

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

平成29年3月

国立研究開発法人 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

公立大学法人 秋田県立大学

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 25 年 12 月には近年開発された新しい木質材料としては異例の速さで「直交集成板の日本農林規格（JAS 規格）」も制定され、また、CLT を一般的な建築材料として普及するために制定が急がれてきた建築関係基準等も平成 28 年度早期に制定された。

しかしながら、CLT は強度異方性を持つひき板をさらにその繊維方向を直交させながら積層接着した材料で、荷重の種類やそれが材料に加えられる面や方向の組合せによって異なるその複雑な力学的挙動が十分に明らかになっていないわけではない。そのため、JAS 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のなかでは除外されている製品仕様も多い。この状況を踏まえ、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、基準の整備等への活用を提案するために本事業を計画した。

平成 28 年度早期に制定された建築関係基準（以下基準と記す）によれば、強度試験データが不足しているために「直交集成板の日本農林規格」（以下 JAS 規格と記す）の適用範囲でありながら、適用の範囲外として扱われている製品仕様がある。また、早急なデータ整備を行う観点で標準的な製品仕様を対象としてきたため試験データの整備が十分行われていない項目もある。これらの課題を下記に記す。

① ラミナ厚さ

基準では 24 mm～36mm（基準強度については 12mm～36mm）となっており、JAS 規格の適用範囲からは 12mm～24mm と 36 mm～50mm が適用除外となっている。ラミナ厚さの適用範囲を広くすることは、製品製造における汎用性・効率性の向上をもたらす可能性があり、検討する必要がある。

② 小角材等を幅はぎ接着したラミナの使用

CLT に用いるラミナの幅については、CLT 製品の層内せん断強度確保の観点から弱軸にあつてはラミナ厚さの 3.5 倍、強軸にあつては 1.75 倍以上とする必要がある。例えば、50mm 厚ラミナの場合その幅を 175mm 以上とする必要があるが、このことは原材料となる原木丸太や製材ひき板の供給において制限となる可能性が高い。幅の広いラミナ供給を幅はぎ加工により確保する技術について、①と合わせて検討する必要がある。

③ 樹種

JAS 規格の適用範囲は国内外産の針葉樹 28 樹種となっているが、基準案ではスギを基準としてこれと同等以上であることが確認できたものをスギ同等の性能として扱う大系である。今後、基準法の適用範囲をスギ以外の樹種にも拡大する必要があるが、そのためには、積層方向のせん断（いわゆる層内せん断、もしくはローリングシアの強度）と幅方向のせん断（いわゆる面内せん断）および長期的性能に関するデータ収集を行っていく必要がある。

④ 層構成

基準案では強軸 2 種類、弱軸 3 種類の層構成のみが適用範囲となっている。この適用範囲の拡大に必要であると考えられる長期的性能についてはその評価に長時間を要することから、現在の進行中の試験評価を継続するとともに、その結果の評価等についてさらに検討する必要がある。また、短期的強度にあつても試験体の製造上の制約から検討が十分で

ない性能項目があり、引き続き検討する必要がある。

これらの問題点を解決するために下記の課題をたてて、実験を通してデータ収集を図った。

（１）厚いラミナおよび小角材等を幅はぎ接着したラミナの使用が各種強度性能に及ぼす影響の解明

厚さが 35mm を超えるラミナ（必要に応じて幅はぎ接着したラミナを用いる）を用いた CLT パネルを製造し各種強度試験を実施する。強度等級は Mx60 とし、層構成は 3 層 3 プライから 7 層 7 プライ以上とする。強度試験の種類は、JAS 規格に規定する面外曲げ性能と面外せん断性能とする。

面外曲げ性能については、広島県立総合技術研究所林業技術センター、鹿児島県工業技術センターが、また、面外せん断性能については、森林総合研究所が実施した。

（２）樹種の影響を解明するための基礎的物性値のデータ収集

CLT における直交層挙動の解析については富山県農林水産総合技術センター木材研究所、CLT の積層方向のせん断性能（いわゆる層内せん断、もしくは面外せん断の強度）と原料ラミナの物性値については、建築研究所、宇都宮大学、森林総合研究所において実施した。

（３）層構成の影響の解明

長期性能評価については、森林総合研究所で 7 層 7 プライの継続的なデータ収集を図った。圧縮における短柱・中間柱・長柱の範囲の確認については、建築研究所、森林総合研究所で実施した。引張り性能については森林総合研究所、面内せん断性能については建築研究所、宇都宮大学、面内曲げ性能については、秋田県立大学木材高度加工研究所、森林総合研究所がそれぞれ実施した。

最後に、複雑で大量の試験体を作製していただいた日本 CLT 協会の製造メーカーの方々に感謝申し上げます。

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

目 次

はじめに

1. 厚いラミナ（小角材等を幅はぎ接着したラミナを含む）の使用が 面外曲げおよび面外せん断性能に及ぼす影響の解明	1
1.1 試験体	1
1.2 面外曲げ性能	19
1.2.1 厚いラミナ（小角材等を幅はぎ接着したラミナを含む）を使用した場合	19
1.2.2 薄いラミナを使用した場合	30
1.3 面外せん断性能	41
2. 基礎的物性値のデータ収集	60
2.1 CLT における直交層挙動の解析	60
2.2 試験評価法に関する検討	83
2.2.1 対称 4 点曲げ試験	83
2.2.2 繊維直交方向のせん断試験	88
2.2.3 圧縮せん断試験	94
3. 層構成	99
3.1 長期性能評価	99
3.2 圧縮における短柱・中間柱・長柱の範囲確認	104
3.3 引張り	126
3.4 面内せん断性能	142
3.5 面内曲げ	147
4. まとめ	162

付録

第 1 回推進委員会議事録	164
第 2 回推進委員会議事録	168
現地検討会概要	172
試験体採材図	174
データ集	194

1. 厚いラミナ（小角材等を幅はぎ接着したラミナを含む）の使用が面外曲げおよび面外せん断性能に及ぼす影響の解明

1.1 試験体

1 章において試験に用いた CLT パネルは、以下の条件により製造した。

1.1.1 試験体の概要

1 章において試験に用いた CLT パネルの仕様を表 1.1.1-1 に示す。これらのパネルから面外曲げ試験体および面外せん断試験体を所定量切り出した。

パネルの製造に用いたラミナは、ラミナ厚①20mm 用、②30mm 用、③38.57mm 用と 42mm 用、④45mm 用の 4 種類であった。それぞれ必要量を予め計算し、製材・乾燥された原料ひき板を連続しグレーディングマシンを用いて測定した曲げヤング係数を用いて外層用ひき板と内層用ひき板に区分した。いずれのラミナも 1m 前後の長さに裁断した後、フィンガージョイントにより 4m 長さにたて継ぎした。

ラミナ厚が 30mm を超える③及び④については、4m たて継ぎ材を幅はぎ接着した後、仕上げ幅が 175mm になるよう裁断した。フィンガー長さは 15mm、垂直型、接着剤には水性高分子イソシアネート系樹脂を用いた（1.1.2a における‘BS’）。パネル製作上 6 m 長さのラミナが必要なものにあつては、さらにこの幅はぎ接着ラミナをたて継ぎして用いた。こちらのフィンガー長さは 20mm、垂直型、接着剤にはレゾルシノール・フェノール供縮合樹脂を用いた（1.1.2a における‘BL’）。

①～④の 4 種類ラミナについて、それぞれ外層用ラミナと内層用ラミナ計 8 種類、たて継ぎ部を中央付近に配した試験体を各 30 枚採取し、曲げ試験を行った。

これらのラミナを水性高分子イソシアネート系樹脂を用いて積層接着し CLT パネルを製造した。これらのパネルからの試験体採材パターンについては付録に資料として示す。

表 1.1.1-1 試験体採取用 CLT パネルの概要

ラミナ厚 (mm)	ラミナ幅 (mm)	層構成	パネル厚 (mm)	パネル幅 (mm)	パネル長 (mm)	パネル 番号	パネル 枚数
20	105	5 層 5 プライ	100	2100	4030	20-2-1	1
				4030	2100	20-3-1	1
		7 層 7 プライ	140	2100	6030	20-5-1	1
				6300	2100	20-6-1	1
		9 層 9 プライ	180	2100	6030	20-8	1
				6300	2100	20-9	1
30	105	3 層 3 プライ	90	2100	4030	30-1-1	1
				4030	2100	30-2-1	1
		9 層 9 プライ	270	2100	6030	30-6	1
				6030	2100	30-7	1
38.57	175	7 層 7 プライ	270	2100	6030	38-1	1
				6030	2100	38-2	1
42	175	5 層 5 プライ	210	2100	6030	42-1	1
				6030	2100	42-2	1
45	175	3 層 3 プライ	135	2100	4030	45B-1	1
				4030	2100	45B-2	1

1.1.2 試験体製造に用いたラミナの曲げ強度性能

a. 厚いラミナ（小角材等を幅はぎ接着したラミナを含む）

i) 試験体

試験体は、厚さが 42mm 及び 45mm である。中央でラミナをフィンガージョイント（以下 FJ）加工しているが、フィンガー長の長い試験体の名称を BL、フィンガー長の短い試験体の名称を BS とした。なお、試験体製作過程で BL には試験体製作過程でフィンガー長の短い FJ が存在しているものがある。

試験体の寸法を厚さが 42mm では、幅 175mm、長さ 966mm（厚さの 23 倍）、厚さが 45mm では、幅 105mm と 175mm、長さ 1035mm（厚さの 23 倍）とした。

ii) 動的試験

縦振動法による縦振動ヤング係数の測定を行った。

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。

$$E_{fr} = (2fl)^2 \rho \quad (1.1.2a-1)$$

E_{fr} : 縦振動ヤング係数

f : 固有振動数

l : 材長

ρ : 密度

iii) 静的曲げ試験

スギラミナ曲げ試験は、JAS 規格による試験方法で、支点間距離を厚さの 21 倍（882mm または 945mm）、モーメント一定区間を厚さの 7 倍（294mm または 945mm）の 3 等分点 4 点荷重方式で載荷した。支点間スパンにおける中央変形量を測定した。

iv) 結果

非破壊検査と静的曲げヤング係数

厚さ 42mm ラミナの非破壊検査の縦振動ヤング係数と曲げヤング係数の関係を図 1.1.2a-1 に、厚さ 45mm ラミナを図 1.1.2a-2 に示す。

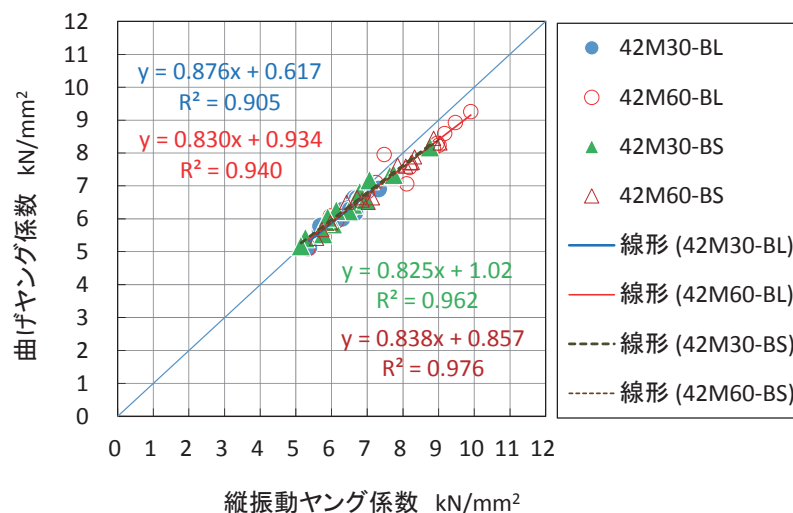


図 1.1.2a-1 厚 42mm ラミナ縦振動法ヤング係数と曲げヤング係数の関係

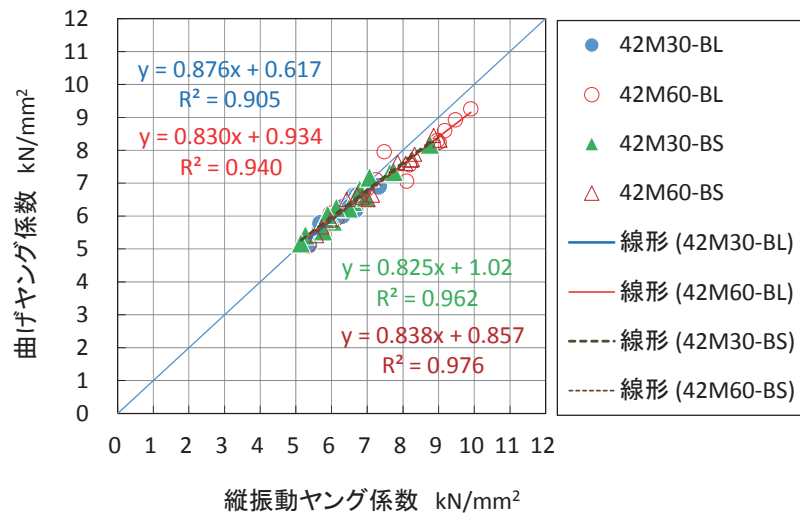


図 1.1.2a-2 厚 45mm ラミナ縦振動法ヤング係数と曲げヤング係数の関係

厚さ 42mm、45mm とも M30 の BL、BS 及び M60 の BL、BS において、ほぼ同じ傾きと切片の近似直線となった。

静的曲げ試験

厚 42mm ラミナ 4 仕様の曲げ試験結果を表 1.1.2a-1 に、厚 45mm ラミナを表 1.1.2a-2 に、厚 42mm ラミナの曲げヤング係数と曲げ強度の関係を図 1.1.2a-3 に、厚 45mm ラミナを図 1.1.2a-4 に示す。

厚 42mm ラミナの 42M30-BL は曲げヤング係数の変動係数が、42M30-BS は曲げ強度の変動係数が小さかったが、42M60 では BL、BS とも曲げ強度、曲げヤング係数とも変動係数が大きかった。

厚 45mm ラミナの 45M30-BL は曲げ強度の変動係数が、42M30-BS は曲げヤング係数の変動係数が小さかったが、45M60 では BL、BS とも曲げ強度の変動係数が大きかった。

破壊形態は、どのタイプもほとんどが FJ の破壊であった。

表 1.1.2a-1 ラミナ曲げ試験結果

試験体仕様	種別	ρ_{test} kg/m ³	δ_{max} mm	σ_b N/mm ²	E_m kN/mm ²	σ_{bp} N/mm ²	δ_p mm	W kNmm	E_{fr} kN/mm ²
42M30-BL									
n = 15	MIN	368	16.8	24.8	5.12	24.4	14.9	75.8	5.37
	AV	393	19.6	29.9	6.26	29.5	18.9	105.4	6.44
	MAX	427	24.4	37.1	6.91	37.1	23.8	167.5	7.33
	SD	15.6	2.55	4.15	0.47	4.01	2.47	28.4	0.51
	CV (%)	4.0	13.0	13.9	7.5	13.6	13.1	27.0	8.0
	TL _{75%,1-5%}			21.6					

試験体仕様	種別	ρ_{test} kg/m ³	δ_{max} mm	σ_b N/mm ²	E_m kN/mm ²	σ_{bp} N/mm ²	δ_p mm	W kNmm	E_{fr} kN/mm ²
42M30-BS									
n = 15	MIN	375	17.0	28.6	5.18	27.2	17.0	90.2	5.14
	AV	394	21.7	33.5	6.42	32.9	20.9	128.8	6.54
	MAX	418	29.4	37.2	8.18	37.0	24.3	222.7	8.76
	SD	12.6	2.94	2.67	0.83	2.89	2.17	29.6	0.99
	CV (%)	3.2	13.6	8.0	12.9	8.8	10.4	23.0	15.1
	TL _{75%,1-5%}			28.2					

試験体仕様	種別	ρ_{test} kg/m ³	δ_{max} mm	σ_b N/mm ²	E_m kN/mm ²	σ_{bp} N/mm ²	δ_p mm	W kNmm	E_{fr} kN/mm ²
42M60-BL									
n = 15	MIN	391	15.9	23.3	5.10	23.3	15.9	62.0	5.33
	AV	409	18.6	34.1	7.39	34.0	18.5	110.3	7.78
	MAX	433	21.6	46.3	9.27	46.3	21.6	164.6	9.90
	SD	13.8	1.63	6.53	1.26	6.60	1.60	26.6	1.47
	CV (%)	3.4	8.8	19.2	17.0	19.4	8.6	24.1	18.9
	TL _{75%,1-5%}			21.1					

試験体仕様	種別	ρ_{test} kg/m ³	δ_{max} mm	σ_b N/mm ²	E_m kN/mm ²	σ_{bp} N/mm ²	δ_p mm	W kNmm	E_{fr} kN/mm ²
42M60-BS									
n = 15	MIN	388	16.9	25.8	5.41	25.8	15.6	78.8	5.58
	AV	409	19.9	34.1	7.01	33.9	19.6	119.9	7.34
	MAX	446	24.1	46.0	8.45	46.0	24.1	193.8	9.05
	SD	14.44	1.82	5.96	0.96	5.99	2.10	33.3	1.13
	CV (%)	3.5	9.2	17.5	13.7	17.7	10.8	27.8	15.4
	TL _{75%,1-5%}			22.3					

※L:材長さ、b:幅、h:厚さ、 ρ_{test} :試験時密度、 δ_{max} :最大荷重時たわみ量、 σ_b :曲げ強度、
 E_m :見かけのヤング係数、 σ_{bp} :比例限度強度、 δ_p :比例限度たわみ量、
W:最大荷重までの仕事量、 E_{fr} :縦振動法によるヤング係数、
TL_{75%,1-5%}:信頼水準75%の95%下側許容限界値(正規分布あてはめ)

表 1.1.2a-2 ラミナ曲げ試験結果

試験体仕様	種別	ρ_{test} kg/m ³	δ_{max} mm	σ_b N/mm ²	E_m kN/mm ²	σ_{bp} N/mm ²	δ_p mm	W kNmm	E_{fr} kN/mm ²
45M30-BL									
n = 14	MIN	363	19.1	28.0	5.34	24.9	17.2	108.2	5.48
	AV	394	24.2	33.2	6.34	32.6	22.2	157.3	6.45
	MAX	450	41.1	39.8	8.68	39.8	28.3	306.5	9.15
	SD	22.1	5.49	3.61	0.81	4.39	3.13	50.9	0.89
	CV (%)	5.6	22.7	10.9	12.8	13.5	14.1	32.3	13.8
	TL _{75%,1-5%}			26.0					

試験体仕様	種別	ρ_{test} kg/m ³	δ_{max} mm	σ_b N/mm ²	E_m kN/mm ²	σ_{bp} N/mm ²	δ_p mm	W kNmm	E_{fr} kN/mm ²
45M30-BS									
n = 17	MIN	334	15.5	23.5	5.26	23.5	15.5	41.6	5.74
	AV	367	20.9	31.4	6.35	31.1	20.6	76.2	6.66
	MAX	432	27.9	45.4	7.81	45.4	27.4	131.7	8.06
	SD	28.2	3.22	6.04	0.66	6.18	3.29	26.2	0.64
	CV (%)	7.7	15.4	19.3	10.4	19.9	16.0	34.4	9.6
	TL _{75%,1-5%}			19.5					

試験体仕様	種別	ρ_{test} kg/m ³	δ_{max} mm	σ_b N/mm ²	E_m kN/mm ²	σ_{bp} N/mm ²	δ_p mm	W kNmm	E_{fr} kN/mm ²
45M60-BL									
n = 30	MIN	371	15.9	25.8	6.81	25.8	15.9	76.5	7.04
	AV	407	21.1	39.8	8.20	39.4	20.7	159.1	8.45
	MAX	446	24.8	56.7	11.20	56.7	24.8	247.9	11.68
	SD	17.9	2.27	6.85	1.04	6.74	2.16	41.7	1.09
	CV (%)	4.4	10.8	17.2	12.6	17.1	10.4	26.2	13.0
	TL _{75%,1-5%}			27.0					

試験体仕様	種別	ρ_{test} kg/m ³	δ_{max} mm	σ_b N/mm ²	E_m kN/mm ²	σ_{bp} N/mm ²	δ_p mm	W kNmm	E_{fr} kN/mm ²
45M60-BS									
n = 30	MIN	366	16.3	28.3	5.65	28.3	16.3	52.4	5.78
	AV	410	21.9	39.9	7.80	39.8	21.8	100.0	8.03
	MAX	442	26.6	51.9	9.27	51.9	26.6	153.4	9.74
	SD	19.65	2.85	6.03	0.82	6.03	2.81	26.2	0.84
	CV (%)	4.8	13.0	15.1	10.5	15.2	12.9	26.2	10.4
	TL _{75%,1-5%}			28.6					

※L:材長さ、b:幅、h:厚さ、 ρ_{test} :試験時密度、 δ_{max} :最大荷重時たわみ量、 σ_b :曲げ強度、
 E_m :見かけのヤング係数、 σ_{bp} :比例限度強度、 δ_p :比例限度たわみ量、
W:最大荷重までの仕事量、 E_{fr} :縦振動法によるヤング係数、
TL_{75%,1-5%}:信頼水準75%の95%下側許容限界値(正規分布あてはめ)

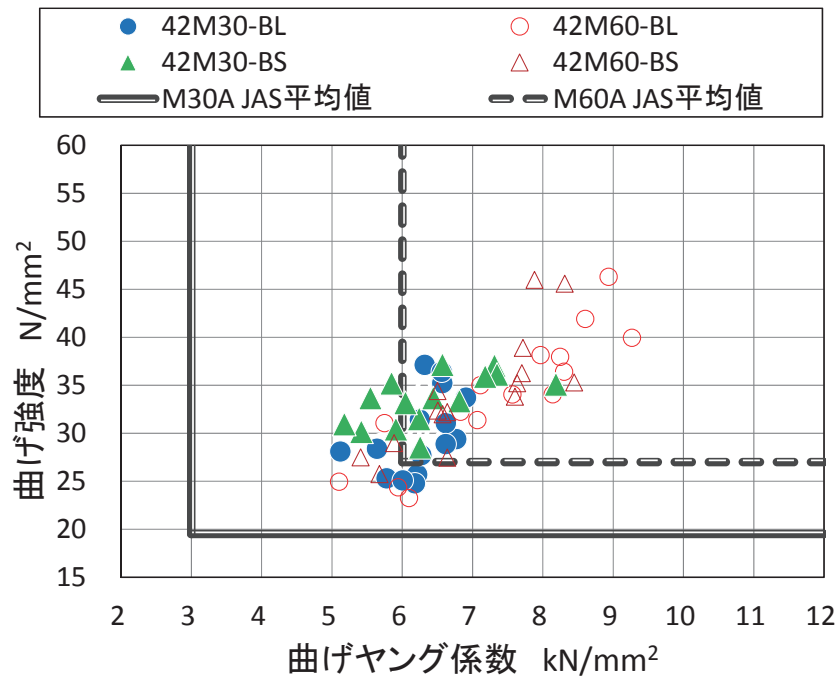


図 1.1.2a-3 厚 42mm ラミナ曲げヤング係数と曲げ強度の関係

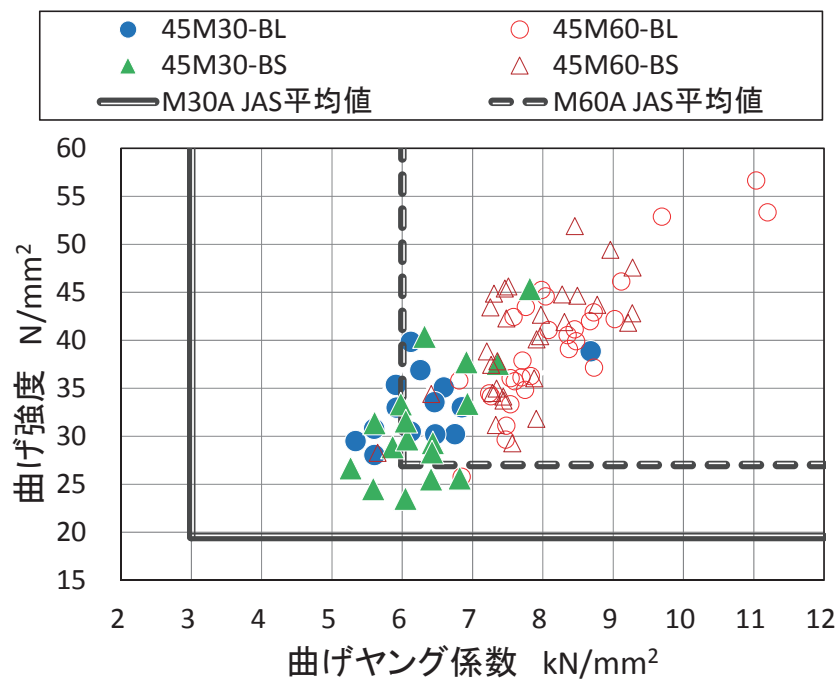


図 1.1.2a-4 厚 45mm ラミナ曲げヤング係数と曲げ強度の関係

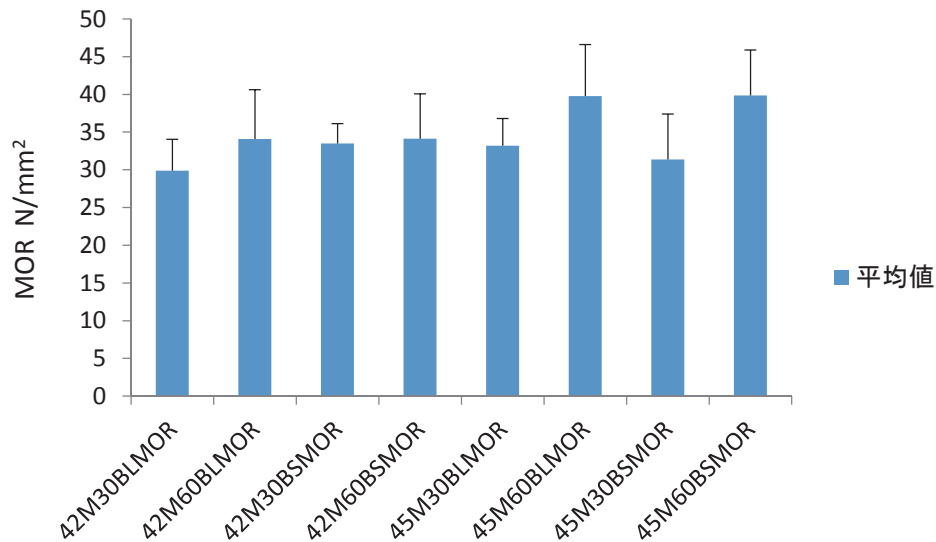


図 1.1.2a-5 曲げ強度(MOR)の平均値と標準偏差

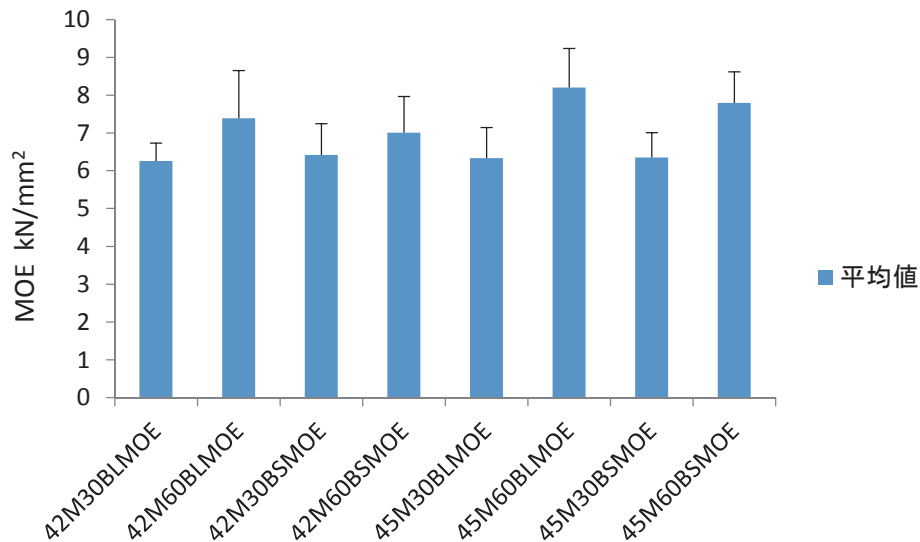


図 1.1.2a-6 曲げヤング係数(MOE)の平均値と標準偏差

図 1.1.2a-5 に厚 42mm ラミナ及び厚 45mm ラミナの曲げ強度 (MOR) 平均値と標準偏差を、図 1.1.2a-6 に曲げヤング係数 (MOE) 平均値と標準偏差を示す。厚 42mm ラミナ及び厚 45mm ラミナの曲げ強度と曲げヤング係数それぞれを Scheffé's method による多重比較をした。その結果、厚 42mm ラミナにおける比較では、曲げ強度は M30 の BL、BS 間、M60 の BL、BS 間で有意な差はなかった。曲げヤング係数は、M30 の BL、BS 間、M60 の BL、BS 間で有意な差はなかったが、42M30-BL と 42M60-BL、42M30-BS と 42M60-BL の間に危険率 5% で有意差があった。

厚 45mm ラミナにおける比較では、曲げ強度は M30 の BL、BS 間、M60 の BL、BS 間で有意な差はなかった。曲げヤング係数は、M30 の BL、BS 間、M60 の BL、BS 間で有意な差はなかったが、45M30-BL と 45M60-BL、45M30-BS と 42M60-BL、45M30-BL と 45M60-BS、45M30-BS と 42M60-BL の間に危険率 1% で有意差があった。

厚 42mm ラミナと厚 45mm ラミナとの比較では、曲げ強度において、厚さの違う M30 及び M60 の BL、M30 及び M60 の BS それぞれの間で有意な差はなかった。その他、42M30-BL と 45M60-BL、

42M30-BL と 45M60-BS の間に危険率 1%で有意な差があった。また、曲げヤング係数においては、曲げ強度と同様、厚さの違う M30 及び M60 の BL、M30 及び M60 の BS それぞれの間に有意な差はなかった。その他、42M30-BL と 45M60-BL、42M30-BL と 45M60-BS、42M30-BS と 45M60-BL、42M30-BS と 45M60-BS の間に危険率 1%で、42M60-BS と 45M60-BL の間に危険率 5%で有意な差があった。

v) まとめ

厚いラミナおよび小角材等を幅はぎ接着したラミナを厚さ 42mm と厚さ 45mm それぞれ 4 仕様に分けた。それぞれ 4 仕様のフラットワイズ曲げ強度性能について検討をした。

厚 42mm ラミナの 42M30-BL は曲げヤング係数の変動係数が、42M30-BS は曲げ強度の変動係数が小さかったが、42M60 では BL、BS とともに曲げ強度、曲げヤング係数とも変動係数が大きかった。

厚 45mm ラミナの 45M30-BL は曲げ強度の変動係数が、42M30-BS は曲げヤング係数の変動係数が小さかったが、45M60 では BL、BS とともに曲げ強度の変動係数が大きかった。

破壊形態は、どのタイプもほとんどが FJ の破壊であった。

厚 42mm ラミナ及び厚 45mm ラミナの曲げ強度と曲げヤング係数それぞれを Scheffé's method による多重比較をした。その結果、厚 42mm ラミナにおける比較では、曲げ強度、曲げヤング係数どちらも M30 の BL、BS 間、M60 の BL、BS 間で有意な差はなかった。厚 45mm ラミナもこれらの間では同じ有意な差はなかった。

厚 42mm ラミナの曲げヤング係数は、42M30-BL と 42M60-BL、42M30-BS と 42M60-BL の間に危険率 5%で有意差があった。厚 45mm ラミナの曲げヤング係数は、45M30-BL と 45M60-BL、45M30-BS と 42M60-BL、45M30-BL と 45M60-BS、45M30-BS と 42M60-BL の間に危険率 1%で有意差があった。

厚 42mm ラミナと厚 45mm ラミナとの比較では、曲げ強度において、厚さの違う M30 及び M60 の BL、M30 及び M60 の BS それぞれの間に有意な差はなかった。その他、42M30-BL と 45M60-BL、42M30-BL と 45M60-BS の間に危険率 1%で有意な差があった。また、曲げヤング係数においては、曲げ強度と同様、厚さの違う M30 及び M60 の BL、M30 及び M60 の BS それぞれの間に有意な差はなかった。その他、42M30-BL と 45M60-BL、42M30-BL と 45M60-BS、42M30-BS と 45M60-BL、42M30-BS と 45M60-BS の間に危険率 1%で、42M60-BS と 45M60-BL の間に危険率 5%で有意な差があった。

資料 ラミナ試験データ

42M30-BL

試験体No	密度 kg/m ³	Pmax kN	Pmax変形量 mm	MOR N/mm ²	MOE kN/mm ²	比例限度強度 N/mm ²	仕事量 kN・mm	Efr
42-M30-BL-1	412	12.45	21.8	35.2	6.57	35.0	137.0	6.65
42-M30-BL-2	394	11.06	20.5	31.4	6.25	31.4	112.3	6.29
42-M30-BL-3	388	9.11	17.2	25.7	6.22	25.6	79.2	6.55
42-M30-BL-4	374	10.34	17.1	29.4	6.77	29.4	87.1	6.90
42-M30-BL-5	368	10.99	19.5	31.0	6.62	31.0	111.7	6.64
42-M30-BL-6	391	8.73	16.8	24.8	6.18	24.4	78.0	6.66
42-M30-BL-7	400	10.03	21.0	28.4	5.64	28.1	104.5	5.68
42-M30-BL-8	383	10.23	17.1	28.9	6.62	28.9	84.6	6.72
42-M30-BL-9	395	13.16	23.8	37.1	6.32	37.1	153.4	6.49
42-M30-BL-10	397	8.95	17.2	25.3	5.78	25.3	75.8	5.69
42-M30-BL-11	427	12.91	24.4	36.4	6.56	33.4	167.5	6.79
42-M30-BL-12	378	9.93	18.4	27.7	6.27	26.0	92.8	6.53
42-M30-BL-13	408	10.09	21.7	28.1	5.12	28.1	106.8	5.37
42-M30-BL-14	403	11.95	19.6	33.7	6.91	33.7	111.9	7.33
42-M30-BL-15	380	9.00	17.3	25.1	6.01	24.9	77.6	6.30
最小値	368	8.73	16.8	24.8	5.12	24.4	75.8	5.37
平均値	393	10.60	19.6	29.9	6.26	29.5	105.4	6.44
最大値	427	13.16	24.4	37.1	6.91	37.1	167.5	7.33
標準偏差	15.6	1.46	2.55	4.15	0.47	4.01	28.4	0.51
変動係数%	4.0	13.7	13.0	13.9	7.5	13.6	27.0	8.0
5%下限値				21.6				

42M60-BL

試験体No	密度 kg/m ³	Pmax kN	Pmax変形量 mm	MOR N/mm ²	MOE kN/mm ²	比例限度強度 N/mm ²	仕事量 kN・mm	Efr
42-M60-BL-1	409	11.03	18.0	31.4	7.07	31.4	99.7	8.10
42-M60-BL-2	418	16.41	20.7	46.3	8.94	46.3	164.6	9.47
42-M60-BL-3	395	8.59	16.2	24.4	5.94	24.4	68.1	6.15
42-M60-BL-4	394	14.91	19.3	41.9	8.60	41.9	139.1	9.17
42-M60-BL-5	415	13.41	18.6	38.0	8.25	38.0	122.1	9.01
42-M60-BL-6	397	8.88	18.8	25.0	5.10	25.0	80.7	5.33
42-M60-BL-7	417	14.11	17.8	40.0	9.27	40.0	124.2	9.90
42-M60-BL-8	397	13.51	20.0	38.2	7.96	38.2	131.9	7.47
42-M60-BL-9	432	8.18	15.9	23.3	6.09	23.3	62.0	5.96
42-M60-BL-10	409	12.04	18.1	34.1	7.57	34.1	105.9	8.18
42-M60-BL-11	410	12.57	19.6	35.0	7.11	35.0	117.9	7.24
42-M60-BL-12	399	11.10	21.6	31.1	5.74	31.1	115.5	5.89
42-M60-BL-13	391	12.88	18.1	36.4	8.30	36.4	111.9	8.96
42-M60-BL-14	433	12.38	16.7	34.1	8.14	34.1	98.0	8.86
42-M60-BL-15	424	11.52	19.8	32.3	6.83	30.2	113.2	7.00
最小値	391	8.18	15.9	23.3	5.10	23.3	62.0	5.33
平均値	409	12.10	18.6	34.1	7.39	34.0	110.3	7.78
最大値	433	16.41	21.6	46.3	9.27	46.3	164.6	9.90
標準偏差	13.8	2.32	1.63	6.53	1.26	6.60	26.6	1.47
変動係数%	3.4	19.2	8.8	19.2	17.0	19.4	24.1	18.9
5%下限値				21.1				

42M30-BS

試験体No	密度 kg/m ³	Pmax kN	Pmax変形量 mm	MOR N/mm ²	MOE kN/mm ²	比例限度強度 N/mm ²	仕事量 kN・mm	Efr
42-M-30-BS-1	400	13.09	20.0	37.0	7.31	37.0	127.6	7.64
42-M-30-BS-2	381	11.92	21.7	33.7	6.44	33.7	127.9	6.60
42-M-30-BS-3	404	12.47	23.9	35.2	5.85	35.2	146.5	6.04
42-M-30-BS-4	381	12.40	17.0	35.1	8.18	35.1	102.1	8.76
42-M-30-BS-5	404	12.74	20.0	36.1	7.35	36.1	124.5	7.74
42-M-30-BS-6	394	10.68	22.3	30.2	5.42	30.2	116.8	5.27
42-M-30-BS-7	385	11.75	20.2	33.4	6.81	33.4	118.4	6.79
42-M-30-BS-8	418	10.85	20.9	30.4	5.91	30.4	111.1	5.83
42-M-30-BS-9	398	11.07	21.4	31.5	6.24	27.2	118.8	6.49
42-M-30-BS-10	380	12.64	20.0	35.9	7.18	35.9	122.6	7.06
42-M-30-BS-11	380	10.06	18.4	28.6	6.25	28.6	90.2	6.14
42-M-30-BS-12	375	10.93	24.0	31.0	5.18	31.0	130.5	5.14
42-M-30-BS-13	398	11.70	22.3	33.2	6.04	33.2	128.6	5.90
42-M-30-BS-14	404	13.06	29.4	37.2	6.57	33.4	222.7	6.96
42-M-30-BS-15	404	11.99	24.3	33.7	5.55	33.7	143.2	5.77
最小値	375	10.06	17.0	28.6	5.18	27.2	90.2	5.14
平均値	394	11.83	21.7	33.5	6.42	32.9	128.8	6.54
最大値	418	13.09	29.4	37.2	8.18	37.0	222.7	8.76
標準偏差	12.6	0.93	2.94	2.67	0.83	2.89	29.6	0.99
変動係数%	3.2	7.9	13.6	8.0	12.9	8.8	23.0	15.1
5%下限値				28.2				

42M60-BS

試験体No	密度 kg/m ³	Pmax kN	Pmax変形量 mm	MOR N/mm ²	MOE kN/mm ²	比例限度強度 N/mm ²	仕事量 kN・mm	Efr
42-M60-BS-1	410	9.61	20.0	27.5	5.41	27.5	94.4	5.58
42-M60-BS-2	420	16.14	22.5	45.6	8.31	45.6	180.7	9.05
42-M60-BS-3	411	11.25	19.6	32.0	6.58	32.0	107.4	6.86
42-M60-BS-4	398	11.92	17.8	33.8	7.60	33.8	103.0	8.08
42-M60-BS-5	446	16.15	24.1	46.0	7.88	46.0	193.8	8.33
42-M60-BS-6	409	10.18	19.7	29.0	5.88	29.0	95.1	5.97
42-M60-BS-7	402	12.47	21.0	35.3	8.45	31.5	144.2	8.86
42-M60-BS-8	399	12.49	19.0	35.2	7.63	35.2	115.8	7.85
42-M60-BS-9	418	9.11	18.1	25.8	5.68	25.8	79.8	5.73
42-M60-BS-10	401	12.71	19.1	36.3	7.70	36.3	117.3	8.23
42-M60-BS-11	396	11.43	19.0	32.2	6.64	32.2	105.7	6.72
42-M60-BS-12	394	9.71	16.9	27.5	6.64	27.5	78.8	7.15
42-M60-BS-13	388	13.81	20.6	38.9	7.72	38.9	139.2	8.27
42-M60-BS-14	416	12.39	21.3	34.4	6.50	34.4	130.0	7.03
42-M60-BS-15	421	11.47	19.9	32.4	6.51	32.4	113.1	6.42
最小値	388	9.11	16.9	25.8	5.41	25.8	78.8	5.58
平均値	409	12.06	19.9	34.1	7.01	33.9	119.9	7.34
最大値	446	16.15	24.1	46.0	8.45	46.0	193.8	9.05
標準偏差	14.4	2.11	1.82	5.96	0.96	5.99	33.3	1.13
変動係数%	3.5	17.5	9.2	17.5	13.7	17.7	27.8	15.4
5%下限値				22.3				

45M30-BL

試験体No	密度 kg/m ³	Pmax kN	Pmax変形量 mm	MOR N/mm ²	MOE kN/mm ²	比例限度強度 N/mm ²	仕事量 kN・mm	Efr
175-45-30BL-1	413	13.37	25.8	35.4	5.91	35.4	171.6	5.86
175-45-30BL-2	383	15.14	28.3	39.8	6.12	39.8	214.5	6.10
175-45-30BL-3	390	11.23	23.7	29.5	5.34	29.5	132.1	5.48
175-45-30BL-4	363	13.33	22.8	35.1	6.59	35.1	148.7	6.38
175-45-30BL-5	396	11.59	41.1	30.8	5.60	30.1	306.5	5.65
175-45-30BL-6	399	12.48	23.5	33.0	5.92	33.0	145.7	6.11
175-45-30BL-7	395	12.70	22.4	33.6	6.46	33.6	142.2	6.71
175-45-30BL-8	391	14.01	25.2	36.9	6.26	36.9	176.5	6.62
175-45-30BL-9	377	11.43	19.3	30.2	6.75	30.2	108.2	6.73
175-45-30BL-10	377	10.75	21.1	28.0	5.60	28.0	112.2	5.74
175-45-30BL-11	370	11.49	22.8	30.2	6.47	27.8	143.9	6.63
175-45-30BL-12	397	12.45	20.3	33.0	6.85	33.0	125.7	6.75
175-45-30BL-13	417	11.50	22.8	30.5	6.12	24.9	135.2	6.41
175-45-30BL-14	450	14.68	19.1	38.9	8.68	38.9	138.7	9.15
最小値	363	10.75	19.1	28.0	5.34	24.9	108.2	5.48
平均値	394	12.58	24.2	33.2	6.34	32.6	157.3	6.45
最大値	450	15.14	41.1	39.8	8.68	39.8	306.5	9.15
標準偏差	22.1	1.36	5.49	3.61	0.81	4.39	50.9	0.89
変動係数%	5.6	10.8	22.7	10.9	12.8	13.5	32.3	13.8
5%下限値				26.0				

45M60-BL

試験体No	密度 kg/m ³	Pmax kN	Pmax変形量 mm	MOR N/mm ²	MOE kN/mm ²	比例限度強度 N/mm ²	仕事量 kN・mm	Efr
175-45-60BL-1	371	15.25	20.9	40.6	8.35	40.6	156.1	8.49
175-45-60BL-2	384	13.58	20.8	36.1	7.54	36.1	139.3	7.84
175-45-60BL-3	436	21.29	22.4	56.7	11.03	56.7	233.7	11.68
175-45-60BL-4	408	14.98	24.8	39.9	8.47	36.1	211.7	8.54
175-45-60BL-5	425	15.98	24.1	42.4	7.58	42.4	188.3	7.56
175-45-60BL-6	401	14.05	18.0	37.2	8.73	37.2	122.6	9.28
175-45-60BL-7	412	16.23	20.8	42.9	8.72	42.9	162.3	9.23
175-45-60BL-8	415	14.35	21.0	37.9	7.71	37.9	147.1	8.03
175-45-60BL-9	403	20.14	21.3	53.4	11.20	51.8	214.9	11.25
175-45-60BL-10	412	11.19	17.0	29.7	7.47	29.7	92.9	7.62
175-45-60BL-11	416	11.74	17.6	31.1	7.48	31.1	100.8	7.74
175-45-60BL-12	396	15.86	20.4	42.2	9.02	42.2	162.5	9.64
175-45-60BL-13	434	14.70	20.0	39.1	8.37	39.1	142.7	8.72
175-45-60BL-14	382	17.37	21.8	46.2	9.11	46.2	186.1	9.12
175-45-60BL-15	424	20.15	24.5	52.9	9.69	50.8	247.9	9.98
175-45-60BL-16	389	17.28	24.8	45.3	7.98	45.3	216.2	8.16
175-45-60BL-17	414	13.54	22.3	35.8	6.81	35.8	148.6	7.10
175-45-60BL-18	446	15.76	21.1	42.0	8.67	42.0	163.8	8.82
175-45-60BL-19	390	13.24	19.3	34.9	7.75	34.9	124.5	7.96
175-45-60BL-20	387	15.42	20.5	41.2	8.45	41.2	153.5	8.52
175-45-60BL-21	422	15.65	22.9	41.1	8.08	40.8	183.2	8.50
175-45-60BL-22	403	13.05	20.4	34.5	7.24	34.5	132.0	7.68
175-45-60BL-23	405	13.62	21.5	36.2	7.69	36.2	138.5	7.86
175-45-60BL-24	406	13.73	21.0	36.3	7.83	32.5	149.9	8.25
175-45-60BL-25	417	13.45	20.9	35.7	7.60	35.5	140.6	7.58
175-45-60BL-26	394	12.87	19.9	34.2	7.26	34.2	124.7	7.25
175-45-60BL-27	418	16.80	23.8	44.6	8.04	44.6	199.4	7.92
175-45-60BL-28	402	9.79	15.9	25.8	6.84	25.8	76.5	7.04
175-45-60BL-29	384	16.39	24.1	43.5	7.76	43.5	195.0	8.35
175-45-60BL-30	428	12.61	18.9	33.4	7.54	33.4	117.0	7.64
最小値	371	9.79	15.9	25.8	6.81	25.8	76.5	7.04
平均値	407	15.00	21.1	39.8	8.20	39.4	159.1	8.45
最大値	446	21.29	24.8	56.7	11.20	56.7	247.9	11.68
標準偏差	17.9	2.58	2.27	6.85	1.04	6.74	41.7	1.09
変動係数%	4.4	17.2	10.8	17.2	12.6	17.1	26.2	13.0
5%下限値				26.1				

45M30-BS

試験体No	密度 kg/m ³	Pmax kN	Pmax変形量 mm	MOR N/mm ²	MOE kN/mm ²	比例限度強度 N/mm ²	仕事量 kN・mm	Efr
105-45-30BS-1	355	8.61	22.6	37.7	6.91	37.7	97.0	7.10
105-45-30BS-2	359	8.58	21.6	37.6	7.36	37.6	91.4	7.57
105-45-30BS-3	380	7.16	23.5	31.4	5.61	31.4	83.3	5.95
105-45-30BS-4	344	5.59	17.9	24.5	5.59	24.5	49.4	5.95
105-45-30BS-5	362	7.64	20.4	33.4	6.93	33.4	77.9	7.32
105-45-30BS-6	336	6.69	20.2	29.3	6.44	29.0	67.7	6.72
105-45-30BS-7	336	5.85	15.5	25.7	6.82	25.7	44.2	7.44
105-45-30BS-8	404	6.09	21.4	26.7	5.26	26.7	65.4	5.74
105-45-30BS-9	340	10.34	25.0	45.4	7.81	45.4	131.7	8.06
105-45-30BS-10	334	9.18	27.9	40.4	6.32	39.7	130.3	6.55
105-45-30BS-11	389	5.30	15.9	23.5	6.04	23.5	41.6	6.40
105-45-30BS-12	432	7.55	23.4	33.4	5.98	33.4	86.9	6.44
105-45-30BS-13	397	6.53	21.3	28.9	5.86	28.9	69.8	6.06
105-45-30BS-14	399	6.72	21.5	29.7	6.07	27.6	74.5	6.33
105-45-30BS-15	361	7.15	21.5	31.6	6.05	31.6	75.4	6.39
105-45-30BS-16	357	5.78	17.5	25.5	6.41	23.6	51.3	6.53
105-45-30BS-17	360	6.42	18.3	28.4	6.43	28.4	57.2	6.68
最小値	334	5.30	15.5	23.5	5.26	23.5	41.6	5.74
平均値	367	7.13	20.9	31.4	6.35	31.1	76.2	6.66
最大値	432	10.34	27.9	45.4	7.81	45.4	131.7	8.06
標準偏差	28.2	1.39	3.22	6.04	0.66	6.18	26.2	0.64
変動係数%	7.7	19.4	15.4	19.3	10.4	19.9	34.4	9.6
5%下限値				19.3				

45M60-BS

試験体No	密度 kg/m ³	Pmax kN	Pmax変形量 mm	MOR N/mm ²	MOE kN/mm ²	比例限度強度 N/mm ²	仕事量 kN・mm	Efr
105-45-60BS-1	414	9.52	19.2	41.8	9.21	41.8	90.7	9.53
105-45-60BS-2	389	7.08	17.7	31.2	7.33	31.2	61.3	7.33
105-45-60BS-3	399	9.90	21.7	43.7	8.77	43.4	109.4	8.39
105-45-60BS-4	398	10.72	21.8	47.6	9.27	47.6	116.3	9.74
105-45-60BS-5	367	9.65	24.1	42.7	7.97	41.9	120.4	8.19
105-45-60BS-6	403	11.18	23.5	49.4	8.96	49.4	128.6	9.14
105-45-60BS-7	419	7.62	19.2	33.7	7.44	33.7	71.0	7.55
105-45-60BS-8	437	10.13	22.6	44.7	8.49	44.7	114.5	8.54
105-45-60BS-9	416	9.16	21.9	40.4	7.96	40.4	98.7	8.17
105-45-60BS-10	394	9.07	23.9	40.1	7.91	37.7	115.9	8.08
105-45-60BS-11	401	6.40	21.0	28.3	5.65	28.3	65.9	5.78
105-45-60BS-12	425	6.61	16.3	29.3	7.56	29.3	52.4	7.75
105-45-60BS-13	415	10.29	26.6	45.4	7.46	45.4	137.0	7.53
105-45-60BS-14	396	8.16	19.5	36.0	7.88	36.0	78.0	8.07
105-45-60BS-15	404	7.85	23.1	34.4	6.41	34.4	91.6	6.73
105-45-60BS-16	395	11.74	26.3	51.9	8.45	51.9	153.4	8.79
105-45-60BS-17	417	7.85	20.0	35.0	7.34	35.0	77.2	8.06
105-45-60BS-18	408	8.57	21.7	37.8	7.35	37.8	91.8	7.60
105-45-60BS-19	403	10.13	22.8	44.8	8.27	44.8	114.1	8.61
105-45-60BS-20	428	8.47	21.8	37.5	7.27	37.5	91.4	7.48
105-45-60BS-21	408	7.83	19.4	34.1	7.44	34.1	74.5	8.41
105-45-60BS-22	418	10.35	25.9	45.6	7.51	45.6	133.0	7.51
105-45-60BS-23	425	7.83	20.2	34.5	7.28	34.5	79.4	7.56
105-45-60BS-24	442	9.68	19.6	42.8	9.27	42.8	93.6	9.33
105-45-60BS-25	407	10.23	26.5	44.9	7.30	44.9	136.3	7.48
105-45-60BS-26	434	9.80	25.9	43.5	7.25	43.5	127.4	7.35
105-45-60BS-27	366	8.79	22.9	38.8	7.20	38.8	100.5	7.45
105-45-60BS-28	440	9.54	24.6	42.3	7.48	42.3	119.0	7.87
105-45-60BS-29	440	7.17	16.6	31.8	7.91	31.8	58.3	8.12
105-45-60BS-30	385	9.55	21.1	41.9	8.31	41.9	99.8	8.91
最小値	366	6.40	16.3	28.3	5.65	28.3	52.4	5.78
平均値	410	9.03	21.9	39.9	7.80	39.8	100.0	8.03
最大値	442	11.74	26.6	51.9	9.27	51.9	153.4	9.74
標準偏差	19.7	1.36	2.85	6.03	0.82	6.03	26.2	0.84
変動係数%	4.8	15.1	13.0	15.1	10.5	15.2	26.2	10.4
5%下限値				27.9				

b. 薄いラミナ

i) 試験方法

初めに、本試験に用いた試験体の概要を表 1.1.2b-1 に示す。

各試験体について、事前に横振動法により弾性係数を測定した。

曲げ試験は、精密万能強度試験機（(株)島津製作所製、最大能力 100kN）を用いて行い、加力方式は 3 等分点 4 点荷重方式、曲げスパンは試験体厚さの 21 倍とした。加圧板幅は 40mm とした。

表 1.1.2b-1 試験体概要

等級・構成	幅(mm)	厚さ(mm)	長さ(mm)	幅はぎ接着	試験体数
M30	105	20	500	なし	30 体
M60	105	20	500	なし	30 体
M30	105	30	690	なし	30 体
M60	105	30	690	なし	30 体

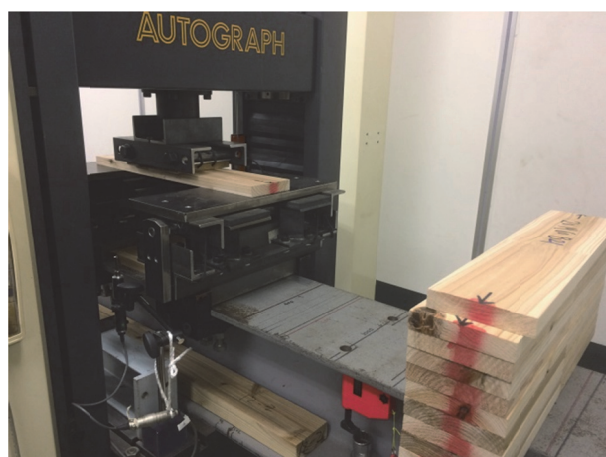


写真 1.1.2b-1 非破壊試験の様子

ii) 結果と考察

試験結果を表 1.1.2b-2～表 1.1.2b-5 に示す。M30 厚さ 20mm 試験体の中で 1 体のみ非破壊試験結果が曲げ試験結果より大幅に低い評価となったものがあったが、それを除くと、非破壊試験結果は、全ての条件で曲げ試験結果と同程度の評価となっていた(図 1.1.2b-1)。曲げヤング係数と曲げ強さとの関係を図 1.1.2b-2 に示す。両者の間に相関関係は認められなかった。

表 1.1.2b-2 曲げ試験結果 (M30 厚さ 20mm)

番号	密度 (kg/mm ³)	動的ヤング係数 E _a f _b (kN/mm ²)	曲げヤング係数 E _b (kN/mm ²)	曲げ強さ σ _b (N/mm ²)
20M30-1	435	4.46	8.58	40.6
2	450	4.85	4.91	38.9
3	387	5.77	5.87	32.1
4	362	6.11	6.15	36.7
5	427	4.58	4.81	40.6
6	408	5.75	5.68	36.3
7	434	4.99	4.81	34.2
8	372	4.71	4.97	30.8
9	461	5.67	5.67	46.4
10	420	4.43	4.45	37.1
11	405	4.42	4.65	42.7
12	428	4.55	5.13	33.7
13	449	5.22	5.26	39.6
14	414	4.67	5.03	35.4
15	443	6.00	6.56	51.4
16	394	4.23	4.71	28.0
17	420	4.65	5.15	36.6
18	427	4.90	5.71	41.8
19	388	6.24	6.46	25.3
20	403	5.39	6.01	37.4
21	425	10.84	10.19	46.8
22	444	4.86	4.96	30.8
23	380	4.70	4.68	26.0
24	384	5.02	5.64	36.1
25	386	5.43	5.97	26.5
26	379	4.96	5.58	39.8
27	388	6.83	7.36	37.7
28	362	6.16	6.60	25.1
29	445	5.29	5.78	43.3
30	423	4.97	5.29	29.8
平均	411	5.35	5.75	36.2
最小	362	4.23	4.45	25.1
最大	461	10.84	10.19	51.4
標準偏差	28.10	1.22	1.22	6.7
変動係数	6.83	22.80	21.19	18.4

表 1.1.2b-3 曲げ試験結果 (M60 厚さ 20mm)

番号	密度 (kg/mm ³)	動的ヤング係数 E _a f _b (kN/mm ²)	曲げヤング係数 E _b (kN/mm ²)	曲げ強さ σ _b (N/mm ²)
20M60-1	397	8.80	8.36	56.3
2	450	10.15	9.63	52.2
3	417	7.99	8.26	43.6
4	425	7.71	8.07	43.7
5	426	7.82	7.64	42.6
6	404	7.79	7.52	43.4
7	448	10.89	10.39	63.6
8	428	10.15	9.86	59.8
9	389	10.16	9.36	53.1
10	419	7.69	7.74	40.0
11	365	7.37	7.26	38.7
12	421	8.37	8.41	39.9
13	386	8.55	8.64	51.4
14	390	8.25	8.54	43.2
15	420	11.30	10.85	66.4
16	419	9.24	9.23	39.4
17	383	8.86	8.97	34.8
18	408	8.24	7.81	43.4
19	454	8.73	8.74	40.2
20	462	9.89	9.45	51.8
21	379	9.46	9.56	47.1
22	464	10.10	9.73	61.1
23	403	6.45	7.18	32.5
24	381	7.77	7.85	40.6
25	389	6.61	7.40	47.6
26	442	9.10	8.80	43.7
27	435	8.96	9.14	52.1
28	386	7.79	8.14	41.1
29	422	8.34	8.33	43.5
30	457	9.69	9.53	49.5
平均	416	8.74	8.68	46.9
最小	365	6.45	7.18	32.5
最大	464	11.30	10.85	66.4
標準偏差	27.71	1.19	0.95	8.4
変動係数	6.67	13.59	10.91	18.0

表 1.1.2b-4 曲げ試験結果 (M30 厚さ 30mm)

番号	密度 (kg/mm ³)	動的ヤング係数 E _a f _b (kN/mm ²)	曲げヤング係数 E _b (kN/mm ²)	曲げ強さ σ_b (N/mm ²)
30M30-1	358	6.18	6.41	32.6
2	397	4.01	4.25	34.6
3	412	5.27	5.19	35.9
4	398	4.48	4.76	37.9
5	535	5.20	5.26	50.7
6	406	5.94	6.07	38.9
7	358	5.73	6.19	33.2
8	367	4.40	4.83	33.5
9	381	5.57	5.84	32.2
10	433	4.96	5.19	41.6
11	443	5.38	5.25	43.3
12	364	5.84	6.36	42.0
13	405	5.56	5.82	33.5
14	395	6.12	6.77	41.7
15	399	4.60	5.03	28.2
16	378	5.67	6.09	31.4
17	361	4.73	5.35	32.0
18	389	5.46	5.96	35.5
19	433	5.29	5.60	41.9
20	368	4.57	5.23	34.0
21	416	5.32	5.80	33.8
22	370	4.91	5.55	34.2
23	391	5.43	5.80	39.1
24	392	5.39	6.05	36.3
25	359	5.49	5.80	32.0
26	406	5.15	5.38	34.5
27	418	5.79	6.10	32.3
28	375	5.02	5.31	38.0
29	450	4.95	5.03	45.4
30	397	4.37	4.77	35.3
平均	398	5.23	5.57	36.5
最小	358	4.01	4.25	28.2
最大	535	6.18	6.77	50.7
標準偏差	36.23	0.55	0.57	4.9
変動係数	9.09	10.43	10.31	13.5

表 1.1.2b-5 曲げ試験結果 (M60 厚さ 30mm)

番号	密度 (kg/mm ³)	動的ヤング係数 E _a f _b (kN/mm ²)	曲げヤング係数 E _b (kN/mm ²)	曲げ強さ σ _b (N/mm ²)
30M60-1	339	7.52	7.74	37.0
2	352	6.68	7.09	37.0
3	359	6.56	6.95	32.4
4	352	8.10	7.85	41.3
5	431	9.48	9.53	46.6
6	383	7.67	7.75	36.7
7	414	8.65	8.79	39.8
8	409	8.35	8.42	44.8
9	406	7.07	7.56	34.7
10	387	6.93	7.34	39.8
11	365	7.43	7.44	36.7
12	462	10.41	10.23	57.5
13	440	7.28	7.33	42.2
14	481	5.81	6.09	48.6
15	404	7.08	7.10	48.5
16	459	8.95	8.55	53.6
17	368	7.36	7.65	31.9
18	404	6.63	7.02	31.6
19	457	12.60	11.49	57.0
20	408	6.13	6.67	30.1
21	396	6.13	6.10	33.7
22	380	8.24	7.93	36.9
23	372	8.07	7.93	41.4
24	381	5.95	6.43	41.1
25	438	7.83	7.58	45.0
26	343	6.86	7.30	36.9
27	426	8.19	8.18	41.3
28	406	9.42	9.36	54.0
29	383	6.13	6.82	37.1
30	419	8.05	8.16	39.8
平均	401	7.72	7.81	41.2
最小	339	5.81	6.09	30.1
最大	481	12.60	11.49	57.5
標準偏差	37.22	1.45	1.18	7.5
変動係数	9.29	18.83	15.10	18.1

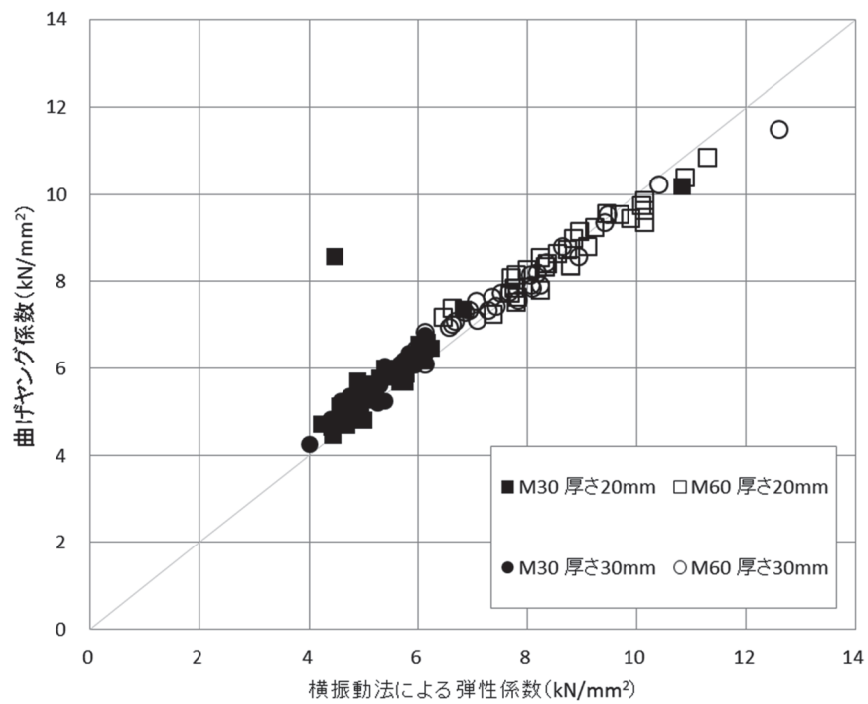


図 1.1.2b-1 横振動法による試験結果と曲げヤング係数の関係

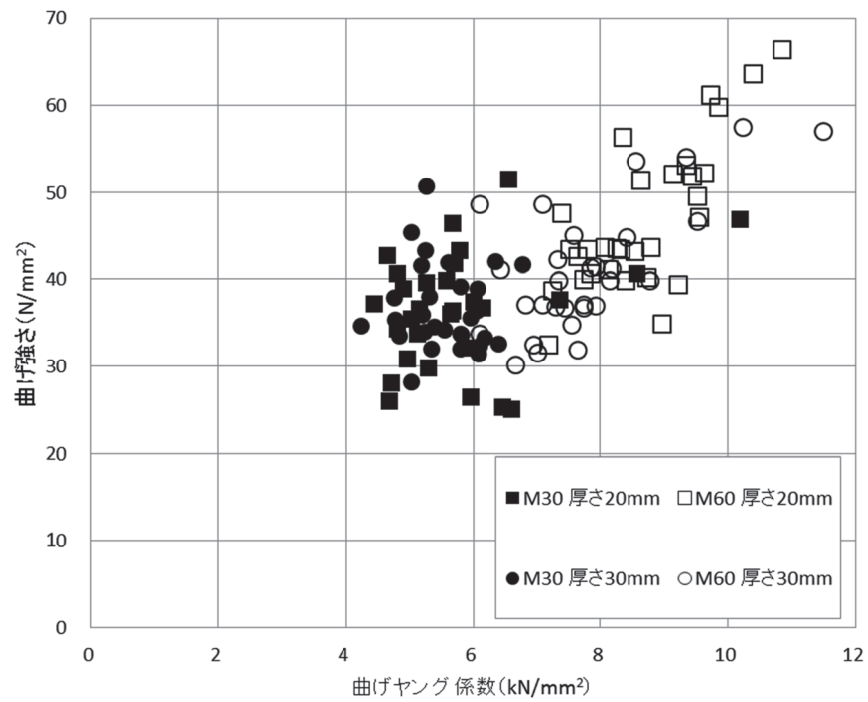


図 1.1.2b-2 曲げヤング係数と曲げ強さの関係

1.2 面外曲げ性能

1.2.1 厚いラミナ（小角材等を幅はぎ接着したラミナを含む）を用いた場合

a. 試験方法

面外曲げ試験に供した CLT は、表 1.2.1-1 のとおりである。9s9ply と 7s7ply の試験体は同じ厚さであるが、ラミナの厚さが異なる。また、5s5ply は 9s9ply と同じラミナの厚さで構成されている。強軸及び弱軸、それぞれ各 3 体である。基本的な寸法は、幅 300mm、厚さは 270mm 及び 210mm、長さは厚さの 23 倍である。

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

表 1.2.1-1 面外曲げ試験 試験体仕様

構成	厚さ	ラミナ幅	試験体数
9s9ply	270mm	175	強軸・弱軸各 3 体
7s7ply	270mm	175	強軸・弱軸各 3 体
5s5ply	210mm	175	強軸・弱軸各 3 体

なお、非破壊試験についても、次のとおり行った。

i) 動的試験方法

面外曲げ試験を行う前に、せん断弾性係数の簡便な非破壊評価方法として、動的弾性係数の測定を試みた。測定は、たわみ振動法(T.G.H.法)^{1.2.1-1)}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 倍の距離の台に置き、試験体中央部材面を上から、または端部上面から、ハンマーで打撃し、打撃か所の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。

ii) 動的試験評価方法

たわみ振動法(T.G.H.法)では、試験体長さ、断面 2 次半径、密度を求め、せん断分布定数(1.0)、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 Fmn 、1 から 6 次程度までの曲げ固有振動数、各 n における見かけの曲げヤング係数を求める。さらに各 n におけるプロット用の系列 X 、 Y を求め、その 1 次回帰式 $Y=aX+c$ とプロットが一致するとき、傾き a と切片 c が次の関係となる。

$$a = -1.2 \left(\frac{E_{fr-t}}{G_{fr-t}} \right), \quad c = E_{fr-t} \quad (1.2.1-1)$$

E_{fr-t} : 真の曲げヤング係数

G_{fr-t} : せん断弾性係数

縦振動法では次の式により縦振動ヤング係数を計算した。

$$E_{fr} = (2fl)^2 \rho \quad (1.2.1-2)$$

E_{fr} : 縦振動ヤング係数

f : 固有振動数

l : 材長

ρ : 密度

b. 結果及び考察

非破壊試験の結果を表 1.2.1-2 に示す。

表 1.2.1-2 縦振動法、たわみ振動法 (T.G.H.法) によるヤング係数とせん断弾性係数

9s9ply強軸 厚270mm 試験体No	密度 kg/m ³	ヤング係数 Efr kN/mm ²	TGH E _{TGHf} kN/mm ²	TGH G _{TGHf} kN/mm ²	9s9ply弱軸 厚270mm 試験体No	密度 kg/m ³	ヤング係数 Efr kN/mm ²	TGH E _{TGHf} kN/mm ²	TGH G _{TGHf} kN/mm ²
最小値	398	3.82	5.37	0.237	最小値	402	2.69	2.54	0.147
平均値	402	3.84	5.71	0.255	平均値	405	2.87	2.73	0.164
最大値	408	3.87	6.15	0.265	最大値	409	2.99	3.01	0.175
標準偏差	5.1	0.03	0.40	0.02	標準偏差	3.6	0.16	0.25	0.01
変動係数%	1.3	0.7	7.1	6.1	変動係数%	0.9	5.4	9.0	9.1
7s7ply強軸 厚270mm 試験体No	密度 kg/m ³	ヤング係数 Efr kN/mm ²	TGH E _{TGHf} kN/mm ²	TGH G _{TGHf} kN/mm ²	7s7ply弱軸 厚270mm 試験体No	密度 kg/m ³	ヤング係数 Efr kN/mm ²	TGH E _{TGHf} kN/mm ²	TGH G _{TGHf} kN/mm ²
最小値	406	4.78	5.83	0.253	最小値	399	2.76	2.84	0.152
平均値	407	4.82	6.57	0.262	平均値	402	2.89	2.97	0.159
最大値	409	4.83	6.95	0.274	最大値	405	3.12	3.15	0.163
標準偏差	1.6	0.03	0.64	0.01	標準偏差	3.0	0.20	0.17	0.01
変動係数%	0.4	0.6	9.7	4.1	変動係数%	0.7	7.0	5.6	3.9
5s5ply強軸 厚210mm 試験体No	密度 kg/m ³	ヤング係数 Efr kN/mm ²	TGH E _{TGHf} kN/mm ²	TGH G _{TGHf} kN/mm ²	5s5ply弱軸 厚210mm 試験体No	密度 kg/m ³	ヤング係数 Efr kN/mm ²	TGH E _{TGHf} kN/mm ²	TGH G _{TGHf} kN/mm ²
最小値	401	4.20	5.75	0.254	最小値	400	2.79	1.89	0.136
平均値	403	4.64	6.48	0.260	平均値	401	2.99	2.03	0.142
最大値	405	4.89	6.93	0.265	最大値	402	3.20	2.22	0.152
標準偏差	1.9	0.38	0.64	0.01	標準偏差	1.1	0.21	0.17	0.01
変動係数%	0.5	8.2	9.8	2.2	変動係数%	0.3	6.9	8.4	6.4

Efr：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)

面外曲げ試験結果を強軸は表 1.2.1-3 に、弱軸は表 1.2.1-4 に、図 1.2.1-1 にみかけの曲げヤング係数と曲げ強度の関係を示す。なお、破壊形態は、すべて引張側平行層ラミナの FJ を起点とする曲げ破壊であった。

また、平行層ラミナ間の水平方向の動向を測定するため、支点と荷重点の中間点について側面片側 2 か所に、変位計を水平方向に取り付け、水平方向の変形量を測定した。その結果を強軸は図 1.2.1-2 から図 1.2.1-4、弱軸は図 1.2.1-5 から図 1.2.1-7 に示す。

