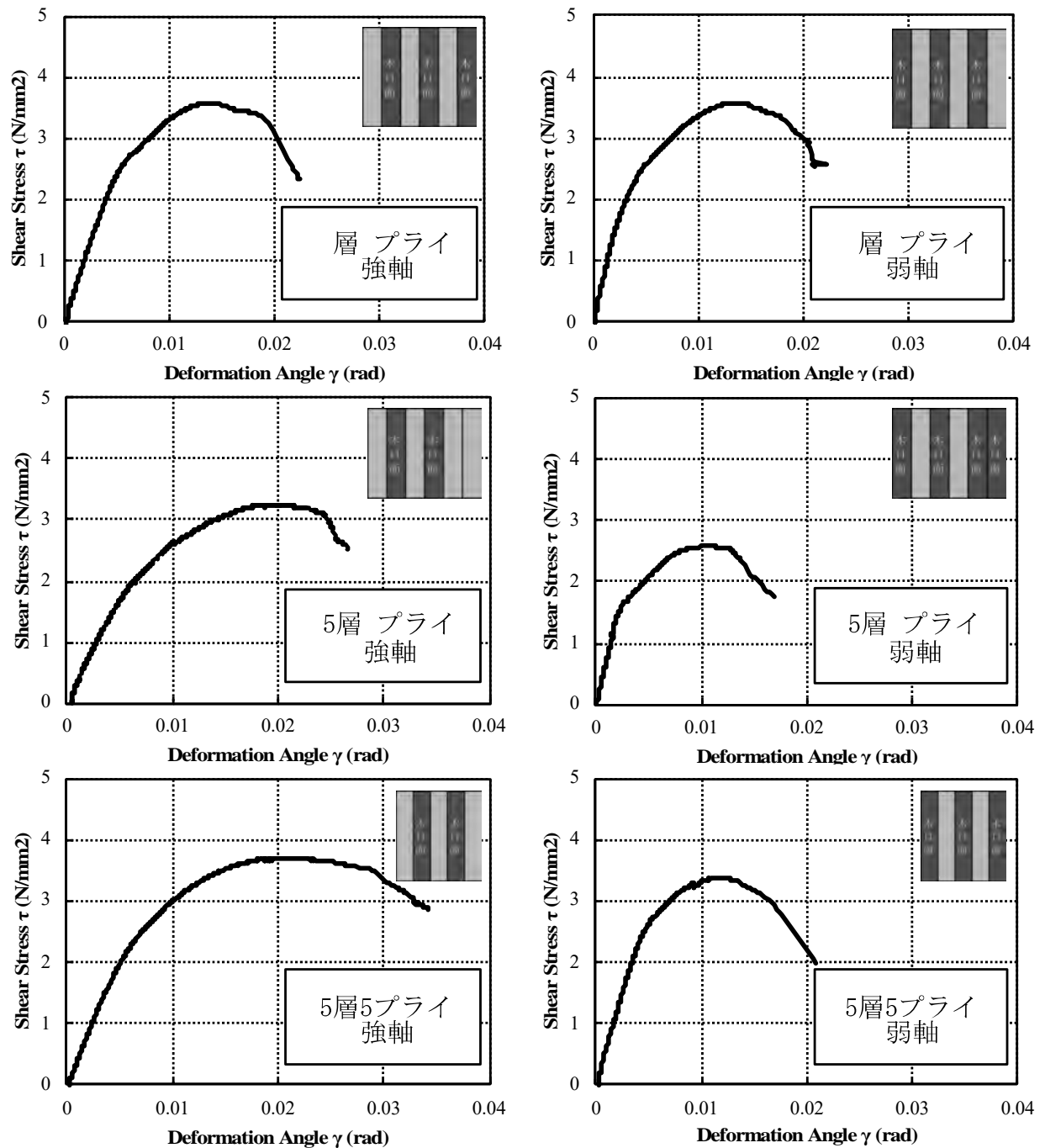


図 1.7.3 セン断応力度変形角関係

同一仕様とみなすことができる6層6プライの強軸と弱軸のせん断強度については、それぞれ、 3.56Nmm^2 、 3.58Nmm^2 でほぼ同じとなった。5層6プライの強軸と弱軸のせん断強度はそれぞれ 3.24Nmm^2 、 2.60Nmm^2 で、5層5プライの強軸と弱軸のせん断強度 3.70Nmm^2 、 3.38Nmm^2 より小さくなった。

1.7.6 計算値との比較

表 1.7.3 に告示式によるせん断強度の計算値との比較を示す。告示による CLT の面内せん断強度の計算式では、CLT の面内せん断強度は、(1)ラミナの繊維方向のせん断強度、(2)ラミナの繊維に直交する方向のせん断強度、(3)接着層のせん断強度でそれぞれ計算されるせん断強度のうち、最も小さい値で評価される。CLT の面内せん断強度 F_s は次式で表される。

$$F_s = \min \left\{ f_{v, \text{lam}, 0}, f_{v, \text{lam}, 90}, \frac{t_{\text{net}}}{t_{\text{gross}}} \frac{3bn_{\text{ca}}}{8t_{\text{gross}}} \cdot \frac{1}{\frac{1}{f_{v, \text{tor}}} \left(1 - \frac{1}{m^2} \right) + \frac{2}{f_R} \left(\frac{1}{m} - \frac{1}{m^2} \right)} \right\}$$

ここで、

$f_{v, \text{lam}, 0}$: ラミナの繊維方向のせん断強度 (N/mm²)

$f_{v, \text{lam}, 90}$: ラミナの繊維方向に直交する方向のせん断強度 (N/mm²)

$f_{v, \text{tor}}$: 接着された 2 つの直交するラミナの交差面のねじりせん断強度 (N/mm²)

f_R : ローリングシア強度 (N/mm²)

n_{ca} : 直交集成板の直交接着層の数

b : ラミナ幅 (mm)

t_{net} : 総層数に占める層数の少ない層のラミナ厚の和 (mm)

t_{gross} : 直交集成板の総厚さ (mm)

m : 各層のラミナの幅方向の枚数

表 1.7.3 計算値

試験体名	F_1	F_2	F_3	F_s	破壊 モード	τ_{max}	F_s / τ_{max}
6 層 6 プライ強軸	2.70	4.05	2.77	2.70	I	3.56	0.76
6 層 6 プライ弱軸	2.70	4.05	2.77	2.70	I	3.58	0.75
5 層 6 プライ強軸	2.70	3.24	2.22	2.22	III	3.24	0.68
5 層 6 プライ弱軸	2.70	3.24	2.22	2.22	III	2.60	0.85
5 層 5 プライ強軸	2.70	3.24	2.66	2.66	III	3.70	0.72
5 層 5 プライ弱軸	2.70	3.24	2.66	2.66	III	3.38	0.79

F_1 : モード I の場合のせん断強度 (N/mm²)

F_2 : モード II の場合のせん断強度 (N/mm²)

F_3 : モード III の場合のせん断強度 (N/mm²)

F_s : (N/mm²) : CLT のせん断強度 (計算値) (N/mm²)

τ_{max} : CLT のせん断強度 (実験値) (N/mm²)

計算値の実験値に対する比は 0.68・0.85 倍程度となり、計算値は安全側の評価となっており、実験値の傾向を概ね捉えていることが確認された。

1.8 面内せん断性能 逆対称 4 点曲げ試験等による評価

1.8.1 目的と概要

CLT の面内せん断性能について、エ型の試験より比較的簡便な逆対称 4 点曲げ試験や圧縮せん断による性能評価の可能性を検討することを目的として、スギによる Mx60 の 5 層 5 プライ、5 層 6 プライ、6 層 6 プライ等を対象に両試験を実施した。

1.8.2 逆対称 4 点曲げせん断試験

i) 試験方法

図 1.8.2-1 に示すように、支持間中央において、モーメントの正負が反転する逆対称曲げモーメントを作用させた。せん断力図、並びにモーメント図は図 1.8.2-2 の通りである。CLT の幅方向を梁のせいとし、全スパン (l) を $9h$ として逆対称 4 点曲げせん断試験を行った。クロスヘッドの下降速度は $0.4\sim 1.0$ mm/sec とした。

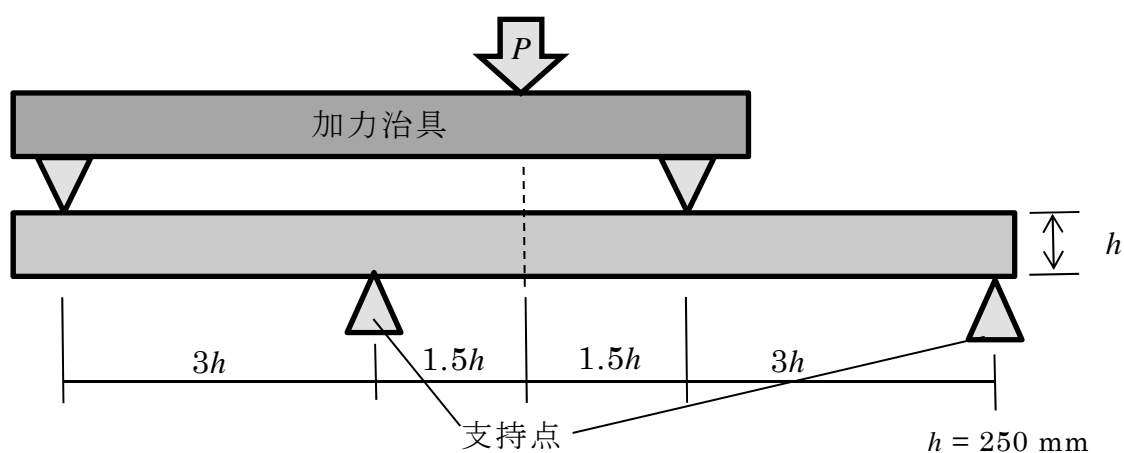


図 1.8.2-1 逆対称 4 点曲げせん断試験の概要

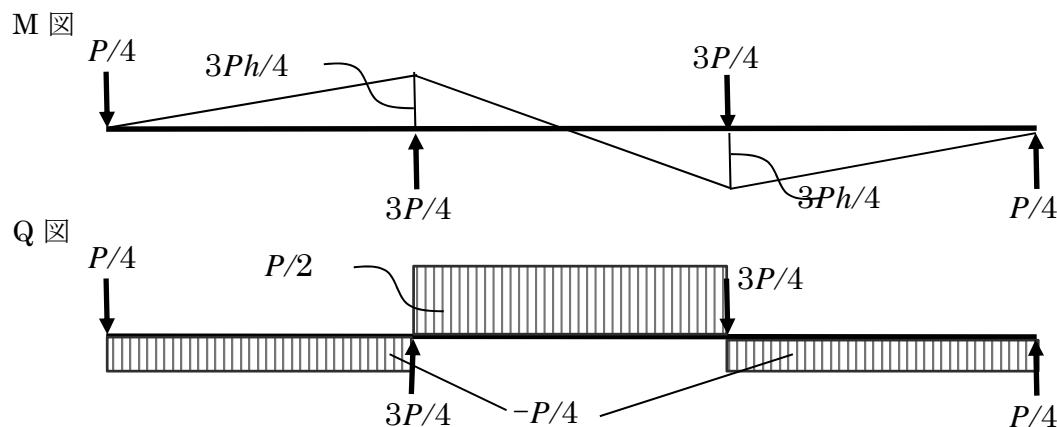


図 1.8.2-2 逆対称 4 点曲げせん断試験におけるモーメント及びせん断力の分布

ii) 試験体

試験体仕様一覧を表 1.8.2-1 に示す。ラミナ厚さは 25 mm で、試験体は全長 $4,200$ mm から $2,650$ mm の部分を切り出して試験に供し、残りの部分から圧縮せん断試験体を製作した。表 1.8.2-2 に各試験体の密度、含水率等を示す。

表 1.8.2-1 逆対称 4 点曲げせん断試験体の仕様

試験体名	外層 樹種	内層 樹種	強度 等級	層 数	プラ イ数	厚さ (mm)	幅 (mm)	長さ (mm)	数量
K-5L5P-ISO	スギ	スギ	Mx60	5	5	125	250	2,650	3
K-5L6P-ISO	スギ	スギ	Mx60	5	6	150	250	2,650	3
K-6L6P-ISO	スギ	スギ	Mx60	6	6	150	250	2,650	3

表 1.8.2-2 逆対称 4 点曲げせん断試験体の重量、密度、含水率

試験体名	重量 (kg)	密度 (g/cm ³)	含水率 (%)
K-5L5P-ISO-1	33.20	0.39	9.7
K-5L5P-ISO-2	32.88	0.38	10.0
K-5L5P-ISO-3	33.88	0.39	9.7
K-5L6P-ISO-1	41.96	0.41	10.7
K-5L6P-ISO-2	41.26	0.40	9.7
K-5L6P-ISO-3	40.82	0.40	10.1
K-6L6P-ISO-1	40.58	0.39	9.3
K-6L6P-ISO-2	41.34	0.40	9.2
K-6L6P-ISO-3	40.76	0.39	10.0

iii) 試験結果

加力試験の結果得られた全体荷重と曲げ変形（図 1.8.2-2 において上から 3P/4 の載荷が与えられた点の鉛直変位から支持点のめり込み変形を除いたもの）の関係を 5L5P、5L6P、6L6P についてそれぞれ図 1.8.2-3～1.8.2-5 に示した。

各試験体の試験実施状況と破壊状況を写真 1.8.2-1～1.8.2-9 に示す。破壊モードは全て外層ラミナと内層ラミナの接着層付近のせん断破壊であった。

せん断強さ τ を式(1.8.2-1)から、せん断弾性係数 G を式(1.8.2-2)から算出し、試験体の密度、含水率とともに表 1.8.2-3 に示す。せん断強さは既往の研究から得られた数値とほぼ同等の数値が得られたが、せん断弾性係数は既往の数値より高い値が得られた。逆対称 4 点曲げせん断試験はせん断強さの評価に対してのみ有効性であることが示唆された。

$$\tau = 3P_{\max}/4A \quad (1.8.2-1)$$

ここで、 τ ：せん断強さ (N/mm²)

P_{\max} ：最大荷重 (N)

A ：断面積 (mm²)

$$G = P/2\gamma A \quad (1.8.2-2)$$

ここで、 G ：せん断弾性係数 (N/mm²)

P ：荷重 (N)

γ ：せん断ひずみ

表 1.8.2-3 逆対称 4 点曲げせん断試験結果

試験体名	密度 (g/cm ³)	含水率 (%)	最大荷重 (kN)	最大荷重時変位 (mm)	せん断剛性 (N/mm ²)	せん断強度 τ (N/mm ²)	せん断弾性係数 G (N/mm ²)
K-5L5P-ISO-1	0.39	9.7	150.29	10.04	233	3.6	4706
K-5L5P-ISO-2	0.38	10.0	143.98	8.32	236	3.45	4010
K-5L5P-ISO-3	0.39	9.7	155.54	9.18	252	3.74	4033
平均	0.39	9.8	149.94	9.18	240	3.60	4250
標準偏差	0.005	0.141	4.726	0.702	8.34	0.118	323.0
変動係数	0.012	0.014	0.032	0.076	0.035	0.033	0.076
下限値*					236	3.22	4097
K-5L6P-ISO-1	0.41	10.7	178.13	11.03	229	3.56	3307
K-5L6P-ISO-2	0.40	9.7	182.80	10.12	264	3.66	2652
K-5L6P-ISO-3	0.40	10.1	202.25	12.59	275	4.05	2979
平均	0.40	10.2	187.73	11.25	256	3.76	2979
標準偏差	0.005	0.411	10.45	1.020	19.61	0.211	267.3
変動係数	0.012	0.040	0.056	0.091	0.077	0.056	0.090
下限値*					247	3.09	2853
K-6L6P-ISO-1	0.39	9.3	181.39	11.09	213	3.61	5872
K-6L6P-ISO-2	0.40	9.2	185.66	11.65	226	3.7	4639
K-6L6P-ISO-3	0.39	10.0	177.90	8.82	246	3.54	4275
平均	0.393	9.5	181.65	10.52	228	3.62	4929
標準偏差	0.005	0.356	3.173	1.224	13.57	0.065	683.2
変動係数	0.012	0.037	0.017	0.116	0.059	0.018	0.139
下限値*					222	3.41	4607

*：下限値は、75%信頼水準において、G は 50%、 τ は 95%下側許容限界値

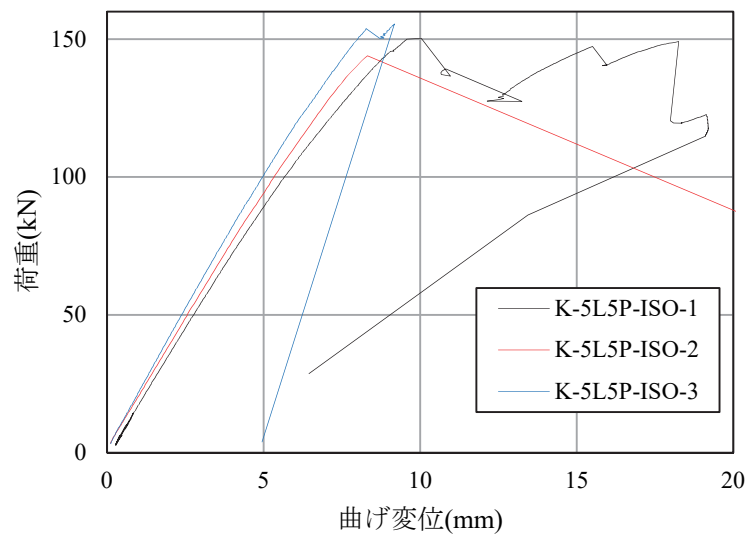


図 1.8.2-3 荷重-曲げ変位関係(K-5L5P-ISO-1~3)

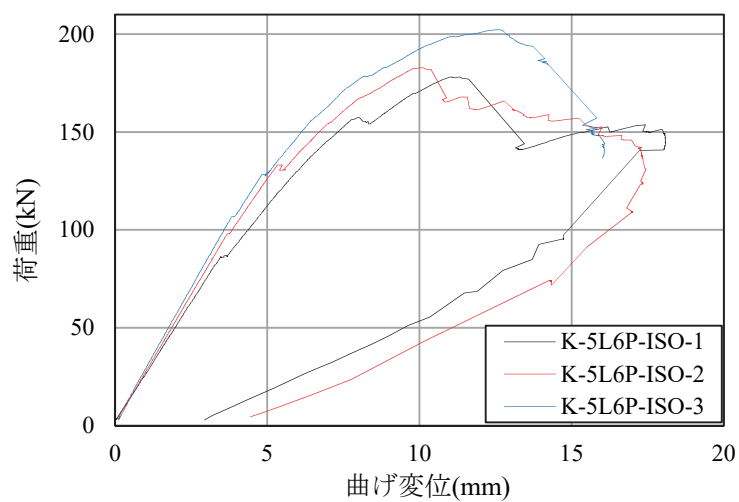


図 1.8.2-4 荷重-曲げ変位関係(K-5L6P-ISO-1~3)

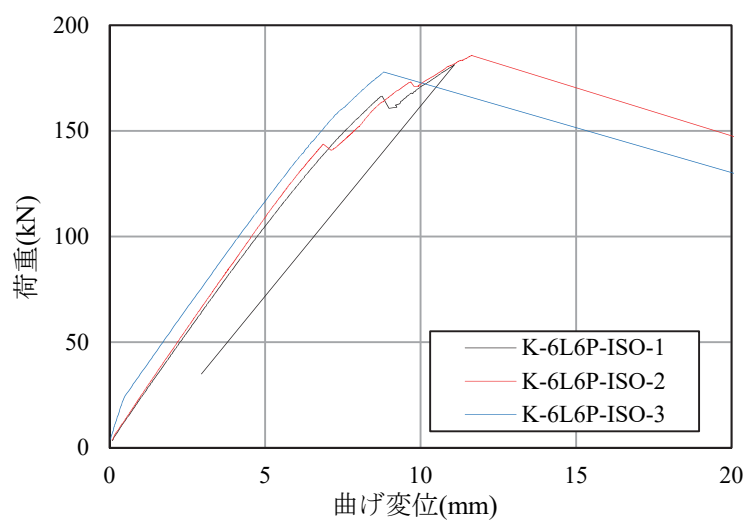
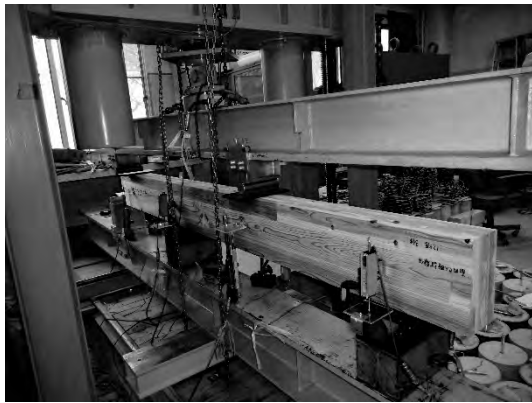


図 1.8.2-5 荷重-曲げ変位関係(K-6L6P-ISO-1~3)



加力前状況



最終破壊状況

写真 1.8.2-1 試験実施状況(K-5L5P-ISO-1)

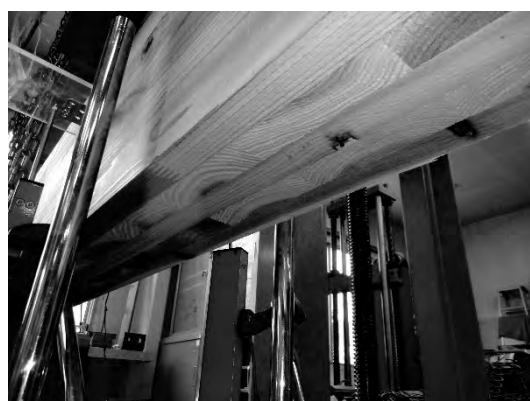


加力前状況



最終破壊状況

写真 1.8.2-2 試験実施状況(K-5L5P-ISO-2)

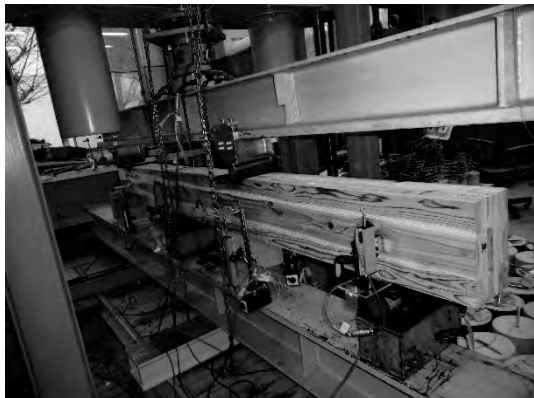


加力前状況

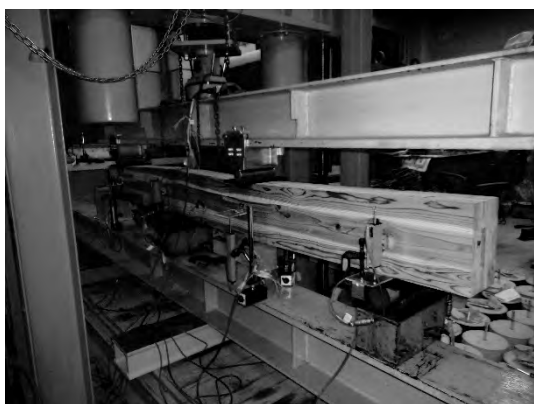


最終破壊状況

写真 1.8.2-3 試験実施状況(K-5L5P-ISO-3)



加力前状況



最終破壊状況

写真 1.8.2-4 試験実施状況(K-5L6P-ISO-1)



加力前状況



最終破壊状況

写真 1.8.2-5 試験実施状況(K-5L6P-ISO-2)



加力前状況



最終破壊状況

写真 1.8.2-6 試験実施状況(K-5L6P-ISO-3)



加力前状況

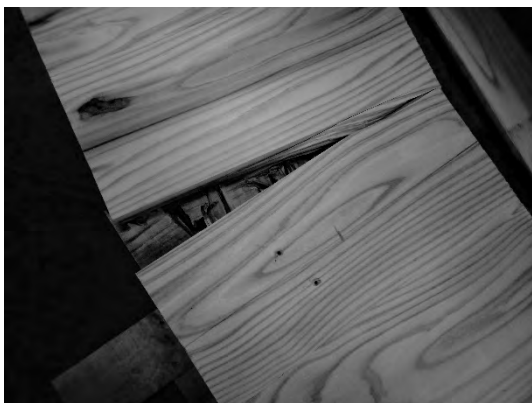
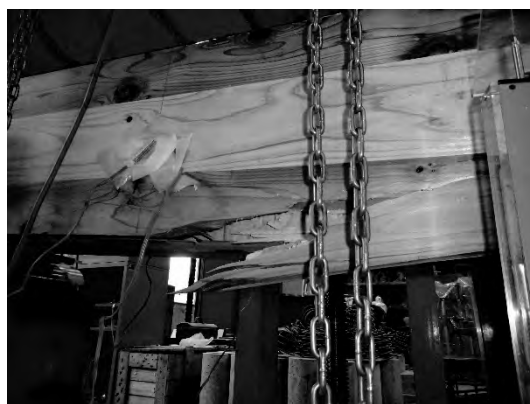


最終破壊状況

写真 1.8.2-7 試験実施状況(K-6L6P-ISO-1)



加力前状況



最終破壊状況

写真 1.8.2-8 試験実施状況(K-6L6P-ISO-2)



加力前状況



最終破壊状況

写真 1.8.2-9 試験実施状況(K-6L6P-ISO-3)

1.8.3 繊維直交方向の圧縮せん断試験

i) 試験方法

図 1.8.3-1 に示すような R. Brandner らによる試験方法 1.8.3-1) に準じて圧縮せん断試験を行った。表層ラミナの幅はぎ面に 3 mm のスリットを入れ、それを中心にして、ラミナの幅に応じた試験体 (図 1.8.3-2) を作成して、単調載荷試験を行った。

ii) 試験体

1.8.2 と同様にスギによる Mx60 の 5 層 5 プライ、5 層 6 プライ、6 層 6 プライを試験体とした。試験体数は各仕様について 6 体ずつ計 18 体である。また、比較のために厚さ 30

mm のラミナによる Mx60、及びヒノキによる S90 について、5 層 5 プライについても圧縮せん断試験を実施した。各試験体の仕様を表 1.8.3-1 に示す。各試験体の密度、含水率等を表 1.8.3-2 に示す。

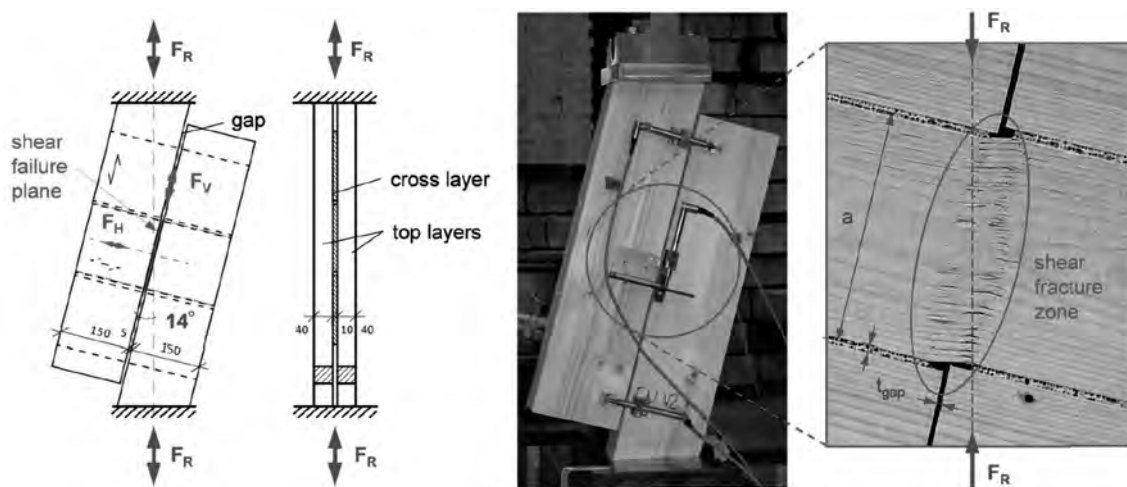


図 1.8.3-1 R. Brandner らによる圧縮せん断試験方法 2.2.2-1)

$$L = \frac{b}{\sin 14^\circ \cos 14^\circ} + \frac{s}{\tan 14^\circ} \quad (1.8.3-1)$$

ここで、 L : 試験体長さ (mm)

b : 片側のラミナの幅 (mm)

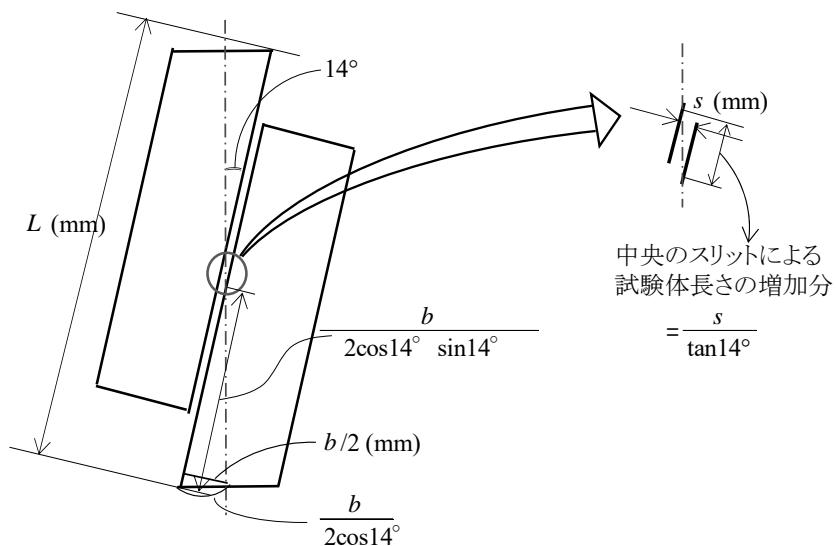


図 1.8.3-2 試験体の詳細寸法

表 1.8.3-1 試験体の仕様

試験体	外層樹種	内層樹種	強度等級	層数	プライ数	厚さ(mm)	試験体数
SM5L5P	スギ	スギ	Mx60	5	5	125	6
SM5L6P	スギ	スギ	Mx60	5	6	150	6
SM6L6P	スギ	スギ	Mx90	6	6	150	6
GIS-H-150	ヒノキ	ヒノキ	S90	5	5	150	6
GIS-SM-150	スギ	スギ	Mx60	5	5	150	6

表 1.8.3-2 試験体の密度および含水率

試験体	質量(kg)	含水率(%)	密度(g/cm ³)
SM5L5P-1	3.46	10.5	0.400
SM5L5P-2	3.32	10.5	0.386
SM5L5P-3	3.48	13.0	0.404
SM5L5P-4	3.52	13.0	0.409
SM5L5P-5	3.38	13.0	0.394
SM5L5P-6	3.38	12.5	0.393
SM5L6P-1	4.18	14.0	0.401
SM5L6P-2	4.32	11.5	0.416
SM5L6P-3	4.16	12.5	0.401
SM5L6P-4	4.30	13.5	0.414
SM5L6P-5	4.28	13.0	0.413
SM5L6P-6	4.46	11.0	0.431
SM6L6P-1	3.88	11.0	0.375
SM6L6P-2	4.10	10.5	0.396
SM6L6P-3	4.02	11.0	0.387
SM6L6P-4	4.02	11.0	0.387
SM6L6P-5	4.12	11.0	0.398
SM6L6P-6	3.92	12.0	0.379
GIS-H-150-1	7.38	9.7	0.520
GIS-H-150-2	7.26	9.3	0.513
GIS-H-150-3	7.27	8.8	0.514
GIS-H-150-4	7.24	9.7	0.512
GIS-H-150-5	7.54	9.3	0.532
GIS-H-150-6	7.50	9.3	0.531
GIS-SM-150-1	5.13	10.2	0.361
GIS-SM-150-2	5.42	9.5	0.383
GIS-SM-150-3	5.28	10.3	0.372
GIS-SM-150-4	5.46	10.0	0.383
GIS-SM-150-5	5.50	10.7	0.387
GIS-SM-150-6	5.39	11.0	0.380

iii) 試験結果

加力試験の結果、得られた荷重変形関係を図 1.8.3-3～7 に示し、各試験体の破壊状況をそれぞれ写真 1.8.3-1～1.8.3-10 に示す。破壊モードはいずれも内層間、もしくは内層－外層間のローリングシアによる破壊であった。せん断面積を加力軸間距離（表層ラミナの中心線の間隔）121 mm とせん断スパン 296 mm を乗じたものとし、せん断強さ τ を式(1.8.3-2)より算出し、試験体の密度とともに表 1.8.3-3 に示した。せん断強さは前述の逆対象曲げせん断試験の結果や、既往の研究結果で示される数値等より低めの数値となった。

$$\tau = P_{\max}/A$$

(1.8.3-2)

ここで、 τ ：せん断強さ (N/mm²)

P_{\max} ：最大荷重 (N)

A ：断面積 (mm²)

表 1.8.3-1 試験結果概要 (圧縮せん断試験)

試験体	最大荷重 (kN)	密度 (g/cm ³)	τ (N/mm ²)
SM5L5P-1	130.04	0.400	0.586
SM5L5P-2	136.78	0.386	0.615
SM5L5P-3	131.73	0.404	0.592
SM5L5P-4	104.82	0.409	0.471
SM5L5P-5	124.51	0.394	0.560
SM5L5P-6	134.67	0.393	0.605
平均	127.09	0.398	0.572
最大値	136.78	0.409	0.615
最小値	104.82	0.386	0.471
標準偏差	10.677	0.008	0.048
変動係数	0.084	0.019	0.084
下限値	—	—	0.557
SM5L6P-1	117.77	0.401	0.530
SM5L6P-2	127.26	0.416	0.572
SM5L6P-3	121.02	0.401	0.544
SM5L6P-4	131.49	0.414	0.591
SM5L6P-5	120.16	0.413	0.540
SM5L6P-6	134.35	0.431	0.605
平均	125.34	0.413	0.564
最大値	134.35	0.431	0.605
最小値	117.77	0.401	0.530
標準偏差	6.132	0.010	0.028
変動係数	0.049	0.025	0.049
下限値	—	—	0.556
SM6L6P-1	111.53	0.375	0.501
SM6L6P-2	110.47	0.396	0.496
SM6L6P-3	113.22	0.387	0.509
SM6L6P-4	123.45	0.387	0.555
SM6L6P-5	108.82	0.398	0.489
SM6L6P-6	113.10	0.379	0.508
平均	113.43	0.387	0.510
最大値	123.45	0.398	0.555
最小値	108.82	0.375	0.489
標準偏差	4.729	0.008	0.022
変動係数	0.042	0.021	0.042
下限値	—	—	0.503

試験体	最大荷重 (kN)	密度 (g/cm ³)	τ (N/mm ²)
GIS-H-150-1	209.22	0.520	0.786
GIS-H-150-2	196.08	0.513	0.738
GIS-H-150-3	194.00	0.514	0.731
GIS-H-150-4	210.86	0.512	0.796
GIS-H-150-5	201.06	0.532	0.757
GIS-H-150-6	202.24	0.531	0.765
平均	202.24	0.520	0.762
最大値	210.86	0.532	0.796
最小値	194.00	0.512	0.731
標準偏差	6.195	0.008	0.023
変動係数	0.031	0.016	0.031
下限値	—	—	0.755
GIS-SM-150-1	122.82	0.361	0.464
GIS-SM-150-2	141.80	0.383	0.535
GIS-SM-150-3	139.80	0.372	0.528
GIS-SM-150-4	148.94	0.383	0.558
GIS-SM-150-5	145.88	0.387	0.549
GIS-SM-150-6	145.26	0.38	0.547
平均	140.75	0.378	0.530
最大値	148.94	0.387	0.558
最小値	122.82	0.361	0.464
標準偏差	8.535	0.009	0.031
変動係数	0.061	0.023	0.059
下限値	—	—	0.521

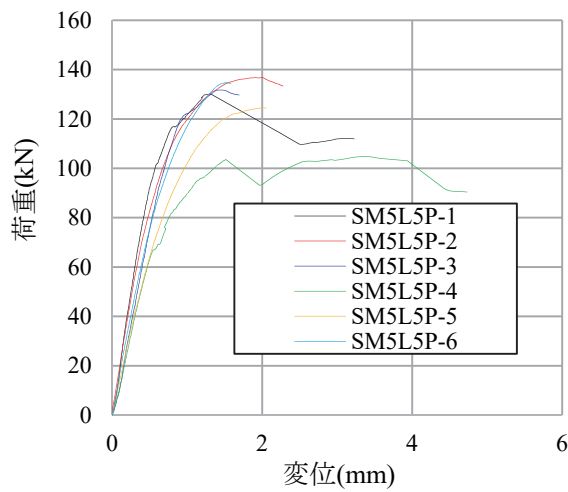


図 1.8.3-3 荷重・変位関係(SM5L5P-1~6)

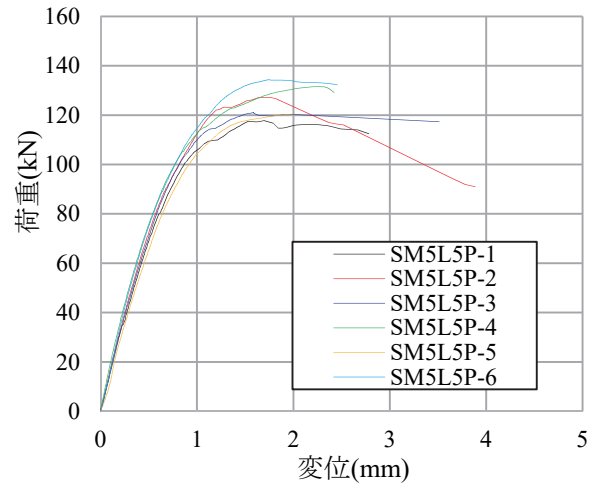


図 1.8.3-4 荷重・変位関係(SM5L6P-1~6)

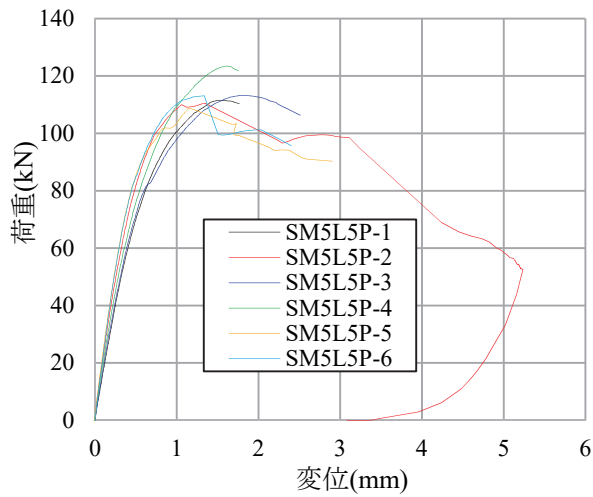


図 1.8.3-5 荷重・変位関係(SM6L6P-1~6)

