

平成27年度 林野庁委託事業

CLT等新たな製品・技術の開発・普及事業
(CLT強度データ収集)
成果報告書

平成28年3月

国立研究開発法人 森林総合研究所

公立大学法人 秋田県立大学

地方独立行政法人 北海道総合研究機構

一般社団法人 日本CLT協会

公益社団法人 日本木材加工技術協会

平成 27 年度 林野庁委託事業
CLT 等新たな製品・技術の開発・普及事業
(CLT 強度データ収集) 成果報告書

目 次

はじめに

1. ラミナ・プライの仕様が短期的強度性能に与える影響の評価	1
1.1 試験体の仕様	1
1.2 面外曲げ試験：5 層 5 プライ	4
1.3 面外曲げ試験：7 層 7 プライ	14
1.4 面外せん断試験	24
1.5 面内曲げ試験	32
1.6 面内せん断試験	38
1.7 圧縮試験（短柱）	45
1.8 座屈試験（長柱・中間柱）	64
1.9 引張り試験	70
1.10 直交層挙動	80
1.11 まとめ	95
2. 試験体寸法が幅はぎ接着プライで構成した CLT の強度性能に与える影響	96
2.1 試験体の仕様	96
2.2 面外曲げ試験	97
2.3 面外せん断試験	111
2.4 引張り試験	127
2.5 まとめ	132
3. CLT 用ラミナの適正製造条件の検討	133
3.1 幅はぎ接着ラミナの強度性能の特徴	133
4. 長期性能に関する検討	145
4.1 長期性能試験時の含水率変動の検討	145
4.2 積層接着されているラミナの縦弾性係数の推定	161
4.3 スギ CLT の長期性能の測定	165
付録 1	
第 1 回進行管理委員会議事録	170
第 2 回進行管理委員会議事録	173
付録 2	
CLT 強度データベース（平成 25～26 年度）	176

はじめに

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

CLT は強度異方性を持つひき板をさらにその繊維方向を直交させながら積層接着した材料である。構造材料として利用するには、荷重の種類やそれが材料に加えられる面や方向の組合せによって異なるその力学的挙動を明らかにし構造設計に利用できる数値として示すことが不可欠である。これまでに CLT の各種短期的強度試験や長期性能評価を精力的に行ってきたが、JAS 規格に則った製造条件の範囲内であっても、これらの製造条件と性能の関係が十分に把握されているとは言えない項目も多数あることからデータ収集は十分とは言えない。

そこで、本事業では CLT を一般的な建築材料として普及するため、材料強度に係る基準の整備に必要な CLT に関する強度試験によるデータの収集・分析を行い、建築関係基準の整備等への活用することを目的とした。

事業の実施にあたっては、非常に短い期間内に、大量の試験体を製造していただくとともに、各試験場所における試験も実施していただいた。ここに記すとともに、関係の皆様にお礼申し上げる。

1. ラミナ・プライの仕様が短期的強度性能に与える影響の評価

平成 25 年度補正と平成 26 年度の事業では、幅はぎ接着のないプライで構成された CLT を対象として強度データの収集を行ってきた。これは一般的な強度性能は幅はぎ接着のないプライで構成された CLT で評価しておけば安全側と考えられてきたこと、また、国内にはプライを幅はぎ接着して製造する工場はあるものの日本農林規格上は幅はぎ未評価であることなどの理由によるものである。

今年度事業では、幅はぎ接着したプライで構成された CLT の強度性能は幅はぎ接着をしない場合と同等以上であるかどうかの確認を第一の目的とした。また、幅はぎ接着により製造した幅広ラミナを用いた CLT パネルについても同様に確認することとした。なお、製造に用いた幅はぎ接着は上述したように日本農林規格上は幅はぎ未評価として扱われているが、用いられている接着剤は構造用としての性能が確認されており、また、製造工程も適切に管理されていることから、短期的な強度性能を評価する上での問題はないと考えた。

原料ひき板およびラミナの調整は、製材ひき板の受け入れ、乾燥、等級区分、たて継ぎを一貫して行える構造用集成材の JAS 認定工場で行った。これらのラミナを、幅はぎ接着工程を必要とする製造ラインを有する工場と必要としない工場（いずれも JAS 認定工場）に供給して試験体製造用 CLT パネルを製造した。その後の CLT パネルからの試験体採材も同じ採材パターンとした。このようにして幅はぎに関する製造工程の違いのみを比較できるよう配慮した。

ラミナ構成の仕様について、これまでは異等級構成が中心であったことから同一等級構成を中心にする一方、層構成については標準的な 3 層 3 プライ（面内せん断試験体のみ）、5 層 5 プライおよび 7 層 7 プライとした。

強度試験の項目は、これまでと同様に面外曲げ、面外せん断、面内曲げ、面内せん断、圧縮・短柱、圧縮・座屈、引張りの各種性能とした。また、面外方向の曲げやせん断性能に大きな影響を与えていると考えられる直交層の挙動について実験的・理論的な解析を行った。

各種試験体は、試験前に非破壊的な手法により密度や弾性係数を測定した。具体的には寸法、重量、縦振動法による長軸方向の弾性係数、たわみ振動法で得られた固有周波数を用いた TGH 法（Timoshenko のたわみ理論に基づく Goens-Hearmon 回帰法による解析）による曲げおよびせん断弾性係数を測定した。

TGH 法の計算には、富山県農林水産総合技術センター木材研究所の園田里美氏が作成した測定手順書とエクセルの計算シートを関係者に配布し用いた。TGH 法による動的なせん断弾性係数 G を評価するにあたり、せん断応力分布定数 s （梁断面に働くせん断応力の平均値に対する実効値の比）を設定する必要がある。均質材料からなる梁では $s = 1.2$ や $s = 1.18$ といった値が採用され、製材でもこの値が一般的に用いられている。しかしながら、CLT は異なる弾性係数の層からなる積層材料であるため、断面内のせん断応力分布が均質材料の場合と大きく異なることが予想される。また、せん断応力分布は、たわみ方向、層構成やラミナの弾性係数などによっても異なると考えられるが、これらのことについて十分な知見が得られていない現状を勘案して、本事業・報告書では、 $s = 1.0$ に統一することとした。

1.1 試験体の仕様

1.1.1 試験体の概要

幅はぎ接着したプライで構成された CLT、幅はぎ接着ラミナを用いて製造された CLT およびその対照として幅はぎ接着をしていないプライで構成された CLT を製造した。強度等級は、同一等級構成を標準としたが、幅はぎ接着したプライで構成された CLT については異等級構成についても製造した。これらの仕様を表 1.1-1 に示す。

表 1.1-1 CLT パネルの概要

幅はぎ接着	ラミナ幅	強度等級	備考
なし	105	同一等級	対照
あり	105	同一等級	幅はぎプライ
あり	105	異等級	幅はぎプライ
なし	251	同一等級	幅はぎラミナ

1.1.2 製造に用いたラミナの概要

寸法 37mm×118mm×4m の北九州産スギひき板 16678 枚を表 1.1-2 の基準で等級区分した。その結果を、表 1.1-3 に示す。

表 1.1-2 製造用ラミナの区分

用途	表示	区分：kN/mm ²
同一等級用	S60A	6 以上(上限無し)
異等級外層用	M60B	8 以上 11 未満
異等級内層用	M30B	3 以上 6 未満

※含水率 8～15%

表 1.1-3 製造用ラミナの区分結果

	全体	M30B	M60B	M60A
区分・下限	—	3.0	8.0	6.0
区分・上限	—	6.0	11.0	—
平均値	7.98	5.22	9.22	8.48
標準偏差	1.943	0.582	0.821	1.659
最小値	2.83	3.02	8.00	6.00
最大値	15.82	5.99	10.99	15.82
変動係数	24.4%	11.1%	8.9%	19.5%

異等級構成の外層用ラミナは M60B として計画したが、ラミナ選別段階で連絡等の齟齬が生じて選別基準が表 1.1-1 に示すように曲げヤング係数で 8.0kN/mm²以上 11.0 kN/mm²未満となった。その結果、表 1.1-2 に示すように最小値で 8.0 kN/mm²、平均値で 9.2 kN/mm²となり、曲げヤング係数については JAS 規格の M90 の水準であった。ただし、

等級区分されたラミナは、1m 前後にカットし、フィンガー長さ 17mm（ピッチ 8mm、スカーフ比 1/9）、水性高分子イソシアネート系樹脂接着剤（以下 API）を用いてたて継ぎした。

幅はぎ接着したラミナは 105mm 幅のラミナを連続的に幅はぎ接着しながら、幅 251mm 毎に裁断して製造した。幅はぎ接着には API を用いた。

2m×4m のパネルから面外曲げ試験体、層内せん断試験体、座屈試験体、面外せん断試験体、圧縮試験体、面内曲げ試験体、引張り試験体を下記の採材パターンにより切り出した。

	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300	310	320	330	340	350	360	370	380	390	400
30	面外曲げ																																		層内せん断					
60	座屈・圧縮λ 92.3																																							
90	面外せん断5										圧縮λ 15										圧縮λ 50																			
120	面外曲げ/面内曲げ/引張り/座屈																																							
150	面内曲げ																																							
180	引張り																																							

10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300	310	320	330	340	350	360	370	380	390	400	
30	面外曲げ																																							
60	圧縮 λ 80																																							
90	面外せん断5											圧縮 λ 15											圧縮 λ 40																	
120	面外曲げ																																							
150	面内曲げ																																							
180	面内曲げ/座屈/面外せん断・圧縮 λ 15・圧縮 λ 40																																							

1.2 面外曲げ試験：5 層 5 プライ

1.2.1 試験方法

面外曲げ試験に供した CLT は、表 1.2.1 のとおり、スギラミナを使用し、等級・構成は S60-5-5 で、幅はぎ接着なしのラミナ幅 251mm 及び 105mm の仕様、また、そのほか S60-5-5 または Mx60-5-5 でラミナ幅 105mm 幅はぎ接着のあり、なしの仕様で、各強軸及び弱軸、それぞれ各 6 体である。基本的な寸法は、幅 300mm、長さは厚さの 23 倍である。

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

表 1.2.1 面外曲げ試験 試験体仕様

等級・構成	幅はぎ接着	ラミナ幅	試験体数	計
S60-5-5	あり	105	強軸・弱軸各 6 体	強軸 24 体 弱軸 24 体
	なし	105	強軸・弱軸各 6 体	
	なし	251	強軸・弱軸各 6 体	
Mx60-5-5	あり	105	強軸・弱軸各 6 体	

なお、非破壊試験について、次のとおり行った。

ア) 動的試験方法

面外曲げ試験を行う前に、せん断弾性係数の簡便な非破壊評価方法として、動的弾性係数の測定を試みた。測定は、たわみ振動法(T.G.H.法)^{1.2.1)}により行った。

たわみ振動法(T.G.H.法)では、スパンを試験体の長さの 0.552 倍の距離の台に置き、試験体中央部材面を上から、または端部上面から、ハンマーで打撃し、打撃か所の下面方向からマイクロフォンで高次の固有振動数を測定した。

また、縦振動法による縦振動ヤング係数も測定した。

イ) 動的試験評価方法

たわみ振動法(T.G.H.法)では、試験体長さ、断面 2 次半径、密度を求め、せん断分布定数(1.0)、せん断弾性係数の初期値(0.8Gpa)を設定する。次に、振動次数 n に依存する係数 mn と Fmn 、1 から 6 次程度までの曲げ固有振動数、各 n における見かけの曲げヤング係数を求める。さらに各 n におけるプロット用の系列 X 、 Y を求め、その 1 次回帰式 $Y=aX+c$ とプロットが一致するとき、傾き a と切片 c が次の関係となる。

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

E_{fr-t} ：真の曲げヤング係数

G_{fr-t} ：せん断弾性係数

縦振動法では次の式により縦振動ヤング係数を計算した。

$$E_{fr} = (2fl)^2 \rho \quad (1.2-2)$$

E_{fr} : 縦振動ヤング係数

f : 固有振動数

l : 材長

ρ : 密度

ウ) 非破壊試験結果

非破壊試験の結果を幅はぎなしラミナ強軸は表 1.2.2、弱軸は表 1.2.3 に示す。

表 1.2.2 幅はぎなしラミナ強軸の縦振動法、たわみ振動法 (T.G.H.法) による
ヤング係数とせん断弾性係数

5層5ply 強軸 ラミナ251mm 試験体No	密度 kg/m ³	ヤング係数 E _{fr} kN/mm ²	TGH E _{TGHf} kN/mm ²	TGH G _{TGHf} kN/mm ²	TGH E _{TGHe} kN/mm ²	TGH G _{TGHe} kN/mm ²
M6-3-1-1	452	5.68	6.70	0.327		
M6-3-1-2	451	5.41	6.89	0.343		
M6-3-1-3	457	5.89	6.94	0.285	6.11	0.780
M6-3-1-4	444	5.33	6.67	0.392		
M6-3-1-5	452	5.16	6.81	0.334		
M6-3-1-6	441	5.29	6.81	0.351	5.35	0.820
最小値	441	5.16	6.67	0.285	5.35	0.780
平均値	450	5.46	6.80	0.339	5.73	0.800
最大値	457	5.89	6.94	0.392	6.11	0.820
標準偏差	5.7	0.27	0.11	0.03	0.54	0.03
変動係数%	1.3	5.0	1.5	10.3	9.4	3.6

5層5ply 強軸 ラミナ105mm 試験体No	密度 kg/m ³	ヤング係数 E _{fr} kN/mm ²	TGH E _{TGHf} kN/mm ²	TGH G _{TGHf} kN/mm ²	TGH E _{TGHe} kN/mm ²	TGH G _{TGHe} kN/mm ²
M6-1-1-1	448	5.46	6.93	0.354		
M6-1-1-2	460	5.34	5.49	0.457		
M6-1-1-3	475	6.08	7.44	0.404	5.53	0.868
M6-1-1-4	456	5.29	7.11	0.342		
M6-1-1-5	431	4.63	6.63	0.317		
M6-1-1-6	450	4.96	6.84	0.310	5.11	0.781
最小値	431	4.63	5.49	0.310	5.11	0.781
平均値	453	5.29	6.74	0.364	5.32	0.825
最大値	475	6.08	7.44	0.457	5.53	0.868
標準偏差	14.5	0.49	0.67	0.06	0.30	0.06
変動係数%	3.2	9.3	9.9	15.6	5.6	7.5

E_{fr} : 縦振動法による縦弾性係数 (単位 kN/mm²)

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

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

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

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

表 1.2.3 幅はぎなしラミナ弱軸の縦振動法、たわみ振動法（T. G. H. 法）による
ヤング係数とせん断弾性係数

5層5ply 弱軸 ラミナ251mm 試験体No	密度 kg/m ³	ヤング係数 E _{fr} kN/mm ²	TGH E _{TGHf} kN/mm ²	TGH G _{TGHf} kN/mm ²	TGH E _{TGHe} kN/mm ²	TGH G _{TGHe} kN/mm ²
M6-3-2-1	428	3.20	1.95	0.167		
M6-3-2-2	443	3.53	2.26	0.163		
M6-3-2-3	443	3.32	1.99	0.185		
M6-3-2-4	454	3.95	2.24	0.200	3.84	0.816
M6-3-2-5	445	3.98	2.53	0.163	3.38	0.728
M6-3-2-6	447	3.45	1.96	0.215		
最小値	428	3.20	1.95	0.163	3.38	0.728
平均値	443	3.57	2.15	0.182	3.61	0.772
最大値	454	3.98	2.53	0.215	3.84	0.816
標準偏差	8.6	0.33	0.23	0.02	0.33	0.06
変動係数%	1.9	9.1	10.7	11.9	9.1	8.1

5層5ply 弱軸 ラミナ105mm 試験体No	密度 kg/m ³	ヤング係数 E _{fr} kN/mm ²	TGH E _{TGHf} kN/mm ²	TGH G _{TGHf} kN/mm ²	TGH E _{TGHe} kN/mm ²	TGH G _{TGHe} kN/mm ²
M6-1-2-1	460	3.96	2.25	0.250		
M6-1-2-2	462	4.21	2.47	0.247	3.89	0.763
M6-1-2-3	468	4.27	2.56	0.221	4.16	0.864
M6-1-2-4	474	4.07	2.32	0.241		
M6-1-2-5	464	4.34	2.53	0.233		
M6-1-2-6	466	4.12	2.32	0.222		
最小値	460	3.96	2.25	0.221	3.89	0.763
平均値	466	4.16	2.41	0.236	4.02	0.814
最大値	474	4.34	2.56	0.250	4.16	0.864
標準偏差	5.0	0.14	0.13	0.01	0.19	0.07
変動係数%	1.1	3.4	5.3	5.3	4.6	8.8

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_{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）

1.2.2 試験結果

ア) 幅はぎ接着のない試験体

幅はぎ接着のない試験体の面外曲げ試験結果を強軸は表 1.2.4 に、弱軸は表 1.2.5 に、図 1.2.1 に見かけの曲げヤング係数と曲げ強度の関係を、写真 1.2.1 から写真 1.2.4 に面外曲げ試験後の破壊状況を示す。なお、破壊形態は、すべて曲げ破壊であった。

また、ラミナ間の水平方向の動向を測定するため、支点上の試験体側面及び荷重点から支点方向の中間点に、平行層間に変位計を水平方向に取り付け、水平方向の変形量を測定した。その結果を図 1.2.2 から図 1.2.5 に示す。

表 1.2.4 幅はぎ接着のないラミナ幅が異なる強軸試験体の面外曲げ試験結果

5層5ply 強軸 ラミナ251mm 試験体No	密度 kg/m ³	最大荷重 kN	最大荷重時 変位量 mm	曲げ強度 σ N/mm ²	みかけ Em 曲げヤング係数 kN/mm ²	真 Eb 曲げヤング係数 kN/mm ²	比例限度 強度 N/mm ²	比例限度 変位 mm	仕事量 kN・mm	破壊形態
M6-3-1-1	452	47.6	50.8	21.8	6.09	6.57	21.8	50.8	1218	曲げ
M6-3-1-2	451	43.8	47.2	20.1	6.36	6.66	19.1	43.0	1086	曲げ
M6-3-1-3	457	61.8	69.6	28.4	5.85	6.10	28.4	69.6	2195	曲げ
M6-3-1-4	444	65.5	67.1	29.9	6.39	6.59	29.9	67.1	2233	曲げ
M6-3-1-5	452	53.6	58.1	24.6	5.99	6.31	24.6	58.1	1566	曲げ
最小値	444	43.8	47.2	20.1	5.85	6.10	19.1	43.0	1086	
平均値	451	54.5	58.6	25.0	6.14	6.45	24.8	57.7	1660	
最大値	457	65.5	69.6	29.9	6.39	6.66	29.9	69.6	2233	
標準偏差	4.5	9.17	9.81	4.20	0.24	0.24	4.50	11.11	536	
変動係数%	1.0	16.8	16.8	16.8	3.9	3.7	18.2	19.3	32.3	
5%下限値				14.6	5.55	5.86				

5層5ply 強軸 ラミナ105mm 試験体No	密度 kg/m ³	最大荷重 kN	最大荷重時 変位量 mm	曲げ強度 σ N/mm ²	みかけ Em 曲げヤング係数 kN/mm ²	真 Eb 曲げヤング係数 kN/mm ²	比例限度 強度 N/mm ²	比例限度 変位 mm	仕事量 kN・mm	破壊形態
M6-1-1-1	448	52.8	52.7	24.0	6.44	6.64	24.0	52.7	1390	曲げ
M6-1-1-2	460	44.5	53.4	20.4	5.50	5.66	18.2	45.9	1221	曲げ
M6-1-1-4	456	48.0	51.9	22.0	5.90	6.06	22.0	51.9	1247	曲げ
M6-1-1-5	431	44.9	51.8	20.6	5.58	5.61	20.6	51.8	1165	曲げ
最小値	431	44.5	51.8	20.4	5.50	5.61	18.2	45.9	1165	
平均値	449	47.6	52.5	21.7	5.86	5.99	21.2	50.6	1256	
最大値	460	52.8	53.4	24.0	6.44	6.64	24.0	52.7	1390	
標準偏差	13.0	3.83	0.74	1.67	0.43	0.48	2.46	3.14	96	
変動係数%	2.9	8.0	1.4	7.7	7.3	8.0	11.6	6.2	7.6	
5%下限値				17.3	4.71	4.71				

表 1.2.5 幅はぎ接着のないラミナ幅が異なる弱軸試験体の面外曲げ試験結果

5層5ply 弱軸 ラミナ251mm 試験体No	密度 kg/m ³	最大荷重 kN	最大荷重時 変位量 mm	曲げ強度 σ N/mm ²	みかけ Em 曲げヤング係数 kN/mm ²	真 Eb 曲げヤング係数 kN/mm ²	比例限度 強度 N/mm ²	比例限度 変位 mm	仕事量 kN・mm	破壊形態
M6-3-2-1	428	19.8	80.6	9.1	1.61	1.61	9.1	80.6	802	曲げ
M6-3-2-2	443	24.4	87.6	11.2	1.81	1.78	11.2	87.6	1079	曲げ
M6-3-2-3	443	19.0	75.8	8.7	1.63	1.68	8.7	75.8	726	曲げ
M6-3-2-4	454	26.5	85.4	12.2	2.04	2.15	12.2	85.4	1145	曲げ
M6-3-2-5	445	31.3	101.1	14.5	2.00	2.11	14.5	101.1	1555	曲げ
M6-3-2-6	447	28.0	109.0	12.9	1.68	1.70	12.9	109.0	1546	曲げ
最小値	428	19.0	75.8	8.7	1.61	1.61	8.7	75.8	726	
平均値	443	24.8	89.9	11.4	1.79	1.84	11.4	89.9	1142	
最大値	454	31.3	109.0	14.5	2.04	2.15	14.5	109.0	1555	
標準偏差	8.6	4.78	12.67	2.22	0.18	0.23	2.22	12.67	354	
変動係数%	1.9	19.2	14.1	19.4	10.3	12.8	19.4	14.1	31.0	
5%下限値				6.3	1.36	1.29				

5層5ply 弱軸 ラミナ105mm 試験体No	密度 kg/m ³	最大荷重 kN	最大荷重時 変位量 mm	曲げ強度 σ N/mm ²	みかけ Em 曲げヤング係数 kN/mm ²	真 Eb 曲げヤング係数 kN/mm ²	比例限度 強度 N/mm ²	比例限度 変位 mm	仕事量 kN・mm	破壊形態
M6-1-2-1	460	29.1	95.2	13.2	2.01	2.07	12.2	86.9	1404	曲げ
M6-1-2-4	474	31.4	100.5	14.4	2.08	2.08	14.0	97.1	1606	曲げ
M6-1-2-5	464	24.9	73.8	11.4	2.21	2.30	11.4	73.8	937	曲げ
M6-1-2-6	466	27.6	85.9	12.6	2.09	2.18	12.6	85.9	1205	曲げ
最小値	460	24.9	73.8	11.4	2.01	2.07	11.4	73.8	937	
平均値	466	28.3	88.8	12.9	2.10	2.16	12.6	85.9	1288	
最大値	474	31.4	100.5	14.4	2.21	2.30	14.0	97.1	1606	
標準偏差	5.9	2.71	11.68	1.25	0.08	0.11	1.10	9.51	286	
変動係数%	1.3	9.6	13.2	9.7	4.0	4.9	8.8	11.1	22.2	
5%下限値				9.6	1.87	1.87				

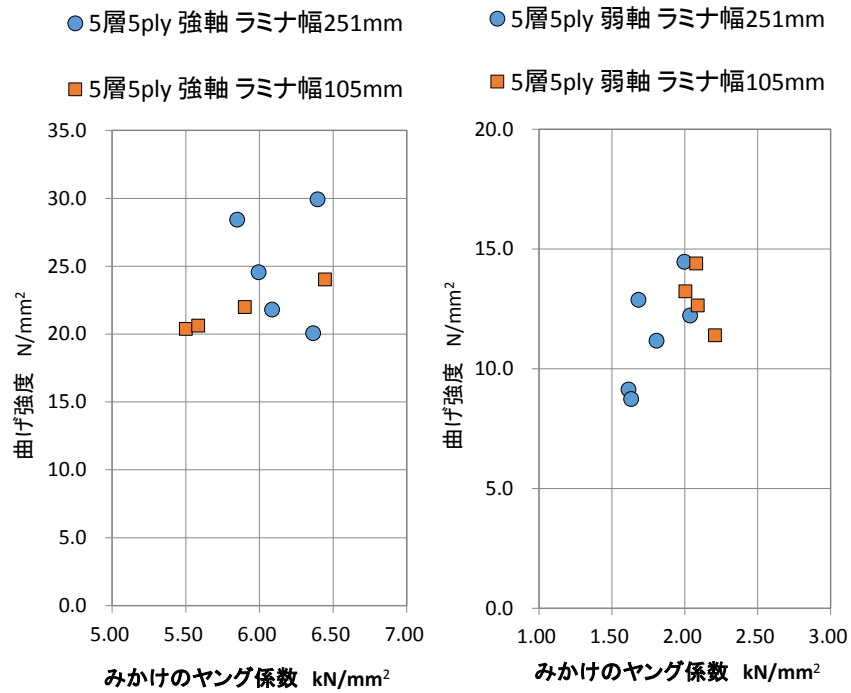


図 1.2.1 幅はぎ接着のないラミナ幅が異なる試験体の曲げヤング係数と曲げ強度の関係



写真 1.2.1 ラミナ幅 251mm 強軸破壊



写真 1.2.2 ラミナ幅 105mm 強軸破壊



写真 1.2.3 ラミナ幅 251mm 弱軸破壊



写真 1.2.4 ラミナ幅 105mm 弱軸破壊



— 5層5ply ラミナ幅251mm

— 5層5ply ラミナ幅105mm

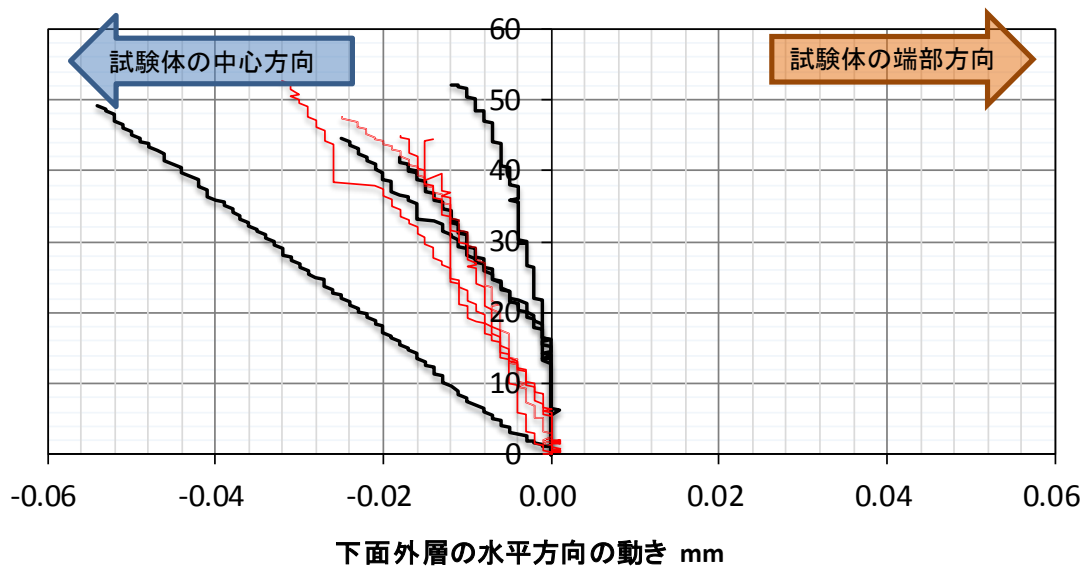
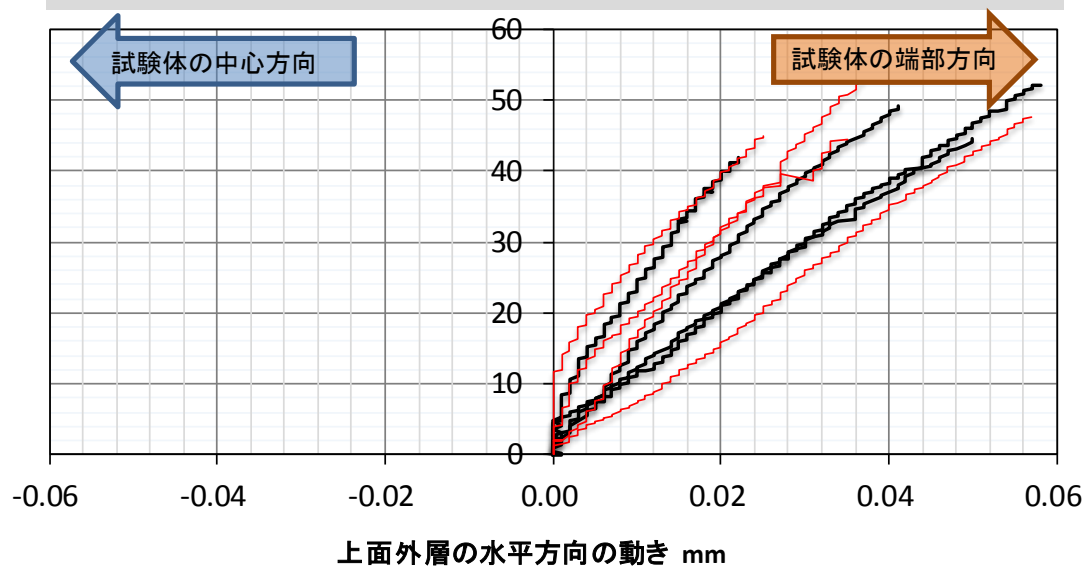
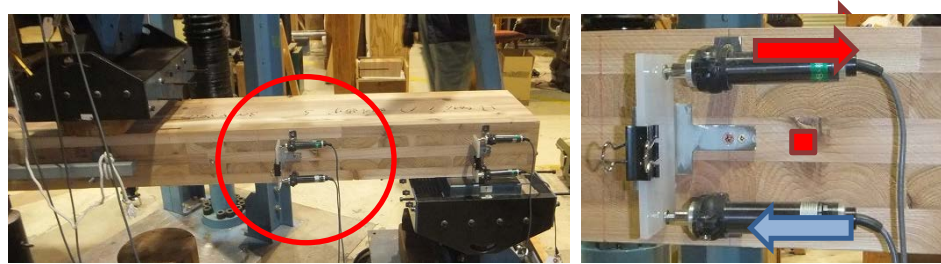


図 1.2.2 幅はぎ接着のないラミナ幅が異なる強軸試験体の支点上の外層水平方向の動き



—5層5ply ラミナ幅251mm

—5層5ply ラミナ幅105mm

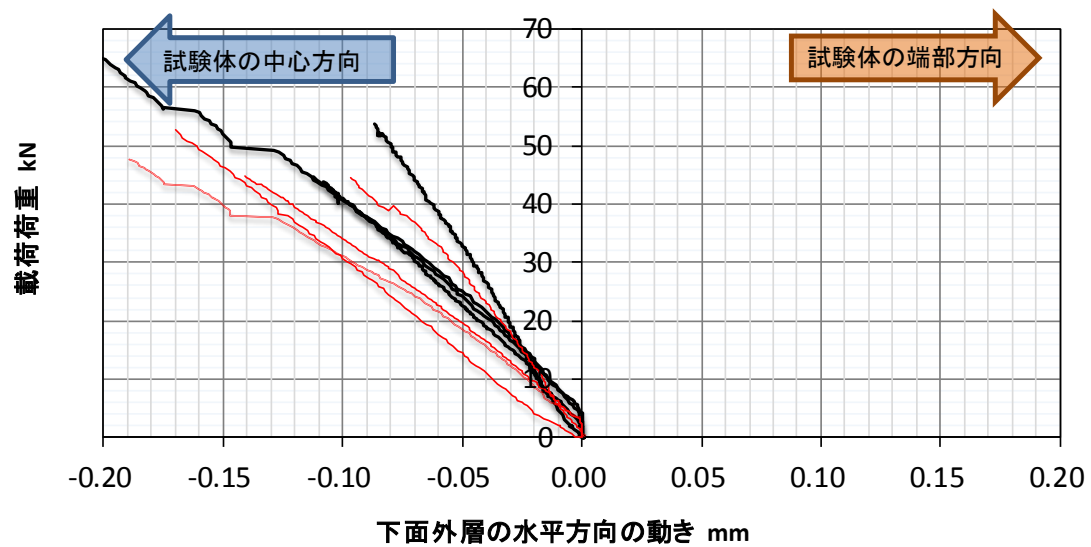
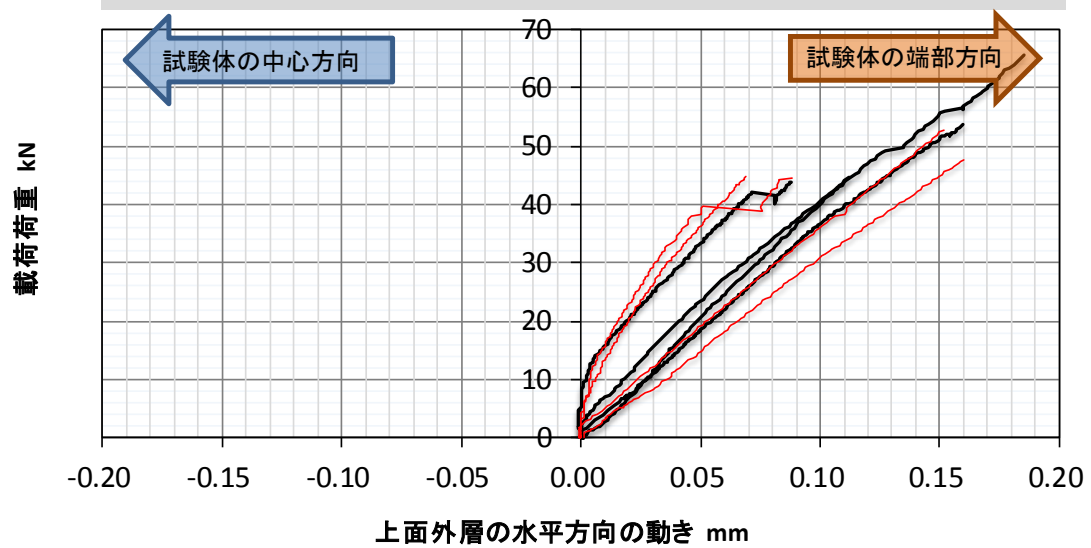


図 1.2.3 幅はぎ接着のないラミナ幅が異なる強軸試験体の荷重点と支点中間点の外層水平方向の動き

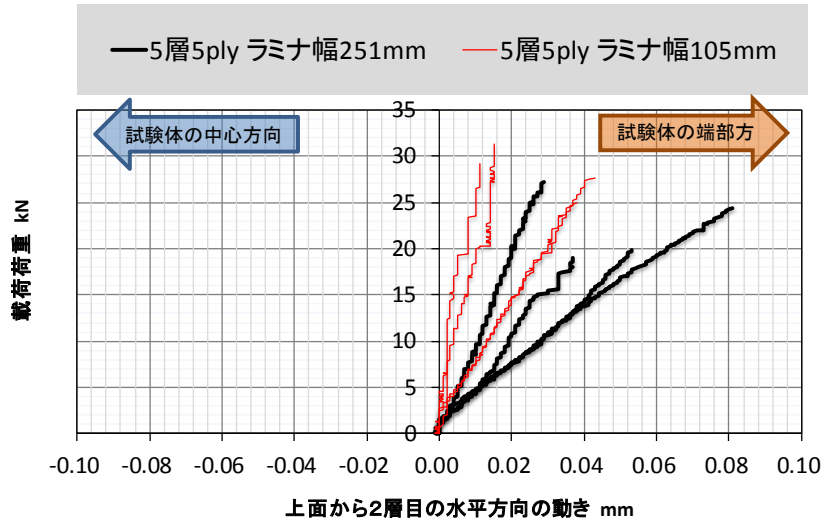


図 1.2.4 幅はぎ接着のないラミナ幅が異なる弱軸試験体の支点上の上から2層目平行層水平方向の動き

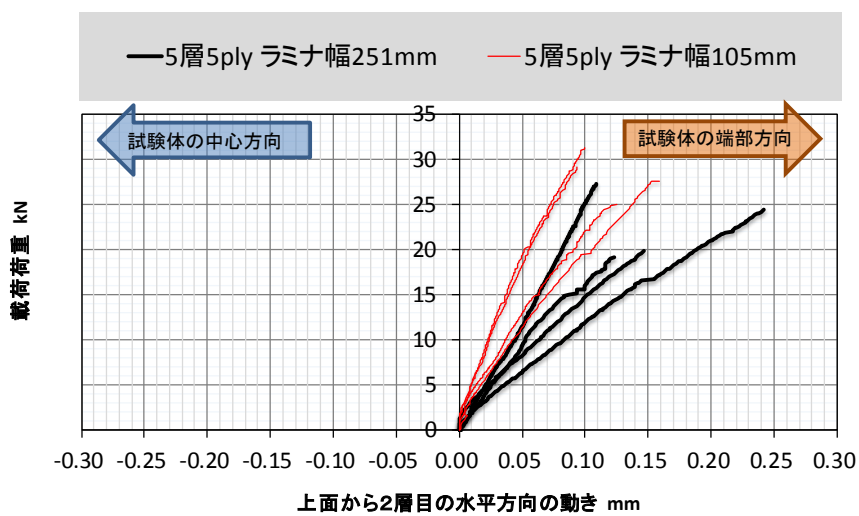


図 1.2.5 幅はぎ接着のないラミナ幅が異なる弱軸試験体の荷重点と支点中間点の上から2層目平行層の水平方向の動き

今回の幅はぎ接着のない試験体の破壊形態は、すべて荷重点間の引張側フィンガージョイントや節からの曲げ破壊のため、平行層ラミナの水平方向の動きが微小で、目視では、わかりにくかった。このため、平成 25 年度補正 林野庁委託事業「CLT 等新製品・新技術利用促進事業のうち CLT 実用化促進（強度データの収集・分析）」による CLT 3 試験体のせん断破壊状況を写真 1.2.5 から写真 1.2.7 に示す。上面の外層などが試験体端部に向けて、荷重点から支点方向にずれていることがわかる。



写真 1.2.5 3層 3ply せん断破壊時



写真 1.2.6 3層 4ply せん断破壊時



写真 1.2.7 7層 7ply せん断破壊時の水平方向のずれ

2.1.3 考察

表 1.2.2 の縦振動ヤング係数とたわみ振動法(T.G.H.法)による面外方向の曲げヤング係数ヤング係数を比較すると、強軸試験体では、平均値で、縦振動ヤング係数が 20%程度低めに、弱軸試験体では縦振動ヤング係数が 70%程度高めになることが分かった。