表 1.2.1-3 強軸試験体の面外曲げ試験結果

9s9ply強軸 厚270mm 試験体No	密度 kg/m ³	Pmax kN	Pmax変位量 mm	MOR N/mm ²	みかけEm MOE kN/mm ²	真 Eb MOE kN/mm ²	比例限度強度 N/mm ²	比例限度変位 mm	仕事量 kN・mm	破壊形態
306.H.OB1	401	65.2	85.6	16.5	4.81	5.10	16.5	85.6	2794	曲げ
306.H.OB2	408	65.2	88.7	16.5	4.68	4.99	16.5	88.7	2898	曲げ
306.H.OB3	398	71.5	105.0	18.2	4.63	5.05	16.5	89.7	3939	曲げ
最小値	398	65.2	85.6	16.5	4.63	4.99	16.5	85.6	2794	
平均値	402	67.3	93.1	17.1	4.71	5.05	16.5	88.0	3210	
最大値	408	71.5	105.0	18.2	4.81	5.10	16.5	89.7	3939	
標準偏差	5.1	3.65	10.44	0.98	0.10	0.05	0.03	2.13	633	
変動係数%	1.3	5.4	11.2	5.7	2.0	1.0	0.2	2.4	19.7	
5%下限値				14.0						

7s7ply強軸 厚270mm 試験体No	密度 kg/m ³	Pmax kN	Pmax変位量 mm	MOR N/mm ²	みかけEm MOE kN/mm ²	真 Eb MOE kN/mm ²	比例限度強度 N/mm ²	比例限度変位 mm	仕事量 kN・mm	破壊形態
381.H.OB1	406	70.8	80.6	18.1	5.70	6.30	18.1	80.6	2872	曲げ
381.H.OB2	406	67.8	84.7	17.4	5.26	5.54	17.4	84.7	2895	曲げ
381.H.OB3	409	64.0	81.4	16.4	5.10	5.05	16.4	81.4	2621	曲げ
最小値	406	64.0	80.6	16.4	5.10	5.05	16.4	80.6	2621	
平均値	407	67.5	82.3	17.3	5.36	5.63	17.3	82.3	2796	
最大値	409	70.8	84.7	18.1	5.70	6.30	18.1	84.7	2895	
標準偏差	1.6	3.41	2.17	0.88	0.31	0.63	0.88	2.17	152	
変動係数%	0.4	5.0	2.6	5.1	5.8	11.1	5.1	2.6	5.4	
5%下限値				14.5						

5s5ply強軸 厚210mm 試験体No	密度 kg/m ³	Pmax kN	Pmax変位量 mm	MOR N/mm ²	みかけEm MOE kN/mm ²	真 Eb MOE kN/mm ²	比例限度強度 N/mm ²	比例限度変位 mm	仕事量 kN・mm	破壊形態
421.H.OB2	401	56.0	77.0	18.4	4.75	4.78	18.4	77.0	2172	曲げ
421.H.OB3	404	59.1	65.2	19.5	5.91	6.35	19.5	65.2	1933	曲げ
421.H.OB5	405	72.1	83.5	23.6	5.72	6.05	22.4	78.6	3080	曲げ
最小値	401	56.0	65.2	18.4	4.75	4.78	18.4	65.2	1933	
平均値	403	62.4	75.2	20.5	5.46	5.72	20.1	73.6	2395	
最大値	405	72.1	83.5	23.6	5.91	6.35	22.4	78.6	3080	
標準偏差	1.9	8.55	9.28	2.76	0.62	0.84	2.04	7.29	605	
変動係数%	0.5	13.7	12.3	13.4	11.4	14.6	10.2	9.9	25.3	
5%下限値				11.8						

※ 5%下限値：信頼水準 75%の 95%下側許容限界値（正規分布あてはめ）

表 1.2.1-4 弱軸試験体の面外曲げ試験結果

9s9ply弱軸 厚270mm 試験体No	密度 kg/m ³	Pmax kN	Pmax変位量 mm	MOR N/mm ²	みかけEm MOE kN/mm ²	真 Eb MOE kN/mm ²	比例限度強度 N/mm ²	比例限度変位 mm	仕事量 kN・mm	破壊形態
307.H.OB1	409	34.5	121.0	8.7	1.84	1.84	8.7	121.0	2130	曲げ
307.H.OB3	402	36.6	120.7	9.2	1.95	1.99	9.2	120.7	2226	曲げ
307.H.OB4	404	38.0	134.5	9.6	1.83	1.88	9.6	134.5	2590	曲げ
最小値	402	34.5	120.7	8.7	1.83	1.84	8.7	120.7	2130	
平均値	405	36.4	125.4	9.2	1.87	1.90	9.2	125.4	2315	
最大値	409	38.0	134.5	9.6	1.95	1.99	9.6	134.5	2590	
標準偏差	3.6	1.75	7.87	0.46	0.06	0.08	0.46	7.87	242	
変動係数%	0.9	4.8	6.3	5.0	3.4	4.0	5.0	6.3	10.5	
5%下限値				7.7						

7s7ply弱軸 厚270mm 試験体No	密度 kg/m ³	Pmax kN	Pmax変位量 mm	MOR N/mm ²	みかけEm MOE kN/mm ²	真 Eb MOE kN/mm ²	比例限度強度 N/mm ²	比例限度変位 mm	仕事量 kN・mm	破壊形態
382.H.OB1	405	35.6	119.8	9.1	1.96	2.03	9.1	119.8	2166	曲げ
382.H.OB2	399	35.6	122.5	9.1	1.92	1.98	9.0	120.9	2213	曲げ
382.H.OB4	401	36.9	124.2	9.5	1.96	1.99	9.5	124.2	2315	曲げ
最小値	399	35.6	119.8	9.1	1.92	1.98	9.0	119.8	2166	
平均値	402	36.0	122.2	9.2	1.95	2.00	9.2	121.6	2231	
最大値	405	36.9	124.2	9.5	1.96	2.03	9.5	124.2	2315	
標準偏差	3.0	0.72	2.19	0.20	0.02	0.03	0.24	2.25	76	
変動係数%	0.7	2.0	1.8	2.2	1.1	1.3	2.6	1.9	3.4	
5%下限値				8.6						

5s5ply 弱軸 厚210mm 試験体No	密度 kg/m ³	Pmax kN	Pmax変位量 mm	MOR N/mm ²	みかけEm MOE kN/mm ²	真 Eb MOE kN/mm ²	比例限度強度 N/mm ²	比例限度変位 mm	仕事量 kN・mm	破壊形態
422.H.OB2	400	30.3	124.4	9.9	1.62	1.61	9.0	112.1	1920	曲げ
422.H.OB3	400	32.5	146.2	10.7	1.51	1.51	8.7	115.1	2465	曲げ
422.H.OB5	402	22.6	105.6	7.4	1.42	1.47	7.0	99.0	1223	曲げ
最小値	400	22.6	105.6	7.4	1.42	1.47	7.0	99.0	1223	
平均値	401	28.5	125.4	9.3	1.51	1.53	8.2	108.7	1870	
最大値	402	32.5	146.2	10.7	1.62	1.61	9.0	115.1	2465	
標準偏差	1.1	5.23	20.29	1.71	0.10	0.07	1.07	8.56	623	
変動係数%	0.3	18.4	16.2	18.3	6.5	4.7	13.0	7.9	33.3	
5%下限値				3.9						

※ 5%下限値：信頼水準 75%の 95%下側許容限界値（正規分布あてはめ）

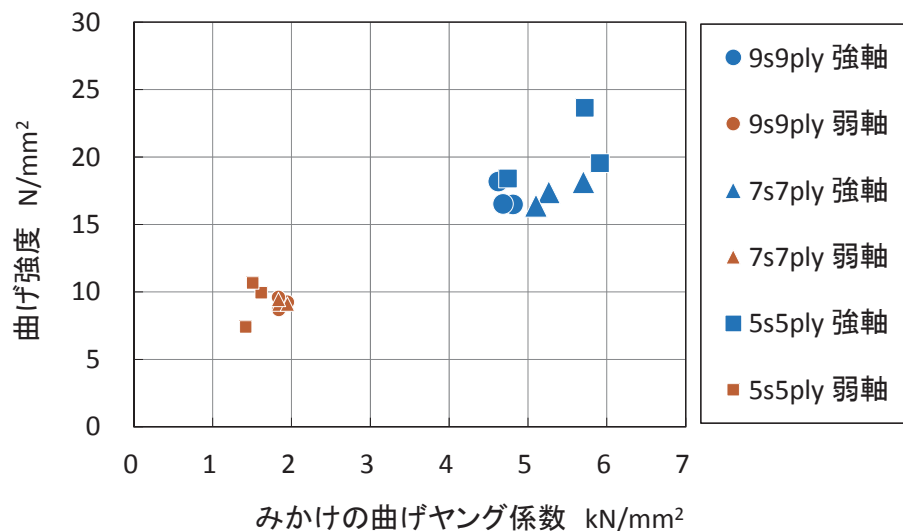


図 1.2.1-1 みかけの曲げヤング係数と曲げ強度の関係

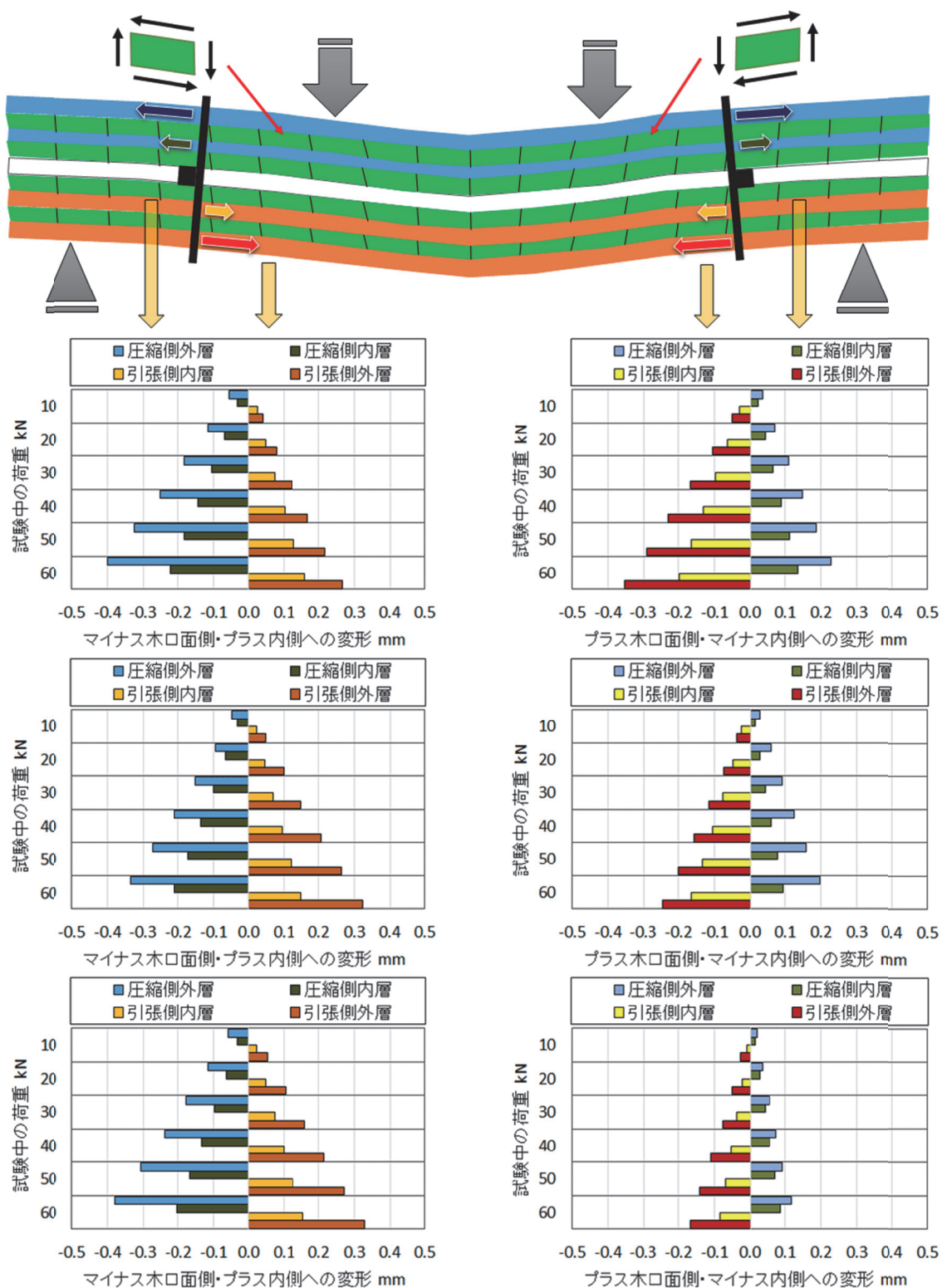


図 1.2.1-2 9s9ply 強軸試験体側面平行層の変形

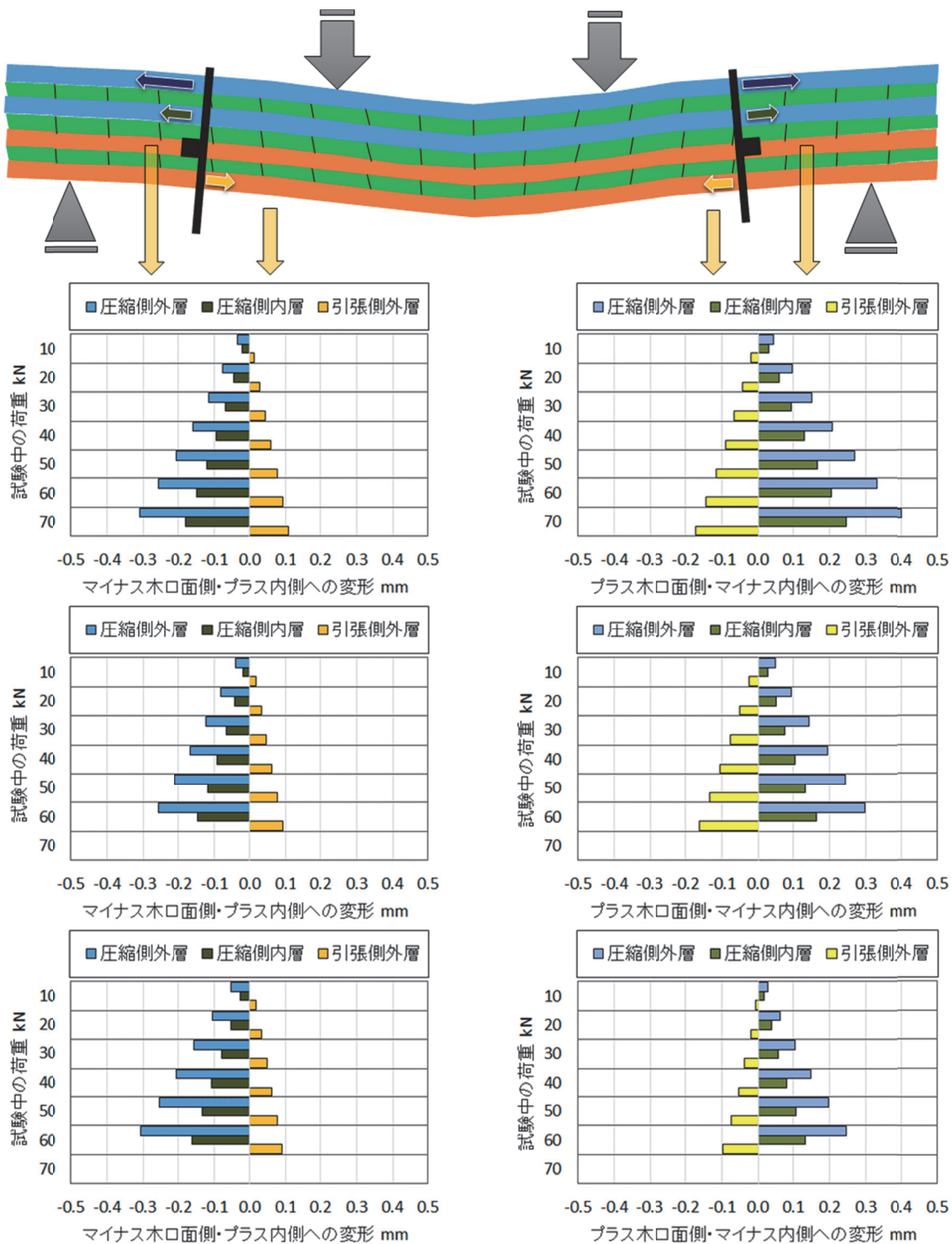


図 1.2.1-3 7s7ply 強軸試験体側面平行層の変形

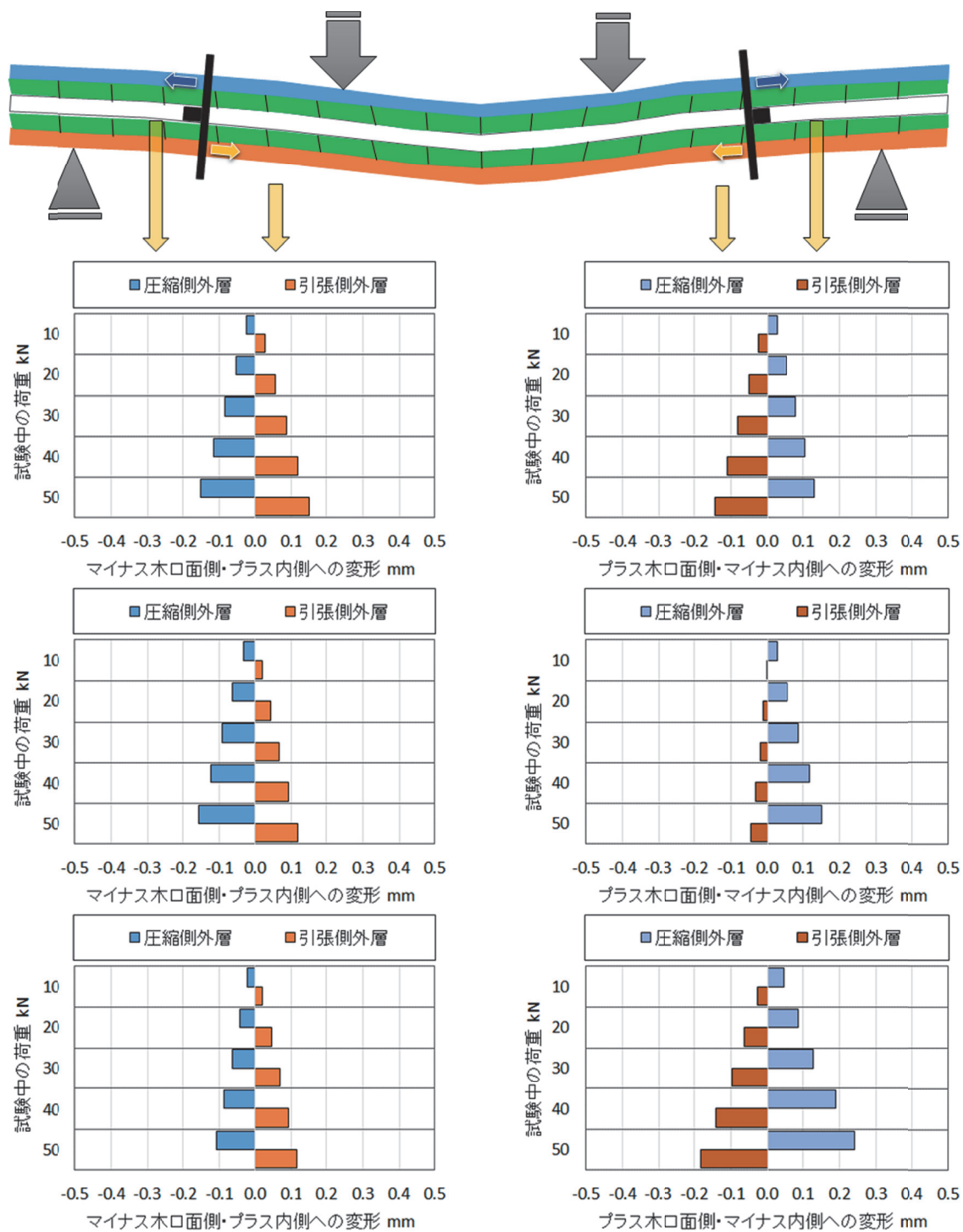


図 1.2.1-4 5s5ply 強軸試験体側面平行層の変形

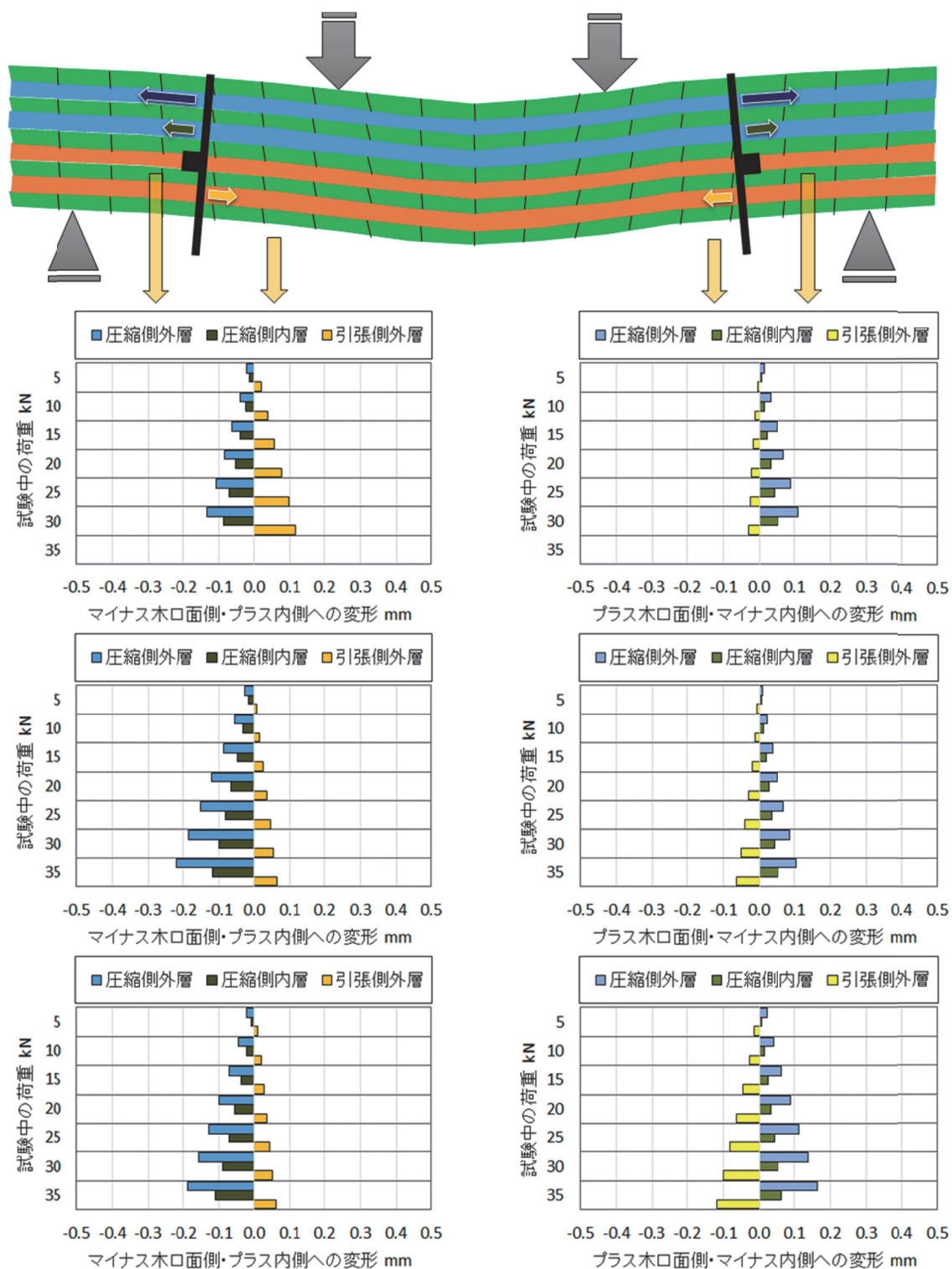


図 1.2.1-5 9s9ply 弱軸試験体側面平行層の変形

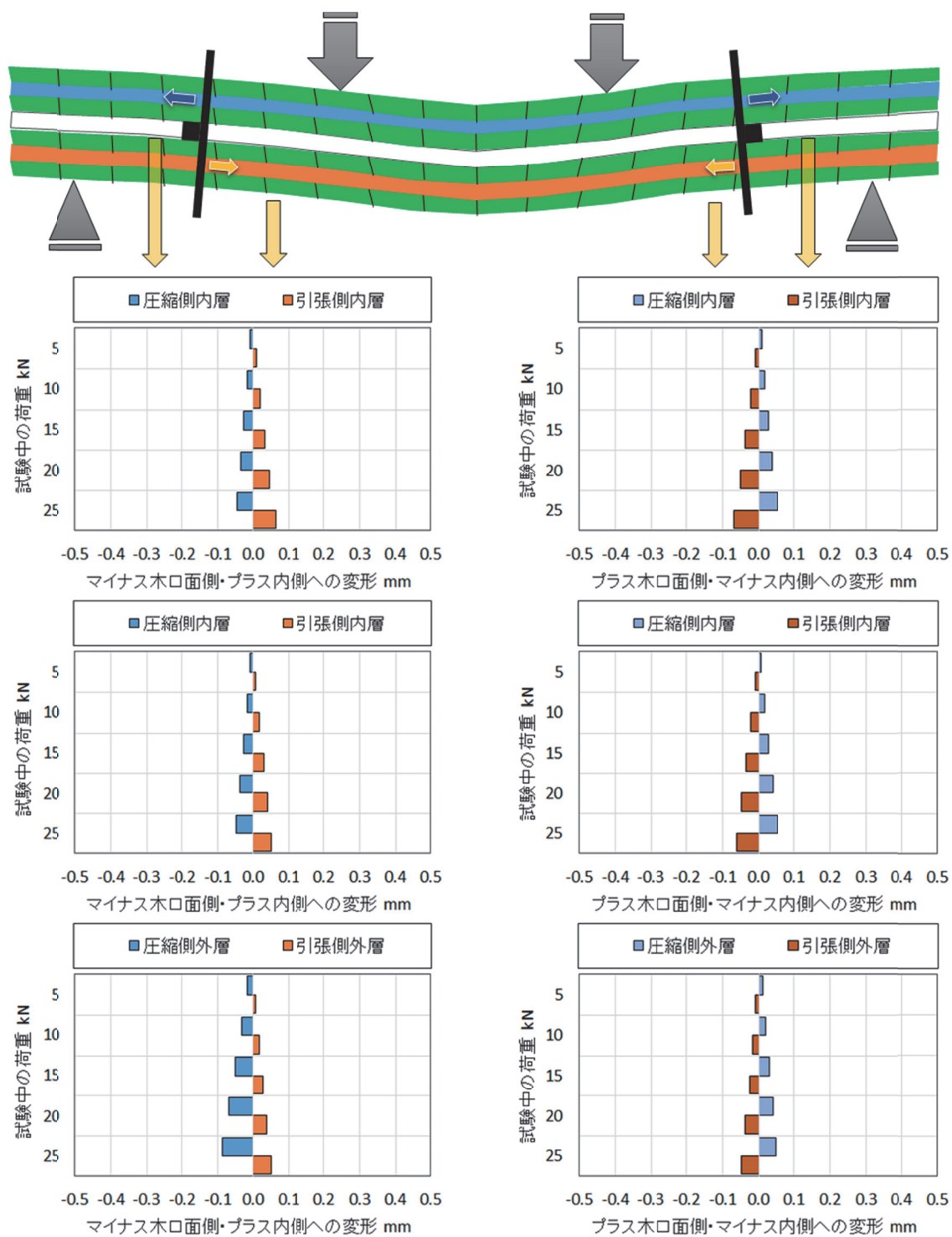


図 1.2.1-6 7s7ply 弱軸試験体側面平行層の変形

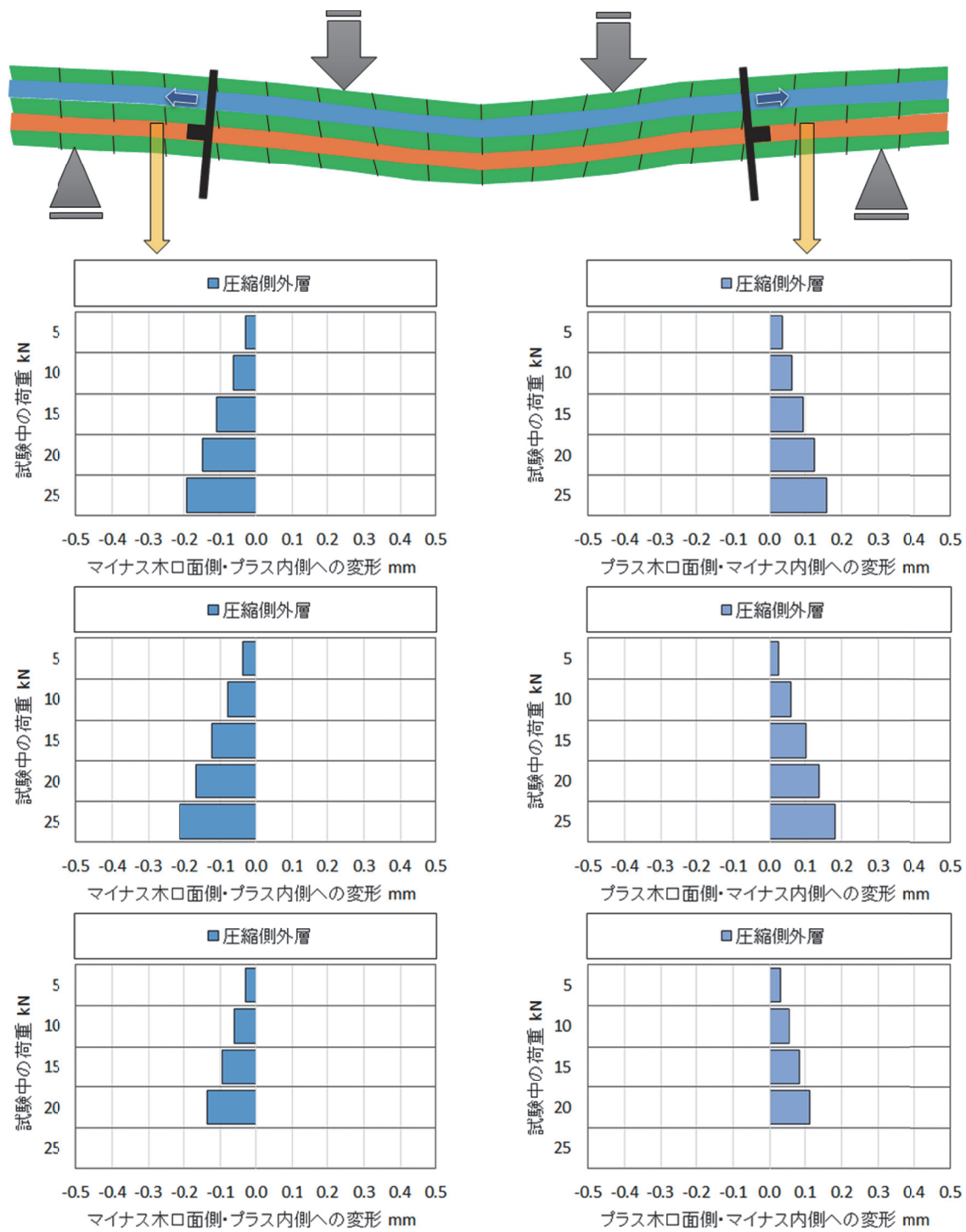


図 1.2.1-7 5s5ply 弱軸試験体側面平行層の変形

表 1.2.1-2 の縦振動ヤング係数とたわみ振動法(T.G.H.法) 及び表 1.2.1-3 による面外方向の真の曲げヤング係数を比較すると、縦振動ヤング係数と真の曲げヤング係数の関係では、強軸試験体では、縦振動ヤング係数が平均値で、縦振動ヤング係数が 15%から 25%程度低めに、弱軸試験体では縦振動ヤング係数が 50%から 100%程度高めになることが分かった。たわみ振動法の面外方向の曲げヤング係数と真の曲げヤング係数の関係では、強軸試験体で、たわみ振動法の方が平均値で、9s9ply、7s7ply は、真の曲げヤング係数より 15%程度高めであり、5S5ply はほぼ同じであった。弱軸試験体ではたわみ振動法の方が 30%から 50%程度高めになっており、たわみ振動法の計算時に周波数の選択間違いがあったかもしれない。

表 1.2.1-3 の強軸試験体の面外曲げ試験結果から、曲げ強度、みかけや真の曲げヤング係数平均値が 9s9ply では全体的に低い結果となったが、たわみ振動法においても差があったため、配置したラミナの強度性能に差があったとも考えられる。曲げ強度 5%下限値では 5S5ply の変動係数が大きいいため低くなった。

表 1.2.1-4 の弱軸試験体の面外曲げ試験結果をみると、曲げ強度の平均値は 3 タイプともほぼ同じであったが、5%下限値では 5S5ply の変動係数が大きいいため低くなった。みかけや真の曲げヤング係数平均値では 5S5ply が低い結果であった。強軸と同様、たわみ振動法においても差があったため、配置したラミナの強度性能に差があったのではないかと考えられた。

9s9ply、7s7ply 及び 5s5ply 強軸また弱軸の曲げ強度とみかけの曲げヤング係数、真の曲げヤング係数について、Scheffé's method による多重比較をした。その結果、どのタイプともそれぞれの間に有意差はなかった。

平行層ラミナ間の水平方向の動向を測定するため、支点と荷重点の中間点について、側面片側 2 か所に変位計を水平方向に取り付け、水平方向の変形量を測定した。図 1.2.1-2 から図 1.2.1-4 の強軸では、9s9ply、7s7ply、5s5ply と積層数が減ってくる順に変形量が少なくなっていく傾向があった。また、試験体の側面左右 2 個所に取り付けた変位計の変形量は、試験体によりどちらかが大きくなることもあり、同じ変形量でないことも分かった。破壊個所が変位計に近いために変形が大きいことでもなく、この理由は不明であった。さらに、圧縮側ラミナは試験体の木口側に向かって、引張側ラミナは試験体の中央方向に向かって変形していることも判明した。これらの結果から CLT の面外曲げ試験体は、各図の上部にある試験体側面形状のように荷重点間では下に凸、荷重点・支点間では上に凸の形状になると推察された。また、最終的な破壊に至るまでに、3 タイプとも部分的にせん断破壊の音がするのであるが、せん断破壊する前に、引張側平行層ラミナの FJ 部の曲げ破壊が起こった。最終的には、引張側ラミナの曲げ強度の方が、せん断力より弱かったと考えられた。

図 1.2.1-5 から図 1.2.1-7 の弱軸では、強軸の変形量ほど大きくはなかった。圧縮側ラミナは試験体の木口側に向かって、引張側ラミナは試験体の中央方向に向かって変形していることも強軸と同じであった。どちらかというと 7s7ply の変形量が少なかった。

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）における測定結果及び今回の結果から、試験体は面外から載荷されることによりせん断力がかかるが、木口近くの直交層ラミナでは影響が少なく、荷重点方向に向けてその影響が大きくなると推測された。試験体自体は全体的に下にたわみ、直交層ラミナに、試験体左側は矩形断面の左下がり、試験体右側は矩形断面の右下がりの向きに圧縮力が働いているようである。この力が層内せん断破壊を起こす要因ではないかと考えられた。面外曲げ試験における破壊形態は、ほとんどが曲げであるが、せん断破壊と曲げ破壊のどちらが起こるか、その境界点について、ひずみデータなどを収集し、引き続き検討する必要がある。

文献

1.2.1-1) 久保島吉貴：未発表資料

1.2.2 薄いラミナを使用した場合

a. 試験方法

初めに、本試験に用いた CLT の概要を表 1.2.2-1 に示す。

表 1.2.2-1 試験体概要

等級・構成	幅(mm)	厚さ(mm)	長さ(mm)	幅はぎ接着	ラミナ幅(mm)	試験体数
Mx60-3-3	300	90	2000	なし	105mm	強軸 9 体 弱軸 6 体
Mx60-5-5	300	100	2300	なし	105mm	強軸 6 体 弱軸 6 体
Mx60-7-7	300	140	3220	なし	105mm	強軸 6 体 弱軸 6 体
Mx60-9-9	300	180	4240	なし	105mm	強軸 6 体 弱軸 6 体

各試験体について、事前に縦振動法により縦弾性係数を、たわみ振動法により面内および面外方向における曲げヤング係数、せん断弾性係数をそれぞれ測定した。

曲げ試験は、実大強度試験機（(株)島津製作所製、最大能力 250kN）を用いて行い、加力方式は 3 等分点 4 点荷重方式、曲げスパンは試験体厚さの 21 倍とした。加圧板幅は 150mm。



写真 1.2.2-1 非破壊試験の様子



写真 1.2.2-2 曲げ試験の様子

b. 結果および考察

試験結果を表 1.2.2-2～表 1.2.2-9 に示す。

表 1.2.2-2 面外曲げ試験結果 (Mx60-9-9 強軸)

番号	密度 (kg/m ³)	E _{fr}	E _{TGHf}	G _{TGHf}	E _{TGHe}	G _{TGHe}	E	σ	含水率 (%)
208-1	415	3.95	5.12	0.29	3.99	0.85	4.94	19.3	10.4
-2	413	4.25	5.16	0.30	4.07	0.94	5.03	21.4	10.6
-3	415	3.84	5.07	0.28	3.72	0.93	5.07	21.7	11.3
-4	420	3.38	5.18	0.30	3.78	0.91	5.16	21.2	9.9
-5	426	4.10	5.32	0.32	4.18	0.95	5.32	19.4	10.8
-6	414	4.05	5.13	0.30	4.04	0.89	4.91	18.8	10.2
平均値	417	3.93	5.16	0.30	3.96	0.91	5.07	20.3	10.5
最小値	413	3.38	5.07	0.28	3.72	0.85	4.91	18.8	9.9
最大値	426	4.25	5.32	0.32	4.18	0.95	5.32	21.7	11.3
標準偏差	4.84	0.30	0.08	0.01	0.18	0.04	0.15	1.3	0.5
変動係数	1.16	7.75	1.61	3.94	4.42	4.25	2.99	6.25	4.38

表 1.2.2-3 面外曲げ試験結果 (Mx60-9-9 弱軸)

番号	密度 (kg/m ³)	E _{fr}	E _{TGHf}	G _{TGHf}	E _{TGHe}	G _{TGHe}	E	σ	含水率 (%)
209-1	401	3.24	2.85	0.23	3.20	0.93	2.44	11.6	9.9
-2	411	2.75	2.03	0.28	2.90	0.89	1.97	10.7	9.7
-3	403	2.88	2.35	0.21	2.86	0.92	1.98	11.6	9.6
-4	402	3.19	2.85	0.21	3.21	0.92	2.41	11.5	9.6
-5	400	2.81	2.40	0.23	2.87	0.93	2.16	10.2	9.6
-6	405	3.22	2.39	0.24	3.21	0.90	2.16	10.7	9.7
平均値	404	3.01	2.48	0.23	3.04	0.91	2.19	11.1	9.7
最小値	400	2.75	2.03	0.21	2.86	0.89	1.97	10.2	9.6
最大値	411	3.24	2.85	0.28	3.21	0.93	2.44	11.6	9.9
標準偏差	4.04	0.23	0.32	0.03	0.18	0.02	0.20	0.6	0.1
変動係数	1.00	7.47	12.82	10.97	5.90	1.76	9.26	5.39	1.27

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)

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

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

E : 強度試験で得られた弾性係数 (単位 kN/mm²)

σ : 強度試験で得られた強さ (単位 N/mm²)

表 1.2.2-4 面外曲げ試験結果 (Mx60-7-7 強軸)

番号	密度 (kg/m ³)	E _{fr}	E _{TGHf}	G _{TGHf}	E _{TGHe}	G _{TGHe}	E	σ	含水率 (%)
2051-1	413	4.29	6.05	0.27	4.35	0.90	5.62	25.5	9.8
-2	421	4.41	6.11	0.29	4.41	0.95	5.65	25.9	10.3
-3	415	4.31	6.07	0.30	4.31	0.86	5.76	23.5	10.3
-4	413	4.28	5.58	0.30	3.93	0.88	5.27	19.9	10.1
-5	421	4.11	5.70	0.31	4.18	0.90	5.59	22.8	10.3
-6	420	4.10	5.65	0.30	3.95	0.98	5.54	21.0	9.7
平均値	417	4.25	5.86	0.29	4.19	0.91	5.57	23.1	10.1
最小値	413	4.10	5.58	0.27	3.93	0.86	5.27	19.9	9.7
最大値	421	4.41	6.11	0.31	4.41	0.98	5.76	25.9	10.3
標準偏差	4.03	0.12	0.24	0.01	0.21	0.05	0.17	2.4	0.3
変動係数	0.97	2.85	4.09	5.04	4.94	4.95	2.96	10.34	2.49

表 1.2.2-5 面外曲げ試験結果 (Mx60-7-7 弱軸)

番号	密度 (kg/m ³)	E _{fr}	E _{TGHf}	G _{TGHf}	E _{TGHe}	G _{TGHe}	E	σ	含水率 (%)
2061-1	413	2.99	1.94	0.20	2.79	0.83	1.95	10.8	9.8
-2	408	2.85	1.86	0.19	2.96	0.82	1.77	11.0	9.1
-3	406	4.82	1.62	0.26	2.43	0.92	1.66	10.1	9.9
-4	419	2.51	1.65	0.24	2.46	0.92	1.61	13.0	10.1
-5	418	2.77	1.66	0.24	2.82	0.85	1.74	11.5	9.8
-6	419	2.61	1.96	0.22	2.52	1.01	1.88	10.8	9.5
平均値	414	3.09	1.78	0.23	2.66	0.89	1.77	11.2	9.7
最小値	406	2.51	1.62	0.19	2.43	0.82	1.61	10.1	9.1
最大値	419	4.82	1.96	0.26	2.96	1.01	1.95	13.0	10.1
標準偏差	5.68	0.86	0.15	0.03	0.22	0.07	0.13	1.0	0.4
変動係数	1.37	27.97	8.70	11.55	8.34	7.90	7.29	8.84	3.65

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)E_{TGHe} : たわみ振動法による面内方向の曲げヤング係数 (単位 kN/mm²)G_{TGHe} : たわみ振動法による面内方向のせん断弾性係数 (単位 kN/mm²)E : 強度試験で得られた弾性係数 (単位 kN/mm²) σ : 強度試験で得られた強さ (単位 N/mm²)

表 1.2.2-6 面外曲げ試験結果 (Mx60-5-5 強軸)

番号	密度 (kg/m ³)	E _{fr}	E _{TGHf}	G _{TGHf}	E _{TGHe}	G _{TGHe}	E	σ	含水率 (%)
2021-1	412	1.07	6.61	0.29	4.45	0.93	6.03	21.9	10.2
-2	411	1.08	6.64	0.28	4.65	0.92	6.20	29.2	9.3
-3	427	1.09	6.49	0.30	4.53	0.97	6.09	26.8	9.7
-4	415	1.03	6.25	0.28	4.24	0.96	5.66	24.5	9.5
-5	406	1.01	5.82	0.28	4.25	0.97	5.35	23.1	10.2
-6	406	1.07	6.59	0.27	4.92	0.91	6.33	25.5	9.4
平均値	413	1.06	6.40	0.28	4.51	0.94	5.94	25.2	9.7
最小値	406	1.01	5.82	0.27	4.24	0.91	5.35	21.9	9.3
最大値	427	1.09	6.64	0.30	4.92	0.97	6.33	29.2	10.2
標準偏差	7.91	0.03	0.32	0.01	0.26	0.03	0.37	2.6	0.4
変動係数	1.92	2.95	4.96	3.72	5.72	2.88	6.19	10.43	3.87

表 1.2.2-7 面外曲げ試験結果 (Mx60-5-5 弱軸)

番号	密度 (kg/m ³)	E _{fr}	E _{TGHf}	G _{TGHf}	E _{TGHe}	G _{TGHe}	E	σ	含水率 (%)
2031-1	411	2.60	1.52	0.17	2.68	0.85	1.47	11.1	10.3
-2	410	0.74	1.52	0.19	2.49	0.89	1.36	10.1	10.1
-3	402	2.46	1.34	0.24	2.43	0.89	1.38	10.2	10.5
-4	405	1.37	1.33	0.19	2.27	0.91	1.28	9.3	10.1
-5	398	1.38	1.32	0.20	2.32	0.92	1.24	9.9	9.7
-6	402	1.42	1.34	0.20	2.42	0.86	1.28	10.4	10.3
平均値	404	1.66	1.40	0.20	2.44	0.89	1.34	10.2	10.2
最小値	398	0.74	1.32	0.17	2.27	0.85	1.24	9.3	9.7
最大値	411	2.60	1.52	0.24	2.68	0.92	1.47	11.1	10.5
標準偏差	5.09	0.72	0.10	0.02	0.14	0.03	0.08	0.6	0.3
変動係数	1.26	43.32	6.88	10.84	5.89	3.01	6.35	5.82	2.46

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)E_{TGHe} : たわみ振動法による面内方向の曲げヤング係数 (単位 kN/mm²)G_{TGHe} : たわみ振動法による面内方向のせん断弾性係数 (単位 kN/mm²)E : 強度試験で得られた弾性係数 (単位 kN/mm²) σ : 強度試験で得られた強さ (単位 N/mm²)

表 1.2.2-8 面外曲げ試験結果 (Mx60-3-3 強軸)

番号	密度 (kg/m ³)	E _{fr}	E _{TGHf}	G _{TGHf}	E _{TGHe}	G _{TGHe}	E	σ	含水率 (%)
3011-1	403	4.86	6.66	0.27	4.97	0.96	6.18	29.0	9.2
-2	407	4.33	6.76	0.27	5.08	0.93	6.44	26.9	8.5
-3	407	5.64	7.64	0.26	5.56	0.91	7.22	31.6	10.0
-4	397	1.13	6.75	0.29	4.91	0.85	6.56	31.0	9.9
-5	405	5.73	7.89	0.23	5.53	0.85	7.38	35.8	10.4
-6	392	2.13	7.04	0.23	5.18	0.83	6.63	29.2	10.4
3021-7	403	4.90	6.75	0.20	4.61	0.89	6.14	31.2	10.0
-8	405	6.24	8.77	0.20	6.09	0.83	7.69	26.6	9.4
-9	399	5.47	7.68	0.19	5.36	0.85	6.90	32.1	9.5
平均値	402	4.49	7.33	0.24	5.25	0.88	6.79	30.38	9.71
最小値	392	1.13	6.66	0.19	4.61	0.83	6.14	26.60	8.54
最大値	407	6.24	8.77	0.29	6.09	0.96	7.69	35.80	10.42
標準偏差	5.08	1.73	0.72	0.04	0.44	0.05	0.54	2.84	0.61
変動係数	1.26	38.60	9.82	15.50	8.35	5.40	7.98	9.35	6.30

表 1.2.2-9 面外曲げ試験結果 (Mx60-3-3 弱軸)

番号	密度 (kg/m ³)	E _{fr}	E _{TGHf}	G _{TGHf}	E _{TGHe}	G _{TGHe}	E	σ	含水率 (%)
3021-1	386	2.17	1.54	0.13	2.16	0.69	0.57	4.8	10.1
-2	398	1.94	1.47	0.11	2.03	0.73	0.50	5.0	10.9
-3	379	0.68	1.32	0.13	1.96	0.62	0.50	4.5	10.6
-4	395	1.79	1.27	0.13	1.77	0.77	0.45	4.0	10.5
-5	387	1.96	1.34	0.13	1.74	0.75	0.48	4.3	10.0
-6	393	1.97	1.66	0.10	2.11	0.64	0.46	5.1	10.3
平均値	390	1.75	1.43	0.12	1.96	0.70	0.49	4.6	10.4
最小値	379	0.68	1.27	0.10	1.74	0.62	0.45	4.0	10.0
最大値	398	2.17	1.66	0.13	2.16	0.77	0.57	5.1	10.9
標準偏差	7.06	0.54	0.15	0.01	0.17	0.06	0.04	0.4	0.3
変動係数	1.81	30.73	10.40	11.60	8.86	8.68	8.66	9.23	3.02

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)E_{TGHe} : たわみ振動法による面内方向の曲げヤング係数 (単位 kN/mm²)G_{TGHe} : たわみ振動法による面内方向のせん断弾性係数 (単位 kN/mm²)E : 強度試験で得られた弾性係数 (単位 kN/mm²) σ : 強度試験で得られた強さ (単位 N/mm²)

次に、荷重－変位曲線を図 1.2.2-1、図 1.2.2-2 に、破壊形態を写真 1.2.2-3、写真 1.2.2-4 にそれぞれ示す。

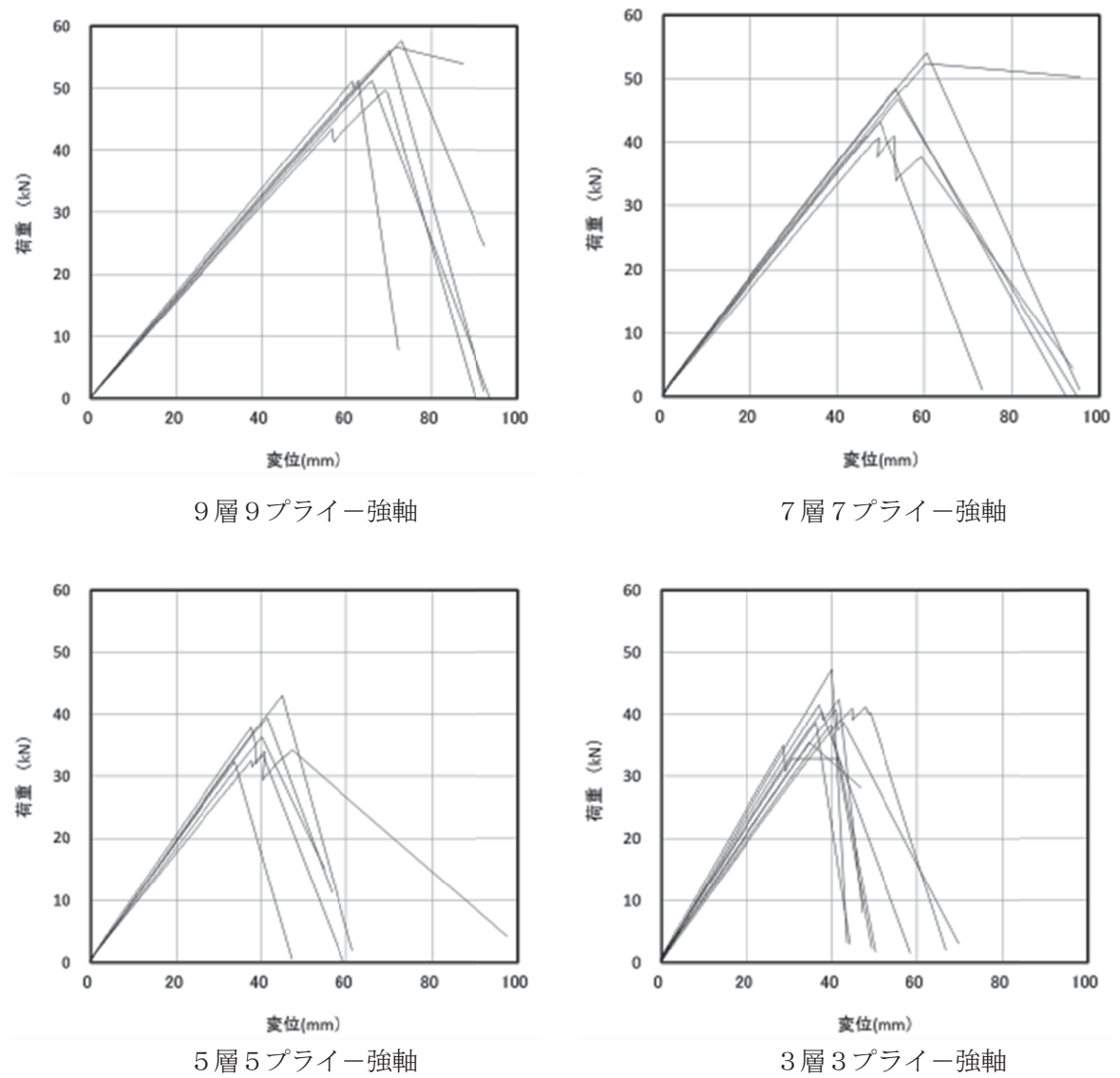
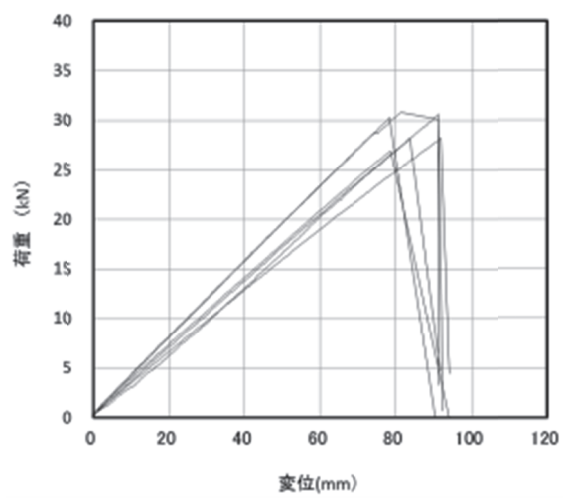
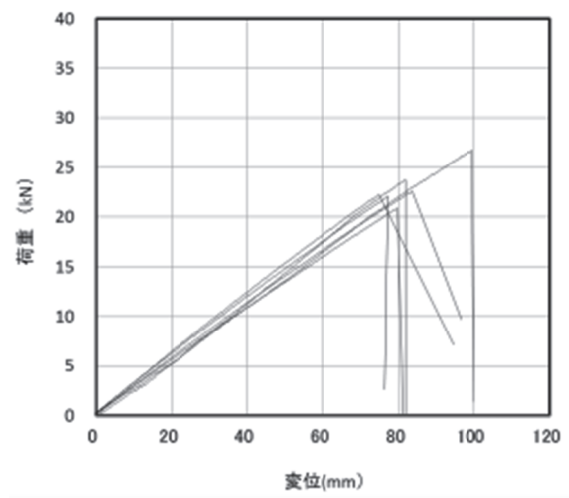


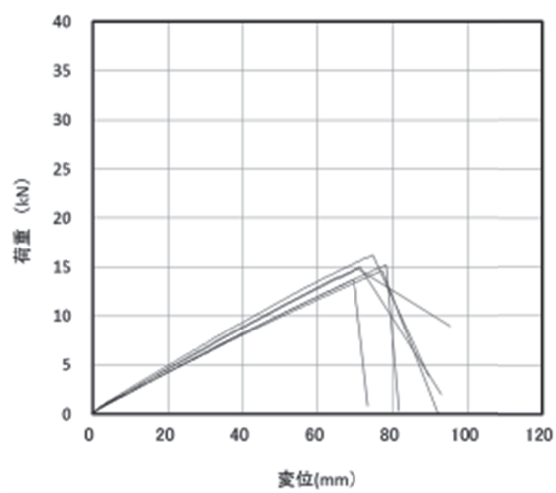
図 1.2.2-1 荷重－変位曲線（強軸試験体）



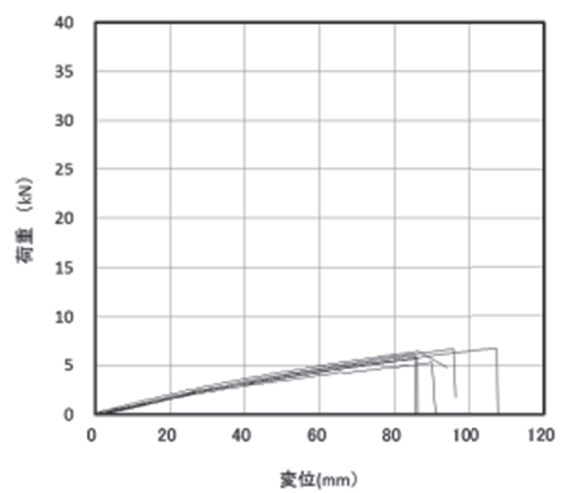
9層9プライー弱軸



7層7プライー弱軸



5層5プライー弱軸



3層3プライー弱軸

図 1.2.2-2 荷重－変位曲線（弱軸試験体）



9層9プライー強軸



7層7プライー強軸



5層5プライー強軸



3層3プライー強軸

写真 1.2.2-3 破壊形態（強軸試験体）



9層9プライー弱軸



7層7プライー弱軸



5層5プライー弱軸



3層3プライー弱軸

写真 1.2.2-4 破壊形態（弱軸試験体）

非破壊試験と曲げ試験の結果の関係を図 1.2.2-3～図 1.2.2-6 に示す。縦振動法による縦弾性係数は、曲げ試験によるヤング係数よりも、強軸試験体では低く、弱軸試験体では高い評価になった。これはたわみ振動法による面内方向の曲げヤング係数でも同じ傾向であった。一方で、たわみ振動法による面外方向の曲げヤング係数は、曲げ試験による曲げヤング係数と同程度の評価ができていた。

曲げ試験による曲げヤング係数と曲げ強さの関係を図 1.2-10 に示す。本試験において、両者に相関は認められなかった。

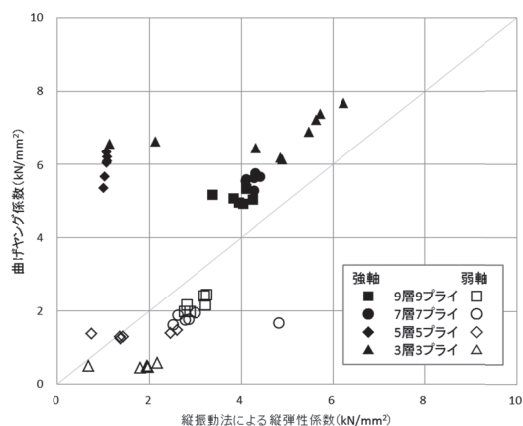


図 1.2.2-3 縦振動法による縦弾性係数と曲げ試験によるヤング係数との関係

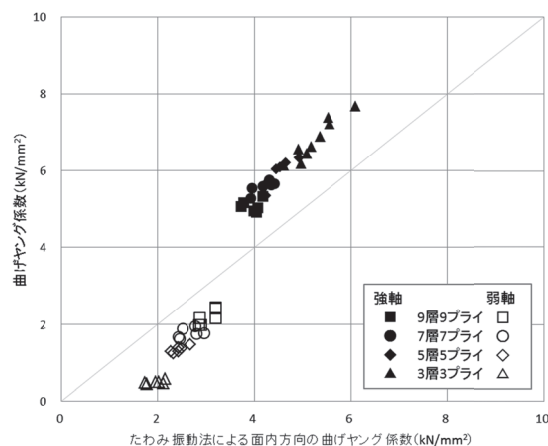


図 1.2.2-4 たわみ振動法によるヤング係数(面内)と曲げ試験によるヤング係数との関係

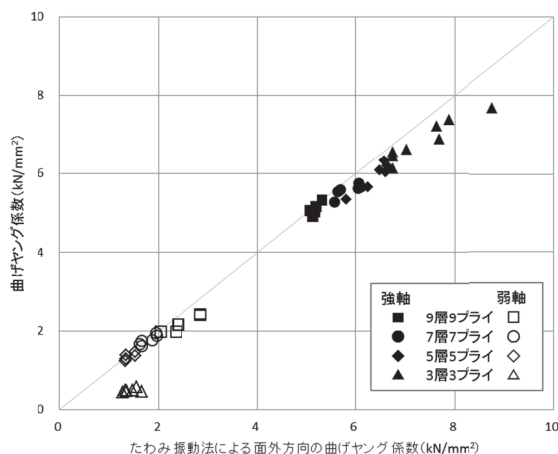


図 1.2.2-5 たわみ振動法によるヤング係数(面外)と曲げ試験によるヤング係数との関係

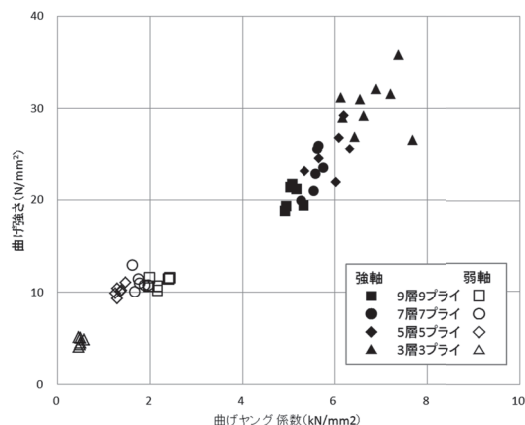


図 1.2.2-6 曲げ試験によるヤング係数と曲げ強さとの関係

1.2.3 まとめ

厚さの異なるラミナ（42mm、38.7mm、30mm、20mm）を用いて3層3プライ、5層5プライ、7層7プライ、9層9プライのCLTを製造し、その曲げ強度を明らかにした。また、これらの製造に用いたラミナの曲げ試験を行ってその強度性能を明らかにした。

図 1.2.3-1 に、厚さの異なるラミナの曲げヤング係数（MOE）と曲げ強度（MOR）の回帰式を示す。ラミナ厚さが厚くなるにつれて、MOE と MOR の回帰式は下方に移動しており、同じ曲げヤング係数であれば曲げ強度が低くなる傾向を示した。

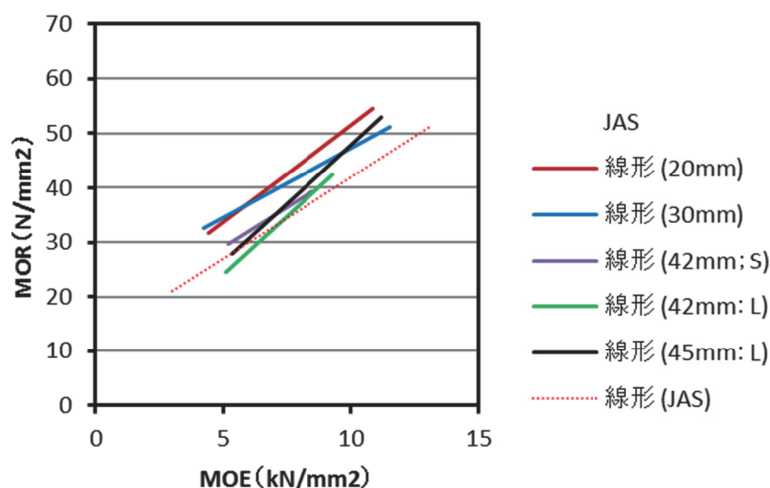


図 1.2.3-1 厚さの異なるラミナの曲げヤング係数と曲げ強度の関係

一方、ラミナの曲げ強度から告示式により推定した CLT の曲げ強度と実験値の関係を図 1.2.3-2 に示す。推定値と実験値の関係は、ラミナ厚さに関係なくほぼ 1 : 1 の関係であった。

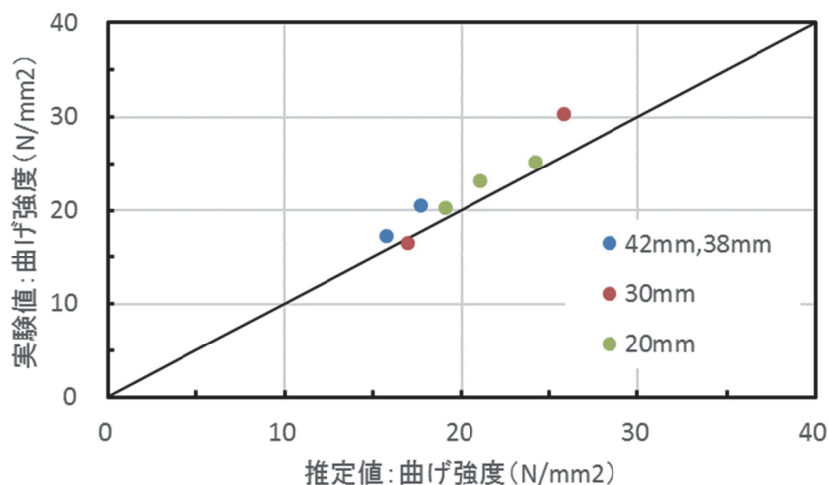


図 1.2.3-2 推定値と実験値の関係

ラミナ厚さが厚くなるとラミナの曲げ強度が低下するが、ラミナ強度から推定された強度と実験で得た曲げ強度の関係には影響がないことから、ラミナ強度の品質管理を十分行うことで告示で与えられる基準強度を満たすことができると考えられる。

1.3 面外せん断性能

1.3.1 はじめに

CLTのJASに準拠し、短スパンでの中央集中1点式（水平せん断式）載荷試験を実施する。試験体一覧を表1.3.1に示す。

1.3.2 試験体・載荷方法

水平せん断式載荷は、直交集成板のJASに準拠した短スパンの中央集中1点式で、支点間距離はいずれも試験体厚の5倍とし、面外方向に載荷した。試験体は、各層構成ともラミナ厚30mmを標準とし、それより薄いラミナ（20mm）および厚いラミナ（38.57、42、45mm）が、面外方向に加力した際のせん断強度に与える影響について比較する。

加圧板の幅は、原則として試験体に実際に接している幅が、試験体の厚さ(d)と同じとした。このため、せん断スパン比（支点部加圧板端部－加力点加圧板端部間の距離を試験体厚さで除したもの）はほぼ1.50で統一されている。

表1.3.1 試験体一覧

強度等級・層構成	ラミナ幅 (mm)	ラミナ厚 (mm)	外層ラミナ	試験体数	水平式サイズ (mm)	上加圧板幅 (mm) *2	せん断スパン比 *3
Mx60-3-3	105	30	強軸	6	d90-W300-L650	88	1.51
	175*1	45	強軸	4	d135-W300-L945	140	1.50
Mx60-5-5	105	20	強軸	4	d100-W300-L700	105	1.48
			弱軸	4	d100-W300-L700	105	1.48
	175*1	42	強軸	6	d210-W300-L1,470	210	1.50
			弱軸	6	d210-W300-L1,470	210	1.50
Mx60-7-7	105	20	強軸	6	d140-W300-L980	140	1.50
			弱軸	6	d140-W300-L980	140	1.50
	175*1	38.57	強軸	6	d270-W300-L1,890	266	1.51
			弱軸	6	d270-W300-L1,890	266	1.51
Mx60-9-9	105	20	強軸	6	d180-W300-L1,260	175	1.50
			弱軸	6	d180-W300-L1,260	175	1.50
	105	30	強軸	6	d270-W300-L1,890	270	1.50
			弱軸	6	d270-W300-L1,890	270	1.50

*1 幅はぎ接着をして、ラミナ幅175mmを製造した。

*2 加圧板幅とは、実際に試験体に接している幅。面取り部を含まない。

*3 せん断スパン比とは、（加圧板端部間距離）／（試験体厚さ）。

1.3.3 非破壊試験結果

非破壊試験の結果一覧を表1.3.2～1.3.15に示す。

表1.3.2 3層3プライーラミナ厚30mm一強軸試験体非破壊試験結果一覧

試験体名	密度 (kg/m ³)	E _{fr}	E _{TGHf}	G _{TGHf}	含水率 (%)
3011-1	388	4.86	5.95	0.30	9.53
3011-2	399	5.20	6.08	0.28	10.15
3011-3	412	5.81	7.20	0.34	10.03
3011-4	402	5.71	6.34	0.31	10.96
3011-5	397	5.65	6.93	0.29	9.07
3011-6	399	5.67	7.16	0.29	9.11
平均値	400	5.48	6.61	0.30	9.81
最小値	388	4.86	5.95	0.28	9.07
最大値	412	5.81	7.20	0.34	10.96
標準偏差	8	0.37	0.56	0.02	0.72
変動係数	2.0	6.8	8.4	6.8	7.35

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)

表1.3.3 3層3プライーラミナ厚45mm一強軸試験体非破壊試験結果一覧

試験体名	密度 (kg/m ³)	E _{fr}	E _{TGHf}	G _{TGHf}	含水率 (%)
45B2-1	422	6.09	6.69	0.29	7.13
45B2-2	419	6.01	6.17	0.28	7.43
45B2-3	416	6.12	6.25	0.32	8.17
45B2-4	418	6.01	6.25	0.28	7.51
平均値	419	6.06	6.34	0.29	7.56
最小値	416	6.01	6.17	0.28	7.13
最大値	422	6.12	6.69	0.32	8.17
標準偏差	2	0.05	0.24	0.02	0.44
変動係数	0.6	0.9	3.7	6.0	5.77

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)

表1.3.4 5層5プライーラミナ厚20mmー強軸試験体非破壊試験結果一覧

試験体名	密度 (kg/m ³)	E _{fr}	E _{TGHf}	G _{TGHf}	含水率 (%)
2021-1	426	4.74	6.22	0.30	9.92
2021-2	425	4.83	6.19	0.29	—
2021-3	393	4.57	6.04	0.30	9.92
2021-4	402	4.38	5.58	0.25	10.26
平均値	412	4.63	6.01	0.29	10.04
最小値	393	4.38	5.58	0.25	9.92
最大値	426	4.83	6.22	0.30	10.26
標準偏差	17	0.20	0.29	0.02	0.20
変動係数	4.0	4.3	4.9	8.3	1.96

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)

表1.3.5 5層5プライーラミナ厚20mmー弱軸試験体非破壊試験結果一覧

試験体名	密度 (kg/m ³)	E _{fr}	E _{TGHf}	G _{TGHf}	含水率 (%)
2031-1	399	2.65	1.53	0.17	9.67
2031-2	408	2.84	1.62	0.18	9.60
2031-3	399	2.51	1.50	0.17	10.78
2031-4	402	2.63	1.49	0.16	10.17
平均値	402	2.66	1.53	0.17	10.06
最小値	399	2.51	1.49	0.16	9.60
最大値	408	2.84	1.62	0.18	10.78
標準偏差	4	0.14	0.06	0.01	0.54
変動係数	1.0	5.1	3.7	4.1	5.39

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)

表1.3.6 5層5プライーラミナ厚42mmー強軸試験体非破壊試験結果一覧

試験体名	密度 (kg/m ³)	E _{fr}	E _{TGHf}	G _{TGHf}	含水率 (%)
421-1	396	4.50	5.72	0.25	9.18
421-2	403	4.41	5.04	0.25	9.37
421-3	391	4.35	5.42	0.26	10.12
422-4	399	4.87	5.69	0.24	9.41
422-5	410	5.22	6.44	0.24	9.15
422-6	412	4.54	5.21	0.25	8.92
平均値	402	4.65	5.59	0.25	9.36
最小値	391	4.35	5.04	0.24	8.92
最大値	412	5.22	6.44	0.26	10.12
標準偏差	8	0.33	0.50	0.01	0.41
変動係数	2.0	7.2	8.9	3.1	4.40

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)