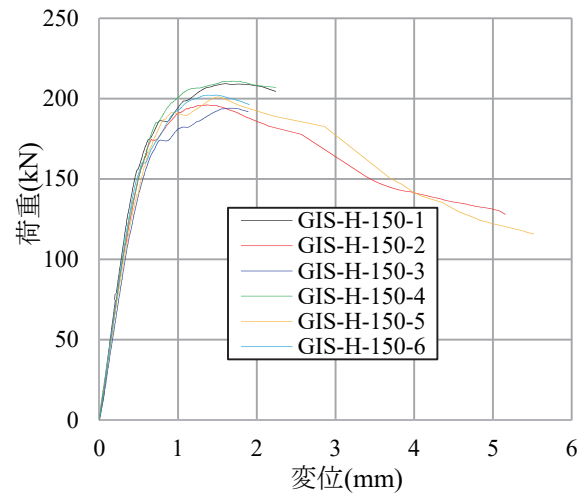


図 1.8.3-6 荷重・変位関係(GIS-H-150-1~6)

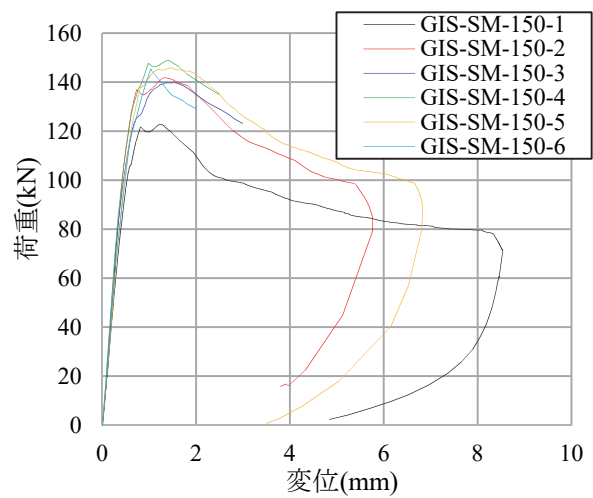


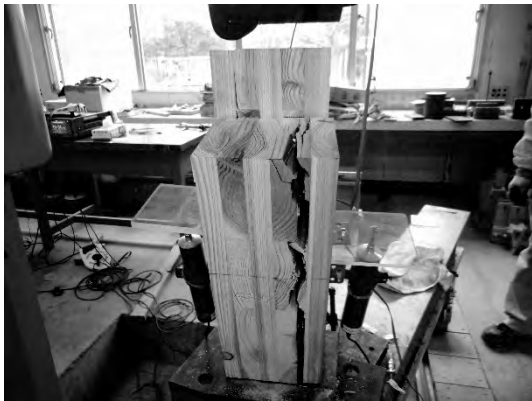
図 1.8.3-7 荷重・変位関係(GIS-SM-150-1~6)



SM-5L5P-1



SM-5L5P-2



SM-5L5P-3

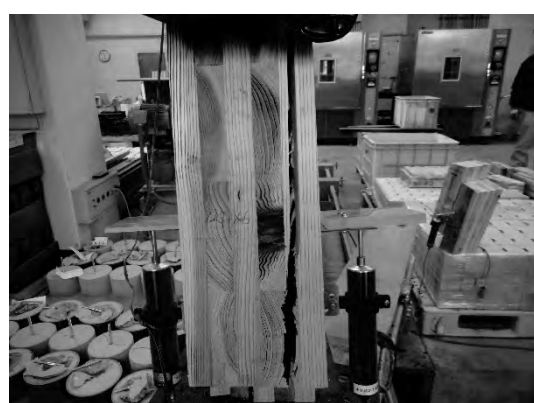
写真 1.8.3-1 最終破壊状況(SM-5L5P-1 ~ SM-5L5P-3)



SM-5L5P-4

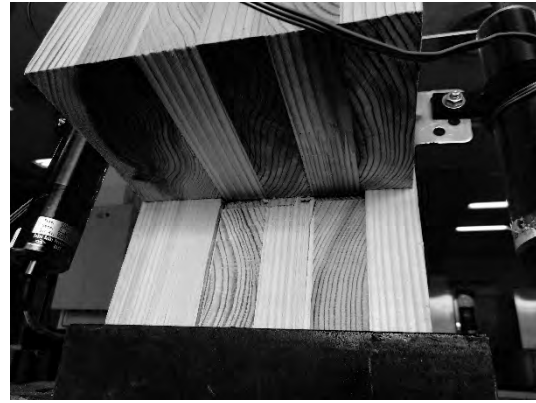


SM-5L5P-5



SM-5L5P-6

写真 1.8.3-2 最終破壊状況(SM-5L5P-4 ~ SM-5L5P-6)



SM-5L6P-1

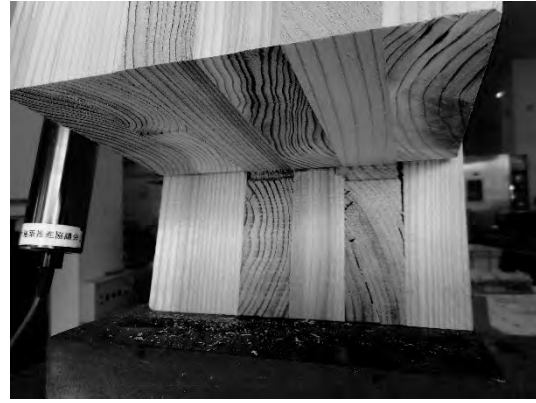


SM-5L6P-2



SM-5L6P-3

写真 1.8.3-3 最終破壊状況(SM-5L6P-1 ~ SM-5L6P-3)



SM-5L6P-4



SM-5L6P-5



SM-5L6P-6

写真 1.8.3-4 最終破壊状況(SM-5L6P-4 ~ SM-5L6P-6)



SM-6L6P-1

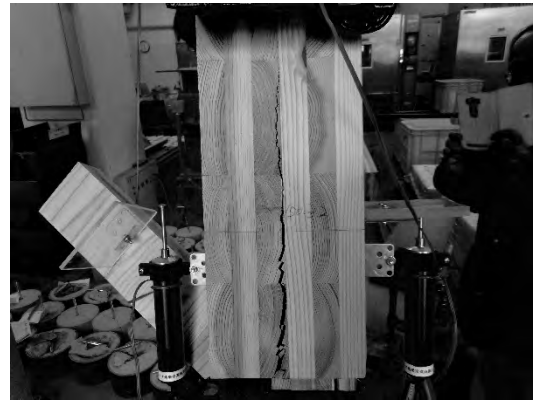


SM-6L6P -2



SM-6L6P -3

写真 1.8.3-5 最終破壊状況(SM-6L6P -1 ~ SM-6L6P -3)



SM-6L6P -4



SM-6L6P -5



SM-6L6P -6

写真 1.8.3-6 最終破壊状況(SM-6L6P-4 ~ SM-6L6P -6)



GIS-H-150-1

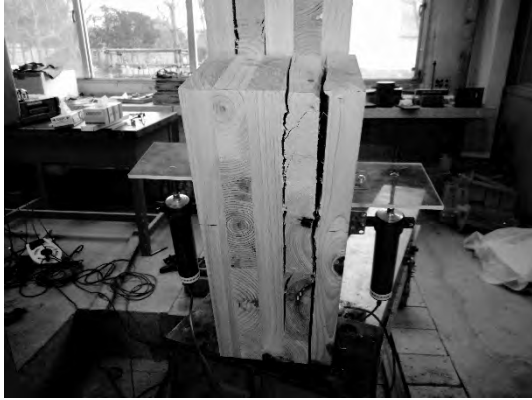


GIS-H-150-2



GIS-H-150-3

写真 1.8.3-7 最終破壊状況(GIS-H-150-1 ~ GIS-H-150-3)



GIS-H-150-4

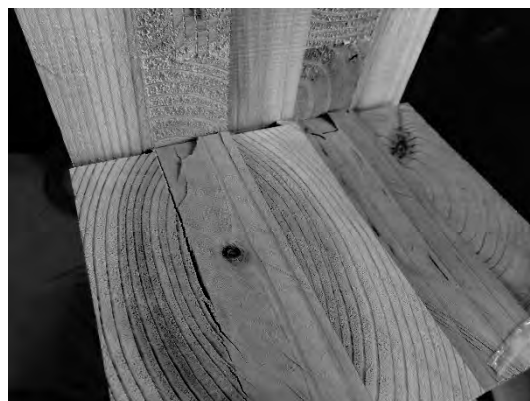


GIS-H-150-5



GIS-H-150-6

写真 1.8.3-8 最終破壊状況(GIS-H-150-4 ~ GIS-H-150-6)



GIS-SM-150-1

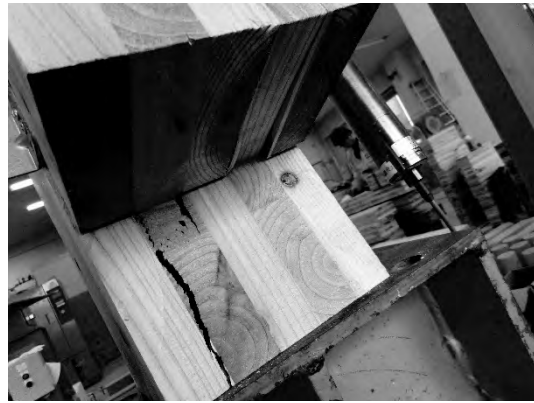


GIS-SM-150-2



GIS-SM-150-3

写真 1.8.3-9 最終破壊状況(GIS-SM-150-2-1 ~ GIS-SM-150-2-3)



GIS-SM-150-4



GIS-SM-150-5



GIS-SM-150-6

写真 1.8.3-10 最終破壊状況(GIS-SM-150-4 ~ GIS-SM-150-6)

1.9 引張性能（井道）

1.9.1 非破壊試験および引張り試験方法

引張り試験体の概要を表 1.9-1 に示す。

表 1.9-1 引張り試験体の概要

等級・層構成	ラミナ幅 (mm)	ラミナ厚 (mm)	寸法(mm) (厚さ×幅×長さ)	試験体数
S-5L5P-T 5 層 5 プライ強軸	105	25	125×300×5900	3
S-5L6P-T 5 層 6 プライ強軸			150×300×5900	3
S-5L6P-T-W 5 層 6 プライ弱軸				3
S-6L6P-T 6 層 6 プライ				3

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。縦振動法は材端木口部をハンマーで打撃し、反対側の材端に固定した加速度ピックアップにより 1 次の固有振動数を収録した。T.G.H.法はハンマーを用いて、材端上部を打撃し、打撃部近傍に設置した加速度ピックアップを用いて 1～7 次の固有振動数を測定した。支点の位置は材長の 0.224 倍とした。縦振動法、T.G.H.法による面内方向の固有振動数測定の様子をそれぞれ写真 1.9-1、1.9-2 に示す。



写真 1.9-1 縦振動法による固有振動数測定の様子



写真 1.9-2 T.G.H.法による面内方向の固有振動数測定の様子

5 層 5 プライ強軸以外の試験体は非対称構成である。そのため、引張り試験時に試験体の厚さ方向への変形が生じることが懸念される。そこで、強軸方向のラミナにゲージ長が 60mm のひずみゲージ（東京測器研究所 PL-60-11-3LJCT-F）を貼付した（一部試験体を除く）。ひずみゲージの貼付位置は図 1.9-1～10 の通りであり、各位置にはゲージ番号を振った。また、側面は展開図ではなく、同一の方向から見たものであり、図中の青色部分は引張り試験機のチャックを示している。貼付位置に節がある場合は、節から試験体長さ方向に 50mm 程度ずらした箇所にひずみゲージを貼付した。ただし、弱軸方向のラミナにはラミナ同士の幅はぎをしていないことを考慮し、ひずみゲージは貼付しなかった。

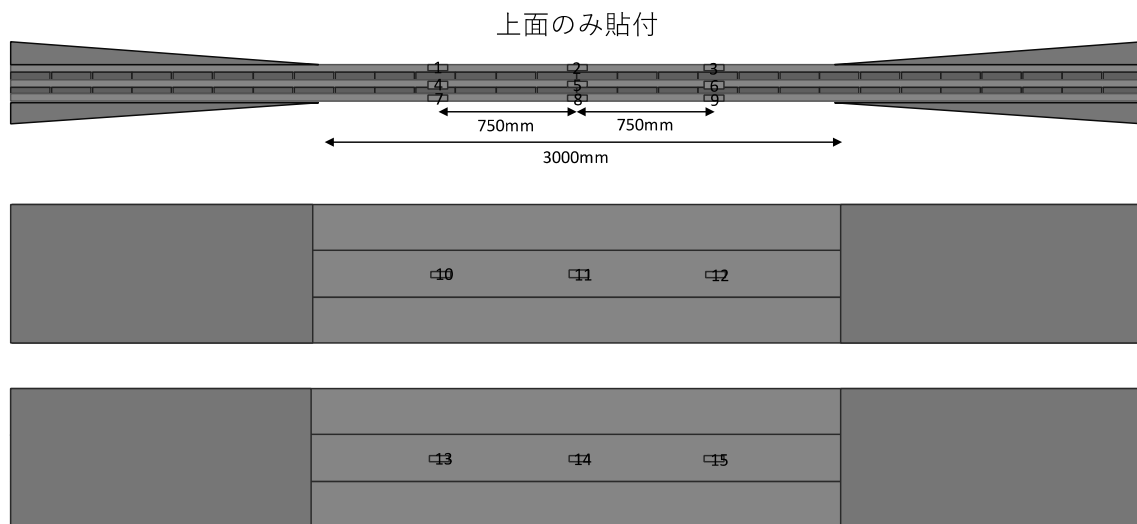


図 1.9-1 S-5L5P-T1 のひずみゲージ貼付位置

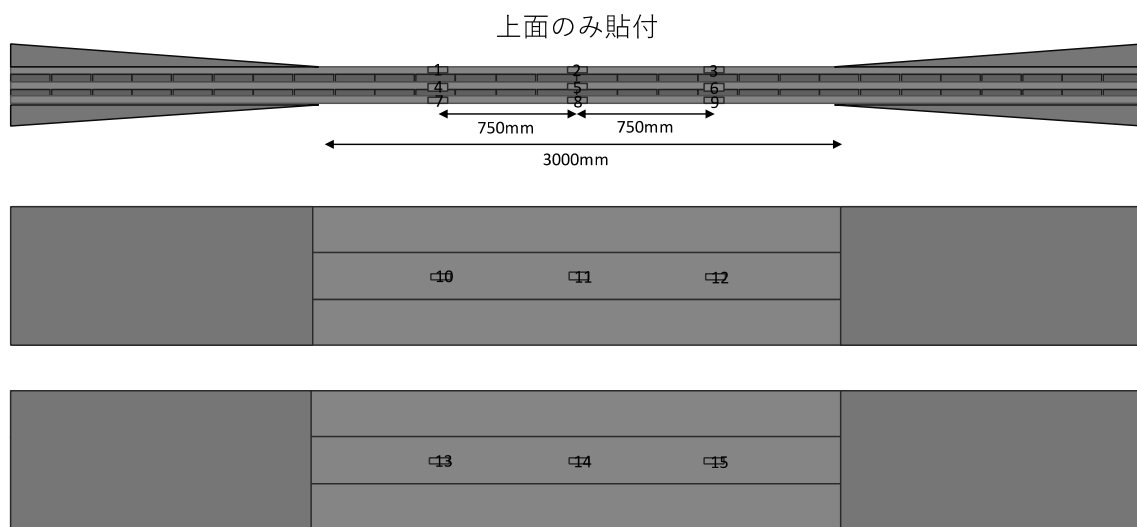


図 1.9-2 S-5L5P-T2 のひずみゲージ貼付位置

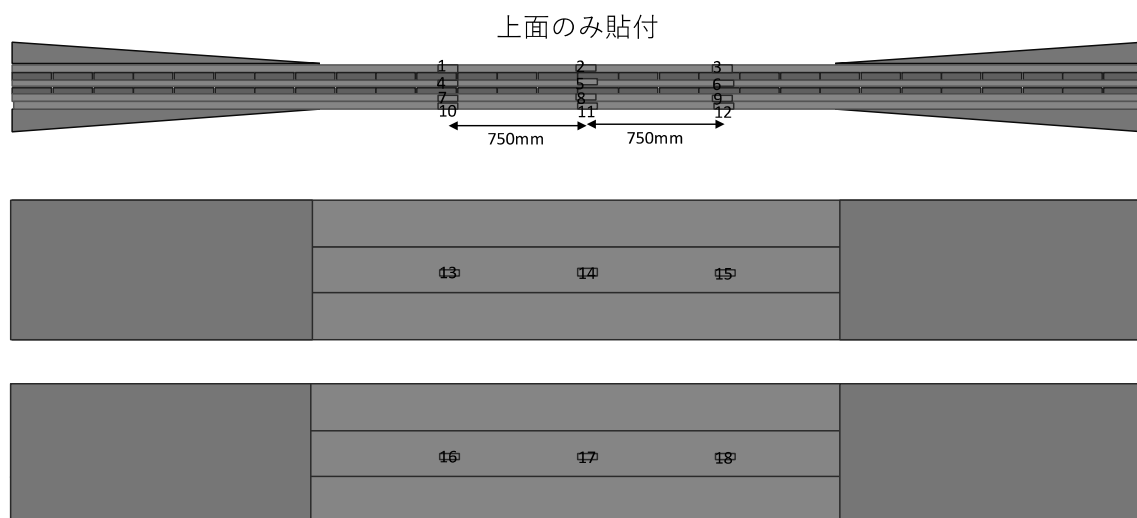


図 1.9-3 S-5L6P-T1 のひずみゲージ貼付位置

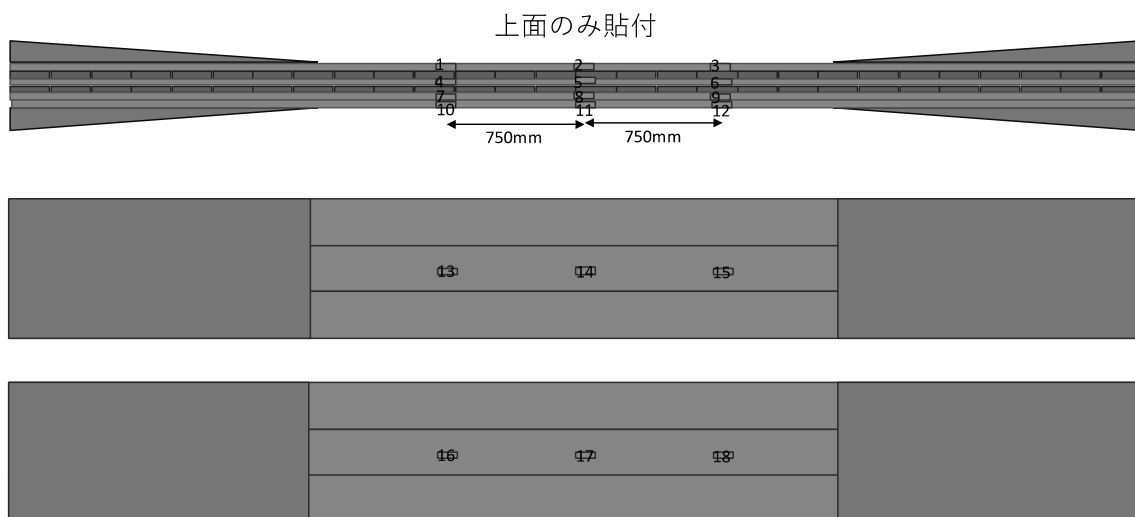


図 1.9-4 S-5L6P-T2 のひずみゲージ貼付位置

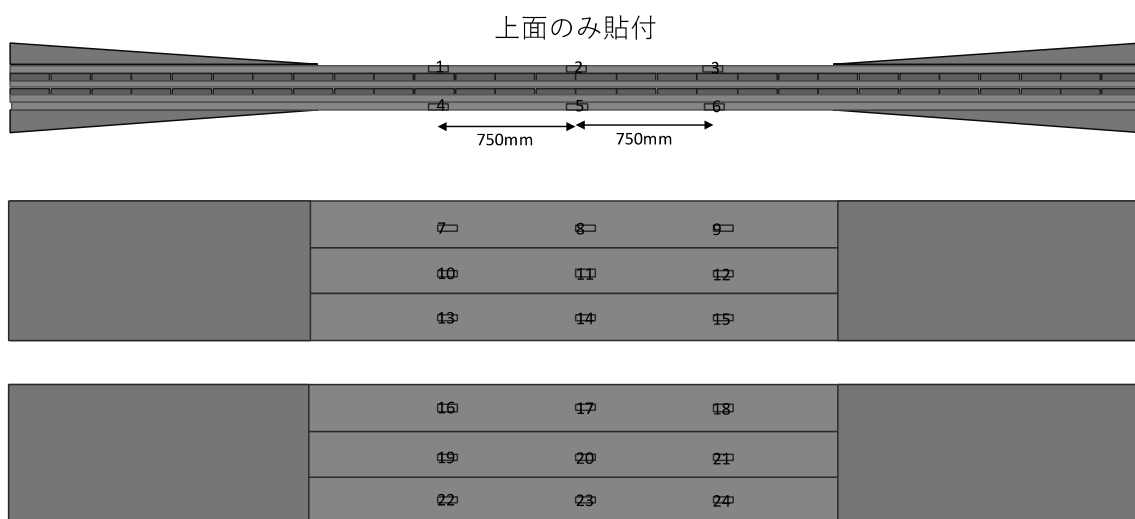


図 1.9-5 S-5L6P-T3 のひずみゲージ貼付位置

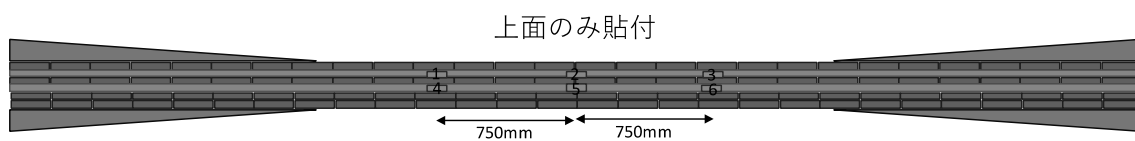


図 1.9-6 S-5L6P-T-W1 のひずみゲージ貼付位置

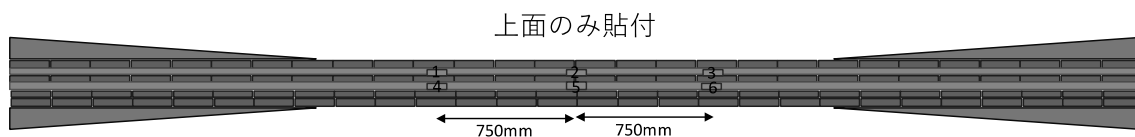


図 1.9-7 S-5L6P-T-W3 のひずみゲージ貼付位置

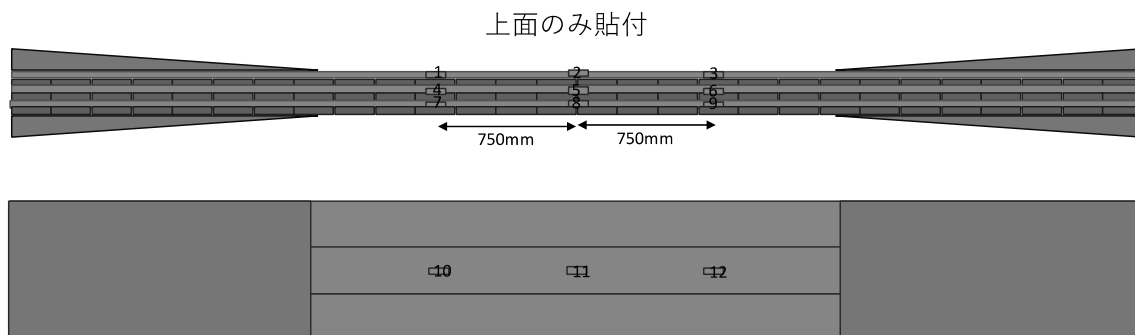


図 1.9-8 S-6L6P-T1 のひずみゲージ貼付位置

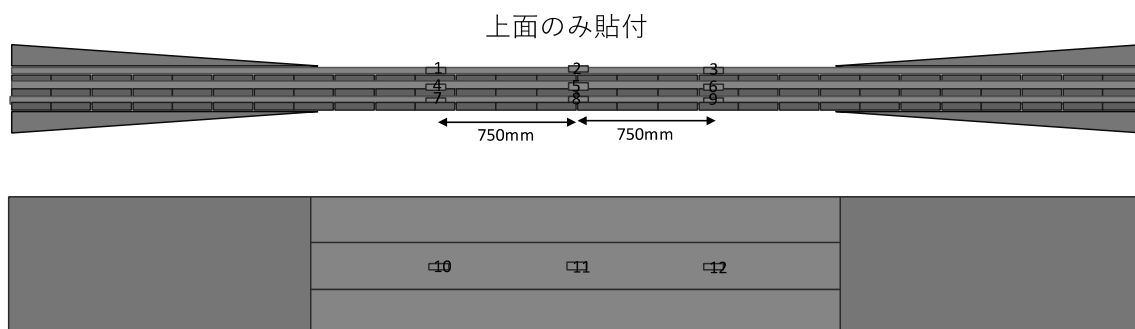


図 1.9-9 S-6L6P-T2 のひずみゲージ貼付位置

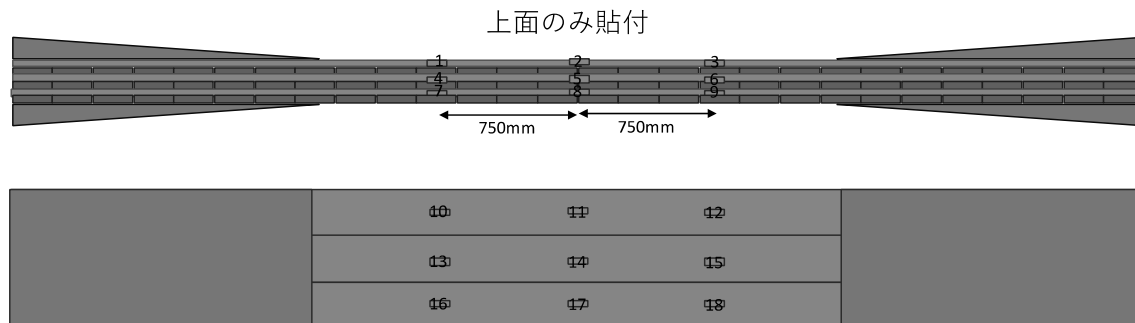


図 1.9-10 S-6L6P-T3 のひずみゲージ貼付位置

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、両つかみ（チャック）部分の長さは約 1200mm 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（加力速度）は 7mm/min とし、試験体が最大荷重に達するまで加力した。引張り試験、変位計とひずみゲージの様子を写真 1.9-3、1.9-4 に示す。試験終了後、破壊部近傍から長さが約 30mm の含水率測定用試験体を切り出し、全乾法で含水率を測定した。

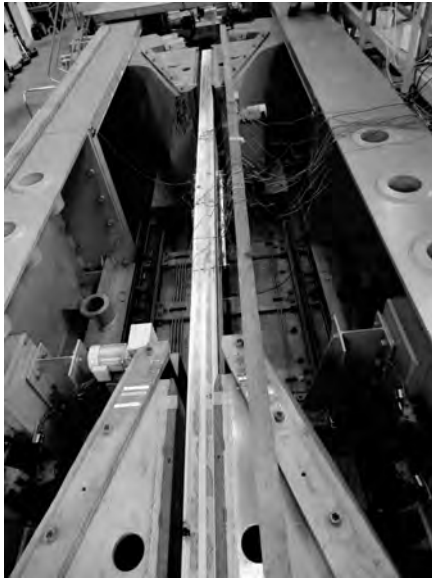


写真 1.9-3 引張り試験の様子



写真 1.9-4 変位計とひずみゲージの様子

1.9.2 引張り試験の結果および考察

破壊後の試験体の様子を写真 1.9-5～6 に示す。引張り試験の結果を種類ごとに表 1.9-2～5 に示す。



写真 1.9-5 破壊後の様子 (5 層 6 プライ弱軸)



写真 1.9-6 破壊後の様子 (6 層 6 プライ)

表 1.9-2 引張り試験結果 (S-5L5P-T, 5 層 5 プライ強軸)

番号	密度 (kg/m ³)	Efr	ETGHf	GTGHf	ETGHe	GTGHe	Et	ot	含水率 (%)
S-5L5P-T1	395	6.03	6.95	0.165	5.78	0.621	5.68	14.2	11.5
S-5L5P-T2	388	6.09	6.90	0.163	6.44	0.564	6.11	18.7	11.4
S-5L5P-T3	390	5.90	7.17	0.155	5.83	0.605	—	16.6	11.5
平均値	391	6.01	7.00	0.161	6.02	0.596	5.90	16.5	11.5
最小値	388	5.90	6.90	0.155	5.78	0.564	5.68	14.2	11.4
最大値	395	6.09	7.17	0.165	6.44	0.621	6.11	18.7	11.5
標準偏差	3.62	0.0978	0.143	0.00534	0.363	0.0297	0.305	2.23	0.0286
変動係数(%)	0.926	1.63	2.04	3.31	6.03	4.97	5.17	13.5	0.249

表 1.9-3 引張り試験結果 (S-5L6P-T, 5 層 6 プライ強軸)

番号	密度 (kg/m ³)	Efr	ETGHf	GTGHf	ETGHe	GTGHe	Et	σt	含水率 (%)
S-5L6P-T1	394	6.42	7.95	0.166	6.70	0.563	6.07	17.7	10.9
S-5L6P-T2	401	6.62	7.50	0.190	6.98	0.594	6.37	19.9	11.1
S-5L6P-T3	393	6.37	7.67	0.172	6.68	0.560	6.38	17.3	11.1
平均値	396	6.47	7.71	0.176	6.79	0.572	6.27	18.3	11.0
最小値	393	6.37	7.50	0.166	6.68	0.560	6.07	17.3	10.9
最大値	401	6.62	7.95	0.190	6.98	0.594	6.38	19.9	11.1
標準偏差	4.50	0.130	0.225	0.0124	0.165	0.0190	0.178	1.43	0.129
変動係数(%)	1.14	2.01	2.92	7.03	2.42	3.32	2.83	7.80	1.17

表 1.9-4 引張り試験結果 (S-5L6P-T-W, 5 層 6 プライ弱軸)

番号	密度 (kg/m ³)	Efr	ETGHf	GTGHf	ETGHe	GTGHe	Et	σt	含水率 (%)
S-5L6P-T-W1	397	3.44	4.39	0.0681	3.52	0.481	3.21	7.33	10.9
S-5L6P-T-W2	401	3.39	4.31	0.0705	3.62	0.469	—	7.58	10.6
S-5L6P-T-W3	400	3.51	4.38	0.0698	3.58	0.495	3.28	8.14	10.7
平均値	399	3.45	4.36	0.0694	3.57	0.482	3.25	7.69	10.8
最小値	397	3.39	4.31	0.0681	3.52	0.469	3.21	7.33	10.6
最大値	401	3.51	4.39	0.0705	3.62	0.495	3.28	8.14	10.9
標準偏差	1.78	0.0610	0.0462	0.00123	0.0489	0.0131	0.0520	0.416	0.164
変動係数(%)	0.445	1.77	1.06	1.78	1.37	2.72	1.60	5.41	1.53

表 1.9-5 引張り試験結果 (S-6L6P, 6 層 6 プライ)

番号	密度 (kg/m ³)	Efr	ETGHf	GTGHf	ETGHe	GTGHe	Et	σt	含水率 (%)
S-6L6P-T1	404	5.20	4.75	0.134	5.32	0.697	4.88	14.1	10.8
S-6L6P-T2	403	5.26	5.78	0.111	5.59	0.577	5.40	12.1	10.4
S-6L6P-T3	410	5.15	4.66	0.136	5.38	0.637	5.00	15.0	11.0
平均値	406	5.20	5.06	0.127	5.43	0.637	5.09	13.8	10.7
最小値	403	5.15	4.66	0.111	5.32	0.577	4.88	12.1	10.4
最大値	410	5.26	5.78	0.136	5.59	0.697	5.40	15.0	11.0
標準偏差	4.11	0.0550	0.625	0.0136	0.139	0.0597	0.270	1.48	0.327
変動係数(%)	1.01	1.06	12.3	10.7	2.56	9.37	5.29	10.7	3.05

Efr : 縦振動法によるヤング係数 (単位 kN/mm²)ETGHf : T.G.H.法による面外方向の曲げヤング係数 (単位 kN/mm²)GTGHf : T.G.H.法による面外方向のせん断弾性係数 (単位 kN/mm²)ETGHe : T.G.H.法による面内方向の曲げヤング係数 (単位 kN/mm²)GTGHe : T.G.H.法による面内方向のせん断弾性係数 (単位 kN/mm²)Et : 引張りヤング係数 (単位 kN/mm²)σt : 引張り強度 (単位 N/mm²)

注 : “—” は測定時の不具合によりデータが欠損したもの

試験体の破壊形態を写真 1.9-7～18 に示すとともに、ひずみゲージを貼付した試験体の最大荷重付近のひずみ量の結果を図 1.9-11～14 に示す。変位計によるひずみ量は、両側面に設置した変位計の平均と標点間距離からひずみを算出した。ひずみゲージの番号は、図 1.9-1～10 および写真 1.9-7～18 と対応している。一部節付近に貼付したひずみゲージのひずみ量が多いものと小さいものとがあるものの、各貼付位置での明確なひずみの差は見られなかった。この原因の一つとして、引張り試験機のチャック機構が試験体の幅・厚さ方向に対して追従するものではないため、変形を拘束した可能性が考えられる。

