

平成29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30年3月

国立研究開発法人 森林研究・整備機構 森林総合研究所

国立研究開発法人 建築研究所

国立大学法人 宇都宮大学

愛媛県農林水産研究所 林業研究センター

広島県立総合技術研究所 林業技術センター

富山県農林水産総合技術センター 木材研究所

地方独立行政法人 北海道立総合研究機構 林産試験場

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「直交集成板の日本農林規格（JAS 規格）」が、また、平成 28 年には CLT を一般的な建築材料として普及するための建築関係基準等が制定された。

そのような中、CLT 構造の建築関係基準等のなかで JAS 規格に則った製造条件の範囲内であっても除外されている製品仕様について引き続きデータ収集を行なってきた。これらのデータを踏まえ、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、また、平成 29 年 2 月から見直しが始まった直交集成板の JAS 規格の見直しにおいてより合理的な根拠に基づいた改正を提案する観点から、CLT 強度試験データの追加的収集・分析を行い、CLT のさらなる普及促進に資するため、本事業を実施した。

平成 28 年度に制定された建築関係基準の適用範囲を広げるための課題として、スギ以外の樹種におけるラミナ形状・寸法が各種強度性能に与える影響について取り上げ、ヒノキおよびカラマツを対象としてデータ収集を実施した。日本農林規格では、ラミナ幅の厚さに対する比（以下、幅厚さ比と示す）は、平行層にあっては 1.75 以上、直交層にあっては 3.5 以上となっている。この基準は欧米の樹種において確認されたデータを根拠としているが、我が国の樹種において試験研究により最適なラミナ形状・寸法の影響が確認された例は少ない。これまで実施されたスギにおける試験研究によると、その影響が大きいと予想されてきた面外せん断性能以外にも面内曲げ性能や引張性能においてその影響が確認されている。また、北海道立総合研究機構林産試験場では、スギと同等の密度であるトドマツが、せん断性能においてスギよりも低い可能性があることを確認している。これらが、樹種の影響によるものか製造条件によるものか確認し、樹種の適用範囲拡大における問題点の整理を行う必要がある。

ヒノキについて、面外曲げ、面外せん断、面内曲げ性能は平成 26 年林野庁事業でヒノキ CLT に関するデータ収集を実施した実績に基づいて愛媛県農林水産研究所林業研究センターが、面内せん断および引張性能は、既往の試験方法や強度データとの一貫性を担保する観点からそれぞれ建築研究所および森林総合研究所が、長期面外曲げ性能は長年の研究実績のある広島県立総合技術研究所林業技術センターが、直交層挙動の影響解析はこれまでの実施内容との比較解析において富山県農林水産総合技術センター木材研究所が、座屈性能は、これまでの強度データとの比較において宇都宮大学と森林総合研究所が実施した。

カラマツについて、CLT の各種強度性能について独自に試験研究を行ってきた実績に基づいて北海道立総合研究機構林産試験場が実施した。

本事業の実施において、試験体の製造管理を一般社団法人日本 CLT 協会が、学識経験者による有識者会議の開催と報告書取りまとめを公益社団法人日本木材加工技術協会が行った。

また、本事業の実施にあたり静岡大学安村基教授を委員長とする有識者会議の委員の皆様からは有益な多くのご助言をいただいた。ここに記してお礼申し上げる。

なお、平成 27 年度林野庁事業において試験評価を開始したスギ 7 層 7 プライ CLT の長期性能のデータ収集状況について、その途中経過を本報告書の第 4 章に報告した。CLT の一般的な利用・普及において貴重なデータなのでご参考になれば幸いである。

平成 29 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	ヒノキ CLT の各種強度性能に与えるラミナの寸法形状の影響	1
1.1	試験体の概要	1
1.2	面外曲げ性能	8
1.3	面外せん断	13
1.4	長期面外曲げ変形	23
1.5	面内曲げ性能	36
1.6	面内せん断性能	41
1.7	引張り性能	45
1.8	圧縮・短柱性能	50
1.9	座屈性能	57
2	カラマツ CLT の各種強度性能に与えるラミナの寸法形状と幅はぎの影響	60
2.1	試験体の概要	60
2.2	面外曲げ性能	64
2.3	面外せん断性能	67
2.4	長期面外曲げ変形	81
2.5	面内曲げ性能	88
3	CLT における直交層のせん断弾性係数とせん断強度	91
3.1	はじめに	91
3.2	実験方法（層内せん断試験）	91
3.3	試験結果	95
3.4	考察	105
3.5	まとめ	114
3.6	（資料）前年度までの事業の試験体の含水率	115
4	スギ 7 層 7 プライの長期性能評価	117
4.1	長期性能評価の目的	117
4.2	試験体	117
4.3	試験方法	117
4.4	応力レベルの決定	118
4.5	スギ CLT の長期変形挙動の測定結果	119
4.6	スギ CLT の荷重レベルと破壊時間の測定結果	120
5	まとめ	122
付録		
	第 1 回推進委員会議事録	124
	第 2 回推進委員会議事録	128
	試験体採材図	132

1 ヒノキ CLT の各種強度性能に与えるラミナの寸法形状の影響

1.1 試験体の概要

1.1.1 試験体

i) CLT パネル

試験体は、幅 2100mm×長さ 8000mm の CLT パネルから採材することとした。層構成は 5 層 5 プライとし、ラミナ厚さ 25mm、パネル厚さ 125mm とした。直交層ラミナの幅は、75mm、105mm、124mm とした。それぞれのラミナ幅／厚さ比は、3.0、4.2、4.96 である。また、平行層ラミナの幅は 105mm とした。

乾燥ラミナの寸法は、厚さ 29mm、長さ 3m とし、幅は 75mm 用が 84mm、105mm 用が 109mm、124mm 用が 128mm であった。

平行層用ラミナはフィンガージョイントで所定の長さにてたて継ぎして用いた。内層直交層用ラミナのうち幅 75mm 用は予め所定長さ 2095mm にカットしたものを用了。一方、幅 105mm 用および 124mm 用は 3 m ラミナをたて継ぎし所定長さ 2095mm にカットして用了。フィンガージョイント形状は、水平型、長さ 15mm、接着剤には水性高分子イソシアネート系樹脂を用了。

積層接着は、接着剤に水性高分子イソシアネート系樹脂を用以て、幅はぎ接着しないで行った。圧縮時間は 1 時間であった。

積層接着後は一定期間養生した後、各種強度試験体を採材した。

ii) ラミナの等級区分

本報告書では、今年度事業で用了ヒノキ CLT の強度等級を Mx90 と表記するが、実際には、外層ラミナは M120、内層ラミナは M60 に相当する品質を持っていた可能性があることに留意して欲しい。以下にその経緯を説明する。

試験体製造に必要なラミナは、必要数量を試算したうえで愛媛県林業研究センターの協力を得て調達した。調達の関係でラミナを製材する原木は、それぞれのラミナ幅毎に異なった。ラミナ機械等級区分用区分値と選別枚数および原料ラミナ幅別の曲げヤング係数統計値を表 1.1-1 に示す。

外層用ラミナは、幅 109mm の 2004 枚のうち曲げヤング係数(以下 MOE)が 11.7kN/mm² 以上のもの 1063 枚と幅 128mm の 591 枚のうち MOE が 11.7~13.2kN/mm² のもの 100 枚、合わせて 1163 枚を用了。内層用のうち平行層用と直交層幅 105mm 用ラミナは、幅 109mm の 2004 枚のうち MOE が 11.7 kN/mm²未満のもの 920 枚と幅 128mm の 591 枚のうち MOE が 11.7 kN/mm²未満のもの 10 枚、合わせて 930 枚を用了。内層用のうち直交層幅 124mm 用ラミナは、幅 128mm の 591 枚のうち MOE が 11.7 kN/mm²未満のもの 350 枚を用了。また、内層用のうち直交層幅 75mm 用ラミナは、幅 84mm の 792 枚のうち MOE が 12.7 kN/mm²未満のもの 720 枚を用了。

同表に示したように、今回対象としたラミナ全 3387 枚の平均値に対して、109mm と 128mm のものは全平均値より高く (3~5%)、84mm は平均値より低かった (15%)。

最終的な用途別ラミナの曲げヤング係数の統計値を表 1.1-2 に、分布のヒストグラムを図 1.1-1 に示す。

外層用ラミナの曲げヤング係数は、平均値で 13.09kN/mm²、最小値で 11.66 kN/mm² となっており、JAS 規格上は M120 (平均 12.0 kN/mm²以上、下限値 10.5 kN/mm²以上) に相当する品質を有していたと考えられる。内層用ラミナは、ラミナ幅によって曲げヤング係数の分布が異なるが、いずれも M60 (平均 6.0 kN/mm²以上、下限値 5.0 kN/mm²以上) の品質は有していると考えられた。

表 1.1-1 ラミナ機械等級区分用区分値と選別枚数および原料ラミナ幅別の曲げヤング係数統計値

乾燥ラミナ幅(mm)		109	128	84	全体
外層・平行層	105mm用	11.7kN/mm ² 以上	11.7~13.2kN/mm ²	—	1163枚
		1063枚	100枚		
内層・平行層/直交層	105mm用	11.7kN/mm ² 未満	11.7kN/mm ² 未満	—	930枚
		920枚	10枚		
内層・直交層	124mm用	—	12.3kN/mm ² 未満 350枚	—	350枚
内層・直交層	75mm用	—	—	12.7kN/mm ² 未満 720枚	720枚
統計値 原料ラミナ 曲げヤング係数 (kN/mm ²)	平均値	11.79	11.51	9.49	11.20
	最小値	6.13	5.53	5.03	5.03
	最大値	19.35	16.42	15.31	19.35
	標準偏差	1.94	1.68	1.67	2.07
	変動係数	16.4%	14.6%	17.6%	18.4%
	枚数	2004	591	792	3387

表 1.1-2 用途別ラミナの曲げヤング係数の統計値

ラミナ幅(mm)	外層・平行層	内層・平行層/直交層	内層直交層	内層直交層
	105mm用	105mm用	124mm用	75mm用
平均値	13.09	10.14	10.69	9.32
最小値	11.66	6.13	5.53	5.03
最大値	19.35	11.65	12.24	12.70
標準偏差	1.15	1.12	1.31	1.47
変動係数	8.8%	11.0%	12.2%	15.8%

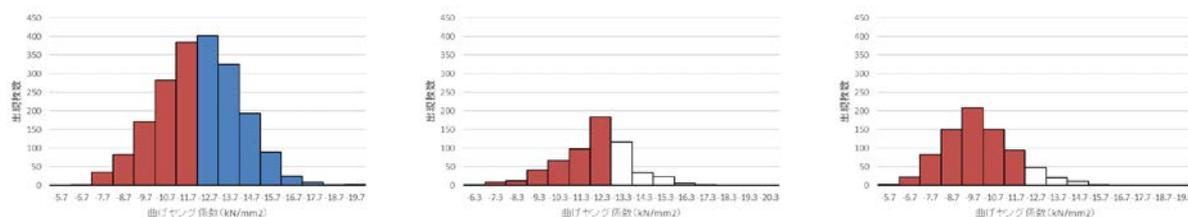


図 1.1-1 ラミナ幅および用途別の曲げヤング係数の分布

左：幅 105mm（青：外層用、茶：内層用）、中：幅 124mm 用、右：幅 75mm 用

1.1.2 試験体製造に用いたラミナの材質

i) 供試ラミナの非破壊試験結果

供試ラミナとして、長さが 3m、断面寸法が 25×105mm で、強度等級が M90 および M60 のたて継ぎラミナをそれぞれ 101 体、96 体準備した。すべての供試ラミナの密度と縦振動法によるヤング係数を測定した。結果を表 1.1-3 に示す。これらの供試ラミナから、ヤング係数の平均値と変動係数がほぼ等しくなるように、エッジワイズ曲げ、フラットワイズ曲げ、縦引張り、縦圧縮試験体を M90 ラミナ、M60 ラミナでそれぞれ 27 体、約 23 体切り出した。その際、フィンガージョイントが荷重点間あるいはスパン内に 1 つ含まれるようにしたが、節は考慮しなかった。

表 1.1-3 供試ラミナの非破壊試験の結果

	M90 ラミナ(n=101)		M60 ラミナ(n=96)	
	密度 (kg/m ³)	Efr (kN/mm ²)	密度 (kg/m ³)	Efr (kN/mm ²)
平均値	487	13.1	481	10.7
最小値	427	10.2	398	6.89
最大値	576	16.3	579	12.7
標準偏差	32.9	1.14	38.8	1.30
変動係数(%)	6.75	8.72	8.07	12.2

n：試験体数、Efr：縦振動法によるヤング係数

ii) ラミナの縦引張り試験結果

供試ラミナから切り出した縦引張り試験体を用いて縦引張り試験を行なった。縦引張り試験体の長さは 1800mm とした。縦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再度測定した。縦引張り試験には飯田工業製 NET-40 を用いた。縦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 520mm 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ほぼ中央に位置するように配置した。縦引張り試験後、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。M90 ラミナの縦引張り試験の様子を写真 1.1-1、1.1-2 に示す。



写真 1.1-1 (左)、1.1-2 (右) M90 ラミナの縦引張り試験の様子 (左：側面、右：上面)

M90 ラミナおよび M60 ラミナの破壊形態について、各個数と割合を表 1.1-4 に示す。また、破壊形態の例を写真 1.1-3~1.1-12 に示す。M90 ラミナはすべての試験体が FJ に関する破壊を生じたが、M60 ラミナは節単独の破壊が 3 割を占めていた。

表 1.1-4 ラミナ縦引張り試験の破壊形態の個数と割合

破壊形態	M90 ラミナ		M60 ラミナ	
	個数	割合(%)	個数	割合(%)
フィンガージョイント (FJ)	19	70	11	48
節 (K)	-	-	7	30
節が主、フィンガージョイントが従 (K+FJ)	5	19	1	4
フィンガージョイントが主、節が従 (FJ+K)	2	7	2	9
フィンガージョイントが主、繊維傾斜が従 (FJ+G)	1	4	1	4
繊維傾斜が主、フィンガージョイントが従 (G+FJ)	-	-	1	4
合計	27	100	23	100

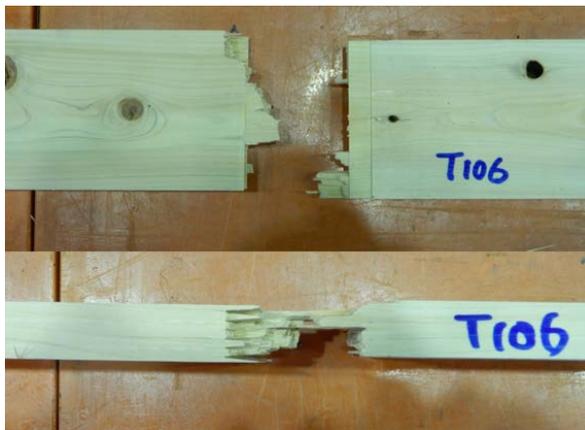


写真 1.1-3 M90 ラミナ FJ による破壊



写真 1.1-4 M90 ラミナ K+FJ による破壊



写真 1.1-5 M90 ラミナ FJ+K による破壊



写真 1.1-6 M90 ラミナ FJ+G による破壊

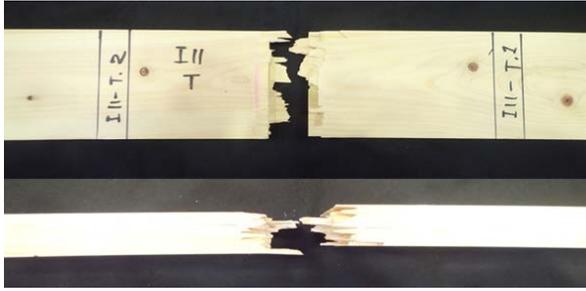


写真 1.1-7 M60 ラミナ FJ による破壊

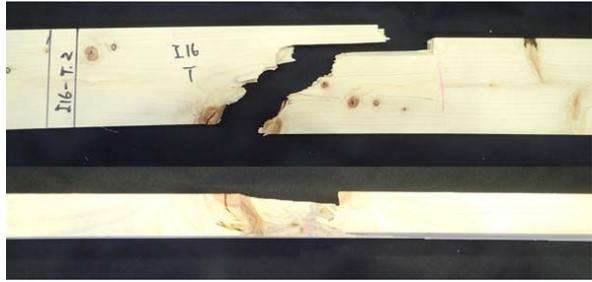


写真 1.1-8 M60 ラミナ K による破壊

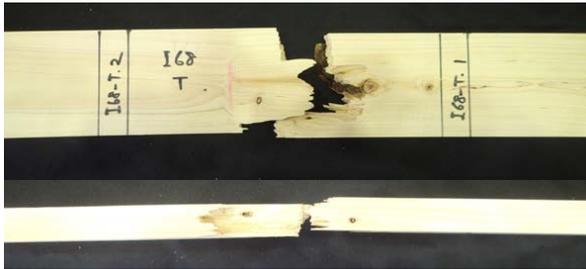


写真 1.1-9 M60 ラミナ K+FJ による破壊



写真 1.1-10 M60 ラミナ FJ+K による破壊

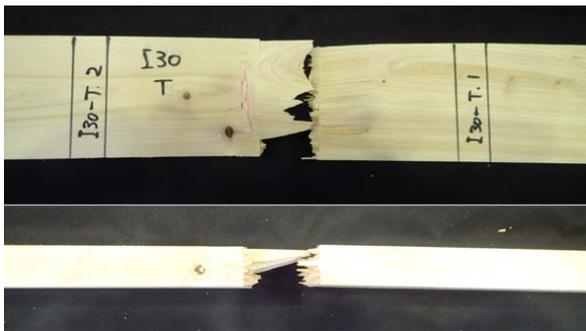


写真 1.1-11 M60 ラミナ FJ+G による破壊

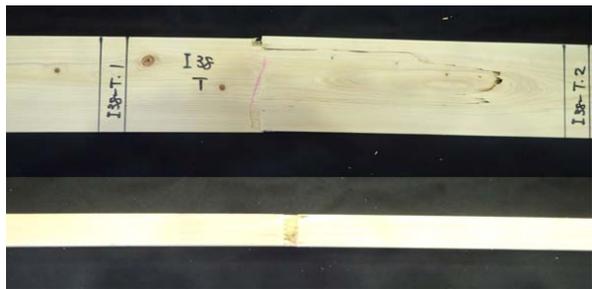


写真 1.1-12 M60 ラミナ G+FJ による破壊

M90 ラミナおよび M60 ラミナの縦引張り試験の結果を非破壊試験の結果を含めてそれぞれ表 1.1-5、1.1-6 に示す。M90 ラミナの縦引張り試験の結果、縦引張り強度の平均値は 32.7N/mm^2 、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）は 18.7N/mm^2 となり、直交集成板の日本農林規格に示された M90 の引張り強さの基準値（平均値 20.5N/mm^2 、下限値 15.5N/mm^2 ）をそれぞれ上回った。一方、M60 ラミナについても、縦引張り強度の平均値は 24.1N/mm^2 、正規分布を仮定した 5% 下限値は 13.7N/mm^2 となり、同 M60 の引張り強さの基準値（平均値 16.0N/mm^2 、下限値 12.0N/mm^2 ）をそれぞれ上回った。

表 1.1-5 M90 ラミナ (n=27) の縦引張り試験の結果

番号	密度(kg/m ³)	Efr	σt	含水率 (%)	破壊形態
2	477	11.9	28.8	9.90	FJ+K
6	519	11.1	24.8	10.2	FJ
8	564	12.0	27.8	9.98	K+FJ
20	458	12.6	25.9	9.10	FJ
24	464	13.7	49.6	9.43	FJ
25	445	13.5	37.6	9.16	K+FJ
26	504	14.0	32.6	8.53	FJ
27	459	14.8	40.7	8.83	FJ
28	470	12.3	29.4	9.07	FJ
36	505	13.5	41.1	8.58	FJ+K
38	494	12.3	38.5	8.17	FJ
40	493	14.1	35.6	8.79	FJ
42	475	15.6	36.8	8.63	FJ
47	474	13.5	33.5	8.25	FJ
53	539	14.6	23.3	8.43	K+FJ
56	480	11.5	32.8	9.05	FJ
58	466	12.5	40.3	8.57	FJ
72	491	13.6	34.7	8.78	FJ
73	424	12.8	33.1	8.62	FJ
74	491	12.8	37.1	8.80	FJ
78	546	12.3	19.5	8.80	K+FJ
79	529	13.5	37.8	8.00	FJ
95	477	12.5	16.6	8.41	FJ+G
96	474	11.1	20.9	8.48	K+FJ
97	457	12.0	35.3	9.62	FJ
105	453	11.6	32.6	10.1	FJ
106	543	12.6	35.7	9.80	FJ
平均値	488	12.9	32.7	8.97	
最小値	424	11.1	16.6	8.00	
最大値	564	15.6	49.6	10.2	
標準偏差	34.1	1.14	7.45	0.615	
変動係数(%)	6.99	8.83	22.8	6.86	

Efr : 縦振動法によるヤング係数 (単位 kN/mm²)

σt : 縦引張り強度 (単位 N/mm²)

表 1.1-6 M60 ラミナ (n=23) の縦引張り試験の結果

番号	密度(kg/m ³)	Efr	σ_t	含水率 (%)	破壊形態
11	479	12.1	30.1	9.97	FJ
13	524	12.1	25.2	9.08	FJ
14	495	11.7	33.0	8.59	K (チャック部)
15	491	11.3	20.4	8.44	FJ
16	525	10.4	19.2	8.80	K
20	530	9.05	20.7	9.10	K
22	584	7.15	24.8	9.08	K
23	458	8.52	18.7	8.92	FJ
28	459	11.8	26.0	8.19	FJ
30	479	10.0	9.75	8.78	FJ+G
38	480	11.7	30.0	7.87	G+FJ
40	468	11.8	29.3	9.10	FJ
41	507	10.1	21.9	7.84	K
50	415	10.2	20.2	8.79	K
57	500	10.0	15.5	7.21	K
58	489	13.2	26.7	7.45	FJ
59	461	11.1	28.6	7.60	FJ+K
60	454	10.6	30.2	7.68	FJ
61	495	13.1	26.2	7.88	FJ
62	507	10.6	21.4	7.59	FJ+K
68	489	8.88	22.6	7.54	K+FJ
69	463	8.79	26.7	7.38	FJ
70	459	8.72	27.1	7.12	FJ
平均値	487	10.6	24.1	8.26	
最小値	415	7.15	9.75	7.12	
最大値	584	13.2	33.0	10.0	
標準偏差	34.1	1.55	5.46	0.773	
変動係数(%)	6.99	14.7	22.7	9.36	

Efr : 縦振動法によるヤング係数 (単位 kN/mm²)

σ_t : 縦引張り強度 (単位 N/mm²)

1.2 面外曲げ性能

1.2.1 試験方法

面外曲げ試験の試験体の概要を表 1.2-1 に示す。試験体は全層ヒノキで直交層ラミナの幅が 75mm、105mm、124mm の異なる 3 種である。寸法は幅が 300mm、厚みが 125mm、長さは厚みの 23 倍となる 2,875mm である。

面外曲げ試験の前に、縦振動法による縦振動ヤング係数を、たわみ振動法(T.G.H.法)による面外方向の曲げヤング係数及びせん断弾性係数をもとめた。縦振動法では、小型 FFT 分析器 (リオン㈱ SA-78) にマイクロフォンを用いて、たわみ振動法では同器に加速度ピックアップを用いて、固有振動数の測定を行った。

面外曲げ試験は、直交集成板の JAS に準拠し、支点間距離は試験体の材せいの 21 倍とした 2,625mm、荷重点間距離は材せいの 7 倍とした 875mm の 3 等分点 4 点荷重方式で行った。試験には実大木材強度試験機 (㈱東京衡機、最大容量 1,000kN) を使用した。载荷中は試験体の支点間中央におけるたわみを試験体の両側面で変位計 (㈱東京測器研究所 CDP-100) を用いて測定し、その平均値をたわみとした。さらに、荷重点間のたわみを袴型治具により変位計 (㈱東京測器研究所 CDP-10) を用いて測定した。試験終了後は、破壊部の近傍から長さ約 30 mm の含水率測定用の試験片を採取し、全乾重量法で含水率を求めた。試験の状況を写真 1.2-1 に示す。

表 1.2-1 面外曲げ試験 試験体の概要

番号 区分	構成	ラミナの寸法			試験体 寸法			外層の 方向	試験 体数
		厚み	幅		幅	厚み	長さ		
			平行層	直交層					
75	5層5プライ Mx90	25	105	75	300	125	2,875	強軸	6
105	5層5プライ Mx90	25	105	105	300	125	2,875	強軸	6
124	5層5プライ Mx90	25	105	124	300	125	2,875	強軸	6



写真 1.2-1 面外曲げ試験の状況

1.2.2 結果及び考察

面外曲げ試験の結果を表 1.2-2、図 1.2-1~1.2-2 に、荷重—スパン中央変位曲線を図 1.2-3~1.2-5 に、破壊形態の例を写真 1.2-2~1.2-8 に示す。

曲げ強さの平均値は、試験体 75 で 35.1N/mm^2 、105 で 36.2N/mm^2 、124 で 37.1N/mm^2 と顕著な差はなかった。ヤング係数の平均について、たわみ振動法による曲げヤング係数 (E_{TGHf}) と実験による真の曲げヤング係数 (E_{tru}) とも、試験体 75、105、124 の間に顕著な差はなく同程度で、 E_{TGHf} と E_{tru} はよく一致した。せん断の影響を含む見かけのヤング係数 (E_{app}) は、試験体 105 と 124 は同程度であったが、75 は 105 や 124 に比べ 5%程度低い値であった。たわみ振動法のせん断弾性係数 (G_{TGHf}) はラミナ幅が大きくなるほど高くなっており、試験体 105 と 124 は同程度であるのに対し、75 は 30%程度低い値であった。

直交層は曲げ性能にほとんど寄与していないことから、曲げ強さにはラミナ幅の影響は生じなかったと推察されるが、見かけの曲げヤング係数については試験体 75 が他より 5%低い値となった。これは、試験体 75 のせん断弾性係数 (G_{TGHf}) が他より 30%ほど低いため、曲げにおいて層内せん断変形を起こしやすくなったことが影響し、わずかに曲げヤング係数が低くなったものと推察されるが、さらに検証が必要である。

なお、試験体 75-5 の曲げ強さは 43.8N/mm^2 で同種の他の試験体より高かったが、引張側最外層の荷重点間に FJ が無かったためと推察される。また、試験体 75 は直交層ラミナの幅の厚み比が 3.0 で、JAS の基準の 3.5 倍以上を満たしていないが、曲げ強さは JAS の基準値を超えた。

破壊形態は、主に引張側ラミナの FJ を起因としたもので、全て曲げ型の破壊であった。また、引張側ラミナが破壊箇所からその上の直交層との境近傍を割けるように破壊が横に広がっている性状のものが特に試験体 75 で多かった。試験体 124-6 は最終破壊と同時に引張側の中央のラミナが直交層ラミナとの境に沿ってせん断破壊した (写真 1.2-8)。

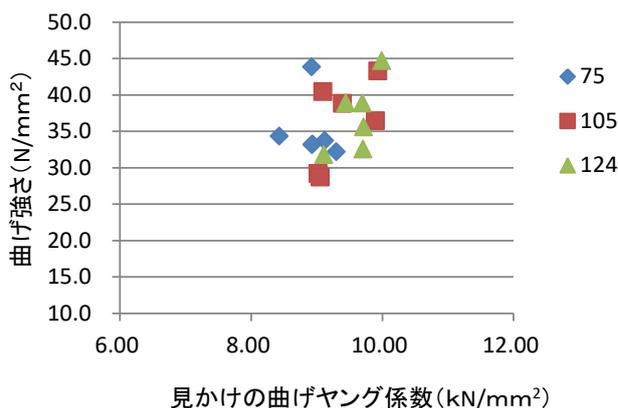


図 1.2-1 面外曲げのヤング係数と曲げ強さの関係

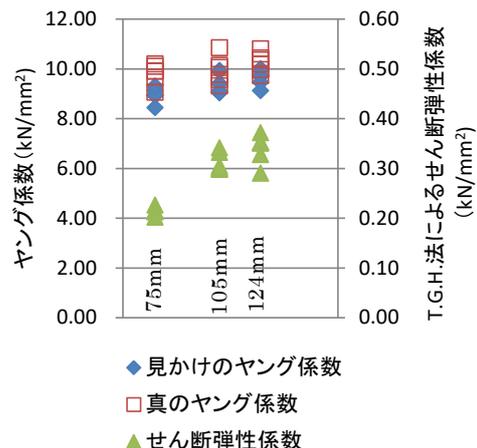


図 1.2-2 直交層ラミナの幅と面外曲げヤング係数及びせん断弾性係数の関係

表 1.2-2 面外曲げ試験の結果

試験体 番号	密度 kg/m ³	E _{fr} kN/mm ²	E _{TGHf} kN/mm ²	G _{TGHf} kN/mm ²	E _{TGHf} /G _{TGHf}	E _{app} kN/mm ²	E _{tru} kN/mm ²	σ N/mm ²	Pmax kN	δ max mm	比例限度 荷重 kN	比例限度 荷重時の たわみ mm	比例限度 荷重 /Pmax	変位 比例限度 荷重時 /Pmax時	含水率 %
75-1	478	7.69	10.16	0.23	44.93	8.93	9.67	33.2	61.60	43.7	61.4	43.7	1.00	1.00	10.1%
75-2	494	7.49	10.56	0.21	49.46	9.13	10.20	33.7	62.40	56.3	59.3	41.2	0.95	0.73	10.6%
75-3	489	7.44	9.84	0.21	46.28	8.43	9.06	34.4	63.90	54.1	61.3	46.1	0.96	0.85	10.6%
75-4	494	7.36	10.21	0.21	48.11	8.94	9.91	33.2	61.65	43.9	61.6	43.9	1.00	1.00	10.3%
75-5	489	7.45	10.19	0.21	47.70	8.92	9.92	43.8	80.80	62.7	61.5	43.8	0.76	0.70	10.6%
75-6	474	7.61	10.48	0.20	52.04	9.30	10.10	32.2	59.70	40.6	59.5	40.6	1.00	1.00	10.8%
平均	486	7.51	10.24	0.21	48.09	8.94	9.81	35.1	65.01	50.2	60.8	43.2	0.94	0.88	10.5%
最小値	474	7.36	9.84	0.20	44.93	8.43	9.06	32.2	59.70	40.6	59.3	40.6	0.76	0.70	10.1%
最大値	494	7.69	10.56	0.23	52.04	9.30	10.20	43.8	80.80	62.7	61.6	46.1	1.00	1.00	10.8%
標準偏差	8.51	0.12	0.26	0.01	2.49	0.29	0.41	4.34	7.85	8.75	1.08	1.99	0.09	0.14	0.26%
変動係数	1.75%	1.60%	2.50%	3.68%	5.17%	3.26%	4.17%	12.38%	12.08%	17.42%	1.77%	4.62%	9.77%	15.96%	2.49%
105-1	490	8.00	11.12	0.30	37.28	9.93	10.85	43.3	80.20	67.9	59.2	37.3	0.74	0.55	10.3%
105-2	495	7.47	10.09	0.30	33.21	9.10	9.32	40.4	74.70	57.0	57.2	39.8	0.77	0.70	10.0%
105-3	490	7.44	10.43	0.30	35.10	9.39	10.06	38.8	71.80	49.0	69.4	47.3	0.97	0.96	10.3%
105-4	485	7.23	10.18	0.30	33.77	9.02	9.57	29.2	54.35	37.5	54.3	37.5	1.00	1.00	10.3%
105-5	483	7.60	10.38	0.33	31.31	9.90	10.14	36.5	67.70	54.1	43.8	28.3	0.65	0.52	10.0%
105-6	480	7.38	9.98	0.34	29.31	9.05	9.78	28.7	53.45	42.7	44.7	30.7	0.84	0.72	10.3%
平均	487	7.52	10.36	0.31	33.33	9.40	9.95	36.2	67.03	51.4	54.8	36.8	0.83	0.74	10.2%
最小値	480	7.23	9.98	0.30	29.31	9.02	9.32	28.7	53.45	37.5	43.8	28.3	0.65	0.52	10.0%
最大値	495	8.00	11.12	0.34	37.28	9.93	10.85	43.3	80.20	67.9	69.4	47.3	1.00	1.00	10.3%
標準偏差	5.60	0.26	0.41	0.02	2.80	0.42	0.54	5.99	10.96	10.8	9.60	6.75	0.14	0.20	0.15%
変動係数	1.15%	3.49%	3.96%	6.04%	8.40%	4.47%	5.38%	16.57%	16.35%	21.07%	17.53%	18.33%	16.48%	27.18%	1.49%
124-1	504	7.65	10.20	0.37	27.47	9.45	9.96	38.9	71.95	66.7	69.0	46.8	0.96	0.70	10.1%
124-2	492	7.72	10.54	0.35	29.96	9.70	10.36	38.9	71.95	53.7	68.7	45.0	0.96	0.84	9.9%
124-3	501	7.90	10.65	0.35	30.26	9.71	10.44	32.6	60.05	39.0	59.8	39.0	1.00	1.00	10.2%
124-4	502	7.74	10.76	0.35	30.75	9.72	10.19	35.6	66.10	43.1	66.1	43.1	1.00	1.00	9.8%
124-5	504	7.54	10.07	0.33	30.76	9.11	9.73	31.8	58.70	49.4	48.7	33.7	0.83	0.68	9.5%
124-6	503	7.95	11.06	0.29	38.14	9.99	10.81	44.7	82.85	69.3	60.9	38.2	0.74	0.55	10.2%
平均	501	7.75	10.55	0.34	31.23	9.61	10.25	37.1	68.60	53.5	62.2	41.0	0.91	0.80	9.9%
最小値	492	7.54	10.07	0.29	27.47	9.11	9.73	31.8	58.70	39.0	48.7	33.7	0.74	0.55	9.5%
最大値	504	7.95	11.06	0.37	38.14	9.99	10.81	44.7	82.85	69.3	69.0	46.8	1.00	1.00	10.2%
標準偏差	4.62	0.15	0.37	0.03	3.60	0.30	0.38	4.79	8.98	12.3	7.66	4.86	0.11	0.18	0.26%
変動係数	0.92%	1.99%	3.48%	8.34%	11.54%	3.13%	3.67%	12.93%	13.08%	23.02%	12.32%	11.85%	11.69%	22.97%	2.65%

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曲げヤング係数 (単位kN/mm²)

E_{app}:強度試験で得られた見かけの弾性係数 (単位kN/mm²)

E_{tru}:強度試験で得られた真の弾性係数 (単位kN/mm²)

σ:強度試験で得られた曲げ強さ (単位N/mm²)

Pmax:最大荷重(kN)

δ max:最大荷重時のスパン中央の変位量(mm)

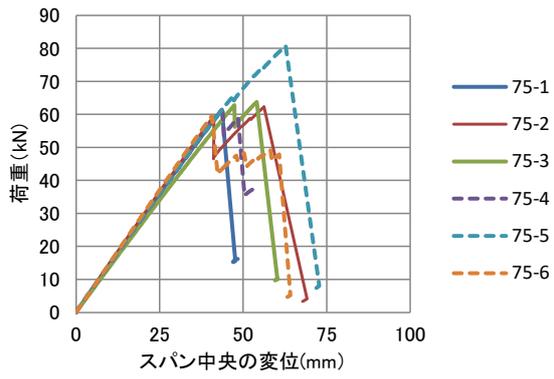


図 1.2-3 荷重とスパン中央の変位の関係
(直交層ラミナ 75mm)



写真 1.2-2 破壊の形態
(直交層ラミナ 75mm)

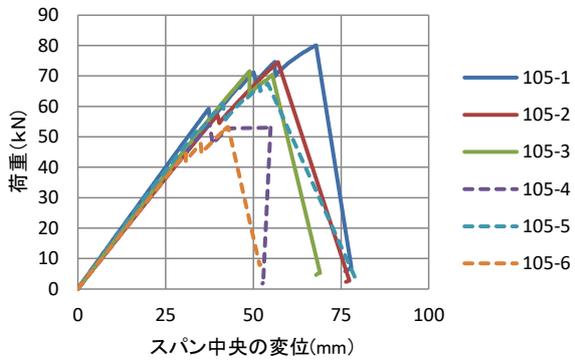


図 1.2-4 荷重とスパン中央の変位の関係
(直交層ラミナ 105mm)



写真 1.2-3 破壊の形態
(直交層ラミナ 105mm)

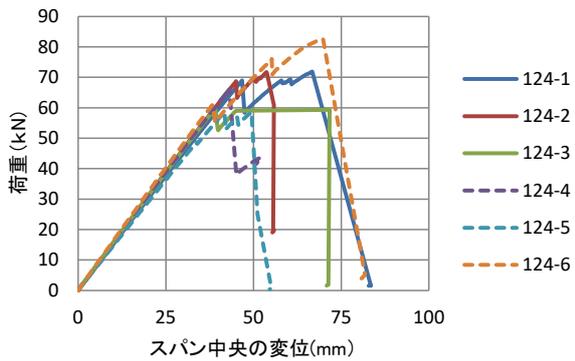


図 1.2-5 荷重とスパン中央の変位の関係
(直交層ラミナ 124mm)



写真 1.2-4 破壊の形態
(直交層ラミナ 124mm)

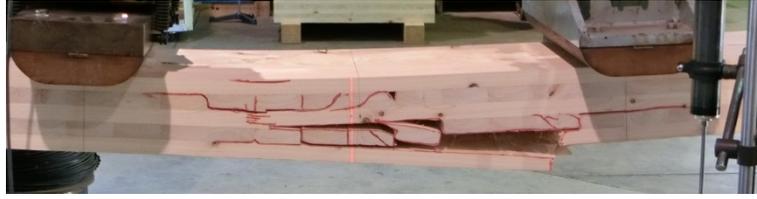


写真 1.2-5 破壊の形態 (試験体 75-3)



写真 1.2-6 破壊の形態 (試験体 75-5)



写真 1.2-7 破壊の形態 (試験体 105-4)



写真 1.2-8 破壊の形態 (試験体 124-6)

1.3 面外せん断

1.3.1 試験方法

面外せん断試験の試験体の概要を表 1.3-1 に示す。試験体は面外曲げと同じく、全層ヒノキで直交層ラミナの幅が 75mm、105mm、124mm の 3 種である。寸法は幅が 300mm、厚みが 125mm、長さは厚みの 7 倍となる 875mm である。

面外せん断試験の前に、縦振動法による縦振動ヤング係数を、たわみ振動法(T.G.H.法)による面外方向の曲げヤング係数及びせん断弾性係数を求めた。縦振動法では、小型 FFT 分析器 (リオン(株) SA-78) にマイクロフォンを用いて、たわみ振動法では同器に加速度ピックアップを用いて固有振動数の測定を行った。

面外せん断試験は、直交集成板の JAS に準拠し、支点間距離は試験体の材せいの 5 倍の 625mm とした中央集中荷重方式で行った。加力板の幅は 120mm とし、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の厚みで除したもの) は 1.54 とした。なお、試験体 75-5 と 105-5、124-5 は加力板幅が 150mm、せん断スパン比が 1.3 である。

面外せん断試験には実大木材強度試験機 (株東京衡機、最大容量 1,000kN) を使用した。载荷中は試験体の支点間中央におけるたわみを試験体の両側面で変位計 (株東京測器研究所 CDP-50) を用いて測定し、その平均値をたわみとした。試験終了後は、破壊部の近傍から長さ約 30 mm の含水率測定用の試験片を採取し、全乾重量法で含水率を求めた。試験の状況を写真 1.3-1 に示す。

表 1.3-1 面外せん断試験 試験体の概要

番号 区分	構成	ラミナの寸法			試験体 寸法			外層の 方向	試験 体数
		厚み	幅		幅	厚み	長さ		
			平行層	直交層					
75	5層5プライ Mx90	25	105	75	300	125	875	強軸	5
105	5層5プライ Mx90	25	105	105	300	125	875	強軸	5
124	5層5プライ Mx90	25	105	124	300	125	875	強軸	5



写真 1.3-1 面外せん断試験の状況

1.3.2 結果及び考察

面外せん断試験の結果を表 1.3-2、図 1.3-1~1.3-2 に、荷重－変位曲線を図 1.3-3~1.3-5 に、破壊形態の例を写真 1.3-2~1.3-9 に示す。たわみ振動法による面外方向のせん断弾性係数の平均値は、試験体 75 で 0.25 kN/mm^2 、105 で 0.34 kN/mm^2 、124 で 0.40 kN/mm^2 となり、直交層ラミナの幅が広いほど高かった。実験によるせん断強さの平均値は、試験体 75 が 2.95 N/mm^2 、試験体 105 が 3.45 N/mm^2 、試験体 124 が 3.91 N/mm^2 と直交層ラミナの幅が広くなるほど高くなり、試験体 105 は 75 より 17% 程度、124 は 105 より 13% 程度高かった。

荷重とスパン中央の変位の関係について、比例限度荷重は直交層ラミナの幅が大きくなるほど高くなっており、比例限度荷重と最大荷重の比（比例限度荷重／最大荷重）の平均値は試験体 75 で 0.64、105 で 0.78、124 で 0.91 であった。またその時の変位の比は試験体 75 で 0.36、105 で 0.51、124 で 0.74 となっており、ラミナ幅の大きいものほど破壊の発生が遅く、弾性域が広がっていることがわかった。

破壊形態については、最大荷重値からの破壊はいずれも直交層の層内せん断破壊によりのものであった。また、最終破壊（Pmax から 20% 以上の荷重低下）も、直交層の層内せん断破壊によるものであったが、試験体 105-1 のみスパン間の FJ からの曲げ型の破壊であった。載荷からの破壊の進行性状は、支点と荷重点間の直交層ラミナの突合せ（目地）部と木部に亀裂が発生し、最終には直交層の平行層との境の近傍を木口に向かってせん断破壊が抜ける性状が特徴であった。試験体 75 では、直交層ラミナの突合せ（目地）部の亀裂の発生が顕著であるのに対し、試験体 105 と 124 では、突合せのほか木部に斜め亀裂が生じる性状で、せん断変形時に生じる引張に抵抗できないラミナの突合せ部が増えることがせん断強さに影響していると推察される。

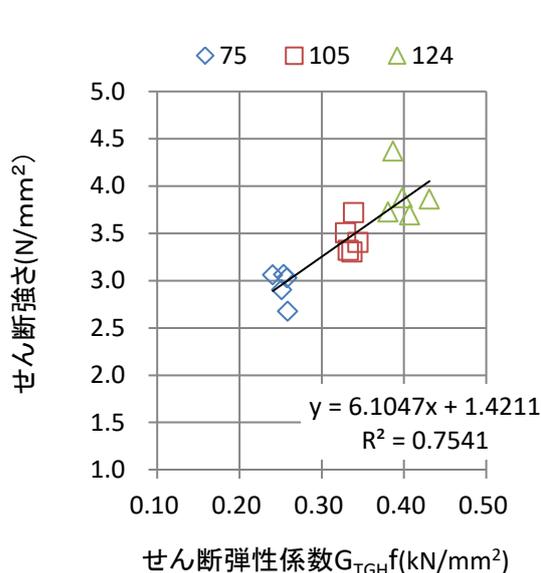


図 1.3-1 せん断弾性係数 (G_{TGHf}) とせん断強さの関係

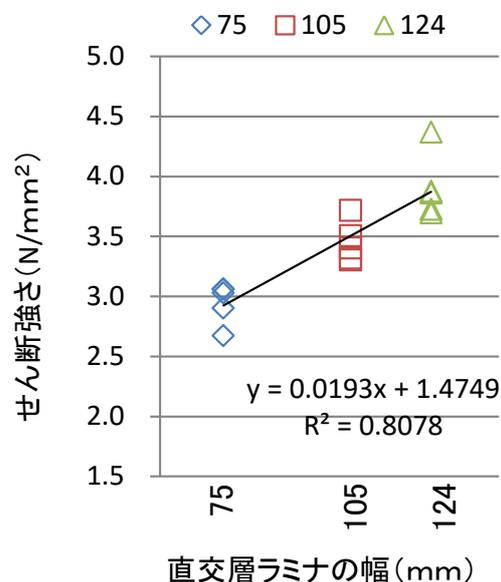


図 1.3-2 直交層ラミナの幅とせん断強さの関係

表 1.3-2 面外せん断試験の結果

試験体 No	密度 kg/m ³	E _{fr} kN/mm ²	E _{TGHF} kN/mm ²	G _{TGHF} kN/mm ²	σ N/mm ²	Pmax kN	δ max mm	比例 限度 荷重 kN	比例限度 荷重時 変位 mm	比例限度 荷重 /Pmax	変位 比例限度 荷重時 /Pmax時	最大荷重 時の 破壊性状	含水率 %
75-1	485	7.27	8.16	0.25	2.9	148.40	13.64	93.36	3.38	0.63	0.25	せん断	10.5%
75-2	482	6.72	7.70	0.26	2.7	136.40	8.88	92.24	3.39	0.68	0.38	せん断	10.2%
75-3	483	7.06	8.20	0.24	3.1	156.20	9.02	98.08	3.54	0.63	0.39	せん断	10.4%
75-4	483	7.06	8.71	0.26	3.0	155.40	9.93	98.60	3.42	0.63	0.34	せん断	10.6%
75-5	481	7.35	8.64	0.25	3.1	156.40	7.80	101.19	3.50	0.65	0.45	せん断	10.5%
平均	482.9	7.09	8.28	0.25	2.9	150.56	9.85	96.69	3.44	0.64	0.36		10.4%
最大	485.1	7.35	8.71	0.26	3.1	156.40	13.64	101.19	3.54	0.68	0.45		10.6%
最小	480.8	6.72	7.70	0.24	2.7	136.40	7.80	92.24	3.38	0.63	0.25		10.2%
標準偏差	1.58	0.25	0.41	0.01	0.17	8.58	2.25	3.77	0.07	0.02	0.07		0.00
変動係数	0.33%	3.46%	4.95%	2.90%	5.61%	5.70%	22.81%	3.89%	2.02%	3.12%	20.50%		1.17%
105-1	494	6.68	8.95	0.34	3.4	173.80	6.03	139.36	4.00	0.80	0.66	せん断	10.6%
105-2	490	7.53	10.15	0.33	3.5	179.00	11.36	139.17	4.00	0.78	0.35	せん断	10.3%
105-3	490	7.29	8.81	0.33	3.3	169.80	8.55	131.56	4.01	0.77	0.47	せん断	10.7%
105-4	489	7.01	8.85	0.34	3.3	169.60	5.41	138.30	3.98	0.82	0.74	せん断	10.2%
105-5	487	7.02	9.02	0.34	3.7	190.00	12.22	135.47	3.80	0.71	0.31	せん断	10.0%
平均	490	7.11	9.15	0.34	3.5	176.44	8.71	136.77	3.96	0.78	0.51		10.3%
最大	494	7.53	10.15	0.34	3.7	190.00	12.22	139.36	4.01	0.82	0.74		10.7%
最小	487	6.68	8.81	0.33	3.3	169.60	5.41	131.56	3.80	0.71	0.31		10.0%
標準偏差	2.57	0.32	0.56	0.01	0.17	8.49	3.06	3.30	0.09	0.04	0.19		0.00
変動係数	0.53%	4.50%	6.16%	1.72%	4.93%	4.81%	35.11%	2.42%	2.20%	5.07%	37.03%		2.84%
124-1	499	7.80	10.42	0.40	3.9	197.60	5.05	172.79	4.07	0.87	0.81	せん断	10.2%
124-2	494	7.55	9.23	0.43	3.9	196.80	6.63	169.76	4.29	0.86	0.65	せん断	10.1%
124-3	486	7.79	10.05	0.41	3.7	189.20	8.35	185.22	4.58	0.98	0.55	せん断	10.3%
124-4	490	7.51	9.81	0.38	3.7	190.00	4.69	189.70	4.69	1.00	1.00	せん断	10.1%
124-5	512	7.88	11.18	0.39	4.4	224.00	6.54	190.21	4.60	0.85	0.70	せん断	9.8%
平均	496	7.71	10.14	0.40	3.9	199.52	6.25	181.54	4.44	0.91	0.74		10.1%
最大	512	7.88	11.18	0.43	4.4	224.00	8.35	190.21	4.69	1.00	1.00		10.3%
最小	486	7.51	9.23	0.38	3.7	189.20	4.69	169.76	4.07	0.85	0.55		9.8%
標準偏差	9.82	0.17	0.72	0.02	0.27	14.21	1.46	9.63	0.26	0.07	0.17		0.00
変動係数	1.98%	2.15%	7.15%	4.95%	6.95%	7.12%	23.33%	5.30%	5.75%	7.70%	23.24%		1.84%

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)

σ:強度試験で得られたせん断強さ (単位N/mm²)

Pmax:最大荷重 (kN)

δ max:最大荷重時のスパン中央の変位量 (mm)

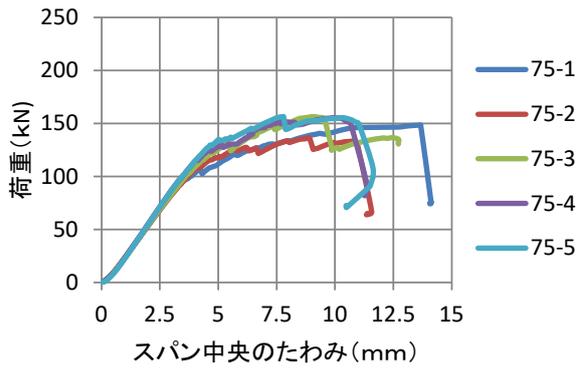


図 1.3-3 荷重とスパン中央の変位の関係 (直交層ラミナ 75 mm)



写真 1.3-2 破壊の形態 (直交層ラミナ 75 mm)

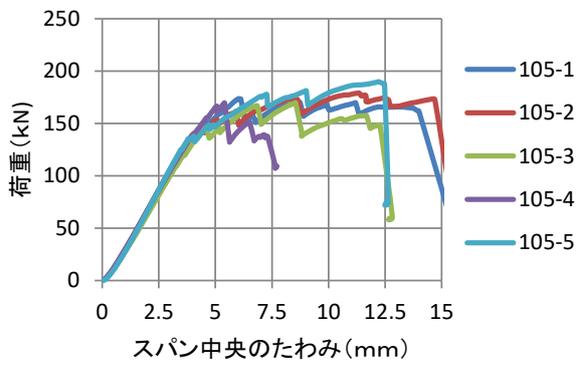


図 1.3-4 荷重とスパン中央の変位の関係 (直交層ラミナ 105 mm)



写真 1.3-3 破壊の形態 (直交層ラミナ 105 mm)

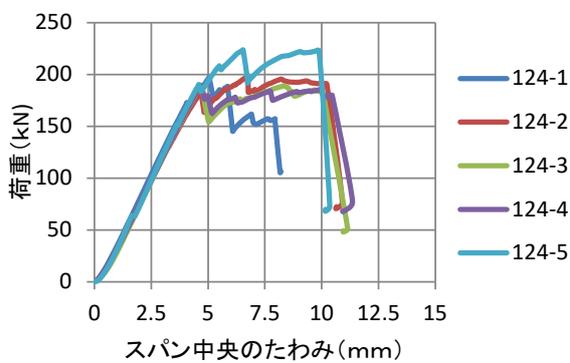


図 1.3-5 荷重とスパン中央の変位の関係 (直交層ラミナ 124 mm)



写真 1.3-4 破壊の形態 (直交層ラミナ 124 mm)