表1.3.7 5層5プライーラミナ厚42mmー弱軸試験体非破壊試験結果一覧

試験体名	密度 (kg/m ³)	E _{fr}	E _{TGHf}	G _{TGHf}	含水率 (%)
422-1	395	2.68	1.34	0.16	8.95
422-2	391	2.68	1.45	0.17	9.12
422-3	397	2.68	1.53	0.20	9.00
421-4	403	3.30	1.75	0.17	8.95
421-5	406	2.88	1.53	0.18	8.87
421-6	405	2.90	1.53	0.18	9.37
平均値	399	2.85	1.52	0.18	9.21
最小値	391	2.68	1.34	0.16	8.95
最大値	406	3.30	1.75	0.20	9.87
標準偏差	6	0.24	0.13	0.01	0.36
変動係数	1.5	8.5	8.8	7.3	3.89

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)

表1.3.8 7層7プライーラミナ厚20mmー強軸試験体非破壊試験結果一覧

試験体名	密度 (kg/m ³)	E _{fr}	E _{TGHf}	G _{TGHf}	含水率 (%)
2051-1	416	4.35	5.42	0.27	10.60
2051-2	422	4.15	5.45	0.26	10.56
2051-3	414	4.50	6.61	0.25	10.67
2051-4	409	4.31	5.95	0.26	10.57
2051-5	418	4.31	6.33	0.28	10.24
2051-6	422	4.12	5.92	0.29	10.25
平均値	417	4.29	5.95	0.27	10.48
最小値	409	4.12	5.42	0.25	10.24
最大値	422	4.50	6.61	0.29	10.67
標準偏差	5	0.14	0.47	0.01	0.19
変動係数	1.2	3.2	7.9	4.7	1.79

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)

表1.3.9 7層7プライーラミナ厚20mmー弱軸試験体非破壊試験結果一覧

試験体名	密度 (kg/m ³)	E _{fr}	E _{TGHf}	G _{TGHf}	含水率 (%)
2061-1	410	3.03	1.96	0.19	9.85
2061-2	410	2.80	1.69	0.20	9.79
2061-3	406	2.76	1.85	0.19	9.92
2061-4	395	2.53	1.69	0.17	9.97
2062-1	398	2.85	1.73	0.17	9.34
2062-2	417	2.54	1.78	0.21	10.74
平均値	406	2.75	1.78	0.19	9.94
最小値	395	2.53	1.69	0.17	9.34
最大値	417	3.03	1.96	0.21	10.74
標準偏差	8	0.19	0.10	0.1	0.46
変動係数	2.0	6.9	5.8	7.6	4.59

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)

表1.3.10 7層7プライーラミナ厚38.57mm—強軸試験体非破壊試験結果一覧

試験体名	密度 (kg/m ³)	E _{fr}	E _{TGHf}	G _{TGHf}	含水率 (%)
381-1	405	4.56	5.78	0.24	9.22
381-2	412	4.64	6.06	0.25	10.21
381-3	403	4.71	6.05	0.26	9.52
381-4	407	4.71	5.82	0.25	10.50
381-5	404	4.50	5.59	0.23	9.83
381-6	405	4.41	5.44	0.25	10.00
平均値	406	4.59	5.79	0.25	9.88
最小値	403	4.41	5.44	0.23	9.22
最大値	412	4.71	6.06	0.26	10.50
標準偏差	3	0.12	0.25	0.01	0.47
変動係数	0.8	2.6	4.3	4.1	4.71

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)

表1.3.11 7層7プライーラミナ厚38.57mm—弱軸試験体非破壊試験結果一覧

試験体名	密度 (kg/m ³)	E _{fr}	E _{TGHf}	G _{TGHf}	含水率 (%)
382-1	403	3.13	2.19	0.20	9.25
382-2	400	3.24	2.22	0.18	9.32
382-3	400	3.03	2.11	0.20	9.33
382-4	400	3.11	2.23	0.20	9.95
382-5	406	2.95	2.12	0.18	9.93
382-6	402	3.11	2.16	0.18	9.77
平均値	402	3.10	2.17	0.19	9.5974
最小値	400	2.95	2.11	0.18	9.25
最大値	406	3.24	2.23	0.20	9.95
標準偏差	2	0.10	0.05	0.01	0.33
変動係数	0.6	3.1	2.2	5.0	3.39

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)

表1.3.12 9層9プライーラミナ厚20mmー強軸試験体非破壊試験結果一覧

試験体名	密度 (kg/m ³)	E _{fr}	E _{TGHf}	G _{TGHf}	含水率 (%)
208-1	416	3.97	5.22	0.26	9.52
208-2	418	4.22	5.39	0.26	9.71
208-3	419	3.71	4.83	0.29	10.38
208-4	429	4.17	5.72	0.29	9.96
208-5	435	4.28	5.92	0.29	9.72
208-6	418	4.19	5.53	0.29	9.67
平均値	423	4.09	5.44	0.28	9.83
最小値	416	3.71	4.83	0.26	9.52
最大値	435	4.28	5.92	0.29	10.38
標準偏差	8	0.21	0.38	0.01	0.30
変動係数	1.8	5.2	7.1	4.8	3.10

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)

表1.3.13 9層9プライーラミナ厚20mmー弱軸試験体非破壊試験結果一覧

試験体名	密度 (kg/m ³)	E _{fr}	E _{TGHf}	G _{TGHf}	含水率 (%)
209-1	414	3.28	2.65	0.22	10.20
209-2	426	2.63	2.06	0.22	9.49
209-3	413	2.63	1.90	0.22	9.54
209-4	414	2.90	2.41	0.22	9.84
209-5	416	2.98	2.38	0.21	9.68
209-6	411	2.99	2.30	0.21	8.93
平均値	416	2.90	2.28	0.22	9.61
最小値	411	2.63	1.90	0.21	8.93
最大値	426	3.28	2.65	0.22	10.20
標準偏差	5	0.25	0.27	0.01	0.42
変動係数	1.3	8.5	11.7	2.6	4.38

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)

表1.3.14 9層9プライーラミナ厚30mm－強軸試験体非破壊試験結果一覧

試験体名	密度 (kg/m ³)	E _{fr}	E _{TGHf}	G _{TGHf}	含水率 (%)
306-1	399	3.54	4.40	0.24	10.27
306-2	402	3.59	4.52	0.24	9.58
306-3	400	3.59	4.67	0.21	9.72
306-4	399	3.61	4.43	0.23	10.25
306-5	401	3.72	4.85	0.23	10.23
306-6	395	3.80	4.74	0.22	10.37
平均値	399	3.64	4.60	0.23	10.07
最小値	395	3.54	4.40	0.21	9.58
最大値	402	3.80	4.85	0.24	10.37
標準偏差	2	0.10	0.18	0.01	0.33
変動係数	0.6	2.7	3.9	6.1	3.28

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)

表1.3.15 9層9プライーラミナ厚30mm－弱軸試験体非破壊試験結果一覧

試験体名	密度 (kg/m ³)	E _{fr}	E _{TGHf}	G _{TGHf}	含水率 (%)
307-1	404	2.56	2.00	0.17	10.21
307-2	402	2.61	2.01	0.19	9.24
307-3	400	2.57	2.01	0.19	8.85
307-4	395	2.69	1.99	0.16	9.69
307-5	400	2.69	1.96	0.20	9.03
307-6	408	2.76	2.13	0.19	9.49
平均値	402	2.65	2.02	0.18	9.42
最小値	395	2.56	1.96	0.16	8.85
最大値	408	2.76	2.13	0.20	10.21
標準偏差	4	0.08	0.06	0.01	0.49
変動係数	1.1	3.0	2.9	8.0	5.24

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)

1.3.4 水平式せん断載荷 試験結果

水平せん断式載荷試験結果を表1.3.16～1.3.19に、試験体のせん断力－変位曲線を図-1.3.1～1.3.14に示す。また強軸試験体における最終破壊性状の例を写真1.3.1～1.3.14に示す。

表1.3.16 3層3プライ試験結果一覧

試験体名	強度等級・層構成	ラミナ厚 (mm)	外層ラミナ	せん断面積 (mm ²)	最大荷重 (kN)	せん断強さ* (N/mm ²)	Av.	破壊性状*
3011-1	Mx60-3-3	30	強軸	27,000	(97.15)	(2.70)	2.82	B
3011-2					104.16	2.89		S
3011-3					109.82	3.05		S
3011-4					97.35	2.70		S
3011-5					101.94	2.83		S
3011-6					99.17	2.75		S
45B2-1	Mx60-3-3	45	強軸	40,500	133.77	2.48	2.43	S
45B2-2					120.02	2.22		S
45B2-3					142.99	2.65		S
45B2-4					127.06	2.35		S

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

表1.3.17 5層5プライ試験結果一覧

試験体名	強度等級・層構成	ラミナ厚 (mm)	外層ラミナ	せん断面積 (mm ²)	最大荷重 (kN)	せん断強さ* (N/mm ²)	Av.	破壊性状*
2021-1	Mx60-5-5	20	強軸	30,300	112.89	2.79	2.62	S
2021-2					118.66	2.94		S
2021-3					(92.14)	(2.28)		B
2021-4					99.04	2.45		S
2031-1	Mx60-5-5	20	弱軸	30,300	(44.15)	(1.09)	1.18	B
2031-2					(52.94)	(1.31)		B
2031-3					(42.03)	(1.04)		B
2031-4					(51.97)	(1.29)		B
421-1	Mx60-5-5	42	強軸	63,000	167.01	1.98	1.88	S
421-2					138.86	1.65		S
421-3					144.39	1.71		S
422-4					167.14	1.98		S
422-5					170.63	2.02		S
422-6					163.94	1.94		S
422-1	Mx60-5-5	42	弱軸	63,000	(82.59)	(1.13)	1.22	B
422-2					(94.06)	(1.29)		B
422-3					(90.34)	(1.24)		B
421-4					(99.11)	(1.36)		B
421-5					74.51	1.02		S
421-6					87.09	1.20		S

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

表1.3.18 7層7プライ試験結果一覧

試験 体名	強度等級 ・層構成	ラミナ 厚 (mm)	外層 ラミナ	せん断 面積 (mm ²)	最大荷重 (kN)	せん断 強さ* (N/mm ²)	Av.	破壊 性状*
2051-1	Mx60-7-7	20	強軸	42,300	128.07	2.27	2.39	S
2051-2					139.12	2.47		S
2051-3					131.40	2.33		S
2051-4					137.00	2.43		S
2051-5					142.67	2.53		S
2051-6					131.49	2.33		S
2061-1	Mx60-7-7	20	弱軸	42,300	(78.58)	(1.39)	(1.43)	B
2061-2					(76.11)	(1.35)		B
2061-3					(90.67)	(1.61)		B
2061-4					(68.09)	(1.21)		B
2062-1					(80.44)	(1.43)		B
2062-2					(88.39)	(1.57)		B
381-1	Mx60-7-7	38.57	強軸	81,000	180.82	1.67	1.72	S
381-2					188.12	1.74		S
381-3					188.83	1.74		S
381-4					182.90	1.69		S
381-5					192.97	1.78		S
381-6					181.83	1.68		S
382-1	Mx60-7-7	38.57	弱軸	81,000	125.01	1.15	1.17	S
382-2					130.39	1.20		S
382-3					122.37	1.13		S
382-4					128.00	1.18		S
382-5					123.67	1.14		S
382-6					132.08	1.22		S

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

表1.3.19 9層9プライ試験結果一覧

試験体名	強度等級・層構成	ラミナ厚 (mm)	外層ラミナ	せん断面積 (mm ²)	最大荷重 (kN)	せん断強さ* (N/mm ²)	Av.	破壊性状*
208-1	Mx60-9-9	20	強軸	54,000	(163.10)	(2.24)	2.19	B
208-2					(151.53)	(2.08)		B
208-3					161.30	2.22		S
208-4					163.00	2.24		S
208-5					152.44	2.09		S
208-6					(163.03)	(2.24)		B
209-1	Mx60-9-9	20	弱軸	54,000	(78.58)	(1.39)	1.43	B
209-2					(76.11)	(1.35)		B
209-3					(90.67)	(1.61)		B
209-4					(68.09)	(1.21)		B
209-1					80.44	1.43		S
209-2					88.39	1.57		S
306-1	Mx60-9-9	30	強軸	81,000	177.40	1.64	1.64	S
306-2					193.00	1.78		S
306-3					161.66	1.49		S
306-4					171.27	1.58		S
306-5					185.80	1.71		S
306-6					176.03	1.62		S
307-1	Mx60-9-9	30	弱軸	81,000	(131.30)	(1.21)	(1.17)	B
307-2					(127.49)	(1.18)		B
307-3					(135.83)	(1.25)		B
307-4					(107.77)	(0.99)		B
307-5					(126.54)	(1.17)		B
307-6					(131.66)	(1.21)		B

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

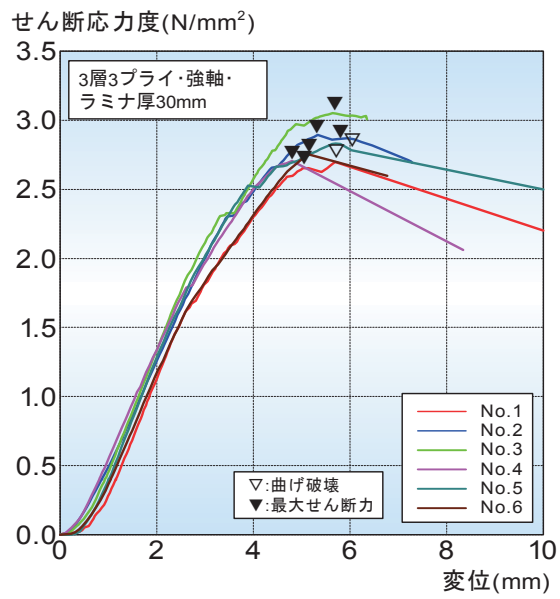


図1.3.1 せん断応力度－変位曲線
(3層3プライ・強軸・ラミナ厚30mm)

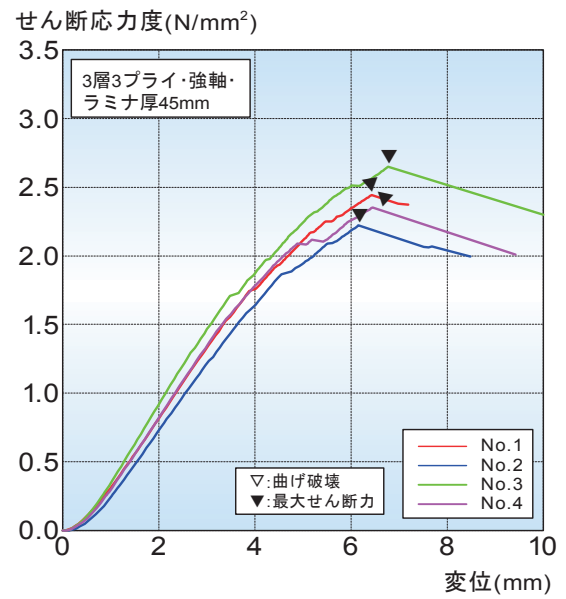


図1.3.2 せん断応力度－変位曲線
(3層3プライ・強軸・ラミナ厚45mm)

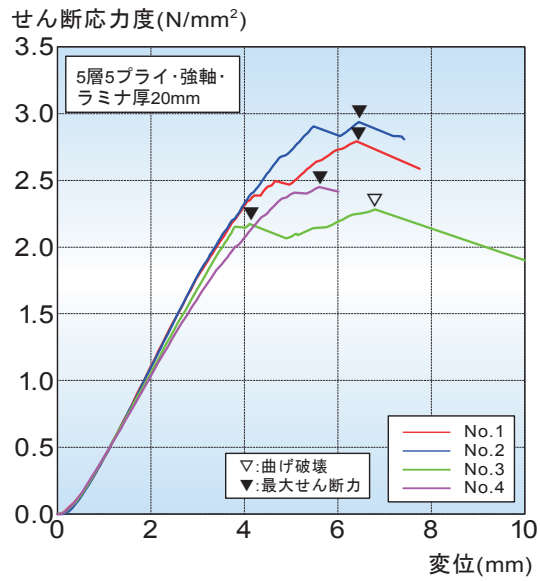


図1.3.3 せん断力-変位曲線
(5層5プライ・強軸・ラミナ厚20mm)

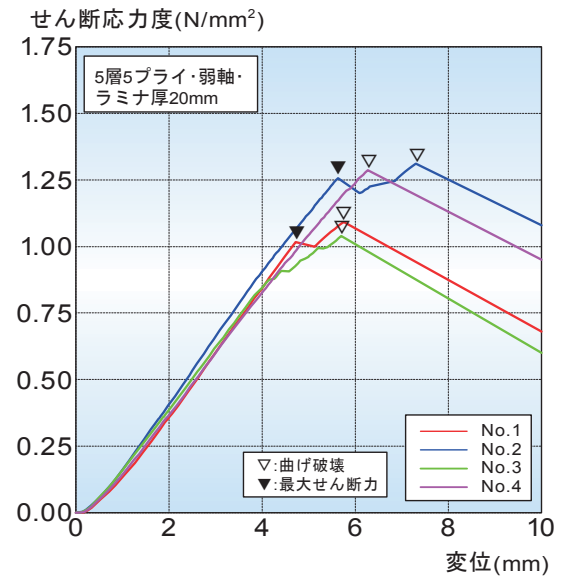


図1.3.4 せん断力-変位曲線
(5層5プライ・弱軸・ラミナ厚20mm)

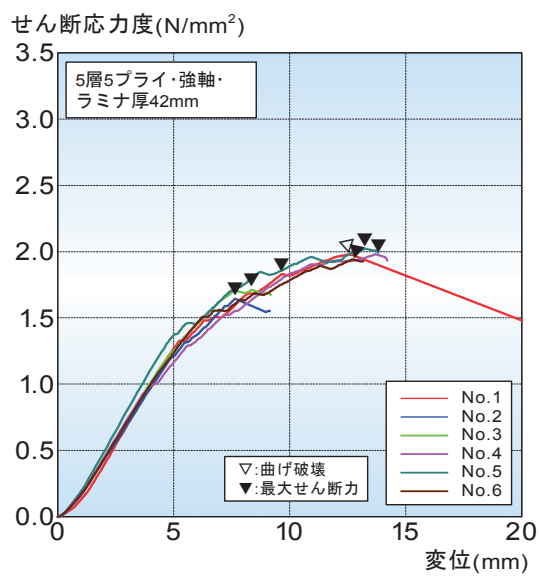


図1.3.5 せん断力-変位曲線
(5層5プライ・強軸・ラミナ厚42mm)

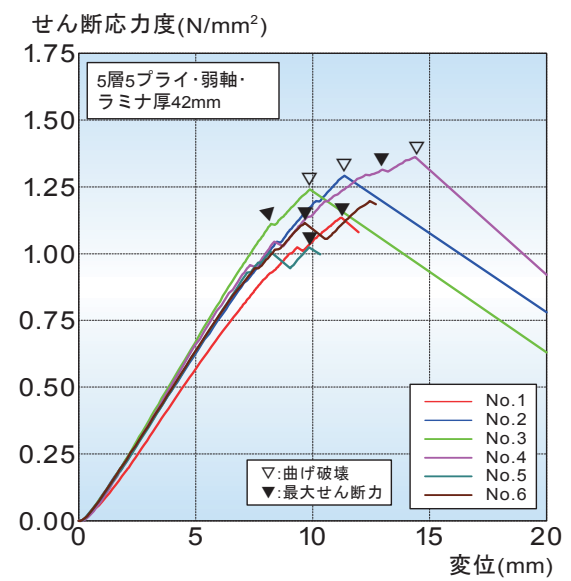


図1.3.6 せん断力-変位曲線
(5層5プライ・弱軸・ラミナ厚42mm)

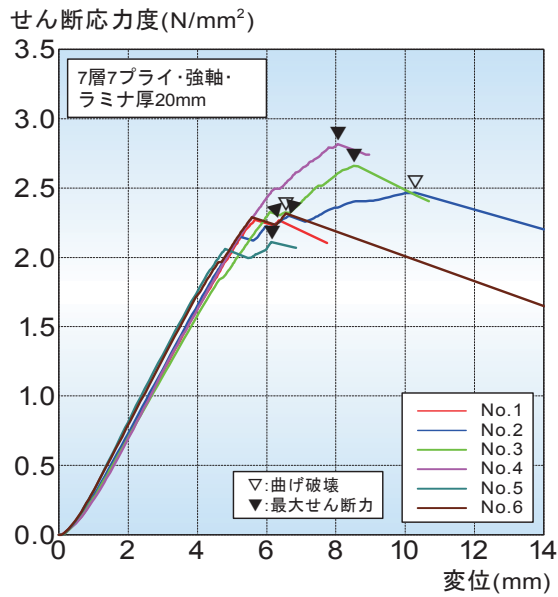


図1.3.7 せん断力-変位曲線
(7層7プライ・強軸・ラミナ厚20mm)

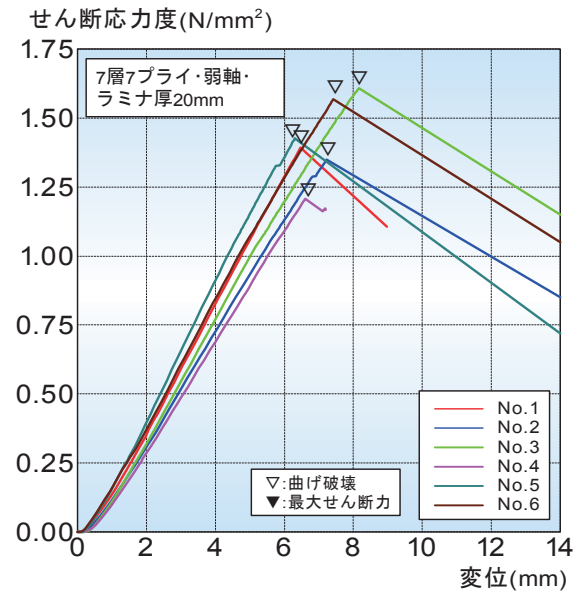


図1.3.8 せん断力-変位曲線
(7層7プライ・弱軸・ラミナ厚20mm)

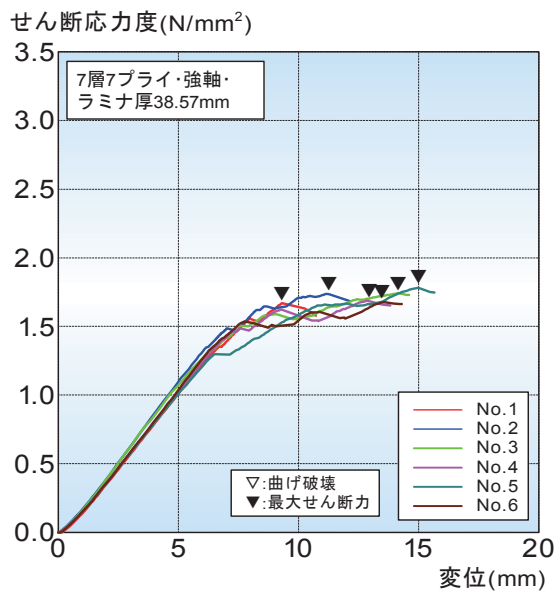


図1.3.9 せん断力-変位曲線
(7層7プライ・強軸・ラミナ厚38.57mm)

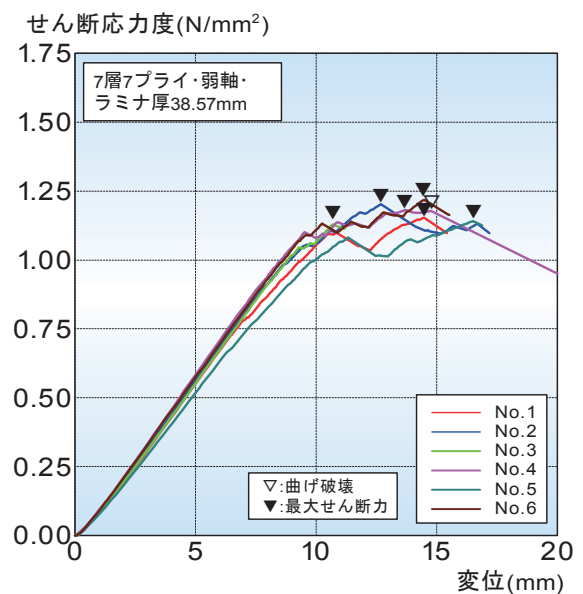


図1.3.10 せん断力-変位曲線
(7層7プライ・弱軸・ラミナ厚38.57mm)

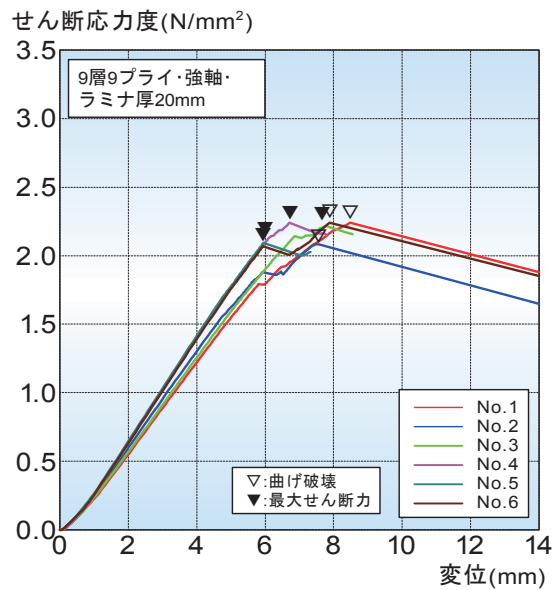


図1.3.11 せん断力-変位曲線
(9層9プライ・強軸・ラミナ厚20mm)

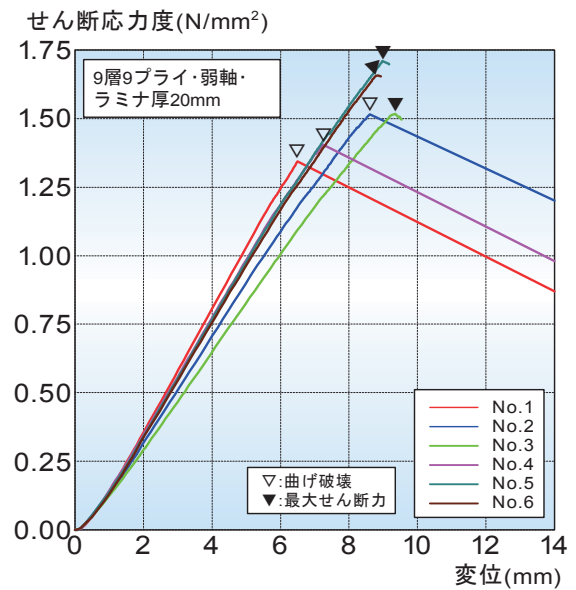


図1.3.12 せん断力-変位曲線
(9層9プライ・弱軸・ラミナ厚20mm)

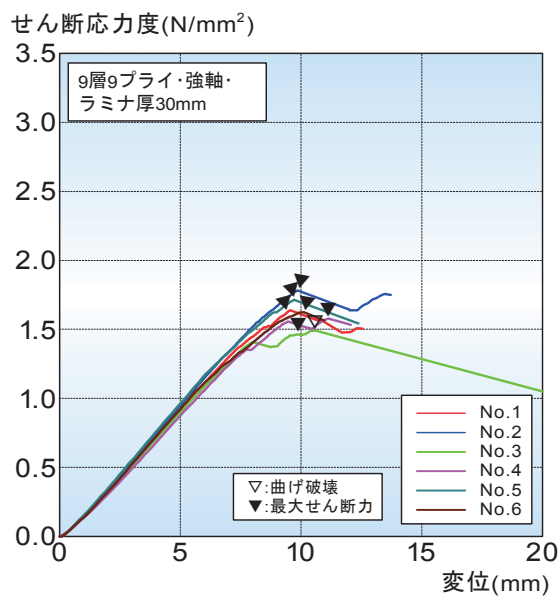


図1.3.13 せん断力-変位曲線
(9層9プライ・強軸・ラミナ厚30mm)

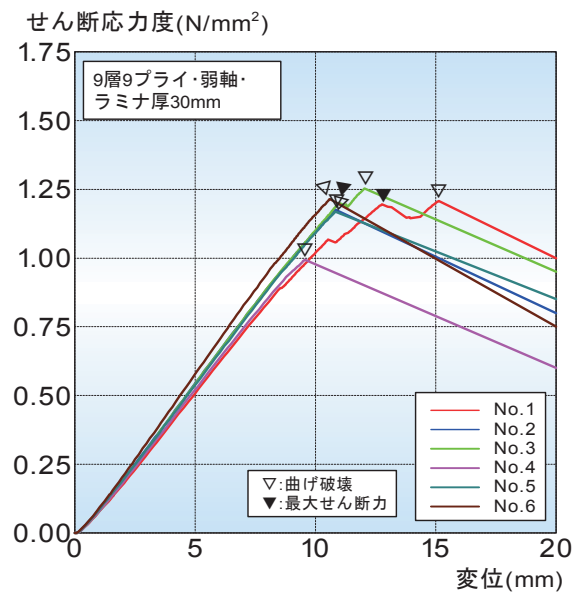


図1.3.14 せん断力-変位曲線
(9層9プライ・弱軸・ラミナ厚30mm)

3層3プライにおけるせん断強さは、ラミナ厚さ30mm強軸の試験体では3層3プライが2.82だったのに対し、ラミナ厚45mm強軸の試験体では2.43だった。これは寸法効果のほか、ラミナの幅厚比（30mm試験体は3.5倍、45mm試験体は3.89倍）の差や、幅はぎ接着ラミナの影響（バットジョイントであり、1枚ものとは異なる）などが示唆される。

同様に、5層5プライ強軸では20mm=2.62、42mm=1.88、7層7プライ強軸では20mm=2.39、38.57mm=1.72、9層9プライでは20mm=2.19、30mm=1.64（単位：いずれもN/mm²）だった。ラミナ厚さを厚くしたことによるせん断強度の低下率は、13.8%~28.2%であった。

5層5プライ、7層7プライおよび9層9プライとも、ラミナ厚が薄くなる（ラミナ厚20mm）と、ラミナの幅厚比が5.25倍となるため、強軸試験体においても最終破壊形態が曲げ型になる傾向が認められた。弱軸試験体においては、ほぼすべて曲げ型であった。



写真1.4.1 最終破壊性状（3層3プライ, ラミナ厚20mm, 強軸）

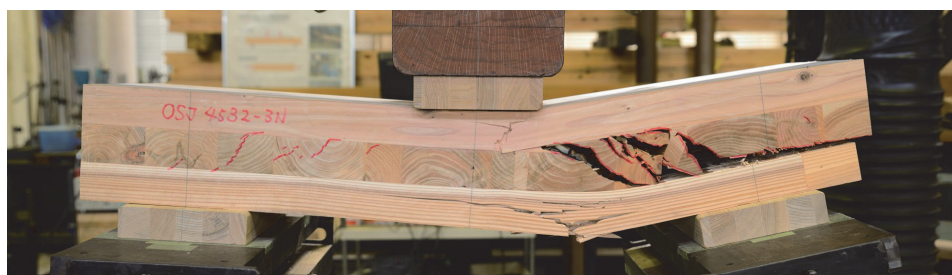


写真1.4.2 最終破壊性状（3層3プライ, ラミナ厚45mm, 強軸）



写真1.4.3 最終破壊性状（5層5プライ，ラミナ厚20mm，強軸）



写真1.4.3 最終破壊性状（5層5プライ，ラミナ厚20mm，弱軸）

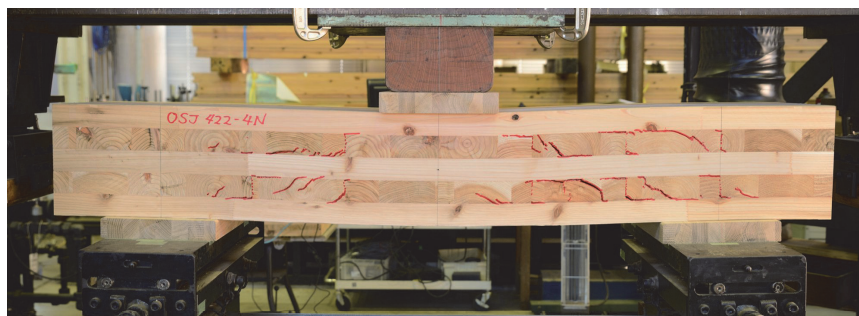


写真1.4.5 最終破壊性状（5層5プライ，ラミナ厚42mm，強軸）

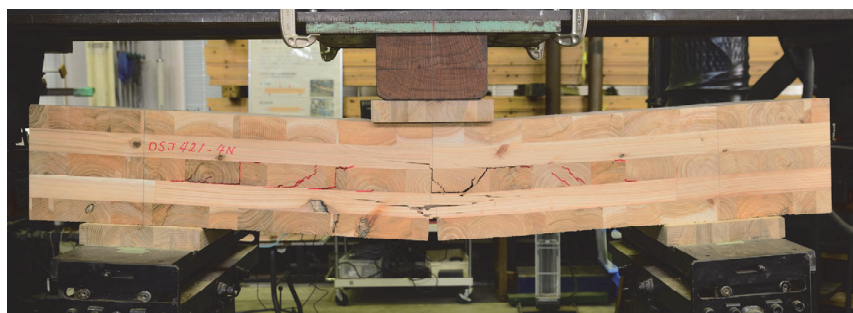


写真1.4.5 最終破壊性状（5層5プライ，ラミナ厚42mm，弱軸）



写真1.4.5 最終破壊性状（7層7プライ, ラミナ厚20mm, 強軸）

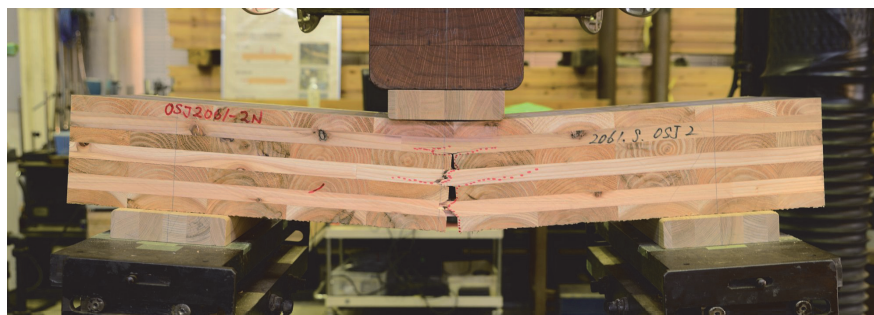


写真1.4.6 最終破壊性状（7層7プライ, ラミナ厚20mm, 弱軸）

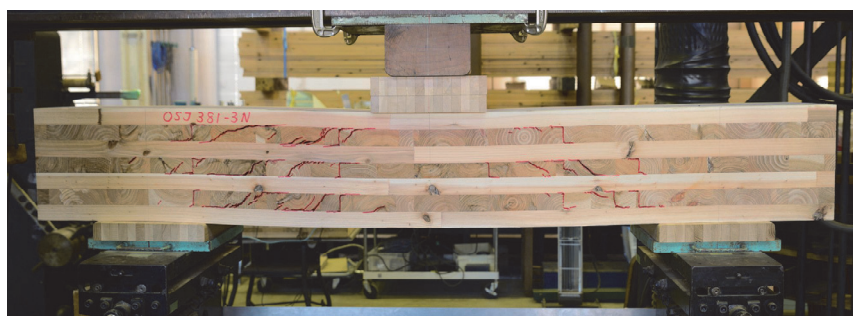


写真1.4.5 最終破壊性状（7層7プライ, ラミナ厚38.57mm, 強軸）

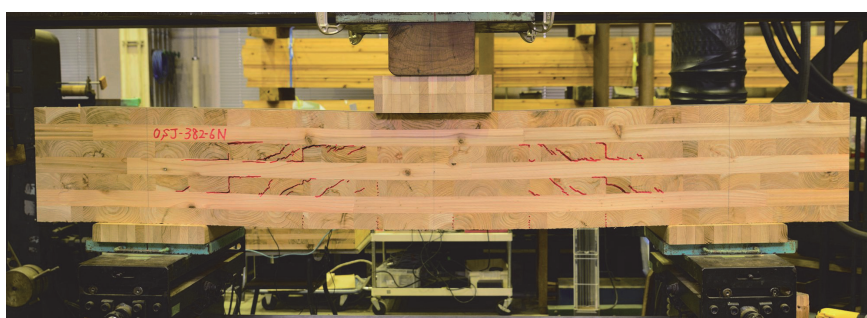


写真1.4.5 最終破壊性状（7層7プライ, ラミナ厚38.57mm, 弱軸）

Z

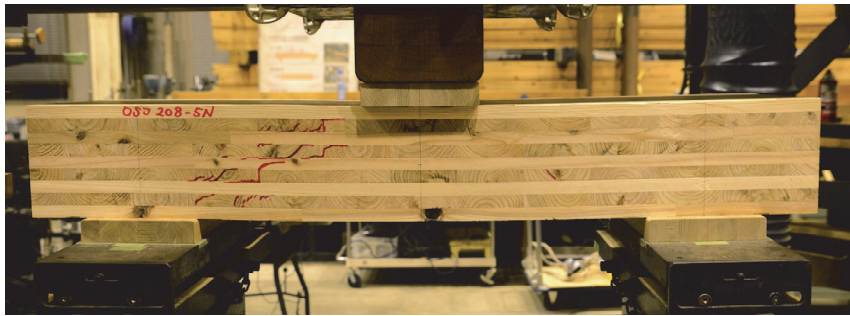


写真1.4.5 最終破壊性状（9層9プライ，ラミナ厚20mm，強軸）

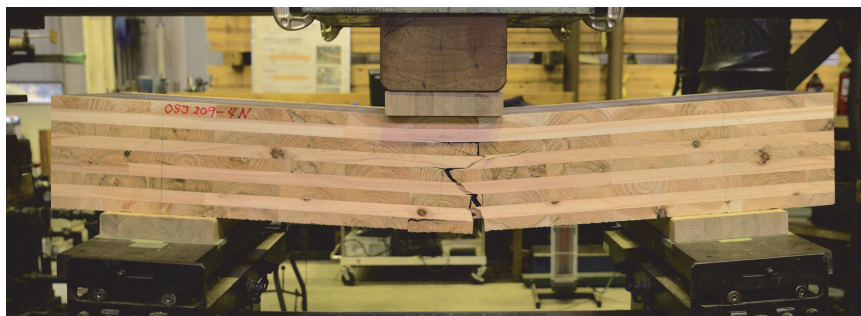


写真1.4.6 最終破壊性状（9層9プライ，ラミナ厚20mm，弱軸）



写真1.4.5 最終破壊性状（9層9プライ，ラミナ厚30mm，強軸）



写真1.4.5 最終破壊性状（9層9プライ，ラミナ厚30mm，弱軸）

2. 基礎的物性値のデータ収集

2.1 CLT における直交層挙動の解析

2.1.1 目的

CLT が面外曲げを受けるとき、ローリングシアに代表されるように、直交層は特徴的な挙動を示し、その挙動が剛性や強度に影響を及ぼす。本項では、直交層の層内せん断試験で得られたせん断強度とせん断弾性係数の知見を報告する。また、既往の面外曲げ試験や面外せん断試験の実験結果との比較により、CLT の積層方向のせん断性能の発現が原料ラミナのどのような物性値と関係しているかを考察する。

2.1.2 実験方法

CLT の平行層にせん断力が作用するときの直交層のせん断弾性係数とせん断強度のデータを収集するため、層内せん断試験を行った。

試験体を採取した試験材のラミナの積層構成を表 2.1-1 に示す。シリーズ 209 を除く弱軸構成の試験体は、2 次接着をし、試験体に加工した。2 次接着の接着剤にはレゾルシノール・フェノール共縮合樹脂を用いた。なお、加工前の試験材は、縦振動法および TGH 法により動的弾性係数を測定した。

表 2.1-1 試験体のラミナの積層構成

シリーズ※	積層構成	内層ラミナの仕様（mm）	幅はぎ 接着	試験材の寸法 （mm）	
208	Mx60-9-9 強軸	M30, t 20×w 105	なし	420×180×95	
209	同上 弱軸				
421	Mx60-5-5 強軸	M30, t 42×w 175（幅はぎラミナ）		なし	875×210×95
422	同上 弱軸				
M6-1	S60-5-5 弱軸	S60A, t 30×w 105	あり		550×150×98
M6-3		S60A, t 30×w 251（幅はぎラミナ）			
Y6-1		S60A, t 30×w 105			
Y6-5	Mx60-5-5 弱軸	M30B, t 30×w 105			557×150×98

※ M6-1～Y6-3 は昨年度事業^{2.1-1)}で製造した弱軸試験体。内層ラミナの仕様は表 2.1-2 を参照。

表 2.1-2 M6-1～Y6-5 のラミナ区分結果

	M30B	M60B	S60A
区分・下限	3.0	8.0	6.0
区分・上限	6.0	11.0	—
平均値	5.22	9.22	8.48
標準偏差	0.582	0.821	1.659
最小値	3.02	8.00	6.00
最大値	5.99	10.99	15.82
変動係数	11.1%	8.9%	19.5%

試験体は、層内せん断試験を行う前に、Concepts bois structure 社製 Sylvatest Duo (発信周波数 22 kHz) を用い、超音波伝播法によりせん断対象とする直交層ラミナの繊維方向の縦弾性係数 E_{c0} を求めた。 E_{c0} は試験体のみかけの密度を用いて算出し、各直交層ラ

ミナの長さに基づく重み付き平均値とした。超音波伝播法の装置、測定方法および補正方法はなお、伝達時間は昨年度事業の結果 2.1-1) に基づき補正した。

層内せん断試験の方法および試験体の概要を図 2.1-1 に示す。層内せん断試験にはミネベア製 TECHNO GRAPH NMB TG-250kN を用い、载荷速度 0.5 mm/分 で試験体が破壊するまで単調圧縮した。変位測定は、加力点のめり込みの影響を除くため、変位計（共和電業製 DTH-A-20）と標点（アルミアングル）をそれぞれ、加力点と支持点の反対側の端付近に取り付け、測定対象とする直交層を挟む両側の平行層の変位 δ を測定した。

直交層のせん断強度 τ は次式で求めた。

$$\tau = \frac{P_{\max}}{2 L W}$$

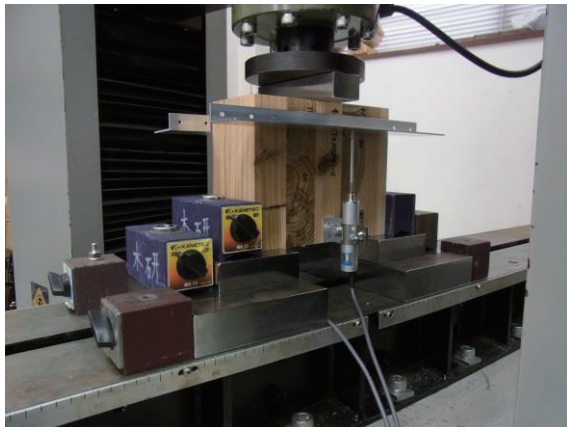
ここで、 P_{\max} は最大荷重、 L は試験体の長さ、 W は試験体の幅（直交層の繊維方向の長さ）。

直交層のせん断弾性係 G_R は次式で求めた。

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

ここで、 t_{LMN} は直交層のラミナの厚さ、 $\delta_{0.4}$ および $\delta_{0.1}$ はそれぞれ最大荷重の 40% および 10% における変位計の変位。

なお、試験体の含水率は静電容量式水分計（ケット科学研究所社製 HM-500）にて最外層のラミナで測定した値とした。

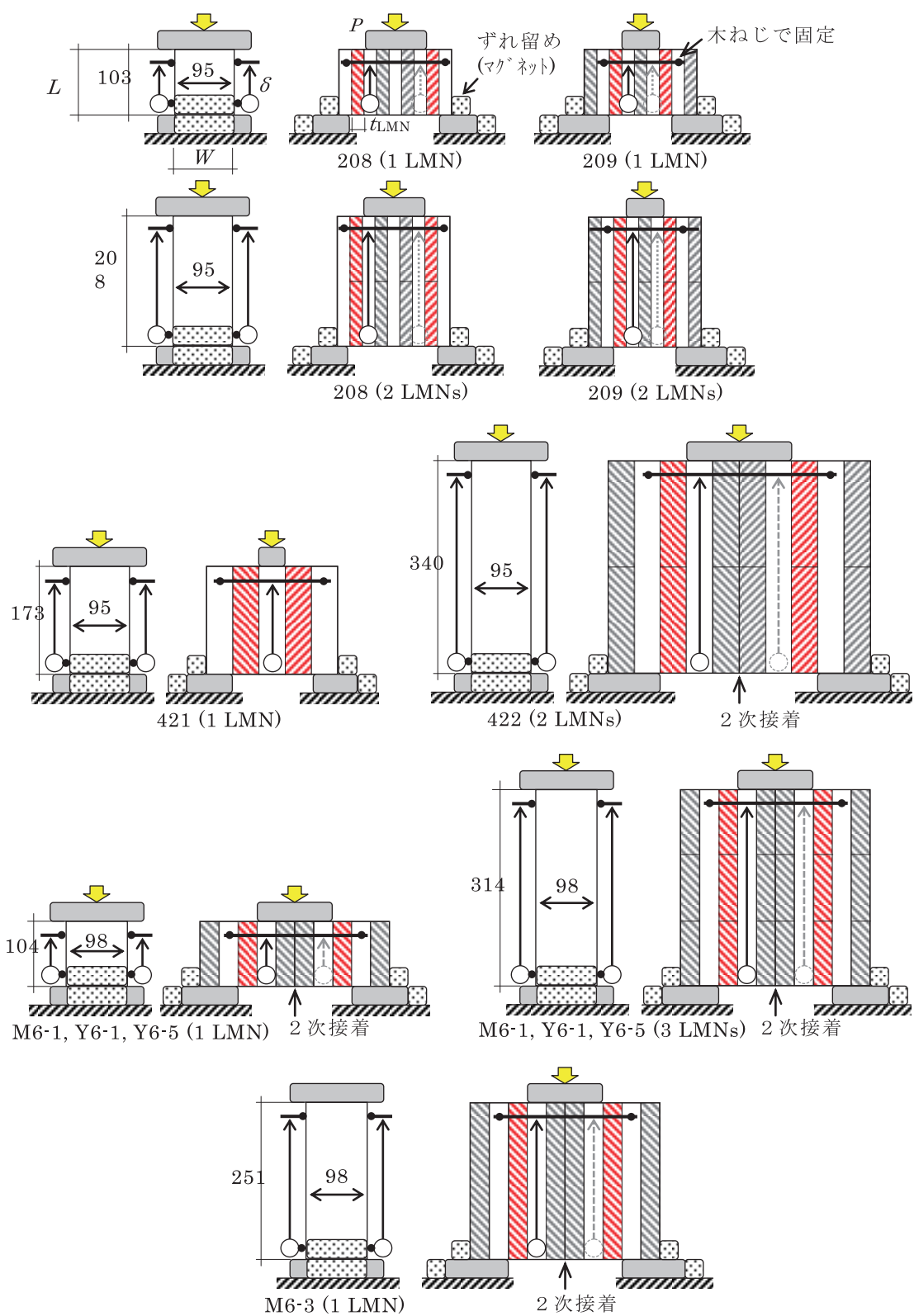


ア) 421 シリーズの例



イ) Y6-1 (3 LMNs) シリーズの例

写真 2.1-1 層内せん断試験の例



2.1.3 試験結果

非破壊試験の結果を表 2.1-3～9 に、層内せん断試験の結果を表 2.1-10～22 に、せん断応力－せん断ひずみ関係を図 2.1-2～5 に、各シリーズの代表的な破壊例を写真 2.1-2～7 に示す。断面長辺に比べ材長が 2.3～4.1 倍と短いため、縦振動法、TGH 法とも動的弾性係数は十分に評価できなかった。そのため、本試験結果は参考値とされたい。

なお、試験体の番号は、試験材の番号に基づき表した。2 次接着により構成した試験体は二つの試験材の番号に基づき表した。

表 2.1-3 非破壊試験の結果－208 シリーズ (Mx60-9-9、強軸)

番号	密度 (kg/m ³)	E_{fr}	$E_{TGH.f}$	$G_{TGH.f}$	$E_{TGH.e}$	$G_{TGH.e}$
208.TO.OSS1	425	2.52	2.44	0.783	4.44	0.503
208.TO.OSS2	416	2.59	2.12	0.697	4.12	0.471
208.TO.OSS3	447	2.47	2.41	0.799	4.49	0.495
208.TO.OSS4	419	2.97	2.16	0.706	4.86	0.525
208.TO.OSS5	437	2.75	2.32	0.755	5.05	0.558
208.TO.OSS6	413	2.83	2.07	0.680	5.12	0.506
平均値	426	2.69	2.25	0.737	4.68	0.510
最小値	413	2.47	2.07	0.680	4.12	0.471
最大値	447	2.97	2.44	0.799	5.12	0.558
標準偏差	13.2	0.194	0.156	0.0493	0.392	0.0295
変動係数	3.09%	7.22%	6.93%	6.69%	8.37%	5.79%

E_{fr} : 縦振動法による縦弾性係数 (単位 kN/mm²)

$E_{TGH.f}$: 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)

$G_{TGH.f}$: 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)

$E_{TGH.e}$: TGH 法による面内方向の曲げヤング係数 (単位 kN/mm²)

$G_{TGH.e}$: TGH 法による面内方向のせん断弾性係数 (単位 kN/mm²)

表 2.1-4 非破壊試験の結果－209 シリーズ (Mx60-9-9、弱軸)

番号	密度 (kg/m ³)	E_{fr}	$E_{TGH.f}$	$G_{TGH.f}$	$E_{TGH.e}$	$G_{TGH.e}$
209.TO.OSS1	405	2.30	1.44	0.468	3.57	0.373
209.TO.OSS2	427	2.20	1.37	0.438	3.20	0.344
209.TO.OSS3	431	2.21	1.33	0.441	3.22	0.356
209.TO.OSS4	416	2.41	1.42	0.459	3.60	0.345
209.TO.OSS5	419	2.28	1.29	0.422	3.75	0.397
209.TO.OSS6	429	2.36	1.46	0.487	3.86	0.404
平均値	421	2.29	1.39	0.452	3.53	0.370
最小値	405	2.20	1.29	0.422	3.20	0.344
最大値	431	2.41	1.46	0.487	3.86	0.404
標準偏差	9.84	0.0826	0.0666	0.0235	0.275	0.0261
変動係数	2.34%	3.60%	4.80%	5.18%	7.78%	7.06%

記号の説明は表 2.1-3 に同じ。

表 2.1-5 非破壊試験の結果－421 および 422 シリーズ（Mx60-5-5、強軸および弱軸）

番号	密度 (kg/m ³)	Efr	$E_{TGH.f}$	$G_{TGH.f}$	$E_{TGH.e}$	$G_{TGH.e}$
421.TO.OSS1	396	4.11	3.42	0.437	5.35	0.157
422.TO.OSS1	403	2.20	1.25	0.162	2.40	0.380

記号の説明は表 2.1-3 に同じ。

表 2.1-6 非破壊試験の結果－M6-1 シリーズ（S60-5-5、弱軸）

番号	密度 (kg/m ³)	Efr	$E_{TGH.f}$	$G_{TGH.f}$	$E_{TGH.e}$	$G_{TGH.e}$
M6-1-2-2	438	2.78	1.32	0.212	3.72	0.271
M6-1-2-5	444	3.28	1.48	0.234	4.10	0.296
M6-1-2-8	483	3.68	1.94	0.315	4.75	0.326
M6-1-2-11	453	2.98	1.33	0.244	3.86	0.310
M6-1-2-14	435	2.81	1.46	0.232	3.64	0.268
M6-1-2-17	464	3.13	1.63	0.259	4.20	0.298
平均値	453	3.11	1.53	0.249	4.05	0.295
最小値	435	2.78	1.32	0.212	3.64	0.268
最大値	483	3.68	1.94	0.315	4.75	0.326
標準偏差	18.5	0.340	0.231	0.0357	0.406	0.0225
変動係数	4.08%	10.9%	15.1%	14.3%	10.0%	7.62%

記号の説明は表 2.1-3 に同じ。

表 2.1-7 非破壊試験の結果－M6-3 シリーズ（S60-5-5、弱軸）

番号	密度 (kg/m ³)	Efr	$E_{TGH.f}$	$G_{TGH.f}$	$E_{TGH.e}$	$G_{TGH.e}$
M6-3-2-2	438	3.11	1.65	0.266	4.33	0.321
M6-3-2-5	434	2.72	1.48	0.236	3.80	0.277
M6-3-2-8	436	2.72	1.61	0.260	4.14	0.303
M6-3-2-11	450	2.67	1.54	0.243	3.45	0.259
M6-3-2-14	449	2.85	1.62	0.271	4.15	0.307
M6-3-2-17	450	3.22	1.83	0.302	4.93	0.371
平均値	443	2.88	1.62	0.263	4.14	0.306
最小値	434	2.67	1.48	0.236	3.45	0.259
最大値	450	3.22	1.83	0.302	4.93	0.371
標準偏差	7.86	0.228	0.120	0.0233	0.502	0.0389
変動係数	1.77%	7.91%	7.40%	8.84%	12.1%	12.7%

記号の説明は表 2.1-3 に同じ。

表 2.1-8 非破壊試験の結果－Y6-1 シリーズ（S60-5-5、弱軸、幅はぎ接着あり）

番号	密度 (kg/m ³)	E_{fr}	$E_{TGH.f}$	$G_{TGH.f}$	$E_{TGH.e}$	$G_{TGH.e}$
Y6-1-1-2	384	2.29	1.41	0.217	3.37	0.240
Y6-1-1-5	412	2.60	1.33	0.207	3.57	0.263
Y6-1-2-8	398	2.38	1.14	0.175	3.24	0.242
Y6-1-3-11	387	2.65	1.04	0.163	4.15	0.311
Y6-1-4-14	403	3.01	1.26	0.196	4.34	0.309
Y6-1-5-17	403	2.22	0.90	0.144	3.29	0.229
平均値	398	2.53	1.18	0.184	3.66	0.265
最小値	384	2.22	0.90	0.144	3.24	0.229
最大値	412	3.01	1.41	0.217	4.34	0.311
標準偏差	10.8	0.292	0.191	0.0278	0.468	0.0362
変動係数	2.73%	11.6%	16.2%	15.2%	12.8%	13.6%

記号の説明は表 2.1-3 に同じ。

表 2.1-9 非破壊試験の結果－Y6-5 シリーズ（Mx60-5-5、弱軸、幅はぎ接着あり）

番号	密度 (kg/m ³)	E_{fr}	$E_{TGH.f}$	$G_{TGH.f}$	$E_{TGH.e}$	$G_{TGH.e}$
Y6-5-1-2	389	2.00	1.19	0.174	2.62	0.197
Y6-5-1-5	399	1.64	1.04	0.160	2.45	0.177
Y6-5-2-8	391	1.81	1.06	0.164	2.38	0.190
Y6-5-3-11	402	2.31	1.37	0.216	4.14	0.282
Y6-5-4-14	401	2.09	1.19	0.189	2.82	0.207
Y6-5-5-17	376	1.96	1.10	0.169	2.53	0.181
平均値	393	1.97	1.16	0.179	2.82	0.206
最小値	376	1.64	1.04	0.160	2.38	0.177
最大値	402	2.31	1.37	0.216	4.14	0.282
標準偏差	10.0	0.232	0.123	0.0207	0.660	0.0388
変動係数	2.56%	11.8%	10.6%	11.6%	23.4%	18.9%

記号の説明は表 2.1-3 に同じ。

表 2.1-10 層内せん断試験の結果－208 シリーズ (1 LMN) (M30、t 20×w 105)

番号	密度 (kg/m ³)	E_{C0}	G_R	τ	含水率 (%)	破壊* 性状
208.TO.OSS1	435	3.8	0.0713	1.81	9.4	T
208.TO.OSS2	415	3.9	0.0867	1.62	8.2	T
208.TO.OSS3	448	3.6	0.0769	1.73	11.7	T
208.TO.OSS4	417	3.8	0.0786	1.88	8.4	T
208.TO.OSS5	412	3.7	0.0503	1.52	9.4	T
208.TO.OSS6	400	3.6	0.0863	1.82	7.6	T
平均値	421	3.7	0.0750	1.73	9.1	T: 6/6
最小値	400	3.6	0.0503	1.52	7.6	
最大値	448	3.9	0.0867	1.88	11.7	
標準偏差	17.6	0.12	0.0135	0.14	1.45	
変動係数	4.17%	3.34%	17.9%	7.92%	16.0%	

E_{C0} : 超音波伝播法で得られた直交層ラミナの縦弾性係数の平均値 (単位 kN/mm²)

G_R : 強度試験で得られた直交層のせん断弾性係数 (単位 kN/mm²)

τ : 強度試験で得られた直交層のせん断強さ (単位 N/mm²)

※ L : ラミナ内部のせん断、G : 試験対象の直交層に係わる接着層のせん断、T : (曲げ変形に伴う引張力に起因する) 試験対象の直交層に係わらない接着層のせん断

表 2.1-11 層内せん断試験の結果－208 シリーズ (2 LMNs) (M30、t 20×w 105)

番号	密度 (kg/m ³)	E_{C0}	G_R	τ	含水率 (%)	破壊 性状
208.TO.OSS1	401	4.5	0.133	1.93	9.3	L, G, T
208.TO.OSS2	431	4.3	0.187	2.17	7.3	T, (L, G)
208.TO.OSS3	432	4.5	0.224	2.10	11.9	L, G
208.TO.OSS4	408	4.3	0.180	2.10	9.3	T
208.TO.OSS5	415	5.2	0.143	1.77	15.5	L, G, T
208.TO.OSS6	423	3.8	0.146	2.01	9.8	L, G
平均値	418	4.4	0.169	2.01	10.5	L: 5/6 G: 5/6 T: 4/6
最小値	401	3.8	0.133	1.77	7.3	
最大値	432	5.2	0.224	2.17	15.5	
標準偏差	12.5	0.47	0.0347	0.14	2.84	
変動係数	2.99%	10.6%	20.6%	7.17%	27.0%	

記号の説明は表 2.1-10 に同じ。

表 2.1-12 層内せん断試験の結果－209 シリーズ (1 LMN) (M30、t 20×w 105)

番号	密度 (kg/m ³)	E_{C0}	G_R	τ	含水率 (%)	破壊 性状
209.TO.OSS1	418	4.1	0.0922	1.76	11.4	G
209.TO.OSS2	431	4.8	0.0589	1.60	11.5	G, (L)
209.TO.OSS3	420	4.3	0.0580	1.88	11.5	L, G
209.TO.OSS4	426	4.7	0.0608	1.33	12.7	G, L
209.TO.OSS5	424	4.2	0.0801	1.54	14.6	G
209.TO.OSS6	434	4.7	0.0975	1.79	13.2	G, L
平均値	425	4.5	0.0746	1.65	12.5	L: 4/6 G: 6/6
最小値	418	4.1	0.0580	1.33	11.4	
最大値	434	4.8	0.0975	1.88	14.6	
標準偏差	6.2	0.30	0.0178	0.20	1.28	
変動係数	1.45%	6.80%	23.8%	12.2%	10.3%	

記号の説明は表 2.1-10 に同じ。

表 2.1-13 層内せん断試験の結果－209 シリーズ (2 LMNs) (M30、t 20×w 105)

番号	密度 (kg/m ³)	E_{C0}	G_R	τ	含水率 (%)	破壊 性状
209.TO.OSS1	401	4.6	0.200	1.93	9.7	L, G
209.TO.OSS2	431	4.2	0.380	2.14	9.4	L, G
209.TO.OSS3	432	3.9	0.264	2.48	11.5	L, G
209.TO.OSS4	408	4.1	0.138	2.13	10.5	L, G
209.TO.OSS5	415	3.7	0.158	1.98	10.5	L, G
209.TO.OSS6	423	4.4	0.196	2.25	11.6	L, G
平均値	418	4.2	0.223	2.15	10.5	L: 6/6 G: 6/6
最小値	401	3.7	0.138	1.93	9.4	
最大値	432	4.6	0.380	2.48	11.6	
標準偏差	12.5	0.34	0.0885	0.20	0.90	
変動係数	2.99%	8.04%	39.8%	9.22%	8.6%	

記号の説明は表 2.1-10 に同じ。

表 2.1-14 層内せん断試験の結果－421 シリーズ（1 LMN）（M30、t 42×w 175、幅はぎラミナ）

番号	密度 (kg/m ³)	E_{C0}	G_R	τ	含水率 (%)	破壊 性状
421.TO.OSS1-1	404	7.3	0.0864	1.06	9.4	G
421.TO.OSS1-2	421	5.1	0.0938	0.74	10.8	G
421.TO.OSS1-3	379	5.6	0.0708	0.85	7.7	G
421.TO.OSS1-4	394	4.7	0.0928	1.23	8.8	G
421.TO.OSS1-5	376	5.7	0.0471	0.69	8.0	G
平均値	395	5.7	0.0782	0.92	8.9	G*: 6/6
最小値	376	4.7	0.0471	0.69	7.7	
最大値	421	7.3	0.0938	1.23	10.8	
標準偏差	18.5	0.99	0.0196	0.23	1.23	
変動係数	4.69%	17.3%	25.1%	24.7%	13.9%	

記号の説明は表 2.1-10 に同じ。なお、試験体の構成上、破壊性状に T はない。

表 2.1-15 層内せん断試験の結果－422 シリーズ（2 LMNs）（M30、t 42×w 175、幅はぎラミナ）

番号	密度 (kg/m ³)	E_{C0}	G_R	τ	含水率 (%)	破壊 性状
422.TO.OSS1	401	5.8	0.0991	1.06	9.0	L, G

記号の説明は表 2.1-10 に同じ。

表 2.1-16 層内せん断試験の結果－M6-1 シリーズ（1 LMN）（S60A、t 30×w 105）

番号	密度 (kg/m ³)	E_{C0}	G_R	τ	含水率 (%)	破壊 性状
M6-1-2-5,11	440	3.8	0.0461	1.08	11.6	T
M6-1-2-14,2	423	4.2	0.0428	1.06	14.0	T, G
M6-1-2-17,8	473	6.1	0.0573	1.18	18.4	T, G
平均値	445	4.7	0.0488	1.11	14.6	T: 3/3 G: 2/3
最小値	423	3.8	0.0428	1.06	11.6	
最大値	473	6.1	0.0573	1.18	18.4	
標準偏差	25.2	1.24	0.00759	0.0666	3.44	
変動係数	5.65%	26.3%	15.6%	6.01%	23.5%	

記号の説明は表 2.1-10 に同じ。

表 2.1-17 層内せん断試験の結果－M6-1 シリーズ（3 LMNs）（S60A、t 30×w 105）

番号	密度 (kg/m ³)	E_{C0}	G_R	τ	含水率 (%)	破壊 性状
M6-1-2-5,11	447	5.9	0.142	1.47	14.3	L, G
M6-1-2-14,2	442	6.3	0.195	1.66	13.1	L, G
M6-1-2-17,8	472	4.9	0.203	1.36	10.4	L, G
平均値	454	5.7	0.180	1.50	12.6	L: 3/3 G: 3/3
最小値	442	4.9	0.142	1.36	10.4	
最大値	472	6.3	0.203	1.66	14.3	
標準偏差	16.2	0.72	0.0332	0.15	2.00	
変動係数	3.57%	12.7%	18.4%	10.3%	15.9%	

記号の説明は表 2.1-10 に同じ。

表 2.1-18 層内せん断試験の結果－M6-3 シリーズ（1 LMN）（S60A、t 30×w 251、幅は
ぎラミナ）

番号	密度 (kg/m ³)	E_{C0}	G_R	τ	含水率 (%)	破壊 性状
M6-3-2-2,14	446	7.7	0.146	1.53	9.0	T
M6-3-2-8,5	436	7.5	0.107	1.23	14.5	L, G
M6-3-2-11,17	442	7.7	0.156	1.46	10.8	G, L
平均値	441	7.6	0.136	1.40	11.4	T: 1/3 L: 2/3 G: 2/3
最小値	436	7.5	0.107	1.23	9.0	
最大値	446	7.7	0.156	1.53	14.5	
標準偏差	5.1	0.15	0.0261	0.155	2.80	
変動係数	1.15%	1.92%	19.1%	11.0%	24.5%	

記号の説明は表 2.1-10 に同じ。

表 2.1-19 層内せん断試験の結果－Y6-1 シリーズ（1 LMN）（S60A、t 30×w 105、幅は
ぎ接着あり）

番号	密度 (kg/m ³)	E_{C0}	G_R	τ	含水率 (%)	破壊 性状
Y6-1-3-11,Y6-1-1-2	386	6.1	0.0337	0.850	13.2	T, (G)
Y6-1-4-14,Y6-1-2-8	407	6.9	0.0222	0.771	11.7	T, (G)
Y6-1-5-17,Y6-1-1-5	403	6.6	0.0227	0.783	9.7	T
平均値	399	6.5	0.0262	0.801	11.5	T: 3/3 G: 2/3
最小値	386	6.1	0.0222	0.771	9.7	
最大値	407	6.9	0.0337	0.850	13.2	
標準偏差	11.2	0.41	0.00651	0.0424	1.76	
変動係数	2.82%	6.23%	24.9%	5.29%	15.2%	

記号の説明は表 2.1-10 に同じ。

表 2.1-20 層内せん断試験の結果－Y6-1 シリーズ（3 LMNs）（S60A、t 30×w 105、幅はぎ接着あり）

番号	密度 (kg/m ³)	E_{C0}	G_R	τ	含水率 (%)	破壊 性状
Y6-1-3-11,Y6-1-1-2	381	5.5	0.086	1.34	9.6	T, L, G
Y6-1-4-14,Y6-1-2-8	395	5.0	0.105	1.43	6.9	L, G
Y6-1-5-17,Y6-1-1-5	403	6.1	0.132	1.41	10.2	L, G
平均値	393	5.5	0.107	1.39	8.9	T: 1/3 L: 3/3 G: 3/3
最小値	381	5.0	0.086	1.34	6.9	
最大値	403	6.1	0.132	1.43	10.2	
標準偏差	11.1	0.55	0.0230	0.0460	1.77	
変動係数	2.83%	9.93%	21.4%	3.30%	19.9%	

記号の説明は表 2.1-10 に同じ。

表 2.1-21 層内せん断試験の結果－Y6-5 シリーズ（1 LMN）（M30B、t 30×w 105、幅はぎ接着あり）

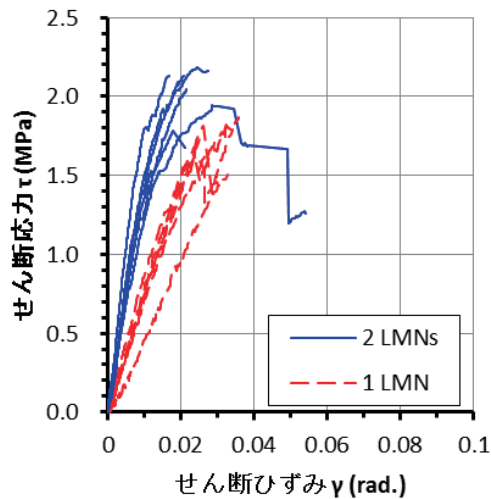
番号	密度 (kg/m ³)	E_{C0}	G_R	τ	含水率 (%)	破壊 性状
Y6-5-1-2,Y6-5-5-17	371	3.6	0.0369	0.841	11.2	G, (L)
Y6-5-2-8,Y6-5-1-5	379	4.3	0.0242	0.617	10.5	G
Y6-5-3-11,Y6-5-4-14	412	4.4	0.0289	0.720	10.6	G
平均値	387	4.1	0.0300	0.726	10.7	L: 1/3 G: 3/3
最小値	371	3.6	0.0242	0.617	10.5	
最大値	412	4.4	0.0369	0.841	11.2	
標準偏差	21.4	0.441	0.00640	0.112	0.379	
変動係数	5.52%	10.9%	21.3%	15.4%	3.5%	

記号の説明は表 2.1-10 に同じ。

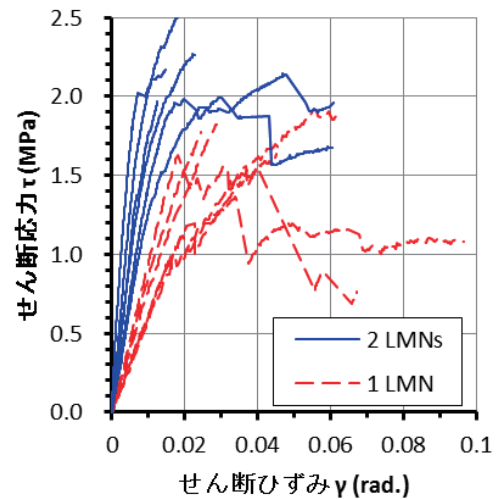
表 2.1-22 層内せん断試験の結果－Y6-5 シリーズ（3 LMNs）（M30B、t 30×w 105、幅はぎ接着あり）

番号	密度 (kg/m ³)	E_{C0}	G_R	τ	含水率 (%)	破壊 性状
Y6-5-1-2,Y6-5-5-17	380	4.2	0.175	1.22	9.9	L, G
Y6-5-2-8,Y6-5-1-5	390	4.5	0.181	1.56	11.3	L, G, (T)
Y6-5-3-11,Y6-5-4-14	397	4.3	0.112	1.34	11.5	L, G
平均値	389	4.3	0.156	1.37	10.9	T: 1/3 L: 3/3 G: 1/3
最小値	380	4.2	0.112	1.22	9.9	
最大値	397	4.5	0.181	1.56	11.5	
標準偏差	8.6	0.133	0.0379	0.171	0.855	
変動係数	2.21%	3.10%	24.3%	12.5%	7.86%	

記号の説明は表 2.1-10 に同じ。



ア) 208 シリーズ



イ) 209 シリーズ

図 2.1-2 セン断応力－せん断ひずみ関係

せん断応力は $\tau = P / (2 L W)$ 。ここで、 P は荷重、 L は試験体の長さ、 W は試験体の幅。せん断ひずみは $\gamma = t_{LMN} / \delta$ 。ここで、 t_{LMN} は直交層のラミナの厚さ、 δ は試験体の長さ方向の平行層の変位。(図 2.1-1 参照)。