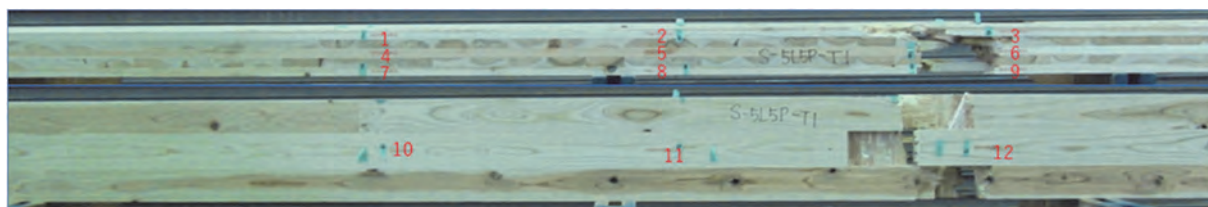


写真 1.9-7 S-5L5P-T1 の破壊形態

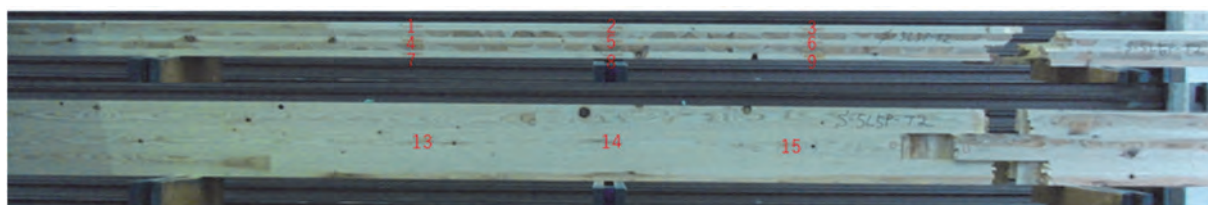


写真 1.9-8 S-5L5P-T2 の破壊形態



写真 1.9-9 S-5L5P-T3 の破壊形態

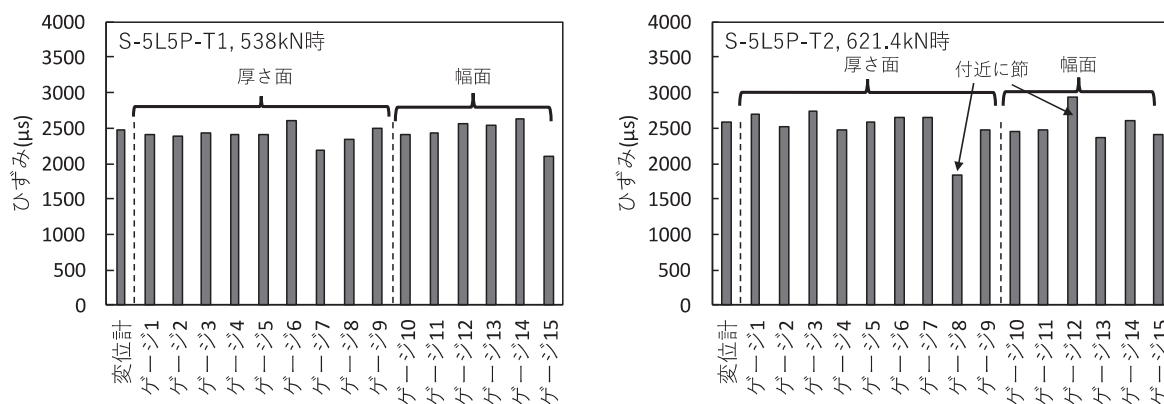


図 1.9-11 5層5プライ (S-5L5P-T) の最大荷重付近のひずみ量

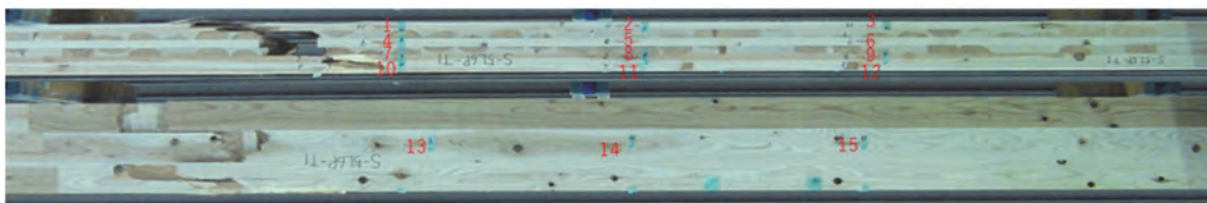


写真 1.9-10 S-5L6P-T1 の破壊形態

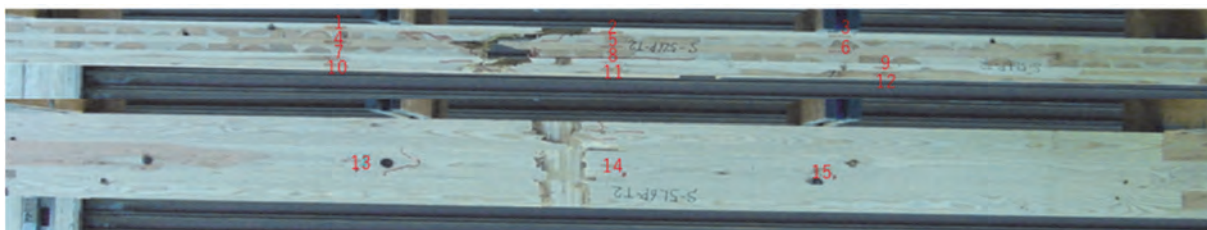


写真 1.9-11 S-5L6P-T2 の破壊形態



写真 1.9-12 S-5L6P-T3 の破壊形態

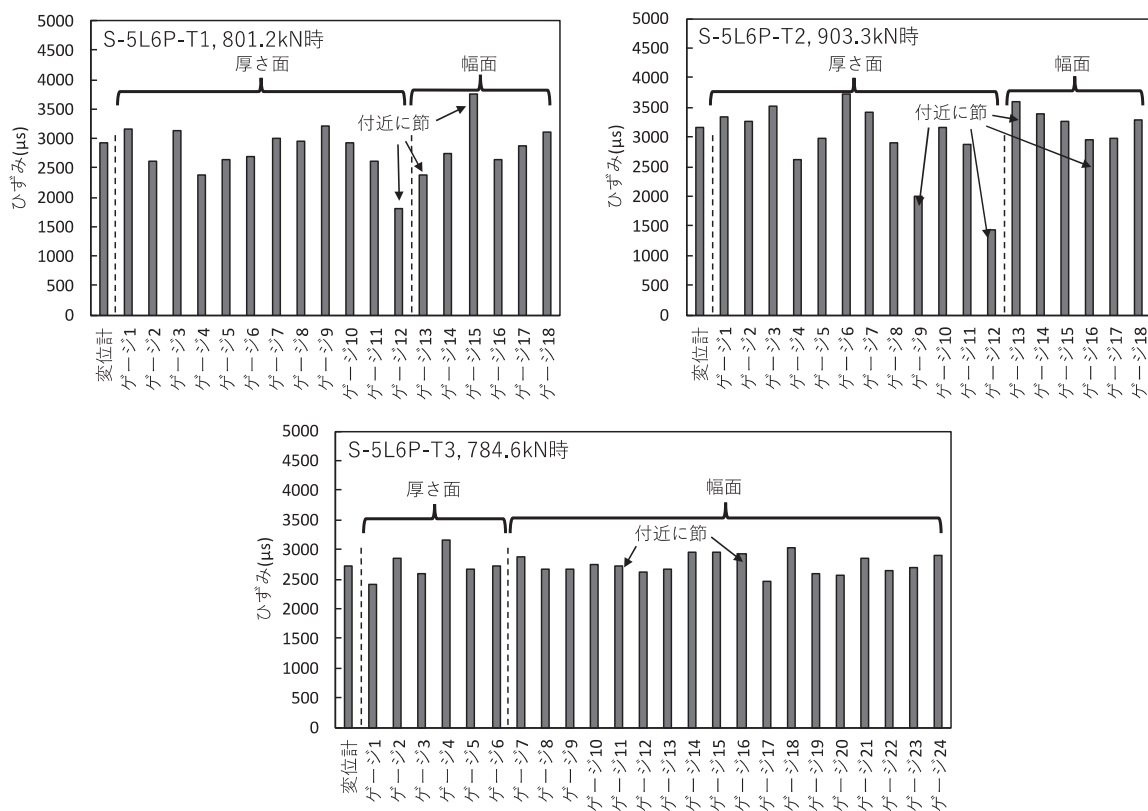


図 1.9-12 5層6プライ強軸 (S-5L6P-T) の最大荷重付近のひずみ量

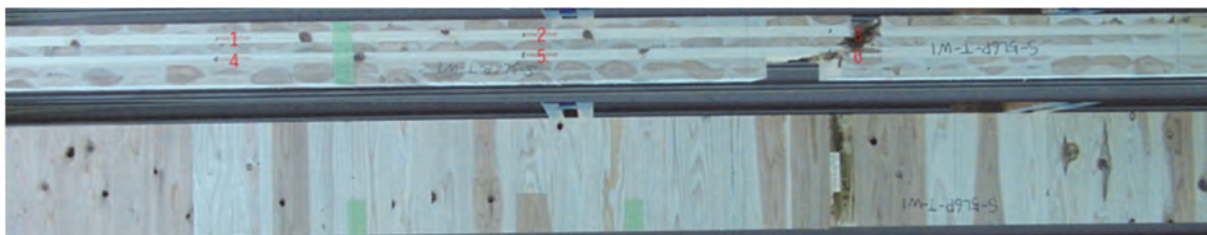


写真 1.9-13 S-5L6P-T-W1 の破壊形態



写真 1.9-14 S-5L6P-T-W2 の破壊形態



写真 1.9-15 S-5L6P-T-W3 の破壊形態

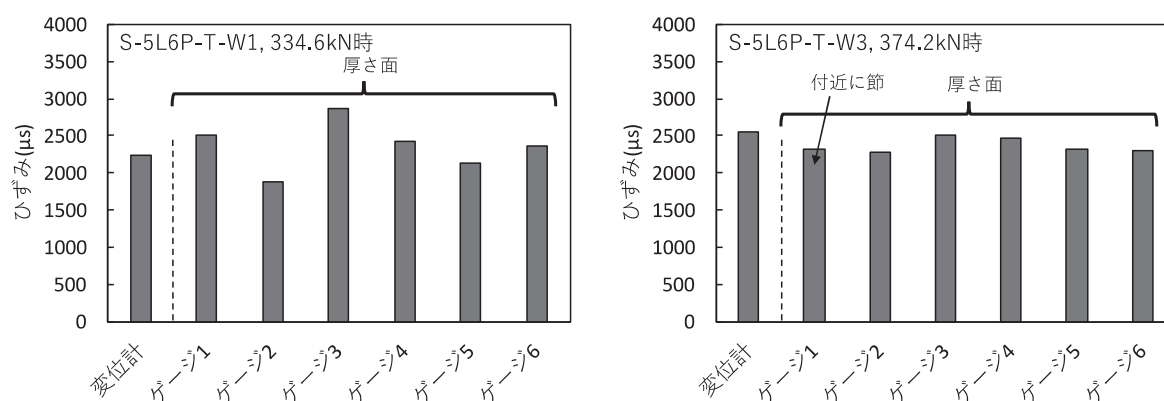


図 1.9-13 5層6プライ強軸 (S-5L6P-T-W) の最大荷重付近のひずみ量

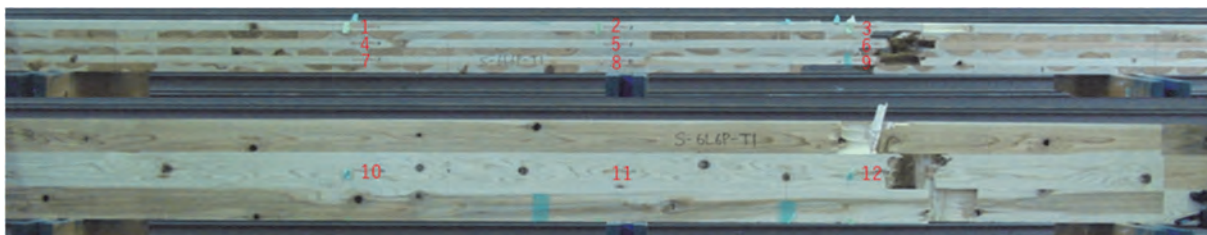


写真 1.9-16 S-6L6P-T1 の破壊形態

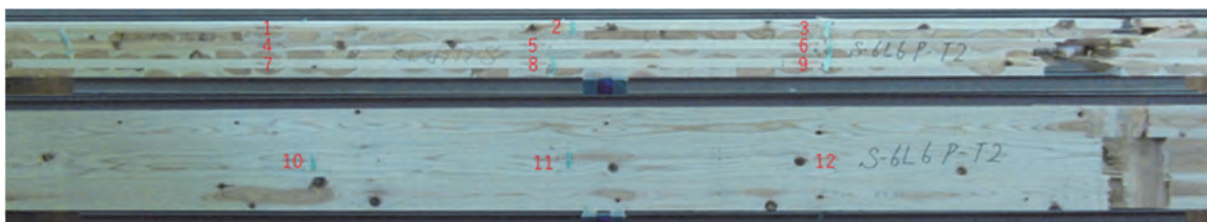


写真 1.9-17 S-6L6P-T2 の破壊形態



写真 1.9-18 S-6L6P-T3 の破壊形態

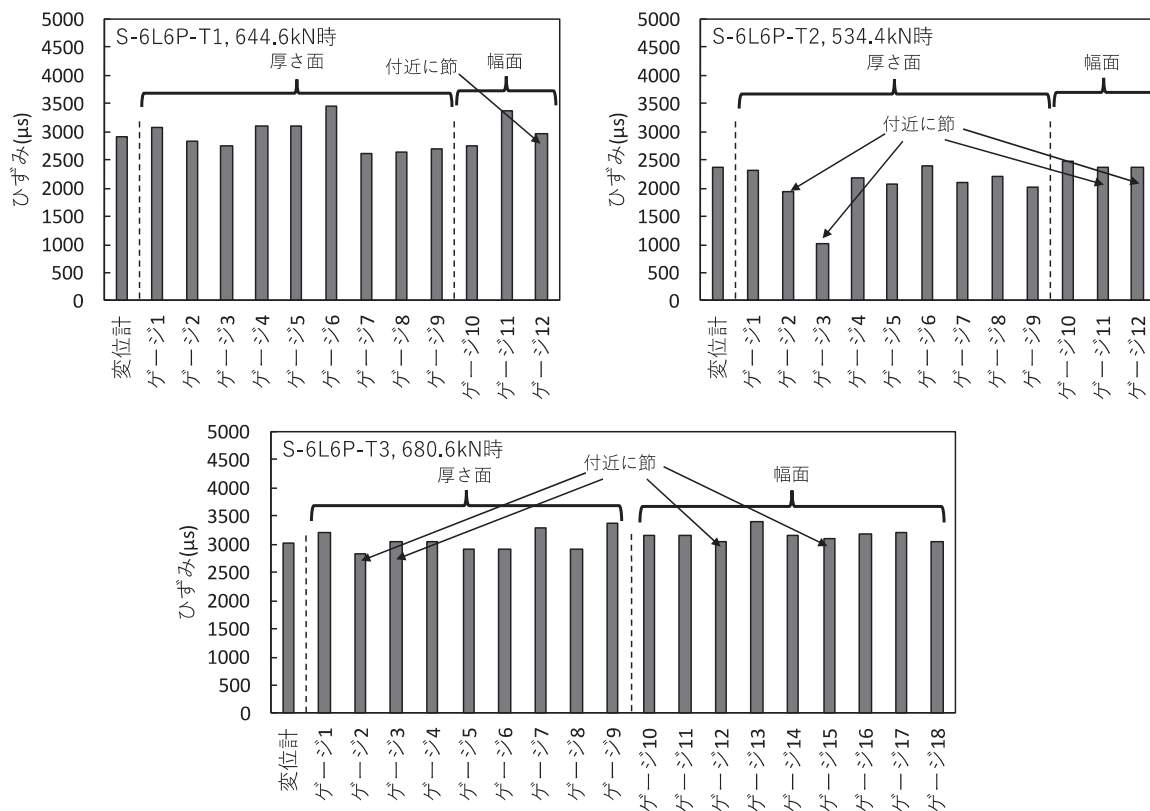


図 1.9-14 6層6プライ (S-6L6P-T) の最大荷重付近のひずみ量

1.10 直交層挙動の解明

ここでは、CLT の直交層の挙動について、直交層付ラミナの曲げ性能および CLT の直交層の層内せん断強度特性次の 2 つの課題について検討する。

1.10.1 直交層付ラミナの曲げ性能における課題

CLT が曲げを受けるとき、その曲げ剛性や曲げ強度は主に平行層の強度特性に依存すると考えられているが、直交層の影響については未だ不明な点が多い。特に非対称構成 CLT の弱軸曲げの強度性能には、直交層の影響が大きくなるおそれがある。そこで、直交層の影響が最も顕著に表れる直交層付ラミナ（2 層 2 プライ CLT）を基本モデルとして検討することとした。

直交層付ラミナが曲げを受けるとき、直交層の存在による影響として、次のようなものが考えられる（図 1.10-1）。

圧縮側に直交層がある場合は、中立軸より上（圧縮側）に位置する直交層は圧縮力が負担し、曲げ剛性に若干寄与すると考えられる。ラミナ間の幅はぎ接着の有無にかかわらず、影響があると考えられる。

引張側に直交層がある場合は、ラミナ間の幅はぎ接着が無いとき、曲げ変形により外縁にある直交層の間が開き、この部分が破壊の起点となり、平行層の破壊や強度に影響するおそれがある。また、中立軸より下（引張側）に位置する直交層は引張力を負担する。ラミナ間に幅はぎ接着が無い場合は、ある程度の引張力を負担し、曲げ剛性に若干寄与すると考えられる。なお、ラミナ間の幅はぎ接着が無い場合は、曲げ剛性への影響は小さいと考えられる。

上記のような問題を検討するため、予備試験、直交層付ラミナの平行層のヤング係数の評価方法、直交層付ラミナの曲げ性能を検討した。なお、このような検討を行う場合は、本来は条件による剛性の差異を比較し論じるべきであるが、数値の身近さから弾性係数の見かけの大きさが変化するものとして、本稿では主に弾性係数の違いを指標にして曲げ剛性の比較・検討することを断っておく。

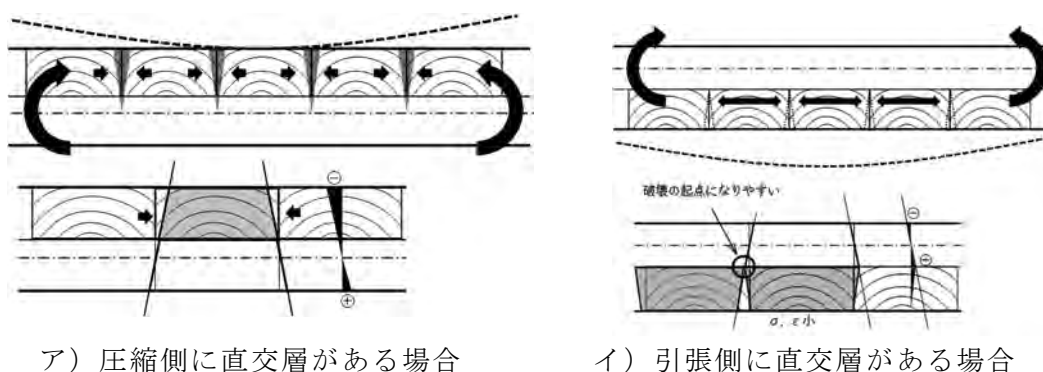


図 1.10-1 直交層付きラミナの曲げ

1.10.2 スリット付梁の曲げ試験（予備試験）

スリットを設けたラミナを直交層付ラミナのモデルとし、曲げ性能がどのように変化するか検討した。また、平行層のヤング係数の評価についても検討した。

i) 試験体と試験方法

試験体には長さ 1270mm×断面 105mm×30mm のフィンガージョイントの無いスギラミナ 4 本を用い、直交層に見立てたスリット加工を施し、曲げ剛性を測定した。

断面の 105mm の辺を梁せい h とし、スパン 1110mm、加力速度 1mm/分で中央最大たわみ 4mm 程度までの三等分四点曲げ試験を行った（図 1.10-2）。試験体は、(1) 加工前、(2) アサリ幅 0.75mm の手鋸により梁せいの半分まで 11cm 間隔でスリットを入れた状態（スリット付）でスリットが引張側の場合（スリット引張側）、(3) スリットが圧縮側の場合（スリット圧縮側）、(4) スリット部分を除去した状態（スリット除去）の 4 つの場合で順に供試した。なお、静的曲げ試験を行う前に各状態で縦振動法と T.G.H.法により弾性係数を測定した。参考のため、一連の静的曲げ試験終了後に曲げ破壊試験（加力速度 5mm/分）により曲げ強度を求めた。また、全乾法により含水率を求めた。

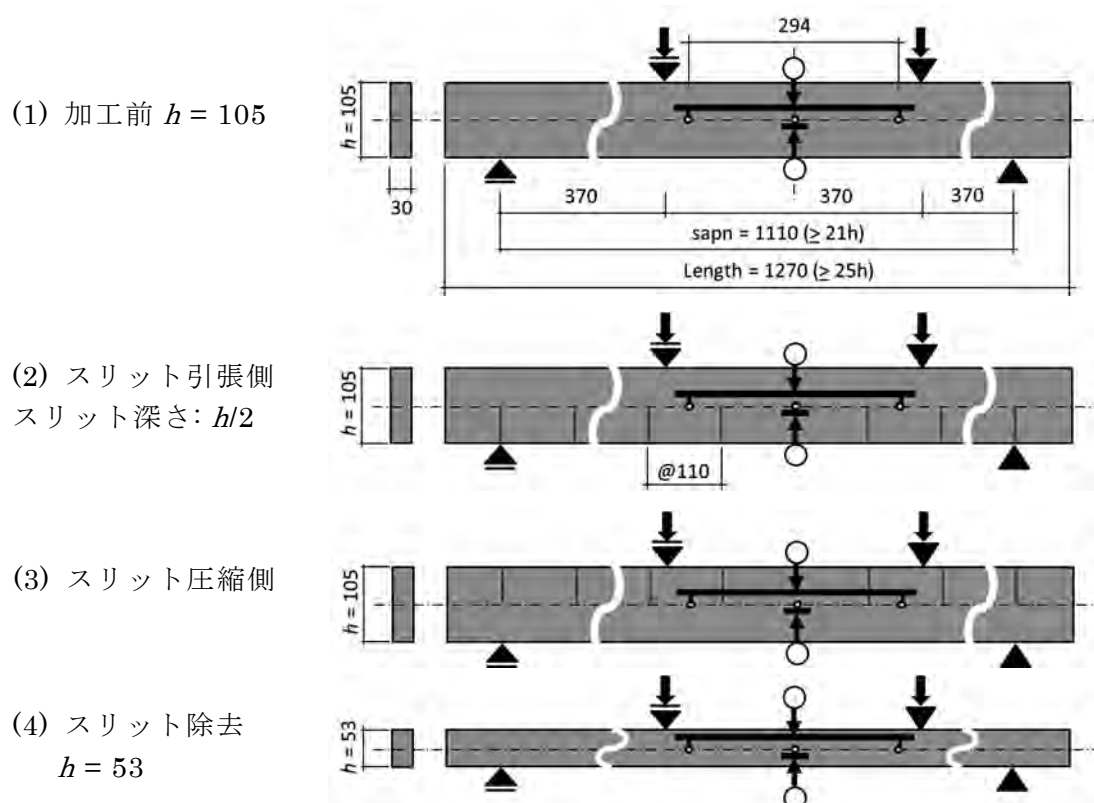


図 1.10-2 予備試験の試験方法（単位 mm）



写真 1.10-1 試験状況

ii) 結果（スリット付梁の曲げ試験）

試験結果を表 1.10.1～4 に示す。たわみ振動法で（一次の曲げ固有振動から）求めた見

かけの曲げヤング係数を E_{adb} とした。また、スリット付の場合は有効梁せいを実梁せい h ($=105\text{mm}$) の $1/2$ として弾性係数を求めた。静的試験においてスパン中央部における曲げモーメント一定区間のたわみと全たわみの測定値を用いて真の曲げヤング係数 E とせん断弾性係数 G を求めたが、適切な値が得られなかった。

表 1.10-1 加工前の試験結果 ($h = 105\text{mm}$)

No.	ρ	E_{fr}	E_{adb}	E_{TGH}	G_{TGH}	E_a	E	G
1	363	8.94	8.02	9.11	0.692	7.55	8.08	0.981
2	396	8.61	7.76	8.63	0.747	6.85	7.57	0.613
3	352	7.34	6.43	7.16	0.708	6.02	6.25	1.390
4	363	10.64	8.86	10.50	0.552	8.23	8.69	1.337

ρ : 試験体の密度 (kg/m^3)

E_{fr} : 縦振動法から求めた縦ヤング係数 (kN/mm^2)

E_{adb} : たわみ振動法で求めた見かけの曲げヤング係数 (kN/mm^2)

E_{TGH} : T.G.H.法 (せん断応力分布係数 $s=1.18$) で求めた真の曲げヤング係数 (kN/mm^2)

G_{TGH} : T.G.H.法 ($s=1.18$) で求めたせん断弾性係数 (kN/mm^2)

E_a : 静的曲げ試験から求めた見かけの曲げヤング係数 (kN/mm^2)

E : 静的曲げ試験から求めた真の曲げヤング係数 (kN/mm^2)

G : 静的曲げ試験から求めたせん断弾性係数 (kN/mm^2)

表 1.10-2 スリット加工後の試験結果

No.	ρ	E_{fr}	E_{adb}	E_{TGH}	G_{TGH}	スリット引張側			スリット圧縮側		
						E_a	E	G	E_a	E	G
1	362	9.49	10.58	11.45	0.491	10.46	9.00	-0.14	9.80	9.14	-0.29
2	394	9.57	10.78	11.67	0.512	10.39	9.76	-0.33	10.50	10.41	-2.56
3	351	7.74	9.30	9.93	0.467	8.64	8.95	0.540	8.78	8.58	-0.83
4	360	10.56	11.44	12.71	0.439	11.84	12.20	0.872	11.44	10.48	-0.27

記号の説明は表 1.10-1 に同じ。

注) 各弾性係数は有効梁せいを $h/2$ として求めた。

表 1.10-3 スリット除去後の試験結果 ($h = 53\text{mm}$)

No.	ρ	E_{fr}	E_{adb}	E_{TGH}	G_{TGH}	E_a	E	G
1	362	9.06	8.83	9.14	0.684	8.45	8.20	-0.614
2	392	9.19	9.20	9.08	0.746	8.99	9.65	0.275
3	353	7.41	7.55	7.71	0.700	6.89	7.32	0.251
4	369	10.94	10.61	10.94	0.545	10.21	11.05	0.276

記号の説明は表 1.10-1 に同じ。

表 1.10-4 曲げ強度および含水率

No.	σ_b	含水率 (%)	No.	σ_b	含水率 (%)
1	—	10.6	3	43.5	11.1
2	54.2	11.0	4	59.0	10.7

σ_b : 曲げ強度 (N/mm^2)

iii) 考察（スリット付梁の曲げ性能）

iii-1) スリット付梁の曲げ剛性

スリットを施した梁は、一種の切欠きのある梁とみなせる。切欠きのある梁の曲げについてはこれまで様々な研究があるが、ここでは平井^{1, 2)}の研究を参考にスリット付梁についてかなり簡略化したモデルを検討する。

図 1.10-3 にスリットのある梁の曲げモデルを示す。スリット部が負担する応力分布は実際かなり複雑であるが、簡略のため、上縁から破線内まで曲げ応力を負担していると仮定する。平井^{1, 2)}は切欠きのある木材梁について、応力のおよぶ範囲を切欠き深さ h に対して αh とし、 α を 5.0 とした。本稿では、スリット間にもこれが適用できるものと仮定する。スリットの内部の頂点からこの破線までの深さ g は $g = x / \alpha$ である。 $h = 53\text{mm}$ 、 $w = 110\text{mm}$ とすると、 $x = w/2$ のとき g は最大値 $w/10 = \text{約 } 0.21h$ である。梁の上側半分の断面二次モーメントを I_0 とすると、有効断面二次モーメント $I_e = (1+g/h)^3 I_0$ となる。

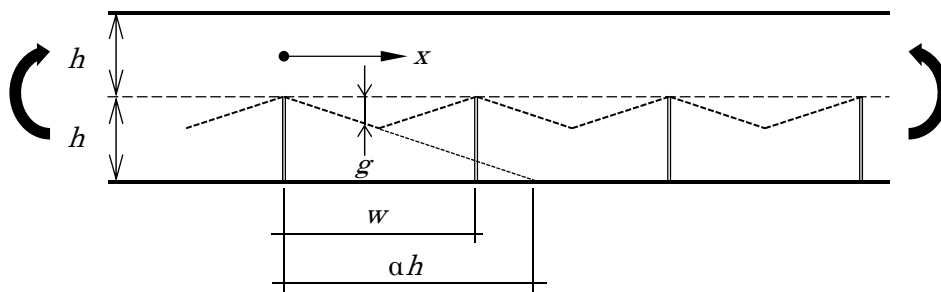


図 1.10-3 スリットのある梁の曲げモデル

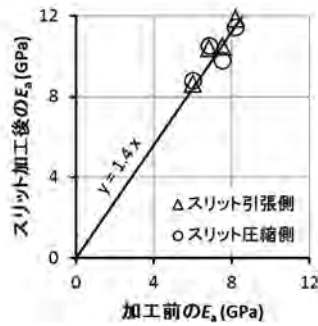
いま、スリットの基本単位となる $0 \leq x \leq w/2$ における断面二次モーメントの平均値をスリットのある梁の見かけの断面二次モーメント I_a とみなすと、 I_a は次のように求まる。

$$I_a = \frac{2}{w} \int_0^{w/2} I_e dx = \left[\frac{(2\alpha h + w)^4}{64\alpha^3 h^3} - \frac{\alpha h}{4} \right] \frac{2}{w} I_0 = 1.36 I_0 \quad 1.10-1$$

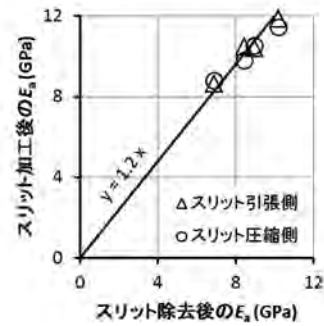
すなわち、上記の簡略モデルではスリットのある梁の曲げ剛性はスリット除去後の梁の曲げ剛性の 1.36 倍程度となることが予想される。

実験結果をみると、スリット加工前の状態と比較すると、スリットがある状態は見かけの曲げヤング係数 E_a は 4 割高い値を示した（図 1.10-4 ア）。同様に、スリット除去後と比較すると、2 割高い値を示した（図 1.10-4 イ）。スリット部が 2 ～ 4 割程度曲げ応力を負担し、曲げ剛性に寄与したと言える。この結果は上述の簡略モデルと概ね一致する。

このことから、幅はぎ接着のない直交層は直交層付ラミナの曲げ剛性の向上に若干ながら寄与すると考えられる。ただし、実際の直交層付ラミナでは、平行層に比べて直交層のヤング係数はかなり小さいため、その影響は小さくなると予想される。また、ラミナ間の隙間は極めて小さいため、圧縮側の寄与は引張側の場合よりも大きいことが予想される。



ア) 加工前



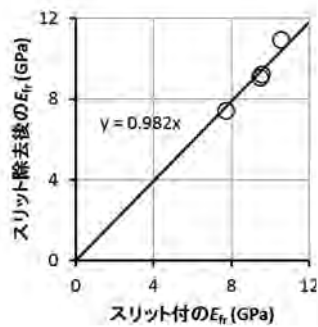
イ) スリット除去後

図 1.10-4 加工前、スリット付および除去後の見かけの曲げヤング係数の比較

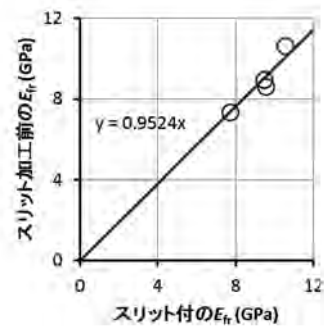
iii-2) 動的試験による直交層付ラミナの曲げ剛性の予測の可能性

スリット付梁の有効梁せいを $h/2$ として縦振動法で求めた縦弾性係数 E_{fr} を算出すると、スリット除去後の E_{fr} とほぼ一致した (図 1.10-5 ア)。また、わずかな差ではあるがスリット加工後の方がスリット加工前よりも一致した。縦振動法により直交層付ラミナの平行層の縦弾性係数が推定できる可能性があると考えられる。

スリット加工の有無における動的曲げヤング係数 E_{adb} の関係を比較すると、図 1.10-4 の静的な見かけの曲げヤング係数と同様の傾向がみられた (図 1.10-6)。たわみ振動法により直交層付ラミナの見かけの曲げ剛性が推定できる可能性があると考えられる。

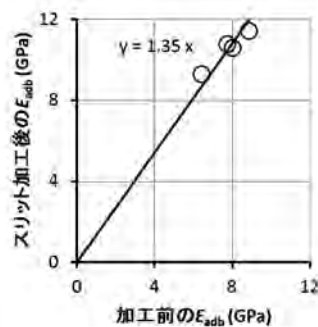


ア) スリット除去後

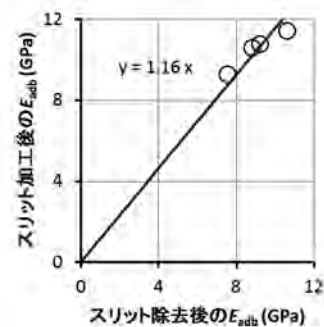


イ) スリット加工前

図 1.10-5 スリット付きとスリットなしの E_{fr} の比較



ア) スリット除去後



イ) スリット加工前

図 1.10-6 スリット付きとスリットなしの E_{fr} の比較

iv) まとめ（スリット付梁の曲げ試験）

スリット加工によるラミナの曲げ剛性および振動特性の変化を検討したところ、次の知見が得られた。

- 1) 直交層付ラミナは直交層の影響により曲げ剛性が向上する可能性が示された。
- 2) 縦振動法により平行層ラミナのヤング係数が評価できる可能性が示された。
- 3) たわみ振動法により直交層付ラミナの曲げ剛性が評価できる可能性が示された。

1.10.3 直交層付ラミナの平行層のヤング係数の評価方法

直交層付ラミナの平行層のラミナのヤング係数を直接測定するため、応力波伝播法および縦振動法による評価方法を検討した。

i) 試験体および実験方法

長さ 2m×幅 10.5cm×厚さ 3cm のスギラミナ 6 本（密度 366～452kg/m³、縦振動法で求めた縦弾性係数 E_H 6.9～11.1GPa）を用意し、幅と厚さを測定後、それぞれ長さが 2m、1.5m、1m、50cm、25cm、12.5cm、6cm における質量および長さ方向の打撃による応力波の伝達時間を測定した。応力波の伝達時間の測定には Fakopp enterprise 社製 FAKOPP microsecond timer（以下、FAKOPP）を用い、センサの針状先端は木口面に長さ方向に貫入した。発信側センサと受信側センサの先端径が異なるため、貫入長さは、発信側センサは 15mm、受信側センサは 10mm とした。同一の金槌、同一の測定者のもと同条件につき 3 回打撃し、伝達時間を求めた。また、長さ 1m 以上のときは縦振動法も適用した。

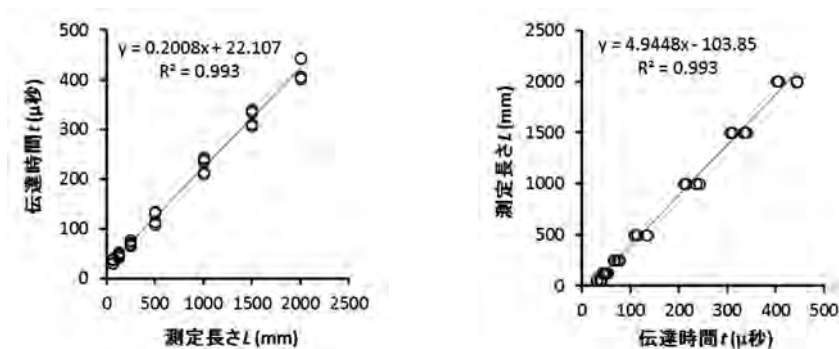


写真 1.10-2 測定装置のセンサー部（左が受振側、右が発振側）

ii) 結果と考察

ii -1) 応力波伝播法の補正式

FAKOPP による測定では、測定条件により伝達時間に誤差が生じるため、同一試験体で測定長さ L から伝達時間 t への回帰直線を求め、その伝達時間軸の切片 t_0 を補正值として用いることが推奨されている（図 1.10-7 ア）。試みに t から L への回帰直線を求め、 L 軸の切片 L_0 も求めた（図 1.10-7 イ）。



ア) L から t への回帰直線

イ) t から L への回帰直線

図 1.10-7 FAKOPP の測定における測定長さ L と伝達時間 t の関係

伝達速度 v を $L/(t-t_0)$ もしくは $(L-L_0)/t$ と補正し、測定長さとの関係を求めた(図 1.10-8)。無補正の場合は明らかに伝達速度は測定長さの影響を受けるが、補正によりその影響は小さくなった。補正方法の違いをみると、 $L \leq 500\text{mm}$ では概ね変らないが、 L が小さいときは L_0 による補正は t_0 による補正よりもばらつきが小さくなった。

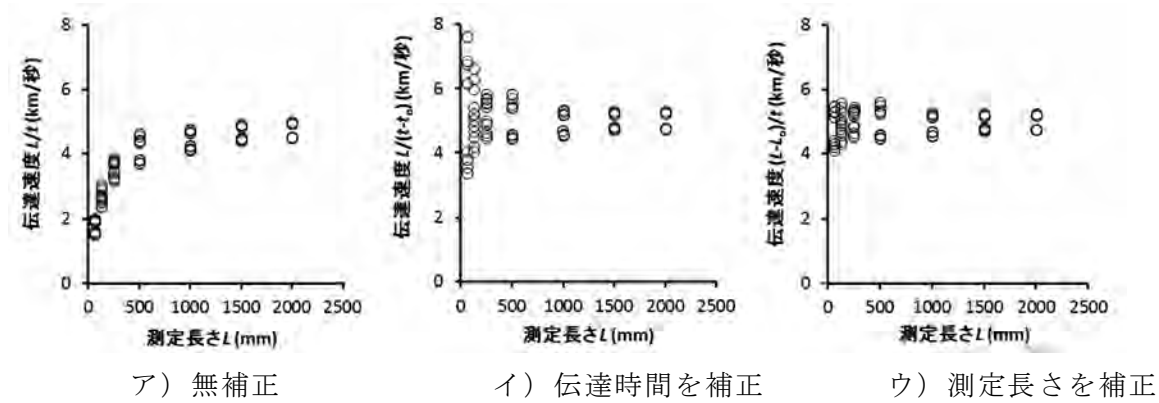


図 1.10-8 測定長さに対する伝達速度とその補正值の関係

さらに、伝達速度 v に対する伝達時間 t および測定長さ L の補正の影響を検討するため、式 $v = (a_L L + L_0) / (a_t t + t_0)$ の係数 a_L 、 a_t 、 L_0 、 t_0 を変化させながら、傾き dv/dL が 0 となる最適化計算を行った。なお、各係数の初期値は前述の回帰計算の結果を参考に $a_L = 1$ 、 $a_t = 1$ 、 $L_0 = 103.9$ 、 $t_0 = -22.11$ とした。

最適化計算により、各係数が $a_L = 0.961$ 、 $L_0 = 103.9$ 、 $a_t = 1$ 、 $t_0 = 0$ のとき伝達速度の傾きは十分 0 に近くなった。以上から、伝達速度に測定長さを補正する方法を採用することとした。なお、応力波伝播法で求めた縦弾性係数 E_v は次式のとおりである。

$$E_v = v^2 \rho \times 10^{-3} \text{ (GPa)} \quad 1.10-2$$

ここで、伝達速度 $v = (a_L L + L_0) / t$ (km/秒)、 L は測定長さ (mm)、 t は伝達時間 (μ 秒)、 ρ は密度 (kg/m^3)、 $a_L = 0.961$ 、 $L_0 = 103.9\text{mm}$ 。

一般に、応力波伝播法も縦振動法も材中の平均的なヤング係数を評価すると考えられているが、応力波は材中の最も通過しやすい経路を伝播するため、両方法による評価値に差異が生じる場合がある。そこで、縦振動法による評価を真値としたときの応力波伝播法の補正方法を検討した。

縦振動法は断面長辺の 6 倍以上の長さが必要とされているため、材長 L が 1 m、1.5m、2m における各試験体の縦振動法で求めた縦弾性係数 E_{tr} と応力波伝播法で求めた縦弾性係数 E_v の関係を検討した。なお、 E_v は L_0 で補正した値を用いた。 E_v は E_{tr} とほぼ線形関係にあったので、線形回帰により次式で補正することとした (図 1.10-9)。

$$E_{tr(v)} = a E_v + b \quad 1.10-3$$

ここで、 $a = 1.161$ 、 $b = -2.027\text{GPa}$ 。

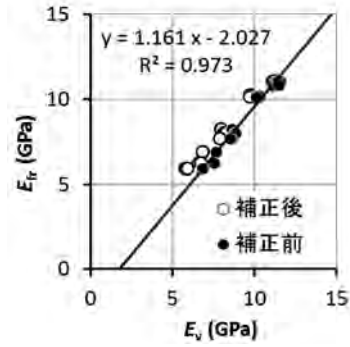


図 1.10-9 応力波伝播法と縦振動法で求めた縦弾性係数の関係

ii・2) 直交層付ラミナの平行層の縦弾性係数の評価式

様々な構成の CLT に縦振動法を適用した場合、得られるヤング係数は、静的な縦圧縮、引張および面内曲げ試験で得られるヤング係数にほぼ等しい値が得られると一般に考えられている。これらの静的試験における剛性は平行層の単純和の剛性にほぼ等しい。また、縦振動法も材長方向の縦波（伸縮波）による固有振動数を基に評価するため、いずれの場合も試験体の平行層の平均的な縦弾性係数が評価されることが考えられる。

ラミナ間の幅はぎ接着がない直交層付ラミナの場合、縦振動法を適用すると縦波は平行層内を伝播し、平行層の軸剛性に依存した固有振動数が観測されることが考えられる。応力波の場合も同様に、平行層内を縦波が伝わり、その伝達時間が観測されることが考えられる。そこで、この仮定に基づき、ここでは、直交層付ラミナの平行層のヤング係数を推定するための縦振動法および応力波伝播法の適用方法を検討する。ただし、直交層付ラミナの平行層の密度は直接測定することができないため、補正方法を検討することとする。

縦振動法の評価式は次式で表せる。

$$E_{fr} = (2fL)^2 \rho \quad 1.10-4$$

ここで、 f は一次の固有振動数、 L は材長、 ρ は密度。

直交層付ラミナに縦振動法を適用した場合、得られる E_{fr} は見かけの値といえる。固有振動数は有効な平行層の剛性によるものと仮定する。軸剛性を縦振動法の評価式に基づいて表わすと次式となる。

$$E_{pfr} A_p = (2fL)^2 \rho A \quad 1.10-5$$

ここで、 E_{pfr} は平行層の動的ヤング係数、 A は実断面積、 A_p は平行層の断面積（有効断面積）である。さらに、本式は次のように書き換えられる。

$$E_{pfr} = (2fL)^2 \rho \frac{t}{t_p} \quad 1.10-6$$

ここで、 t は直交層付ラミナの厚さ、 t_p は平行層の厚さ。

予備試験において、スリット除去後の試験体の E_{fr} を真値 E_{fro} として、スリット付試験体の E_{pfr} を求めて比をとると、 E_{pfr} / E_{fro} の平均値は 1.02 であった。このことから厚さ t に関する補正は妥当と考えられる。同一等級構成の場合は、平行層と直交層の密度を等し

いものと仮定すれば本式が適用できる。

異等級構成の場合は試験体の見かけの密度と平行層の密度が異なる。縦振動法の式では密度 ρ は断面の質量に基づいて導入されるため、本来は直交層付ラミナの見かけの密度とされる。しかしながら、 E/ρ は縦波の伝播速度の二乗値であり、伝播速度は材料固有の物性値と考えられる。主に平行層内を縦波が伝播すると仮定するならば、平行層の密度を採用した方が妥当と考えられるので、平行層の密度 ρ_p を採用することにする。

以上から E_{fr} から E_{pfr} への換算は次式となる。

$$E_{pfr} = E_{fr} \frac{\rho_p}{\rho_a} \frac{t}{t_p} \quad 1.10-7$$

ここで、 ρ_a は直交層付ラミナの見かけの密度。平行層の密度 ρ_p と直交層の密度 ρ_c の比 $k = \rho_c / \rho_p$ が既知であるとき、 ρ_p と ρ_c は次式で求まる。

$$\rho_p = \frac{t}{t_p + k(t - t_p)} \rho_a, \quad \rho_c = \frac{t}{t_p/k + (t - t_p)} \rho_a \quad 1.10-8$$