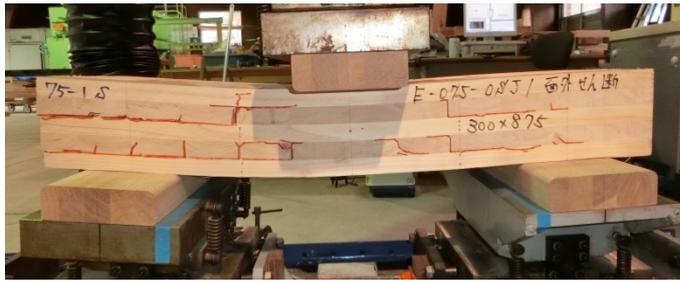


写真 1.3-5 破壊の形態 (試験体 75-1)

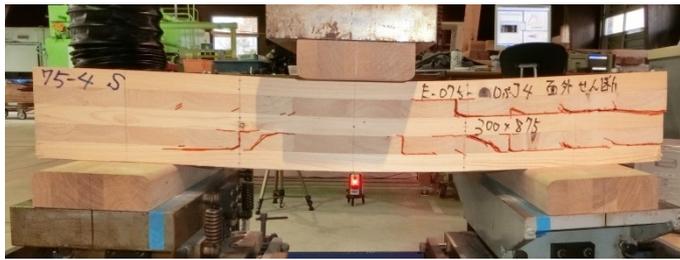


写真 1.3-6 破壊の形態 (試験体 75-4)

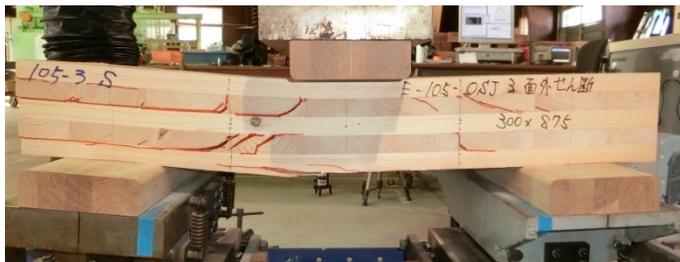


写真 1.3-7 破壊の形態 (試験体 105-3)



写真 1.3-8 破壊の形態 (試験体 124-2)

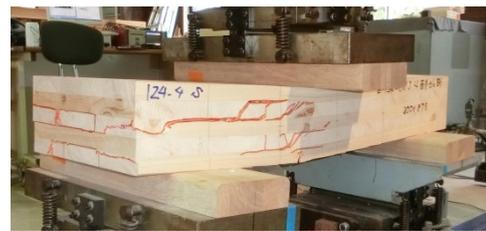


写真 1.3-9 破壊の形態 (試験体 124-4)

1.5 面内曲げ性能

1.5.1 試験の方法

面内曲げ試験の試験体の概要を表 1.5-1 に示す。試験体は全層ヒノキの直交層ラミナの幅が 75mm、105mm、124mm の異なる 3 種である。寸法は幅が 125mm、厚みが 300mm、長さは 5,900mm である。

面内曲げ試験の前に、縦振動法による縦振動ヤング係数を、たわみ振動法(T.G.H.法)による面内方向及び面外方向の曲げヤング係数及びせん断弾性係数を求めた。縦振動法では、小型 FFT 分析器 (リオン(株) SA-78) にマイクロフォンを用いて、たわみ振動法では同器に加速度ピックアップを用いて、固有振動数の測定を行った。

面内曲げ試験は、支点間距離を試験体の材せいの 18 倍とした 5,400mm、荷重点間距離は材せいの 6 倍とした 1,800mm の 3 等分点 4 点荷重方式で行った。試験には実大木材強度試験機 (株東京衡機、最大容量 1,000kN) を使用した。載荷中は支点間中央におけるたわみを試験体の両側面で変位計(株東京測器研究所 SDP-200D)を用いて測定し、その平均値をたわみとした。さらに、荷重点間のたわみを袴型治具により変位計 (株東京測器研究所 CDP-25) を用いて測定した。試験終了後は、破壊部の近傍から長さ約 30 mm の含水率測定用の試験片を採取し、全乾重量法で含水率を求めた。試験の状況を写真 1.5-1 に示す。

表 1.5-1 面内曲げ試験 試験体の概要

番号 区分	構成	ラミナの寸法			試験体 寸法			外層の 方向	試験 体数
		厚み	幅		幅	厚み	長さ		
			平行層	直交層					
75	5層5プライ Mx90	25	105	75	125	300	5,900	強軸	5
105	5層5プライ Mx90	25	105	105	125	300	5,900	強軸	5
124	5層5プライ Mx90	25	105	124	125	300	5,900	強軸	5



写真 1.5-1 面内曲げ試験の状況

1.5.2 結果及び考察

面内曲げ試験の結果を表 1.5-2、図 1.5-1~1.5-2 に、荷重—スパン中央変位曲線を図 1.5-3~1.5-5 に、破壊形態の例を写真 1.5-2~1.5-7 に示す。

面内曲げ強さの平均値は、試験体 75 で 27.6 N/mm²、105 で 25.6 N/mm²、124 で 26.6 N/mm²と同程度で差はなかった。試験体 105-2 は他のものより曲げ強さが低い値であったが、破壊の起因となった FJ が両側面の引張側ラミナのほぼ同じ位置にあったためと推察される。また、実験によるヤング係数も同程度で差はなかった。曲げ強さと曲げヤング係数のばらつきについても差異はなかったが、試験体 105 は 75 と 124 に比べばらつきが大きかった。直交層は曲げ性能にほとんど寄与していないことから、ラミナ幅の影響も生じていないもの推察される。

破壊形態は、主に引張側のラミナの FJ 又は節を起因とし、脆的な破壊形態であった。

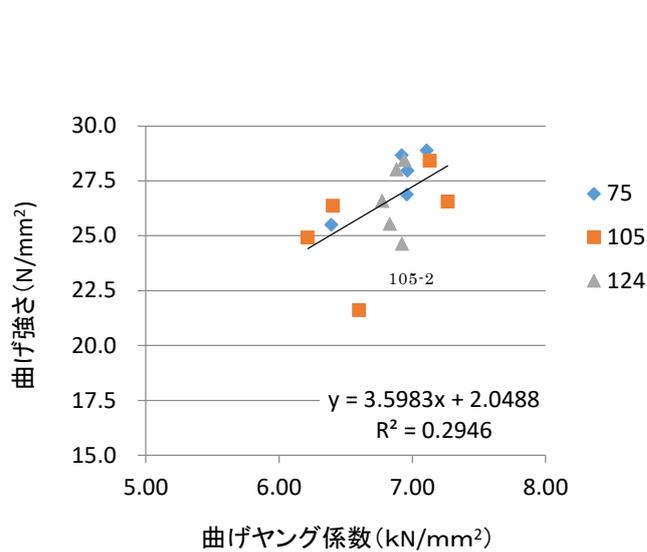


図 1.5-1 面内曲げのヤング係数と曲げ強さの関係

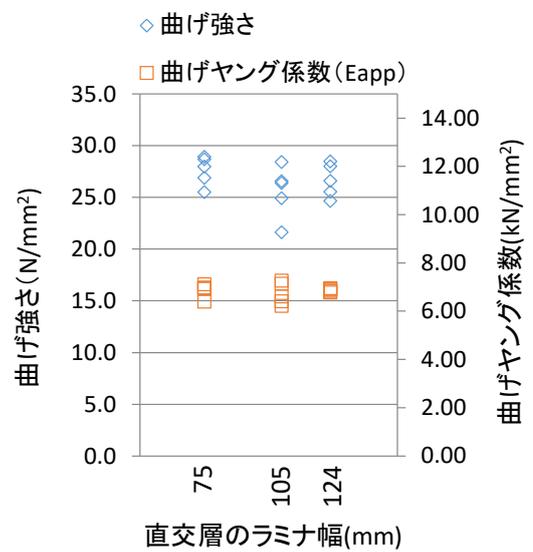


図 1.5-2 直交層ラミナの幅と面内曲げ強さ及び曲げヤング係数の関係

表 1.5-2 面内曲げ試験の結果

試験体 番号	密度	E_{fr}	E_{GHR}	G_{GHR}	E_{GHe}	G_{GHe}	E_{app}	E_{tru}	σ	P_{max}	δ_{max}	比例限度 荷重	比例限度 荷重時の たわみ	比例限度 荷重 /Pmax	変位 比例限度 荷重時 /Pmax時	含水率
	kg/m ³	kN/mm ²	N/mm ²	kN	mm	kN	mm			%						
75-1	481	7.47	10.50	0.20	7.45	0.76	6.96	7.53	26.9	57.20	94.2	55.10	78.3	0.96	0.83	10.5%
75-2	487	7.00	10.37	0.21	7.02	0.90	6.39	6.57	25.5	54.30	94.4	49.70	76.3	0.92	0.81	10.4%
75-3	482	7.46	10.50	0.20	7.57	0.81	6.92	7.13	28.7	61.00	87.3	60.32	86.2	0.99	0.99	10.3%
75-4	488	7.60	10.64	0.20	7.68	0.82	7.11	7.44	28.9	61.25	90.1	51.92	72.6	0.85	0.81	10.4%
75-5	481	7.43	10.17	0.21	7.52	0.80	6.97	7.15	28.0	59.35	93.2	53.34	76.0	0.90	0.81	10.7%
平均	484	7.39	10.44	0.21	7.45	0.82	6.87	7.16	27.6	58.62	91.8	54.07	77.9	0.92	0.85	10.5%
最小値	481	7.00	10.17	0.20	7.02	0.76	6.39	6.57	25.5	54.30	87.3	49.70	72.62	0.85	0.81	10.3%
最大値	488	7.60	10.64	0.21	7.68	0.90	7.11	7.53	28.9	61.25	94.4	60.32	86.24	0.99	0.99	10.7%
標準偏差	3.43	0.23	0.17	0.01	0.25	0.05	0.28	0.37	1.41	2.91	3.07	4.01	5.10	0.06	0.08	0.13%
変動係数	0.71%	3.12%	1.68%	2.46%	3.42%	5.90%	4.02%	5.23%	5.10%	4.96%	3.34%	7.42%	6.54%	6.01%	9.16%	1.26%
105-1	492	7.07	10.06	0.31	7.05	0.87	6.40	6.71	26.4	56.05	88.4	46.70	72.1	0.83	0.82	10.2%
105-2	485	7.17	9.76	0.32	7.19	0.90	6.60	7.06	21.6	45.95	68.2	45.93	68.2	1.00	1.00	10.0%
105-3	500	6.76	9.42	0.33	6.78	1.01	6.22	6.54	24.9	53.05	88.8	44.36	70.1	0.84	0.79	10.5%
105-4	496	7.61	10.82	0.33	7.63	0.93	7.13	7.19	28.4	60.45	86.8	53.13	72.9	0.88	0.84	10.5%
105-5	499	7.82	11.01	0.31	7.73	0.88	7.27	7.69	26.6	56.60	85.8	41.32	54.9	0.73	0.64	10.6%
平均	495	7.29	10.21	0.32	7.27	0.92	6.72	7.04	25.6	54.42	83.6	46.29	67.65	0.86	0.82	10.4%
最小値	485	6.76	9.42	0.31	6.78	0.87	6.22	6.54	21.6	45.95	68.2	41.32	54.93	0.73	0.64	10.0%
最大値	500	7.82	11.01	0.33	7.73	1.01	7.27	7.69	28.4	60.45	88.8	53.13	72.91	1.00	1.00	10.6%
標準偏差	5.96	0.42	0.68	0.01	0.40	0.06	0.46	0.45	2.54	5.42	8.69	4.34	7.34	0.10	0.13	0.24%
変動係数	1.20%	5.83%	6.69%	4.08%	5.5%	6.1%	6.80%	6.40%	9.93%	9.95%	10.40%	9.39%	10.85%	11.38%	15.72%	2.32%
124-1	495	7.48	10.52	0.32	7.38	0.88	6.77	7.01	26.6	56.65	98.6	48.32	70.02	0.85	0.71	10.5%
124-2	485	7.56	10.41	0.32	7.46	0.88	6.88	7.25	28.0	59.60	97.1	55.71	80.06	0.93	0.82	10.3%
124-3	497	7.74	10.72	0.33	7.65	0.89	6.94	6.98	28.5	60.65	99.2	56.94	81.27	0.94	0.82	10.7%
124-4	488	7.37	10.47	0.29	7.37	0.88	6.83	7.13	25.5	54.35	78.0	54.31	78.00	1.00	1.00	10.3%
124-5	496	7.51	10.40	0.30	7.46	0.84	6.92	7.15	24.6	52.40	81.6	45.10	64.54	0.86	0.79	10.4%
平均	492	7.53	10.50	0.31	7.46	0.87	6.87	7.11	26.6	56.73	90.9	52.08	74.78	0.92	0.83	10.4%
最小値	485	7.37	10.40	0.29	7.37	0.84	6.77	6.98	24.6	52.40	78.0	45.10	64.54	0.85	0.71	10.3%
最大値	497	7.74	10.72	0.33	7.65	0.89	6.94	7.25	28.5	60.65	99.2	56.94	81.27	1.00	1.00	10.7%
標準偏差	5.12	0.14	0.13	0.01	0.11	0.02	0.07	0.11	1.61	3.46	10.2	5.12	7.21	0.06	0.11	0.16%
変動係数	1.04%	1.79%	1.25%	4.16%	1.5%	1.9%	1.00%	1.54%	6.06%	6.11%	11.27%	9.82%	9.64%	6.64%	12.79%	1.57%

E_{fr} : 縦振動法による縦弾性係数 (単位kN/mm²)

E_{GHR} : 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_{GHR} : 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_{GHe} : 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_{GHe} : 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)

E_{app} : 強度試験で得られた見かけの弾性係数 (単位kN/mm²)

E_{tru} : 強度試験で得られた真の弾性係数 (単位kN/mm²)

σ : 強度試験で得られた曲げ強さ (単位N/mm²)

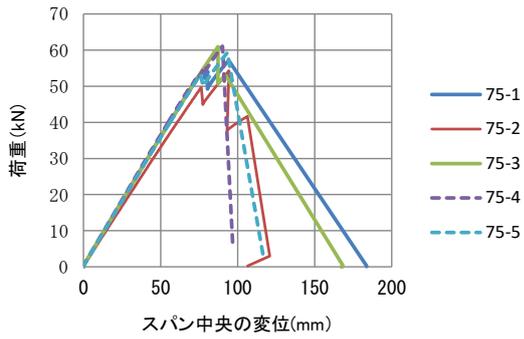


図 1.5-3 荷重とスパン中央の変位
の関係 (直交層ラミナ 75mm)



写真 1.5-2 破壊の形態
(直交層ラミナ 75mm)

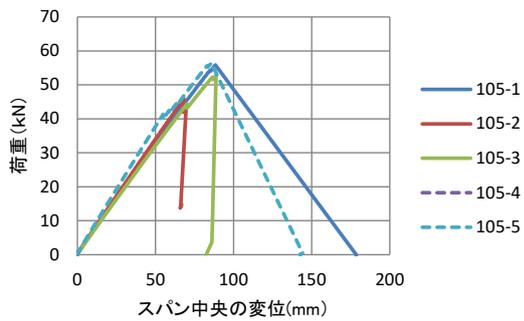


図 1.5-4 荷重とスパン中央の変位
の関係 (直交層ラミナ 105mm)



写真 1.5-3 破壊の形態
(直交層ラミナ 105mm)

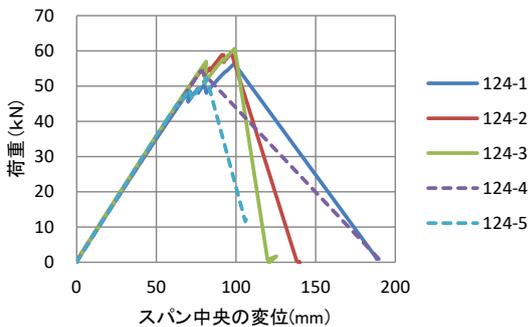


図 1.5-5 荷重とスパン中央の変位
の関係 (直交層ラミナ 124mm)



写真 1.5-4 破壊の形態
(直交層ラミナ 124mm)



写真 1.5-5 破壊の形態 (試験体 75-5)



写真 1.5-6 破壊の形態 (試験体 105-4)



写真 1.5-7 破壊の形態 (試験体 124-1)

1.4 長期面外曲げ変形

1.4.1 試験方法

i) 試験体

長期面外曲げ試験に供した CLT は、ラミナの組合せを JAS に準じて異等級構成強度等級 Mx90 とした。いずれも内層に用いるラミナは M60 のヒノキとし、外層に用いるラミナは M90 のヒノキで、5 層 5ply である。平行層はひき板の幅と厚さ (25mm) の比を 4.2 倍 (幅 105mm) で統一し、直交層については、ひき板の幅と厚さ (25mm) の比を 3.0 倍 (幅 75mm)、4.2 倍 (幅 105mm) 及び 5.0 倍 (幅 124mm) とした。なお、フィンガー (以下 FJ) 長は 15mm、傾斜 1/12、水平方向の FJ、接着剤は水性高分子イソシアネート系樹脂であった。ラミナの幅はぎ接着はしなかった。これらのラミナを使用して、長さ 2875mm、幅 300mm、厚さ 125mm の 5 層 5ply 強軸を直交層の厚さの比ごとに各 4 体合計 12 体製作した。

ii) 非破壊試験

面外曲げクリープ試験を行う前に、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)^{1.4-1)}により行った。

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

また、縦振動法による縦振動ヤング係数も測定した。

たわみ振動法(T.G.H.法)では、試験体長さ、断面 2 次半径、密度を求め、せん断分布定数(1.0)、せん断弾性係数の初期値(0.8Gpa)を設定する。次に、振動次数 n に依存する係数 m_n と F_{m_n} 、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。

$$a = -1.2 \left(\frac{E_{fr-t}}{G_{fr-t}} \right), \quad c = E_{fr-t} \quad (1.4-1)$$

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。

$$E_{fr} = (2fl)^2 \rho \quad (1.4-2)$$

E_{fr} : 縦振動ヤング係数

f : 固有振動数

l : 材長

ρ : 密度

表 1.4-1 に非破壊試験結果を示す。密度については、直交層ひき板の幅と厚さ (25mm) の比を 3.0 倍 (幅 75mm) としたものが、4.2 倍 (幅 105mm) 及び 5.0 倍 (幅 124mm) に比べ、平均値が少し低い値であった。縦振動法による縦振動弾性係数、たわみ振動法による面外方向の曲げヤング係数それぞれの平均値はあまり差がなかった。たわみ振動法による面外方向のせん断弾性係数平均値は、幅と厚さの比が 3.0 倍の試験体において、他の比の試験体に比べ 35%低い値であった。

表 1.4-1 非破壊試験結果

幅と厚さの比 3.0倍 強軸 n = 4	重量 kg	全長 mm	幅 mm	厚 mm	密度 kg/m ³	縦振動 E_{fr} kN/mm ²	TGH E_{TGHf} kN/mm ²	TGH G_{TGHf} kN/mm ²
H-075-DOL-1	53.2	2876	300.5	127.0	485	7.20	9.89	0.259
H-075-DOL-2	52.9	2876	300.2	127.0	482	7.43	10.65	0.240
H-075-DOL-3	52.6	2875	300.4	126.7	481	7.52	9.73	0.257
H-075-DOL-4	54.2	2876	300.9	127.2	492	7.53	9.94	0.258
最小値	52.6	2875	300.2	126.7	481	7.20	9.73	0.240
平均値	53.2	2876	300.5	127.0	485	7.42	10.05	0.253
最大値	54.2	2876	300.9	127.2	492	7.53	10.65	0.259
標準偏差	0.69	0.50	0.29	0.22	5.14	0.15	0.41	0.009
変動係数%	1.3	0.0	0.1	0.2	1.1	2.1	4.1	3.5
幅と厚さの比 4.2倍 強軸 n = 4	重量 kg	全長 mm	幅 mm	厚 mm	密度 kg/m ³	縦振動 E_{fr} kN/mm ²	TGH E_{TGHf} kN/mm ²	TGH G_{TGHf} kN/mm ²
H-105-DOL-1	55.0	2875	300.3	127.2	501	7.24	9.96	0.357
H-105-DOL-2	54.6	2876	300.5	127.1	497	7.43	10.29	0.369
H-105-DOL-3	53.5	2875	300.1	127.3	487	7.39	9.89	0.403
H-105-DOL-4	54.7	2876	300.5	127.4	496	7.48	9.72	0.391
最小値	53.5	2875	300.1	127.1	487	7.24	9.72	0.357
平均値	54.4	2876	300.4	127.2	495	7.39	9.97	0.380
最大値	55.0	2876	300.5	127.4	501	7.48	10.29	0.403
標準偏差	0.65	0.58	0.19	0.11	5.71	0.10	0.24	0.021
変動係数%	1.2	0.0	0.1	0.1	1.2	1.4	2.4	5.5
幅と厚さの比 5.0倍 強軸 n = 4	重量 kg	全長 mm	幅 mm	厚 mm	密度 kg/m ³	縦振動 E_{fr} kN/mm ²	TGH E_{TGHf} kN/mm ²	TGH G_{TGHf} kN/mm ²
H-124-DOL-1	55.6	2875	300.7	127.0	506	8.03	11.46	0.403
H-124-DOL-2	53.2	2876	300.4	127.0	485	7.20	9.53	0.421
H-124-DOL-3	53.4	2876	300.6	126.9	486	7.22	9.65	0.394
H-124-DOL-4	54.6	2877	300.4	126.8	498	7.68	10.66	0.338
最小値	53.2	2875	300.4	126.8	485	7.20	9.53	0.338
平均値	54.2	2876	300.5	126.9	494	7.53	10.33	0.389
最大値	55.6	2877	300.7	127.0	506	8.03	11.46	0.421
標準偏差	1.13	0.82	0.14	0.10	10.14	0.40	0.91	0.036
変動係数%	2.1	0.0	0.0	0.1	2.1	5.3	8.8	9.2

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)

iii) 長期面外曲げ試験

長期荷重は、図 1.4-1、写真 1.4-1 に示すようにモーメントアーム式を採用した。アームの長さは支点から錘をかける個所まで 4000mm、支点から荷重点まで 250mm である。写真 1.4-2 の加力軸のネジを回転させることでアームを水平に維持できるようにした。写真 1.4-3 はアーム及びおもり、写真 1.4-4 は荷重点である。

試験室は非空調のため、継続的に温湿度を測定することとした。

試験条件は、支点間距離を 2625mm (厚さの 21 倍)、荷重点間距離を 875mm (厚さの 7 倍) として、3 等分点 4 点荷重方式で行った。平成 28 年 3 月 31 日国土交通省告示第 561 号許容応力度の計算方法に従い、長期荷重として 10.54kN の荷重を、合計 12 体、

面外方向に載荷した。荷重点間測定に当たっては、せん断の影響のある区間の支点間中央の変形量（12体）（写真 1.4-5 参照）、せん断の影響のない区間の荷重点間の変形量（9体）（写真 1.4-5 参照）、及び支点と荷重点中間の側面 2 か所の層間変形量（2体）（図 1.4-2、写真 1.4-6 参照）を測定した。

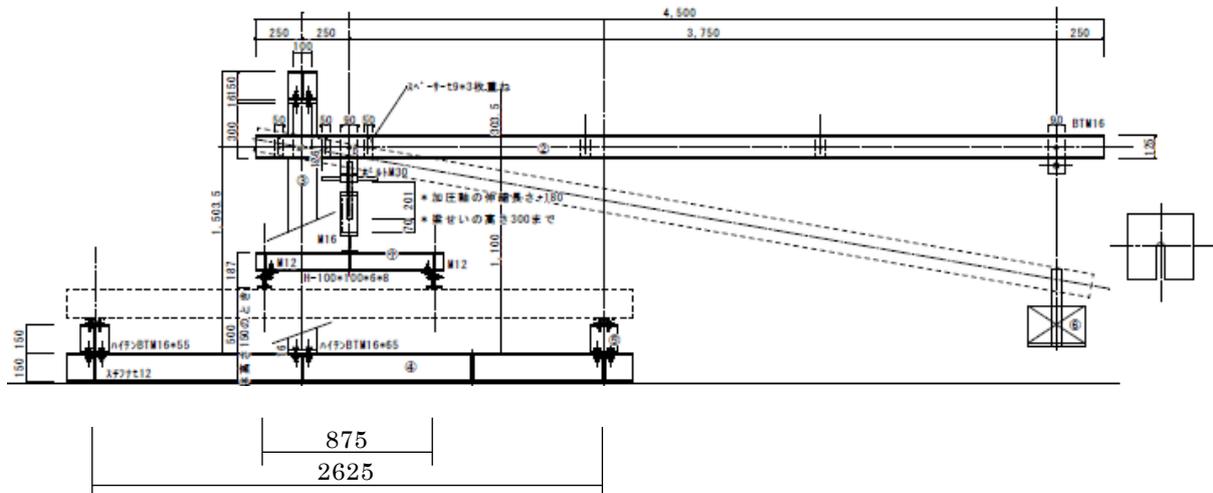


図 1.4-1 モーメントアーム方式のクリープ試験機

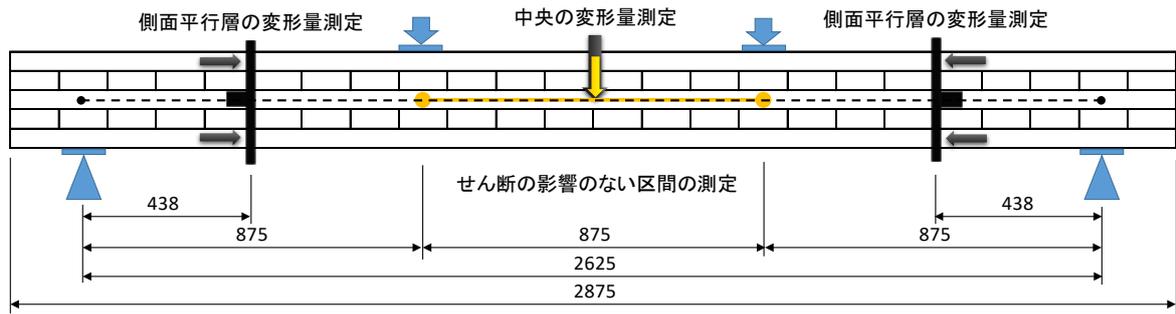


図 1.4-2 側面の変形量測定位置

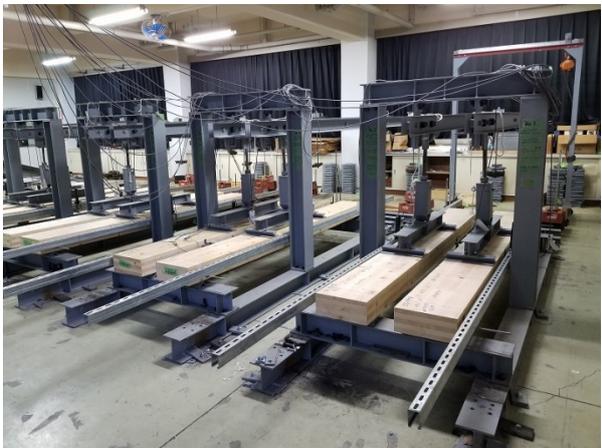


写真 1.4-1 モーメントアーム式試験機



写真 1.4-2 加力軸水平調整ネジ部



写真 1.4-3 アーム及びおもりの状況



写真 1.4-4 荷重点



写真 1.4-5 支点間及び荷重点間変形量測定



写真 1.4-6 側面平行層の変形量測定

1.4.2 評価方法

i) 告示法

基準法第 37 条に関する技術的基準（平成 12 年建設省告示第 1446 号）建築材料の性能評価方法^{1.4-2)}によると解析はつぎのとおりである。

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

$$K_t = d_{1min}/d_{tmin} \quad (1.4-3)$$

$$\log_{10}K_t = e + f \times \log_{10}t \quad (1.4-4)$$

$$K_{50year} = 10^e \times t_{50year}^f = 26280000f \quad (1.4-5)$$

ここで、 K_t : t 分後のクリープたわみ比

d_{1min} : 1 分後のたわみ (mm)

d_{tmin} : t 分後のたわみ (mm)

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

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

t_{50year} : 50 年分の時間 t で 26280000 分

ii) パワー則

パワー則の解析方法^{1.4-3)}は、つぎのとおりである。

$$\log_{10}\delta_c(t) = a\log_{10}t + b \quad (1.4-6)$$

ここで、 $\delta_c(t)$: 負荷 t 日経過後のクリープ

a, b : 定数、ただし b は負荷 1 日後の点に外挿された定数

(5)式で得られた定数 a と b を変換し、次式 (パワー則) を得る。

$$\delta_c(t) = At^N \quad (1.4-7)$$

ここで、 A : $b = \log_{10}A$ により得られる定数。

ただし、 A は負荷 1 日経過後のクリープたわみを意味する。

N : 定数、ただし、 $a = N$

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

$$\delta_{50}/\delta_0 = 1 + ct^N \quad (1.4-8)$$

ここで、 δ_{50} : 50 年後の曲げクリープたわみ

δ_0 : 初期たわみ

c : A/δ_0

1.4.3 評価結果

長期面外曲げ試験を 12 月 5 日に開始してから 70 日間の各試験体の、支点間中央変形量と温湿度を図 1.4-2 に、荷重点間中央変形量と温湿度を図 1.4-3 に、側面平行層の変形量と温湿度を図 1.4-4 に示す。

支点間中央変形量は全体に上昇傾向で、温湿度とも下がり始めた 35 日目、46 日目、60 日目あたりから変形量がわずかに増加した。また相対湿度が 70%あたりから上昇すると、変形量が減少する傾向があった。この傾向は、ひき板の幅と厚さの比を 3.0 倍 (幅 75mm) とした試験体の荷重点間中央変形量でも見られたが、これ以外は逆の変形をした仕様もあった。側面平行層の変形量は加力点側 (上側) 外層が木口面方向に動き、支点側 (下側) が中心方向に動く傾向を示した。ひき板の幅と厚さの比を 5.0 倍 (幅 124mm) の H-124-DOL-4 東上の変形量が他の位置の変形量に比べ、異常に大きくなった。また、温度は低く減少傾向、相対湿度は上昇傾向であった。

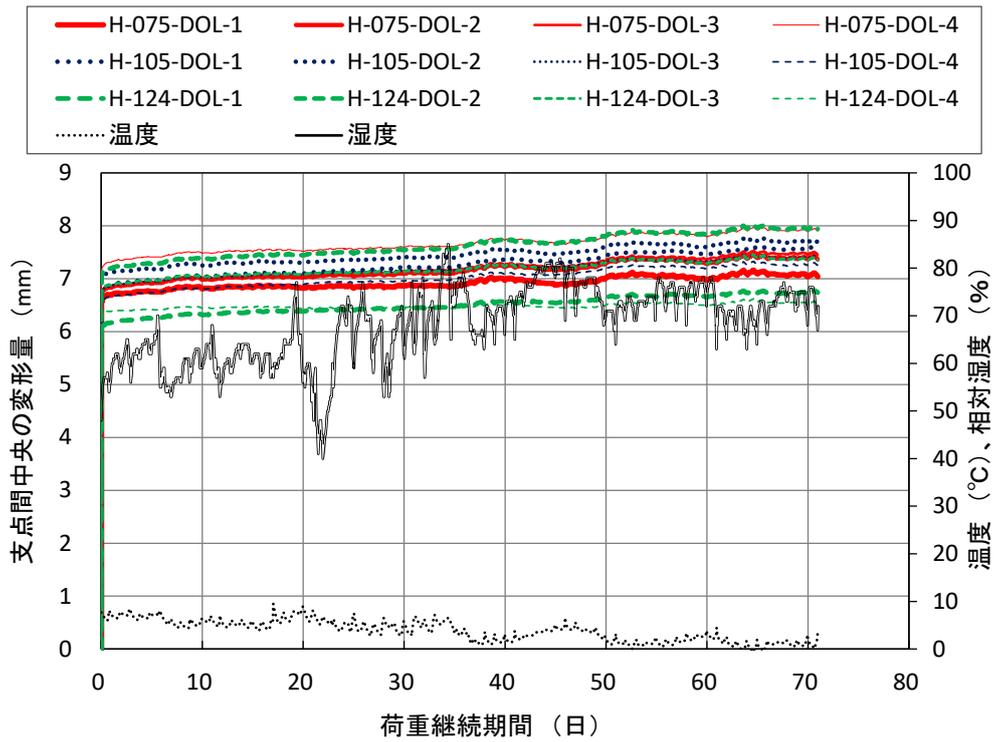


図 1.4-2 支点間中央変形量と温湿度

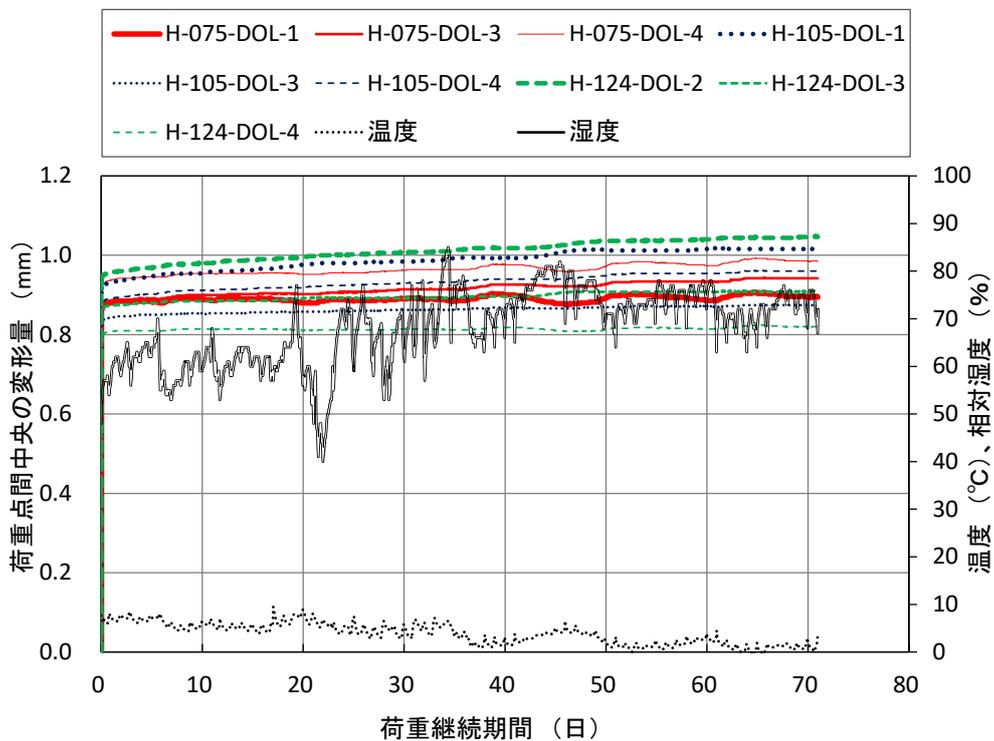


図 1.4-3 荷重点間中央変形量と温湿度

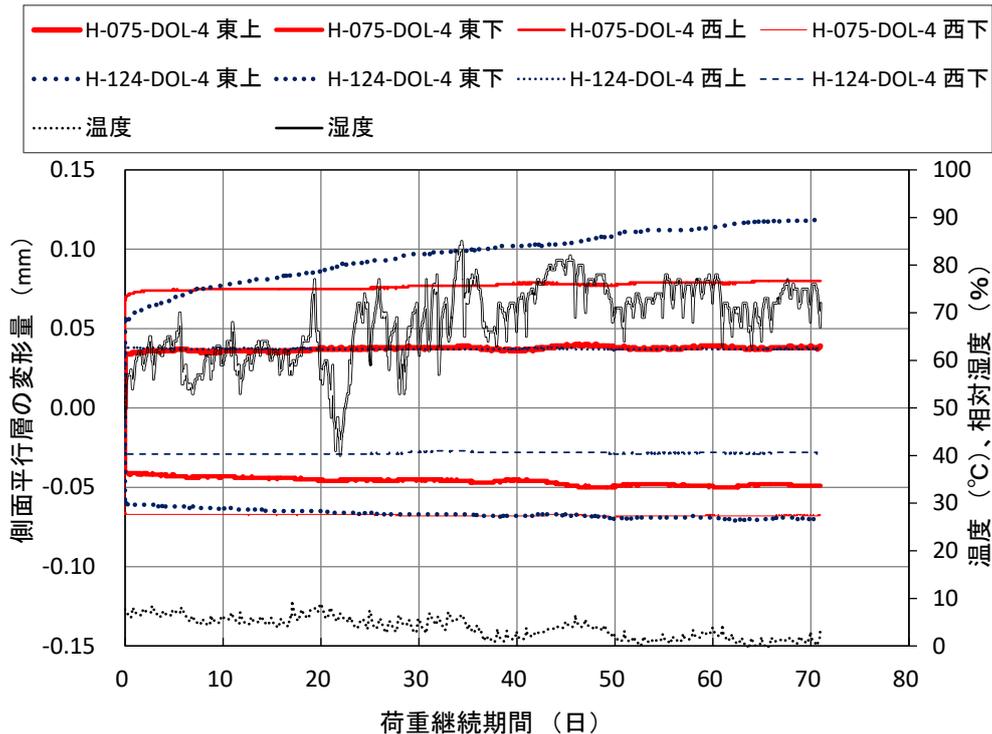


図 1.4-4 側面平行層の変形量と温湿度

つぎに、変形増大係数の評価結果について、表 1.4-2 に支点間中央変形量の解析結果を、表 1.4-3 に荷重点間中央変形量の解析結果を、表 1.4-4 に側面平行層変形量の解析結果を示す。また、それぞれの解析の根拠となった告示法におけるクリープ変形比の常用対数と経過時間の常用対数の関係、及びパワー則におけるクリープ変形量の常用対数と経過時間の常用対数の関係を図 1.4-5 から図 1.4-20 に示す。

70 日間経過時点では、支点間中央変形量の解析結果、直交層のひき板の幅と厚さ (25mm) の比 3.0 倍 (幅 75mm)、4.2 倍 (幅 105mm) 及び 5.0 倍 (幅 124mm) とともに、告示法で平均値 1.16 及び 1.19、パワー則で平均値 1.56 から 2.12 となった。パワー則では、幅と厚さの比が大きくなるほど変形増大係数が大きい値となり、想定した変形予想と反対の傾向を示した。しかし、変形増大係数の差はあまりないため、支点間中央変形における幅と厚さの比の違いが、変形増大係数に与える影響はあまりないと考えられた。

つぎに、せん断の影響のない区間、荷重点間の中央変形量について解析した結果、直交層のひき板の幅と厚さ (25mm) の比 3.0 倍 (幅 75mm)、4.2 倍 (幅 105mm) 及び 5.0 倍 (幅 124mm) とともに、告示法で平均値 1.11 から 1.17、パワー則で平均値 1.34 から 1.51 となった。告示法、パワー則とも、幅と厚さの比が 3.0 倍で変形増大係数は大きい値であったが、3 者とも大きな差ではなかったため、荷重点間中央変形量における幅と厚さの比の違いは、支点間中央変形と同様、影響はあまりないと考えられた。

さらに、側面平行層変形量の解析結果、直交層のひき板の幅と厚さ (25mm) の比 3.0 倍 (幅 75mm)、及び 5.0 倍 (幅 124mm) の 2 体とも、変形増大係数が非常に大きくなる測定箇所があり、今後どのような変形が進行するのか注意深く観察する必要がある。

表 1.4-2 支点間中央変形量の解析結果 (70 日間経過時点)

	No	d_{1min}	傾き N	切片 $\log A$	I_0 切片 $\log A$	d_{50year}	d_{1min}/d_{50year}	R	R^2	d_{50year}/d_{1min}
告示法	H-075-DOL-1	6.55	-0.00911	0.0185	1.044	7.33	0.893	-0.832	0.693	1.12
	H-075-DOL-2	6.64	-0.01307	0.0275	1.065	7.79	0.852	-0.847	0.718	1.17
	H-075-DOL-3	6.67	-0.01452	0.0337	1.081	7.91	0.843	-0.829	0.687	1.19
	H-075-DOL-4	7.10	-0.01318	0.0277	1.066	8.34	0.851	-0.858	0.737	1.18
	平均値	6.74	-0.01247	0.0269	1.064	7.84	0.860	-0.842	0.709	1.16
	No	δ_0	傾き N	切片 $\log A$	I_0 切片 $\log A$	δ_{50}	$\delta_0/(\delta_{50}+\delta_0)$	R	R^2	$(\delta_{50}+\delta_0)/\delta_0$
パワー則	H-075-DOL-1	6.55	0.297	-1.83	0.0148	2.38	0.733	0.966	0.933	1.36
	H-075-DOL-2	6.64	0.304	-1.70	0.0197	3.54	0.652	0.976	0.952	1.53
	H-075-DOL-3	6.67	0.358	-1.95	0.0111	5.07	0.568	0.973	0.948	1.76
	H-075-DOL-4	7.10	0.319	-1.74	0.0182	4.22	0.627	0.979	0.958	1.59
	平均値	6.74	0.319	-1.81	0.0160	3.80	0.645	0.973	0.948	1.56
	No	d_{1min}	傾き N	切片 $\log A$	I_0 切片 $\log A$	d_{50year}	d_{1min}/d_{50year}	R	R^2	d_{50year}/d_{1min}
告示法	H-105-DOL-1	6.65	-0.0161	0.0353	1.085	8.07	0.824	-0.843	0.711	1.21
	H-105-DOL-2	6.95	-0.0134	0.0313	1.075	8.13	0.855	-0.834	0.696	1.17
	H-105-DOL-3	6.62	-0.0131	0.0249	1.059	7.83	0.846	-0.881	0.776	1.18
	H-105-DOL-4	6.44	-0.0153	0.0330	1.079	7.76	0.830	-0.856	0.733	1.20
	平均値	6.67	-0.0145	0.0311	1.074	7.95	0.839	-0.854	0.729	1.19
	No	δ_0	傾き N	切片 $\log A$	I_0 切片 $\log A$	δ_{50}	$\delta_0/(\delta_{50}+\delta_0)$	R	R^2	$(\delta_{50}+\delta_0)/\delta_0$
パワー則	H-105-DOL-1	6.65	0.3163	-1.6862	0.021	4.58	0.592	0.975	0.950	1.69
	H-105-DOL-2	6.95	0.3738	-2.0479	0.009	5.31	0.567	0.979	0.958	1.76
	H-105-DOL-3	6.62	0.2681	-1.4983	0.032	3.10	0.681	0.981	0.963	1.47
	H-105-DOL-4	6.44	0.3048	-1.6595	0.022	4.00	0.617	0.977	0.955	1.62
	平均値	6.67	0.3158	-1.7230	0.021	4.25	0.614	0.978	0.956	1.64
	No	d_{1min}	傾き N	切片 $\log A$	I_0 切片 $\log A$	d_{50year}	d_{1min}/d_{50year}	R	R^2	d_{50year}/d_{1min}
告示法	H-124-DOL-1	5.99	-0.0149	0.0328	1.079	7.16	0.836	-0.857	0.735	1.20
	H-124-DOL-2	6.96	-0.0168	0.0378	1.091	8.51	0.818	-0.833	0.693	1.22
	H-124-DOL-3	6.65	-0.0122	0.0228	1.054	7.77	0.856	-0.882	0.778	1.17
	H-124-DOL-4	6.30	-0.0041	0.0075	1.017	6.65	0.948	-0.820	0.672	1.06
	平均値	6.47	-0.0120	0.0252	1.060	7.52	0.864	-0.848	0.719	1.16
	No	δ_0	傾き N	切片 $\log A$	I_0 切片 $\log A$	δ_{50}	$\delta_0/(\delta_{50}+\delta_0)$	R	R^2	$(\delta_{50}+\delta_0)/\delta_0$
パワー則	H-124-DOL-1	5.99	0.3297	-1.83	0.0148	4.14	0.591	0.983	0.967	1.69
	H-124-DOL-2	6.96	0.3191	-1.67	0.0214	4.98	0.583	0.970	0.941	1.72
	H-124-DOL-3	6.65	0.2784	-1.57	0.0268	3.11	0.681	0.979	0.958	1.47
	H-124-DOL-4	6.30	0.7105	-4.06	0.0001	16.40	0.278	0.766	0.587	3.60
	平均値	6.47	0.4094	-2.28	0.0158	7.16	0.533	0.925	0.863	2.12

表 1.4-3 荷重点間中央変形量の解析結果 (70 日間経過時点)

	No	d_{1min}	傾き N	切片 $\log A$	I_0 切片 $\log A$	d_{50year}	d_{1min}/d_{50year}	R	R^2	d_{50year}/d_{1min}
告示法	H-075-DOL-1	0.862	-0.0038	0.004	1.009	0.912	0.945	-0.666	0.443	1.06
	H-075-DOL-3	0.866	-0.0107	0.024	1.057	0.983	0.881	-0.841	0.708	1.14
	H-075-DOL-4	0.910	-0.0092	0.016	1.039	1.025	0.888	-0.862	0.744	1.13
	平均値	0.879	-0.0079	0.015	1.035	0.973	0.905	-0.790	0.631	1.11
	No	δ_0	傾き N	切片 $\log A$	I_0 切片 $\log A$	δ_{50}	$\delta_0/(\delta_{50}+\delta_0)$	R	R^2	$(\delta_{50}+\delta_0)/\delta_0$
パワー則	H-075-DOL-1	0.862	0.226	-2.615	2.43E-03	0.115	0.882	0.804	0.646	1.13
	H-075-DOL-3	0.866	0.344	-2.893	1.28E-03	0.453	0.656	0.970	0.941	1.52
	H-075-DOL-4	0.910	0.301	-2.654	2.22E-03	0.381	0.705	0.946	0.895	1.42
	平均値	0.879	0.2903	-2.721	1.97E-03	0.317	0.748	0.907	0.827	1.36
	No	d_{1min}	傾き N	切片 $\log A$	I_0 切片 $\log A$	d_{50year}	d_{1min}/d_{50year}	R	R^2	d_{50year}/d_{1min}
告示法	H-105-DOL-1	0.902	-0.016	0.0353	1.085	1.101	0.819	-0.893	0.798	1.22
	H-105-DOL-3	0.821	-0.007	0.0095	1.022	0.903	0.909	-0.926	0.857	1.10
	H-105-DOL-4	0.866	-0.013	0.0276	1.066	1.017	0.851	-0.879	0.773	1.17
	平均値	0.863	-0.0121	0.0241	1.057	1.007	0.860	-0.899	0.809	1.17
	No	δ_0	傾き N	切片 $\log A$	I_0 切片 $\log A$	δ_{50}	$\delta_0/(\delta_{50}+\delta_0)$	R	R^2	$(\delta_{50}+\delta_0)/\delta_0$
パワー則	H-105-DOL-1	0.902	0.333	-2.610	2.46E-03	0.724	0.555	0.991	0.982	1.80
	H-105-DOL-3	0.821	0.207	-2.330	4.68E-03	0.160	0.837	0.988	0.976	1.20
	H-105-DOL-4	0.866	0.301	-2.571	2.68E-03	0.460	0.653	0.987	0.975	1.53
	平均値	0.863	0.2803	-2.504	3.27E-03	0.448	0.682	0.989	0.977	1.51

	No	d_{1min}	傾き N	切片 $logA$	$I0$ 切片 $logA$	d_{50year}	d_{1min}/d_{50year}	R	R^2	d_{50year}/d_{1min}
告示法	H-124-DOL-2	0.928	-0.016	0.0346	1.083	1.122	0.827	-0.868	0.754	1.21
	H-124-DOL-3	0.854	-0.008	0.0143	1.033	0.942	0.906	-0.882	0.778	1.10
	H-124-DOL-4	0.792	-0.003	0.0014	1.003	0.829	0.955	-0.791	0.626	1.05
	平均値	0.858	-0.0088	0.0168	1.040	0.965	0.896	-0.847	0.719	1.12
	No	δ_0	傾き N	切片 $logA$	$I0$ 切片 $logA$	δ_{50}	$\delta_0/(\delta_{50}+\delta_0)$	R	R^2	$(\delta_{50}+\delta_0)/\delta_0$
パワー則	H-124-DOL-2	0.928	0.309	-2.517	3.04E-03	0.601	0.607	0.980	0.960	1.65
	H-124-DOL-3	0.854	0.266	-2.609	2.46E-03	0.230	0.788	0.979	0.959	1.27
	H-124-DOL-4	0.792	0.193	-2.552	2.80E-03	0.076	0.913	0.856	0.732	1.10
	平均値	0.858	0.2560	-2.559	2.77E-03	0.302	0.769	0.938	0.884	1.34

表 1.4-4 側面平行層変形量の解析結果 (70 日間経過時点)

	No	d_{1min}	傾き N	切片 $logA$	$I0$ 切片 $logA$	d_{50year}	d_{1min}/d_{50year}	R	R^2	d_{50year}/d_{1min}
告示法	075-4 東上	0.0340	-0.027	0.0816	1.207	0.0450	0.756	-0.798	0.637	1.32
	075-4 東下	0.0400	-0.053	0.1798	1.513	0.0649	0.616	-0.900	0.810	1.62
	075-4 西上	0.0690	-0.024	0.0645	1.160	0.0901	0.766	-0.872	0.761	1.31
	075-4 西下	0.0660	-0.005	0.0130	1.030	0.0697	0.946	-0.580	0.336	1.06
	No	δ_0	傾き N	切片 $logA$	$I0$ 切片 $logA$	δ_{50}	$\delta_0/(\delta_{50}+\delta_0)$	R	R^2	$(\delta_{50}+\delta_0)/\delta_0$
パワー則	075-4 東上	0.0340	0.354	-4.093	8.06E-05	0.034	0.498	0.831	0.691	2.01
	075-4 東下	0.0400	0.539	-4.733	1.85E-05	0.186	0.177	0.961	0.924	5.65
	075-4 西上	0.0690	0.256	-3.291	5.11E-04	0.041	0.629	0.905	0.820	1.59
	075-4 西下	0.0660	0.231	-3.904	1.25E-04	0.006	0.912	0.591	0.349	1.10

	No	d_{1min}	傾き N	切片 $logA$	$I0$ 切片 $logA$	d_{50year}	d_{1min}/d_{50year}	R	R^2	d_{50year}/d_{1min}
告示法	124-4 東上	0.0560	-0.187	0.626	4.222	0.3242	0.173	-0.983	0.966	5.79
	124-4 東下	0.0580	-0.041	0.128	1.342	0.0871	0.666	-0.962	0.926	1.50
	124-4 西上	0.0390	0.005	-0.003	0.994	0.0359	1.086	0.520	0.271	0.92
	124-4 西下	0.0270	0.013	-0.082	0.828	0.0260	1.036	0.564	0.318	0.96
	No	δ_0	傾き N	切片 $logA$	$I0$ 切片 $logA$	δ_{50}	$\delta_0/(\delta_{50}+\delta_0)$	R	R^2	$(\delta_{50}+\delta_0)/\delta_0$
パワー則	124-4 東上	0.0560	0.603	-4.201	6.29E-05	1.927	0.029	0.996	0.992	34.4
	124-4 東下	0.0580	0.393	-3.890	1.29E-04	0.1647	0.352	0.982	0.964	2.84
	124-4 西上	0.0390	—	—	—	—	—	—	—	—
	124-4 西下	0.0270	—	—	—	—	—	—	—	—