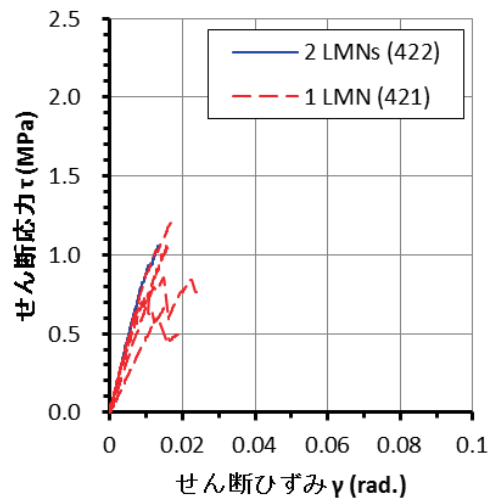
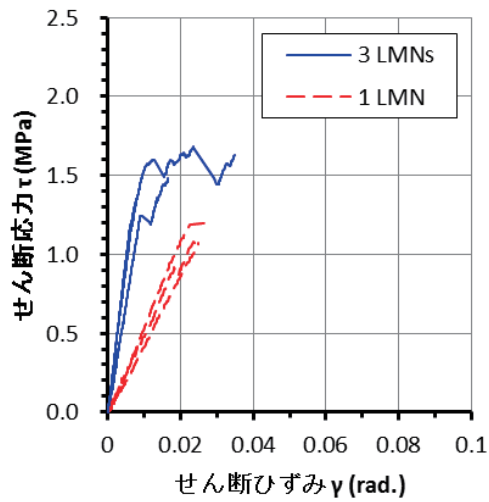
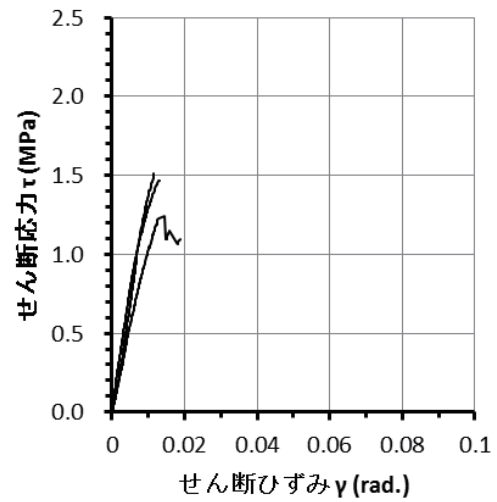


図 2.1-3 セン断応力－せん断ひずみ関係 (421, 422 シリーズ)

せん断応力 τ とせん断ひずみ γ は図 2.1-2 に同じ。

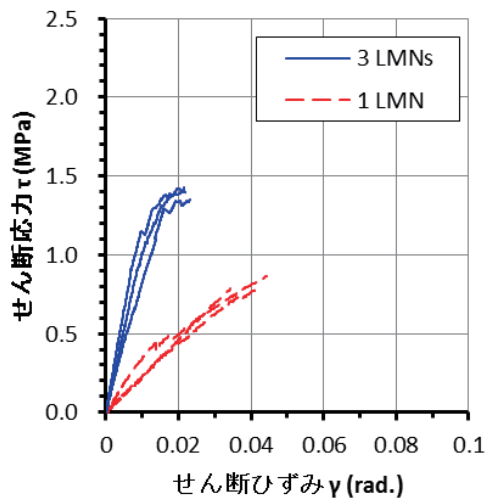


ア) M6-1 シリーズ

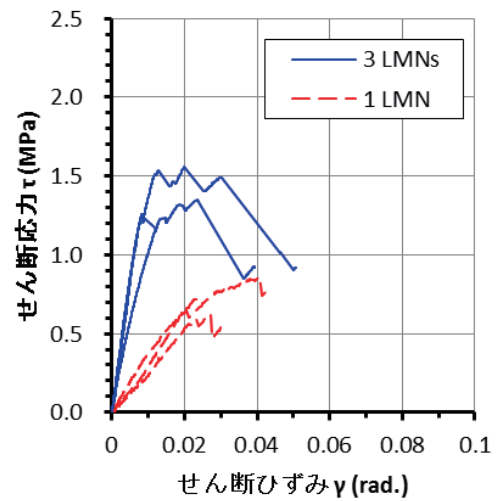


イ) M6-3 シリーズ

図 2.1-4 セン断応力－せん断ひずみ関係
せん断応力 τ とせん断ひずみ γ は図 2.1-2 に同じ。

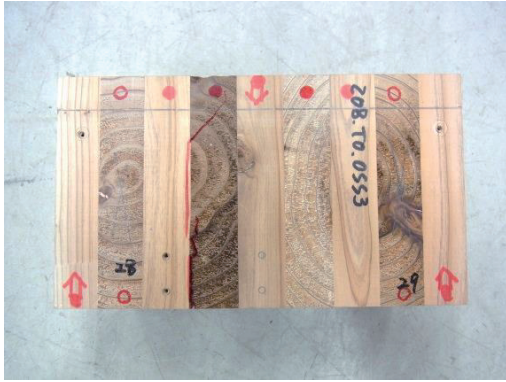


ア) Y6-1 シリーズ

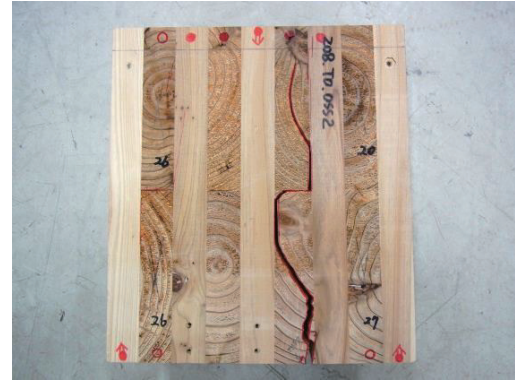


イ) Y6-5 シリーズ

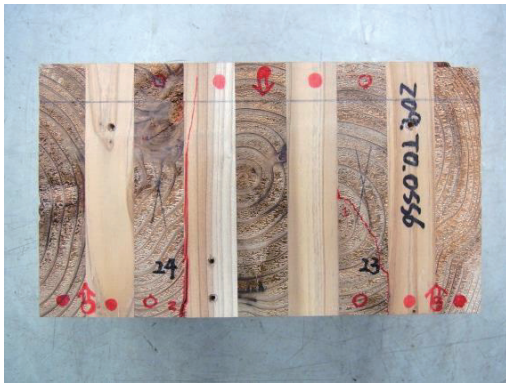
図 2.1-5 セン断応力－せん断ひずみ関係
せん断応力 τ とせん断ひずみ γ は図 2.1-2 に同じ。



ア) 208 シリーズ (1 LMN)



イ) 208 シリーズ (3 LMNs)



ウ) 209 シリーズ (1 LMN)

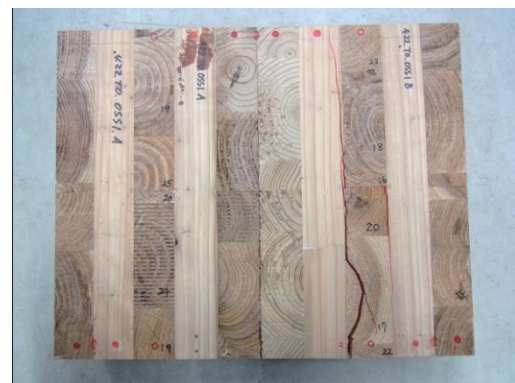


エ) 209 シリーズ (3 LMNs)

写真 2.1-2 試験体の破壊例 (208、209 シリーズ)



ア) 421 シリーズ (1 LMN)



イ) 422 シリーズ (2 LMNs)

写真 2.1-3 試験体の破壊例 (421、422 シリーズ)



ア) 1 LMN

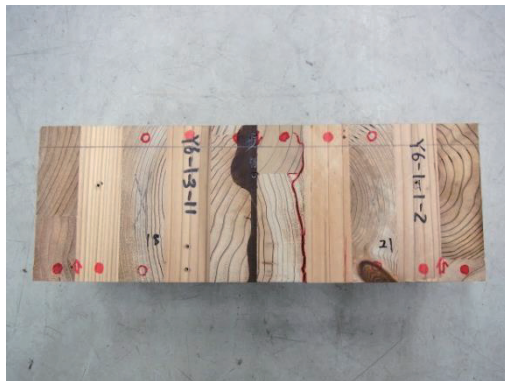


イ) 3 LMNs

写真 2.1-4 各試験体の破壊例 (M6-1 シリーズ)



写真 2.1-5 各試験体の破壊例 (M6-3 シリーズ)

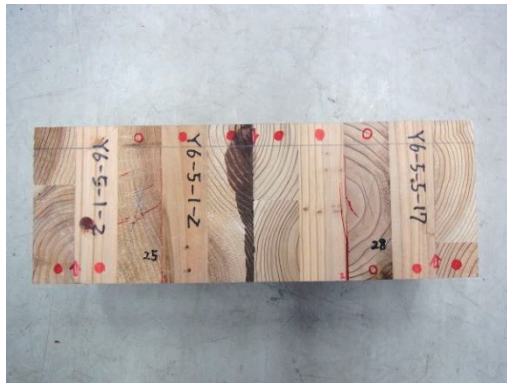


ア) 1 LMN



イ) 3 LMNs

写真 2.1-6 各試験体の破壊例 (Y6-1 シリーズ)



ア) 1 LMN



イ) 3 LMNs

写真 2.1-7 各試験体の破壊例 (Y6-5 シリーズ)

2.1.4 考察

CLT の積層方向のせん断性能の発現は、直交層と平行層の接着層の強度と剛性、ラミナの断面内のせん断強度とせん断剛性、ラミナの木取り、幅はぎ接着、ラミナの幅と厚さなどが関係していると考えられる。以下、本実験の結果に基づきこれらの幾つかについて考察する。

まず、同一シリーズにおいて、1 LMN のようにせん断長さ L が短い試験体は、長い試験体に比べ、せん断弾性係数 G_R 、せん断強度 τ とも低い値を示した。 G_R が低く評価されたのは、試験体のスパン／梁せい比が比較的大きいため、測定変位に曲げたわみ成分が含まれたためと考えられる。 τ の差については、短い試験体は直交層ラミナの断面内のせん断破壊が少なく、接着層の破壊が顕著であったことから、曲げ変形に伴い試験体底面に生じる水平方向の引張力が比較的大きく、見かけの強度が低下したと考えられる。現在、これらの評価値の補正方法の知見がないため、今回は短い試験体の結果は参考値とし、以下、3 LMNs などのせん断長さが比較的大きな試験体の結果を考察の対象とする。

図 2.1-6 に破壊形態の模式図を示す。このような破壊は写真 2.1-8 に示すように面外せん断試験や面外曲げ試験で観察されるが、今回行った層内せん断試験でもせん断長さを長くとした試験体で観察された (写真 2.1-2～7)。層内せん断試験に比べ、面外せん断試験や面外曲げ試験の方が破壊が顕著であるが、これは、後二者では曲げモーメントの影響により、破壊とともに大きな面外変形が瞬時に生じるためと考えられる。直交ラミナの破壊状況をみると、ラミナの木取りの影響もあるが、ラミナ内の破壊は断面の年輪の放射方向に 45° に近い角度で走行するものが多くみられた。木材工業ハンドブック 2.1-3) に掲載されているスギの引張強さは、繊維方向が 54.9 MPa、放射方向が 6.9 MPa、接線方向が 2.5 MPa であり、実験に用いたスギラミナの強さが概ねこれに近いものとする、ラミナ断面の対角にせん断変形に伴う引張力が働くとき、引張強さの弱い接線方向に垂直に亀裂が生じやすいと考えられる。放射方向に引張力が働く場合は、亀裂が年輪界に沿って生じるケースがしばしば見られた。幅はぎ接着されていないラミナ間の突き合わせ部分ではせん断変形に伴う引張力に抵抗できないため、しばしば亀裂が突き合わせ部分を通ると考えられる。直交層と平行層の界面では、接着層の強度よりも平行層ラミナのせん断強度が概ね大きいため、亀裂の角度は界面にほぼ平行となるものと考えられる。亀裂の発生がラミナ断面内と接着層のどちらを起点として生じるかは確認できていないが、CLT のローリングシア破壊における層内せん断強度は、ラミナ断面内のせん断強度 (接線方向や放射方向の引張強度) と接着層のせん断強度に依存すると考えられる。また、乾燥による内部割れが顕著な場合、層内せん断強度が低下することが懸念される。

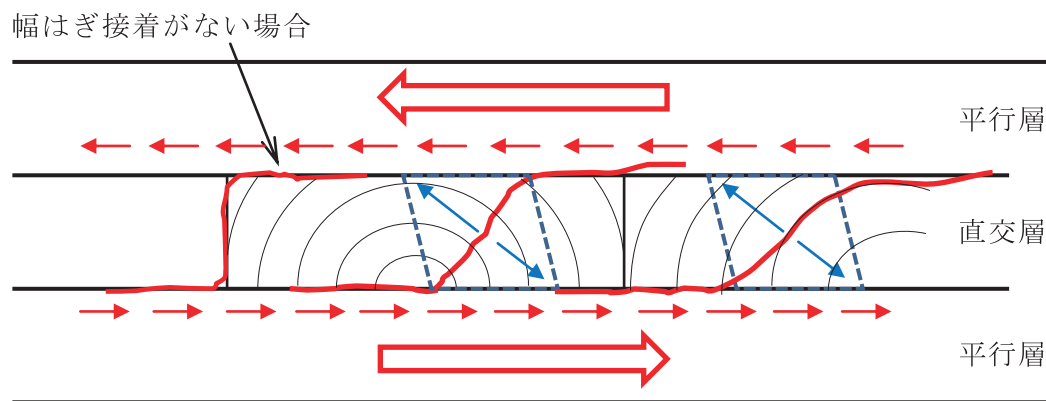


図 2.1-6 層内せん断破壊の模式図



ア) 大野式せん断試験による破壊例 2.2-2)

イ) 面外曲げ試験による破壊例※

写真 2.1-8 実大試験にみられる直交層の破壊例

※広島県立総合技術研究所林業技術センターでの試験例。ただし、主な破壊は荷重点間の引張側ラミナからの曲げ破壊。

次に、本実験で得た G_R と τ の評価値について考察する。

まず、測定方法の影響について考察する。前年度と同じ仕様の試験体（M6-1、M6-3、Y6-1、Y6-5）を前年度のデータと比較すると、密度は同程度で、 τ はの評価値は今年度のデータが前年度のデータより若干小さく、 G_R は前年度の試験結果のほぼ倍の値となった（図 2.1-7）。両実験の違いは、試験体のスパン、試験体の2次接着、試験体脚部の水平方向の拘束、変位測定の方法などである。 τ の差異は大きくはないが、今年度の試験体が弱軸方向の試験材を2次接着して作成したため、スパンが長くなり曲げモーメントが比較的大きくなったことが主な原因と考えられる（写真 2.1-9）。 G_R の差異は大きい、主な原因は、変位測定の違いによると考えられる。前年度の試験では、変位計、標点とも加力点または支持点付近に取り付けたが、一部の試験体で加力点直下のめり込み破壊がみられたため、今年度は平行層の軸力が最も小さくなる加力点または支持点の反対側に取付けた（写真 2.1-9）。前年度の測定方法では試験体の圧縮変位を比較的多く含むため、せん断弾性係数を小さく評価したものと考えられる。このことは、後述するように、面外せん断試験における平行層ラミナ間の水平変位が前年度の G_R の評価値を用いると2倍程度の齟齬が生じたことと一致する。本項で用いたような層内せん断試験の場合、せん断力のほかに、ラミナは軸力を負担する。また、この軸力はせん断長さの方向に一様ではない。応力分布を考慮した評価値の補正方法は今後検討すべき課題といえる。

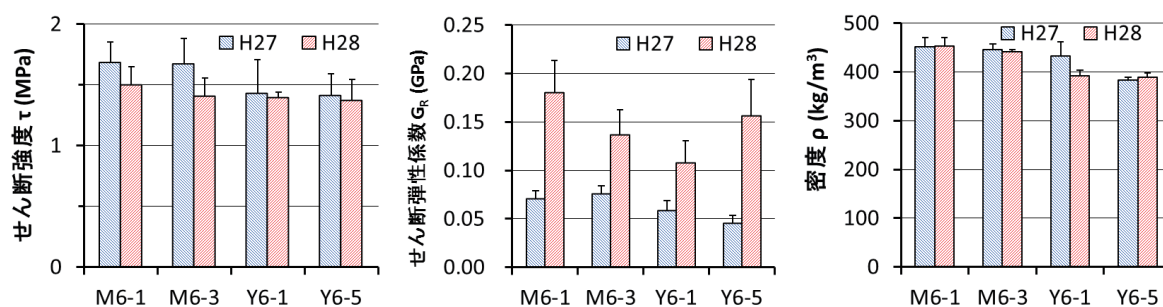


図 2.1-7 前年度の試験結果との比較

H27 は前年度の、H28 は今回の試験データ。エラーバーは標準偏差。



ア) 前年度の測定方法



イ) 今年度の測定方法

写真 2.1-9 層内せん断試験方法の差異 (Y6-1 シリーズの例)

次に、 G_R の今年度のデータの評価値の妥当性について考察する。図 2.1-8 と図 2.1-9 に 5 層 5 プライ C L T (M6-1 および M6-3 シリーズ) の面外曲げ試験における支点－荷重点間の中央部の平行層間の荷重－水平変位関係の比較を示す。計算値は、図 2.1-11 と図 2.1-12 に示す張出し梁モデルに連続体解法を適用した解^{2.1-1)}によるもので、ラミナのヤング係数は表 2.1-2 の平均値を、 G_R と τ は今回の層内せん断試験の各シリーズの平均値を適用した。平行層の引張強さは縦継ぎラミナの引張試験の平均値 (23.2 MPa、愛媛県林業研究センターの報告値) を適用した。実験値は、写真 2.1-10 に示す面外曲げ試験の測定値 (広島県立総合技術研究所林業技術センターの報告^{2.1-1)}) を用いた。なお、計算モデルでは、支点－荷重点間の平行層間の水平変位はスパン方向に比較的安定した値を示す (図 2.1-12)。また、見かけの曲げヤング係数と曲げ強度は計算値と実験値が概ね一致した (図 2.1-10)。

今年度の層内せん断試験で求めた G_R を適用すると、実験値と計算値がよく一致した。計算上、載荷荷重に対して、直交層のせん断耐力は余裕があるが、これに比較して平行層の引張耐力が小さいため、最外層ラミナの引っ張りで破壊が決定される。この点も実験結果と一致した。これらのことから、今回の実験で得られた G_R は概ね妥当な値と考えられる。面外曲げ試験の実験結果と比較した直交層のスギラミナ S60A の層内せん断弾性係数 (いわゆるローリングシア係数) G_R は 0.15～0.18 GPa 程度の値となるが、スギ材の断面内のせん断弾性係数の文献値^{2.1-3)} $G_{RT} = 0.015$ GPa とは著しく異なる。この差異については更なる検討が必要である。

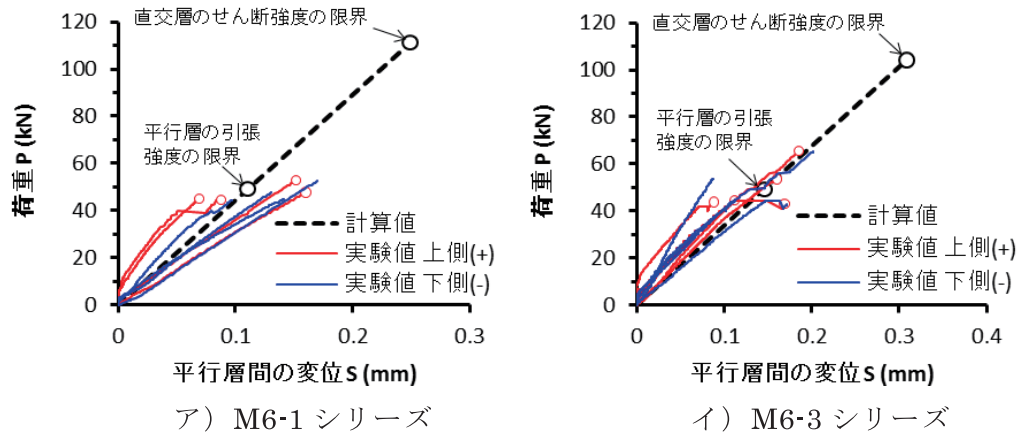


図 2.1-8 面外曲げ試験における支点－荷重点間の中央部の平行層ラミナ間の水平変位 (S60-5-5 強軸試験体)

実験値：写真 2.1-9 を参照。

計算値：張出し梁モデルに連続体解法を適用した解（図 2.1-11、図 2.1-12 を参照）。

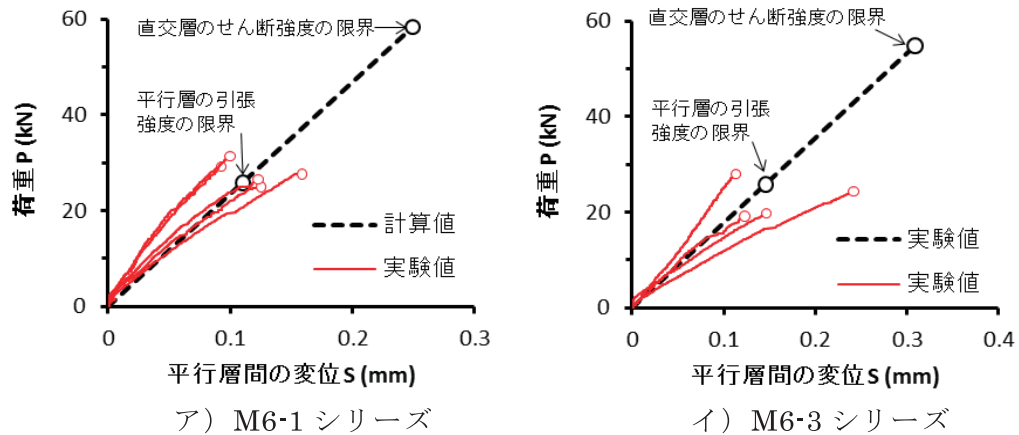


図 2.1-9 面外曲げ試験における支点－荷重点間の中央部の平行層ラミナ間の水平変位 (S60-5-5 弱軸試験体)

実験値と計算値は図 2.1-8 を参照。

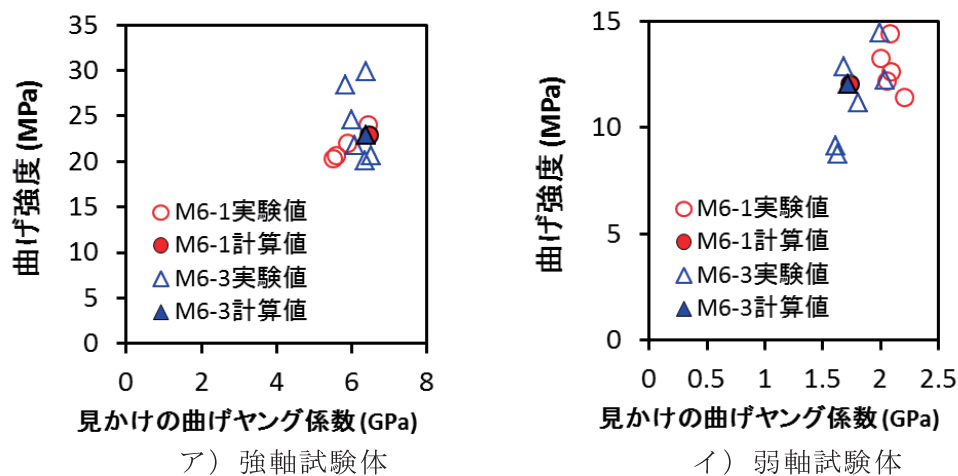


図 2.1-10 面外曲げ試験における見かけの曲げヤング係数－曲げ強度関係の比較



ア) 5層5プライ強軸試験体の測定例



イ) 5層5プライ弱軸試験体の測定例

写真 2.1-10 3等分4点面外曲げ試験における荷重点—支点間中央部での水平変位の測定（広島県立総合技術研究所林業技術センター 藤田氏提供）

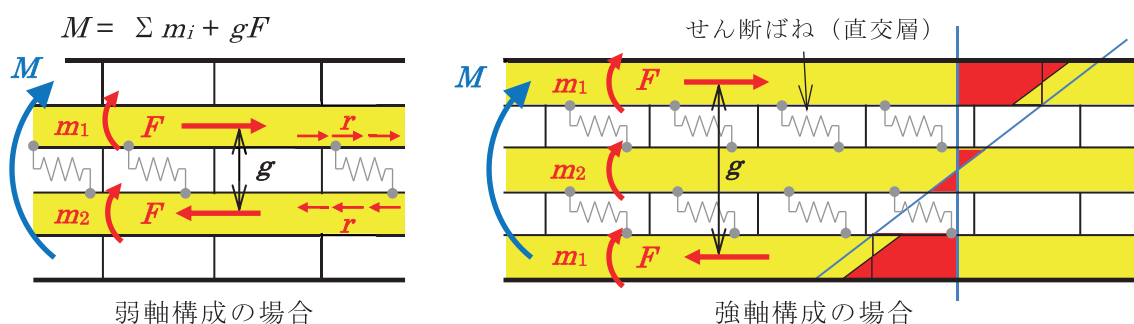
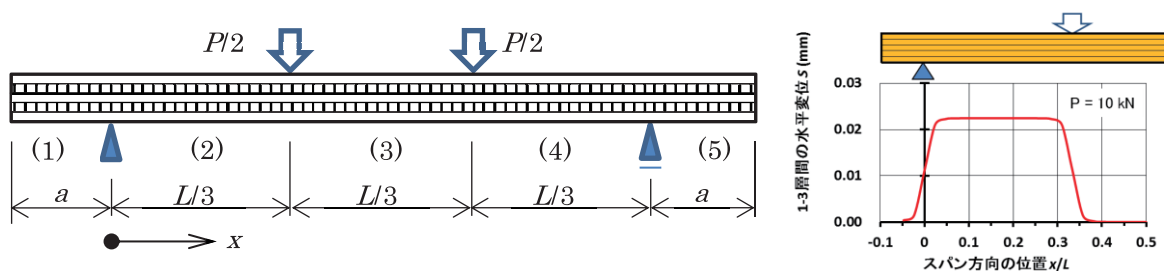


図 2.1-11 不完全合成梁の基本モデル（5層5プライ CLT）



$$F_{(1)} = \frac{2P\alpha}{\beta^3} C \cosh\left(\frac{\beta L}{6}\right) \sinh\left(\frac{\beta L}{6}\right)^2 \sinh(\beta(a+x))$$

$$F_{(2)} = \frac{P\alpha}{4\beta^3} \left\{ 2\beta x + C \left[\sinh\left(\beta\left(a - \frac{L}{2} + x\right)\right) - 2 \cosh\left(\beta\left(a + \frac{L}{3}\right)\right) \sinh\left(\beta\left(x - \frac{L}{6}\right)\right) - \sinh\left(\beta\left(a - \frac{L}{6} + x\right)\right) \right] \right\}$$

$$F_{(3)} = \frac{P\alpha}{\beta^3} \left[\frac{\beta L}{6} - C \cosh\left(\beta\left(a + \frac{L}{6}\right)\right) \sinh\left(\frac{\beta L}{6}\right) \cosh\left(\beta\left(\frac{L}{2} - x\right)\right) \right]$$

$$r = \frac{dF}{dx}, \quad C = \frac{1}{\cosh\left(\beta\left(a + \frac{L}{2}\right)\right)}, \quad \alpha = \frac{kg}{\sum(EI)_i}, \quad \beta^2 = k \left(\frac{2}{(EA)_1} + \frac{g^2}{\sum(EI)_i} \right)$$

図 2.1-12 三等分点荷重を受ける張出し梁のモデル 2.1-1)

次に直交層の層内せん断強度 τ の評価値について考察する。前述のとおり、前年度と比べ今年度に行った試験では τ の評価値が若干小さい（図 2.1-7）。今年度の評価がモーメントの影響などで低めに評価されたものとして、前年度の評価値をより真値に近いものとしみなして考察する。

図 2.1-13 に中央集中 1 点式の面外せん断試験における実験値と計算値の比較を示す。実験値は昨年度事業 2.1-1) で森林総合研究所にて行った試験結果である。計算値は、図 2.1-11 と図 2.1-14 に示す中央集中荷重を受ける梁モデルに連続体解法を適用した解によるもので、せん断強度は層内せん断試験で得られた M6-1 および M6-3 シリーズの強度の各平均値を適用した。曲げ強度は前述の縦継ぎラミナの引張試験の平均値を用いて求めた。

実験の最終破壊形式は、同一シリーズにて曲げ破壊とせん断破壊の両方が観察されたことから、曲げ破壊荷重とせん断破壊荷重は同程度と推察される。平均値を比較すると、実験値に対する計算値の曲げ破壊荷重は、強軸試験体はほぼ一致し、弱軸試験体は 9 割となった。同様にせん断破壊荷重は、強軸試験体は約 85%、弱軸試験体は約 75% (9 割の約 85%) と小さい値を示した。計算モデルが概ね正しいものとするれば、前年度の層内せん断試験で評価された τ は本来の強度の 85% 程度と推察される。この差異については、試験方法を含め、更に検討を必要とする。

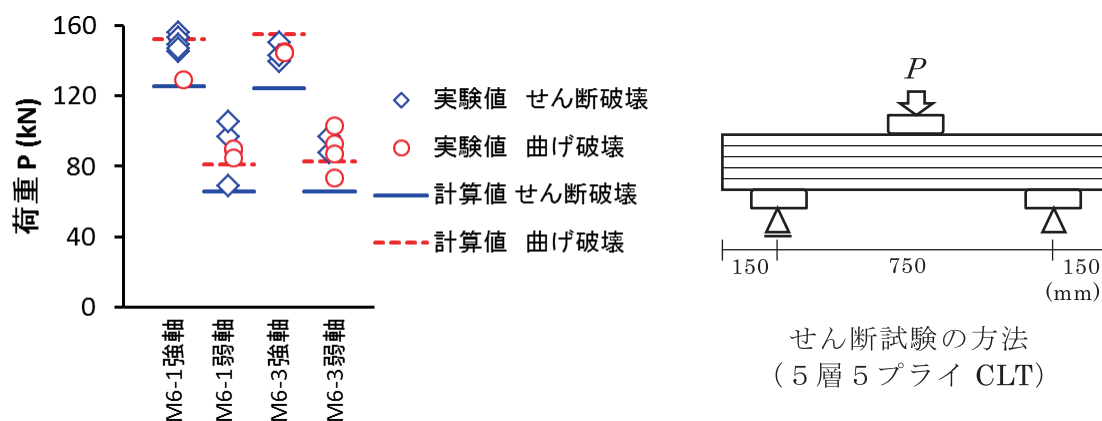


図 2.1-13 面外曲げせん断試験の実験値と評価値の比較

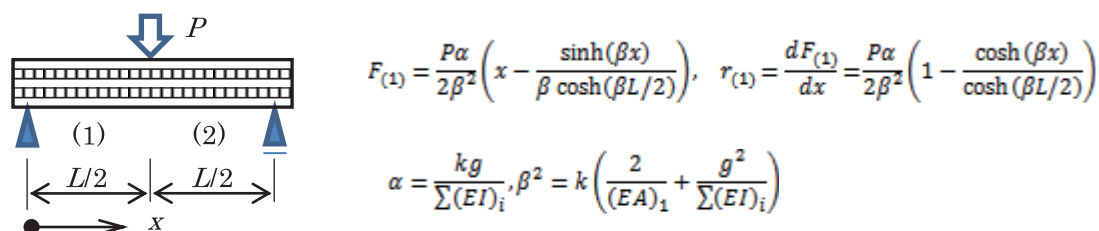


図 2.1-14 中央集中荷重を受ける梁のモデル 2.1-1)

以上の考察を踏まえ、評価した強度特性値およびそれらの関係について考察する。対象は面外曲げ試験や面外せん断試験との比較検討を行った厚さ 30mm のラミナ (S60A) の試験結果とする。まず、グレーディングで管理できるラミナの物性値である繊維方向の縦弾性係数 E_{co} についてであるが、実験方法で述べたとおり、 E_{co} は超音波伝播速度と試験体の見かけの密度を用いて評価した。表 2.1-23 に示すように、製造ラミナの区分結果（表 2.1-2）と比較すると低めの値で評価したと考えられる。また、今年度の測定データに比べ

て前年度の測定データは若干低い。これは、測定者によって受発信センサーの試験体への押しつけ力が異なり、伝達速度の評価が異なったためと考えられる。 E_{Co} が区分結果と平均値が等しくなる補正係数を乗じて以下、せん断強度特性との比較検討に用いる。

面外せん断試験の実験結果との比較から、 τ を、前年度の測定値は真値 = 測定値/0.85として、今年度の測定値は真値 = 測定値 \times 1.16/0.85として補正する。1.16はM6-1、M6-3シリーズの τ の平均値の前年度と今年度の比である。 τ の平均値は約2.0 MPaとなる。 G_R は今年度の試験データを用いて、平均値が約0.15 GPa、 τ/G_R は約13/1000となった(図2.1-15 ア))。ところで、図2.1-15に示すように、グレーディングで管理できるラミナの物性値である繊維方向の縦弾性係数と τ や G_R とは強い相関関係はみられなかった。結論付けるには更に様々な等級のデータによる検証が必要であるが、直交層のせん断強度特性は等級区分に依存しない可能性がある。

表 2.1-23 S60A ラミナの軸方向のヤング係数の比較と E_{Co} の補正係数

測定データ	n	平均値 (GPa)	変動係数	補正係数
区分結果※	—	8.48	19.5%	—
今年度の E_{Co}	15	6.02	19.0%	1.41
前年度の E_{Co}	18	7.29	11.3%	1.16

※区分結果は試験体製造用ラミナの区分結果¹⁾(表 2.1-2 参照)

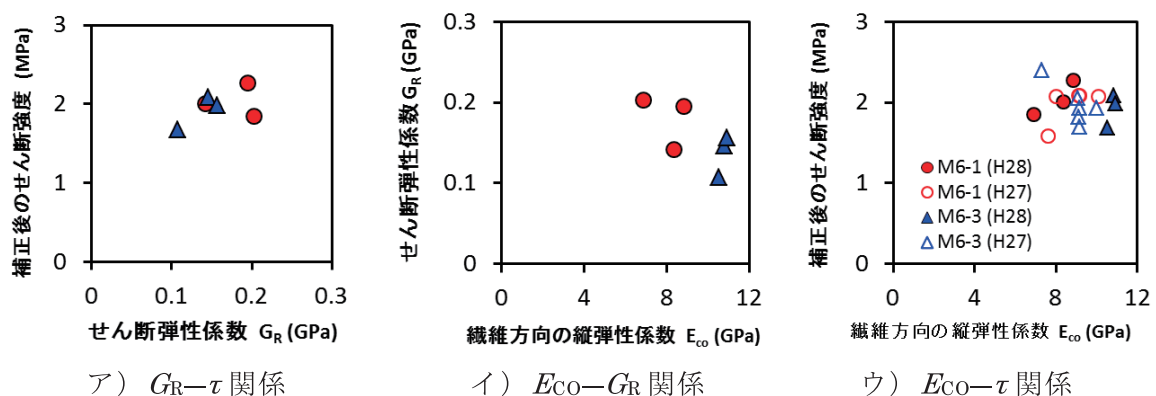


図 2.1-15 直交層ラミナの強度特性値間関係 (ラミナ厚さ 30mm、S60A)

さらに、ラミナの厚さの影響について考察する。比較するのは今年度試験を行った表 2.1-24 に示す試験体で、Mx60 構成の内層ラミナ (M30) の層内せん断試験を行ったもののうち、比較的せん断長さ L が大きかったものである。厚さは 20、30、42mm の 3 種類あるが、図 2.1-16 に示すように、ラミナの厚さが大きくなるほど G_R も τ も小さくなる傾向を示した。なお、実大試験との比較を行っていないため、両せん断強度特性値とも補正はしていない。表 2.1-24 に示すように、強度に影響を与えると思われるスパンは、せん断長さとの比 a/L が 0.5~0.75 程度で、ラミナの厚さが 42mm の試験体が最も a/L が大きい。同程度の 208 シリーズと比較すると強度特性値が顕著に小さい。せん断長さとラミナの厚さの比 L/t は 421 シリーズを除き、10 に近い値で、421 シリーズを除いても傾向は変わらない。すなわち、ラミナの厚さに対する層内せん断強度特性の寸法効果が示唆されたといえる。定量的な評価方法を検討するには更なるデータ収集が必要である。

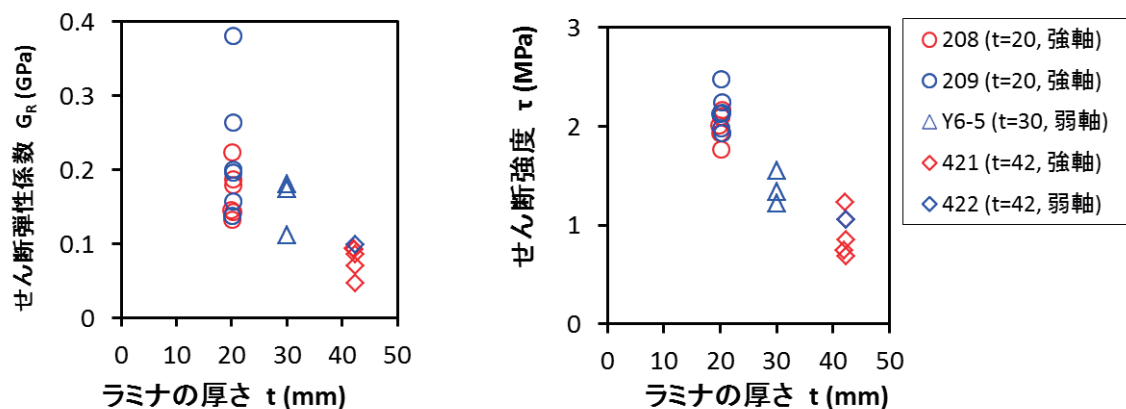


図 2.1-16 ラミナの厚さとせん断強度特性の関係（Mx60 構成）
 G_R 、 τ とも未補正の値

表 2.1-24 図 2.1-16 の試験体の仕様

シリーズ	ラミナ構成	試験対象のラミナ※ ³			試験体		
		厚さ t (mm)	幅 w (mm)	w/t	せん断長さ L (mm)	a/L ※ ⁴	L/t
208	Mx60-9-9 強軸	20	105	5.25	208 (2 LMNs)	0.67	10.4
209	同上 弱軸				208 (2 LMNs)	0.48	10.4
Y6-5※ ¹	Mx60-5-5 弱軸	30	105	3.50	313 (3 LMNs)	0.58	10.4
421※ ²	同上 強軸	42	175	4.17	173 (1 LMN)	0.73	4.1
422※ ²	同上 弱軸				340 (2 LMNs)	0.74	8.1

※¹ ラミナ間の幅はぎ接着あり。※² 幅はぎラミナ。※³ 等級はいずれも M30（内層）。
 ※⁴ a は支点の内法長さ。

文献

- 2.1-1) 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
- 2.2-2) 新藤健太，宮武敦，平松靖，渡部博：スギを用いて製造したクロス・ラミネイティド・ティンバー（CLT）の強度性能 その 4 面外せん断性能，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造 III，pp.121-122 (2013)
- 2.1-3) 森林総合研究所監修：改訂 4 版本材工業ハンドブック，丸善，pp.135-136 (2004)

2.2 試験評価法に関する検討

欧州で開発された CLT については、我が国でも普及、発展が強く望まれており 2016 年 3・4 月に材料の設計強度や試験法・評価法、構造方法に関する技術的基準等が整備され、一般化したところである。しかし、2011 年に CLT に関する国内での一連の検討が開始されてから、早期の技術的基準の制定、又は改正を目指したため、種々の仕様等が限定的である。また、CLT は強度異方性を持つひき板をさらにその繊維方向を直交させながら積層接着した材料で、荷重の種類やそれが材料に加えられる面や方向の組合せによって異なるその複雑な力学的挙動が複雑で、一部の仕様については十分に明らかになっているわけではない。そのため、JAS 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のなかでは除外されている製品仕様もある。このような状況を踏まえ、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・分析を行う。ここでは、基準の適用範囲の拡大を企図して CLT の面内せん断性能を簡便に評価する方法について検討する。

2.2.1 逆対称 4 点曲げせん断試験

i) 試験方法

図 2.2.1-1 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 2.2.1-2 の通りである。CLT の幅方向を梁のせいとし、全スパン (l) を $9h$ として逆対象 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 $0.4 \sim 1.0 \text{ mm/sec}$ とした。

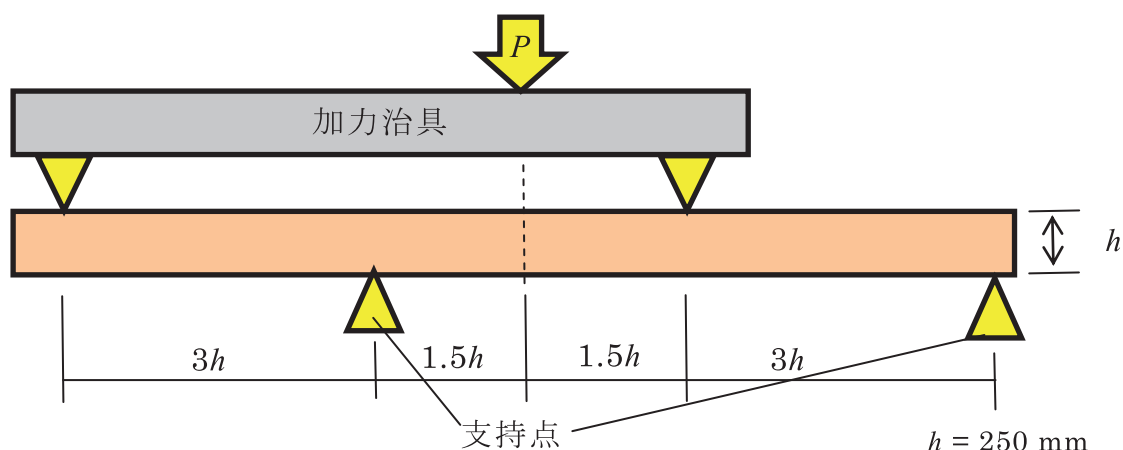


図 2.2.1-1 逆対称 4 点曲げせん断試験の概要

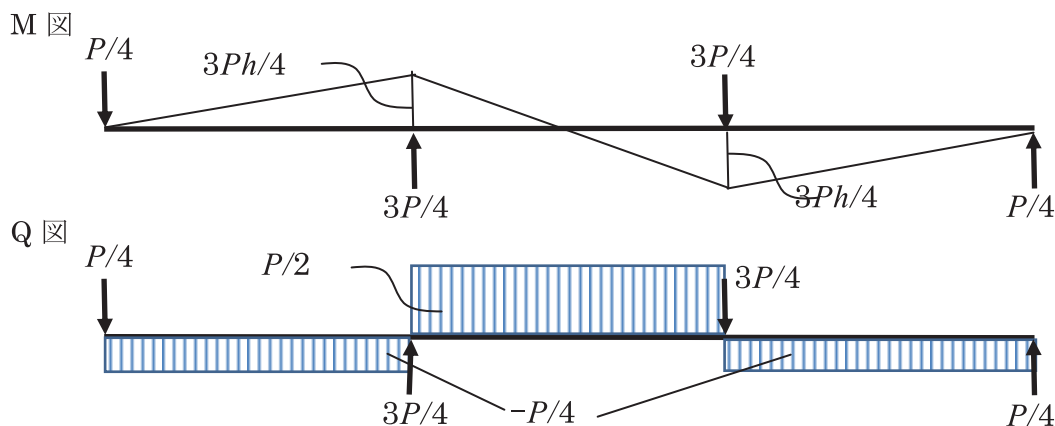


図 2.2.1-2 逆対称 4 点曲げせん断試験におけるモーメント及びせん断力の分布

ii) 試験体

原料ラミナを直交集成板の日本農林規格(以下、「JAS」と称する)に定める M90A, M60A, M30A の基準に適合するヒノキ、及びスギとした 5 層 5 ply の厚さ 150mm の CLT を試験体とした。試験体の種類は Mx60A、S60A、Mx90A、S90A とした。各仕様は表 2.1.1-1 の通りであり、各試験体の余長は 150 mm とした。

表 2.2.1-1 曲げせん断試験体

No.	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
1	スギ	スギ	Mx60	5	5	150	250	2,650	5
2	スギ	スギ	S60	5	5	150	250	2,650	5
3	ヒノキ	スギ	Mx90	5	5	150	250	2,650	5
4	ヒノキ	ヒノキ	S90	5	5	150	250	2,650	5

iii) 試験結果

20 体のうち 4 体は試験機の不具合（暴走）により、データを得られなかった。加力試験の結果得られた全体荷重と曲げ変形（図 2.2.1-2 において上から 3P/4 の载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 Mx60、S60、Mx90、S90 についてそれぞれ図 2.2.1-3～2.2.1-6 に示した。

各試験体の破壊状況を写真 2.2.1-1～2.2.1-16 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。S90 試験体においては、内層ラミナ自体も横（繊維直交）方向のせん断破壊を生じている例が多く確認された。

せん断強さ τ を式(2.2.1-1)により算出し、せん断剛性 G を式(2.2.1-2)より算出し、試験体の密度、含水率とともに表 2.2.1-2 に示す。いずれの数値も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、逆対称 4 点曲げせん断試験の有効性が示唆された。

$$\tau = 3P_{\max}/4A \quad (2.2.1-1)$$

ここで、 τ ：せん断強さ（N/mm²）

P_{\max} ：最大荷重（N）

A ：断面積（mm²）

$$G = P/2\gamma A \quad (2.2.1-2)$$

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 2.2.1-2 逆対称 4 点曲げせん断試験結果（その 1 : Mx60、S60）

番号	密度 (kg/m ³)	G (kN/mm ²)	τ (N/mm ²)
Mx60-1	428.3	1.037	3.500
Mx60-2	421.4	0.944	3.383
Mx60-3	401.2	1.212	2.644
Mx60-4	411.4	0.897	3.348
Mx60-5	423.1	1.101	3.136
平均値	417.1	1.038	3.202
最大値	428.3	1.212	3.500
最小値	401.2	0.897	2.644
標準偏差	9.677	0.1121	0.3030
変動係数	0.0232	0.1080	0.0946
下限値*		1.001	2.456

番号	密度 (kg/m ³)	G (kN/mm ²)	τ (N/mm ²)
S60-1	410.8	1.024	3.407
S60-2	411.4	0.965	3.172
S60-3	412.2	1.104	2.877
S60-4	427.5	0.985	2.896
S60-5	421.2	0.983	3.570
平均値	416.6	1.012	3.184
最小値	427.5	1.104	3.570
最大値	410.8	0.965	2.877
標準偏差	6.639	0.0497	0.2743
変動係数	0.0159	0.0491	0.0861
下限値*		0.996	2.509

* : 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

表 2.2.1-2 逆対称 4 点曲げせん断試験結果（その 2 : Mx90、S90）

番号	密度 (kg/m ³)	G (kN/mm ²)	τ (N/mm ²)
Mx90-1	443.4	1.099	2.890
Mx90-2	446.5	1.049	3.314
Mx90-3	445.3	1.370	3.229
Mx90-4	437.1	2.149	3.129
Mx90-5	487.9	— **	— **
平均値	452.1	1.417	3.141
最小値	487.9	2.149	3.314
最大値	437.1	1.049	2.890
標準偏差	18.235	0.4398	0.1588
変動係数	0.0403	0.3105	0.0506
下限値*		1.248	2.715

番号	密度 (kg/m ³)	G (kN/mm ²)	τ (N/mm ²)
S90-1	479.6	1.159	4.163
S90-2	483.8	2.072	3.646
S90-3	490.9	1.105	4.141
S90-4	473.9	1.185	4.215
S90-5	483.3	— **	— **
平均値	482.3	1.380	4.041
最小値	490.9	2.072	4.215
最大値	473.9	1.105	3.646
標準偏差	5.553	0.4003	0.2298
変動係数	0.0115	0.2900	0.0569
下限値*		1.227	3.425

* : 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

** : 測定トラブルにより、データ無し。

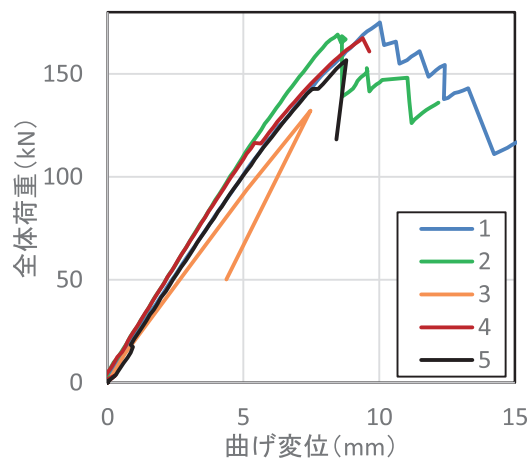


図 2.2.1-3 Mx60 全体荷重と曲げ変形の関係

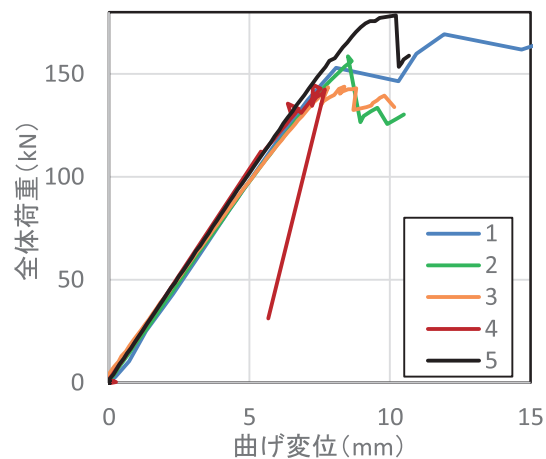


図 2.2.1-4 S60 せん断応力とひずみの関係

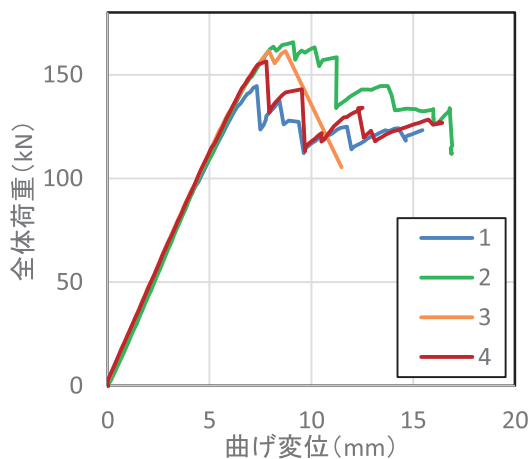


図 2.2.1-5 Mx90 せん断応力とひずみの関係

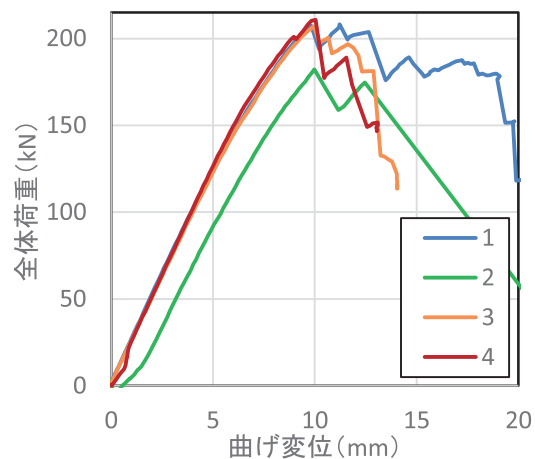


図 2.2.1-6 S90 せん断応力とひずみの関係



写真 2.2.1-1 Mx60-1 の破壊状況



写真 2.2.1-2 Mx60-2 の破壊状況



写真 2.2.1-3 Mx60-4 の破壊状況



写真 2.2.1-4 Mx60-4 の破壊状況

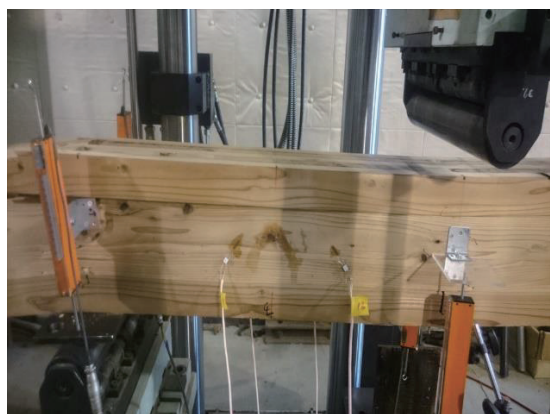


写真 2.2.1-5 S60-1 の破壊状況

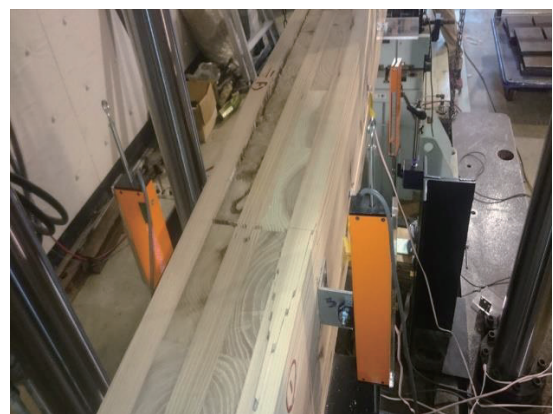


写真 2.2.1-6 S60-2 の破壊状況



写真 2.2.1-7 S60-3 の破壊状況

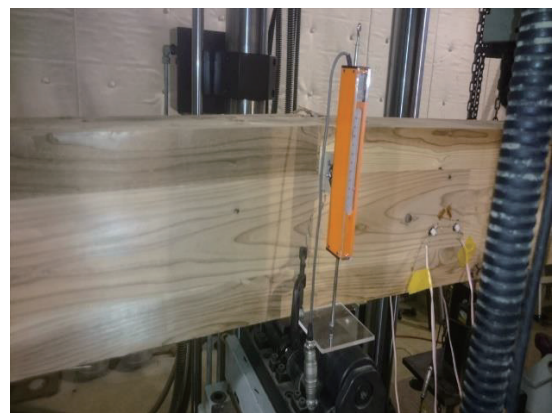


写真 2.2.1-8 S60-4 の破壊状況



写真 2.2.1-9 S60-5 の破壊状況



写真 2.2.1-10 Mx90-1 の破壊状況



写真 2.2.1-11 Mx90-2 の破壊状況



写真 2.2.1-12 Mx90-3 の破壊状況

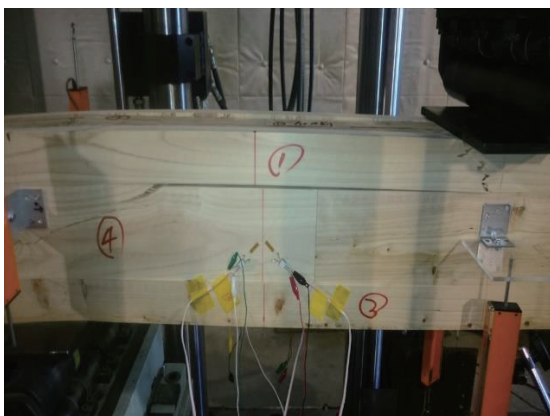


写真 2.2.1-13 Mx90-4 の破壊状況



写真 2.2.1-14 Mx90-5 の破壊状況



写真 2.2.1-15 S90-1 の破壊状況(1)



写真 2.2.1-16 S90-1 の破壊状況(2)



写真 2.2.1-17 S90-3 の破壊状況

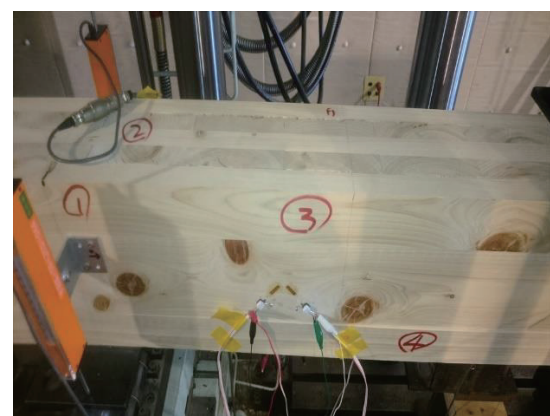


写真 2.2.1-18 Mx90-1 の破壊状況

2.2.2 繊維直交方向の圧縮せん断試験

i) 試験方法

図 2.2.2-1 に示すような R. Brandner らによる試験方法 2.2.2-1) 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を作成して、単調載荷試験を行った。クロスヘッドの下降速度は 0.15 mm/sec とした。

ii) 試験体

2.2.1 と同様に S60A、Mx90A による 5 層 5 ply の厚さ 150mm の CLT を試験体とした。試験体数は各仕様について 6 体ずつ計 12 体である。

具体的な試験体の寸法は、加力中心線が支持断面の中心に来る必要があり、試験体のラミナ幅に応じて決めた。ラミナ幅を b (mm)、試験体中央部の幅はぎ面のスペースを s (mm) とすれば、試験体の全長 L (mm) は式(2.2.2-1)で表され (図 2.2.2-2)、 b と s の組み合わせにより、表 2.2.2-1 のようになる。

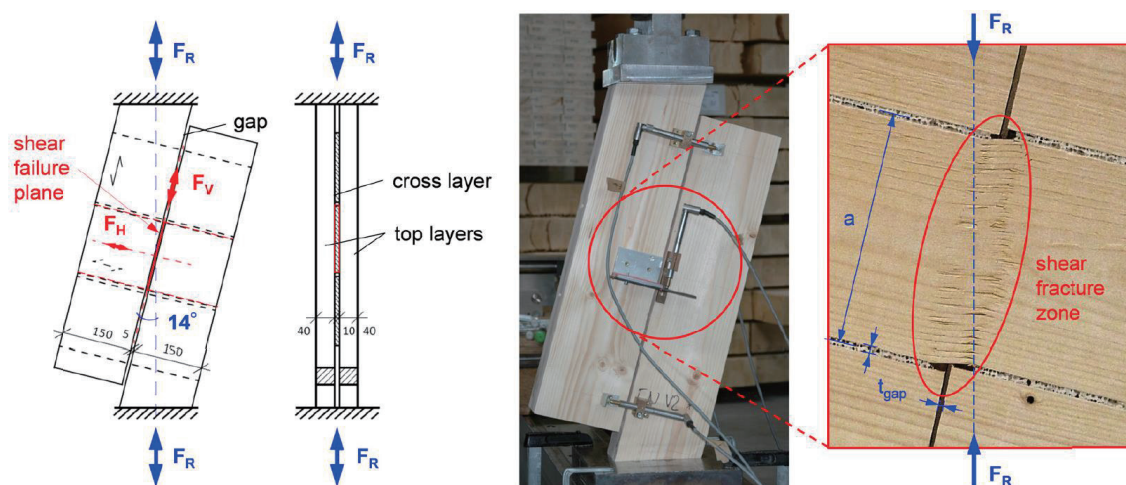


図 2.2.2-1 R. Brandner らによる圧縮せん断試験方法 2.2.2-1)

$$L = \frac{b}{\sin 14^\circ \cos 14^\circ} + \frac{s}{\tan 14^\circ}$$

(2.2.2-1)

ここで、 L : 試験体長さ (mm)

b : 片側のラミナの幅 (mm)

表 2.2.2-1 ラミナ幅、縁スペースと試験体全長の関係

ラミナ幅 b (mm)	スリット s (mm)	試験体全長 L (mm)	試験体全幅 B (mm)
117.0	3	510.47	237
118.0	3	514.73	239
119.0	3	518.99	241
120.0	3	523.25	243

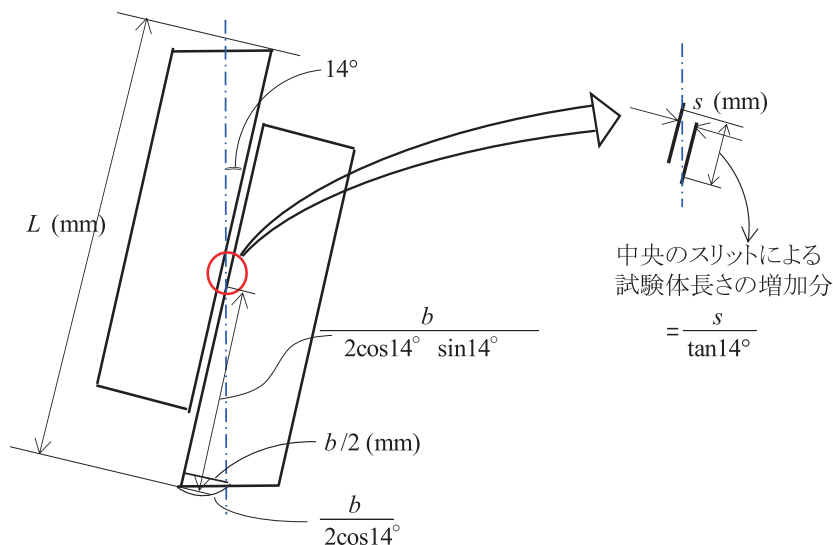


図 2.2.2-2 試験体の詳細寸法

iii) 試験結果

加力試験の結果、得られた荷重変形関係を図 2.2.2-3 (S60) 及び図 2.2.2-4 (Ms90) に示し、各試験体の破壊状況をそれぞれ写真 2.2.2-1～2.2.2-12 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(2.2.2-2)、せん断弾性係数 G を式(2.2.2-3)より算出し、試験体の密度とともに表 2.2.2-2 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とほぼ同様の数値であったが、せん断弾性係数は低めの数値となった。

$$\tau = P_{max}/A \quad (2.2.2-2)$$

ここで、 τ ：せん断強さ (N/mm²)

P_{max} ：最大荷重 (N)

A ：断面積 (mm²)

$$G = P/\gamma A \quad (2.2.2-3)$$

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 2.2.2-2 逆対称 4 点曲げせん断試験結果（その 1：Mx60、S60）

番号	密度 (kg/m ³)	G (kN/mm ²)	τ (N/mm ²)
S60-1	383.5	0.615	3.343
S60-2	394.3	0.661	3.536
S60-3	399.7	0.767	3.442
S60-4	407.9	— **	3.347
S60-5	391.6	0.626	3.598
S60-6	407.9	0.641	3.430
平均値	397.5	0.662	3.449
最大値	407.9	0.767	3.598
最小値	383.5	0.615	3.343
標準偏差	8.770	0.0547	0.0929
変動係数	0.0221	0.0826	0.0269
下限値*		0.644	3.220

番号	密度 (kg/m ³)	G (kN/mm ²)	τ (N/mm ²)
Mx90-1	428.2	— **	3.897
Mx90-2	406.5	0.700	3.275
Mx90-3	409.2	0.697	3.117
Mx90-4	430.9	0.750	3.559
Mx90-5	414.6	0.587	3.102
Mx90-6	444.4	0.681	3.852
平均値	422.3	0.683	3.467
最大値	444.4	0.750	3.897
最小値	406.5	0.587	3.102
標準偏差	13.406	0.0530	0.3251
変動係数	0.0317	0.0776	0.0938
下限値*		0.665	2.707

*：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

**：測定トラブルにより、データ無し。

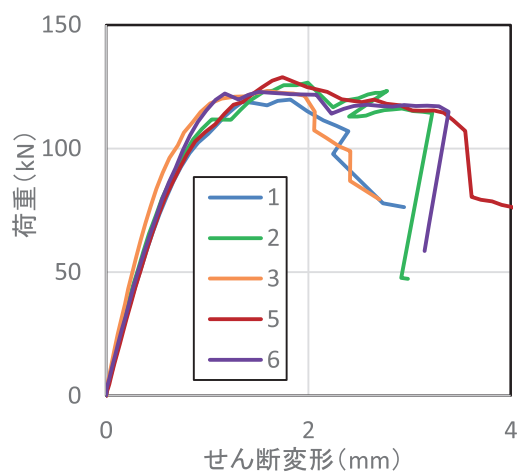


図 2.2.2-3 S60 せん断力と変形の関係

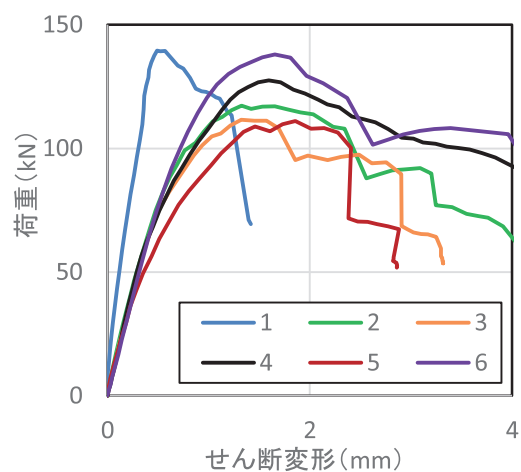


図 2.2.2-4 Mx90 せん断力と変形の関係



写真 2.2.2-1 S60-1 の破壊状況



写真 2.2.2-2 S60-2 の破壊状況

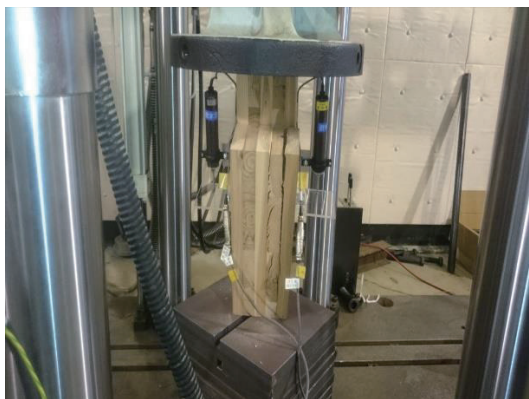


写真 2.2.2-3 S 60-3 の破壊状況



写真 2.2.2-4 S 60-4 の破壊状況



写真 2.2.2-5 S60-4 破壊状況

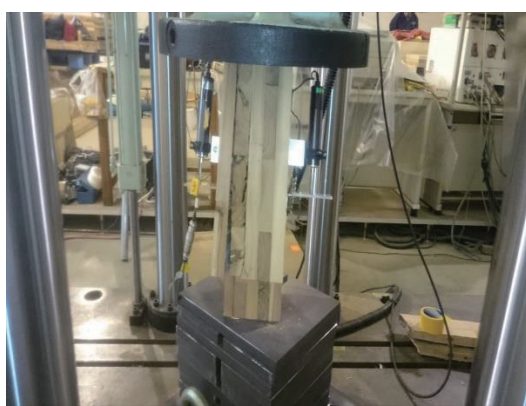


写真 2.2.2-6 S60-5 の破壊状況



写真 2.2.2-7 Mx90-1 の破壊状況



写真 2.2.2-8 Mx90-2 の破壊状況



写真 2.2.2-9 Mx90-3 の破壊状況

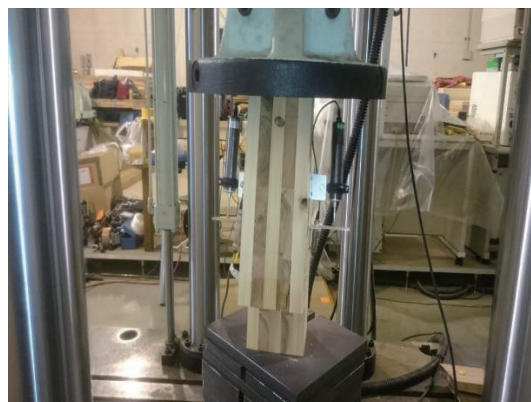


写真 2.2.2-10 Mx90-4 の破壊状況

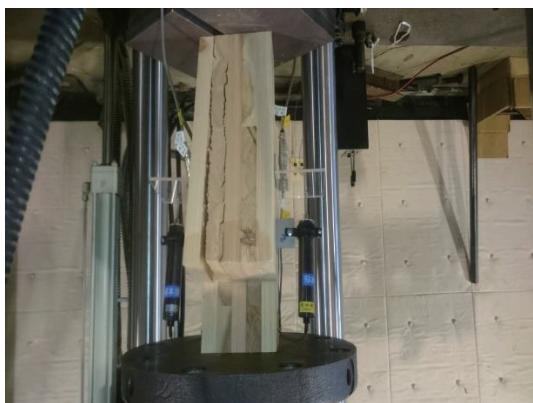


写真 2.2.2-11 Mx90-5 の破壊状況



写真 2.2.2-12 Mx90-6 の破壊状況

iv) 引用

2.2.2-1) R. Brandner, T. Bogensperger, G. Schickhofer: “In plane Shear Strength of Cross Laminated Timber (CLT): Test Configuration, Quantification and influencing Parameters”, International Council for Research and Innovation in Building and Construction, Working Commission W18 - Timber Structures, Vancouver, Canada, 2013.