表 1.2.2 強軸の面外方向のたわみ振動法 (T.G.H.法) による曲げヤング係数と表 1.2.4 真の曲げヤング係数を比較すると、幅 251mm ラミナでは、面外方向のたわみ振動曲げヤング係数より静的曲げヤング係数が 5%、幅 105mm では 13%、平均値で低めになった。表 1.2.1 の弱軸面外方向のたわみ振動法 (T.G.H.法) による曲げヤング係数と表 1.2.5 真の曲げヤング係数を比較すると、幅 251mm ラミナでは、面外方向のたわみ振動曲げヤング係数より静的曲げヤング係数が 17%、幅 105mm ラミナでは 11%平均値で低めになった。

表 1.2.4 幅はぎ接着のないラミナ幅が異なる強軸試験体の面外曲げ試験結果及び図 1.2.1 幅はぎ接着のないラミナ幅が異なる試験体の曲げヤング係数と曲げ強度の関係から、幅 251mm ラミナの強軸は幅 105mm ラミナに比べて 2 層目と 4 層目の直交層の幅の違いが影響するのか、強度は平均値で高いものの、変動係数が大きいため、正規分布仮定の信頼

水準 75%の 95%下側許容限界値（以下 5%下限値という）で低くなった。曲げヤング係数は、幅 251mm ラミナは幅 105mm ラミナに比べて平均値、5%下限値とも高い結果となった。

表 1.2.5 幅はぎ接着のないラミナ幅が異なる弱軸試験体の面外曲げ試験結果及び図 1.2.1 幅はぎ接着のないラミナ幅が異なる試験体の曲げヤング係数と曲げ強度の関係から、幅 251mm ラミナの弱軸は幅 105mm ラミナに比べて、強度は平均値、5%下限値とも低く、曲げヤング係数も、同様の結果となった。外層の直交層の強度性能による差があったのかもしれないが、原因は現段階では不明である。幅はぎ接着の有無なども含めて検討する必要がある。

図 1.2.2 幅はぎ接着のないラミナ幅が異なる強軸試験体の支点上の外層水平方向の動き及び図 1.2.3 幅はぎ接着のないラミナ幅が異なる強軸試験体の荷重点と支点中間点の外層水平方向の動きから、強軸試験体の層内せん断の影響を検討した。5 層 5ply 強軸試験体の 3 層目平行層にターゲットを取り付け、上下外層に変位計を取り付けた。このターゲットが動かないと仮定した場合、上面外層は試験体端部方向に移動し、下面外層は試験体中心部方向に移動しているように見られる。荷重点と支点中間点の外層の水平移動が大きく、特に下側外層は幅 105mm ラミナが幅 215mm ラミナより大きく移動している。このことは、今回は曲げ破壊であったものの、幅はぎ接着をしていない場合、直交層のラミナ幅が短い方（ラミナの厚さが同じ場合）が層内せん断の影響が大きく出るのではないかと考えられる。

また、図 1.2.4 幅はぎ接着のないラミナ幅が異なる弱軸試験体の支点上の上から 2 層目平行層水平方向の動き及び図 1.2.5 幅はぎ接着のないラミナ幅が異なる弱軸試験体の荷重点と支点中間点の上から 2 層目平行層の水平方向の動きから、弱軸試験体の層内せん断の影響を検討した。5 層 5ply 弱軸試験体の 2 層目平行層に変位計を、4 層目にターゲット取り付けた。このターゲットが動かないと仮定した場合、上面 2 層目は試験体端部方向に移動しているように見られる。荷重点と支点中間点の方が支点上より水平移動が大きく、特に上から 2 層目は幅 215mm ラミナが幅 105mm ラミナより大きく移動している。このことについては、外層の直交層の幅の差が影響しているのかもしれないが、幅はぎ接着の有無なども含めて検討する必要がある。

文献

1.2.1) 久保島吉貴：未発表資料

1.3 面外曲げ試験：7 層 7 プライ

1.3.1 試験方法

初めに、本試験に用いた CLT の概要を表 1.3-1 に示す。

表 1.3-1 試験体概要

等級・構成	幅(mm)	厚さ(mm)	長さ(mm)	幅はぎ接着	ラミナ幅(mm)	試験体数
S60-7-7	300	175	4000	あり	105	強軸 6 体 弱軸 6 体
	300	175	4000	なし	105	強軸 6 体 弱軸 6 体
	300	175	3980	なし	251	強軸 6 体 弱軸 6 体
Mx60-7-7	300	175	4000	あり	105	強軸 6 体 弱軸 6 体

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

曲げ試験は、実大強度試験機（(株)島津製作所製、最大能力 250kN）を用いて行い、加力方式は 3 等分点 4 点荷重方式、曲げスパンは試験体厚さの 21 倍である 3670mm とした。加圧板幅は支点部および載荷部ともに 150mm とし、加力速度は強軸試験体では 8mm/分、弱軸試験体では 10mm/分とした。



図 1.3-1 曲げ試験の様子

1.3.2 試験結果

試験結果を表 1.3-2～表 1.3-9 に示す。

ア) 幅はぎ接着のない試験体

表 1.3-2 面外曲げ試験結果(強軸)

番号	密度 (kg/m ³)	E _{fr}	E _{TGHf}	G _{TGHf}	E _{TGHe}	G _{TGHe}	E _m	E _b	σ	含水 率(%)
M6-2-1-1	474	5.04	6.11	0.30	5.03	0.91	5.67	5.80	23.4	10.6
-2	465	4.57	5.48	0.34	4.55	0.95	5.19	5.13	22.5	10.6
-3	467	4.63	5.28	0.32	4.77	0.91	5.04	5.28	18.5	10.5
-4	468	4.56	5.54	0.33	4.45	1.02	5.20	5.32	17.8	10.4
-5	464	4.48	5.59	0.36	4.66	0.86	5.31	5.81	15.2	10.6
-6	464	4.47	5.44	0.32	4.38	0.89	5.00	5.15	16.6	10.5
平均値	467	4.63	5.57	0.33	4.64	0.92	5.24	5.42	19.0	10.5
最小値	464	4.47	5.28	0.30	4.38	0.86	5.00	5.13	15.2	10.4
最大値	474	5.04	6.11	0.36	5.03	1.02	5.67	5.81	23.4	10.6
標準偏差	3.96	0.21	0.28	0.02	0.24	0.06	0.24	0.31	3.2	0.1
変動係数	0.85	4.61	5.11	5.57	5.16	6.19	4.63	5.68	17.12	0.75

表 1.3-3 面外曲げ試験結果(弱軸)

番号	密度 (kg/m ³)	E _{fr}	E _{TGHf}	G _{TGHf}	E _{TGHe}	G _{TGHe}	E _m	E _b	σ	含水 率(%)
M6-2-2-1	462	3.85	2.70	0.23	3.99	0.85	2.50	2.61	13.5	10.7
-2	461	3.81	2.46	0.24	3.77	0.89	2.29	2.37	12.9	10.5
-3	467	3.70	2.65	0.23	4.00	0.84	2.40	2.34	12.2	10.7
-4	464	3.70	2.65	0.24	3.78	0.81	2.50	2.56	11.3	10.5
-5	472	3.71	2.61	0.22	3.83	0.86	2.42	2.47	10.1	10.5
-6	470	3.65	2.47	0.25	3.67	0.91	2.30	2.44	11.8	10.2
平均値	466	3.74	2.59	0.23	3.84	0.86	2.40	2.46	12.0	10.5
最小値	461	3.65	2.46	0.22	3.67	0.81	2.29	2.34	10.1	10.2
最大値	472	3.85	2.70	0.25	4.00	0.91	2.50	2.61	13.5	10.7
標準偏差	4.37	0.08	0.10	0.01	0.13	0.04	0.10	0.11	1.2	0.2
変動係数	0.94	2.03	3.93	4.82	3.38	4.06	4.00	4.30	10.19	1.76

E_{fr} : 縦振動法による縦弾性係数 (単位 kN/mm²)

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

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

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

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

E_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真の弾性係数 (単位 kN/mm²)

σ : 強度試験で得られた強さ (単位 N/mm²)

イ) 幅はぎ接着のある試験体

a) 同一等級構成

表 1.3-4 面外曲げ試験結果(強軸)

番号	密度 (kg/m ³)	E _{fr}	E _{TGHf}	G _{TGHf}	E _{TGHe}	G _{TGHe}	E _m	E _b	σ	含水率 (%)
Y6-2-1-1	423	5.11	5.79	0.17	4.95	0.77	5.46	5.81	18.2	10.7
-2	426	5.33	6.27	0.17	5.39	0.80	5.82	6.20	17.9	11.1
-3	389	4.37	5.25	0.17	4.14	0.71	4.87	5.27	17.4	10.3
-4	393	4.91	6.52	0.18	4.55	0.72	5.92	6.44	23.4	11.0
-5	413	4.76	5.85	0.25	4.48	0.75	5.51	5.84	13.7	11.1
-6	407	4.40	5.01	0.25	4.48	0.76	4.84	5.03	17.2	10.7
平均値	408	4.81	5.78	0.20	4.67	0.75	5.40	5.76	18.0	10.8
最小値	389	4.37	5.01	0.17	4.14	0.71	4.84	5.03	13.7	10.3
最大値	426	5.33	6.52	0.25	5.39	0.80	5.92	6.44	23.4	11.1
標準偏差	15.52	0.38	0.58	0.04	0.44	0.03	0.46	0.54	3.1	0.3
変動係数	3.80	7.92	10.02	21.11	9.42	4.33	8.51	9.32	17.46	2.79

表 1.3-5 面外曲げ試験結果(弱軸)

番号	密度 (kg/m ³)	E _{fr}	E _{TGHf}	G _{TGHf}	E _{TGHe}	G _{TGHe}	E _m	E _b	σ	含水率 (%)
Y6-2-2-1	408	3.44	2.39	0.14	3.33	0.75	2.27	2.33	11.7	10.7
-2	419	3.64	2.54	0.15	3.68	0.72	2.56	2.73	14.0	10.5
-3	408	3.60	2.55	0.11	3.43	0.71	2.42	2.61	10.9	10.7
-4	413	3.47	2.52	0.10	3.54	0.81	2.31	2.38	11.9	10.7
-5	405	3.70	2.42	0.12	3.69	0.75	2.31	2.34	12.1	11.3
-6	407	3.74	2.59	0.12	3.90	0.74	2.35	2.28	14.7	11.5
平均値	410	3.60	2.50	0.12	3.60	0.75	2.37	2.44	12.6	10.9
最小値	405	3.44	2.39	0.10	3.33	0.71	2.27	2.28	10.9	10.5
最大値	419	3.74	2.59	0.15	3.90	0.81	2.56	2.73	14.7	11.5
標準偏差	5.00	0.12	0.08	0.02	0.21	0.04	0.11	0.18	1.5	0.4
変動係数	1.22	3.34	3.21	13.41	5.73	4.92	4.56	7.42	11.77	3.59

E_{fr} : 縦振動法による縦弾性係数 (単位 kN/mm²)

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

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

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真の弾性係数 (単位 kN/mm²)

σ : 強度試験で得られた強さ (単位 N/mm²)

b) 異等級構成

表 1.3-6 面外曲げ試験結果(強軸)

番号	密度 (kg/m ³)	E _{fr}	E _{TGHf}	G _{TGHf}	E _{TGHe}	G _{TGHe}	E _m	E _b	σ	含水率 (%)
Y6-6-1-1	422	4.30	5.92	0.28	4.27	0.79	5.77	6.04	20.8	11.2
-2	436	3.92	5.47	0.27	3.81	0.89	5.28	5.65	17.4	11.0
-3	428	4.24	5.93	0.27	4.18	0.80	5.58	6.03	18.1	11.6
-4	434	4.35	6.16	0.26	4.34	0.80	5.87	6.07	22.4	11.4
-5	430	4.11	5.61	0.27	4.04	0.89	5.13	5.52	22.4	10.8
-6	434	4.37	6.02	0.27	4.20	0.80	5.59	5.81	23.1	11.5
平均値	431	4.22	5.85	0.27	4.14	0.83	5.54	5.85	20.7	11.2
最小値	422	3.92	5.47	0.26	3.81	0.79	5.13	5.52	17.4	10.8
最大値	436	4.37	6.16	0.28	4.34	0.89	5.87	6.07	23.1	11.6
標準偏差	5.06	0.17	0.26	0.01	0.19	0.05	0.28	0.23	2.4	0.3
変動係数	1.17	4.09	4.47	2.18	4.57	5.52	5.12	3.94	11.69	2.77

表 1.3-7 面外曲げ試験結果(弱軸)

番号	密度 (kg/m ³)	E _{fr}	E _{TGHf}	G _{TGHf}	E _{TGHe}	G _{TGHe}	E _m	E _b	σ	含水率 (%)
Y6-6-2-1	429	2.53	1.81	0.22	2.51	0.89	1.66	1.70	12.5	10.9
-2	422	2.53	1.86	0.21	2.53	0.89	1.73	1.68	9.2	10.6
-3	435	2.40	1.70	0.24	2.35	0.95	1.59	1.61	11.0	10.7
-4	442	2.42	1.68	0.24	2.24	1.22	1.62	1.63	10.3	10.7
-5	433	2.51	1.76	0.21	2.48	0.94	1.63	1.64	9.1	10.8
-6	432	2.55	1.85	0.19	2.52	0.91	1.77	1.78	8.7	10.6
平均値	432	2.49	1.78	0.22	2.44	0.97	1.66	1.67	10.1	10.7
最小値	422	2.40	1.68	0.19	2.24	0.89	1.59	1.61	8.7	10.6
最大値	442	2.55	1.86	0.24	2.53	1.22	1.77	1.78	12.5	10.9
標準偏差	6.50	0.06	0.08	0.02	0.12	0.13	0.07	0.06	1.5	0.1
変動係数	1.50	2.60	4.28	10.05	4.82	13.34	4.15	3.77	14.36	1.07

E_{fr} : 縦振動法による縦弾性係数 (単位 kN/mm²)

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

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

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

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

E_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真の弾性係数 (単位 kN/mm²)

σ : 強度試験で得られた強さ (単位 N/mm²)

ウ) 幅はぎ接着ラミナを用いた試験体

表 1.3-8 面外曲げ試験結果(強軸)

番号	密度 (kg/m ³)	E _{fr}	E _{TGHf}	G _{TGHf}	E _{TGHe}	G _{TGHe}	E _m	E _b	σ	含水率 (%)
M6-4-1-1	434	4.51	5.46	0.28	4.56	0.81	5.22	5.61	19.1	10.7
-2	433	4.79	6.41	0.28	4.60	0.82	6.11	6.55	21.3	10.7
-3	439	4.71	5.36	0.28	4.58	0.81	5.07	5.65	20.0	10.9
-4	424	4.75	5.19	0.29	4.63	0.79	4.85	5.11	17.4	10.4
-5	447	4.95	6.21	0.28	5.14	0.89	5.72	5.85	23.2	10.6
-6	442	5.07	5.70	0.29	4.86	0.87	5.29	5.63	21.2	10.7
平均値	437	4.80	5.72	0.29	4.73	0.83	5.38	5.73	20.4	10.7
最小値	424	4.51	5.19	0.28	4.56	0.79	4.85	5.11	17.4	10.4
最大値	447	5.07	6.41	0.29	5.14	0.89	6.11	6.55	23.2	10.9
標準偏差	8.01	0.19	0.49	0.00	0.23	0.04	0.46	0.47	2.0	0.2
変動係数	1.83	4.06	8.55	1.49	4.85	4.55	8.54	8.22	9.84	1.44

表 1.3-9 面外曲げ試験結果(弱軸)

番号	密度 (kg/m ³)	E _{fr}	E _{TGHf}	G _{TGHf}	E _{TGHe}	G _{TGHe}	E _m	E _b	σ	含水率 (%)
M6-4-2-1	429	3.85	2.93	0.17	3.75	0.78	2.71	2.77	14.7	10.8
-2	427	3.75	2.74	0.18	3.61	0.86	2.58	2.61	14.2	10.8
-3	426	3.92	2.76	0.16	3.76	0.82	2.52	2.77	14.9	10.3
-4	421	3.98	2.70	0.15	3.82	0.72	2.57	2.74	13.7	10.4
-5	417	3.89	2.75	0.14	4.03	0.67	2.57	2.70	13.6	10.8
-6	423	3.56	2.39	0.16	3.58	0.77	2.21	2.29	12.5	10.7
平均値	424	3.83	2.71	0.16	3.76	0.77	2.53	2.65	13.9	10.6
最小値	417	3.56	2.39	0.14	3.58	0.67	2.21	2.29	12.5	10.3
最大値	429	3.98	2.93	0.18	4.03	0.86	2.71	2.77	14.9	10.8
標準偏差	4.44	0.15	0.18	0.01	0.16	0.07	0.17	0.19	0.8	0.2
変動係数	1.05	3.90	6.58	6.93	4.34	8.96	6.57	7.02	6.07	2.14

E_{fr} : 縦振動法による縦弾性係数 (単位 kN/mm²)

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

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

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

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

E_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真の弾性係数 (単位 kN/mm²)

σ : 強度試験で得られた強さ (単位 N/mm²)

次に荷重－変位曲線を図 1.3-2、図 1.3-3 に、破壊形態を図 1.3-4～図 1.3-8 にそれぞれ示す。

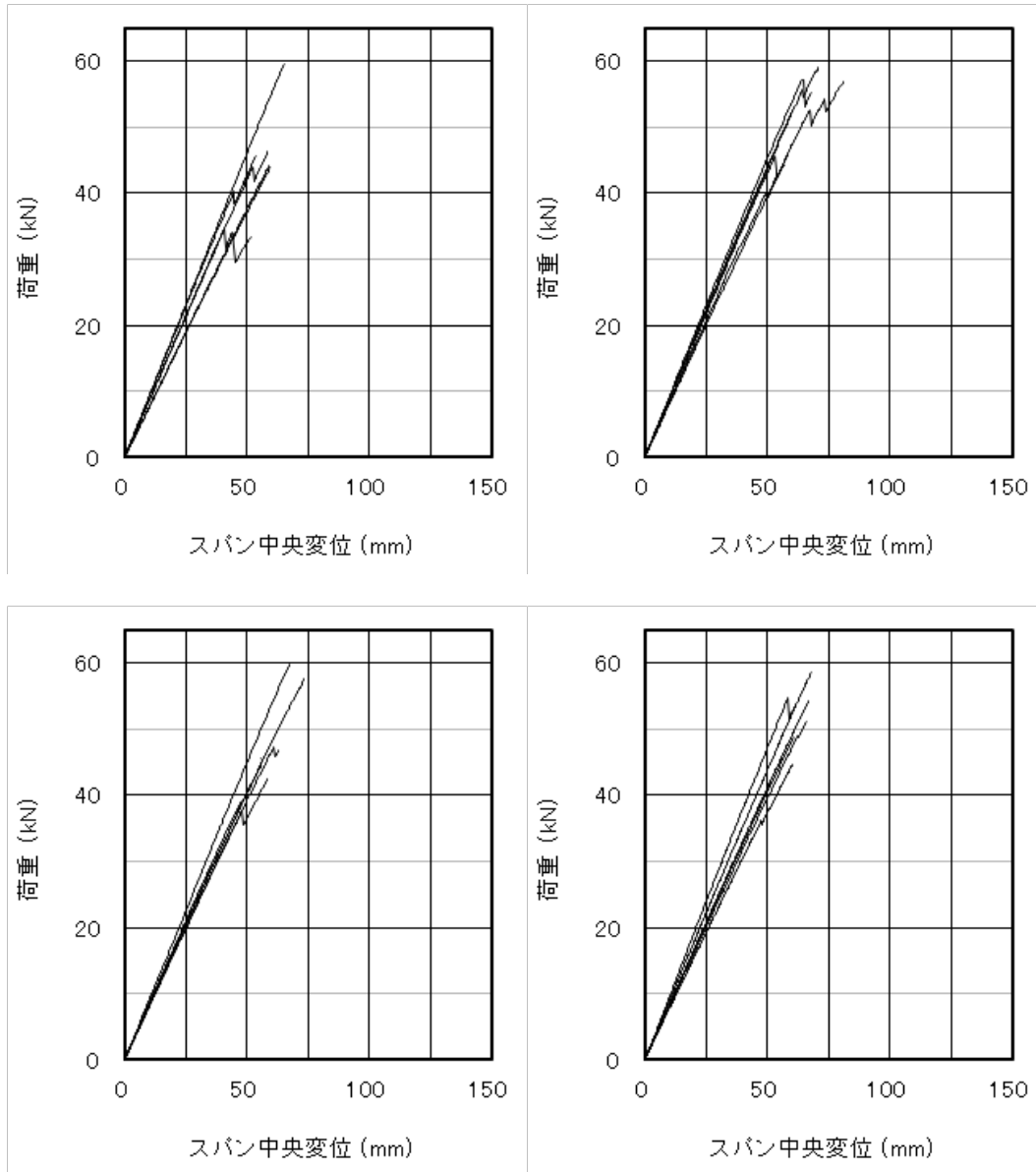


図 1.3-2 荷重変位曲線（強軸試験体）

（左上：幅はぎあり 同一等級構成、右上：幅はぎあり 異等級構成

左下：幅はぎなし 105mm ラミナ、右下：幅はぎなし 251mm ラミナ）

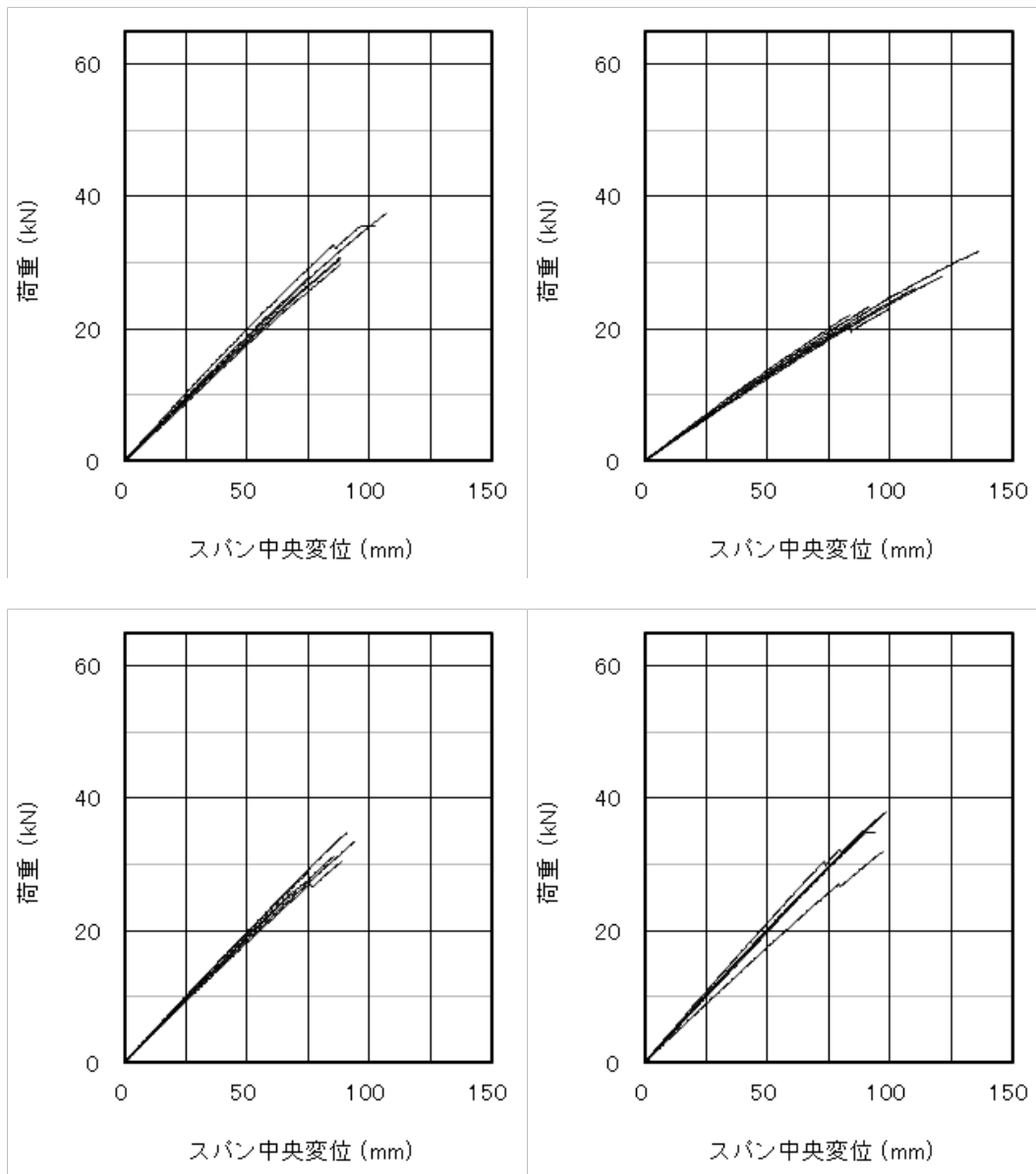


図 1.3-4 荷重変位曲線（弱軸試験体）
 （左上：幅はぎあり 同一等級構成、右上：幅はぎあり 異等級構成
 左下：幅はぎなし 105mm ラミナ、右下：幅はぎなし 251mm ラミナ）



図 1.3-5 破壊形態（幅はぎあり・同一等級構成 左：強軸 右：弱軸）



図 1.3-6 破壊形態（幅はぎあり・異等級構成 左：強軸 右：弱軸）



図 1.3-7 破壊形態（幅はぎなし・105mm ラミナ 左：強軸 右：弱軸）



図 1.3-8 破壊形態（幅はぎなし・251mm ラミナ 左：強軸 右：弱軸）

1.3.3 考察

非破壊試験結果と曲げ試験結果との関係を図 1.3-9、図 1.3-10 に示す。縦振動法による縦弾性係数は、曲げ試験による見かけの曲げヤング係数に比べ、強軸試験体では低く、弱軸試験体では高い評価になった。一方、たわみ振動法による面外方向の曲げヤング係数は、曲げ試験による見かけの曲げヤング係数と近い値となったことから、非破壊試験による評価はたわみ振動法が適していることが確認された。

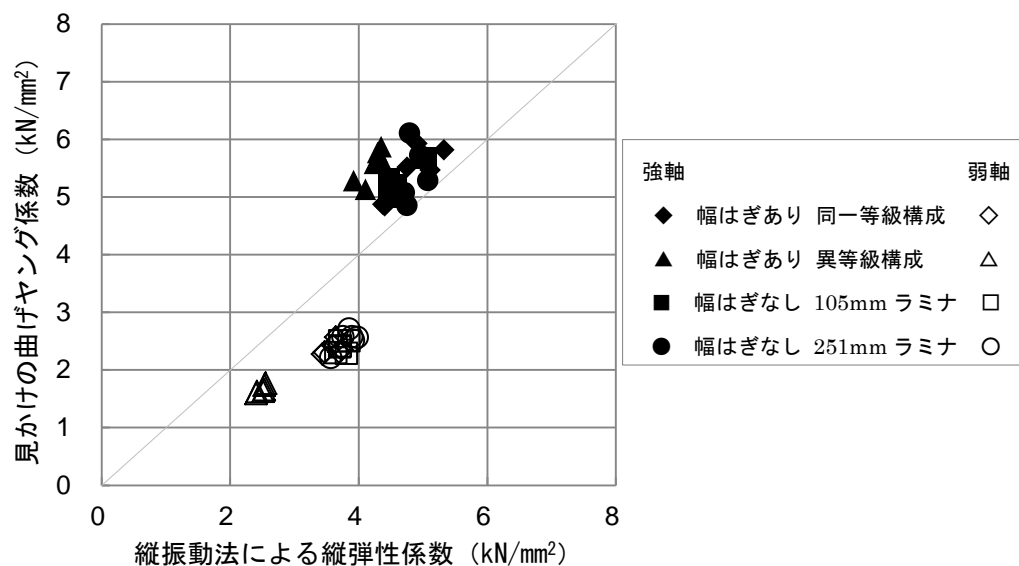


図 1.3-9 非破壊試験結果と曲げ試験結果の関係（縦振動法）

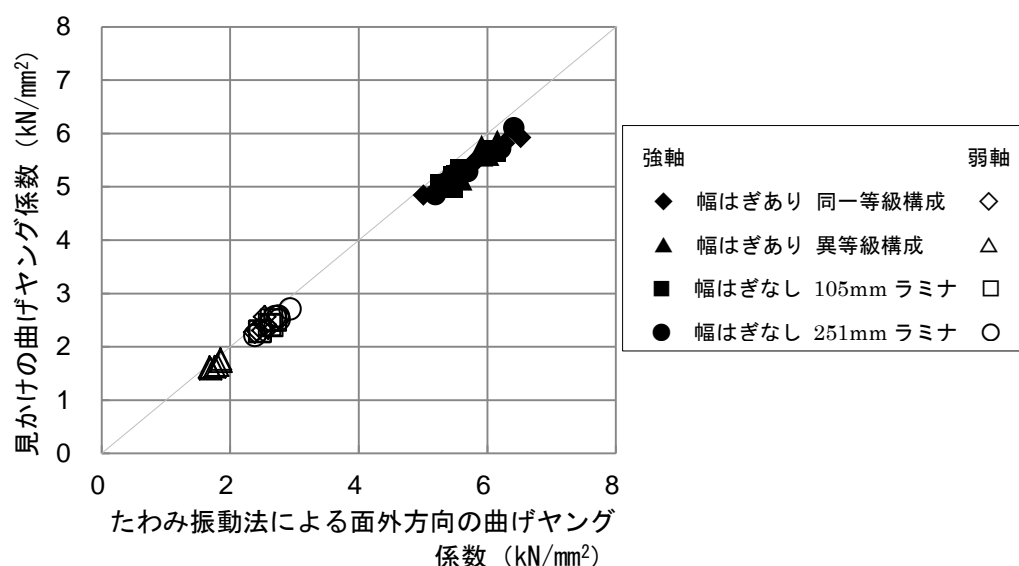


図 1.3-10 非破壊試験結果と曲げ試験結果の関係（たわみ振動法）

次に、見かけの曲げヤング係数と曲げ強さとの関係を図 1.3-11 に示す。本試験において、曲げヤング係数と曲げ強さとの間に相関は認められなかった。

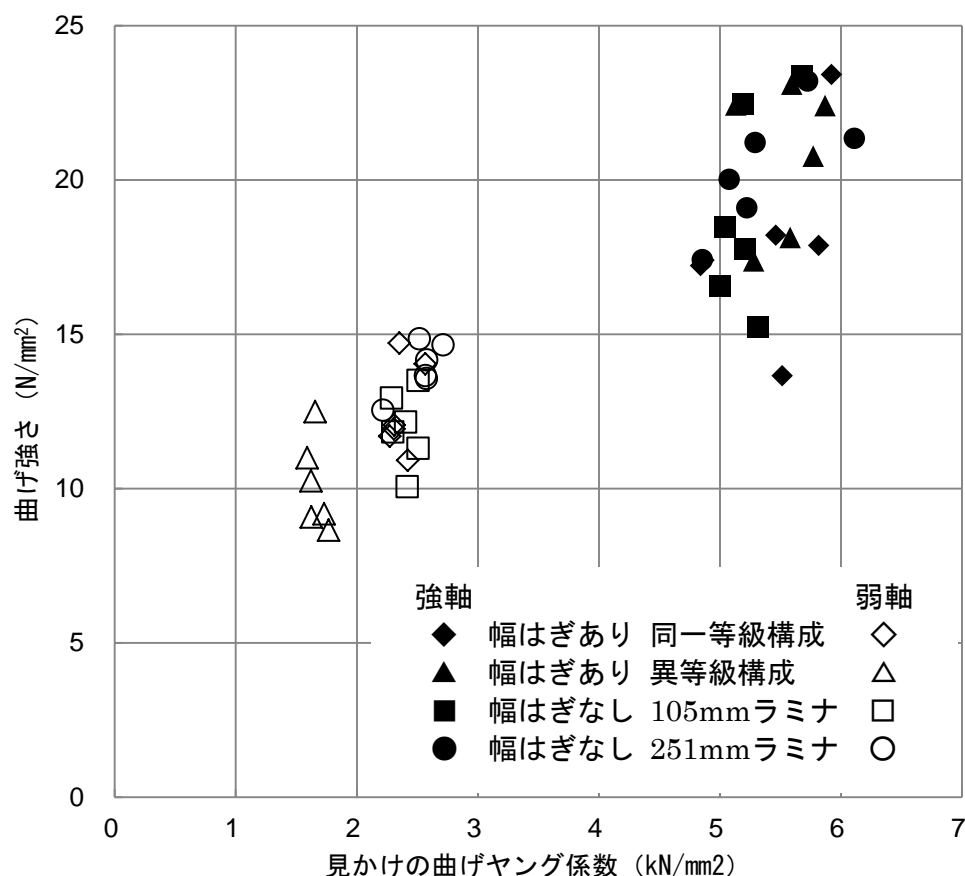


図 1.3-11 曲げヤング係数と曲げ強さの関係

また、プライを幅はぎ接着した影響、幅はぎプライで構成した CLT におけるラミナ構成の影響、幅はぎラミナを用いた影響を、見かけの曲げヤング係数、真の曲げヤング係数、曲げ強さについてそれぞれ検討した。その結果、強軸ではどの条件においても強度性能に有意差は認められなかった。一方、弱軸では幅はぎプライで構成した CLT におけるラミナ構成の違いにより、見かけの曲げヤング係数と真の曲げヤング係数において有意差が認められ、どちらも異等級構成は同一等級構成の 0.7 倍程度であった。これは異等級構成になることで、内層にヤング係数の低いラミナが配置されるためだと考えられる。

また、幅はぎラミナの影響により、曲げ強さに有意差が認められ、幅はぎラミナを用いることで、105mm ラミナを用いた CLT の 1.16 倍の強度となった。

なお、本試験に用いた試験体は条件毎に密度差があり、条件間の差を正確には比較できなかった。幅はぎ接着の有無を例に挙げると、幅はぎ接着なしの強軸試験体は、幅はぎ接着ありの強軸試験体より約 60kg/m³ 高く、本試験の結果を、幅はぎ接着した影響だけだと考えることは難しい。

1.4 面外せん断試験

1.4.1 はじめに

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

1.4.2 試験体・載荷方法

水平せん断載荷におけるM図、Q図を図-2.2.1に示す。載荷方法は、直交集成板のJASに準拠した短スパンの中央集中1点式（水平せん断式）、支点間距離はいずれも試験体厚の5倍とし、面外方向に載荷した。試験体は、5層5プライ、7層7プライの2種類およびラミナ幅105mm、251mmの2種類の計4種類とし、それぞれ最外層ラミナが強軸方向および弱軸方向のものを設定した。試験体のラミナ厚は5層5プライ30mm、7層7プライ25mmとした。試験体厚さ(d)は5層5プライで150mm、7層7プライで175mm、幅はいずれも300mm、試験体長さはいずれも厚さ(d)の7倍とした。樹種はスギ、強度等級は同一等級S60とした。いずれの試験体も、幅はぎ接着はしていない。

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

表-1.4.1 試験体一覧

強度等級 ・層構成	ラミナ 幅 (mm)	外層 ラミナ	試験 体数	水平式サイズ (mm)	加圧板幅 (mm) ^{*2}	せん断 スパン 比 ^{*3}
S60-5-5	105	強軸	6	d150-W300-L1,050	150	1.50
		弱軸	6	d150-W300-L1,050	150	1.50
	251 ^{*1}	強軸	6	d150-W300-L1,050	150	1.50
		弱軸	6	d150-W300-L1,050	150	1.50
S60-7-7	105	強軸	4	d175-W300-L1,225	175	1.50
		弱軸	4	d175-W300-L1,225	175	1.50
	251 ^{*1}	強軸	4	d175-W300-L1,225	175	1.50
		弱軸	4	d175-W300-L1,225	175	1.50

^{*1} 幅はぎ接着をして、ラミナ幅250mmを製造した。

^{*2} 加圧板幅とは、実際に試験体に接している幅。面取り部を含まない。

^{*3} せん断スパン比とは、(加圧板端部間距離) / (試験体厚さ)。

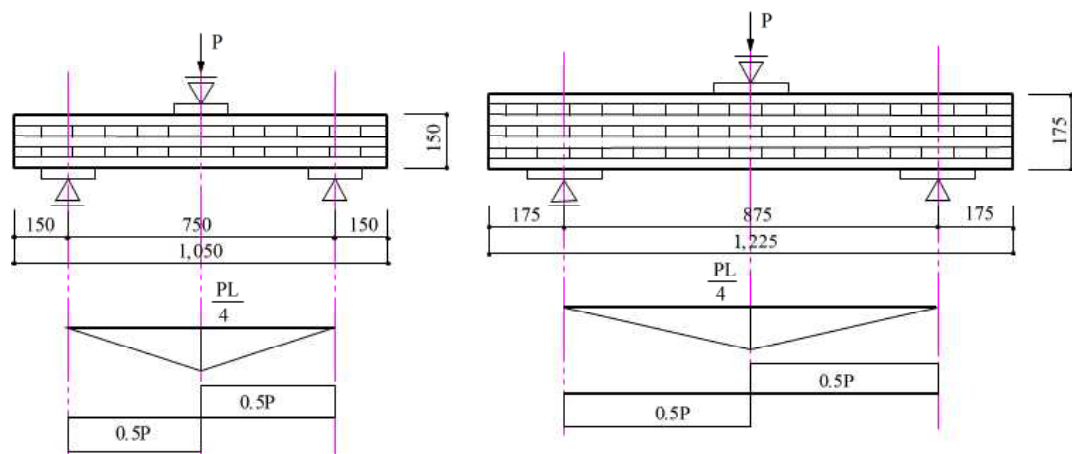


図-1.4.1 水平せん断式載荷とM図およびQ図（左：5層5プライ、右：7層7プライ）

1.4.3 水平式せん断載荷 試験結果

試験結果の例を表-1.4.2に、試験体のせん断力－変位曲線の例を図-1.4.2～1.4.9にそれぞれ示す。また、各シリーズごとの試験体における最終破壊性状の例を写真-1.4.1～1.4.8にそれぞれ示す。