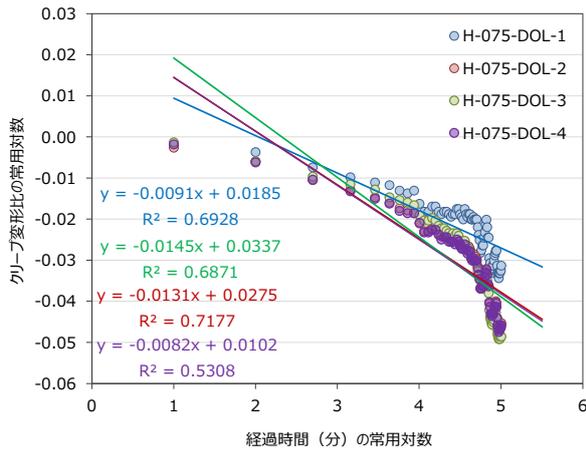


図 1.4-5 H-075 支点間変形量告示法評価

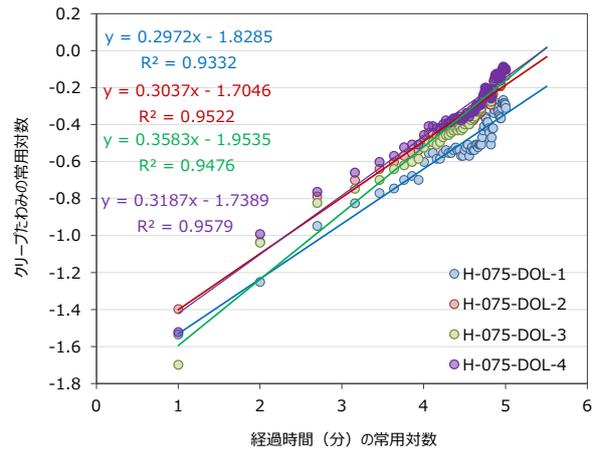


図 1.4-6 H-075 支点間変形量パワー則評価

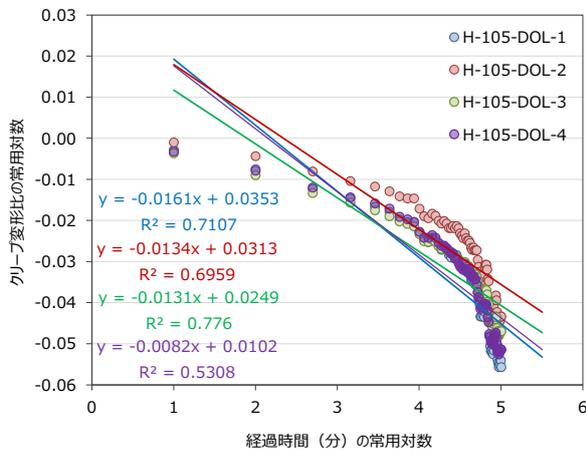


図 1.4-7 H-105 支点間変形量告示法評価

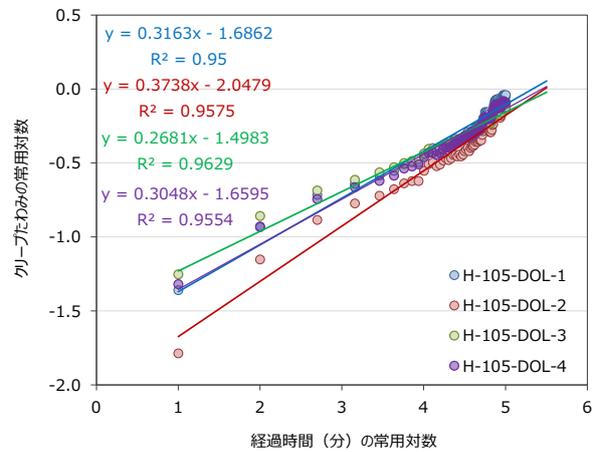


図 1.4-8 H-105 支点間変形量パワー則評価

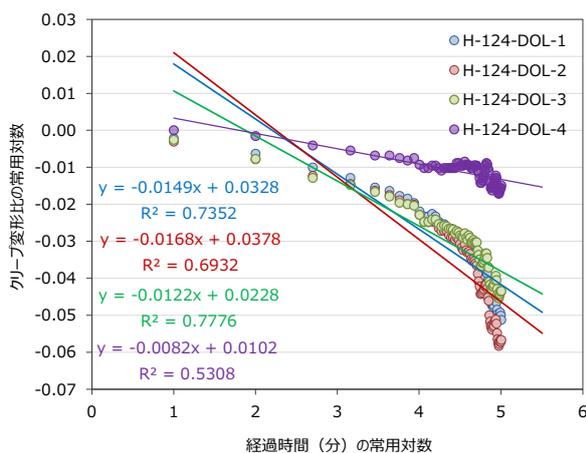


図 1.4-9 H-124 支点間変形量告示法評価

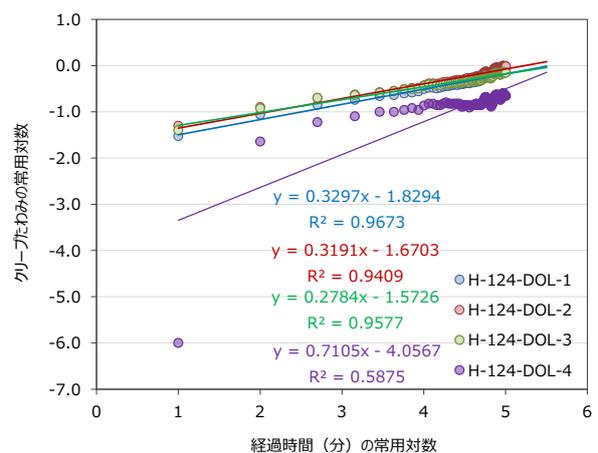


図 1.4-10 H-124 支点間変形量パワー則評価

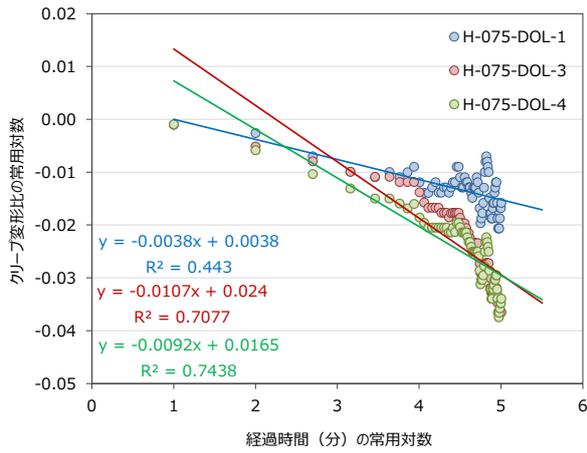


図 1.4-11 H-075 荷重点間変形量告示法評価

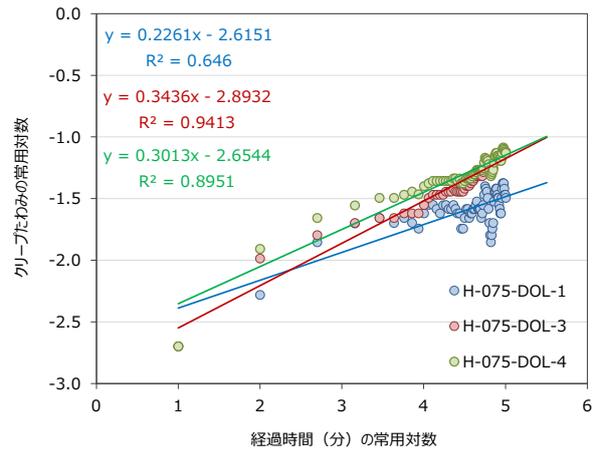


図 1.4-12 H-075 荷重点間変形量パワー則評価

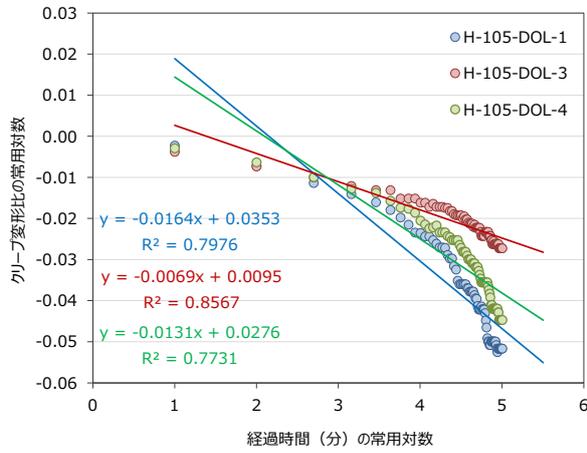


図 1.4-13 H-105 荷重点間変形量告示法評価

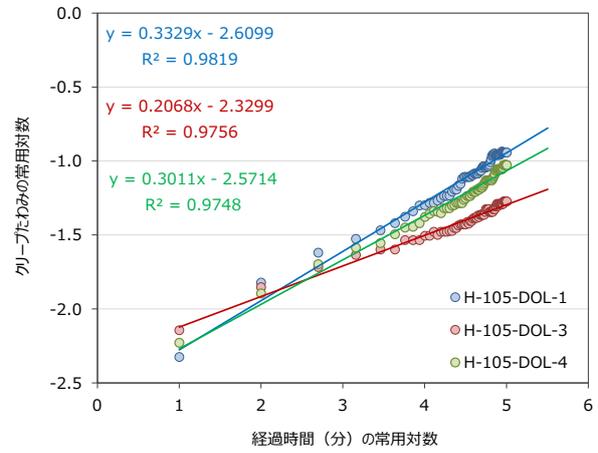


図 1.4-14 H-105 荷重点間変形量パワー則評価

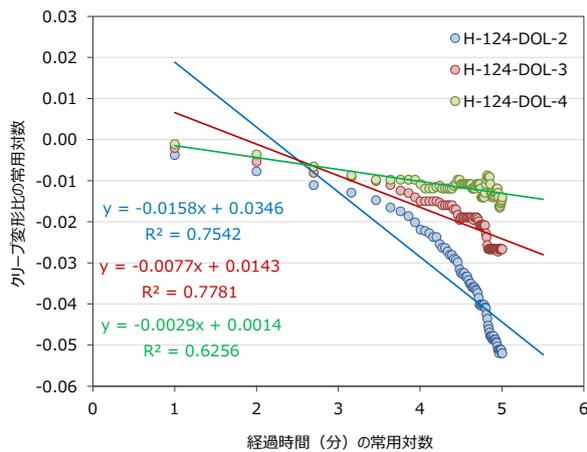


図 1.4-15 H-124 荷重点間変形量告示法評価

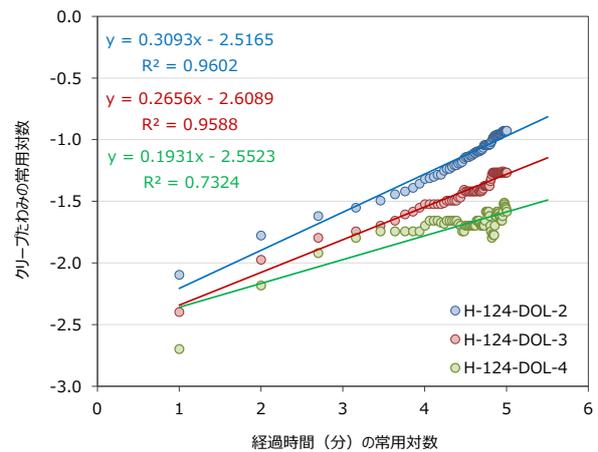


図 1.4-16 H-124 荷重点間変形量パワー則評価

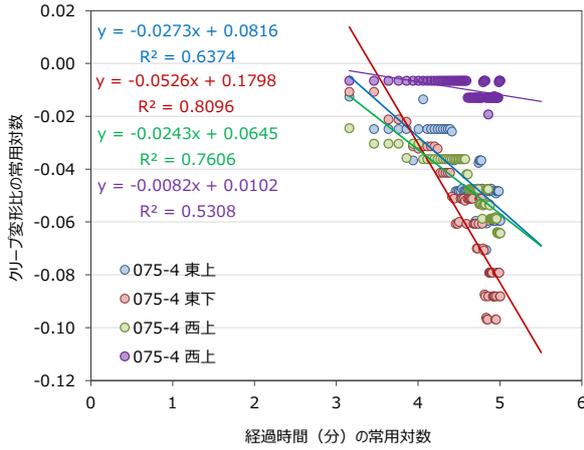


図 1.4-17 H-075 側面平行層変形量告示法評価

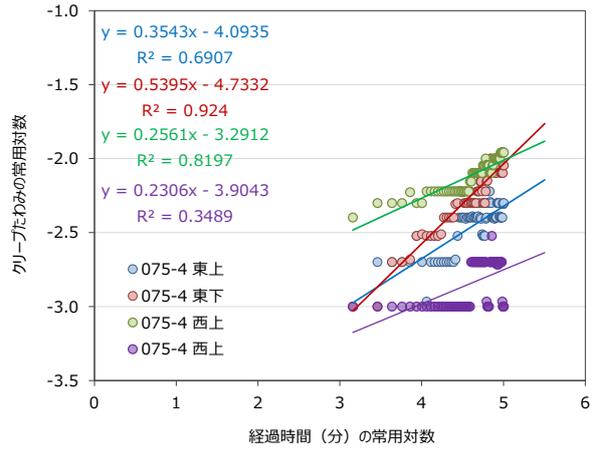


図 1.4-18 H-075 側面平行層変形量パワー則評価

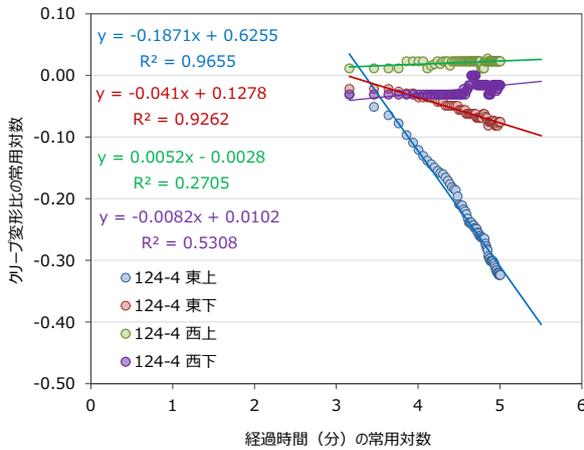


図 1.4-19 H-124 側面平行層変形量告示法評価

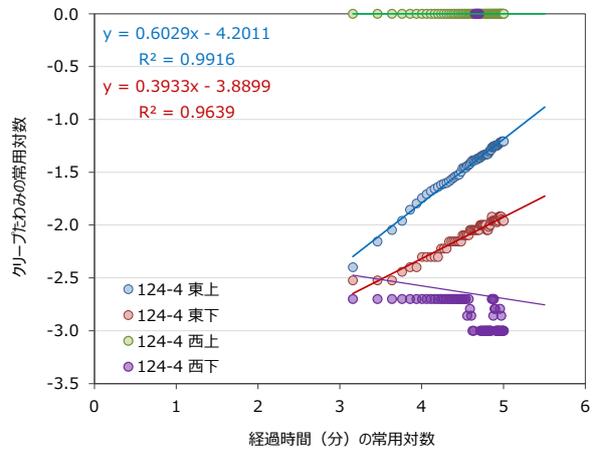


図 1.4-20 H-124 側面平行層変形量パワー則評価

1.4.4 まとめ

ヒノキ異等級構成強度等級 Mx90 で、5層 5ply 強軸の CLT の長期面外曲げ試験を行った。平行層は、ひき板の幅と厚さ (25mm) の比を 4.2 倍 (幅 105mm) で統一し、直交層については、ひき板の幅と厚さ (25mm) の比を 3.0 倍 (幅 75mm)、4.2 倍 (幅 105mm) 及び 5.0 倍 (幅 124mm) の仕様として、各仕様 4 体ずつ計 12 体製作した。

長期面外曲げ試験を行う前に、縦振動法及びたわみ振動法(T.G.H.法)により非破壊試験を行った。密度については、直交層ひき板の幅と厚さの比を 3.0 倍 (幅 75mm) としたものが、他に比べ、平均値が少し低い値であった。縦振動法による縦振動弾性係数、たわみ振動法による面外方向の曲げヤング係数それぞれの平均値はあまり差がなかった。たわみ振動法による面外方向のせん断弾性係数平均値は、幅と厚さの比が 3.0 倍の試験体において、他の比の試験体に比べ 35%低い値であった。

長期面外曲げ試験は、モーメントアーム方式で、非空調の試験室において 12 月 5 日開始し、70 日間行った。載荷は、3 等分点 4 点荷重方式で、平成 28 年 3 月 31 日国土交通省告示第 561 号許容応力度の計算方法に従い、長期荷重として 10.54kN を載荷した。たわみ量は、せん断の影響のある区間の支点間中央の変形量、せん断の影響のない区間の荷重点間の変形量を測定したが、その他、支点と荷重点中間の側面 2 か所の層間変形量も測定した。

70 日間の各変位計の変形量においては、支点間中央変形量及び荷重点間中央変形量は全体に上昇傾向であり、側面平行層の変形量は加力点側（上側）外層が木口面方向に動き、支点側（下側）が中心方向に動く傾向を示した。また、温度は低く減少傾向、相対湿度は上昇傾向であった。

各箇所の変形量の解析は、告示法及びパワー則で評価した。その結果、支点間中央及び荷重点間の中央では、変形増大係数の差はあまりなかった。直交層の幅と厚さの比の違いが、長期荷重試験に与える影響は少ないと考えられた。側面平行層変形では、直交層の幅と厚さの比 3.0 倍及び 5.0 倍の 2 体とも、変形増大係数が非常に大きくなる測定個所があり、今後どのような変形が進行するのか注意深く観察する必要があると考えられた。

文献

- 1.4-1) 久保島吉貴：未発表資料
- 1.4-2) 日本ツーバイフォー建築協会："2002 年枠組壁工法建築物構造計算指針", 工業調査会, 東京,2002, p187.
- 1.4-3) 日本・住宅木材技術センター："構造用木材の強度試験マニュアル",2011.3,p49-p54

1.5 面内曲げ性能

1.5.1 試験の方法

面内曲げ試験の試験体の概要を表 1.5-1 に示す。試験体は全層ヒノキの直交層ラミナの幅が 75mm、105mm、124mm の異なる 3 種である。寸法は幅が 125mm、厚みが 300mm、長さは 5,900mm である。

面内曲げ試験の前に、縦振動法による縦振動ヤング係数を、たわみ振動法(T.G.H.法)による面内方向及び面外方向の曲げヤング係数及びせん断弾性係数を求めた。縦振動法では、小型 FFT 分析器 (リオン(株) SA-78) にマイクロフォンを用いて、たわみ振動法では同器に加速度ピックアップを用いて、固有振動数の測定を行った。

面内曲げ試験は、支点間距離を試験体の材せいの 18 倍とした 5,400mm、荷重点間距離は材せいの 6 倍とした 1,800mm の 3 等分点 4 点荷重方式で行った。試験には実大木材強度試験機 (株東京衡機、最大容量 1,000kN) を使用した。載荷中は支点間中央におけるたわみを試験体の両側面で変位計(株東京測器研究所 SDP-200D)を用いて測定し、その平均値をたわみとした。さらに、荷重点間のたわみを袴型治具により変位計 (株東京測器研究所 CDP-25) を用いて測定した。試験終了後は、破壊部の近傍から長さ約 30 mm の含水率測定用の試験片を採取し、全乾重量法で含水率を求めた。試験の状況を写真 1.5-1 に示す。

表 1.5-1 面内曲げ試験 試験体の概要

番号 区分	構成	ラミナの寸法			試験体 寸法			外層の 方向	試験 体数
		厚み	幅		幅	厚み	長さ		
			平行層	直交層					
75	5層5プライ Mx90	25	105	75	125	300	5,900	強軸	5
105	5層5プライ Mx90	25	105	105	125	300	5,900	強軸	5
124	5層5プライ Mx90	25	105	124	125	300	5,900	強軸	5



写真 1.5-1 面内曲げ試験の状況

1.5.2 結果及び考察

面内曲げ試験の結果を表 1.5-2、図 1.5-1~1.5-2 に、荷重—スパン中央変位曲線を図 1.5-3~1.5-5 に、破壊形態の例を写真 1.5-2~1.5-7 に示す。

面内曲げ強さの平均値は、試験体 75 で 27.6 N/mm²、105 で 25.6 N/mm²、124 で 26.6 N/mm²と同程度で差はなかった。試験体 105-2 は他のものより曲げ強さが低い値であったが、破壊の起因となった FJ が両側面の引張側ラミナのほぼ同じ位置にあったためと推察される。また、実験によるヤング係数も同程度で差はなかった。曲げ強さと曲げヤング係数のばらつきについても差異はなかったが、試験体 105 は 75 と 124 に比べばらつきが大きかった。直交層は曲げ性能にほとんど寄与していないことから、ラミナ幅の影響も生じていないもの推察される。

破壊形態は、主に引張側のラミナの FJ 又は節を起因とし、脆的な破壊形態であった。

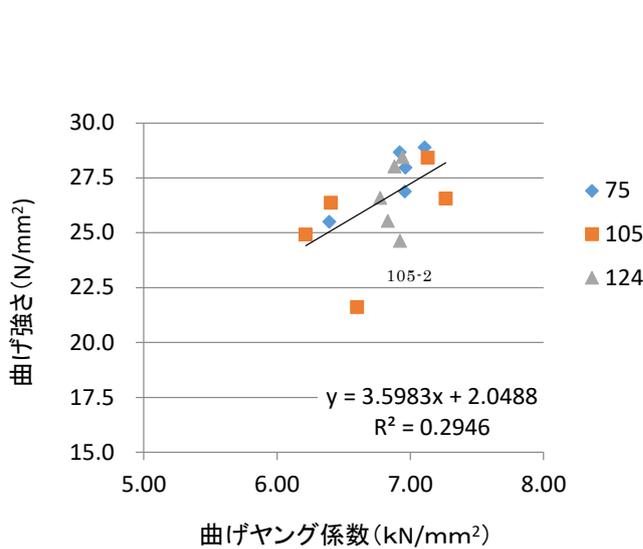


図 1.5-1 面内曲げのヤング係数と曲げ強さの関係

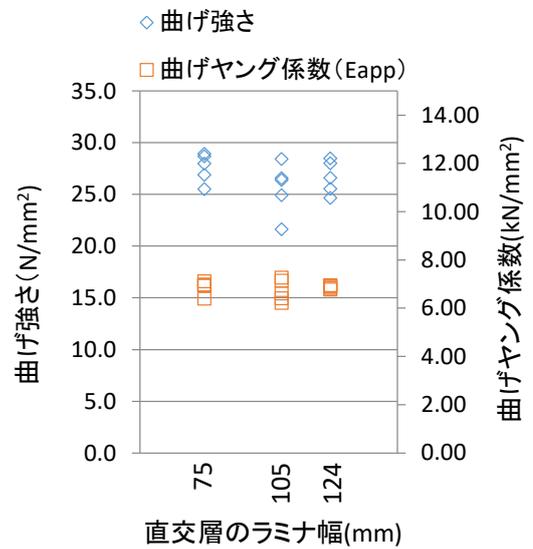


図 1.5-2 直交層ラミナの幅と面内曲げ強さ及び曲げヤング係数の関係

表 1.5-2 面内曲げ試験の結果

試験体 番号	密度	E_{fr}	E_{GHR}	G_{GHR}	E_{GHe}	G_{GHe}	E_{app}	E_{tru}	σ	P_{max}	δ_{max}	比例限度 荷重	比例限度 荷重時の たわみ	比例限度 荷重 /Pmax	変位 比例限度 荷重時 /Pmax時	含水率
	kg/m ³	kN/mm ²	N/mm ²	kN	mm	kN	mm			%						
75-1	481	7.47	10.50	0.20	7.45	0.76	6.96	7.53	26.9	57.20	94.2	55.10	78.3	0.96	0.83	10.5%
75-2	487	7.00	10.37	0.21	7.02	0.90	6.39	6.57	25.5	54.30	94.4	49.70	76.3	0.92	0.81	10.4%
75-3	482	7.46	10.50	0.20	7.57	0.81	6.92	7.13	28.7	61.00	87.3	60.32	86.2	0.99	0.99	10.3%
75-4	488	7.60	10.64	0.20	7.68	0.82	7.11	7.44	28.9	61.25	90.1	51.92	72.6	0.85	0.81	10.4%
75-5	481	7.43	10.17	0.21	7.52	0.80	6.97	7.15	28.0	59.35	93.2	53.34	76.0	0.90	0.81	10.7%
平均	484	7.39	10.44	0.21	7.45	0.82	6.87	7.16	27.6	58.62	91.8	54.07	77.9	0.92	0.85	10.5%
最小値	481	7.00	10.17	0.20	7.02	0.76	6.39	6.57	25.5	54.30	87.3	49.70	72.62	0.85	0.81	10.3%
最大値	488	7.60	10.64	0.21	7.68	0.90	7.11	7.53	28.9	61.25	94.4	60.32	86.24	0.99	0.99	10.7%
標準偏差	3.43	0.23	0.17	0.01	0.25	0.05	0.28	0.37	1.41	2.91	3.07	4.01	5.10	0.06	0.08	0.13%
変動係数	0.71%	3.12%	1.68%	2.46%	3.42%	5.90%	4.02%	5.23%	5.10%	4.96%	3.34%	7.42%	6.54%	6.01%	9.16%	1.26%
105-1	492	7.07	10.06	0.31	7.05	0.87	6.40	6.71	26.4	56.05	88.4	46.70	72.1	0.83	0.82	10.2%
105-2	485	7.17	9.76	0.32	7.19	0.90	6.60	7.06	21.6	45.95	68.2	45.93	68.2	1.00	1.00	10.0%
105-3	500	6.76	9.42	0.33	6.78	1.01	6.22	6.54	24.9	53.05	88.8	44.36	70.1	0.84	0.79	10.5%
105-4	496	7.61	10.82	0.33	7.63	0.93	7.13	7.19	28.4	60.45	86.8	53.13	72.9	0.88	0.84	10.5%
105-5	499	7.82	11.01	0.31	7.73	0.88	7.27	7.69	26.6	56.60	85.8	41.32	54.9	0.73	0.64	10.6%
平均	495	7.29	10.21	0.32	7.27	0.92	6.72	7.04	25.6	54.42	83.6	46.29	67.65	0.86	0.82	10.4%
最小値	485	6.76	9.42	0.31	6.78	0.87	6.22	6.54	21.6	45.95	68.2	41.32	54.93	0.73	0.64	10.0%
最大値	500	7.82	11.01	0.33	7.73	1.01	7.27	7.69	28.4	60.45	88.8	53.13	72.91	1.00	1.00	10.6%
標準偏差	5.96	0.42	0.68	0.01	0.40	0.06	0.46	0.45	2.54	5.42	8.69	4.34	7.34	0.10	0.13	0.24%
変動係数	1.20%	5.83%	6.69%	4.08%	5.5%	6.1%	6.80%	6.40%	9.93%	9.95%	10.40%	9.39%	10.85%	11.38%	15.72%	2.32%
124-1	495	7.48	10.52	0.32	7.38	0.88	6.77	7.01	26.6	56.65	98.6	48.32	70.02	0.85	0.71	10.5%
124-2	485	7.56	10.41	0.32	7.46	0.88	6.88	7.25	28.0	59.60	97.1	55.71	80.06	0.93	0.82	10.3%
124-3	497	7.74	10.72	0.33	7.65	0.89	6.94	6.98	28.5	60.65	99.2	56.94	81.27	0.94	0.82	10.7%
124-4	488	7.37	10.47	0.29	7.37	0.88	6.83	7.13	25.5	54.35	78.0	54.31	78.00	1.00	1.00	10.3%
124-5	496	7.51	10.40	0.30	7.46	0.84	6.92	7.15	24.6	52.40	81.6	45.10	64.54	0.86	0.79	10.4%
平均	492	7.53	10.50	0.31	7.46	0.87	6.87	7.11	26.6	56.73	90.9	52.08	74.78	0.92	0.83	10.4%
最小値	485	7.37	10.40	0.29	7.37	0.84	6.77	6.98	24.6	52.40	78.0	45.10	64.54	0.85	0.71	10.3%
最大値	497	7.74	10.72	0.33	7.65	0.89	6.94	7.25	28.5	60.65	99.2	56.94	81.27	1.00	1.00	10.7%
標準偏差	5.12	0.14	0.13	0.01	0.11	0.02	0.07	0.11	1.61	3.46	10.2	5.12	7.21	0.06	0.11	0.16%
変動係数	1.04%	1.79%	1.25%	4.16%	1.5%	1.9%	1.00%	1.54%	6.06%	6.11%	11.27%	9.82%	9.64%	6.64%	12.79%	1.57%

E_{fr} : 縦振動法による縦弾性係数 (単位kN/mm²)

E_{GHR} : 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_{GHR} : 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_{GHe} : 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_{GHe} : 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)

E_{app} : 強度試験で得られた見かけの弾性係数 (単位kN/mm²)

E_{tru} : 強度試験で得られた真の弾性係数 (単位kN/mm²)

σ : 強度試験で得られた曲げ強さ (単位N/mm²)

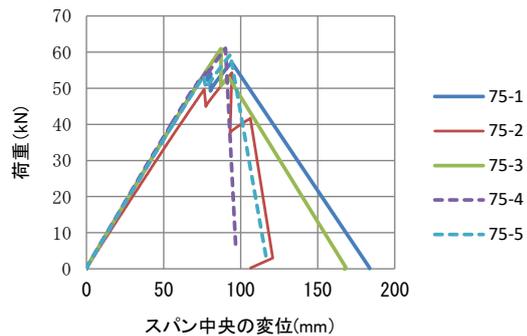


図 1.5-3 荷重とスパン中央の変位
の関係 (直交層ラミナ 75mm)



写真 1.5-2 破壊の形態
(直交層ラミナ 75mm)

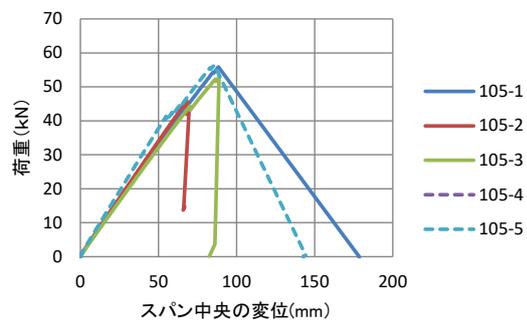


図 1.5-4 荷重とスパン中央の変位
の関係 (直交層ラミナ 105mm)



写真 1.5-3 破壊の形態
(直交層ラミナ 105mm)

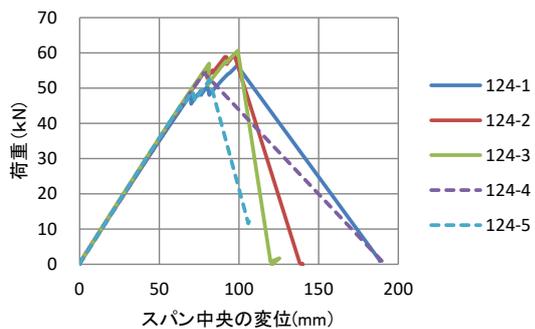


図 1.5-5 荷重とスパン中央の変位
の関係 (直交層ラミナ 124mm)



写真 1.5-4 破壊の形態
(直交層ラミナ 124mm)



写真 1.5-5 破壊の形態 (試験体 75-5)

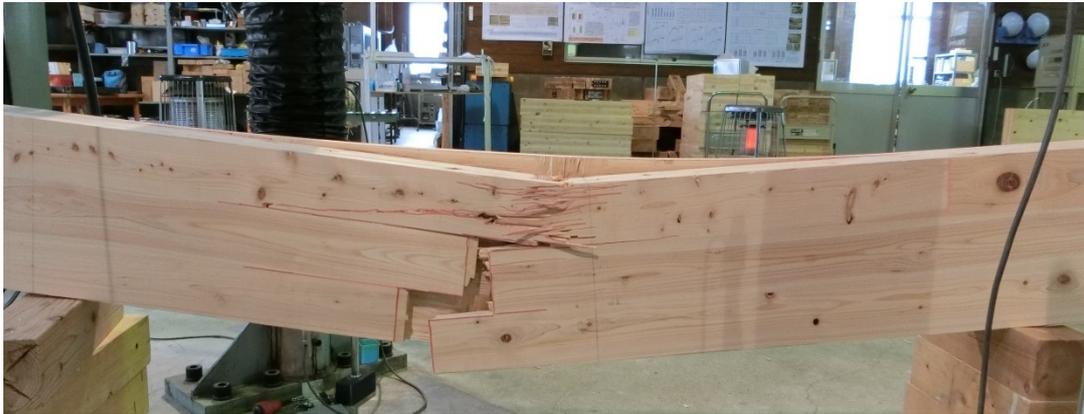


写真 1.5-6 破壊の形態 (試験体 105-4)

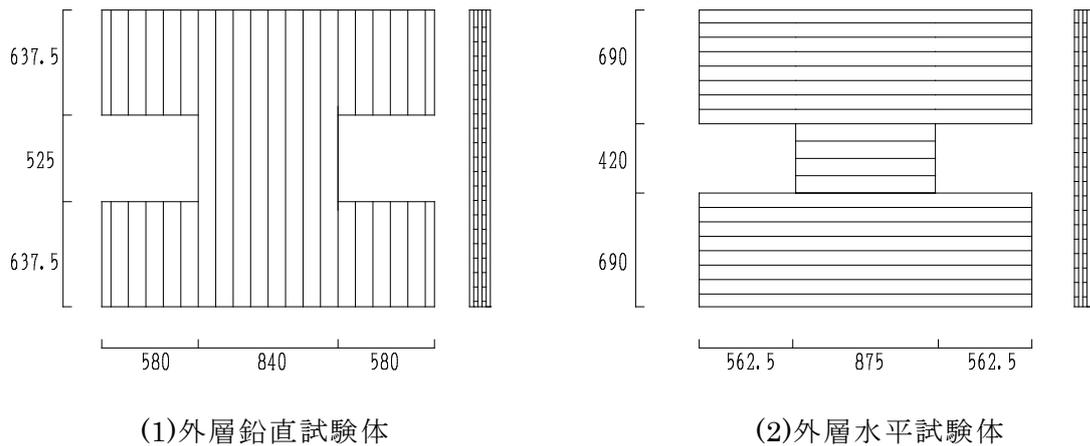


写真 1.5-7 破壊の形態 (試験体 124-1)

1.6 面内せん断性能

1.6.1 試験体の概要

図 1.6.1 に試験体図を、表 1.6.1 に試験体仕様を示す。パラメーターは偶数層ラミナの幅 3 種類 (74mm、105mm、124mm) と、加力方向と外層ラミナの繊維方向 2 種類 (鉛直・水平) であり、合計 6 種類について各 1 体ずつ実験を行った。試験体形状はエ形で、くびれ部分の寸法は面内曲げ強度と面内せん断強度を仮定し、面内せん断破壊するような寸法 (外層鉛直 : 840 mm×525mm、外層水平 : 875 mm×420mm) とした。試験体セットアップ図を図 1.6. 2 に示す。加力は一方向単調載荷である。



(1)外層鉛直試験体

(2)外層水平試験体

図 1.6.1 試験体形状

表 1.6.1 試験体仕様

試験体名	樹種	層構成	加力方向に対する外層ラミナの繊維方向	ラミナ厚 [mm]	奇数層ラミナ幅 [mm]	偶数層ラミナ幅 [mm]
幅 75mm 外層ラミナ鉛直	ヒノキ	5層 5プライ	鉛直	25	105	75
幅 105mm 外層ラミナ鉛直						105
幅 124mm 外層ラミナ鉛直						124
幅 75mm 外層ラミナ水平			水平			75
幅 105mm 外層ラミナ水平						105
幅 124mm 外層ラミナ水平						124

1.6.2 試験方法

図 1.6.2 に試験のセットアップを示す。E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、载荷フレームに取り付ける。

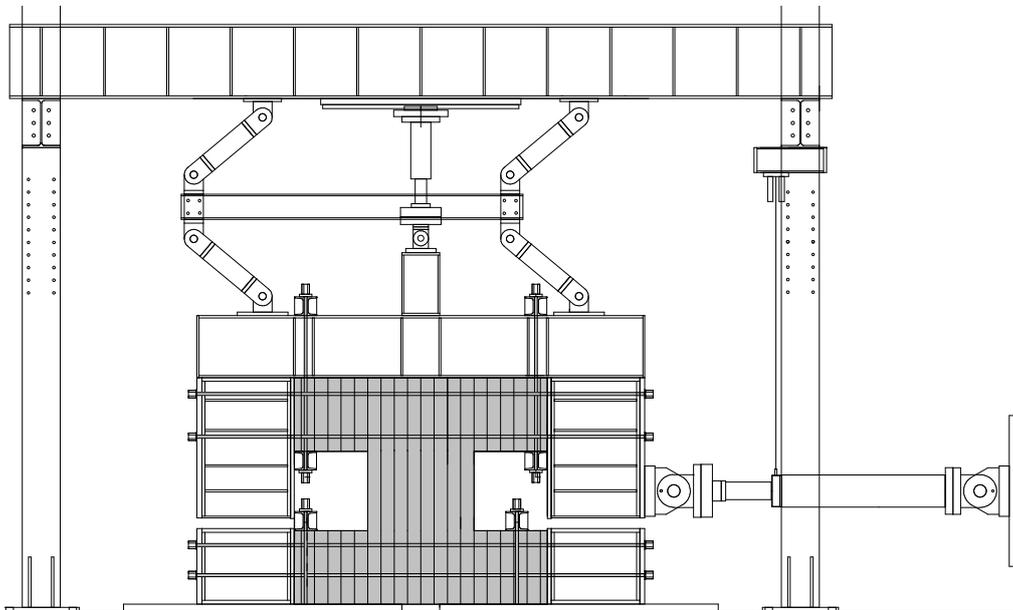


図 1.6.2 試験のセットアップ

図 1.6.3、1.6.4 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 1.6.3 試験体の様子

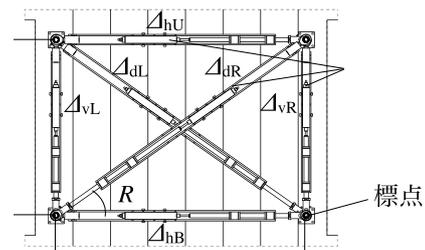
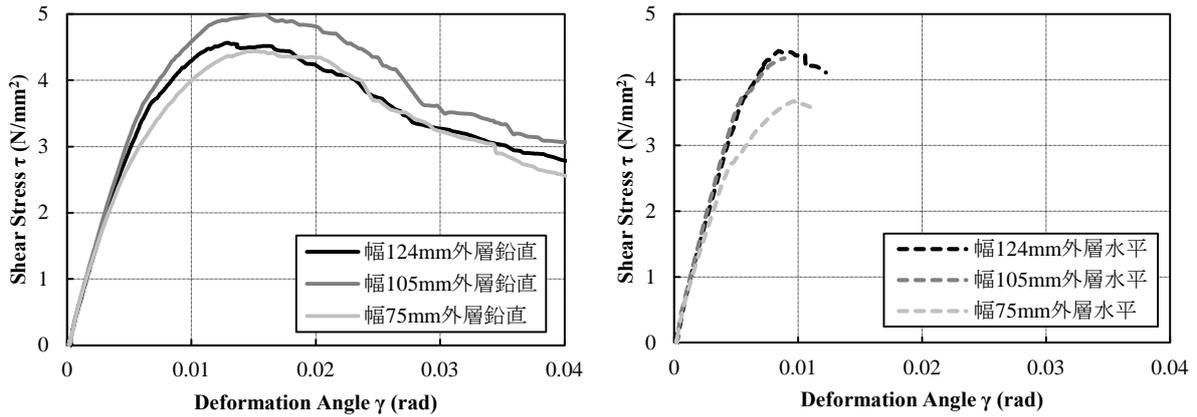


図 1.6.4 計測装置概要

1.6.3 結果および考察

図 1.6.5 にせん断応力度変形角関係を、表 1.6.2 に試験で得られたせん断強度、せん断弾性係数を、そして写真 1.6.1 に試験体の破壊性状を示す。

内層ラミナ幅が大きくなるにつれて、破壊モードが III から I へ移り、強度や剛性が大きくなる傾向が見られた。



(a) 加力方向に対し外層ラミナ鉛直方向 (b) 加力方向に対し外層ラミナ水平方向

図 1.6.5 せん断応力度変形角関係

表 1.6.2 試験結果一覧

試験体名	τ_{\max} [N/mm ²]	τ_{\max} 告示式 [N/mm ²]	τ_{limit} [N/mm ²]	G [N/mm ²]	破壊
幅 75mm 外層鉛直	4.44	2.26	2.36	618	III
幅 105mm 外層鉛直	4.99	2.70	2.87	656	I
幅 124mm 外層鉛直	4.56	2.70	2.72	625	I
幅 75mm 外層水平	3.67	2.26	2.63	667	III
幅 105mm 外層水平	4.32	2.70	3.79	745	III
幅 124mm 外層水平	4.44	2.70	3.77	719	III

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

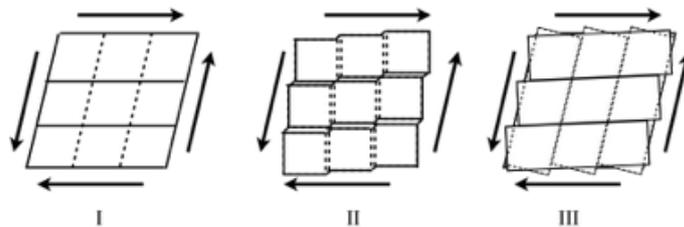


図 1.6.5 破壊モード



幅 75mm 外層鉛直



幅 75mm 外層水平



幅 105mm 外層鉛直



幅 105mm 外層水平



幅 124mm 外層鉛直



幅 124mm 外層水平

写真 1.6.1 破壊の様子

1.7 引張り性能

1.7.1 非破壊試験及び引張り試験方法

CLTの引張り試験体の概要を表 1.7-1 に示す。全層ヒノキの5層5プライで、ラミナ厚と平行層ラミナ幅は一定とし、直交層ラミナ幅を75、105、124mmと変化させた。

表 1.7-1 CLT引張り試験体の概要

等級・層構成	平行層 ラミナ幅 (mm)	直交層 ラミナ幅 (mm)	ラミナ 厚 (mm)	方向	寸法(mm) (厚さ×幅×長さ)	試験体数
Mx90-5-5	105	75	25	強軸	125×300×5900	5
		105				5
		124				5

引張り試験に先立ち、縦振動法によるヤング係数および面外・面内方向のT.G.H.法（曲げたわみ振動法）による曲げヤング係数・せん断弾性係数を測定した。縦振動法は材端木口部をハンマーで打撃し、反対側の材端に固定した加速度ピックアップにより1次の固有振動数を収録した。T.G.H.法はハンマーを用いて、材端上部を打撃し、打撃部近傍に設置した加速度ピックアップを用いて1～7次の固有振動数を測定した。支点の位置は材長の0.224倍とした。T.G.H.法による面内・面外方向の固有振動数測定の様子をそれぞれ写真1.7-1、1.7-2に示す。



写真 1.7-1 (左)、1.7-2 (右) T.G.H.法による面内 (左)・面外 (右) 方向の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、HYS-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1.7-3、1.7-4に示す。試験終了後、破壊部近傍から長さが約30mmの含水率測定用試験体を切り出し、全乾法で含水率を測定した。



写真 1.7-3 引張り試験の様子

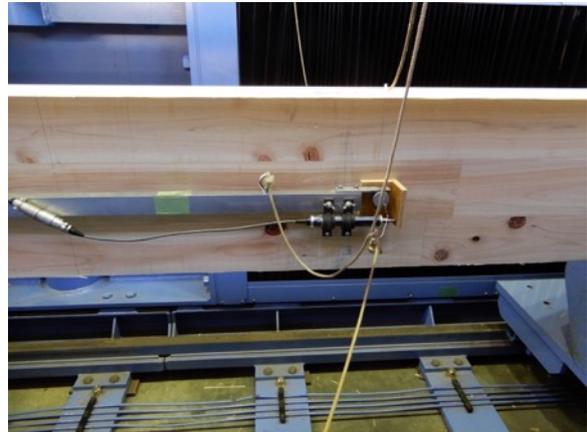


写真 1.7-4 変位計とヨークの取り付けの様子

1.7.2 CLT の引張り試験の結果および考察

直交層ラミナ幅が 75、105、124mm の試験体の破壊形態の例をそれぞれ写真 1.7-5～1.7-10 に示す。平行層外層の破壊は主に各ラミナのフィンガージョイント部で生じていた。幅はぎをしていないこともあり、直交層については一部に破壊が認められるものの、ラミナ同士が離れただけのものが多く見られた。平行層内層の破壊は、フィンガージョイントの有無に関わらず、直交層ラミナが離れた位置の隣接部で生じたものが多く見られた。



写真 1.7-5 (左)、1.7-6 (右) 直交層ラミナ幅が 75mm の試験体の破壊形態の例



写真 1.7-7 (左)、1.7-8 (右) 直交層ラミナ幅が 105mm の試験体の破壊形態の例



写真 1.7-9 (左)、1.7-10 (右) 直交層ラミナ幅が 124mm の試験体の破壊形態の例

CLT の引張り試験の結果をラミナ幅ごとに表 1.7-2～1.7-4 に示すとともに、全試験体の統計値を表 1.7-5 に示す。

表 1.7-2 CLT の引張り試験結果 (直交層ラミナ幅 75mm)

番号	密度 (kg/m ³)	E _{fr}	E _{TGHf}	G _{TGHf}	E _{TGHe}	G _{TGHe}	E _t	σ _t	含水率 (%)
S-075-T-1	482	7.49	10.6	0.213	7.64	0.804	7.15	21.2	9.42
S-075-T-2	487	7.80	10.9	0.215	7.95	0.767	7.67	17.8	9.18
S-075-T-3	489	7.44	10.5	0.201	7.57	0.770	7.31	20.1	9.50
S-075-T-4	491	7.56	10.7	0.204	7.96	0.788	7.09	18.7	9.35
S-075-T-5	470	7.55	10.7	0.201	7.52	0.727	7.30	15.8	9.48
平均値	484	7.57	10.7	0.207	7.73	0.771	7.30	18.7	9.38
最小値	470	7.44	10.5	0.201	7.52	0.727	7.09	15.8	9.18
最大値	491	7.80	10.9	0.215	7.96	0.804	7.67	21.2	9.50
標準偏差	8.16	0.138	0.154	0.00660	0.213	0.0290	0.227	2.09	0.131
変動係数 (%)	1.69	1.82	1.44	3.19	2.75	3.77	3.11	11.1	1.40

表 1.7-3 CLT の引張り試験結果 (直交層ラミナ幅 105mm)

番号	密度(kg/m ³)	E _{fr}	E _{TGHf}	G _{TGHf}	E _{TGHe}	G _{TGHe}	E _t	σ _t	含水率 (%)
S-105-T-1	488	7.23	10.1	0.215	7.37	0.846	7.67	19.7	9.24
S-105-T-2	499	7.31	10.4	0.319	8.33	0.721	6.68	17.5	9.06
S-105-T-3	502	7.65	11.1	0.310	7.85	0.874	7.55	15.9	9.48
S-105-T-4	491	7.50	10.4	0.373	7.73	0.914	6.92	19.6	8.99
S-105-T-5	500	7.61	10.3	0.340	7.73	0.888	7.31	18.5	9.20
平均値	496	7.46	10.4	0.311	7.80	0.849	7.22	18.2	9.19
最小値	488	7.23	10.1	0.215	7.37	0.721	6.68	15.9	8.99
最大値	502	7.65	11.1	0.373	8.33	0.914	7.67	19.7	9.48
標準偏差	6.13	0.182	0.414	0.0590	0.346	0.0755	0.419	1.58	0.192
変動係数(%)	1.24	2.44	3.97	19.0	4.43	8.90	5.80	8.66	2.09

表 1.7-4 CLT の引張り試験結果 (直交層ラミナ幅 124mm)

番号	密度 (kg/m ³)	E _{fr}	E _{TGHf}	G _{TGHf}	E _{TGHe}	G _{TGHe}	E _t	σ _t	含水率 (%)
S-124-T-1	502	7.91	11.4	0.319	7.94	0.896	7.38	19.4	9.13

S-124-T-2	489	7.90	11.4	0.317	8.03	0.876	7.80	20.1	8.96
S-124-T-3	493	7.92	11.5	0.321	8.16	0.829	7.66	16.8	8.97
S-124-T-4	489	7.68	11.0	0.311	7.77	0.797	7.21	18.1	8.97
S-124-T-5	494	7.40	10.4	0.314	7.60	0.891	7.45	20.9	9.00
平均値	493	7.76	11.1	0.316	7.90	0.858	7.50	19.1	9.01
最小値	489	7.40	10.4	0.311	7.60	0.797	7.21	16.8	8.96
最大値	502	7.92	11.5	0.321	8.16	0.896	7.80	20.9	9.13
標準偏差	5.08	0.228	0.468	0.00403	0.220	0.0431	0.232	1.66	0.0681
変動係数 (%)	1.03	2.94	4.20	1.27	2.79	5.02	3.10	8.73	0.756

表 1.7-5 CLT の引張り試験結果の統計値 (全試験体)

	密度(kg/m ³)	Efr	E _{TGHf}	G _{TGHf}	E _{TGHe}	G _{TGHe}	Et	σ _t	含水率 (%)
平均値	491	7.60	10.7	0.278	7.81	0.826	7.34	18.7	9.20
最小値	470	7.23	10.1	0.201	7.37	0.721	6.68	15.8	8.96
最大値	502	7.92	11.5	0.373	8.33	0.914	7.80	21.2	9.50
標準偏差	8.22	0.216	0.457	0.0611	0.258	0.0634	0.308	1.69	0.206
変動係数(%)	1.67	2.84	4.25	22.0	3.30	7.68	4.19	9.07	2.24

Efr : 縦振動法によるヤング係数 (単位 kN/mm²)

E_{TGHf} : T.G.H.法による面外方向の曲げヤング係数 (単位 kN/mm²)

G_{TGHf} : T.G.H.法による面外方向のせん断弾性係数 (単位 kN/mm²)

E_{TGHe} : T.G.H.法による面内方向の曲げヤング係数 (単位 kN/mm²)

G_{TGHe} : T.G.H.法による面内方向のせん断弾性係数 (単位 kN/mm²)

Et : 引張りヤング係数 (単位 kN/mm²)

σ_t : 引張り強度 (単位 N/mm²)

等価断面法により引張り強度の推定を行なった。推定に使用した値について、外層ラミナ・内層ラミナのヤング係数は M90、M60 ラミナ縦引張り試験体の縦振動法によるヤング係数の平均値、それぞれ 12.9、10.6kN/mm²を用いた。外層ラミナの引張り強度は M90 ラミナ縦引張り試験体の縦引張り強度の平均値 32.7N/mm²を用いた。直交層ラミナのヤング係数は 0 と仮定した。等価断面法による推定の結果、引張り強度は 18.5N/mm²と算出された。

直交層ラミナ幅と引張りヤング係数・引張り強度との関係をそれぞれ図 7.1-1、7.1-2 に示すとともに、引張り強度の推定値を図 7.1-2 内に破線で示す。引張りヤング係数、引張り強度とも、直交層ラミナ幅が両者に及ぼす影響は認められなかった。また、全試験体の引張り強度の平均値は 18.7N/mm²、等価断面法による引張り強度の推定値 18.5N/mm²であり、等価断面法により CLT の引張り強度を精度良く推定できた。