2.2.3 圧縮せん断試験

CLT のせん断強度およびせん断剛性を得るには、CLT に純粋なせん断力を作用させ、その変形状態を評価することが理想である。しかし、3.4 で示すような非常に大がかりな実験とならざるを得ないため、オーストリアでは簡便に評価する方法が検討されている¹⁾²⁾。本項ではこの事例に倣い、ラミナの軸方向を 45 度方向傾けて木取りした短柱による圧縮試験によって CLT のせん断評価を試みる。基本概念を図 2.3.3-1 に示す。

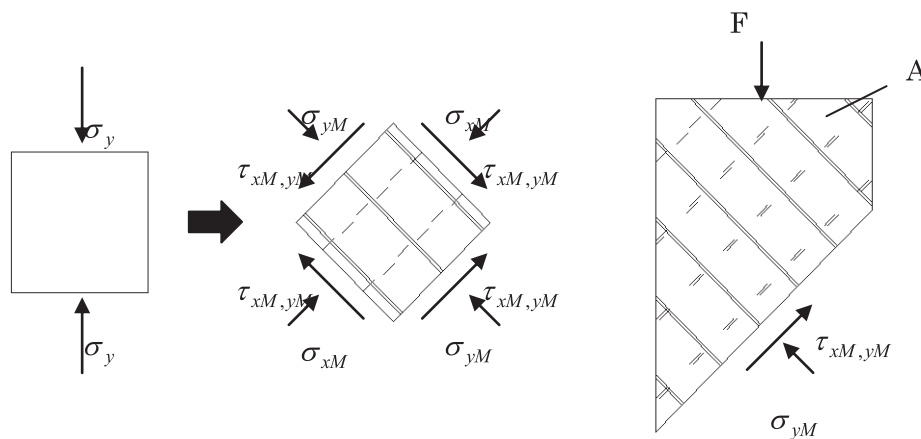


図 2.2.3-1 45 度方向で面内圧縮した場合のせん断力¹⁾

ここで、解析断面（45 度方向の断面）が断面積（A：加圧面の面積）の $\sqrt{2}$ 倍で、解析断面に作用するせん断力は F の $1/\sqrt{2}$ 倍であることから、せん断応力は、圧縮強度の $1/2$ が作用していることになるので、せん断応力は、式 2.2.3-1 で表すことができる。

$$\tau_{xM,yM} = \frac{1}{2} \cdot \frac{F_{\max}}{A} = \frac{F_{\max}}{2 \cdot w_{CLT} \cdot t_{CLT}} \quad \dots \text{式 2.2.3-1}$$

一方、CLT のせん断変形については、図 2.2.3-2 のように 3 つの変形モードによるモデル化が提案されている³⁾。

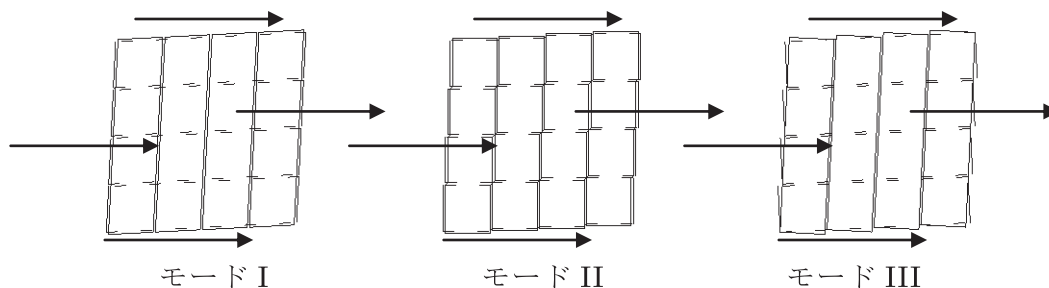


図 2.2.3-2 CLT におけるせん断変形のモード³⁾

ここで、文献 1)、2)では、せん断剛性については、ラミナのヤング係数を反映すること、で、式 2.2.3-2 で表せるとしている。

$$G_{xM,yM} = \frac{1}{\left(\frac{4}{E_y} - \frac{1}{E_{xM}} - \frac{1}{E_{yM}} \right)} \quad \dots \text{式 2.2.3-2}$$

45 度方向で採材した試験体を圧縮した場合のせん断変形のイメージを図 2.2.3-3 に示す。厳密には、層構成が奇数であることから繊維方向と繊維直交方向の比率でヤング率を補正する必要があることや垂直抗力（図 2.2.3-1 中、 σ_{yM} ）の影響を考慮する必要であることなど、全体変形には様々な因子が作用しているが、式 2.2.3-2 の繊維方向のラミナのヤング係数 E_{xM} および繊維直行方向のラミナのヤング係数 E_{yM} が明らかであり、せん断変形要素だけを取り出すことができれば、間接的にせん断剛性を評価することができるといえる。

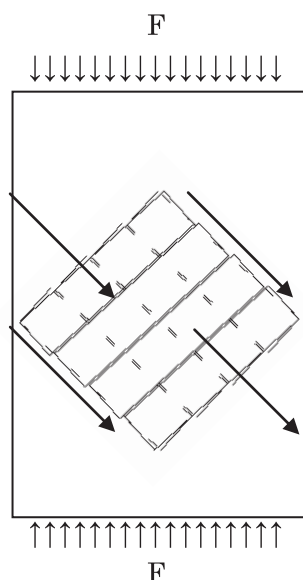


図 2.2.3-3 短柱圧縮せん断試験における全体変形のイメージ

i) 試験体

試験に用いた CLT は、3 層 3 プライ、5 層 5 プライ、7 層 7 プライ、9 層 9 プライのスギ CLT で、3.4 の面内せん断性能試験と同じ原板から採材したものである。試験体長さは、全断面に対する細長比 λ ($=h/\sqrt{12}$) がおよそ $\lambda 20$ となることに配慮したうえで、ラミナ幅が 105mm の試験体で、短辺にかからないラミナが全層において 3 枚確保されるように設定した。ただし、3 層 3 プライのみラミナ幅は 135mm であるため、短辺にかからないラミナは 2 枚である。CLT は幅はぎ無し（目地の接着無し）であるが、3 層 3 プライのラミナは幅はぎして 135mm にしたラミナで構成されている。試験体数は各 2 である。試験体概要の一覧を表 2.2.3-1 に示す。

表 2.2.3-1 45 度方向短柱圧縮試験に用いた CLT の概要

等級・構成	ラミナ厚 (mm)	細長比 (λ)	寸法 (mm) 厚さ×幅×長さ	試験体数 (原板番号)
Mx60-3-3	45	21.3	135×300×830	2 体(45B1,45B2)
Mx60-5-5	30	19.2	150×300×830	2 体(304-1,304-2)
Mx60-7-7	20	20.5	140×300×830	2 体(204-1,204-2)
Mx60-9-9	20	16.0	180×300×830	2 体(207-1,207-2)

ii) 試験方法

試験は、縦振動法によって非破壊的に縦弾性係数 (E_{tr}) を測定したのち、最大容量が 3000kN の圧縮試験機 (前川試験機製作所製、A-300-B4) を用いて圧縮強度試験に供した。加圧盤は上下とも固定とし、上端側には厚さ 1mm のテフロンシート 2 枚に厚さ 0.1mm のテフロンシートを挟み込んで挿入した。試験速度は最大荷重に達するまでの時間が約 3 分となるように調整し、最大荷重の 2% の荷重低下をもって試験終了とした。変位は、クロスヘッドの変位を変位計 (東京測器研究所製、CDP-50) で幅面の表裏で計測するとともに、変位計 (CDP-25) を取り付けた治具を用いて、標点間距離を材長の 1/2 として試験体中央の縮みを幅面の表裏で測定し、その平均値を試験体の圧縮変位とした。変位の計測に用いた治具は、ナイフエッジで試験体に接触させ、試験体の厚さ方向の変形をできるかぎり拘束しないようにスプリングを介して両側から引き寄せて取り付けた。試験体中央のラミナには表裏面で長さ 30mm のひずみゲージ (東京測器研究所製、PFL-30-11) を縦、横、表板ラミナ繊維方向の 3 方向で重ねて貼付した。試験の様子を写真 2.2.3-1 に、ターゲット部分の試験における変形のイメージを図 2.2.3-4 に示す。

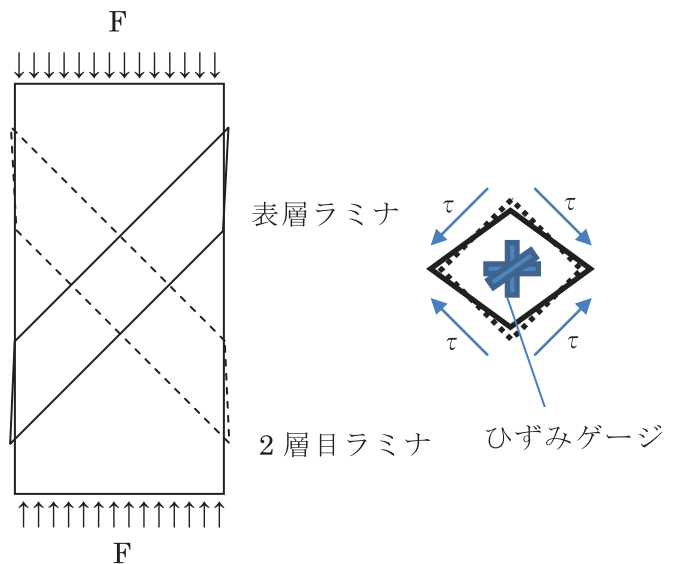
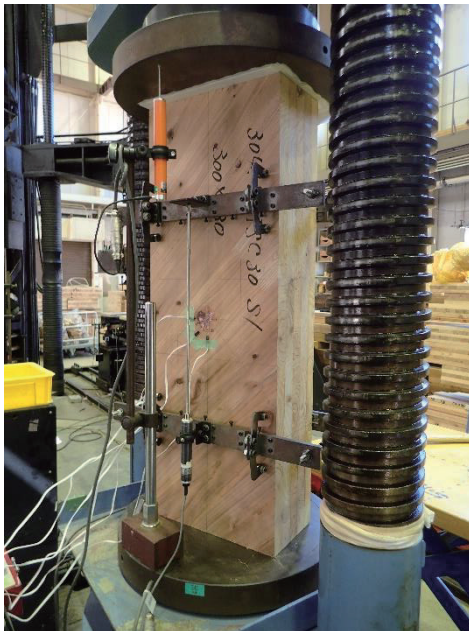


写真 2.2.3-1 試験の様子 (5-5 での例) 図 2.2.3-4 中央ラミナの変形のイメージ

iii) 試験結果と考察

破壊性状を写真 2.2.3-2 に示す。最終的には、試験体の側面で爪のように突出する破壊がすべての試験体で見られた。加えて、接着層に沿った木破が確認されるものもあった。テフロンシートの界面は横滑りした様子はなかったことから、上下加圧版に掛かるラミナはテフロンシートを介しても、変形を拘束していた可能性が残るが、材中央部分の破壊性状から、中央の 3 枚のラミナ (3 層 3 プライについては 2 枚) は、図 2.2.3-2 におけるモード III の変形が生じたものと考えられる。図 2.2.3-5 荷重-ひずみ曲線の例を示す。純粋にせん断変形した場合には、縦方向ひずみの絶対値と横方向ひずみの絶対値は等しくなるが、圧縮せん断試験では、縦方向ひずみの絶対値は横方向ひずみの絶対値のおおよそ 2 倍の値を示した。



写真 2.2.3-2 破壊性状

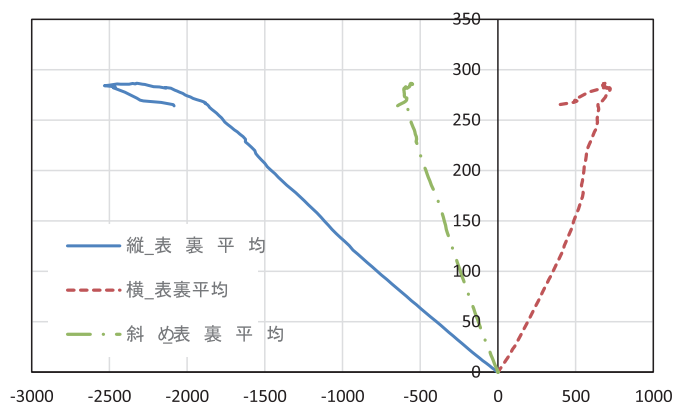


図 2.2.3-5 荷重-ひずみ曲線
(5-5 の例、圧縮を負、引張を正として表示)

表 2.2.3-2 に 45 度方向の短柱圧縮性能として評価した場合の結果を示す。ヤング係数は変位計による計測値に加え、ひずみゲージの縦方向のみの値を用いて評価した場合も記した。ヤング係数は積層数が多いほど高くなる傾向にあり、縦振動によって非破壊的に計測した縦弾性係数は、変位計によるヤング係数の方に近い値を示した。45 度方向圧縮強度 σ_{c45} についても積層数が多いほど高くなる傾向があり、積層数（接着層数）がヤング係数、強度ともに、大きく影響している可能性が示唆される。ただし、7 層 7 プライと 9 層 9 プライで強度差があまりないことから、通常はモード III 変形が支配的であるが、積層数が増えるとモード I の強度に達して破壊に至る可能性も示唆される。

表 2.2.3-2 45 度方向短柱圧縮試験結果一覧

仕様	番号	密度 (kg/m ³)	E_{fr45} (kN/mm ²)	変位計		σ_{c45} (N/mm ²)
				ひずみゲージ	ひずみゲージ	
				(kN/mm ²)	(N/mm ²)	
3-3	45B1	401	1.91	1.60	2.21	4.18
	45B2	398	1.89	1.83	2.56	3.96
5-5	304-1	406	2.13	1.78	2.90	6.31
	304-2	398	1.96	1.73	2.35	5.91
7-7	204-1	413	2.36	2.02	2.90	8.35
	204-2	419	2.47	2.19	2.62	8.54
9-9	207-1	420	2.44	2.27	2.64	8.53
	207-2	421	2.45	2.21	2.37	8.92

E_{fr45} : 縦振動法による 45 度方向の縦弾性係数 (kN/mm²)

E_{c45} : 強度試験で得られた 45 度方向の縦圧縮ヤング係数 (kN/mm²)

σ_{c45} : 強度試験で得られた 45 度方向の縦圧縮強度 (N/mm²)

次に表 2.2.3-3 の結果をせん断性能に換算する。ここで、式 2.2.3-2 に代入すべき E_{xM} および E_{yM} は不明であるため無視して、せん断剛性 G を $G=E/4$ として過小に評価する。すなわち、ターゲットとした正方形部分の対角線のひずみを ε とした場合に適用できる $\gamma=2\varepsilon$ の関係および前掲の $\sigma=2\tau$ の関係から $\tau=G\gamma$ の関係を用いて算出する。ここで採用する ε は 3 種類とし、縦方向ひずみと横方向ひずみの絶対値の平均を ε として求めた $G_{\text{ひずみ縦横平均}}$ に加え、縦方向ひずみのみから求めた $G_{\text{ひずみ縦のみ}}$ ¹⁾、変位計の値をひずみに換算した値から求めた $G_{\text{変位計}}$ を算出した。

換算結果を表 2.2.3-3 に示す。せん断剛性換算値は $G_{\text{ひずみ縦横平均}}$ で評価した場合が最も高い値となったが、図 2.2.3-5 荷重・ひずみ曲線の例に示した通り、横方向ひずみの値が、縦方向ひずみの値に等しくないため、純粋にせん断変形していたと言い難く、平均値を採用することへの疑問が残る。一方、 $G_{\text{ひずみ縦のみ}}$ の場合には、木材のせん断剛性とされている値に近い値が算出されているが、縦方向のみのひずみを採用する理論的な根拠に乏しい。 $G_{\text{変位計}}$ の値は最も小さく、ラミナの交差部分だけでなく、全体の圧縮ひずみとして計測された値であるため、小さい値となったものと考えている。

以上のように、せん断剛性換算値は論理的根拠に乏しい面があるのは否めない。ただし、数値自体の取り扱いには注意が必要であるものの 3.4 の結果に近い傾向が得られている。また、実際の使用における軸力とせん断が同時に作用する場合が多々あることから、実験結果はより詳細な理論的裏付けが望まれるであろう。

表 2.2.3-3 セン断強度・剛性換算値

仕様	原板番号	τ_c (N/mm ²)	$G_{\text{ひずみ縦横平均}}$ (N/mm ²)	$G_{\text{ひずみ縦のみ}}$ (N/mm ²)	$G_{\text{変位計}}$ (N/mm ²)
3-3	45B1	2.09	784	554	400
	45B2	1.98	1166	640	458
5-5	304-1	3.15	1014	726	446
	304-2	2.96	1069	587	433
7-7	204-1	4.18	1064	725	504
	204-2	4.27	983	656	549
9-9	207-1	4.26	895	659	569
	207-2	4.46	925	592	551

τ_{c45} : σ_{c45} をせん断強度に換算した値 (= $\sigma_{c45}/2$, N/mm²)

$G_{\text{ひずみ縦横平均}}$: 縦方向のひずみと横方向のひずみの絶対値の平均値から算出したせん断剛性 (N/mm²)

$G_{\text{ひずみ縦のみ}}$: 縦方向のひずみのみから算出したせん断剛性 (N/mm²)

$G_{\text{変位計}}$: 変位計の値をひずみに換算した値から算出したせん断剛性 (N/mm²)

引用文献

- 1) Reinhard Brandner, Shear Properties of Cross Laminated Timber (CLT) under in-plane load: Test Configuration and Experimental Study, INTER /48-12-2, 2015
- 2) Reinhard Brandner, Shear Properties of Cross Laminated Timber (CLT) under in-plane load: Test Configuration and Experimental Study, NZ Timber Design Journal Vol.24 (3), pp.14-27, 2016
- 3) M. Flaig, Shear Strength and shear stiffness of CLT-beams load in plane, CIB-W18/46-12-3, Vancouver, Canada, 2013

3 層構成

3.1 長期性能評価

3.1.1 研究の目的

木質材料は粘弾性体であることから、木質材料を用いた建築物に荷重等の外力が長期間作用すると、変形の増大や最悪の場合、建築物の倒壊を招く恐れがある。したがって、想定する建物の使用期間に合わせて、作用する外力による影響を適切に構造的設計に反映できるように、材料の強度等級や断面寸法を選択する必要がある。直交集成板の JAS 規格によると、CLT は、ひき板又は小角材をその繊維方向を互いにほぼ平行にして幅方向に並べ又は接着したものを、主としてその繊維方向を互いにほぼ直角にして積層接着し 3 層以上の構造を持たせた一般材であり、製材や集成材と構造が異なっている。このことにより CLT の長期載荷荷重に対する性能が製材や集成材と異なる可能性がある。特に、CLT は主応力方向と繊維方向が直交する層(直交層)を有するため、適切な材料選択のためには、材料の断面構成が強度性能に与える影響を定量的に評価する必要がある。

本節では、CLT の建築関係基準の整備等に必要となる長期挙動について、JAS 規格に規定される異等級構成を基本とする CLT の長期挙動データに係る試験を行い、その結果を国土交通省の建築関係基準の整備に活用できるよう整理することを目的とする。研究方法としては、建築基準法において定められている指定建築材料ごとの技術基準(測定方法等)に準じ、一定の温湿度環境下において一定の外力が作用する場合の CLT の長期変形挙動の測定を実施し、建築物の設計に資する長期挙動データの収集を行う。ここでは、面外曲げの長期的かつ継続的に作用する荷重に対する CLT の力学的な性状を採り上げ、知見を得ることを目的として、クリープ試験及びクリープ破壊試験を実施した。

3.1.2 試験体

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。

規格：直交集成板の日本農林規格に定める Mx60-5-5(異等級構成 Mx60 の 5 層 5ply)および Mx60-7-7(異等級構成 Mx60 の 7 層 7ply)

樹種：スギ

寸法：長さ 3450mm×厚さ 150mm×幅 300mm(Mx60-5-5)

長さ 4830mm×厚さ 210mm×幅 300mm(Mx60-7-7)

3.1.3 試験方法

クリープ破壊試験を以下に記す載荷条件及び荷重量により実施した。

加力方法：3 等分点 4 点加力

支点間距離(厚さの 21 倍)：3150mm(Mx60-5-5)、4410mm(Mx60-7-7)

荷重点間距離：1050mm(Mx60-5-5)、1470mm(Mx60-7-7)

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：30 体

3.1.4 長期荷重試験時の温湿度測定

森林総合研究所内に設置された長期荷重試験装置に関しては、装置周囲の温湿度を経時的に遠隔地である北海道立総合研究機構林産試験場から測定できる体制を構築している。本項では、研究実施期間中の 5 ヶ月間（平成 28 年 11 月 4 日～平成 29 年 3 月 2 日）の測定結果を考察する。

温湿度センサーとして TR-72wf-H（ティアンドデイ社製：温度精度 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ 、湿度精度 $\pm 2.5\%\text{RH}$ ）を用いた。また、同センサーは出荷時に校正を受けたものを使用した（校正温湿度 $20^{\circ}\text{C} 65\%\text{RH}$ ）。同センサーは長期荷重試験室の無線 LAN ネットワークに接続され、クラウドサーバにデータが送られる。データはユーザー名とパスワードで保護されている。図 3.1-1 にセンサーの設置位置を示す。センサーは各試験体につき 4 箇所設置した。センサーはマグネットスタンドを用いて試験装置に固定され、試験体交換時に容易に取り外せるようにしている。センサーの位置は JIS A 1470-1（建築材料の吸放湿性試験方法—第一部：湿度応答法）を参考に、試験体近傍 5cm の位置に設置した。センサーの設置状況を図 3.1-2 に示す。サンプリング間隔は 5～10 分、データ送信は 30 分とした。

当該期間の測定結果は、温度平均 19.9°C （標準偏差 0.258°C ）、湿度平均 $62.1\%\text{RH}$ （標準偏差 $4.39\%\text{RH}$ ）であった。温度・湿度共に極めて安定しており、変動は小さかった。当該測定施設においては、夏期に温度が高く、湿度が低くなる傾向があるものの、測定空間に人の出入りがなければ、夏期以外と制御精度は同程度である。本温湿度測定結果より、当該測定施設における測定は恒温恒湿環境下で実施されたといえる。

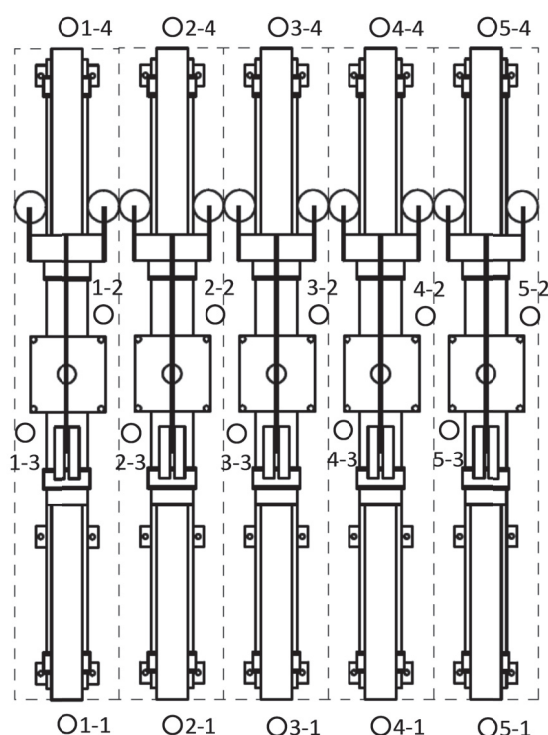


図 3.1-1 温湿度センサーの設置位置



図 3.1-2 温湿度センサーの設置状況

3.1.5 応力レベルの決定

載荷する荷重の応力レベルは、短期曲げ試験により得られた強軸試験体の最大荷重の平均値を元に決定した。建築基準法において定められている指定建築材料ごとの技術基準に従うと、3 応力レベル以上、各応力レベル 10 試験体以上を要するため、昨年度までの検討では、主として最大荷重の 90%、80%、70%に相当する荷重を各応力レベル 10 体ずつの試験体に載荷する方式を採用した。本年度は、応力レベルの水準を増やし、応力レベルと破壊時間の相関性を高めることができないか検討した。

応力レベル決定の過程は以下の通りである。

短期曲げ試験による Mx60-7-7 の試験体 16 体の最大荷重は、平均 68.88kN、標準偏差 5.87kN(COV8.52%)であった。応力レベルを最大荷重の 66～94%の範囲で 2%括約の数値とした。試験装置は、てこによる増力装置を介して重錘のデッドロードを 50 倍に拡大载荷するが、重錘の最小荷重は 1.0kg であることから、算出された荷重にもっとも近い重錘重量を選択することとした、例えば、応力レベル 66%の場合、算出される荷重は 45.46kN すなわち、4638.88kg となる。したがって、载荷すべき重錘重量は 92.77kg であるが、これを 1.0kg 括約に丸め、93kg 载荷するものとした。このとき、実際の応力レベルは 66.16% 二相当する。図 3.1-3 に設定した応力レベルと実際の応力レベルの関係を示す。両者は良い一致を示しており、本試験条件において応力レベルを 2%括約で設定することは妥当であったと言える。

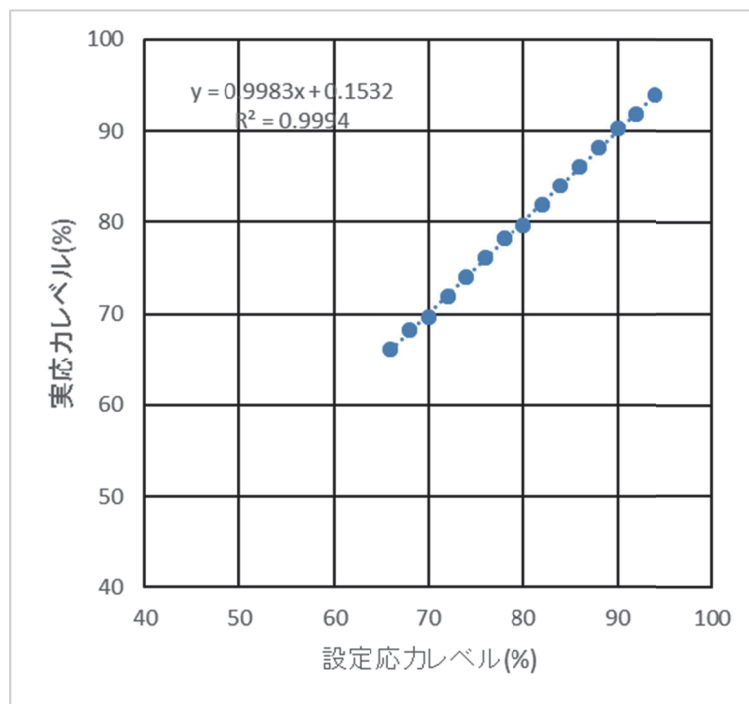


図 3.1-3 設定応力レベルと実応力レベルの関係

3.1.6 スギ CLT の長期性能の測定結果

図 3.1-4 にクリープ破壊試験の実施風景を示す。5 台の測定装置に 7 層 7ply 試験体を設置している状況である。写真試験空間が狭く、他の測定結果に影響を与えうるため、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は困難である。図 3.1-5 に測定中の変形量の経時的変化の一例を示す。応力レベル 82%の場合、加力開始直後の加力点変位は約 55.3mm 試験体中央部変位は 63.0mm であった。およそ 6 日後にはそれぞれ 60.6mm、69.9 に増大し、破断に到った。

図 3.1-6 に試験体の破断状況を示す。破壊は引張側最外層のフィンガージョイント部から生じることが多く、最外層の剝離と直交層のローリングシア破壊が生じると変形が増大し、破断に到る。最外層ラミナのフィンガージョイントが近接している場合、比較的早期に破断するように思われる。

図 3.1-7 にこれまでに測定した試験体の破断時間と応力レベルの関係を示す。図中の曲線は FPL の Wood の研究による製材の破断時間と応力レベルの関係(Madison curve)であ



図 3.1-4 試験体の設置風景

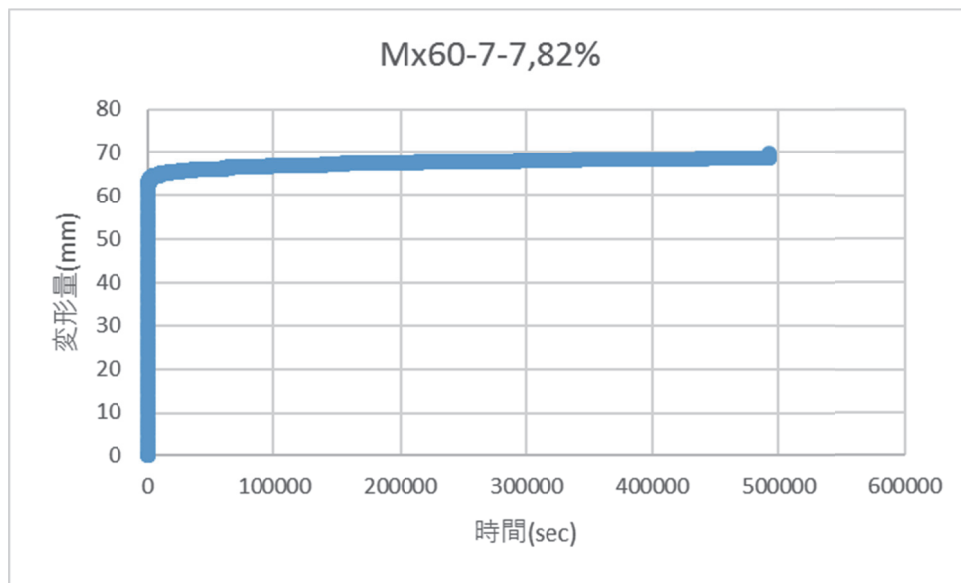


図 3.1-5 変形量の経時変化



図 3.1-6 試験体の破断状況

る。Mx60-5-5、Mx60-7-7 とともに概ね製材と同様の傾向を示すが、データの変動が大きく、更にデータの蓄積が必要と考えられる。

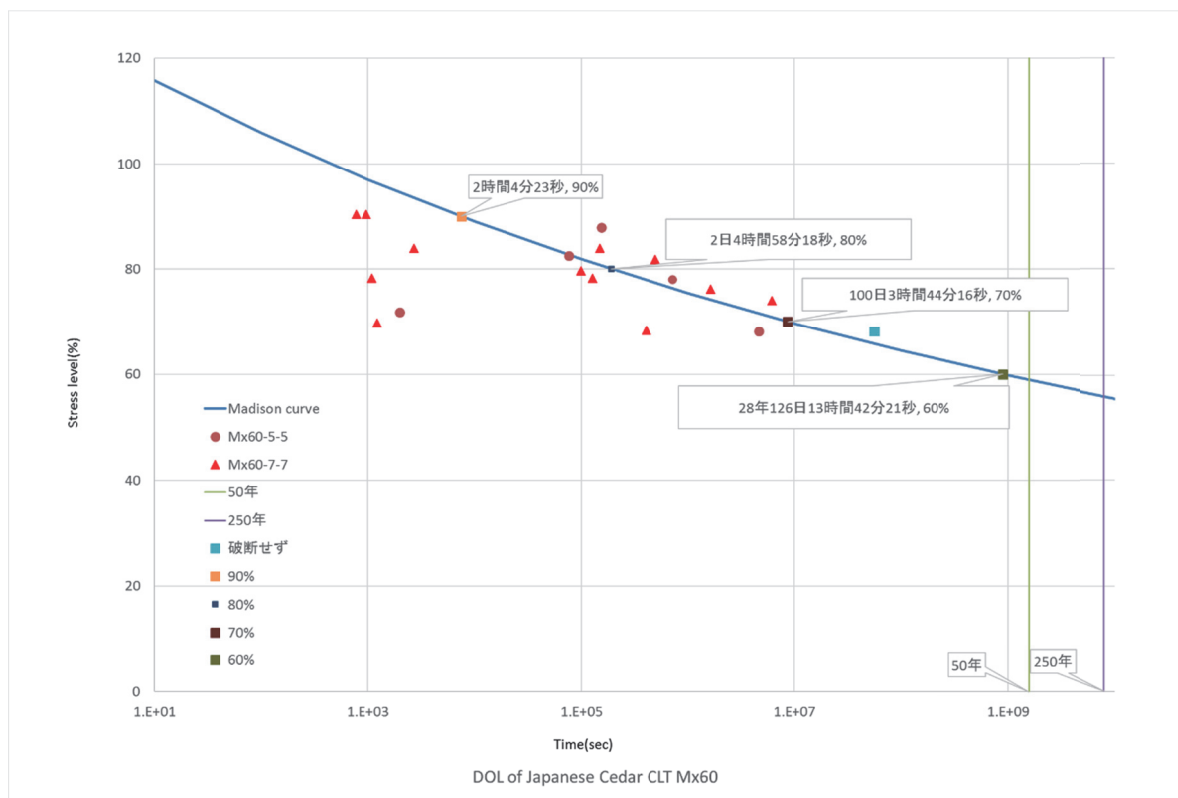


図 3.1-7 破断時間と応力比の関係

3.2 圧縮における短柱・中間柱・長柱の範囲確認

3.2.1 試験体の概要

3.2 節において試験に用いた CLT パネルの仕様を表 3.2.1-1 に示す。これらのパネルから圧縮における短柱・中間柱・長柱の試験体を所定量切り出した。

パネルの製造に用いたラミナは、ラミナ厚①20mm 用、②30mm 用の 2 種類であった。それぞれ必要量を予め計算し、製材・乾燥された原料ひき板を連続しグレーディングマシンを用いて測定した曲げヤング係数を用いて外層用ひき板と内層用ひき板に区分した。いずれのラミナも 2m 前後の長さに裁断した後、フィンガージョイントにより所定の長さにしたて継ぎして用いた。フィンガー長さは 15mm、水平型、接着剤には水性高分子イソシアネート系樹脂を用いた。

これらのラミナを水性高分子イソシアネート系樹脂を用いて積層接着して CLT パネルを製造した。これらのパネルからの試験体採材パターンについては付録に資料として示す。

表 3.2.1-1 試験体採取用 CLT パネルの概要

層構成	ラミナ厚 (mm)	ラミナ幅 (mm)	パネル厚 (mm)	パネル幅 (mm)	パネル長 (mm)	パネル 番号	パネル 枚数
3層3プライ	30	105	90	2100	12030	30-1-2	1
				12030	2100	30-2-2	1
5層5プライ	20	105	100	2100	12030	20-2-2	1
				12030	2100	20-3-2	1
7層7プライ	20	105	140	2940	12030	20-5-2	1
				12030	2940	20-6-2	1

3.2.2 試験方法

a. 座屈試験による評価

i) 概要

有効細長比が異なる CLT について座屈試験を行い、平成 13 年国土交通省告示第 1024 号の第一（特殊な許容応力度）の十九のハに示される直交集成板の圧縮材の許容応力度の算定方法の妥当性を再検証した。また、同告示の第二（特殊な材料強度）の十八のハに示される直交集成板の材料強度の算定方法の妥当性を再検証した。

材料強度を例に同告示において示されている算定方法を以下に示す。圧縮材の座屈の材料強度は、表 3.2.2a-1 に示すように、有効細長比が①30 以下の場合、②30 よりも大きく 100 以下の場合、③100 よりも大きい場合で算定式が異なる。このように圧縮材の座屈の材料強度（許容応力度も同様）は、有効細長比と直交集成板の方向（強軸方向／弱軸方向）によって、その求め方が異なる。また、座屈の材料強度（許容応力度）を求めるための算定式を異ならせる有効細長比の値は、30 と 100 として定められている。

上記のように定められている技術的な根拠は以下のとおりである。

- イ) 有効細長比が 100 を超える圧縮材については、オイラーの座屈荷重式を適用することができる。すなわち、長柱とみなすことができる。
- ロ) 有効細長比が 30 以下の圧縮材については、座屈強度が圧縮強度と同じとなる。すなわち、短柱と見なすことができる。
- ハ) 有効細長比が 30 を超え、100 以下の圧縮材は、上記の①と②の中間的な性状を示し、両者によって得られた値を直線補完することによって求めることができる。中間柱とみなす。

本項では、CLT に対しても上記の考え方を採用して良いかどうかを再検証するために詳細な条件設定を行った実験を実施し、実験結果に基づいて考察した。なお、昨年度までに実施した一連の実験により、上記の考え方が CLT にも適用可能であることを概ね確認しているが、本年度より詳細な確認を行っている。

表 3.2.2.a-1 有効細長比と圧縮材の座屈の材料強度

有効細長比		圧縮材の座屈の材料強度 (N/mm ²)
①	$\lambda \leq 30$ の場合	F_C
②	$30 < \lambda \leq 100$ の場合	$(1.3 - 0.01\lambda) F_C$
③	$100 < \lambda$ の場合	$\frac{3000}{\lambda^2} F_C$

(注) 上記の表において、 λ 及び F_C は、それぞれ次の数値を表すものとする。

λ 次の式によって計算した有効細長比

$$\lambda = l \sqrt{\frac{A}{I}}$$

この式において、 l 、 A 及び I は、それぞれ次の数値を表すものとする。

l 座屈長さ (mm)

A 圧縮材の強軸方向の許容応力度を計算する場合にあっては圧縮材の断面積、
圧縮材の弱軸方向の許容応力度を計算する場合にあっては圧縮材のうち外層

を除いた部分の断面積 (mm²)

I 圧縮材の強軸方向の許容応力度を計算する場合にあっては圧縮材の断面二次モーメント、圧縮材の弱軸方向の許容応力度を計算する場合にあっては圧縮材のうち外層を除いた部分の断面二次モーメント (mm⁴)

F_C 第三第九号イに規定する圧縮に対する基準強度 (N/mm²)

ii) 試験体

表 3.2.2a-2 及び表 3.2.2a-3 に試験体の種類と仕様を示す。表 3.2.2a-2 は加力方向が最外層ラミナの繊維方向と平行方向となる強軸方向加力、表 3.2.2a-3 は加力方向が最外層ラミナの繊維方向と直交方向となる弱軸方向加力の試験体となる。試験体は強軸方向加力(表 3.2.2a-2)、弱軸方向加力(表 3.2.2a-3) のいずれも樹種はスギ、強度等級は Mx60-3-3、Mx60-5-5、Mx60-7-7 の 3 種類とした。

材厚は、Mx60-3-3 を 90mm(ラミナ厚 30mm)、Mx60-5-5 を 100mm(ラミナ厚 20mm)、Mx60-7-7 を 140mm(ラミナ厚 20mm)とした。Mx60-5-5 と Mx60-7-7 のラミナ厚を 20mm としたのは、有効細長比が大きい(例えば、有効細長比 120)の試験体の長さを試験装置の寸法容量との兼ね合いで 5000mm 以下に抑えるための措置である。

全ての強度等級、全ての加力方向について、有効細長比は 10、20、30、40、50、60、70、80、90、100、110、120 の 12 種類とした。なお、試験機の荷重容量のため一部の仕様については試験の実施を見合わせている。

表 3.2.2a-2 強軸方向に加力を行った試験体の種類と仕様

樹種・層構成・加力方向																	
スギ(Mx60) 3層3プライ 強軸方向						スギ(Mx60) 5層5プライ 強軸方向						スギ(Mx60) 7層7プライ 強軸方向					
想定 細長比 λ	寸法(mm)			試験体 本数	試験体記号	想定 細長比 λ	寸法(mm)			試験体 本数	試験体記号	想定 細長比 λ	寸法(mm)			試験体 本数	試験体記号
	長さ	幅	厚さ				長さ	幅	厚さ				長さ	幅	厚さ		
120	3118	300	90	3	3012 HU CB 1201	120	3464	300	100	3	2022 HU CB 1201	120	4850	300	140	3	2052 HU CB 1201
					3012 HU CB 1202						2022 HU CB 1202						2052 HU CB 1202
					3012 HU CB 1203						2022 HU CB 1203						2052 HU CB 1203
110	2858	300	90	3	3012 TU CB 1101	110	3175	300	100	3	2022 HU CB 1101	110	4446	300	140	3	2052 HU CB 1101
					3012 TU CB 1102						2022 HU CB 1102						2052 HU CB 1102
					3012 TU CB 1103						2022 HU CB 1103						2052 HU CB 1103
100	2598	300	90	3	3012 TU CB 1001	100	2887	300	100	3	2022 TU CB 1001	100	4041	300	140	3	2052 HU CB 1001
					3012 TU CB 1002						2022 TU CB 1002						2052 HU CB 1002
					3012 TU CB 1003						2022 TU CB 1003						2052 HU CB 1003
90	2338	300	90	3	3012 TU CB 0901	90	2598	300	100	3	2022 TU CB 0901	90	3637	300	140	3	2052 HU CB 0901
					3012 TU CB 0902						2022 TU CB 0902						2052 HU CB 0902
					3012 TU CB 0903						2022 TU CB 0903						2052 HU CB 0903
80	2078	300	90	3	3012 TU CB 0801	80	2309	300	100	3	2022 TU CB 0801	80	3233	300	140	3	2052 HU CB 0801
					3012 TU CB 0802						2022 TU CB 0802						2052 HU CB 0802
					3012 TU CB 0803						2022 TU CB 0803						2052 HU CB 0803
60	1559	300	90	3	3012 TU CB 0601	60	1732	300	100	3	2022 TU CB 0601	60	2425	300	140	3	2052 TU CB 0601
					3012 TU CB 0602						2022 TU CB 0602						2052 TU CB 0602
					3012 TU CB 0603						2022 TU CB 0603						2052 TU CB 0603
50	1229	300	90	3	3012 TU CB 0501	50	1443	300	100	3	2022 TU CB 0501	50	2021	300	140	3	2052 TU CB 0501
					3012 TU CB 0502						2022 TU CB 0502						2052 TU CB 0502
					3012 TU CB 0503						2022 TU CB 0503						2052 TU CB 0503
40	1039	300	90	3	3012 TU CB 0401	40	1155	300	100	3	2022 TU CB 0401	40	1617	300	140	3	2052 TU CB 0401
					3012 TU CB 0402						2022 TU CB 0402						2052 TU CB 0402
					3012 TU CB 0403						2022 TU CB 0403						2052 TU CB 0403
30	779	300	90	3	3012 TU CB 0301	30	866	300	100	3	2022 TU CB 0301	30	1212	300	140	3	2052 TU CB 0301
					3012 TU CB 0302						2022 TU CB 0302						2052 TU CB 0302
					3012 TU CB 0303						2022 TU CB 0303						2052 TU CB 0303
20	520	300	90	3	3012 TU CB 0201	20	577	300	100	3	2022 TU CB 0201	20	808	300	140	3	2052 TU CB 0201
					3012 TU CB 0202						2022 TU CB 0202						2052 TU CB 0202
					3012 TU CB 0203						2022 TU CB 0203						2052 TU CB 0203
10	260	300	90	3	3012 TU CB 0101	10	289	300	100	3	2022 TU CB 0101	10	404	300	140	3	2052 TU CB 0101
					3012 TU CB 0102						2022 TU CB 0102						2052 TU CB 0102
					3012 TU CB 0103						2022 TU CB 0103						2052 TU CB 0103

表 3.2.2a-3 弱軸方向に加力を行った試験体の種類と仕様

スギ(Mx60) 3層3プライ 弱軸方向						スギ(Mx60) 5層5プライ 弱軸方向						スギ(Mx60) 7層7プライ 弱軸方向					
想定 細長比 λ	寸法(mm)			試験体 本数	試験体記号	想定 細長比 λ	寸法(mm)			試験体 本数	試験体記号	想定 細長比 λ	寸法(mm)			試験体 本数	試験体記号
	長さ	幅	厚さ				長さ	幅	厚さ				長さ	幅	厚さ		
120	3118	300	90	3	3022 HU CB 1201	120	3464	300	100	3	2032 HU CB 1201	120	4850	300	140	3	2062 HU CB 1201
					3022 HU CB 1202						2032 HU CB 1202						2062 HU CB 1202
					3022 HU CB 1203						2032 HU CB 1203						2062 HU CB 1203
110	2858	300	90	3	3022 TU CB 1101	110	3175	300	100	3	2032 HU CB 1101	110	4446	300	140	3	2062 HU CB 1101
					3022 TU CB 1102						2032 HU CB 1102						2062 HU CB 1102
					3022 TU CB 1103						2032 HU CB 1103						2062 HU CB 1103
100	2598	300	90	3	3022 TU CB 1001	100	2887	300	100	3	2032 TU CB 1001	100	4041	300	140	3	2062 HU CB 1001
					3022 TU CB 1002						2032 TU CB 1002						2062 HU CB 1002
					3022 TU CB 1003						2032 TU CB 1003						2062 HU CB 1003
90	2338	300	90	3	3022 TU CB 0901	90	2598	300	100	3	2032 TU CB 0901	90	3637	300	140	3	2062 HU CB 0901
					3022 TU CB 0902						2032 TU CB 0902						2062 HU CB 0902
					3022 TU CB 0903						2032 TU CB 0903						2062 HU CB 0903
80	2078	300	90	3	3022 TU CB 0801	80	2309	300	100	3	2032 TU CB 0801	80	3233	300	140	3	2062 HU CB 0801
					3022 TU CB 0802						2032 TU CB 0802						2062 HU CB 0802
					3022 TU CB 0803						2032 TU CB 0803						2062 HU CB 0803
60	1559	300	90	3	3022 TU CB 0601	60	1732	300	100	3	2032 TU CB 0601	60	2425	300	140	3	2062 TU CB 0601
					3022 TU CB 0602						2032 TU CB 0602						2062 TU CB 0602
					3022 TU CB 0603						2032 TU CB 0603						2062 TU CB 0603
50	1229	300	90	3	3022 TU CB 0501	50	1443	300	100	3	2032 TU CB 0501	50	2021	300	140	3	2062 TU CB 0501
					3022 TU CB 0502						2032 TU CB 0502						2062 TU CB 0502
					3022 TU CB 0503						2032 TU CB 0503						2062 TU CB 0503
40	1039	300	90	3	3022 TU CB 0401	40	1155	300	100	3	2032 TU CB 0401	40	1617	300	140	3	2062 TU CB 0401
					3022 TU CB 0402						2032 TU CB 0402						2062 TU CB 0402
					3022 TU CB 0403						2032 TU CB 0403						2062 TU CB 0403
30	779	300	90	3	3022 TU CB 0301	30	866	300	100	3	2032 TU CB 0301	30	1212	300	140	3	2062 TU CB 0301
					3022 TU CB 0302						2032 TU CB 0302						2062 TU CB 0302
					3022 TU CB 0303						2032 TU CB 0303						2062 TU CB 0303
20	520	300	90	3	3022 TU CB 0201	20	577	300	100	3	2032 TU CB 0201	20	808	300	140	3	2062 TU CB 0201
					3022 TU CB 0202						2032 TU CB 0202						2062 TU CB 0202
					3022 TU CB 0203						2032 TU CB 0203						2062 TU CB 0203
10	260	300	90	3	3022 TU CB 0101	10	289	300	100	3	2032 TU CB 0101	10	404	300	140	3	2062 TU CB 0101
					3022 TU CB 0102						2032 TU CB 0102						2062 TU CB 0102
					3022 TU CB 0103						2032 TU CB 0103						2062 TU CB 0103

iii) 試験方法

写真 3.2.2.a-1 に試験の様子を示す。両端ピン支持にて、試験体に軸力を与えた。また、試験体頂部の鉛直変位と試験体中央部の水平変位を測定した。なお、加力ジグ（ピン支持ジグ）により、各試験体の座屈長さは試験体の実長よりも 200mm 長くなる。



写真 3.2.2.a-1 座屈試験の様子

b. 短柱試験による評価

i) 試験体

短柱圧縮試験に用いた CLT は、3 層 3 プライ、5 層 5 プライ、7 層 7 プライのスギ CLT で、試験体数は、強軸と弱軸の 2 条件と、試験体の長さを全断面に対する細長比 λ ($=h/\sqrt{12}$) で設定した λ 10 から λ 40 の 4 条件に対して各 3 体で、合計 72 体である。試験体概要の一覧を表 3.2.1b-1 に示す。

表 3.2.1b-1 短柱圧縮試験に用いた CLT の概要

等級・構成	ラミナ厚 (mm)	細長比 (λ)	寸法 (mm) 厚さ×幅×長さ	試験体数 (原板番号)
Mx60-3-3	30	10	90×300× 260	強軸(3012)・弱軸(3022)各 3 体
		20	90×300× 520	強軸(3012)・弱軸(3022)各 3 体
		30	90×300× 779	強軸(3012)・弱軸(3022)各 3 体
		40	90×300× 1039	強軸(3012)・弱軸(3022)各 3 体
Mx60-5-5	20	10	100×300× 289	強軸(2022)・弱軸(2032)各 3 体
		20	100×300× 578	強軸(2022)・弱軸(2032)各 3 体
		30	100×300× 866	強軸(2022)・弱軸(2032)各 3 体
		40	100×300× 1155	強軸(2022)・弱軸(2032)各 3 体
Mx60-7-7	20	10	140×300× 404	強軸(3052)・弱軸(3062)各 3 体
		20	140×300× 808	強軸(3052)・弱軸(3062)各 3 体
		30	140×300× 1212	強軸(3052)・弱軸(3062)各 3 体
		40	140×300× 1617	強軸(3052)・弱軸(3062)各 3 体

ii) 試験方法

試験は、縦振動法によって非破壊的に縦弾性係数 (E_{fr}) を測定したのち、最大容量が 3000kN の圧縮試験機（前川試験機製作所製、A-300-B4）を用いて、上端側の加圧盤の回転を自由、下端側を固定とした圧縮強度試験に供した。試験速度は最大荷重に達するまでの時間が約 3 分となるように調整し、最大荷重の 2% の荷重低下をもって試験終了とした。変位は、クロスヘッドの変位を変位計（東京測器研究所製、CDP-50）で幅面の表裏で計測するとともに、変位計（CDP-25）を取り付けた治具を用いて、標点間距離を材長の 1/2 として試験体中央の縮みを幅面の表裏で測定し、その平均値を試験体の圧縮変位とした。変位の計測に用いた治具は、ナイフエッジで試験体に接触させ、試験体の厚さ方向の変形をできるかぎり拘束しないようにスプリングを介して両側から引き寄せて取り付けた。試験の様子を写真 3.2.2b-1 に示す。試験終了後、荷重と圧縮変位の関係における傾きから縦圧縮ヤング係数 (E_c) を、最大荷重から縦圧縮強度 (σ_c) を算出した。



写真 3.2.2b-1 試験の様子（左：3.2 弱軸 λ 20、右 7-7 弱軸 λ 40）

3.2.3 結果および考察

a. 座屈試験による評価

i) 強軸方向加力の結果

図 3.2.3.a-1、図 3.2.3.a-2 に強軸方向に加力した結果を示す。図 3.2.3.a-1 は Mx60-3-3 の試験結果、図 3.2.3.a-2 は Mx60-5-5 の試験結果である。同図に示すオレンジ色と黒色の線はいずれも、表 3.2.2.a-1 に示される告示記載の方法によって座屈荷重を求めたものであるが、圧縮強度 F_c の取り方が異なる。

オレンジ色の線は、特定の有効細長比の試験体の座屈試験の結果から圧縮強度 F_c を推計し、その値を用いて求めたその他の有効細長比の試験体の座屈荷重が実験値と合うかどうか確認したものである。Mx60-3-3 については有効細長比が 40、50、60、80、90 の試験体の座屈荷重の結果から圧縮強度 F_c をそれぞれ求め、その平均を F_c として計算に用いている。一方、Mx60-5-5 については、有効細長比が 30、40、50、60、80、90 の試験結果から圧縮強度 F_c をそれぞれ求め、その平均を F_c として計算に用いている。

Mx60-3-3 については、圧縮強度 F_c は 36.8 N/mm^2 ($\lambda=90$)、 41.6 N/mm^2 ($\lambda=80$)、 51.1 N/mm^2 ($\lambda=60$)、 38.1 N/mm^2 ($\lambda=50$)、 39.8 N/mm^2 ($\lambda=40$) と求まり、ばらつきがある(変動係数 13.6%)ものの、有効細長比によらずほぼ同じような値となった。また、Mx60-5-5 についても、圧縮強度 F_c は 44.8 N/mm^2 ($\lambda=90$)、 46.4 N/mm^2 ($\lambda=80$)、 46.2 N/mm^2 ($\lambda=60$)、 48.1 N/mm^2 ($\lambda=50$)、 55.2 N/mm^2 ($\lambda=40$)、 47.6 N/mm^2 ($\lambda=30$) と求まり、ばらつき(変動係数 7.6%)は Mx60-3-3 よりは小さく、有効細長比によらずほぼ同じような値となった。

図 3.2.3.a-1 及び図 3.2.3.a-2 に示すように実験結果と計算結果(オレンジ色の線)は、ほぼ一致する。圧縮強度の値に座屈試験の結果から逆算した値を用いているため実験結果と計算結果は基本的に合うことになるが、特定の圧縮強度を用いて計算した座屈荷重が有効細長比によらず、ほぼ実験値と会うことは、圧縮強度から有効細長比に応じて座屈荷重を求めるという現行の座屈荷重の算定方法が CLT についても適用可能であることを示唆するものである。

一方、黒線は圧縮強度 F_c に告示 1024 号に示されている圧縮の基準強度を用いて座屈荷重を算出したものであるが、計算結果(黒線)は実験値(平均値)に比べると低い値となっており、仮に座屈荷重(5%下限値)が座屈荷重(平均値)の $3/4$ と仮定した場合、実験結果から算出した座屈荷重の下限値も、告示に示される方法に寄り求めた座屈荷重よりも小さい値となる。

告示の方法によって求めた座屈荷重が、安全側の座屈荷重を与えることを確認した。

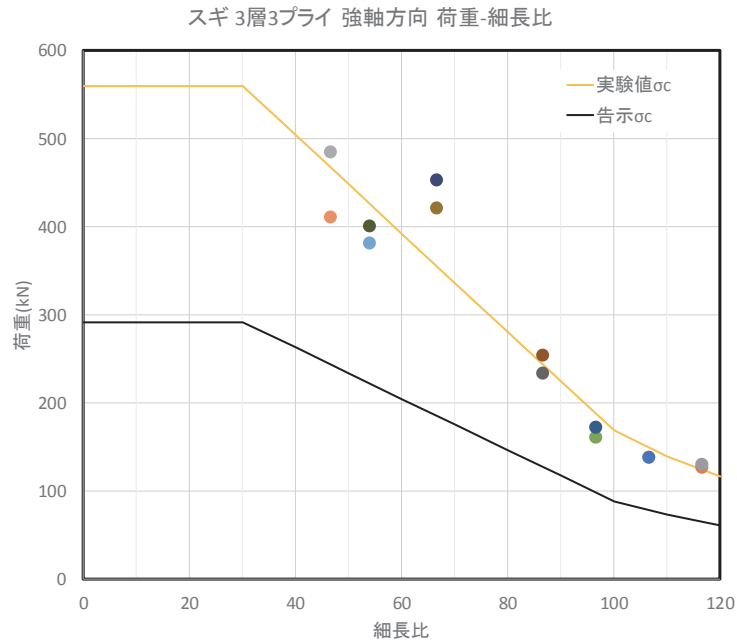


図 3.2.3.a-1 Mx60-3-3（強軸方向加力）の座屈荷重と有効細長比の関係

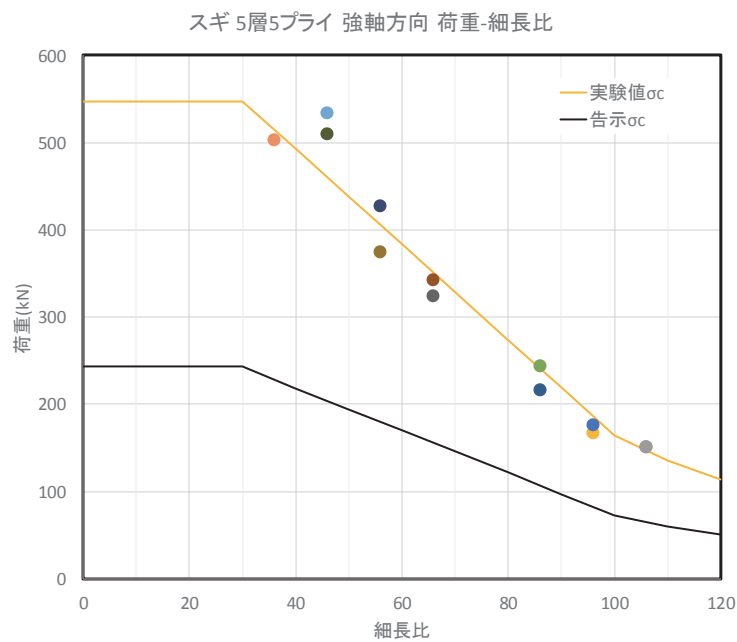


図 3.2.3.a-2 Mx60-5-5（強軸方向加力）の座屈荷重と有効細長比の関係

ii) 弱軸方向加力の結果

図 3.2.3.a-3、図 3.2.3.a-4 に弱軸方向に加力した結果を示す。図 3.2.3.a-3 は Mx60-3-3 の試験結果、図 3.2.3.a-4 は Mx60-5-5 の試験結果である。図 3.2.3.a-3 に示す黒色の線と図 3.2.3.a-4 に示す青色と黒色の線はいずれも、表 3.2.2.a-1 に示される告示記載の方法によって座屈荷重を求めたものであるが、圧縮強度 F_c の取り方が異なる。

青色の線は、特定の有効細長比の試験体の座屈試験の結果から圧縮強度 F_c を推計し、その値を用いて求めたその他の有効細長比の試験体の座屈荷重が実験値と合うかどうか確

認したものである。Mx60-5-5 について、有効細長比が 59.8、76.5、93.1 の試験結果から圧縮強度 F_c をそれぞれ求め、その平均を F_c として計算に用いている。圧縮強度 F_c は 37.9 N/mm^2 ($\lambda=59.8$)、 36.5 N/mm^2 ($\lambda=76.5$)、 38.2 N/mm^2 ($\lambda=93.1$) と求まり、ばらつき（変動係数 2.4%）は小さく、有効細長比によらずほぼ同じような値となった。

図 3.2.3.a-4 に示すように実験結果と計算結果（青色の線）は、ほぼ一致する。圧縮強度の値に座屈試験の結果から逆算した値を用いているため実験結果と計算結果は基本的に合うことになるが、特定の圧縮強度を用いて計算した座屈荷重が有効細長比によらず、ほぼ実験値と合うことは、圧縮強度から有効細長比に応じて座屈荷重を求めるという現行の座屈荷重の算定方法が CLT についても適用可能であることを示唆するものである。

一方、黒線は圧縮強度 F_c に告示 1024 号に示されている圧縮の基準強度を用いて座屈荷重を算出したものであるが、計算結果（黒線）は実験値（平均値）に比べると低い値となっており、仮に座屈荷重（5%下限値）が座屈荷重（平均値）の 3/4 と仮定した場合、実験結果から算出した座屈荷重の下限値も、告示に示される方法に寄り求めた座屈荷重よりも小さい値となる。

告示の方法によって求めた座屈荷重が、安全側の座屈荷重を与えることを確認した。

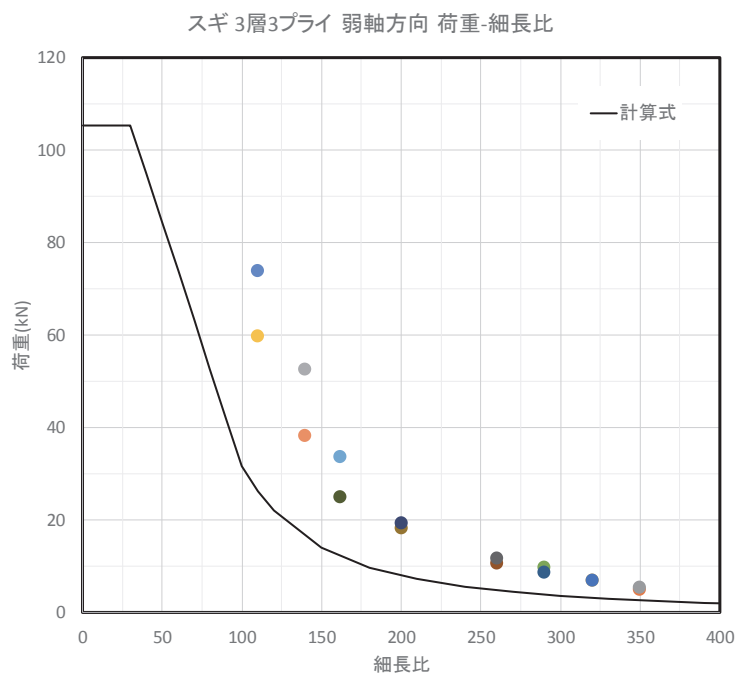


図 3.2.3.a-3 Mx60-3-3（弱軸方向加力）の座屈荷重と有効細長比の関係

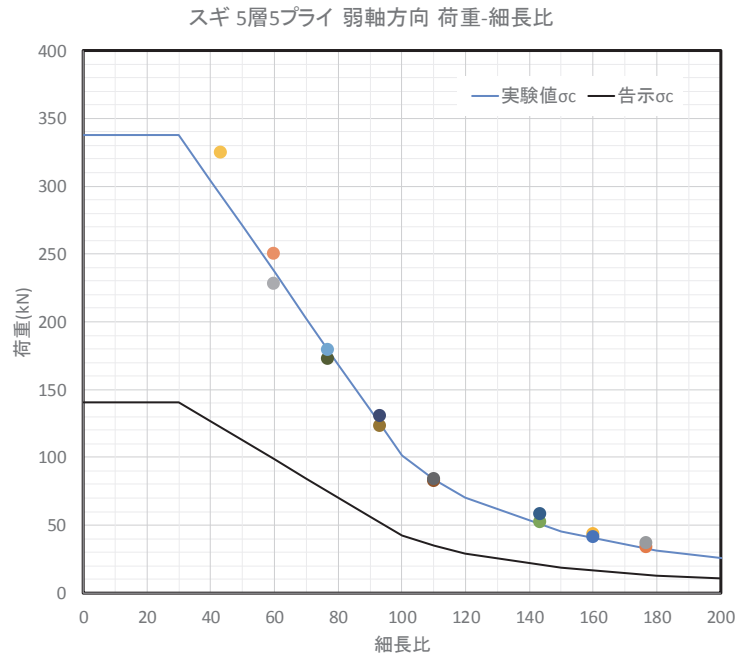


図 3.2.3.a-4 Mx60-5-5（弱軸方向加力）の座屈荷重と有効細長比の関係

iii) まとめ

- (1) Mx60-3-3 の強軸方向と弱軸方向、並びに、Mx60-5-5 の強軸方向と弱軸方向について、有効細長比が異なる複数の長さが異なる CLT を対象として座屈試験を行い、有効細長比により、座屈強度の求め方を異ならせる平成 13 年国土交通省告示第 1024 号に示される方法の妥当性について再確認を行った。
- (2) 座屈試験の結果から逆算した圧縮強度を用いて、告示に示される計算方法により求めた座屈荷重の値は、有効細長比が 40 以上の範囲においては、実験結果と概ね一致した。現行の座屈強度の算定方法について、有効細長比 40 以上の範囲においては概ね妥当であることを確認した。
- (3) 告示に示される方法により CLT の圧縮強度を算定し、その値を用いて座屈荷重を求めた結果は、実験により得られた座屈荷重（平均値）よりも小さい値であった。また、座屈荷重の 5%下限値を座屈荷重の平均値の 3/4 と仮定した場合、告示の方法によって計算した座屈荷重は、座屈荷重（下限値）よりも小さい値となり、安全側の値を与えることを確認した。

b. 短柱試験による評価

i) 破壊性状

破壊性状の例を写真 3.2.3b-1 から写真 3.2.3b-4 に示す。 $\lambda 10$ や $\lambda 20$ の試験体については、強軸試験体では表裏面において、圧壊が確認され、フィンガージョイントや節がある場合は、それらが起点となっていた傾向にあった。目立った欠点のないものでも表裏面に圧壊が確認された。側面で軸方向ラミナに圧壊によるしわが確認でき、終局的には、積層面に沿って割れるものもあった。弱軸試験体では、表裏板からは目立った損傷は観察されないが、触診により、年輪界に一致した凹凸が生じていることが確認された。局所的なはらみや凹凸が顕著なものについては、側面から目視で確認できるものもあった。



写真 3.2.3b-1 強軸試験体の代表的な破壊の例 (5 層 5 プライ $\lambda 10$)



写真 3.2.3b-2 弱軸試験体の代表的な破壊の例 (5 層 5 プライ $\lambda 10$)



写真 3.2.3b-3 水平フィンガーの圧壊によって生じた面外への変形

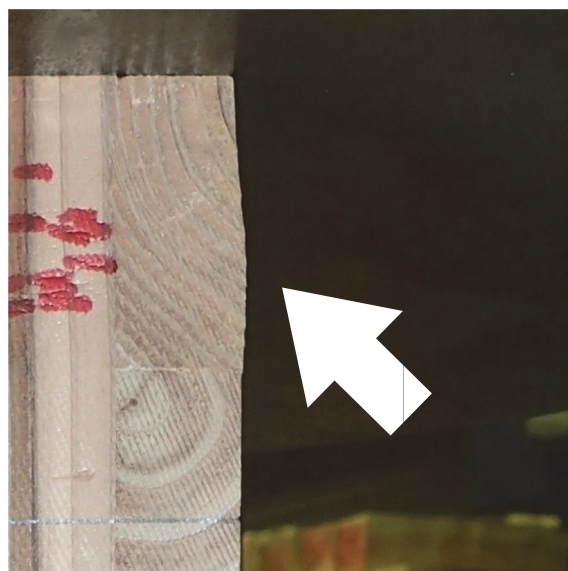


写真 3.2.3b-4 弱軸試験体で表板に現れた年輪界に一致した凹凸の例

写真 3.2.3b-5 に側面から見た試験終了時の全体変形の比較を示す。弱軸試験体では、 $\lambda 10$ 以外のほぼすべてが「く」の字に折れ曲がった。 $\lambda 40$ では平行層のラミナの圧痕が確認されないものもあった。強軸試験体においても、終局においては $\lambda 30$ や $\lambda 40$ で若干「く」の字に折れ曲がるものがあった。いずれの試験体においても、上側の加圧版の水平はおおよそ保たれていた。7 層 7 プライの $\lambda 40$ の強軸で S 字に変形した試験体があり、試験機が横方向の力を支えていた可能性が懸念された。



写真 3.2.3b-5 側面から見た試験終了時の全体変形の様子（左 4 体：5 層 5 プライ弱軸、右 4 体：7 層 7 プライ強軸、いずれも左から $\lambda 10$ 、 $\lambda 20$ 、 $\lambda 30$ 、 $\lambda 40$ ）

ii) 荷重変位関係

荷重と変位の関係曲線の例を図 3.2.3b-1 から図 3.2.3b-6 に示す。強軸試験体 (Ma) では、いずれの層構成においても試験体長さが表裏面ともに、最大荷重まで圧縮の変位を示すが、3 層 3 プライの弱軸試験体 (3-3_Mi) では、最大荷重時に片側の変位が引張りとなっており、最大荷重より前に、座屈していることが看取された。5 層 5 プライの弱軸試験体 (5-5_Mi) および 7 層 7 プライの弱軸試験体 (7-7_Mi) においても、それぞれ、 $\lambda 20$ 以上、 $\lambda 30$ 以上で、最大荷重に達する手前で変位が戻っていることから、途中から座屈していたことが読み取れ、破壊性状において目立った圧壊が残らなかった傾向に一致するものと考えられた。

表 3.2.3b-1 から表 3.2.3b-6 に試験結果の一覧を示す。なお、縦振動法による縦弾性係数のうち、 $\lambda 10$ の試験体に関しては、FFT アナライザーによる固有振動数は明瞭なピークを示したものもあったが、ラミナの構成から推定されるヤング係数を大幅に下回る値であったため、異常値として除外した。

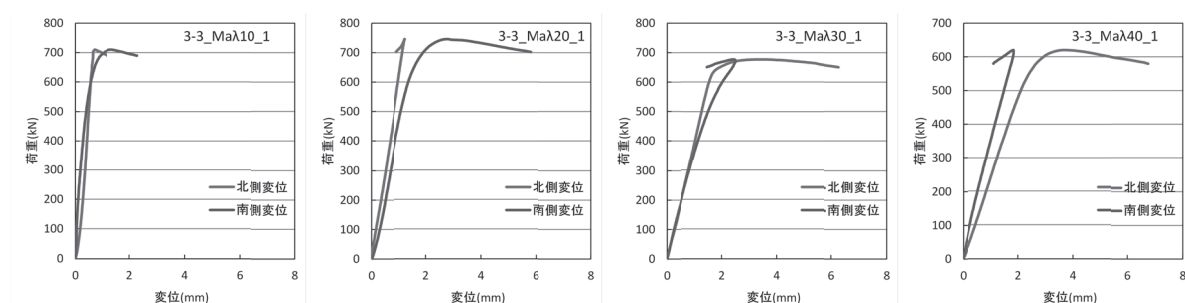


図 3.2.3b-1 3 層 3 プライ強軸の荷重変形曲線の例 (左から $\lambda 10$ 、20、30、40)

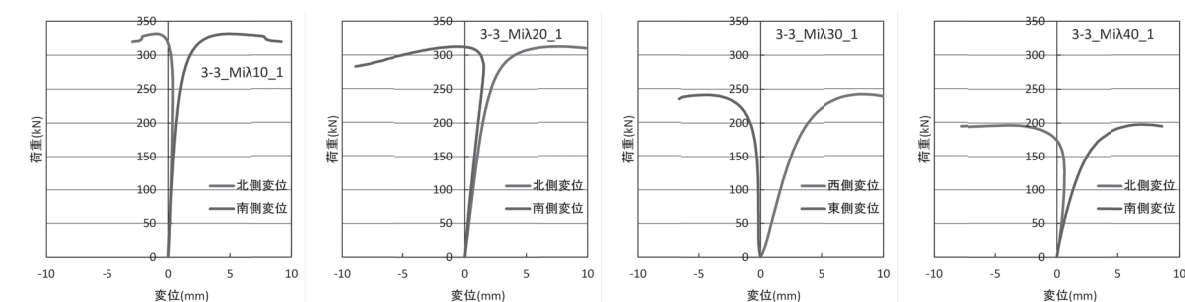


図 3.2.3b-2 3 層 3 プライ弱軸の荷重変形曲線の例 (左から $\lambda 10$ 、20、30、40)

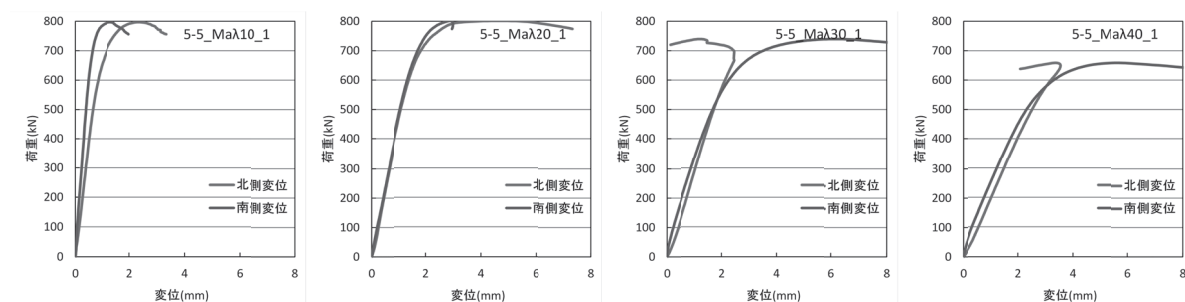


図 3.2.3b-3 5 層 5 プライ強軸の荷重変形曲線の例 (左から $\lambda 10$ 、20、30、40)

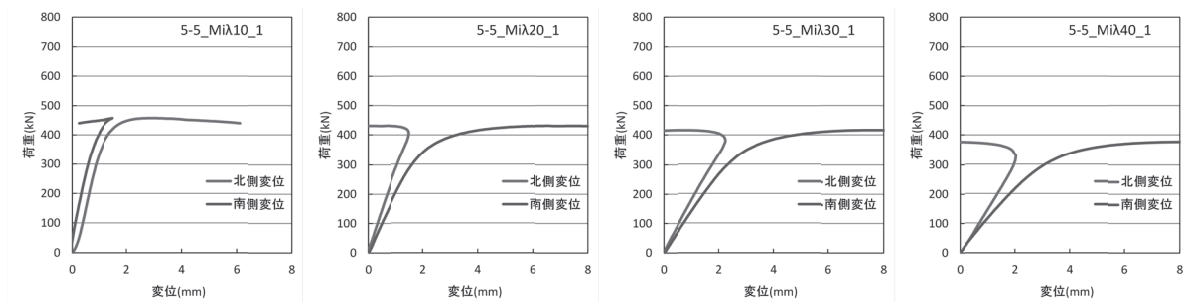


図 3.2.3b-4 5 層 5 プライ弱軸の荷重変形曲線の例 (左から λ 10、20、30、40)

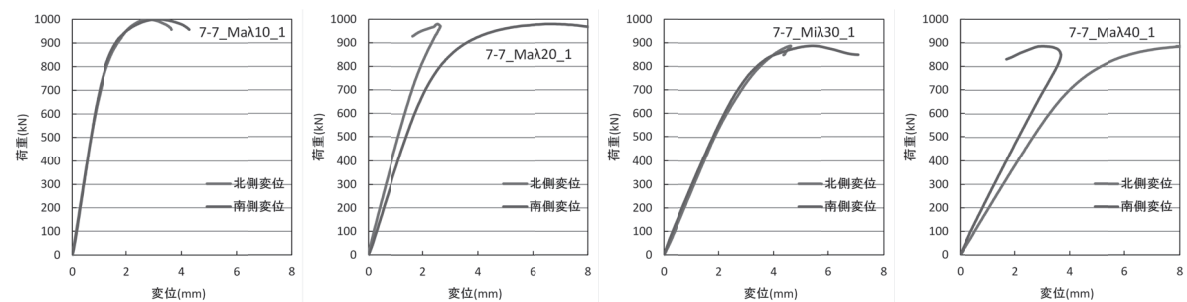


図 3.2.3b-5 7 層 7 プライ強軸の荷重変形曲線の例 (左から λ 10、20、30、40)