応力波伝播法の場合は主に平行層内の伝達時間が観測されるものと仮定し、密度の補正により、直交層付ラミナの平行層のヤング係数 E_{pv} は見かけのヤング係数 E_v から次のように換算する。

$$E_{pv} = E_v \frac{\rho_p}{\rho_a} \quad 1.10-9$$

後述する直交層付ラミナの曲げ試験に用いた試験体は、平成 25 年度補正事業で製造された 9 層 9 プライスギ CLT（ラミナ厚さ 30mm、ラミナ幅 105mm、ラミナ間の幅はぎ接着なし）より採材したものである。この CLT は外層に M60A、内層に M30A の等級のラミナを使用しており、両等級の縦継ぎラミナの曲げ、圧縮、引張試験各 30 体の試験結果および E_{fr} と密度が報告されている³⁾（表 1.10-5）。また、曲げ試験における見かけの曲げヤング係数 E_a と E_{fr} との関係が報告されている。これに基づき、せん断変形の影響を含む平行層の見かけの静的曲げヤング係数を縦振動法または応力波伝播法で推定した値 $E_{pa(fr)}$ または $E_{pa(v)}$ は次式で求めるものとする。

$$\begin{aligned} E_{pa(fr)} &= 0.85 E_{pfr} + 0.34 \text{ (GPa)} \\ E_{pa(v)} &= 0.85 E_{pfr(v)} + 0.34 \text{ (GPa)} \end{aligned} \quad 1.10-10$$

ここで、 $E_{pfr(v)} = a E_{pv} + b$ (GPa)、 $a = 1.161$ 、 $b = -2.027$ GPa。

今回採材した試験体は M30 の同一等級構成と平行層が M60 で直交層が M30 である異等級構成の二種類があるので、前述の密度比 k は M60（平行層）の平均密度 ρ_p と M30（直交層）の平均密度 ρ_c の比 $k = \rho_c / \rho_p = 0.893$ を用いることとする。

長さ 780mm の同一等級構成および異等級構成の直交層付ラミナ各 24 体について、縦振動法および応力波伝播法で求めた平行層の縦弾性係数の推定値を表 1.10-6 に示す。縦振動法、応力波伝播法ともに既報のデータと一致するが、応力波伝播法の値の方が縦振動法よりも良好な推定値が得られる傾向がみられた。

表 1.10-5 既報における各等級の縦継ぎラミナの密度と縦弾性係数

	曲げ			引張		圧縮		全体	
	ρ	E_{fr}	E_a	ρ	E_{fr}	ρ	E_{fr}	ρ	E_{fr}
M30A									
平均値	354	6.15	5.58	380	5.72	368	5.93	367	5.93
最小値	279	5.34	4.70	300	4.48	323	3.96	279	3.96
最大値	407	7.36	6.82	429	7.43	410	7.14	429	7.43
C.V.(%)	8.7	8.7	8.9	7.6	11.7	5.8	9.7	7.9	10.4
M60A									
平均値	403	7.92	7.09	423	7.3	408	7.14	411	7.45
最小値	347	5.92	5.45	356	5.49	357	4.42	347	4.42
最大値	486	10.47	9.43	489	8.81	487	8.87	489	10.47
C.V.(%)	7.1	13.0	12.6	7.9	11.4	8.4	16.1	8.0	14.2

ρ : 密度 (kg/m³)

E_{fr} : 縦振動法で求めた縦弾性係数 (kN/mm²)

E_a : 曲げ試験で求めた曲げヤング係数 (kN/mm²)

注) 曲げ、引張、圧縮は既報³⁾の縦継ぎラミナ単体の試験データ (各 30 体)。全体はそれらを再集計した統計値。C.V.は変動係数。

表 1.10-6 動的試験で求めた直交層付ラミナの平行層の密度とヤング係数の推定値

	M30A					M60A				
	ρ_p	E_{pfr}	$E_{pfr(v)}$	$E_{pa(fr)}$	$E_{pa(v)}$	ρ_p	E_{pfr}	$E_{pfr(v)}$	$E_{pa(fr)}$	$E_{pa(v)}$
比	1.11	1.03	1.00	0.99	0.96	1.03	0.95	1.06	0.89	1.00
平均値	407	6.12	5.92	5.54	5.37	422	7.05	7.92	6.33	7.07
最小値	364	4.48	4.22	4.15	3.92	396	5.79	6.31	5.26	5.71
最大値	449	7.39	7.85	6.62	7.01	471	8.38	9.79	7.46	8.67
C.V.(%)	4.37	11.9	14.9	11.1	14.0	4.20	9.87	11.3	9.34	10.8

ρ_p : 直交層付ラミナの平行層の推定密度 (kg/m³)

E_{pfr} : 縦振動法で求めた直交層付ラミナの平行層の縦振動法による縦弾性係数の推定値 (kN/mm²)

$E_{pfr(v)}$: 応力波伝播法で求めた直交層付ラミナの平行層の縦振動法による縦弾性係数の推定値 (kN/mm²)

$E_{pa(fr)}$: 縦振動法で求めた直交層付ラミナの平行層の見かけの静的曲げヤング係数の推定値 (kN/mm²)

$E_{pa(v)}$: 応力波伝播法で求めた直交層付ラミナの平行層の見かけの静的曲げヤング係数の推定値 (kN/mm²)

注) 直交層付ラミナの平行層の推定値 (各 24 体)。比は推定値 / 対応する表 1.10-5 の値 (E_{pa} は曲げ試験の E_a 、それ以外は全体の値)。C.V.は変動係数。

iii) まとめ (直交層付ラミナの平行層のヤング係数の評価方法)

以上の検討から、縦振動法および応力波伝播法により、直交層付ラミナの平行層のヤング係数の縦振動法で求めた縦弾性係数および静的曲げ試験で求めた曲げヤング係数に相当する値を求めるための評価式が導かれた。

1.10.4 直交層付ラミナの変動スパン法試験

直交層付ラミナのせん断たわみの影響を含む見かけの曲げヤング係数、影響を含まない真の曲げヤング係数およびせん断弾性係数の知見を得るために変動スパン法試験を行った。

i) 試験体

厚さ 30mm×幅 105mm のスギラミナを用いた Mx60 構成 9 層 9 プライスギ CLT (外層 M60、内層 M30、ラミナ間の幅はぎ接着なし) を試験材として試験体を採取した。試験材である CLT は「平成 25 年度補正林野庁委託事業 C L T 等新製品・新技術利用促進事業のうち C L T 実用化促進 (強度データの収集・分析)」にて試験体の予備として製造されたものである。構成するラミナのロットから抜取した中央にフィンガージョイント (以下、FJ) を有する断面 30mm×110mm×長さ 690mm の試験体の曲げ試験結果は表 1.10-7 のとおり報告されている。

この CLT より、長さ 780mm×幅 10cm×厚さ 6cm の直交層付ラミナ (2 層 2 プライ) を採取した。試験体の仕様は表 1.10-8 のとおり 3 種類であった。なお、B30 シリーズは平行層の FJ がその直下で直交層間の境界と一致していないものを選んだ。

表 1.10-7 スギラミナの曲げ試験結果³⁾

ラミナ種類	試験体数	項目	含水率 (%)	密度 (kg/m ³)	縦振動法によるヤング係数 (kN/mm ²)	曲げヤング係数 (kN/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)
M30A	30	平均値	9.9	354	6.15	5.58	31.1
		最小値	9.1	279	5.34	4.70	21.3
		最大値	10.9	407	7.36	6.82	40.4
		変動係数(%)	4.2	8.7	8.7	8.9	15.1
M60A	30	平均値	10.6	403	7.92	7.09	38.4
		最小値	9.3	347	5.92	5.45	26.2
		最大値	12.9	486	10.47	9.43	49.6
		変動係数(%)	7.0	7.1	13.0	12.6	13.6

表 1.10-8 変動スパン法試験に用いた直交層付ラミナ試験体

シリーズ	構成	平行層	直交層	平行層の縦継ぎ
R30	同一等級構成	M30	M30	なし
R60	異等級構成	M60	M30	なし
B30	同一等級構成	M30	M30	中央付近に 1 箇所

ii) 試験方法 (直交層付ラミナの変動スパン法試験)

試験方法は(公財)日本住宅・木材技術センターの「構造用木材の強度試験マニュアル」に掲載された変動スパン法⁴⁾に準じた。試験体の積層方向を荷重方向とし、有効な梁せいを平行層の厚さとみなし、1 試験体・1 条件につき曲げスパン L の異なる 4 回の中央集中荷重による 3 点曲げ試験を行った。スパンおよび加力速度は表 1.10-9 のとおりとした。スパン中央における目標最大たわみ δ_{\max} は $L/300 \sim L/400$ 程度となるように設定し、これを若干超えるまで荷重 P とした中央たわみ δ を測定した。中央たわみの測定には東京測器株式会社製小径高感度変位計 CDP-25MT を用い、引張側外縁にてたわみ変位を測定した。加力は R75 の鋼製治具を介して行った。支点にて試験体を支持する鋼板の長さは 70mm で

あった。直交層が引張側の場合と、圧縮側の場合の2条件の試験を行った。

せん断変形の影響を含む見かけの曲げヤング係数 $E_{m,app}$ を次式で求めた。 $L = 708\text{mm}$ における $E_{m,app}$ をその試験体の見かけの曲げヤング係数 E_a とした。

$$E_{m,app} = \frac{L^3}{4bt^3} \frac{P_{\delta m} - P_{0.5\delta m}}{0.5\delta_{\max}} \quad 1.10-11$$

ここで、 b は試験体の幅、 t は平行層の厚さ（実測値）、 $P_{\delta m}$ は目標最大たわみの荷重、 $P_{0.5\delta m}$ は目標最大たわみの50%のたわみの荷重。

L が異なる4回の試験結果で得られた $E_{m,app}$ とスパン厚さ比から真の曲げヤング係数 E とせん断弾性係数 G を求めた。すなわち、横軸を $(t/L)^2$ 、縦軸を $1/E_{m,app}$ とする関係を直線回帰し、その傾きを $1.2/G$ 、縦軸の切片を $1/E$ とし、 E と G を求めた。

また、縦振動法、T.G.H.法、応力波伝播法により試験体の動的弾性係数を測定した。動的弾性係数を求めるときは、平行層のみを有効とみなし、試験体の厚さのかわりに平行層の厚さを用いて評価した。T.G.H.法におけるせん断応力分布係数 s は1.18とした。

表 1.10-9 変動スパン法の設定値

スパン L (mm)	708	390	300	252
L/t	23.6	13.0	10.0	8.4
加力速度(mm/分)	2.5	1.5	1.0	0.6
目標最大たわみ δ_{\max} (mm)	2.36	1.3	0.8	0.65

t は平行層の厚さ（約 30mm）



ア) $L = 708\text{mm}$ イ) $L = 390\text{mm}$ ウ) $L = 300\text{mm}$ エ) $L = 252\text{mm}$

写真 1.10-3 変動スパン法試験（直交層が引張側の場合）



ア) $L = 708\text{mm}$ イ) $L = 390\text{mm}$ ウ) $L = 300\text{mm}$ エ) $L = 252\text{mm}$

写真 1.10-4 変動スパン法試験（直交層が圧縮側の場合）

iii) 結果（直交層付ラミナの変動スパン法試験）

表 1.10-10～15 に試験結果を示す。変動スパン法では、相関係数が低い、見かけの曲げヤング係数がスパンとともに高くない等の理由により真の曲げヤング係数 E とせん断

弾性係数 G が適切にできない場合がしばしばみられた。

表 1.10-10 R30 シリーズの動的非破壊試験の結果

No.	ρ	E_{adb}	E_{TGH}	G_{TGH}	E_{pfr}	E_{pv}
R30A752-1-1	402	8.60	8.32	0.576	5.58	6.86
R30A752-2-1	405	10.58	11.28	0.442	5.87	6.76
R30A754-1-1	449	10.54	10.71	0.603	6.73	7.39
R30A754-1-2	400	7.26	7.29	0.648	4.64	5.56
R30A754-2-1	398	9.42	10.05	0.577	6.06	7.17
R30A754-2-2	400	10.53	10.73	0.955	7.30	8.52
平均値	409	9.49	9.73	0.633	6.03	7.04
最小値	398	7.26	7.29	0.442	4.64	5.56
最大値	449	10.58	11.28	0.955	7.30	8.52
標準偏差	19.5	1.35	1.57	0.172	0.923	0.96
変動係数(%)	4.78	14.2	16.2	27.1	15.3	13.7

ρ : 密度 (kg/m³)

E_{adb} : たわみ振動法で求めた見かけの曲げヤング係数 (kN/mm²)

E_{TGH} : T.G.H.法 (せん断応力分布係数 $s = 1.18$) で求めた真の曲げヤング係数 (kN/mm²)

G_{TGH} : T.G.H.法 ($s = 1.18$) で求めたせん断弾性係数 (kN/mm²)

E_{pfr} : 縦振動法で求めた平行層の縦弾性係数 (kN/mm²)

E_{pv} : 応力波伝播法で求めた平行層の縦弾性係数 (kN/mm²)

注) 各弾性係数は平行層の厚さのみを有効として求めた。

表 1.10-11 R30 シリーズの変動スパン法試験の結果

No.	直交層引張側				直交層圧縮側			
	E_a	E	G	R^2	E_a	E	G	R^2
R30A752-1-1	7.45	7.66	0.346	0.88	7.97	8.20	-55.7	0.00
R30A752-2-1	7.71	7.84	0.534	0.98	9.38	9.71	0.398	0.99
R30A754-1-1	8.43	8.58	0.737	0.96	10.11	10.50	1.398	0.74
R30A754-1-2	6.11	6.20	0.528	0.96	7.31	7.61	0.658	0.92
R30A754-2-1	8.26	8.60	0.725	0.94	9.66	9.80	0.643	0.96
R30A754-2-2	8.79	9.26	1.133	0.59	11.11	11.46	1.740	0.81
平均値	7.79	7.54	0.599		9.26	9.76	0.520	
最小値	6.11	6.20	0.528		7.31	9.71	0.398	
最大値	8.79	8.58	0.737		11.11	9.80	0.643	
標準偏差	0.957	1.22	0.119		1.40	-	-	
変動係数(%)	12.3	16.2	19.8		15.1	-	-	

E_a : スパンが 708mm のときの見かけの曲げヤング係数 (kN/mm²)

E : 変動スパン法 (せん断応力分布係数 $s = 1.2$) で求めた真の曲げヤング係数 (kN/mm²)

G : 変動スパン法 ($s = 1.2$) で求めたせん断弾性係数 (kN/mm²)

R^2 : 回帰直線の決定係数 (変動スパン法では 0.95 以上を推奨)

注) $E < E_a$ または $R^2 < 0.95$ となる E と G の値は斜体とし、統計量の計算から除外した。

表 1.10-12 R60 シリーズの非破壊試験の結果

No.	ρ	E_{adb}	E_{TGH}	G_{TGH}	E_{pfr}	E_{pv}
R60A752-1-2	422	11.74	12.21	0.651	8.20	10.19
R60A752-2-1	400	10.58	10.75	0.613	7.94	9.92
R60A752-2-2	377	8.96	9.10	0.567	6.40	7.59
R60A754-1-1	388	9.82	10.03	0.749	7.76	8.08
R60A754-1-2	407	9.66	9.60	0.901	7.48	8.47
R60A754-2-2	394	9.33	9.75	0.616	7.03	9.40
平均値	398	10.02	10.24	0.683	7.47	8.94
最小値	377	8.96	9.10	0.567	6.40	7.59
最大値	422	11.74	12.21	0.901	8.20	10.19
標準偏差	15.6	1.00	1.11	0.123	0.658	1.05
変動係数(%)	3.92	10.0	10.8	18.0	8.81	11.8

表の説明は表 1.10-10 に同じ。

表 1.10-13 R60 シリーズの変動スパン法試験の結果

No.	直交層引張側				直交層圧縮側			
	E_a	E	G	R^2	E_a	E	G	R^2
R60A752-1-2	9.79	10.08	0.751	0.98	11.86	12.49	0.824	0.92
R60A752-2-1	9.30	9.71	0.792	0.95	11.49	12.22	0.761	0.93
R60A752-2-2	8.80	8.95	2.422	0.86	9.09	9.44	1.478	0.72
R60A754-1-1	8.57	8.87	0.834	0.97	10.33	10.86	1.009	0.85
R60A754-1-2	8.13	8.50	1.962	0.36	10.25	10.50	3.699	0.46
R60A754-2-2	9.26	9.68	0.699	0.93	10.47	10.41	-3.26	0.69
平均値	8.97	9.55	0.792		10.58	-	-	
最小値	8.13	8.87	0.751		9.09	-	-	
最大値	9.79	10.08	0.834		11.86	-	-	
標準偏差	0.595	0.621	0.041		0.988	-	-	
変動係数(%)	6.63	6.50	5.18		9.33	-	-	

表の説明は表 1.10-11 に同じ。

表 1.10-14 B30 シリーズの非破壊試験の結果

No.	ρ	E_{adb}	E_{TGH}	G_{TGH}	E_{pfr}	E_{pv}
B30A752-1-1	437	12.49	13.33	0.444	7.39	7.91
B30A752-1-2	423	8.83	8.96	0.606	5.89	6.58
B30A752-2-1	393	8.42	8.39	0.602	6.26	7.16
B30A752-2-2	422	8.77	9.01	0.723	6.31	6.57
B30A754-2-1	408	9.13	9.32	0.761	6.58	7.03
B30A754-2-2	399	8.74	9.40	0.968	5.89	7.45
平均値	414	9.40	9.74	0.684	6.39	7.12
最小値	393	8.42	8.39	0.444	5.89	6.57
最大値	437	12.49	13.33	0.968	7.39	7.91
標準偏差	16.5	1.53	1.80	0.178	0.559	0.517
変動係数(%)	3.99	16.3	18.5	26.0	8.76	7.27

表の説明は表 1.10-10 に同じ。

表 1.10-15 B30 シリーズの変動スパン法試験の結果

No.	直交層引張側				直交層圧縮側			
	E_a	E	G	R^2	E_a	E	G	R^2
B30A752-1-1	9.17	9.35	0.289	0.80	12.41	11.94	409.5	0.00
B30A752-1-2	6.87	7.03	2.565	0.23	8.18	8.68	0.943	0.58
B30A752-2-1	6.94	7.12	1.631	0.20	7.82	7.71	-1.64	0.98
B30A752-2-2	6.91	7.46	0.502	0.66	8.33	8.31	3.109	0.53
B30A754-2-1	7.74	8.14	0.787	0.71	9.72	9.93	1.438	0.94
B30A754-2-2	7.63	8.12	0.323	0.96	8.97	9.29	0.611	0.98
平均値	7.54	8.12	0.323		9.24	9.29	0.611	
最小値	6.87	-	-		7.82	-	-	
最大値	9.17	-	-		12.41	-	-	
標準偏差	0.884	-	-		1.693	-	-	
変動係数(%)	11.7	-	-		18.3	-	-	

表の説明は表 1.10-11 に同じ。

iv) 考察

iv-1) 直交層付ラミナの見かけの曲げ剛性

変動スパン法試験（中央載荷 3 点曲げ試験）のうちスパン $L = 708\text{mm}$ の条件で求めた見かけの曲げヤング係数 E_a を後の項で述べる曲げ試験（ $L = 660\text{mm}$ の 3 等分 4 点曲げ試験）で求めた E_a と比較すると、変動スパン法で求めた E_a は 1 割程度高い値となった（図 1.10-10）。一方たわみ振動法で求めた E_{adb} はほぼ変らなかった。これは、変動スパン法で採用した荷重レベルが小さすぎたことによるものと思われる。本実験の変動スパン法試験で得た E_a の値を静的曲げの E_a としてそのまま扱うにはやや正確性に欠けるかもしれない。そこで、本項では E_a の値そのものについては論ぜず、直交層が引張側にある場合と圧縮側にある場合の曲げ剛性の違いについて述べることにする。

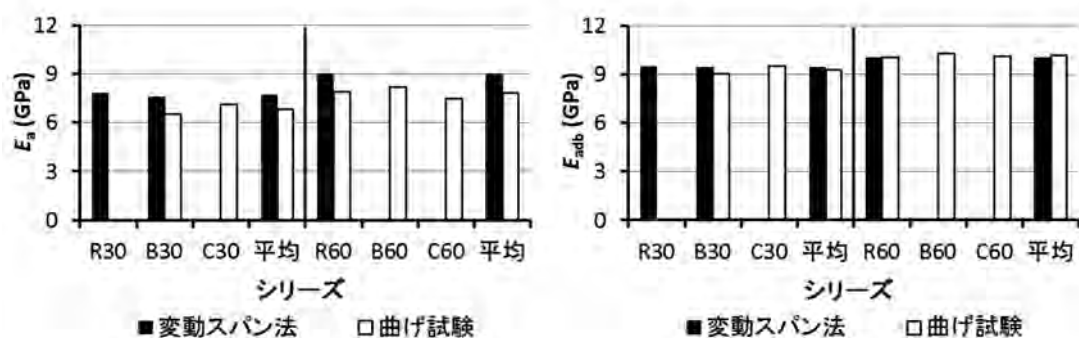
図 1.10-11 に示すように、フィンガージョイント（以下、FJ）の有無にかかわらず、直交層付ラミナは直交層を引張側とした場合に比べ、直交層を圧縮側とした場合は 1.2 倍程

度の曲げ剛性を示した。ここでは数値の身近さからあえて曲げヤング係数で評価しているが、実際には曲げ剛性の比較であることを断っておく。

引張側に直交層があるときは、直交層は幅はぎ接着がなく断続的に配されているのでスパン方向の軸力が十分伝達されない。予備試験の知見では直交層の負担できる曲げ剛性は平行層の 0.2 倍程度とはなるが、さらに、スパン方向のヤング係数が平行層のそれに比べて著しく小さいため、負担できる曲げ剛性はかなり小さいものとなることが予想される。このモデルについては以降の曲げ強度の項でさらに詳しく検討することとする。

一方、図 1.10-12 に示すように、圧縮側に直交層があるときは、断続的ではあるが予備試験のスリットと違い直交層間は接しているか微小な隙間を有すると考えられるので、曲げによる圧縮力が作用すると完全ではないものの直交層間に圧縮力によるスパン方向の軸力の伝達が生じることになる。このときの直交層内の応力分布は、直交層間の隙間、ラミナ形状、平行層との弾性係数の比などによって決まるものと考えられるが、かなり複雑であり、機構的なモデルを立てるには更なる検討が必要である。予備試験ではスリットが引張側にある場合も圧縮側にある場合もほぼ等しい曲げ剛性が観察されたが、直交層付ラミナの場合は以上のような理由で直交層が圧縮側にあるときは、直交層が引張側にあるときに比べて高い曲げ剛性を示すと考えられる。

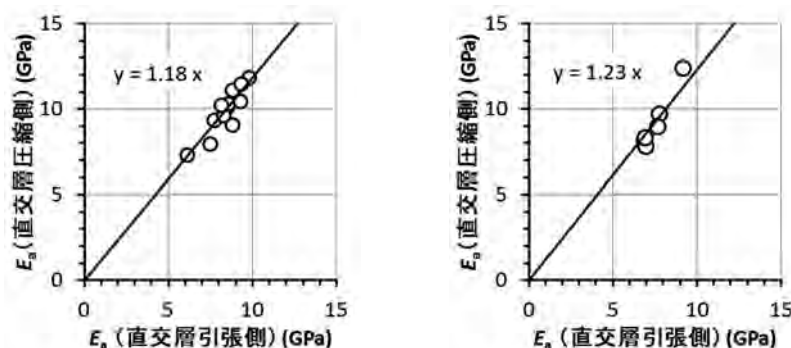
このようなケースは、CLT の弱軸方向の面外曲げにおける圧縮側外層ラミナの挙動に適用できると考えられる。積層数が多いときはその影響は少ないが、3 層 3 プライ構成などの積層数が少ない CLT に適用されると考えられる。



ア) 静的加力試験

イ) たわみ振動法

図 1.10-10 各シリーズにおける見かけの曲げヤング係数 E_a



ア) R シリーズ (FJ なし)

イ) B30 シリーズ (FJ あり)

図 1.10-11 直交層が引張側と圧縮側にあるときの直交層付ラミナの見かけの曲げヤング係数 E_a の比較

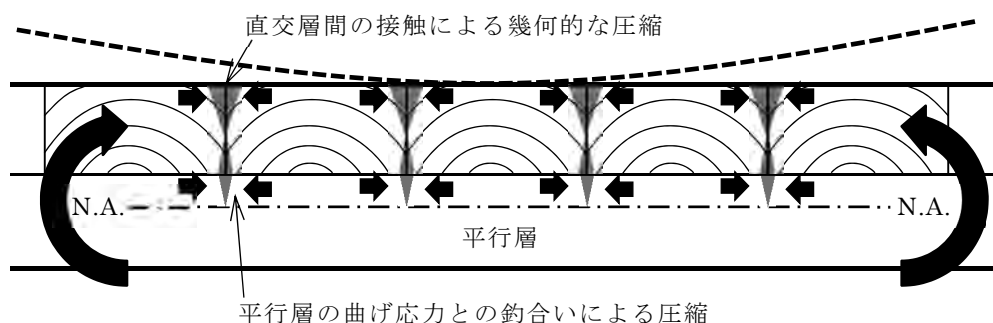


図 1.10-12 直交層が圧縮側のときの直交層付ラミナの曲げの概念図

iv-2) 直交層付ラミナの真の曲げヤング係数とせん断弾性係数

変動スパン法も T.G.H.法も梁の真の曲げヤング係数 E とせん断弾性係数 G を評価するための試験法である。前者は静的曲げ試験に、後者はたわみ振動試験に基づくという違いはあるが、前者では異なる複数のスパン梁せい比におけるたわみを、後者では異なる次数における固有振動数を測定し、見かけの曲げヤング係数を介して回帰法により E と G を求める。CLT への両方法の適用と比較については、井道ら⁵⁾が厚さ 150mm×幅 1000mm×長さ 3000mm の 5 層 5 プライスギ CLT に適用し両方法で求めた E と G の値がそれぞれ一致することを報告している。

結果で報告したとおり、今回行った変動スパン法は、両弾性係数を求める回帰プロットに良好な相関が得られないなど、適切な結果が得られない事例が多くみられた。この原因としては次のようなものが考えられる。

- 1) 曲げスパンをラミナ厚さを基に設定したため、試験体長さが短すぎた。
- 2) 試験体長さあるいは曲げスパンに対して、ラミナ幅が大きいため、局所的な剛性の差異が現われた。
- 3) 荷重や変位が小さく、支点の回転や水平方向のすべりが円滑に行われなかった。
- 4) 応力レベルが小さく、また各スパン梁せい比条件での応力に差異があった。

これらの問題の 1) と 2) は T.G.H.法にも当てはまる可能性がある。低次の曲げ振動は影響が少ないが、高次の曲げ振動はスパン方向に細か支点と荷重点を持つような変形を前提として解析を進めるため、局所的に剛性が異なると適切に解析できない懸念がある。

よって、試験結果はあくまで参考値という前提で、以下の比較検討を行う。

変動スパン法で $E_a < E$ であるデータのうち、 E は相関係数 $r \geq 0.8$ であるデータを、 G は決定係数 $R^2 \geq 0.95$ であるデータを適切に測定できたものとして検討する。真の曲げヤング係数 E は見かけの曲げヤング係数 E_a より 4%程度高い程度でほぼ等しかった（図 1.10-13 ア）。同様に T.G.H.法で得られた真の曲げヤング係数 E_{TGH} は 1 次のたわみ振動から求めた見かけの曲げヤング係数 E_{adb} より 3%程度高い程度でほぼ等しかった。

次に T.G.H.法と変動スパン法で求めた E_a 、 E および G をそれぞれ比較すると、 E_{adb} に対して直交層が圧縮側および引張側のときの E_a はそれぞれ 1.02 倍および 0.84 倍であった（図 1.10-14 ア）。 E_{TGH} と変動スパン法による E の関係も同様であった。このことから、たわみ振動法の適用により、直交層が圧縮側（曲げ剛性が高い方）の直交層付ラミナの見かけの曲げ剛性が評価できる可能性が示唆された。これは予備試験で得られた知見とも一致する。同様に、T.G.H.法の適用により、直交層が圧縮側（曲げ剛性が高い方）の直交層付ラミナの真の曲げ剛性が評価できる可能性が示唆された。 G については両試験法の関係

を検討するのに十分なデータが得られなかったが、概ね T.G.H.法で得られた値は変動スパン法で得られた値よりも若干大きく、 G_{TGH} は 0.4~1GPa 程度、 G は 0.3~0.9GPa 程度であった。ただし、これらの G の値は前述の問題点の懸念から参考値としておく。

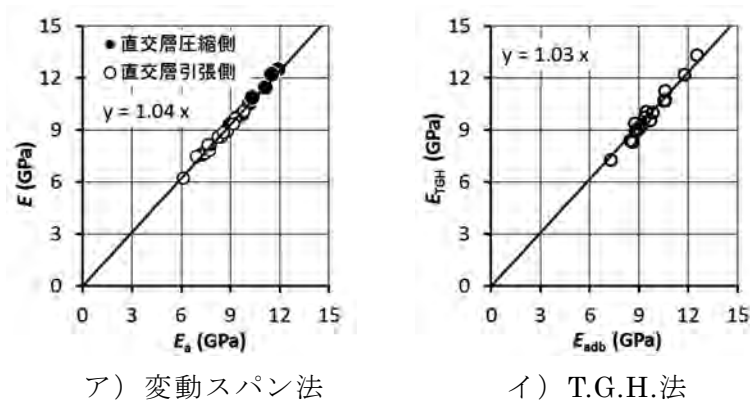


図 1.10-13 真の曲げヤング係数 E と見かけの曲げヤング係数 E_a の比較

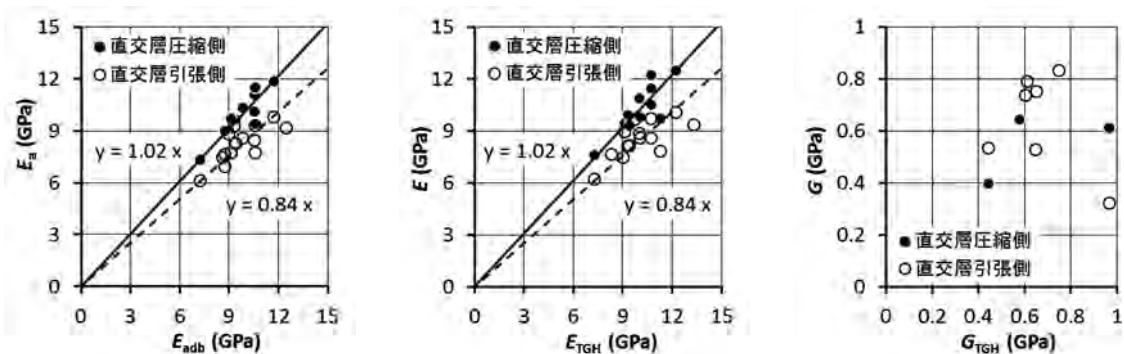


図 1.10-14 T.G.H.法と変動スパン法で求めた弾性係数の比較

v) まとめ（直交層付ラミナの変動スパン法試験）

直交層付ラミナに変動スパン法および T.G.H.法を適用し、次の知見を得た。

- 1) 直交層付ラミナへの変動スパン法の適用にはラミナ幅を考慮して十分長い試験体を用いる必要がある。
- 2) 直交層付ラミナの曲げ剛性は直交層を圧縮側とした方が引張側としたときよりも 1.2 倍程度高く、フィンガージョイントを材長 70cm 程度に 1 つ含んでもその傾向は概ね変わらない。このことから、3 層 3 プライのように層数の少ない CLT の弱軸曲げ剛性は直交層の剛性の寄与を若干受ける可能性がある。
- 3) 直交層付ラミナの真の曲げヤング係数は見かけの曲げヤング係数とほぼ変わらない。
- 4) 直交層付ラミナに T.G.H.法を適用した場合、直交層が圧縮側にあるとき（高い方）の曲げ剛性として評価されるようである。

1.10.5 直交層付ラミナの曲げ強度試験

曲げ強度試験を行い、直交層付ラミナの曲げ剛性および曲げ強度を検討した。

i) 試験体

試験体は変動スパン法試験で述べたものと同様に、厚さ 30mm×幅 105mm のスギラミ

ナを用いた Mx60 構成 9 層 9 プライ CLT (ラミナ間の幅はぎ接着なし) より採材した長さ 780mm×幅 10cm×厚さ 6cm の直交層付ラミナであった。

フィンガージョイント (FJ) と直交層ラミナの境界の関係および平行層の等級に従い、6 シリーズの各 6 体の試験体を供試した (表 1.10-16)。FJ を有する試験体は、FJ を一つ含み、FJ が試験体の長さの中央付近に位置するように採材した。

表 1.10-16 試験体の概要

シリーズ	平行層	フィンガージョイント (FJ)
B30	M30	直交層ラミナの境界と FJ がやや離れたもの (FJ と BC の最短距離 22~48mm)
B60	M60	
C30	M30	直交層ラミナのほぼ直上 (FJ と BC の最短距離 0~9mm)
C60	M60	
R60	M60	FJ なし

BC：直交層ラミナ間の境界

注)直交層はいずれも M30(ラミナ間の幅はぎ接着なし。圧縮側)。FJ の長さは 15mm。

試験体数は各シリーズともそれぞれ 6 体。

ii) 試験方法

直交集成板の日本農林規格のラミナの曲げ C 試験に準じ、3 等分点 4 点曲げ試験を行った。スパン L は 660mm、荷重点間は 220mm であった。荷重点間には直交層ラミナがほぼ 2 つ含まれ、また、平行層に FJ を有する試験体では FJ が 1 つ含まれる。試験装置には島津製作所製 AG-10 を用い、加力速度は 5mm/分とした。中央たわみ δ の測定には東京測器株式会社製巻込型変位計 DP-500ES を用いた。試験体を支持する支点鋼板の長さは 70mm であった。なお、試験体は平行層を圧縮側、直交層を引張側として、積層方向を加力方向とした。

曲げヤング係数 E_a および曲げ強度 σ_b は平行層のみを有効とみなし、それぞれ次式により求めた。

$$E_a = \frac{276}{1296} \frac{L^3}{b t^3} \frac{\Delta P}{\Delta \delta} \quad 1.10-12$$

ここで、 b は試験体の幅、 t は平行層の厚さ (実測値)、 $\Delta P / \Delta \delta$ は荷重－中央たわみ関係における最大荷重 P_{\max} の 10%点と 40%点を結ぶ傾き。

$$\sigma_b = \frac{P_{\max} L}{b t^2} \quad 1.10-13$$

供試前には T.G.H.法、縦振動法、応力波伝播法により試験体の動的弾性係数を求めた。動的弾性係数を求めるときは、平行層のみを有効とみなし、試験体の厚さのかわりに平行層の厚さを用いて計算した。また、試験終了後に破壊近傍より試片を採取し、全乾法により含水率を求めた。



写真 1.10-5 直交層付ラミナの曲げ強度試験

iii) 結果（直交層付ラミナの曲げ強度試験）

非破壊試験および曲げ強度試験の結果を表 1.10-17～21 に示す。破壊性状については考察の項を参照されたい。

表 1.10-17 B30 シリーズの曲げ強度試験の結果

試験体名	ρ	E_{pfr}	E_{pv}	E_{adb}	E_{TGH}	G_{TGH}	E_a	σ_b	M.C.
B30S752-1-1	394	6.08	7.14	9.59	9.69	0.457	7.45	22.1	11.3
B30S752-1-2	407	6.14	6.34	8.81	9.07	0.465	6.48	35.1	11.1
B30S752-2-1	394	5.27	5.65	8.91	7.90	0.587	5.86	32.9	12.1
B30S752-2-2	409	6.18	6.70	8.95	8.89	0.507	7.16	39.8	11.7
B30S754-2-1	402	5.77	5.89	8.52	8.32	0.757	5.66	38.5	11.5
B30S754-2-2	405	5.49	6.27	9.48	9.63	0.476	6.65	29.0	11.7
平均値	402	5.82	6.33	9.04	8.92	0.541	6.54	32.9	11.6
最小値	394	5.27	5.65	8.52	7.90	0.457	5.66	22.1	11.1
最大値	409	6.18	7.14	9.59	9.69	0.757	7.45	39.8	12.1
標準偏差	6.55	0.38	0.54	0.41	0.71	0.12	0.70	6.57	0.34
変動係数(%)	1.63	6.48	8.50	4.57	7.92	21.4	10.7	20.0	2.93

ρ : 密度 (単位 kg/m^3)

E_{pfr} : 縦振動法で求めた平行層の縦弾性係数 (単位 kN/mm^2)

E_{pv} : 応力波伝播法で求めた平行層の縦弾性係数 (単位 kN/mm^2)

E_{adb} : たわみ振動法で求めた見かけの曲げヤング係数 (単位 kN/mm^2)

E_{TGH} : T.G.H.法 (せん断応力分布定数 $s=1.18$) で求めた曲げヤング係数 (単位 kN/mm^2)

G_{TGH} : T.G.H.法 ($s=1.18$) で求めたせん断弾性係数 (単位 kN/mm^2)

E_a : 強度試験で得られた見かけの曲げヤング係数 (単位 kN/mm^2)

σ_b : 強度試験で得られた曲げ強度 (単位 N/mm^2)

M.C. : 含水率 (単位 %)

注) 各弾性係数および曲げ強度は平行層のみを有効として求めた値である。

表 1.10-18 C30 シリーズの曲げ強度試験の結果

試験体名	ρ	E_{pfr}	E_{pv}	E_{adb}	E_{TGH}	G_{TGH}	E_a	σ_b	M.C.
C30S752-1-1	443	6.51	6.90	10.10	10.66	0.421	6.51	28.0	10.9
C30S752-2-1	399	5.95	6.74	9.03	8.93	0.742	7.14	28.2	11.2
C30S754-1-1	413	6.84	7.52	10.37	10.51	0.529	8.45	39.7	11.6
C30S754-1-2	395	4.48	5.38	7.48	7.52	0.481	5.17	31.1	11.4
C30S754-2-1	409	6.42	7.04	9.13	9.19	0.574	6.81	36.4	11.1
C30S754-2-2	364	7.18	7.84	11.08	11.34	0.486	8.45	33.2	11.2
平均値	404	6.23	6.90	9.53	9.69	0.539	7.09	32.8	11.2
最小値	364	4.48	5.38	7.48	7.52	0.421	5.17	28.0	10.9
最大値	443	7.18	7.84	11.08	11.34	0.742	8.45	39.7	11.6
標準偏差	25.6	0.95	0.85	1.27	1.40	0.11	1.25	4.62	0.24
変動係数(%)	6.34	15.3	12.3	13.3	14.5	20.8	17.6	14.1	2.17

記号の説明および注釈は表 1.10-17 に同じ。

表 1.10-19 B60 シリーズの曲げ強度試験の結果

試験体名	ρ	E_{pfr}	E_{pv}	E_{adb}	E_{TGH}	G_{TGH}	E_a	σ_b	M.C.
B60S752-1-1	398	7.12	8.20	10.08	10.25	0.869	7.63	47.1	11.7
B60S752-1-2	407	6.71	8.84	9.04	8.84	0.954	8.14	32.7	11.7
B60S752-2-1	446	8.40	9.03	11.97	11.98	0.940	8.93	39.4	12.1
B60S752-2-2	413	7.42	8.71	10.80	11.11	0.773	8.59	34.3	11.7
B60S754-1-1	387	7.37	8.68	9.82	10.23	0.511	8.31	44.9	11.9
B60S754-2-1	377	6.73	9.01	10.09	10.39	0.911	7.60	44.0	11.2
平均値	404	7.29	8.75	10.30	10.47	0.826	8.20	40.4	11.7
最小値	377	6.71	8.20	9.04	8.84	0.511	7.60	32.7	11.2
最大値	446	8.40	9.03	11.97	11.98	0.954	8.93	47.1	12.1
標準偏差	24.2	0.62	0.30	0.99	1.05	0.17	0.53	5.90	0.30
変動係数(%)	5.98	8.53	3.45	9.65	10.0	20.3	6.42	14.6	2.54