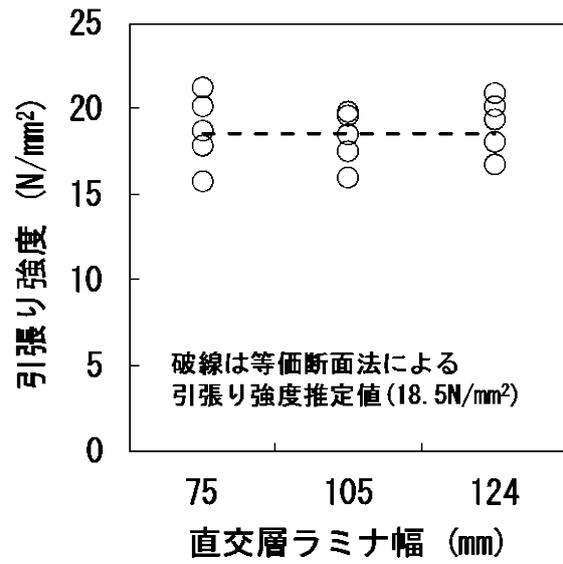
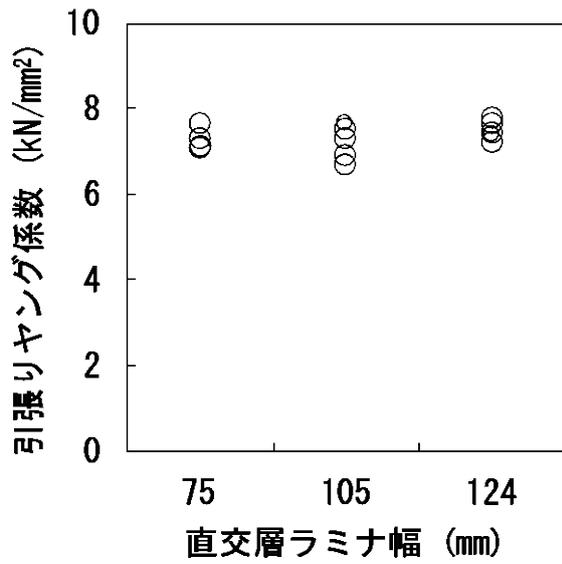


図 7.1-1 直交層ラミナ厚と引張りヤング係数との関係 図 7.1-2 直交層ラミナ幅と引張り強度との関係

1.8 圧縮・短柱性能

i) 試験体

短柱圧縮試験に用いた CLT は、5 層 5 プライのヒノキ CLT で、直交層ラミナの幅が 75mm、105mm、124mm の 3 種類で加力方向はすべて強軸方向である。試験体数は、長さを全断面に対する細長比 λ ($=h/\sqrt{12}$) で設定した $\lambda 15$ と $\lambda 30$ の 2 種類に対して各 3 体の合計 18 体である。試験体一覧を表 1.8-1 に示す。

表 1.8-1 短柱圧縮試験に用いた CLT の概要

等級・構成	直交層ラミナ幅 (mm)	細長比 (λ)	寸法 (mm) 厚さ×幅×長さ	試験体数
Mx90-5-5 強軸	75	15	125×300×540	3
		30	125×300×1080	3
	105	15	125×300×540	3
		30	125×300×1080	3
	124	15	125×300×540	3
		30	125×300×1080	3

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、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 5% 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 1.8-1 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。

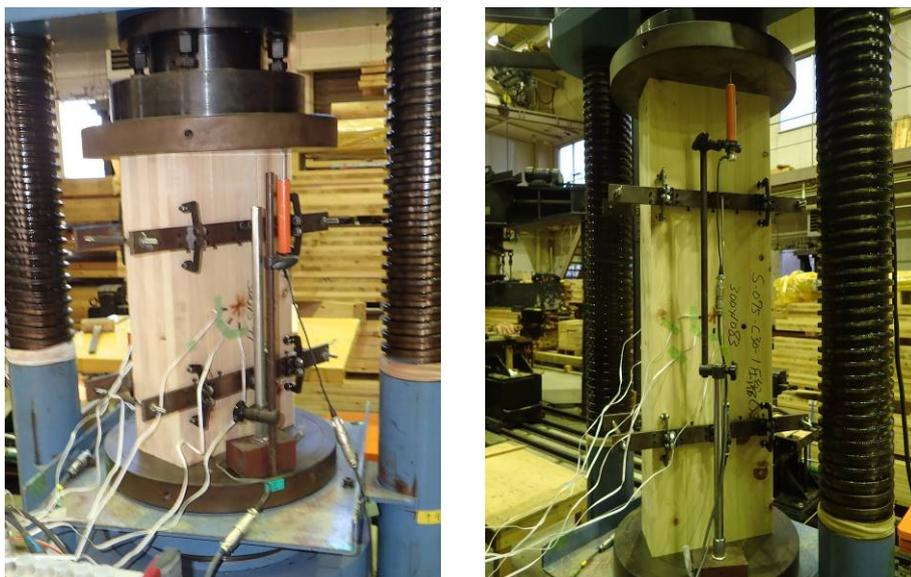


写真 1.8-1 試験の様子 (左: $\lambda 15$ 、右: $\lambda 30$)

iii) 破壊性状

破壊性状の例を写真 1.8-1 から写真 1.8-2 に示す。λ15 および λ30 の双方に共通して、フィンガージョイントや節を起点とした圧壊が表裏面で確認された。フィンガージョイントを起点とした破壊においては、フィンガー根元からラミナ内で割れ裂ける傾向にあり、面外に剥離するものもあった。割れ裂けが積層接着面に沿って進展するものもあった。



左側面

正面

右側面

裏面

写真 1.8-2 破壊性状の例 (上段 : λ15 の例、下段 : λ30 の例)

iv) 荷重変位関係

試験体中央部分の材長 1/2 の縮みを幅面の表裏変位計計測値の平均値を変位として、荷重と変位の関係曲線の例を図 1.8-1 から図 1.8-6 に、試験結果の一覧を表 1.8-2 および表 1.8-3 に示す。

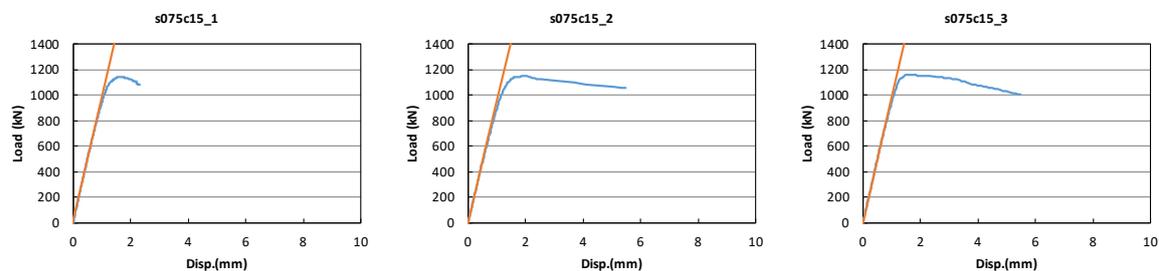


図 1.8-1 荷重変形関係（直交層ラミナ幅 75mm、 $\lambda 15$ ）

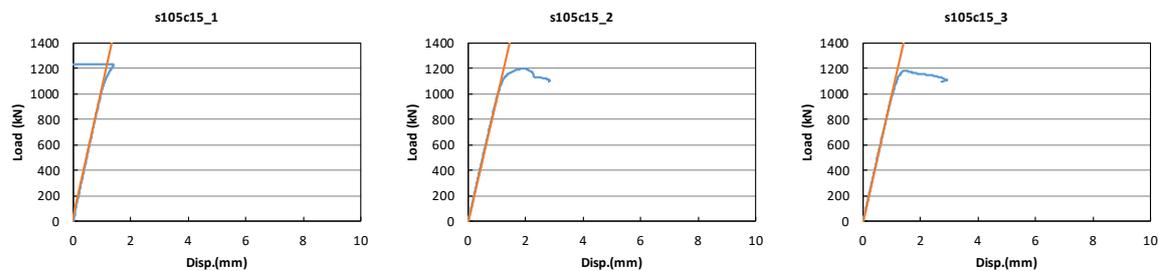


図 1.8-2 荷重変形関係（直交層ラミナ幅 105mm、 $\lambda 15$ ）

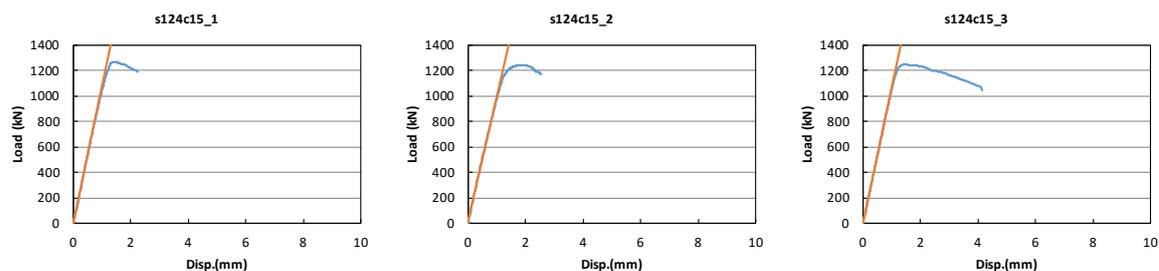


図 1.8-3 荷重変形関係（直交層ラミナ幅 124mm、 $\lambda 15$ ）

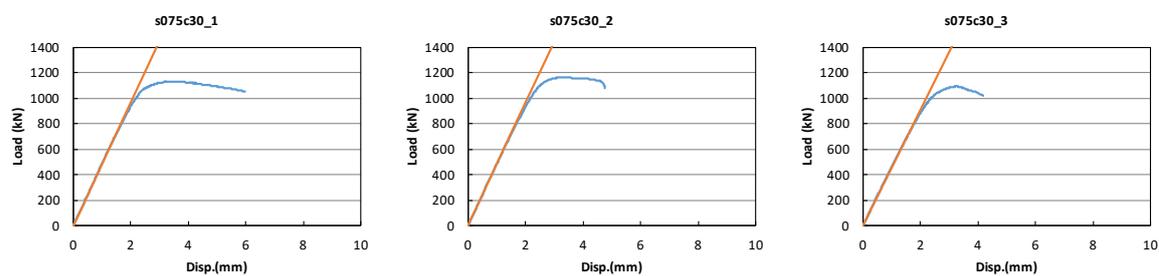


図 1.8-4 荷重変形関係（直交層ラミナ幅 75mm、 $\lambda 30$ ）

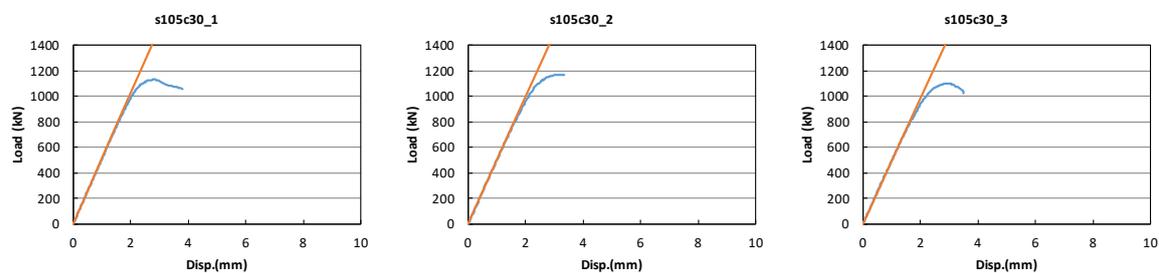


図 1.8-5 荷重変形関係（直交層ラミナ幅 105mm、 $\lambda 30$ ）

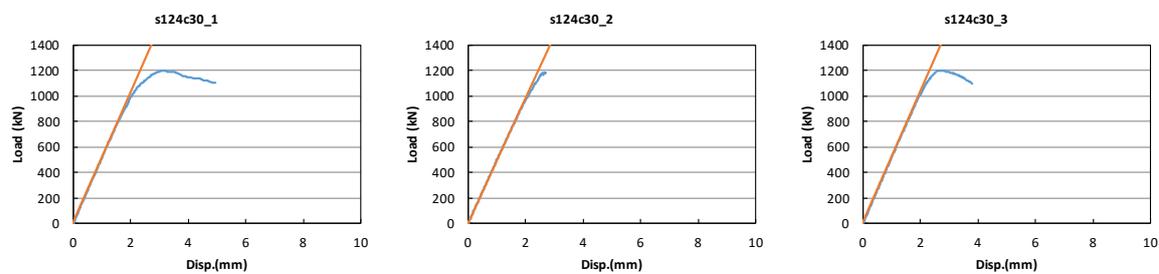


図 1.8-6 荷重変形関係（直交層ラミナ幅 124mm、 $\lambda 30$ ）

表 1.8-2 λ15 試験体結果一覧

番号	密度 (kg/m ³)	E_R (kN/mm ²)	E_c (kN/mm ²)	σ_c (N/mm ²)	含水率 (%)
λ15-075-1	488	6.48	6.91	30.1	9.44
λ15-075-2	490	6.18	6.65	30.2	9.10
λ15-075-3	480	6.28	6.90	30.6	9.30
平均	486	6.31	6.82	30.3	9.28
最大	490	6.48	6.91	30.6	9.44
最小	480	6.18	6.65	30.1	9.10
標準偏差	5.57	0.153	0.147	0.244	0.172
変動係数	1.15%	2.42%	2.15%	0.807%	1.86%
λ15-105-1	488	6.85	7.30	32.4	9.33
λ15-105-2	507	6.82	6.93	31.5	9.31
λ15-105-3	486	6.61	7.00	31.0	9.51
平均	493	6.76	7.08	31.6	9.38
最大	507	6.85	7.30	32.4	9.51
最小	486	6.61	6.93	31.0	9.31
標準偏差	11.6	0.129	0.199	0.705	0.109
変動係数	2.35%	1.90%	2.81%	2.23%	1.16%
λ15-124-1	487	6.89	7.55	33.3	8.25
λ15-124-2	486	6.87	6.98	32.7	9.03
λ15-124-3	491	6.91	7.42	32.7	8.50
平均	488	6.89	7.32	32.9	8.59
最大	491	6.91	7.55	33.3	9.03
最小	486	6.87	6.98	32.7	8.25
標準偏差	2.44	0.022	0.299	0.330	0.399
変動係数	0.500%	0.317%	4.08%	1.00%	4.64%

E_R : 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 1.8-3 λ30 試験体結果一覧

番号	密度 (kg/m ³)	E_H (kN/mm ²)	E_c (kN/mm ²)	σ_c (N/mm ²)	含水率 (%)
λ30-075-1	482	7.20	6.86	29.7	8.58
λ30-075-2	481	7.15	6.78	30.5	9.13
λ30-075-3	479	6.64	6.45	28.7	9.63
平均	481	7.00	6.70	29.6	9.11
最大	482	7.20	6.86	30.5	9.63
最小	479	6.64	6.45	28.7	8.58
標準偏差	1.91	0.307	0.219	0.928	0.524
変動係数	0.397%	4.39%	3.27%	3.13%	5.75%
λ30-105-1	480	7.60	7.20	29.7	8.10
λ30-105-2	501	7.33	7.00	30.8	8.30
λ30-105-3	487	7.21	6.92	28.9	8.47
平均	490	7.38	7.04	29.8	8.29
最大	501	7.60	7.20	30.8	8.47
最小	480	7.21	6.92	28.9	8.10
標準偏差	10.6	0.202	0.141	0.945	0.186
変動係数	2.17%	2.74%	2.00%	3.17%	2.24%
λ30-124-1	502	7.83	7.29	31.5	9.24
λ30-124-2	495	7.36	6.94	31.2	9.11
λ30-124-3	487	7.63	7.29	31.5	9.50
平均	494	7.61	7.17	31.4	9.28
最大	502	7.83	7.29	31.5	9.50
最小	487	7.36	6.94	31.2	9.11
標準偏差	7.59	0.236	0.202	0.170	0.197
変動係数	1.54%	3.10%	2.82%	0.543%	2.13%

E_H : 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)

図 1.8-7 に縦振動によるヤング係数と圧縮試験によるヤング係数の関係を示す。λ30 の試験体は縦振動によるヤング係数の方が高い傾向にあり、両者に直線関係が読み取れるが、λ15 の試験体は圧縮試験によるヤング係数の方が高い傾向にあり、直線関係は得られなかった。縦振動法による評価に対して試験体の長さが不足していたことが要因として考えられる。

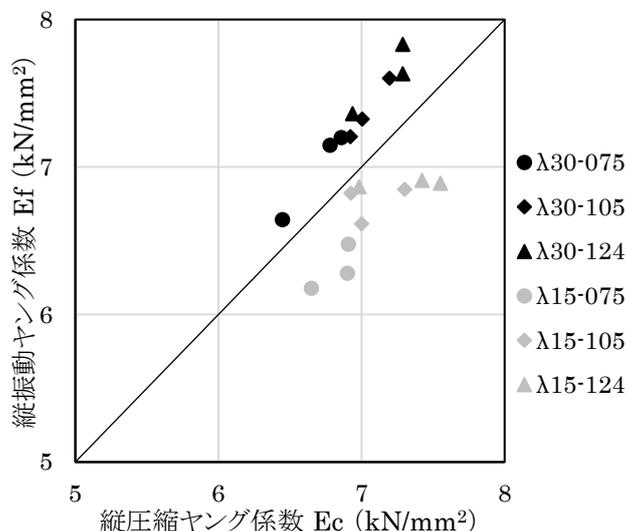
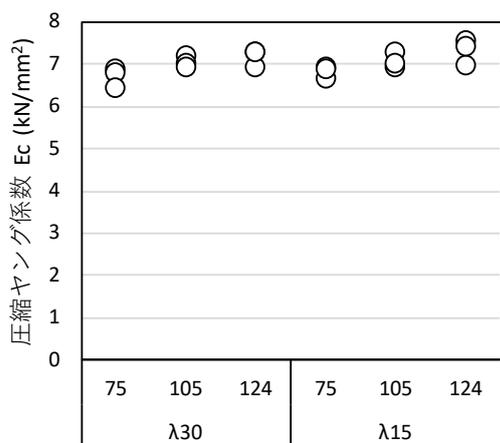


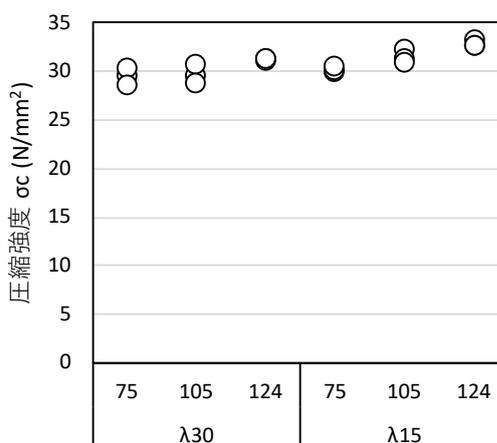
図 1.8-7 に縦振動によるヤング係数と圧縮試験によるヤング係数の関係

図 1.8-8 に直交層ラミナ幅毎のヤング係数の値を、図 1.8-9 に圧縮強度の値を示す。直交層ラミナ幅が大きくなると、ヤング係数、圧縮強度のともに大きくなる傾向が λ30 試験体と λ15 試験体の双方において得られた。圧縮強度については、λ30 よりも λ15 の方が少し高い印象にあった。平行層理論では、平行層のみの圧縮ヤング係数から CLT の強度を推定するため、本結果が示すように直交層の幅の違いが圧縮ヤング係数に影響を及ぼすことになる、そのメカニズムを説明する新たな理論が必要となる。したがって、今回の試験で得られた結果のみで、圧縮強度の有意差が直交層の幅の影響によるものであると結論付けることは尚早であり、試験体数を増やすなど、さらなる検証が必要である。



直交層ラミナ幅
試験長さ(mm)

図 1.8-8 直交層ラミナ毎のヤング係数



直交層ラミナ幅
試験長さ(mm)

図 1.8-9 直交層ラミナ毎の圧縮強度

1.9 座屈性能

1.9.1 試験

(1)試験体

座屈試験に供した試験体の仕様を表 1.9.1 に示す。平行層のラミナ幅が異なる 3 種類の試験体について試験を行った。試験の n 数は各仕様ともに 3 とした。

表 1.9.1 座屈試験体の仕様

平行層ラミナ幅 (mm)	試験体No.	加力 方向	厚さ	幅	長さ	細長比
			(mm)	(mm)	(mm)	
75	U-075-C110-1	強軸 方向	125	300	3969	110.0
	U-075-C110-2					
	U-075-C110-3					
105	U-105-C110-1					
	U-105-C110-2					
	U-105-C110-3					
124	U-124-C110-1					
	U-124-C110-2					
	U-124-C110-3					

(2)試験方法

試験は試験体の中立軸が加力軸芯となるように加力した（偏心加力を行っていない）。加力時の試験体頂部の鉛直変位、及び、試験体中央部の水平変位を測定した。また、加力方向に対して平行な層のラミナの材長中央部分、及び、材長の 4 等分点におけるひずみを測定した。

1.9.2 試験結果

(1)材料物性値

試験に供した試験体の各物性値を表 1.9.2 及び表 1.9.3 に示す。

表 1.9.2 座屈試験に供した試験体の寸法と重量

試験体No	重量 kg	全長 mm	幅 mm	厚 mm
U-124-C110-1	74.120	3970	301.21	126.92
U-124-C110-2	73.380	3971	300.53	126.98
U-124-C110-3	74.530	3969	300.35	127.06
U-105-C110-1	74.370	3971	300.72	127.44
U-105-C110-2	75.330	3971	300.77	127.16
U-105-C110-3	73.940	3971	300.27	126.97
U-075-C110-2	71.820	3972	300.57	127.01
U-075-C110-1	71.580	3972	300.57	127.03
U-075-C110-3	72.030	3971	301.20	127.20
U-075-C110-3	72.030	3971	301.20	127.20

表 1.9.3 座屈試験に供した試験体の密度とヤング係数

試験体No	周波数 Hz	密度 kg/m ³	ヤング係数 Efr kN/mm ²	ヤング係数 Efr 10 ³ kgf/cm ²
U-124-C110-1	496.3	488	7.58	77.3
U-124-C110-2	501.3	484	7.67	78.3
U-124-C110-3	495.0	492	7.60	77.5
U-105-C110-1	496.3	489	7.59	77.4
U-105-C110-2	505.0	496	7.98	81.4
U-105-C110-3	477.5	488	7.02	71.6
U-075-C110-2	497.5	474	7.40	75.4
U-075-C110-1	500.0	472	7.45	75.9
U-075-C110-3	505.0	473	7.62	77.7
U-075-C110-3	505.0	473	7.62	77.7

(2)座屈強度

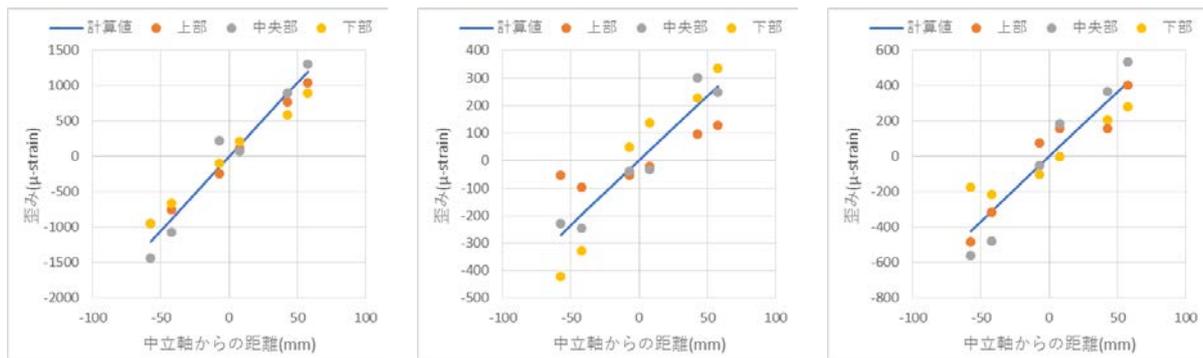
表 1.9.4 に試験結果として、最大座屈荷重 (P_{max})、southwell 法により算出した座屈荷重 (P_{cb})、及び、最大座屈強度 (σ_{max}) と southwell 法により算出した座屈強度 (σ_{cb}) を示す。平行層のラミナ幅が大きいほど、座屈強度は高い値と求まった。

(3)ひずみ

図 1.9.2 に平行層ラミナについて測定したひずみ量の結果を各仕様について示す。また、同表には、直交層においてせん断変形が生じないで、一体として変形していると仮定したときにラミナに生じるひずみ量を算定した結果を青線にて示す。ひずみの測定値は、材の両端部において計算値と異なる傾向にあった。直交層のせん断変形により、材の一体として変形していないものと考えられる。

表 1.9.4 座屈試験の結果

平行層ラミナ幅 (mm)	試験体No.	P_{max}	P_{cb}	σ_{max}	σ_{cb}	$\sigma_{cbAve.}$
		(kN)	(kN)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)
75	U-075-C110-1	282.0	285.7	7.52	7.62	7.48
	U-075-C110-2	269.7	277.8	7.19	7.41	
	U-075-C110-3	263.2	277.8	7.02	7.41	
105	U-105-C110-1	307.6	303.0	8.20	8.08	7.73
	U-105-C110-2	290.1	303.0	7.73	8.08	
	U-105-C110-3	248.5	263.2	6.63	7.02	
124	U-124-C110-1	296.5	294.1	7.91	7.84	7.85
	U-124-C110-2	299.1	303.0	7.98	8.08	
	U-124-C110-3	277.6	285.7	7.40	7.62	



(a)ラミナ幅 75mm

(b)ラミナ幅 105mm

(c)ラミナ幅 124mm

図 1.9.2 平行層ラミナのひずみ量

1.9.3 まとめ

一連の試験により以下のことが確認された。

- ① 平行層のラミナ幅が大きいほど、座屈強度は高い値と求まった。
- ② 材のラミナのひずみを測定した結果より、直交層のせん断変形により、材の一体として変形していないものと考えられる。

2 カラマツ CLT の各種強度性能に与えるラミナの寸法形状と幅はぎの影響

2.1 試験体の概要

2.1.1 試験体

2章において試験に用いたカラマツ CLT パネル（5層5プライ）の仕様を表 2.1-1 に示す。パネル番号 11～14 および 21～24 では幅はぎ接着された CLT でのラミナ幅（105mm と 75mm）の影響、パネル番号 3 および 4 ではラミナ幅 105mm での幅はぎの有無の影響、パネル番号 4 および 5 では幅はぎ接着されない CLT でのラミナ幅（105mm と 75mm）の影響、パネル番号 S1 および S2 では幅はぎ接着された CLT での積層接着の接着剤種類（水性高分子イソシアネート系木材接着剤=API とレゾルシノール樹脂接着剤=RF）の影響を調べることにした。

カラマツ CLT パネルは、次の条件により製造した。パネル製造に用いたカラマツラミナは、製材・乾燥された原板を打撃法およびグレーディング装置により測定した曲げヤング係数を用いて選別した（それぞれの CLT パネルに用いたラミナの品質は次節で詳述する）。パネル番号 11～14 および 21～24 の平行層ラミナにおいては、水性高分子イソシアネート系樹脂接着剤を用いて垂直型フィンガージョイント（FJ、フィンガー長：20 mm）により 3.6m 長さにてたて継ぎした。その他のパネル番号の平行層ラミナおよび全てのパネル番号の直交層ラミナはたて継ぎのない通しラミナ（NJ 材）とした。

幅はぎ接着については水性高分子イソシアネート系樹脂接着剤を用いて行い、パネル番号 S1・S2 ではラミナ幅 105mm で 10 枚ずつ、その他では 105mm なら 5 枚、75mm なら 7 枚ずつ幅はぎした。幅はぎ後、パネル番号 S1・S2 ではサンダー研削、その他ではプレーナー切削により厚さを揃えた。積層接着については、S2 ではレゾルシノール樹脂接着剤、その他では水性高分子イソシアネート系樹脂接着剤を用いて冷圧で行った。

表 2.1-1 試験体採取用のカラマツ CLT パネルの概要

CLT パネル						直交層ラミナ		平行層ラミナ	
厚さ (mm)	幅 (mm)	長さ (mm)	積層接着	枚数	番号	ラミナ幅 (mm)	幅はぎ接着	ラミナ幅 (mm)	幅はぎ接着
125	1050	3598	API	4	11~14	105	あり(514)	105	あり(525)
				4	21~24	75			
				1	3	105	あり(514)		
				1	4	105	なし		
				1	5	75			
125	1050	3150	API	1	S1	105	あり(1050)	105	あり(1050)
			RF	1	S2				

※幅はぎ接着のカッコ内の数字は幅はぎ後の合計幅（mm）である。

これらのパネルから面外せん断試験体、面外曲げ試験体、面内曲げ試験体等を採取した。採材位置を図 2.1-1 に示す。

パネル番号 11・12 および 21・22 の採材方法

層内せん断 IS11-1			面外曲げ OB11 300×2825mm			層内せん断 IS11-2
			面内曲げ IB11 200×3550mm			
			曲げクリープ短期 BCS11 95×2350mm			
			曲げクリープ長期 BCL11 95×2350mm			
面外せん断 OS11-1 300×875mm	面外せん断 OS11-2 300×875mm	面外せん断 OS11-3 300×875mm	面外せん断 OS11-4 300×875mm			

パネル番号 13・14 および 23・24 の採材方法

層内せん断 IS13-1			面外曲げ OB13-1 300×2825mm			層内せん断 IS13-2
			面内曲げ IB13 200×3550mm			
			曲げクリープ短期 BCS13 95×2350mm			
			曲げクリープ長期 BCL13 95×2350mm			
層内せん断 IS13-3			面外曲げ OB13-2 300×2825mm			層内せん断 IS13-4

パネル番号 3・4・5 の採材方法

面外せん断 OS3-1 200×875mm	層内せん断 IS3-1 200×400	面外せん断 OS3-4 200×875mm	層内せん断 IS3-4 200×400
大野式面外せん断 大S3-1 200×1500mm		大野式面外せん断 大S3-3 200×1500mm	
層内せん断 IS3-2 200×400	面外せん断 OS3-2 200×875mm	層内せん断 IS3-5 200×400	面外せん断 OS3-5 200×875mm
大野式面外せん断 大S3-2 200×1500mm		大野式面外せん断 大S3-4 200×1500mm	
面外せん断 OS3-3 200×875mm	層内せん断 IS3-3 200×400	面外せん断 OS3-6 200×875mm	層内せん断 IS3-6 200×400

パネル番号 S1・S2 の採材方法

面外せん断 OS1-1S 200×875mm	層内せん断 IS1-1S 200×400	面外せん断 OS1-4S 200×875mm	層内せん断 IS1-4S 200×400
大野式面外せん断 大S1-1S 200×1500mm		大野式面外せん断 大S1-3S 200×1500mm	
層内せん断 IS1-2S 200×400	面外せん断 OS1-2S 200×875mm	層内せん断 IS1-5S 200×400	面外せん断 OS1-5S 200×875mm
大野式面外せん断 大S1-2S 200×1500mm		大野式面外せん断 大S1-4S 200×1500mm	
面外せん断 OS1-3S 200×875mm	層内せん断 IS1-3S 200×400	面外せん断 OS1-6S 200×875mm	層内せん断 IS1-6S 200×400

図 2.1-1 CLT パネルにおける試験体の採材位置

2.1.2 試験体製造に用いたラミナの材質

試験体製造に用いたカラマツラミナのうち、パネル番号 11～14・21～24・3～5 の平行層 FJ 材に用いた原板の縦振動ヤング係数のヒストグラムと、CLT 工場での連続式グレーディング装置によるヤング係数との関係を図 2.1-2 に示す。原料となる製材（815 枚）はカラマツ中大径丸太（26～28cm、長さ 3.65m）の外周部から選択的に採材した高強度ラミナのため、縦振動ヤング係数の平均値が 13.5kN/mm^2 と高くなっている。縦振動ヤング係数と連続式グレーディング装置によるヤング係数（ラミナごとの測定点の平均値）の相関は高く、後者のヤング係数を用いて構造用集成材の JAS に準じて等級区分した結果を縦振動測定時の密度とともに表 2.1-2 に示す。

また、別ロットのカラマツ高強度ラミナ（400 枚、縦振動ヤング係数の平均値= 12.9kN/mm^2 、変動係数 20.6%）からパネル番号 11～14・3～4 の直交層 NJ 材および S1～S2 の全層 NJ 材を選抜するとともに、別ロットのカラマツ高強度ラミナ（808 枚、縦振動ヤング係数の平均値= 12.4kN/mm^2 、変動係数 18.5%）からパネル番号 21～24・5 の直交層 NJ 材を選抜した。

以上より、ラミナ幅、幅はぎ有無、接着剤種類を比較すべきパネルどうし、すなわち、パネル番号 11～14 と 21～24、パネル番号 3～5、パネル番号 S1 と S2、それぞれは各層ラミナのヤング係数が同質となるようにマッチングしながら CLT パネルを組み立てた。

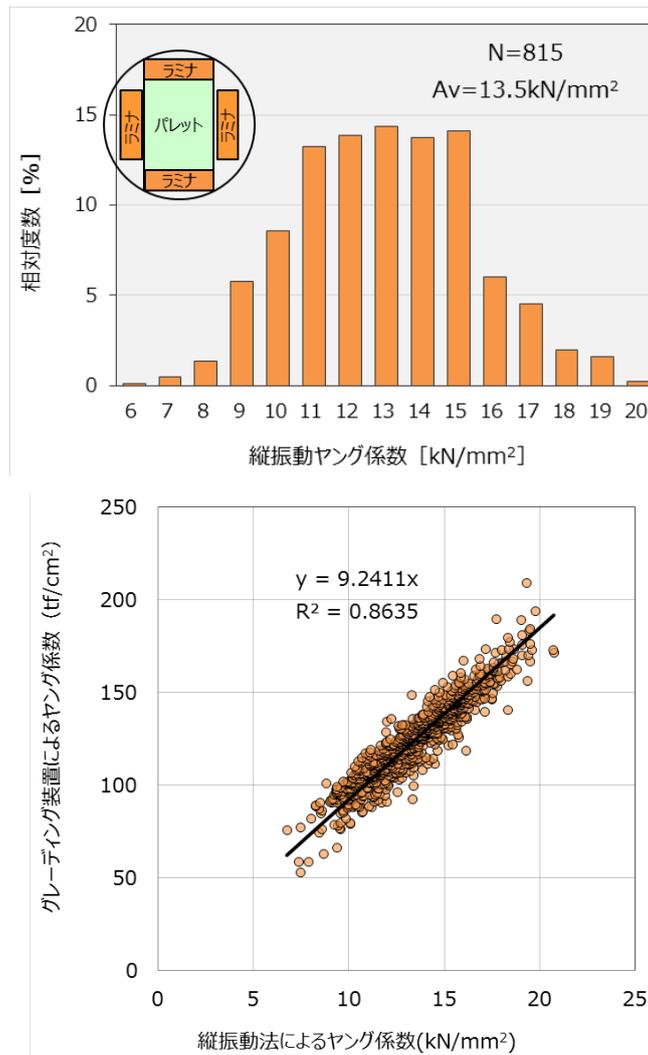


図 2.1-2 平行層に用いたカラマツラミナ（105mm 幅）のヤング係数

表 2.1-2 平行層に用いたカラマツラミナ（幅 105mm）の等級区分結果

	等級	~L50	L70	L80	L90	L100	L110	L125	L140	L160	L180~	全体
	N	5	11	22	65	107	197	195	166	40	7	815
E_{av}	AV	59.9	77.4	87.1	94.9	105.1	117.4	132.2	147.8	167.4	190.0	125.1
	CV	8.4%	2.2%	2.6%	2.9%	2.7%	3.7%	3.3%	3.6%	3.3%	5.0%	17.8%
E_{fr}	AV	8.2	9.0	9.7	10.4	11.3	12.6	14.2	15.9	18.1	19.1	13.5
	CV	10.5%	11.9%	10.0%	10.4%	8.4%	7.8%	6.5%	6.0%	6.0%	3.5%	18.2%
ρ	AV	448	465	492	479	489	506	532	565	604	629	524
	CV	4.5%	7.1%	10.5%	7.7%	7.1%	8.0%	7.2%	7.0%	5.6%	3.5%	10.0%

E_{av} : グレーディング装置によるヤング係数（単位：tf/cm²）、 E_{fr} : 縦振動法によるヤング係数（単位 kN/mm²）、 ρ : 気乾密度（単位：kg/m³）、AV : 平均値、CV : 変動係数

表 2.1-3 各 CLT パネルに用いたカラマツラミナの等級区分および縦振動ヤング係数

パネル番号	外層平行層 FJ 材 幅 105mm	内層平行層 FJ 材 幅 105mm	内層直交層 NJ 材 幅 105mm	パネル番号	外層平行層 FJ 材 幅 105mm	内層平行層 FJ 材 幅 105mm	内層直交層 NJ 材 幅 75mm
11	L140	L90 以下	N=25	21	L140	L90 以下	N=33
			AV=11.29				AV=11.50
			CV=6.0%				CV=6.1%
12	L140	L90 以下	N=25	22	L140	L90 以下	N=33
			AV=11.32				AV=11.45
			CV=6.0%				CV=6.2%
13	L125	L90 以下	N=25	23	L125	L90 以下	N=33
			AV=11.34				AV=11.47
			CV=6.0%				CV=6.2%
14	L125	L90 以下	N=25	24	L125	L90 以下	N=33
			AV=11.37				AV=11.49
			CV=6.0%				CV=6.0%

パネル番号	外層平行層 FJ 材 幅 105mm	内層平行層 FJ 材 幅 105mm	内層直交層 NJ 材	パネル番号	外層平行層 NJ 材 幅 105mm	内層平行層 NJ 材 幅 105mm	内層直交層 NJ 材 幅 105mm
3	L125	L110	105mm,N=25	S1	N=20	N=10	N=20
			AV=9.29		AV=14.34	AV=12.69	AV=13.37
			CV=8.1%		CV=2.2%	CV=1.0%	CV=2.1%
4	L125	L110	105mm,N=25	S2	N=20	N=10	N=20
			AV=9.35		AV=14.36	AV=12.71	AV=13.40
			CV=7.7%		CV=2.3%	CV=0.9%	CV=2.1%
5	L125	L110	75mm,N=33				
			AV=9.07				
			CV=9.3%				

FJ 材 : たて継ぎ材、NJ 材 : 通シラミナ、AV および CV : 縦振動法によるヤング係数（単位 kN/mm²）の平均値および変動係数

2.2 面外曲げ性能

2.2.1 試験方法

試験体の幅を 300 mm として、面外曲げ試験前には曲げたわみ振動法および T.G.H.法による非破壊測定により面外方向の曲げヤング係数とせん断弾性係数を求めた。

面外曲げ試験は、実大木材強度試験機（(株)東京衡機製造所製、最大曲げ能力 200 kN）を用いて行った。直交集成板の日本農林規格に基づいて、加力方式は 3 等分点 2 点荷重、曲げスパンは試験体材せいの 21 倍とした。加圧板幅は支点部および載荷部ともに 200 mm とした。加力速度は 8 mm/分とし、載荷開始から最大荷重到達までの時間は約 4~7 分であった。試験体の両側面中央部においてスパン中央のたわみ量を測定するとともに、ヨークを用いて荷重点間における相対たわみ量を測定し、両側面の平均値をそれぞれのたわみ量とした。面外曲げ試験終了後、試験体の非破壊部から含水率測定用の試験片を切り出し、全乾重量法によって含水率を測定した。荷重条件を図 2.2-1、試験の状況を写真 2.2-1 に示す。

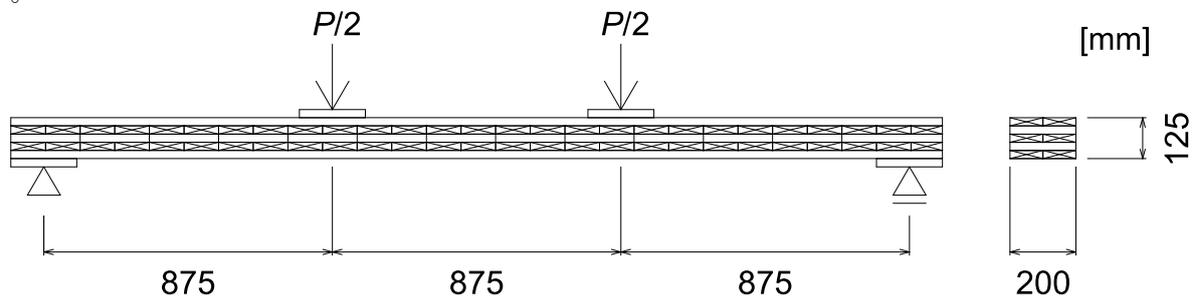


図 2.2-1 面外曲げ試験の荷重条件



写真 2.2-1 面外曲げ試験の状況

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

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

ここで、 P_{\max} : 最大荷重

L : 試験スパン

s : 支点から荷重点までの距離

a : 荷重点間距離

- y : ヨークの測定スパン
- b : 試験体の幅
- h : 試験体の厚さ
- ΔP : 最大荷重の 10~40%までの荷重増分
- $\Delta \delta$: ΔP に対応するスパン中央たわみ δ の増分
- $\Delta \delta_y$: ΔP に対応するヨーク相対たわみ δ_y の増分

2.2.2. 試験結果

面外曲げ試験の荷重-変位曲線を図 2.2-2、面外曲げ強さを図 2.2-3、面外曲げ試験の結果を表 2.2-1 に示す。すべての試験体が、引張側最外層ラミナのたて継ぎ部または節を起点とする曲げ破壊であった。また、直交層ラミナ幅が 75 mm の試験体で面外曲げ強さのばらつきが、直交層ラミナ幅が 105 mm の試験体に比べ小さくなった。面外曲げ強さの平均値は直交層ラミナ幅 75 mm 試験体が 105 mm 試験体に比べ約 1 割大きくなった。

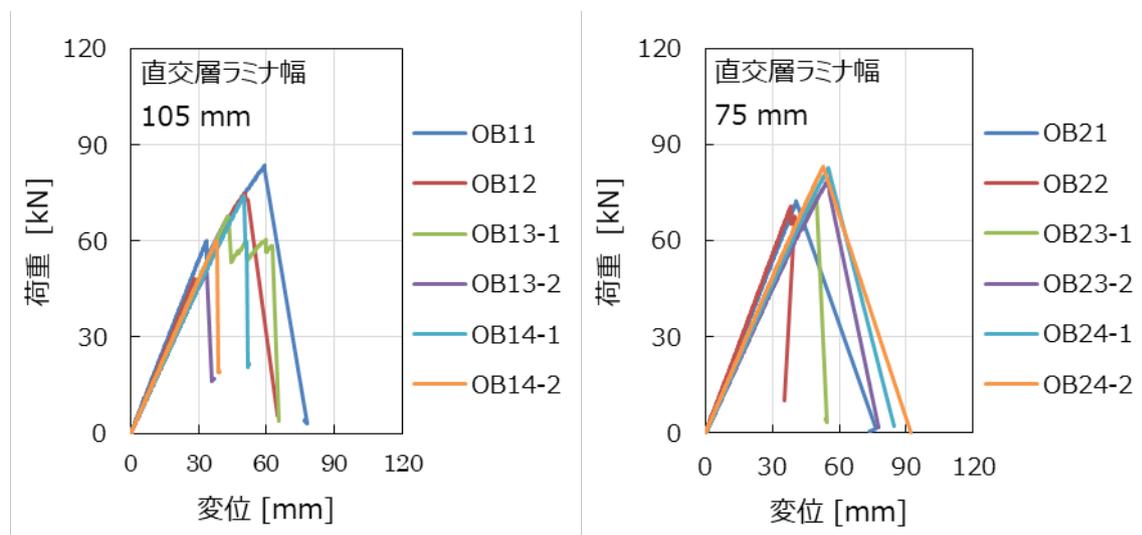


図 2.2-2 面外曲げ試験の荷重-変位曲線

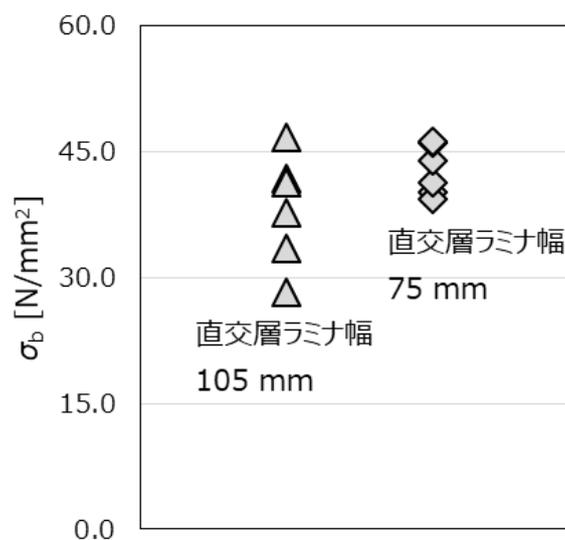


図 2.2-3 面外曲げ強さ

表 2.2-1 面外曲げ試験の結果

直交層 ラミナ幅	番号	密度 (kg/m ³)	E_{fr}	E_{TGHf}	G_{TGHf}	E_m	E_b	σ_b	含水率 (%)
105 mm	OB11	539	8.95	13.66	0.327	11.82	12.77	46.6	10.6
	OB12	522	8.55	12.59	0.289	11.22	11.74	41.8	10.8
	OB13-1	505	8.52	11.59	0.290	10.44	11.10	37.7	9.5
	OB13-2	518	8.70	10.37	0.308	9.89	10.49	28.2	9.3
	OB14-1	535	8.79	11.32	0.310	9.92	10.52	41.2	9.6
	OB14-2	528	9.03	11.58	0.311	10.34	11.03	33.4	9.8
	平均値	525	8.76	11.85	0.306	10.60	11.27	38.2	9.9
	最小値	505	8.52	10.37	0.289	9.89	10.49	28.2	9.3
	最大値	539	9.03	13.66	0.327	11.82	12.77	46.6	10.8
	標準偏差	12	0.21	1.13	0.014	0.76	0.86	6.6	0.6
変動係数 (%)	2.4	2.4	9.6	4.7	7.2	7.6	17.2	6.2	
75 mm	OB21	537	8.69	12.91	0.274	11.69	12.42	40.2	10.4
	OB22	555	9.86	13.37	0.313	11.94	12.48	39.3	9.7
	OB23-1	520	8.09	10.93	0.301	10.02	10.62	41.2	9.8
	OB23-2	507	7.89	11.03	0.287	9.85	10.56	43.9	9.5
	OB24-1	519	8.40	11.01	0.304	10.25	10.79	46.0	9.4
	OB24-2	511	8.41	11.01	0.300	10.58	11.16	46.3	9.0
	平均値	525	8.56	11.71	0.297	10.72	11.34	42.8	9.6
	最小値	507	7.89	10.93	0.274	9.85	10.56	39.3	9.0
	最大値	555	9.86	13.37	0.313	11.94	12.48	46.3	10.4
	標準偏差	18	0.70	1.12	0.014	0.89	0.89	3.0	0.5
変動係数 (%)	3.4	8.2	9.6	4.6	8.3	7.8	7.0	4.8	

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_m : 強度試験で得られた見かけの弾性係数 (単位 kN/mm²)

E_b : 強度試験で得られた純曲げ弾性係数 (単位 kN/mm²)

σ_b : 強度試験で得られた強さ (単位 N/mm²)

2.3 面外せん断性能

2.3.1 試験方法

面外せん断試験は、直交集成板の日本農林規格に基づいた中央集中荷重方式（JAS式せん断）および、逆対称4点荷重方式（大野式せん断）により行った。試験体の条件を表2.3-1に示す。

表 2.3-1 面外せん断試験の試験体条件

直交層ラミナの幅	直交層ラミナの幅はぎ	試験体幅	積層接着	加力方式
105 mm	有	300 mm	API	JAS 式
75 mm	有	300 mm	API	JAS 式
105 mm	有	200 mm	API	JAS 式、大野式
105 mm	無	200 mm	API	JAS 式、大野式
75 mm	無	200 mm	API	JAS 式、大野式
105 mm	有	200 mm	API	JAS 式、大野式
105 mm	有	200 mm	RF	JAS 式、大野式

API：水性高分子イソシアネート系接着剤

RF：レゾルシノール・フェノール樹脂接着剤

i) JAS 式面外せん断試験

実大木材強度試験機（(株)東京衡機製造所製、最大能力 1000kN）を用いて試験を行った。加圧版幅は支点部が 100 mm、載荷部は 120 mm とした。加圧版幅を考慮しないせん断スパン比を 2.5 倍とした。加力速度は 3 mm/分とし、載荷開始から最大荷重到達までの時間は約 2~7 分であった。面外せん断試験終了後、試験体から含水率測定用の試験片を切り出し、全乾重量法によって含水率を測定した。荷重条件を図 2.3-1、試験の状況を写真 2.3-1 に示す。

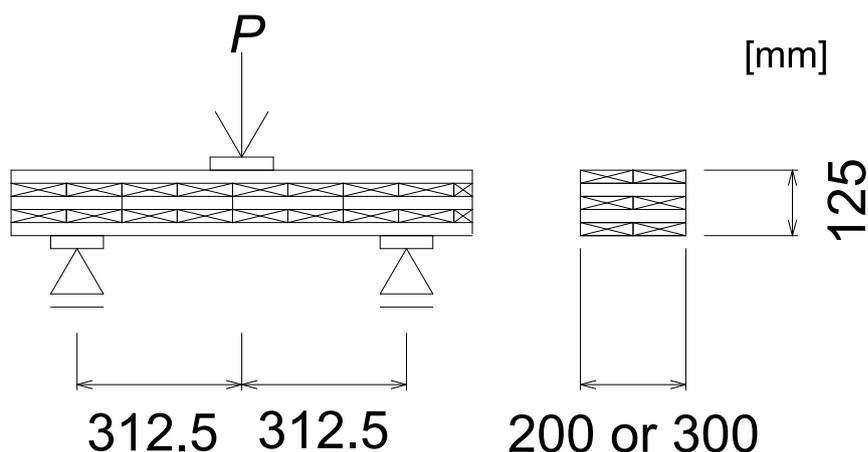


図 2.3-1 JAS 式面外せん断試験の荷重条件



写真 2.3-1 JAS 式面外せん断試験の状況

最大荷重 P_{\max} からせん断強さ σ_s を次式により算出した。

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

ここで、 P_{\max} : 最大荷重
 b : 試験体の幅
 h : 試験体の厚さ

ii) 大野式面外せん断試験

実大木材強度試験機（(株)東京衡機製造所製、最大能力 200 kN）を用いて試験を行った。加圧版幅は支点部が 120 mm、載荷部は 120 mm とした。加圧版幅を考慮しないせん断スパン比を 1.25 倍とした。加力速度は 3 mm/分とし、載荷開始から最大荷重到達までの時間は約 3～6 分であった。面外せん断試験終了後、試験体から含水率測定用の試験片を切り出し、全乾重量法によって含水率を測定した。荷重条件を図 2.3-2、試験の状況を写真 2.3-2 に示す。