表-1.4.2 (その1) 試験結果一覧

試験体名	強度等級・層構成	ラミナ幅 (mm)	外層ラミナ	せん断面積 (mm ²)	最大荷重 (kN)	せん断強さ* (N/mm ²)	Av.	最終破壊性状
M6-1-1-1	S60-5-5	105	強軸	45,000	(129.02)	(2.15)	2.43	B
M6-1-1-2					145.24	2.40		S
M6-1-1-3					155.83	2.58		S
M6-1-1-4					152.74	2.53		S
M6-1-1-5					149.15	2.47		S
M6-1-1-6					146.84	2.43		S
M6-1-2-1	S60-5-5	105	弱軸	45,000	68.91	1.14	1.48	S
M6-1-2-2					(89.50)	(1.48)		B
M6-1-2-3					96.53	1.60		S
M6-1-2-4					105.33	1.74		S
M6-1-2-5					(89.95)	(1.49)		B
M6-1-2-6					(84.48)	(1.40)		B
M6-3-1-1	S60-5-5	251	強軸	45,000	139.25	2.31	2.44	S
M6-3-1-2					(144.81)	(2.40)		B
M6-3-1-3					161.60	2.68		S
M6-3-1-4					(144.72)	(2.40)		B
M6-3-1-5					149.97	2.48		S
M6-3-1-6					143.03	2.37		S
M6-3-1-1	S60-5-5	251	弱軸	45,000	(73.47)	(1.22)	1.49	B
M6-3-1-2					(92.62)	(1.53)		B
M6-3-1-3					(86.92)	(1.44)		B
M6-3-1-4					96.66	1.60		S
M6-3-1-5					(102.92)	(1.70)		B
M6-3-1-6					87.71	1.45		S

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

表-1.4.1 (その2) 試験結果一覧

試験体名	強度等級・層構成	ラミナ幅 (mm)	外層ラミナ	せん断面積 (mm ²)	最大荷重 (kN)	せん断強さ* (N/mm ²)	Av.	最終破壊性状
M6-2-1-1	S60-7-7	105	強軸	52,500	(166.61)	(2.38)	2.28	B
M6-2-1-2					153.19	2.19		S
M6-2-1-3					162.67	2.32		S
M6-2-1-4					(155.41)	(2.22)		B
M6-2-2-1	S60-7-7	105	弱軸	52,500	126.31	1.79	1.71	S
M6-2-2-2					(129.41)	(1.84)		B
M6-2-2-3					(107.25)	(1.52)		B
M6-2-2-4					(117.26)	(1.67)		B
M6-4-1-1	S60-7-7	251	強軸	52,500	158.70	2.27	2.33	S
M6-4-1-2					(175.31)	(2.50)		B
M6-4-1-3					(159.67)	(2.28)		B
M6-4-1-4					159.71	2.28		S
M6-4-2-1	S60-7-4	251	弱軸	52,500	(112.34)	(1.60)	1.42	B
M6-4-2-2					105.92	1.50		S
M6-4-2-3					(80.96)	(1.15)		B
M6-4-2-4					(101.10)	(1.44)		B

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

5層5プライ試験体のせん断強さは、強軸試験体でラミナ幅105mmが2.43、ラミナ幅251mmが2.44(単位はいずれもN/mm²)となり、同じであった。弱軸試験体においても、ラミナ幅105mmが1.48、ラミナ幅251mmが1.49(単位はいずれもN/mm²)となり、同じであった。このためラミナ幅がせん断強度に与える影響については認められなかった。しかしながら最終破壊モードを比較すると、強軸試験体でラミナ幅105mmがせん断破壊5体だったのに対し、ラミナ幅251mmはせん断破壊が3体であった。これはラミナの幅厚比が大きくなると直交層のラミナが転がり変形（いわゆるローリング・シア）しにくくなるため、最終破壊形状（破壊モード）が異なってくるものと推測される。

一方、7層7プライ試験体のせん断強さは、強軸試験体でラミナ幅105mmが2.28、ラミナ幅251mmが2.33(単位はいずれもN/mm²)となり、ほぼ同じであった。しかしながら弱軸試験体においては、ラミナ幅105mmが1.71、ラミナ幅251mmが1.42(単位はいずれもN/mm²)となり、約17%ほどせん断強度が低下した。いずれの試験体も同一等級（S60）であることから、ラミナ幅の影響なのかあるいはラミナの強度が低かったのか、現時点では不明である。最終破壊モードについては、強軸試験体いずれもせん断破壊2体、曲げ破壊2体となり、最終破壊形状に違いは認められなかった。弱軸試験体においても、いずれもせん断破壊1体、曲げ破壊3体と同じであり、5層5プライ試験体とは異なる結果となった。

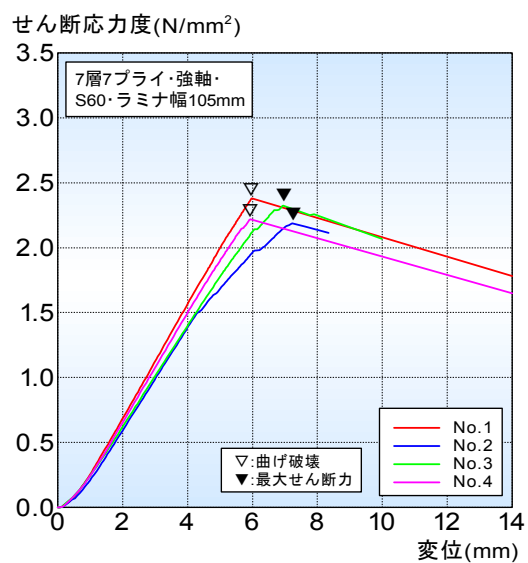


図-1.4.6 せん断力-変位曲線
(7層7プライ・強軸・ラミナ幅105mm)

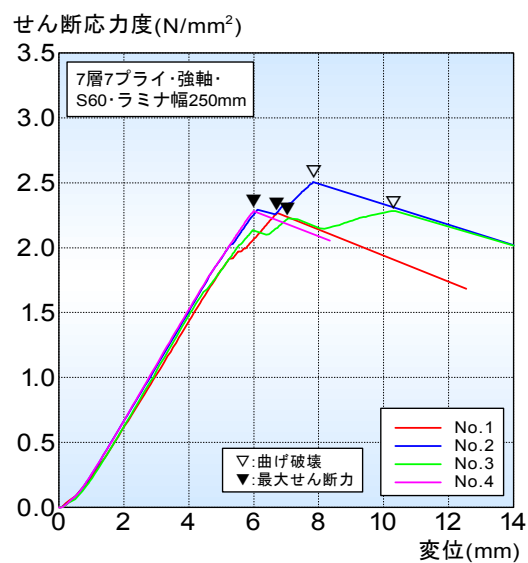


図-1.4.7 せん断力-変位曲線
(7層7プライ・強軸・ラミナ幅251mm)

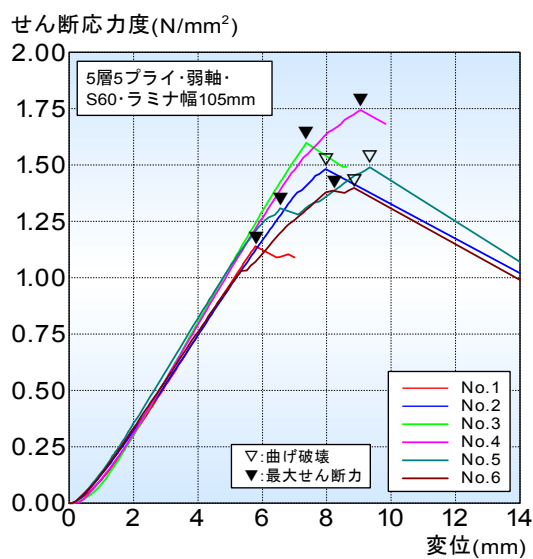


図-1.4.4 せん断力-変位曲線
(5層5プライ・弱軸・ラミナ幅105mm)

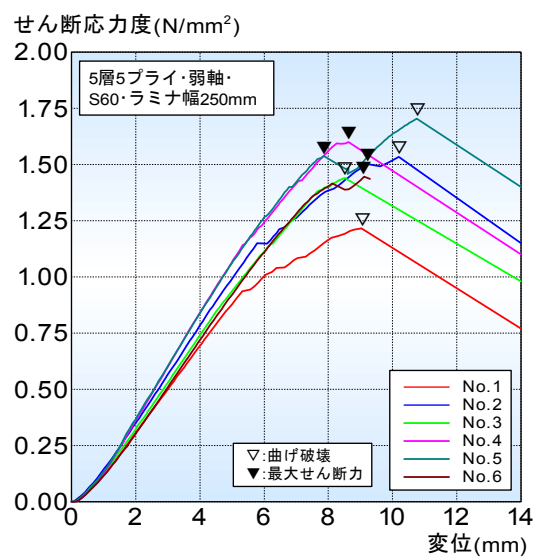


図-1.4.5 せん断力-変位曲線
(5層5プライ・弱軸・ラミナ幅251mm)

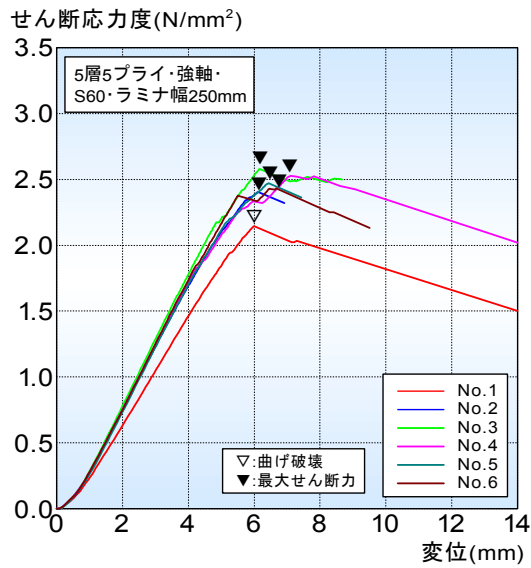


図-1.4.2 せん断力-変位曲線
(5層5プライ・強軸・ラミナ幅105mm)

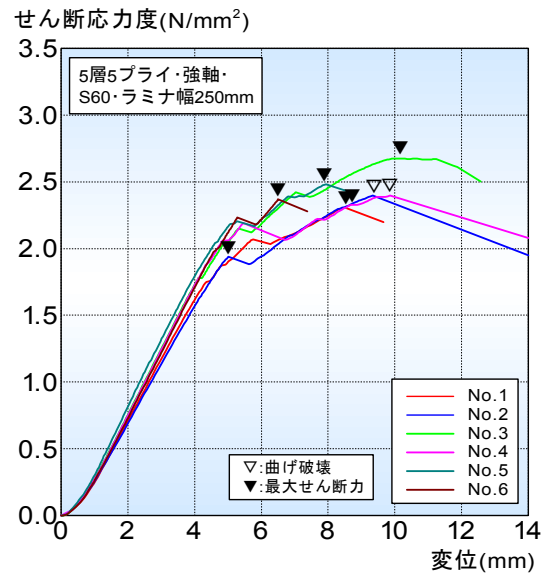


図-1.4.3 せん断力-変位曲線
(5層5プライ・強軸・ラミナ幅251mm)

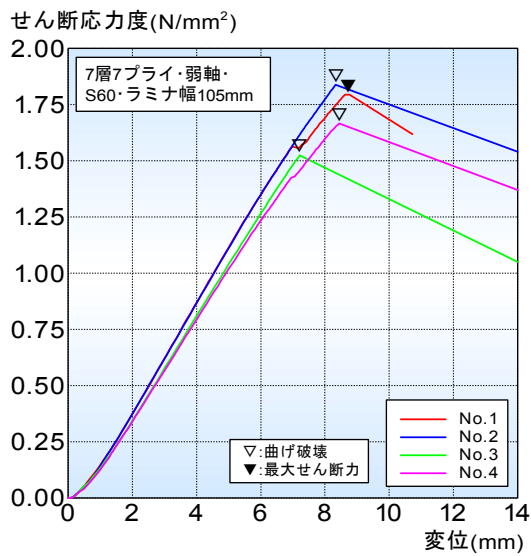


図-1.4.6 せん断力-変位曲線
(7層7プライ・弱軸・ラミナ幅105mm)

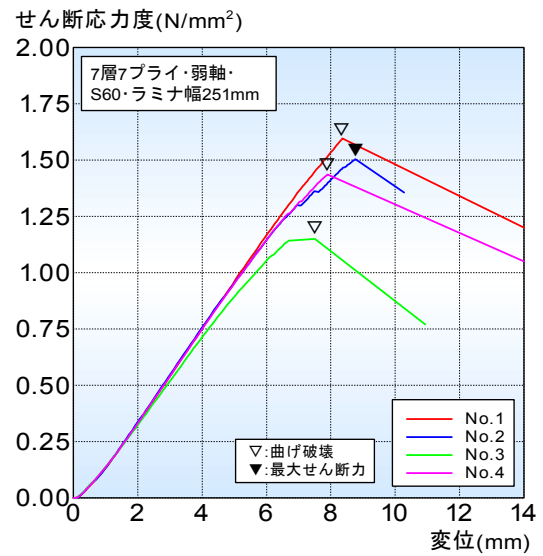


図-1.4.7 せん断力-変位曲線
(7層7プライ・弱軸・ラミナ幅251mm)

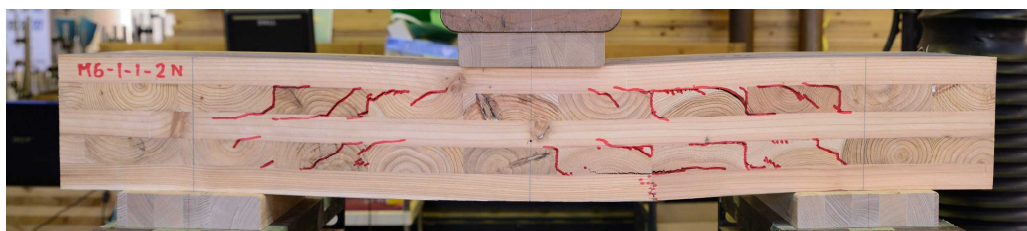


写真-1.4.1 最終破壊性状（5層5プライ, 強軸, ラミナ幅105mm）



写真-1.4.2 最終破壊性状（5層5プライ, 強軸, ラミナ幅251mm）

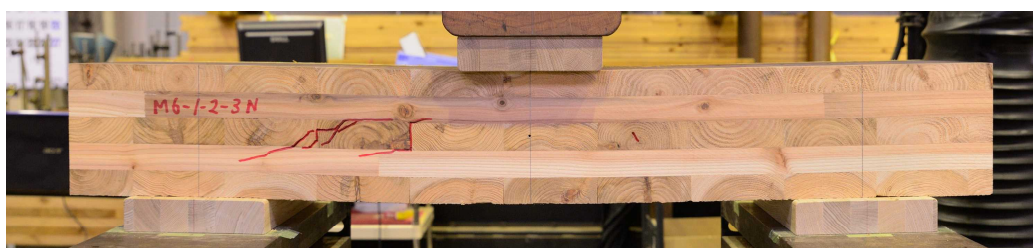


写真-1.4.3 最終破壊性状（5層5プライ, 弱軸, ラミナ幅105mm）

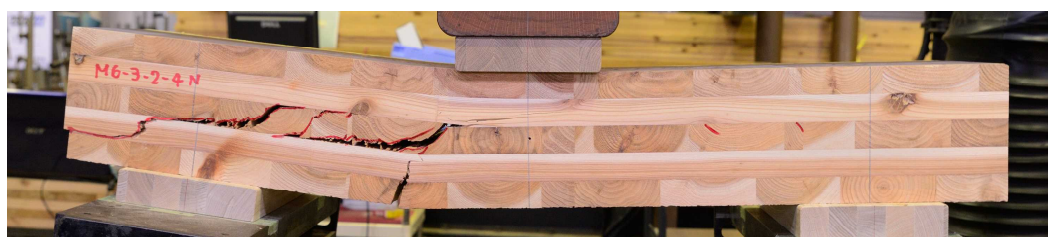


写真-1.4.4 最終破壊性状（5層5プライ, 弱軸, ラミナ幅251mm）



写真-1.4.5 最終破壊性状（7層7プライ, 強軸, ラミナ幅105mm）



写真-1.4.6 最終破壊性状（7層7プライ, 強軸, ラミナ幅251mm）

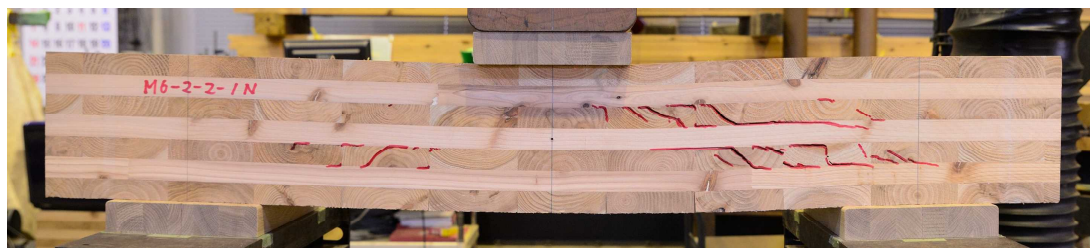


写真-1.4.7 最終破壊性状（7層7プライ, 弱軸, ラミナ幅105mm）

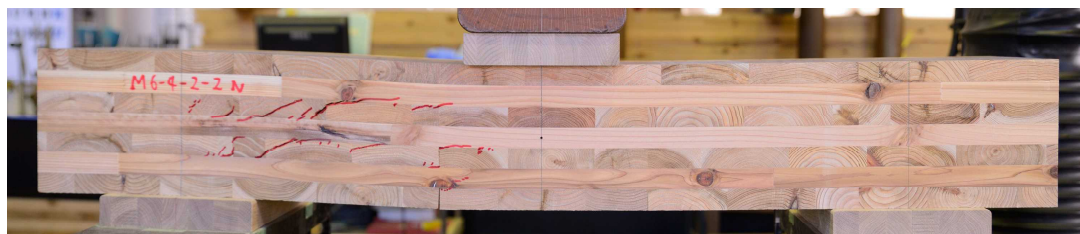


写真-1.4.8 最終破壊性状（7層7プライ, 弱軸, ラミナ幅251mm）

1.5 面内曲げ試験

1.5.1 目的

幅 105mm の 1 枚ものラミナで構成された CLT、およびラミナを幅はぎ接着して幅 251mm としたラミナ（幅はぎラミナ）で構成されたスギ同一等級 CLT の面内曲げ強度性能を求めることを目的とした。

1.5.2 試験体

CLT 面内曲げ試験体の仕様を表 1.5.2-1 に示す。幅 251mm のラミナは、ひき板を連続的に幅はぎ接着した後、幅 251mm に加工して作製した。試験体のせいは 200mm、長さは約 4m とした。

1.5.3 試験方法

各試験体について非破壊試験を行い、縦振動法によるヤング係数、および T.G.H.法による曲げヤング係数、せん断弾性係数を求めた。T.G.H.法による測定は面内方向、面外方向の 2 方向とし、1 次から 7 次の曲げ固有振動数を用いて各弾性係数を求めた。

面内曲げ試験の様子を写真 1.5.3-1 に示す。面内曲げ試験は、最大容量が 200kN の実大強度試験機（東京衡機製造所）を用いて 3 等分点 4 点荷重方式で実施した。全スパンは試験体のせい 200mm の 18 倍の 3600mm とし、荷重点間距離は 1200mm とした。荷重点の幅は 150mm、支点の幅は 180mm であった。得られた荷重データを用いて見かけの曲げヤング係数、および曲げ強さを算出した。試験後、破壊部の近傍から長さ約 30mm の材を採取し、全乾法で含水率を求めた。

1.5.4 試験結果および考察

5 層 5 プライ、7 層 7 プライの試験体の非破壊試験結果および面内曲げ試験結果をそれぞれ表 1.5.4-1～表 1.5.4-4、表 1.5.4-5～表 1.5.4-8 に示す。

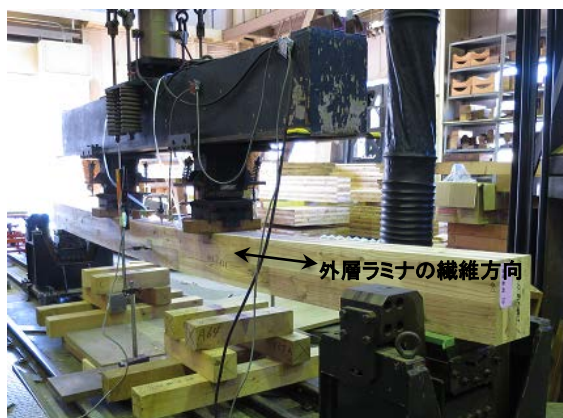
外層が強軸方向の試験体においては、密度、縦振動法によるヤング係数（E_{fr}）、T.G.H.法による面内方向の曲げヤング係数（E_{TGhe}）、面外方向の曲げヤング係数（E_{TGHf}）、面内方向のせん断弾性係数（G_{TGhe}）、面外方向のせん断弾性係数（G_{TGHf}）の値のばらつきは小さかった。それぞれの層構成の CLT において、E_{fr} と E_{TGhe} は同程度の値であった。外層のラミナの影響により E_{TGHf} は E_{TGhe} よりも高い値となった。G_{TGhe} は G_{TGHf} よりも高かった。

外層が弱軸方向の試験体においては、密度、E_{fr}、E_{TGhe}、E_{TGHf}、G_{TGhe}、G_{TGHf} の値のばらつきは小さかった。それぞれの層構成の CLT において、E_{fr} と E_{TGhe} は同程度の値であった。外層ラミナが弱軸方向のため、E_{TGHf} は E_{TGhe} より低い値となった。G_{TGhe} は外層が強軸方向の試験体と同程度であった。G_{TGHf} は外層が強軸方向は試験体に比べてやや低い傾向にあった。

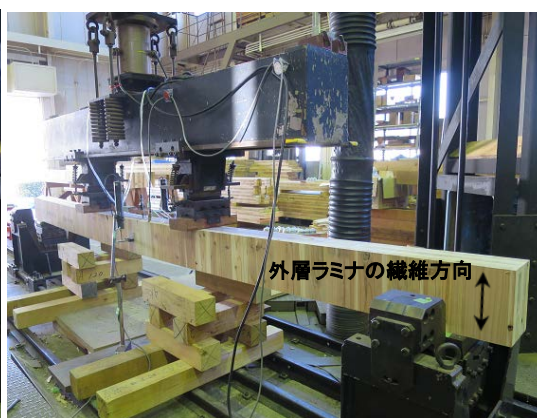
面内曲げ試験の結果、外層ラミナの繊維方向が強軸方向、弱軸方向の試験体いずれにおいても、幅 105mm のラミナで構成された試験体に比べて、幅 251mm の幅はぎラミナで構成された試験体の曲げ強さはやや高い傾向にあった。

表 1.5.2-1 CLT 面内曲げ試験体の仕様

樹種	等級 構成	ラミナ 幅 (mm)	ラミナ 厚さ (mm)	外層ラミナ の繊維方向	試験体数	試験体番号
スギ	S60-5-5	105	30	強軸方向	6	M6-1-1・1～6
				弱軸方向	6	M6-1-2・1～6
		251	30	強軸方向	6	M6-3-1・1～6
				弱軸方向	6	M6-3-2・1～6
	S60-7-7	105	25	強軸方向	4	M6-2-1・1～4
				弱軸方向	4	M6-2-2・1～4
		251	25	強軸方向	4	M6-4-1・1～4
				弱軸方向	4	M6-4-2・1～4



外層ラミナの繊維方向：強軸



外層ラミナの繊維方向：弱軸

写真 1.5.3-1 面内曲げ試験の様子

表 1.5.4-1 幅 105mm ラミナ 5 層 5 プライ CLT（強軸方向）の面内曲げ試験結果

番号	ρ	E _{fr}	E _{TGHf}	G _{TGHf}	E _{TGHe}	G _{TGHe}	E	σ	MC
M6-1-1 -1	452	4.81	5.82	0.30	4.68	0.94	4.29	17.3	10.7
M6-1-1 -2	476	5.09	6.56	0.32	5.27	0.88	4.59	16.1	10.6
M6-1-1 -3	453	5.03	6.61	0.31	4.99	0.81	4.37	14.0	10.7
M6-1-1 -4	454	4.57	5.50	0.30	4.34	0.83	3.95	14.5	10.7
M6-1-1 -5	420	4.70	6.32	0.33	4.72	0.76	4.24	15.2	10.4
M6-1-1 -6	429	4.82	5.97	0.30	4.83	0.74	4.51	14.3	10.6
平均値	447	4.84	6.13	0.31	4.81	0.82	4.32	15.2	10.6
最小値	420	4.57	5.50	0.30	4.34	0.74	3.95	14.0	10.4
最大値	476	5.09	6.61	0.33	5.27	0.94	4.59	17.3	10.7
標準偏差	20.1	0.20	0.44	0.01	0.31	0.08	0.23	1.28	0.12
変動係数(%)	4.49	4.04	7.16	4.73	6.49	9.31	5.25	8.40	1.12

表 1.5.4-2 幅 105mm ラミナ 5 層 5 プライ CLT（弱軸方向）の面内曲げ試験結果

番号	ρ	E _{fr}	E _{TGHf}	G _{TGHf}	E _{TGHe}	G _{TGHe}	E	σ	MC
M6-1-2 -1	471	4.15	2.39	0.20	4.20	0.88	3.67	13.3	10.3
M6-1-2 -2	447	4.05	2.20	0.18	3.97	0.68	3.74	13.3	10.1
M6-1-2 -3	455	3.59	2.06	0.17	3.60	0.73	3.35	11.9	10.5
M6-1-2 -4	460	4.23	2.41	0.19	4.26	0.68	3.70	10.5	10.5
M6-1-2 -5	470	3.63	2.15	0.19	3.69	0.95	3.27	12.3	10.2
M6-1-2 -6	472	4.01	2.27	0.17	4.00	0.83	3.66	15.6	10.4
平均値	463	3.94	2.25	0.18	3.95	0.79	3.56	12.8	10.3
最小値	447	3.59	2.06	0.17	3.60	0.68	3.27	10.5	10.1
最大値	472	4.23	2.41	0.20	4.26	0.95	3.74	15.6	10.5
標準偏差	10.0	0.27	0.14	0.01	0.27	0.11	0.20	1.70	0.17
変動係数(%)	2.16	6.80	6.15	6.54	6.77	14.2	5.65	13.3	1.65

ρ : 密度 (kg/m³)

E_{fr} : 縦振動法による縦弾性係数 (単位 kN/mm²)

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

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

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

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

E : 強度試験で得られた面内方向の見かけの曲げヤング係数 (単位 kN/mm²)

σ : 強度試験で得られた面内方向の曲げ強さ (単位 N/mm²)

MC : 含水率 (単位%)

表 1.5.4-3 幅 251mm ラミナ 5 層 5 プライ CLT (強軸方向) の面内曲げ試験結果

番号	ρ	Efr	E _{TGHf}	G _{TGHf}	E _{TGHe}	G _{TGHe}	E	σ	MC
M6-3-1 -1	438	5.37	6.57	0.27	5.24	0.84	4.77	18.4	10.5
M6-3-1 -2	428	5.28	6.63	0.27	5.09	0.75	4.73	20.1	10.7
M6-3-1 -3	463	6.04	8.24	0.28	5.78	0.75	5.36	21.0	10.6
M6-3-1 -4	457	4.96	6.12	0.29	4.85	0.93	4.33	20.8	10.2
M6-3-1 -5	442	5.57	6.67	0.25	5.59	0.72	5.13	18.4	11.0
M6-3-1 -6	436	4.99	6.50	0.27	5.07	0.64	4.79	19.4	10.2
平均値	444	5.37	6.79	0.27	5.27	0.77	4.85	19.7	10.5
最小値	428	4.96	6.12	0.25	4.85	0.64	4.33	18.4	10.2
最大値	463	6.04	8.24	0.29	5.78	0.93	5.36	21.0	11.0
標準偏差	13.4	0.40	0.74	0.01	0.35	0.10	0.35	1.12	0.27
変動係数(%)	3.03	7.50	10.9	4.70	6.68	12.9	7.30	5.71	2.60

表 1.5.4-4 幅 251mm ラミナ 5 層 5 プライ CLT (弱軸方向) の面内曲げ試験結果

番号	ρ	Efr	E _{TGHf}	G _{TGHf}	E _{TGHe}	G _{TGHe}	E	σ	MC
M6-3-2 -1	435	3.47	2.09	0.16	3.32	0.82	3.03	11.3	10.6
M6-3-2 -2	469	3.78	2.10	0.19	3.86	0.93	3.39	17.2	10.5
M6-3-2 -3	446	3.96	2.18	0.18	3.92	0.72	3.63	13.8	9.6
M6-3-2 -4	464	3.85	2.24	0.15	3.90	0.91	3.53	14.9	10.6
M6-3-2 -5	436	3.48	2.03	0.18	3.45	0.73	3.08	13.3	9.8
M6-3-2 -6	454	4.14	2.22	0.18	4.29	0.72	4.00	15.3	9.8
平均値	450	3.78	2.14	0.17	3.79	0.80	3.44	14.3	10.1
最小値	435	3.47	2.03	0.15	3.32	0.72	3.03	11.3	9.6
最大値	469	4.14	2.24	0.19	4.29	0.93	4.00	17.2	10.6
標準偏差	14.1	0.27	0.08	0.02	0.35	0.10	0.36	2.00	0.45
変動係数(%)	3.12	7.01	3.89	8.87	9.26	11.9	10.5	14.0	4.40

ρ : 密度 (kg/m³)

Efr : 縦振動法による縦弾性係数 (単位 kN/mm²)

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

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

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

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

E : 強度試験で得られた面内方向の見かけの曲げヤング係数 (単位 kN/mm²)

σ : 強度試験で得られた面内方向の曲げ強さ (単位 N/mm²)

MC : 含水率 (単位%)

表 1.5.4-5 幅 105mm ラミナ 7 層 7 プライ CLT (強軸方向) の面内曲げ試験結果

番号	ρ	E _{fr}	E _{TGHf}	G _{TGHf}	E _{TGHe}	G _{TGHe}	E	σ	MC
M6-2-1 -1	460	4.65	5.59	0.32	4.67	0.87	4.24	15.9	10.5
M6-2-1 -2	470	4.59	5.71	0.31	4.56	0.82	4.11	16.2	10.8
M6-2-1 -3	468	4.88	5.57	0.33	5.08	0.84	4.49	17.6	10.7
M6-2-1 -4	460	4.91	5.47	0.32	4.96	0.80	4.45	14.1	10.6
平均値	464	4.76	5.58	0.32	4.82	0.83	4.32	15.9	10.7
最小値	460	4.59	5.47	0.31	4.56	0.80	4.11	14.1	10.5
最大値	470	4.91	5.71	0.33	5.08	0.87	4.49	17.6	10.8
標準偏差	5.46	0.16	0.10	0.01	0.24	0.03	0.18	1.42	0.11
変動係数(%)	1.18	3.41	1.76	2.64	5.07	3.74	4.20	8.94	1.02

表 1.5.4-6 幅 105mm ラミナ 7 層 7 プライ CLT (弱軸方向) の面内曲げ試験結果

番号	ρ	E _{fr}	E _{TGHf}	G _{TGHf}	E _{TGHe}	G _{TGHe}	E	σ	MC
M6-2-2 -1	464	4.05	2.93	0.22	4.18	0.79	3.80	11.9	10.3
M6-2-2 -2	468	3.72	2.65	0.23	3.62	0.94	3.26	11.2	10.2
M6-2-2 -3	485	3.94	2.72	0.23	3.81	0.81	3.47	14.8	10.9
M6-2-2 -4	477	3.58	2.36	0.23	3.47	0.84	3.21	12.8	10.4
平均値	474	3.82	2.67	0.23	3.77	0.85	3.43	12.7	10.4
最小値	464	3.58	2.36	0.22	3.47	0.79	3.21	11.2	10.2
最大値	485	4.05	2.93	0.23	4.18	0.94	3.80	14.8	10.9
標準偏差	9.74	0.21	0.24	0.00	0.30	0.07	0.27	1.56	0.28
変動係数(%)	2.06	5.57	8.95	2.08	8.09	7.98	7.75	12.3	2.68

ρ : 密度 (kg/m³)

E_{fr} : 縦振動法による縦弾性係数 (単位 kN/mm²)

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

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

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

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

E : 強度試験で得られた面内方向の見かけの曲げヤング係数 (単位 kN/mm²)

σ : 強度試験で得られた面内方向の曲げ強さ (単位 N/mm²)

MC : 含水率 (単位%)

表 1.5.4-7 幅 251mm ラミナ 7 層 7 プライ CLT (強軸方向) の面内曲げ試験結果

番号	ρ	E _{fr}	E _{TGH^f}	G _{TGH^f}	E _{TGH^e}	G _{TGH^e}	E	σ	MC
M6-4-1 -1	433	4.67	5.54	0.28	5.00	0.71	4.53	16.9	11.0
M6-4-1 -2	441	4.59	5.33	0.30	4.61	0.79	4.19	16.8	10.1
M6-4-1 -3	438	5.22	6.47	0.27	5.28	0.82	5.06	17.2	11.1
M6-4-1 -4	446	4.86	5.83	0.29	4.99	0.93	4.45	16.6	10.7
平均値	439	4.84	5.79	0.29	4.97	0.82	4.56	16.9	10.7
最小値	433	4.59	5.33	0.27	4.61	0.71	4.19	16.6	10.1
最大値	446	5.22	6.47	0.30	5.28	0.93	5.06	17.2	11.1
標準偏差	5.30	0.28	0.50	0.01	0.28	0.09	0.36	0.21	0.42
変動係数(%)	1.21	5.84	8.55	3.84	5.55	11.3	7.98	1.22	3.94

表 1.5.4-8 幅 251mm ラミナ 7 層 7 プライ CLT (弱軸方向) の面内曲げ試験結果

番号	ρ	E _{fr}	E _{TGH^f}	G _{TGH^f}	E _{TGH^e}	G _{TGH^e}	E	σ	MC
M6-4-2 -1	421	3.77	2.48	0.19	3.96	0.85	3.73	13.1	10.3
M6-4-2 -2	407	3.39	2.35	0.17	3.22	0.77	3.01	13.2	11.3
M6-4-2 -3	423	3.82	2.36	0.15	3.69	0.65	3.30	15.2	11.0
M6-4-2 -4	420	3.51	2.33	0.16	3.32	0.77	3.02	11.6	10.7
平均値	418	3.62	2.38	0.17	3.55	0.76	3.27	13.3	10.8
最小値	407	3.39	2.33	0.15	3.22	0.65	3.01	11.6	10.3
最大値	423	3.82	2.48	0.19	3.96	0.85	3.73	15.2	11.3
標準偏差	7.01	0.21	0.07	0.02	0.34	0.08	0.34	1.47	0.40
変動係数(%)	1.68	5.73	2.77	11.6	9.50	10.6	10.4	11.1	3.72

ρ : 密度 (kg/m³)

E_{fr} : 縦振動法による縦弾性係数 (単位 kN/mm²)

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

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

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

E : 強度試験で得られた面内方向の見かけの曲げヤング係数 (単位 kN/mm²)

σ : 強度試験で得られた面内方向の曲げ強さ (単位 N/mm²)

MC : 含水率 (単位%)

1.6 面内せん断試験

1.6.1 試験方法

(1) 試験体

試験体には幅が 2000mm で、高さが 1800mm、のスギ CLT パネルを用いた。CLT パネルは、幅が 105mm、厚さが 30mm のラミナで構成される。パネルには写真 1 のように、中央が幅 840mm 高さ 630mm となるようなくびれを設けた。試験体上部および下部には、厚さ 24mm の構造用合板を接着した。

表 1.6.1 に試験体の一覧を示す。パラメータは、層構成が 2 種類（3 層 3 プライ、5 層 5 プライ）、ラミナの幅はぎ部分が接着されているものといないものの 2 種類、最外層のラミナの繊維方向が 2 種類（鉛直、水平）、CLT の等級[1]が 2 種類（Mx60、S60）で、計 16 種類とした。各パラメータにつき 1 体ずつ試験を実施した。

表 1.6.1 試験体一覧

試験体名	層構成	幅はぎ接着 あり／なし	最外層のラミナの方向	等級
HN90KX	3 層 3 プライ	なし	鉛直	Mx60
HN90KS				S60
HN90JX			水平	Mx60
HN90JS				S60
HA90KX		あり	鉛直	Mx60
HA90KS				S60
HA90JX			水平	Mx60
HA90JS				S60
HN150KX	5 層 5 プライ	なし	鉛直	Mx60
HN150KS				S60
HN150JX			水平	Mx60
HN150JS				S60
HA150KX		あり	鉛直	Mx60
HA150KS				S60
HA150JX			水平	Mx60
HA150JS				S60

(2) 実験方法

写真 1.6.1 及び図 1.6.1 に示すセットアップのように実験には、既往の研究[2]と同様の装置を用いた。4.8mm/分の単調載荷で水平荷重を与えた。最大荷重の 80%まで荷重が低下、または脆性破壊するまで載荷を続けた。くびれ部分に図 1.6.2 のように変位計を取りつけ、CLT パネルの平均せん断変形角を計測した。