記号の説明および注釈は表 1.10-17 に同じ。

表 1.10-20 C60 シリーズの曲げ強度試験の結果

試験体名	ρ	E_{pfr}	E_{pv}	E_{adb}	E_{TGH}	G_{TGH}	E_a	σ_b	M.C.
C60S752-1-1	417	7.38	9.09	9.50	9.52	0.625	8.11	34.5	11.8
C60S752-2-1	401	6.81	7.93	10.48	11.16	0.400	7.98	35.4	12.4
C60S752-2-2	393	6.97	8.28	10.74	10.83	0.533	-	31.4	11.8
C60S754-1-1	392	6.30	7.29	8.63	8.47	0.885	6.39	32.0	11.7
C60S754-2-1	413	6.21	8.38	10.37	10.73	0.432	7.57	38.3	11.4
C60S754-2-2	418	7.35	8.75	10.89	10.77	0.840	7.39	36.6	11.5
平均値	406	6.84	8.29	10.10	10.25	0.619	7.49	34.7	11.8
最小値	392	6.21	7.29	8.63	8.47	0.400	6.39	31.4	11.4
最大値	418	7.38	9.09	10.89	11.16	0.885	8.11	38.3	12.4
標準偏差	11.6	0.50	0.63	0.87	1.04	0.21	0.68	2.67	0.34
変動係数(%)	2.87	7.35	7.60	8.62	10.1	33.1	9.08	7.68	2.87

記号の説明および注釈は表 1.10-17 に同じ。

表 1.10-21 R60 シリーズの曲げ強度試験の結果

試験体名	ρ	E_{pfr}	E_{pv}	E_{adb}	E_{TGH}	G_{TGH}	E_a	σ_b	M.C.
R60S752-1-2	416	7.67	9.24	11.89	12.19	0.773	9.18	41.3	11.3
R60S752-2-1	377	5.79	7.19	9.44	9.09	0.646	7.31	41.4	12.5
R60S752-2-2	404	6.27	8.36	10.03	10.36	0.446	8.50	47.3	11.5
R60S754-1-2	381	6.14	7.44	8.88	8.62	0.887	6.28	34.8	11.2
R60S754-2-1	396	6.24	8.29	9.36	9.37	0.793	7.18	39.7	11.9
R60S754-2-2	394	7.41	9.32	10.55	10.97	0.699	8.88	47.3	10.5
平均値	395	6.59	8.31	10.03	10.10	0.707	7.89	42.0	11.5
最小値	377	5.79	7.19	8.88	8.62	0.446	6.28	34.8	10.5
最大値	416	7.67	9.32	11.89	12.19	0.887	9.18	47.3	12.5
標準偏差	14.4	0.76	0.88	1.08	1.34	0.15	1.13	4.78	0.66
変動係数(%)	3.66	11.6	10.6	10.8	13.2	21.6	14.4	11.4	5.77

記号の説明および注釈は表 1.10-17 に同じ。

iv) 考察（直交層付ラミナの曲げ強度試験）

iv-1) 直交層付ラミナの曲げ剛性

直交層付ラミナの曲げ剛性をモデルを用いて検討する。まず、直交層がスパン方向に連続しているものとして、図 1.10-5 のような 2 層集成材のモデル（モデル A）を仮定する。実際には供試した試験体の直交層はラミナ間の幅はぎ接着がなく、単一のラミナではないが、この仮定で求まる直交層付ラミナの曲げ剛性(ED)はその上限を与えるものとみなせる。

表 1.10-22 スギの各方向のヤング係数 (GPa)

繊維方向 E_L	半径方向 E_R	接線方向 E_T
7.35	0.59 (0.08)	0.29 (0.04)

注) 値は木材工業ハンドブック⁶⁾による。(数値)は E_L に対する比

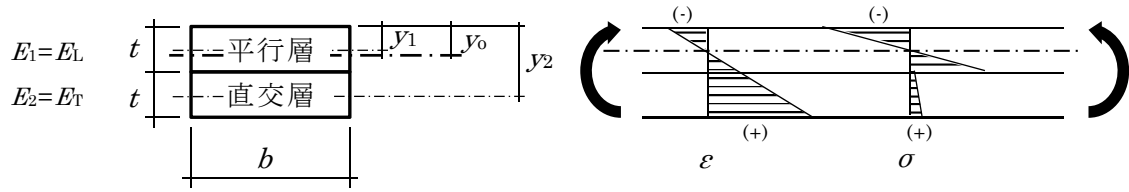


図 1.10-15 2層集成材の曲げモデル A

直交層のスパン方向のヤング係数 E_2 を接線方向のヤング係数 E_T と仮定する。表 1.10-22 から $k = E_T/E_L = 0.04$ とすれば、圧縮側外縁から中立軸までの距離 y_0 は次式で求まる η 。

$$y_0 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i E_i A_i}{\sum_{i=1}^n E_i A_i} = \frac{\frac{t}{2} E_T b t + \frac{3t}{2} E_L b t}{E_T b t + E_L b t} = \frac{3+k}{2(1+k)} t = \frac{3.04}{2.08} t = 0.974 \times \frac{3}{2} t \quad 1.10-14$$

距離 y_0 は直交層付ラミナの場合と平行層単体の場合とで 3% 程度しか差がない。そこで簡便のため、直交層付ラミナの中立軸は平行層単体の中立軸に等しいと仮定する。なお、 E_T の代わりに E_R を用いてもこの差は 5% 程度である。

R30 シリーズや B30 シリーズのように同一等級構成であるとき、次式 η のとおり、直交層付ラミナの曲げ剛性 $(EI)_e$ は、平行層単体の曲げ剛性 $E_L I_0$ の約 1.5 倍となる。

$$(EI)_e = \sum_{i=1}^n E_i (I_{oi} + y_{oi}^2 A_i) = (13E_T + E_L) I_0 = (1 + 13k) E_L I_0 = 1.52 E_L I_0 \quad 1.10-15$$

ここで、 I_0 はラミナ単体の断面二次モーメント ($I_{oi} = bt^3/12$)。 A_i は各層の断面積 ($= bt$)。

異等級構成である R60 シリーズの場合は、表 1.10-7 の既往の知見から M30 と M60 の曲げヤング係数の比が $5.58/7.09 = 0.79$ なので $k = 0.79 \times 0.04$ として同様に計算すると、 $(EI)_e$ は $E_L I_0$ の 1.41 倍となる。

以上から直交層付ラミナの曲げ剛性の上限が求まった。つぎに、曲げ剛性の下限を与えるスリット付梁のモデル (モデル B) の適用を検討する (図 1.10-16)。

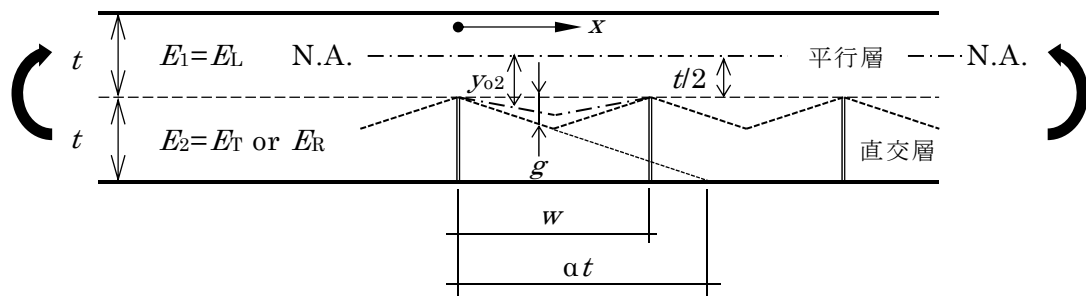


図 1.10-16 スリット付梁の曲げモデル (モデル B)

このモデルで使うスリット間の有効応力範囲に関する係数 α は切欠き梁の値として $\alpha=5$ が提案されている $1, 2)$ が、直交層付ラミナのように非切欠き部と切欠き部の弾性係数が異なる場合の知見がない。非切欠き部に対して切欠き部のヤング係数が著しく小さいとき、切欠き部内でひずみが及ぶ範囲が拡大し α は 5 よりも小さくなる。 α が小さくなると直交

層が負担する剛性が大きくなる。ここでは便宜的に $\alpha=5$ を採用するので、得られる曲げ剛性 $(ED)_e$ は直交層付ラミナの曲げ剛性の下限を示す。

直交層の上縁（梁せいの中心）から仮想外縁（上図の三角状の破線）までの距離 g は $g = x/\alpha$ である。モデル A での計算を参考にすれば、梁の中立軸から直交層の中立軸までの距離 y_{o2} はほぼ $y_{o2} = (t+g)/2$ となる。梁幅を b とすれば、直交層の有効断面二次モーメント I_c は次のように表される。ただし、次式の適用範囲は $\alpha \geq w/(2t)$ である。

$$I_c = \frac{bg^3}{12} + y_{o2}^2 bg = \frac{bg^3}{12} + \frac{b}{4}(t+g)^2 g \quad 1.10-16$$

直交層は断続してはいるが、ラミナ幅よりスパンが十分長ければ、直交層の見かけの断面二次モーメント I_{ca} は I_c の平均値とみなせる。ゆえに I_{ca} は次のように表せる。

$$I_{ca} = \frac{2}{w} \int_0^{w/2} I_c dx = \frac{6\alpha^2 t^2 w + 4\alpha t w^2 + w^3}{8\alpha^3 t^3} I_0 \quad 1.10-17$$

また、 $\alpha \leq w/(2t)$ のときは直交層に作用する引張応力の範囲は台形となり、各式は次のよう表わされる。なお、 $\alpha = w/(2t)$ のときは $I_{ca} = 4.5 I_0$ となる。

$$g = \frac{x}{\alpha}, I_c = I_{c1} = \frac{bg^3}{12} + \frac{b}{4}(t+g)^2 g \quad (x \leq \alpha t) \quad 1.10-18$$

$$g = t, I_c = I_{c2} = 13I_0 \quad (x \geq \alpha t) \quad 1.10-19$$

$$I_{ca} = \frac{2}{w} \int_0^{\alpha t} I_{c1} dx + \left(1 - \frac{2\alpha t}{w}\right) I_{c2} = \left(13 - 17\alpha \frac{t}{w}\right) I_0 \quad 1.10-20$$

よって、直交層の有効曲げ剛性 $(ED)_{ca}$ は $kE_L I_{ca}$ となる。いま $t = 30\text{mm}$ 、 $w = 105\text{mm}$ 、 $\alpha = 5$ とすれば $(ED)_{ca}$ は、 $0.813kE_L I_0$ となり、平行層の曲げ剛性 $E_L I_0$ に対する直交層付ラミナの曲げ剛性 $(ED)_e = E_L(I_0 + kI_{ca})$ は表 1.10-23 のようになる。これを $(ED)_e$ の下限とみなす。

表 1.10-23 直交層付ラミナの曲げ剛性の計算値 ($\alpha = 5$)

ラミナ構成	平行層	直交層	$E_2 = E_T$		$E_2 = E_R$	
			k	$(ED)_e/(E_L I_0)$	k	$(ED)_e/(E_L I_0)$
同一等級構成	M30	M30	0.04	1.032	0.08	1.065
異等級構成	M60	M30	0.03	1.026	0.06	1.049

以上から、平行層の曲げ剛性に対する直交層付ラミナの曲げ剛性の比は、同一等級構成では 1.03～1.5 倍、異等級構成では 1.03～1.4 倍の範囲にあると考えられる。

つぎに実験値と計算値を比較する。予備試験で得られた知見から、縦振動法および応力波伝播法で得たヤング係数を平行層の縦弾性係数に換算した値 $E_{pa(fr)}$ および $E_{pa(v)}$ を平行層単体の静的曲げヤング係数とみなす。これらを曲げ強度試験で得た曲げヤング係数 E_a と比較する（図 1.10-23）。使用ラミナの既往の曲げ試験結果と平均値で比較すると、M30 では既往のデータが 5.58GPa に対して $E_{pa(fr)}$ は 5.46GPa で $E_{pa(v)}$ は 5.15GPa、M60 では既往のデータが 7.09GPa に対して $E_{pa(fr)}$ は 6.21GPa で $E_{pa(v)}$ は 6.95GPa であった。なお、本来は曲げ剛性を比較すべきだが、数値の身近さから曲げヤング係数で比較していること

を断っておく。

実験結果による平行層の曲げ剛性に対する直交層付ラミナの曲げ剛性の比は、モデル A とモデル B で求めた剛性の範囲内にあったことから、モデル A を上限、モデル B を下限とすることで、直交層付ラミナの曲げ剛性はおおよそ予測できるようである。

いま $E_{pa(fr)}$ および $E_{pa(v)}$ が既往の試験データと近い方の値のケースを採用すると、実験結果による平行層の曲げ剛性に対する直交層付ラミナの曲げ剛性の比は、同一等級構成では約 1.25 倍、異等級構成では約 1.13 倍であった。実験結果の剛性倍率に適合するようにモデル B で用いる係数 α を $E_2 = E_T$ として求めると、同一等級構成では $\alpha = 1.4$ 、異等級構成では $\alpha = 1.8$ となり 5 よりもかなり小さい。

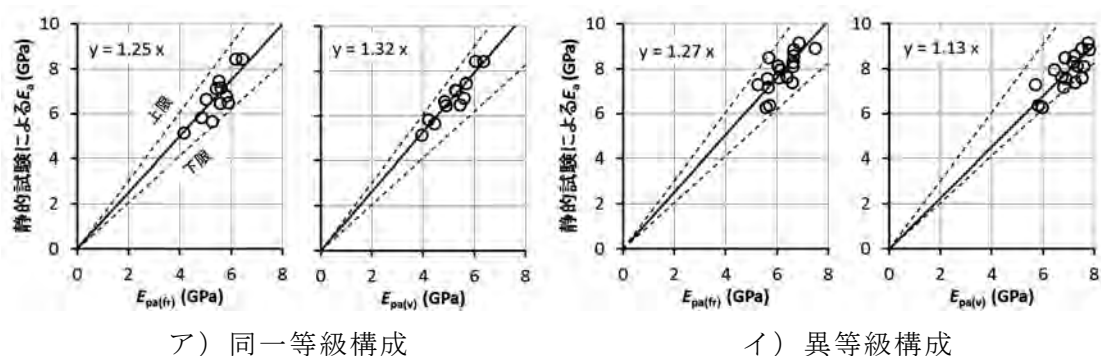


図 1.10-17 平行層ラミナの曲げヤング係数 E_{pa} と直交層付ラミナの曲げヤング係数 E_a の関係（添字(fr)は縦振動法に、添字(v)は応力波伝播法に基づく値）

次にたわみ振動法の適用について検討する。同一等級構成において、静的試験で得られた E_a はたわみ振動法で得られた E_{adb} の 74% 程であった（図 1.10-18 ア）。変動スパン法の項で述べたたわみ振動法で得られる曲げ剛性は直交層が圧縮側のときの（高い方の）曲げ剛性に近いことと、今回の変動スパン法試験では静的曲げ試験よりも E_a が 1 割程高かったことを勘案すると順当な値と言える。異等級構成では同一等級構成よりも曲げ剛性がやや大きく評価されるが、平行層の密度を考慮して補正すると同一等級構成の場合と一致する（図 1.10-18 イ）。

すなわち、たわみ振動法により直交層を圧縮側とする直交層付ラミナの曲げ剛性を評価できる可能性があり、特に異等級構成では平行層の密度で評価するのが妥当と言える。

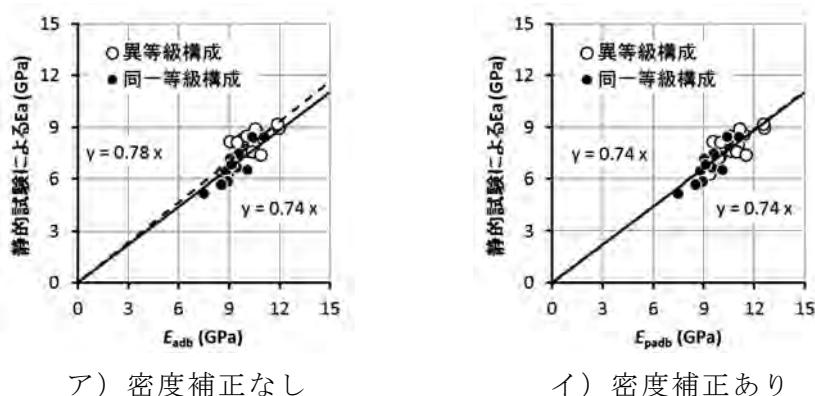


図 1.10-18 たわみ振動法と静的試験で得た曲げヤング係数の関係
 E_{padb} は密度を平行層の密度に補正して得た曲げヤング係数

iv-2) 直交層付ラミナの曲げ試験における破壊性状

直交層付ラミナの曲げ強度試験中には次のような傾向が観察された。

- 1) 直交層ラミナの境界（以下、CB）が開き始める（写真 1.10-6）。
- 2) 接着層のせん断と思われる音が断続的に発生する。
- 3) CB の上側頂部から水平方向に破壊が始まる。CB からの顕著な剥離がみられることもある。
- 4) 上記 3 で生じた破壊が広がり破壊する。多くの場合、縦継ぎ部に破壊が到達して最終破壊となる。

平行層ラミナに付着した直交層は補強材となる。ラミナ間の幅はぎ接着が無いときは、CB は補強材の途切れた弱点となるため、CB から破壊する。全ての試験体が CB から破壊した。フィンガージョイント（以下、FJ）と CB が一致する C シリーズでは、ほとんどの試験体が FJ で最終的に破壊した。FJ で最終破壊しなかったのは、節での破壊か、FJ から離れた CB を起点とする破壊であった。FJ と CB がやや離れた B シリーズでは、同一等級構成と異等級構成でやや傾向が異なった。同一等級構成では FJ で最終破壊したものもみられたが、節や材で最終破壊したものもあった。材で破壊したものは、破壊の起点となった CB が FJ とラミナ幅以上離れたものか、CB からの破壊が FJ の位置と逆方向に進んだものであった。異等級構成では全ての試験体が FJ で最終破壊した。

切欠き梁と同様に CB の中立軸側頂部では平行層との境界で応力が釣り合うが、CB は隣接する直交層と軸力の伝達がないため、頂部に集中的にせん断力が作用する（図 1.10-19）。曲げモーメントが作用する全ての CB にせん断力が働くので、各 CB には加力中に微小破壊が生じる。加力中に観測された音はこれに起因するものと考えられる。写真 1.10-6 は加力中にみられた CB の小破壊であるが、この試験体は最終的には別の CB から破壊した。

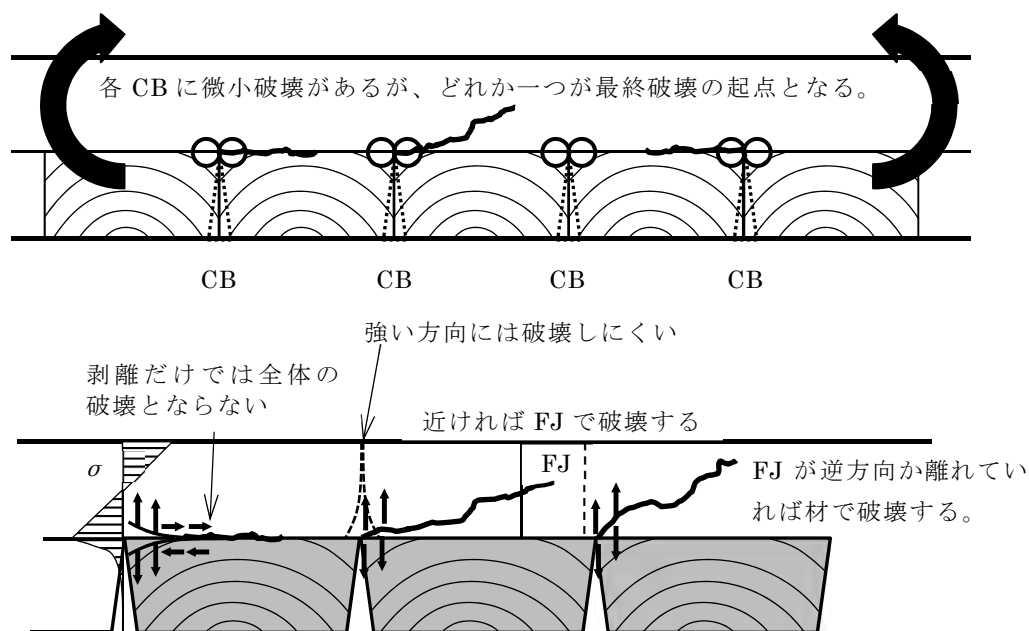


図 1.10-19 直交層付ラミナの曲げ破壊

直交層付ラミナの曲げ強度は基本的に平行層の強度に依存する。そのため、平行層に及ぶ顕著な破壊が生じるまでは、加力中に複数の CB の破壊が進行する。CB の破壊は平行

層の破壊を誘発しやすい懸念があるものの、直交層付ラミナの強度は CB 近傍の平行層の強度によって決まると考えられる。

以上から、ラミナ間の幅はぎ接着が無い直交層を引張側とする直交層付ラミナの曲げ破壊は、直交層境界が起点となり、最終的にはその近傍の平行層の強度の低い部分で破壊すると考えられる。CLT の弱軸曲げでは、同様の破壊が生じやすいと予想される。



写真 1.10-6 曲げ試験中に観察された直交層境界の開きと微小な破壊

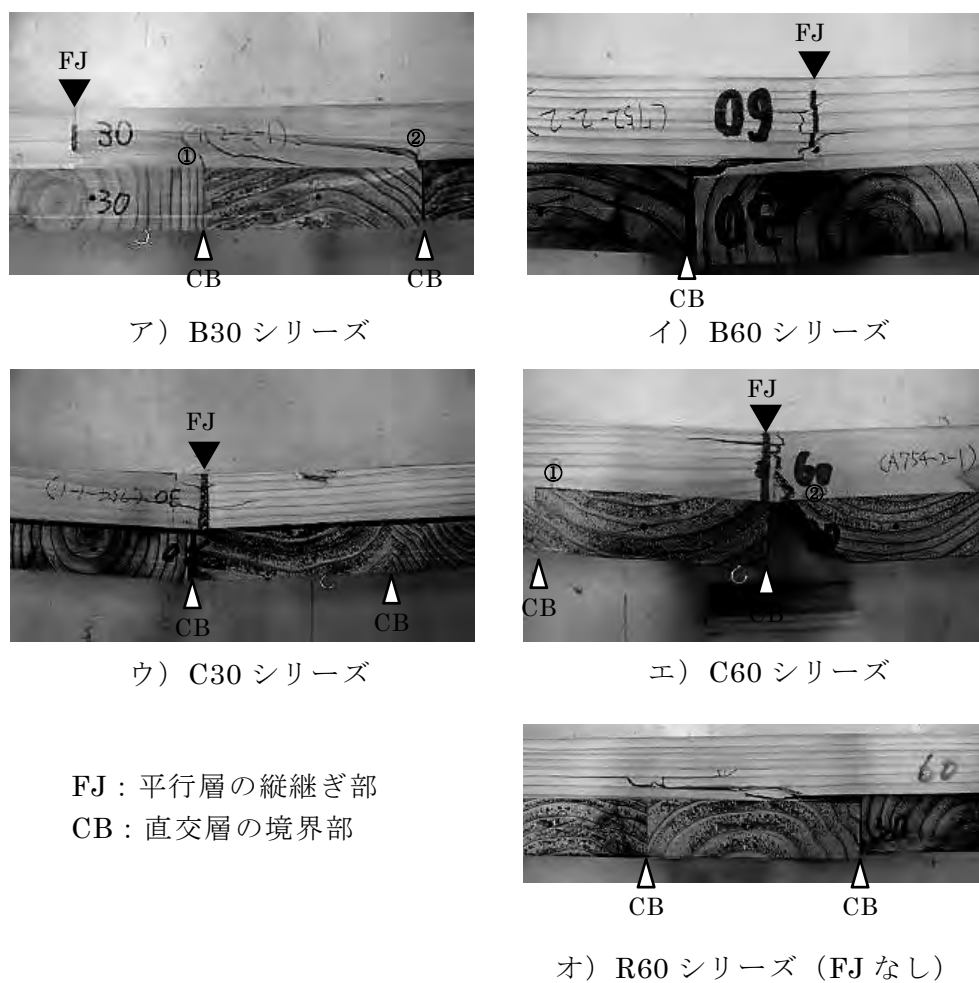


写真 1.10-7 曲げ試験における直交層付ラミナの破壊例

iv-3) 直交層付ラミナの曲げ強度

図 1.10-20 に各シリーズごとの荷重－変形関係および最終破壊の種別を、図 1.20-21 に曲げヤング係数と曲げ強度との関係を、図 1.10-22 に密度と曲げ強度の関係を、図 1.10-23 に縦継ぎラミナと（既往の報告値）の曲げ強度との比較を示す。等級構成が同じ直交層付ラミナは曲げヤング係数も密度も大きな差異は見られなかったが、曲げ強度には一部差異がみられた。

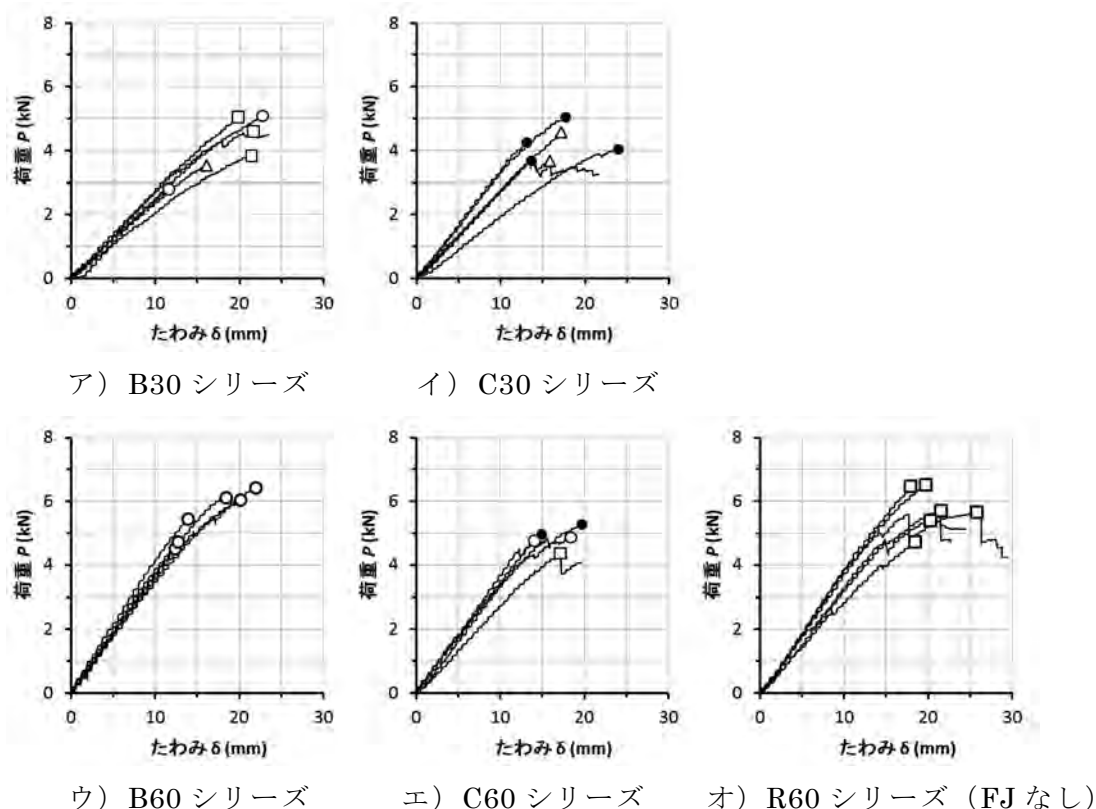


図 1.10-20 直交層付ラミナの曲げ強度試験における荷重－たわみ関係

○、●、△、□は最終破壊別に最大荷重点を示す。○は FJ で破壊、●は FJ 直下の直交層境界を起点に FJ で破壊、△は節で破壊、□は節以外の材で破壊。

注) たわみ δ は試験体の引張側外縁の変位を測定しているため、加力中の直交層の破壊（剥離）により、平行層の曲げたわみよりも大きい場合がある。

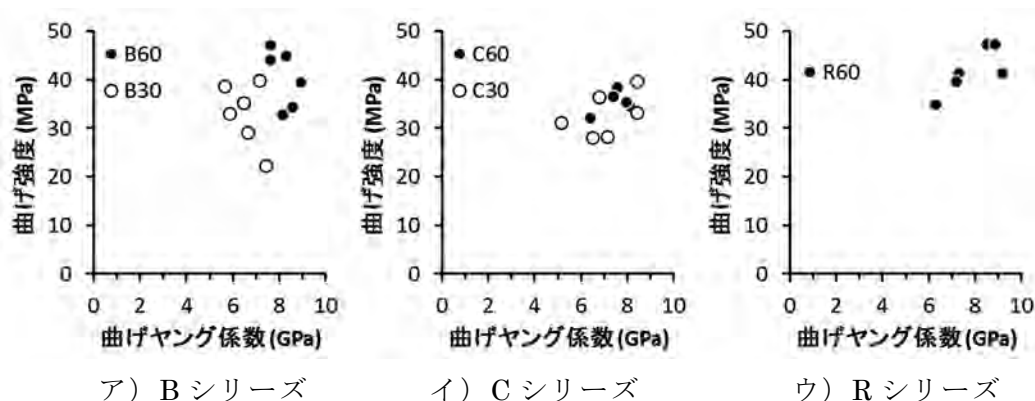
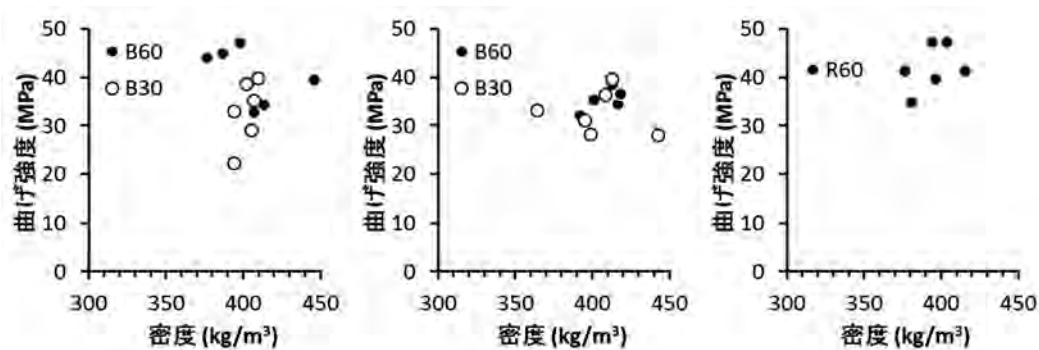
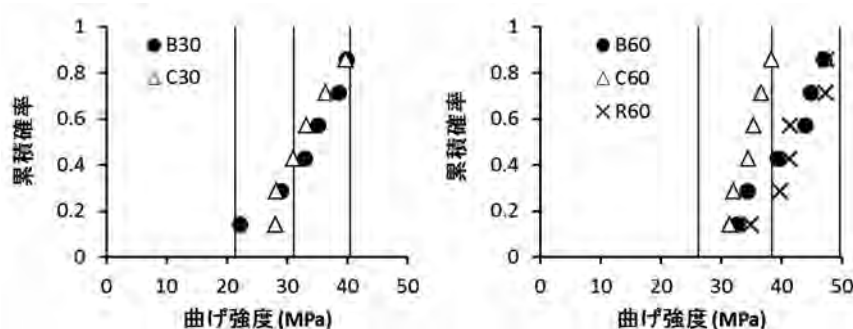


図 1.10-21 直交層付ラミナの曲げヤング係数と曲げ強度の関係



ア) B シリーズ イ) C シリーズ ウ) R シリーズ

図 1.10-22 直交層付ラミナの密度と曲げ強度の関係



ア) 平行層ラミナが M30 イ) 平行層ラミナが M60

図 1.10-23 FJ ラミナと直交層付ラミナの曲げ強度の比較

図中の縦線は既報の FJ ラミナの曲げ強度で、左から最小値、平均値、最大値。

同一等級構成 (B30 と C30) では FJ と CB の距離によらず既報の FJ ラミナのデータと同程度の曲げ強度を示した。このことから、M30 等級のラミナは直交層が付着していても、破壊性状は異なるものの、曲げ強度はほぼ変わらないと言える。FJ で最終破壊した C30 シリーズの試験体は全て FJ 直下の CB が破壊の起点となっていたが、平行層ラミナの強度が低いときには FJ 直下の CB の曲げ強度への影響はごく小さいと言える。ただし、B30 シリーズと比較すると C30 シリーズは破壊時のたわみが小さい傾向がみられた。

異等級構成 (B60、C60 および R60) では、FJ と CB の距離がやや離れた B60 シリーズは既報の FJ ラミナのデータや FJ のない R60 シリーズと同程度の曲げ強度を示した。破壊性状は異なるものの、FJ が CB と離れていると M60 等級のラミナは直交層が付着していても曲げ強度はほぼ変わらないと言える。B60 シリーズの試験体は全て最終的に FJ で破壊したが、CB の存在による破壊のしやすさと直交層の付着による FJ の補強が相殺されたものと思われる。破壊性状の項でも述べたように、CB は破壊の起因にはなるが、CB で破壊が生じて平行層に大きく破壊が及ばない限りは最終破壊とはならない。そのため、FJ ラミナ単体、FJ の無い R60 シリーズおよび FJ と CB が離れた B シリーズが同程度の曲げ強度を示したと考えられる。

しかしながら、FJ と CB が一致する C60 シリーズはこれらよりも 1 割程低い曲げ強度を示した。FJ で最終破壊した試験体のうち、FJ 直下の CB が起点のものが 3 体、別の CB が起点のものが 2 体あった。前者 3 体は後者 2 体よりも高い曲げ強度を示した。曲げ強度の低下要因はかなり複雑と考えられる。今後のさらなる検討が望まれる。

以上から、等級 M30 のラミナを直交層とする直交層付ラミナの曲げ強度は、平行層が M30 の FJ ラミナのときは FJ ラミナと同程度で、平行層が M60 の FJ ラミナのときは FJ が直交層境界と一致していなければ同等級の FJ ラミナと同程度であるが、直交層境界と一致している場合は 1 割程度強度が低下する可能性があることが示唆された。

v) まとめ（直交層付ラミナの曲げ強度試験）

曲げ強度試験を行い、直交層付ラミナの曲げ剛性および曲げ強度を検討したところ、以下の知見を得た。

- 1) 直交層を引張側とする直交層付ラミナの曲げ剛性は平行層ラミナ単体の曲げ剛性に比べ、M30 ラミナによる同一等級構成では約 1.25 倍で、平行層を M60、直交層を M30 とする異等級構成では約 1.13 倍と考えられる。
- 2) 直交層を引張側とする直交層付ラミナの曲げ剛性は、2 層集成材モデルを上限に、スリットのある梁モデルを下限とした梁の曲げモデルを適用することで、概ねの範囲を予想できる。
- 3) 直交層付ラミナにたわみ振動法を適用すると、直交層が圧縮側のときの（高い方の）曲げ剛性が評価できる可能性が示された。また、異等級構成の場合には密度を補正することで評価精度の改善が期待できる。
- 4) 直交層を引張側とする直交層付ラミナの曲げ破壊は、直交層の境界が破壊の起点となり、最終的にその近傍の平行層の強度の低い部分で破壊する。しばしば、破壊までに複数の直交層境界が小破壊する。
- 5) 直交層付を引張側とするラミナの曲げ強度はその平行層と概ね変らないが、フィンガージョイントと直交層の境界が一致している場合には 1 割程度強度が低下することがある。

1.10.6 まとめ（直交層付ラミナの曲げ性能）

直交層付ラミナの曲げ性能について本稿 1.10.2～5 までの結論を要約すると以下のとおりである。

- 1) 縦振動法や応力波伝播法により平行層ラミナの縦弾性係数を推測できると考えられる。
- 2) 直交層を圧縮側とすると、引張側とするときよりも曲げ剛性が高い。
- 3) たわみ振動法を適用すると、直交層が圧縮側のときの（高い方の）曲げ剛性が評価できると考えられる。また、異等級構成の場合には密度を補正することで評価精度の改善が期待できる。
- 3) 直交層を引張側とする直交層付ラミナの曲げ剛性は平行層ラミナ単体の曲げ剛性に比べ、M30 ラミナによる同一等級構成では約 1.25 倍で、平行層を M60、直交層を M30 とする異等級構成では約 1.13 倍と考えられる。
- 4) 直交層を引張側とする直交層付ラミナの曲げ剛性は、2 層集成材モデルを上限に、スリットのある梁モデルを下限とした梁の曲げモデルを適用することで、概ねの範囲を予想できる。
- 5) 曲げ破壊は直交層ラミナ間の境界が起点となり、最終的に平行層が破壊する。
- 6) 異等級構成は、平行層の縦継ぎ直下に直交層間の境界があると曲げ強度が 1 割ほど低下する可能性がある。それ以外の場合は、平行層の縦継ぎと直交層境界との位置関係によらず、曲げ強度は縦継ぎラミナ単体と同程度である。

1.10.7 層内せん断強度特性の検討

本項では本年度作成したスギCLTの直交層ラミナの層内せん断強度試験を行い、せん断強度とせん断弾性係数を測定した。また、層内せん断試験におけるラミナの数の違いおよびせん断変位の測定方法の違いによる評価値の差異についても検討した。

i) 試験材

試験体を採取した試験材の概要を表 1.10-24 に示す。ラミナは幅 105mm×厚さ 25mm のスギラミナで、幅方向のラミナ間の幅はぎ接着はない。ラミナの等級は内層が M30、外層が M60 であった。振動法で求めた試験材の密度と弾性係数を表 1.10-25～27 に示す。ねじり振動法で評価したせん断弾性係数 G_T はどのシリーズもおおよそ 0.45GPa 程度であった。試験材は幅方向に 3 等分し、さらに長さ方向に裁断して試験体を採取した。

表 1.10-24 試験材の概要

試験材名	構成	長さ (cm)	厚さ (cm)	試験対象ラミナ
T-5L5P-RAS-1～3	5 層 5 プライ強軸	80	12.5	2、4 層目 (M30)
T-5L5P-RSB-W1～2	5 層 5 プライ弱軸	100	12.5	3 層目 (M30)
T-5L5P-RSBS-W1～3	5 層 5 プライ弱軸	80	12.5	3 層目 (M30)
T-6L6P-RSC-W1～6	6 層 6 プライ弱軸	100	15	6 層目 (M60)

注) 厚さは積層方向の長さ。幅はすべて 30cm。

表 1.10-25 振動法で求めた試験材 A シリーズ (RSA) の弾性係数

No.	ρ	E_{tr}	E_{TGHf}	G_{TGHf}	G_T
T-5L5P-RSA1	402	5.82	5.38	0.190	0.451
T-5L5P-RSA2	412	5.84	4.24	0.192	0.463
T-5L5P-RSA3	409	5.17	4.66	0.181	0.459
平均値	408	5.61	4.76	0.188	0.458
最小値	402	5.17	4.24	0.181	0.451
最大値	412	5.84	5.38	0.192	0.463
標準偏差	5.40	0.382	0.573	0.006	0.006
変動係数	1.3%	6.8%	12.0%	3.1%	1.3%