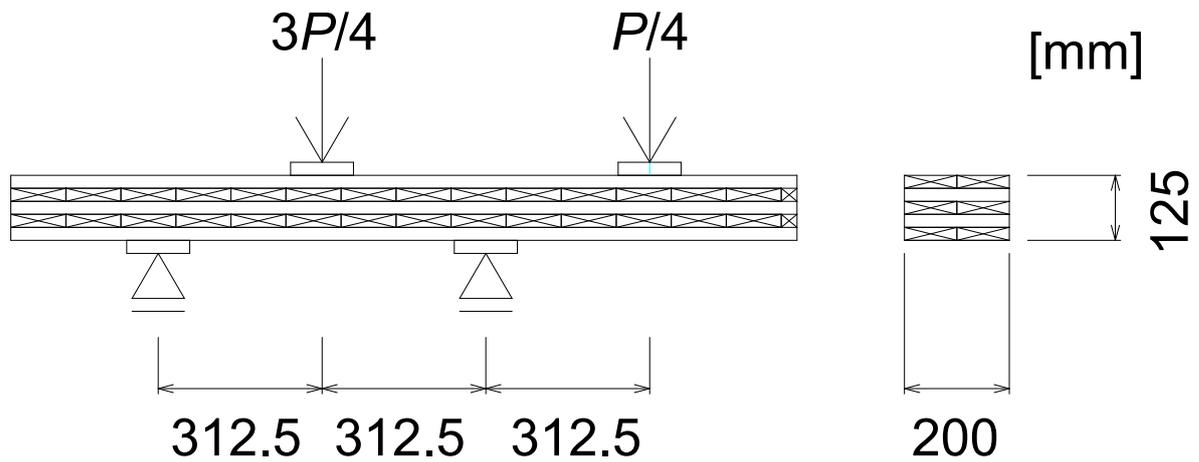


図 2.3-2 大野式面外せん断試験の荷重条件



写真 2.3-2 大野式面外せん断試験の状況

最大荷重 P_{\max} からせん断強さ σ_s を次式により算出した。

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

- ここで、 P_{\max} : 最大荷重
 b : 試験体の幅
 h : 試験体の厚さ

2.3.2 試験結果

荷重-変位曲線および面外せん断強さの平均値を図 2.3-3～2.3-12 に、面外せん断試験の結果を表 2.3-2～2.3-6 に示す。多くの試験体でせん断破壊が生じ、JAS 式試験では支点と荷重点の間、大野式試験では左側荷重点と右側支点の区間において、直交層ラミナが回転するような破壊形態を示した。一部の試験体では曲げ破壊が生じ、その時の破壊は、JAS 式試験では荷重点直下、大野式試験では左側荷重点直下または右側支点直上で発生したものであった。また、せん断破壊と曲げ破壊が同時に生じた試験体も観察された。

JAS 式試験では、ラミナ幅による面外せん断強度の変化は観察されなかった (図 2.3-4、2.3-6)。また、直交層ラミナの幅はぎがある場合では、幅はぎがない場合に比べ、面外せん断強度は約 1 割大きくなった (図 2.3-6)。レゾルシノール・フェノール樹脂接着剤を積層接着に用いた場合、水性高分子イソシアネート系接着剤を用いた場合に比べ、面外せん断強度が小さくなっていたが (図 2.3-8)、適切な積層接着がなされていなかった可能性が考えられ、接着条件に関する検討を要する。

大野式試験でも JAS 式試験と同様の傾向が見られ、ラミナ幅による面外せん断強度の変化は観察されず (図 2.3-10)、直交層ラミナの幅はぎがある場合では、幅はぎがない場合に比べ、面外せん断強度は約 1 割大きくなった (図 2.3-10)。大野式試験では積層接着に用いた接着剤の違いで面外せん断強度の差異は見られなかった。

表 2.3-2 JAS 式面外せん断試験 (試験体幅 300 mm)の試験結果

直交層 ラミナ幅	直交層 幅はぎ	積層接着	番号	密度 (kg/m ³)	σ_s	含水率 (%)	破壊形態
105 mm	有	API	K-OS11-1	539	3.29	10.5	せん断
			K-OS11-2	550	3.27	10.4	せん断
			K-OS11-3	529	3.22	10.5	せん断
			K-OS11-4	544	3.43	10.5	せん断
			K-OS12-1	536	3.42	11.0	せん断/曲げ
			K-OS12-2	540	3.16	10.6	せん断
			K-OS12-3	548	3.21	10.8	せん断
			K-OS12-4	543	3.46	10.6	せん断
			平均値	541	3.31	10.6	
			最小値	529	3.16	10.4	
			最大値	550	3.46	11.0	
			標準偏差	7	0.11	0.2	
			変動係数 (%)	1.2	3.4	1.8	
			75 mm	有	API	K-OS21-1	546
K-OS21-2	545	3.52				9.7	せん断
K-OS21-3	544	3.17				9.6	せん断
K-OS21-4	557	3.60				9.9	曲げ
K-OS22-1	548	3.34				9.6	せん断
K-OS22-2	554	3.84				10.0	せん断
K-OS22-3	549	3.75				9.6	せん断
K-OS22-4	531	3.49				9.4	せん断
平均値	547	3.47				9.3	
最小値	531	3.06				6.3	
最大値	557	3.84				10.0	
標準偏差	8	0.27				1.2	
変動係数 (%)	1.4	7.8				12.9	

API : 水性高分子イソシアネート系接着剤

σ_s : 強度試験で得られた強さ (単位 N/mm²)

破壊形態の「せん断/曲げ」は最大荷重到達時にせん断破壊および曲げ破壊が同時に発生していた状況を示す。

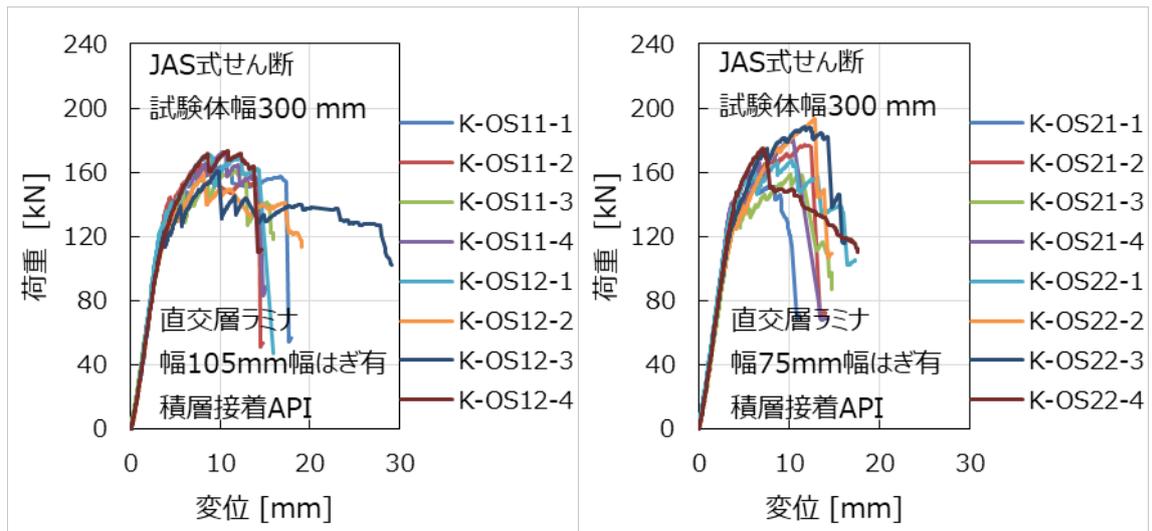


図 2.3-3 JAS 式せん断試験 (試験体幅 300 mm)の荷重-変位曲線

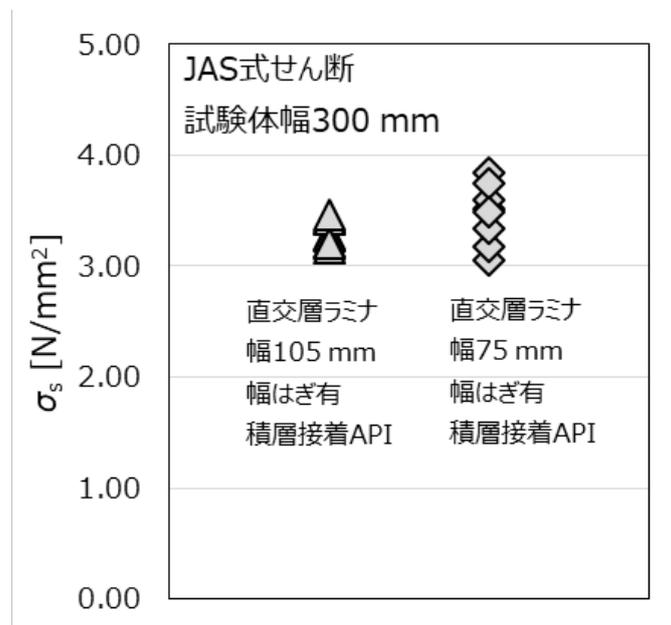


図 2.3-4 JAS 面外せん断試験より得られた面外せん断強さ (試験体幅 300 mm)

表 2.3-3 JAS 式面外せん断試験 (試験体幅 200 mm)の試験結果その 1

直交層 ラミナ幅	直交層 幅はぎ	積層接 着	番号	密度 (kg/m ³)	σ_s	含水率 (%)	破壊形態
105 mm	有	API	OS3-1	534	3.58	9.6	せん断
			OS3-2	526	3.31	10.5	せん断
			OS3-3	521	3.47	9.7	せん断
			OS3-4	518	3.46	10.0	せん断
			OS3-5	507	3.38	10.0	せん断
			OS3-6	513	3.14	9.9	せん断
			平均値	520	3.39	10.0	
			最小値	507	3.14	9.6	
			最大値	534	3.58	10.5	
			標準偏差	10	0.15	0.3	
			変動係数 (%)	1.9	4.5	3.1	
105 mm	無	API	OS4-1	518	2.88	9.3	せん断
			OS4-2	535	3.33	9.3	せん断
			OS4-3	521	3.09	9.5	せん断
			OS4-4	520	3.09	9.5	せん断/曲げ
			OS4-5	530	2.86	10.4	せん断
			OS4-6	517	3.29	9.3	せん断/曲げ
			平均値	523	3.09	9.5	
			最小値	517	2.86	9.3	
			最大値	535	3.33	10.4	
			標準偏差	7	0.20	0.4	
			変動係数 (%)	1.4	6.4	4.3	
75 mm	無	API	OS5-1	522	3.10	9.7	せん断
			OS5-2	506	2.71	9.6	せん断
			OS5-3	513	2.83	9.3	せん断
			OS5-4	522	2.98	9.4	せん断/曲げ
			OS5-5	509	3.04	9.5	せん断
			OS5-6	511	3.18	9.4	せん断
			平均値	514	2.97	9.5	
			最小値	506	2.71	9.3	
			最大値	522	3.18	9.7	
			標準偏差	7	0.18	0.2	
			変動係数 (%)	1.3	6.0	1.6	

API : 水性高分子イソシアネート系接着剤

σ_s : 強度試験で得られた強さ (単位 N/mm²)

破壊形態の「せん断/曲げ」は最大荷重到達時にせん断破壊および曲げ破壊が同時に発生していた状況を示す。

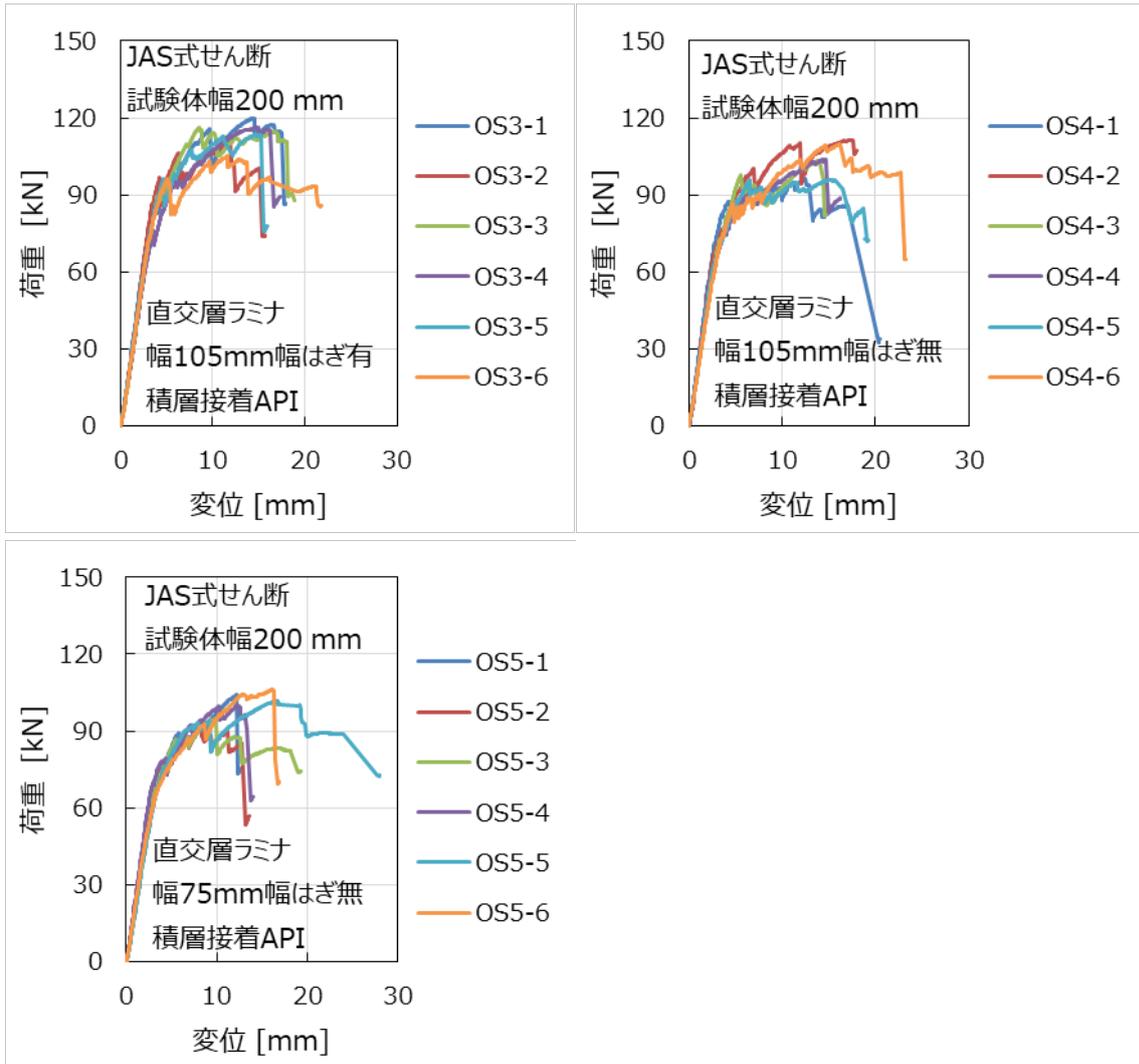


図 2.3-5 JAS 式せん断試験（試験体幅 200 mm）の荷重-変位曲線その 1

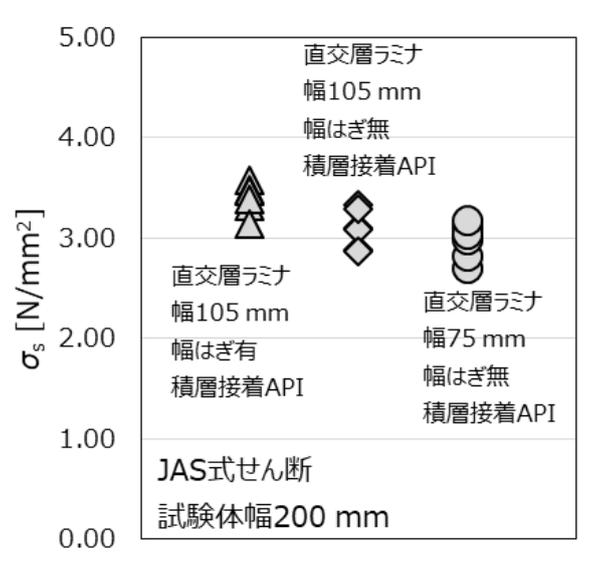


図 2.3-6 JAS 面外せん断試験より得られた面外せん断強さ（試験体幅 200 mm）その 1

表 2.3-4 JAS 式面外せん断試験 (試験体幅 200 mm)の試験結果その 2

直交層 ラミナ幅	直交層 幅はぎ	積層接着	番号	密度 (kg/m ³)	σ_s	含水率 (%)	破壊形態
105 mm	有	API	OS1S-1	533	3.47	11.0	せん断
			OS1S-2	547	3.41	10.6	せん断
			OS1S-3	560	3.39	11.4	せん断
			OS1S-4	542	3.42	10.5	せん断
			OS1S-5	557	3.27	10.6	せん断
			OS1S-6	566	3.10	10.9	曲げ
			平均値	551	3.34	10.8	
			最小値	533	3.10	10.5	
			最大値	566	3.47	11.4	
			標準偏差	12	0.14	0.3	
			変動係数 (%)	2.2	4.2	3.1	
105 mm	有	RF	OS2S-1	546	3.07	10.8	せん断
			OS2S-2	548	3.17	11.0	せん断
			OS2S-3	537	3.20	10.8	せん断
			OS2S-4	542	2.85	10.8	せん断
			OS2S-5	550	3.23	11.7	せん断
			OS2S-6	531	2.88	11.2	せん断
			平均値	542	3.07	11.0	
			最小値	531	2.85	10.8	
			最大値	550	3.23	11.7	
			標準偏差	7	0.17	0.3	
			変動係数 (%)	1.3	5.4	3.1	

API : 水性高分子イソシアネート系接着剤

RF: レゾルシノール・フェノール樹脂接着剤

σ_s : 強度試験で得られた強さ (単位 N/mm²)

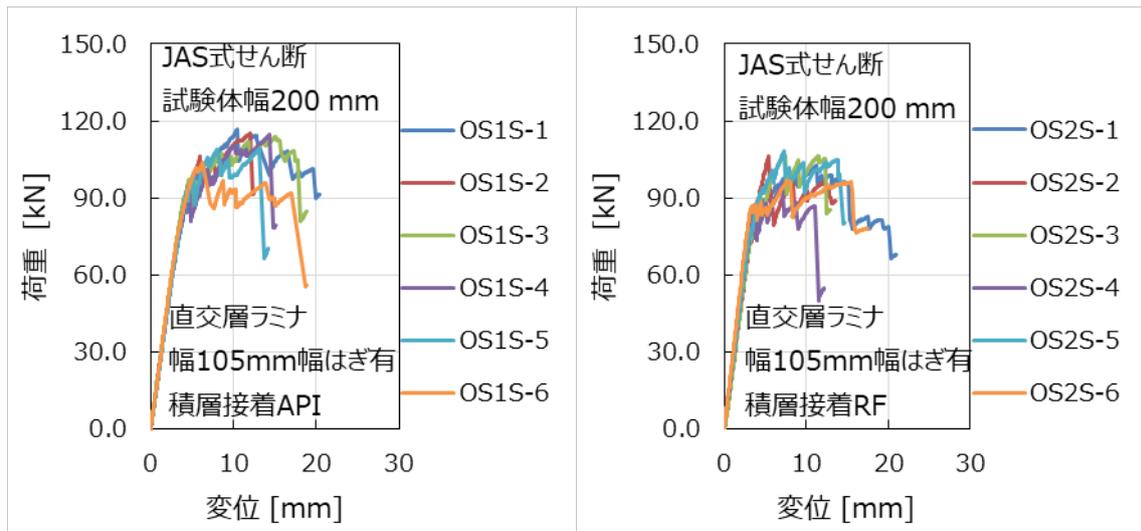


図 2.3-7 JAS 式せん断試験（試験体幅 200 mm）の荷重-変位曲線その 2

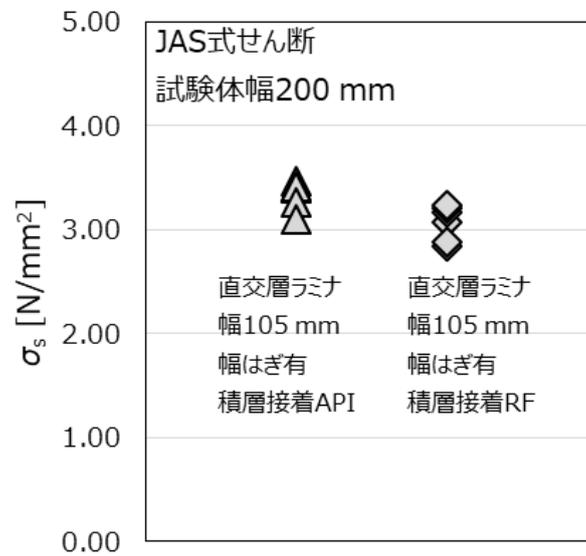


図 2.3-8 JAS 面外せん断試験より得られた面外せん断強さ（試験体幅 200 mm）その 2

表 2.3-5 大野式面外せん断試験の結果その 1

直交層 ラミナ幅	直交層 幅はぎ	積層接着	番号	密度 (kg/m ³)	σ_s	含水率 (%)	破壊形態
105 mm	有	API	S3-1	510	4.47	9.9	せん断
			S3-2	531	4.40	9.9	せん断
			S3-3	512	4.38	9.8	せん断
			S3-4	524	4.14	9.8	せん断
			平均値	519	4.35	9.9	
			最小値	510	4.14	9.8	
			最大値	531	4.47	9.9	
			標準偏差	10	0.14	0.1	
			変動係数 (%)	2.0	3.3	0.8	
105 mm	無	API	S4-1	527	4.09	9.2	せん断
			S4-2	519	4.13	9.1	せん断
			S4-3	526	3.82	9.1	せん断
			S4-4	514	3.85	9.2	せん断
			平均値	521	3.97	9.2	
			最小値	514	3.82	9.1	
			最大値	527	4.13	9.2	
			標準偏差	6	0.16	0.1	
			変動係数 (%)	1.1	4.1	0.6	
75 mm	無	API	S5-1	487	3.84	8.9	曲げ
			S5-2	515	3.88	9.4	曲げ
			S5-3	506	4.14	8.9	曲げ
			S5-4	522	4.22	9.1	せん断
			平均値	508	4.02	9.1	
			最小値	487	3.84	8.9	
			最大値	522	4.22	9.4	
			標準偏差	15	0.19	0.2	
			変動係数 (%)	3.0	4.7	2.3	

API : 水性高分子イソシアネート系接着剤

σ_s : 強度試験で得られた強さ (単位 N/mm²)

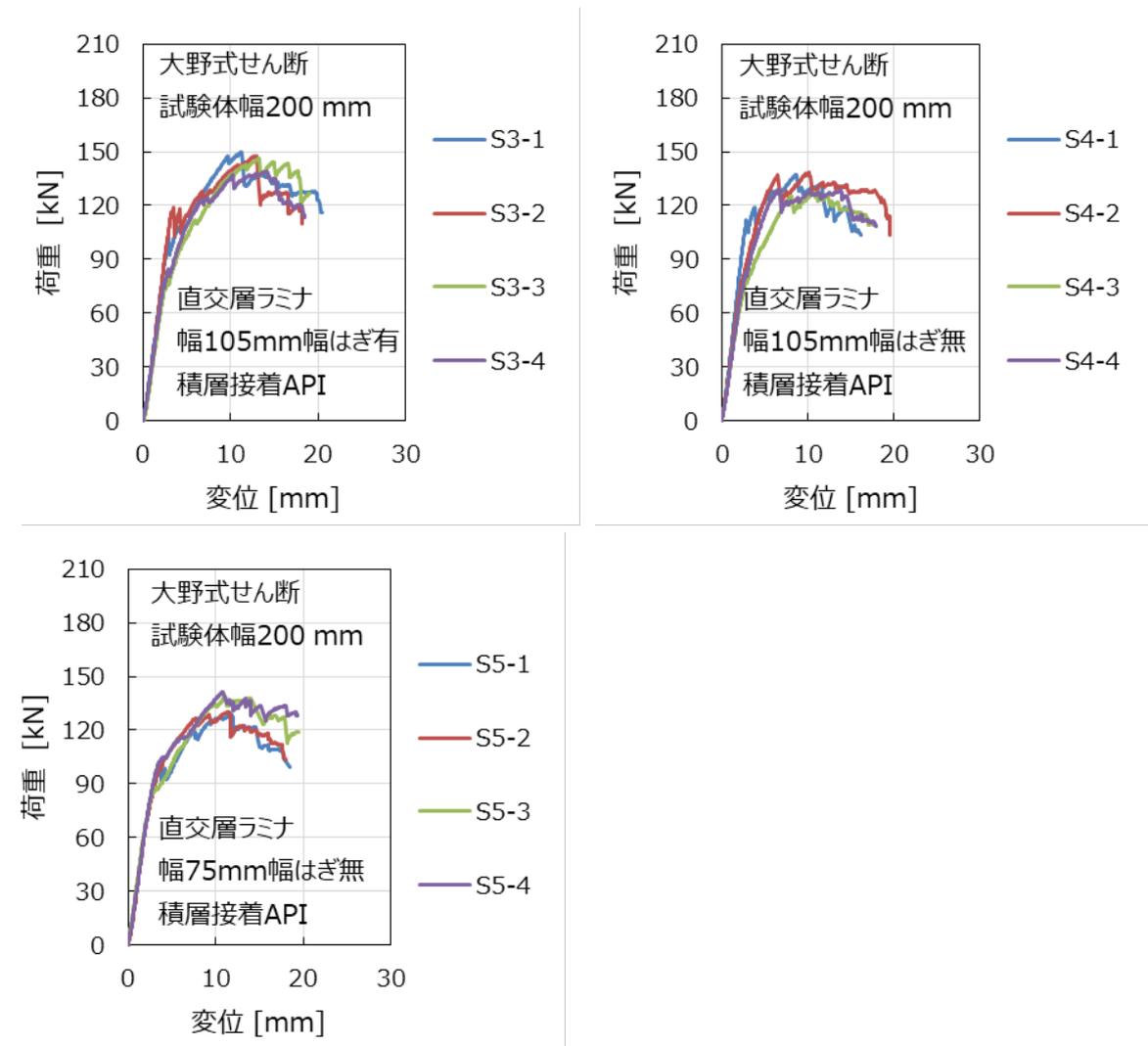


図 2.3-9 大野式せん断試験の荷重-変位曲線その 1

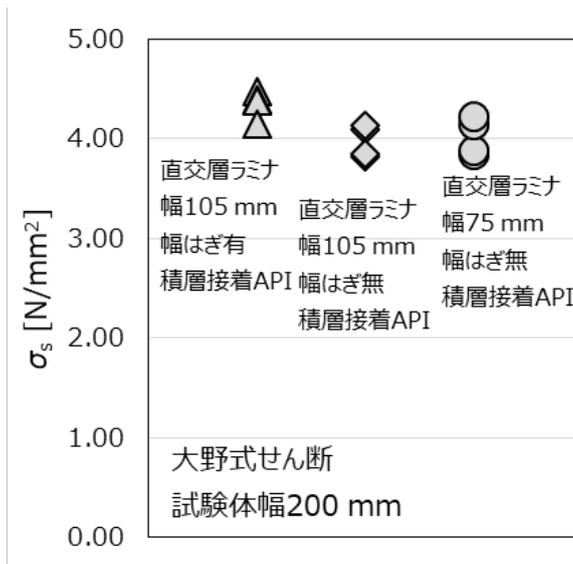


図 2.3-10 大野式面外せん断試験より得られた面外せん断強さその 1

表 2.3-6 大野式面外せん断試験の結果その 2

直交層 ラミナ幅	直交層 幅はぎ	積層接着	番号	密度 (kg/m ³)	σ_s	含水率 (%)	破壊形態
105	有	API	S1S-1	525	4.15	10.6	せん断
			S1S-2	544	4.30	11.0	せん断
			S1S-3	530	4.25	10.7	曲げ
			S1S-4	546	4.31	11.1	曲げ
			平均値	536	4.25	10.8	
			最小値	525	4.15	10.6	
			最大値	546	4.31	11.1	
			標準偏差	10	0.07	0.2	
			変動係数 (%)	1.9	1.7	2.1	
105	有	RF	S2S-1	550	4.41	11.0	曲げ
			S2S-2	543	4.40	10.9	せん断
			S2S-3	550	4.25	11.5	せん断
			S2S-4	540	4.37	11.0	せん断
			平均値	546	4.36	11.1	
			最小値	540	4.25	10.9	
			最大値	550	4.41	11.5	
			標準偏差	5	0.07	0.3	
			変動係数 (%)	0.9	1.7	2.3	

API : 水性高分子イソシアネート系接着剤

RF: レゾルシノール・フェノール樹脂接着剤

σ_s : 強度試験で得られた強さ (単位 N/mm²)

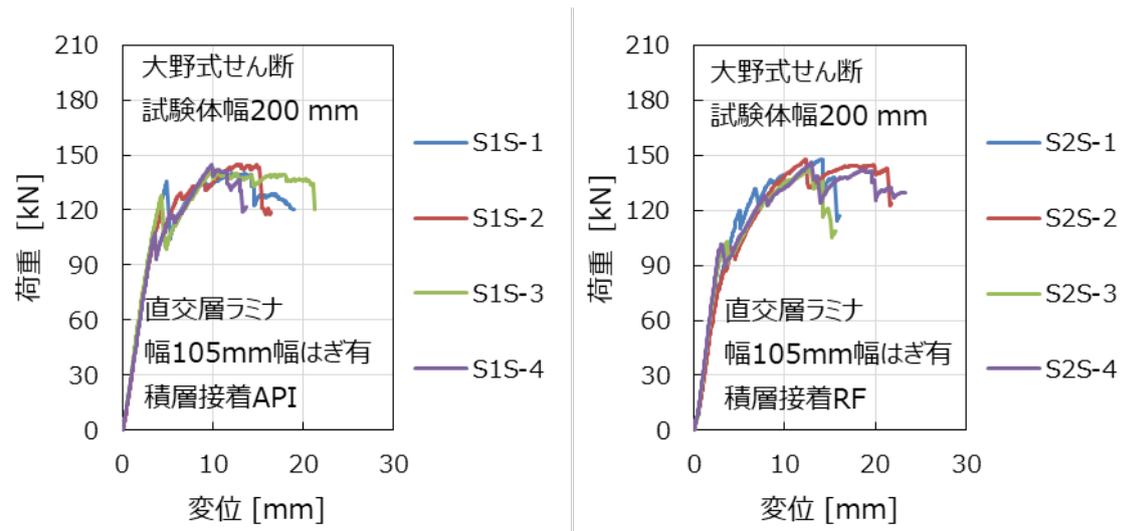


図 2.3-11 大野式せん断試験の荷重・変位曲線その 2

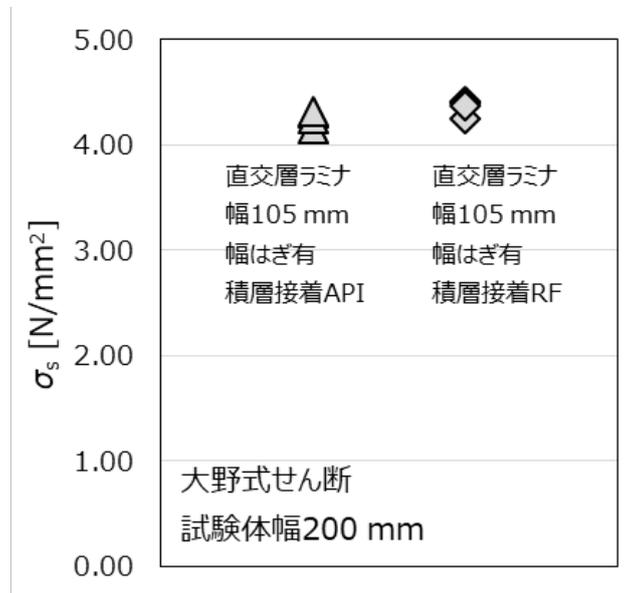


図 2.3-12 大野式面外せん断試験より得られた面外せん断強さその 2

2.4 長期面外曲げ変形

2.4.1 試験方法

面外曲げクリープ試験は、恒温恒湿室（20℃65%RH 設定）に設置した長期荷重装置 4 台を用いて行った。荷重条件は、支点間スパンを試験体厚さの 15.12 倍（1890 mm）とした 3 等分点 2 点荷重方式とした。装置は、モーメントアームの先端に吊り下げた錘の重量に対して、この原理の支点、力点、作用点の距離の比に応じた荷重が加わる機構となっており、錘質量の約 17 倍の荷重を載荷できる。吊り下げる錘には薄板鋼板（厚さ 9×400×400 mm、1 枚の平均重量 110 N）を用いた。直交層ラミナ幅が 105 mm と 75 mm の試験体で 2 体ずつ試験を実施した。試験体の調湿は行わなかった。試験の状況を写真 2.4-1 および写真 2.4-2 に示す。

面外曲げクリープ試験を実施する前に、載荷する長期荷重を決定するために、クリープ試験体のサイドマッチ試験体で短期強度試験を行った。荷重条件は、支点間スパンを試験体厚さの 18 倍（2250 mm）とした 3 等分点 2 点荷重とした。試験体は直交層ラミナの幅が 105 mm の試験体と 75 mm の試験体で 4 体ずつとした。短期強度試験の結果を表 2.4.1 に示す。面外曲げ強度の平均値が大きかった直交層ラミナ幅 75 mm の試験体の面外強さの平均値 38.7 N/mm²に 0.37 を乗じた値 14.3 N/mm²の曲げ応力が、長期荷重装置で発生するような載荷荷重 11.4kN を長期荷重とした。ヨークを用いて、スパン中央たわみおよび、荷重点間における相対たわみ量を測定した。たわみの計測はデータロガーを用いて 1 分間隔で自動収集し、荷重を加え始めてから 1 分、5 分、10 分、100 分及び 500 分後、その後は 24 時間ごとのデータを選抜した。なお、評価するデータは、載荷後 500 分までのたわみを除外したデータ（載荷後 24 時間以降のデータ）¹⁾ で、なおかつ載荷後 7 日経過後のデータまでである。

クリープ評価法については、建築基準法第 37 条に関する技術的基準（平成 12 年建設省告示第 1446 号）が定める評価法²⁾を参考にした告示法および、パワー則と呼ばれる評価法を用いた。

i) 告示法

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

$$K_t = \delta_{1\text{min}} / \delta_{t\text{min}}$$

$$\log_{10} K_t = e + f \cdot \log_{10} t$$

$$K_{50\text{year}} = 10^{e + f \cdot \log_{10} 50} = 10^{e + 26280000f}$$

ここで、 $\delta_{1\text{min}}$: 載荷 1 分後のたわみ

$\delta_{t\text{min}}$: 載荷 t 分後のたわみ

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

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

$t_{50\text{year}}$: 50 年分の時間 t で 26280000 分

ii) パワー則

次の通り解析を行った。

$$\text{Log}_{10} \delta_c(t) = a \log_{10} t + b$$

ここで、 $\delta_c(t)$: 荷重 t 分後のクリープ

a : 経過時間の常用対数 $\log_{10} t$ とクリープ常用対数 $\log_{10} \delta_c(t)$ の回帰直線の傾き

b : 経過時間の常用対数 $\log_{10} t$ とクリープ常用対数 $\log_{10} \delta_c(t)$ の回帰直線の切片

上式で得られた定数 a と b を変換し、次式 (パワー則) を得る。

$$\delta_c(t) = At^N$$

ここで、 $A = 10^b$

N : 定数。ただし $a = N$

上式をベースにした次式により、クリープ調整係数を求める。

$$\delta_{50\text{year}} / \delta_{1\text{min}} = 1 + ct^N$$

ここで、 $\delta_{50\text{year}}$: 50 年後の曲げクリープたわみ

$\delta_{1\text{min}}$: 荷重 1 分後のたわみ

c : $A / \delta_{1\text{min}}$



写真 2.4-1 長期荷重装置での試験実施状況



写真 2.4-2 長期荷重装置の荷重部分

表 2.4-1 サイドマッチ短期面外曲げ強度試験の結果

直交層 ラミナ幅	番号	密度(kg/m ³)	E_{fr}	E_{TGHf}	G_{TGHf}	E_m	E_b	σ_b	含水率 (%)
105 mm	BCS11	536	8.45	12.67	0.323	11.10	12.05	45.4	10.5
	BCS12	525	8.96	13.53	0.292	11.68	14.69	43.4	10.1
	BCS13	497	8.03	11.68	0.302	10.22	11.92	31.5	8.8
	BCS14	520	8.51	10.38	0.324	9.07	8.78	23.7	9.8
	平均値	519	8.49	12.07	0.310	10.52	11.86	36.0	9.8
	最小値	497	8.03	10.38	0.292	9.07	8.78	23.7	8.8
	最大値	536	8.96	13.53	0.324	11.68	14.69	45.4	10.5
	標準偏差	16	0.38	1.35	0.016	1.13	2.42	10.2	0.7
	変動係数 (%)	3.1	4.5	11.2	5.2	10.8	20.4	28.4	7.2
75 mm	BCS21	536	8.23	12.83	0.302	10.77	11.71	26.6	9.6
	BCS22	528	8.89	12.96	0.302	11.38	12.83	47.0	9.5
	BCS23	503	8.29	12.25	0.286	10.05	10.86	41.1	9.9
	BCS24	510	8.78	12.57	0.309	10.65	11.59	40.2	9.2
	平均値	519	8.55	12.65	0.300	10.71	11.75	38.7	9.5
	最小値	503	8.23	12.25	0.286	10.05	10.86	26.6	9.2
	最大値	536	8.89	12.96	0.309	11.38	12.83	47.0	9.9
	標準偏差	15	0.34	0.32	0.010	0.55	0.81	8.6	0.3
	変動係数 (%)	3.0	3.9	2.5	3.2	5.1	6.9	22.2	3.1

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_m : 短期強度試験で得られた見かけの弾性係数 (単位 kN/mm²)

E_b : 短期強度試験で得られた純曲げ弾性係数 (単位 kN/mm²)

σ_b : 短期強度試験で得られた強さ (単位 N/mm²)

2.4.2 試験結果

支点間中央クリープの解析結果について、告示法でのクリープ変形比の常用対数と経過時間の常用対数の関係を図 2.4-1 に示す。また、パワー則でのクリープ変形量の常用対数と経過時間の常用対数の関係の関係を図 2.4-2 に示す。解析結果を表 2.4-2 に示し、クリープ係数 ($\delta_{tmin}/\delta_{1min}$) の実測値と回帰曲線を図 2.4-3 および図 2.4-4 に示す。

また、支点間中央クリープの解析結果についても同様に、告示法でのクリープ変形比の常用対数と経過時間の常用対数の関係を図 2.4-5 に示す。また、パワー則でのクリープ変形量の常用対数と経過時間の常用対数の関係の関係を図 2.4-6 に示す。解析結果を表 2.4-3 に示し、クリープ係数 ($\delta_{tmin}/\delta_{1min}$) の実測値と回帰曲線を図 2.4-7 および図 2.4-8 に示す。

支点間中央クリープについて、告示法およびパワー則のどちらにおいても、直交層ラミナの幅が 75 mm の試験体で、50 年後のたわみ予測値が、直交層ラミナの幅が 105 mm の試験体に比べ大きくなった (表 2.4.2)。荷重点間中央クリープについては、値のばらつきが大きいため差の比較はできないが、直交層ラミナの幅が 105 mm と 75 mm の試験体の間で、50 年後のたわみ予測値の明確な差異は見られなかった。支点間中央変位はせん断変位を含まないことから、ラミナ幅の違いでせん断クリープに差異が生じる可能性が示唆された。更なる長期間の計測や詳細な解析をする必要がある。

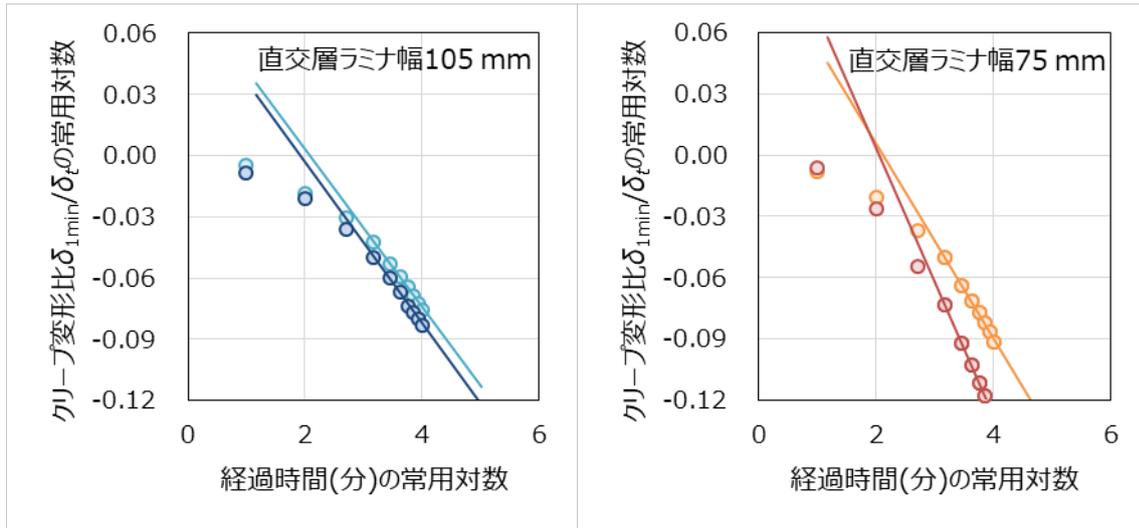


図 2.4-1 支点間中央クリープ変形比と経過時間の両常用対数の関係

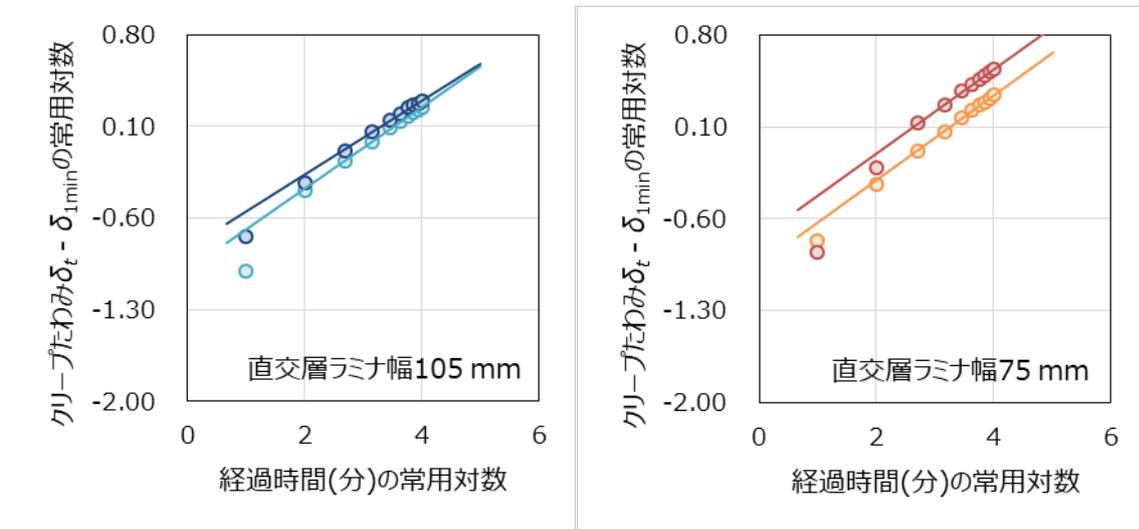


図 2.4-2 支点間中央クリープ変形量と経過時間の両常用対数の関係

表 2.4-2 支点間中央クリープの解析結果

	直交層 ラミナ幅	No.	δ_{1min}	傾き f	切片 e	R^2	δ_{50year}	$\delta_{50year} / \delta_{1min}$
告示法	105 mm	BCL11	9.33	-0.039	0.080	0.996	15.02	1.61
		BCL12	9.40	-0.039	0.075	0.995	15.50	1.65
	75 mm	BCL21	9.43	-0.048	0.101	0.995	16.85	1.79
		BCL23	10.02	-0.065	0.134	0.998	22.49	2.24
	直交層 ラミナ幅	No.	δ_{1min}	傾き a	切片 b	R^2	δ_{50year}	$\delta_{50year} / \delta_{1min}$
パワー則	105 mm	BCL11	9.33	0.312	-0.998	0.999	29.92	3.21
		BCL12	9.40	0.282	-0.829	0.997	27.75	2.95
	75 mm	BCL21	9.43	0.324	-0.955	0.998	37.61	3.99
		BCL23	10.02	0.320	-0.739	0.998	53.30	5.32

δ_{1min} : 载荷 1 分後のたわみ、 f : 両常用対数プロットの回帰直線の傾き、 e : 両常用対数プロットの回帰直線の切片、 R^2 : 両常用対数プロットの決定係数、 δ_{50year} : 回帰計算より得られた 50 年後のたわみ予測値

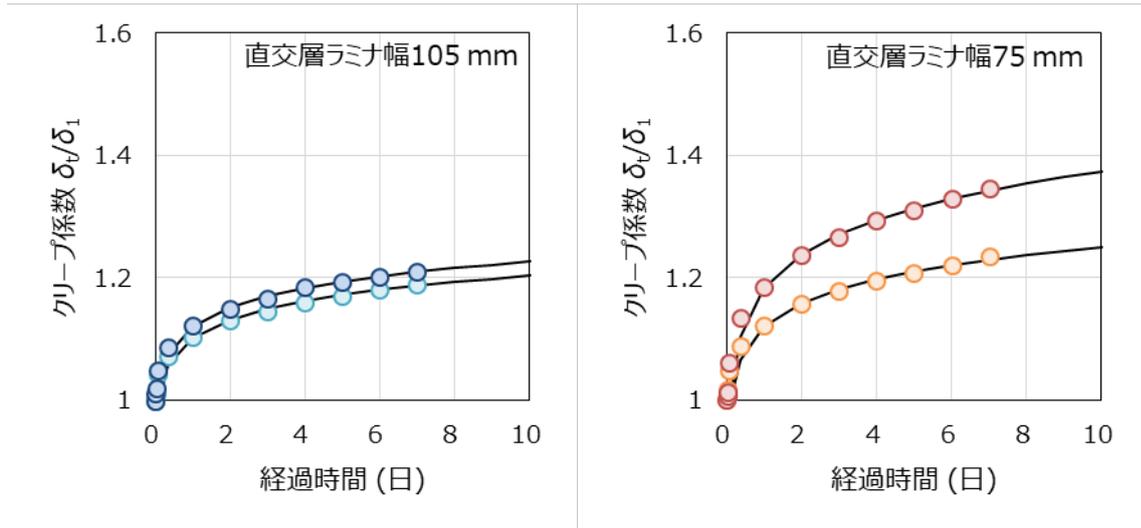


図 2.4-3 支点間中央クリープのクリープ係数の実測値と回帰曲線（告示法）

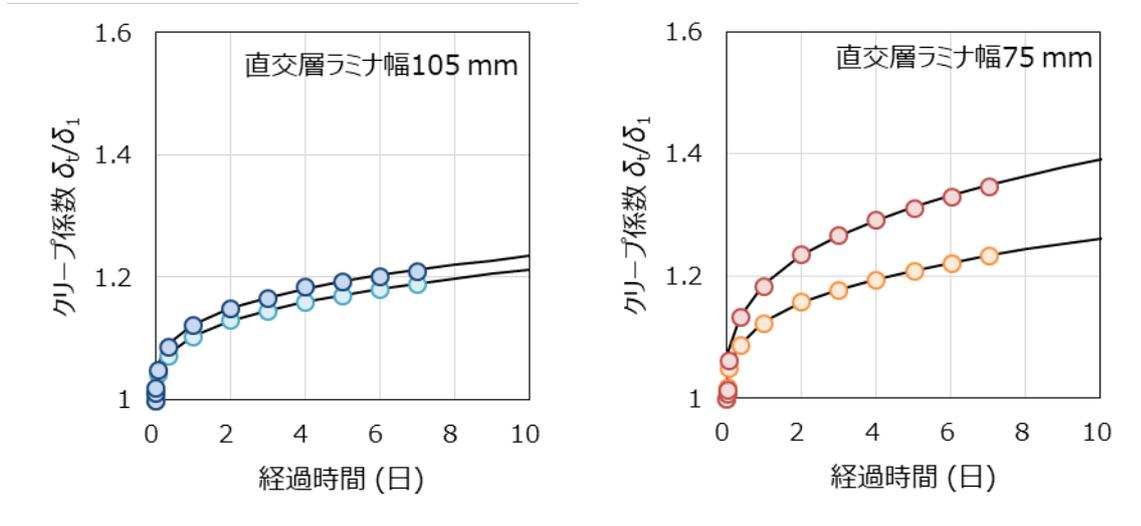


図 2.4-4 支点間中央クリープのクリープ係数の実測値と回帰曲線（パワー則）

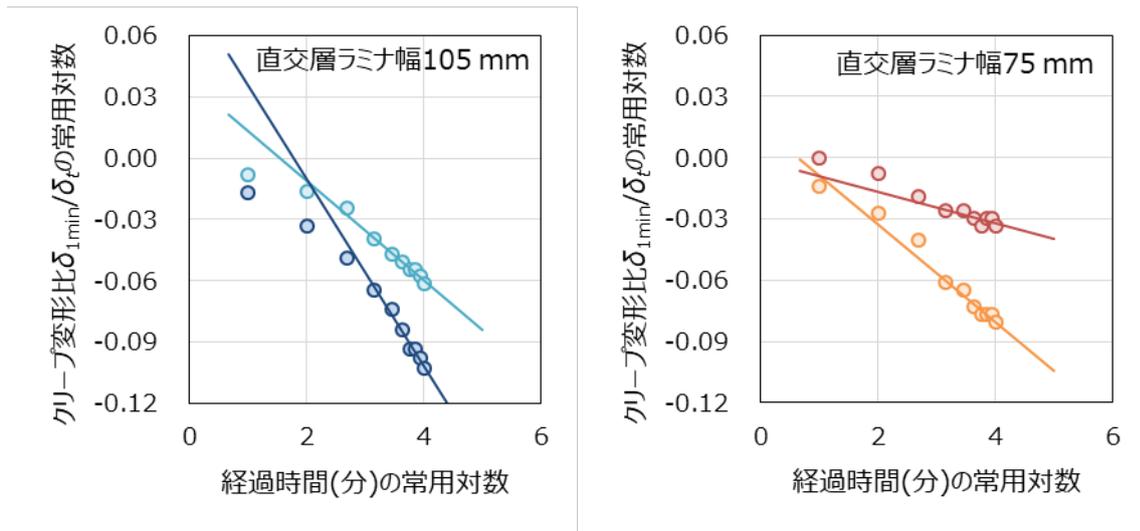


図 2.4-5 荷重点間中央クリープ変形比と経過時間の両常用対数の関係

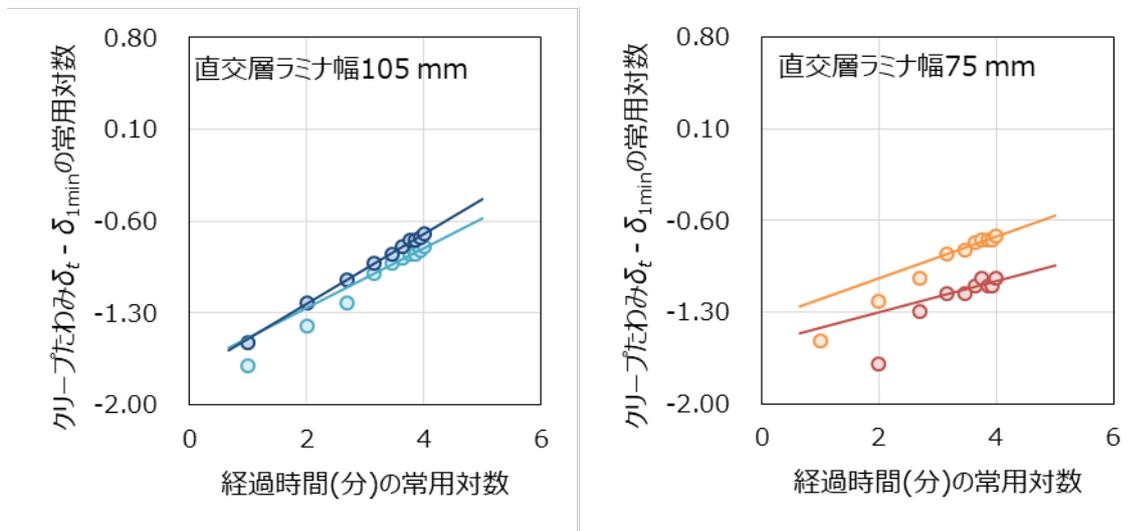


図 2.4-6 荷重点間中央クリープ変形量と経過時間の両常用対数の関係

表 2.4-3 荷重点間中央クリープの解析結果

	直交層 ラミナ幅	No.	δ_{1min}	傾き f	切片 e	R^2	δ_{50year}	$\delta_{50year} / \delta_{1min}$
告示法	105 mm	BCL11	1.05	-0.024	0.038	0.977	1.46	1.39
		BCL12	0.75	-0.046	0.081	0.982	1.36	1.81
	75 mm	BCL21	0.93	-0.024	0.015	0.945	1.35	1.45
		BCL23	1.13	-0.008	-0.001	0.620	1.29	1.14
	直交層 ラミナ幅	No.	δ_{1min}	傾き a	切片 b	R^2	δ_{50year}	$\delta_{50year} / \delta_{1min}$
パワー則	105 mm	BCL11	1.05	0.226	-1.710	0.983	1.98	1.88
		BCL12	0.75	0.266	-1.762	0.986	2.37	3.16
	75 mm	BCL21	0.93	0.159	-1.359	0.946	1.59	1.71
		BCL23	1.13	0.120	-1.542	0.643	1.35	1.20

δ_{1min} : 載荷 1 分後のたわみ、 f : 両常用対数プロットの回帰直線の傾き、 e : 両常用対数プロットの回帰直線の切片、 R^2 : 両常用対数プロットの決定係数、 δ_{50year} : 回帰計算より得られた 50 年後のたわみ予測値

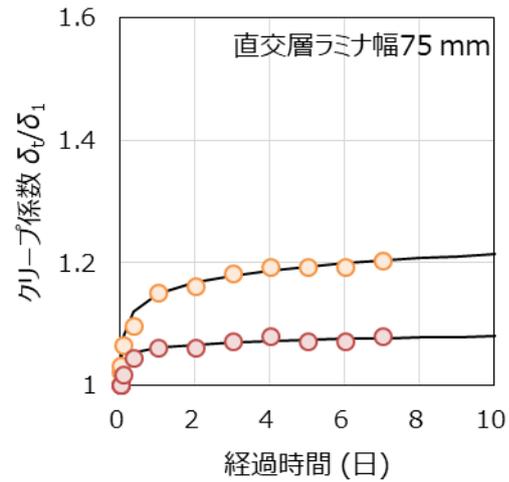
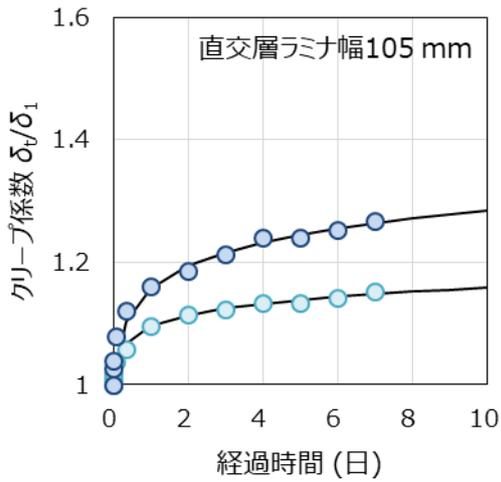


図 2.4-7 荷重点間中央クリープのクリープ係数の実測値と回帰曲線（告示法）

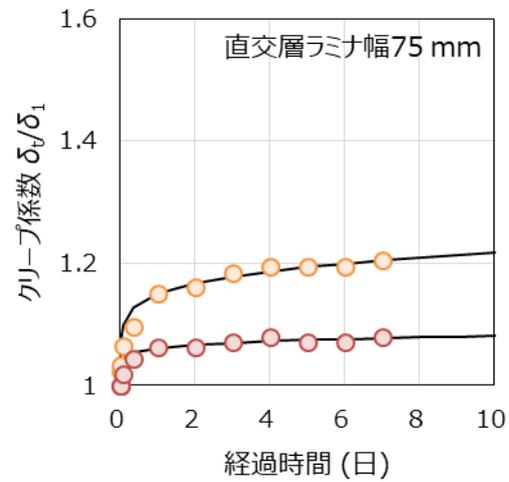
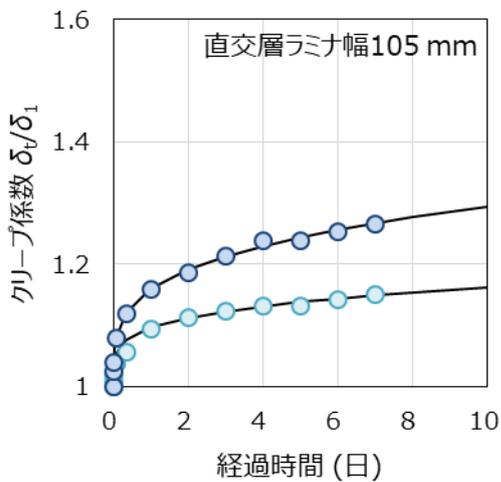


図 2.4-8 荷重点間中央クリープのクリープ係数の実測値と回帰曲線（パワー則）

【参考文献】

- 1) 大橋義徳ほか：木材学会誌，54(4)，174-182，2008
- 2) 日本ツーバイフォー建築協会：“2007年枠組壁工法建築物構造計算指針”，2007、pp.195-224.