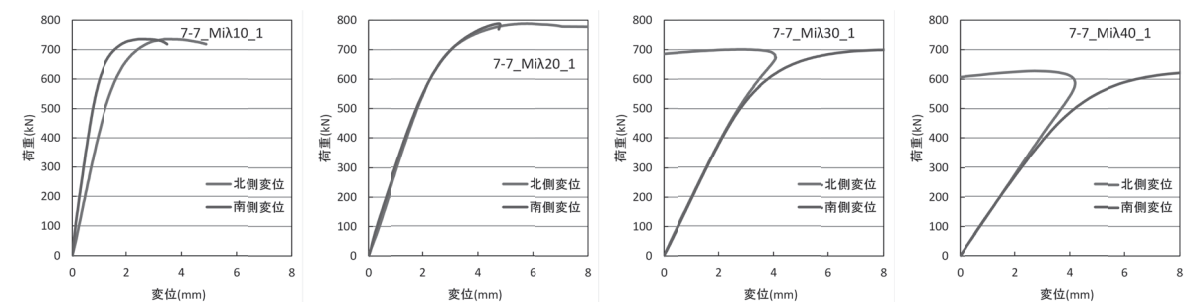


図 3.2.3b-6 7 層 7 プライ弱軸の荷重変形曲線の例 (左から λ 10、20、30、40)

表 3.2.3b-1 3層3プライ 強軸

細長比	番号	密度 (kg/m ³)	E_{fr} (kN/mm ²)	E_c (kN/mm ²)	σ_c (N/mm ²)	含水率 (%)
$\lambda 10$	3012_C0101	428	※	5.91	26.2	11.0
	3012_C0102	426	※	4.00	24.0	11.8
	3012_C0103	415	※	4.95	26.9	10.2
	平均	423	-	4.95	25.7	11.0
	最大	428	-	5.91	26.9	11.8
	最小	415	-	4.00	24.0	10.2
	標準偏差	6.92	-	0.952	1.47	0.80
	変動係数	1.63%	-	19.2%	5.74%	7.2%
$\lambda 20$	3012_C0201	407	5.30	5.15	27.4	12.7
	3012_C0202	417	5.19	5.04	26.9	11.1
	3012_C0203	408	5.10	4.57	24.8	10.6
	平均	411	5.20	4.92	26.4	11.5
	最大	417	5.30	5.15	27.4	12.7
	最小	407	5.10	4.57	24.8	10.6
	標準偏差	5.55	0.0992	0.306	1.38	1.06
	変動係数	1.35%	1.91%	6.22%	5.22%	9.25%
$\lambda 30$	3012_C0301	422	5.46	5.23	25.0	12.7
	3012_C0302	423	5.12	4.84	23.6	11.9
	3012_C0303	422	5.06	4.69	25.4	10.9
	平均	422	5.21	4.92	24.6	11.8
	最大	423	5.46	5.23	25.4	12.7
	最小	422	5.06	4.69	23.6	10.9
	標準偏差	0.727	0.216	0.278	0.950	0.884
	変動係数	0.172%	4.15%	5.66%	3.86%	7.47%
$\lambda 40$	3012_C0401	430	5.87	5.42	22.8	12.9
	3012_C0402	439	5.04	4.56	23.7	10.5
	3012_C0403	412	5.23	4.76	24.4	13.5
	平均	427	5.38	4.91	23.6	12.3
	最大	439	5.87	5.42	24.4	13.5
	最小	412	5.04	4.56	22.8	10.5
	標準偏差	13.4	0.432	0.451	0.804	1.61
	変動係数	3.13%	8.03%	9.19%	3.41%	13.1%

 E_{fr} : 縦振動法による縦弾性係数 (単位 kN/mm²) E_c : 強度試験で得られた縦圧縮ヤング係数 (単位 kN/mm²) σ_c : 強度試験で得られた縦圧縮強度 (単位 N/mm²)

※ : 異常値

表 3.2.3b-2 3層3プライ 弱軸

細長比	番号	密度 (kg/m ³)	E_{fr} (kN/mm ²)	E_c (kN/mm ²)	σ_c (N/mm ²)	含水率 (%)
$\lambda 10$	3022_C0101	416	※	2.05	12.2	12.8
	3022_C0102	393	※	2.03	11.7	11.6
	3022_C0103	391	※	1.54	12.2	11.5
	平均	400	-	1.87	12.1	12.0
	最大	416	-	2.05	12.2	12.8
	最小	391	-	1.54	11.7	11.5
	標準偏差	14.2	-	0.286	0.272	0.717
	変動係数	3.55%	-	15.3%	2.26%	6.0%
$\lambda 20$	3022_C0201	384	1.63	1.59	11.6	12.2
	3022_C0202	393	1.72	1.88	11.6	11.2
	3022_C0203	410	1.73	1.86	9.93	12.4
	平均	396	1.69	1.78	11.0	11.9
	最大	410	1.73	1.88	11.6	12.4
	最小	384	1.63	1.59	9.93	11.2
	標準偏差	13.2	0.0516	0.160	0.956	0.653
	変動係数	3.34%	3.05%	9.03%	8.66%	5.48%
$\lambda 30$	3022_C0301	409	1.95	1.96	8.90	12.2
	3022_C0302	411	1.80	1.72	9.54	11.2
	3022_C0303	440	2.14	2.02	10.4	12.4
	平均	420	1.96	1.90	9.61	11.9
	最大	440	2.14	2.02	10.4	12.4
	最小	409	1.80	1.72	8.90	11.2
	標準偏差	17.5	0.167	0.160	0.753	0.653
	変動係数	4.18%	8.49%	8.39%	7.84%	5.48%
$\lambda 40$	3022_C0401	407	1.89	1.98	7.25	13.1
	3022_C0402	414	2.02	1.88	7.85	11.5
	3022_C0403	419	1.95	1.68	6.70	12.8
	平均	413	1.95	1.84	7.27	12.5
	最大	419	2.02	1.98	7.85	13.1
	最小	407	1.89	1.68	6.70	11.5
	標準偏差	6.09	0.0635	0.154	0.573	0.838
	変動係数	1.47%	3.25%	8.33%	7.89%	6.73%

 E_{fr} : 縦振動法による縦弾性係数 (単位 kN/mm²) E_c : 強度試験で得られた縦圧縮ヤング係数 (単位 kN/mm²) σ_c : 強度試験で得られた縦圧縮強度 (単位 N/mm²)

※ : 異常値

表 3.2.3b-3 5 層 5 プライ 強軸

細長比	番号	密度 (kg/m ³)	E_{fr} (kN/mm ²)	E_c (kN/mm ²)	σ_c (N/mm ²)	含水率 (%)
$\lambda 10$	2022_C0101	445	※	4.66	26.3	10.0
	2022_C0102	433	※	4.73	23.9	10.2
	2022_C0103	433	※	4.03	23.7	10.4
	平均	437	-	4.47	24.6	10.2
	最大	445	-	4.73	26.3	10.4
	最小	433	-	4.03	23.7	9.95
	標準偏差	6.86	-	0.382	1.44	0.210
	変動係数	1.57%	-	8.55%	5.86%	2.1%
$\lambda 20$	2022_C0201	455	4.79	4.43	26.4	11.3
	2022_C0202	460	4.36	4.12	24.4	11.6
	2022_C0203	439	4.60	4.39	26.0	11.8
	平均	451	4.58	4.31	25.6	11.6
	最大	460	4.79	4.43	26.4	11.8
	最小	439	4.36	4.12	24.4	11.3
	標準偏差	11.3	0.213	0.171	1.06	0.271
	変動係数	2.50%	4.65%	3.96%	4.12%	2.34%
$\lambda 30$	2022_C0301	458	4.69	4.36	24.5	10.0
	2022_C0302	452	4.96	4.58	26.2	10.2
	2022_C0303	438	4.45	4.15	23.7	9.27
	平均	449	4.70	4.36	24.8	9.84
	最大	458	4.96	4.58	26.2	10.2
	最小	438	4.45	4.15	23.7	9.27
	標準偏差	9.97	0.256	0.213	1.27	0.507
	変動係数	2.22%	5.45%	4.89%	5.14%	5.15%
$\lambda 40$	2022_C0401	444	4.48	4.13	21.7	12.3
	2022_C0402	435	4.84	4.43	22.2	11.4
	2022_C0403	402	4.25	4.33	20.6	11.2
	平均	427	4.52	4.30	21.5	11.7
	最大	444	4.84	4.43	22.2	12.3
	最小	402	4.25	4.13	20.6	11.2
	標準偏差	21.8	0.301	0.152	0.836	0.579
	変動係数	5.10%	6.66%	3.53%	3.89%	4.96%

 E_{fr} : 縦振動法による縦弾性係数 (単位 kN/mm²) E_c : 強度試験で得られた縦圧縮ヤング係数 (単位 kN/mm²) σ_c : 強度試験で得られた縦圧縮強度 (単位 N/mm²)

※ : 異常値

表 3.2.3b-4 5 層 5 プライ 弱軸

細長比	番号	密度 (kg/m ³)	E_{fr} (kN/mm ²)	E_c (kN/mm ²)	σ_c (N/mm ²)	含水率 (%)
$\lambda 10$	2032_C0101	436	※	2.07	15.1	11.1
	2032_C0102	451	※	3.02	16.8	12.1
	2032_C0103	459	※	2.59	16.4	12.4
	平均	449	-	2.56	16.1	11.9
	最大	459	-	3.02	16.8	12.4
	最小	436	-	2.07	15.1	11.1
	標準偏差	11.4	-	0.471	0.908	0.68
	変動係数	2.53%	-	18.39%	5.63%	5.7%
$\lambda 20$	2032_C0201	445	2.44	2.22	14.2	11.3
	2032_C0202	439	2.48	2.48	14.3	10.7
	2032_C0203	453	2.54	2.51	16.5	11.5
	平均	446	2.48	2.40	15.0	11.2
	最大	453	2.54	2.51	16.5	11.5
	最小	439	2.44	2.22	14.2	10.7
	標準偏差	6.89	0.0507	0.159	1.26	0.43
	変動係数	1.55%	2.04%	6.64%	8.41%	3.84%
$\lambda 30$	2032_C0301	442	2.45	2.18	13.7	12.1
	2032_C0302	432	2.45	2.15	14.1	11.3
	2032_C0303	459	2.57	2.15	13.6	11.2
	平均	445	2.49	2.16	13.8	11.5
	最大	459	2.57	2.18	14.1	12.1
	最小	432	2.45	2.15	13.6	11.2
	標準偏差	13.7	0.0672	0.0172	0.276	0.495
	変動係数	3.08%	2.70%	0.80%	2.00%	4.29%
$\lambda 40$	2032_C0401	442	2.70	2.37	12.4	10.5
	2032_C0402	455	2.79	2.44	12.7	10.9
	2032_C0403	455	2.73	2.47	13.1	10.3
	平均	451	2.74	2.43	12.8	10.6
	最大	455	2.79	2.47	13.1	10.9
	最小	442	2.70	2.37	12.4	10.3
	標準偏差	7.26	0.0460	0.0508	0.352	0.324
	変動係数	1.61%	1.68%	2.09%	2.76%	3.07%

 E_{fr} : 縦振動法による縦弾性係数 (単位 kN/mm²) E_c : 強度試験で得られた縦圧縮ヤング係数 (単位 kN/mm²) σ_c : 強度試験で得られた縦圧縮強度 (単位 N/mm²)

※ : 異常値

表 3.2.3b-5 7 層 7 プライ 強軸

細長比	番号	密度 (kg/m ³)	E_{fr} (kN/mm ²)	E_c (kN/mm ²)	σ_c (N/mm ²)	含水率 (%)
$\lambda 10$	2052_C0101	461	3.31	3.53	23.6	10.5
	2052_C0102	439	3.13	3.86	23.7	10.6
	2052_C0103	432	2.77	3.90	22.9	10.0
	平均	444	3.07	3.76	23.4	10.4
	最大	461	3.31	3.90	23.7	10.6
	最小	432	2.77	3.53	22.9	9.95
	標準偏差	15.1	0.276	0.204	0.426	0.368
	変動係数	3.39%	8.99%	5.43%	1.82%	3.5%
$\lambda 20$	2052_C0201	449	4.17	3.82	23.1	10.7
	2052_C0202	434	4.16	3.88	23.1	11.5
	2052_C0203	435	4.22	3.97	23.3	11.3
	平均	439	4.18	3.89	23.2	11.2
	最大	449	4.22	3.97	23.3	11.5
	最小	434	4.16	3.82	23.1	10.7
	標準偏差	8.49	0.0346	0.0720	0.122	0.436
	変動係数	1.93%	0.83%	1.85%	0.53%	3.90%
$\lambda 30$	2052_C0301	430	4.28	3.94	20.9	10.9
	2052_C0302	437	4.34	3.99	22.0	10.5
	2052_C0303	437	4.13	3.66	20.7	10.3
	平均	435	4.25	3.87	21.2	10.5
	最大	437	4.34	3.99	22.0	10.9
	最小	430	4.13	3.66	20.7	10.3
	標準偏差	3.67	0.109	0.178	0.708	0.301
	変動係数	0.844%	2.57%	4.61%	3.34%	2.85%
$\lambda 40$	2052_C0401	432	4.30	3.98	20.9	9.849
	2052_C0402	436	4.34	3.94	21.9	10.3
	2052_C0403	431	4.07	3.80	21.8	10.3
	平均	433	4.24	3.91	21.5	10.1
	最大	436	4.34	3.98	21.9	10.3
	最小	431	4.07	3.80	20.9	9.849
	標準偏差	2.82	0.147	0.0976	0.522	0.254
	変動係数	0.652%	3.47%	2.50%	2.43%	2.51%

 E_{fr} : 縦振動法による縦弾性係数 (単位 kN/mm²) E_c : 強度試験で得られた縦圧縮ヤング係数 (単位 kN/mm²) σ_c : 強度試験で得られた縦圧縮強度 (単位 N/mm²)

表 3.2.3b-6 7 層 7 プライ 弱軸

細長比	番号	密度 (kg/m ³)	E_{fr} (kN/mm ²)	E_c (kN/mm ²)	σ_c (N/mm ²)	含水率 (%)
$\lambda 10$	2062_C0101	432	2.46	2.51	17.3	10.9
	2062_C0102	422	2.51	2.71	18.4	10.6
	2062_C0103	428	2.37	2.65	17.8	10.5
	平均	427	2.44	2.63	17.8	10.7
	最大	432	2.51	2.71	18.4	10.9
	最小	422	2.37	2.51	17.3	10.5
	標準偏差	4.64	0.0726	0.103	0.515	0.193
	変動係数	1.09%	2.97%	3.91%	2.89%	1.8%
$\lambda 20$	2062_C0201	457	2.97	2.72	18.6	11.0
	2062_C0202	448	2.91	2.65	18.2	10.3
	2062_C0203	453	2.95	2.69	17.7	9.73
	平均	452	2.94	2.69	18.2	10.3
	最大	457	2.97	2.72	18.6	11.0
	最小	448	2.91	2.65	17.7	9.73
	標準偏差	4.58	0.0312	0.0344	0.463	0.627
	変動係数	1.01%	1.06%	1.28%	2.55%	6.08%
$\lambda 30$	2062_C0301	451	3.04	2.72	16.5	10.2
	2062_C0302	443	2.98	2.73	17.7	10.5
	2062_C0303	446	2.96	2.66	16.4	10.5
	平均	447	2.99	2.70	16.9	10.4
	最大	451	3.04	2.73	17.7	10.5
	最小	443	2.96	2.66	16.4	10.2
	標準偏差	4.06	0.0399	0.0381	0.717	0.151
	変動係数	0.908%	1.34%	1.41%	4.24%	1.45%
$\lambda 40$	2062_C0401	438	2.91	2.56	14.8	10.3
	2062_C0402	442	2.97	2.77	15.7	10.1
	2062_C0403	447	2.86	2.54	14.9	10.1
	平均	442	2.91	2.62	15.1	10.2
	最大	447	2.97	2.77	15.7	10.3
	最小	438	2.86	2.54	14.8	10.1
	標準偏差	4.67	0.0552	0.129	0.481	0.129
	変動係数	1.06%	1.89%	4.93%	3.19%	1.27%

 E_{fr} : 縦振動法による縦弾性係数 (単位 kN/mm²) E_c : 強度試験で得られた縦圧縮ヤング係数 (単位 kN/mm²) σ_c : 強度試験で得られた縦圧縮強度 (単位 N/mm²)

iii) 短柱圧縮試験における細長比の影響

図 3.2.3b-7 に圧縮ヤング係数を比較したものを強軸、弱軸の別に示す。層構成が同じものの比較では、弱軸 5 層 5 プライの $\lambda 30$ と $\lambda 40$ の比較を除いて、平均値に有意差はなかった。弱軸 5 層 5 プライの $\lambda 30$ の平均値が $\lambda 10$ 、 $\lambda 20$ 、 $\lambda 40$ と比べて若干低く、ばらつきも小さかったため、試験体数を増やせば、有意差はなくなるものと考えられる。

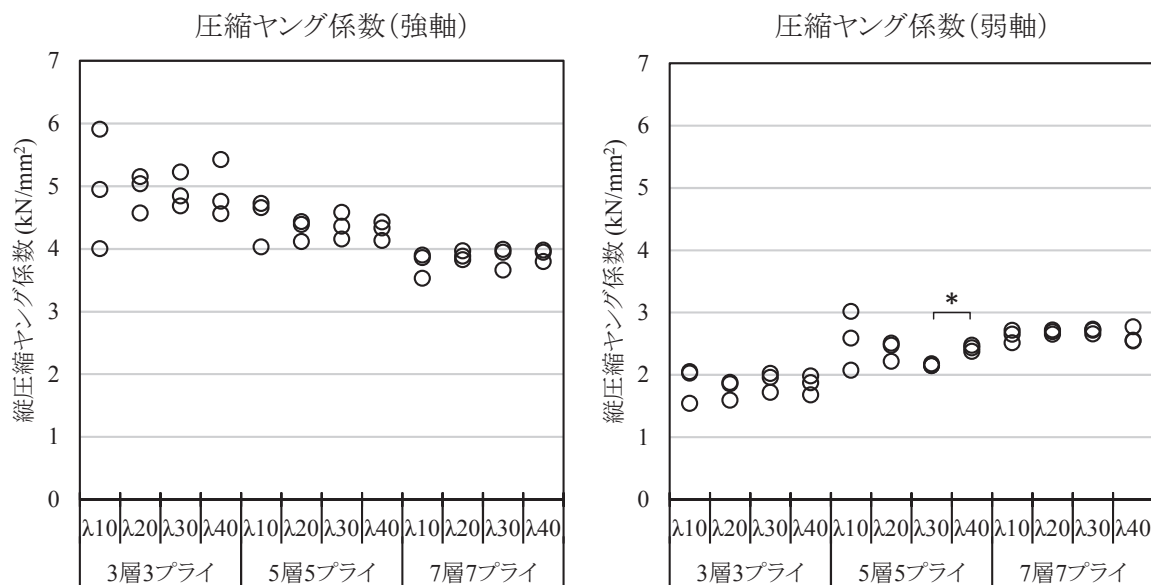


図 3.2.3b-7 縦圧縮ヤング係数の比較 (* : 5 %水準で平均値に有意差あり)

図 3.2.3b-8 に圧縮強度の比較を示す。強軸においては、7 層 7 プライで、 $\lambda 10$ や $\lambda 20$ に対して $\lambda 30$ や $\lambda 40$ において有意差があり、弱軸においては、3 層 3 プライ、5 層 5 プライにおいても有意差があった。強軸の 3 層 3 プライにおいても、若干 $\lambda 30$ や $\lambda 40$ の平均が、 $\lambda 10$ や $\lambda 20$ の平均を下回っている傾向から、 $\lambda 20$ 以下で試験した方が、座屈を伴わない範囲で強度試験値が得られるものと考えられた。

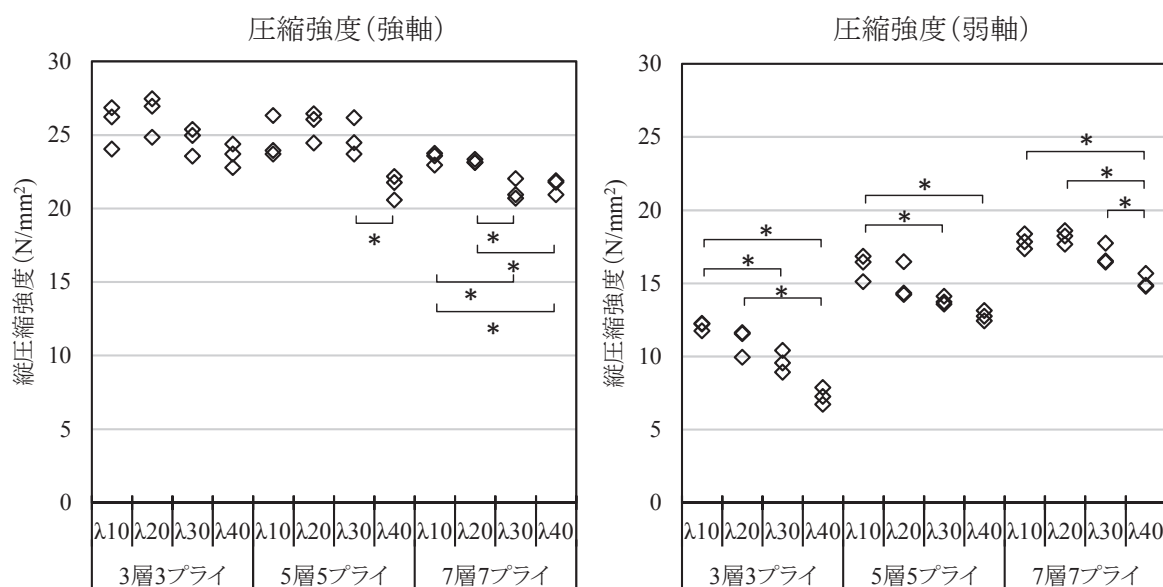


図 3.2.2b-8 縦圧縮強度の比較 (* : 5 %水準で平均値に有意差あり)

3.2.4 まとめ

長柱・中間中圧縮試験

Mx60-3-3 の強軸方向と弱軸方向、並びに、Mx60-5-5 の強軸方向と弱軸方向について、有効細長比が異なる複数の長さが異なる CLT を対象として座屈試験を行い、有効細長比により、座屈強度の求め方を異ならせる平成 13 年国土交通省告示第 1024 号に示される方法の妥当性について再確認を行った。

座屈試験の結果から逆算した圧縮強度を用いて、告示に示される計算方法により求めた座屈荷重の値は、有効細長比が 40 以上の範囲においては、実験結果と概ね一致した。現行の座屈強度の算定方法について、有効細長比 40 以上の範囲においては概ね妥当であることを確認した。

告示に示される方法により CLT の圧縮強度を算定し、その値を用いて座屈荷重を求めた結果は、実験により得られた座屈荷重（平均値）よりも小さい値であった。また、座屈荷重の 5%下限値を座屈荷重の平均値の 3/4 と仮定した場合、告示の方法によって計算した座屈荷重は、座屈荷重（下限値）よりも小さい値となり、安全側の値を与えることを確認した。

短柱圧縮試験

短柱圧縮試験では、 $\lambda 30$ と $\lambda 40$ で実施した得られた強度は、 $\lambda 10$ 、 $\lambda 20$ の強度よりも低い傾向が確認された。ただし、降伏後に座屈していたものと考えられた。 $\lambda 30$ で実施した強度は安全側の数値となるものと考えられるが、とりわけ弱軸試験体に関しては、試験評価上の安全性から、 $\lambda 10$ や $\lambda 20$ で評価することが望ましいと思われた。

3.3 引張り

3.3.1 試験体

a. CLT 試験体の概要

3.3 節において試験に用いた CLT パネルの仕様を表 3.3.1a-1 に示す。これらのパネルから引張試験体を所定量切り出した。

パネルの製造に用いたラミナは、ラミナ厚①20mm 用および 21.4mm 用、②30mm 用、③45mm 用の 3 種類であった。それぞれ必要量を予め計算し、製材・乾燥された原料ひき板を連続しグレーディングマシンを用いて測定した曲げヤング係数を用いて外層用ひき板と内層用ひき板に区分した。いずれのラミナも 1m 前後の長さに裁断した後、フィンガージョイントにより所定の長さにたて継ぎして用いた。フィンガー長さは 15mm、垂直型、接着剤には水性高分子イソシアネート系樹脂を用いた。

これらのラミナを水性高分子イソシアネート系樹脂を用いて積層接着して CLT パネルを製造した。これらのパネルからの試験体採材パターンについては付録に資料として示す。

表 3.3.1a-1 試験体採取用 CLT パネルの概要

層構成	ラミナ厚 (mm)	ラミナ幅 (mm)	パネル厚 (mm)	パネル幅 (mm)	パネル長 (mm)	パネル 番号	パネル 枚数
3 層 3 プライ	20	105	60	2100	6030	20-1	1
	30	105	90	2100	6030	30-3	1
	45	105	135	2100	6030	45A-1	1
5 層 5 プライ	30	105	150	2100	6030	30-5	1
7 層 7 プライ	21.4	105	150	2100	6030	21-1	1

b. 試験体製造に用いたラミナ試験体の概要

①②の 2 種類のラミナについて、それぞれ外層用ラミナ(M60)と内層用ラミナ(M30)、また、③のラミナについて外層用ラミナ (M60) 計 5 種類のラミナについて、たて継ぎ部を中央付近に配した試験体を各 30 枚採取し、引張試験を行った。試験体の概要を表 3.3.1b-1 に示す。

表 3.3.1b-1 ラミナ引張り試験体の概要

グループ	等級	幅(mm)	厚さ(mm)	試験体数
M30A-20	M30A	105	20	30
M30A-30			30	30
M60A-20	M60A		20	30
M60A-30			30	30
M60A-45			45	30

3.3.2 試験方法

a. CLT の非破壊試験および引張り試験方法

CLT の引張り試験体の概要を表 3.3.2a-1 示す。

表 3.3.2a-1 CLT 引張り試験体の概要

等級・層構成	ラミナ幅 (mm)	ラミナ厚 (mm)	方向	大板番号	寸法(mm) (厚さ×幅×長さ)	試験体数
Mx60-3-3	105	20	強軸	201	60×300×6000	6
		30		303	90×300×6000	6
		45		45A1	135×300×6000	6
Mx60-5-5		30		305	150×300×6000	6
Mx60-7-7		21.4		211		6

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プラスチック製のハンマーで打撃し、反対側の材端に近接したマイクロフォンあるいは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.法はプラスチック製のハンマーを用いて、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 1～9 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。縦振動法および T.G.H.法による固有振動数測定の様子を写真 3.3.2a-1、3.3.2a-2 に示す。



写真 3.3.2a-1 縦振動法による固有振動数測定の様子 写真 3.3.2a-2 T.G.H.法による固有振動数測定の様子

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は 7mm/min とした。引張り試験の様子を写真 3.3.2a-3、3.3.2a-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。

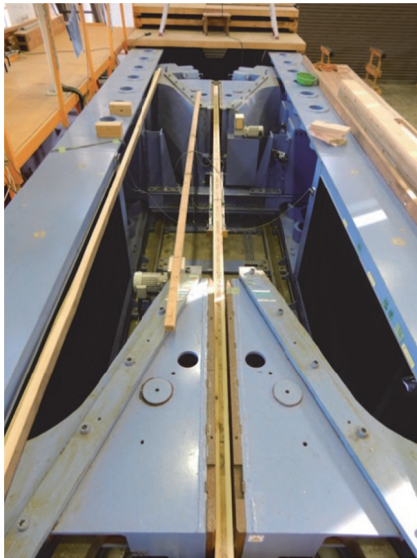


写真 3.3.2a-3 Mx60-3-3 ラミナ厚 21.4mm の引張り試験の様子

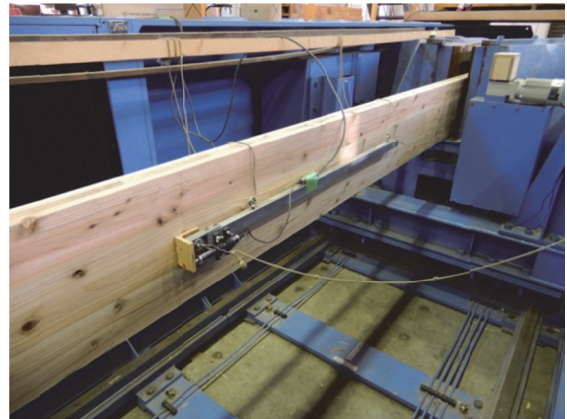


写真 3.3.2a-4 変位計およびヨークの取り付けの様子

b. ラミナ試験体の引張り試験方法

ラミナの引張り試験に先立ち、密度と縦振動法によるヤング係数を測定した。引張り試験には飯田工業製 NET-40 を用いた。引張り試験は直交集成板の日本農林規格の別記に示されたラミナの引張り試験に従った。ただし試験機の制約により、両端のグリップ間の距離は日本農林規格に示された 600mm 以上ではなく、20、30、45mm 厚の試験体でそれぞれ 520、530、570mm とした。いずれの試験体もフィンガージョイントがスパンの中央に位置するように配置した。引張り試験後、破壊部近傍の両側から長さが約 20mm の含水率測定用試験体を採取して全乾法により乾燥し、両者の平均値を試験体の含水率とした。引張り試験の様子を写真 3.3.2b-1、3.3.2b-2 に示す。



写真 3.3.2b-1 M30A-30 の引張り試験の様子



写真 3.3.2b-2 M30A-30 の引張り試験の様子

3.3.3 結果および考察

a. CLT 引張り試験の結果および考察

各層構成の破壊形態の例を写真 3.3.3a-1～3.3.3a-10 に、CLT 引張り試験の結果を表 3.3.3a-1～3.3.3a-5 に示す。



写真 3.3.3a-1 Mx60-3-3 ラミナ厚 20mm の破壊形態の例



写真 3.3.3a-2 Mx60-3-3 ラミナ厚 20mm の破壊形態の例



写真 3.3.3a-3 Mx60-3-3 ラミナ厚 30mm の破壊形態の例



写真 3.3.3a-4 Mx60-3-3 ラミナ厚 30mm の破壊形態の例



写真 3.3.3a-5 Mx60-3-3 ラミナ厚 45mm の破壊形態の例



写真 3.3.3a-6 Mx60-3-3 ラミナ厚 45mm の破壊形態の例



写真 3.3.3a-7 Mx60-5-5 の破壊形態の例



写真 3.3.3a-8 Mx60-5-5 の破壊形態の例



写真 3.3.3a-9 Mx60-7-7 の破壊形態の例

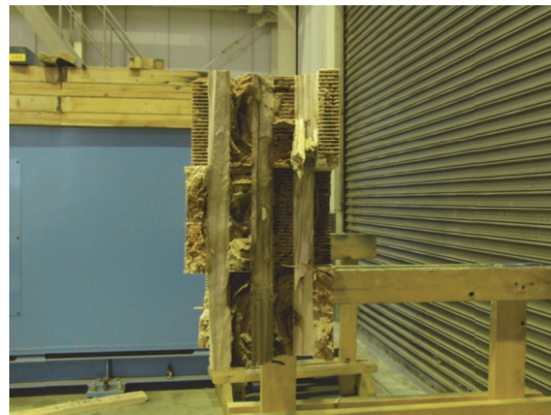


写真 3.3.3a-10 Mx60-7-7 の破壊形態の例

表 3.3.3a-1 非破壊試験および引張り試験の結果 (Mx60-3-3、ラミナ厚 20mm)

番号	密度(kg/m ³)	Efr	ETGHf	GTGHf	ETGHe	GTGHe	E	σ	含水率 (%)
201-1	412	6.20	9.47	0.154	6.63	0.679	5.71	14.8	9.64
201-2	411	6.07	9.34	0.154	6.34	0.725	6.30	16.4	8.53
201-3	406	6.25	9.27	0.157	6.49	0.676	5.92	16.4	11.5
201-4	414	5.67	8.78	0.153	6.04	0.696	5.25	14.7	9.44
201-5	417	6.43	9.95	0.143	6.75	0.713	6.07	16.1	9.46
201-6	422	5.77	9.73	0.139	5.97	0.744	5.39	14.3	9.75
平均値	414	6.06	9.42	0.150	6.37	0.706	5.77	15.4	9.72
最小値	406	5.67	8.78	0.139	5.97	0.676	5.25	14.3	8.53
最大値	422	6.43	10.0	0.157	6.75	0.744	6.30	16.4	11.5
標準偏差	5.42	0.294	0.407	0.00706	0.314	0.0267	0.404	0.957	0.977
変動係数	1.31	4.84	4.32	4.70	4.93	3.79	6.99	6.19	10.0

表 3.3.3a-2 非破壊試験および引張り試験の結果 (Mx60-3-3、ラミナ厚 30mm)

番号	密度(kg/m ³)	Efr	ETGHf	GTGHf	ETGHe	GTGHe	E	σ	含水率 (%)
303-1	380	5.40	8.33	0.158	6.19	0.592	4.75	13.6	9.58
303-2	381	5.73	8.00	0.177	6.06	0.659	5.58	15.4	8.62
303-3	388	5.34	7.65	0.164	5.69	0.639	4.87	13.7	10.4
303-4	394	5.64	8.39	0.167	6.40	0.505	5.24	15.0	10.7
303-5	404	5.77	8.79	0.165	6.11	0.656	5.39	14.2	8.53
303-6	393	5.88	8.48	0.171	6.05	0.640	5.62	16.5	9.75
平均値	390	5.63	8.27	0.167	6.08	0.615	5.24	14.8	9.60
最小値	380	5.34	7.65	0.158	5.69	0.505	4.75	13.6	8.53
最大値	404	5.88	8.79	0.177	6.40	0.659	5.62	16.5	10.7
標準偏差	8.79	0.212	0.398	0.00655	0.232	0.0589	0.362	1.13	0.897
変動係数	2.25	3.76	4.81	3.92	3.82	9.58	6.91	7.67	9.34

Efr：縦振動法による縦弾性係数 (単位 kN/mm²)

ETGHf：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)

GTGHf：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)

ETGHe：たわみ振動法による面内方向の曲げヤング係数 (単位 kN/mm²)

GTGHe：たわみ振動法による面内方向のせん断弾性係数 (単位 kN/mm²)

E：強度試験で得られた弾性係数 (単位 kN/mm²)

σ：強度試験で得られた強さ (単位 N/mm²)

表 3.3.3a-3 非破壊試験および引張り試験の結果 (Mx60-3-3、ラミナ厚 45mm)

番号	密度(kg/m ³)	Efr	ETGHf	GTGHf	ETGHe	GTGHe	E	σ	含水率 (%)
45A1-1	398	5.65	8.23	0.173	6.30	0.565	5.16	13.1	6.92
45A1-2	380	5.57	7.69	0.203	6.02	0.574	5.28	14.0	6.62
45A1-3	389	5.80	8.41	0.187	6.12	0.637	4.97	13.8	6.94
45A1-4	390	5.95	8.53	0.201	6.55	0.581	5.45	13.5	6.76
45A1-5	394	6.01	8.57	0.189	6.57	0.623	5.39	14.1	6.56
45A1-6	391	5.38	8.12	0.196	5.76	0.620	5.06	13.1	6.69
平均値	390	5.73	8.26	0.192	6.22	0.600	5.22	13.6	6.75
最小値	380	5.38	7.69	0.173	5.76	0.565	4.97	13.1	6.56
最大値	398	6.01	8.57	0.203	6.57	0.637	5.45	14.1	6.94
標準偏差	5.99	0.239	0.326	0.0109	0.318	0.0301	0.188	0.420	0.157
変動係数	1.53	4.17	3.95	5.69	5.12	5.01	3.60	3.09	2.32

表 3.3.3a-4 非破壊試験および引張り試験の結果 (Mx60-5-5、ラミナ厚 30mm)

番号	密度(kg/m ³)	Efr	ETGHf	GTGHf	ETGHe	GTGHe	E	σ	含水率 (%)
305-1	405	4.41	8.33	0.158	4.91	0.633	3.74	12.0	10.0
305-2	399	4.77	7.94	0.143	4.99	0.619	4.45	13.4	10.2
305-3	405	4.41	7.91	0.155	4.59	0.627	3.98	11.9	9.70
305-4	404	4.59	7.71	0.159	4.84	0.628	4.25	12.4	10.1
305-5	403	4.56	8.12	0.155	4.62	0.625	4.31	9.63	9.04
305-6	408	4.78	8.21	0.160	4.86	0.639	4.54	13.0	9.44
平均値	404	4.59	8.04	0.155	4.80	0.629	4.21	12.1	9.75
最小値	399	4.41	7.71	0.143	4.59	0.619	3.74	9.63	9.04
最大値	408	4.78	8.33	0.160	4.99	0.639	4.54	13.4	10.2
標準偏差	2.97	0.162	0.225	0.00621	0.161	0.00686	0.301	1.31	0.452
変動係数	0.735	3.53	2.80	4.01	3.35	1.09	7.14	10.9	4.64

Efr：縦振動法による縦弾性係数 (単位 kN/mm²)ETGHf：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)GTGHf：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)ETGHe：たわみ振動法による面内方向の曲げヤング係数 (単位 kN/mm²)GTGHe：たわみ振動法による面内方向のせん断弾性係数 (単位 kN/mm²)E：強度試験で得られた弾性係数 (単位 kN/mm²) σ ：強度試験で得られた強さ (単位 N/mm²)

表 3.3.3a-5 非破壊試験および引張り試験の結果 (Mx60-7-7、ラミナ厚 21.4mm)

番号	密度(kg/m ³)	Efr	ETGHf	GTGHf	ETGHe	GTGHe	E	σ	含水率 (%)
211-1	416	4.90	8.03	0.173	5.23	0.667	4.71	10.6	10.0
211-2	407	4.63	7.66	0.165	4.69	0.630	4.13	11.6	9.30
211-3	407	4.80	7.86	0.178	5.03	0.630	4.45	10.8	9.51
211-4	409	4.48	7.63	0.179	5.13	0.650	3.82	9.65	10.0
211-5	406	5.09	7.53	0.180	5.61	0.660	4.75	11.2	9.31
211-6	406	4.85	7.90	0.175	5.15	0.647	4.58	12.8	10.2
平均値	408	4.79	7.77	0.175	5.14	0.648	4.41	11.1	9.73
最小値	406	4.48	7.53	0.165	4.69	0.630	3.82	9.65	9.30
最大値	416	5.09	8.03	0.180	5.61	0.667	4.75	12.8	10.2
標準偏差	3.79	0.213	0.191	0.00556	0.298	0.0152	0.364	1.06	0.405
変動係数	0.928	4.44	2.46	3.18	5.79	2.35	8.26	9.52	4.16

Efr：縦振動法による縦弾性係数 (単位 kN/mm²)

ETGHf：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)

GTGHf：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)

ETGHe：たわみ振動法による面内方向の曲げヤング係数 (単位 kN/mm²)

GTGHe：たわみ振動法による面内方向のせん断弾性係数 (単位 kN/mm²)

E：強度試験で得られた弾性係数 (単位 kN/mm²)

σ：強度試験で得られた強さ (単位 N/mm²)

Mx60-3-3 によるラミナ厚の影響を図 3.3.3a-1 に示す。ラミナ厚が大きくなるほど引張り強度の平均値が低下する傾向が認められた。CLT 厚が 150mm に近い試験体による層構成の影響を図 3.3.3a-2 に示す。CLT の層が多くなるほど引張り強度の平均値が低下する傾向が認められた。これは層構成が多くなるほど断面の平行層の割合が小さくなり、また外層 M60A ラミナの割合が小さくなることによるものだと考えられた。

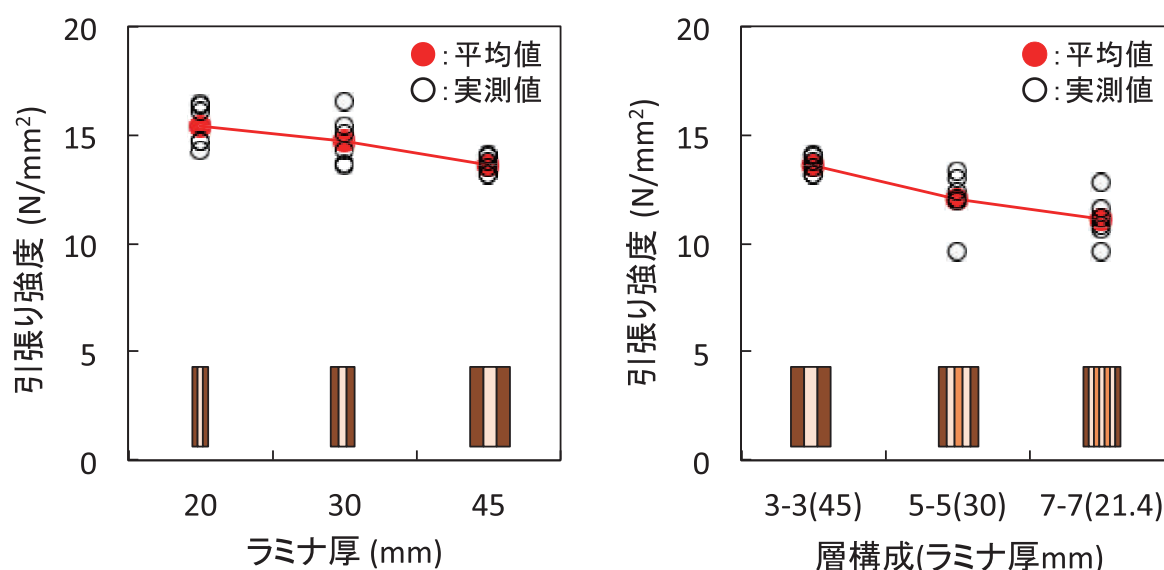


図 3.3.3a-1 Mx60-3-3 によるラミナ厚の影響 図 3.3.3a-2 CLT 厚が 150mm に近い試験体による層構成の影響

等価断面法により Mx60-3-3 と Mx60-5-5 の引張り強度の推定を行った。使用した値は表 3.3.3a-6 の通りである。ラミナのヤング係数と引張り強度は後述する本ラミナ引張り試験の平均値を用いた。また直交層のヤング係数は 0 と仮定した。推定値と実測した平均値を表 3.3.3a-7 に、実測値との比較を図 3.3.3a-3 に示す。Mx60-3-3 ではいずれのラミナ厚とも推定値が平均値をやや上回り、ラミナ厚が 20mm と 45mm のものでは推定値がすべての実測値を上回った。一方、Mx60-5-5 では推定値がすべての実測値を下回った。この違いについて、積層接着の影響、直交層の影響、CLT に用いたラミナとラミナ試験で用いたラミナの比較の必要性などが考えられるが、今後の検討課題である。

表 3.3.3a-6 等価断面法による引張り強度の推定に用いた値

等級・層構成	ラミナ厚 (mm)	平行層外層 Efr (kN/mm ²)	平行層内層 Efr (kN/mm ²)	平行層外層 σ_t (N/mm ²)	直交層 Efr (kN/mm ²)
Mx60-3-3	20	8.76 (M60A-20)	-	25.8 (M60A-20)	0
	30	7.71 (M60A-30)	-	23.3 (M60A-30)	0
	45	7.99 (M60A-45)	-	22.4 (M60A-45)	0
Mx60-5-5	30	7.71 (M60A-30)	5.41 (M30A-30)	23.3 (M60A-30)	0

Efr：縦振動法によるヤング係数

σ_t ：ラミナの引張り強度

表 3.3.3a-7 等価断面法による引張り強度の推定値と実測した平均値

グループ	ラミナ厚 (mm)	推定値 (N/mm ²)	実測値平均 (N/mm ²)
Mx60-3-3	20	17.2	15.4
	30	15.5	14.8
	45	14.9	13.6
Mx60-5-5	30	9.44	12.1

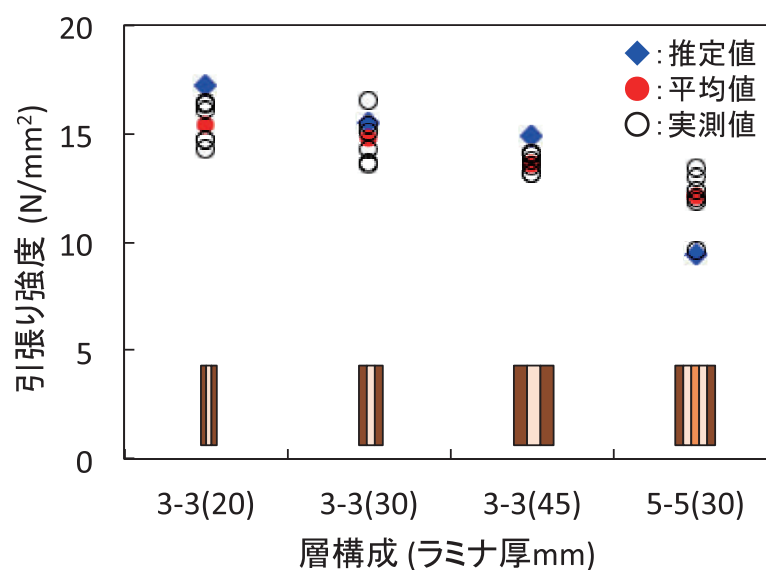


図 3.3.3a-3 等価断面法による引張り強度の推定値と実測値との比較

b. ラミナ引張り試験の結果および考察

ラミナの破壊形態の例として、フィンガージョイントによる破壊（FJ）、節による破壊（K）、フィンガージョイントが主で節が従の破壊（FJ+K）、節が主でフィンガージョイントが従の破壊（K+FJ）の例を写真 3.3.3b-1～3.3.3b-4 に示すとともに、各グループの破壊形態の個数と割合を表 3.3.3b-1 に示す。フィンガージョイントをスパンのほぼ中央部に配置したが、節または節を主とする破壊が全体の 4 割弱存在した。



写真 3.3.3b-1 フィンガージョイントによる破壊（FJ）



写真 3.3.3b-2 節による破壊（K）



写真 3.3.3b-3 FJ が主で節が従の破壊（FJ+K）



写真 3.3.3b-4 節が主で FJ が従の破壊（K+FJ）

表 3.3.3b-1 各グループによる破壊形態の個数と割合（カッコ内）

グループ	F	K	FJ+K	K+FJ
M30A-20	22 (73%)	6 (20%)	1 (3%)	1 (3%)
M30A-30	13 (43%)	10 (33%)	4 (13%)	3 (10%)
M60A-20	14 (47%)	11 (37%)	3 (10%)	2 (7%)
M60A-30	17 (57%)	8 (27%)	5 (17%)	0 (0%)
M60A-45	13 (43%)	12 (40%)	1 (3%)	4 (13%)
合計	79 (53%)	47 (31%)	14 (9%)	10 (7%)

ラミナの引張り試験の結果を表 3.3.3b-2～3.3.3b-6 に示す。また、各グループの平均値と正規分布を仮定した 5%下限値（信頼水準 75%における 95%下側許容限界値）に、直交集成板の日本農林規格に示された区分ラミナの引張り強さの強度性能の基準を加えたものを表 3.3.3b-7 に示す。いずれのグループとも日本農林規格の基準値を平均値、下限値とも上回っていた。

表 3.3.3b-2 M30A-20 の引張り試験の結果

番号	密度(kg/m ³)	Efr	σ	含水率 (%)	破壊形態
1	390	8.29	25.5	9.53	FJ
2	372	5.42	16.2	9.78	FJ
3	358	4.63	16.4	10.1	FJ
4	424	4.72	14.6	9.70	K+FJ
5	420	4.87	20.5	8.82	FJ
6	430	5.58	19.2	9.21	FJ
7	447	5.43	18.4	10.2	FJ
8	344	8.11	20.9	8.63	FJ
9	383	5.53	22.3	10.2	FJ
10	384	5.58	13.0	9.20	FJ
11	392	4.65	16.8	10.8	FJ
12	378	6.15	15.7	9.20	FJ
13	400	11.3	32.1	8.34	FJ
14	392	4.78	17.8	10.2	K
15	429	4.18	15.4	10.1	K
16	415	4.70	21.9	12.0	FJ
17	428	5.18	16.4	8.85	FJ
18	386	6.06	16.6	12.3	FJ
19	415	4.58	18.8	11.2	FJ
20	432	4.01	18.1	8.33	FJ
21	390	4.88	16.5	8.92	K
22	436	6.69	28.2	9.36	FJ
23	437	4.84	24.1	8.98	FJ
24	365	4.97	19.9	9.21	FJ
25	362	5.97	20.7	8.22	FJ
26	406	4.85	21.0	9.13	K
27	440	4.85	12.1	8.37	K
28	378	5.78	20.0	8.18	FJ
29	447	5.56	18.8	8.81	K
30	435	5.77	14.8	10.1	FJ+K
平均値	404	5.60	19.1	9.54	
最小値	344	4.01	12.1	8.18	
最大値	447	11.3	32.1	12.3	
標準偏差	29.3	1.45	4.32	1.06	
変動係数	7.26	25.9	22.6	11.1	

Efr：縦振動法による縦弾性係数（単位 kN/mm²）

σ ：強度試験で得られた強さ（単位 N/mm²）

FJ：フィンガージョイントによる破壊、K：節による破壊

FJ+K：フィンガージョイントが主で節が従の破壊

K+FJ：節が主でフィンガージョイントが従の破壊

表 3.3.3b-3 M30A-30 の引張り試験の結果

番号	密度(kg/m ³)	Efr	σ	含水率 (%)	破壊形態
1	386	5.31	19.9	10.4	K
2	417	3.91	15.7	11.0	K
3	358	6.02	23.8	10.5	K
4	380	5.84	21.5	10.7	K
5	394	4.64	17.3	11.4	K
6	391	5.93	18.5	10.8	K+FJ
7	322	4.97	18.9	11.2	FJ
8	427	5.69	22.1	13.4	FJ
9	370	5.79	23.2	12.1	FJ
10	366	6.40	26.1	13.6	FJ
11	386	6.25	19.1	13.5	K
12	367	5.40	19.2	13.3	FJ
13	373	5.28	26.4	13.2	FJ
14	385	4.65	15.0	10.4	K
15	358	4.62	21.8	12.7	FJ
16	387	4.11	14.8	11.2	K+FJ
17	376	5.11	21.6	13.0	FJ+K
18	423	4.86	24.6	10.7	FJ
19	419	5.14	23.1	12.7	K
20	360	4.86	22.7	10.6	FJ
21	372	5.36	14.4	7.46	FJ
22	388	5.47	18.1	10.1	K
23	408	5.85	21.5	11.9	FJ+K
24	385	5.08	20.8	8.76	FJ+K
25	409	4.65	19.0	12.6	K
26	336	6.32	23.7	12.3	FJ
27	390	6.10	24.3	12.9	FJ+K
28	351	6.47	26.4	11.6	FJ
29	383	6.27	27.5	11.9	K+FJ
30	349	5.87	20.4	12.4	FJ
平均値	381	5.41	21.0	11.6	
最小値	322	3.91	14.4	7.46	
最大値	427	6.47	27.5	13.6	
標準偏差	25.1	0.687	3.58	1.45	
変動係数	6.6	12.7	17.0	12.5	

Efr：縦振動法による縦弾性係数（単位 kN/mm²）

σ ：強度試験で得られた強さ（単位 N/mm²）

FJ：フィンガージョイントによる破壊、K：節による破壊

FJ+K：フィンガージョイントが主で節が従の破壊

K+FJ：節が主でフィンガージョイントが従の破壊

表 3.3.3b-4 M60A-20 の引張り試験の結果

番号	密度(kg/m ³)	Efr	σ	含水率 (%)	破壊形態
1	406	8.06	22.0	9.22	FJ
2	486	8.94	17.9	10.3	K
3	386	6.61	22.8	9.92	FJ
4	384	8.03	30.1	8.56	K+FJ
5	424	6.85	31.1	8.59	FJ+K
6	444	10.5	33.5	7.73	FJ+K
7	408	8.11	30.4	8.04	FJ+K
8	384	8.59	27.2	7.20	FJ
9	406	10.0	31.3	7.88	K+FJ
10	372	7.35	13.4	8.63	K
11	452	8.38	28.0	7.15	K
12	489	8.55	27.6	9.32	K
13	461	10.7	23.5	8.44	FJ
14	434	9.84	34.5	6.94	FJ
15	377	7.72	17.4	7.67	K
16	380	9.11	18.4	8.09	FJ
17	436	10.5	30.8	8.68	FJ
18	365	8.62	28.4	7.83	FJ
19	366	7.83	27.6	7.45	FJ
20	376	8.58	25.3	7.86	K
21	441	12.4	41.4	6.67	FJ
22	418	9.14	25.5	7.01	FJ
23	447	9.37	22.1	7.78	FJ
24	374	8.07	22.8	7.47	FJ
25	402	9.68	31.7	7.21	FJ
26	387	7.99	15.9	7.51	K
27	366	7.24	17.4	7.50	K
28	399	6.92	23.9	8.44	K
29	450	9.88	31.1	8.05	K
30	408	9.35	21.4	8.11	K
平均値	411	8.76	25.8	8.04	
最小値	365	6.61	13.4	6.67	
最大値	489	12.4	41.4	10.3	
標準偏差	35.9	1.30	6.35	0.861	
変動係数	8.75	14.9	24.6	10.7	

Efr：縦振動法による縦弾性係数（単位 kN/mm²） σ ：強度試験で得られた強さ（単位 N/mm²）

FJ：フィンガージョイントによる破壊、K：節による破壊

FJ+K：フィンガージョイントが主で節が従の破壊

K+FJ：節が主でフィンガージョイントが従の破壊

表 3.3.3b-5 M60A-30 の引張り試験の結果

番号	密度(kg/m ³)	Efr	σ	含水率 (%)	破壊形態
1	357	8.57	18.5	7.19	FJ
2	376	7.99	22.6	7.90	FJ+K
3	470	8.36	23.4	8.85	K
4	362	8.90	21.3	7.20	FJ
5	312	7.90	22.8	6.39	FJ
6	387	7.08	19.9	6.70	FJ+K
7	411	7.87	28.5	6.91	FJ+K
8	414	6.91	18.1	7.44	FJ
9	392	8.30	18.8	10.2	K
10	355	8.07	21.9	6.68	FJ
11	377	6.95	19.1	6.80	FJ
12	397	7.83	24.9	5.71	FJ
13	373	8.42	21.7	6.41	FJ+K
14	336	6.73	21.1	5.89	K
15	354	7.35	23.6	6.98	FJ
16	379	7.89	31.2	7.04	FJ
17	448	8.64	21.0	6.11	K
18	403	7.33	22.1	6.96	K
19	383	6.37	28.1	7.42	FJ
20	505	9.11	25.3	6.85	K
21	379	8.97	21.0	6.81	FJ
22	378	7.34	29.7	7.19	FJ
23	409	7.11	30.8	6.67	FJ
24	401	7.68	24.4	6.78	K
25	426	7.15	17.7	6.83	FJ+K
26	425	8.19	24.9	6.71	K
27	418	6.33	21.4	7.38	FJ
28	359	6.39	20.9	7.57	FJ
29	449	7.96	29.4	8.83	FJ
30	415	7.61	25.2	8.63	FJ
平均値	395	7.71	23.3	7.17	
最小値	312	6.33	17.7	5.71	
最大値	505	9.11	31.2	10.2	
標準偏差	40.2	0.778	3.83	0.935	
変動係数	10.2	10.1	16.4	13.0	

Efr：縦振動法による縦弾性係数（単位 kN/mm²）

σ ：強度試験で得られた強さ（単位 N/mm²）

FJ：フィンガージョイントによる破壊、K：節による破壊

FJ+K：フィンガージョイントが主で節が従の破壊

K+FJ：節が主でフィンガージョイントが従の破壊

表 3.3.3b-6 M60A-45 の引張り試験の結果

番号	密度(kg/m ³)	Efr	σ	含水率 (%)	破壊形態
1	368	7.45	20.9	5.48	K
2	401	7.34	25.9	4.25	K
3	418	7.36	14.9	9.19	FJ
4	438	8.52	23.5	6.26	K+FJ
5	399	10.8	24.7	4.62	K+FJ
6	405	8.09	24.8	9.83	FJ
7	395	8.81	28.9	8.64	FJ
8	371	7.61	25.8	6.95	K
9	412	8.73	26.8	5.78	FJ
10	422	6.72	25.8	3.19	K
11	419	9.81	21.1	6.51	K
12	424	9.61	17.8	5.06	K+FJ
13	440	7.29	21.9	10.1	FJ
14	407	9.86	28.6	5.69	K+FJ
15	389	7.70	20.3	3.85	FJ
16	418	7.07	16.5	9.42	FJ
17	414	7.72	24.3	6.03	FJ
18	415	5.54	18.0	6.14	K
19	411	7.42	19.0	5.06	FJ
20	389	7.96	17.9	3.70	K
21	458	7.20	18.0	6.55	K
22	426	8.03	26.3	5.85	K
23	389	5.51	19.0	5.67	K
24	391	8.23	22.3	4.70	FJ+K
25	388	7.76	24.1	5.34	FJ
26	427	7.41	22.3	7.34	FJ
27	412	7.78	20.4	4.65	K
28	396	9.41	26.3	6.67	FJ
29	434	9.24	24.1	6.56	FJ
30	400	7.56	23.0	4.24	K
平均値	409	7.99	22.4	6.11	
最小値	368	5.51	14.9	3.19	
最大値	458	10.8	28.9	10.1	
標準偏差	20.2	1.19	3.70	1.82	
変動係数	4.9	14.8	16.5	29.8	

Efr：縦振動法による縦弾性係数（単位 kN/mm²）

σ ：強度試験で得られた強さ（単位 N/mm²）

FJ：フィンガージョイントによる破壊、K：節による破壊

FJ+K：フィンガージョイントが主で節が従の破壊

K+FJ：節が主でフィンガージョイントが従の破壊

3.3.3b-7 各グループの平均値と 5%下限値。

グループ	平均値 (N/mm ²)	JAS 平均値 (N/mm ²)	下限値 (N/mm ²)	JAS 下限値 (N/mm ²)
M30A-20	19.1	11.5	11.0	8.5
M30A-30	21.0		14.4	
M60A-20	25.8	16.0	14.0	12.0
M60A-30	23.3		16.2	
M60A-45	22.4		15.5	

注：5%下限値は正規分布を仮定した信頼水準 75%による 95%下側許容限界値。JAS 平均値、JAS 下限値はそれぞれ直交集成板の日本農林規格の表 8 に示された A 種構成に用いる等級区分機による区分ラミナの強度性能の基準の引張り強さ。

グレードごとにラミナ厚による平均値の差の検定を行った。M30A-20 と M30A-30 の Efr の平均値（以下いずれも平均値）はそれぞれ 5.60、5.41 kN/mm²、引張り強度はそれぞれ 19.1、21.0 N/mm²であったが、Efr、引張り強度とも、t 検定の結果 5%水準で両者に有意差はなかった（順に $p=0.52$ 、 0.063 ）。同様に M60A-20、M60A-30、M60A-45 の Efr はそれぞれ 8.76、7.71、7.99 kN/mm²、引張り強度はそれぞれ 25.8、23.3、22.4 N/mm²であった。Tukey-Kramer の HSD 検定の結果 5%水準で、Efr では M60A-20 と M60A-30、M60A-20 と M60A-45 との間に有意差が認められた（ $p=0.001$ ）。引張り強度では M60A-20 と M60A-45 との間に有意差が認められた（ $p=0.021$ ）。

3.4 面内せん断性能

3.4.1 試験体の概要

3.4 節において試験に用いた CLT パネルの仕様を表 3.4.1a-1 に示す。これらのパネルから面内せん断試験体を所定枚数切り出した。

パネルの製造に用いたラミナは、ラミナ厚①20mm 用、②30mm 用、③45mm 用の 3 種類であった。それぞれ必要量を予め計算し、製材・乾燥された原料ひき板を連続しグレーディングマシンを用いて測定した曲げヤング係数を用いて外層用ひき板と内層用ひき板に区分した。いずれのラミナも 1m 前後の長さに裁断した後、フィンガージョイントにより所定の長さにたて継ぎして用いた。フィンガー長さは 15mm、垂直型、接着剤には水性高分子イソシアネート系樹脂を用いた。

これらのラミナを水性高分子イソシアネート系樹脂を用いて積層接着して CLT パネルを製造した。これらのパネルからの試験体採材パターンについては付録に資料として示す。なお、これらのパネルからは 2.2.3 に示す圧縮せん断試験体も採材した。

表 3.4.1a-1 試験体採取用 CLT パネルの概要

層構成	ラミナ厚 (mm)	ラミナ幅 (mm)	パネル厚 (mm)	パネル幅 (mm)	パネル長 (mm)	パネル 番号	パネル 枚数
3層3プライ	45	175	135	2100	4030	45B-1	2
5層5プライ	30	105	150	2100	4030	30-4	2
7層7プライ	20	105	140	2100	4030	20-4	2
9層9プライ	20	105	180	2100	4030	20-7	2

3.4.2 試験方法

図 3.4.2-1 に試験のセットアップを示す。エ形の CLT パネルのうち、試験体となるのは、中央のくびれ部分である。試験体下部は PC 鋼棒を鉛直および水平方向に用いて、鋼製基礎治具へ緊結する。試験上部は下部と同様に鋼製治具へ緊結し、鋼製治具および水平ジャッキの重量を試験体に与えないようにするため、鉛直ジャッキで上へ持ち上げる。上部の治具は水平平行移動装置を介し、載荷フレームに取り付ける。

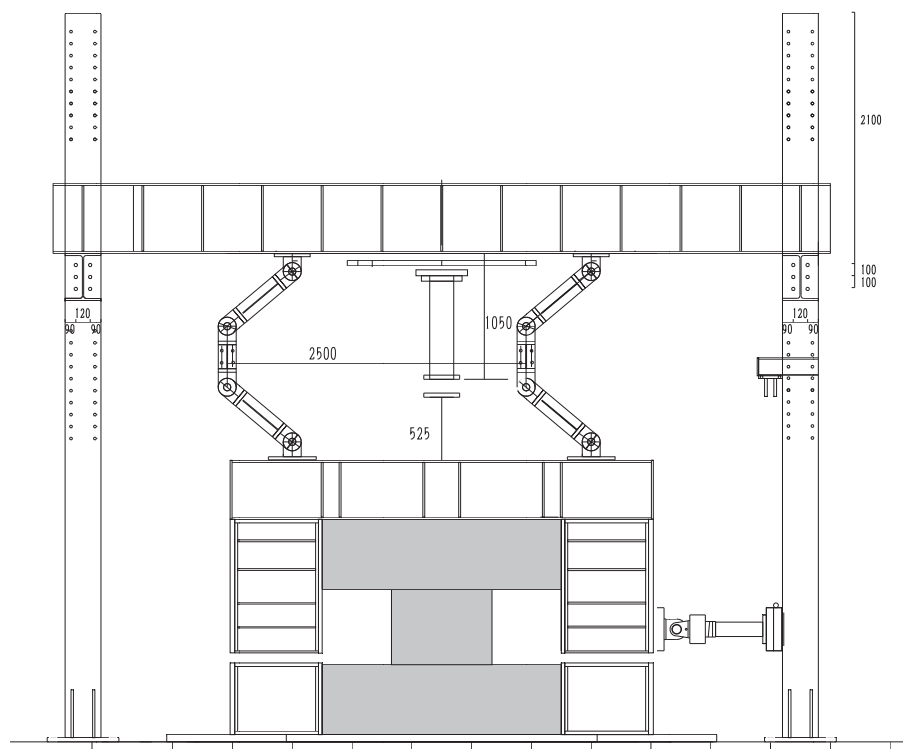


図 3.4.2-1 試験のセットアップ

図 3.4.2-2、3.4.2-3 に計測装置の概要を示す。くびれ部分の 4 隅に 4 点の標点を設け標点間の変位を用い、パネルのせん断変形角を計測した。また水平ジャッキに取り付けたロードセルで水平荷重を計測し、くびれ部分の断面積で除し、せん断応力度とした。



図 3.4.2-2 試験体の様子

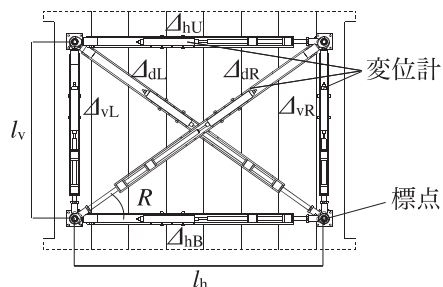
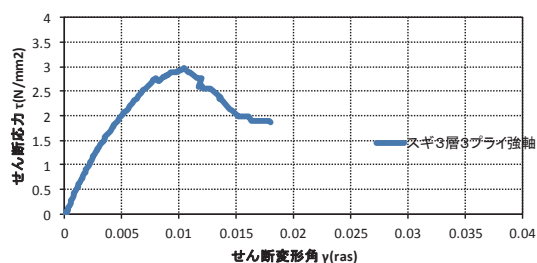


図 3.4.2-3 計測装置概要

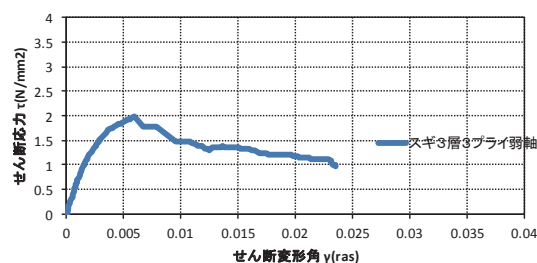
3.4.3 結果および考察

図 3.4.3-1 にせん断応力度変形角関係を示す。表 3.4.3-1 に試験で得られたせん断強度、せん断弾性係数を示す。また表 3.4.3-2 および図 3.4.3-3 にせん断強度の試験結果と計算値（告示式）の比較を示す。

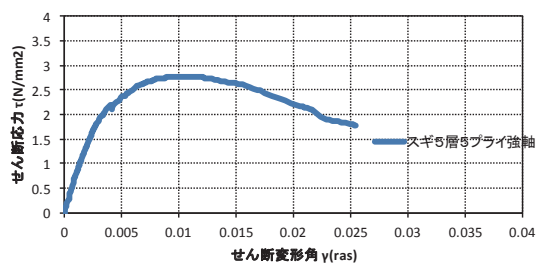
すべての試験体において実験値は計算値を上回っていた、つまり、計算値は実験値を安全側に評価していた。試験体の厚さに占める接着層の数が増えるほど、せん断強度が増加する傾向がみられた。7層7プライ弱軸、9層9プライ強軸・弱軸では、試験体の入り隅部で破壊が生じ荷重が低下したため、計測部では荷重が低下した後、変形角が減少した。



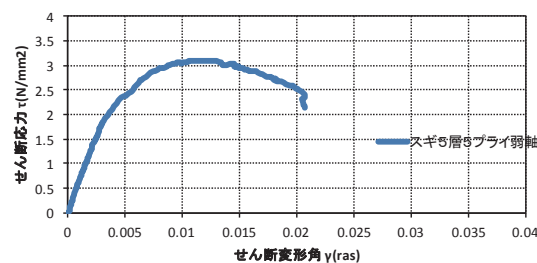
(a) 3層3プライ強軸



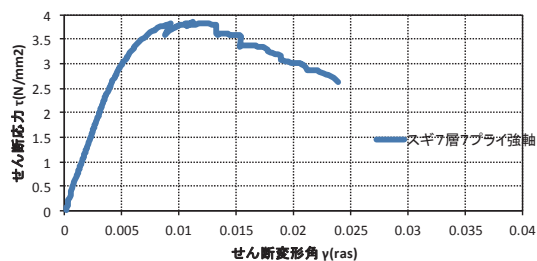
(b) 3層3プライ弱軸



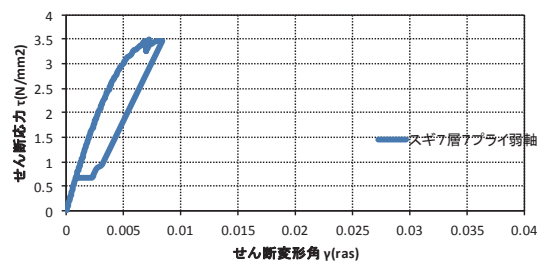
(c) 5層5プライ強軸



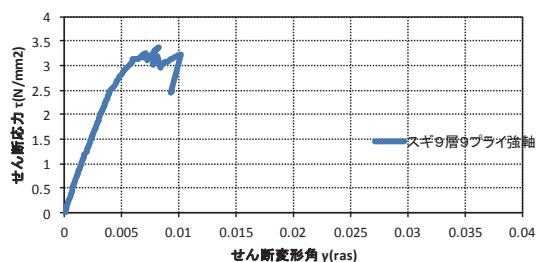
(d) 5層5プライ弱軸



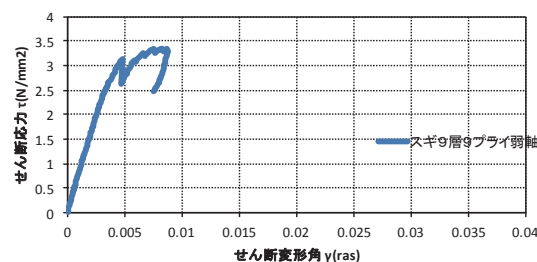
(e) 7層7プライ強軸



(f) 7層7プライ弱軸



(g) 9層9プライ強軸



(h) 9層9プライ弱軸

図 3.4.3-1 せん断応力度変形角関係

表 3.4.3-1 試験結果一覧

試験体名	樹種	層構成	最外層の繊維方向	t	l	τ_{\max}	τ_{limit}	G	破壊モード
3層3プライ強軸	スギ	3層3プライ	鉛直（強軸）	45	175	2.98	1.20	645	I
3層3プライ弱軸	スギ	3層3プライ	水平（弱軸）	45	175	1.97	1.12	681	II
5層5プライ強軸	スギ	5層5プライ	鉛直（強軸）	30	105	2.77	1.78	721	III
5層5プライ弱軸	スギ	5層5プライ	水平（弱軸）	30	105	3.10	2.00	626	III
7層7プライ強軸	スギ	7層7プライ	鉛直（強軸）	20	105	3.84	2.85	665	I
7層7プライ弱軸	スギ	7層7プライ	水平（弱軸）	20	105	3.50	2.29	757	隅
9層9プライ強軸	スギ	9層9プライ	鉛直（強軸）	20	105	3.36	2.48	653	隅
9層9プライ弱軸	スギ	9層9プライ	水平（弱軸）	20	105	3.35	2.64	807	隅

t : ラミナ厚さ (単位 mm)

l : ラミナ幅 (単位 mm)

τ_{\max} : 強度試験で得られた最大せん断応力度(単位 N/mm²)

τ_{limit} : 強度試験で得られた比例限度せん断応力度 (単位 N/mm²)

G : 強度試験で得られたせん断弾性係数 (単位 N/mm²)