(a) エ形 CLT パネル



(b) 計測の様子

写真 1.6.1 試験体セットアップ

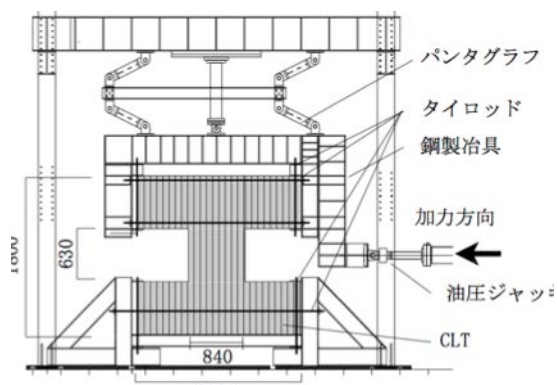


図 1.6.1 試験概要

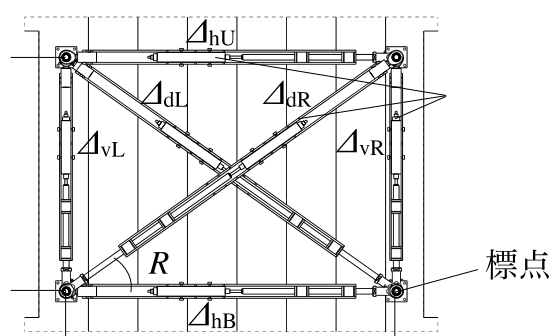


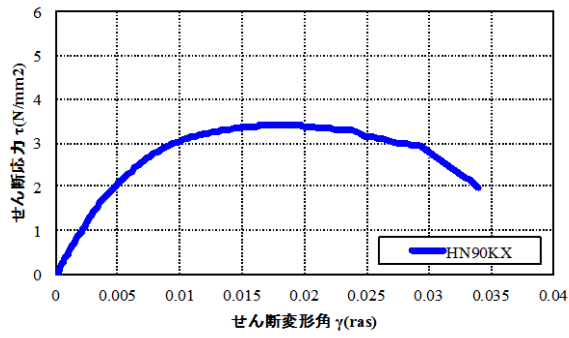
図 1.6.2 変位の計測位置

1.6.3 実験結果

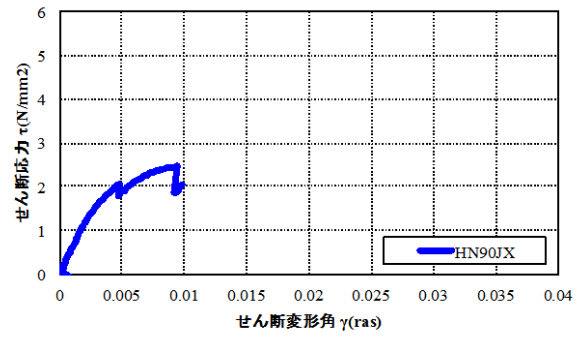
図 1.6.3～図 1.6. 6 にせん断応力度変形角関係を示す。写真 1.6.2～写真 1.6.5 に破壊した試験体の様子と、せん断応力度変形角関係を示す。

1.6.4 試験結果の考察

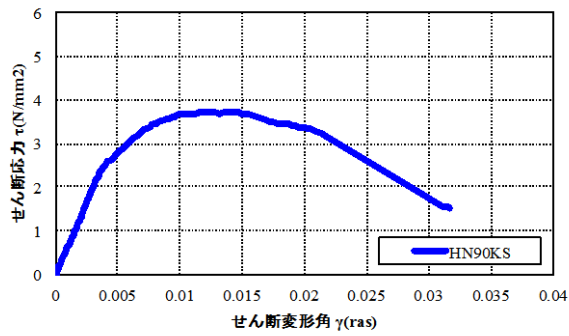
3層3プライでは、Mx60 と S60 のいずれの試験体でも、幅はぎ接着ありでは、なしにくらべ、強度と初期剛性はともに大きくなった。幅はぎ接着ありでは、弾性域が広く、破壊が脆性的で、せん断応力度変形角関係は直線的となった。これに対し、幅はぎ接着なしでは、剛性が徐々に低下し、ゆるやかに荷重が低下する傾向がみられた。ただし、幅はぎ接着なしで、最外層のラミナが水平方向の場合は、試験体の補強されている部分の近くで脆性的な破壊が生じた。5層5プライでは、3層3プライと同様の傾向がみられた。



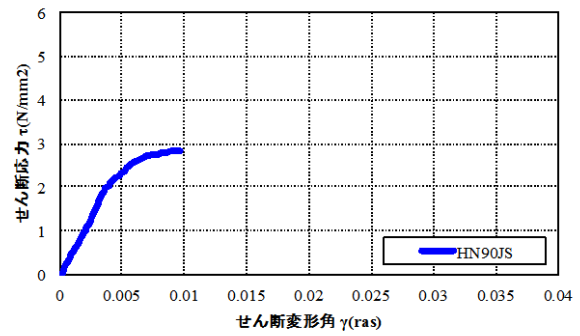
(a) HN90KX 鉛直 Mx60



(c) HN90JX 水平 MX60

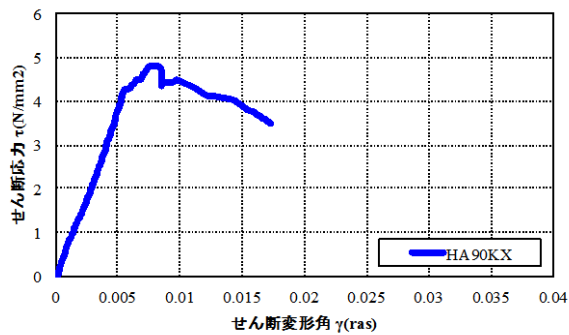


(b) HN90KS 鉛直 S60

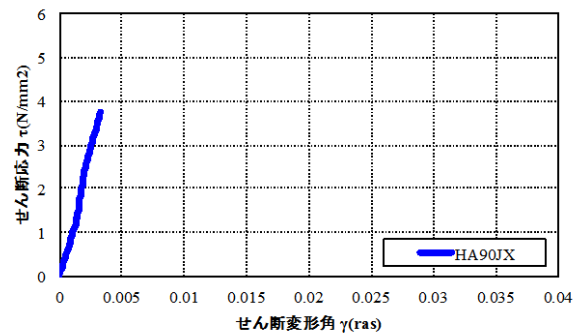


(d) HN90JS 水平 S60

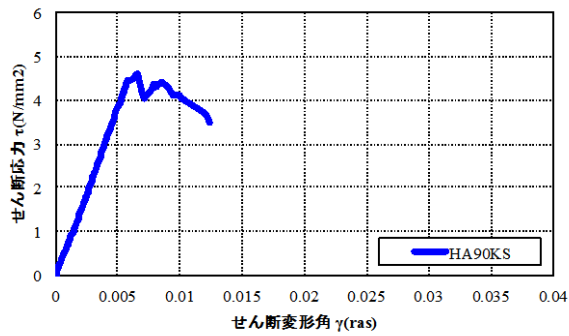
図 1.6.3 HN90 3層3プライ 幅はぎ接着なし



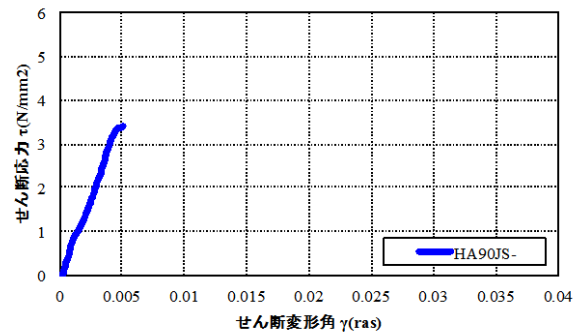
(a) HA90KX 鉛直 Mx60



(c) HA90JX 水平 Mx60

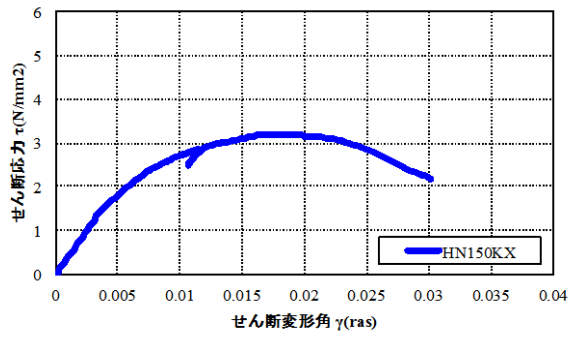


(b) HA90KS 鉛直 S60

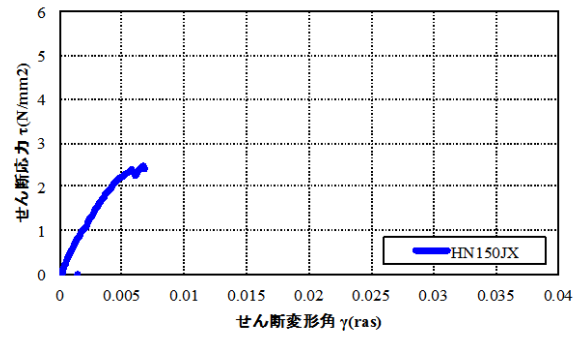


(d) HA90JS 水平 S60

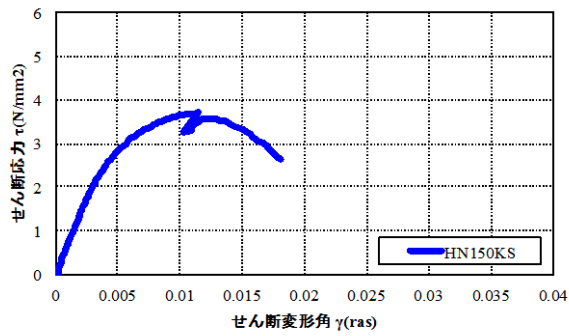
図 1.6.4 HA90 3層3プライ 幅はぎ接着あり



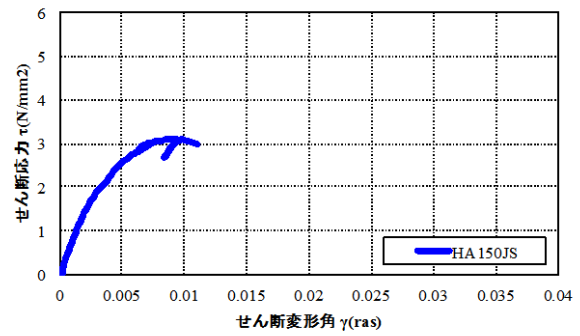
(a) HN150KX 鉛直 Mx60



(c) HN 150JX 水平 Mx60

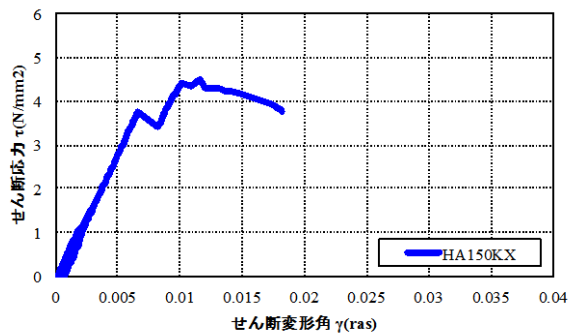


(b) HN150KS 鉛直 S60

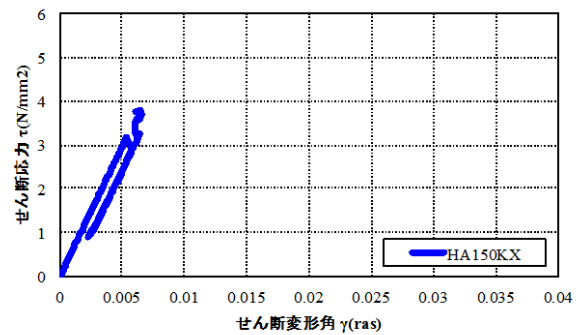


(d) HN150JS 水平 S60

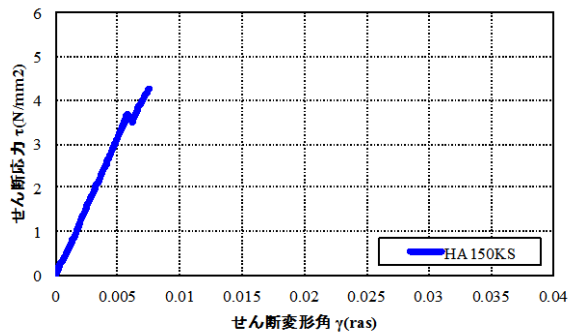
図 1.6.5 HN150 5層5プライ 幅はぎ接着なし



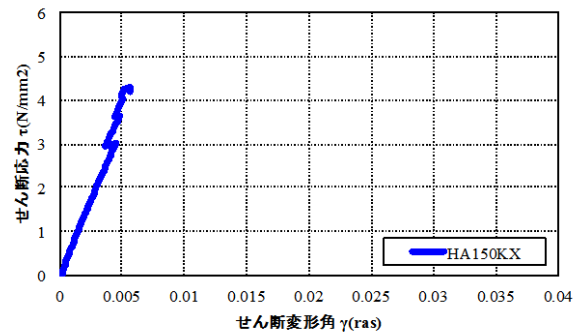
(a) HA150KX 鉛直 Mx60



(c) HA150JX 水平 Mx60



(b) HA150KS 鉛直 S60



(d) HA150JS 水平 S60

図 1.6.6 HA150 5層5プライ 幅はぎ接着あり



(a) HN90KX 鉛直 Mx60



(c) HN90JX 水平 MX60



(b) HN90KS 鉛直 S60



(d) HN90JS 水平 S60

写真 1.6.2 HN90 3層3プライ 幅はぎ接着なし



(a) HA90KX 鉛直 Mx60



(c) HA90JX 水平 Mx60



(b) HA90KS 鉛直 S60



(d) HA90JS 水平 S60

写真 1.6.3 HA90 3層3プライ 幅はぎ接着あり



(a) HN150KX 鉛直 Mx60



(c) HN 150JX 水平 Mx60



(b) HN150KS 鉛直 S60



(d) HN150JS 水平 S60

写真 1.6.4 HN150 5層5プライ 幅はぎ接着なし



(a) HA150KX 鉛直 Mx60



(c) HA150JX 水平 Mx60



(b) HA150KS 鉛直 S60



(d) HA150JS 水平 S60

写真 1.6.5 HA150 5層5プライ 幅はぎ接着あり

(5) 参考文献

- [1] 農林水産省：直交集成板の日本農林規格、2013年.
- [2] 中島昌一、荒木康弘、孕石剛志、中島史郎、宮武 敦：CLT の面内せん断性能に層構成とラミナ等級が与える影響、日本建築学会大会学術講演梗概集、2015 年

1.7 圧縮試験（短柱）

1.7.1 試験方法

短柱圧縮試験に用いた CLT の概要を表 1.7-1 に示す。試験体は、縦振動法によって非破壊的にヤング係数 (E_{fr}) を測定したのち、最大容量が 3000kN の圧縮試験機（前川試験機製作所製、A-300-B4）を用いて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 5 分になるように調整し、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 1.7-1 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) を、比例限度荷重ならびに最大荷重から縦圧縮比例限度応力および縦圧縮強度を算出した。

表 1.7-1 短柱圧縮試験に用いた CLT の概要

等級・構成	幅はぎ接着	ラミナ幅	試験体数	
S60-5-5	あり	105	強軸・弱軸各 5 体	強軸 20 体 弱軸 20 体
	なし	105	強軸・弱軸各 5 体	
	なし	251	強軸・弱軸各 5 体	
Mx60-5-5	あり	105	強軸・弱軸各 5 体	
S60-7-7	あり	105	強軸・弱軸各 3 体	強軸 12 体 弱軸 12 体
	なし	105	強軸・弱軸各 3 体	
	なし	251	強軸・弱軸各 3 体	
Mx60-7-7	あり	105	強軸・弱軸各 3 体	



写真 1.7-1 短柱圧縮試験の様子（左：5層5プライ、右：7層7プライ）

1.7.2 試験結果

ア) 幅はぎ接着のない試験体

(1) 非破壊試験

表 1.7-2 非破壊試験の結果

(5層5ply 強軸 S60A-105 幅はぎ無)

5-5 強 S60A-105 無		E _{fr} 縦振動 (kN/mm ²)
番号	密度 (kg/m ³)	
M6-1-1-1	427	4.58
M6-1-1-2	476	5.34
M6-1-1-3	461	4.91
M6-1-1-4	461	5.04
M6-1-1-5	443	4.61
平均	454	4.90
最大	476	5.34
最小	427	4.58
標準偏差	19.0	0.313
変動係数	4.18%	6.40%

表 1.7-3 非破壊試験の結果

(5層5ply 弱軸 S60A-105 幅はぎ無)

5-5 弱 S60A-105 無		E _{fr} 縦振動 (kN/mm ²)
番号	密度 (kg/m ³)	
M6-1-2-1	448	3.19
M6-1-2-2	462	2.99
M6-1-2-3	460	3.56
M6-1-2-4	452	3.54
M6-1-2-5	465	3.97
平均	458	3.45
最大	465	3.97
最小	448	2.99
標準偏差	7.29	0.377
変動係数	1.59%	10.9%

表 1.7-4 非破壊試験の結果

(7層7ply 強軸 S60A-105 幅はぎ無)

7-7 強 S60A-105 無		E _{fr} 縦振動 (kN/mm ²)
番号	密度 (kg/m ³)	
M6-2-1-1	452	4.22
M6-2-1-2	471	4.33
M6-2-1-3	465	4.42
平均	463	4.32
最大	471	4.42
最小	452	4.22
標準偏差	9.80	0.102
変動係数	2.12%	2.36%

表 1.7-5 非破壊試験の結果

(7層7ply 弱軸 S60A-105 幅はぎ無)

7-7 弱 S60A-105 無		E _{fr} 縦振動 (kN/mm ²)
番号	密度 (kg/m ³)	
M6-2-2-1	468	3.95
M6-2-2-2	468	3.43
M6-2-2-3	477	3.51
平均	471	3.63
最大	477	3.95
最小	468	3.43
標準偏差	5.13	0.279
変動係数	1.09%	7.70%

(2) 破壊試験

表 1.7-6 短柱圧縮試験の結果(5層 5ply 強軸 S60A-105 幅はぎ無)

5-5 弱 S60A-105 無				
番号	弾性係数 (kN/mm ²)	比例限度応力 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	含水率 (%)
M6-1-1-1	4.72	15.3	22.3	10.7
M6-1-1-2	5.41	18.9	27.4	10.3
M6-1-1-3	5.19	17.8	26.7	10.0
M6-1-1-4	4.99	15.3	26.2	10.8
M6-1-1-5	4.64	15.3	21.1	11.5
平均	4.99	16.5	24.7	10.6
最大	5.41	18.9	27.4	11.5
最小	4.64	15.3	21.1	10.0
標準偏差	0.320	1.74	2.86	0.592
変動係数	6.42%	10.5%	11.6%	5.56%

表 1.7-7 短柱圧縮試験の結果(5層 5ply 弱軸 S60A-105 幅はぎ無)

5-5 弱 S60A-105 無				
番号	弾性係数 (kN/mm ²)	比例限度応力 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	含水率 (%)
M6-1-2-1	3.45	11.5	17.6	10.3
M6-1-2-2	2.66	10.3	17.5	10.4
M6-1-2-3	3.61	11.1	18.5	12.3
M6-1-2-4	3.52	11.9	17.2	9.87
M6-1-2-5	3.92	12.4	18.5	9.89
平均	3.43	11.4	17.8	10.6
最大	3.92	12.4	18.5	12.3
最小	2.66	10.3	17.2	9.87
標準偏差	0.468	0.803	0.588	1.01
変動係数	13.6%	7.0%	3.3%	9.58%

表 1.7-8 短柱圧縮試験の結果（7 層 7ply 強軸 S60A-105 幅はぎ無）

7-7 強 S60A-105 無				
番号	弾性係数 (kN/mm ²)	比例限度応力 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	含水率 (%)
M6-2-1-1	4.07	14.3	23.2	10.4
M6-2-1-2	4.28	13.9	23.2	10.8
M6-2-1-3	4.24	15.0	22.7	10.5
平均	4.20	14.4	23.1	10.6
最大	4.28	15.0	23.2	10.8
最小	4.07	13.9	22.7	10.4
標準偏差	0.113	0.590	0.300	0.202
変動係数	2.70%	4.09%	1.30%	1.91%

表 1.7-9 短柱圧縮試験の結果（7 層 7ply 弱軸 S60A-105 幅はぎ無）

7-7 弱 S60A-105 無				
番号	弾性係数 (kN/mm ²)	比例限度応力 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	含水率 (%)
M6-2-2-1	3.92	12.3	19.5	10.4
M6-2-2-2	3.39	11.6	19.0	11.2
M6-2-2-3	3.28	10.5	17.9	10.6
平均	3.53	11.5	18.8	10.7
最大	3.92	12.3	19.5	11.2
最小	3.28	10.5	17.9	10.4
標準偏差	0.339	0.889	0.826	0.421
変動係数	9.61%	7.74%	4.40%	3.93%

イ) 幅はぎ接着のある試験体

イ a) 同一等級構成

(1) 非破壊試験

表 1.7-10 非破壊試験の結果
(5 層 5ply 強軸 S60A-105 幅はぎ有)

5-5 強 S60A-105 有		E _{fr} 縦振動 (kN/mm ²)
番号	密度 (kg/m ³)	
Y6-1-Ma_1	410	4.24
Y6-1-Ma_2	403	4.23
Y6-1-Ma_3	423	4.93
Y6-1-Ma_4	434	4.90
Y6-1-Ma_5	465	4.63
平均	427	4.59
最大	465	4.93
最小	403	4.23
標準偏差	24.2	0.344
変動係数	5.66%	7.50%

表 1.7-11 非破壊試験の結果
(5 層 5ply 弱軸 S60A-105 幅はぎ有)

5-5 弱 S60A-105 有		E _{fr} 縦振動 (kN/mm ²)
番号	密度 (kg/m ³)	
Y6-1-Mi_1	398	2.64
Y6-1-Mi_2	393	2.59
Y6-1-Mi_3	423	3.26
Y6-1-Mi_4	413	3.07
Y6-1-Mi_5	400	2.86
平均	405	2.88
最大	423	3.26
最小	393	2.59
標準偏差	12.17	0.286
変動係数	3.00%	9.92%

表 1.7-12 非破壊試験の結果
(7 層 7ply 強軸 S60A-105 幅はぎ有)

7-7 強 S60A-105 有		E _{fr} 縦振動 (kN/mm ²)
番号	密度 (kg/m ³)	
Y6-2-Ma_1	386	4.12
Y6-2-Ma_2	394	4.39
Y6-2-Ma_3	395	4.10
平均	392	4.20
最大	395	4.39
最小	386	4.10
標準偏差	4.80	0.165
変動係数	1.23%	3.94%

表 1.7-13 非破壊試験の結果
(7 層 7ply 弱軸 S60A-105 幅はぎ有)

7-7 弱 S60A-105 有		E _{fr} 縦振動 (kN/mm ²)
番号	密度 (kg/m ³)	
Y6-2-Mi_1	407	3.78
Y6-2-Mi_2	405	3.74
Y6-2-Mi_3	412	3.47
平均	408	3.66
最大	412	3.78
最小	405	3.47
標準偏差	3.47	0.169
変動係数	0.85%	4.62%

(2) 破壊試験

表 1.7-14 短柱圧縮試験の結果 (5 層 5ply 弱軸 S60A-105 幅はぎ有)

5-5 強 S60A-105 有				
番号	弾性係数 (kN/mm^2)	比例限度応力 (N/mm^2)	圧縮強度 (N/mm^2)	含水率 (%)
Y6-1-Ma_1	4.23	13.8	21.2	11.8
Y6-1-Ma_2	4.01	12.2	19.8	11.2
Y6-1-Ma_3	4.99	15.7	23.3	10.5
Y6-1-Ma_4	5.19	16.4	24.5	11.1
Y6-1-Ma_5	4.36	15.4	24.3	10.9
平均	4.56	14.7	22.6	11.1
最大	5.19	16.4	24.5	11.8
最小	4.01	12.2	19.8	10.5
標準偏差	0.505	1.67	2.04	0.463
変動係数	11.1%	11.4%	9.0%	4.17%

表 1.7-15 短柱圧縮試験の結果 (5 層 5ply 弱軸 S60A-105 幅はぎ有)

5-5 弱 S60A-105 有				
番号	弾性係数 (kN/mm^2)	比例限度応力 (N/mm^2)	圧縮強度 (N/mm^2)	含水率 (%)
Y6-1-Mi_1	2.41	9.1	13.5	11.0
Y6-1-Mi_2	2.58	9.1	13.0	11.9
Y6-1-Mi_3	3.84	12.9	17.7	11.7
Y6-1-Mi_4	3.30	12.4	17.7	11.2
Y6-1-Mi_5	3.07	10.7	14.5	11.2
平均	3.04	10.9	15.3	11.4
最大	3.84	12.9	17.7	11.9
最小	2.41	9.1	13.0	11.0
標準偏差	0.575	1.78	2.27	0.39
変動係数	18.9%	16.4%	14.9%	3.39%

表 1.7-16 短柱圧縮試験の結果（7 層 7ply 強軸 S60A-105 幅はぎ有）

7-7 強 S60A-105 有				
番号	弾性係数 (kN/mm ²)	比例限度応力 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	含水率 (%)
Y6-2-Ma_1	4.23	13.3	19.4	10.6
Y6-2-Ma_2	4.26	13.8	20.4	11.0
Y6-2-Ma_3	4.07	13.4	19.6	10.7
平均	4.19	13.5	19.8	10.8
最大	4.26	13.8	20.4	11.0
最小	4.07	13.3	19.4	10.6
標準偏差	0.103	0.277	0.529	0.182
変動係数	2.46%	2.05%	2.67%	1.70%

表 1.7-17 短柱圧縮試験の結果（7 層 7ply 弱軸 S60A-105 幅はぎ有）

7-7 弱 S60A-105 有				
番号	弾性係数 (kN/mm ²)	比例限度応力 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	含水率 (%)
Y6-2-Mi_1	3.57	12.2	18.8	10.3
Y6-2-Mi_2	4.00	10.8	18.5	10.4
Y6-2-Mi_3	3.11	10.2	18.4	11.3
平均	3.56	11.1	18.6	10.7
最大	4.00	12.2	18.8	11.3
最小	3.11	10.2	18.4	10.3
標準偏差	0.445	1.014	0.192	0.539
変動係数	12.5%	9.17%	1.03%	5.04%

イ b) 異等級構成
(1) 非破壊試験

表 1.7-18 非破壊試験の結果
(5 層 5ply 強軸 M60B-105 幅はぎ有)

5 層 5 プライ強軸 M60B		E _{fr} 縦振動 (kN/mm ²)
番号	密度 (kg/m ³)	
Y6-5-Ma_1	399	4.03
Y6-5-Ma_2	399	4.05
Y6-5-Ma_3	381	4.20
Y6-5-Ma_4	399	4.27
Y6-5-Ma_5	381	4.33
平均	392	4.17
最大	399	4.33
最小	381	4.03
標準偏差	9.93	0.131
変動係数	2.53%	3.13%

表 1.7-19 非破壊試験の結果
(5 層 5ply 弱軸 M60B-105 幅はぎ有)

5 層 5 プライ弱軸 M60B		E _{fr} 縦振動 (kN/mm ²)
番号	密度 (kg/m ³)	
Y6-5-Mi_1	404	2.24
Y6-5-Mi_2	395	3.05
Y6-5-Mi_3	410	3.08
Y6-5-Mi_4	386	2.24
Y6-5-Mi_5	396	2.22
平均	398	2.57
最大	410	3.08
最小	386	2.22
標準偏差	9.3	0.454
変動係数	2.34%	17.72%

表 1.7-19 非破壊試験の結果
(7 層 7ply 強軸 M60B-105 幅はぎ有)

7 層 7 プライ強軸 M60B		E _{fr} 縦振動 (kN/mm ²)
番号	密度 (kg/m ³)	
Y6-6-Ma_1	434	3.87
Y6-6-Ma_2	425	3.98
Y6-6-Ma_3	446	4.16
平均	435	4.00
最大	446	4.16
最小	425	3.87
標準偏差	10.95	0.146
変動係数	2.52%	3.65%

表 1.7-19 非破壊試験の結果
(7 層 7ply 弱軸 M60B-105 幅はぎ有)

7 層 7 プライ弱軸 M60B		E _{fr} 縦振動 (kN/mm ²)
番号	密度 (kg/m ³)	
Y6-6-Mi_1	449	2.61
Y6-6-Mi_2	444	2.55
Y6-6-Mi_3	422	2.51
平均	438	2.56
最大	449	2.61
最小	422	2.51
標準偏差	14.4	0.048
変動係数	3.28%	1.89%

(2) 破壊試験

表 1.7-20 短柱圧縮試験の結果 (5 層 5ply 強軸 M60B-105 幅はぎ有)

5-5 強 M60B -105 有				
番号	弾性係数 (kN/mm ²)	比例限度応力 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	含水率 (%)
Y6-5-Ma_1	4.46	13.8	20.6	10.9
Y6-5-Ma_2	4.32	16.8	22.0	10.6
Y6-5-Ma_3	4.05	12.9	20.5	10.9
Y6-5-Ma_4	4.43	14.6	21.3	12.0
Y6-5-Ma_5	4.28	14.1	19.9	12.0
平均	4.31	14.4	20.9	11.3
最大	4.46	16.8	22.0	12.0
最小	4.05	12.9	19.9	10.6
標準偏差	0.160	1.45	0.798	0.649
変動係数	3.7%	10.0%	3.8%	5.74%

表 1.7-21 短柱圧縮試験の結果 (5 層 5ply 強軸 M60B-105 幅はぎ有)

5-5 弱 M60B -105 有				
番号	弾性係数 (kN/mm ²)	比例限度応力 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	含水率 (%)
Y6-5-Mi_1	2.04	7.6	13.3	10.9
Y6-5-Mi_2	3.48	11.9	15.9	10.2
Y6-5-Mi_3	3.38	12.9	16.6	10.9
Y6-5-Mi_4	2.02	8.2	12.4	10.8
Y6-5-Mi_5	2.16	8.7	13.3	10.8
平均	2.62	9.9	14.3	10.7
最大	3.48	12.9	16.6	10.9
最小	2.02	7.6	12.4	10.2
標準偏差	0.743	2.352	1.831	0.295
変動係数	28.41%	23.9%	12.8%	2.76%

表 1.7-22 短柱圧縮試験の結果（7 層 7ply 強軸 M60B-105 幅はぎ有）

7-7 強 M60B -105 有				
番号	弾性係数 (kN/mm ²)	比例限度応力 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	含水率 (%)
Y6-6-Ma_1	3.91	13.3	20.0	11.2
Y6-6-Ma_2	4.14	13.0	20.4	11.5
Y6-6-Ma_3	3.96	14.7	22.1	11.0
平均	4.00	13.7	20.8	11.2
最大	4.14	14.7	22.1	11.5
最小	3.91	13.0	20.0	11.0
標準偏差	0.121	0.886	1.08	0.248
変動係数	3.01%	6.49%	5.17%	2.22%

表 1.7-23 短柱圧縮試験の結果（7 層 7ply 強軸 M60B-105 幅はぎ有）

7-7 弱 M60B -105 有				
番号	弾性係数 (kN/mm ²)	比例限度応力 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	含水率 (%)
Y6-6-Mi_1	2.35	8.9	17.1	10.8
Y6-6-Mi_2	2.20	9.4	16.8	10.9
Y6-6-Mi_3	2.12	8.0	15.6	11.3
平均	2.22	8.8	16.5	11.0
最大	2.35	9.4	17.1	11.3
最小	2.12	8.0	15.6	10.8
標準偏差	0.115	0.680	0.789	0.286
変動係数	5.18%	7.75%	4.77%	2.61%

ウ) 幅はぎラミナを用いた試験体

(1) 非破壊試験

表 1.7-24 非破壊試験の結果

(5 層 5 強軸 S60A-251 幅はぎ無)

5-5 強 S60A-251 無		E _{fr} 縦振動 (kN/mm ²)
番号	密度 (kg/m ³)	
M6-3-1-1	435	4.63
M6-3-1-2	443	4.84
M6-3-1-3	452	5.73
M6-3-1-4	454	5.56
M6-3-1-5	445	5.54
平均	446	5.26
最大	454	5.73
最小	435	4.63
標準偏差	7.59	0.488
変動係数	1.70%	9.27%

表 1.7-25 非破壊試験の結果

(5 層 5ply 弱軸 S60A-251 幅はぎ無)

5-5 弱 S60A-251 無		E _{fr} 縦振動 (kN/mm ²)
番号	密度 (kg/m ³)	
M6-3-2-1	427	3.28
M6-3-2-2	457	2.98
M6-3-2-3	443	3.18
M6-3-2-4	448	4.06
M6-3-2-5	450	3.37
平均	445	3.37
最大	457	4.06
最小	427	2.98
標準偏差	11.0	0.408
変動係数	2.48%	12.1%

表 1.7-26 非破壊試験の結果

(7 層 7ply 強軸 S60A-251 幅はぎ無)

7-7 強 S60A-251 無		E _{fr} 縦振動 (kN/mm ²)
番号	密度 (kg/m ³)	
M6-4-1-1	459	4.51
M6-4-1-2	454	4.89
M6-4-1-3	447	4.93
平均	453	4.78
最大	459	4.93
最小	447	4.51
標準偏差	5.85	0.233
変動係数	1.29%	4.87%

表 1.7-27 非破壊試験の結果

(7 層 7ply 弱軸 S60A-251 幅はぎ無)

7-7 弱 S60A-251 無		E _{fr} 縦振動 (kN/mm ²)
番号	密度 (kg/m ³)	
M6-4-2-1	432	3.30
M6-4-2-2	420	3.60
M6-4-2-3	405	3.17
平均	419	3.35
最大	432	3.60
最小	405	3.17
標準偏差	13.7	0.220
変動係数	3.26%	6.57%

(2) 破壊試験

表 1.7-28 短柱圧縮試験の結果 (5 層 5ply 強軸 S60A-251 幅はぎ無)

5-5 強 S60A-251 無				
番号	弾性係数 (kN/mm ²)	比例限度応力 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	含水率 (%)
M6-3-1-1	4.55	18.6	22.2	10.8
M6-3-1-2	4.91	16.7	24.3	11.7
M6-3-1-3	5.57	15.7	27.3	11.0
M6-3-1-4	5.60	15.1	25.4	10.0
M6-3-1-5	5.33	16.0	24.5	9.68
平均	5.19	16.4	24.7	10.6
最大	5.60	18.6	27.3	11.7
最小	4.55	15.1	22.2	9.7
標準偏差	0.45	1.36	1.85	0.813
変動係数	8.8%	8.3%	7.5%	7.65%

表 1.7-29 短柱圧縮試験の結果 (5 層 5ply 弱軸 S60A-251 幅はぎ無)

5-5 弱 S60A-251 無				
番号	弾性係数 (kN/mm ²)	比例限度応力 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	含水率 (%)
M6-3-2-1	3.26	10.6	16.1	10.9
M6-3-2-2	2.87	10.7	17.4	10.6
M6-3-2-3	2.96	10.0	17.3	10.4
M6-3-2-4	3.89	13.3	19.4	9.88
M6-3-2-5	3.32	11.8	18.7	9.68
平均	3.26	11.3	17.8	10.3
最大	3.89	13.3	19.4	10.9
最小	2.87	10.0	16.1	9.7
標準偏差	0.402	1.32	1.30	0.512
変動係数 (%)	12.31%	11.7%	7.3%	4.97%

表 1.7-30 短柱圧縮試験の結果（7 層 7ply 強軸 S60A-251 幅はぎ無）

7-7 強 S60A-251 無				
番号	弾性係数 (kN/mm ²)	比例限度応力 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	含水率 (%)
M6-4-1-1	4.35	13.5	24.0	10.9
M6-4-1-2	4.75	15.0	22.5	11.4
M6-4-1-3	4.85	16.1	23.5	11.3
平均	4.65	14.9	23.3	11.2
最大	4.85	16.1	24.0	11.4
最小	4.35	13.5	22.5	10.9
標準偏差	0.266	1.31	0.746	0.300
変動係数	5.73%	8.80%	3.20%	2.68%

表 1.7-31 短柱圧縮試験の結果（7 層 7ply 弱軸 S60A-251 幅はぎ無）

7-7 弱 S60A-251 無				
番号	弾性係数 (kN/mm ²)	比例限度応力 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	含水率 (%)
M6-4-2-1	2.93	10.3	17.5	11.2
M6-4-2-2	3.49	12.0	17.1	10.9
M6-4-2-3	3.07	9.7	15.7	10.6
平均	3.16	10.7	16.8	10.9
最大	3.49	12.0	17.5	11.2
最小	2.93	9.7	15.7	10.6
標準偏差	0.291	1.22	0.920	0.302
変動係数	9.18%	11.4%	5.48%	2.77%

1.7.3 考察

ア) プライを幅はぎ接着する影響

幅はぎの有無（1.7.2.アと 1.7.2.イ a）について、強度を比較する。5 層 5 プライにおいては、強軸（図 1.7-1）、弱軸（図 1.7-2）ともに、幅はぎ有の方が若干低かった。7 層 7 プライにおいては、強軸（図 1.7-3）では、幅はぎ有の方が低かったが、弱軸（図 1.7-4）では同等であった。

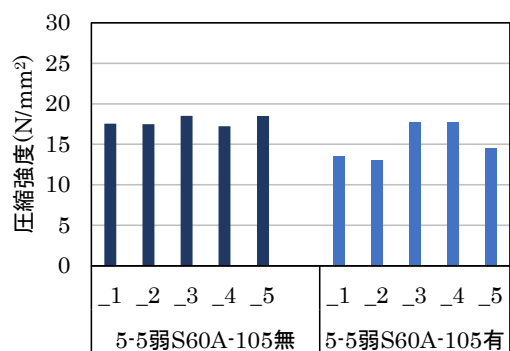
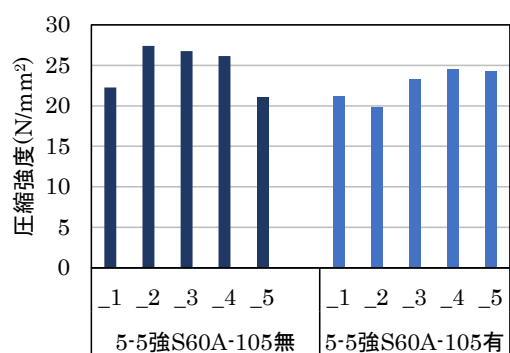
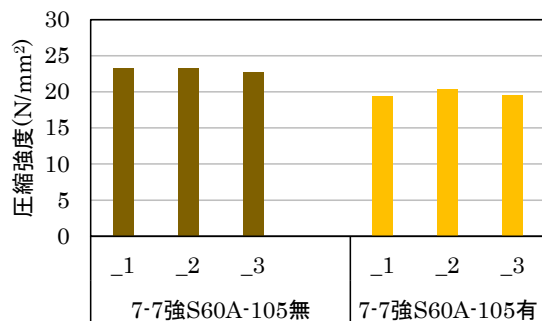


図 1.7-1 幅はぎの有無による
強度比較(5-5 強)

図 1.7-2 幅はぎの有無による
強度比較(5-5 弱)



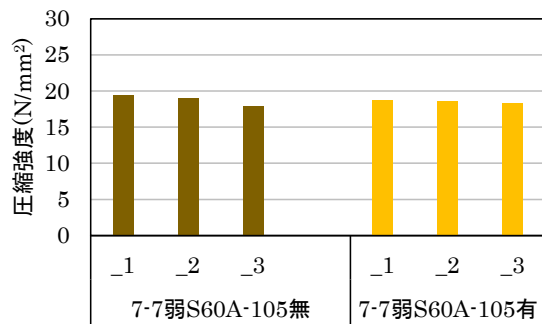


図 1.7-3 幅はぎの有無による
強度比較(7-7 強)