2.5 面内曲げ性能

2.5.1 試験方法

試験体の材せいを 200 mm として、面内曲げ試験前には曲げたわみ振動法および T.G.H. 法による非破壊測定により面内方向の曲げヤング係数とせん断弾性係数を求めた。

面内曲げ試験は、実大木材強度試験機（(株)東京衡機製造所製、最大曲げ能力 200 kN）を用いて行った。加力方式は 3 等分点 2 点荷重、曲げスパンは試験体梁せいの 17.1 倍（3420 mm）とした。加圧板幅は支点部および載荷部ともに 200 mm とした。加力速度は 8 mm/分とし、載荷開始から最大荷重到達までの時間は約 4～6 分であった。試験体の両側面中央部において、スパン中央のたわみ量を測定するとともに、ヨークを用いて荷重点間における相対たわみ量を測定し、両側面の平均値をそれぞれのたわみ量とした。曲げ試験終了後、試験体の非破壊部から含水率測定用の試験片を切り出し、全乾重量法によって含水率を測定した。荷重条件を図 2.5-1、試験の状況を写真 2.5-1 に示す。

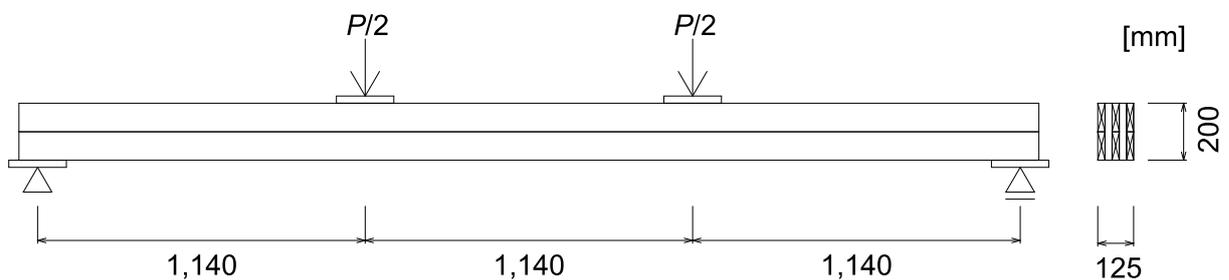


図 2.5-1 面外曲げ試験の荷重条件



写真 2.5-1 面内曲げ試験の状況

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

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

- ここで、 P_{\max} : 最大荷重
 L : 試験スパン
 s : 支点から荷重点までの距離
 a : 荷重点間距離

- y : ヨークの測定スパン
- b : 試験体の幅
- h : 試験体の厚さ
- ΔP : 最大荷重の 10~40%までの荷重増分
- $\Delta \delta$: ΔP に対応するスパン中央たわみ δ の増分
- $\Delta \delta_y$: ΔP に対応するヨーク相対たわみ δ_y の増分

2.5.2. 試験結果

面内曲げ試験の荷重-変位曲線を図 2.5-2、面内曲げ強さを図 2.5-3、面内曲げ試験の結果を表 2.5-1 に示す。すべての試験体が、強軸方向に配置されたラミナの曲げ破壊であった。また、直交層ラミナの幅の違いでは面内曲げ強さに差異は見られなかった。

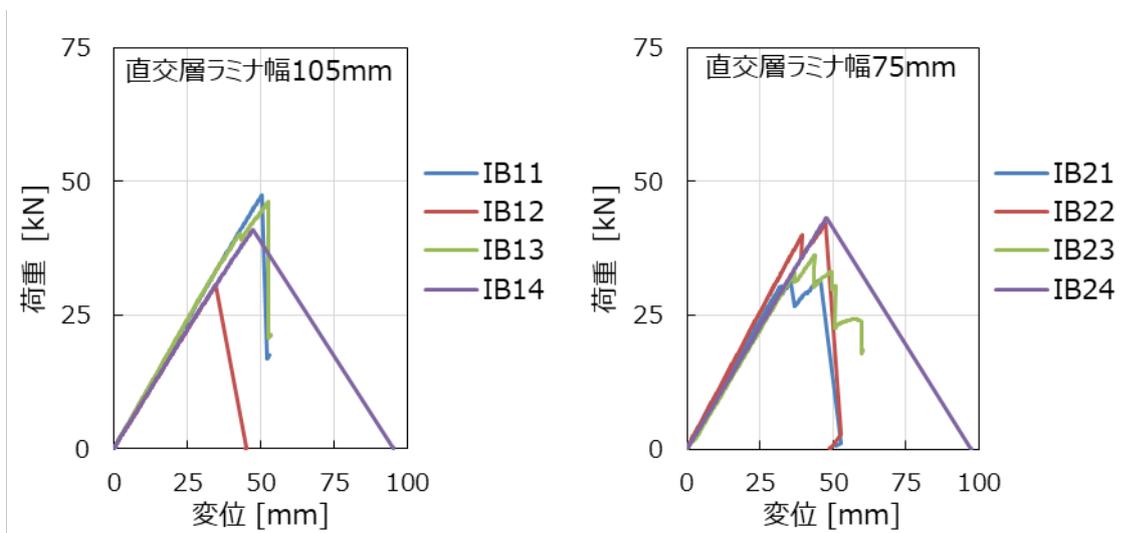


図 2.5-2 面内曲げ試験の荷重-変位曲線

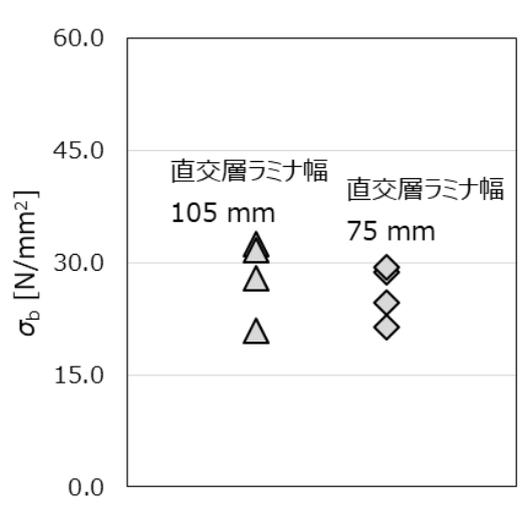


図 2.5-3 面内曲げ強さ

表 2.5-1 面内曲げ試験の結果

直交層 ラミナ幅	番号	密度(kg/m ³)	E_{fr}	E_{TGHe}	G_{TGHe}	E_m	E_b	σ_b	含水率 (%)
105 mm	IB11	531	8.81	8.77	0.967	8.17	8.54	32.4	10.1
	IB12	528	8.23	8.38	0.963	7.53	7.97	21.0	10.9
	IB13	506	8.61	9.26	0.926	8.24	8.42	31.6	9.5
	IB14	527	8.28	8.18	1.050	7.50	7.55	27.9	9.6
	平均値	523	8.48	8.65	0.977	7.86	8.12	28.2	10.0
	最小値	506	8.23	8.18	0.926	7.50	7.55	21.0	9.5
	最大値	531	8.81	9.26	1.050	8.24	8.54	32.4	10.9
	標準偏差	11	0.28	0.48	0.052	0.40	0.45	5.2	0.6
	変動係数 (%)	2.2	3.3	5.5	5.4	5.1	5.6	18.5	6.4
75 mm	IB21	555	9.05	8.93	0.964	8.12	8.41	21.4	11.1
	IB22	550	9.30	9.10	0.999	8.59	9.27	28.7	9.7
	IB23	516	8.37	8.50	0.945	7.78	8.15	24.6	9.0
	IB24	530	8.56	7.94	1.022	7.67	8.68	29.4	9.4
	平均値	538	8.82	8.62	0.983	8.04	8.63	26.0	9.8
	最小値	516	8.37	7.94	0.945	7.67	8.15	21.4	9.0
	最大値	555	9.30	9.10	1.022	8.59	9.27	29.4	11.1
	標準偏差	18	0.43	0.52	0.034	0.41	0.48	3.7	0.9
	変動係数 (%)	3.3	4.9	6.0	3.5	5.1	5.5	14.2	9.1

E_{fr} : 縦振動法による縦弾性係数 (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_m : 強度試験で得られた見かけの弾性係数 (単位 kN/mm²)

E_b : 強度試験で得られた純曲げ弾性係数 (単位 kN/mm²)

σ_b : 強度試験で得られた強さ (単位 N/mm²)

3. CLTにおける直交層のせん断弾性係数とせん断強度

3.1 はじめに

本章では、強度試験により収集したヒノキ CLT、カラマツ CLT、スギ CLT の直交層の層内せん断弾性係数と層内せん断強度のデータとその知見を報告する。特に、ヒノキ CLT とカラマツ CLT については、ラミナ幅が直交層のせん断強度特性値に与える影響を検討した。また、せん断強度の実測値のせん断長さに対する補正方法についても検討した。

3.2 実験方法（層内せん断試験）

3.2.1 スギ CLT の実験方法

試験材には、3層3プライ Mx60 構成のスギ CLT を用いた。ラミナの厚さ t_{LMN} は 45mm、ラミナ幅 W_{LMN} は 175mm だが、幅はぎ接着ラミナであり、ラミナ間の幅はぎ接着はない。試験材の詳細は昨年度事業の成果報告書を参照されたい。

各試験材 (45B1.To.OSS1-2～45B1.To.OSS6-2、95mm×135mm×700mm、計6体) は、縦振動法ならびに TGH 法により強度特性の非破壊測定に供試した。

層内せん断試験用の試験体は、内層直交層の層内せん断試験に供するため、試験材を2次接着後に裁断加工し、計6体の試験体とした (図 3.2-1)。測定対象である直交層はラミナ間の境界 (幅はぎ位置) が試験体の長さ方向の中央となるように配置した。これは、後述するヒノキ CLT やカラマツ CLT のラミナ配置 J に相当する。なお、前述のとおり、供試したスギ CLT はラミナ間の幅はぎ接着はない。

層内せん断試験は、ミネベア社製引張圧縮試験機 TG-250kN (最大試験力 250kN) を用い、載荷速度 0.5mm/分で試験体が破壊するまで単調圧縮した (図 3.2-2、写真 3.2-1)。すなわち、試験体の最外層 (平行層) を治具で支持し、試験体の中央の平行層に加力治具を介して圧縮力を加え、内層の直交層をせん断した。加力治具はラミナの厚さと同幅で、試験体との接触面の角は R 3mm の面取りを施した。治具の加力には球座等は介さなかった。試験体の脚部は厚さ 10mm の鋼板を介してはさみ、開き留めとした。最外層頂部と内層平行層の脚部の間の変位 δ を変位計 (共和電業製 DTH-A-20) にて測定し、せん断変形角 $\gamma (= \delta/t_{LMN})$ より、直交層のせん断弾性係数 G_R を求めた。

直交層の層内せん断強度 τ は次式で求めた。

$$\tau = \frac{P_{\max}}{2LW} \quad (3.1-1)$$

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

直交層の層内せん断弾性係数 G_R は次式で求めた。

$$G_R = \frac{0.15 P_{\max} t_{LMN}}{(\delta_{0.4} - \delta_{0.1}) LW} \quad (3.1-2)$$

ここで、 $\delta_{0.4}$ および $\delta_{0.1}$ はそれぞれ最大荷重の 40% および 10% における変位。

試験体の含水率は高周波木材水分計 (マイクロメジャー株式会社製 HS-100) にて最外層のラミナを測定した値とした。

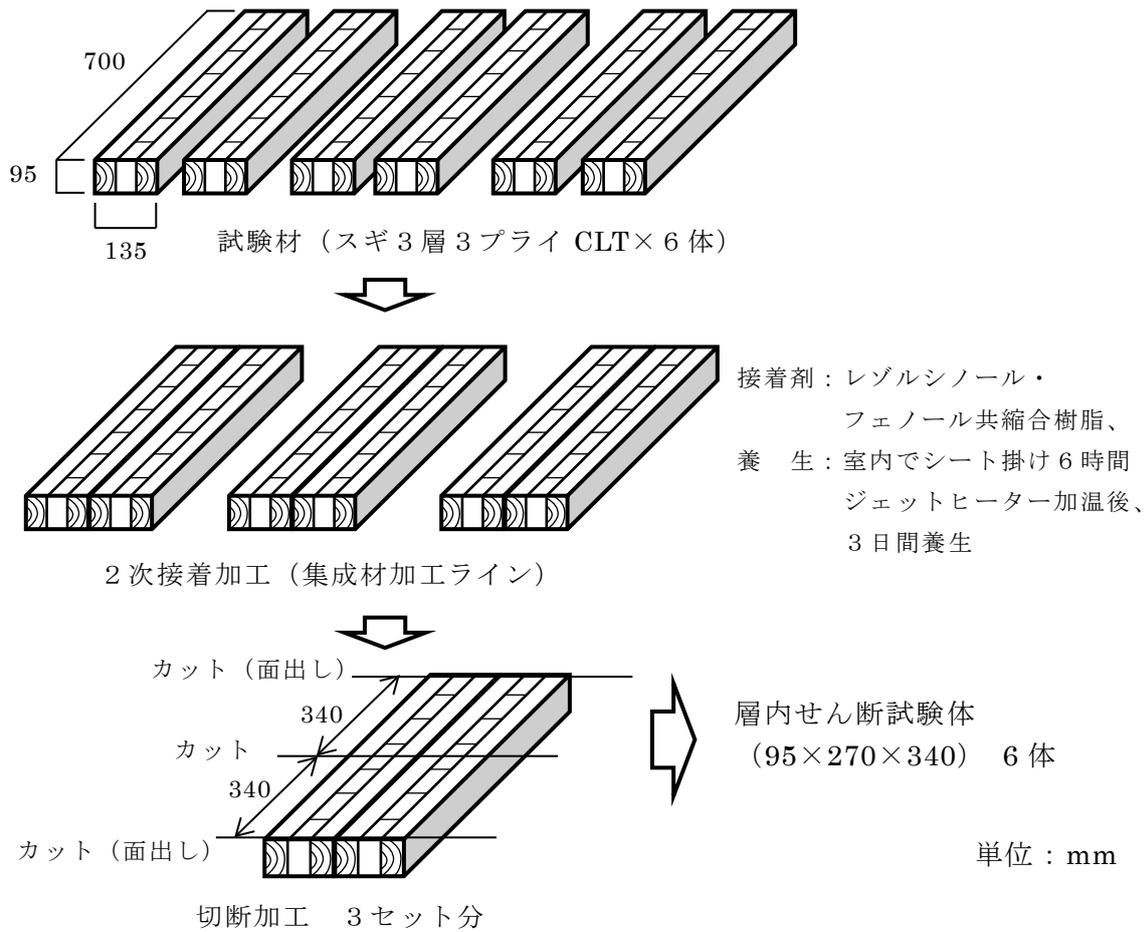


図 3.2-1 スギ CLT 試験体の加工

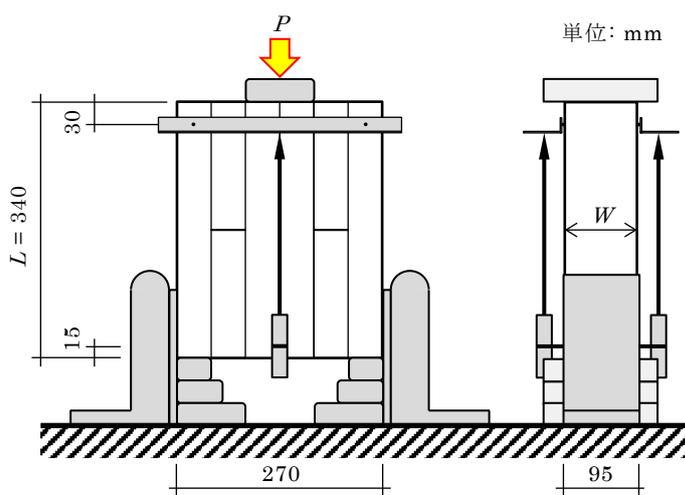


図 3.2-2 層内せん断試験の方法 (スギ CLT)



写真 3.2-1 層内せん断試験の例

3.2.2 ヒノキ CLT の実験方法

ラミナ幅 W_{LMN} が 75、105、124mm の 3 種類のヒノキ CLT を供試した。試験材は 5 層 5 プライ Mx90 構成（外層ラミナ M90、内層ラミナ M60、幅はぎ接着なし）で、ラミナの厚さ t_{LMN} は 25mm であった。

面外せん断試験用の試験体（幅 300mm×長さ 875mm×積層方向の厚さ 125mm）のうち、ラミナ幅の異なる E-075-OSJ6、E-105-OSJ6、E-124-OSJ6 の 3 体を試験体採取用の試験材とした。

各試験材は幅方向に三等分（幅約 100mm）計 9 本に裁断し、試料の試験体番号を仮に E-075-OSJ6-#、E-105-OSJ6-#、E-124-OSJ6-#（#は 1～3）とし、振動法による強度特性値の非破壊測定に供した。

この裁断試験材からせん断長さ $L = 315\text{mm}$ で、ラミナ配置の異なる各 2 体ずつ計 18 体の試験体を採取した。ラミナ配置は、直交層ラミナの中央をせん断長さの中央に配置したもの（記号 J）、直交層ラミナ境界を中央に配置したもの（記号 L）の 2 種類とした。（図 3.2-3 上段）。一部の試験体には、ひずみゲージ（共和電業製 KFGS-10-120-C1-11、ゲージ長 10mm、接着剤 CC-35 を使用）を 7 枚貼り付け、平行層の軸ひずみと直交層のせん断ひずみを測定した。

ラミナ幅が 105mm と 124mm の試験体は、加力点付近で圧縮破壊（繊維方向のめり込み）が生じ（写真 3.2-3）、破壊強度を測定できなかったため、ひずみゲージを貼り付けた試験体を除き、 $L = 175\text{mm}$ に変更して供試した（図 3.2-3 下段）。したがって、これらのラミナ配置 J の試験体には仕様の差異はない。さらに比較のため、ラミナ幅 75mm についても $L = 175\text{mm}$ の試験体（ラミナ配置 L のみ）を 3 体供試した。

層内せん断試験方法と強度特性値の評価方法および含水率の測定方法は、スギ試験体の方法に準じた（図 3.2-4、写真 3.2-2）。

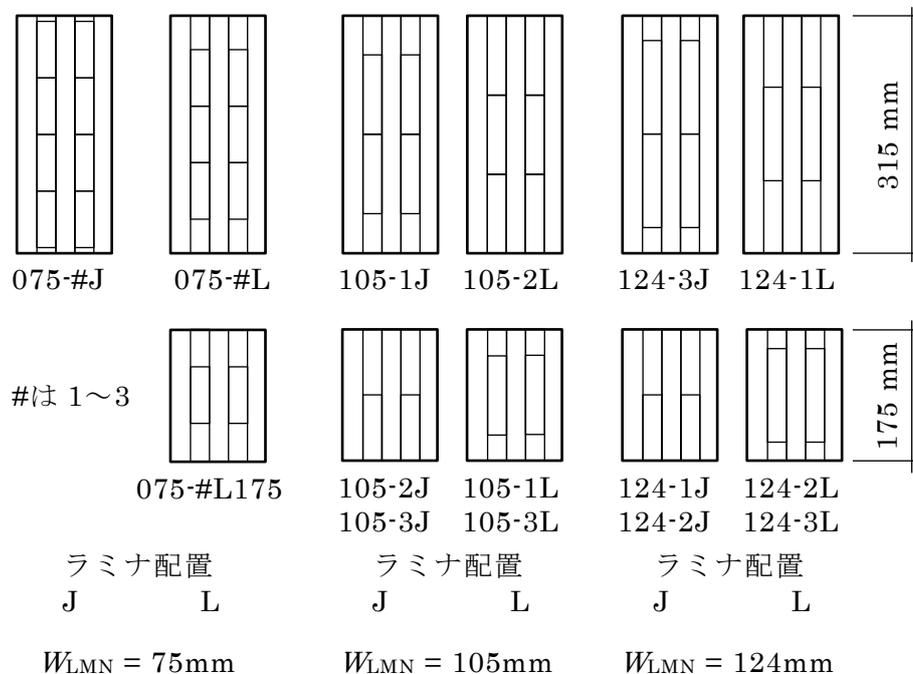


図 3.2-3 層内せん断試験体の形状、ラミナ配置および番号（ヒノキ CLT）
 W_{LMN} はラミナ幅を示す。

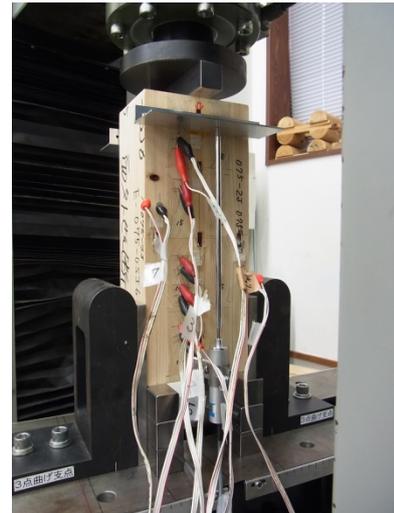
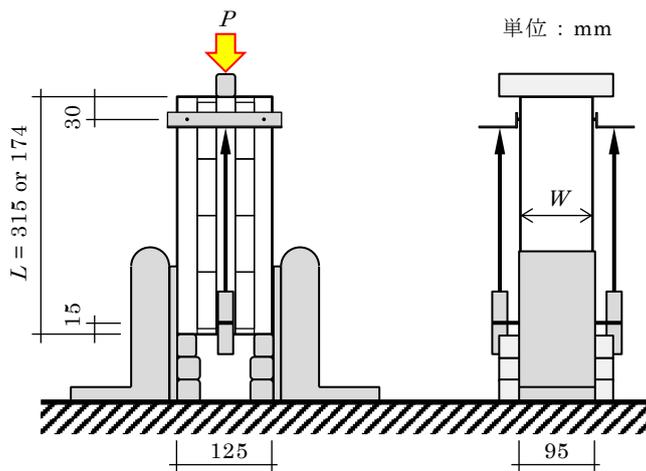


図 3.2-4 層内せん断試験の方法（ヒノキ CLT） 写真 3.2-2 層内せん断試験の例



写真 3.2-3 加力点のめり込みの例

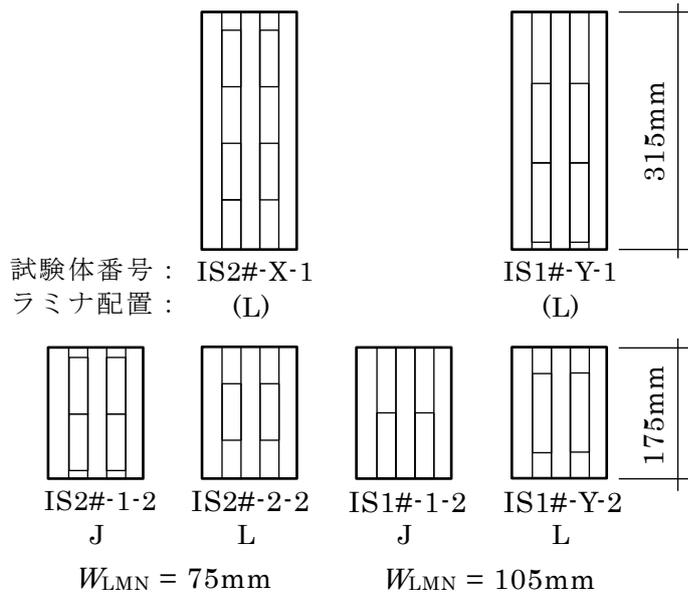
3.2.3 カラマツ CLT の実験方法

ラミナ幅 W_{LMN} が 75mm または 105mm の 2 種類のカラマツ CLT を供試した。試験材は 5 層 5 プライ Mx120 構成で、ラミナの厚さ t_{LMN} は 25mm であった。ラミナ間は幅はぎ接着して製造されたものであった。なお、平行層ラミナのラミナ幅は 105mm であった。

試験材の大きさは 95mm×125mm×315mm で、層内せん断試験に用いたせん断長さ $L = 315$ mm の試験体は、ラミナ幅の異なる試験材各 6 体をそのまま供試した（図 3.2-5）。直交層のラミナ断面の中心は概ね長さの中央付近にあった（ラミナ配置の表示(L)）。 $L = 175$ mm の試験体は、ヒノキ CLT の試験体と同様にラミナ配置が J（各 3 体）と L（各 3 体）となるように加工し、強度試験に供試した。

なお、試験材が短く、適切な固有振動モードが観測できなかったため、強度特性値の非破壊測定は行わなかった。

層内せん断試験方法と強度特性値の評価方法および含水率の測定方法は、ヒノキ CLT の試験方法に準じた（図 3.2-4、写真 3.2-4）。



#は1～3、Xは1または2、Yは2または3

図 3.2-5 層内せん断試験体の形状、ラミナ配置および番号（カラマツ CLT）



写真 3.2-4 層内せん断試験の例

3.3 試験結果

3.3.1 スギ CLT の非破壊試験および層内せん断試験の結果

試験結果は以下のとおりであった。

表 3.3-1 非破壊試験の結果 - スギ 45B シリーズ（試験材）

番号	密度 (kg/m^3)	E_{fr}	$E_{TGH.f}$	$G_{TGH.f}$	$E_{TGH.e}$	$G_{TGH.e}$
45B1.To.OSS1-2	396	4.73	6.02	0.263	5.06	0.557
45B1.To.OSS2-2	412	5.10	4.95	0.276	5.63	0.540
45B1.To.OSS3-2	428	4.73	4.89	0.230	5.00	0.420
45B1.To.OSS4-2	387	4.78	4.70	0.220	5.19	0.382
45B1.To.OSS5-2	399	4.92	4.69	0.249	5.62	0.561
45B1.To.OSS6-2	399	4.63	4.38	0.262	4.46	0.687
平均値	403	4.81	4.94	0.250	5.16	0.525
最小値	387	4.63	4.38	0.220	4.46	0.382
最大値	428	5.10	6.02	0.276	5.63	0.687
標準偏差	14.4	0.169	0.566	0.0217	0.436	0.110
変動係数	3.57%	3.51%	11.5%	8.67%	8.45%	20.9%

E_{fr} ：縦振動法による縦弾性係数（単位 kN/mm^2 ）

$E_{TGH.f}$ ：たわみ振動法による面外方向の曲げヤング係数（単位 kN/mm^2 ）

$G_{TGH.f}$ ：たわみ振動法による面外方向のせん断弾性係数（単位 kN/mm^2 ）

$E_{TGH.e}$ ：TGH 法による面内方向の曲げヤング係数（単位 kN/mm^2 ）

$G_{TGH.e}$ ：TGH 法による面内方向のせん断弾性係数（単位 kN/mm^2 ）

G の評価におけるせん断応力分布係数 s は 1 とした。すなわち、表中の G は G/s である。

表 3.3-2 層内せん断試験の結果—スギ 45B シリーズ

番号	密度 (kg/m ³)	G_R	τ	含水率 (%)	破壊※ 性状
45B-1.2-1	411	101.1	1.11	8.7	G, L
45B-1.2-2	406	79.1	1.10	9.1	G, L
45B-3.4-1	408	76.0	0.974	12.1	G, L
45B-3.4-2	414	73.1	0.976	11.6	L, G
45B-5.6-1	398	71.6	1.11	10.5	G, (L)
45B-5.6-2	412	73.9	1.03	11.1	G, L
平均値	408	79.1	1.05	10.5	
最小値	398	71.6	0.974	8.7	
最大値	414	101.1	1.11	12.1	
標準偏差	5.72	11.1	0.0653	1.36	
変動係数	1.40%	14.0%	6.22%	13.0%	

G_R : 強度試験で得られた直交層のせん断弾性係数 (単位 N/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 : 試験対象の直交層に係わらない接着層やラミナの破壊

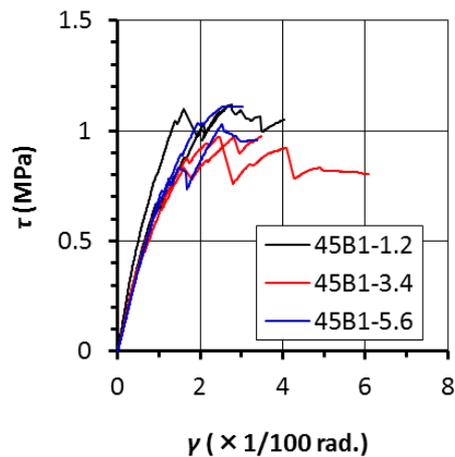


図 3.3-1 せん断応力 τ —せん断ひずみ γ 関係 (スギ CLT)



写真 3.3-1 試験体の破壊例 (スギ CLT)

3.3.2 ヒノキ CLT の非破壊試験および層内せん断試験の結果
試験結果は以下のとおりであった。

表 3.3-3 非破壊試験の結果 - 075 シリーズ

番号	密度 (kg/m ³)	E_{fr}	$E_{TGH.f}$	$G_{TGH.f}$	$E_{TGH.e}$	$G_{TGH.e}$
E-075-OSJ6-1	509	6.64	8.74	0.239	7.17	0.801
E-075-OSJ6-2	487	6.38	8.70	0.243	6.70	0.728
E-075-OSJ6-3	474	7.06	8.27	0.239	7.22	0.739
平均値	490	6.69	8.57	0.240	7.03	0.756
最小値	474	6.38	8.27	0.239	6.70	0.728
最大値	509	7.06	8.74	0.243	7.22	0.801
標準偏差	17.3	0.342	0.259	0.0023	0.290	0.0398
変動係数	3.52%	5.12%	3.02%	0.94%	4.12%	5.27%

記号の説明は表 3.3-1 に同じ。

表 3.3-4 非破壊試験の結果 - 105 シリーズ

番号	密度 (kg/m ³)	E_{fr}	$E_{TGH.f}$	$G_{TGH.f}$	$E_{TGH.e}$	$G_{TGH.e}$
E-105-OSJ6-1	479	6.41	8.57	0.331	6.60	0.804
E-105-OSJ6-2	471	6.67	8.07	0.382	6.83	0.733
E-105-OSJ6-3	463	6.76	8.15	0.390	6.99	0.661
平均値	471	6.61	8.26	0.368	6.81	0.733
最小値	463	6.41	8.07	0.331	6.60	0.661
最大値	479	6.76	8.57	0.390	6.99	0.804
標準偏差	8.1	0.178	0.270	0.0322	0.198	0.0714
変動係数	1.72%	2.70%	3.26%	8.77%	2.90%	9.74%

記号の説明は表 3.3-1 に同じ。

表 3.3-5 非破壊試験の結果 - 124 シリーズ

番号	密度 (kg/m ³)	E_{fr}	$E_{TGH.f}$	$G_{TGH.f}$	$E_{TGH.e}$	$G_{TGH.e}$
E-124-OSJ6-1	485	7.42	8.82	0.426	7.78	0.722
E-124-OSJ6-2	506	7.76	9.71	0.459	8.06	0.786
E-124-OSJ6-3	513	8.39	10.05	0.454	8.83	0.798
平均値	501	7.85	9.52	0.446	8.23	0.769
最小値	485	7.42	8.82	0.426	7.78	0.722
最大値	513	8.39	10.05	0.459	8.83	0.798
標準偏差	15.1	0.490	0.636	0.0181	0.545	0.0411
変動係数	3.00%	6.24%	6.68%	4.05%	6.63%	5.35%

記号の説明は表 3.3-1 に同じ。

表 3.3-6 層内せん断試験の結果 ($W_{LMN} = 75\text{mm}$ 、 $L = 315\text{mm}$)

番号	密度 (kg/m^3)	G_R	τ	含水率 (%)	破壊性状
075-1J	515	178	1.42	14.1	G, L
075-2J	491	228	1.37	12.4	G, L
075-3J	474	123	1.45	12.7	G, L
075-1L	503	213	1.50	13.5	G, L
075-2L	472	140	1.54	12.0	G, L
075-3L	468	121	1.65	11.9	G, L
平均値	487	167	1.49	12.7	
最小値	468	121	1.37	11.9	
最大値	515	228	1.65	14.1	
標準偏差	19.0	46.2	0.0995	0.870	
変動係数	3.90%	27.6%	6.68%	6.84%	

記号の説明は表 3.3-2 に同じ。

表 3.3-7 層内せん断試験の結果 ($W_{LMN} = 75\text{mm}$ 、 $L = 175\text{mm}$)

番号	密度 (kg/m^3)	G_R	τ	含水率 (%)	破壊性状
075-1L175	502	102	1.37	10.5	G, L, (T)
075-2L175	509	154	1.88	8.6	G, L
075-3L175	487	109	1.84	8.6	G, L
平均値	499	122	1.70	9.2	
最小値	487	102	1.37	8.6	
最大値	509	154	1.88	10.5	
標準偏差	11.1	28.2	0.286	1.11	
変動係数	2.22%	23.2%	16.9%	12.1%	

記号の説明は表 3.3-2 に同じ。

表 3.3-8 層内せん断試験の結果 ($W_{LMN} = 105\text{mm}$ 、 $L = 175\text{mm}$)

番号	密度 (kg/m^3)	G_R	τ	含水率 (%)	破壊性状
105-2J	461	154	2.08	11.3	G, T, L,
105-3J	461	162	2.35	11.4	G, T, L,
105-1L	468	150	2.07	11.5	G, L
105-3L	459	170	2.06	11.5	G, T, L
平均値	462	159	2.14	11.4	
最小値	459	150	2.06	11.3	
最大値	468	170	2.35	11.5	
標準偏差	4.06	8.79	0.142	0.122	
変動係数	0.879%	5.52%	6.63%	1.07%	

記号の説明は表 3.3-2 に同じ。

表 3.3-9 層内せん断試験の結果 ($W_{LMN} = 124\text{mm}$ 、 $L = 175\text{mm}$)

番号	密度 (kg/m^3)	G_R	τ	含水率 (%)	破壊性状
124-1J	505	210	2.78	12.4	L, G, T
124-2J	506	203	3.06	11.7	L, G, T
124-2L	505	155	2.90	10.8	G, L
124-3L	510	N.A.	N.A.	13.5	G
平均値	507	189	2.91	12.1	
最小値	505	155	2.78	10.8	
最大値	510	210	3.06	13.5	
標準偏差	2.39	30.2	0.140	1.12	
変動係数	0.471%	16.0%	4.80%	9.30%	

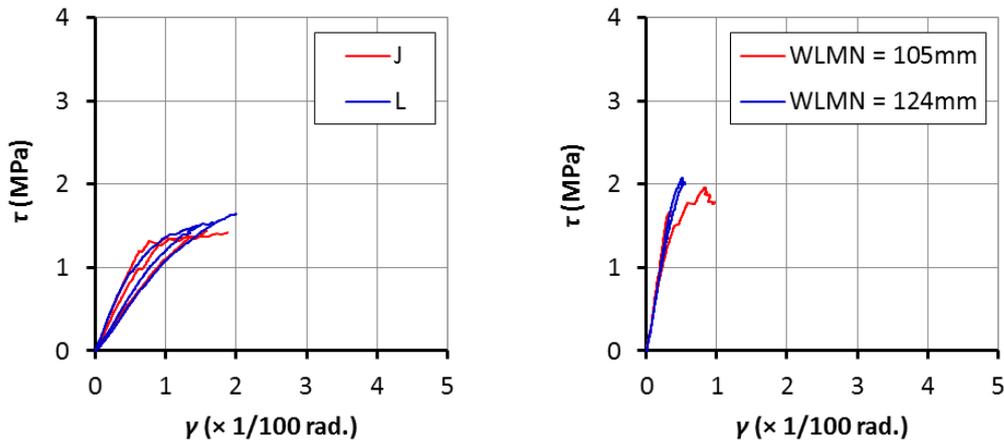
記号の説明は表 3.3-2 に同じ。

124-3L は強度試験データなし。

表 3.3-10 層内せん断試験の結果 (参考) — りり込み破壊した試験体 ($L = 315\text{mm}$)

番号	密度 (kg/m^3)	G_R	τ	含水率 (%)	破壊性状
105-1J	473	461	1.96	10.7	C, G
105-2L	470	583	1.66	11.8	C
124-3J	511	511	2.02	14.2	C
124-1L	486	536	2.07	11.2	C

記号の説明は表 3.3-2 に同じ。



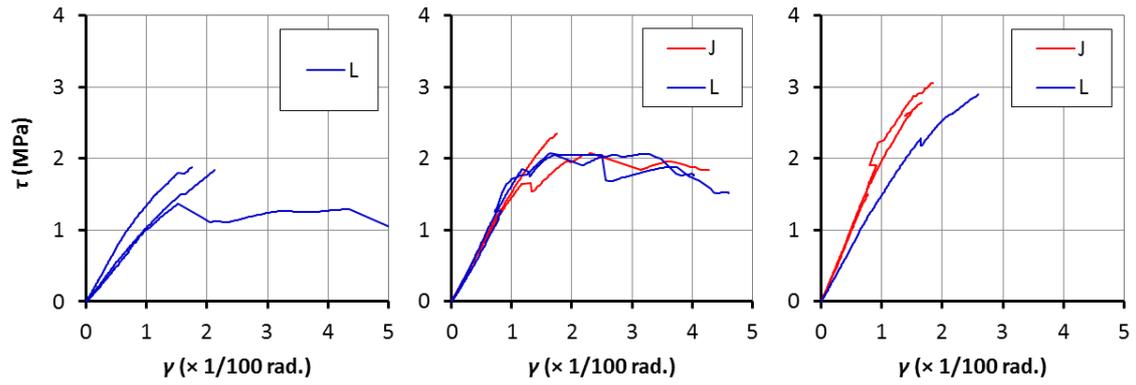
ア) $W_{LMN} = 75\text{mm}$

イ) りり込み破壊した試験体

図 3.3-2 せん断応力 τ —せん断ひずみ γ 関係 (ヒノキ CLT、 $L = 315\text{mm}$)

記号 J、L はラミナ配置を示す。

W_{LMN} はラミナ幅を示す。

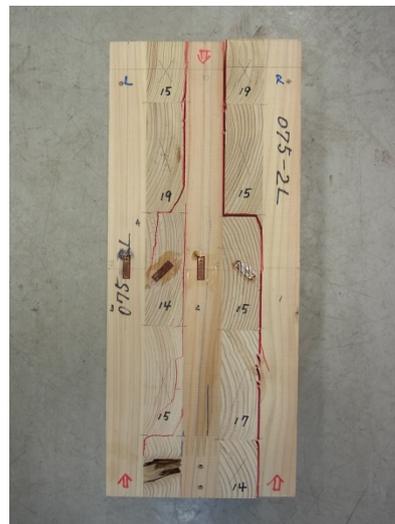
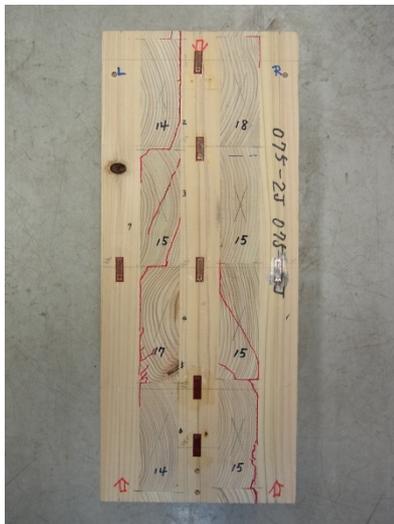


ア) $W_{LMN} = 75\text{mm}$ イ) $W_{LMN} = 105\text{mm}$ ウ) $W_{LMN} = 124\text{mm}$

図 3.3-3 セン断応力 τ -せん断ひずみ γ 関係 (ヒノキ CLT、 $L = 175\text{mm}$)

記号 J、L はラミナ配置を示す。

W_{LMN} はラミナ幅を示す。



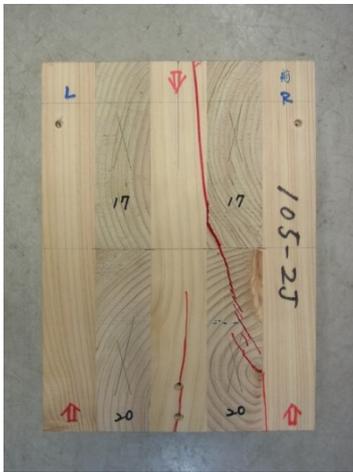
ア) $W_{LMN} = 75\text{mm}$ 、ラミナ配置 J イ) $W_{LMN} = 75\text{mm}$ 、ラミナ配置 L

写真 3.3-2 試験体の破壊例 (ヒノキ CLT、 $L = 315\text{mm}$)

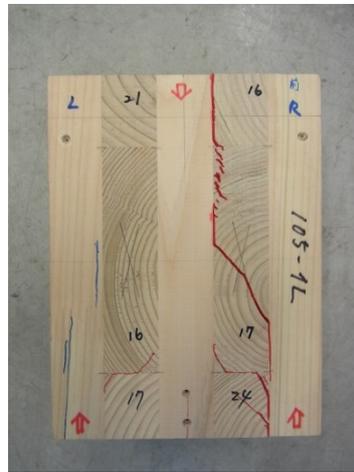
W_{LMN} はラミナ幅を示す。



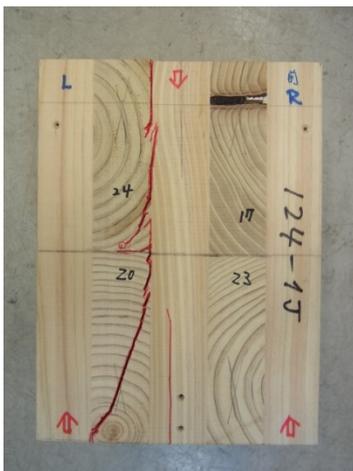
ア) $W_{LMN}=75\text{mm}$ 、ラミナ配置 L



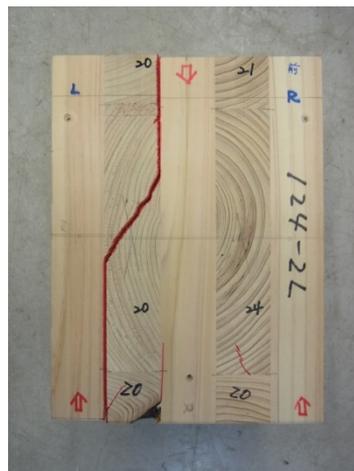
イ) $W_{LMN}=105\text{mm}$ 、ラミナ配置 J



ウ) $W_{LMN}=105\text{mm}$ 、ラミナ配置 L



エ) $W_{LMN}=124\text{mm}$ 、ラミナ配置 J



オ) $W_{LMN}=124\text{mm}$ 、ラミナ配置 L

写真 3.3-3 試験体の破壊例 (ヒノキ CLT、 $L=175\text{mm}$)

W_{LMN} はラミナ幅を示す。

3.3.3 カラマツ CLT の層内せん断試験の結果

試験結果は以下のとおりであった。表中で加力点で圧縮破壊（めり込み）した試験体の G_R と τ の測定値は斜体で示し、統計値から除いた。

表 3.3-11 層内せん断試験の結果－カラマツ CLT ($W_{LMN} = 75\text{mm}$ 、 $L = 315\text{mm}$)

番号	ラミナ配置	密度 (kg/m^3)	G_R *	τ *	含水率 (%)	破壊性状 *
IS21-1-1	(L)	524	<i>215</i> *	<i>1.63</i> *	8.9	C
IS22-1-1	(L)	567	180	1.79	9.6	L, G, ((C))
IS23-1-1	(L)	479	264	1.69	8.5	G, L, (C)
IS21-2-1	(L)	524	<i>273</i> *	<i>1.64</i> *	9.3	C
IS22-2-1	(L)	573	209	1.71	9.2	G, L, ((C))
IS23-2-1	(L)	506	332	1.53	8.8	G, L, ((T)), ((C))
平均値		531	246	1.68	9.0	
最小値		479	180	1.53	8.5	
最大値		573	332	1.79	9.6	
標準偏差		39.9	57.9	0.0956	0.43	
変動係数		7.50%	23.5%	5.70%	4.7%	

記号の説明は表 3.3-2 に同じ。

※めり込み破壊した試験体（記号 C）の G_R と τ は統計値から除いた。

表 3.3-12 層内せん断試験の結果－カラマツ CLT ($W_{LMN} = 105\text{mm}$ 、 $L = 315\text{mm}$)

番号	ラミナ配置	密度 (kg/m^3)	G_R *	τ *	含水率 (%)	破壊性状 *
IS11-1-1	(L)	557	294	1.49	9.7	G, L, (C)
IS12-1-1	(L)	511	<i>393</i> *	<i>1.26</i> *	10.5	C
IS13-1-1	(L)	495	147	1.62	10.8	G, L, ((C))
IS11-2-1	(L)	538	282	1.38	11.3	L, G, ((C))
IS12-2-1	(L)	513	<i>713</i> *	<i>1.52</i> *	9.3	G, L, C
IS13-3-1	(L)	516	141	1.82	9.9	G, L, (C)
平均値		526	216	1.58	10.4	
最小値		495	141	1.38	9.7	
最大値		557	294	1.82	11.3	
標準偏差		23.2	72.4	0.164	0.66	
変動係数		4.42%	33.5%	10.4%	6.4%	

記号の説明は表 3.3-2 に同じ。

※めり込み破壊した試験体（記号 C）の G_R と τ は統計値から除いた。

表 3.3-13 層内せん断試験の結果－カラマツ CLT ($W_{LMN} = 75\text{mm}$ 、 $L = 175\text{mm}$)

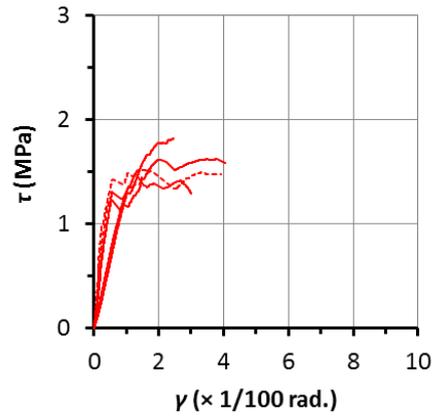
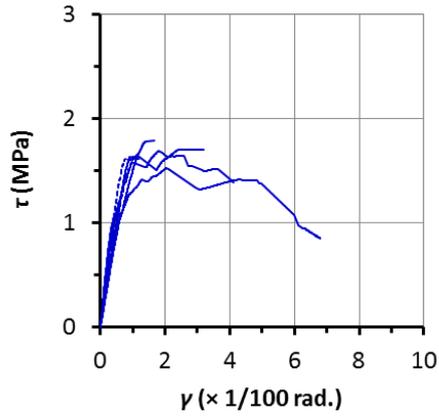
番号	ラミナ配置	密度 (kg/m^3)	G_R	τ	含水率 (%)	破壊性状
IS21-1-2	J	553	94.1	1.83	10.3	G, L, (T)
IS22-1-2	J	563	137	1.60	9.9	L, G
IS23-1-2	J	521	99.8	1.62	9.0	G, L
IS21-2-2	L	581	112	1.70	11.1	G, L, (T)
IS22-2-2	L	550	126	2.47	10.2	G, L, (T)
IS23-2-2	L	545	158	2.18	8.1	G, L
平均値		552	121	1.90	9.8	
最小値		521	94.1	1.60	8.1	
最大値		581	158	2.47	11.1	
標準偏差		19.7	24.0	0.352	1.0	
変動係数		3.56%	19.8%	18.5%	11%	