ρ : 密度 (kg/m³)

E_{tr} : 縦振動法で求めた縦弾性係数 (単位 kN/mm²)

E_{TGHf} : T.G.H.法 (せん断応力分布係数 $s=1.0$) で求めた面外方向の曲げヤング係数 (単位 kN/mm²)

G_{TGHf} : T.G.H.法 ($s=1.0$) で求めた面外方向のせん断弾性係数 (単位 kN/mm²)

G_T : ねじり振動法で求めたせん断弾性係数 (単位 kN/mm²)

表 1.10-26 振動法で求めた試験材 B シリーズ (RSB および RSBS) の弾性係数

No.	ρ	E_{tr}	E_{TGHf}	G_{TGHf}	G_T
T-5L5P-RSB-W1	388	3.14	1.61	0.141	0.448
T-5L5P-RSB-W2	384	3.25	1.62	0.126	0.424
T-5L5P-RSBS-W1	423	4.45	2.01	0.146	0.490
T-5L5P-RSBS-W2	404	3.57	1.70	0.129	0.467
T-5L5P-RSBS-W3	397	3.32	1.61	0.141	0.444
平均値	399	3.55	1.71	0.137	0.455
最小値	384	3.14	1.61	0.126	0.424
最大値	423	4.45	2.01	0.146	0.490
標準偏差	15.3	0.530	0.171	0.008	0.025
変動係数	3.8%	15.0%	10.0%	6.2%	5.4%

記号の説明は表 1.10-25 に同じ。

表 1.10-27 振動法で求めた試験材 C シリーズ (RSC) の弾性係数

No.	ρ	E_{tr}	E_{TGHf}	G_{TGHf}	G_T
T-6L6P-RSC-W1	390	4.50	2.89	0.241	0.457
T-6L6P-RSC-W2	393	4.30	3.46	0.162	0.416
T-6L6P-RSC-W3	397	4.26	3.33	0.140	0.416
T-6L6P-RSC-W4	411	4.59	3.22	0.147	0.455
T-6L6P-RSC-W5	397	4.31	3.13	0.143	0.425
T-6L6P-RSC-W6	413	4.06	2.85	0.158	0.407
平均値	400	4.34	3.14	0.165	0.429
最小値	390	4.06	2.85	0.140	0.407
最大値	413	4.59	3.46	0.241	0.457
標準偏差	9.62	0.188	0.242	0.038	0.021
変動係数	2.4%	4.3%	7.7%	23.1%	5.0%

記号の説明は表 1.10-25 に同じ。

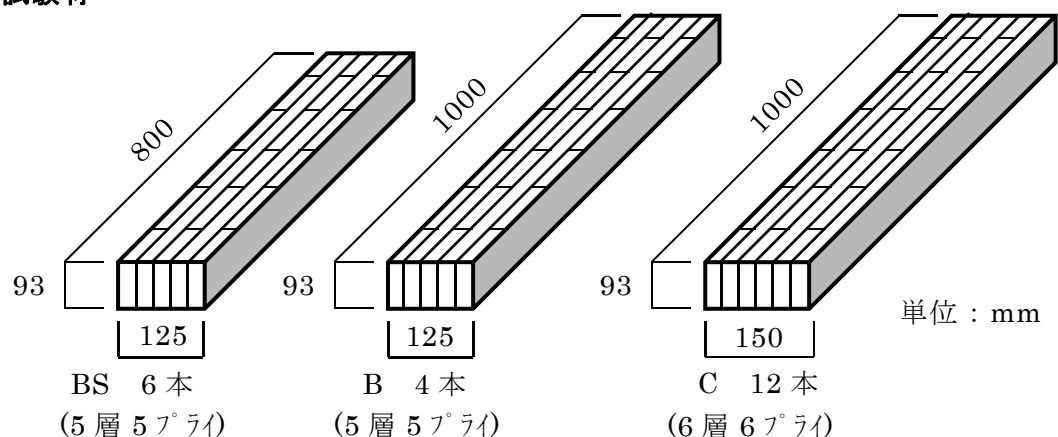
ii) 試験体

A シリーズの測定対象のラミナの等級は M30 である。直交層が長さ方向に各層ラミナ 1 枚、2 枚または 3 枚となるように計 18 体採取した。ただし、2 つの直交層のずれ等により、試験体内のラミナの配置は若干のずれがあった。なお、加力点となる 3 層目 (平行層) は、試験中のめり込み破壊を緩和するため、ラミナの厚さ分 (2.5cm) だけ試験体本体よりも凸状に出る形状とした。また、測定対象となる一つの直交層内にラミナが 1 枚含まれるものを 1LMN、2 枚含まれるものを 2LMN、3 枚含まれるものを 3LMN と呼ぶことにする。

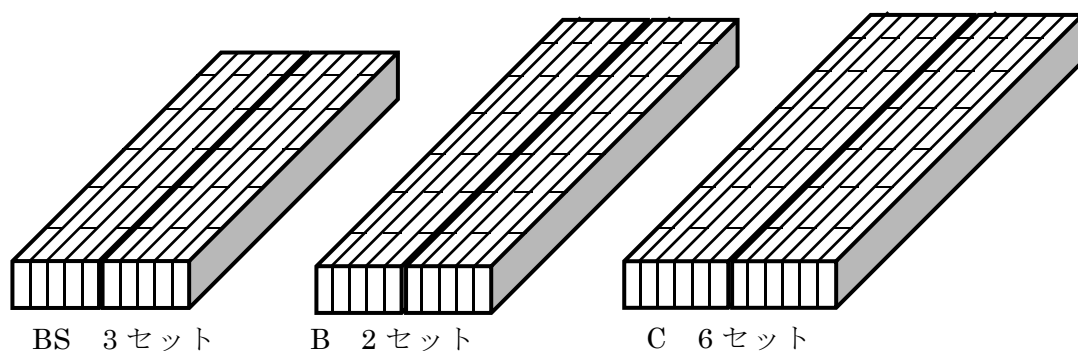
B シリーズの測定対象のラミナの等級は M30 である。RSB または RSBS シリーズの試験材を 2 次接着し、測定対象となる内層直交層ラミナが長さ方向に 1 枚、2 枚または 3 枚となるように、層内せん断試験体を作成した (図 1.10-24)。2 次接着する試験材は同一試験材から長さ方向が同じとなるように (測定対象のラミナが同じラミナから由来するように) 組み合わせた。2 次接着にはレゾルシノールフェノール共縮合樹脂接着剤を用いた。

C シリーズの測定対象のラミナの等級は M60 であり、外層と同じ等級である。前述の B シリーズと同様に、RSC シリーズの試験材を 2 次接着して試験体を作成した。

試験材



2次接着加工



仕上げ・切断加工

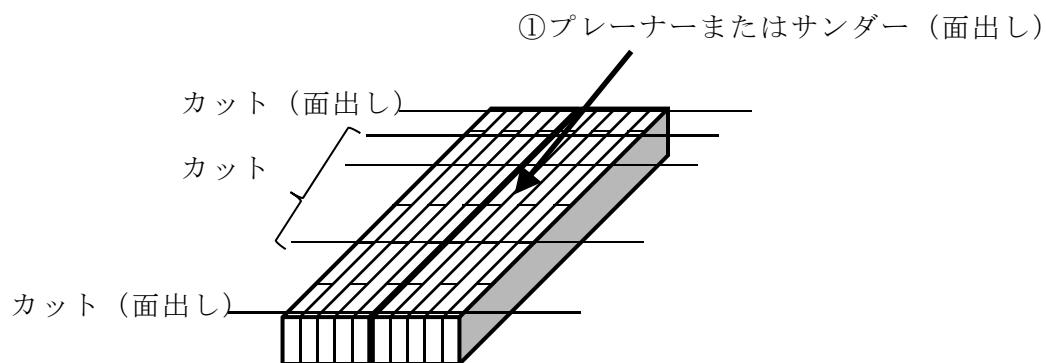


図 1.10-24 BシリーズおよびCシリーズの2次接着加工

iii) 試験方法

層内せん断試験は、ミネベア社製引張圧縮試験機 TG-250kN（最大試験力 250kN）を用い、載荷速度 0.5mm/分で試験体が破壊するまで単調圧縮した（写真 1.10-8～10）。A シリーズは試験体の内層平行層の凸部を加力した（図 1.10-25～26）。B シリーズおよび C シリーズは試験体の作成上の都合で凸部を設けず、測定対象である直交層の間の層分の厚さの幅を持つ鋼製板（高さ 30mm）を介して加力した（写真 1.10-9～10）。この鋼製板が試験体と接触する面の角には R3mm の丸みを設けた。どのシリーズも試験体の脚部は厚さ

10mm の鋼板を介してはさみ、開き留めとした。支点は前述の鋼製板と同様の鋼製板で支持した。変位測定のためにより、一部の試験では鋼製板を積み重ねた。せん断変形による変位を変位計（共和電業製 DTH-A-20）2 本にて測定し、その平均値をせん断変位 δ とした。せん断ひずみ $\gamma (= \delta/t_{LMN})$ より、直交層のせん断弾性係数 G_R を求めた。せん断変形による変位の測定は、従来と同様の方法である試験体頂部－脚部間の変位（図 1.10-25）と試験体のせん断長さの中央部の変位（図 1.10-26）を測定する 2 つの方法を採用した。以降、前者で求めた G_R を G_{RW} 、後者で求めた G_R を G_{RC} と区別する。

層内せん断強度 τ は、最大荷重を P_{max} 、試験体の幅を W とし、次式で求めた。

$$\tau = \frac{P_{max}}{2 L W} \quad 1.10-21$$

直交層の層内せん断弾性係数 G_R は次式で求めた。

$$G_R = \frac{0.15 P_{max} t_{LMN}}{(\delta_{0.4} - \delta_{0.1}) L W} \quad 1.10-22$$

ここで、 $\delta_{0.4}$ および $\delta_{0.1}$ はそれぞれ最大荷重の 40% および 10% における変位。 t_{LMN} はラミナの厚さ（25mm）。

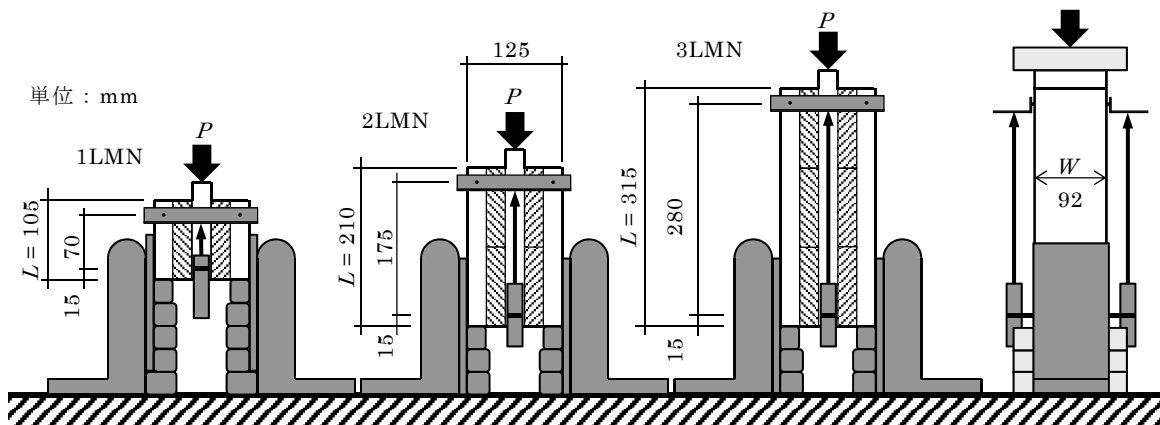


図 1.10-25 A シリーズの層内せん断試験（頂部－脚部間で変位を測定する場合）

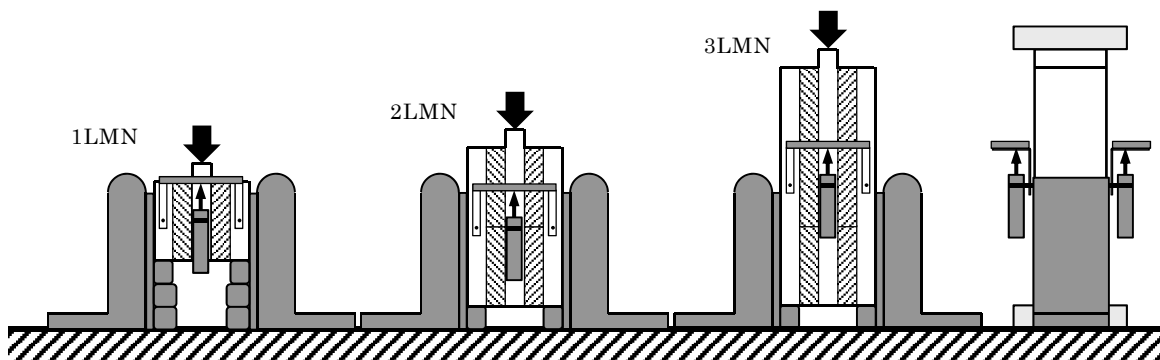
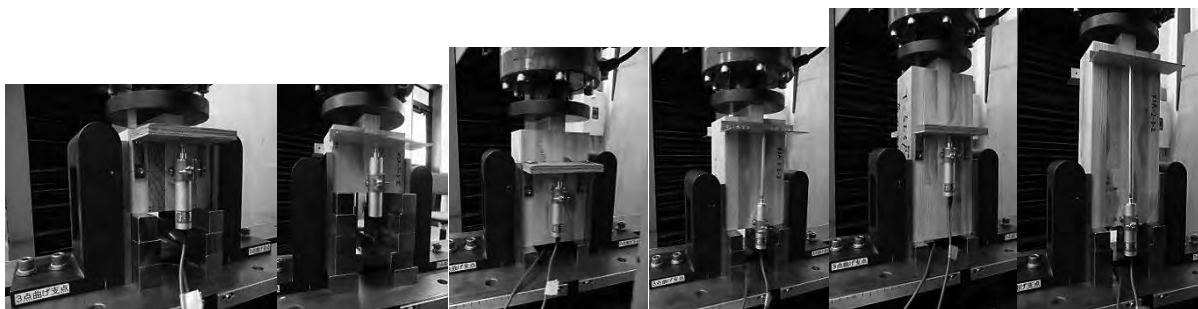


図 1.10-26 A シリーズの層内せん断試験（せん断長さの中央部で変位を測定する場合）



ア) 1LMN

イ) 2LMN

ウ) 3LMN

写真 1.10-8 Aシリーズの層内せん断試験の状況

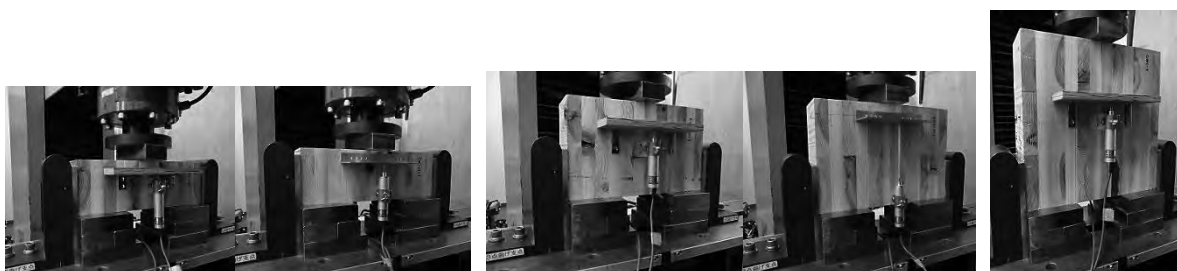


ア) 1LMN

イ) 2LMN

ウ) 3LMN

写真 1.10-9 Bシリーズの層内せん断試験の状況



ア) 1LMN

イ) 2LMN

ウ) 3LMN

写真 1.10-10 Cシリーズの層内せん断試験の状況

iv) 結果

各シリーズの層内せん断試験の結果を表 1.10-28～36 に、せん断応力-せん断ひずみ関係を図 1.10-27 に、破壊例を写真 1.10-11 に示す。

せん断強度 τ は、ラミナ等級 M30 の試験体が 0.9～1.8MPa、ラミナ等級 M60 の試験体が 0.8～2.0MPa であった。

層内せん断弾性係数 G_R は試験体のラミナ数により差異がみられた。同シリーズで比較すると、概ね G_R が小さい試験体ほど破壊時のせん断ひずみが大きい傾向がみられた。

表 1.10-28 A シリーズ (M30、1LMN) の層内せん断試験の結果

No.	ρ	τ	G_{RW}	G_{RC}
RSA-1-1-1	407	1.29		65.1
RSA-2-1-1	405	0.98		67.8
RSA-3-1-1	423	1.80		46.2
RSA-1-1-2	397	1.12	35.2	
RSA-2-1-2	406	1.24	34.0	
RSA-3-1-2	397	0.91	26.4	
平均値	406	1.22	31.9	59.7
最小値	397	0.91	26.4	46.2
最大値	423	1.80	35.2	67.8
標準偏差	9.76	0.320	4.77	11.8
変動係数	2.41%	26.2%	15.0%	19.7%

 ρ : 密度 (kg/m^3) τ : 直交層のせん断強度 (N/mm^2) G_{RW} : 試験体頂部付近と脚部付近の変位から求めた直交層の層内せん断弾性係数 (N/mm^2) G_{RC} : せん断長さの中央部の変位から求めた直交層の層内せん断弾性係数 (N/mm^2)

表 1.10-29 A シリーズ (M30、2LMN) の層内せん断試験の結果

No.	ρ	τ	G_{RW}	G_{RC}
RSA-1-2-1	408	1.11		50.2
RSA-2-2-1	384	1.27		35.0
RSA-3-2-1	410	1.32		75.7
RSA-1-2-2	407	0.98	72.4	
RSA-2-2-2	416	1.03	61.3	
RSA-3-2-2	425	1.20	73.6	
平均値	408	1.15	69.1	53.6
最小値	384	0.98	61.3	35.0
最大値	425	1.32	73.6	75.7
標準偏差	13.61	0.134	6.76	20.6
変動係数	3.34%	11.6%	9.78%	38.4%

記号の説明は表 1.10-28 に同じ。

表 1.10-30 A シリーズ (M30、3LMN) の層内せん断試験の結果

No.	ρ	τ	G_{RW}	G_{RC}
RSA-1-3-1	405	1.21		84.9
RSA-2-3-1	380	1.08		74.1
RSA-3-3-1	392	0.93		68.4
RSA-1-3-2	390	1.16	62.6	
RSA-2-3-2	431	1.20	61.7	
RSA-3-3-2	417	1.20	70.2	
平均値	403	1.13	64.8	75.8
最小値	380	0.93	61.7	68.4
最大値	431	1.21	70.2	84.9
標準偏差	18.92	0.110	4.65	8.4
変動係数	4.70%	9.75%	7.17%	11.0%

記号の説明は表 1.10-28 に同じ。

表 1.10-31 B シリーズ (M30、1LMN) の層内せん断試験の結果

No.	ρ	τ	G_{RW}	G_{RC}
BW1-1-1	372	1.76		23.7
BW2-1-1	373	1.42		37.6
BSW1-1-1	418	1.15		36.1
BSW2-1-1	390	1.14		28.0
BSW3-1-1	400	1.46		32.4
BW1-1-2	374	1.47	72.2	
BW2-1-2	372	1.21	50.5	
BSW1-1-2	427	1.02	40.9	
BSW2-1-2	395	1.09	22.4	
BSW3-1-2	402	1.24	36.7	
平均値	392	1.29	44.5	31.6
最小値	372	1.02	22.4	23.7
最大値	427	1.76	72.2	37.6
標準偏差	19.8	0.228	18.5	5.76
変動係数	5.06%	17.6%	41.5%	18.3%

記号の説明は表 1.10-28 に同じ。

表 1.10-32 B シリーズ (M30、2LMN) の層内せん断試験の結果

No.	ρ	τ	G_{RW}	G_{RC}
BW1-2-1	397	1.22		53.9
BW2-2-1	377	1.15		44.8
BSW1-2	431	1.56		55.3
BSW2-2	395	1.54		46.3
BSW3-2	397	0.90		70.7
BW1-2-2	401	1.22	51.5	
BW2-2-2	378	0.99	72.4	
平均値	397	1.22	61.9	54.2
最小値	377	0.90	51.5	44.8
最大値	431	1.56	72.4	70.7
標準偏差	18.0	0.251	14.7	10.3
変動係数	4.54%	20.5%	23.8%	19.0%

記号の説明は表 1.10-28 に同じ。

表 1.10-33 B シリーズ (M30、3LMN) の層内せん断試験の結果

No.	ρ	τ	G_{RC}
BW1-3	367	1.35	115.7
BW2-3	374	1.33	54.1
BSW1-3	429	1.44	83.3
BSW2-3	404	1.41	61.7
BSW3-3	389	1.33	61.8
平均値	393	1.37	75.3
最小値	367	1.33	54.1
最大値	429	1.44	115.7
標準偏差	24.7	0.0513	25.1
変動係数	6.28%	3.74%	33.3%

記号の説明は表 1.10-28 に同じ。

表 1.10-34 C シリーズ (M60、1LMN) の層内せん断試験の結果

No.	ρ	τ	G_{RW}	G_{RC}
CW1-1-1	384	1.66	30.5	
CW2-1-1	439	2.01	53.9	
CW3-1-1	383	1.09	42.4	
CW4-1-1	415	1.50	40.8	
CW5-1-1	388	0.97	18.7	
CW6-1-1	408	1.11	17.0	
CW1-1-2	410	1.71		39.7
CW2-1-2	393	1.41		43.1
CW3-1-2	396	1.44		51.4
CW4-1-2	404	1.28		45.6
CW5-1-2	399	1.08		34.1
CW6-1-2	427	1.23		32.6
平均値	404	1.37	33.9	41.1
最小値	383	0.97	17.0	32.6
最大値	439	2.01	53.9	51.4
標準偏差	17.1	0.309	14.5	7.11
変動係数	4.24%	22.5%	42.8%	17.3%

記号の説明は表 1.10-28 に同じ。

表 1.10-35 C シリーズ (M60、2LMN) の層内せん断試験の結果

No.	ρ	τ	G_{RW}	G_{RC}
CW1-2-1	382	1.10		53.3
CW2-2-1	402	0.96		56.6
CW3-2-1	403	1.24		48.3
CW4-2-1	415	1.43		73.9
CW5-2-1	405	1.16		42.8
CW6-2-1	429	1.30		53.7
CW1-2-2	381	1.14	63.1	
CW2-2-2	391	1.27	75.1	
CW3-2-2	385	1.52	55.4	
CW4-2-2	405	0.79	40.0	
CW5-2-2	393	1.54	70.6	
CW6-2-2	409	1.38	69.9	
平均値	400	1.24	62.4	54.8
最小値	381	0.79	40.0	42.8
最大値	429	1.54	75.1	73.9
標準偏差	14.4	0.224	12.9	10.58
変動係数	3.61%	18.2%	20.7%	19.3%

記号の説明は表 1.10-28 に同じ。

表 1.10-36 C シリーズ (M60、3LMN) の層内せん断試験の結果

No.	ρ	τ	G_{RC}
CW1-3	387	1.234	75.7
CW2-3	390	1.430	81.4
CW3-3	383	0.925	67.8
CW4-3	420	1.135	70.3
CW5-3	391	1.380	79.6
CW6-3	405	1.242	71.8
平均値	396	1.22	74.4
最小値	383	0.92	67.8
最大値	420	1.43	81.4
標準偏差	13.7	0.181	5.40
変動係数	3.47%	14.8%	7.26%

記号の説明は表 1.10-28 に同じ。

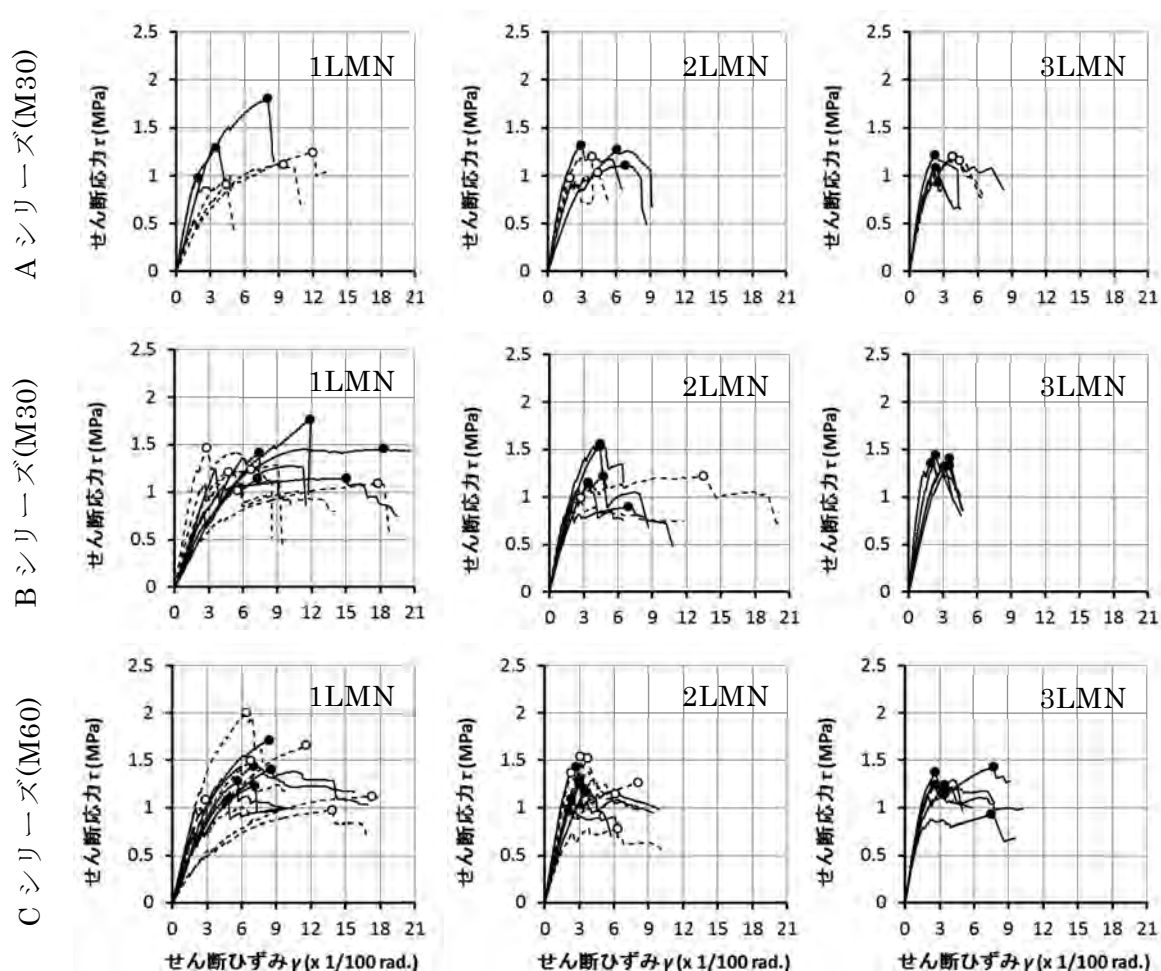
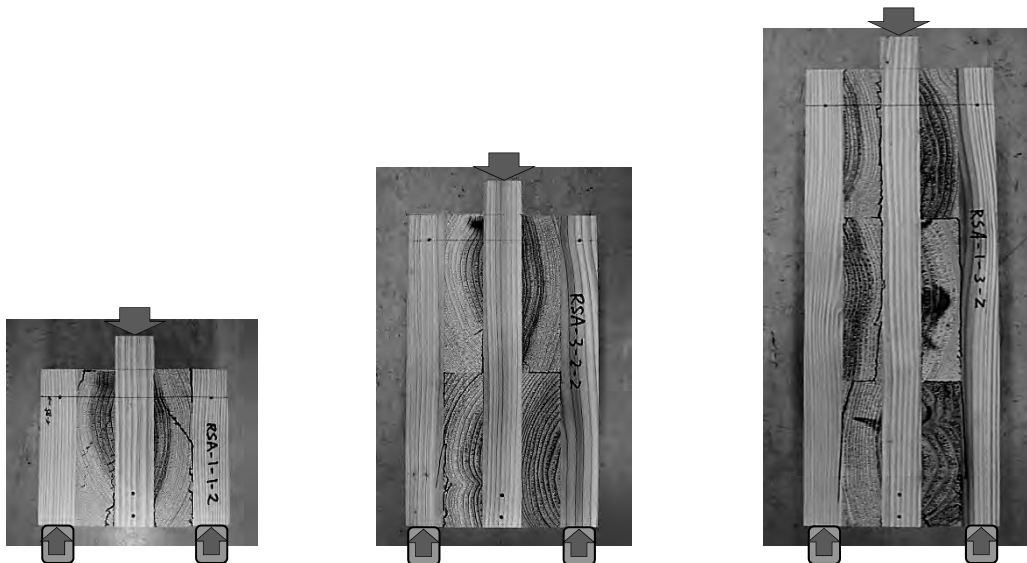
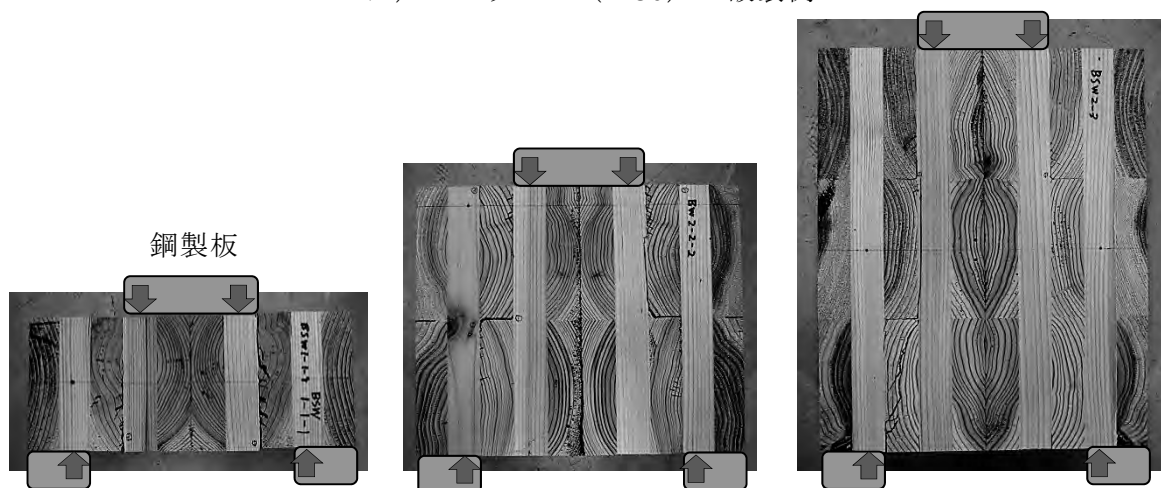


図 1.10-27 層内せん断試験のせん断応力 τ —せん断ひずみ γ 関係
 実線は変位をせん断長さ中央部で測定したもの。●はその最大応力点。
 破線は変位を頂部—脚部間で測定したもの。○はその最大応力点。



ア) Aシリーズ (M30) の破壊例



イ) Bシリーズ (M30) の破壊例



ウ) Cシリーズ (M60) の破壊例

写真 1.10-11 層内せん断試験の破壊例

v) 考察

v-1) 層内せん断試験における破壊性状

せん断破壊は、最初に接着層の微小な破壊とみられる音が発生し、その後しばしば、直交層ラミナの隅角部に亀裂の発生が目視確認された。これは、直交層ラミナ間に幅はぎ接着がないため、隅角部に集中的に応力が生じるためと考えられる。その後、支点と加力点を結ぶ線に近い方向に亀裂の進展がしばしばみられた。また、この方向が年輪境界と一致するときは、せん断に伴う引張力により年輪に沿った破壊が、直交するときは、年輪の放射方向に亀裂がしばしば亀裂がみられた。

B シリーズと C シリーズの 1LMN 試験体では、曲げ変形の影響がみられる場合もあり、その場合は、脚部は荷重点直下付近に亀裂がみられた。また、2 次接着した試験体ではその接着面で破壊するケースもあった。

v-2) 層内せん断強さ

層内せん断強さ τ は M30 が 0.9~1.8MPa、M60 が 0.8~2.0MPa であった。既往のデータと比較すると、両等級とも τ は小さい値を示した (表 1.10-37)。

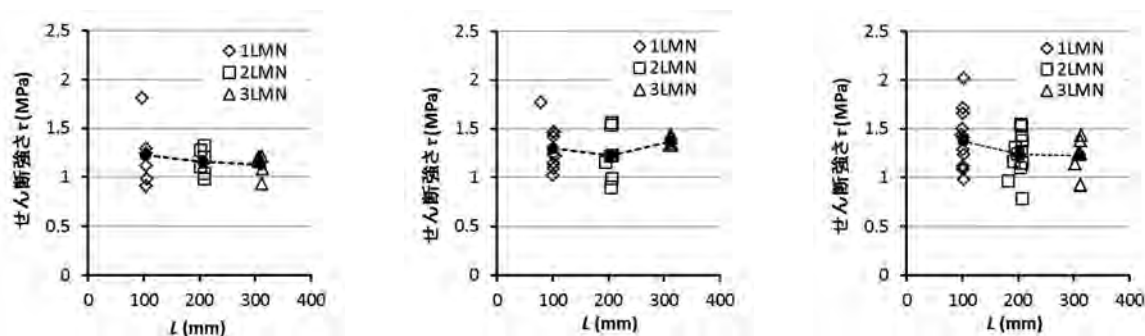
試験体に含まれるラミナ数が多いほど τ のばらつきが小さくなる傾向がみられた (図 1.10-28)。 τ の平均値は 1LMN がやや高くなる傾向がみられた。また、ラミナ等級 M30 (A および B シリーズ) よりも M60 (C シリーズ) の方が τ が若干大きい傾向がみられた。これらの傾向における密度の影響は小さいと思われる (図 1.10-29)。

表 1.10-37 各等級ラミナのせん断弾性係数 G_{RW} とせん断強度 τ の平均値の比較

シリーズ	ラミナ	G_{RW} (MPa)	τ (MPa)	t_{LMN} (mm)	試験体	CLT	密度 (kg/m ³)
A と B	M30A	66.2	1.19	25	2LMN	Mx60-5-5	402
	208	169	2.01	20	2LMN	Mx60-9-9	418
	209	74.6	1.65	20	2LMN	Mx60-9-9	425
C	M60A	70.7	1.22	25	3LMN	Mx60-6-6	396
	M6-1	74.4(G_{RC})	1.63	30	3LMN	S60-5-5	453

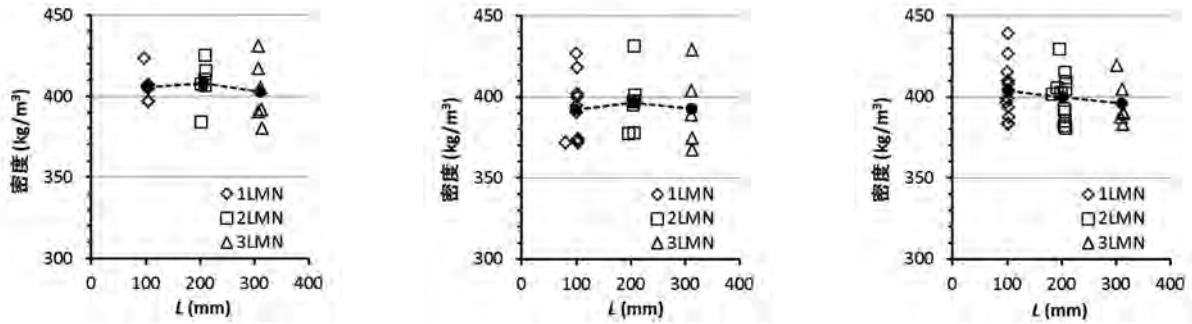
全てラミナ幅 105mm、ラミナ間の幅はぎ接着なし。

208、209、M6-1 は平成 27 年度⁸⁾および平成 28 年度事業⁹⁾で得られた知見。



ア) A シリーズ (M30) イ) B シリーズ (M30) ウ) C シリーズ (M60)

図 1.10-28 せん断強さ τ とせん断長さ L の関係



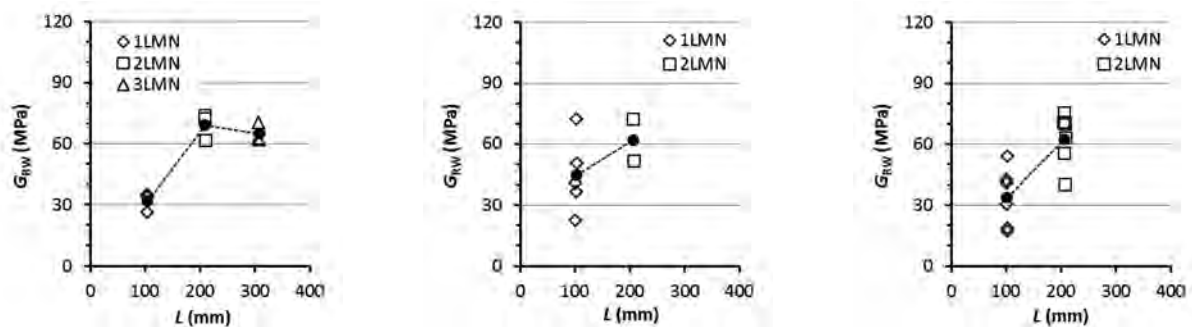
ア) A シリーズ (M30) イ) B シリーズ (M30) ウ) C シリーズ (M60)

図 1.10-29 セン断強さ τ と密度の関係

v-3) 層内せん断弾性係数

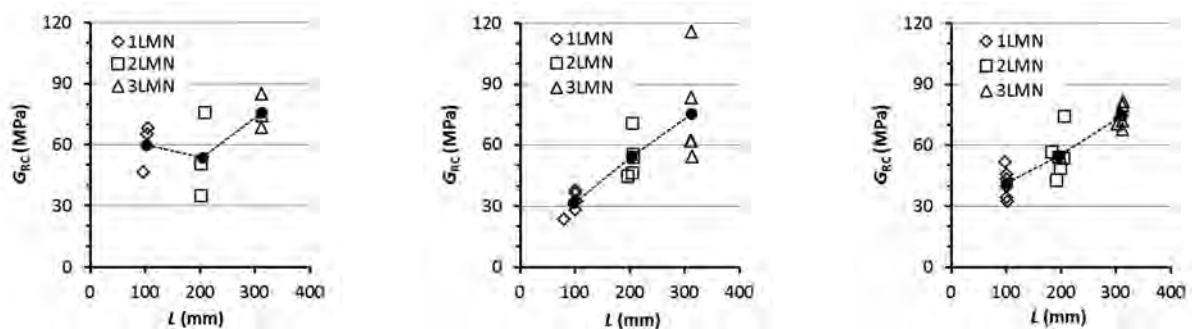
層内せん断弾性係数 G_R はラミナの等級 M30 が 22~116MPa、M60 が 17~81MPa であった。既往のデータと比較すると、両等級とも G_R は小さい値を示した (表 1.10-37)。

ラミナ数が多いほど G_R が大きく評価される傾向がみられた (図 1.10-30~31)。従来から採用していた試験体頂部一脚部間の変位で測定した G_{RW} と今回新たに採用した試験体中央部の変位で測定した G_{RC} を比較すると、 G_{RW} の方が G_{RC} よりもやや大きい傾向がみられた。測定部分のせん断応力の差異によると考えられる。直交層ラミナ間に幅はぎ接着が無い場合の層内せん断試験のせん断応力分布は知見がなく、更なる検討が必要である。



ア) A シリーズ (M30) イ) B シリーズ (M30) ウ) C シリーズ (M60)

図 1.10-30 試験体頂部一脚部間で測定したせん断弾性係数 G_{RW} とせん断長さ L の関係



ア) A シリーズ (M30) イ) B シリーズ (M30) ウ) C シリーズ (M60)

図 1.10-31 試験体中央部で測定したせん断弾性係数 G_{RC} とせん断長さ L の関係

vi) まとめ（層内せん断強度特性）

本年度事業にて作成したスギ CLT を構成するラミナ間の幅はぎ接着のない厚さ 25mm ×ラミナ幅 105mm の等級 M30 および M60 のラミナについて、直交層ラミナの層内せん断試験を行い、層内せん断強度特性について以下の知見を得た。

- 1) 層内せん断強さは M30 が 0.9～1.8MPa、M60 が 0.8～2.0MPa であった。条件が類似した既往のデータと比較すると、両等級とも小さい値を示した。
- 2) 層内せん断強さは試験体に含まれるラミナ数が多いほど測定結果のばらつきが小さくなる傾向がみられた。
- 3) 層内せん断弾性係数は M30 が 22～116MPa、M60 が 17～81MPa であった。条件が類似した既往のデータと比較すると、両等級とも小さい値を示した。
- 4) 層内せん断弾性係数は試験体に含まれるラミナ数が多いほど大きく評価される傾向がみられた。
- 5) 従来の測定方法である試験体頂部一脚部間の変位で測定した場合と今回新たに採用した試験体中央部の変位で測定した場合を比較すると、前者の方が後者よりも若干大きな層内せん断弾性係数の評価となる傾向がみられた。

1.10 章の文献

- 1) 平井卓郎，沢田 稔：切り欠きを持つ木材梁の曲げ剛性と耐力（第 1 報），北大演報，36(2)，387-419，1979.
- 2) 平井卓郎，沢田 稔：切り欠きを持つ木材梁の曲げ剛性と耐力（第 2 報），北大演報，36(3)，663-679，1979.
- 3) 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のうち CLT 実用化促進（強度データの収集・分析）成果報告書，p112-114，2015.3.
- 4) 構造用木材の強度試験マニュアル，日本住宅・木材技術センター，p.34-35，2011.3.
- 5) 井道裕史，長尾博文，加藤英雄，三浦祥子，宮武敦：第 63 回日本木材学会大会要旨集 CD-ROM，D29-08-1100，2013.
- 6) 木材工業ハンドブック改訂 4 版，丸善，東京，p.135，2007.
- 7) 園田里見，森田秀樹：8.1 集成材の断面設計理論，ティンバーメカニクス，日本木材学会 木材強度・木質構造研究会編，海青社，大津，pp.185-190，2015.
- 8) 平成 27 年度林野庁委託事業 CLT 等新たな製品・技術の開発普及事業（CLT 強度データ収集）成果報告書，p.78-86，2016.3.
- 9) 平成 28 年度林野庁委託事業 都市の木質化等に向けた新たな製品・技術の開発・普及事業（CLT 強度データ収集）成果報告書，p.60-82，2017.3.