図 1.7-4 幅はぎの有無による
強度比較(7-7 弱)

イ) 幅はぎプライで構成した CLT におけるラミナ構成の影響

ラミナの等級構成が異なる S60A と M60B の幅はぎのある 2 種類 (1.7.2.イ a と 1.7.2.イ b) について、強度を比較する。5 層 5 プライでは、強軸 (図 1.7-5)、弱軸 (図 1.7-6) のともに同等であった。7 層 7 プライでは強軸 (図 1.7-7) においては、同等であったが、弱軸 (図 1.7-8) においては、M60B の方が若干低かった。

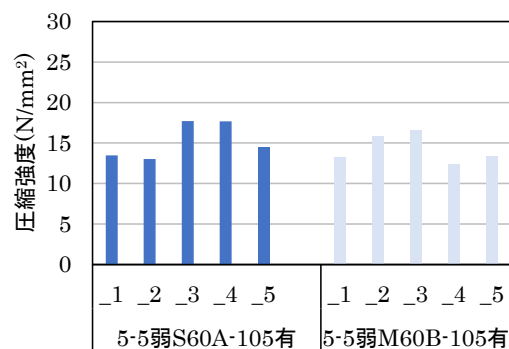
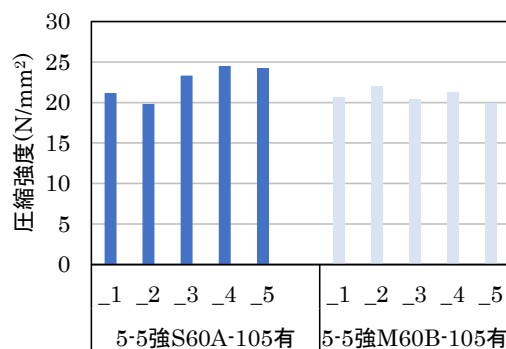


図 1.7-5 ラミナの構成の違いによる
強度比較(5-5 強)

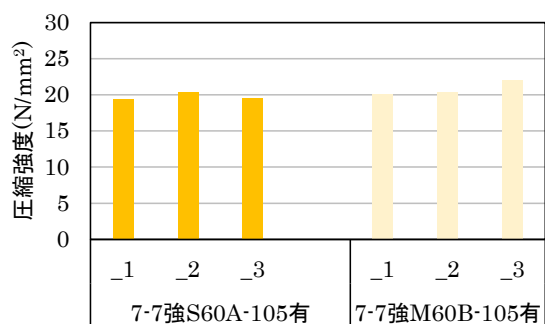


図 1.7-6 ラミナの構成の違いによる
強度比較(5-5 弱)

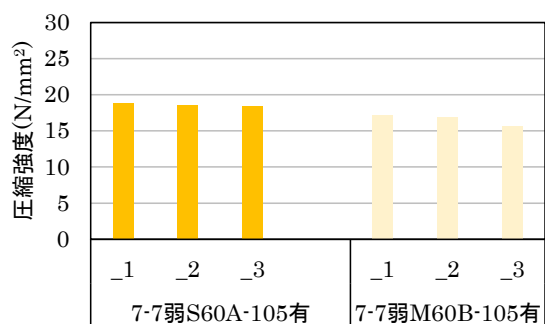


図 1.7-7 幅はぎの有無による
強度比較(7-7 強)

図 1.7-8 幅はぎの有無による
強度比較(7-7 弱)

ウ) 幅はぎラミナを用いる影響

幅はぎラミナ（幅 251mm）を用いた場合（1.7.2.ウ）の強度について、通常のラミナを用いた幅はぎ無（1.7.2.ア）、幅はぎ有（1.7.2.イ a）と比較する。5 層 5 プライにおいては、強軸（図 1.7-9）、弱軸（図 1.7-10）ともに、幅はぎ無と同等であった。7 層 7 プライにおいては、強軸（図 1.7-11）では、幅はぎ無と同等であったが、弱軸（図 1.7-12）では幅はぎラミナを用いた仕様

の方が幅はぎ無よりも若干低かった。

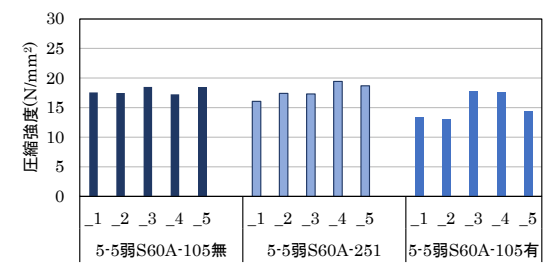
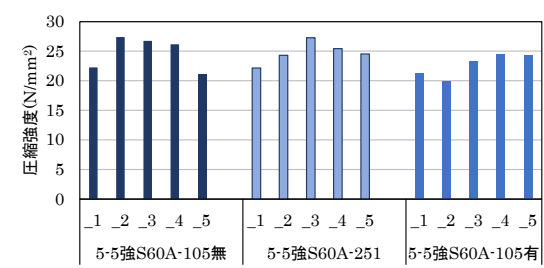


図 1.7-9 幅はぎラミナを用いた場合
の強度比較(5-5 強)

図 1.7-10 幅はぎラミナを用いた場
合
の強度比較(5-5 弱)

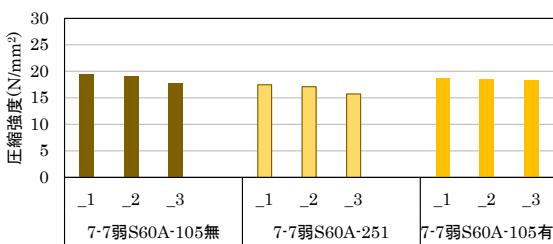
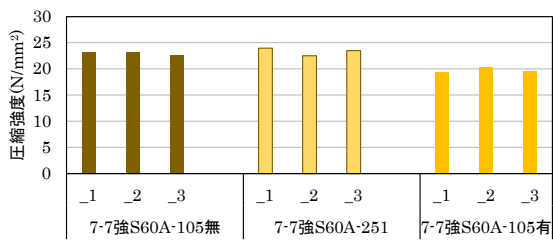
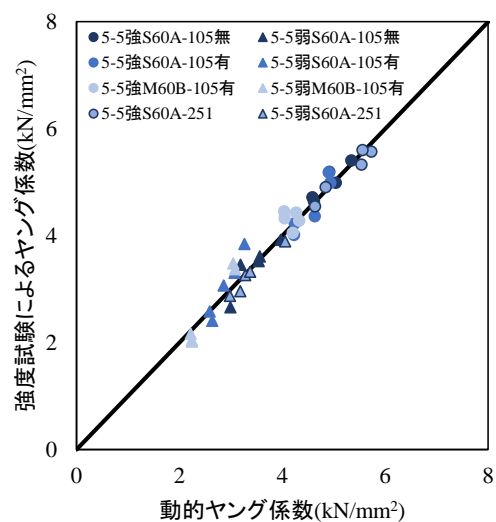


図 1.7-11 幅はぎラミナを用いた場合
の強度比較(7-7 強)

図 1.7-12 幅はぎラミナを用いた場
合
の強度比較(7-7 弱)

エ) その他の項目

強度試験による圧縮ヤング係数と縦振動法によるヤング係数の関係を図1.7-13に示す。5層5プライでは、両者はおおよそ同等にあるが、7層7プライにおいては、縦振動法によるヤング係数の方が強度試験によるヤング係数よりも若干高い傾向を示した。



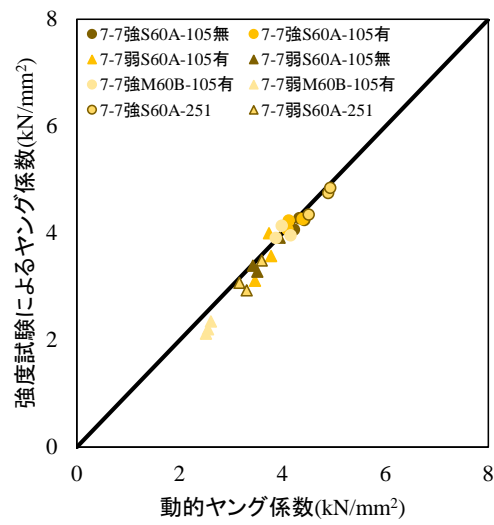


図 1.7-13 強度試験による圧縮ヤング係数と縦振動法によるヤング係数の比較

1.8 座屈試験（長柱・中間柱）

1.8.1 概要

表 1.8-1 に示す仕様の試験体（CLT）について座屈試験を行い、座屈荷重を求め、幅はぎの有無が座屈荷重に与える影響について考察した。とともに、実験によって得られた座屈荷重と既往の計算方法を用いて求めた座屈荷重を比較し、当該計算方法の CLT への適用の可否について考察した。

1.8.2 試験方法

表 1.8-1 に試験に供した CLT 試験体の仕様を示す。座屈試験は、試験体の弱軸方向に対して回転するようにピン支持し、試験体の弱軸方向の中立軸上に荷重を載荷する方法により行った。荷重載荷時の試験体頂部の鉛直変位と試験体中央部の水平変位を測定した。写真 1.8-1 に座屈試験を行っている様子を示す。

表 1.8-1 CLT 試験体の仕様

試験体No.	細長比 λ	強度等級	幅はぎ	ラミナ幅 (mm)	外層繊維方向	厚さ (mm)	幅 (mm)	長さ (mm)	数量
1	50	S60-5-5	無	105	強軸	150	300	2200	6
2	50	S60-5-5		105	弱軸	150	300	2200	6
3	50	S60-5-5		251	強軸	150	300	2200	6
4	50	S60-5-5		251	弱軸	150	300	2200	6
5	39.5	S60-7-7		105	強軸	175	300	2000	4
6	39.5	S60-7-7		105	弱軸	175	300	2000	4
7	39.5	S60-7-7		251	強軸	175	300	2000	4
8	39.5	S60-7-7		251	弱軸	175	300	2000	4
9	92.3	S60-5-5		105	強軸	150	300	4000	6
10	92.3	S60-5-5		105	弱軸	150	300	4000	6
11	92.3	S60-5-5		251	強軸	150	300	4000	6
12	92.3	S60-5-5		251	弱軸	150	300	4000	6
13	79.1	S60-7-7		105	強軸	175	300	4000	4
14	79.1	S60-7-7		105	弱軸	175	300	4000	4
15	79.1	S60-7-7		251	強軸	175	300	4000	4
16	79.1	S60-7-7		251	弱軸	175	300	4000	4
17	50	S60-5-5	有	105	強軸	150	300	2200	6
18	50	S60-5-5		105	弱軸	150	300	2200	6
19	50	Mx60-5-5		105	強軸	150	300	2200	6
20	50	Mx60-5-5		105	弱軸	150	300	2200	6
21	39.5	S60-7-7		105	強軸	175	300	2000	4
22	39.5	S60-7-7		105	弱軸	175	300	2000	4
23	39.5	Mx60-7-7		105	強軸	175	300	2000	4
24	39.5	Mx60-7-7		105	弱軸	175	300	2000	4
25	92.3	S60-5-5		105	強軸	150	300	4000	6
26	92.3	S60-5-5		105	弱軸	150	300	4000	6
27	92.3	Mx60-5-5		105	強軸	150	300	4000	6
28	92.3	Mx60-5-5		105	弱軸	150	300	4000	6
29	79.1	S60-7-7		105	強軸	175	300	4000	4
30	79.1	S60-7-7		105	弱軸	175	300	4000	4
31	79.1	Mx60-7-7		105	強軸	175	300	4000	4
32	79.1	Mx60-7-7		105	弱軸	175	300	4000	4



写真 1.8-1 座屈試験を行っている様子

1.8.3 試験結果

表 1.8-2 と表 1.8-3 に試験体の諸物性と試験体の座屈荷重をそれぞれ示す。

表 1.8-2 試験体の諸物性

強度等級	加力方向	幅 b (mm)	厚さ h (mm)	長さ L (mm)	重量 w (kg)	密度 ρ (kg/m ³)	真のE E (GPa)	真のG G (GPa)	含水率 $M.C.$ (%)
S60-5-5	強軸	300	152	2170	43.48	441	6.310	0.313	14.2
S60-5-5	弱軸	300	152	2170	44.06	445	2.008	0.193	12.8
S60-7-7	強軸	300	178	1976	48.98	464	5.258	0.318	17.0
S60-7-7	弱軸	300	178	1975	49.04	466	2.779	0.229	15.2
S60-5-5 ^{注1)}	強軸	300	150	2170	42.54	436	6.723	0.265	14.8
S60-5-5 ^{注1)}	弱軸	301	152	2170	42.82	431	2.130	0.126	14.3
S607-7 ^{注1)}	強軸	300	178	1976	47.60	452	5.277	0.300	14.2
S607-7 ^{注1)}	弱軸	299	178	1975	43.48	415	2.379	0.171	12.7
S60-5-5 ^{注3)}	強軸	301	151	2200	40.94	409	6.342	0.196	16.2
S60-5-5 ^{注3)}	弱軸	300	151	2200	40.36	405	1.620	0.158	13.8
Mx60-5-5 ^{注2,3)}	強軸	300	151	2200	39.53	397	7.032	0.201	14.3
Mx60-5-5 ^{注2,3)}	弱軸	300	150	2200	39.90	403	1.473	0.157	11.3

(注1) ラミナ幅250mm

(注2) B種

(注3) 幅はぎあり

表 1.8-3 試験体の座屈荷重等

強度等級	加力方向	幅 b (mm)	厚さ h (mm)	長さ L (mm)	弾性係数 E_a (GPa)	細長比 λ	座屈荷重 F_{cb} (kN)
S60-5-5	強軸	300	152	2170	5.72	49.6	745
S60-5-5	弱軸	300	152	2170	1.87	49.5	478
S60-7-7	強軸	300	178	1976	4.50	38.4	1641
S60-7-7	弱軸	300	178	1975	2.47	38.5	713
S60-5-5 ^{注1)}	強軸	300	150	2170	6.03	50.1	782
S60-5-5 ^{注1)}	弱軸	301	152	2170	1.88	49.5	434
S607-7 ^{注1)}	強軸	300	178	1976	4.53	38.6	908
S607-7 ^{注1)}	弱軸	299	178	1975	2.09	38.5	461
S60-5-5 ^{注3)}	強軸	301	151	2200	5.46	50.5	769
S60-5-5 ^{注3)}	弱軸	300	151	2200	1.51	50.5	642
Mx60-5-5 ^{注2,3)}	強軸	300	151	2200	5.79	50.5	356
Mx60-5-5 ^{注2,3)}	弱軸	300	150	2200	1.42	50.8	342

(注1) ラミナ幅250mm

(注2) B種

(注3) 幅はぎあり

幅はぎ接着のない試験体の座屈荷重は、例えば S60-5-5（強軸）が 745kN、S60-5-5（弱軸）が 478kN であったのに対して、幅はぎがある試験体の座屈荷重は、同（強軸）が 769kN、同（弱軸）が 642kN となり、特に弱軸方法について幅はぎを行うことによって座屈荷重が高くなった。これは、幅はぎを行うことによって引張側の最外層ラミナも座屈に対して抵抗するためと考えられる。

1.8.4 考察（座屈荷重の算定）

表 1.8-3 に示す実験により得られた座屈荷重をオイラーの座屈荷重式、並びに、平成 13 年国土交通省告示第 1024 号に示す直線回帰式等を用いて算定した結果を表 1.8-4 に示す。なお、計算するにあたり、各強度等級の圧縮耐力は現在パブリックコメント中の告示案に示されている方法によって求めた。式 1.8-1 により、細長比 $\lambda > 100$ のときの座屈荷重を求め、式 1.8-2 により $\lambda \leq 30$ のときの圧縮強度を求め、断面積を乗じて圧縮耐力（下限値）とし、さらに 0.75 で除して圧縮耐力（平均値）とした。また、 $30 < \lambda \leq 100$ のときは $\lambda = 30$ のときと $\lambda = 100$ のときの圧縮荷重並びに座屈荷重を直線回帰して、座屈荷重を算定した。

$$P_{CB} = \frac{\pi^2 EI}{l^2} \quad \dots \text{式 1.8-1}$$

ここで、 P_{CB} : 座屈荷重 (kN)

E : 曲げ弾性係数 (N/mm²)

I : 断面二次モーメント (mm⁴)

l : 座屈長さ (mm)

$$F_C = \sigma_{c_oml} \frac{A_A}{A_o} \times 0.75 \quad \dots \text{式 1.8-2}$$

ここで、 F_C : 圧縮強度 (N/mm²)

σ_{c_oml} : 強軸方向; 外層に使用するラミナの圧縮強度 (N/mm²)

弱軸方向; 内層の最も外側の層に使用するラミナの圧縮強度 (N/mm²)

A_A : 直交集成板の等価断面の断面積 (mm²)

A_o : 直交集成板の断面積 (mm²)

表 1.8-4 座屈荷重の計算値

強度等級	加力方向	弾性係数 E (N/mm ²)	オイラーの 座屈荷重 $F_{cb} \lambda=100$ (kN)	圧縮強度 $F_{c\ ave}$ (N/mm ²)	圧縮耐力 $F_{c\ ave} \times A$ (kN)	細長比 λ	座屈荷重 $F_{cb\ cal}$ (kN)	座屈荷重 F_{cb} (kN)
S60-5-5	強軸	5718	256	13.0	589	49.6	496	745
S60-5-5	弱軸	1870	84	13.9	379	49.5	297	478
S60-7-7	強軸	4503	237	16.5	879	38.4	801	1641
S60-7-7	弱軸	2472	130	12.5	399	38.5	366	713
S60-5-5 ^{注1)}	強軸	6028	268	13.0	583	50.1	493	782
S60-5-5 ^{注1)}	弱軸	1881	85	13.9	381	49.5	298	434
S607-7 ^{注1)}	強軸	4535	238	16.5	876	38.6	798	908
S607-7 ^{注1)}	弱軸	2090	109	12.5	473	38.5	429	461
S60-5-5 ^{注3)}	強軸	5459	245	13.0	589	50.5	488	769
S60-5-5 ^{注3)}	弱軸	1509	67	13.9	377	50.5	286	642
Mx60-5-5 ^{注2,3)}	強軸	5788	259	15.7	710	50.5	578	356
Mx60-5-5 ^{注2,3)}	弱軸	1425	63	13.9	374	50.8	282	342

(注1) ラミナ幅250mm

(注2) B種

(注3) 幅はぎあり

図 1.8-1 に座屈荷重の実験値と計算値を比較した結果を示す。Mx60-5-5 (B 種, 幅はぎあり) の試験体を除き、座屈荷重の実験値は計算値よりも高い値となり、前述の計算方法によって座屈荷重を安全側に評価することができることを確認した。本実験の結果からは、座屈荷重に関してはラミナ幅の影響はなく、また、幅はぎを行うことによって座屈荷重が幾分高くなることが確認された。上記 2 点については、今後さらに確認を行う必要があると考える。

試験体の破壊性状について、最大荷重に達して荷重が少し減じた時点をもって試験を終了したため、ほとんど全ての試験体は曲げ変形するという状態 (写真 1.8-2 参照) で試験

を終了した。多くの試験体では、圧縮側の鉛直方向ラミナが圧壊し、隣接する直交層のラミナが剥離及びせん断破壊した。一方、試験体の中には折損し破壊に至ったものもあった(写真 1.8-3)。

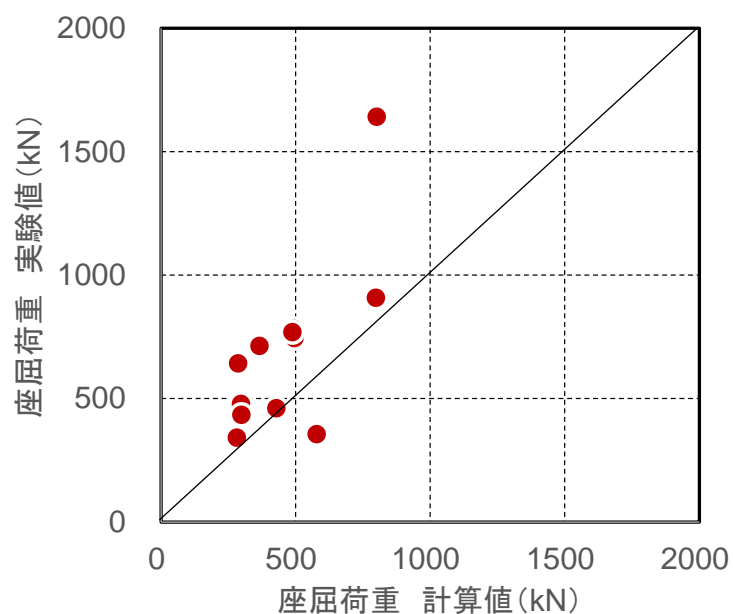


図 1.8-1 座屈荷重の実験値と計算値の比較



(a) 曲げ変形した試験体



(b) 試験体の破壊状態の詳細

写真 1.8-2 試験体の破壊性状

(解説) 圧縮側の鉛直方向ラミナが圧壊し、隣接する直交層のラミナが剥離及びせん断破壊した。



写真 1.8-3 折損し破壊した試験体の断面（5層5プライ）

1.8.5 まとめ

ラミナ幅、ラミナの曲げ弾性係数の上限の有無、幅はぎの有無がことなる幾つかの仕様の試験体（CLT）について座屈試験を行い、座屈荷重を求めるとともに、実験によって得られた座屈荷重と既往の計算方法を用いて求めた座屈荷重を比較し、当該計算方法の CLT への適用の可否について考察した。一連の検討の結果、以下の知見が得られた。

- ① 座屈荷重を求めるための既往の計算方法によって座屈荷重を安全側に評価することができる。
- ② 座屈荷重について、ラミナ幅の影響はない。
- ③ 座屈荷重について、幅はぎを行うことによって座屈荷重が幾分高くなる。特に弱軸方法については幅はぎを行うことによって座屈荷重が高くなったが、これは、幅はぎを行うことによって引張側の最外層ラミナも座屈に対して抵抗するためと考えられる。

なお、以上の知見については限れた実験に基づくものであり、今後さらに検証を行う必要がある。

1.9 引張り試験

1.9.1 試験方法

本試験で用いた CLT の概要を表 1.9-1 に示す。

表 1.9-1 本試験で用いた CLT の概要

等級・構成	幅はぎ接着	方向	大板番号	試験体寸法(mm) (厚さ×幅×長さ)	ラミナ幅 (mm)	試験体数	報告書の項
S60-5-5	あり	強軸	Y6-1-1～5-ma	150×300×4000	105	6	1.9.2.イ.a
		弱軸	Y6-1-1～5-mi			6	
	なし	強軸	M6-1-1	150×300×4000	105	6	1.9.2.ア
		弱軸	M6-1-2			6	
	なし	強軸	M6-3-1	150×300×3980	251 ^{a)}	6	1.9.2.ウ
		弱軸	M6-3-2			6	
Mx60-5-5	あり	強軸	Y6-5-1～5-ma	150×300×4000	105	6	1.9.2.イ.b
		弱軸	Y6-5-1～5-mi			6	

a) 最大 105mm 幅の小角材を幅はぎ接着したもの（幅はぎラミナ）

引張り試験に先立ち、縦振動法によるヤング係数および面外・面内方向の T.G.H.法（曲げたわみ振動法）による曲げヤング係数・せん断弾性係数を測定した。縦振動法は材端木口部をプラスチック製のハンマーで打撃し、反対側の材端に近接したマイクロフォンにより 1 次の固有振動数を収録した。T.G.H.法はプラスチック製のハンマーを用いて、材端上部を打撃し、打撃部近傍あるいは反対側の材端上部に設置した加速度ピックアップを用いて 1～7 次の固有振動数を測定した。支点の位置は材長の 0.224 倍とした。縦振動法および T.G.H.法による固有真数測定の様子を写真 1.9-1、1.9-2 に示す。



写真 1.9-1 縦振動法による固有振動数測定の様子



写真 1.9-2 T.G.H.法による固有振動数測定の様子

引張り試験には、最大容量が 2000kN の横型引張り試験機（前川試験機製作所製、HZS-200-LB4）を用いた。引張り試験時のスパンチャック間距離は 3000mm、両つかみ

部分の長さは約 500mm 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 または CDP-25M）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 1.9-3、1.9-4 に示す。試験終了後、破壊部近傍から長さが約 30mm の含水率測定用試験体を切り出し、全乾法で含水率を測定した。



写真 1.9-3 引張り試験の様子



写真 1.9-4 変位計およびヨークの取り付けの様子

1.9.2 試験結果

ア) 幅はぎ接着のない試験体

試験体の破壊状況の例を写真 1.9-5～1.9-8 に示すとともに、非破壊試験および引張り試験の結果を表 1.9-2、1.9-3 に示す。



写真 1.9-5 強軸方向の試験体（幅面）



写真 1.9-6 強軸方向の試験体（厚さ面）



写真 1.9-7 弱軸方向の試験体（幅面）



写真 1.9-8 弱軸方向の試験体（厚さ面）

表 1.9-2 非破壊試験および引張り試験の結果-M6-1-1
(S60-5-5、幅はぎ接着なし、ラミナ幅 105mm、強軸)

番号	密度(kg/m ³)	Efr	ETGHf	GTGHf	ETGHe	GTGHe	Et	ot	含水率 (%)
M6-1-1-1	464	5.31	7.42	0.309	5.35	0.866	5.09	12.2	10.0
M6-1-1-2	458	5.29	6.91	0.305	5.35	0.871	5.14	12.6	10.0
M6-1-1-3	456	5.48	6.76	0.302	5.28	0.837	5.33	14.2	10.1
M6-1-1-4	445	4.77	5.80	0.298	4.92	0.814	4.38	12.3	10.2
M6-1-1-5	453	4.86	5.83	0.306	4.88	0.839	4.70	12.8	11.0
M6-1-1-6	436	5.08	5.97	0.297	4.81	0.778	4.73	11.1	10.2
平均値	452	5.13	6.45	0.303	5.10	0.834	4.89	12.5	10.2
最小値	436	4.77	5.80	0.297	4.81	0.778	4.38	11.1	10.0
最大値	464	5.48	7.42	0.309	5.35	0.871	5.33	14.2	11.0
標準偏差	10.3	0.277	0.674	0.00462	0.255	0.0345	0.352	1.01	0.380
変動係数(%)	2.27	5.39	10.4	1.52	4.99	4.13	7.19	8.09	3.71

表 1.9-3 非破壊試験および引張り試験の結果-M6-1-2
(S60-5-5、幅はぎ接着なし、ラミナ幅 105mm、弱軸)

番号	密度(kg/m ³)	Efr	ETGHf	GTGHf	ETGHe	GTGHe	Et	ot	含水率 (%)
M6-1-2-1	465	3.77	2.11	0.254	3.94	0.893	3.35	9.42	10.5
M6-1-2-2	469	3.84	2.24	0.179	3.52	0.842	3.52	10.6	10.8
M6-1-2-3	461	3.52	2.19	0.185	3.79	0.889	3.22	9.17	10.3
M6-1-2-4	460	3.71	2.29	0.163	3.61	0.804	3.22	9.10	10.3
M6-1-2-5	443	3.31	1.96	0.197	3.33	0.824	2.84	8.17	11.6
M6-1-2-6	456	3.54	2.04	0.174	3.48	0.775	3.31	8.45	10.1
平均値	459	3.62	2.14	0.192	3.61	0.831	3.24	9.15	10.6

最小値	443	3.31	1.96	0.163	3.33	0.775	2.84	8.17	10.1
最大値	469	3.84	2.29	0.254	3.94	0.889	3.52	10.6	11.6
標準偏差	8.78	0.197	0.125	0.0324	0.219	0.0398	0.226	0.860	0.533
変動係数(%)	1.91	5.44	5.85	16.9	6.08	4.79	6.98	9.39	5.02

Efr：縦振動法による縦弾性係数（単位 kN/mm^2 ）

ETGHf：たわみ振動法による面外方向の曲げヤング係数（単位 kN/mm^2 ）

GTGHf：たわみ振動法による面外方向のせん断弾性係数（単位 kN/mm^2 ）

ETGHe：たわみ振動法による面内方向の曲げヤング係数（単位 kN/mm^2 ）

GTGHe：たわみ振動法による面内方向のせん断弾性係数（単位 kN/mm^2 ）

Et：強度試験で得られた引張り弾性係数（単位 kN/mm^2 ）

σ_t ：強度試験で得られた引張り強さ（単位 N/mm^2 ）

イ）幅はぎ接着のある試験体

イ a) 同一等級構成

試験体の破壊状況の例を写真 1.9-9～1.9-12 に示すとともに、非破壊試験および引張り試験の結果を表 1.9-4、1.9-5 に示す。



写真 1.9-9 強軸方向の試験体（幅面）



写真 1.9-10 強軸方向の試験体（厚さ面）



写真 1.9-11 弱軸方向の試験体（幅面）



写真 1.9-12 弱軸方向の試験体（厚さ面）

表 1.9-4 非破壊試験および引張り試験の結果-Y6-1-1～5-ma
(S60-5-5、幅はぎ接着あり、ラミナ幅 105mm、強軸)

番号	密度(kg/m ³)	Efr	ETGHf	GTGHf	ETGHe	GTGHe	Et	ot	含水率 (%)
Y6-1-1-ma-1	387	4.61	5.87	0.187	4.48	0.661	4.54	13.0	11.2
Y6-1-2-ma-2	400	4.39	5.75	0.229	4.38	0.744	4.04	11.6	10.3
Y6-1-3-ma-3	449	5.79	7.17	0.231	5.77	0.822	5.68	12.3	10.5
Y6-1-4-ma-4	462	5.47	6.77	0.293	5.57	0.899	5.07	14.2	10.3
Y6-1-4-ma-5	452	5.35	7.29	0.283	5.24	0.868	5.06	11.8	10.1
Y6-1-5-ma-6	445	5.01	6.55	0.214	4.89	0.869	4.59	13.3	11.2
平均値	433	5.10	6.57	0.239	5.06	0.810	4.83	12.7	10.6
最小値	387	4.39	5.75	0.187	4.38	0.661	4.04	11.6	10.1
最大値	462	5.79	7.29	0.293	5.77	0.899	5.68	14.2	11.2
標準偏差	31.0	0.533	0.646	0.0407	0.570	0.0913	0.566	1.00	0.488
変動係数(%)	7.17	10.4	9.83	17.0	11.3	11.3	11.7	7.84	4.60

表 1.9-5 非破壊試験および引張り試験の結果-Y6-1-1～5-mi
(S60-5-5、幅はぎ接着あり、ラミナ幅 105mm、弱軸)

番号	密度(kg/m ³)	Efr	ETGHf	GTGHf	ETGHe	GTGHe	Et	ot	含水率 (%)
Y6-1-1-mi-1	416	3.34	1.92	0.136	3.42	0.704	3.18	9.72	10.8
Y6-1-2-mi-2	397	3.48	2.01	0.0907	3.39	0.656	3.29	9.80	12.9
Y6-1-3-mi-3	421	3.98	2.31	0.0904	3.82	0.700	3.74	8.96	11.5
Y6-1-4-mi-4	412	3.77	2.21	0.0765	3.63	0.634	3.88	10.5	11.3
Y6-1-4-mi-5	414	4.18	2.31	0.0774	4.10	0.628	4.18	8.46	11.1
Y6-1-5-mi-6	394	3.10	1.83	0.0888	3.08	0.660	2.90	7.72	10.9
平均値	409	3.64	2.10	0.0934	3.57	0.664	3.53	9.19	11.4
最小値	394	3.10	1.83	0.0765	3.08	0.628	2.90	7.72	10.8
最大値	421	4.18	2.31	0.136	4.10	0.704	4.18	10.5	12.9
標準偏差	11.0	0.407	0.208	0.0220	0.357	0.0323	0.483	1.01	0.764
変動係数(%)	2.70	11.2	9.92	23.6	10.0	4.86	13.7	11.0	6.70

Efr：縦振動法による縦弾性係数（単位 kN/mm²）

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

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

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

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

Et：強度試験で得られた引張り弾性係数（単位 kN/mm²）

ot：強度試験で得られた引張り強さ（単位 N/mm²）

イ b) 異等級構成

試験体の破壊状況の例を写真 1.9-13～1.9-16 に示すとともに、非破壊試験および引張り試験の結果を表 1.9-6、1.9-7 に示す。



写真 1.9-13 強軸方向の試験体（幅面）



写真 1.9-14 強軸方向の試験体（厚さ面）



写真 1.9-15 弱軸方向の試験体（幅面）



写真 1.9-16 弱軸方向の試験体（厚さ面）

表 1.9-6 非破壊試験および引張り試験の結果-Y6-5-1～5-ma
(Mx60-5-5、幅はぎ接着あり、ラミナ幅 105mm、強軸)

番号	密度 (kg/m ³)	E _{fr}	E _{TGHf}	G _{TGHf}	E _{TGHe}	G _{TGHe}	E _t	ot	含水 率 (%)
Y6-5-1-ma-1	379	4.54	6.59	0.180	4.47	0.669	4.20	11.7	11.1
Y6-5-2-ma-2	387	4.75	7.11	0.166	4.97	0.658	4.50	10.8	10.1
Y6-5-3-ma-3	382	4.25	6.00	0.156	4.18	0.669	3.93	11.8	12.5
Y6-5-4-ma-4	388	4.71	6.72	0.171	4.73	0.673	4.26	11.5	11.7
Y6-5-4-ma-5	379	4.90	7.23	0.161	4.85	0.650	4.56	11.3	11.3
Y6-5-5-ma-6	384	5.26	7.10	0.177	4.97	0.660	5.29	12.9	10.7
平均値	383	4.73	6.79	0.168	4.69	0.663	4.46	11.7	11.2
最小値	379	4.25	6.00	0.156	4.18	0.650	3.93	10.8	10.1

最大値	388	5.26	7.23	0.180	4.97	0.673	5.29	12.9	12.5
標準偏差	3.88	0.341	0.459	0.00918	0.313	0.00875	0.467	0.708	0.833
変動係数(%)	1.01	7.20	6.76	5.45	6.67	1.32	10.5	6.06	7.42

表 1.9-7 非破壊試験および引張り試験の結果-Y6-5-1～5-mi
(Mx60-5-5、幅はぎ接着あり、ラミナ幅 105mm、弱軸)

番号	密度(kg/m ³)	E _{fr}	E _{TGHf}	G _{TGHf}	E _{TGHe}	G _{TGHe}	E _t	σ _t	含水率 (%)
Y6-5-1-mi-1	400	2.32	1.45	0.115	2.22	0.724	2.16	6.81	10.7
Y6-5-2-mi-2	404	2.56	1.54	0.132	2.61	0.890	2.35	7.65	11.0
Y6-5-3-mi-3	411	3.79	2.29	0.124	3.79	0.692	3.54	10.3	10.5
Y6-5-4-mi-4	391	2.32	1.45	0.121	2.21	0.749	2.10	6.04	10.6
Y6-5-4-mi-5	404	2.37	1.46	0.116	2.40	0.716	2.23	7.96	11.1
Y6-5-5-mi-6	398	2.46	1.50	0.126	2.41	0.688	2.31	7.33	11.1
平均値	401	2.64	1.61	0.122	2.60	0.743	2.45	7.68	10.8
最小値	391	2.32	1.45	0.115	2.21	0.688	2.10	6.04	10.5
最大値	411	3.79	2.29	0.132	3.79	0.890	3.54	10.3	11.1
標準偏差	6.62	0.575	0.331	0.00646	0.600	0.0754	0.542	1.44	0.269
変動係数(%)	1.65	21.8	20.5	5.28	23.0	10.1	22.1	18.8	2.48

E_{fr}：縦振動法による縦弾性係数（単位 kN/mm²）

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

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

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

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

E_t：強度試験で得られた引張り弾性係数（単位 kN/mm²）

σ_t：強度試験で得られた引張り強さ（単位 N/mm²）

ウ）幅はぎラミナを用いた試験体

試験体の破壊状況の例を写真 1.9-17～1.9-20 に示すとともに、非破壊試験および引張り試験の結果を表 1.9-8、1.9-9 に示す。

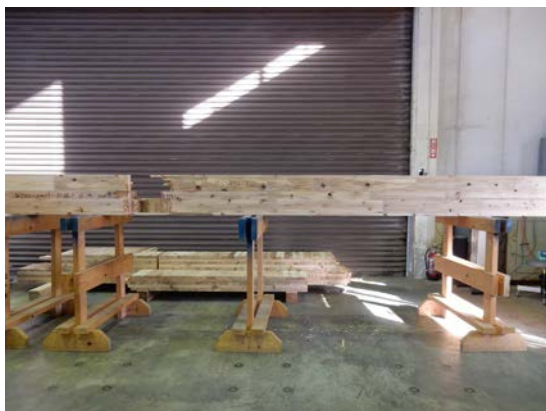


写真 1.9-17 強軸方向の試験体（幅面）

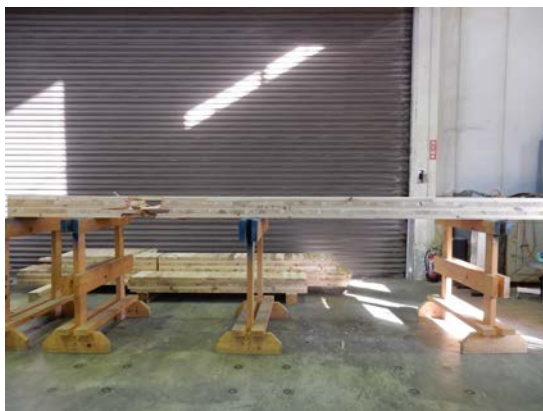


写真 1.9-18 強軸方向の試験体（厚さ面）



写真 1.9-19 弱軸方向の試験体（幅面）



写真 1.9-20 弱軸方向の試験体（厚さ面）

表 1.9-8 非破壊試験および引張り試験の結果-M6-3-1
(S60-5-5、幅はぎラミナ、ラミナ幅 251mm、強軸)