記号の説明は表 3.3-2 に同じ。

表 3.3-14 層内せん断試験の結果－カラマツ CLT ($W_{LMN} = 105\text{mm}$ 、 $L = 175\text{mm}$)

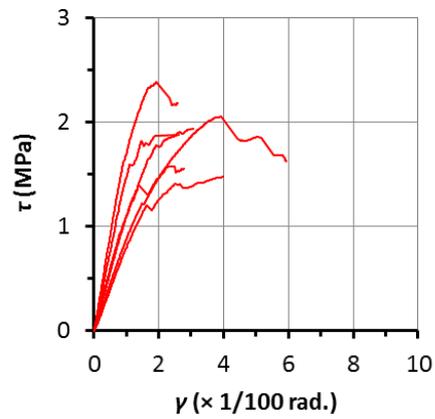
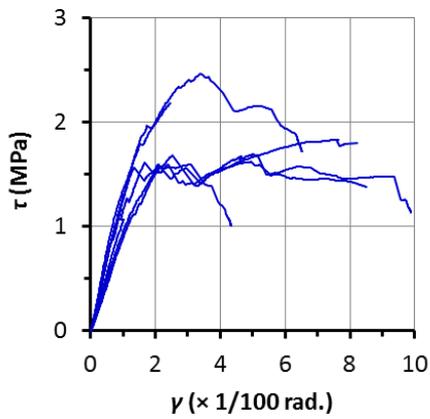
番号	ラミナ配置	密度 (kg/m^3)	G_R	τ	含水率 (%)	破壊性状
IS11-1-2	J	547	89.8	2.06	12.0	G, L, (T)
IS12-1-2	J	542	123	1.58	11.7	G, L
IS13-1-2	J	522	85.3	1.48	7.9	G, L
IS11-2-2	L	555	185	2.39	12.3	L, G
IS12-2-2	L	537	157	1.88	8.8	L, G
IS13-3-2	L	502	114	1.94	9.9	G, L
平均値		534	126	1.89	10.4	
最小値		502	85.3	1.48	7.9	
最大値		555	185	2.39	12.3	
標準偏差		19.3	38.9	0.329	1.8	
変動係数		3.61%	30.9%	17.4%	18%	

記号の説明は表 3.3-2 に同じ。



ア) $W_{LMN} = 75\text{mm}$ 、 $L = 315\text{mm}$

イ) $W_{LMN} = 105\text{mm}$ 、 $L = 315\text{mm}$

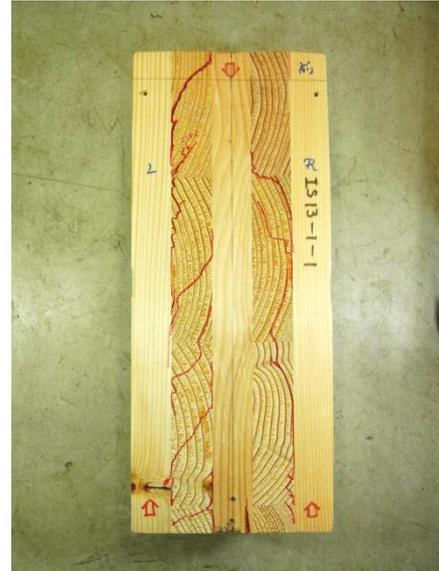


ウ) $W_{LMN} = 75\text{mm}$ 、 $L = 175\text{mm}$

エ) $W_{LMN} = 105\text{mm}$ 、 $L = 175\text{mm}$

図 3.3-4 セン断応力 τ -せん断ひずみ γ 関係 (カラマツ CLT)

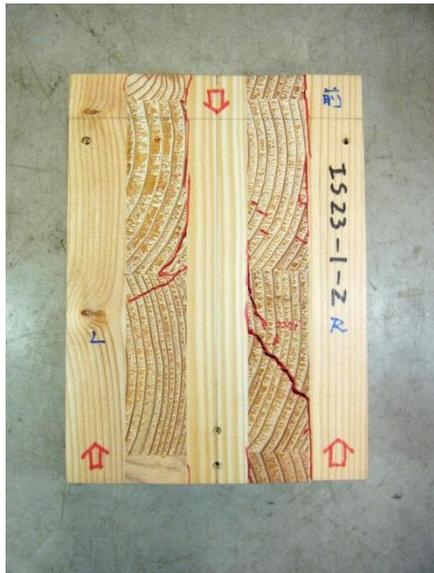
破線 (図ア、イ) はめり込み破壊した試験体。



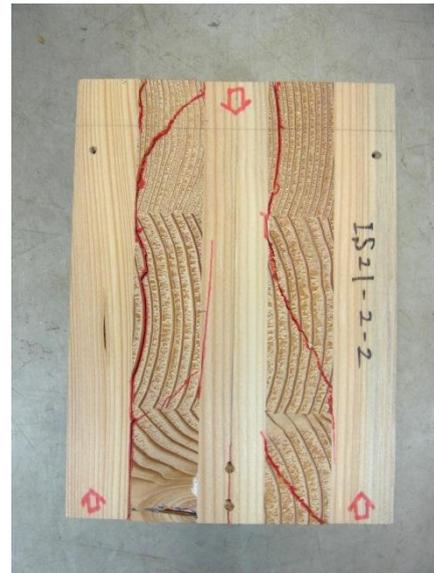
ア) $W_{LMN} = 75\text{mm}$

イ) $W_{LMN} = 105\text{mm}$

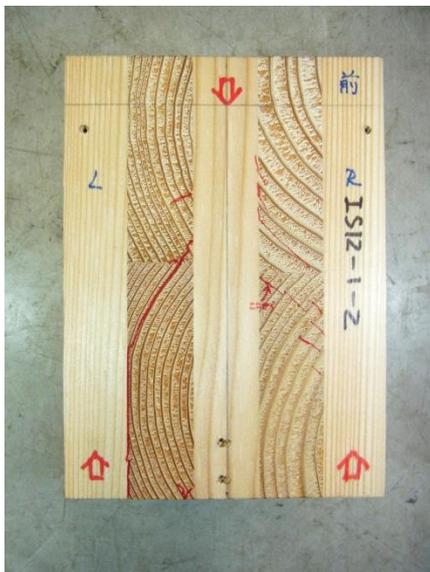
写真 3.3-4 試験体の破壊例 (カラマツ CLT、 $L = 315\text{mm}$)



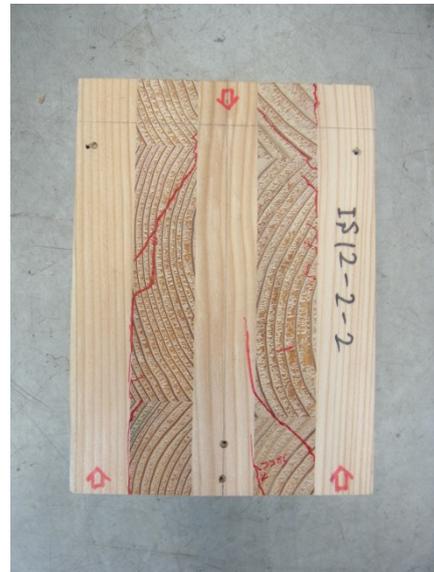
ア) $W_{LMN}=75\text{mm}$ 、ラミナ配置 J



イ) $W_{LMN}=75\text{mm}$ 、ラミナ配置 L



ウ) $W_{LMN}=105\text{mm}$ 、ラミナ配置 J



エ) $W_{LMN}=105\text{mm}$ 、ラミナ配置 L

写真 3.3-5 試験体の破壊例 (カラマツ CLT、 $L=175\text{mm}$)

3.4 考察

3.4.1 破壊性状

層内せん断試験による試験体の破壊性状は、概ね前年度事業までに得られた知見と一致した。図 3.4-1 に示すように、次のような特徴がみられた。

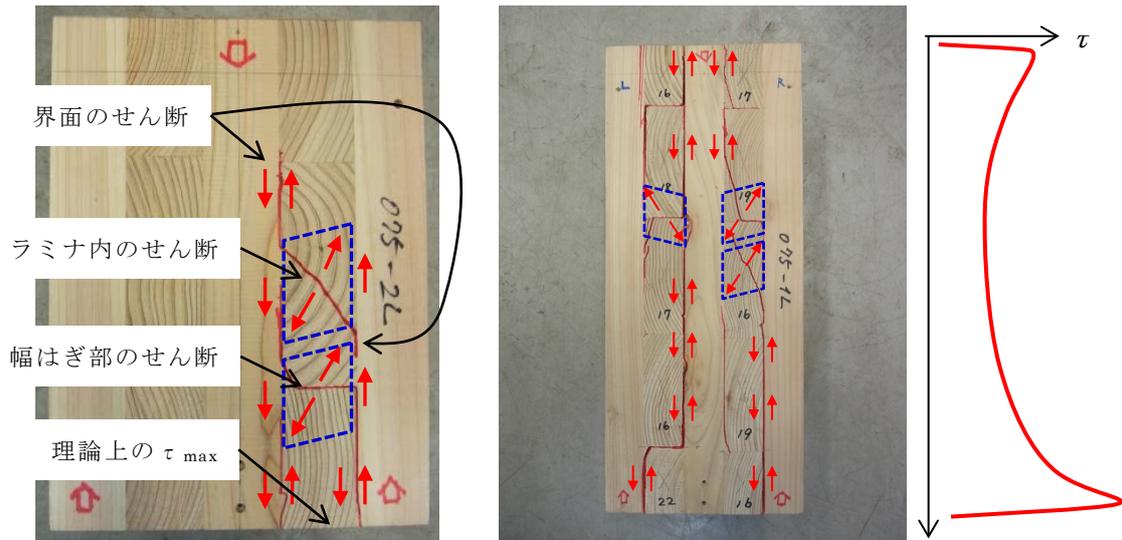
また、ヒノキ CLT は、ラミナ内のせん断破壊よりも接着層のせん断破壊が多くみられた。幅はぎ接着がないことの他に、材の木口面内のせん断強度が比較的高いことが推察される。カラマツ CLT は、幅はぎ接着がないこともあり、ラミナのせん断破壊が顕著であった。

(1) 破壊は支持点ラミナ境界付近で発生しやすい。

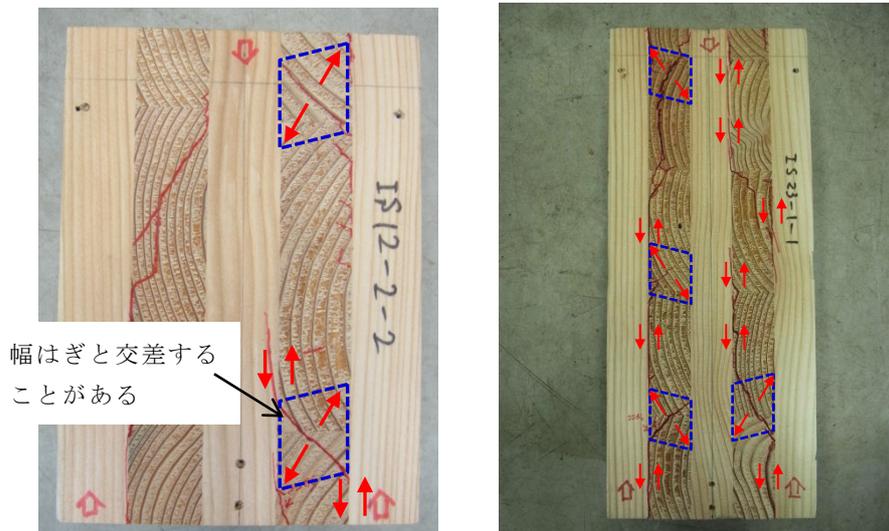
後述するように、本試験では最大応力が下側端部にあるためである。

(2) 破壊は概ね加力点と支持点を結ぶ方向に生じやすく、試験体が長い場合はしばし

- ば繰り返り生じる。
- (3) 直交層と平行層の接着界面付近でせん断破壊を生じやすい。
 - (4) 直交層ラミナ内ではせん断変形によって生じる引張によって破壊を生じやすい。
このとき特に(3)で生じた破壊面は直交層ラミナの両境界面に生じやすい。
 - (5) 幅はぎ接着が無い場合は、幅はぎ面を通る破壊がしばしばみられ、概してラミナが回転しやすい。
 - (6) 幅はぎ接着がある場合は、幅はぎ面と破壊面が交差することがある。



ア) 幅はぎ接着のない試験体 (ヒノキ CLT)



イ) 幅はぎ接着のある試験体 (カラマツ CLT)

図 3.4-1 層内せん断試験における破壊の特徴の比較

3.4.2 強度特性値と密度との関係

せん断強度 τ 、層内せん断弾性係数 G_R および密度の相関関係を図 3.4-2 に示す。ただし、ここで用いた密度は試験体全体の密度であり、直交層の密度そのものではない。

スギ CLT は、今回実施した試験データの範囲では、 τ や G_R と密度との間に明確な相関関係は確認できなかった。また、 τ と G_R の間にも相関関係は確認できなかった(図 3.4-2)。

ヒノキ CLT は、 G_R と密度に若干の正の相関関係がみられた(図 3.4-3)。 τ と密度については、相関関係は確認できなかった。 τ と G_R の相関関係は、せん断長さ $L=175\text{mm}$ の試験体には若干の正の相関関係がみられたが、 $L=315\text{mm}$ (ラミナ幅 75mm) の試験体では相関関係は確認できなかった。

カラマツ CLT は、 τ または G_R と密度との間の相関関係は確認できなかった(図 3.4-4)。 τ と G_R の相関関係は、 $L=175\text{mm}$ の試験体にはわずかに正の相関関係がみられたが、 $L=315\text{mm}$ の試験体では相関は確認できなかった。

スギの前年度の試験結果を含め、全樹種を統合して比較すると、それぞれの物性値の間には概ね正の相関関係がみられる(図 3.4-5)。ただし、これらの測定値は実験条件が様々異なり、同シリーズでもせん断長さや厚さが異なると強度特性値の評価値が異なる結果が示されている。そのため、樹種間やラミナ形状の影響の差異を比較するためには、試験条件によって異なる評価値の補正方法が必要である。

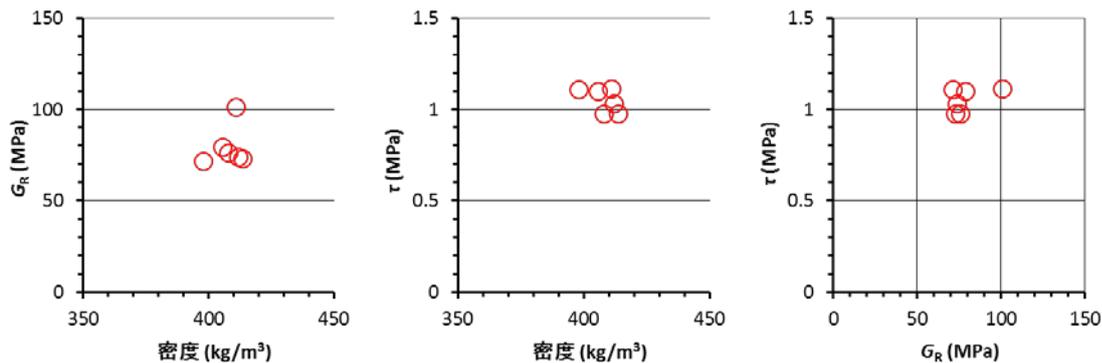


図 3.4-2 密度、せん断弾性係数 G_R およびせん断強度 τ の関係(スギ CLT(45B シリーズ))

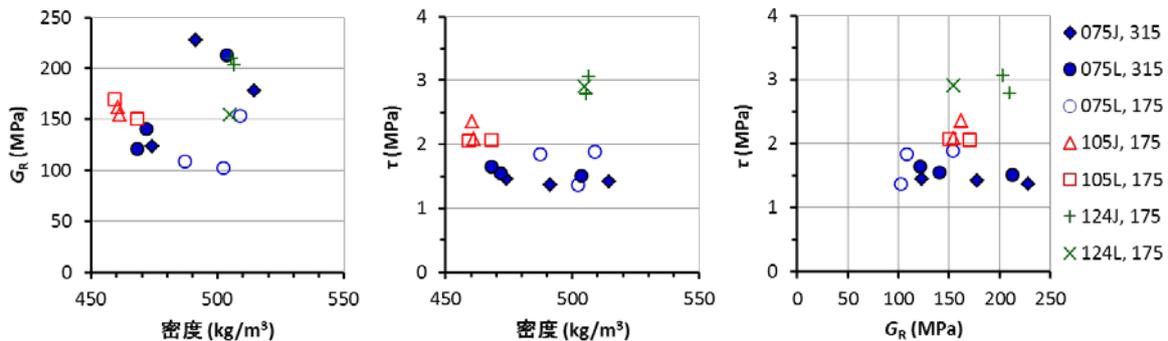


図 3.4-3 密度、せん断弾性係数 G_R およびせん断強度 τ の関係 (ヒノキ CLT) 盛り込み破壊した試験体を除く

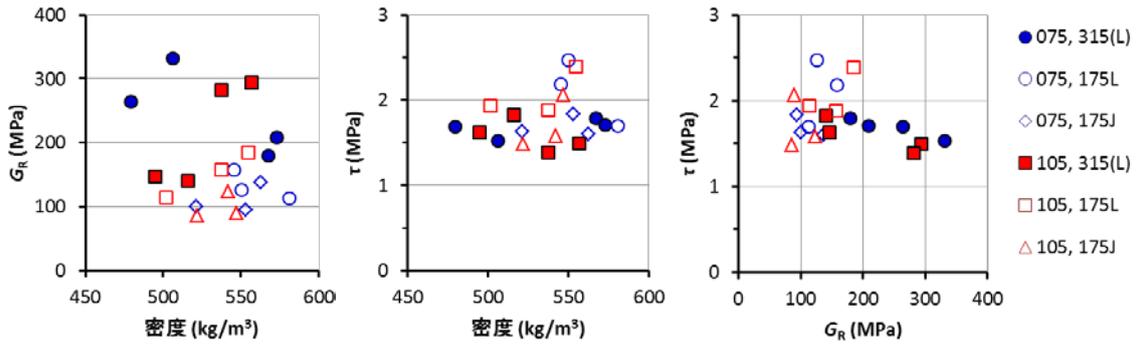


図 3.4-4 密度、せん断弾性係数 G_R およびせん断強度 τ の関係（カラマツ CLT）
めり込み破壊した試験体を除く

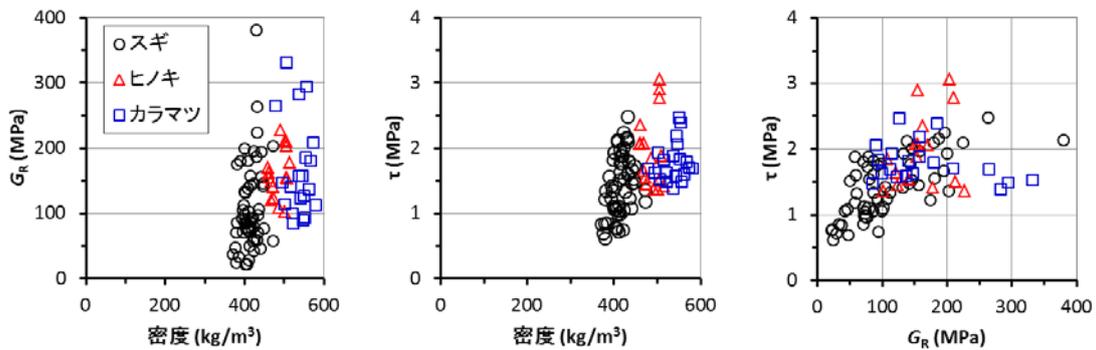


図 3.4-5 密度、せん断弾性係数 G_R およびせん断強度 τ の関係（全樹種統合）
スギは前年度事業の結果を含む。めり込み破壊した試験体は除外した。

3.4.3 試験体長さ、ラミナ幅およびラミナ配置の影響

図 3.4-6 にヒノキ CLT のせん断長さ L と層内せん断弾性係数 G_R およびせん断強度 τ の関係を、図 3.4-7 に同じくカラマツ CLT 試験体の結果を示す。

ヒノキ CLT、カラマツ CLT とともに、 L が大きくなると、 G_R は大きく、 τ は小さくなる傾向がみられる。これは、長さ方向の応力分布の影響によるものと考えられる。特に τ については、応力分布の理論値との比較により次項で考察する。

ラミナ幅の影響について、めり込み破壊がなかった $L = 175\text{mm}$ の試験体の結果を比較し、考察する（図 3.4-8）。

ヒノキ CLT では、ラミナ幅が大きいほど G_R 、 τ ともに大きな値を示す傾向がみられた。ただし、ラミナ配置が J のラミナ幅 105mm と 124mm の試験体は同じラミナ幅（87.5mm × 2）で実験されているので、試験結果に見られる差異は単に使用したラミナの物性の差と言える。例えば、図 3.4-3 に見られるように両者の見かけの密度は異なっている。したがって、これら 2 つの平均値で考えると、ラミナ幅 75mm の試験体に対してラミナ幅 105mm や 124mm の試験体は G_R や τ が大きくなる傾向がみられたと言える。

ラミナ配置については、J と L の仕様で顕著な差異は見られなかった。供試したヒノキ CLT はラミナ間の幅はぎ接着をしていないため、ラミナ配置が層内せん断強度性能に影響しやすいと予想されたが、本試験結果では差異はみられなかった。

カラマツ CLT では、ラミナ幅 75mm と 105mm において G_R 、 τ ともに明確な差異は見られなかった（図 3.4-8 イ）。供試したカラマツ CLT は幅はぎ接着をしているため、1 体

の幅はぎ接着ラミナのような性質を示し、ヒノキ CLT でみられたような差異が見られなかったものと考えられる。一方ラミナ配置については、原因は明らかではないが、L に比べ J の G_R や τ がやや小さくなる傾向がみられた。

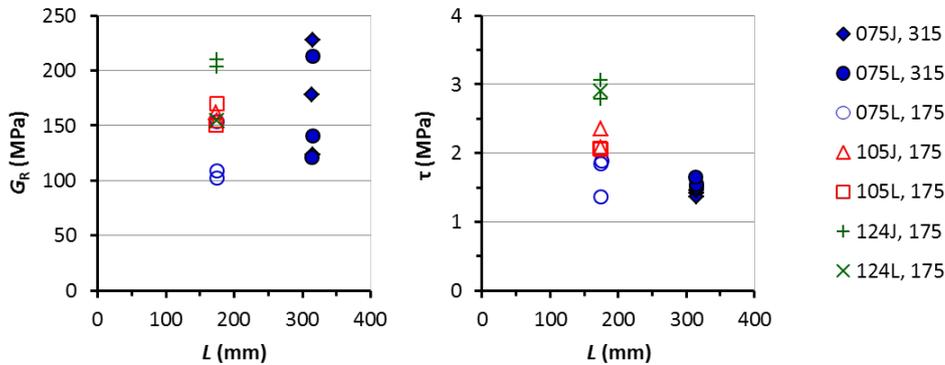
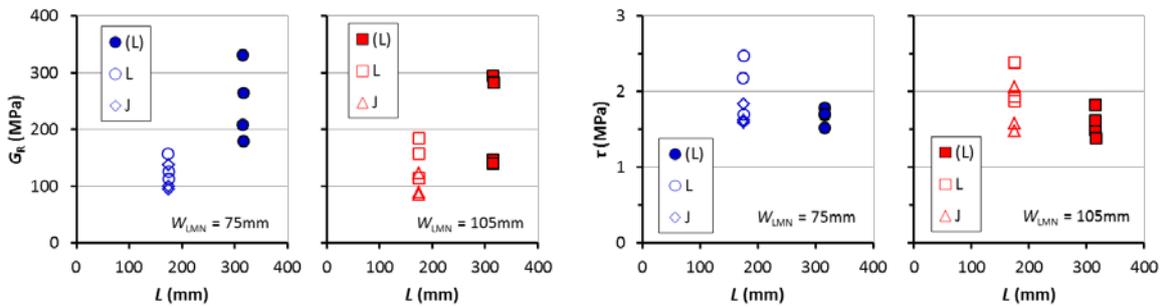


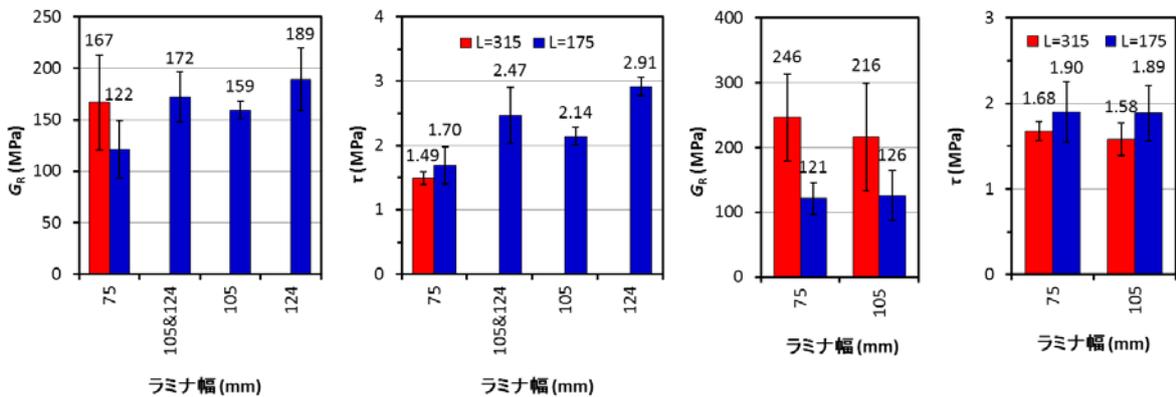
図 3.4-6 せん断長さ L とせん断弾性係数 G_R およびせん断強度 τ の関係 (ヒノキ CLT) くり込み破壊した試験体を除く。凡例の最初の数値はラミナ幅を、L と J は試験体のラミナ配置を、最後の数値は L を示す。



ア) $G_R - L$ 関係

イ) $\tau - L$ 関係

図 3.4-7 せん断長さ L とせん断弾性係数 G_R およびせん断強度 τ の関係 (カラマツ CLT) くり込み破壊した試験体を除く。凡例の L と J は試験体のラミナ配置を示す (本文参照)。



ア) ヒノキ CLT

イ) カラマツ CLT

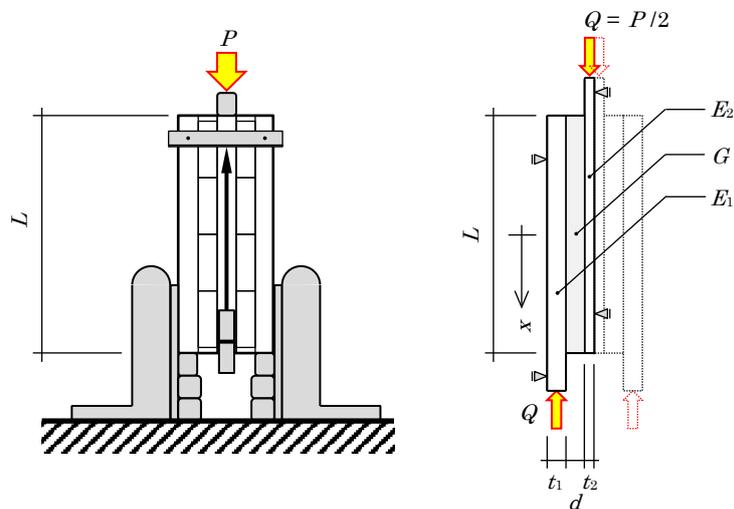
図 3.4-8 ラミナ幅とせん断弾性係数 G_R およびせん断強度 τ の関係 凡例の L は試験体のせん断長さ L (単位 mm) を示す。

3.4.4 層内せん断試験の応力分布の検討

過去の本事業を含め、これまでに行ってきた層内せん断試験は試験体のラミナ厚さやせん断長さが様々であった。そのため、評価されたせん断強度特性を比較するには何らかの補正方法が必要と言える。本項では、よく知られた **Volkersen** 理論³⁻¹⁾を用いて、試験体のせん断長さ方向の応力分布を検討する。

Volkersen 理論はラップジョイントの接着層のせん断応力分布（せん断遅れ）の著名な解析理論である。本理論では少ない強度特性値の情報からせん断応力分布を推定できることから、本課題の層内せん断試験の応力分布の検討に適用した。

層内せん断試験をこの理論に基づきモデル化すると図 3.4-9 のようになる。本理論は接着層のせん断応力を検討するものであるが、本考察では直交層を接着層に見立てて解析を行った。このモデルにおける G には、直交層のほか、層間の接着層や平行層の G も含まれるが、直交層が支配的であることおよび試験法による評価や CLT としての実用上の評価から妥当なものとした。



ア) 層内せん断試験

イ) 適用したモデル

図 3.4-9 層内せん断試験に対する Volkersen 理論によるモデル化

本理論によれば、直交層のせん断応力 τ は次式で表せる。

$$\tau(x) = \tau_m \frac{\rho}{2} \left[\frac{\cosh(\rho x/L)}{\sinh(\rho/2)} - \frac{1 - \alpha \sinh(\rho x/L)}{1 + \alpha \cosh(\rho/2)} \right] \quad (3.4-1)$$

ここで、せん断幅（図 3.4-9 における試験体の奥行方向の長さ）を b とすると、せん断長さ L 方向の平均せん断応力 τ_m 、係数 α および ρ それぞれ次式による値である。

$$\tau_m = \frac{Q}{Lb}, \quad \alpha = \frac{E_1 t_1}{E_2 t_2}, \quad \rho = \sqrt{\frac{L^2 G}{E_1 t_1 d} (1 + \alpha)} \quad (3.4-2)$$

本試験のモデルでは、図 3.4-9 イ) の下側外縁 ($x = +L/2$) でせん断応力が最大となる

ので、最大せん断応力 τ_{\max} は次式であらわせる。ただし、Volkersen 理論ではせん断される層の外縁でせん断力が 0 となることを考慮していない。また、本試験方法では支持点がせん断層外縁に近く、外層で圧縮塑性が生じ、局部圧縮応力が緩和されていることも考えられる。これらを考慮すると、次式の τ_{\max} は実際よりも大きな値を示すと考えられる。

$$\tau_{\max} = \tau_m \frac{\rho}{2} \left[\frac{1}{\tanh(\rho/2)} - \frac{1-\alpha}{1+\alpha} \tanh\left(\frac{\rho}{2}\right) \right] \quad (3.4-3)$$

外層と内層の平行層の軸ひずみ ϵ_1 と ϵ_2 は、それぞれ次式で表せる。

$$\epsilon_1(x) = \frac{1}{E_1 t_1} \int_{-L/2}^x \tau dx = \frac{\epsilon_{1\max}}{2} \left\{ \frac{2}{1+\alpha} + \frac{\sinh\left(\frac{\rho x}{L}\right)}{\sinh\left(\frac{\rho}{2}\right)} - \frac{1-\alpha}{1+\alpha} \frac{\cosh\left(\frac{\rho x}{L}\right)}{\cosh\left(\frac{\rho}{2}\right)} \right\} \quad (3.4-4)$$

$$\epsilon_2(x) = \frac{1}{E_2 t_2 b} \left[Q - b \int_{-L/2}^x \tau dx \right] = \epsilon_{2\max} - \alpha \epsilon_1(x) \quad (3.4-5)$$

ここで、平行層の最大ひずみ $\epsilon_{1\max}$ と $\epsilon_{2\max}$ はそれぞれ次式による値である。

$$\epsilon_{1\max} = \frac{Q}{E_1 t_1 b}, \quad \epsilon_{2\max} = \frac{Q}{E_2 t_2 b} \quad (3.4-6)$$

表 3.4-1 の計算条件で、ヒノキ試験体のひずみゲージによる測定値と理論値を比較した (図 3.4-10、図 3.4-11)。荷重-変形関係が、線形域内における $P = 40\text{kN}$ ($Q = 20\text{kN}$) での値とした。

平行層の軸ひずみ ϵ は、計算値と大きく外れるものが見られたが、長さ方向の分布の傾向は概ね実験値と理論値で同様であった (図 3.4-10)。計算値と理論値の差異については、計算条件に用いた物性値の差異のほか、試験体の形状のゆがみや不均質性による荷重の傾き (偏心) 等によるものと考えられる。

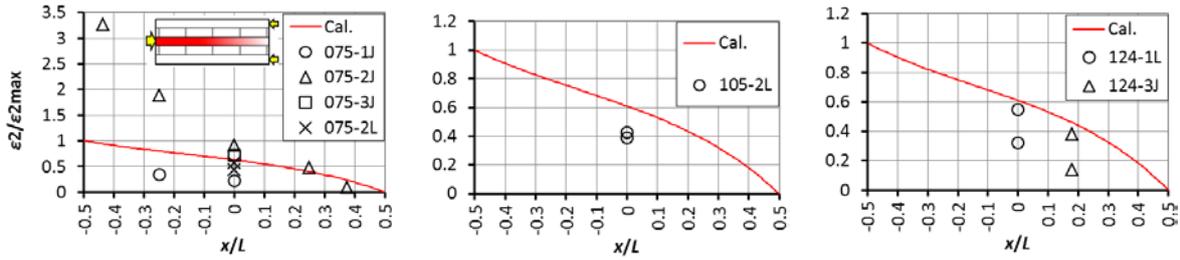
直交層のせん断ひずみ γ も、計算値と大きく外れるものがみられた (図 3.4-11)。個々のラミナの G の差異や荷重の偏心のほか、ラミナ断面に貼付けたひずみゲージの精度や、ラミナ幅の影響、ラミナ内の厚さ方向のせん断応力分布の影響などが考えられる。

表 3.4-1 計算条件

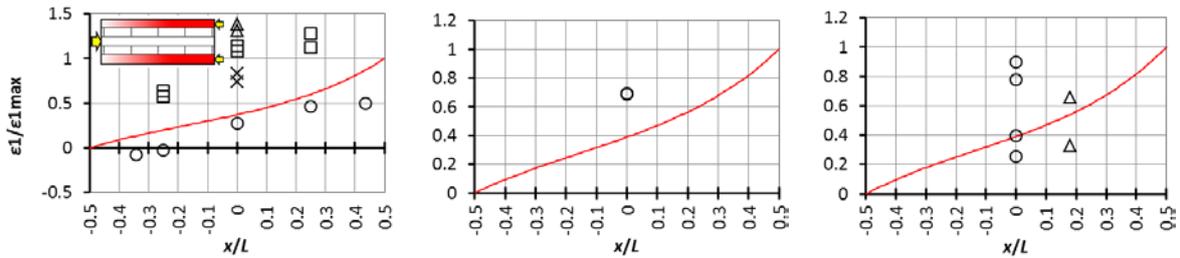
W_{LMN} (mm)	E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	G (MPa)
75	13.25	9.32	167
105	13.25	10.14	159
124	13.25	10.99	189

E はラミナのロットの平均値

G は本試験の評価値の平均的な値



ア) 内層 (凡例の Cal.は理論曲線)



イ) 最外層 (凡例はアに同じ)

図 3.4-10 平行層の軸ひずみ ε の分布 ($Q = 20\text{kN}$)

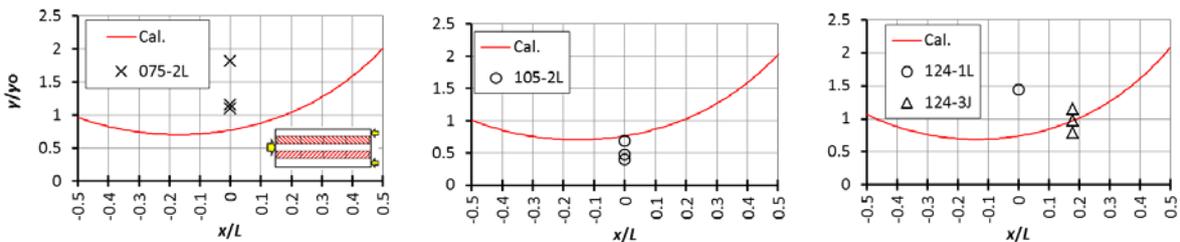


図 3.4-11 直交層のせん断ひずみ γ の分布 ($Q = 20\text{kN}$)

$\gamma_0 = \tau_m / G$ 、Cal.は表 3.4-1 の値を用いた理論曲線。

続いて、Volkersen 理論に基づいた層内せん断強度 τ の実験値の補正方法を検討する。

図 3.4-12 に、ヒノキ CLT およびカラマツ CLT の τ とせん断長さ L の関係を示す。理論曲線は式 3.4-3 に基づく τ_{\max} である。理論曲線の物性値は表 3.4-2 の値を用いた。 τ_m の値は $L = 175\text{ mm}$ の実験値の平均値を通るように調整した。計算には G の真値が必要であり、実験結果から G は L が大きい方が大きくなる傾向が見られているが、ここでは $L = 175\text{ mm}$ の実験値を用いることとした。

実験値と理論曲線は概ね一致した傾向を示しており、本稿で採用した試験方法では、 L が長いほどみかけの層内せん断強度 (せん断強度 τ の評価値) が低下すると考えられる。

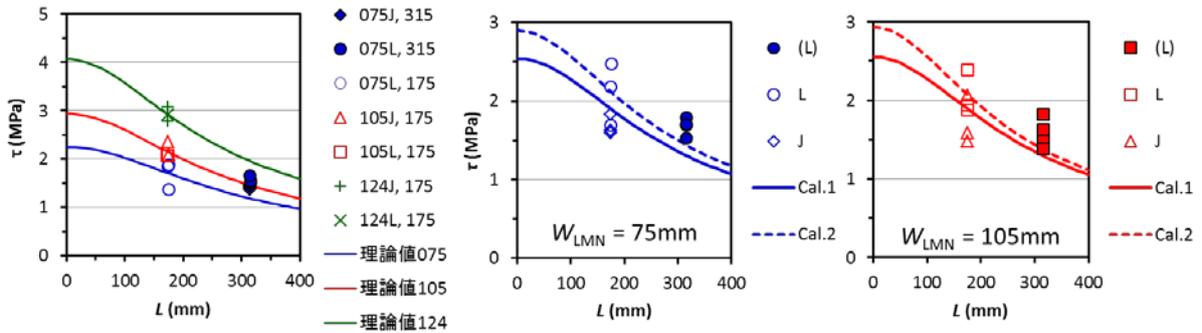
一方、図 3.4-13 に示すように、スギ CLT では L が τ_{\max} に及ぼす影響は比較的小さい。スギ CLT の試験では 3 層 3 プライ CLT を 2 次接着して供試したため、 $E_1 t_1 = E_2 t_2$ ($\alpha=1$) となり、せん断応力の L 方向の分布が対称となる。さらに G に対して E が大きいため、 τ の分布は平坦に、 ε の分布は直線的になる。これらの結果、 L が τ_{\max} に及ぼす影響は比較的小さくなった。

試験体の仕様等により、今回行ったスギ CLT のような評価に適した条件で実験できるとは限らないが、試験条件を計画する際に考慮すべき知見といえる。なお、理論上は $E \rightarrow \infty$ のとき $\tau_{\max}/\tau_m \rightarrow 1$ となる。

表 3.4-2 計算条件とせん断強度の真値 τ_{est} の推定値

W_{LMN} (mm)	E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	G (MPa)	τ_{exp} (MPa)	τ_{est} (MPa)
ヒノキ CLT					
75	13.25	9.32	122	1.70	2.25
105	13.25	10.14	159	2.14	2.94
124	13.25	10.99	189	2.91	4.07
カラマツ CLT (Cal.1: L + J)					
75	14.25	9.00	121	1.90	2.54
105	14.25	9.00	126	1.89	2.55
カラマツ CLT (Cal.2: L)					
75	14.25	9.00	132	2.12	2.90
105	14.25	9.00	152	2.07	2.93
スギ CLT (45B1 シリーズ)					
175	8.20	8.20	79.1	1.05	1.14

E はラミナのロットの平均値、但しカラマツ CLT は仕様から推定した値。
 G と τ_{exp} は $L = 175\text{mm}$ (スギ CLT は $L = 340\text{mm}$) の実験値の平均値。

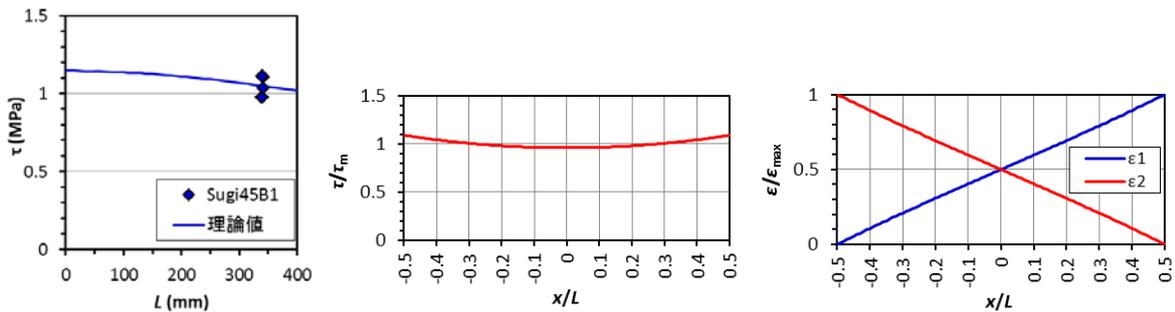


ア) ヒノキ CLT

イ) カラマツ CLT

図 3.4-12 せん断長さ L とせん断強度 τ の関係

計算条件は表 3.4-2 の値。Cal.1 は $L = 175\text{mm}$ のラミナ配置 L と J 両方の実験値を基準とした理論曲線。Cal.2 は $L = 175\text{mm}$ のラミナ配置 L の実験値を基準とした理論曲線。



ア) $\tau-L$ 関係

イ) τ の長さ方向の分布

ウ) ε の長さ方向の分布

図 3.4-13 スギ CLT (45B1 シリーズ) のせん断長さ L とせん断強度 τ の関係、せん断応力 τ の分布および平行層の軸ひずみ ε の分布

計算条件は表 3.4-2 の値。

さて、 $L \rightarrow 0$ のとき $\tau_{\max}/\tau_m \rightarrow 1$ に収束するので、理論上は L を十分小さくして測定すれば真値に近いせん断強度が得られることになるが、実験では L を過剰に小さくすると曲げによる底面の引張力の影響により、みかけのせん断強度の低下を招くことが前年度事業の実験結果から示唆されている。また、 L が大きい実験条件では加力点でのめり込みが生じせん断強度の測定が不能となる。したがって、実験に適した L を採用することになるが、何らかの補正が必要となる。層内せん断強度については、次式により実験値 τ_{exp} から真値 τ_{est} が推定できる。ただし、換算係数 C を求めるには、 E_1 、 E_2 、 G 、 t_1 、 t_2 、 d 、 L の値が必要となる（図 3.4-9 参照）。なお、本方法で補正で得た τ_{est} の値は表 3.4-2 内に示した。

$$\tau_{\text{est}} = C \tau_{\text{exp}} \quad (3.4-7)$$

ここで、

$$C = \frac{\rho}{2} \left[\frac{1}{\tanh(\rho/2)} - \frac{1-\alpha}{1+\alpha} \tanh\left(\frac{\rho}{2}\right) \right] \quad (3.4-8)$$

本補正方法で未考慮な点は以下とおりであり、今後更なる検討が必要と言える。

- 1) 本補正方法は、支点側端部（条件によっては加力点側端部）からのせん断破壊を前提としている。実際には端部境界でせん断応力は急激に低下するので換算係数 C は若干大きな値を与えると考えられる。また、ラミナ内部の破壊で強度が決まる場合は、前提条件に合致しない。
- 2) 本補正方法では、ラミナの厚さ方向のせん断応力分布は考慮していない。
- 3) 測定対象のラミナの物性が L 方向に一様であることを前提としている。すなわち、応力が不連続となる幅はぎ部の影響は考慮されていない。
- 4) 換算係数の算出には G の真値が必要であるが、測定値 G_R の実験条件に対する補正方法の知見は得られていない。

3.5 まとめ

カラマツまたはヒノキで製造したラミナ厚さ 25mm の 5 層 5 プライ CLT の直交層の層内せん断試験を行い、せん断強度 τ と層内せん断弾性係数 G_R のデータを収集し、これらの強度特性値に及ぼすラミナ幅の影響を検討した。また、ラミナ厚さ 45mm のスギ 3 層 3 プライ CLT についても直交層の層内せん断試験を行い、 τ と G_R のデータを収集した。

ラミナ幅の影響については、次の通りであった。

- 1) 幅はぎ接着をしないヒノキ CLT では、ラミナ幅 75mm に比べラミナ幅 105mm および 124mm では τ 、 G_R ともに大きくなる傾向がみられた。
- 2) 幅はぎ接着されたカラマツ CLT では、ラミナ幅 75mm と 105mm の試験体の間に τ 、 G_R ともに明確な差異はみられなかった。

さらに、ヒノキ CLT およびカラマツ CLT について、せん断長さ L の影響について検討したところ、次の知見が得られた。

- 1) G_R は L が大きくなると大きな値を示す傾向がみられた。
- 2) τ は L が大きくなると小さな値を示す傾向がみられた。
- 3) 応力解析により上記 2 を検討したところ、理論値と実験値の傾向は概ね一致した。
- 4) 上記 3 の知見に基づき、 τ を補正したところ、真値は実験値の 1.1~1.4 倍程度となると推定された。ただし、前述のラミナ幅の影響は定性的に変わらなかった。

3.6 (資料) 前年度までの事業の試験体の含水率

これまで層内せん断試験の実施時点では、試験体の含水率は静電容量式水分計で参考値として求めていた。試験体の全乾法による含水率は、都合により、試験後かなりの時間が経ってから測定した。そのため、次の方法で求めた。

まず、試験体の加力方向中央部付近から厚さ 3 cm のサンプルを採取し、全乾法により含水率測定時の含水率 u_s を次式で求めた。なお、サンプルは試験体の全ての直交層と平行層を含む。

$$u_s = \frac{m_{su} - m_{s0}}{m_{s0}} \times 100 (\%) \quad (3.6-1)$$

ここで、 m_{su} および m_{s0} は、それぞれ含水率測定用サンプルの乾燥前質量と全乾質量。

次に、含水率測定時の試験体の含水率を u_s とすると、試験体の全乾質量の推定値 m_0 は次式で求まる。

$$m_0 = \frac{m_{wm}}{1 + 0.01 u_s} \quad (3.6-2)$$

ここで、 m_{wm} は含水率測定時の試験体の質量。

最後に、試験時の試験体の含水率 u は次式で求まる。

$$u = \frac{m_u - m_0}{m_0} \times 100 (\%) \quad (3.6-3)$$

ここで、 m_u は試験時の試験体の質量。

以下に測定結果を示す。

表 3.6-1 208 シリーズ試験体の含水率 (%)

No.	1 LMN		2 LMNs	
	M.C.	M.C.e.	M.C.	M.C.e.
208.TO.OSS1	10.2	9.4	10.4	9.3
208.TO.OSS2	10.0	8.2	10.5	7.3
208.TO.OSS3	11.2	11.7	10.9	11.9
208.TO.OSS4	9.9	8.4	10.1	9.3
208.TO.OSS5	10.1	9.4	10.2	15.5
208.TO.OSS6	9.4	7.6	10.3	9.8

M.C.は全乾法による試験時の推定含水率。

M.C.e.は静電容量式水分計による測定値 (既報告値)。

表 3.6-2 209 シリーズ試験体の含水率 (%)

No.	1 LMN		2 LMNs	
	M.C.	M.C.e.	M.C.	M.C.e.
209.TO.OSS1	10.0	11.4	9.5	9.7
209.TO.OSS2	11.0	11.5	9.9	9.4
209.TO.OSS3	10.2	11.5	10.2	11.5
209.TO.OSS4	10.8	12.7	10.3	10.5
209.TO.OSS5	10.3	14.6	10.0	10.5
209.TO.OSS6	10.8	13.2	10.0	11.6

記号の説明は表 3.6-1 に同じ。

表 3.6-3 421 および 422 シリーズの試験体の含水率 (%)

No.	M.C.	M.C.e.
421.TO.OSS1-1	9.7	9.4
421.TO.OSS1-2	10.2	10.8
421.TO.OSS1-3	9.9	7.7
421.TO.OSS1-4	9.1	8.8
421.TO.OSS1-5	9.4	8.0
422.TO.OSS1-A,B	9.0	9.0

記号の説明は表 3.6-1 に同じ。

表 3.6-4 M6-1、Y6-1 および Y6-5 シリーズ試験体の含水率 (%)

No.	1 LMN		3 LMNs	
	M.C.	M.C.e.	M.C.	M.C.e.
M6-1-2-5, 11	9.5	11.6	9.9	14.3
M6-1-2-14, 2	9.8	14.0	9.7	13.1
M6-1-2-17, 8	9.8	18.4	10.5	10.4
Y6-1-3-11, Y6-1-1-2	10.8	13.2	10.9	9.6
Y6-1-4-14, Y6-1-2-8	11.7	11.7	11.0	6.9
Y6-1-5-17, Y6-1-1-5	10.7	9.7	10.9	10.2
Y6-5-1-2, Y6-5-5-17	10.1	11.2	10.7	9.9
Y6-5-2-8, Y6-5-1-5	11.0	10.5	10.9	11.3
Y6-5-3-11, Y6-5-4-14	10.3	10.6	10.8	11.5

記号の説明は表 3.6-1 に同じ。

文献

3-1) S. Thelandersson, H. J. Larsen: "Timber Engineering", pp.339-340, Wiley, 2003.