1.11 まとめ

基材となる CLT パネルの表層に美観向上等を目的としたラミナを付加することでパネルの積層方向の中心軸に対してラミナの配置が非対称構成になる。それが強度性能に与える影響について、5 層 5 プライ CLT を基材として検討した。ラミナ付加のパターンは、付加ラミナの繊維方向を基材表層の繊維方向に平行に積層する 5 層 6 プライタイプと基材表層の繊維方向に直交させて積層する 6 層 6 プライとした。

- ・積層方向の短期曲げ性能においては、ラミナ構成が非対称になることで積層方向の中立軸がパネル積層方向の中心と一致しなくなることで、また、モーメントの方向が変わると付加されたラミナに生じる応力が引張や圧縮になることの影響に注目したが、これらの影響は、いずれのタイプにおいても確認されなかった。一方、6 層 6 プライの弱軸と 5 層 6 プライの強軸の剛性や耐力が向上することが確認された。また、その程度の推定はおおよそ可能であるが、精度向上の余地はあると考えられる。

- ・温湿度非定常下における積層方向の長期曲げ変形については、同じ層構成でもモーメントの方向が変わると付加されたラミナに生じる応力が引張や圧縮になる影響があるかどうか注目したが、試験開始後 1 か月の段階ではモーメントの方向の影響は確認されていない。ただし、計測を冬季に開始した条件であることを加味して引き続き計測することが望まれる。

- ・積層方向の短期せん断性能については、ラミナ構成の影響によりせん断応力の応力集中係数が変動すること、また、試験条件の影響について注目した。その結果として、JAS 規格で規定する水平せん断試験の試験条件のうち、試験体厚さの規定を明確にする必要があることがわかった。

- ・座屈性能については、細長比の算定には付加ラミナがある場合であっても基材パネル厚さで行う必要性が示唆された。しかしながら、それを行っても 6 層 6 プライタイプについては、ラミナによる座屈耐力低下が生じる可能性が示された。その理由として中立軸位置と中心軸のズレの影響が示唆された。

- ・幅方向のせん断性能においては、せん断強度の推定には告示式が適用できそうであることが確認された。

- ・引張性能において、付加ラミナが引張強度に与える影響は告示式を用いて推定可能であり、弾性係数についても等価断面法で推定できることが確認された。

- ・直交層挙動の解明では、直交層付ラミナがモーメントを受ける時に圧縮側にある場合と引張側にある場合の違いについて、その曲げヤング係数と曲げ強度を実験的に求めるとともに解析を行って明らかにした。これらの成果は、積層方向の曲げ性能と座屈性能の挙動を解析する上で活かす必要がある。

2. スギ 7 層 7 プライの長期性能評価

2.1 試験体の概要

クリープ破壊試験とクリープ変形試験に供した試験体の仕様と寸法は以下に示す通りとした。試験体は原板 7 枚より 8 体ずつ採取し、16 体を曲げ破壊試験に供試して破壊荷重を導出した。

樹種：スギ

構成：7 層 7 プライ(対照用に 5 層 5 プライも供試)

等級：直交集成板の日本農林規格に定める Mx60

ラミナ厚さ：30±6mm

寸法：長さ 4830mm×公称厚さ 210mm×幅 300mm

長さ 3450mm×厚さ 150mm×幅 300mm(対照用 Mx60-5-5)

2.2 結果および考察

クリープ試験・クリープ破壊試験を以下に記す載荷条件により実施した。

加力方法：3 等分点 4 点加力

支点間距離(厚さの 21 倍)：4410mm

荷重点間距離：1470mm

載荷荷重：曲げ試験により得られた最大荷重より決定

試験体数：29 体(本事業のみでなく過去の事業も含めた累積的数字)

図 2-1 にクリープ破壊試験の実施風景を示す。加力前にクロスヘッドの位置を定めるため、一番右の試験体にレーザー水準器が載っている。図 2-2 にクリープ試験時の変形量の経時的变化を示す。図中に、変形がなめらかでない変化をしている点が 2 箇所あるが、1 回目は停電によりクロスヘッドが固定され、応力緩和により一時的に荷重が軽減した時点、2 回目は破断した試験体の入れ替えのため、試験空間の温湿度環境が揺籃した時点である。いずれにしても、試験空間が狭いこと、他の測定結果に影響を与えうることから、全ての試験体が破断するまで試験体の入れ替えを行うことには慎重にならざるを得ない。



図 2-1 クリープ試験実施風景

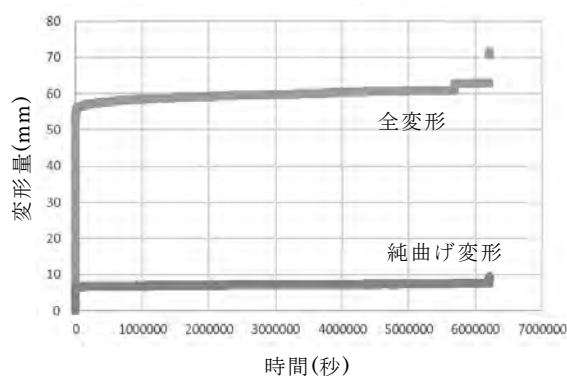


図 2-1 クリープ変形量の経時変化

図 2-3 に荷重レベルと破壊時間の関係を示す。これまでに 29 体供試している。加力開始時に初期変形の増大過程で破断した試験体が 6 体存在するため、それらについては破断時の荷重から荷重レベルを算出したが、この測定値を今後の解析に使用して良いかは議論の余地があろう。荷重レベルが低いにも関わらず著しく早い段階で破断した測定結果は、マジソンカーブに対する一致性は低くするが、回帰直線の傾きの絶対値を小さくする効果

があるため、算出される荷重継続時間に係る調整係数は大きくなる傾向がある。実際使用時に想定される荷重レベルが十分小さいことが前提でない限り、当該結果に基づく判断は、危険側となり得ることに注意が必要である。

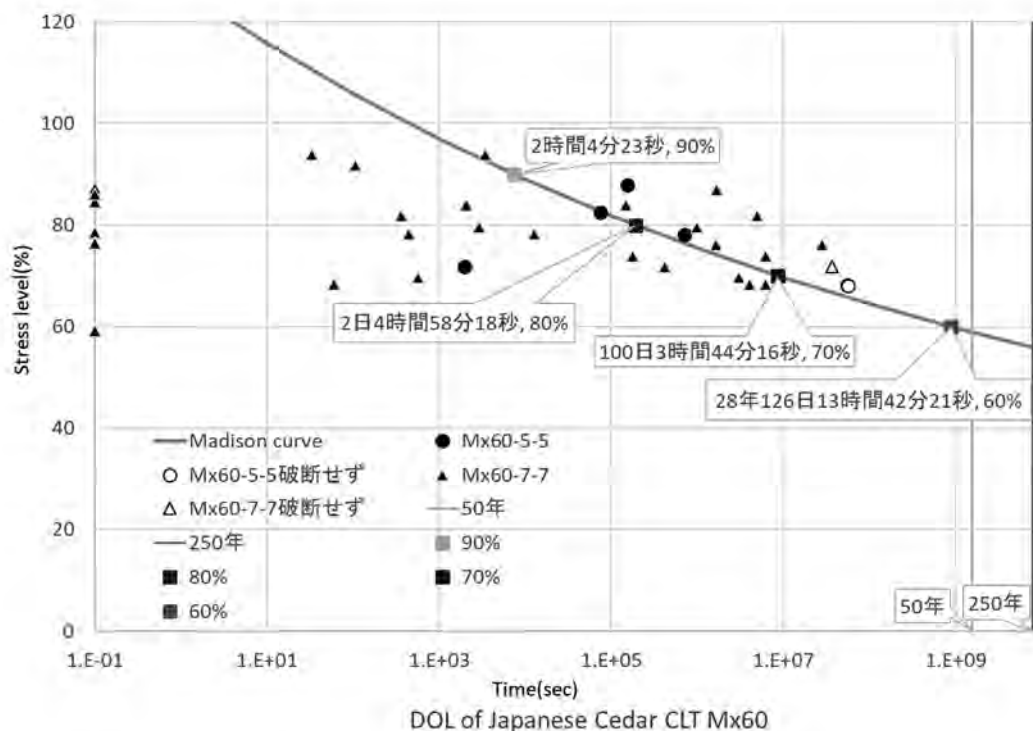


図 2-3 荷重レベルと破壊時間の関係

【文献】

- 1) 直交集成板の日本農林規格，平成 25 年 12 月 20 日 農林水産省告示第 3079 号(2013)
- 2) Wood, L.W., “Relation of Strength of Wood Duration of Load”, F.P.L. Report No. R1916(1951)
- 3) Liska, J.A., “Effect of Rapid Loading on the Compression and Flexural Strength of Wood”, F.P.L. Report No. R1767(1950)
- 4) Borg Madsen, “Structural Behaviour of Timber”, Timber Engineering LTD., (1992)
- 5) 枠組壁工法建築物設計の手引・構造計算指針編集委員会編：“2007 年枠組壁工法建築物構造計算指針”，(社)日本ツーバイフォー建築協会(2007)
- 6) “建築物の基礎，主要構造部等に使用する建築材料並びにこれらの建築材料が適合すべき日本工業規格又は日本農林規格及び品質に関する技術的基準を定める件”，建設省，平成 12 年 5 月 31 日建設省告示第 1446 号 (2000)(最終改正：平成 15 年 4 月 28 日国土交通省告示第 461 号)

3 まとめ

直交集成板の日本農林規格に則った製造条件の範囲内であってもCLT構造の建築関係基準等では適用外とされている製品仕様がある。より汎用性・効率性に優れた建築関係基準を整備する観点から、非対称構成CLTの強度性能及び長期性能における層構成の影響評価に取り組んだ。

非対称構成CLTの強度性能については、5層5プライCLTを基材として繊維方向を変えてラミナを付加した製品について各種強度試験を行うとともに、その解析を行って強度性能に与える影響を明らかにした。座屈性能については、ラミナを付加した場合に性能低下が生じる可能性が示唆された。また、積層方向の曲げ性能において弱軸の剛性や耐力が大幅に向上する場合があることも確認された。これらの挙動はおおよそ推定できる可能性を示すことができたが、これらの挙動を建物の設計で必要に応じて反映させるためには、この様な製品に対応した日本農林規格を整備するとともに、CLTパネル工法の基準法関連告示においても対応できるようにする必要がある。今回は、5層5プライを中心に検証を行ったがその他の層構成についても検証する必要がある。

長期性能における層構成の影響については、スギ7層7プライCLTの実験的な評価を行ってきた。所定の数のデータが収集される目処がたったため、7層7プライの長期許容応力度制定に向けて、今後、そのデータ解析について関係者と協議していく予定である。また、残された層構成である9層9プライについての試験を行うかどうかについても関係者と協議していく必要がある。

執筆者（五十音順）

井道裕史	森林総合研究所 構造利用研究領域	1.9
宇京斉一郎	森林総合研究所 構造利用研究領域	1.4
大橋義徳	北海道立総合研究機構 森林研究本部 林産試験場	1.2
渋谷龍也	森林総合研究所 複合材料研究領域	2.2
新藤健太	森林総合研究所 複合材料研究領域	1.4
杉本健一	森林総合研究所 構造利用研究領域	1.6
園田里見	富山県農林水産総合技術センター/木材研究所	1.10
高梨隆也	北海道立総合研究機構 森林研究本部 林産試験場	1.2
槌本敬大	建築研究所	1.8
中島昌一	建築研究所	1.7
中島史郎	宇都宮大学	1.5
野田康信	森林総合研究所 構造利用研究領域	1.6
宮武敦	森林総合研究所 複合材料研究領域	1.1、1.11、3
宮本康太	森林総合研究所 複合材料研究領域	2.2
山本健	広島県立総合技術研究所 林業技術センター	1.3

付 録

平成30年度林野庁委託事業
CLT等新たな木質建築部材利用促進・定着委託事業（国による開発）
（CLT強度データ収集事業）

関係者名簿（順不同、敬称略）

委 員：	安村 基	静岡大学名誉教授（委員長）
	河合 直人	工学院大学建築学部建築学科
	青木 謙治	東京大学大学院農学生命科学研究科
	尾方 伸次	公益財団法人日本合板検査会
	後藤 隆洋	公益財団法人日本住宅・木材技術センター
	上山 耕平	一般財団法人建材試験センター
	藤田 和彦	藤田K林産技術士事務所
	横田 俊峰	独立行政法人農林水産消費安全技術センター
	荒木 康弘	国土技術政策総合研究所
アドバイザー：	秋津 裕志	地方独立行政法人北海道立総合研究機構林産試験場
	佐々木貴信	秋田県立大学 木材高度加工研究所
	中原 亨	鹿児島県工業技術センター
	玉置 教司	愛媛県農林水産研究所林業研究センター
	谷内 博規	岩手県林業技術センター
オブザーバー：	青木 亮	国土交通省住宅局建築指導課
	徳竹 忠義	国土交通省住宅局建築指導課
	古藤 信義	農林水産省食料産業局食品製造課食品規格室
	齋藤 健一	林野庁木材産業課木材製品技術室
	福島 純	林野庁木材産業課木材製品技術室
	猪島 明久	林野庁木材産業課木材製品技術室
	藤本 達之	林野庁木材産業課木材製品技術室
	的場 弾	林野庁木材産業課木材製品技術室
課題担当者：	中島 史郎	宇都宮大学地域デザイン科学部
	槌本 敬大	国立研究開発法人建築研究所
	中島 昌一	国立研究開発法人建築研究所
	大橋 義徳	地方独立行政法人北海道立総合研究機構林産試験場
	高梨 隆也	地方独立行政法人北海道立総合研究機構林産試験場
	園田 里見	富山県農林水産総合技術センター木材研究所
	涌嶋 智	広島県立総合技術研究所林業技術センター
	山場 淳史	広島県立総合技術研究所林業技術センター
	弓場 憲生	広島県立総合技術研究所林業技術センター
	齋藤 一郎	広島県立総合技術研究所林業技術センター
	山本 健	広島県立総合技術研究所林業技術センター
	渡辺 靖崇	広島県立総合技術研究所林業技術センター
	坂部 芳平	一般社団法人日本CLT協会

	西妻 博康	一般社団法人日本CLT協会
	孕石 剛志	銘建工業(株)
	渡部 博	銘建工業(株)
	村田 忠	山佐木材株式会社
	原田 真樹	国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所
	井道 裕史	国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所
	長尾 博文	国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所
	杉本 健一	国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所
	野田 康信	国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所
	宇京斉一郎	国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所
	軽部 正彦	国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所
	渋沢 龍也	国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所
	宮本 康太	国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所
	平松 靖	国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所
	新藤 健太	国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所
	宮武 敦	国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所
事務局：	黒田 尚宏	公益社団法人日本木材加工技術協会
	村田 光司	公益社団法人日本木材加工技術協会

第1回推進委員会 議事録

日 時：平成 30 年 7 月 12日（木） 15:00～17:00

場 所：林友ビル 6階中会議室

議 事：1) 挨拶

2) 委員紹介

3) 本年度事業について

試験計画の概要

試験体の概要

4) その他

資 料：資料 1 出席者名簿

資料 2-1 仕様書

資料 2-2 提案書改訂版

資料 3-1 試験体概要

資料 3-2 採材図

出席者（順不同、敬称略）

委 員：安村基（委員長）、河合直人、尾方伸次、後藤隆洋、荒木 康弘、横田 俊峰

アドバイザー：秋津裕志、玉置教司、谷内博規

オブザーバー：徳武忠義、古藤信義、猪島明久、藤本達之、的場弾

課題担当者

事務局

議事：

事務局による資料の確認、林野庁木材産業課猪島課長補佐の挨拶、出席者の紹介の後、安村委員長の司

会による委員会が開会された。

まず、宮武主査が、「今年度は、非対称構成のCLTの強度性能、長期性能における層構成の影響評価の2課題で実施する予定である。非対称構成については、5層5プライを対象にし、貼り方を変えることで5層6プライと6層6プライを考えている。美観等を目的としたラミナがJASでは使えることになっているが、問題があるのではという議論が出ており、今回検討することにした。長期性能については、7層7プライのデータ収集を引き続き実施する。」と趣旨説明した。

「美観等ということ、強度以外の目的を含めてとのこと、非対称構成ということが一つにならないように思えるが、どうなのか。」と質問があり、「現状のJASでは、層構成でいうと3層3プライから9層9プライの6構成と決まっており、それに対して、基準強度が足せるという状況になっているが、そこに、よく分からないものを貼ってしまって、例えば5層5プライに1プライ貼って5層6プライというのはどうなのか。燃えしろ設計において、CLTの外側に燃えしろ層みたいなのを貼り付ける場合、JASでは対称構成しかないので、片側だけでいいのに反対側にも張らなければならない、余分な材料を使わないといけなのではないか。」と答えた。「JASへの提案みたいなことも考えるのか。」と問われ、「5層5プライに何かを貼ることでパネルの挙動が随分変わってしまうので、プラスにしかならないだろうから貼るのはいいという考え方が通用しないと思っている。JASで例えば6層6プライも規定した方がいいと思う。」と答えた。引き続き、宮武主査より、5層5プライのCLTにラミナを貼った場合のシミュレーションの結果、何らかの形でJASに位置付ける必要があると思われ、それを確認するために今回の実験を組んでいるとの説明と実験計画について説明があり、「実験条件、スパンをどうしたらいいか、荷重点間の距離、座屈試験の加力位置、追加に貼るラミナの品質をどうするかについて意見を聞きたい。」と述べた。これに対し、「基本的に、外側に付けるのはラミナであって、それで、その厚さはほかの層と同じ厚さを考えるということでもいいか。」と質問があり、「Mx60の5層プライの外に1個付ける場合、M60のAを標準にしようか、Bにするかしたい。また、何か付けることができそうなので、例えばM30Bなど、貼ってみたいラミナを貼ることも考えている。」と答えた。「使う時に外に付けるものはM60以下のものを必ず付けろ、あるいは、外のラミナと同じ物を付けろ、何でもいから付けろ、その辺を明白にしておかないと、せっかくやったって、やったものは使えるが、それが一般性を持たない可能性が出てくる。」と述べた。これに対し、「今の段階だと、やったものが使えるという段取りを踏んできており、やったものについては認めてもらいたいと思っている。」と述べた。「今の実験の計画で考えると、それは将来的に、JASにMx60の6層6プライとか5層6プライという等級ができ、そこに数値が反映されるという理解でよろしいか。単純に通常のCLTの中で非対称構成の物が追加されるというところに限定されるようなイメージとなるが、その理解でよろしいか。」との質問に、「そうならざるを得ない。今年やる実験で、それがどこまで決め切れるか。やったものしか決められないかもしれない。」、「1枚何かを貼ることでCLTは全く別物になってしまう可能性があり、そうならば、層構成をちゃんと明示するような形にした方がいいと思う。ただ、ラミナの厚さを薄くすれば、計算上はこれぐらいしか動かないので、5層5プライに貼ってもいいという考え方もできると思うので、そこが今回分かるような実験にしたいとは思っている。新しく貼る物について、M60以外の物でラミナの厚さを変えたらどうかとか、あるいは材質を変えてみたらどうかとかという意見をいただきたい。」と答えた。「ここでは強度の話を見ればいいということか。1枚何かを貼ることが強度にどういう影響を与えるかということだけでもいいか。」と意見を述べ、「限定された形ではなくて、色々なことが推察できるような実験にはしたいと思っている。」と述べた。「普遍的なシミュレーション方法があって、それは実験で検証するためには、こういうパラメータの物を実験しておけばいいというようなやり方が本来は正当的な気がする。それが検証できるような実験が少なくともいるのでは。」との質問に、「まず限定された中でもやっておきたい。これがもっと、どこまで拡大解釈していいかどうかは、今回の実験系の中では恐らく難しいと思う

が、少なくとも、この考え方が検証できないと先に進めない。」と答えた。「主査の案で構わないような気がする。曲げ試験の条件も、5層5プライを1,050でやったらいい。」「その意見に賛成。これまで弱軸の評価をする時も、外形寸法の21倍で測っている。多分大きい方に合わせておいて、その数値を比較できる方がすなりいくと思う。」との意見があった。「この提案を採用すると、どれかの試験体を削るか、2,875の試験体を3,450にするかしないといけない。CLT協会と相談したい。」と主査が述べ、これに委員長も同意した。「5層6プライの弱軸の場合、負側の方にした時に、この非対称になっている直交層のラミナが、圧縮、フタするのかどうかで中立軸が変わってくる。そもそも弱軸の要素が入ってきている時の曲げで、圧縮側に入っている時とか引張側に入っている時の影響というのが、まだ余り分かってない。基本的に、計算するための物性値になるようなものというのが、はっきりしていないと思う。それがないと、方法を作るにしても、その値を決めるところから考えていかなければならない。」との発言があった。それに対し、「横方向の圧縮を受ける時のヤング率みたいなものを測っておいた方がいいのではないかということではないか。」と質問があり、「本来だと、例えば極端な話、2層2プライとかで片側直交層で、強軸と弱軸だけで組み合わせたような物で検証してみるというのが本来必要なのかなと。それをモデルにし、上手くデータが出たものが合うか合わないかとか、あるいはひずみを取って中立軸を出してやって、それと合うか合わないかという検証は、できるのかもしれない。」との答えがあった。「こんなデータも取ったらいいかみたいなことも含めて、また進めながら相談したい。また、使ったラミナのヤング係数、どんな分布のラミナ、ヤング係数の分布だったかというデータを取っているで、今年使ったラミナの縦継ぎ部のところは試験体をもらって、少なくとも曲げ試験はしておきたい。横方向のデータについては、2層2プライでやるとすると、少しラミナを多めに用意し、そういう試験を組んでみるということになると思う。」と主査が述べた。

「座屈は、要は圧縮側、引張側の直交層は多分効かないが、圧縮側の直交方向が効いてくる。そうすると、剛心上で力を加えていたものが、実は少しずれていて偏心荷重が入ってきている可能性が出てきている。今回の場合、最外層に片側1枚張るということになるので、剛心のところに加力をするのか、図心に加力するのかというので結果は変わってくると思う。剛心上、図心上のどちらで加力するのか。この場で決められなければ、後で相談して決めたい。」との意見があった。主査が、「M60は標準のラミナとして貼る。もう1種類貼れる余地があると思っているが、それを何にしたいといいか。」と意見を求めた。委員長が、「厚さを変えるというのは、すぐ作れるのか。」と尋ね、渡辺オブザーバーが、「1プライ当たり25ミリと記憶しており、これだと20ミリまでとなる。」と答えた。

前年度の長期の結果について説明があった。その後、データの解釈についての議論がなされた。長期荷重に関して、「平成28年度の補正のCLTに関する事業の中で、ヒノキの5層5プライを測り始めたが、これについては、今後、実施していく方向になるのか。」と質問があり、林野庁担当者が、「国交省さんとの話も聞かなければ分からないし、メーカー側の要望というのものもあるだろうから、その辺も合わせて聞きながら、また今後、方向性を決めていきたい。」と答えた。

試験体について、8月中ぐらいに作って、9月いっぱいかけて切り出して、10月頭ぐらいから試験ができるようになるのではないかと説明があった。

主査より、建研に、面内せん断のエ型の試験体のくびれの寸法が資料どおりで良いか確認して欲しいと要求があった。

「5層5プライを標準で、外にM60を貼る、基本方針はそれで行きたいと思うが、それ以外にもう一つ何かを選ぶとしたら、M30Bぐらいにしたい。とにかく弱いものを張るという方向にしたい。」と述べた。「下のラミナの品質ということだが、選別は等級だけで選別するのか、それとも、表面性をプラスするのか、後は密度を管理するのかとか、考えなくていいのか。」との意見が出され、「M30Bから節がなるべく少ないやつを選ぶというのは、恐らく、ほぼ不可能に近い要求になる。美観かどうかは、結果

を見て考える。」と答えた。「最後に貼るものを、燃えしろをふかすというのであれば、30とかを貼るというのは分かるが、もし、美観という、イメージだけだが、ヒノキとかもう少し材質のいいものを貼るとなってくると、今度はヤングの高いものがむしろ外側に貼られてくる可能性があり、目的によって、くるものが変わってくるような気がするので、その辺の整理をしておいた方がいい。」との意見があった。

主査より、「工場を見学されたいという方は大分少なくなっていると思うが、もし、銘建工業で試験体を貼る時に立ち会ってみたいという方がいたら、現地検討会をするようなことも考えたいと思う。試験上、何か問題点が出てきましたら、連絡ください。順調に進めば、2月上旬ぐらいに委員会を開いて、今年度の取りまとめということになると思うので、よろしくお願いいたします。」と発言があり、委員長が委員会の終了を宣言した。

現地検討会議事録

日 時：平成 30 年 10 月 5 日（金）

場 所：銘建工業(株) CLT工場会議室

出席者：安村（静岡大学名誉教授），秋津（北林産試），宮武（森林総研），山本（広島総研），西妻，村田，西牧（日本CLT協会），中島，孕石，渡部（銘建工業），村田（加工技術協会，事務局）

資 料：資料1 出席者名簿

資料2 今年度の試験計画及び試験体の仕様について

資料3 CLT試験体 製造状況及び製品検査

資料4 CLT製造パネル一覧・ラミナ試験体明細表

資料5 CLT用スギラミナのグレーディングデータ

議事内容：

1) 本年度事業について

宮武委員が、今年度の試験体仕様の決定内容を説明した。安村委員長が、「CLT製品に付加する層は下記の3つの用途が考えられる。①化粧材（薄いラミナ等）②燃えしろ層（強度負担あり）③化粧（厚い材料）これらについて、接着を含めてどう扱うか（JAS上で取り扱うか否かも含め）が課題である」と発言した。また、安村委員長は、「6層6プライは終局時の破壊性状が重要。仮に6プライ目が破壊した場合、隣接する5層目に破壊が進展するか否かを見ておく必要がある」とも指摘した。

2) 試験体製造状況の確認

渡部オブザーバーが、宮武委員の立会の下実施した当該試験体の製造・加工状況について報告した。報告終了後、製造工場の検査及び、面内せん断試験体：K-5L5P-IS-1 製品検査を実施した。材面品質、加工精度ともに良好である事を確認した。CLT製造に使用したラミナについては、M30の内訳を再度整理し、宮武委員に送付することとした。

3) 今後のスケジュール等

・森林総研への試験体納入は、外部倉庫の契約があるため、11月中以降となる可能性が大きい。その他の試験体は、銘建工業と担当で調整し、順次出荷する。第2回本委員会開催候補期間は、2/4～7の間のいずれか（もしくは2/11～13）で開催する。報告書発行の件は、委員会開催日の決定と合わせて、事務局より、後日連絡する予定である。印刷の関係があるので、報告書は遅れずに提出して欲しいと発言が事務局よりあった。

4) その他

現地検討会終了後、真庭市内のCLT建築物を視察した。

第2回推進委員会 議事録

日 時：平成 31 年2 月 7 日（木） 14:00～17:00

場 所：TKPスター貸会議室 飯田橋

議 事：1) 挨拶

2) 委員紹介

3) 本年度事業について

試験計画の概要

試験体の概要

とりまとめ方針

残された課題など

4) その他

資 料：資料 1 出席者名簿

資料 1 出席者名簿

資料 2 報告書案

出席者（順不同、敬称略）

委 員：安村基（委員長）、河合直人、尾方伸次、後藤隆洋、荒木 康弘、横田 俊峰

アドバイザー：秋津裕志、玉置教司、谷内博規、佐々木貴信、中原亨

オブザーバー：古藤信義、猪島明久、福島純、的場弾

課題担当者

事務局

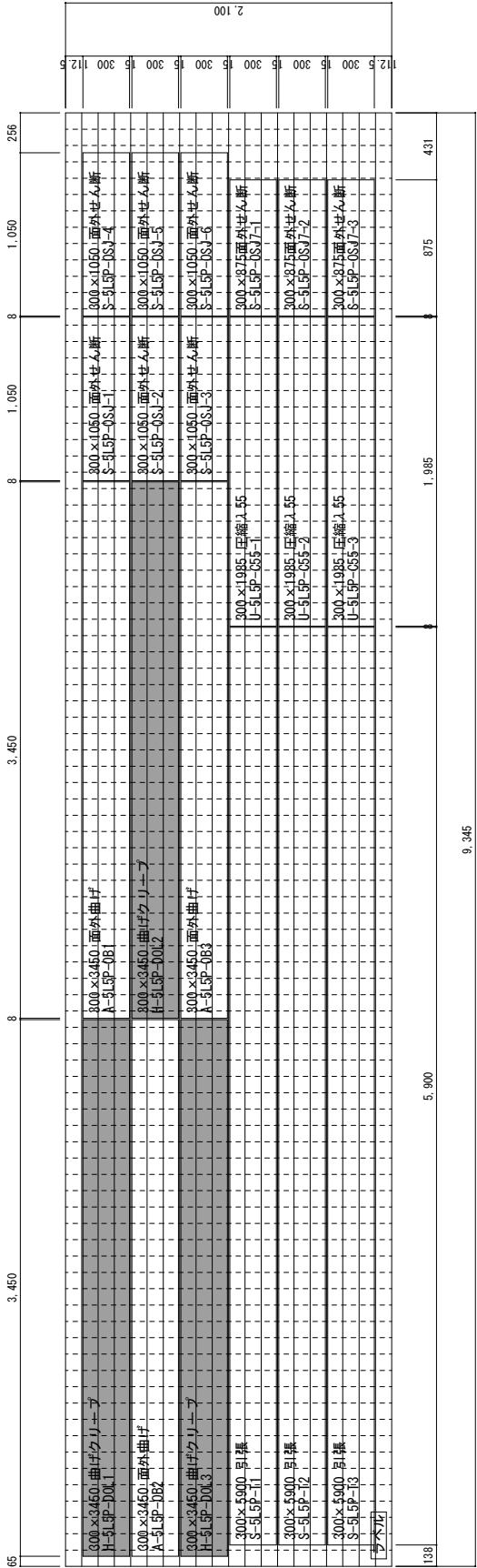
議事

事務局による資料の確認、林野庁木材産業課猪島課長補佐の挨拶の後、安村委員長の司会による委員会が開会された。

まず、宮武主査が、「非対称CLTの強度性能の評価と7層7プライのDOLの試験を行った。非対称に関しましては、曲げとかせん断とか引っ張り、圧縮、告示で必要になるような項目について、一通り検討してきた。」との説明後、各担当者からの説明に入った。「試験体は、厚さ25mm、幅105mm、幅厚さ比3.5倍のラミナを使用し、5層5プライに1層付加して非対称とし、付加層の厚さが20mm、25mmの2種類であった。3mのラミナを水性高分子イソシアネートで水平型のフィンガージョイントしたものを所定の長さにカットした。ラミナ数は、25mm厚が約3000枚、20mm厚が約100であった。図1. 1-1に使用したラミナの分布を示した。試験体の層構成は、5層5プライを標準とし、5層5プライの表（弱軸方向）に直交するに1枚貼った6層6プライ、外側の繊維の方向に繊維を揃えてもう1層貼った5層6プライである。製作したパネルは13枚、これらのパネルからそれぞれの試験用のサンプルを採材した。」と宮武主査より説明があった。「6層6プライの強弱というのは、どういう感じか」、「構成が全部Sなのか、Mxも入っているのか」との質問があった。続いて、高梨担当者より、積層方向の短期曲げ性能について、「スパンを3150mm（1番厚い仕様、厚さ150mmの21倍に統一して、積層方向の短期曲げ、いわゆる面外曲げ試験を行った。試験体は、5層5プライ強軸を基本とし、それに対して直交層を付加したもので、引っ張り側に直交層を付加したもの、圧縮側に直交層を付加したものである。試験自体は曲げ破壊、フィンガーでの破壊とか節での破壊とか、色々と混ざっており、一般的に曲げ試験で見られる破壊だった。5層6プライの強軸で、2プライしか直交層がないので、曲げがすごく強くて、最終的にはせん断破壊、直交層のローリングシアアがかなり多く出た。曲げ弾性係数とみかけの曲げ弾性係数、T. G. H. 法による弾性係数と曲げ試験による荷重点間のたわみから測定した曲げ弾性係数は1対1に対応し、弱軸試験体では、非破壊試

験から曲げ試験の結果に1対1で対応していた。今回の試験値とヤング係数と曲げ強度を使用して等価断面法による計算値は近い値であった。)との説明があった。「弱軸の計算というのは、最外層は省いて、2層目のところでとっているのか」との質問があった。続いて、温湿度が非定常下における積層方向の長期の曲げ変形について、山本課題担当者より、「どの厚さの試験体もスパン3150mmで、荷重点間1050mmで試験した。同じぐらいのひずみになるような荷重を非破壊の試験の結果から計算し、大体13～16mmぐらいのひずみが初期に発生するような荷重をかけて試験した。2週間程度しかまだ試験を行えていない。」との説明があった。続いて、新藤課題担当者より、面外方向の短期のせん断性能について、「加力はJASに定める水平せん断試験の結果のみで、短スパンの3点の曲げ型の試験である。せん断強さを算出する際は、矩形断面の断面係数1.5倍している。断面だが、ここでは強軸も弱軸も全て全断面で割っている。基準となる5層5プライについて、せん断強度は平均で2.38、せん断スパン比1.5になる。5層6プライでは、せん断スパン比は1.25、せん断強度は平均2.8弱くらい。」と説明があった。表の注釈について確認があった。続いて、座屈について、宮武主査が、「短柱を $\lambda 25$ と設定し、 $\lambda 55$ 、 $\lambda 90$ について試験した。5層5プライの $\lambda 55$ が最大荷重578だった。いわゆる5層6プライの強軸方向、1枚ラミナが強い方に付加されるので、656と最大荷重は上がっている。6層6プライの強軸は5層プライと比べると、荷重が落ちた。」と説明した。座屈試験の加力位置について意見交換がなされた。続いて、杉本課題担当者より、「6層6プライの付加ラミナ20mm厚の試験体において、縦弾性係数 E_{fr} とその試験で求めたヤング係数、縦圧縮ヤング係数 E_c との比はほぼ1であった。5層6プライの弱軸で25mm厚の付加プライをつけたものだけ、0.85と低った。」と説明があり、野田課題担当者より、試験体のひずみの挙動について補足説明があった。続いて、中島(昌)課題担当者が、実大水平面内せん断実験について、「実験から得られたせん断強度は、6層6プライが6.56、強軸が3.56、弱軸が3.58と、面ほぼ同じ値になった。5層5プライと比べて5層6プライの方が小さくなった。」と説明した。続いて、せん断試験について、榎本課題担当者より、「5層5プライのラミナ厚30mmは一昨年度もやっていて、そのときの ϵ は大体平均で3.2、標準が0.3だったので、小さいようである。」との説明があった。渡部課題担当者が、「大野式の3等分点の载荷になりますので、 P_{max} の値に対して1/2を掛けて、全断面の面積で除してせん断強度を算出した。破壊モードは、ローリングシアアの破壊と荷重点の下にフィンガージョイントまたは節があった場合に曲げで破壊しているものも見られた。」と補足説明した。続いて、井道課題担当者が、引っ張り性能について、「5層5プライの基本となる試験体では、厚さ面、幅面とも同じようなひずみであった。5層5プライ非対称では、ひずみが余り変わらない、明確な違いがないという結果だった。6層6プライも似たような結果であった。」と説明した。「外だけ引っ張られて、中のせん断変形が入って、中は上手く引っ張られてないということはないか。」と質問があった。続いて、園田課題担当者より、層内せん断試験に基づく直交層挙動の解明について、「見かけの曲げ剛性は、曲げ振動法の一次からラミナが引っ張り側についているときのものと一致する。縦振動法にすると、ラミナの剛性、ヤング率が大体評価できるとことが確認できた。非対称で直交層をつけた場合に、その直交層が破壊の起点となる可能性があり、強度が下がるケースもあるということが分かった。」との説明があった。続いて、長期性能試験の試験体について、宮武主査より、「7層7プライでMx60、外層用M60内層用M30、樹種はスギ、ラミナの断面寸法は厚さ30mm、幅105mmである。接着剤は、たて継ぎ、積層ともにイソシアネート、フィンがジョイントは垂直型である。」との説明があった。続いて、渋谷課題担当者が、「5層5プライについては、建研の結果と大体同じような傾向となった。7層7プライには2年弱かかっても破断しないものがあった。また、加力の過程で、初期変形が出る過程でそのまま破断したものもあった。」と説明した。初期で破壊した試験結果の取扱いについて議論があった。その後、全体についての質疑応答が行われた。谷内アドバイザーより、岩手県で実施しているアカマツCLTについての情報提供があった。報告書の原稿締め切りを2月25日とすることが決められ、閉会した。