番号	密度(kg/m ³)	Efr	ETGHf	GTGHf	ETGHe	GTGHe	Et	ot	含水率 (%)
M6-3-1-1	447	5.49	6.68	0.272	5.17	0.819	5.25	12.7	10.7
M6-3-1-2	430	4.93	6.18	0.296	4.95	0.826	4.50	12.6	10.3
M6-3-1-3	449	5.72	6.97	0.285	5.46	0.840	5.51	14.8	10.8
M6-3-1-4	445	5.51	7.28	0.277	5.35	0.825	5.21	13.5	10.5
M6-3-1-5	447	5.39	7.01	0.270	5.14	0.838	5.19	10.8	10.7
M6-3-1-6	449	5.61	7.28	0.263	5.39	0.844	5.65	10.8	10.9
平均値	445	5.44	6.90	0.277	5.24	0.832	5.22	12.5	10.6
最小値	430	4.93	6.18	0.263	4.95	0.819	4.50	10.8	10.3
最大値	449	5.72	7.28	0.296	5.46	0.844	5.65	14.8	10.9
標準偏差	7.39	0.276	0.416	0.0118	0.191	0.0100	0.398	1.55	0.212
変動係数(%)	1.66	5.07	6.04	4.27	3.64	1.21	7.62	12.4	2.00

表 1.9-9 非破壊試験および引張り試験の結果-M6-3-2
(S60-5-5、幅はぎラミナ、ラミナ幅 251mm、弱軸)

番号	密度(kg/m ³)	E _{fr}	E _{TGHf}	G _{TGHf}	E _{TGHe}	G _{TGHe}	E _t	o _t	含水率 (%)
M6-3-2-1	448	4.11	2.38	0.145	3.71	0.786	3.74	8.92	10.3
M6-3-2-2	447	3.63	2.02	0.170	3.22	0.824	3.31	7.62	10.7
M6-3-2-3	460	3.97	2.37	0.168	4.05	0.841	3.77	10.9	10.1
M6-3-2-4	444	3.87	2.25	0.135	3.91	0.764	3.55	11.2	10.1
M6-3-2-5	446	3.80	2.19	0.135	3.64	0.781	3.66	10.4	9.45
M6-3-2-6	452	3.75	2.20	0.171	4.04	0.814	3.37	8.83	10.0
平均値	449	3.85	2.24	0.154	3.76	0.802	3.57	9.64	10.1
最小値	444	3.63	2.02	0.135	3.22	0.764	3.31	7.62	9.45
最大値	460	4.11	2.38	0.171	4.05	0.841	3.77	11.2	10.7
標準偏差	5.89	0.169	0.134	0.0176	0.315	0.0292	0.194	1.40	0.419
変動係数(%)	1.31	4.38	6.01	11.4	8.37	3.65	5.43	14.5	4.14

E_{fr}：縦振動法による縦弾性係数（単位 kN/mm²）

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

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

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

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

E_t：強度試験で得られた引張り弾性係数（単位 kN/mm²）

o_t：強度試験で得られた引張り強さ（単位 N/mm²）

1.9.3 考察

ア）幅はぎプライで構成した CLT におけるラミナ構成の影響（1.9.2.イ a と 1.9.2.イ b の比較から）

等級・構成と引張り強度との関係を荷重方向の強軸・弱軸別に図 1.9-1 に示す。S60-5-5 と Mx60-5-5 とした CLT の引張り強度について、平均値は強軸・弱軸方向ともに S60-5-5 の方が Mx60-5-5 よりも高かったものの、t 検定を行った結果、本試験体では、いずれも有意水準 5% で平均値に有意差は認められなかった。

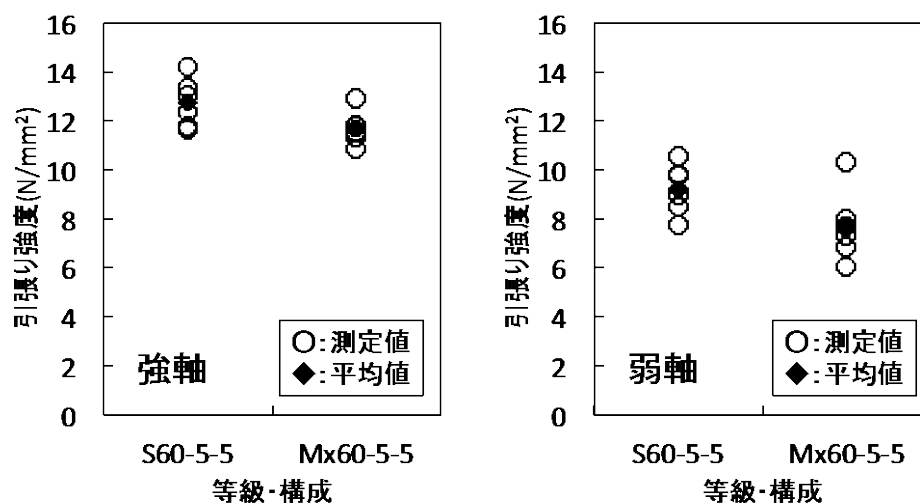


図 1.9-1 等級・構成と引張り強度との関係

イ) 幅はぎラミナを用いる影響 (1.9.2.ア、1.9.2.イ.a と 1.9.2.ウの比較から)

幅はぎ接着の有無と引張り強度との関係を図 1.9-2 に示す。幅はぎ接着あり、幅はぎ接着なし、最大 105mm 幅の小角材を幅はぎ接着して (幅はぎラミナ) ラミナ同士の幅はぎ接着なし、の 3 種類の試験体と、CLT の引張り強度について Tukey-Kramer の HSD 検定を行った結果、強軸・弱軸方向ともに有意水準 5% で平均値に有意差は認められなかった。

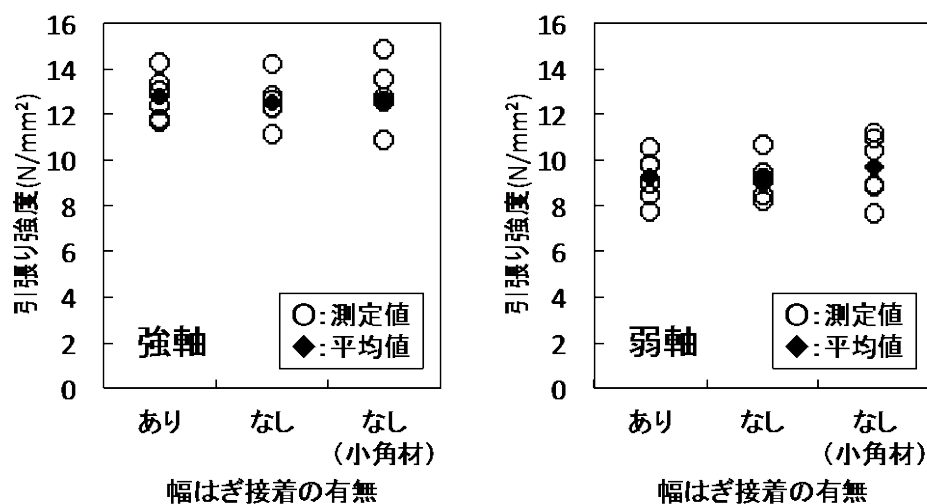


図 1.9-2 幅はぎ接着の有無と引張り強度との関係

注：なし (小角材) の試験体は、最大 105mm 幅の小角材を幅はぎ接着して (幅はぎラミナ) ラミナ同士の幅はぎ接着を行っていないものである。

1.10 直交層挙動

1.10.1 目的

面外曲げにおいては、同じ積層材である集成材に比べ、CLT パネルは直交層の挙動が特徴的に曲げ剛性に影響していると考えられる。CLT Handbook 等において、CLT パネルの面外曲げ剛性を算定するための数理モデルが既にいくつか提案されている。本項では、これらのモデルの計算に必用な物性値とモデルへの適用を検討する。

1.10.2 ラミナの幅方向の縦弾性係数

機械等級区分ではラミナは軸方向の曲げヤング係数で管理される。また、ラミナの幅方向の縦弾性係数の知見は少ない。そこで、ラミナの幅方向の縦弾性係数を検討した。

1.10.2.1 実験方法

縦継ぎの無い乾燥スギラミナ（厚さ 30 mm×幅 105 mm×長さ 2000 mm）4 本を用意し、各ラミナを繊維方向に 25 cm に裁断し、超音波の伝達速度を用いて繊維方向と幅方向の縦弾性係数を求めた。伝達時間の測定装置と測定方法および縦弾性係数の評価方法は 4.2.2 を参照されたい。長軸方向では両断面の中心間で、幅方向では節の無い断面で伝達時間を測定した。また、伝達時間の補正は各ラミナの補正值を適用した。

1.10.2.2 結果

図 1.10.2-1 に幅方向の縦弾性係数 E_{90} と繊維方向の縦弾性係数 E_0 との関係を、図 1.10.2-2 に縦弾性係数比 E_0/E_{90} と密度の関係を示す。

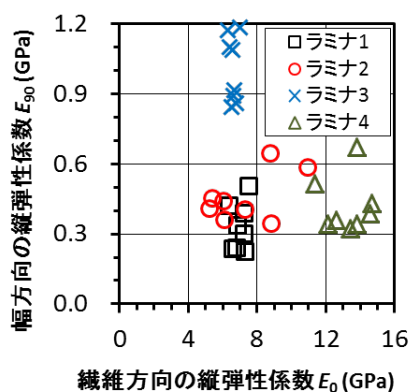


図 1.10.2-1 各方向のヤング係数

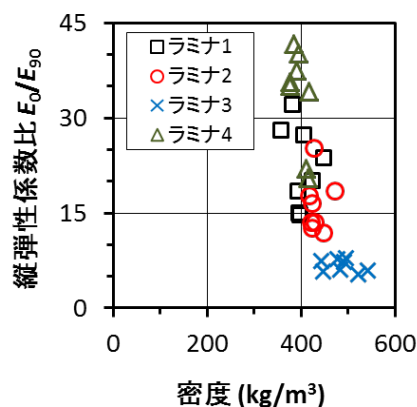


図 1.10.2-2 密度とヤング係数の比

1.10.2.3 考察

図 1.10.2-1 に示すように、 E_{90} と E_0 との関係は、3 のみ異なる傾向がみられた。木材工業ハンドブック掲載のスギ材の文献値^{1.10-1)}では、 $E_L = 7.35$ GPa、 $E_R = 0.59$ GPa、 $E_T = 0.29$ GPa であり、ラミナ 3 を除く試験体の $E_0 = 7$ GPa 付近の E_{90} は文献値の E_T と概ね合致した。ラミナ 3 の E_{90} は文献値の E_R に比べ大きく、芯持ちラミナは未成熟材であるため異なったと考えられる。

図 1.10.2-2 に示すように、 E_0/E_{90} は全試験体で 5~42 (平均 20) とばらつきが大きい
が、ラミナ 3 を除くと 12~42 (平均 24) であり、前述の文献値から計算される $E_L/E_T = 25.3$
と概ね一致した。ラミナ 3 は 5~8 (平均 7) であり、文献値の $E_L/E_R = 12.5$ より小さな
値であった。

CLT handbook^{1.10-2)}では欧州材等の知見から $E_0/E_{90} = 30$ が採用されている。かなりの
ばらつきがあるものの、本実験結果からはスギの場合 $E_0/E_{90} = 20$ 程度が妥当と考えられ
る。ただし、芯持ち材の割合が多いときは、 E_0/E_{90} は小さくなる傾向があるので注意を要
する。なお、本実験で評価した E_0/E_{90} は、材の真の縦弾性係数に基づくものであり、曲げ
試験で得られる (せん断付加たわみを含む) 見かけの曲げヤング係数に基づく場合は、若
干異なる値となることが予想される。

1.10.3 直交層のせん断弾性係数

C L T の平行層にせん断力が生じるときの直交層のせん断弾性係数を検討した。

1.10.3.1 実験方法

5 層 5 プライの面外曲げ試験体 (強軸試験体) とエンドマッチするように、幅 300 mm
× 厚さ 150 mm × 長さ 550 mm の板を採材し、幅方向に 3 分割した中央部の材 (幅 98 mm
× 厚さ 150 mm × 長さ 550 mm) を供試材とした。試験体の長さは各試験体のラミナの長
さを考慮して調整し、各仕様それぞれ 6 体を供試した。試験体番号は採材の都合により、
末尾を 2、5、8、11、14、17 とした (各番号が面外曲げ試験体の末尾番号 1、2、3、4、5、
6 に対応する)。

せん断試験を行う前に、超音波伝播法により直交層ラミナの繊維方向の縦弾性係数 E_{C0}
を求めた。 E_{C0} は試験体のみかけの密度を用いて算出し、各直交層ラミナの長さに基づく
重み付き平均値とした。超音波伝播法の装置、測定方法および補正方法は 4.2.2 を参照さ
れたい。伝達時間の補正は補正值の平均値を適用した。

層内せん断試験は、図 1.10.3-1 および写真 1.10.3-1 に示すような接合部せん断試験型の
方法で行った。ラミナ幅が 105 mm の試験体は長さ 315 mm とし、少なくとも 1 つの直交
層は 105 mm のラミナ 3 枚からなるように採材した。同様に、ラミナ幅が 250 mm の試験
体は長さ 250 mm とし、少なくとも 1 つの直交層は 250 mm のラミナ 1 枚からなるように
採材した。載荷速度は 0.5 mm/分とし、試験体が破壊するまで単調加力した。なお、変位
測定は、加力点のめり込みの影響を除くため、加力点より 5 cm 以上離れた位置に変位計
と標点 (アルミアングル) を取り付けた。

直交層のせん断強度 τ は次式で求めた。

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

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

直交層のせん断弾性係 G_R は次式で求めた。

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

ここで、 t_{LMN} は直交層のラミナの厚さ（30 mm）、 $\delta_{0.4}$ および $\delta_{0.1}$ はそれぞれ最大荷重の40%および10%における変位計の変位。

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

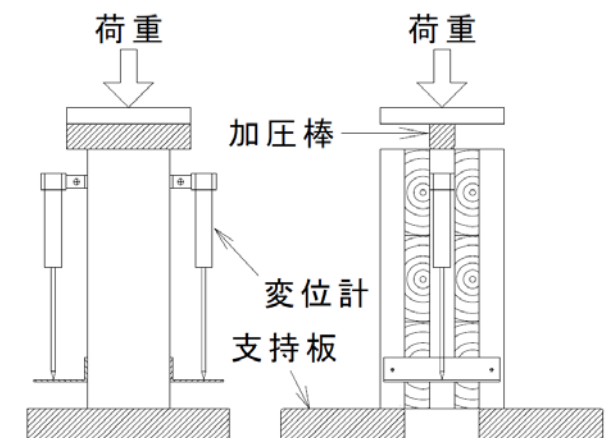


図 1.10.3-1 層内せん断試験の方法

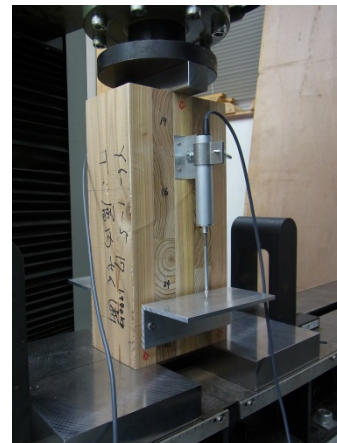


写真 1.10.3-1 層内せん断試験

1.10.3.2 試験結果

表 1.10.3-1～4 に結果の概要を示す。縦振動法および TGH 法の測定は、M6-1-1-2 は長さ 315 mm で、他の試験体は長さ 550 mm で行った。縦振動法は固有振動が確認できたものの、エンドマッチした同シリーズの面外曲げ試験体と比べ著しく低い値が評価された。TGH 法は固有振動の同定が困難であったため、評価値は参考値である。

図 1.10.3-2 に各試験体のせん断応力-せん断ひずみ関係を示す。本試験は2つの直交層のせん断が並行するため、多くの試験体で、片方の直交層の破壊により最大耐力に達し、他方の直交層にせん断力が分配され耐力が回復するものの、破壊を伴いながら徐々に耐力が低下するという傾向がみられた。

写真 1.10.3-4 に各仕様の破壊例を示す。破壊性状は、接着層のせん断破壊、ラミナ断面を載荷点側から支持点側へ対角に破断面が横切るせん断破壊が各仕様ともに共通してみられた。

その他、各仕様の特徴は以下に述べる。

ア) 幅はぎ接着のない試験体

M6-1 シリーズは、試験材のラミナ間の突き合わせ部分が両直交層とも一致していたので、直交層の各列に 105 mm 長のラミナ 3 枚が含まれるように試験体を採材した。すなわち、試験体の長さは 315 mm とした。

せん断応力－せん断ひずみ関係は、最大応力まで概ね線形であった（図 1.10.3-2 ア）。破壊については、幅はぎ接着がないため、ほとんどの試験体で、ラミナ突き合わせ部分を通るラミナの回転による破壊がみられた（写真 1.10.3-4 ア）。

イ）幅はぎ接着のある試験体

イ a) 同一等級構成

Y6-1 シリーズは、試験材のラミナ間の突き合わせ部分が両直交層で一致していなかったため、一つの直交層に 105 mm 長のラミナ 3 枚が含まれるように試験体を採材した。すなわち、試験体の長さは 315 mm であった。

せん断応力－せん断ひずみ関係は、幅はぎ接着のない M6-1 シリーズに比べ、最大応力の 60%程度からやや非線形の傾向を示した（図 1.10.3-2 イ）。

破壊については、幅はぎ接着されているため、M6-1 シリーズでみられたような、ラミナ突き合わせ部分を通るラミナの回転破壊はみられず、ラミナの角付近で幅はぎ接着面を対角線方向に横切る破壊がみられた（写真 1.10.3-4 イ）。

イ b) 異等級構成

Y6-5 シリーズは、Y6-1 シリーズ同様に試験体を採材した。

せん断応力－せん断ひずみ関係は、Y6-1 シリーズにと同様にやや非線形な傾向を示した（図 1.10.3-2 エ）。

破壊性状は、概して Y6-1 シリーズと同様であった（写真 1.10.3-4 ウ）。ただし、試験体 Y6-5-1-2 は、直交層でせん断破壊する前に、載荷点直下のラミナが縦継ぎ部分で圧壊した（写真 1.10.3-2）。また、試験体 Y6-5-5-17 は、直交層にせん断破壊が生じる前に、載荷点直下のラミナがめり込み破壊した（写真 1.10.3-3）。

ウ）幅はぎラミナを用いた試験体

M6-3 シリーズは、試験材のラミナ間の突き合わせ部分が両直交層とも一致していたので、直交層の各列に 25 cm 長のラミナ 1 枚が含まれるように試験体を採材した。すなわち、試験体の長さは 25 cm とした。ただし、ラミナの幅はぎ接着部分は両直交層で必ずしも一致していなかった。

せん断応力－せん断ひずみ関係は概ね線形であった（図 1.10.3-2 ウ）。

破壊性状は、隣り合うラミナが幅はぎ接着されているため、M6-1 シリーズでみられたような、ラミナの突き合わせ部分を通るラミナの回転破壊はみられなかった。

表 1.10.3-1 層内せん断試験の結果—M6-1（幅はぎ接着なし、ラミナ幅 105 mm）

番号	密度 (kg/ m ³)	E_{fr}	E_{TGHf}	G_{TGHf}	E_{C0}	G_R	τ	含水率 (%)
M6-1-1-2	421	3.90	3.89	0.550	6.6	0.0679	1.35	7.0
M6-1-1-5	463	2.28	3.21	0.364	7.9	0.0746	1.77	9.4
M6-1-1-8	472	3.90	4.57	0.504	7.9	0.0853	1.77	9.6
M6-1-1-11	466	2.47	5.06	0.295	6.9	0.0630	1.76	9.9
M6-1-1-14	448	2.36	3.56	0.533	8.7	0.0685	1.77	7.2
M6-1-1-17	443	2.72	2.87	0.432	6.0	0.0647	1.70	8.0
平均値	452	2.94	3.86	0.45	7.3	0.0707	1.69	8.5
最小値	421	2.28	2.87	0.29	6.0	0.0630	1.35	7.0
最大値	472	3.90	5.06	0.55	8.7	0.0853	1.77	9.9
標準偏差	19.0	0.76	0.83	0.10	1.0	0.0082	0.17	1.3
変動係数	4.2%	25.8%	21.5%	22.8%	13.9%	11.6%	10.0%	15.1%

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）（参考値）

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）（参考値）

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

G_R ：強度試験で得られた直交層のせん断弾性係数（単位 kN/mm²）

τ ：強度試験で得られた直交層のせん断強さ（単位 N/mm²）

表 1.10.3-2 層内せん断試験の結果—Y6-1（幅はぎ接着あり、ラミナ幅 105 mm）

番号	密度 (kg/ m ³)	E_{fr}	E_{TGHf}	G_{TGHf}	E_{C0}	G_R	τ	含水率 (%)
Y6-1-1-2	408	4.47	3.75	0.168	7.0	0.0493	1.30	7.0
Y6-1-1-5	413	3.94	4.05	0.193	7.2	0.0456	1.32	6.1
Y6-1-2-8	421	4.51	5.08	0.259	6.1	0.0620	1.35	8.4
Y6-1-3-11	465	4.57	5.32	0.389	6.6	0.0659	1.97	7.0
Y6-1-4-14	473	5.32	8.73	0.205	7.3	0.0738	1.44	9.2
Y6-1-5-17	417	4.68	3.44	0.251	6.9	0.0506	1.19	6.5
平均値	433	4.58	5.06	0.24	6.8	0.0579	1.43	7.3
最小値	408	3.94	3.44	0.17	6.1	0.0456	1.19	6.1
最大値	473	5.32	8.73	0.39	7.3	0.0738	1.97	9.2
標準偏差	28.6	0.44	1.95	0.08	0.4	0.0111	0.28	1.2
変動係数	6.6%	9.7%	38.4%	32.4%	6.4%	19.2%	19.5%	16.1%

記号の説明は表 1.10.3-1 に同じ。

表 1.10.3-3 層内せん断試験の結果－Y6-5（幅はぎ接着あり、ラミナ幅 105 mm）

番号	密度 (kg/ m ³)	E_{fr}	E_{TGHf}	G_{TGHf}	E_{Co}	G_R	τ	含水率 (%)
Y6-5-1-2	399	3.98	2.26	0.434	5.0	0.0505	1.32	10.1
Y6-5-1-5	378	3.75	2.72	0.254	4.4	0.0561	1.55	12.7
Y6-5-2-8	390	4.20	2.91	0.265	5.0	0.0426	1.41	7.8
Y6-5-3-11	388	3.94	2.92	0.264	5.3	0.0335	1.16	7.5
Y6-5-4-14	379	2.92	2.11	0.341	4.9	0.0493	1.53	9.3
Y6-5-5-17	402	3.83	3.14	0.483	4.6	0.0384	1.25	10.7
平均値	389	3.77	2.68	0.34	4.9	0.0451	1.41	9.7
最小値	378	2.92	2.11	0.25	4.4	0.0335	1.16	7.5
最大値	402	4.20	3.14	0.48	5.3	0.0561	1.55	12.7
標準偏差	10.1	0.45	0.41	0.10	0.3	0.0084	0.18	1.9
変動係数	2.6%	11.8%	15.3%	28.9%	7.1%	18.6%	12.6%	20.0%

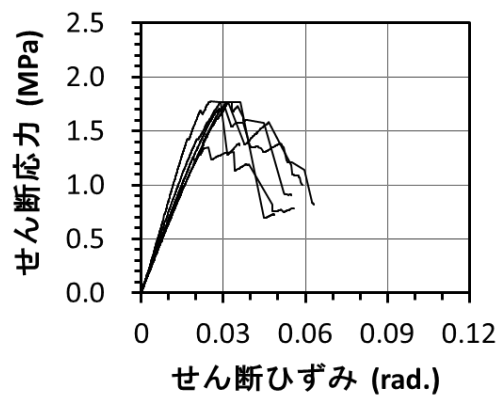
記号の説明は表 1.10.3-1 に同じ。

Y6-5-1-2 と Y6-5-5-17 の τ は参考値（統計値の計算から除外）。

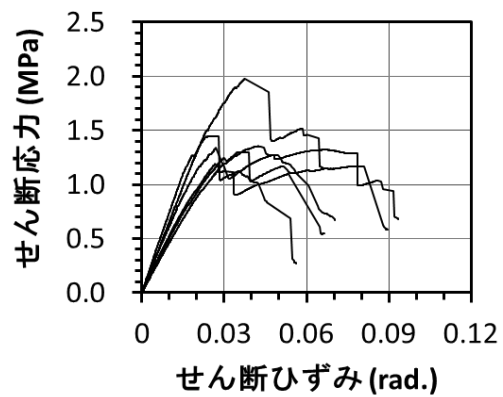
表 1.10.3-4 層内せん断試験の結果－M6-3（幅はぎ接着あり、ラミナ幅 215 mm）

番号	密度 (kg/ m ³)	E_{fr}	E_{TGHf}	G_{TGHf}	E_{Co}	G_R	τ	含水率 (%)
M6-3-1-2	457	4.99	6.10	0.270	7.8	0.0742	1.55	8.7
M6-3-1-5	461	4.87	5.79	0.278	8.6	0.0766	1.64	9.6
M6-3-1-8	444	4.84	5.46	0.291	7.8	0.0887	1.75	7.9
M6-3-1-11	439	4.17	5.77	0.276	7.9	0.0634	1.45	7.1
M6-3-1-14	441	3.99	5.72	0.288	6.3	0.0800	2.04	8.4
M6-3-1-17	431	4.61	5.44	0.261	7.9	0.0704	1.64	6.2
平均値	446	4.58	5.72	0.28	7.7	0.0756	1.68	8.0
最小値	431	3.99	5.44	0.26	6.3	0.0634	1.45	6.2
最大値	461	4.99	6.10	0.29	8.6	0.0887	2.04	9.6
標準偏差	11.6	0.41	0.24	0.01	0.8	0.0086	0.21	1.2
変動係数	2.6%	8.9%	4.3%	4.1%	10.0%	11.4%	12.2%	15.2%

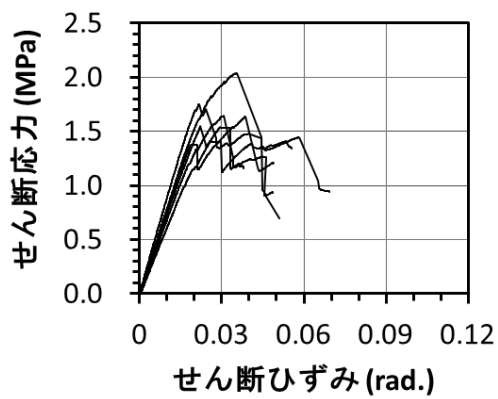
記号の説明は表 1.10.3-1 に同じ。



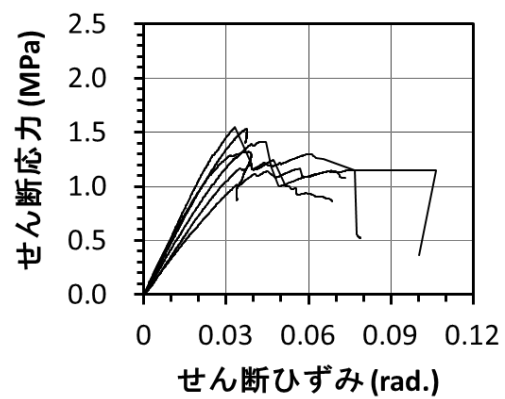
ア) M6-1 シリーズ



イ) Y6-1 シリーズ



ウ) M6-3 シリーズ



エ) Y6-5 シリーズ

図 1.10.3-2 せん断応力-せん断ひずみ関係



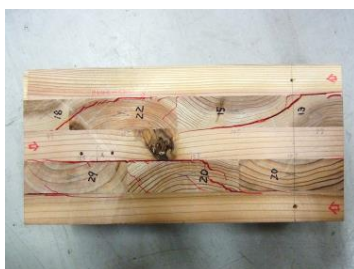
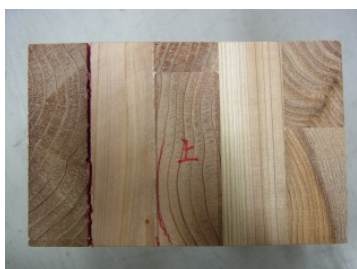
写真 1.10.3-2 縦継ぎ部の圧壊
(Y6-5-1-2)



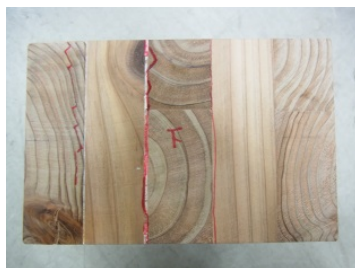
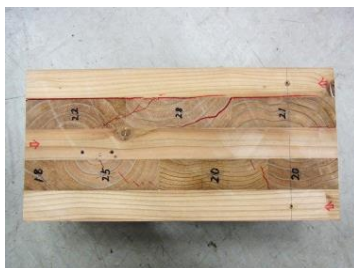
写真 1.10.3-3 載荷点のめり込み
(Y6-5-5-17)



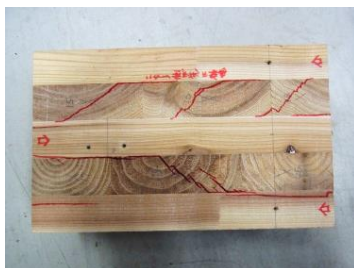
ア) M6-1 シリーズの破壊例 (M6-1-1-17)



イ) Y6-1 シリーズの破壊例 (Y6-1-1-2)



ウ) Y6-5 シリーズの破壊例 (Y6-5-2-8)



エ) M6-3 シリーズの破壊例 (M6-3-1-8)

写真 1.10.3-4 各試験体の破壊例

1.10.3.3 考察

本実験の試験体は、幅はぎ接着の有無はあるものの、一つの直交層に複数のラミナが含まれていた。また、ラミナの厚さに対してせん断面の長さが 10 倍程度あった。そのため、最大耐力に達する以前にしばしば観察される、一つのラミナが分離するような破壊を生じても、即、試験体全体の破壊に至らず、耐力は主に平行層と直交層の間の接着層の破壊によって決まったと考えられる。このことは、M6-1 シリーズ（幅はぎ接着なし）のせん断強度の平均値が、直交層が同じ等級ラミナとして製造された、M6-3 シリーズ（幅はぎラミナ）とほぼ等しく、また、Y6-1 シリーズ（幅はぎ接着あり）よりも小さくなかったことから理解できる（図 1.10.3-3）。

本試験方法で評価されるせん断強度 τ は、2 つの直交層の強度の小さい方の値が評価されると考えられる。したがって、本来の強度の平均値は観測値よりも若干大きいと推察される。極値統計に基づいて概算すると、変動係数が 10～12% のとき、本来の強度の平均値は観測値の 1.06～1.07 倍程度と推定される。木材工業ハンドブックに掲載された文献値^{1.10-3)}によれば、スギ材の板目と柾目直交の接着せん断強度は 2.5 MPa で、本実験の観測値は極値統計による補正を加味してもやや小さい。一方、試験方法は異なるが、岡部ら^{1.10-4)}が行ったせん断長さ 74 mm の実験では、 τ の平均値は 1.64 Mpa で、本結果と概ね一致している。ただし、この報告では破壊形態は主にラミナのせん断破壊であった。

せん断弾性係数 G_R は、2 つの直交層の平均的な値が評価されると考えられ、本来の一つの直交層の平均値は観測値と同程度と推察される。なお、図 1.10.3-3 に示すように、 G_R と τ には正の相関関係がみられた。ただし、スギ材の文献値^{1.10-1)}の値 ($E_L = 7.35$ GPa、 $G_{RT} = 15$ Mpa) に比べ、本実験値の G_R は 5 倍程度大きい。また、岡部ら^{1.10-4)}の実験では、破壊時のせん断ひずみの平均値は 0.081 rad. であるが、本実験ではその半分程度の 0.03～0.04 rad. 程度の値であった。

図 1.10.3-4 に示すように、 G_R は直交層のラミナの繊維方向の縦弾性係数 E_{C0} と概ね正の相関関係がみられた。これによれば、概ね $G_R = E_{C0}/105$ となる。CLT handbook^{1.10-2)}では、スプルースの値を参考に $G_R = E_0/150$ が採用されている。

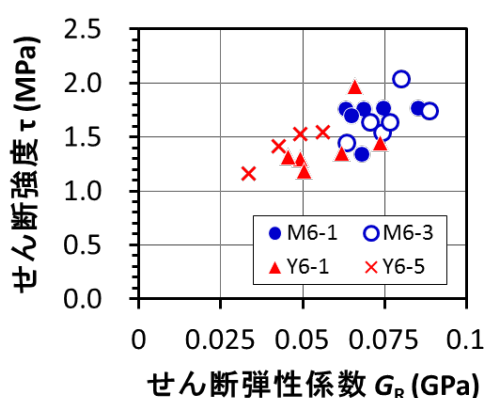


図 1.10.3-3 直交層のせん断強度とせん断弾性係数の関係

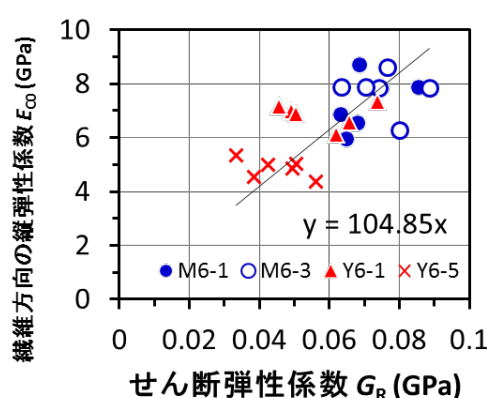


図 1.10.3-4 直交層の繊維方向の縦弾性係数とせん断弾性係数の関係

1.10.4 面外曲げモデルの検討

1.10.4.1 CLT の面外曲げモデルの概要

ア) CLT Handbook で提案されている計算モデル

CLT の面外曲げモデルについて、CLT handbook^{1.10-2)}には以下の3つの計算モデルが提案されている。いずれも等価曲げ剛性を求めるもので、実用的かつ簡便な方法である。以下、本項ではそれぞれ MJB T、CT、SAM と略す。詳細は同文献を参照されたい。

- ・ Mechanically Jointed Beams Theory (MJB T, Gamma Mehtod)

機械的接合梁理論。平行層のみ考慮する。平行層の負担軸力は直交層のせん断変形により緩和され、緩和の程度を係数 γ で表現する。計算に必用な物性値は、ラミナの繊維方向の曲げヤング係数 E_0 、直交層のせん断弾性係数（ローリングシアによるせん断弾性係数） G_R 。

- ・ Composite Theory (CT, k Method)

平行層理論。全層の等価曲げ剛性を評価する。見かけの曲げヤング係数の低減率を k として計算する。等価断面計算と同じ結果を得る。計算に必用な物性値は、 E_0 、直交層の曲げヤング係数 E_{90} 。

- ・ Shear Analogy Method (SAM)

せん断解析法。全層の等価曲げ剛性と等価せん断剛性を求める。等価曲げ剛性は CT と基本的に同値となる。計算に必用な物性値は、 E_0 、 E_{90} 、平行層のせん断弾性係数 G_0 、 G_{90} ($=G_R$)。

イ) 不完全合成梁の理論によるモデル

MJB T と同じく、機械的接合された重ね梁の計算モデルを基にしたものである。機械的接合部を、連続した接合として扱う連続体解法と、個別に配置された接合として扱う離散解法に大きく分けられる。前者は微分方程式の解を導く。後者は、階差方程式を数値計算で解く。これらの方法は複雑ではあるが、ラミナが負担する軸力やせん断力やそのスパン方向の分布が求められるので、応力解析に適している。

以下、5層5プライ CLT のモデルの例を述べる。連続体解法、離散解法とも図 1.10.4-1 に示すような基本的モデルを採用した。このモデルは MJB T や既往の機械的接合による3層重ね梁モデル^{1.10.5~7,9)}と同じものである。梁は厚さ方向に対象な構造とする。スパン長 L 、梁幅 b とし、各層の厚さ h は等しいものとする。

外力として加わるモーメント M に対して、各層が負担する曲げモーメント m と最外層の負担軸力 F は次のように釣合う。

$$M = \sum m + gF \quad (1.10.4-1)$$

連続体解法は、最外層のみが軸力を負担とした場合、基本式は2層梁モデルと同じである。すなわち、軸力 F に関する次の二階微分方程式を解く。ただし、係数 α と β は2層梁と若干異なる。また、単位長さあたりのせん断力 r (F の一階微分値 dF/dx に相当する) に対するすべり係数 k は、最外層間のすべりとする。

$$F'' - \beta^2 F + \alpha M = 0 \quad (1.10.4-2)$$

$$\alpha = \frac{kg}{\Sigma(EI)_i}, \beta^2 = k \left(\frac{2}{(EA)_1} + \frac{g^2}{\Sigma(EI)_i} \right) \quad (1.10.4-3)$$

$$k = \frac{bG_R}{2h} \quad (1.10.4-4)$$

いま、図 1.10.4-2 に示す一般的な 3 等分点荷重の梁形式（以降、**Beam A**）について、式(1.10.4-2)を解くと次式の解を得る。なお、左右対称条件なので、 $x > L/2$ の式は省略する。また、 r の式は単に F の一階微分なので省略する。

$$F_{(1)} = \frac{P\alpha}{2\beta^2} \left[x - \frac{\cosh(\beta L/6)}{\beta \cosh(\beta L/2)} \sinh(\beta x) \right] \quad (1.10.4-5)$$

$$F_{(2)} = \frac{P\alpha}{2\beta^2} \left[\frac{L}{3} - \frac{\sinh(\beta L/3)}{\beta \cosh(\beta L/2)} \cosh \left(\beta \left(\frac{L}{2} - x \right) \right) \right] \quad (1.10.4-6)$$

図 1.10.4-3 に示す張出しのある梁の場合は、更に複雑となり、次式のようになる（上記同様に一部の式は省略する）。

$$F_{(1)} = \frac{2P\alpha \cosh(\beta L/6) \sinh(\beta L/6)^2}{\beta^3 \cosh(\beta(a+L/2))} \sinh(\beta(a+x)) \quad (1.10.4-7)$$

$$F_{(2)} = \frac{P\alpha}{4\beta^3} \left\{ 2\beta x + \frac{1}{\cosh(\beta(a+L/2))} \left[\sinh \left(\beta \left(a - \frac{L}{2} + x \right) \right) - 2 \cosh \left(\beta \left(a + \frac{L}{3} \right) \right) \sinh \left(\beta \left(x - \frac{L}{6} \right) \right) - \sinh \left(\beta \left(a - \frac{L}{6} + x \right) \right) \right] \right\} \quad (1.10.4-8)$$

$$F_{(3)} = \frac{P\alpha}{\beta^3} \left[\frac{\beta L}{6} - \frac{\cosh(\beta(a+L/6)) \sinh(\beta L/6)}{\cosh(\beta(a+L/2))} \cosh \left(\beta \left(\frac{L}{2} - x \right) \right) \right] \quad (1.10.4-9)$$