破壊モード (実験) : 強度試験で見られた破壊モード

I : 鉛直方向のラミナのせん断破壊

II : 水平方向のラミナのせん断破壊

III : 接着面近傍のねじり破壊

隅 : 入り隅部の鉛直方向の引張破壊

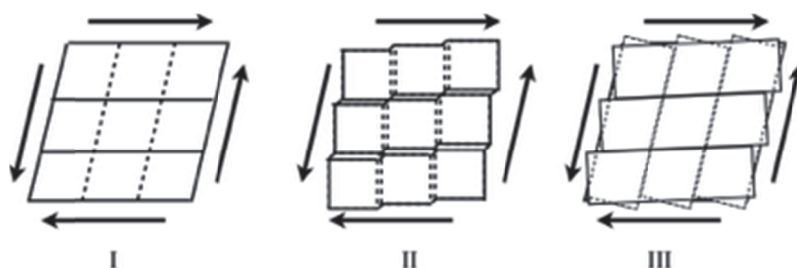


図 3.4.3-2 破壊モード

表 3.4.3-2 計算値（告示式）と実験値の比較

試験体名	f_{vlam}	f_{tor}	f_R	m	n_{ca}	b	τ_{\max}	$c\tau_{\max}$	破壊モード (実験)	破壊モード (計算)	$c\tau_{\max}/\tau_{\max}$
3層3プライ強軸	2.7	3	0.9	5	2	175	2.98	1.92	I, III	III	0.64
3層3プライ弱軸	2.7	3	0.9	5	2	175	1.97	1.92	II	III	0.97
5層5プライ強軸	2.7	3	0.9	8	4	105	2.77	2.45	III	III	0.88
5層5プライ弱軸	2.7	3	0.9	8	4	105	3.10	2.45	III	III	0.79
7層7プライ強軸	2.7	3	0.9	8	6	105	3.84	2.70	I	I	0.70
7層7プライ弱軸	2.7	3	0.9	8	6	105	3.50	2.70	隅	I	0.77
9層9プライ強軸	2.7	3	0.9	8	8	105	3.36	2.70	隅	I	0.80
9層9プライ弱軸	2.7	3	0.9	8	8	105	3.35	2.70	隅	I	0.81

f_{vlam} : ラミナのせん断強度 (単位 N/mm^2)
 f_{tor} : 接着層近傍のねじり強度 (単位 N/mm^2)
 f_{R} : ラミナのせん断強度 (単位 N/mm^2)
 m : 幅方向のラミナの枚数 (単位 枚)
 n_{ca} : 接着層数 (単位 枚)
 b : ラミナ幅 (単位 mm)
 τ_{max} : 強度試験で得られた最大せん断応力度 (単位 N/mm^2)
 ${}^c\tau_{\text{max}}$: 計算で得られた最大せん断応力度 (単位 N/mm^2)
 破壊モード (実験) : 強度試験で見られた破壊モード
 破壊モード (計算) : 計算で予測された破壊モード
 I : 鉛直方向のラミナのせん断破壊
 II : 水平方向のラミナのせん断破壊
 III : 接着面近傍のねじり破壊
 隅 : 入り隅部の鉛直方向の引張破壊

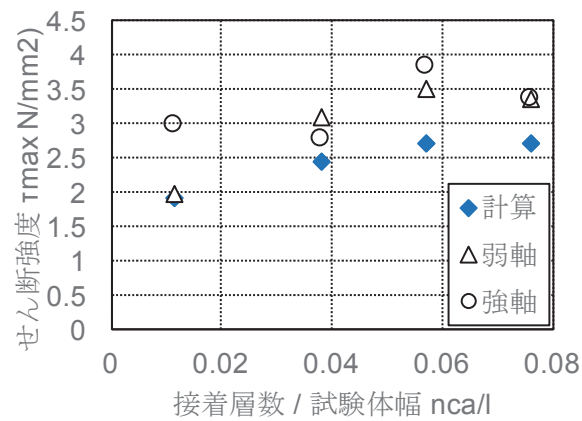


図 3.4.3-3 実験値と計算値の比較

3.5 面内曲げ

3.5.1 試験体の概要

3.5 節において試験に用いた CLT パネルの仕様を表 3.5.1-1 に示す。これらのパネルから面内曲げ試験体を所定量切り出した。

パネルの製造に用いたラミナは、ラミナ厚①21.4mm 用、②30mm 用の 2 種類であった。それぞれ必要量を予め計算し、製材・乾燥された原料ひき板を連続しグレーディングマシンを用いて測定した曲げヤング係数を用いて外層用ひき板と内層用ひき板に区分した。いずれのラミナも 2m 前後の長さに裁断した後、フィンガージョイントにより所定の長さにたて継ぎして用いた。フィンガー長さは 15mm、水平型、接着剤には水性高分子イソシアネート系樹脂を用いた。

これらのラミナを水性高分子イソシアネート系樹脂を用いて積層接着して CLT パネルを製造した。これらのパネルからの試験体採材パターンについては付録に資料として示す。

表 3.5.1-1 試験体採取用 CLT パネルの概要

層構成	ラミナ厚 (mm)	ラミナ幅 (mm)	パネル厚 (mm)	パネル幅 (mm)	パネル長 (mm)	パネル 番号	パネル 枚数
5層5プライ	30	105	150	2940	12030	30-8	2
7層7プライ	21.4	105	150	2940	12030	21-2	2

等級区分時の曲げヤング係数のデータを 21.4mm 用ラミナについて表 3.5.1-2、30mm 用ラミナについて表 3.5.1-3 に示す。

表 3.5.1-2 21.4mm 用ラミナの等級区分結果

等級区分値		内層用	外層用
	下限値	－	9.55
	上限値	9.55	－
統計値	全体	内層用	外層用
平均	8.75	7.99	10.46
最小	4.36	4.36	9.56
最大	14.23	9.55	14.23
標準偏差	1.49	1.03	0.75
変動係数	17.0%	12.9%	7.2%
データの個数	1413	976	437

表 3.5.1-3 30mm 用ラミナの等級区分結果

等級区分値		内層用	外層用
	下限値	－	7.76
	上限値	7.76	－
統計値	全体	内層用	外層用
平均	7.57	6.70	8.79
最小	3.62	3.62	7.77
最大	11.62	7.76	11.62
標準偏差	1.28	0.77	0.76
変動係数	16.9%	11.5%	8.6%
データの個数	1040	606	434

3.5.2 試験方法

a. 梁せい 600mm

面外曲げ試験は、図 3.5.2a-1 および写真 3.5.2a-1 に示すように、長さ 12m の試験体を支点間 10,800mm に設置し、3 等分点（荷重点間 3600mm）に载荷する方法で行った。試験では支間中央および支点の鉛直変位を測定した。また、図 3.5.2a-2 および写真 3.5.2a-2 に示すように、荷重点間の試験体側面にヨークを、载荷点下縁と支間中央の上下縁および側面のひずみをそれぞれ測定した。

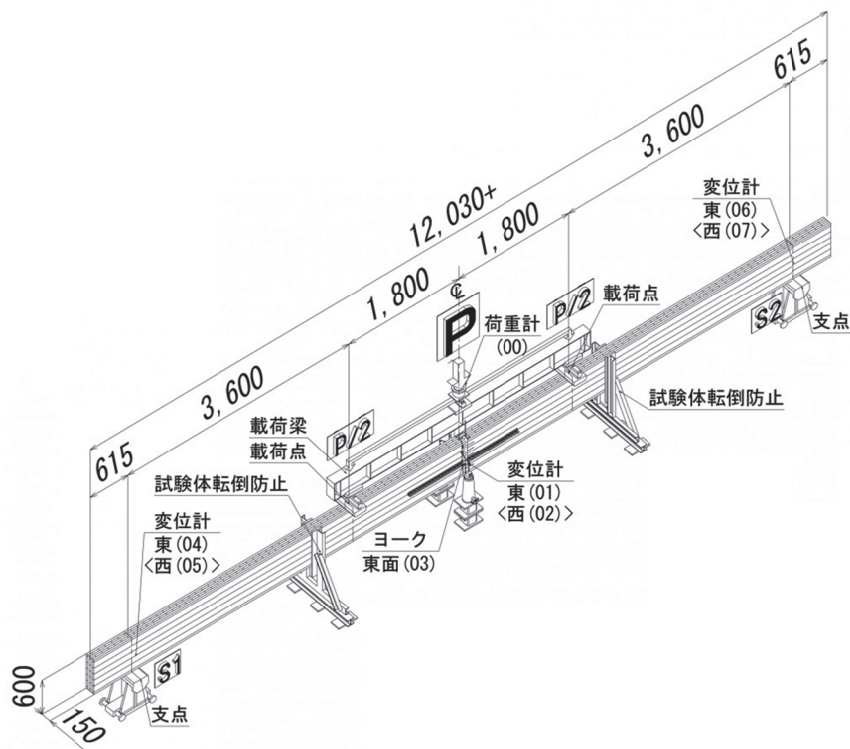


図 3.5.2a-1 面内曲げ試験方法

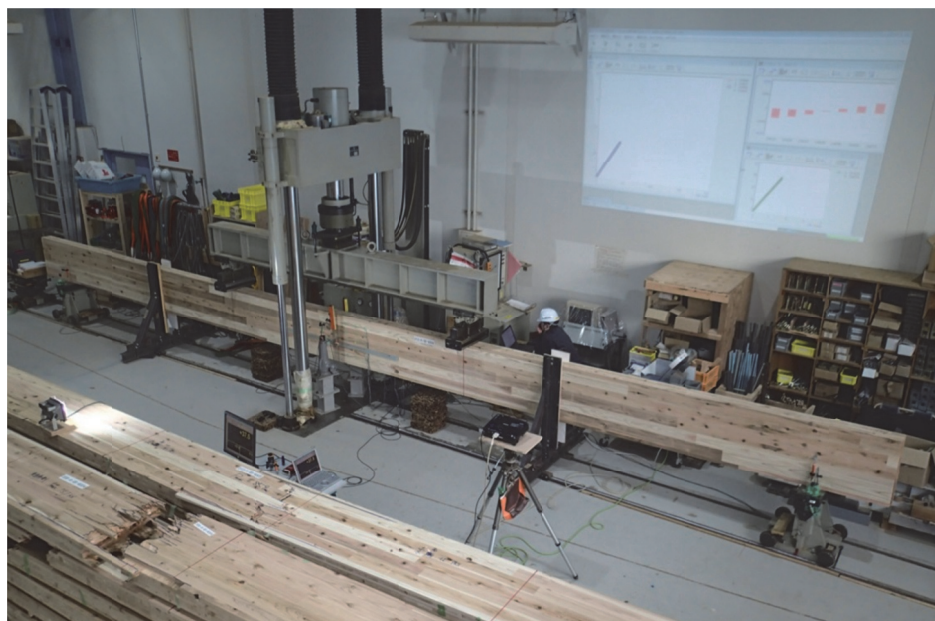


写真 3.5.2a-1 面内曲げ試験状況

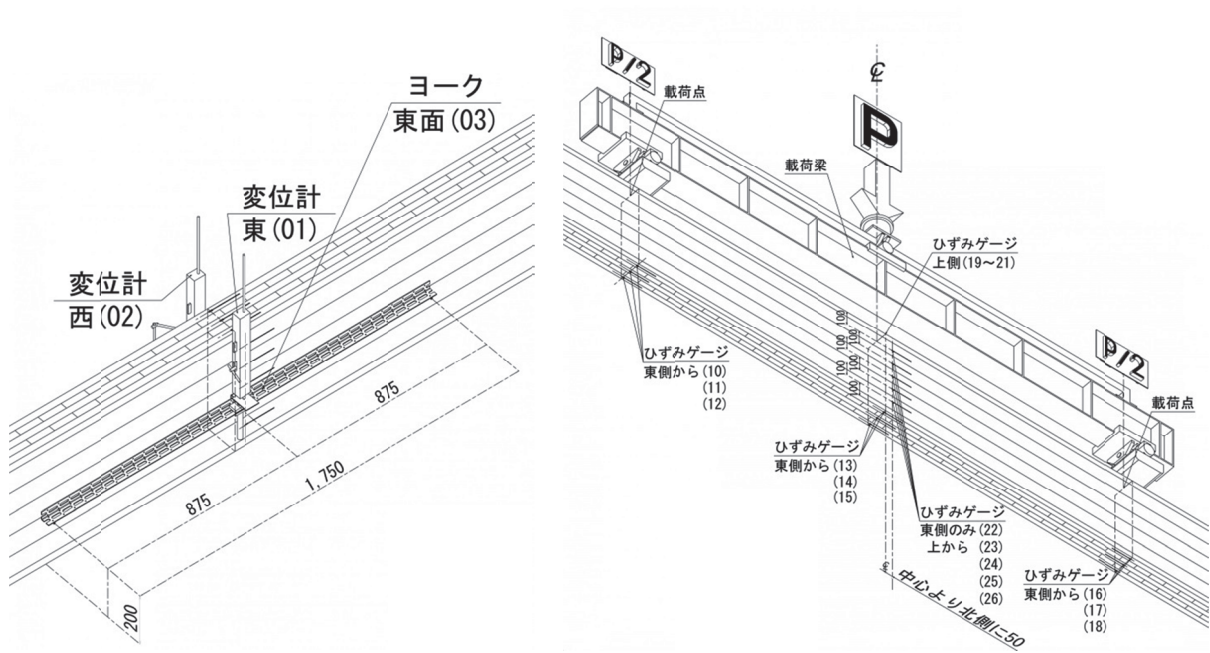


図 3.5.2a-2 ヨークおよびひずみゲージ位置図



写真 3.5.2a-2 ヨークおよびひずみゲージの取り付け状況

b. 梁せい 300mm、150mm

面内曲げ試験体の寸法、重量を測定し、縦振動法及びたわみ振動法 (T.G.H 法) により、試験体の縦弾性係数、面外方向、面内方向の曲げヤング係数、せん断弾性係数を求めた。

面内曲げ試験は、スパンを梁せいの 18 倍とした 3 等分点 4 点荷重式で実施した (図 3.5.2b-1)。すなわち、梁せい 300mm の試験体では、支点間の距離を 5400mm、荷重点間距離を 1800mm とし、梁せい 150mm では、支点間距離を 2700mm、荷重点間距離を 900mm とした。試験体破壊後、試験体の破壊部の近くから長さ約 30mm の材を採取し、全乾法により含水率を測定した。

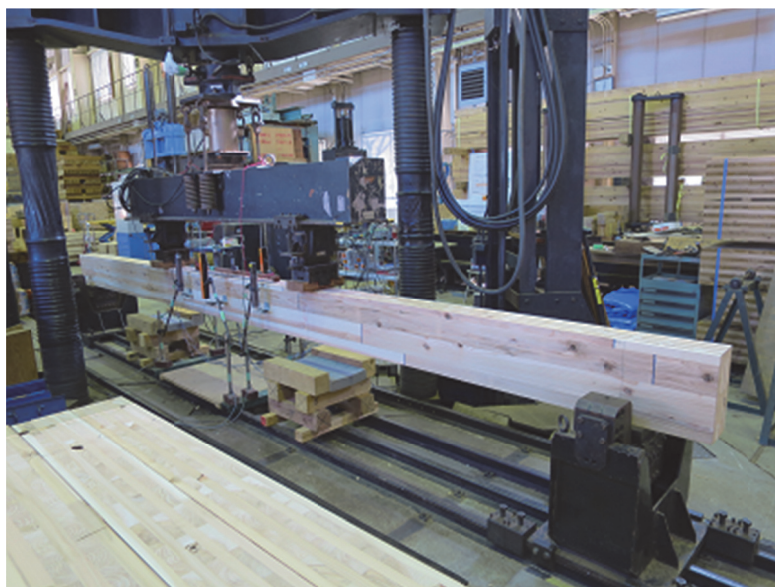


図 3.5.2b-1 面内曲げ試験

3.5.3 試験結果

a. 梁せい 600mm

表 3.5.3a-1 に 5 層 5 プライの面内曲げ試験結果を、表 3.5.3a-2 に 7 層 7 プライの面内曲げ試験結果をそれぞれ示す。また、各試験体の荷重-変位曲線を図 3.5.3a-1 に示す。なお、中央変位は支点の鉛直変位を差し引いて補正を行っている。

表 3.5.3a-1 5 層 5 プライの面内曲げ試験結果

番号	密度 (kg/m ³)	E _{fr} (GPa)	E _{TGHf} (GPa)	G _{TGHf} (GPa)	E _{TGHe} (GPa)	G _{TGHe} (GPa)	E (GPa)	E _b (GPa)	σ (MPa)	含水率 (%)
308-A-IB-6001	393	5.34	7.80	0.238	5.45	0.700	4.79	4.72	15.1	10.0
308-A-IB-6002	391	5.30	7.73	0.252	5.77	0.688	4.66	4.59	14.4	10.0
308-A-IB-6003	381	5.39	7.97	0.239	5.69	0.678	4.86	4.98	14.4	9.5
308-A-IB-6004	393	5.34	7.47	0.221	5.56	0.673	4.66	4.63	15.0	10.0
308-A-IB-6005	396	5.51	7.82	0.224	5.79	0.701	5.04	5.08	16.1	11.0
308-A-IB-6006	394	5.44	7.60	0.229	5.68	0.667	4.93	4.57	16.8	10.0
平均値	392	5.39	7.73	0.234	5.66	0.684	4.82	4.76	15.3	10.3
最小値	381	5.30	7.47	0.221	5.45	0.667	4.66	4.57	14.4	10.2
最大値	396	5.51	7.97	0.252	5.79	0.701	5.04	5.08	16.8	10.5
標準偏差	5.3	0.077	0.17	0.011	0.13	0.014	0.15	0.22	0.9	0.14
変動係数(%)	1.35	1.43	2.26	4.85	2.30	2.09	3.17	4.55	6.15	1.36

表 3.5.3a-2 7 層 7 プライの面内曲げ試験結果

番号	密度 (kg/m ³)	E _{fr} (GPa)	E _{TGHf} (GPa)	G _{TGHf} (GPa)	E _{TGHe} (GPa)	G _{TGHe} (GPa)	E (GPa)	E _b (GPa)	σ (MPa)	含水率 (%)
212-A-IB-6001	379	5.52	7.78	0.216	5.90	0.644	4.94	5.05	15.0	10.2
212-A-IB-6002	376	5.44	7.92	0.222	5.97	0.643	4.91	5.04	14.4	10.2
212-A-IB-6003	381	5.52	7.89	0.218	5.91	0.666	5.06	5.18	14.1	10.2
212-A-IB-6004	381	5.43	7.48	0.181	5.82	0.625	4.73	4.72	15.0	10.0
212-A-IB-6005	383	5.46	7.56	0.184	5.85	0.649	5.02	5.09	17.2	10.3
212-A-IB-6006	382	5.49	7.73	0.179	5.99	0.636	4.98	5.25	14.2	10.0
平均値	381	5.48	7.73	0.200	5.91	0.644	4.94	5.05	15.0	10.1
最小値	376	5.43	7.48	0.179	5.82	0.625	4.73	4.72	14.1	10.0
最大値	383	5.52	7.92	0.222	5.99	0.666	5.06	5.25	17.2	10.3
標準偏差	2.7	0.039	0.17	0.021	0.06	0.014	0.12	0.18	1.2	0.13
変動係数(%)	0.72	0.72	2.26	10.3	1.07	2.13	2.38	3.60	7.74	1.24

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)

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

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

E : 強度試験で得られた弾性係数 (単位 kN/mm²)

E_b : 強度試験 (純曲げ区間の区間たわみ) から得られた弾性係数 (単位 kN/mm²)

σ : 強度試験で得られた強さ (単位 N/mm²)

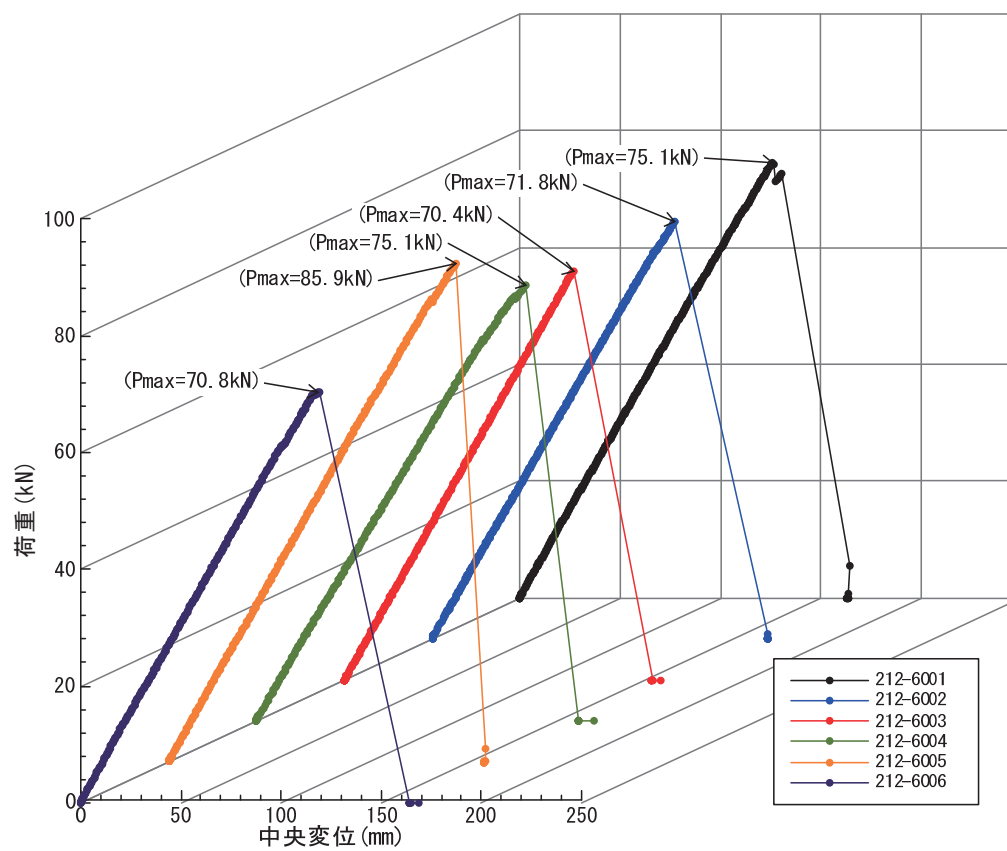
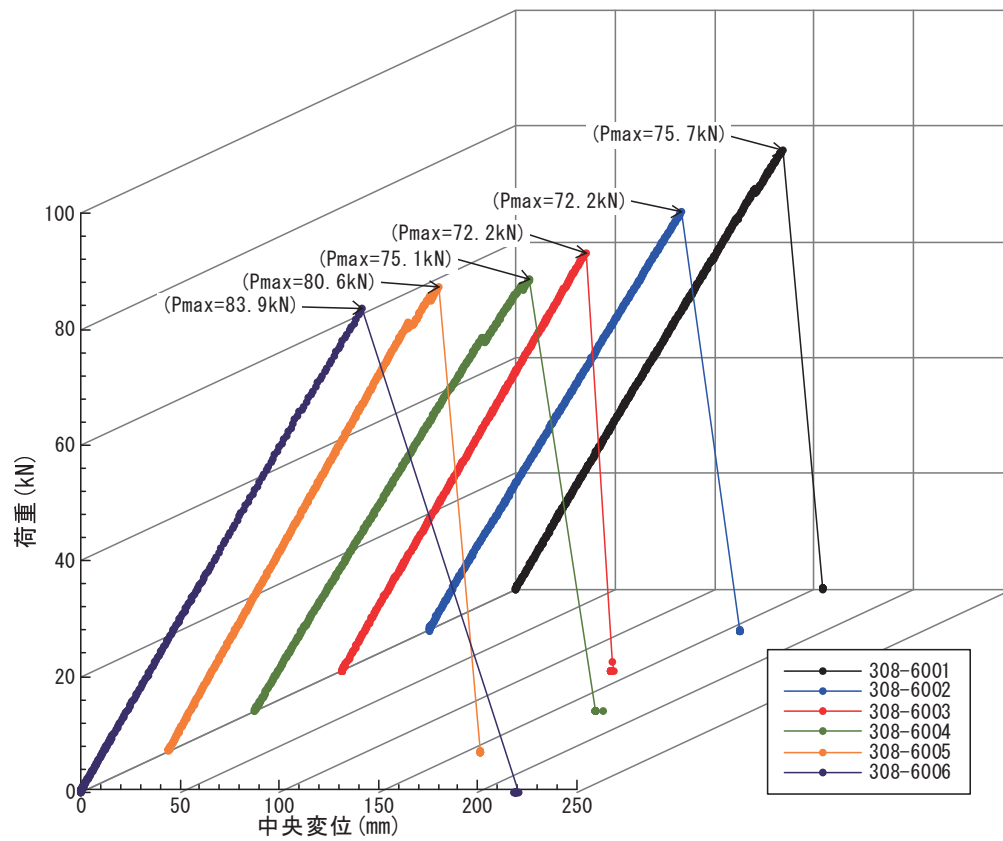


図 3.5.3a-1 荷重-変位曲線 (上 : 5 層 5 プライ、下 : 7 層 7 プライ)

図 3.5.3a-2 に一例として、5 層 5 プライおよび 7 層 プライの試験体の中央断面のひずみ分布を示す。ひずみは、上縁から、側面、下縁にわたって、連続的に直線分布していることが分かる。全ての試験体で同様の傾向が確認できたことから、面内曲げにおいても CLT は平面保持の仮定に従うものと推察される。

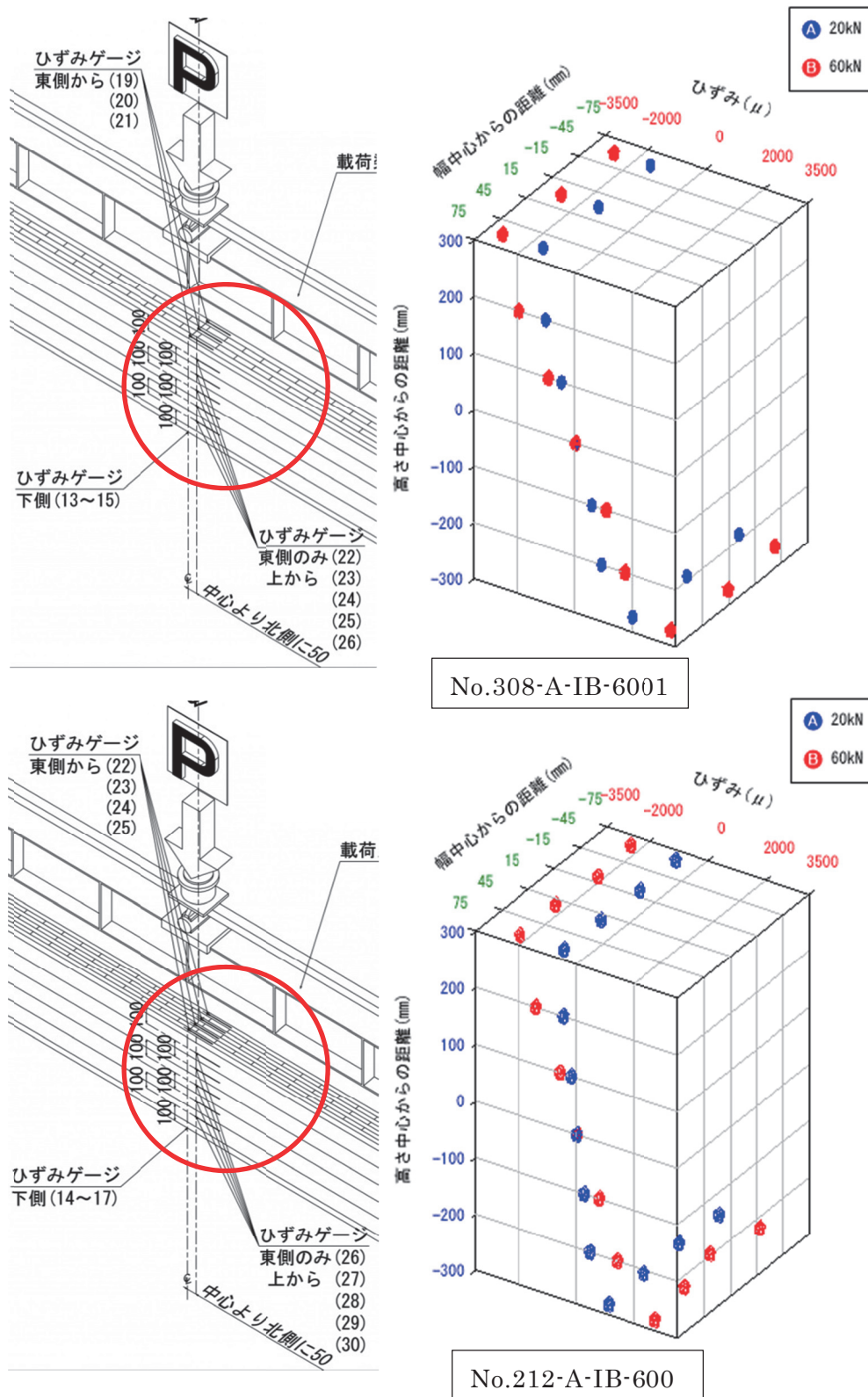


図 3.5.3a-2 中央断面のひずみ分布（上：5 層 5 プライ、下：7 層 7 プライ）

写真 3.5.3a-1 に 5 層 5 プライの曲げ破壊状況を、写真 3.5.3a-2 に 7 層 7 プライの曲げ破壊状況をそれぞれ示す。また、写真 3.5.3a-3 に破壊した試験体の全景を示す。



308-A-IB-6001



308-A-IB-6002



308-A-IB-6003



308-A-IB-6004



308-A-IB-6005



308-A-IB-6006

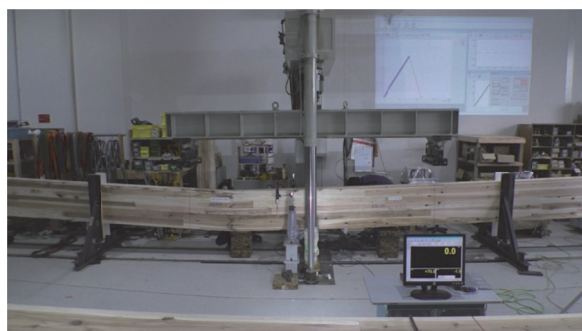
写真 3.5.3a-1 破壊状況 (5 層 5 プライ)



212-A-IB-6001



212-A-IB-6002



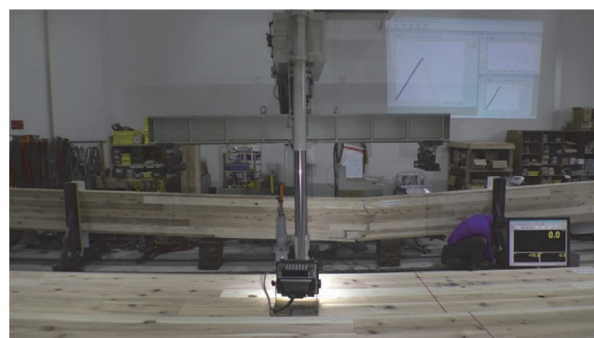
212-A-IB-6003



212-A-IB-6004



212-A-IB-6005



212-A-IB-6006

写真 3.5.3a-2 破壊状況 (7層7プライ)

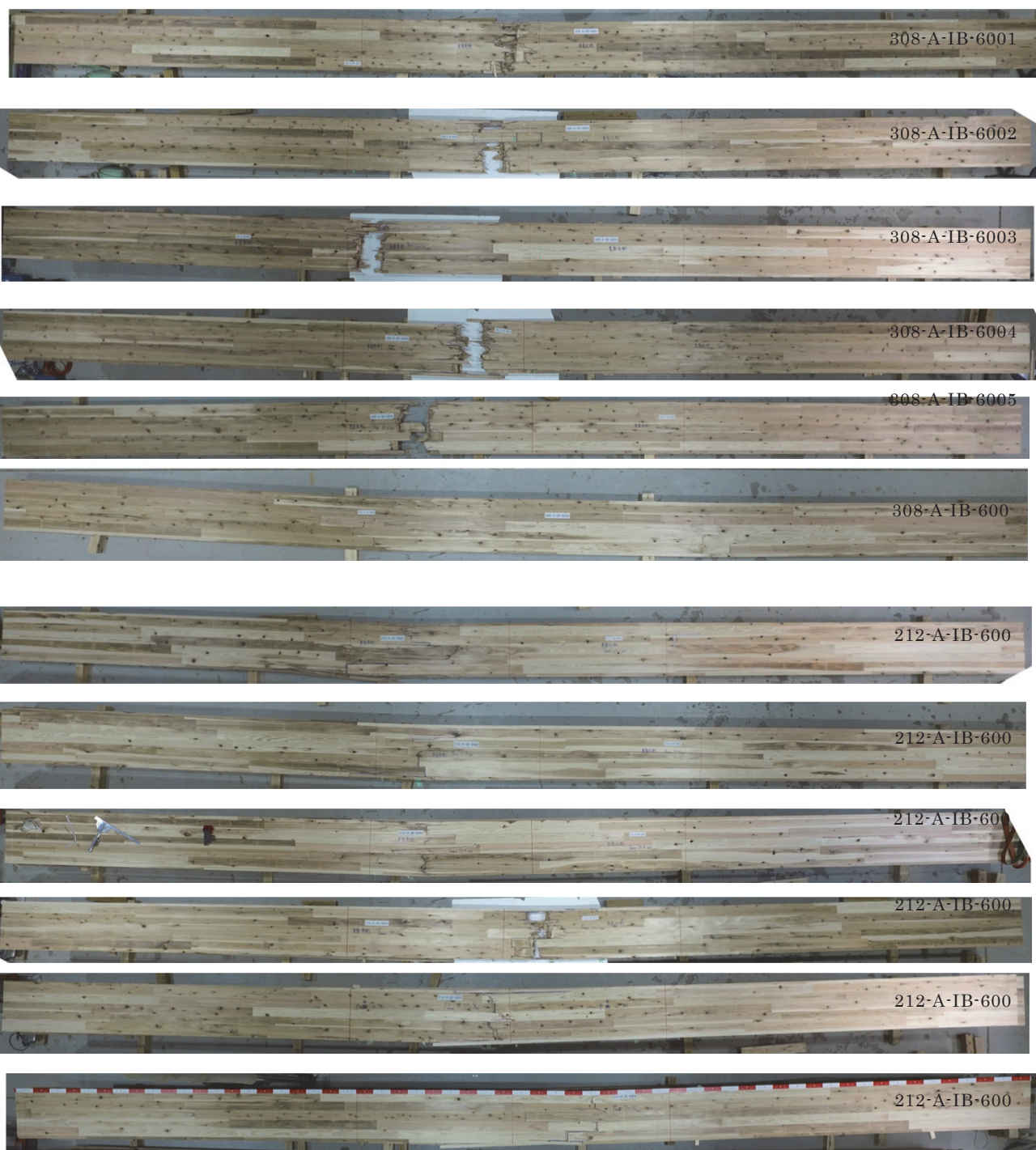


写真 3.5.3a-3 試験体全景（上：5層5プライ、下：7層7プライ）

b. 梁せい 300mm、150mm

面内曲げ試験結果を図 3.5.3b-1、表 3.5.3b-1～表 3.5.3b-4 に示す。破壊形態は、梁せい 300mm の Mx60-5-5 については 6 体中 3 体が引張り側ラミナの FJ 部で、残りの 3 体は引張り側の節で破壊した。梁せい 300mm の Mx60-7-7 については 6 体すべてが FJ 部で破壊した。梁せい 150mm の Mx60-5-5 については 12 中 6 体が引張り側ラミナの FJ 部で、5 体が引張り側の節で、残りの 1 体が FJ 及び節のない健全部で破壊した。梁せい 150mm の Mx60-7-7 については 12 体すべてが FJ 部で破壊した。



図 3.5.3b-1 面内曲げ試験体の破壊の例（引張り側ラミナの FJ 部で破壊）

表 3.5.3b-1 Mx60-5-5 強軸、梁せい 300mm、ラミナ厚さ 30mm、厚さ 150mm

番号	密度 (kg/m ³)	Efr	ETGHf	GTGHf	ETGHe	GTGHe	E	Etrue	σ	含水率 (%)
308-3001	379	5.21	8.74	0.18	5.71	0.58	4.74	5.08	14.6	9.13
308-3002	382	5.25	9.07	0.17	5.76	0.58	4.89	4.99	15.8	9.20
308-3003	373	5.40	9.00	0.18	5.62	0.55	4.85	5.14	18.5	8.94
308-3004	381	5.24	8.95	0.18	5.40	0.57	4.58	5.01	15.5	9.57
308-3005	387	5.32	9.31	0.17	5.72	0.63	4.96	5.49	17.7	8.47
308-3006	381	5.41	9.30	0.17	5.78	0.57	4.82	5.13	18.1	9.28
平均値	380	5.30	9.06	0.17	5.66	0.58	4.81	5.14	16.7	9.10
最小値	373	5.21	8.74	0.17	5.40	0.55	4.58	4.99	14.6	8.47
最大値	387	5.41	9.31	0.18	5.78	0.63	4.96	5.49	18.5	9.57
標準偏差	4.6	0.09	0.22	0.01	0.14	0.03	0.13	0.18	1.6	0.37
変動係数	1.2%	1.6%	2.4%	3.1%	2.4%	4.9%	2.7%	3.5%	9.5%	4.0%

表 3.5.3b-2 Mx60-7-7 強軸、梁せい 300mm、ラミナ厚さ 21.4mm、厚さ 150mm

番号	密度 (kg/m ³)	Efr	ETGHf	GTGHf	ETGHe	GTGHe	E	Etrue	σ	含水率 (%)
212-3001	375	5.47	9.04	0.16	6.00	0.55	4.87	4.97	14.5	9.97
212-3002	376	5.47	8.92	0.17	5.92	0.55	4.93	5.14	18.6	9.47
212-3003	371	5.44	8.97	0.16	5.72	0.53	4.82	5.18	16.5	8.98
212-3004	383	5.55	9.77	0.13	5.93	0.56	5.00	5.38	18.0	8.76
212-3005	372	5.74	9.47	0.14	5.96	0.53	5.13	5.44	17.0	8.77
212-3006	376	5.58	9.63	0.13	6.02	0.55	5.29	5.92	17.8	8.88
平均値	376	5.54	9.30	0.15	5.93	0.54	5.01	5.34	17.1	9.14
最小値	371	5.44	8.92	0.13	5.72	0.53	4.82	4.97	14.5	8.76
最大値	383	5.74	9.77	0.17	6.02	0.56	5.29	5.92	18.6	9.97
標準偏差	4.1	0.11	0.37	0.02	0.11	0.01	0.18	0.33	1.5	0.48
変動係数	1.1%	2.0%	3.9%	11.8%	1.8%	2.4%	3.5%	6.2%	8.5%	5.3%

Efr：縦振動法による縦弾性係数（単位 kN/mm²）ETGHf：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）GTGHf：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）ETGHe：たわみ振動法による面内方向の曲げヤング係数（単位 kN/mm²）GTGHe：たわみ振動法による面内方向のせん断弾性係数（単位 kN/mm²）E：強度試験で得られた見かけの曲げヤング係数（単位 kN/mm²）Etrue：強度試験で得られた真の曲げヤング係数（単位 kN/mm²） σ ：強度試験で得られた強さ（単位 N/mm²）

表 3.5.3b-3 Mx60-5-5 強軸、梁せい 150mm、ラミナ厚さ 30mm、厚さ 150mm

番号	密度 (kg/m ³)	Efr	ETGHf	GTGHf	ETGHe	GTGHe	E	Etrue	σ	含水率 (%)
308-1501	384	5.11	7.32	0.25	4.95	0.59	4.44	4.54	20.4	9.48
308-1502	386	5.00	7.06	0.21	4.79	0.61	4.39	4.47	15.1	9.25
308-1503	391	5.62	7.60	0.25	5.41	0.64	5.05	5.02	22.7	9.29
308-1504	393	6.02	8.98	0.20	5.88	0.57	5.50	5.88	20.3	9.15
308-1505	374	5.50	7.96	0.25	5.35	0.54	4.88	4.88	19.3	8.97
308-1506	383	5.62	8.01	0.21	5.58	0.53	5.04	5.33	21.0	9.61
308-1507	389	5.19	7.21	0.22	5.03	0.63	4.60	4.52	14.6	9.19
308-1508	381	5.19	7.45	0.23	4.98	0.58	4.63	4.98	20.4	9.10
308-1509	382	5.70	7.81	0.22	5.58	0.56	5.04	5.48	19.8	8.77
308-1510	373	5.10	6.84	0.23	4.77	0.55	4.36	4.39	15.4	9.33
308-1511	380	5.21	7.25	0.21	5.21	0.58	4.73	4.88	18.0	8.86
308-1512	385	5.27	7.40	0.22	5.22	0.59	4.76	5.29	23.2	9.68
平均値	383	5.38	7.57	0.23	5.23	0.58	4.79	4.97	19.2	9.22
最小値	373	5.00	6.84	0.20	4.77	0.53	4.36	4.39	14.6	8.77
最大値	393	6.02	8.98	0.25	5.88	0.64	5.50	5.88	23.2	9.68
標準偏差	6.1	0.31	0.57	0.016	0.34	0.033	0.33	0.46	2.9	0.28
変動係数	1.6%	5.7%	7.5%	7.3%	6.6%	5.7%	7.0%	9.3%	15.0%	3.1%

Efr：縦振動法による縦弾性係数（単位 kN/mm²）

ETGHf：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）

GTGHf：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）

ETGHe：たわみ振動法による面内方向の曲げヤング係数（単位 kN/mm²）

GTGHe：たわみ振動法による面内方向のせん断弾性係数（単位 kN/mm²）

Etrue：強度試験で得られた真の曲げヤング係数（単位 kN/mm²）

σ ：強度試験で得られた強さ（単位 N/mm²）

表 3.5.3b-4 Mx60-7-7 強軸、梁せい 150mm、ラミナ厚さ 21.4mm、厚さ 150mm

番号	密度 (kg/m ³)	E _{fr}	E _{TGHf}	G _{TGHf}	E _{TGHe}	G _{TGHe}	E	E _{true}	σ	含水率 (%)
212-1501	378	5.62	7.70	0.21	5.26	0.57	4.78	4.87	19.9	9.45
212-1502	380	5.57	7.61	0.19	5.47	0.56	5.21	5.43	19.8	9.53
212-1503	379	5.60	7.46	0.21	5.49	0.57	5.06	5.37	17.5	9.48
212-1504	377	5.45	7.74	0.20	5.44	0.59	4.99	4.89	18.0	9.46
212-1505	376	5.58	7.62	0.20	5.63	0.57	5.13	5.36	20.0	9.21
212-1506	386	6.01	8.21	0.16	5.69	0.56	5.28	5.45	20.4	9.11
212-1507	383	5.27	7.36	0.19	5.24	0.57	4.71	4.78	14.1	9.09
212-1508	376	5.35	7.20	0.16	5.22	0.55	4.76	4.70	19.5	9.11
212-1509	362	5.37	7.75	0.18	5.34	0.53	4.86	4.89	22.2	9.04
212-1510	371	5.17	6.74	0.17	5.15	0.57	4.73	4.88	15.0	9.19
212-1511	372	5.43	7.36	0.19	5.36	0.55	5.02	5.30	19.8	8.79
212-1512	375	5.56	7.85	0.20	5.34	0.55	4.94	5.03	20.3	9.60
平均値	376	5.50	7.55	0.19	5.39	0.56	4.96	5.08	18.9	9.25
最小値	362	5.17	6.74	0.16	5.15	0.53	4.71	4.70	14.1	8.79
最大値	386	6.01	8.21	0.21	5.69	0.59	5.28	5.45	22.2	9.60
標準偏差	6.0	0.22	0.37	0.018	0.16	0.016	0.19	0.28	2.3	0.25
変動係数	1.6%	3.9%	4.9%	9.3%	3.1%	2.8%	3.9%	5.5%	12.3%	2.7%

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)

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

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

E_{true} : 強度試験で得られた真の曲げヤング係数 (単位 kN/mm²)

σ : 強度試験で得られた強さ (単位 N/mm²)

4. まとめ

「直交集成板の日本農林規格」（以下 JAS 規格と記す）の適用範囲でありながら、平成 28 年度早期に制定された建築関係基準（以下基準と記す）では適用の範囲外として扱われている製品仕様を中心に試験を行って強度データを収集した。得られた結果と課題を以下にまとめる。

（１）厚いラミナおよび小角材等を幅はぎ接着したラミナの使用が各種強度性能に及ぼす影響の解明

厚さが 35mm を超えるラミナ（小角材等を幅はぎ接着したラミナを含む）を用いた CLT パネルを製造し、JAS 規格に規定する面外曲げ性能と面外せん断性能について評価した。

その結果、面外曲げ強度については

- ・厚さが 35mm を超えるラミナ（小角材等を幅はぎ接着したラミナを含む）を用いた CLT の面外曲げ強度は、ラミナの曲げ強度から告示式を用いて精度良く推定できること
- ・ラミナ厚さが厚くなるとラミナの曲げ強度は低下する傾向にあるが、日本農林規格に規定するラミナの曲げ強度基準値を満足できる水準であること

また、面外せん断強度については

- ・同じ層構成であっても、ラミナ厚さが厚くなると面外せん断強度は低下すること（図 4-1）が明らかになった。

製造に用いるラミナの強度を管理する現行の日本農林規格の制度内であれば、厚いラミナを用いて CLT を製造することに面外曲げ強度についての問題はないと考えられる。一方、面外せん断強度については、その強度試験法、強度推定法について整理する必要がある。

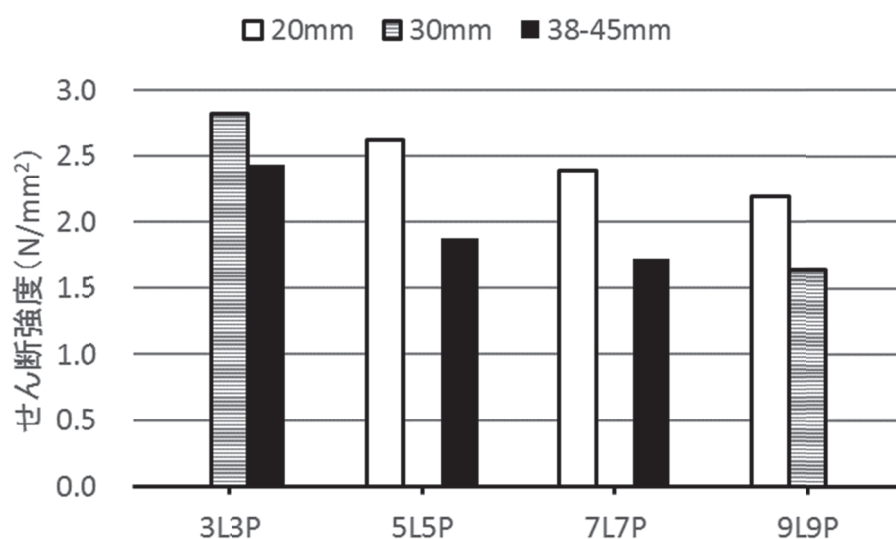


図 4-1 層構成、ラミナ厚さと面外せん断強度

（２）樹種の影響を解明するための基礎的物性値のデータ収集

この課題では CLT の強度性能のうち樹種の影響を受けると考えられる面外せん断、面内せん断性能の評価に取り組んだ。

まず、面外せん断性能を評価するために CLT における直交層挙動の解析を行うとともに、その挙動を説明する物性値を実験的に求めるための試験法が提案された。この手法は簡易的に行えることから、多くの樹種についてこの手法でデータ収集することで、より効率的

に樹種の影響を評価できると考えられる。

一方、面内せん断に関しては、従来のエ型試験方法とは異なる、非対称曲げ方式、圧縮せん断方式について検討した。従来型の評価法との比較を今後進める必要があるが、従来型より簡便であることから試験体数を確保したより信頼性が高く合理的な設計につながると考えられる。

（３）層構成の影響の解明

長期性能評価については、7層7プライの継続的なデータ収集を図った結果、現時点では5層5プライ同等と考えられるデータが得られていることが確認された。

圧縮における短柱・中間柱・長柱の範囲に層構成が与える影響を確認した結果、層構成に関わらず座屈強度が告示式で安全に評価できることが明らかとなった。今後は、より精度の高い計算手法について検討し、合理的な設計のためのデータ収集が必要と考えられた。

引張り性能については、層構成に関わらず全体的に告示の計算式が危険側になることが確認された。今後、積層接着の影響、直交層の影響、CLTに用いたラミナとラミナ試験で用いたラミナの比較を検討する必要性がある。

面内せん断性能については、これまで検討されてこなかった層構成とともにラミナ厚さの影響についても実験的に明らかにされ、告示式の適用範囲であることが確認された。今後はより合理的な計算手法等の評価技術について検討する必要がある。

面内曲げ性能については、強度を実験で評価する際に試験体の梁せいが与える影響について実験的な検討を行い、層構成に関わらずその影響があることが確認された。今後、このデータを構造計算でどのように活かすか検討する必要がある。

（４）全体を通して

これまでの強度データ収集は、CLT製造に用いるラミナを30mm前後と限定して行ってきた。また、これらのデータを前提としてCLT建築に関する基準法関連告示も規定されてきた。今回、この適用範囲の拡大を目指してラミナ厚さや積層数等について従来試験を行ってこなかった範囲のCLTについて試験研究の対象とした結果、告示式では安全側に評価されるもののより合理的な設計を可能とする手法が必要なものの、また、適用範囲を拡大すると告示式では危険側となる可能性があるものなどが明らかになってきた。今後、建設コストを含めてより合理的な設計手法が求められることになると考えられることから、引き続きデータ収集を行う必要がある。

付 録

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・普及委託事業
(CLT 強度データ収集)」

第 1 回推進委員会 議事録

日 時： 平成 28 年 10 月 3 日（月）18:00～20:00

場 所： 林友ビル 6 階中会議室

- 議 事： 1) 挨拶
- 2) 委員紹介 資料 1
- 3) 本年度事業について
- 試験計画の概要 資料 2
- 進行計画 資料 3
- 計画補足データ紹介 資料 4
- 4) その他
- データ収集等のスケジュール 資料 5

- 資 料：資料 1 委員名簿
- 資料 2 仕様書、提案書
- 資料 3 試験体仕様の概要
- 資料 4 幅はぎ接着ラミナの強度性能の特徴
- 資料 5 強度データの整備（これまでと今後）

出席者名簿（順不同、敬称略）

- 委 員： （委員長）安村 基 静岡大学農学部
- （委 員）岡部 実 一般財団法人ベターリビングつくば建築試験研究センター
- （委 員）尾方 伸次 公益財団法人日本合板検査会
- （委 員）後藤 隆洋 公益財団法人日本住宅・木材技術センター
- （委 員）横田 俊峰 独立行政法人農林水産消費安全技術センター
- （委 員）秋津 裕志 地方独立行政法人北海道総合研究機構 林産試験場
- （委 員）玉置 教司 愛媛県農林水産研究所林業研究センター

- オブザーバー： 米田 信年 国土交通省大臣官房官庁営繕部整備課
- 高木淳一郎 国土交通省住宅局建築指導課
- 野口 雄史 //
- 中熊 靖 農林水産省消食料産業局食品製造課食品規格室
- 大村 敏幸 //
- 井口 真輝 林野庁木材産業課木材製品技術室
- 藤澤 将志 //
- 原 章仁 //
- 坂 賢 //

課題担当者：	槌本 敬大	国立研究開発法人 建築研究所
	中島 史郎	国立大学法人 宇都宮大学
	中島 昌一	〃
	佐々木貴信	秋田県立大学 木材高度加工研究所
	園田 里見	富山県農林水産総合技術センター 木材研究所
	藤田 和彦	広島県立総合技術研究所林業技術センター
	中原 亨	鹿児島県工業技術センター
	村田 忠	一般社団法人日本 CLT 協会
	坂部 芳平	〃
	孕石 剛志	〃
	宮武 敦	国立研究開発法人 森林総合研究所
	新藤 健太	〃
	杉本 健一	〃
	野田 康信	〃
	宇京斉一郎	〃
	塔村真一郎	〃
	軽部 正彦	〃
事務局：	黒田 尚宏	公益社団法人日本木材加工技術協会
	海老原 徹	〃

1) 井口木材製品技術室長挨拶

2) 委員・オブザーバー紹介

3) 本年度事業について

資料 2 事業の概要

資料 3 事業実施内容と試験計画

資料 4 幅はぎ接着ラミナの強度性能の特徴

資料 5 強度データの整備（これまでと今後）

議 事

3) 本年度事業について

資料 2 は事業の概要で、3 月～4 月に CLT に関する建築基準法に基づく告示が公布・施行されたが、その中で JAS では作れるが、今回は対象にならないところがあるので、それらのデータを収集する。その事業内容は、ア、イ、ウである。

ア 厚いラミナ及び小角材等を幅はぎ接着したラミナの使用が各種強度性能に及ぼす影響の解明については、告示でラミナの厚さが 24～36mm に限定されたので、厚さが 35mm を超えるラミナを用いた CLT について、面外曲げ性能及び面外せん断性能試験を行う。

イ 基礎的物性値のデータ収集については、基礎的データをどうとるかを設定して、(ア) CLT における直交層挙動の解析、(イ) 接着面のねじりせん断強度と層内せん断強度の収集、(ウ) 試験評価法に関する検討 を行う。

ウ 層構成については、(ア) 長期性能評価、(イ) 圧縮における短柱・中間柱・長柱の範囲確認、

(ウ) 引張り、(エ) 面内せん断性能、(オ) 面内曲げを行う。長期性能では現在進行中の 7 層 7 プライのデータを収集する。(イ)～(ウ)では、今まで厚さを 30mm に限定して作ってきた関係で、試験ができなかった部分がある。そのあたりを試験する。

スケジュールは 3 月 10 日までとなっている。

資料 3 の①～④は、提案書の方で書いた中身である。①について、基準強度については 12～36mm では計算式が使えるが、37mm～50mm で計算式が使えるかを検証したい。

②小角材等を幅はぎ接着したラミナの使用については、例えば 50mm 厚さのラミナの場合、JAS 上 3.5 倍の 175mm 幅のラミナが必要となる。幅はぎ加工によって幅の広いラミナを確保する技術を検討する。

③樹種については、JAS では針葉樹 28 樹種が適用範囲となっているが、基準強度的にはスギ同等として扱われる。今後、スギ同等以上の強度を適切に評価するには、評価方法がはっきりしないせん断に関する基礎的な物性値データを収集する。

④層構成については、長期の方は、強軸 2 種類、弱軸 3 種類の層構成のみが適用範囲となっているので、現在進行中の試験を継続し、結果の評価等について検討し、適用範囲の拡大に資する。また、厚さ 30mm としたことから、試験できない層構成があった。例えば、引張りでは厚さ 150mm 以上は試験できないので、5 層 5 プライまでであったが、薄いラミナを使って 9 層 9 プライまでを検証したい。具体的な内容が次の (1)～(3) である。

(1) 厚いラミナあるいは小角材を使った場合の強度性能に及ぼす影響について、ア) 面外曲げ、積層方向の曲げは広島県と鹿児島県に委託して行う。試験体の概要は表 1 に示している。3 層 3 プライ～9 層 9 プライまであり、3 層 3 プライでは、ラミナ厚さ 30mm と 45mm とで比較する。5 層 5 プライでは 20mm と 42mm、7 層 7 プライでは 20mm と 38.57mm、9 層 9 プライでは 20mm と 30mm を比較する計画である。広島県の方では厚いラミナの CLT について、鹿児島県では薄いラミナを用いた積層数の多い CLT を担当する。また、表の下にあるようにラミナの曲げ試験をやることにしている。20mm のラミナと 45mm のラミナを一緒の原木から採ることができないので、ラミナの厚さによりラミナの材質が異なることが予想される。ラミナの曲げ試験を行い、ラミナ試験から CLT の強度が計算で推定できるかを検証する。

イ) 面外せん断、積層方向のせん断について、森林総研と秋田県立大で行う。JAS タイプの試験と 4 点曲げで評価する大野式と呼ばれる方式で評価する。30mm を超えるラミナについては、幅 175mm に幅はぎ接着してから試験体を製造する。

(2) 基礎的物性値については、ア)、イ)、ウ)がある。ア)は木口面のせん断で、昨年度富山県で、理論的解析を行った。今年度は昨年度のデータに基づきさらに解析を進める。

イ)は、面内せん断で、幅方向のせん断と言われるもので、接着面のせん断については宇大で試験方法を含めて検討している。スギ以外のものについてもデータ収集し、建研の実大せん断試験と照らし合わせて、簡単な評価方法を検討する。

ウ) 試験評価法については、建築研究所で、曲げやせん断性能を評価する国内外の方法について調査し、必要があれば試験を行って検証する。

(3) 層構成について、ア)長期性能に関し、森林総研で実施中の試験を継続してデータの収集を行う。イ)圧縮における短柱・中間柱・長柱の範囲確認は、宇大で行う。座屈について、厚さ 30mm のラミナから 3 層 3 プライ、厚さ 20mm のラミナから 5 層 5 プライと 7 層 7 プライの試験体を製造して、 λ (細長比)は 10 から 120 の試験を行う。また、ラミナの圧縮試験を行い、ラミナの値から強度推定の検証を行う。ウ)引張りについては、森林総研で行う。厚さ 150mm までのものしか評価できないので、厚さ 150mm の中で 7 層 7 プライまでの試験を行う。5 プライではラミナ厚さ 30mm、

7 プライではラミナ厚さ 21.4mm となる。また、3 層 3 プライでは、ラミナ厚さ 3 種類の試験体で試験を行う。さらに、厚さ 20、30、45mm のラミナの引張り試験を行い、強度推定に及ぼすラミナ厚さの影響を見る。エ) 面内せん断については、宇都宮大学で行う。ラミナ厚さを変えて、層構成にバリエーションを持たせ、3 層 3 プライ～9 層 9 プライまでを対象に試験を行う。カ) 面内曲げ強度は、試験体長さの制約から、はり背 300mm の試験体で評価してきたが、銘建さんで 12m のプレスができたので、はり背 600mm までが試験できるようになった。CLT のはり背の影響について、5 層 5 プライと 7 層 7 プライで評価する。はり背 600mm の曲げ試験は、秋田県立大学で行う。また、ラミナの厚さが異なるので、強度推定に使うため、厚さ 21.4mm と 30mm のラミナの縦使い方向の曲げ試験を行う。

(質疑・応答) 省略

資料 4 は、幅はぎ接着したラミナの材質について、曲げ、引張り、圧縮試験を行い評価したものである。樹種はスギで、内層用、外層用、両者を一緒にした同一用の 3 つにグレーディングし、それを 3 枚幅はぎして幅はぎ接着ラミナとした。比較対照として、幅はぎしない並列ラミナを用意した。曲げ強さの平均値は、内層用と外層用は、幅はぎラミナが強い値を示した。同一用は同じような値を示すが、外層用、内層用、同一用すべてまとめると、幅はぎラミナが強い結果となった。曲げヤングも幅はぎラミナが大きい結果となった。引張強さは、いずれも並列ラミナより幅はぎラミナが高かった。圧縮強さはいずれも幅はぎラミナの方が高い値を示した。以上の結果より、いずれの試験でも、幅はぎラミナの方が高い値を示し、幅はぎによる拘束効果のようなものが認められた。

(質疑・応答) 省略

資料 5 は、今後を考える資料で、これまで試験を行ったものと、今年やる試験を示している。空欄はまだやっていないものを示す。今年やる試験については、ゴシック体で下線がついている。下に凡例があるが、SS は外層/内層スギ、HS は外層ヒノキ、内層スギ、HH は外層、内層ヒノキで、KK は外層、内層カラマツであり、この辺のデータは収集してある。層構成は、3 層 3 プライから、9 層 9 プライまでである。それぞれに Mx120 から S30 まで 7 つの強度等級がある。これらについて、曲げ（積層方向、幅方向）、圧縮座屈、圧縮短柱、引張り、せん断（積層方向、幅方向）と長期を評価してきている。何をやって、何をやってないかが見て取れる。また、幅はぎ接着無し、有りは※印一つと二つで表記している。また、t24 は厚さ 24mm 未満のラミナを使うもの、t36 は厚さ 36mm を超えるラミナを使うもので、今年行うのが中心になっている。

(質疑・応答) 省略

（その他）銘建工業（株）における、12 メートルプレスで試験体を作る時期に合わせた現地検討会の実施について、打ち合わせを行った。これについては、事務局と宮武氏とで具体的につめることとした。

付 録

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・普及委託事業
(CLT 強度データ収集)」
第 2 回推進委員会 議事録

日 時： 平成 29 年 2 月 3 日（金）18:00～20:00

場 所： 林友ビル 6 階中会議室（東京都文京区後楽 1-7-12）

議 題： 1）本年度事業結果について
2）その他

配付資料：資料 1 報告書目次案（宮武）
資料 2 面外曲げ－ラミナ曲げ性能（藤田）
資料 3 面外曲げ（藤田）
資料 4 面外曲げ（中原）
資料 5 面内曲げ（平松）
資料 6 面内曲げ（佐々木）
資料 7 面内曲げ一寸法効果（佐々木）
資料 8 座屈（中島史郎）
資料 9 圧縮－短柱（野田）
資料 10 引張り（井道）
資料 11 面外せん断（新藤）
資料 12 面内せん断（中島昌一）
資料 13 直交層挙動（園田）
資料 14 面内せん断評価法（槌本）
資料 15 圧縮せん断（野田）
資料 16 これまでに行った短期強度データ収集の方針と告示への反映（宮武）

出席者（順不同、敬称略）

委 員：	（委員長）安村 基	静岡大学農学部
	（委 員）青木 謙治	東京大学大学院農学生命科学研究科 生物材料学専攻
	（委 員）中川 貴文	国土交通省国土技術政策総合研究所
	（委 員）尾方 伸次	公益財団法人日本合板検査会
	（委 員）後藤 隆洋	公益財団法人日本住宅・木材技術センター
	（委 員）岡部 実	一般財団法人ベターリビングつくば建築試験研究センター
	（委 員）川上 修	一般財団法人建材試験センター 中央試験所
	（委 員）横田 俊峰	独立行政法人農林水産消費安全技術センター
	（委 員）秋津 裕志	北海道立総合研究機構 林産試験場

オブザーバー：	米田 信年	国土交通省大臣官房官庁営繕部整備課
	井上 裕也	〃
	高木淳一郎	国土交通省住宅局建築指導課
	井口 真樹	林野庁木材産業課木材製品技術室
	藤沢 将志	〃
	原 章仁	〃
	坂 賢	〃
課題担当者：	槌本 敬大	国立研究開発法人 建築研究所
	中島 史郎	宇都宮大学地域デザイン科学部 建築都市デザイン学科
	林 知行	秋田県立大学 木材高度加工研究所
	佐々木貴信	〃
	園田 里見	富山県農林水産総合技術センター 木材研究所
	藤田 和彦	広島県立総合技術研究所林業技術センター
	中原 亨	鹿児島県工業技術センター
	村田 忠	一般社団法人日本 CLT 協会（代 西牧 聡）
	孕石 剛志	〃
	坂部 芳平	〃
	宮武 敦	国立研究開発法人 森林総合研究所
	新藤 健太	〃
	長尾 博文	〃
	杉本 健一	〃
	野田 康信	〃
	宇京斉一郎	〃
	塔村真一郎	〃
	軽部 正彦	〃
事務局：	黒田 尚宏	公益社団法人日本木材加工技術協会
	海老原 徹	〃

【議事】

1) 本年度事業結果について

課題担当者から、提出された資料に基づいて本年度行った CLT の各種強度データについて報告があった。

1. 厚いラミナおよび小角材を幅はぎ接着したラミナの使用が各種強度性能に及ぼす影響の解明

1.1 ラミナの曲げ強度性能（資料 2）

厚板のラミナと小角材を幅はぎしたラミナ（厚さ 42mm）の曲げ強さ、曲げヤング係数とも、両者の間に差が見られなかった。

1.2 面外曲げ性能（資料 3、資料 4）

厚いラミナと小角材を幅はぎ接着したラミナを用いて製造した CLT（9 層 9 プライ、7 層 7 プライ、5 層 5 プライ）の曲げ性能に強軸も弱軸も有意な差は見られなかった。

また、3層3プライのCLT（ラミナ厚30mm）、5層5プライ、7層7プライ、9層9プライのCLT（ラミナ厚20mm）の曲げ性能を比較した結果、強軸試験体では、3層3プライの曲げ強さ、ヤング係数は他より大きい値となったが、弱軸試験体では、ヤング係数、曲げ強さともに他より低い値となった。

1.3 面外せん断性能（資料11）

試験は、JASに準拠した短スパンの中央集中荷重方式で行った。3層3プライ（ラミナ厚さ30mmと45mm）の強軸、5層5プライおよび7層7プライ（ラミナ厚さ20mm）の強軸、弱軸の6種類の試験を行った。3層3プライ、強軸のせん断強さは、ラミナ厚さが30mmでは2.82 N/mm²、ラミナ厚さ45mmでは2.43であった。これは寸法効果のほか、幅はぎ接着ラミナの影響が考えられる。

2. 基礎的物性値のデータ収集

2.1 CLTにおける直交層挙動の解析（資料13）

直交層のせん断試験を行い、直交層のせん断弾性係数、せん断強度のデータを収集した。層内せん断試験の結果、直交層のせん断強さ τ は約2.0 MPa、せん断弾性係数 G_R は約0.2GP程度の値が得られた。面外曲げ試験をした時の層内せん断剛性、強度と平行層間の変形と今回の剛性を比較したところ、ほぼ一致したことから、今回の測定したせん断弾性係数の値は大体妥当な値ではないかと考えられる。

2.2 試験評価法に関する検討

2.2.1 対称4点曲げ試験（資料14）

2.2.2 繊維直交方向のせん断試験（資料14）

原料ラミナは、スギとヒノキで、5層5プライ、150mmの厚さのCLTについて、幅を150mmと250mmとして、曲げせん断と圧縮せん断試験を行う。

2.2.3 圧縮せん断試験（資料15）

短柱で圧縮せん断を行い、せん断応力に換算して評価できないかという試みをしている。解析断面を45度に持ってきて、これにラミナの方角を合わせることによって、圧縮試験をすることによってせん断破壊を起こさせる試験方法である。予備試験の結果、換算したせん断強さ τ は約3.0 N/mm²と、当たらずも遠からずの値が得られている。

3. 層構成

3.1 長期性能評価

3.2 圧縮における短柱・中間柱・長柱の範囲確認

a. 座屈試験による評価（資料8）

座屈については、有効細長比（ λ ）が変わった時、従来の式がCLTについても適用できるかを確認するため、 $\lambda=10\sim110$ で座屈試験を行った。3層3プライ、5層5プライの強軸方向の場合、実験値と計算値がよく合っており、CLTも従来の式と合うことが確認できた。

b. 短柱試験による評価（資料9）

上側が球座で、下側が固定という支持条件で、 $\lambda=10\sim40$ で圧縮試験を行った。Mx60の3層3プライ、5層5プライ、7層7プライのCLTについて、強軸と弱軸で3体ずつ実施している。

3層3プライの強軸、弱軸の結果、 λ が大きくなるにつれて最大荷重が下がってくる傾向であった。7層7プライでも同じような傾向が見られている。強度に関しては、 $\lambda=20$ 程度では圧縮強度の測定ができるという傾向が得られている一方で、圧縮強度、圧縮比例限度力は λ の影響を受ける傾向が見られた。

3.3 引張り（資料10）

ラミナの厚さに注目して、厚さ 20, 30, 45mm のラミナを用いて厚さ 60mm、90mm、135mm の 3 層 3 プライの CLT を製造し、これによって引張強さがどう変わるか。もう一点は、厚さ 150mm に近い CLT を 3 層 3 プライ、5 層 5 プライ、7 層 7 プライで作ри、比較した。3 層 3 プライで、ラミナ厚さを変えた結果、ラミナ厚さが大きくなると引張強度は少し小さくなった。また、プライ数が大きくなると引張り強度は低下した。これらの理由については、ラミナ試験の結果をみて検討する。

3.4 面内せん断性能（資料 12）

エ形の CLT パネルのうち、真ん中の正方形部分に面内せん断力を加えて、面内せん断試験を行った。試験の結果、層数が増え、せん断強度が大きくなって、逆にせん断変形は小さくなる結果となった。告示に書いてある計算方法が合うかを検証するため、計算式（告示式）と実験値の比較を行った。全ての試験体において、計算値は実験値を過小評価した。また、破壊モードは計算値と実験値がほぼ合っていた。

3.5 面内曲げ（資料 5、資料 6、資料 7）

a. 梁背 150mm、300mm

試験体の厚さを 5 層 5 プライと 7 層 7 プライで同じ 150mm になるようにして、CLT を作って試験をした。Mx60-5-5 の梁背 300mm の場合、5 層 5 プライの曲げ強さの平均値は 16.9 であった。7 層 7 プライでは 17.3 であった。梁背 150mm の場合、5 層 5 プライの曲げ強さの平均値は 19.4、7 層 7 プライでは 19.2 であった。梁背 300mm の結果と比べると、梁背 150mm の方が曲げ強さが高い結果となっている。

b. 梁背 600mm

5 層 5 プライが 6 体、7 層 7 プライが 6 体をスパン 10, 800mm の 3 等分点加重で試験をした。5 層 5 プライの曲げ強度の平均値が 15.3MPa、7 層 7 プライの平均値が 15.0MPa であり、梁背 300mm、150mm の結果より低い値を示した。

梁背 150、300、600mm で寸法効果があるかどうか検討した結果、平均値で見ると、寸法効果が認められるように見える。

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・普及委託事業
(CLT 強度データ収集)」
現地検討会 議事録

日 時： 平成 28 年 11 月 28 日（月）13:00～14:30

場 所： 銘建工業株式会社 CLT 工場 会議室

議 題： 1) 本年度事業について

CLT パネル製造状況について

資料 1

試験体について

資料 2, 3

実験計画について

資料 4

2) その他

スケジュールなど

資 料：資料 1 CLT パネル製造状況
資料 2 試験体リスト
資料 3 試験体採材図
資料 4 現地検討会資料（富山県）

出席者（順不同、敬称略）

委 員：	（委員長）安村 基	静岡大学農学部
	（委 員）尾方 伸次	公益財団法人日本合板検査会
	（委 員）後藤 隆洋	公益財団法人日本住宅・木材技術センター
	（委 員）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
	（委 員）玉置 教司	愛媛県農林水産研究所 林業研究センター

課題担当者：	園田 里見	富山県農林水産総合技術センター 木材研究所
	藤田 和彦	広島県立総合技術研究所林業技術センター
	野沢 浩二	〃
	渡辺 靖崇	〃
	孕石 剛志	一般社団法人日本 CLT 協会（銘建工業株式会社）
	宮武 敦	国立研究開発法人 森林総合研究所
	新藤 健太	〃
	長尾 博文	〃
	井道 裕史	〃

事務局：	黒田 尚宏	公益社団法人日本木材加工技術協会
	海老原 徹	〃

議事

1) 本年度事業について

森林総研 宮武氏より資料 1、資料 2、資料 3 について、説明があった。本年度、CLT パネルは銘建工業（株）で製造されるが、資料 1 により、試験項目、パネル使用番号、ラミナ厚さ、ラミナ幅、層構成、寸法（厚さ×短尺方向×長尺方向）、ラミナ製造・FJ を行う工場等が詳細に示された。

資料 2 は、試験機関（秋田県立大学木高研、広島県林業技術センター、宇都宮大学、鹿児島県工業技術センター、建築研究所、富山県木材研究所、森林総合研究所）ごとに試験体のリスト（パネル仕様番号、等級-層数-プライ数、試験体番号、厚さ、幅、長さ、枚数、在籍）を示す。