4-18-03-076 H30 CLT強度データ 試験体採材図
製造番号 強度データ1 スギ Mx60A 5-5 125×2100×9345 : 1枚

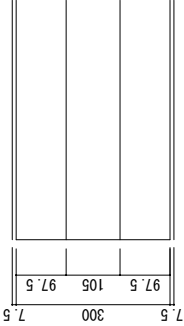


試験体名称
例 H-5L5P-D0L-1
↑ 曲げクリープ試験のNo1を示す
↑ QLTの層構成: 5層5プライを示す
↑ 納入先: 広島総研を示す

送り先	A	北林産試 (旭川)	北海道旭川市
	S	森林総研	茨城県つくば市
	U	宇都宮大	栃木県宇都宮市
	H	広島総研	広島県三次市

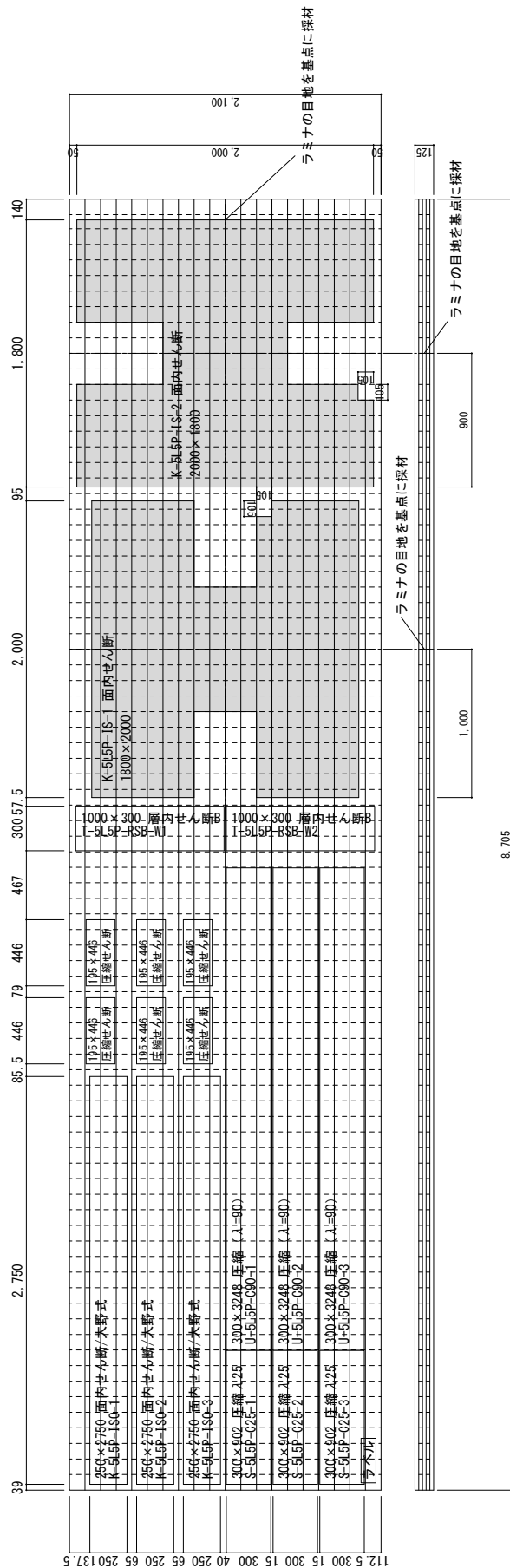
試験記号	D0L	曲げクリープ	055	圧縮 (λ=55)
	0B	面外曲げ	T	引張
	OSJ	面外せん断 (JAS)		
	OSJ7	面外せん断_7倍		

※試験体採材時の目地目途



件名	H30_CLT強度データ試験体	No 1 / 13
図面名称	試験体採材図	
銘建工業株式会社	作図 渡部	2019.1.23

4-18-03-076 H30 CLT強度デ一タ試験体採材図
製造番号 強度デ一タ-2 スギ Mx60A 5-5 125×2100×8705 : 1枚



試験体名称
例 H-5L5P-D0L-1
↑ 納入先：広島総研を示す
↑ QLTの層構成：5層5プライを示す
↑ 曲げクリープ試験のNo1を示す

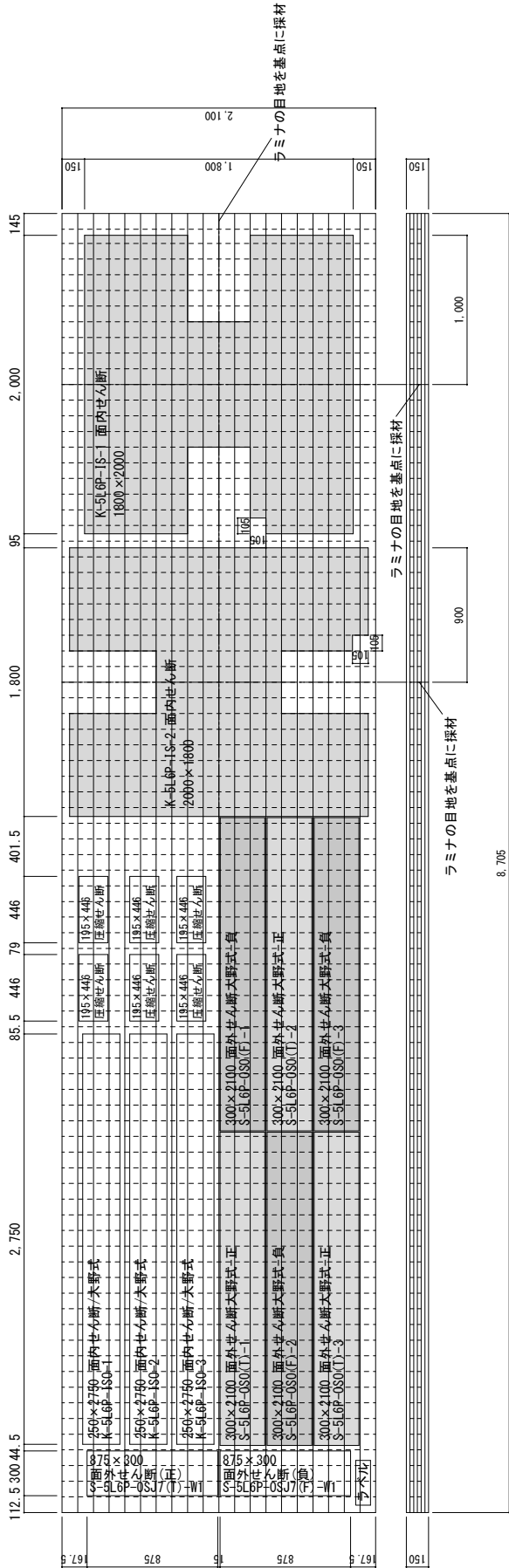
S	森総研	茨城県つくば市
T	富山木研	富山県射水市
K	建築研究所	茨城県つくば市
U	宇都宮大	栃木県宇都宮市

試験記号	IS	面内せん断	C25	圧縮 ($\lambda = 25$)
	ISO	面内せん断(大野式)	C90	圧縮 ($\lambda = 90$)
	RSB	層内せん断B		

※試験体採材時の目的地

件名	H30_CLT強度デ一夕試験体	No 2 / 13
図面名称	試験体採材図	
銘建工業株式会社 作図 渡部		2019.1.23

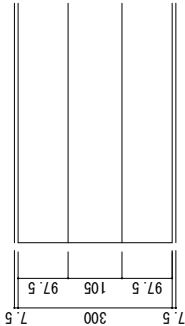
4-18-03-076 H30 CLT強度データ 試験体採材図
製造番号 強度データ-3 スギ Mx60A 5-6 150×2100×8705 : 1枚



試験体名称
例 H-5L6P-DOL-1
↑ 曲げクリープ試験のNo1を示す
↑ CLTの構成・5層6プライを示す
↑ 納入先：広島総研を示す

送り先	S	森林総研	茨城県つくば市
	K	建築研究所	茨城県つくば市

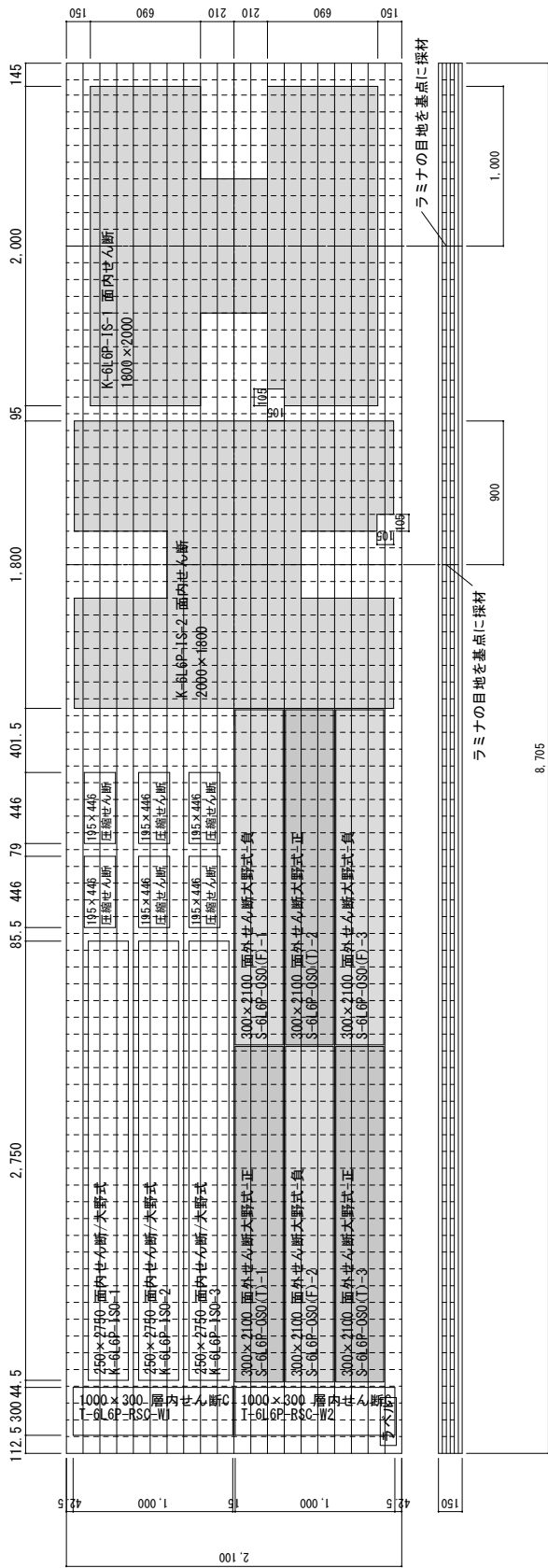
試験記号	IS	面内せん断	OSJ7(T)	面外せん断7倍(正)
	ISO	面内せん断(大野式)	OSJ7(F)	面外せん断7倍(負)
	OS0(T)	面外せん断(大野式・正)		
	OS0(F)	面外せん断(大野式・負)		



※試験体採材時の目地目途

件名	H30_CLT強度データ試験体	No 3 / 13
図面名称	試験体採材図	
銘建工業株式会社	作図 渡部	2019.1.23

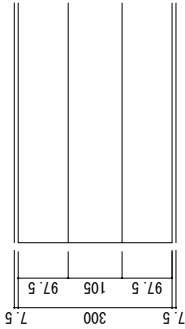
4-18-03-076 H30 CLT強度データ 試験体採材図
製造番号 強度データ-4 スギ Mx60A 6-6 150×2100×8705 : 1枚



試験体名称
例 H-T125-D0L-1
↑ 曲げクリープ試験のNo1を示す
↑ CLTの厚み: 125mmを示す
↑ 納入先: 広島総研を示す

送り先		富山木研	富山県射水市
		森林総研	茨城県つくば市
		建築研究所	茨城県つくば市

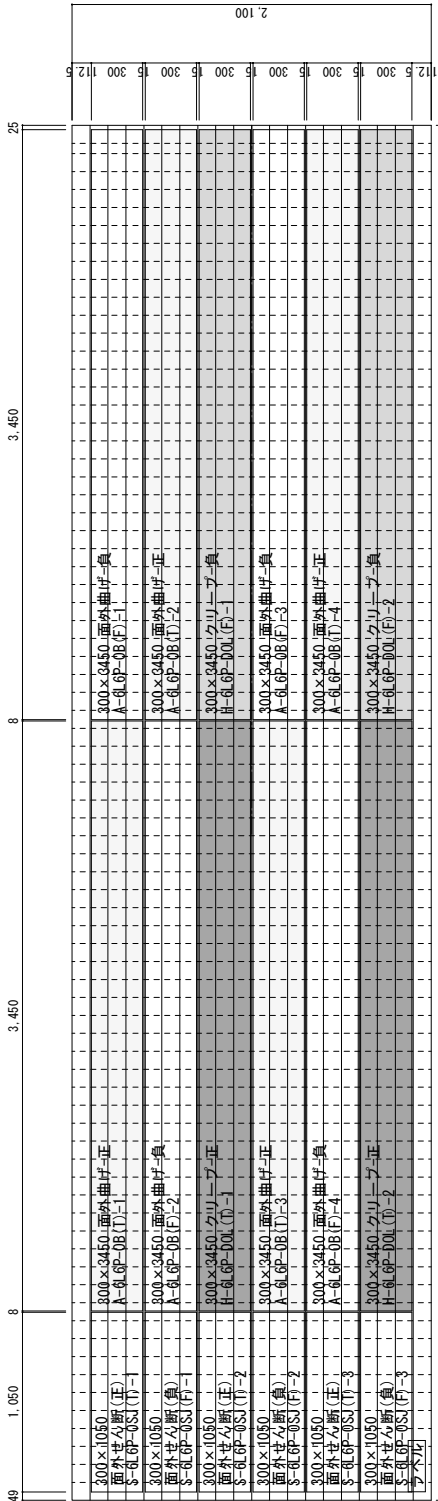
試験記号		面内せん断	OS0 (T)	面外せん断 (大野式・正)
		面内せん断 (大野式)	OS0 (F)	面外せん断 (大野式・負)
		層内せん断C		



※試験体採材時の目地目途

件名	H30_CLT強度データ試験体	No 4 / 13
図面名称	試験体採材図	
銘建工業株式会社	作図 渡部	2019. 1. 23

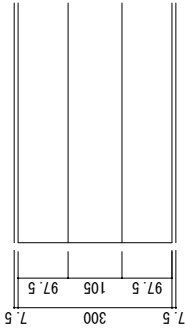
4-18-03-076 H30 CLT強度データ 試験体採材図
製造番号 強度データ-5 スギ Mx60A 6-6 150×2100×8040 : 1枚



試験体名称
例 H-T125-D0L-1
↑ 曲げクリープ試験のNo1を示す
↑ QLTの厚み: 125mmを示す
↑ 納入先: 広島総研を示す

送り先	H	広島総研	広島県三次市
	S	森林総研	茨城県つくば市
	A	北林産試	北海道旭川市

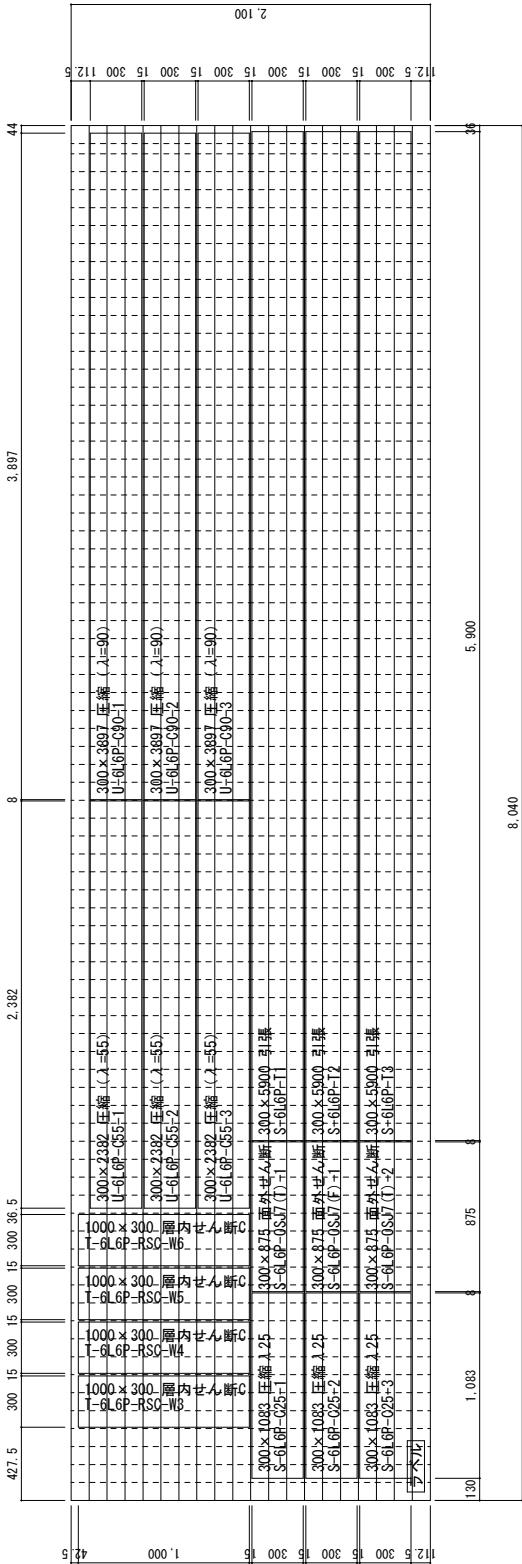
試験記号	OB (T)	面外曲げ (正)	OSJ (T)	面外せん断 (JAS式・正)
	OB (F)	面外曲げ (負)	OSJ (F)	面外せん断 (JAS式・負)
	D0L (T)	クリープ (正)		
	D0L (F)	クリープ (負)		



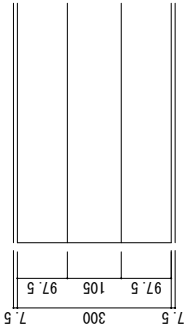
※試験体採材時の目地目途

件名	H30_CLT強度データ試験体	No 5 / 13
図面名称	試験体採材図	
銘建工業株式会社	作図 渡部	2019.1.23

4-18-03-076 H30 CLT強度データ 試験体採材図
製造番号 強度データ-6 スギ Mx60A 6-6 150×2100×8040 : 1枚



試験体名称
例 H-T125-D0L-1
↑ 曲げクリープ試験のNo1を示す
↑ CLTの厚み: 125mmを示す
納入先: 広島総研を示す



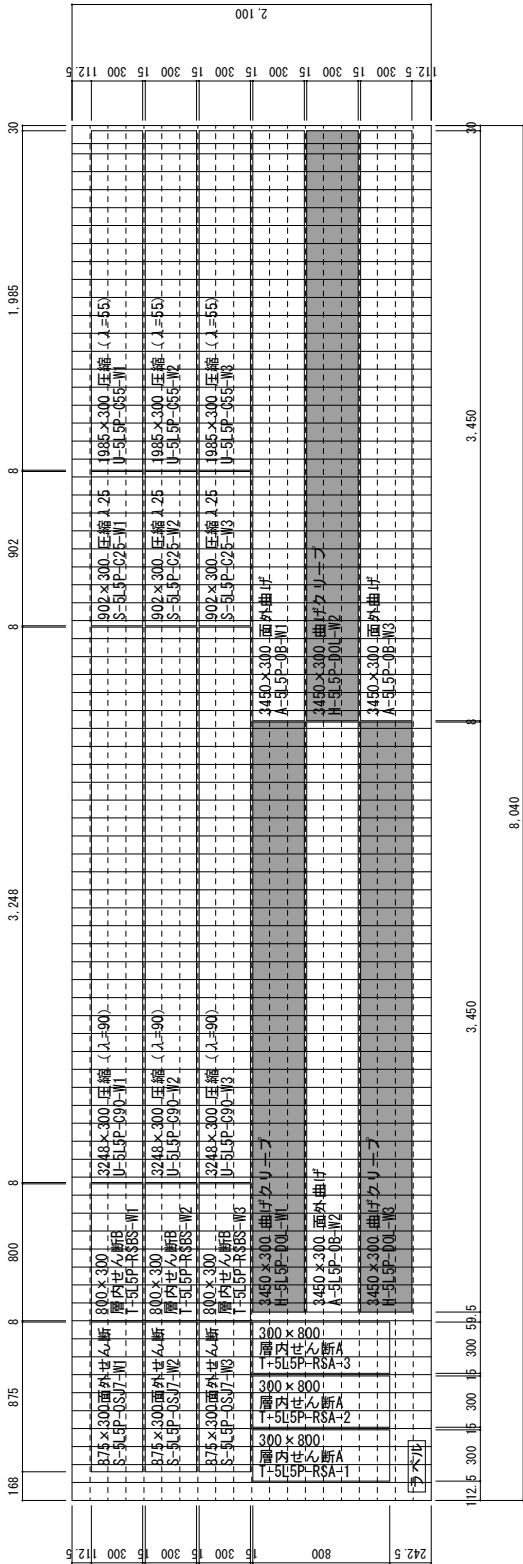
送り先	T	富山本研	富山県射水市
	S	森林総研	茨城県つくば市
	U	宇都宮大	栃木県宇都宮市

試験記号	T	引張	C25	圧縮 (λ=25)
	RSC	層内せん断C	C55	圧縮 (λ=55)
	OSJ7 (T)	面外せん断7倍 (正)	C90	圧縮 (λ=90)
	OSJ7 (F)	面外せん断7倍 (負)		

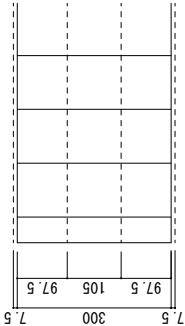
※試験体採材時の目地目途

件名	H30_CLT強度データ試験体	No 6 / 13
図面名称	試験体採材図	
銘建工業株式会社	作図 渡部	2019.1.23

4-18-03-076 H30 CLT強度データ 試験体採材図
製造番号 強度データ-7 スギ Mx60A 5-5 125×8040×2100：1枚



試験体名称
例 H-5L5P-D0L-1
↑ 曲げクリーブ試験のNo.1を示す
↑ CLTの層構成：5層5プライを示す
納入先：広島総研を示す



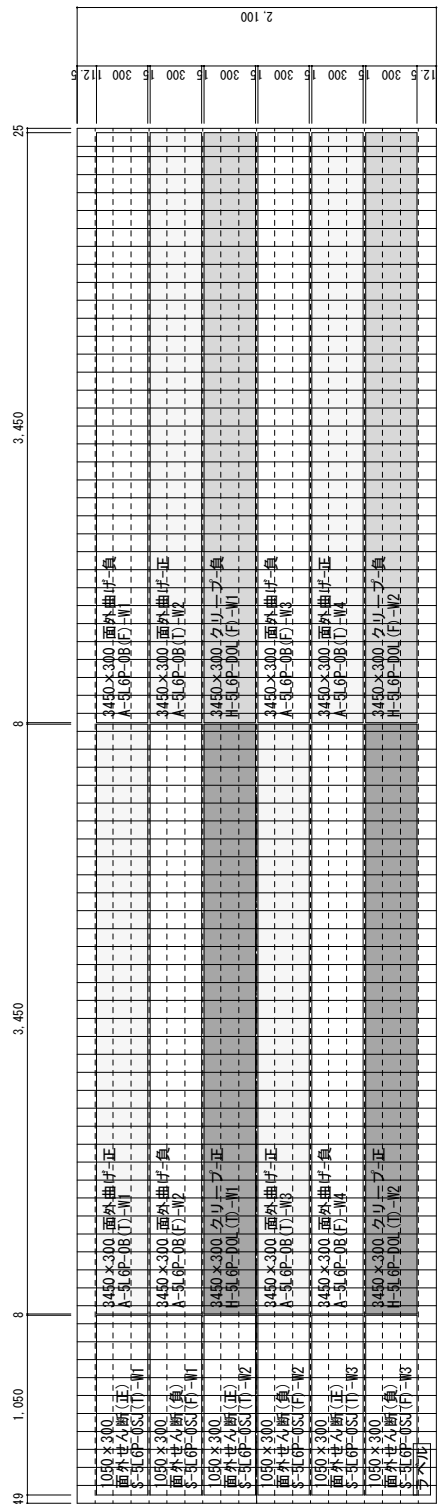
※試験体採材時の目地目途

送り先	A	北林産試（旭川）	北海道旭川市
	S	森林総研	茨城県つくば市
	U	宇都宮大	栃木県宇都宮市
	H	広島総研	広島県三次市
	T	富山木研	富山県射水市

試験記号	D0L	曲げクリーブ	C25	圧縮 (λ=25)
	0B	面外曲げ	C55	圧縮 (λ=55)
	0SJ7	面外せん断_7倍	C90	圧縮 (λ=90)
	RSA	層内せん断A		
	RSBS	層内せん断B		

件名	H30_CLT強度データ試験体	No. 7 / 13
図面名称	試験体採材図	
銘建工業株式会社	作図 渡部	2019.1.23

4-18-03-076 H30_CLT強度デ一タ 試験体採材図
製造番号 強度デ一タ-8 スギ Mx60A 5-6 150×8040×2100 : 1枚



8,040

試験体名称

例 H-T125-D0L-1

↑曲げクリープ試験のNo1を示す

—QLTの厚み: 125mmを示す

納入先：広島総研を示す

納入先：広島総研を示す

送り先

H	広島総研	広島県三次市
S	森林総研	茨城県つくば市
A	北林産試	北海道旭川市

試験記号

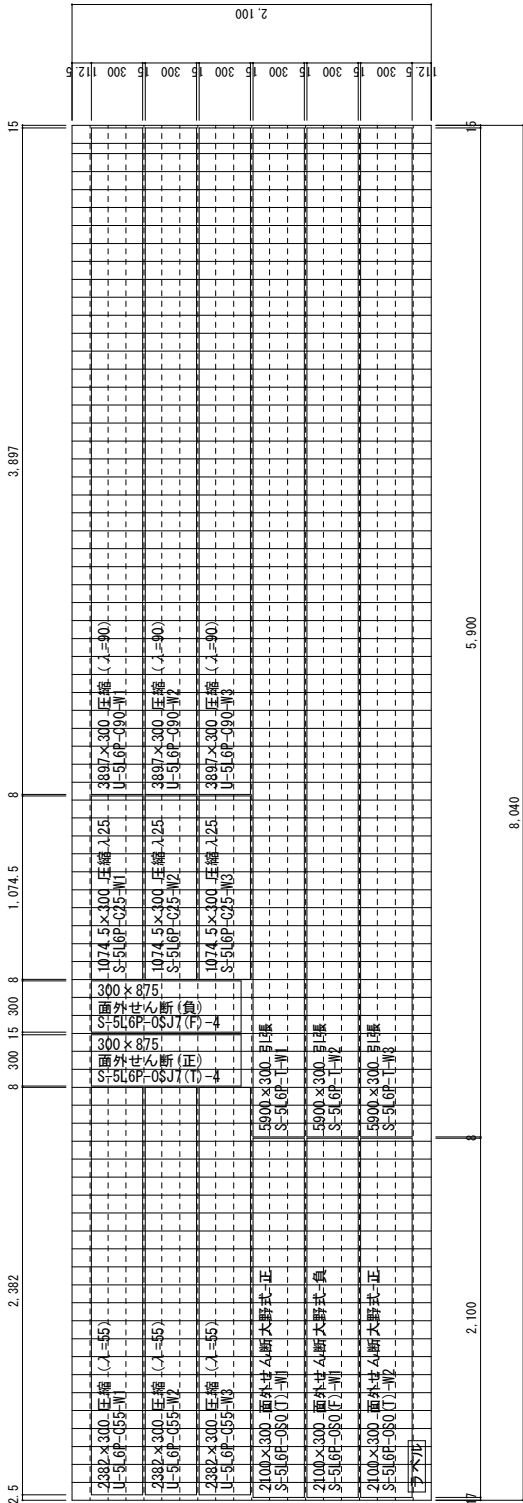
OB (T)	面外曲げ (正)	OSJ (T)	面外せん断 (JAS式・正)
OB (F)	面外曲げ (負)	OSJ (F)	面外せん断 (JAS式・負)
DOL (T)	クリーブ (正)		
DOL (F)	クリーブ (負)		

※試験体採材時の目地目途

A blank 5x5 grid for drawing a 5-sided polygon. The grid is labeled with numbers 5, 300, 97.5, and 7.5 along the bottom edge.

件名	H30_CLT強度予一タ試験体	No 8 / 13
図面名称	試験体採材図	
銘建工業株式会社 作図 渡部		2019.1.23

4-18-03-076 H30 CLT強度データ 試験体採材図
製造番号 強度データ-9 スギ Mx60A 5-6 150×8040×2100：1枚

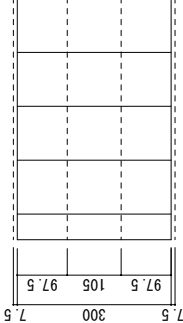


試験体名称
例 H-5LP-DOL-1
↑ 曲げクリープ試験のNo.1を示す
↑ CLTの構成：5層6プライを示す
納入先：広島総研を示す

送り先	S	森林総研	茨城県つくば市
	U	宇都宮大	栃木県宇都宮市

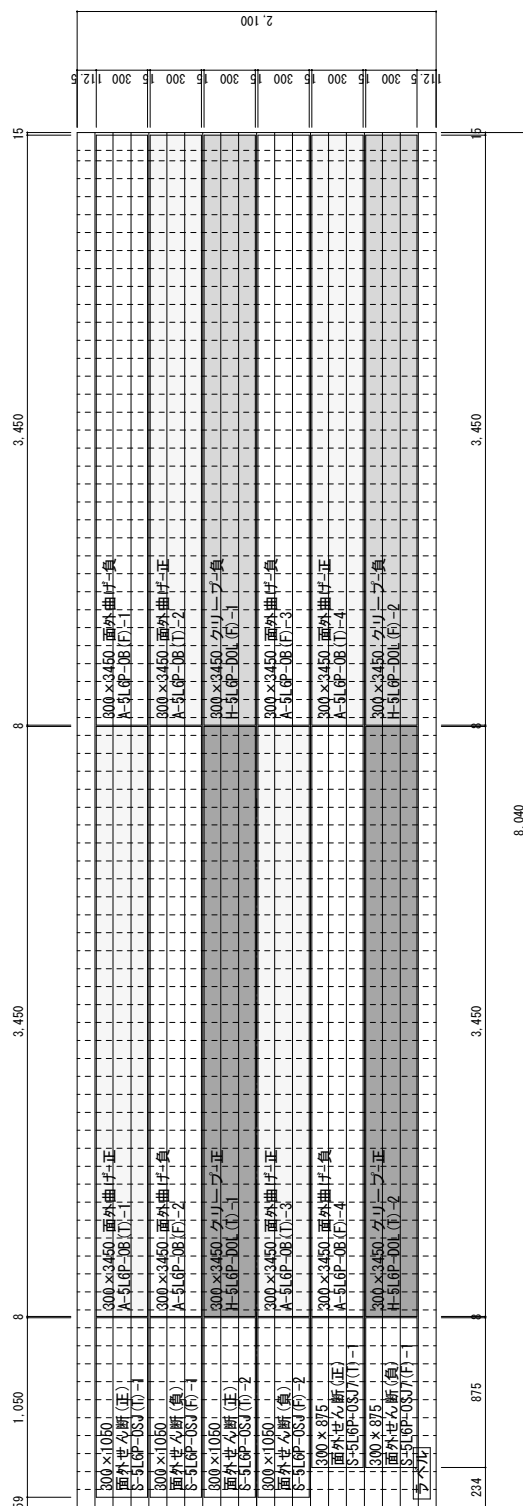
試験記号	OS0 (T)	面外せん断 (大野式・正)	C25	圧縮 (λ=25)
	OS0 (F)	面外せん断 (大野式・負)	C55	圧縮 (λ=55)
	OSJ7 (T)	面外せん断7倍 (正)	C90	圧縮 (λ=90)
	OSJ7 (F)	面外せん断7倍 (負)	T	引張

※試験体採材時の目地目途



件名	H30_CLT強度データ試験体	No 9 / 13
図面名称	試験体採材図	
銘建工業株式会社	作図 渡部	2019.1.23

4-18-03-076 H30 CLT強度デ一タ 試験体採材図
製造番号 強度デ一タ-10 スギ Mx60A 5-6 150×2100×8040 : 1枚



試験体名称

例 H-T125-DOL-1

↑ 曲げクリープ試験のNo1を示す
↑ QLTの厚み：125mmを示す
↑ 納入先：広島総研を示す

H	広島総研	広島県三次市
S	森林総研	茨城県つくば市
A	北林産試	北海道旭川市

試験記号	OB (T)	面外曲げ (正)	OSJ (T)	面外せん断 (JAS式・正)
	OB (F)	面外曲げ (負)	OSJ (F)	面外せん断 (JAS式・負)
	DOL (T)	クリープ (正)	OSJ7 (T)	面外せん断 (7倍・正)
	DOL (F)	クリープ (負)	OSJ7 (F)	面外せん断 (7倍・負)

※試験体採材時の目的地用途

件名	H30_CLT強度デ一夕試験体	No 10/ 13
図面名称	試験体採材図	
銘建工業株式会社 作図 渡部		2019.1.23

4-18-03-076 H30 CLT強度デ一タ
製造番号 強度デ一タ-11 スギ Mx60A 5-6 150 × 2100 × 8040 : 1枚

[illegible]

試験体名称

例 H-5L6P-DOL-1

納入先：広島総研を示す
 QTIの構成：5層6プライを示す
 曲げクリープ試験のNo1を示す

U	宇都宮大	栃木県宇都宮市
S	森林総研	茨城県つくば市

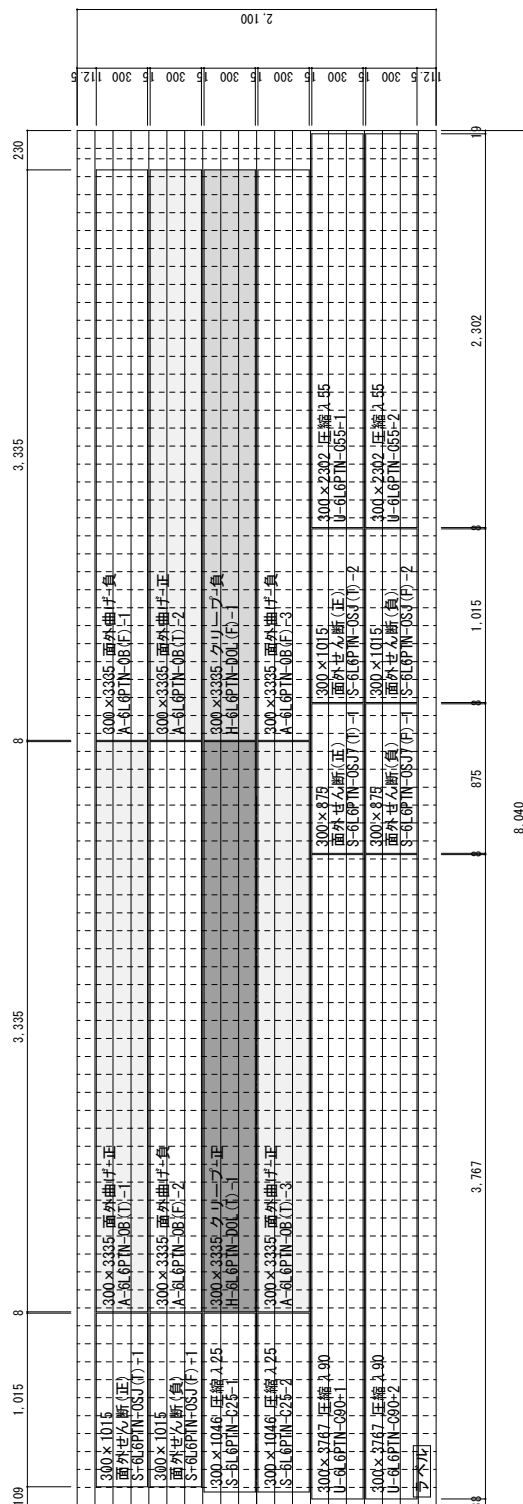
試験記号

OSJ7(T)	面外せゝ断7倍(正)	C25	圧縮($\lambda=25$)
OSJ7(F)	面外せゝ断7倍(負)	C55	圧縮($\lambda=55$)
T	引張	C90	圧縮($\lambda=90$)

※試験体採材時の目的地用途

件名	H30_CLT強度デ一夕試験体	No 11 / 13
図面名称	試験体採材図	
銘建工業株式会社 作図 渡部 2019.1.23		

4-18-03-076 H30_CLT強度データ 試験体採材図
製造番号 H30強度-12 スギ Mx60A 6-6 145×2100×8040:1枚



試験体名称

例 H-T125-DOL-1

曲げクリープ試験のNo1を示す

CLTの厚み: 125mmを示す

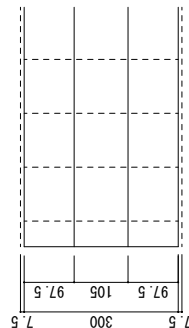
納入先：広島総研を示す

送り先	A	北林産試	北海道旭川市
	S	森林総研	茨城県つくば市
	U	宇都宮大	栃木県宇都宮市
	H	広島総研	広島県三次市

試験記号

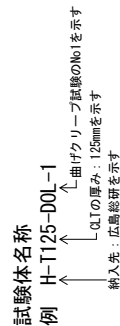
OB (T)	面外曲げ(正)		DOL (T)	クリープ(正)
OB (F)	面外曲げ(負)		DOL (F)	クリープ(負)
OSJ (T)	面外せん断(正)		C25	圧縮 ($\lambda=25$)
OSJ (F)	面外せん断(負)		C55	圧縮 ($\lambda=55$)
OSJ7 (T)	面外せん断7倍(正)		C90	圧縮 ($\lambda=90$)
OSJ7 (F)	面外せん断7倍(負)			

※試験体採材時の目的地・用途



件名	H30_CLT強度デ一夕試験体	No 12/ 13
図面名称	試験体採材図	
銘建工業株式会社 作図 渡部		2019.1.23

製造番号 強度 13 ター 145 × 8040 × 2100 : 1枚



試験記号	08 (T)	面外曲げ (正)	DOL (T)	クリープ (正)
	08 (F)	面外曲げ (負)	DOL (F)	クリープ (負)
	08J (T)	面外せん断 (正)	025	圧縮 ($\lambda = 25$)
	08J (F)	面外せん断 (負)	055	圧縮 ($\lambda = 55$)
	08J7 (T)	面外せん断7倍 (正)	090	圧縮 ($\lambda = 90$)
	08J7 (F)	面外せん断7倍 (負)		

※試験体採材時の目地目途

件名	H30_CLT強度デ一夕試験体	No 13 / 13
図面名称	試験体採材図	
銘建工業株式会社 作図 渡部		2019. 1. 23