離散解法は、非合成梁を基本とするため、一般に完全合成に近い不完全合成梁に対しては数値計算が十分に収束しない場合がある。一方で、非合成梁のたわみ角 θ_o が分かっているれば、荷重形式ごとに複雑な微分方程式の解を導出する必要がないという利点がある。

本報では離散解法は神谷^{1.10.5)}の方法に準じた。すなわち、直交層のラミナをスパン方向に配列された接合部とみなし、1－3 層間のすべり S に関する次の階差方程式(1.10.4-10)を式(1.10.4-11～13)の条件のもとで、数値計算によって解く。ただし、CLT は非合成梁よりも完全合成梁に近いとため、境界条件と計算手順は神谷の方法の改良法^{1.10-8)}を適用した。詳細は文献を参照されたい。

$$S_{i+1} = S_i + h(\theta_{o,i+1} - \theta_{o,i}) + C_\beta(X_{i+1} - X_i)F_i \quad (1.10.4-10)$$

(1.10.4-11)

(1.10.4-12)

(1.10.4-13)

ここで、 q は接合部（直交層ラミナ）が負担するせん断力。 K は接合部のすべり剛性で、ラミナ幅を w とするとき、 $K = wbG_R$ 。

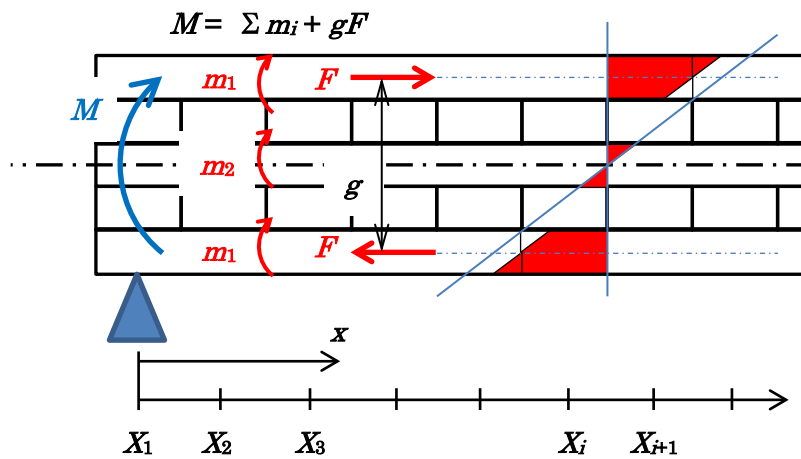


図 1.10.4-1 不完全合成梁の基本モデル（5層5プライ CLT）

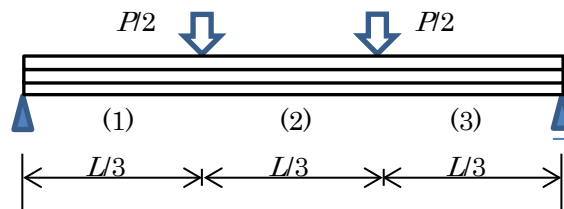


図 1.10.4-2 三等分点荷重を受ける梁 (Beam A)

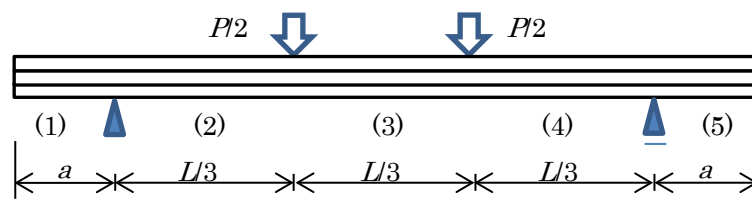


図 1.10.4-3 三等分点荷重を受ける張出しのある梁 (Beam B)

1.10.4.2 解析例

M6-1-1-1 (S60A-5-5、強軸方向試験体、ラミナ間の幅はぎ接着なし) を例に、最大荷重時の各モデルのスパン中央たわみを比較した。計算に用いた物性値を表 1.10.4-1 に示す。連続体解法と離散解法によるたわみ量 δ は、既往の研究^{1.10-8)}に基づき、次式で計算した。なお、離散解法は数値計算が完全に収束しなかったもので、結果に若干の誤差が含まれる。

$$\delta = \delta_o - \delta_F \quad (1.10.4-14)$$

ここで、 δ_o は非合成梁のたわみ量、 δ_F は軸力によるたわみの緩和量で次式による。

$$\delta_F = \frac{\alpha}{\beta^2} \left(g\delta_o - \frac{F}{k} \right) \quad (1.10.4-15)$$

表 1.10.4-1 計算に用いたラミナの物性値

E_0	E_{90}/E_0	G_0/E_0	G_R
8.48 GPa	1/20	1/15	67.9 MPa

表 1.10.4-2 実験値と各計算モデルのスパン中央たわみの比較 (荷重 $P=52.8\text{kN}$)

実験値	CT	離散 解法	連続体解法		MJBT	SAM	
			Beam A	Beam B		($\kappa=1.0$)	($\kappa=1.2$)
52.7 (100%)	50.7 (96%)	56.6 (107%)	56.7 (108%)	56.7 (108%)	57.0 (108%)	57.1 (108%)	58.3 (111%)

注) (数値) は実験値との比。CT は Composite Theory、MJBT は Mechanically Jointed Beams Theory、SAM は Shear Analogy Method、 κ は梁断面のせん断応力分布に基づく係数、Beam A は通常の梁、Beam B は張出しのある梁。

1.10.4.3 考察

CT を除いた他のモデルは実験値よりも数%程度たわみを大きく評価した (表 1.10.4-2)。

SAM は、せん断付加たわみを考慮するものの、CLT の梁断面の垂直方向のせん断応力分布の最大値は均一材に比べて概して小さく、SAM で採用されている $\kappa=1.2$ はせん断付加たわみを過大に評価すると考えられる。SAM は初等材料力学で考慮される全ての変形を反映しており、幅はぎ接着されていない引張側直交層ラミナが軸力を十分負担しないことも考慮すると、 $\kappa=1.0$ とした場合の評価たわみは本来は実験値以下となると予想される。採用した物性値が実態と差異があるのか、SAM の適用性の問題であるのかは確認できなかったが、本解析値は実験値よりも大きな評価となった。

MJBT、連続体解法および離散解法は、5 層 5 プライ CLT の強軸方向の曲げでは、同じモデル (図 1.10.4-1) に基づくため、たわみの計算値がほぼ等しくなったと考えられる。なお、このモデルでは、影響が小さく、相殺されるとして、直交層の曲げ剛性への寄与と平行層のせん断たわみを考慮していない。

CTは、せん断付加たわみと、幅はぎ接着のないCLTでは引張側の直交層が軸力を十分に負担しないことが反映されていないため、たわみ量を過小評価したと考えられる。

次に連続体解法と離散解法で得られる軸力等について考察する。図1.10.4-4に示すように、最外層ラミナの負担軸力 F のスパン方向の分布は、ほぼモーメント図と同様の傾向を示した。連続体解法では滑らかな線状に、離散解法では階段状の解が得られるが、直交層にローリングシア様のせん断変形があるとするれば、実際にはその中間的な挙動を示すと考えられる。また、連続体解法では F の傾きが単位長さあたりの層せん断力 r であり、離散解法では F の階段状の差が1つの直交層ラミナに作用するせん断力 q である。すべり変位は r や q から求まる。

図1.10.4-5に1-3層間のすべり変位 S の分布を示す。 S は連続体解法では r を式(1.10.4-4)に示す k で除した値であり、離散解法では q から式(1.10.4-13)に基づいて計算した値である。すなわち、 r または q はこの図と同様の分布をしている。一般的な機械的接合梁は、不完全合成梁ではあるが非合成梁に近く、この分布は非合成梁のたわみ角と相似の分布を示す^{1.10-5)}。一方、完全合成に近い場合は、この分布はせん断力図と相似した形状となる。今回の解析ではせん断力図にかなり近い形状を示しており、CLTが完全合成に近い性質であることがうかがえる。離散解法の数値計算が完全に収束しなかったのも、完全合成に近かったためと考えられる^{1.10-8)}。

連続体解法の一般的な梁と張出しのある梁による解析を比較すると、軸力分布では支点($x=0$)付近にわずかな違いがみられる(図1.10.4-4)。この差異はたわみには影響がないものの、直交層に働く層せん断力や層間変位 S の分布には明確に現れる^{1.10-9)}(図1.10.4-5)。解析値の S は実験値の2倍程度の値とはなっているが、実験で観察された傾向は離散解法や連続体解法の張出し梁の解析値に近い。実験が張出し部分を持つ梁であることを考慮して解析すると、CLTのせん断破壊の位置を検討する場合に有効であると言える。

次に、破壊について若干考察する。連続体解法で得られる r の最大値は213 N/mmであるが、 τ に試験体幅を乗じた値は約500 N/mmと余裕がある。同じく F の最大値は224 kNで最外層が負担する引張り応力は24.8 MPaとなるが、昨年度の事業で得られたM60Aの縦継ぎスギラミナの縦引張り強度の平均値25.0 MPaであり^{1.10-10)}、ほぼ一致する。実験で観察された破壊も最外層ラミナの縦継ぎ部の引張り破壊であった。

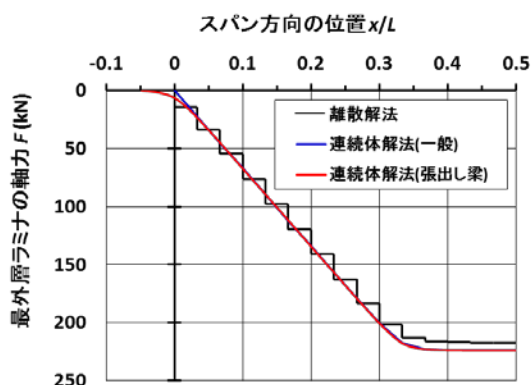


図 1.10.4-4 スパン方向における最外層ラミナの負担軸力の分布(計算値)

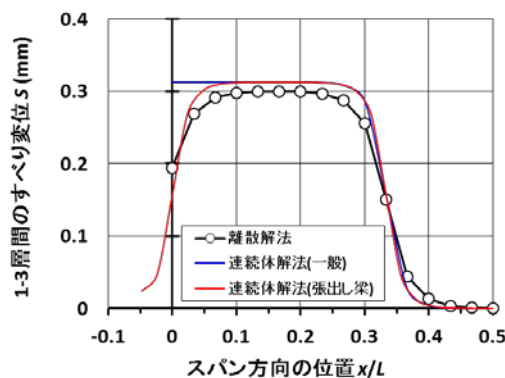


図 1.10.4-5 スパン方向における1-3層間のすべり変位の分布(計算値)

1.10.5 まとめ

CLT の計算モデルに必要なスギラミナの物性値 E_{90} と G_R について検討し、その知見を得た。CLT の各面外曲げモデルならび不完全合成梁モデルにこれらの値を適用して、スパン中央たわみと比較したところ、各モデルで数%程度の差異はあるものの、実験値と概ね一致することを確認した。

謝辞

1.10 ならび 4.2 の応力波伝達時間の測定に使用したファコップをご提供くださいました国立大学法人富山大学芸術文化学部 堀江秀夫教授ならびに同装置の使用方法をご教示くださいました国立研究開発法人森林総合研究所 加藤英雄氏に謝意を表します。

文献

- 1.10-1) 森林総合研究所監修：改訂 4 版木材工業ハンドブック，丸善，p.135 (2004).
- 1.10-2) Gagnon, S., Popovski, M.,: “CLT handbook: cross-laminated timber Canadian Edition”, Capter 3, FPInnovations (2011).
- 1.10-3) 森林総合研究所監修：改訂 4 版木材工業ハンドブック，丸善，p.739 (2004).
- 1.10-4) 岡部実，安村基，小林研治：スギ CLT パネル層せん断耐力の推定．木材学会誌，60(3)，169-176 (2014).
- 1.10-5) 神谷文夫：木質釘着パネルの非線形曲げ解析（第 1 報）．林業試験場研究報告 No.329，121-142 (1984).
- 1.10-6) 小松幸平：“木質構造研究の現状と今後の課題 Part-II”，日本木材学会編，日本木材学会，東京，1994，pp.114-117.
- 1.10-7) 蒲池 健，稲山正弘，井上雅文：木造組立て梁設計法．日本建築学会構造系論文集，74(638)，691-700 (2009).
- 1.10-8) 園田里見：不完全合成梁の解法（第 1 報）．木材学会誌，59(4)，211-218 (2013).
- 1.10-9) 後藤一雄：曲げ剛性の大きい弦材をセン断変形のともなう機構で結び付けた合成ばりについて（中央集中荷重の場合）．建築学会論文報告集，No.63-1，557-560 (1959).
- 1.10-10) 小木曾純子，長尾博文，原田真樹，加藤英雄，井道裕史，宮武敦：ラミナ強度データによるスギ CLT の強度評価（その 1）スギラミナの曲げ・縦圧縮・縦引張り強度．第 65 回木材学会大会要旨集（CD 版），東京，2015.3, D17-P-S13.

1.11 まとめ

幅はぎ接着したプライで構成された CLT、幅はぎ接着ラミナを用いて製造された CLT およびその対照として幅はぎ接着をしていないプライで構成された CLT について、面外曲げ、面外せん断、面内曲げ、面内せん断、圧縮・短柱、圧縮・座屈、引張りの各種強度性能試験を行った。その結果、幅はぎ接着したプライで構成された CLT と幅はぎ接着ラミナを用いて製造された CLT の面内せん断性能を除く各種強度性能は、幅はぎ接着をしていないプライで構成された CLT のそれと同等の性能を示すことが明らかになった。

面内せん断性能については、幅はぎ接着することで、初期のせん断剛性や最大せん断耐力が向上することが明らかとなった。一方、直交層の挙動の影響を受けると考えられた面外曲げや面外せん断性能については、幅はぎ接着することによる性能向上は見られなかった。この理由としては、今年度事業ではラミナ幅をラミナ厚さの 3.5 倍以上とする JAS 規格上の規定の範囲での試験であったことが考えられる。この点を言い換えるならば、JAS 規格のこの基準は JAS 規格に規定する面外曲げと面外せん断強度の製品を供給する上で妥当であることが確認できたとも言えよう。

面外曲げにおける直交層の挙動について、ラミナの基礎的物性値から推定できる道筋が示された。樹種毎の評価がより簡便に行える可能性があり、スギのみならず他樹種においても同様の検証を行って有用性が示されるならば、CLT の製品開発や製品評価をより効率的に行うことができよう。

2. 試験体寸法が幅はぎ接着プライで構成した CLT の強度性能に与える影響

これまでの事業において試験体の寸法、特に幅が強度性能に与える影響について検討してきたが、幅はぎ接着しないプライで構成された CLT が対象であった。本年度は、幅はぎ接着した CLT において、これまで明らかになった試験体幅の影響の傾向が同様であるかどうか確認することを目的とした。試験項目はこれまでと同様に面外曲げ、面外せん断、引張りとした。

2.1 試験体の仕様

2.1.1 試験体の概要

幅はぎ接着したプライで構成された CLT と対照として幅はぎ接着をしていないプライで構成された CLT を製造した。CLT パネルの仕様は Mx60-5-5 とした。

2.1.2 製造に用いたラミナの概要

原料ひき板およびラミナの等級区分およびたて継ぎは構造用集成材の JAS 認定工場で行った。寸法 34mm×112mm×4m の秋田県産スギひき板 3500 枚を連続式グレーディングマシンを用いて外層用、内層用に区分して用いた。区分の基準値と区分結果を表 2.1-1 に示す。

表 2.1-1 ラミナの等級区分（曲げヤング係数）の概要

	全体	内層用	外層用
区分・下限	—	2.5	8.0
区分・上限	—	8.2	—
平均値	7.87	6.94	9.14
標準偏差	1.441	0.861	0.897
最小値	1.07	3.32	8.00
最大値	12.41	8.20	12.41
変動係数	18.3%	12.4%	9.8%

単位：kN/mm²

等級区分されたラミナは、1m 前後にカットし、フィンガージョイントした。接着剤には水性高分子イソシアネート系樹脂接着剤（以下 API）を用いた。

CLT パネルの寸法は、試験体製造ラインの制約から短辺長さ 2m×長辺長さ 4m とした。面外曲げ試験体の長さは試験体厚さの 23 倍必要であることから、5 層 5 プライについてはラミナ厚さを 30 mm としてパネル厚さは 150mm とした。一方、7 層 7 プライはラミナ厚さ 25mm としパネル厚さ 175mm とした。ラミナ幅は 105mm とした。

2.1.3 試験体の採材の概要

2m×4m のパネルから面外曲げ試験体、層内せん断試験体については、幅 1800mm のものと 900mm、600mm、300mm をセットとして 1 枚のパネルから、引張り試験体は 300mm と 600mm をセットとして 1 枚のパネルから所定本数、切り出した。

2.2 面外曲げ試験

2.2.1 試験方法

面外曲げ試験には厚さ 30mm 幅 105mm のラミナを積層接着した厚さ 150mm の 5 層 5 プライのスギ CLT（強度等級：Mx60-5-5）を用いた。試験体の長さは 3450mm である。試験体数は、ラミナ間の幅はぎ接着がされた、幅 300mm、600mm、900mm、1800mm を各 6 体とし、比較対象として、幅はぎ接着をしていない試験体を各 2 体とした。

面外曲げ試験は、図 1 に示すように、3 等分点 4 点曲げ方式とした。写真 2.2-1 に示すように載荷フレーム内に支間 3150mm で設置した試験体の 3 等分点で幅方向にそれぞれ線載荷されるように、H 形鋼の載荷梁（H200×200×8×12）を介して 2 本の油圧ジャッキ（容量 500kN/本）で載荷した。載荷梁の下面には試験体へのめり込みを考慮して、10mm 程度の面取りをしたナラ集成材等を取り付けた。なお、幅 300mm、幅 600mm の試験では、載荷梁の長さを短いものに変えて試験を行った。

試験体は曲げ試験の前に縦振動法により縦弾性係数、たわみ振動法（TGH 法）により面外方向の曲げヤング係数およびせん断弾性係数を求めた。

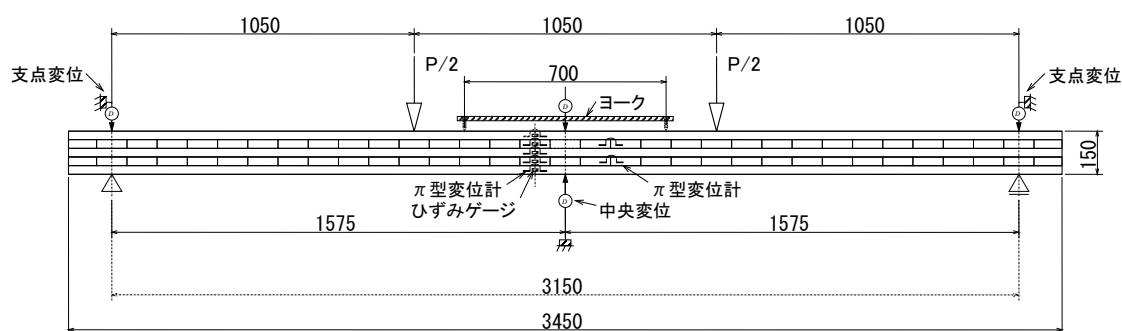


図 2.2-1 面外曲げ試験方法



写真 2.2-1 面外曲げ試験（幅 1800mm）

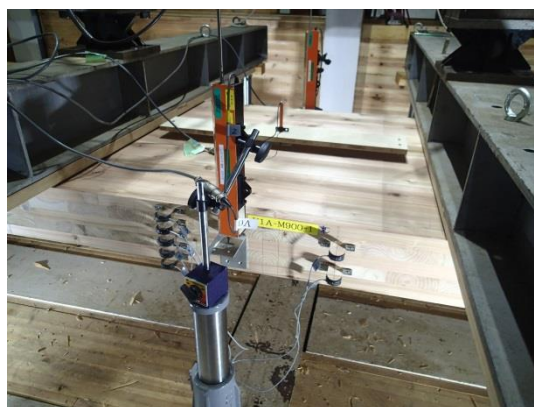


写真 2.2-2 測定器の設置

最大荷重 P_{\max} から曲げ強さ σ を、比例域における荷重と支点変位を補正したスパン中央たわみの関係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純曲げ区間に置いたヨークのたわみとの関係から真の曲げヤング係数 E_b を、次式により算出した。

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

ここで、 P_{\max} : 最大荷重

L : スパン ($L=3,150\text{mm}$)

s : 支点から荷重点までの距離 ($s=1,050\text{mm}$)

y : ヨークの測定スパン ($y=700$)

b : 試験体の幅 (mm)

h : 試験体の高さ (mm)

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

以下に、面外曲げ試験の結果の一覧（表 2.2-1～表 2.2-4）および荷重-変位関係、破壊形態（図 2.2-2～図 2.2-13）を試験体幅毎に示す。

(1) 1800mm 幅

表 2.2-1 面外曲げ試験—5 層 5 プライ 1800mm 幅

番号	密度 (kg/m ³)	E_r (GPa)	E_{TGHf} (GPa)	G_{TGHf} (GPa)	E_m (GPa)	E_b (GPa)	σ (MPa)	含水率 (%)
M1A-M1800-1	411	5.84	8.06	0.267	7.43	7.97	24.7	10.2
M1A-M1800-2	406	5.76	7.73	0.324	7.39	8.00	26.0	10.2
平均値	408	5.80	7.89	0.296	7.41	7.98	25.3	10.2

Y1A-M1800-1	413	5.90	7.65	0.296	7.59	8.32	22.8	10.2
Y1A-M1800-2	413	5.82	7.83	0.291	7.34	8.07	26.0	10.2
Y1A-M1800-3	415	5.93	7.06	0.315	7.36	7.89	25.1	10.2
Y1A-M1800-4	410	5.91	6.89	0.305	7.57	8.22	26.1	10.5
Y1A-M1800-5	414	5.83	7.08	0.351	7.33	8.38	25.0	10.7
Y1A-M1800-6	412	5.88	7.69	0.287	7.41	8.33	24.8	10.3
平均値	413	5.88	7.37	0.307	7.43	8.20	25.0	10.3
最小値	410	5.82	6.89	0.287	7.33	7.89	22.8	10.2
最大値	415	5.93	7.83	0.351	7.59	8.38	26.1	10.7
標準偏差	1.8	0.044	0.40	0.023	0.12	0.19	1.2	0.21
変動係数	0.45	0.75	5.5	7.6	1.5	2.3	4.8	2.0

E_r : 縦振動法による縦弾性係数

E_{TGHf} : たわみ振動法による面外方向の曲げヤング係数

G_{TGHf} : たわみ振動法による面外方向のせん断弾性係数

E_m : 見かけの曲げヤング係数

E_b : 真の曲げヤング係数

σ : 曲げ強度

図 2.2-2 幅 1800mm 面外曲げ，幅はぎ接着無し

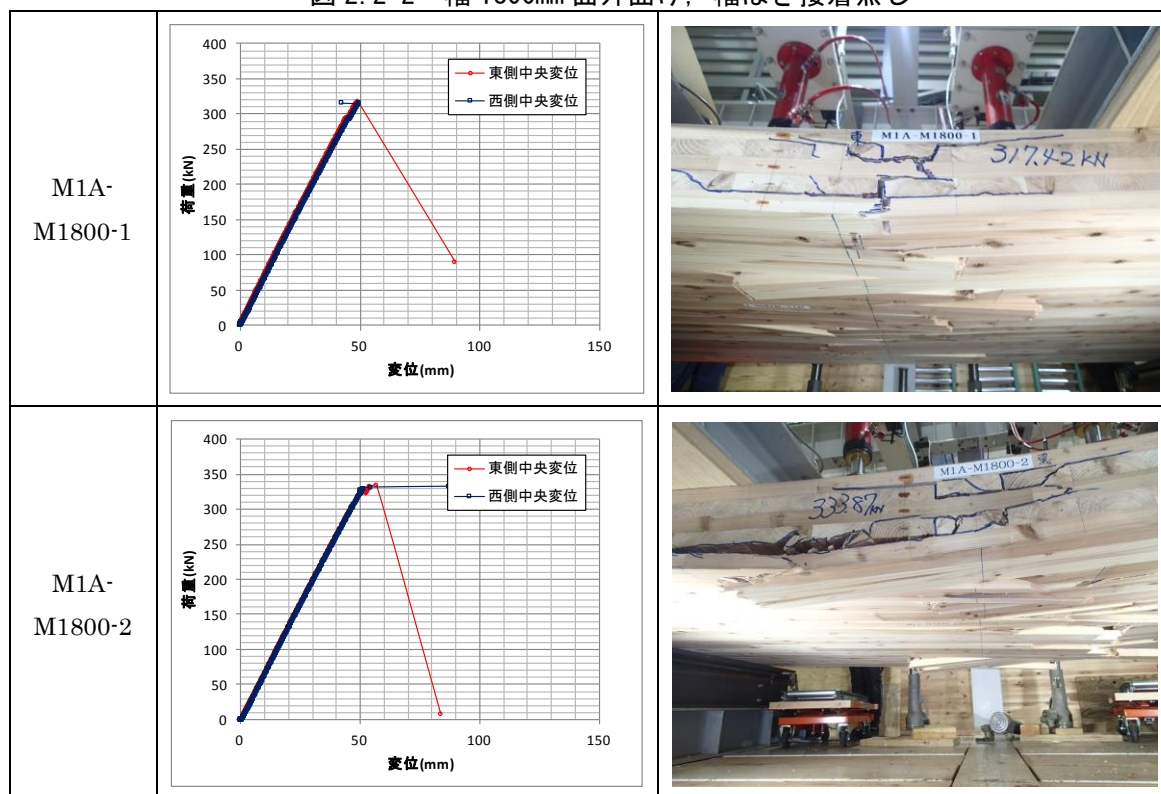


図 2.2-3 幅 1800mm 面外曲げ，幅はぎ接着有り (1)

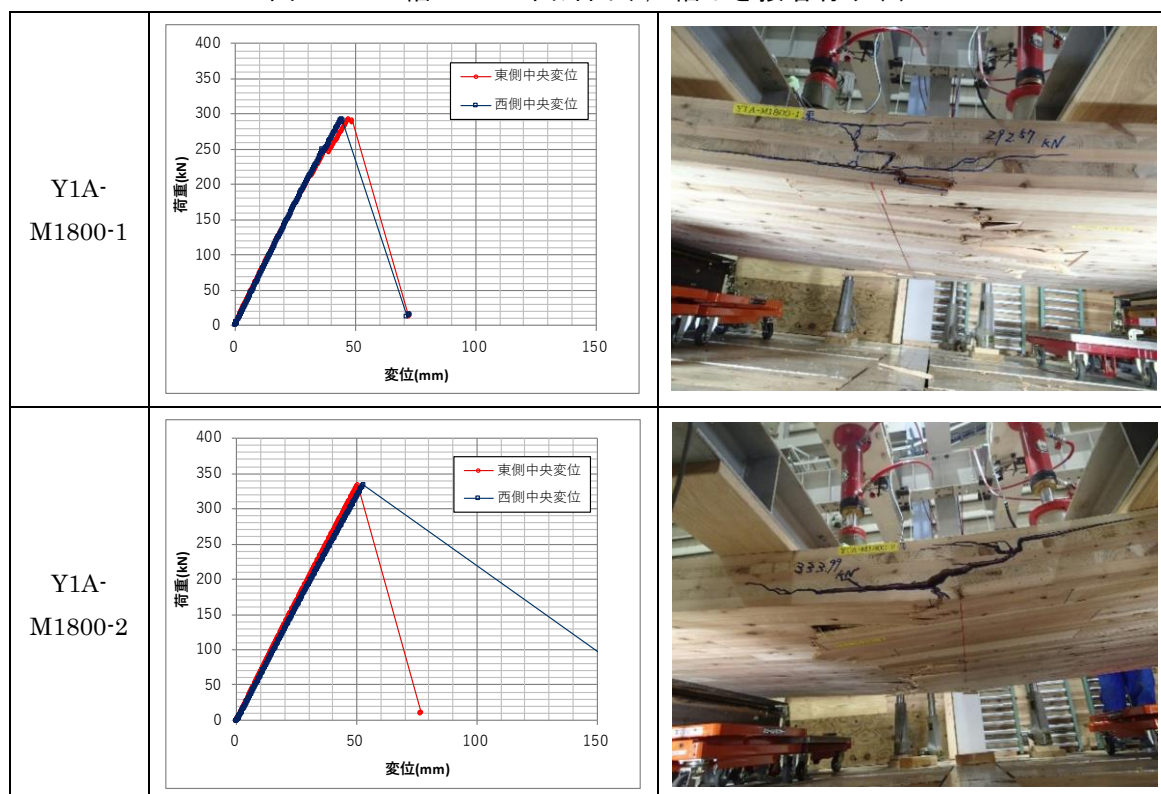
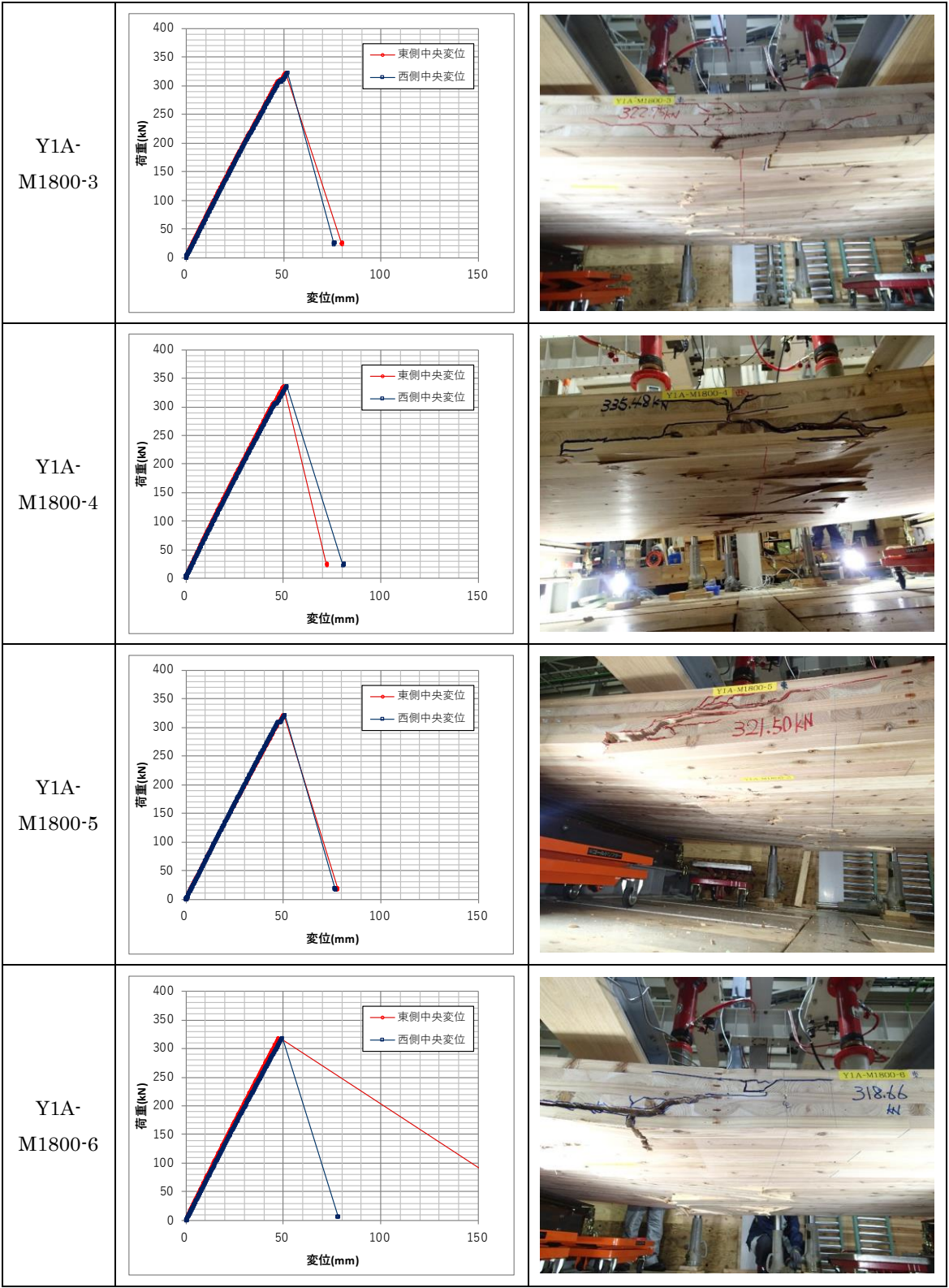


図 2.2-4 幅 1800mm 面外曲げ，幅はぎ有り (2)



(2) 900mm 幅

表 2.2-2 面外曲げ試験－5 層 5 プライ 900mm 幅

番号	密度 (kg/m ³)	E_r (GPa)	E_{rGHf} (GPa)	G_{rGHf} (GPa)	E_m (GPa)	E_b (GPa)	σ (MPa)	含水率 (%)
M1A-M900-1	397	5.72	7.48	0.272	7.27	8.15	24.8	9.7
M1A-M900-2	408	5.93	7.68	0.279	7.36	8.54	24.6	10.2
平均値	403	5.82	7.58	0.275	7.31	8.34	24.7	9.9

Y1A-M900-1	419	6.03	8.10	0.285	7.40	8.03	24.2	9.8
Y1A-M900-2	421	6.17	8.36	0.290	7.63	8.36	26.0	10.3
Y1A-M900-3	417	6.11	8.37	0.280	7.57	8.29	24.9	10.5
Y1A-M900-4	423	6.12	8.43	0.279	7.38	8.36	22.1	10.5
Y1A-M900-5	421	6.03	8.37	0.282	7.39	8.32	28.9	10.3
Y1A-M900-6	417	5.94	7.88	0.287	7.29	7.96	23.1	10.2
平均値	419	6.07	8.25	0.284	7.44	8.22	24.9	10.3
最小値	417	5.94	7.88	0.279	7.29	7.96	22.1	9.8
最大値	423	6.17	8.43	0.290	7.63	8.36	28.9	10.5
標準偏差	2.6	0.081	0.21	0.004	0.13	0.18	2.4	0.25
変動係数	0.62	1.3	2.6	1.5	1.7	2.1	9.6	2.4

図 2.2-5 幅 900mm 面外曲げ，幅はぎ接着無し

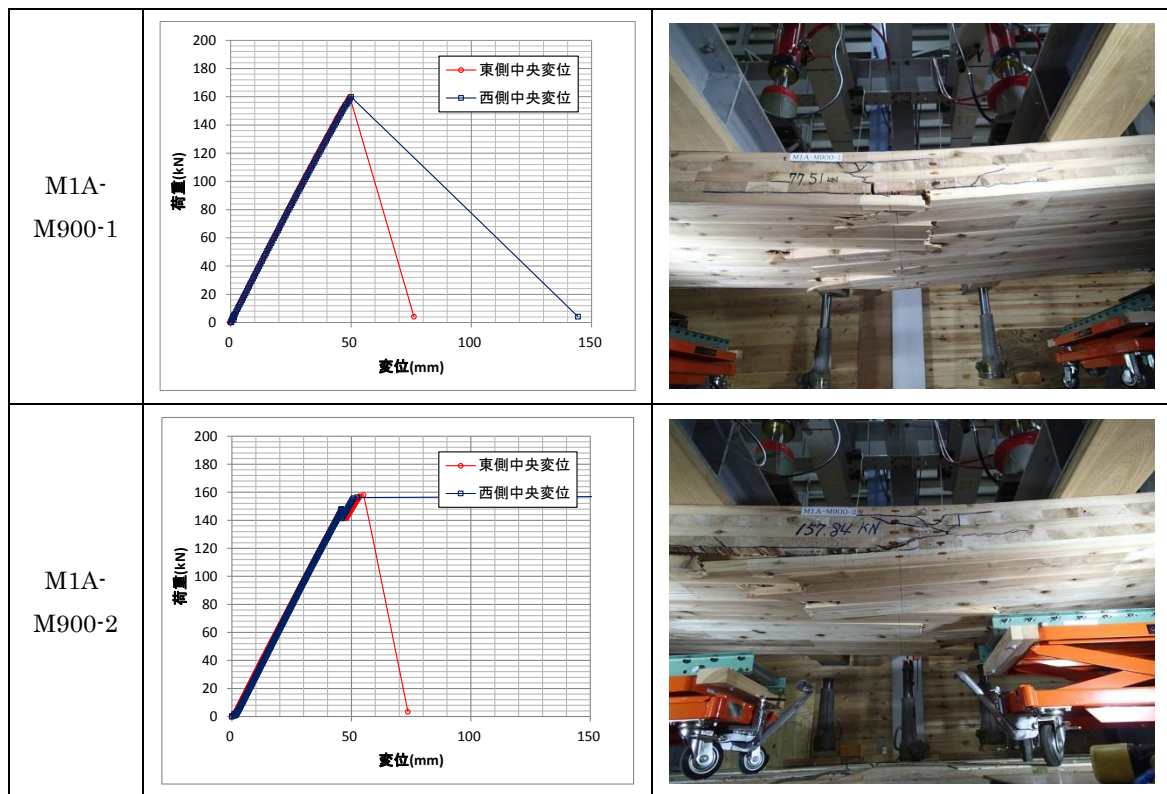
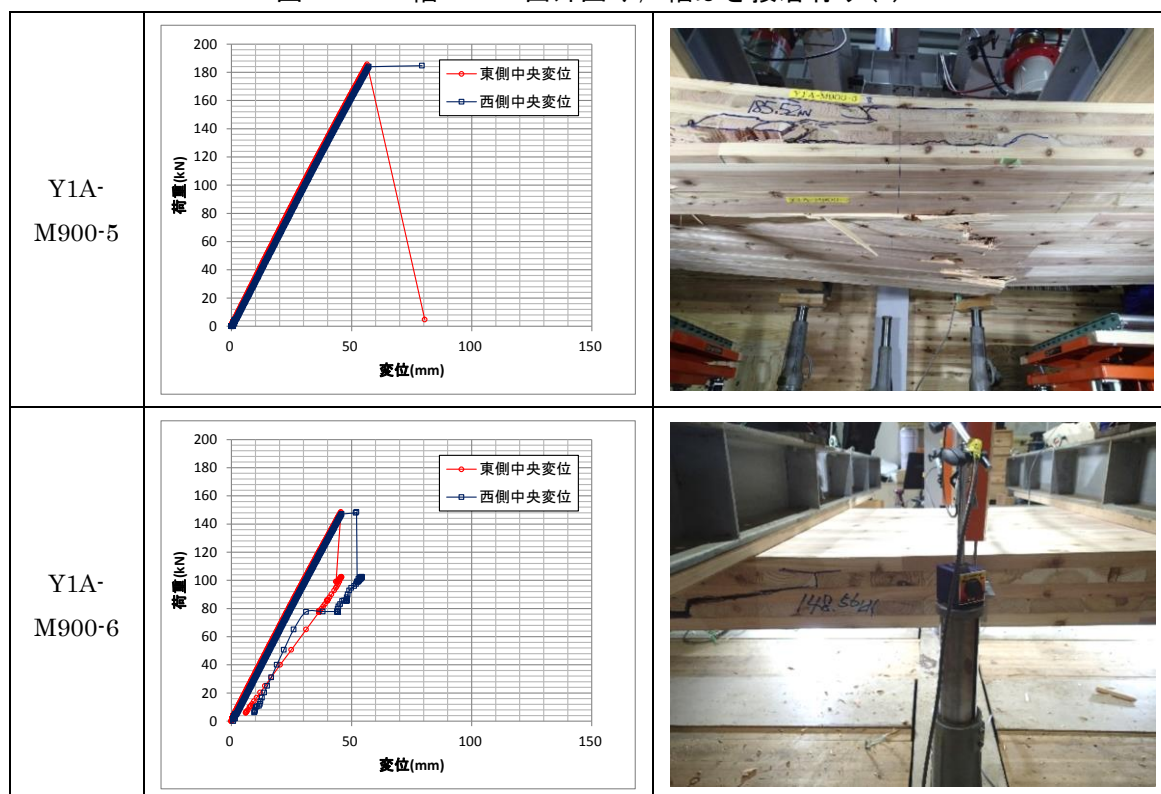