4 スギ7層7プライの長期性能評価

4.1 長期性能評価の目的

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、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、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、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、3 層 3 プライの強軸方向、3 層 4 プライの強軸方向、5 層 5 プライの弱軸方向、5 層 7 プライの弱軸方向、7 層 7 プライの強軸方向、9 層 9 プライの弱軸方向は、せん断力が卓越する中立軸付近に直交層が配置されるため、CLT の強度特性に直交層が与える影響が大きい者と考えられる。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。

本章では、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結果について述べる。

4.2 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。

樹種：スギ

構成：7 層 7 プライ(対照用に 5 層 5 プライも供試)

等級：直交集成板の日本農林規格に定める Mx60

ラミナ厚さ：30±6mm

寸法：長さ 4830mm×公称厚さ 210mm×幅 300mm

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

4.3 試験方法

クリープ試験・クリープ破壊試験を以下に記す載荷条件により実施した。

加力方法：3 等分点 4 点加力

支点間距離(厚さの 21 倍) : 4410mm

荷重点間距離 : 1470mm

載荷荷重 : 曲げ試験により得られた最大荷重より決定

試験体数 : 21 体(本事業のみでなく過去の事業も含めた累積的数字)

4.4 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、これまでの検討では、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ていた。本事業は、昨年度事業にて検討した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方針に従った。

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スギ 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(対照用 Mx60-5-5 の試験体 16 体の最大荷重は、平均 42.5kN、標準偏差 5.48kN(COV12.9%))。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 倍に拡大載荷するが、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

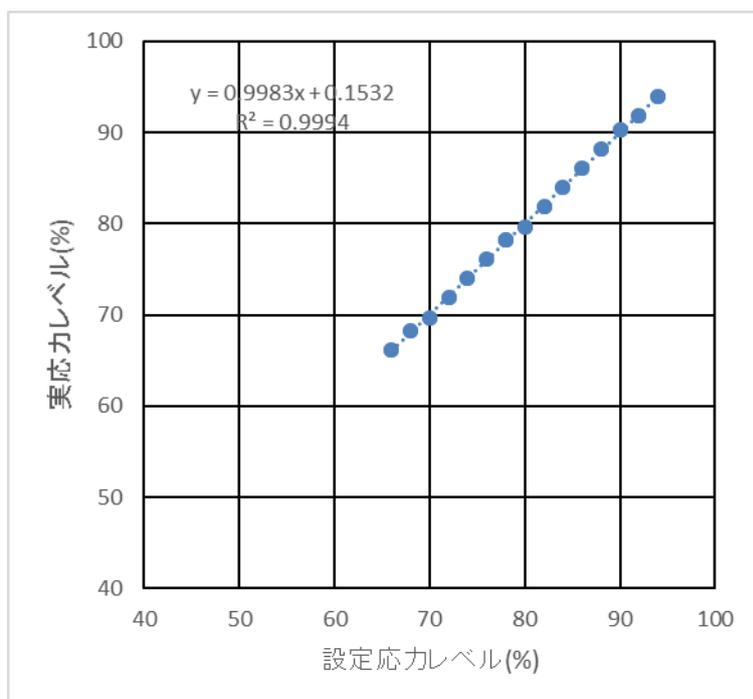


図 4-1 設定応力レベルと実応力レベルの関係

となる。したがって、載荷すべき重錘重量は $4638.88 \div 50 = 92.78\text{kg}$ であるが、これを 1.0kg 括約に丸め、 93kg 載荷するものとした。このとき、実際の応力レベルは 66.16% に相当する。図 4-1 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ると言える。

4.5 スギ CLT の長期変形挙動の測定結果

図 4-2 にクリープ破壊試験の実施風景を示す。加力前にクロスヘッドの位置を定めるため、一番右の試験体にレーザー水準器が載っている。図 4-3 にクリ



図 4-2 長期挙動試験の風景

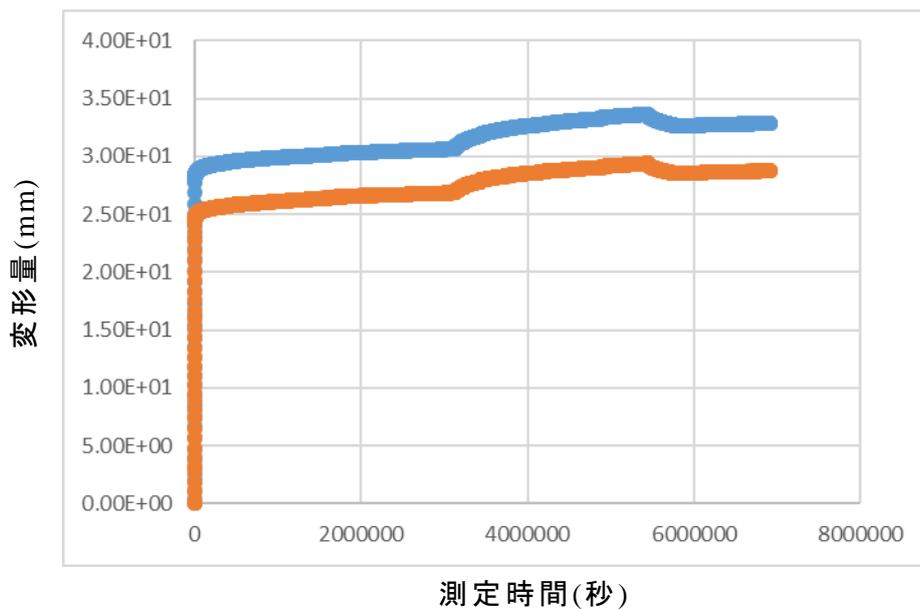


図 4-3 長期挙動試験時の変形量の変化

ープ試験時の変形量の経時的変化を示す。図中に、変形がなめらかでない変化をしている点が 2 箇所あるが、1 回目は停電によりクロスヘッドが固定され、応力緩和により一時的に荷重が軽減した時点、2 回目は破断した試験体の入れ替えのため、試験空間の温湿度環境が揺籃した時点である。いずれにしても、試験空間が狭いこと、他の測定結果に影響を与えうることから、全ての試験体が破断するまで試験体の入れ替えを行うことには慎重にならざるを得ない。

4.6 スギ CLT の荷重レベルと破壊時間の測定結果

図 4-4 にクリープ破壊試験時の試験体の破壊状況を示す。破壊は、引張側最外層のフィンガージョイント部に起因することが多く、隣接する層のジョイント部または節に向かってクラックが生じ、断面二次モーメントが減少することで変形量が急激に増大することで破断に到るのが典型的な破壊状況である。

図 4-5 に荷重レベルと破壊時間の関係を示す。これまでに 21 体供試しているが、破壊までのデータを記録できなかったものがあるため、図中のプロットは 18 点である。加力開始時に初期変形の増大過程で破断した試験体が 3 体存在するが、これらを今後の解析に勘案して良いかは議論の余地があろう。荷重レベルが低いにも関わらず著しく早い段階で破断した測定結果は、マジソンカーブに対する一致性は低くするが、回帰直線の傾きの絶対値を小さくする効果があるため、算出される荷重継続時間に係る調整係数は大きくなる傾向がある。実際使用時に想定される荷重レベルが十分小さいことが前提でない限り、当該結果に基づく判断は、危険側となり得ることに注意が必要である。



図 4-4 長期挙動試験時の試験体の破壊状況

【文献】

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

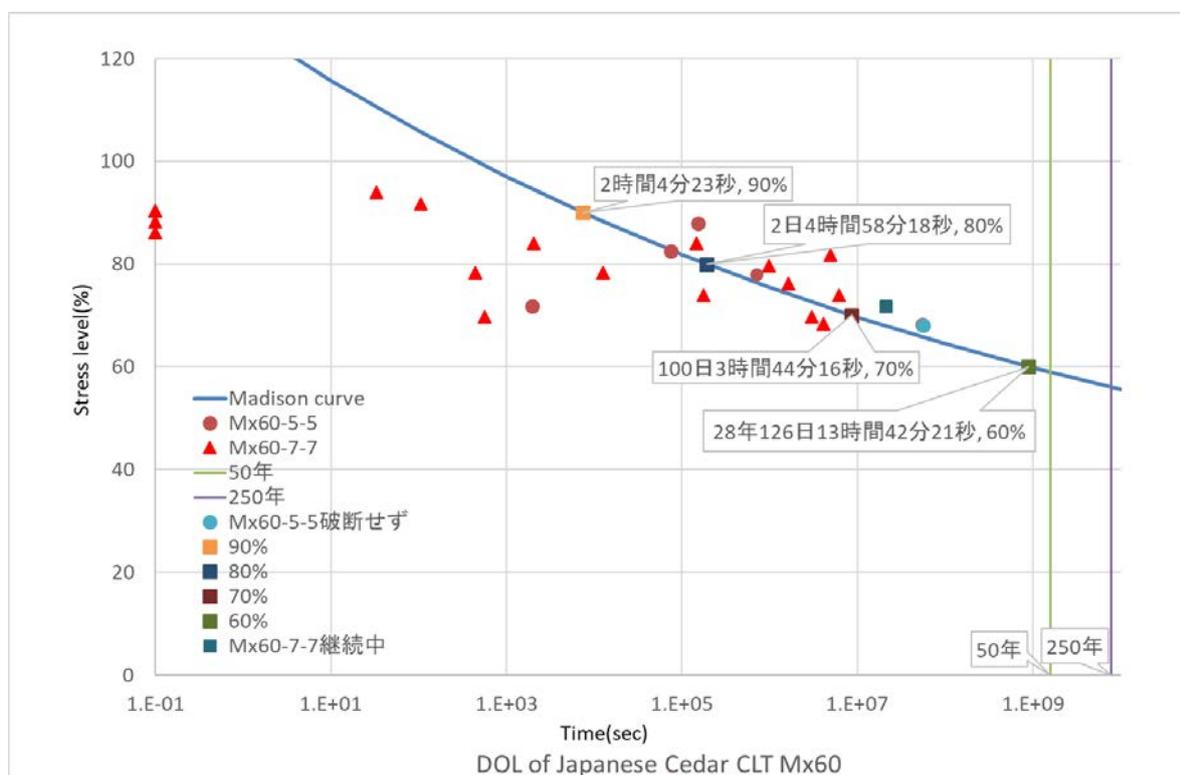


図 4-5 破壊時間と荷重レベルの関係

5 まとめ

平成 28 年度に制定された建築関係基準の適用範囲を広げるための課題として、スギ以外の樹種におけるラミナ形状・寸法が各種強度性能に与える影響について取り上げ、ヒノキおよびカラマツを対象としてデータ収集を実施した。

その結果を以下にまとめる。

面外方向のせん断弾性係数およびせん断弾性係数は、ラミナ幅厚さ比と正の相関関係が比較的顕著にあることが認められた(図 5-2)。また、面外方向の曲げ性能のうちみかけの曲げヤング係数にも影響が認められたが(図 5-1 左図)、これはラミナ幅厚さ比がせん断弾性係数に影響を与えた結果と考察された。

その他の強度性能、面外曲げ性能のうち曲げ強度(図 5-1 右図)、面内曲げ性能、面内せん断性能(図 5-4)、引張性能(図 5-5 左図)、短柱圧縮性能(図 5-5 右図)については、ラミナ幅厚さ比の影響が顕著にあると認められるものはなかった。

長期面外曲げ性能について求めた変形増大係数を図 5-3 に示す。ヒノキでは比較的安定したデータ得られており現時点ではラミナ幅厚さ比の影響は認められていない。一方、カラマツではヒノキに比べて大きな値が得られているが、これは試験開始からの時間経過が短いデータを対象とした解析結果で、引き続き測定を継続してデータ解析を進める必要がある。

CLT の直交層におけるせん断弾性係数とせん断強度について、平成 28 年度事業で開発した手法を用いてデータ収集を行った。CLT の強度性能を推定する上で本データは重要なので、今後、引き続き試験条件の影響解析を行ってデータ整備を図る予定である。

今年度事業の成果と平成 28 年度事業に基づいて得られた小角材等を幅はぎ接着したラミナを用いた CLT の強度性能データおよび平成 27 年度事業で評価を開始したスギ 7 層 7 プライの荷重継続時間係数に関するデータをあわせて整理し、より広い製造条件で建築関係基準が適用されるよう活用することができると考えられる。

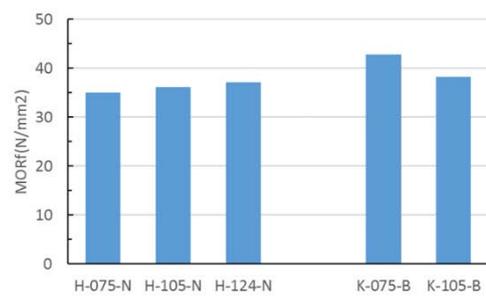
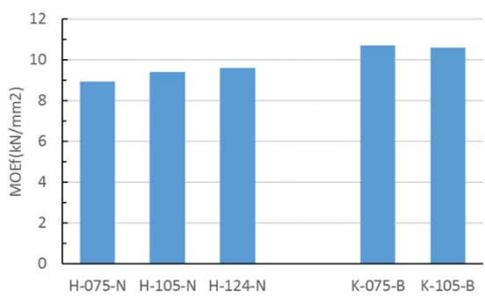


図 5-1 面外曲げ性能

樹種—ラミナ幅厚さ比—幅はぎ接着有無

樹種 H:ヒノキ、K:カラマツ、ラミナ幅厚さ比 075:3、105:4.2、124:4.96

幅はぎ接着有無 N:なし、B:あり

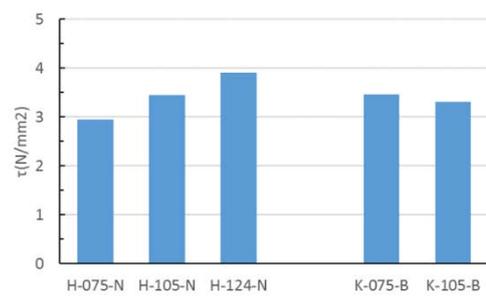
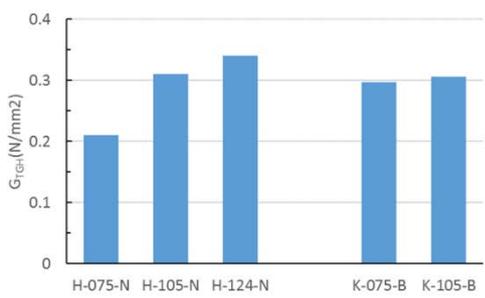


図 5-2 面外せん断性能

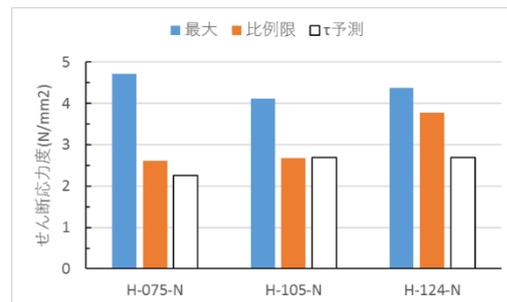
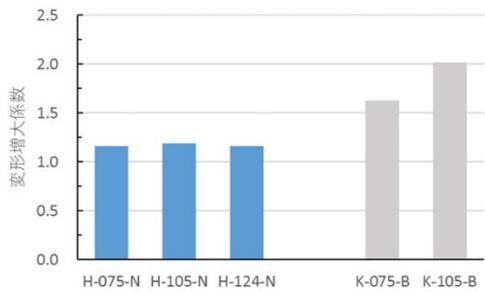


図 5-3 長期面外曲げ性能

図 5-4 面内せん断性能

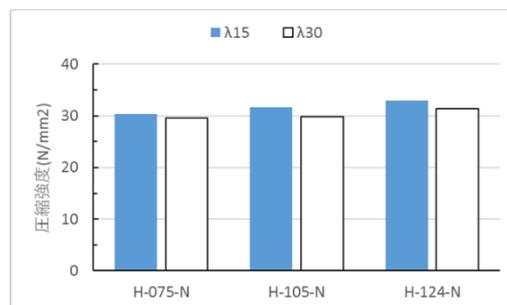
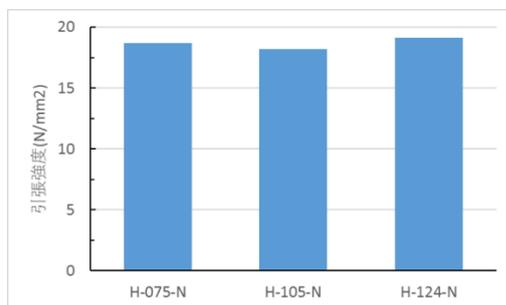


図 5-5 軸方向の強度性能 左:引張、右:短柱圧縮

付 録

成 29 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強度データ収集事業）」
第 1 回推進委員会 議事録

日 時： 平成 29 年 10 月 4 日（水） 16:00～18:00

場 所： 林友ビル 6 階中会議室

- 議 事： 1) 挨拶
2) 委員紹介
3) 本年度事業について
試験計画の概要
試験体の概要
4) その他
告示改正に向けてのデータ整備

- 資 料：資料 1 出席者名簿
資料 2-1 仕様書
資料 2-2 提案書改訂版
資料 3-1 試験体概要
資料 3-2 採材図
参考資料-1 CLT 材料強度関連告示改正に向けての CLT データ
参考資料-2 スギ長期データ

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 生物資源科学科
（委 員）河合 直人 工学院大学 建築学部 建築学科
（委 員）青木 謙治 東京大学大学院農学生命科学研究科
（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）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

- アドバイザー： 秋津 裕志 地方独立行政法人北海道立総合研究機構 林産試験場
佐々木貴信 秋田県立大学 木材高度加工研究所
中原 亨 鹿児島県工業技術センター

- オブザーバー： 高木淳一郎 国土交通省住宅局建築指導課
古藤 信義 農林水産省 食料産業局 食品製造課 食品規格室
井口 真輝 林野庁木材産業課 木材製品技術室
藤本 達之 //

原 章仁 //

課題担当者： 中島 史郎 国立大学法人 宇都宮大学
中島 昌一 //
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
大橋 義徳 地方独立行政法人北海道立総合研究機構 林産試験場
松本 和茂 //
村田 忠 一般社団法人日本CLT協会
坂部 芳平 // (代 西妻)
孕石 剛志 //
宮武 敦 国立研究開発法人 森林研究・整備機構 森林総合研究所
軽部 正彦 //
平松 靖 //
新藤 健太 //
杉本 健一 //
野田 康信 //
宇京斉一郎 //

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) 井口木材製品技術室長挨拶（議事後半）
 - 2) 委員・アドバイザー・オブザーバー紹介
 - 3) 本年度事業について
- (1) 資料 2-1、資料 2-2 について(宮武)

資料 2-1 は、森林総研からの提案書を受けて林野庁が作成したもの。事業内容は二つあり、一つは、ヒノキ・カラマツについて強度データを収集する。一つは、収集した強度データを分析し、告示に資するデータを整備するもの。スケジュールは、3月12日までとなっている。

仕様書に基づいて提案したものが資料 2-2 である。この事業も平成 25 年補正から進めてきており、データも大分集まってきた。今年は、2 ページ目に簡単に書いてあるが、昨年、別のプロジェクトで、ラミナの寸法、形状の影響について検討した。直交層のラミナは、厚さに対する幅が平行層では 1.75 倍、直交層では 3.5 倍以上であるが、ローリングシアーが発生することを確認する中で、面外せん断以外の引張り、面外方向の曲げで影響が見られることがあったので、スギ以外の樹種で試験をやることになっている。また、スギ以外の樹種でデータが足りないところがないか検討する。

具体的には、3 ページからで、ラミナ形状・寸法の影響解明について、ヒノキ、カラマツでやることになっている。ヒノキについては、愛媛県林業研究センター、森林総研、建築研究所、広島県林業技術センター、富山県木材研究所、宇都宮大学でやることになっている。ヒノキラミナの調達愛媛県にお世話になっている。

具体的には、愛媛県で面外曲げ、面外せん断、面内曲げのデータを収集する。面内せん断、引

張りについては建研、森林総研が実施する。メカノソープティブ変形、DOL でなくて長期の挙動については広島県で、直交層挙動の影響解析についてはこれまでの実績を踏まえ富山県で実施する。座屈については、長柱を宇都宮大学、短柱を森林総研が実施する。カラマツについては、試験体製造から評価まで北海道林産試験場で実施する。

スケジュールは4ページの表のとおりである。が10月に当委員会記されており、2月にまとめの委員会と報告書の作成となっている。5ページに、分担を含めて実施主体を示している。

以上が、事業の概要である。

(質疑) CLT のラミナ特性は調べるか。せん断でのローリングシア。検討する樹種について。メカノソープティブ変形。

(2) 資料 3-1、3-2 (宮武)

資料 3-1 は試験体製造の概要で、表 1 は CLT パネルの使用を示す。ヒノキから説明すると、ラミナの厚さは 25mm で平行層の幅は 105mm で、直交層の幅は 75mm、105mm、124mm の 3 種類である。積層数は 5 層 5 プライで、ラミナ品質は外層が M90 で、内層は M60、パネルの厚さは 125mm、銘建の新しいラインで製造したことから幅は 2,010mm であり、それぞれ 3 枚ずつ製造した。

カラマツについては、ラミナ厚さは 30mm。幅 500mm とあるが、ある製造メーカでこのあたりの条件が変わってきている。層構成については、5 層 5 プライで、外層の M90 とあるのは間違いで M120 に訂正。パネルの厚さは 150mm、幅 1,000mm 程度で、長さは少し短い 3,650mm となる。

表 2 は試験項目と製造条件、試験体数量で、上がヒノキ、下がカラマツである。ヒノキ 105、75、124 とあるのは、直交層の幅を示す。また、試験項目、担当と試験体数を示している。

ヒノキについては、銘建さんに試験体作りをしていただき、製造が終わっている。次のページに曲げヤング係数の分布を示している。分かりやすいのは下の図で、薄い部分が外層用、濃い部分が内層用の分布を示す。結果のまとめが右下の表で、幅 105mm の外層用が平均 13.24kN/mm²、内層用が 10.14 であった。また、幅 75mm の内層用は 9.32、124mm の内層用は 10.99 であった。

105mm 用のもの、75mm 用のもの、124mm 用のもので、原木がばらばらになってしまったことがあって、幅だけを変えたかったが、材質も変わったかも知れないので、データを取ってもらったのがこの結果である。

このような形でパネルを作り、資料 3-2 は試験体の採材図を示す。1 枚目は、幅 75mm の短尺ラミナから幅約 2m、長さ 8m のパネルを作ってもらって、ここにあるような採材をした。同じ採材のものがそれぞれ 3 枚続き、1 枚目が幅 75mm、2 枚目が 105mm、次が 124mm のものである。その他、面内曲げ、引張、面内せん断の採材図が 4 ページから 6 ページ、7 ページからは、一部曲げクリープ、荷重方向の異なる面内せん断の採材図である。

(大橋) カラマツ CLT はセイホクさんの方で貼ってもらって、出来ればヒノキと同じ条件で作製する。ラミナの方は、北海道の集成材工場で準備して、11 月中には製造してもらい、出来たら年内に試験をしたい。

(質疑) ラミナ層構成。ラミナ厚。基本的に 5 層 5 プライか。クリープ試験体の採材。カラマツ試験体について。試験のスケジュールは。曲げクリープ試験は、DOL 試験か。幅はぎの有無の影響は。幅はぎ接着の程度は。主たる試験目的。面内せん断の試験体。せん断における破壊モード。メカノソープティブの試験条件について。

(3) 参考資料 (宮武)

参考資料 1 から説明。具体的にはこれまでのデータの整理したものを高木さんの方にだしてご検討いただいている。現在の状況は、充実したスギのデータに基づいて CLT 材料が設計に使えるように基準強度が定められ、スギについては材料設計ができるようになった。これに何が追加でき

るか、スギ以外の樹種についても整理してきた。

圧縮、引張り、曲げ（面外、面内）については、ヒノキ、カラマツの M120、カラマツ、トドマツの M90 のラミナを使った CLT 強度を告示式を用いて安全側で推定できることを確認している。九ハニところ、積層方向のせん断に関しては、層構成の影響が有り、3/3 が高く、9/9 で最も低い。樹種の違いをみると、ヒノキ、カラマツが高く、スギ、トドマツが低い。9/9 について下限値、JAS 規準値、告示の基準強度を樹種間で値を比較するとスギの告示基準強度が最も低い。スギの数値で設計することになっているが、他の樹種にも適用できるのではと考えられる。軸方向のせん断については、樹種に応じた計算式の変更と数値の追加で、繊維方向のせん断、繊維直交方向のせん断、ねじりせん断、ローリングシアの数値を明らかにして面内せん断強度を得ることができる。現行告示式の元式に得られた数値を代入して求めた推定値は、試験による強度を安全側で推定できることを確認している。接着層のねじり強度について、接着剤と樹種、密度の影響とかを検討している。スギが低いと想定。

次は長期の関係。荷重比と経過時間の対数との関係を示すが、荷重継続時間係数は 3/3 ではスギ 0.632、カラマツ 0.56 と、製材品の 0.55 よりも大きい。5/5 ではスギ 0.639、カラマツ 0.522 であった。このカラマツの値 0.52 を使って求めた 5/5 強軸、5/7 強軸、7/7 弱軸の長期許容応力度は、係数 0.55 として基準強度から算出される長期許容応力度よりも大きく、安全側で評価できることを確認している。長期性能試験の実施状況は、スギ、カラマツについて 3/3、5/5 で確認済み、ヒノキ 5/5 について試験を継続中。3/3、3/4、5/5、5/7 については安全性を確認済みと考えており、残すところは 7/7 強軸と 9/9 である。スギ 7/7 については森林総研で試験継続中である。

その結果が参考資料-2。現在のところ、荷重比の低いところではばらつきがあり、マジソンカーブをこえるものもあるのでなやましい。また、開始後すぐに破壊したものもあり、回帰曲線の当てはめにおける扱いが問題か。7/7 は、カラマツ、トドマツは北海道で整理中。5/5 よりも低い値がでており、もう少しデータをみてから提案したい。

（質疑）ラミナ等級について。

（高木）これから確認事項がでてくる、整理した上で、検討したい。

（井口）CLT の利用が増えつつある。5 万 m³/年。コスト面での競争力向上が課題。H30 で 10 万 m³ を目標。このデータ収集事業では、スギ以外のデータを収集して使いやすい環境をつくるのが目標。引き続きご支援をお願いします。

（事務局）次回日時、2 月 2 日 14:00～

平成 29 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強度データ収集事業）」
第 2 回推進委員会 議事録

日 時： 平成 30 年 2 月 2 日（金）14:00～17:00

場 所： 林友ビル 6 階中会議室

議 題： 1) 挨拶
2) 委員紹介 資料 1
3) 本年度事業の進捗状況と取りまとめについて 資料 2、資料 3-1～3-3
4) その他

資 料：資料 1 出席者名簿
資料 2 報告書目次案
資料 3-1 試験結果①
資料 3-2 試験結果②
付属資料 試験体概要・採材図

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 生物資源科学科
	（委員）河合 直人	工学院大学 建築学部 建築学科
	（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）川上 修	一般財団法人建材試験センター 中央試験所
	（委員）中川 貴文	国土交通省国土技術政策総合研究所
	（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
アドバイザー：	秋津 裕志	地方独立行政法人北海道立総合研究機構 林産試験場
	佐々木貴信	秋田県立大学 木材高度加工研究所
	中原 亨	鹿児島県工業技術センター
オブザーバー：	柏崎 高志	国土交通省 大臣官房官庁営繕部 整備課
	井口 真輝	林野庁木材産業課 木材製品技術室
	藤本 達之	〃
	原 章仁	〃
課題担当者：	中島 史郎	国立大学法人 宇都宮大学
	中島 昌一	〃
	荒木 康弘	国立研究開発法人 建築研究所
	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
	大橋 義徳	地方独立行政法人北海道立総合研究機構 林産試験場

	高梨 隆也	〃
	玉置 教司	愛媛県農林水産研究所 林業研究センター
	坂部 芳平	一般社団法人日本CLT協会 (代 西妻)
	孕石 剛志	〃
	渡部 博	〃
	宮武 敦	国立研究開発法人 森林研究・整備機構 森林総合研究所
	渋沢 龍也	〃
	軽部 正彦	〃
	長尾 博文	〃
	井道 裕史	〃
	宮本 康太	〃
	平松 靖	〃
	新藤 健太	〃
	杉本 健一	〃
	野田 康信	〃
	宇京齊一郎	〃
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

○本年度事業の進捗状況

課題担当責任者（宮武氏）から、本年度事業の成果報告書の目次案が提示され、ついで担当者から提出された資料（目次項目順）に基づいて本年度行った CLT の各種強度データについて順次報告・質疑があった。

・試験体概要（宮武）

CLT 試験体は 5 層 5 プライ、全層ヒノキとし、ラミナ厚さ 25mm、パネル厚さ 125mm。平行層ラミナの幅は 105mm。直交層ラミナの幅は、75mm、105mm、124mm の 3 種類。各試験に供する試験体は、幅 2100mm×長さ 8000mm のヒノキ CLT パネル（銘建工業(株)製造）から採材。乾燥ラミナの寸法は、厚さ 29mm、長さ 3m とし、幅は 75mm 用が 84mm、105mm 用が 109mm、124mm 用が 128mm。外層用ラミナの曲げヤング係数は、平均値で 13.09kN/mm²、最小値で 11.66 kN/mm² となっており、JAS 規格上は M120（平均 12.0 kN/mm² 以上、下限値 10.5 kN/mm² 以上）に相当する品質。内層用ラミナは、ラミナ幅によって曲げヤング係数の分布が異なるが、いずれも M60（平均 6.0 kN/mm² 以上、下限値 5.0 kN/mm² 以上）の品質。

・面内せん断性能（荒木）

試験体は直交層ラミナの幅 3 種類（74mm、105mm、124mm）と、加力方向と外層ラミナの繊維方向 2 種類（鉛直・水平）。試験体形状はエ形で、くびれ部分の寸法は面内曲げ強度と面内せん断強度を仮定し、面内せん断破壊するような寸法。加力は一方向単調載荷で、エ形の CLT 試験体中央のくびれ部分について、変位とせん断変形角、水平荷重を計測。内層ラミナ幅が大きくなるにつれて、破壊モードが III から I へ移り、せん断応力度 τ は大きくなる傾向。剛性 G は 600~700。（質疑） τ 、G の算出法、試験体形状のせん断破壊への影響ほか。

・面外曲げ性能（玉置）

試験体は前出。面外曲げ試験は、直交集成板の日本農林規格に準じ、全スパンは試験体の材せ

いの 21 倍とした 3 等分点 4 点荷重方式。面外曲げ性能へのラミナ幅による顕著な差はなかった。

- ・面外せん断（玉置）

面外せん断試験は、全スパンは試験体の材せいの 5 倍とした中央集中荷重方式。幅が広い方が強くなる傾向。たわみとの関係が変化。

- ・面内曲げ性能（玉置）

面内曲げ試験は、全スパンを材せいの 18 倍とした、3 等分点 4 点荷重方式で実施。曲げ強さに、内層ラミナ幅による顕著な差は出なかった。

（質疑）面外曲げ試験での破壊モード。

（質疑）報告上 Mx90 か 120 かについて。（宮武）今回準備したラミナの 2/5 が外層用。外層用ラミナは最小が 11.66 kN/mm² であり、実質 M120。事業提案は Mx90 であったが、今回結果として Mx120 になった。今後の取り扱いは検討要。Mx90 のデータがないわけではない。

- ・長期面外曲げ性能（藤田）

平行層は、ひき板の幅と厚さ（25mm）の比を 4.2 倍（幅 105mm）、直交層は、ひき板の幅と厚さ（25mm）の比は 3.0 倍（幅 75mm）、4.2 倍（幅 105mm）及び 5.0 倍（幅 124mm）。長期面外曲げ試験は、モーメントアーム方式で、3 等分点 4 点荷重方式、長期荷重として 10.54kN を載荷した。レベルは 0.16。たわみ量は、せん断の影響のある区間の支点間中央の変形量、せん断の影響のない区間の荷重点間の変形量、支点と荷重点中間の側面 2 か所の層間変形量を測定。温湿度の変化に伴って変形量が変わる。各箇所の変形量の解析は、告示法及びパワー則で評価。支点間中央及び荷重点間の中央では、変形増大係数の差はあまりなかった。直交層の幅と厚さの比の違いが、長期荷重試験に与える影響は少ないと考えられる。側面平行層変形量では、直交層の幅と厚さの比 3.0 倍及び 5.0 倍の 2 体とも、変形増大係数が非常に大きくなる測定箇所があり、注視したい。

（質疑）側面平行層変形量の測定方法、相対湿度の影響について。

- ・引張性能（井道）

ラミナの強度試験を実施。外層ラミナ長さが 3m、断面寸法が 25×105mm で、強度等級が M90 および M60 のたて継ぎラミナ 101 体。ラミナの引張試験の結果。M90 ラミナはすべての試験体が FJ がかわる破壊を生じたが、M60 ラミナは FJ、節、繊維傾斜など。M90 の縦引張り強度は平均 32.7 N/mm²、下限値を余裕でクリア。M60 では低下。

平行層外層では主に各ラミナのフィンガージョイント部で破壊が生じた。幅はぎをしていない直交層については一部に破壊が認められるものの、ラミナ間が離れただけのものが多かった。平行層内層の破壊は、フィンガージョイントの有無に関わらず、直交層ラミナが離れた位置の隣接部で生じた。引張りヤング係数、引張り強度とも、直交層ラミナ幅が両者に及ぼす影響は認められなかった。また、全試験体の引張り強度の平均値は 18.7N/mm²、等価断面法による引張り強度の推定値 18.5N/mm² であり、等価断面法により CLT の引張り強度を精度良く推定できた。

（質疑）ラミナのヤング係数区分と CLT パネル強度との関係。JAS 格付けとの関係。引張り試験におけるチャック切れの有無。

（論点）今年度事業で用いたヒノキ CLT の強度等級を Mx90 と表記しているが、実際には、外層ラミナは M120、内層ラミナは M60 に相当する品質があったことを報告書に明記する（確認）。

- ・圧縮・短柱性能（野田）

全断面に対する細長比 $\lambda 15$ 、 $\lambda 30$ として試験を実施。破壊性状は、従来通り、 $\lambda 15$ および $\lambda 30$ の双方に共通して、フィンガージョイントや節を起点とした圧壊を確認。直交層ラミナ幅の影響はないと想定していたが、結果ではラミナ幅が大きくなると、ヤング係数、圧縮強度のともに大きくなる傾向が $\lambda 30$ 試験体と $\lambda 15$ 試験体の双方において得られた。 $\lambda 30$ よりも $\lambda 15$ の方が少し

高い印象にあった。引張に比べて直交層の影響を受けにくいと考えられるので、今回の結果については原因究明が必要。圧縮強度の有意差が直交層の幅の影響によるものであると結論付けることは尚早であり、試験体数を増やすなど、さらなる検証が必要。ラミナの影響が疑われる。

(質疑) ヤング係数と強度。

・座屈性能 (中島)

試験では試験体の中立軸が加力軸芯となるように加力し、試験体頂部の鉛直変位及び中央部の水平変位を測定。結果は、直交層のラミナ幅が大きいほど、座屈強度は高くなった。平行層ラミナについて測定したひずみ量では、直交層と平行層が一体として変形していると仮定したときにラミナに生じると算定されるひずみ量と少し外れているところがあり、今後解析する。

(質疑) 直交層のラミナ幅の影響について、CLT 版からの試験体の取り方の影響について。細長比の影響は。

・カラマツ (大橋)

ラミナ厚 25mm で、Mx120。外層の平行層は、L125。直交層ラミナ幅 105mm および 75mm で幅はぎとラミナ幅の影響をみる。パネルサイズは 1×3.6m、パネル 8 枚で、ラミナ幅を変えて面外曲げとせん断試験を実施。面外せん断試験では、接着剤の影響もみた。面外曲げ性能と面内曲げ性能については、ラミナ幅による違いはなし。面外せん断性能については、JAS 式と大野式により試験を実施。JAS 式試験では、ラミナ幅による面外せん断強度の変化はなし。また、直交層ラミナの幅はぎがある場合では、幅はぎのある場合はない場合に比べ約 1 割大きい。大野式試験でも JAS 式同様の傾向で、ラミナ幅による面外せん断強度の変化は認められず、直交層ラミナの幅はぎがある場合では、幅はぎがない場合に比べ、面外せん断強度は約 1 割大きくなった。

(質疑) せん断試験方法について。

・直交層の挙動 (園田)

前年度までの層内せん断試験体の全乾法含水率を求めた。スギ、ヒノキ、カラマツ試験体で層内せん断試験を行った。スギは昨年度の試験体を 2 次加工して用いた。ヒノキについては、ラミナ幅が層内せん断強度特性に与える影響を検討する予定であったが、75mm は問題ないが、105mm ではラミナ幅が大きな試験体で加力点にめり込みが生じたため、174mm に試験体長さを短くして実施したが、長さの影響が分からないので、測定値のみではラミナ幅の影響を検討できなかった。破壊パターンは、試験材が長いと幅はぎ接着部分で、短いと接線方向に引っ張られる破壊が増加。密度とせん断弾性係数の関係については、スギでは相関はなく、ヒノキでは若干の相関。カラマツについては幅はぎ接着の有無に関係なく、相関はなく、G とせん断強度の関係も認めず。せん断長さやラミナ厚が異なる条件での層内せん断試験データを標準に換算する方法として、Volkersen の理論を検討中。長さの違いについては適用できそうだが、ラミナ幅の影響についてはさらに解析が必要。面外曲げ試験についての直交層の解析および外曲げせん断試験と層内せん断試験の関係についての検討は、時間的に困難な見込み。

(質疑) 層内せん断性能の評価方法、せん断長さの影響について。

○報告書の取りまとめ方等

目次は、1 章はヒノキについて。1.1 試験体の概要、1.2 面外曲げ性能、1.3 面外せん断性能、1.4 面外曲げ変形、1.5 面内曲げ性能、1.6 面内せん断性能、1.7 引張性能、1.8 圧縮・短柱性能、1.9 座屈性能とし、2 章カラマツについても同様の項目立て。3 章は直交層の挙動の流れで、4 章に長期性能の試験結果を加えるかどうかを検討。(渋沢) 長期性能のデータ収集の状況を説明。

(宮武) フォーマットを提示。(事務局) 原稿締め切りは、2 月末とする。

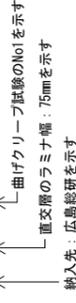
・挨拶 (林野庁)

H29 CLT強度データ 試験体木取図
 製造番号：O ヒノキ Mx90A 125×2100×8040：1枚
 ※短尺ラミナ：幅75mmになります

90	2,875	10	875	10	3,969	211
H-075-D0L-1 曲げクリーブ 300×2875	E-075-0SJ1 300×875 面外せん断	U-075-G110-1 圧縮(λ=110) 300×3969	113	15	300	2,100
E-075-0B-1 面外曲げ 300×2875	E-075-0SJ2 300×875 面外せん断	S-075-G15-1 S-075-G30-1 圧縮(λ=30) 300×541 300×1083	113	15	300	300
E-075-0B-2 面外曲げ 300×2875	E-075-0SJ3 300×875 面外せん断	U-075-G110-2 圧縮(λ=110) 300×3969	113	15	300	300
H-075-D0L-2 曲げクリーブ 300×2875	E-075-0SJ4 300×875 面外せん断	S-075-G15-2 S-075-G30-2 圧縮(λ=30) 300×541 300×1083	113	15	300	300
E-075-0B-3 面外曲げ 300×2875	E-075-0SJ5 300×875 面外せん断	U-075-G110-3 圧縮(λ=110) 300×3969	113	15	300	300
E-075-0B-4 面外曲げ 300×2875	E-075-0SJ6 300×875 面外せん断	S-075-G15-3 S-075-G30-3 圧縮(λ=30) 300×541 300×1083	113	15	300	300
ラベル						
90	2,875	10	875	10	541 10 1,083 10	2,345 191

試験体名称

例 H-075-D0L-1



※試験体採材時の目地目途

7.5	97.5	105	300	7.5
-----	------	-----	-----	-----

送り先

H	広島総研	広島県三次市
S	森林総研	茨城県つくば市
E	愛媛林研	愛媛県久万高原町
U	宇都宮大	栃木県宇都宮市

試験記号

D0L	曲げクリーブ	C15	圧縮(λ=15)
0B	面外曲げ	C30	圧縮(λ=30)
0SJ	面外せん断(JAS)	C65	圧縮(λ=65)
		C110	圧縮(λ=110)

承認サイン	確認
-------	----

件名 H29_CLT強度データ

No 1

図面名称 試験体木取図

銘建工業株式会社 作図 渡部 2017.6.5

H29_CLT強度データ 試験体木取図
 製造番号：O ヒノキ MX90A 125×2100×8040：1枚
 ※短尺ラミナ：幅105mmになります

8.040

90	2,875	10	875	10	3,969	211
H-105-D0L-1 曲げクリーブ 300×2875 U-105-G110-1 圧縮(λ=110) 300×875 面外せん断 300×3969						
E-105-0B-1 面外曲げ 300×2875 S-105-C15-1 S-105-C30-1 圧縮(λ=30) 300×875 面外せん断 300×541 300×1083 U-105-G65-1 圧縮(λ=65) 300×2345						
E-105-0B-2 面外曲げ 300×2875 U-105-G110-2 圧縮(λ=110) 300×875 面外せん断 300×3969						
H-105-D0L-2 曲げクリーブ 300×2875 S-105-G15-2 S-105-G30-2 圧縮(λ=30) 300×875 面外せん断 300×541 300×1083 U-105-G65-2 圧縮(λ=65) 300×2345						
E-105-0B-3 面外曲げ 300×2875 U-105-G110-3 圧縮(λ=110) 300×875 面外せん断 300×3969						
E-105-0B-4 面外曲げ 300×2875 S-105-G15-3 S-105-G30-3 圧縮(λ=30) 300×875 面外せん断 300×541 300×1083 U-105-G65-3 圧縮(λ=65) 300×2345						
90	2,875	10	875	10	541	10
1,083						
2,345						
191						

試験体名称
 例 H-075-D0L-1
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo1を示す
 ↑ 直交層のラミナ幅：75mmを示す
 納入先：広島総研を示す

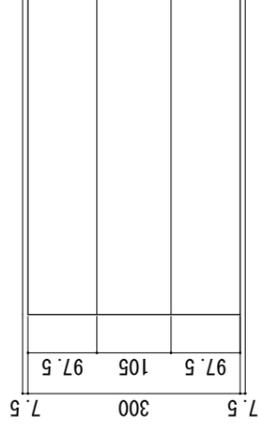
送り先

H	広島総研	広島県三次市
S	森林総研	茨城県つくば市
E	愛媛林研	愛媛県久万高原町
U	宇都宮大	栃木県宇都宮市

試験記号

D0L	曲げクリーブ	C15	圧縮(λ=15)
0B	面外曲げ	C30	圧縮(λ=30)
0SJ	面外せん断(JAS)	C65	圧縮(λ=65)
		C110	圧縮(λ=110)

※試験体採材時の目地目途



承認サイン	確認
-------	----

件名 H29_CLT強度データ

No 2 / 9

図面名称 試験体木取り図

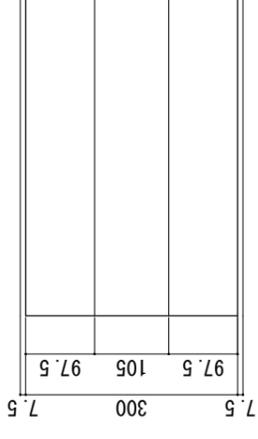
銘建工業株式会社 作図 渡部 2017.6.5

H29_CLT強度データ 試験体木取図
 製造番号：O ヒノキ Mx90A 125×2100×8040：1枚
 ※短尺ラミナ：幅124mmになります

90	2, 875	10	875	10	3, 969	211							
H-124-D0L-1 曲げクリーブ 300×2875	E-124-0SJ1 300×875 面外せん断	U-124-C110-1 圧縮(λ=110) 300×3969	15	300	113	2, 100							
E-124-0B-1 面外曲げ 300×2875	E-124-0SJ2 300×875 面外せん断	S-124-C30-1 圧縮(λ=30) 300×1083	15	300	113	2, 100							
E-124-0B-2 面外曲げ 300×2875	E-124-0SJ3 300×875 面外せん断	U-124-C110-2 圧縮(λ=110) 300×3969	15	300	113	2, 100							
H-124-D0L-2 曲げクリーブ 300×2875	E-124-0SJ4 300×875 面外せん断	S-124-C30-2 圧縮(λ=30) 300×1083	15	300	113	2, 100							
E-124-0B-3 面外曲げ 300×2875	E-124-0SJ5 300×875 面外せん断	U-124-C110-3 圧縮(λ=110) 300×3969	15	300	113	2, 100							
E-124-0B-4 面外曲げ 300×2875	E-124-0SJ6 300×875 面外せん断	S-124-C30-3 圧縮(λ=30) 300×1083	15	300	113	2, 100							
ラベル			90	2, 875	10	875	10	541	10	1, 083	10	2, 345	191

試験体名称
 例 H-075-D0L-1
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo1を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo2を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo3を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo4を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo5を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo6を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo7を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo8を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo9を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo10を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo11を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo12を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo13を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo14を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo15を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo16を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo17を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo18を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo19を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo20を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo21を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo22を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo23を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo24を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo25を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo26を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo27を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo28を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo29を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo30を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo31を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo32を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo33を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo34を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo35を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo36を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo37を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo38を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo39を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo40を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo41を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo42を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo43を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo44を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo45を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo46を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo47を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo48を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo49を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo50を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo51を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo52を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo53を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo54を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo55を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo56を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo57を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo58を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo59を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo60を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo61を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo62を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo63を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo64を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo65を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo66を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo67を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo68を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo69を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo70を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo71を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo72を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo73を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo74を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo75を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo76を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo77を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo78を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo79を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo80を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo81を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo82を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo83を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo84を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo85を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo86を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo87を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo88を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo89を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo90を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo91を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo92を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo93を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo94を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo95を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo96を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo97を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo98を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo99を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo100を示す

※試験体採材時の目地目途



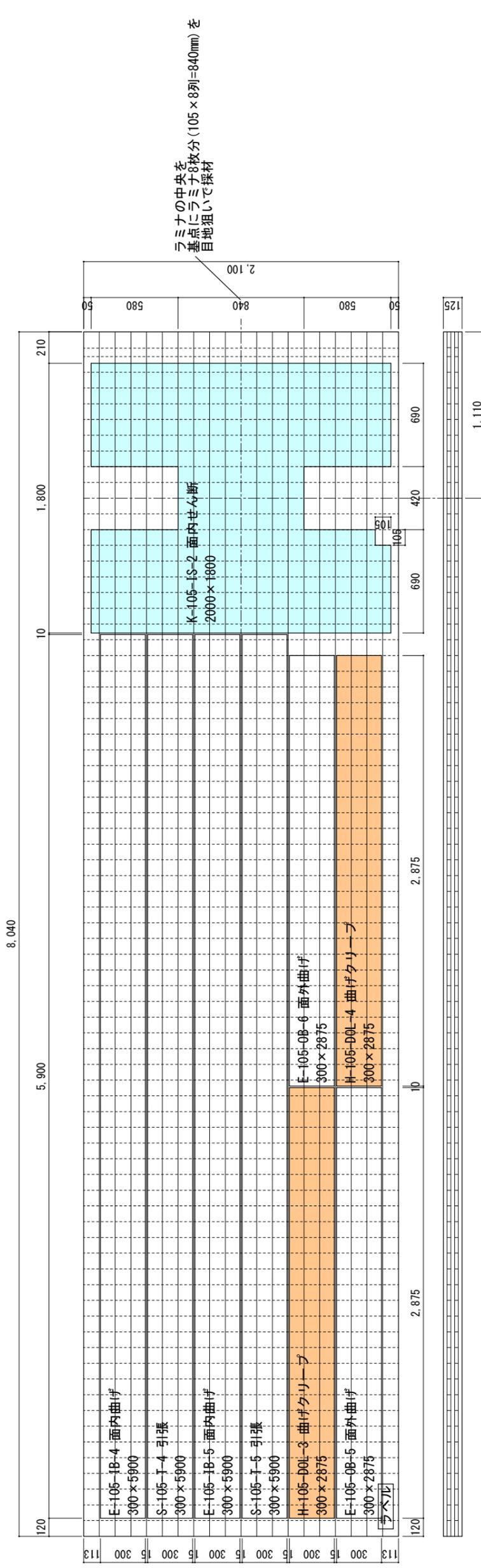
H	広島総研	広島県三次市
S	森林総研	茨城県つくば市
E	愛媛林研	愛媛県久万高原町
U	宇都宮大	栃木県宇都宮市

D0L	曲げクリーブ	C15	圧縮(λ=15)
0B	面外曲げ	C30	圧縮(λ=30)
0SJ	面外せん断(JAS)	C65	圧縮(λ=65)
		C110	圧縮(λ=110)

承認サイン	確認
-------	----

件名	H29_CLT強度データ	No 3
図面名称	試験体木取り図	9
銘建工業株式会社 作図 渡部 2017.6.5		

H29_CLT強度データ 試験体木取図
 製造番号：〇 ヒノキ Mx90A 125×2100×8040：1枚
 ※短尺ラミナ：幅105mmになります



面内せん断試験体の採材位置を基点とする

試験体名称
 例 H-075-DOL-1
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo.を示す
 ↑ 直交層のラミナ幅：75mmを示す
 納入先：広島総研を示す

※試験体採材時の目地目途

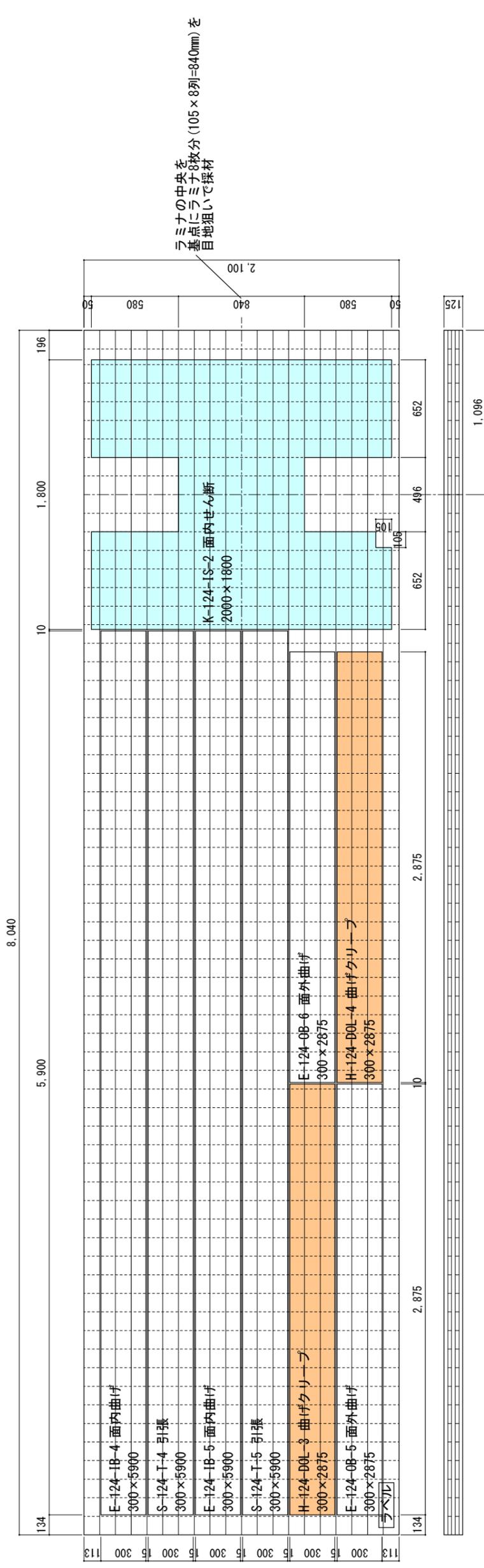
送り先	試験体名称	採材位置
H	広島総研	広島県三次市
S	森林総研	茨城県つくば市
E	愛媛林研	愛媛県久万高原町
K	建研	茨城県つくば市

試験記号	試験体名称	試験位置
DOL	曲げクリーブ	面内曲げ
OB	面外曲げ	引張
		面内せん断

7.5	97.5	300	97.5	7.5
7.5	97.5	300	97.5	7.5

承認サイン	確認

H29_CLT強度データ 試験体木取図
 製造番号：○ ヒノキ MX90A 125×2100×8040：1枚
 ※短尺ラミナ：幅124mmになります



面内せん断試験体の採材位置を基点とする

試験体名称
 例 H-075-D0L-1
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo.を示す
 ↑ 曲げクリーブ試験のNo.を示す
 ↓ 直交層のラミナ幅：75mmを示す
 納入先：広島総研を示す

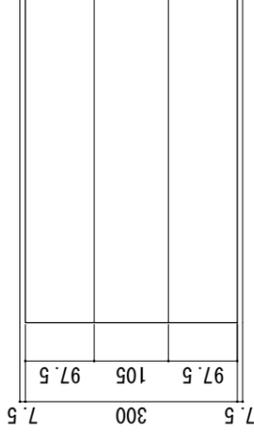
※試験体採材時の目地目途

H	広島総研	広島県三次市
S	森林総研	茨城県つくば市
E	愛媛林研	愛媛県久万高原町
K	建研	茨城県つくば市

送り先

D0L	曲げクリーブ	IB	面内曲げ
OB	面外曲げ	T	引張
		IS	面内せん断

試験記号



承認サイン	確認
-------	----