資料 3 は、試験の種類（面外曲げ、面外せん断、圧縮座屈、引張、面内せん断、面内曲げ等）ごとに CLT パネルから試験体の詳細な採材方法を示している。

富山県木材研究所の園田氏より、資料 4 により、CLT における直交層挙動の解析について説明があった。基本的には、広島県と鹿児島県で前年度行った面外曲げ試験で得られたデータを解析することにより行う。面外曲げ試験における、実験値に対する応力解析モデルの適合性を検証することにより、CLT の直交層挙動を解明する。

これらについて、質疑応答を行い、今年度の試験の種類、試験体の詳細等についての確認を行った。

1. 面外曲げ等

No 30-1-1 ラミナ幅105 3層3プライ 90×2100×4030 1枚

面外曲げ300×2000 3011. KG. 081		面外曲げ300×2000 3011. KG. 082	
面外せん断 300×650 3011. S. 05J1	面外せん断 300×650 3011. S. 05J2	面外せん断 300×650 3011. S. 05J3	面外せん断 300×650 3011. S. 05J4
面外せん断大野式 300×1260 3011. S. 0501		面外せん断大野式 300×1260 3011. S. 0502	
		面外せん断大野式 300×1260 3011. S. 0503	
面外曲げ300×2000 3011. KG. 083		面外曲げ300×2000 3011. KG. 084	
面外曲げ300×2000 3011. KG. 085		面外曲げ300×2000 3011. KG. 086	
面外せん断大野式 300×1260 3011. S. 0504		面外せん断大野式 300×1260 3011. S. 0505	
		面外せん断大野式 300×1260 3011. S. 0506	
<div style="text-align: right;">ラベル</div>			

[illegible]

No 30-2-1 ラミナ幅105 3層3プライ 90×4030×2100 1枚

面外曲げ2000×300 3021.KG.081	面外曲げ300×200 3021.KG.087	面外せん断 3021.S.0513	面外せん断大算式 300×1250 3021.S.0501	面外曲げ300×200 3021.KG.088	面外曲げ300×200 3021.KG.089	面外せん断大算式 300×1250 3021.S.0502
面外曲げ2000×300 3021.KG.082		面外せん断 3021.S.0512				
面外曲げ2000×300 3021.KG.083						
面外曲げ2000×300 3021.KG.084						
面外曲げ2000×300 3021.KG.085						
面外曲げ2000×300 3021.KG.086						

[illegible]


1. 面外曲げ等

No 45B-1 ラミナ厚45幅175 3層3プライ 135×2100×4030 3枚の内1枚

面外せ入断 95×700	
面外曲げ300×3105 4581. H. 081	4581. S. 05S1-1 4581. TO. 05S1-2 4581. S. 05S1-3 4581. S. 05S2-1 4581. TO. 05S2-2 4581. S. 05S2-3 4581. S. 05S3-1 4581. TO. 05S3-2 4581. S. 05S3-3 4581. S. 05S4-1 4581. TO. 05S4-2 4581. S. 05S4-3 4581. S. 05S5-1 4581. TO. 05S5-2 4581. S. 05S5-3 4581. S. 05S6-1 4581. TO. 05S6-2 4581. S. 05S6-3
面外曲げ300×3105 4581. H. 082	
面外曲げ300×3105 4581. H. 083	
面外曲げ300×3105 4581. H. 084	
面外曲げ300×3105 4581. H. 085	
面外曲げ300×3105 4581. H. 086	

[illegible]

No 45B-2 ラミナ厚45幅175 3層3プライ 135×4030×2100 1枚


面外曲げ3105×300 4582. H. 081	面外せん断 4582. S. 0312	面外せん断 300×325 4582. S. 0311	面外せん断 300×325 4582. S. 0313	
面外曲げ3105×300 4582. H. 082		面外せん断 300×325 4582. S. 0314		
面外曲げ3105×300 4582. H. 083				
面外曲げ3105×300 4582. H. 084				
面外曲げ3105×300 4582. H. 085				
面外曲げ3105×300 4582. H. 086				

[illegible]

1. 面外曲げ等

No 20-2-1 ラミナ幅105 5層5プライ 100×2100×4030 1枚


面外曲げ300×2300 2021. KG. 081	面外せん断大野式 300×1400 2021. S. 0501	
面外曲げ300×2300 2021. KG. 082	面外せん断大野式 300×1400 2021. S. 0502	
面外曲げ300×2300 2021. KG. 083	面外せん断 300×700 2021. S. 05J1	面外せん断 300×700 2021. S. 05J2
面外曲げ300×2300 2021. KG. 084	面外せん断大野式 300×1400 2021. S. 0503	
面外曲げ300×2300 2021. KG. 085	面外せん断大野式 300×1400 2021. S. 0504	
面外曲げ300×2300 2021. KG. 086	面外せん断 300×700 2021. S. 05J3	面外せん断 300×700 2021. S. 05J4



[illegible]

No 20-3-1 ラミナ幅105 5層5プライ 100×4030×2100 1枚

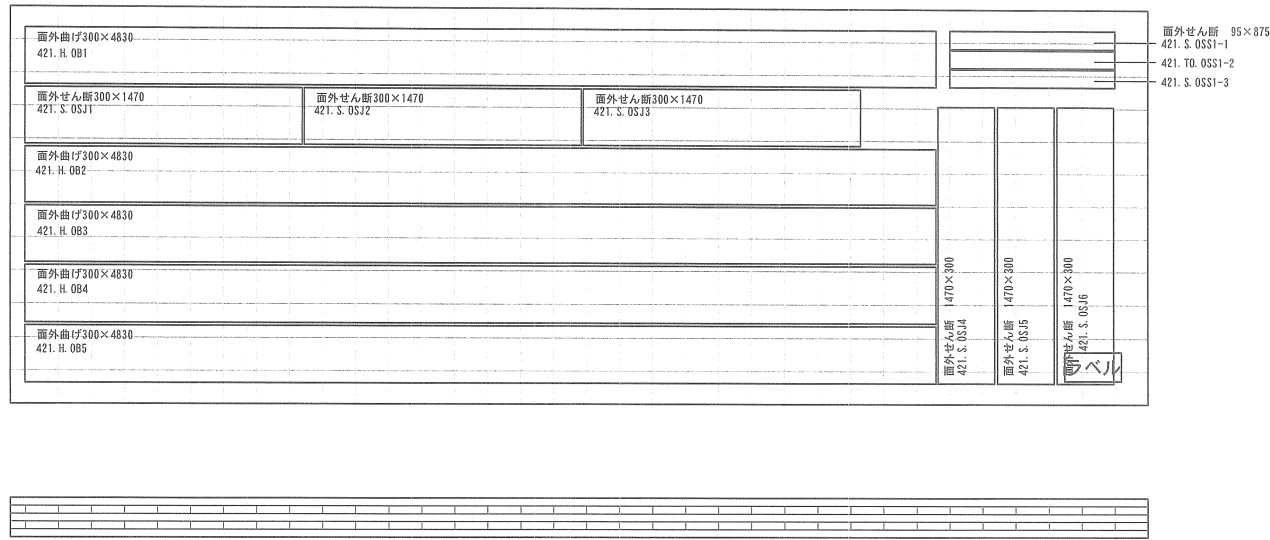
面外曲げ2300×300 2031. KG. 081	面外せん断大野式 1400×300 2031. S. 0S01		
面外曲げ2300×300 2031. KG. 082	面外せん断大野式 1400×300 2031. S. 0S02		
面外曲げ2300×300 2031. KG. 083	<table border="1"> <tr> <td> 面外せん断 700×300 2031. S. 0SJ1 </td> <td> 面外せん断 700×300 2031. S. 0SJ2 </td> </tr> </table>	面外せん断 700×300 2031. S. 0SJ1	面外せん断 700×300 2031. S. 0SJ2
面外せん断 700×300 2031. S. 0SJ1	面外せん断 700×300 2031. S. 0SJ2		
面外曲げ2300×300 2031. KG. 084	面外せん断大野式 1400×300 2031. S. 0S03		
面外曲げ2300×300 2031. KG. 085	面外せん断大野式 1400×300 2031. S. 0S04		
面外曲げ2300×300 2031. KG. 086	<table border="1"> <tr> <td> 面外せん断 700×300 2031. S. 0SJ3 </td> <td> 面外せん断 700×300 2031. S. 0SJ4 </td> </tr> </table>	面外せん断 700×300 2031. S. 0SJ3	面外せん断 700×300 2031. S. 0SJ4
面外せん断 700×300 2031. S. 0SJ3	面外せん断 700×300 2031. S. 0SJ4		



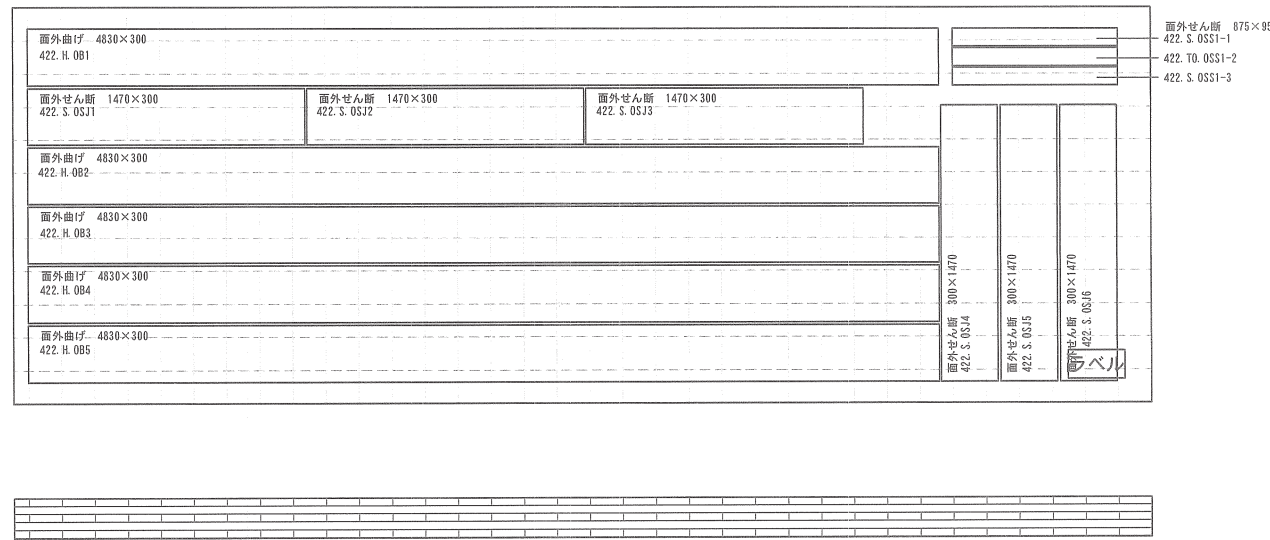
[illegible]

1. 面外曲げ等

No 42-1 ラミナ厚42幅175 5層5プライ 210×2100×6030 1枚



No 42-2 ラミナ厚42幅175 5層5プライ 210×6030×2100 1枚



1. 面外曲げ等

No 20-5-1 ラミナ幅105 7層7プライ 140×2100×6030 1枚

面外曲げ300×3220 2051. KG. 081	面外せん断 300×980 2051. S. 05J1
面外曲げ300×3220 2051. KG. 082	面外せん断 300×980 2051. S. 05J2
面外曲げ300×3220 2051. KG. 083	面外せん断 300×980 2051. S. 05J3
面外曲げ300×3220 2051. KG. 084	面外せん断 300×980 2051. S. 05J4
面外曲げ300×3220 2051. KG. 085	面外せん断 300×980 2051. S. 05J5
面外曲げ300×3220 2051. KG. 086	面外せん断 300×980 2051. S. 05J6

ラベル

--

No 20-6-1 ラミナ幅105 7層7プライ 140×6030×2100 1枚

面外曲げ3220×300 2061. KG. 081	面外せん断 980×300 2061. S. 05J1	面外せん断大剪式 300×1950 2061. S. 0501	面外せん断 300×980 2061. S. 05J8	面外せん断大剪式 300×1950 2061. S. 0502	面外せん断 300×980 2061. S. 05J9	面外せん断大剪式 300×1950 2061. S. 0503
面外曲げ3220×300 2061. KG. 082	面外せん断 980×300 2061. S. 05J2					
面外曲げ3220×300 2061. KG. 083	面外せん断 980×300 2061. S. 05J3					
面外曲げ3220×300 2061. KG. 084	面外せん断 980×300 2061. S. 05J4	面外せん断大剪式 300×1950 2061. S. 0501	面外せん断 300×980 2061. S. 05J8	面外せん断大剪式 300×1950 2061. S. 0502	面外せん断 300×980 2061. S. 05J9	面外せん断大剪式 300×1950 2061. S. 0503
面外曲げ3220×300 2061. KG. 085	面外せん断 980×300 2061. S. 05J5					
面外曲げ3220×300 2051. KG. 086	面外せん断 980×300 2061. S. 05J6					


ラベル

--

1. 面外曲げ等

No 38-1 ラミナ厚38.57幅175 7層7プライ 270×2100×6030 1枚

面外曲げ300×6000 381. H. 081		
面外せん断300×1890 381. S. 05J1	面外せん断300×1890 381. S. 05J2	面外せん断300×1890 381. S. 05J3
面外曲げ300×6000 381. H. 082		
面外曲げ300×6000 381. H. 083		
面外せん断300×1890 381. S. 05J4	面外せん断300×1890 381. S. 05J5	面外せん断300×1890 381. S. 05J6
面外曲げ300×6000 381. H. 084		



[illegible]

No 38-2 ラミナ厚38.57幅175 7層7プライ 270×6030×2100 1枚

面外曲げ6000×300 382. H. 0B1		
面外せん断 1890×300 382. S. 0S11	面外せん断 1890×300 382. S. 0S12	面外せん断 1890×300 382. S. 0S13
面外曲げ6000×300 382. H. 0B2		
面外曲げ6000×300 382. H. 0B3		
面外せん断 1890×300 382. S. 0S14	面外せん断 1890×300 382. S. 0S15	面外せん断 1890×300 382. S. 0S16
面外曲げ6000×300 382. H. 0B4		

ラベル

[illegible]

1. 面外曲げ等

No 20-8 ラミナ幅105 9層9プライ 180×2100×6030 1枚

面外曲げ300×4140 208. KG. 081	面外せん断 300×1260 208. S. 0S11		面外せん断 95×420
			208. S. 0SS1-1
			208. TO. 0SS1-2
			208. S. 0SS1-3
面外曲げ300×4140 208. KG. 082	面外せん断 300×1260 208. S. 0S12		208. S. 0SS2-1
			208. TO. 0SS2-2
			208. S. 0SS2-3
面外曲げ300×4140 208. KG. 083	面外せん断 300×1260 208. S. 0S13		208. S. 0SS3-1
			208. TO. 0SS3-2
			208. S. 0SS3-3
面外曲げ300×4140 208. KG. 084	面外せん断 300×1260 208. S. 0S14		208. S. 0SS4-1
			208. TO. 0SS4-2
			208. S. 0SS4-3
面外曲げ300×4140 208. KG. 085	面外せん断 300×1260 208. S. 0S15		208. S. 0SS5-1
			208. TO. 0SS5-2
			208. S. 0SS5-3
面外曲げ300×4140 208. KG. 086	面外せん断 300×1260 208. S. 0S16	ラベル	208. S. 0SS6-1
			208. TO. 0SS6-2
			208. S. 0SS6-3



No 20-9 ラミナ幅105 9層9プライ 180×6030×2100 1枚

面外曲げ4140×300 209. KG. 081	面外せん断 1260×300 209. S. 0S11		面外せん断 420×95
			209. S. 0SS1-1
			209. TO. 0SS1-2
			209. S. 0SS1-3
面外曲げ4140×300 209. KG. 082	面外せん断 1260×300 209. S. 0S12		209. S. 0SS2-1
			209. TO. 0SS2-2
			209. S. 0SS2-3
面外曲げ4140×300 209. KG. 083	面外せん断 1260×300 209. S. 0S13		209. S. 0SS3-1
			209. TO. 0SS3-2
			209. S. 0SS3-3
面外曲げ4140×300 209. KG. 084	面外せん断 1260×300 209. S. 0S14		209. S. 0SS4-1
			209. TO. 0SS4-2
			209. S. 0SS4-3
面外曲げ4140×300 209. KG. 085	面外せん断 1260×300 209. S. 0S15		209. S. 0SS5-1
			209. TO. 0SS5-2
			209. S. 0SS5-3
面外曲げ4140×300 209. KG. 086	面外せん断 1260×300 209. S. 0S16	ラベル	209. S. 0SS6-1
			209. TO. 0SS6-2
			209. S. 0SS6-3



1. 面外曲げ等

No 30-6 ラミナ幅105 9層9プライ 270×2100×6030 1枚

面外曲げ300×6000 306. H. 081		
面外せん断300×1890 306. S. 05J1	面外せん断300×1890 306. S. 05J2	面外せん断300×1890 306. S. 05J3
面外曲げ300×6000 306. H. 082		
面外曲げ300×6000 306. H. 083		
面外せん断300×1890 306. S. 05J4	面外せん断300×1890 306. S. 05J5	面外せん断300×1890 306. S. 05J6
面外曲げ300×6000 306. H. 084		

ラベル

[illegible]

No 30-7 ラミナ幅105 9層9プライ 270×6030×2100 1枚

面外曲げ 6000×300 307. H. 081		
面外せん断 1890×300 307. S. 0SJ1	面外せん断 1890×300 307. S. 0SJ2	面外せん断 1890×300 307. S. 0SJ3
面外曲げ 6000×300 307. H. 082		
面外曲げ 6000×300 307. H. 083		
面外せん断 1890×300 307. S. 0SJ4	面外せん断 1890×300 307. S. 0SJ5	面外せん断 1890×300 307. S. 0SJ6
面外曲げ 6000×300 307. H. 084		

ラベル

[illegible]

2. 圧縮座屈等

No 30-1-2 ラミナ厚30幅105 3層3プライ 90×2100×12030 1枚

3012.S.0531 300×520	3012.S.081 300×2078	3012.TU.CB0601 300×1559	3012.S.C0301 300×779	3012.S.C0301 300×520	3012.TU.CB0602 300×1559	3012.S.C0401 300×1039	3012.S.C0101 300×260	3012.TU.CB0603 300×1559
	3012.TU.CB0801 300×2078	3012.TU.CB0501 300×1299	3012.TU.CB0802 300×2078		3012.TU.CB0502 300×1299	3012.TU.CB0803 300×2078		3012.TU.CB0503 300×1299
3012.S.C0302 300×779	3012.S.C0202 300×520	3012.TU.CB0901 300×2338	3012.TU.CB0401 300×1039	3012.TU.CB0902 300×2338	3012.TU.CB0402 300×1039	3012.TU.CB0903 300×2338		3012.TU.CB0403 300×1039
3012.S.C0402 300×1039	3012.S.C0102 300×260	3012.TU.CB1001 300×2598	3012.TU.CB0101 300×779	3012.TU.CB1002 300×2598	3012.TU.CB0102 300×779	3012.TU.CB1003 300×2598		3012.TU.CB0103 300×779
3012.S.C0303 300×779	3012.S.C0203 300×520	3012.TU.CB1101 300×2858	3012.TU.CB0201 300×520	3012.TU.CB1102 300×2858	3012.TU.CB0202 300×520	3012.TU.CB1103 300×2858		3012.TU.CB0203 300×520
3012.S.C0403 300×1039	3012.S.C0103 300×260	3012.HU.CB1201 300×3118	3012.TU.CB0101 300×260	3012.HU.CB1202 300×3118	3012.TU.CB0102 300×260	3012.HU.CB1203 300×3118		3012.TU.CB0103 300×260

No 30-2-2 ラミナ厚30幅105 3層3プライ 90×12030×2100 1枚

3022.S.0531 630×300	3022.S.081 2078×300	3022.TU.CB0601 1559×300	3022.S.C0301 779×300	3022.S.C0301 520×300	3022.TU.CB0602 1559×300	3022.S.C0401 1039×300	3022.S.C0101 260×300	3022.TU.CB0603 1559×300
	3022.TU.CB0801 2078×300	3022.TU.CB0501 1299×300	3022.TU.CB0802 2078×300		3022.TU.CB0502 1299×300	3022.TU.CB0803 2078×300		3022.TU.CB0503 1299×300
3022.S.C0302 779×300	3022.S.C0202 520×300	3022.TU.CB0901 2338×300	3022.TU.CB0401 1039×300	3022.TU.CB0902 2338×300	3022.TU.CB0402 1039×300	3022.TU.CB0903 2338×300		3022.TU.CB0403 1039×300
3022.S.C0402 1039×300	3022.S.C0102 260×300	3022.TU.CB1001 2598×300	3022.TU.CB0101 779×300	3022.TU.CB1002 2598×300	3022.TU.CB0102 779×300	3022.TU.CB1003 2598×300		3022.TU.CB0103 779×300
3022.S.C0303 779×300	3022.S.C0203 520×300	3022.TU.CB1101 2858×300	3022.TU.CB0201 520×300	3022.TU.CB1102 2858×300	3022.TU.CB0202 520×300	3022.TU.CB1103 2858×300		3022.TU.CB0203 520×300
3022.S.C0403 779×300	3022.S.C0103 260×300	3022.HU.CB1201 3118×300	3022.TU.CB0101 260×300	3022.HU.CB1202 3118×300	3022.TU.CB0102 260×300	3022.HU.CB1203 3118×300		3022.TU.CB0103 260×300

2. 圧縮座屈等

No 20-2-2 ラミナ厚20幅105 5層5プライ 100×2100×12030 1枚

2022 S C020 300×577	2022 S C0301 300×866	2022 S C0401 300×1155	2022 TU C06001 300×1732	2022 S C0302 300×866	2022 S C0402 300×1155	2022 TU C06002 300×1732	2022 S C0303 300×866	2022 S C0403 300×1155	2022 TU C06003 300×1732
2022 S C0101 300×866	2022 TU C06001 300×2306	2022 TU C06001 300×2306	2022 TU C06001 300×2306	2022 TU C06002 300×2306	2022 TU C06002 300×2306	2022 TU C06002 300×2306	2022 TU C06003 300×2306	2022 TU C06003 300×2306	2022 TU C06003 300×2306
2022 S C020 300×577	2022 TU C06001 300×2306	2022 TU C06001 300×2306	2022 TU C06001 300×2306	2022 TU C06002 300×2306	2022 TU C06002 300×2306	2022 TU C06002 300×2306	2022 TU C06003 300×2306	2022 TU C06003 300×2306	2022 TU C06003 300×2306
2022 S C0102 300×866	2022 TU C06001 300×2306	2022 TU C06001 300×2306	2022 TU C06001 300×2306	2022 TU C06002 300×2306	2022 TU C06002 300×2306	2022 TU C06002 300×2306	2022 TU C06003 300×2306	2022 TU C06003 300×2306	2022 TU C06003 300×2306
2022 S C020 300×577	2022 TU C06001 300×2306	2022 TU C06001 300×2306	2022 TU C06001 300×2306	2022 TU C06002 300×2306	2022 TU C06002 300×2306	2022 TU C06002 300×2306	2022 TU C06003 300×2306	2022 TU C06003 300×2306	2022 TU C06003 300×2306
2022 S C0103 300×866	2022 TU C06001 300×2306	2022 TU C06001 300×2306	2022 TU C06001 300×2306	2022 TU C06002 300×2306	2022 TU C06002 300×2306	2022 TU C06002 300×2306	2022 TU C06003 300×2306	2022 TU C06003 300×2306	2022 TU C06003 300×2306

No 20-3-2 ラミナ厚20幅105 5層5プライ 100×12030×2100 1枚

2022 S C020 577×300	2022 S C0301 866×300	2022 S C0401 1155×300	2022 TU C06001 1732×300	2022 S C0302 866×300	2022 S C0402 1155×300	2022 TU C06002 1732×300	2022 S C0303 866×300	2022 S C0403 1155×300	2022 TU C06003 1732×300
2022 S C0101 289×300	2022 TU C06001 2306×300	2022 TU C06001 2306×300	2022 TU C06001 2306×300	2022 TU C06002 2306×300	2022 TU C06002 2306×300	2022 TU C06002 2306×300	2022 TU C06003 2306×300	2022 TU C06003 2306×300	2022 TU C06003 2306×300
2022 S C020 577×300	2022 TU C06001 2306×300	2022 TU C06001 2306×300	2022 TU C06001 2306×300	2022 TU C06002 2306×300	2022 TU C06002 2306×300	2022 TU C06002 2306×300	2022 TU C06003 2306×300	2022 TU C06003 2306×300	2022 TU C06003 2306×300
2022 S C0102 289×300	2022 TU C06001 2306×300	2022 TU C06001 2306×300	2022 TU C06001 2306×300	2022 TU C06002 2306×300	2022 TU C06002 2306×300	2022 TU C06002 2306×300	2022 TU C06003 2306×300	2022 TU C06003 2306×300	2022 TU C06003 2306×300
2022 S C020 577×300	2022 TU C06001 2306×300	2022 TU C06001 2306×300	2022 TU C06001 2306×300	2022 TU C06002 2306×300	2022 TU C06002 2306×300	2022 TU C06002 2306×300	2022 TU C06003 2306×300	2022 TU C06003 2306×300	2022 TU C06003 2306×300
2022 S C0103 289×300	2022 TU C06001 2306×300	2022 TU C06001 2306×300	2022 TU C06001 2306×300	2022 TU C06002 2306×300	2022 TU C06002 2306×300	2022 TU C06002 2306×300	2022 TU C06003 2306×300	2022 TU C06003 2306×300	2022 TU C06003 2306×300

2. 圧縮座屈等

No 20-5-2 ラミナ厚20幅105 7層7プライ 140×2940×12030 1枚

2052 S 1501 300×2415	2052 S C0401 300×1617	2052 TU C0601 300×2425	2052 HU C0101 300×4041	2052 TU C0301 300×1212
2052 S 05J1 300×980	2052 HU C0001 300×3233	2052 TU C0501 300×2021	2052 HU C0101 300×4446	2052 TU C0201 300×3637
2052 S C0301 300×1212	2052 HU C0001 300×3637	2052 TU C0401 300×1617	2052 HU C01201 300×4850	2052 TU C06101 300×4041
2052 S 05J2 300×980	2052 S 1502 300×2415	2052 S C0402 300×1617	2052 TU 0602 300×2425	2052 S C0403 300×1617
2052 S C0201 300×808	2052 S 0101 300×4041	2052 HU C0002 300×3233	2052 TU C0502 300×2021	2052 HU C0003 300×3233
2052 S C0302 300×1212	2052 HU C0002 300×3637	2052 TU C0402 300×1617	2052 HU C0003 300×3637	2052 TU C0403 300×1617
2052 S C0202 300×808	2052 S 0102 300×4041	2052 HU C01002 300×4041	2052 TU C0302 300×1212	2052 HU C01003 300×4041
2052 S C0303 300×1212	2052 HU C01002 300×4446	2052 TU C0202 300×808	2052 HU C01003 300×4446	2052 TU C06203 300×808
2052 S C0401 300×808	2052 S 0103 300×4041	2052 HU C01202 300×4850	2052 TU C0102 300×4041	2052 HU C01203 300×4850

No 20-6-2 ラミナ厚20幅105 7層7プライ 140×12030×2940 1枚

2062 S 1501 2415×300	2062 S C0401 1617×300	2062 TU C0601 2425×300	2062 HU C0101 4041×300	2062 TU C0301 1212×300
2062 S 05J1 980×300	2062 HU C0001 3233×300	2062 TU C0501 2021×300	2062 HU C0101 4446×300	2062 TU C0201 808×300
2062 S C0301 1212×300	2062 HU C0001 3637×300	2062 TU C0401 1617×300	2062 HU C01201 4850×300	2062 TU C06101 404×300
2062 S 05J2 980×300	2062 S 1502 2415×300	2062 S C0402 1617×300	2062 TU 0602 2425×300	2062 S C0403 1617×300
2062 S C0201 808×300	2062 S 0101 404×300	2062 HU C0002 3233×300	2062 TU C0502 2021×300	2062 HU C0003 3233×300
2062 S C0302 1212×300	2062 HU C0002 3637×300	2062 TU C0402 1617×300	2062 HU C0003 3637×300	2062 TU C0403 1617×300
2062 S C0202 808×300	2062 S 0102 404×300	2062 HU C01002 4041×300	2062 TU C0302 1212×300	2062 HU C01003 4041×300
2062 S C0303 1212×300	2062 HU C01002 4446×300	2062 TU C0202 808×300	2062 HU C01003 4446×300	2062 TU C06203 808×300
2062 S C0401 808×300	2062 S 0103 404×300	2062 HU C01202 4850×300	2062 TU C0102 404×300	2062 HU C01203 4850×300

3. 引張

No 20-1 ラミナ幅105 3層3プライ 60×2100×6030 1枚

引張300×6000 201. S. T1	
引張300×6000 201. S. T2	
引張300×6000 201. S. T3	
引張300×6000 201. S. T4	
引張300×6000 201. S. T5	
引張300×6000 201. S. T6	ラベル

--

No 30-3 ラミナ幅105 3層3プライ 90×2100×6030 1枚

引張300×6000 303. S. T1	
引張300×6000 303. S. T2	
引張300×6000 303. S. T3	
引張300×6000 303. S. T4	
引張300×6000 303. S. T5	
引張300×6000 303. S. T6	ラベル

--

3. 引張

No 45A-1 ラミナ厚45幅105 3層3プライ 135×2100×6030 1枚

引張300×6000 45A1. S. T1	
引張300×6000 45A1. S. T2	
引張300×6000 45A1. S. T3	
引張300×6000 45A1. S. T4	
引張300×6000 45A1. S. T5	
引張300×6000 45A1. S. T6	ラベル

--

No 30-5 ラミナ幅105 5層5プライ 150×2100×6030 1枚

引張300×6000 305. S. T1	
引張300×6000 305. S. T2	
引張300×6000 305. S. T3	
引張300×6000 305. S. T4	
引張300×6000 305. S. T5	
引張300×6000 305. S. T6	ラベル

--

3. 引張

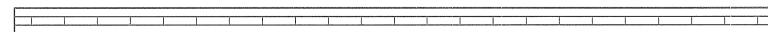
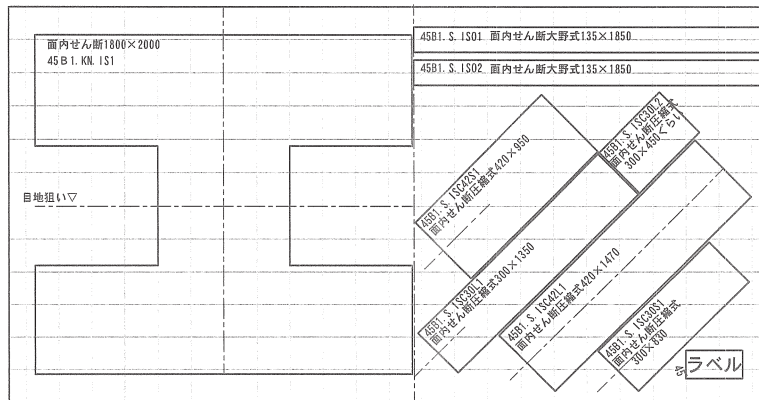
No 21-1 ラミナ幅105 7層7プライ 150×2100×6030 1枚

引張300×6000 211. S. T1	
引張300×6000 211. S. T2	
引張300×6000 211. S. T3	
引張300×6000 211. S. T4	
引張300×6000 211. S. T5	
引張300×6000 211. S. T6	ラベル

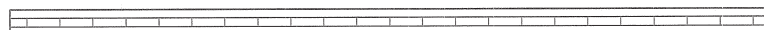
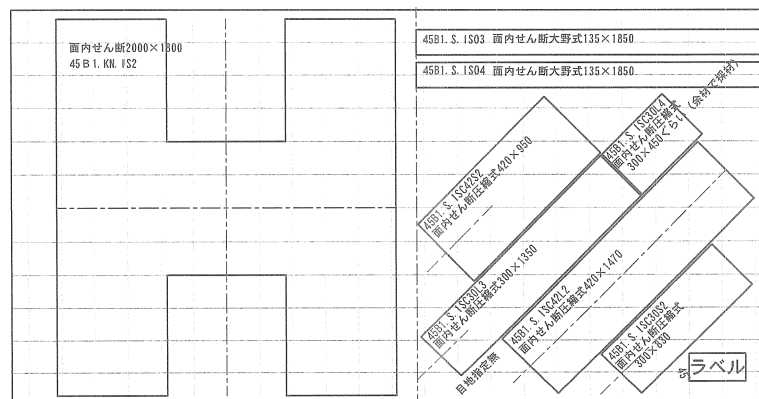
--	--

4. 面内せん断等

No 45B-1 ラミナ厚45幅175 3層3プライ 135×2100×4030 3枚の内1枚

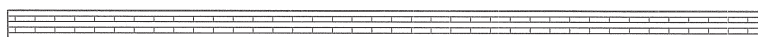
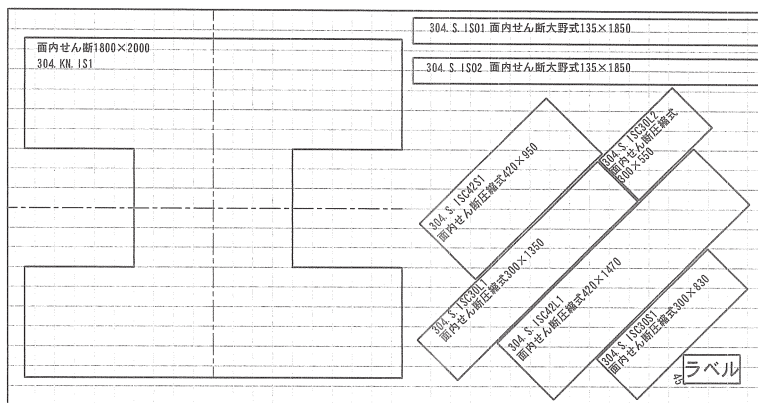


No 45B-1 ラミナ厚45幅175 3層3プライ 135×2100×4030 3枚の内1枚

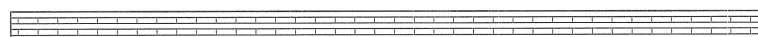
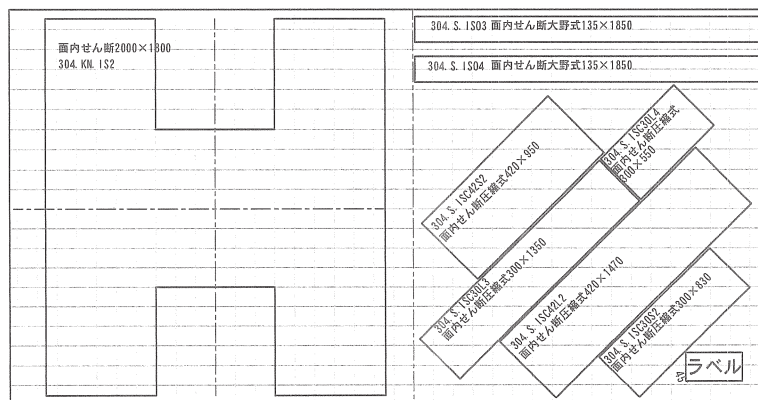


4. 面内せん断等

No 30-4 ラミナ幅105 5層5プライ 150×2100×4030 2枚の内 1枚

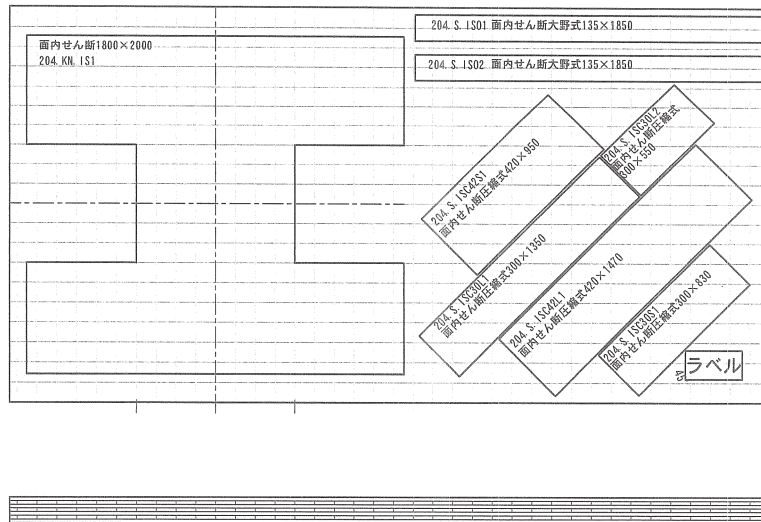


No 30-4 ラミナ幅105 5層5プライ 150×2100×4030 2枚の内 1枚

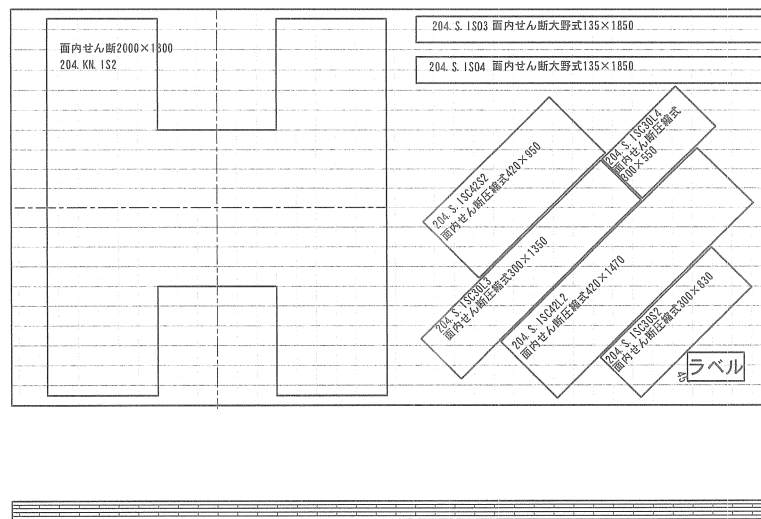


4. 面内せん断等

No 20-4 ラミナ幅105 7層7プライ 140×2100×4030 2枚の内 1枚

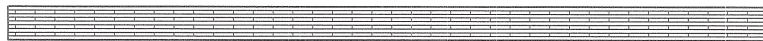
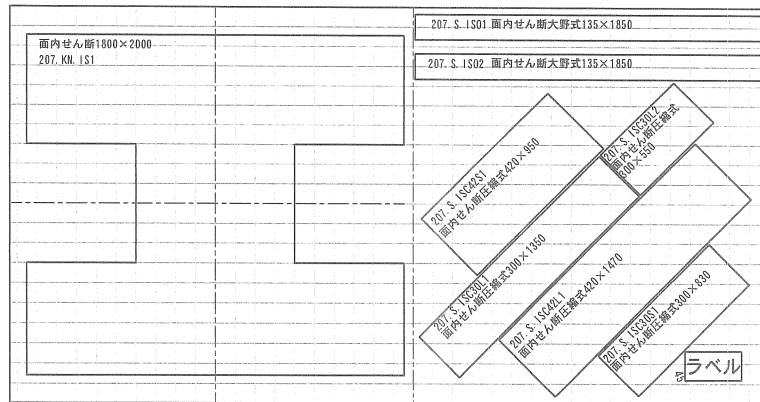


No 20-4 ラミナ幅105 7層7プライ 140×2100×4030 2枚の内 1枚

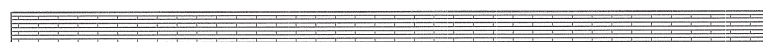
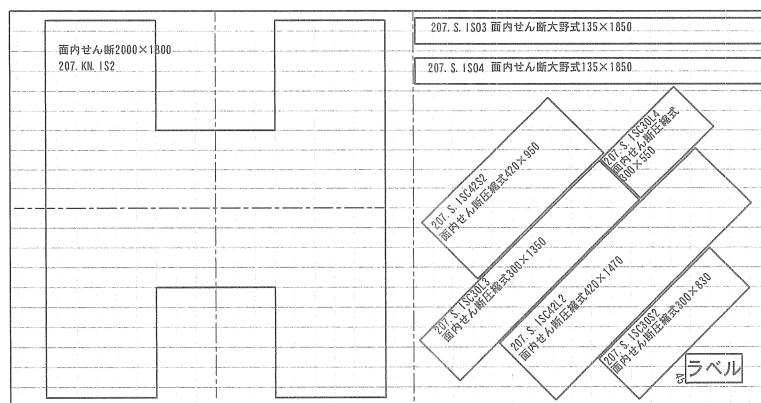


4. 面内せん断等

No 20-7 ラミナ幅105 9層9プライ 180×2100×4030 2枚の内 1枚



No 20-7 ラミナ幅105 9層9プライ 180×2100×4030 2枚の内 1枚



5. 面内曲げ等

No 30-8 ラミナ厚30幅105 5層5プライ 150×2940×12030 2枚の内 1枚

308. A. 186001 600×12030+		
308. S. 181501 150×3000+	308. S. 183001 300×6000	308. S. 181502 150×3000+
308. S. 1501 140+×3000+		308. S. 1502 140+×3000+
308. A. 186002 600×12030+		
308. S. 181503 150×3000+	308. S. 183002 300×6000	308. S. 181504 150×3000+
308. S. 1503 140+×3000+		308. S. 1504 140+×3000+
308. A. 186003 600×12030+		
ラベル 308. S. 181505 150×3000+	308. S. 183003 300×6000	308. S. 181506 150×3000+
308. S. 1505 140+×3000+		308. S. 1506 140+×3000+

No 30-8 ラミナ厚30幅105 5層5プライ 150×2940×12030 2枚の内 1枚

308. A. 186004 600×12030+		
308. S. 181507 150×3000+	308. S. 183004 300×6000	308. S. 181508 150×3000+
308. S. 1507 140+×3000+		308. S. 1508 140+×3000+
308. A. 186005 600×12030+		
308. S. 181509 150×3000+	308. S. 183005 300×6000	308. S. 181510 150×3000+
308. S. 1509 140+×3000+		308. S. 15010 140+×3000+
308. A. 186006 600×12030+		
ラベル 308. S. 181511 150×3000+	308. S. 183006 300×6000	308. S. 181512 150×3000+
308. S. 15011 140+×3000+		308. S. 15012 140+×3000+

5. 面内曲げ等

No 21-2 ラミナ厚21.43 幅105 7層7プライ 150×2940×12030 2枚の内1枚

212 A 106001 600×12030+		
212 S 101501 150×3000+	212 S 103001 300×6000	212 S 101502 150×3000+
212 S 1501 140×3000+		212 S 1502 140×3000+
212 A 106002 600×12030+		
212 S 101503 150×3000+	212 S 103002 300×6000	212 S 101504 150×3000+
212 S 1503 140×3000+		212 S 1504 140×3000+
212 A 106003 600×12030+		
ラベル 212 S 101505 150×3000+	212 S 103003 300×6000	212 S 101506 150×3000+
212 S 1505 140×3000+		212 S 1506 140×3000+



No 21-2 ラミナ厚21.43 幅105 7層7プライ 150×2940×12030 2枚の内1枚

212 A 106004 600×12030+		
212 S 101507 150×3000+	212 S 103004 300×6000	212 S 101508 150×3000+
212 S 1507 140×3000+		212 S 1508 140×3000+
212 A 106005 600×12030+		
212 S 101509 150×3000+	212 S 103005 300×6000	212 S 101510 150×3000+
212 S 1509 140×3000+		212 S 15010 140×3000+
212 A 106006 600×12030+		
ラベル 212 S 101511 150×3000+	212 S 103006 300×6000	212 S 101512 150×3000+
212 S 15011 140×3000+		212 S 15012 140×3000+



面外曲げ

等級	方向	等級			n	密度	TGH		Efr	MOE		Pmax	σ_b		σ_{bp}	事業		備考
		強度	層	プライ			Ef	Gf		El	Em		Ave.	CV				
Mx60-3-3	強	Mx60	3	3	6	417	8.00	0.209	5.78	6.74	7.76	41.00	30.8	11.2	29.4	H25補正		スギ
Mx60-3-4	強	Mx60	3	4	6	403	7.58	0.167	4.49	6.49	7.17	41.60	29.2	11.2	27.1	H25補正		
Mx60-5-5	強	Mx60	5	5	6	411	6.69	0.262	4.8	5.78	6.33	63.60	28.9	17.1	24.6	H25補正		
Mx60-5-5	強	Mx60	5	5	6	414				6.30	6.34		27.4	10.4		H25補正	幅150	
Mx60-5-5	強	Mx60	5	5	6	417				6.38	6.67		26.1	13.6		H25補正	幅300	
Mx60-5-5	強	Mx60	5	5	6	413				6.34	6.94		25.8	12.1		H25補正	幅600	
Mx60-5-5	強	Mx60	5	5	6	411				6.36	6.88		24.9	11.8		H25補正	幅1200	
Mx60-5-5	強	Mx60	5	5	3	417				6.37			23.4	1.6		H25補正	幅2400	
Mx60-5-7	強	Mx60	5	7	6	416	7.36	0.298	5.68	7.24	6.67	94.30	30.8	8.7	28.0	H25補正		
Mx60-7-7	強	Mx60	7	7	6	405	5.92	0.261	4.28	5.59	5.19	65.60	21.3	9.1	20.7	H25補正		
Mx60-9-9	強	Mx60	9	9	6	408	5.45	0.250	4.05	4.83	4.59	79.70	20.2	10.5	18.8	H25補正		
Mx60-3-3	弱	Mx60	3	3	6	415	0.69	0.186	2.45	0.46	0.47	7.90	5.9	10.7	3.5	H25補正		ヒノキ -スギ 複合
Mx60-3-4	弱	Mx60	3	4	6	413	1.46	0.211	3.47	1.03	1.01	12.60	8.9	10.6	5.3	H25補正		
Mx60-5-5	弱	Mx60	5	5	6	406	1.62	0.158	2.68	1.30	1.34	20.70	9.4	9.0	8.9	H25補正		
Mx60-5-7	弱	Mx60	5	7	6	416	1.12	0.095	2.06	0.64	0.63	17.00	5.5	12.2	3.4	H25補正		
Mx60-7-7	弱	Mx60	7	7	6	403	2.06	0.198	2.89	1.87	1.81	31.20	10.2	9.3	9.0	H25補正		
Mx60-9-9	弱	Mx60	9	9	6	402	2.32	0.216	3.04	2.15	2.09	43.10	10.9	8.1	10.9	H25補正		
Mx90-3-3	強	Mx90	3	3	6	460	12.12	0.272	8.62	10.15	12.3	52.30	39.7	9.9	32.7	H26		
Mx90-3-4	強	Mx90	3	4	6	445	11.02	0.185	6.63	8.90	10.55	50.60	28.7	8.3	26.2	H26		
Mx90-5-5	強	Mx90	5	5	6	434	9.75	0.251	6.48	8.45	9.56	75.00	34.0	12.2	32.8	H26		
Mx90-5-5	強	Mx90	5	5	6	444	9.80	0.244	6.33	9.00	10.03	38.41	35.8	10.4		H26	幅150	
Mx90-5-5	強	Mx90	5	5	6	441	10.31	0.244	6.45	9.07	9.45	75.39	35.2	5.8		H26	幅300	
Mx90-5-5	強	Mx90	5	5	6	446	9.86	0.237	6.46	8.88	9.84	124.50	29.1	5.2		H26	幅600	
Mx90-5-5	強	Mx90	5	5	3	444	9.87	0.255	6.43	8.82	10.2	271.87	31.7	4.6		H26	幅1200	
Mx90-5-5	強	Mx90	5	5	3	439			6.35	9.01	10	508.00	29.6	6.4		H26	幅2400	
Mx90-5-7	強	Mx90	5	7	6	452	11.43	0.284	8.35	9.97	11.2	107.80	35.1	5.7	33.7	H26		
Mx90-7-7	強	Mx90	7	7	6	420	8.43	0.243	5.74	7.59	8.41	84.10	27.5	12.6	26.9	H26		
Mx90-9-9	強	Mx90	9	9	6	424	8.17	0.221	5.36	6.72	7.37	89.40	22.7	13.0	21.2	H26		
Mx90-3-3	弱	Mx90	3	3	6	471	1.90	0.201	2.6	0.55	0.54	8.10	6.1	11.8	3.3	H26		ヒノキ
Mx90-3-4	弱	Mx90	3	4	6	439	1.42	0.425	3.68	1.15	1.14	15.60	8.9	10.3	6.4	H26		
Mx90-5-5	弱	Mx90	5	5	6	432	2.09	0.115	3.03	1.52	1.60	24.10	10.9	14.0	10.2	H26		
Mx90-5-7	弱	Mx90	5	7	6	458	0.99	0.165	2.33	0.81	0.80	17.50	5.7	18.6	2.9	H26		
Mx90-7-7	弱	Mx90	7	7	6	424	3.21	0.100	3.15	2.03	2.10	34.10	11.1	11.0	10.4	H26		
Mx90-9-9	弱	Mx90	9	9	6	425	3.49	0.117	3.24	2.28	2.42	40.90	10.4	9.6	10.1	H26		

Mx90-3-3	強	Mx90	3	3	6	497	12.05		8.94	10.75	12.03	66.97	51.0	11.5		H26愛		ヒノキ
Mx90-3-4	強	Mx90	3	4	6	501	10.68		6.61	9.45	10.41	64.53	36.7	7.5		H26愛		
Mx90-5-5	強	Mx90	5	5	6	501	10.72		7.40	9.53	10.34	77.45	35.4	15.7		H26愛		
Mx90-5-7	強	Mx90	5	7	6	500	12.00		9.02	10.44	11.30	118.8	38.9	16.5		H26愛		
Mx90-7-7	強	Mx90	7	7	6	496	9.19		5.50	8.05	8.76	87.57	28.7	11.4		H26愛		
Mx90-9-9	強	Mx90	9	9	6	501	8.38		5.99	7.27	7.87	99.93	25.4	6.8		H26愛		
Mx90-5-5	弱	Mx90	5	5	6	503	2.51		4.31	2.22	2.25	30.06	13.7	13.9		H26愛		

Mx90-3-3	強	Mx90	3	3	6	530	12.55	0.381	9.07	11.09	11.68		42.2	15.5		H26北		カラマツ ※等級の Mx90は Mx120相 当のラミ ナ品質で あった。
Mx90-3-4	強	Mx90	3	4	6	533	12.40	0.246	7.45	10.72	11.70		32.7	15.4		H26北		
Mx90-5-5	強	Mx90	5	5	6	528	10.89	0.338	7.99	9.87	10.40		33.2	9.4		H26北		
Mx90-5-7	強	Mx90	5	7	6	532	12.79	0.392	9.71	11.4	12.22		33.9	9.1		H26北		
Mx90-7-7	強	Mx90	7	7	6	519	10.14	0.347	7.49	9.08	9.76		25.6	11.4		H26北		
Mx90-9-9	強	Mx90	9	9	6	514	9.12	0.337	6.99	8.16	8.87		21.4	5.9		H26北		
Mx90-3-3	弱	Mx90	3	3	6	532	1.91	0.051	3.69	0.64	0.62		7.5	17.6		H26北		
Mx90-3-4	弱	Mx90	3	4	6	521	2.44	0.157	5.45	1.54	1.51		11.2	6.8		H26北		
Mx90-5-5	弱	Mx90	5	5	6	517	2.44	0.253	4.37	2.22	2.26		13.4	13.8		H26北		
Mx90-5-7	弱	Mx90	5	7	6	559	3.17	0.054	3.35	0.96	0.96		6.3	13.5		H26北		
Mx90-7-7	弱	Mx90	7	7	6	523	3.47	0.257	4.75	3.03	3.13		13.5	11.6		H26北		
Mx90-9-9	弱	Mx90	9	9	6	516	3.69	0.321	5.00	3.53	3.71		13.2	4.4		H26北		

n: 試験体数

TGH Ef: たわみ振動法による面外方向曲げヤング係数 (kN/mm²)

TGH Gf: たわみ振動法による面外方向せん断弾性係数 (kN/mm²)、S=1.18

Efr: 縦振動法による弾性係数 (kN/mm²)

El: 曲げ試験時全たわみから求めた曲げヤング係数 (kN/mm²)

Em: 曲げ試験時荷重点間たわみから求めた曲げヤング係数 (kN/mm²)

σ_b Ave: 曲げ強度 平均値 (N/mm²)

σ_b cv: 曲げ強度 変動係数 (%)

σ_{bp} : 曲げ比例限度応力 (N/mm²)

面外せん断

等級(幅)	方向	等級			n	τ		事業	備考
		強度	層	プライ		Ave.	CV		
Mx60-3-3	強	Mx60	3	3	6	2.97	4.98	H25補正	
Mx60-3-4	強	Mx60	3	4	6	2.18	7.34	H25補正	
Mx60-5-5	強	Mx60	5	5	6	2.27	6.37	H25補正	
Mx60-5-5	強	Mx60	5	5	6	2.38	9.40	H25補正	幅150
Mx60-5-5	強	Mx60	5	5	6	2.45	6.90	H25補正	幅300
Mx60-5-5	強	Mx60	5	5	6	2.43	3.90	H25補正	幅600
Mx60-5-5	強	Mx60	5	5	6	2.34	3.70	H25補正	幅1200
Mx60-5-7	強	Mx60	5	7	6	2.59	5.79	H25補正	
Mx60-7-7	強	Mx60	7	7	6	1.98	3.69	H25補正	
Mx60-9-9	強	Mx60	9	9	6	1.81	8.85	H25補正	
Mx60-3-3	弱	Mx60	3	3	6	0.87	11.20	H25補正	
Mx60-3-4	弱	Mx60	3	4	6	1.50	10.59	H25補正	
Mx60-5-5	弱	Mx60	5	5	6	1.23	10.61	H25補正	
Mx60-5-7	弱	Mx60	5	7	6	0.86	7.00	H25補正	
Mx60-7-7	弱	Mx60	7	7	6	1.39	5.04	H25補正	
Mx60-9-9	弱	Mx60	9	9	6	1.61	7.94	H25補正	
Mx90-3-3	強	Mx90	3	3	6	3.45	7.51	H26	
Mx90-3-4	強	Mx90	3	4	6	2.24	7.86	H26	
Mx90-5-5	強	Mx90	5	5	6	2.47	5.17	H26	
Mx90-5-7	強	Mx90	5	7	6	2.74	4.00	H26	
Mx90-7-7	強	Mx90	7	7	6	2.17	4.90	H26	
Mx90-9-9	強	Mx90	9	9	6	1.77	4.41	H26	
Mx90-3-3	弱	Mx90	3	3	6	0.94	14.60	H26	
Mx90-3-4	弱	Mx90	3	4	6	1.27	13.45	H26	
Mx90-5-5	弱	Mx90	5	5	6	1.27	7.09	H26	
Mx90-5-7	弱	Mx90	5	7	6	0.80	16.18	H26	
Mx90-7-7	弱	Mx90	7	7	6	1.28	11.12	H26	
Mx90-9-9	弱	Mx90	9	9	6	1.28	10.92	H26	
Mx90-3-3	強	Mx90	3	3	6	4.03	8.80	H26愛	
Mx90-3-4	強	Mx90	3	4	6	3.04	5.80	H26愛	
Mx90-5-5	強	Mx90	5	5	6	3.04	4.20	H26愛	
Mx90-5-7	強	Mx90	5	7	4	3.38	5.10	H26愛	
Mx90-7-7	強	Mx90	7	7	4	2.73	4.50	H26愛	
Mx90-9-9	強	Mx90	9	9	4	2.43	4.10	H26愛	
Mx90-5-5	弱	Mx90	5	5	6	1.71	6.80	H26愛	
Mx90-3-3	強	Mx90	3	3	6	3.87	3.67	H26北	
Mx90-3-4	強	Mx90	3	4	6	2.76	1.79	H26北	
Mx90-5-5	強	Mx90	5	5	6	3.40	3.99	H26北	
Mx90-5-7	強	Mx90	5	7	4	3.27	2.24	H26北	
Mx90-7-7	強	Mx90	7	7	4	2.42	1.49	H26北	
Mx90-9-9	強	Mx90	9	9	4	2.06	1.70	H26北	
Mx90-3-3	弱	Mx90	3	3	6	1.16	5.94	H26北	
Mx90-3-4	弱	Mx90	3	4	6	1.28	17.80	H26北	
Mx90-5-5	弱	Mx90	5	5	6	1.64	10.68	H26北	
Mx90-5-7	弱	Mx90	5	7	4	0.88	18.39	H26北	
Mx90-7-7	弱	Mx90	7	7	4	1.41	10.42	H26北	
Mx90-9-9	弱	Mx90	9	9	4	1.55	2.09	H26北	

n: 試験体数

τ Ave: 面外せん断強度 平均値(N/mm²)

τ cv: 面外せん断強度 変動係数(%)

面内曲げ

等級(幅)	方向	等級			n	密度	TGH				Efr	MOE EI	σ_b		事業	備考
		強度	層	プライ			Ef	Gf	Ev	Gv			Ave.	CV		
Mx60-3-3	強	Mx60	3	3	6	417	7.90	0.28	5.71	0.83	5.92	5.34	23.0	17.3	H25補正	スギ
Mx60-3-4	強	Mx60	3	4	6	411	7.07	0.20	4.35	0.82	4.52	4.08	16.5	3.6	H25補正	
Mx60-5-5	強	Mx60	5	5	6	413	6.58	0.25	4.65	0.86	4.67	4.27	19.8	11.8	H25補正	
Mx60-5-7	強	Mx60	5	7	6	414	7.13	0.31	5.60	0.84	5.74	5.23	21.4	6.4	H25補正	
Mx60-7-7	強	Mx60	7	7	6	407	5.63	0.26	4.17	0.84	4.33	3.82	16.1	9.1	H25補正	
Mx60-3-3	弱	Mx60	3	3	6	416			2.42	0.73	2.46	2.22	10.8	14.6	H25補正	
Mx60-3-4	弱	Mx60	3	4	6	412			3.22	0.97	3.39	3.01	13.6	12.5	H25補正	
Mx60-5-5	弱	Mx60	5	5	6	406	1.55	0.17	2.60	0.88	2.69	2.42	11.7	7.3	H25補正	
Mx60-5-7	弱	Mx60	5	7	6	412	0.72	0.25	2.15	0.56	2.14	1.85	8.6	5.6	H25補正	
Mx60-7-7	弱	Mx60	7	7	6	407	2.01	0.21	2.82	0.79	2.92	2.52	12.8	9.7	H25補正	
Mx90-3-3	強	Mx90	3	3	6	462	12.20	0.26	8.65	0.95	8.81	7.87	29.6	8.9	H26	スギ ヒノキ 複合
Mx90-3-4	強	Mx90	3	4	6	443	11.00	0.18	6.43	0.86	6.54	5.86	21.9	5.6	H26	
Mx90-5-5	強	Mx90	5	5	6	432	10.00	0.25	6.46	0.84	6.54	5.84	23.4	9.0	H26	
Mx90-5-7	強	Mx90	5	7	6	452	11.70	0.29	8.47	0.81	8.54	7.60	25.8	11.1	H26	
Mx90-7-7	強	Mx90	7	7	6	415	8.45	0.25	6.00	0.74	3.82	5.30	20.0	10.9	H26	
Mx90-3-3	弱	Mx90	3	3	6	471			2.77	3.34	2.77	2.34	10.0	17.6	H26	
Mx90-3-4	弱	Mx90	3	4	6	438			3.67	0.84	3.76	3.39	13.7	9.4	H26	
Mx90-5-5	弱	Mx90	5	5	6	436	1.84	0.18	3.08	0.85	3.19	2.81	11.8	10.6	H26	
Mx90-5-7	弱	Mx90	5	7	6	456	1.08	0.20	2.41	0.77	2.52	2.13	9.1	11.1	H26	
Mx90-7-7	弱	Mx90	7	7	6	427	2.32	0.20	3.16	0.85	3.27	2.90	11.6	9.4	H26	

n: 試験体数

TGH Ef: たわみ振動法による面外方向曲げヤング係数 (kN/mm²)

TGH Gf: たわみ振動法による面外方向せん断弾性係数 (kN/mm²)、S=1.18

TGH Ev: たわみ振動法による面内方向曲げヤング係数 (kN/mm²)

TGH Gv: たわみ振動法による面内方向せん断弾性係数 (kN/mm²)、S=1.18

Efr: 縦振動法による弾性係数(kN/mm²)

MOE EI: 曲げ試験時全たわみから求めた曲げヤング係数 (kN/mm²)

σ_b Ave: 曲げ強度 平均値 (N/mm²)

σ_b cv: 曲げ強度 変動係数 (%)

σ_{bp} : 曲げ比例限度応力 (N/mm²)

圧縮・短柱

等級(幅)	方向	等級			n	密度	Efr	MOE EI	σ_c		σ_{cp}	事業	事業
		強度	層	プライ					Ave.	CV			
Mx60-3-3	強	Mx60	3	3	6	411	5.20	5.92	23.7	2.5	12.7	H25補正	スギ
Mx60-3-4	強	Mx60	3	4	6	415	4.97	4.19	17.6	2.4	10.3	H25補正	
Mx60-5-5	強	Mx60	5	5	6	414	4.14	4.33	19.6	5.7	11.3	H25補正	
Mx60-5-7	強	Mx60	5	7	6	413	4.65	5.20	23.7	2.2	13.4	H25補正	
Mx60-7-7	強	Mx60	7	7	6	409	3.93	3.98	18.8	2.3	12.2	H25補正	
Mx60-9-9	強	Mx60	9	9	6	406	3.43	3.58	17.9	3.0	11.1	H25補正	
Mx60-3-3	弱	Mx60	3	3	6	397	1.68	1.98	11.0	2.3	6.0	H25補正	
Mx60-3-4	弱	Mx60	3	4	6	411	2.18	3.48	15.3	2.4	9.1	H25補正	
Mx60-5-5	弱	Mx60	5	5	6	401	2.22	2.41	12.4	4.1	7.0	H25補正	
Mx60-5-7	弱	Mx60	5	7	6	410	1.45	1.87	9.7	3.1	5.0	H25補正	
Mx60-7-7	弱	Mx60	7	7	6	401	2.27	2.59	13.5	2.7	7.4	H25補正	
Mx60-9-9	弱	Mx60	9	9	6	403	2.50	2.86	14.0	3.4	7.9	H25補正	
Mx90-3-3	強	Mx90	3	3	6	455	6.75	8.00	33.9	3.3	30.2	H26	スギ・ ヒノキ 複合
Mx90-3-4	強	Mx90	3	4	6	446	5.44	5.89	25.2	4.0	20.5	H26	
Mx90-5-5	強	Mx90	5	5	6	435	5.37	6.14	26.0	3.2	21.3	H26	
Mx90-5-7	強	Mx90	5	7	6	451	7.24	7.87	33.1	1.5	24.4	H26	
Mx90-7-7	強	Mx90	7	7	6	419	5.11	5.35	24.4	3.1	18.0	H26	
Mx90-9-9	強	Mx90	9	9	6	418	4.59	4.90	22.7	3.4	16.2	H26	
Mx90-3-3	弱	Mx90	3	3	6	471	2.18	2.57	15.9	5.0	11.0	H26	
Mx90-3-4	弱	Mx90	3	4	6	436	3.01	3.33	20.4	5.4	14.2	H26	
Mx90-5-5	弱	Mx90	5	5	6	432	2.85	2.89	16.7	3.6	12.0	H26	
Mx90-5-7	弱	Mx90	5	7	6	459	2.11	2.14	14.2	2.4	8.7	H26	
Mx90-7-7	弱	Mx90	7	7	6	423	3.06	2.90	17.1	4.5	11.4	H26	
Mx90-9-9	弱	Mx90	9	9	6	428	3.13	3.01	18.5	2.8	11.0	H26	
Mx90-3-3	強	Mx90	3	3	6	496	7.25	8.16	34.0	3.7		H26愛	ヒノキ
Mx90-3-4	強	Mx90	3	4	6	506	5.03	5.96	26.5	2.7		H26愛	
Mx90-5-5	強	Mx90	5	5	6	494	6.40	6.75	29.2	3.0		H26愛	
Mx90-5-7	強	Mx90	5	7	4	503	8.36	8.73	35.7	2.9		H26愛	
Mx90-7-7	強	Mx90	7	7	4	495	5.78	5.86	26.8	0.7		H26愛	
Mx90-9-9	強	Mx90	9	9	4	504	5.49	5.83	26.2	1.5		H26愛	
Mx90-5-5	弱	Mx90	5	5	6	496	4.06	4.22	20.8	2.4		H26愛	カラマツ ※等級 のMx90 はMx120 相当のラ ミナ品質 であつ た。
Mx90-3-3	強	Mx120	3	3	6	540	7.87	8.67	34.1	3.8	20.4	H26北	
Mx90-3-4	強	Mx120	3	4	6	529	5.09	7.05	26.1	3.4	15.5	H26北	
Mx90-5-5	強	Mx120	5	5	6	527	7.23	7.42	29.4	3.8	16.3	H26北	
Mx90-5-7	強	Mx120	5	7	4	539	9.04	9.61	33.9	3.5	20.2	H26北	
Mx90-7-7	強	Mx120	7	7	4	524	6.90	7.20	27.9	3.3	15.4	H26北	
Mx90-9-9	強	Mx120	9	9	4	514	6.36	6.84	26.1	4.7	14.3	H26北	
Mx90-3-3	弱	Mx120	3	3	6	536	2.58	3.35	15.6	4.2	8.7	H26北	
Mx90-3-4	弱	Mx120	3	4	6	518	4.12	5.26	21.4	5.0	13.0	H26北	
Mx90-5-5	弱	Mx120	5	5	6	514	3.98	4.06	17.8	4.8	10.3	H26北	
Mx90-5-7	弱	Mx120	5	7	4	542	2.61	2.93	14.8	6.4	9.5	H26北	
Mx90-7-7	弱	Mx120	7	7	4	527	4.27	4.35	19.5	1.7	11.1	H26北	
Mx90-9-9	弱	Mx120	9	9	4	518	4.67	4.62	20.5	3.3	11.8	H26北	

n: 試験体数

Efr: 縦振動法による弾性係数(kN/mm²)

MOE EI: 圧縮試験時変位量から求めた圧縮ヤング係数(kN/mm²)

σ_c Ave: 圧縮強度 平均値(N/mm²)

σ_c cv: 圧縮強度 変動係数(%)

σ_{cp} : 圧縮比例限度応力(N/mm²)

引張り

等級(幅)	方向	等級		n	密度	TGH				Efr	MOE		σ_t		σ_{tp}	備考 試験体幅	事業	事業
		強度	層 プライ			Ef	Gf	Ev	Gv		Et	Ave.	CV					
Mx60-3-3	強	Mx60	3	3	6	413	7.06	0.53	5.79	0.84	5.71	5.19	16.8	8.2	13.6	300	H25補正	スギ
Mx60-3-4	強	Mx60	3	4	6	405	7.83	0.16	4.38	0.79	4.43	4.04	12.0	9.6	9.52	300	H25補正	
Mx60-5-5	強	Mx60	5	5	6	412	6.85	0.24	4.75	0.82	4.71	4.34	14.3	7.8	11.2	300	H25補正	
Mx60-5-5	強	Mx60	5	5	6	416					4.59	3.97	13.1	8.3	8.76	150	H25補正	
Mx60-5-5	強	Mx60	5	5	6	409					4.74	4.32	12.7	7.8	8.95	300	H25補正	
Mx60-5-5	強	Mx60	5	5	6	411					4.71	4.35	12.6	6.0	11.1	600	H25補正	
Mx60-3-3	弱	Mx60	3	3	6	411					2.49	0.81	6.7	14.4	5.26	300	H25補正	
Mx60-3-4	弱	Mx60	3	4	6	413					3.45	0.73	10.1	9.9	8.66	300	H25補正	
Mx60-5-5	弱	Mx60	5	5	6	403	1.31	0.26	2.72	0.74	2.62	2.24	8.3	4.7	6.37	300	H25補正	
Mx90-3-3	強	Mx90	3	3	6	461	11.80	0.26	8.52	0.95	8.61	8.18	20.5	12.7	19.0	300	H26	スギ- ヒノキ 複合
Mx90-3-4	強	Mx90	3	4	6	442	10.90	0.18	6.49	0.83	6.62	6.26	16.6	5.8	15.6	300	H26	
Mx90-5-5	強	Mx90	5	5	6	436	10.00	0.25	6.51	0.87	6.61	6.06	16.3	6.6	13.9	300	H26	
Mx90-5-5	強	Mx90	5	5	12	433	9.92	0.23	6.45	0.99	6.69	6.17	15.9	7.7	13.8	150	H26	
Mx90-5-5	強	Mx90	5	5	6	435	9.94	0.23	6.65	0.88	6.78	6.43	16.1	6.1	14.5	300	H26	
Mx90-5-5	強	Mx90	5	5	6	432	9.94	0.24	6.55	0.91	6.72	6.32	15.8	6.9	14.5	600	H26	
Mx90-3-3	弱	Mx90	3	3	6	468					2.68	0.81	6.1	14.4	5.79	300	H26	
Mx90-3-4	弱	Mx90	3	4	6	436					3.67	0.80	9.1	9.5	8.39	300	H26	
Mx90-5-5	弱	Mx90	5	5	6	433	1.81	0.20	3.02	0.90	3.16	2.8	7.9	14.4	6.69	300	H26	

n:試験体数

TGH Ef:たわみ振動法による面外方向曲げヤング係数(kN/mm2)

TGH Gf:たわみ振動法による面外方向せん断弾性係数(kN/mm2)、S=1.18

TGH Ev:たわみ振動法による面内方向曲げヤング係数(kN/mm2)

TGH Gv:たわみ振動法による面内方向せん断弾性係数(kN/mm2)、S=1.18

Efr:縦振動法による弾性係数(kN/mm2)

MOE Et:引張り試験時変位量から求めた引張りヤング係数(kN/mm2)

σ_t Ave:引張り強度 平均値(N/mm2)

σ_t cv:引張り強度 変動係数(%)

σ_{tp} :引張り比例限度応力(N/mm2)

執 筆 者

氏 名	所 属	担 当
宮武 敦 (研)森林総合研究所)		はじめに、1.1.1、 1.2.3、3.2.1、 3.4.1、4.
藤田 和彦 広島県立総合技術研究所林業技術センター		1.1.2a、1.2a
中原 亨 鹿児島県工業技術センター		1.1.2b、1.2b
園田 里見 富山県農林水産総合技術センター 木材研究所		2.1
槌本 敬大 (研)建築研究所)		2.2.1、2.2.2
新藤 健太 (研)森林総合研究所)		1.3
野田 康信 (研)森林総合研究所)		2.2.3、3.2b
渋沢 龍也 (研)森林総合研究所)		3.1
宮本 康太 (研)森林総合研究所)		3.1
中島 史郎 宇都宮大学		3.2a
荒木 康弘 (研)建築研究所)		3.4.2、3.4.3
中島 昌一 宇都宮大学		3.4.2、3.4.3
佐々木貴信 秋田県立大学 木材高度加工研究所		3.5a
林 知行 秋田県立大学 木材高度加工研究所		3.5a
平松 靖 (研)森林総合研究所)		3.5b