図 2.2-6 幅 900mm 面外曲げ，幅はぎ接着有り (1)

Y1A-M900-1	<p>Graph showing Load (kN) vs. Displacement (mm) for Y1A-M900-1. The load increases linearly to 155.6 kN at 50 mm displacement, then decreases.</p>	<p>Photograph of specimen Y1A-M900-1 under load, showing a crack and the load value 155.6 kN.</p>
Y1A-M900-2	<p>Graph showing Load (kN) vs. Displacement (mm) for Y1A-M900-2. The load increases linearly to 165.9 kN at 50 mm displacement, then decreases.</p>	<p>Photograph of specimen Y1A-M900-2 under load, showing a crack and the load value 165.9 kN.</p>
Y1A-M900-3	<p>Graph showing Load (kN) vs. Displacement (mm) for Y1A-M900-3. The load increases linearly to 159.8 kN at 50 mm displacement, then decreases.</p>	<p>Photograph of specimen Y1A-M900-3 under load, showing a crack and the load value 159.8 kN.</p>
Y1A-M900-4	<p>Graph showing Load (kN) vs. Displacement (mm) for Y1A-M900-4. The load increases linearly to 142.1 kN at 50 mm displacement, then decreases.</p>	<p>Photograph of specimen Y1A-M900-4 under load, showing a crack and the load value 142.1 kN.</p>

図 2.2-7 幅 900mm 面外曲げ, 幅はぎ接着有り (2)



(3) 600mm 幅

表 2.2-3 面外曲げ試験—5 層 5 プライ 600mm 幅

番号	密度 (kg/m ³)	E_r (GPa)	E_{TGHf} (GPa)	G_{TGHf} (GPa)	E_m (GPa)	E_b (GPa)	σ (MPa)	含水率 (%)
M1A-M600-1	403	5.77	7.91	0.259	7.35	7.91	26.0	10.3
M1A-M600-2	399	5.72	7.53	0.291	7.32	7.67	26.5	10.8
平均値	401	5.75	7.72	0.275	7.34	7.79	26.3	10.6

Y1A-M600-1	422	6.08	8.59	0.277	7.50	7.83	27.7	10.2
Y1A-M600-2	428	6.14	8.59	0.287	7.74	8.20	30.0	10.5
Y1A-M600-3	425	6.29	8.55	0.289	7.46	8.02	26.6	10.2
Y1A-M600-4	432	6.27	8.68	0.276	7.41	7.89	29.2	9.0
Y1A-M600-5	435	6.35	8.71	0.296	7.84	8.50	24.8	9.7
Y1A-M600-6	428	6.11	8.41	0.276	7.42	7.74	22.3	9.3
平均値	428	6.21	8.59	0.284	7.56	8.03	26.8	9.8
最小値	422	6.08	8.41	0.276	7.41	7.74	22.3	9.0
最大値	435	6.35	8.71	0.296	7.84	8.50	30.0	10.5
標準偏差	4.6	0.11	0.11	0.01	0.18	0.28	2.9	0.6
変動係数	1.1	1.8	1.3	3.1	2.4	3.5	10.7	5.8

図 2.2-8 幅 600mm 面外曲げ，幅はぎ接着無し

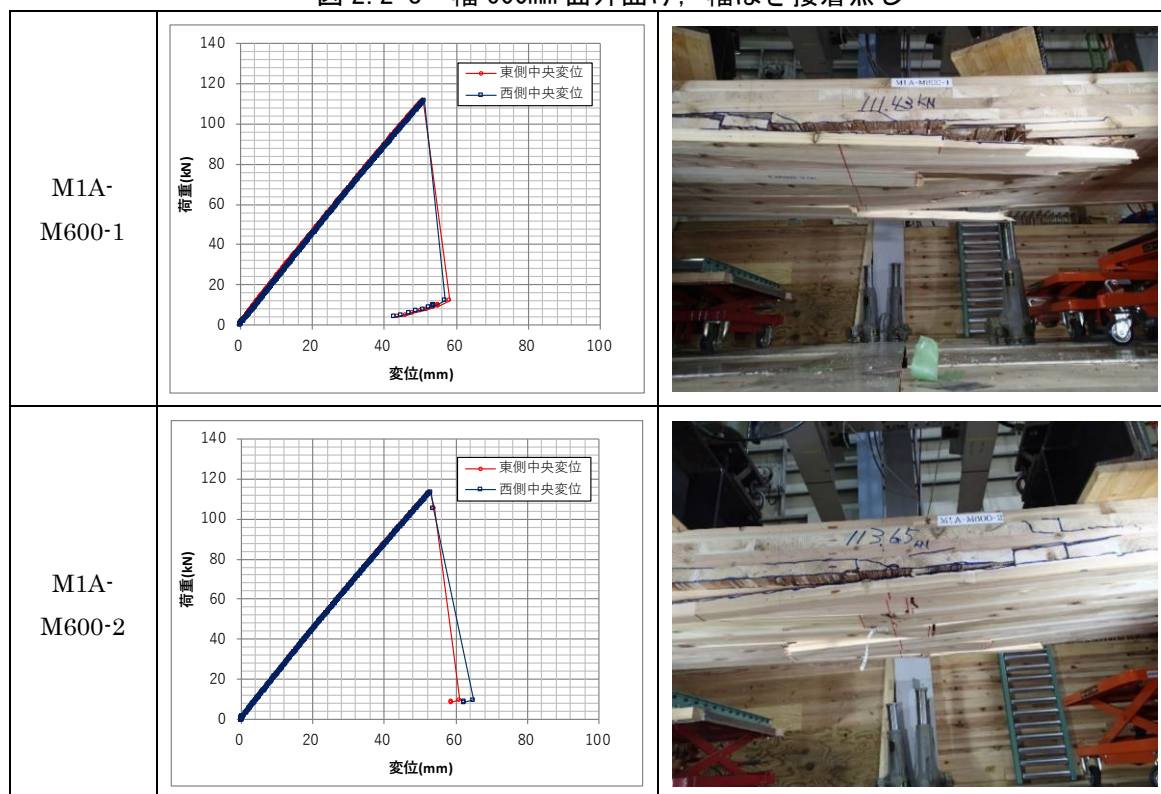


図 2.2-9 幅 600mm 面外曲げ，幅はぎ接着有り (1)

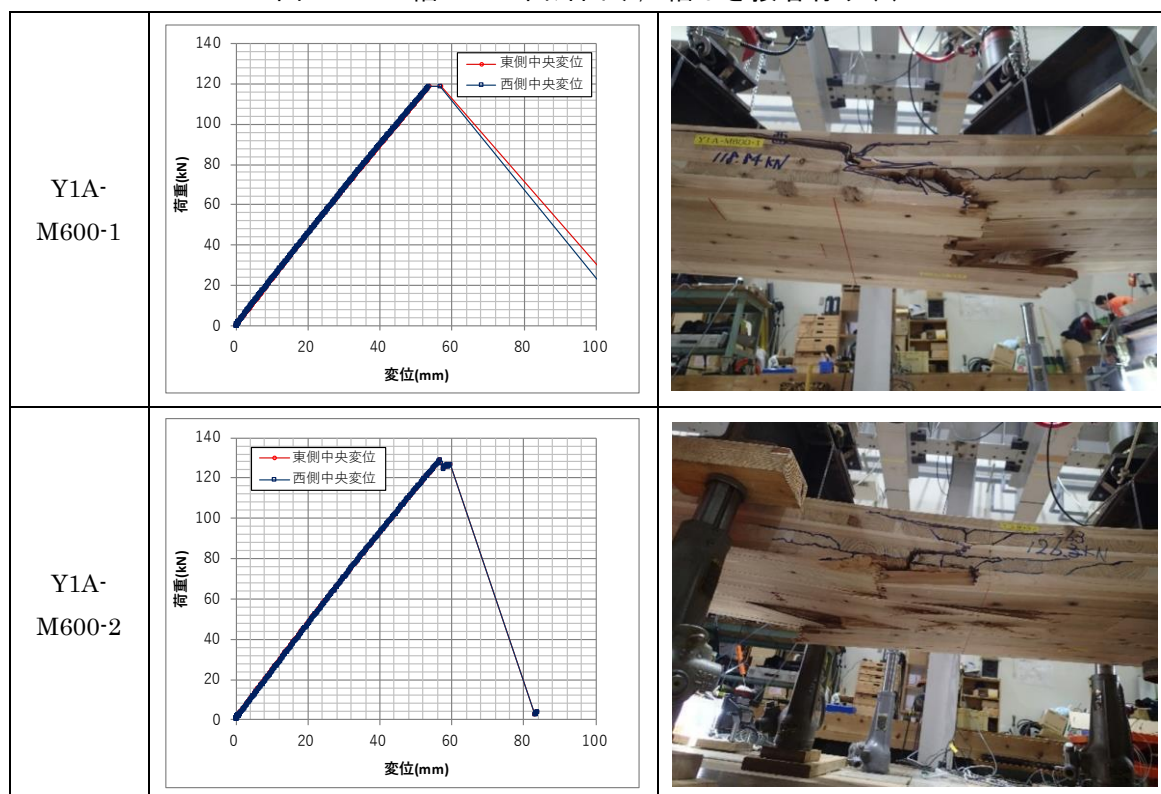
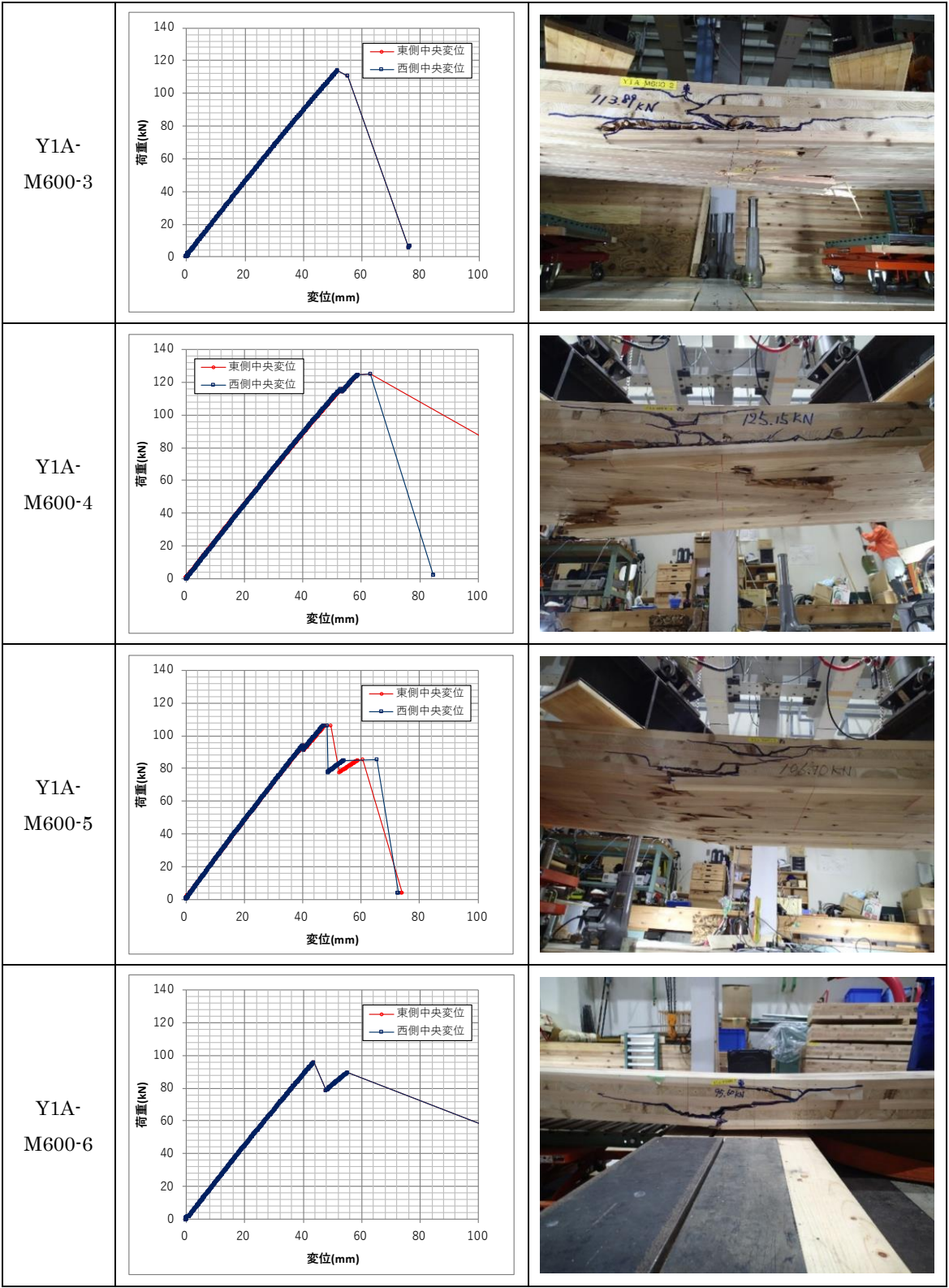


図 2.2-10 幅 600mm 面外曲げ，幅はぎ有り (2)



(3) 300mm 幅

表 2.2-4 面外曲げ試験－5 層 5 プライ 300mm 幅

番号	密度 (kg/m ³)	E_F (GPa)	E_{TGHF} (GPa)	G_{TGHF} (GPa)	E_m (GPa)	E_b (GPa)	σ (MPa)	含水率 (%)
M1A-M300-1	405	5.89	8.00	0.270	7.56	8.05	24.3	10.2
M1A-M300-2	410	5.59	8.34	0.258	7.65	8.01	28.1	10.0
平均値	408	5.74	8.17	0.264	7.61	8.03	26.2	10.1

Y1A-M300-1	410	6.03	8.13	0.285	7.97	8.16	24.9	10.7
Y1A-M300-2	404	5.66	7.77	0.259	7.22	7.37	26.2	10.5
Y1A-M300-3	402	5.68	7.60	0.275	7.38	7.41	27.5	10.5
Y1A-M300-4	406	5.82	8.23	0.246	7.69	8.17	23.4	10.5
Y1A-M300-5	409	5.73	7.79	0.277	7.31	8.13	31.4	9.2
Y1A-M300-6	406	5.79	7.93	0.259	7.43	7.67	24.5	9.5
平均値	406	5.79	7.91	0.267	7.50	7.82	26.3	10.1
最小値	402	5.66	7.60	0.246	7.22	7.37	23.4	9.2
最大値	410	6.03	8.23	0.285	7.97	8.17	31.4	10.7
標準偏差	3.0	0.14	0.24	0.01	0.28	0.38	2.9	0.6
変動係数	0.74	2.3	3.0	5.4	3.7	4.9	10.8	6.3

図 2.2-11 幅 300mm 面外曲げ，幅はぎ接着無し

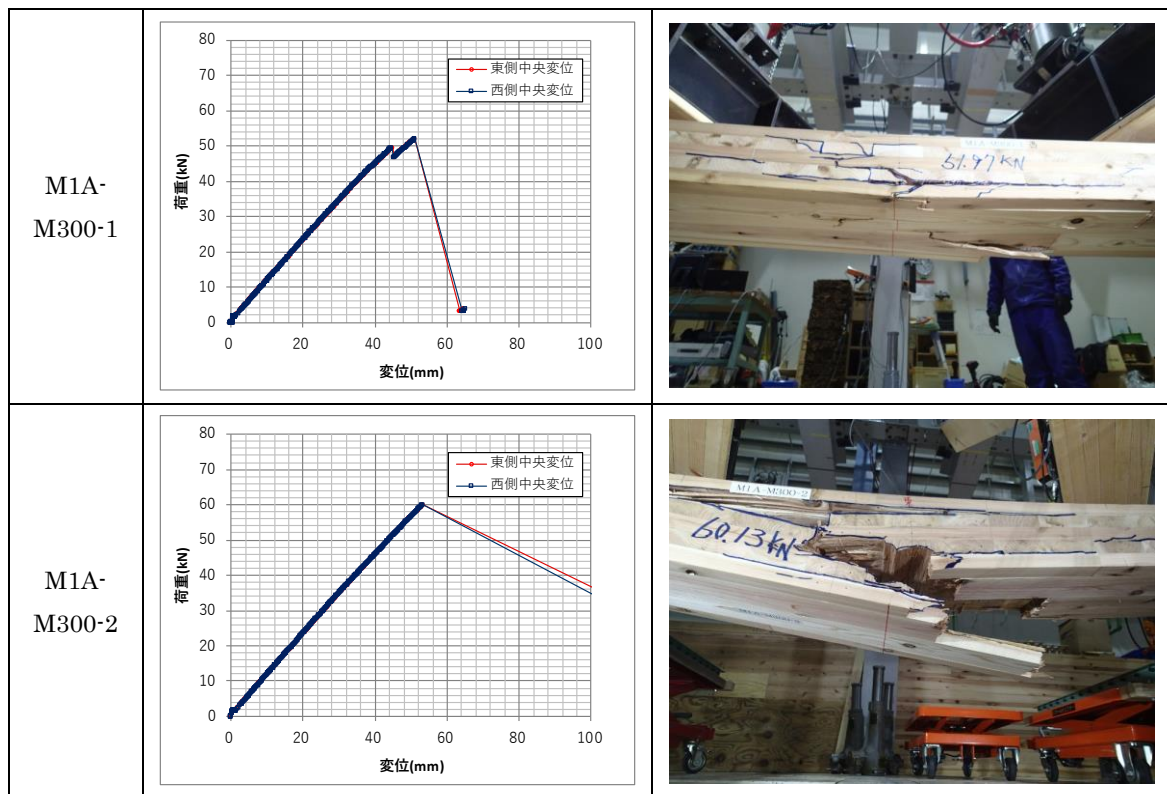
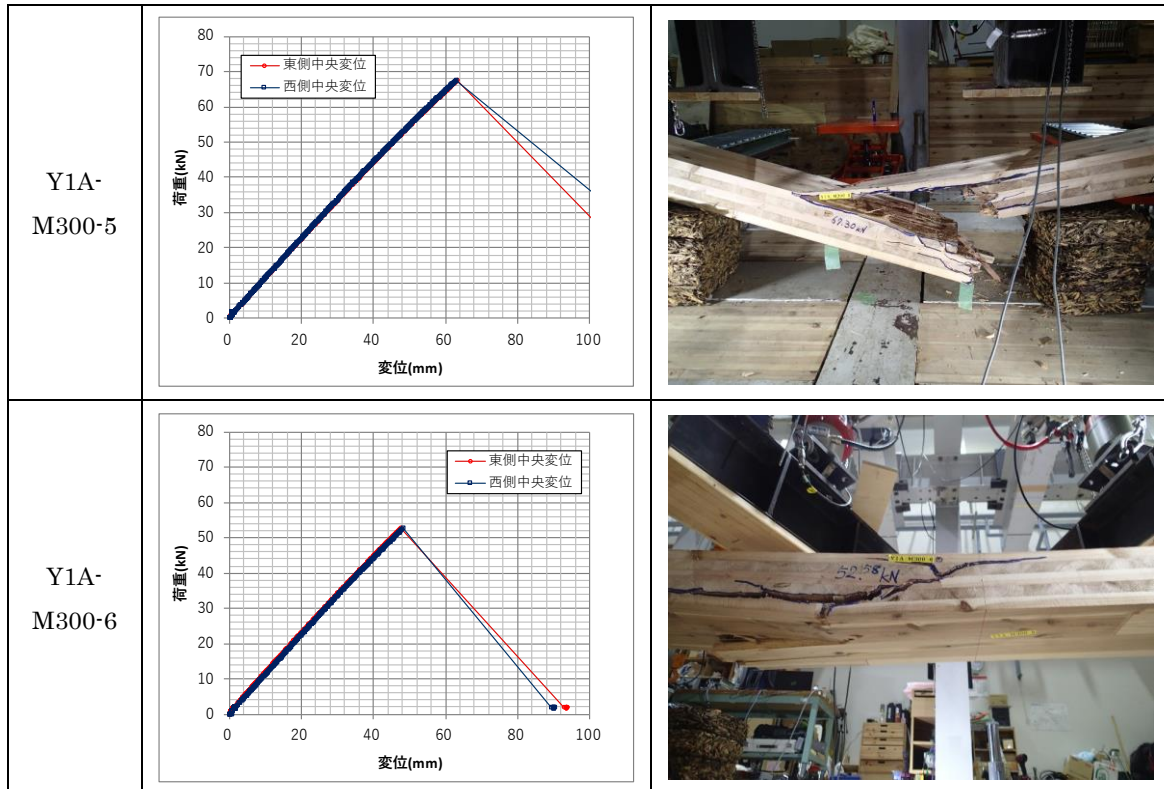


図 2.2-12 幅 300mm 面外曲げ, 幅はぎ接着有り(1)

<p>Y1A-M300-1</p>		
<p>Y1A-M300-2</p>		
<p>Y1A-M300-3</p>		
<p>Y1A-M300-4</p>		

図 2.2-13 幅 300mm 面外曲げ，幅はぎ接着有り (2)



2.2.3 考察

面外曲げ試験では、試験体幅に関わらず全ての試験体で曲げ破壊が先行し、せん断破壊が生じた試験体はなかった。曲げ性能に関しては、荷重点間に引張側最外層ラミナのフィンガージョイントや節の有無が曲げ強度に及ぼす影響が示唆され、幅の小さい試験体ほどばらつきが大きくなる傾向が認められた。図 2.2-14 に試験体幅と曲げ強度との関係を示す。同図より曲げ強度には寸法効果が認められ、JAS 規格の基本となる 300mm 幅に対して 1800mm 幅では約 6% 曲げ強度が低下することが示唆された。ラミナの幅はぎの有無と曲げ強度の関係に明確な差はなく、幅はぎの有無が曲げ強度に与える影響は確認できなかった。

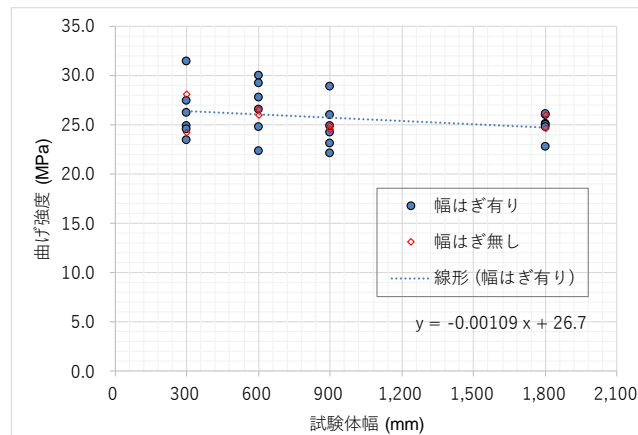


図 2.2-14 試験体幅と曲げ強度の関係

本試験では、写真 2.2-3～2.2-5 に示すように Π 型変位計（東京測器研究所(株)製 PI-5-50）を用いて、断面内のひずみ分布や幅はぎ接着の有無によるラミナ間の開きの測定を試みた。また、 Π 型変位計の測定変位から換算したひずみとひずみゲージによる測定結果を比較して、 Π 型変位計によるひずみ計測の妥当性を検証した。

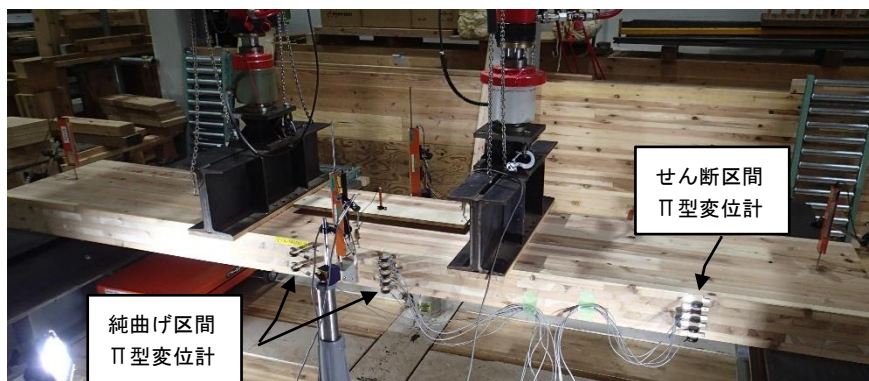


写真 2.2-3 Π 型変位計の設置

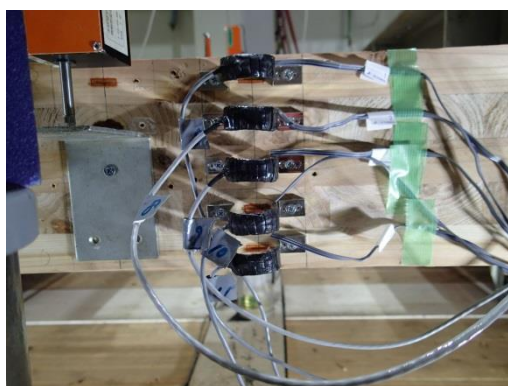
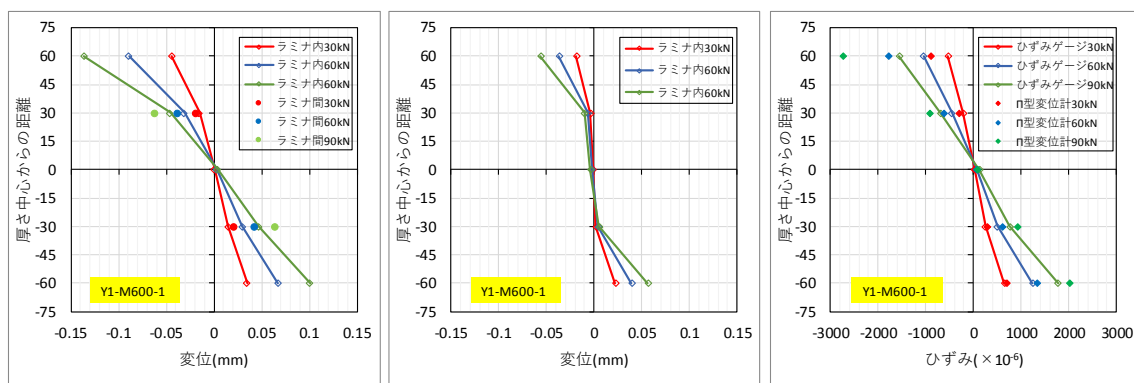


写真 2.2-4 同一ラミナ内での測定



写真 2.2-5 隣接ラミナ間での測定

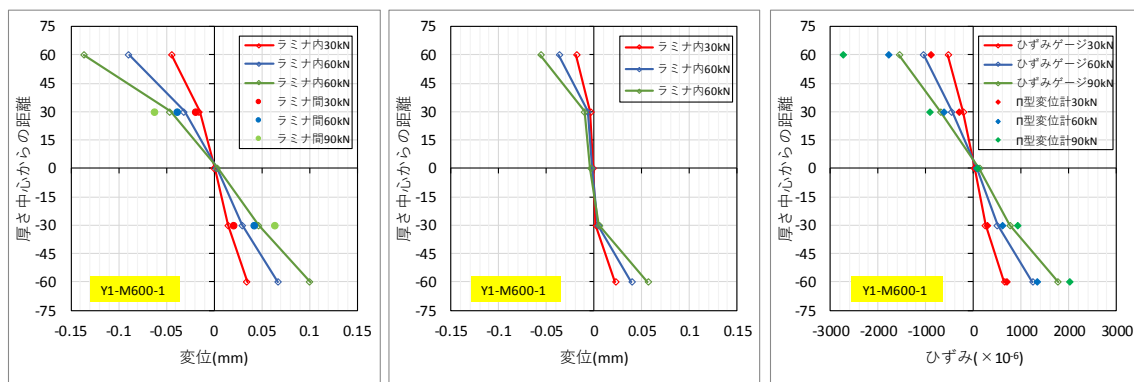


(a) 曲げ区間内の変位分布

(b) せん断区間の変位分布

(c) 曲げ区間内のひずみ分布

図 2.2-15 Π 型変位計およびひずみゲージによる断面内ひずみ分布の測定（幅はぎ有り）



(a) 曲げ区間内の変位分布 (b) セン断区間の変位分布 (c) 曲げ区間内のひずみ分布

図 2.2-16 II 型変位計およびひずみゲージによる断面内ひずみ分布の測定（幅はぎ無し）

II 型変位計の標点間距離（50mm）を基準にして、測定変位から換算したひずみ分布を図 2.2-7 に示す。また、II 型変位計と同じ位置に貼付したひずみゲージ（写真 2.2-3）で測定されたひずみ分布を図 2.2-8 に示す。これらを比較すると、ひずみ分布もひずみの絶対値も同等であり、II 型変位計によるひずみ測定も可能である。

2.2.4 まとめ

2.3 面外せん断試験

2.3.1 試験方法

面外曲げ試験には厚さ 30mm 幅 105mm のラミナを積層接着した厚さ 150mm の 5 層 5 プライのスギ CLT (強度等級 : Mx60-5-5) を用いた。なお、各ラミナの幅方向の接着 (幅はぎ接着) はされていない。試験体の長さは 1050mm、幅は 300mm、600mm、1200mm、1800mm であり、試験体数は幅はぎ有りが各 6 体、幅はぎ無しが各 3 体とした。

面外せん断試験は、図 2.3-1 および写真 2.3-1 に示すように支間 750mm の中央に線載荷する 3 点曲げ方式で行った。

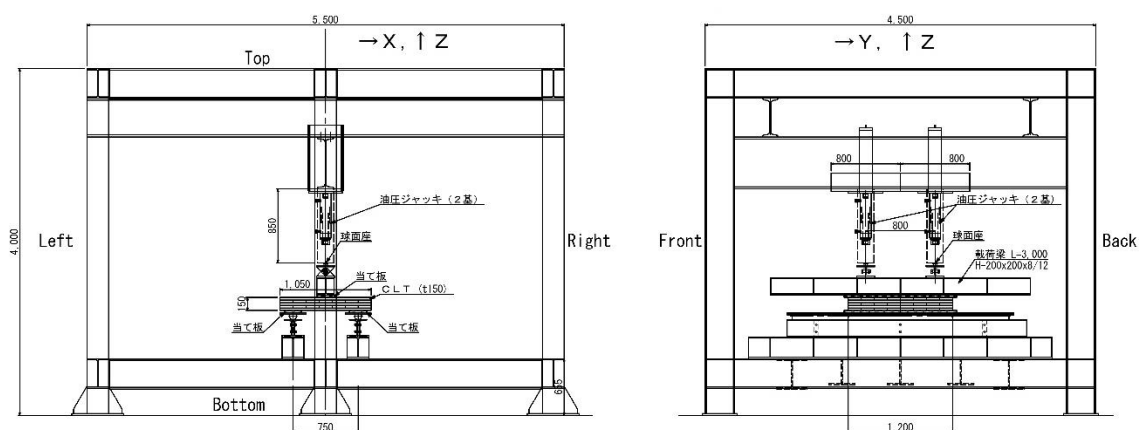


図 2.3-1 面外せん断試験方法

2.3.2 試験結果

面外せん断試験の結果一覧を幅の小さい順から表 2.2-1～表 2.2-4 にそれぞれ示す。

ここでは、試験で得られた最大荷重 P_{\max} からせん断強さ f_s を(3.2-1)式より求めた。

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

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

各試験体の荷重-変位関係を図 3.2-2 から、各試験体の破壊状況を写真 3.2-2 から順に示した。



写真 2.3-1 面外せん断試験

表 2. 3-1 面外せん断試験結果（試験体幅 1800mm）

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

表 2. 3-2 面外せん断試験結果（試験体幅 900mm）

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

表 2.3-3 面外せん断試験結果（試験体幅 600mm）

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

表 2.3-4 面外せん断試験結果（試験体幅 300mm）

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

図 2.3-2 幅 1800mm 面外せん断（幅はぎ無し）

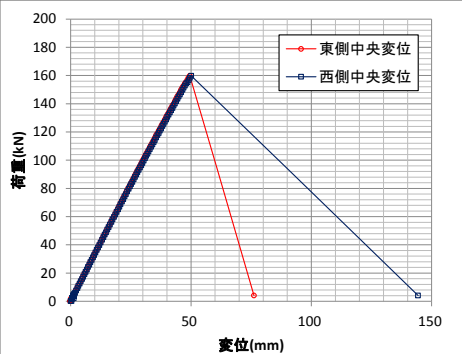

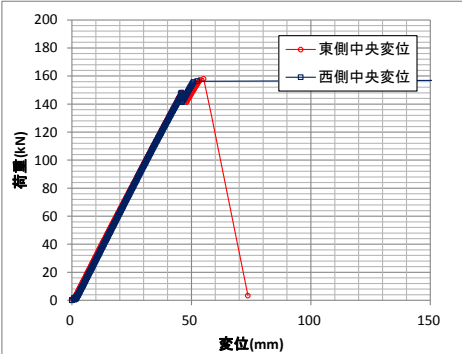

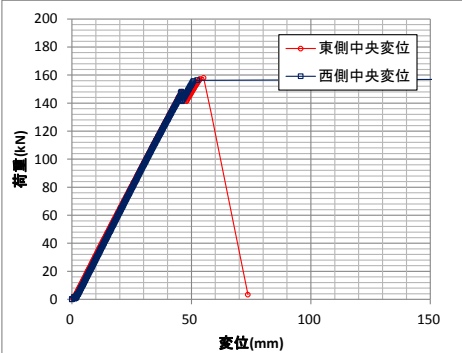

<p>M1A-S1800-1</p>		
<p>M1A-S1800-1</p>		
<p>M1A-S1800-3</p>		

図 2.3-3 幅 1800mm 面外せん断（幅はぎ有り）（1）

Y1A-S1800-1		
Y1A-S1800-1		
Y1A-S1800-3		
Y1A-S1800-4		

図 2.3-4 幅 1800mm 面外せん断（幅はぎ有り）（2）

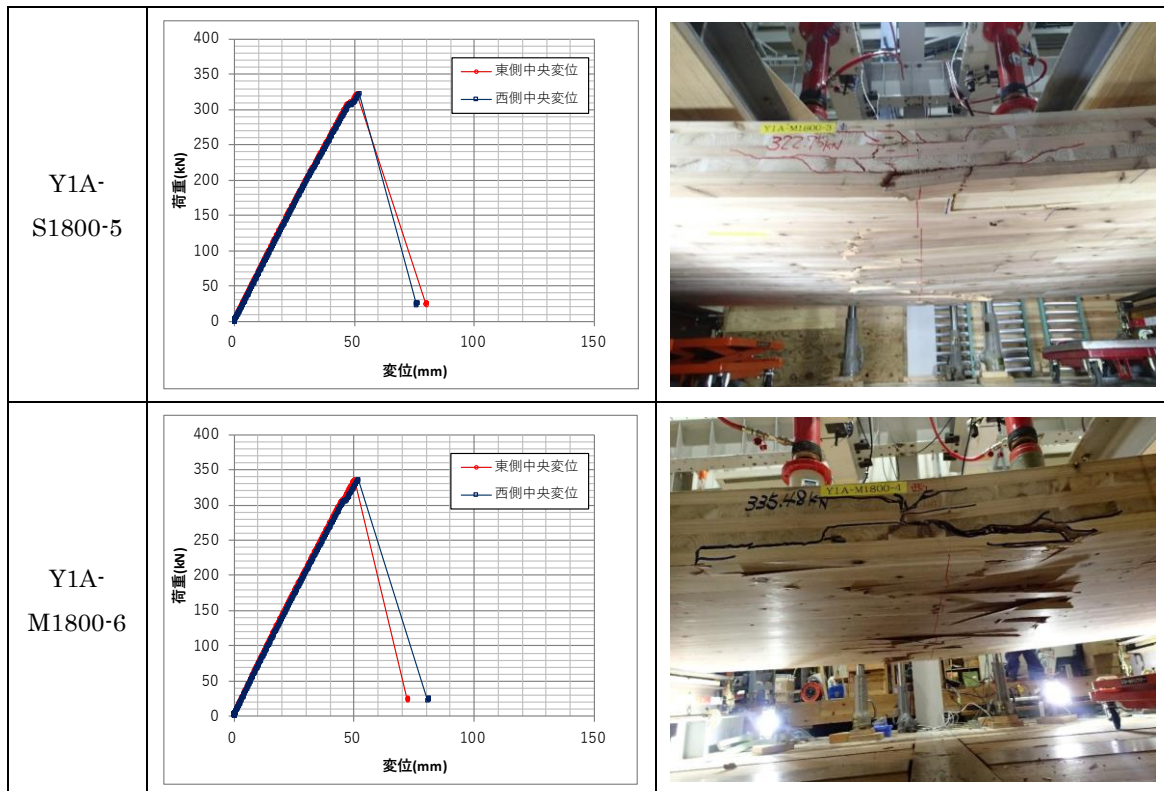


図 2.3-5 幅 900mm 面外せん断（幅はぎ無し）

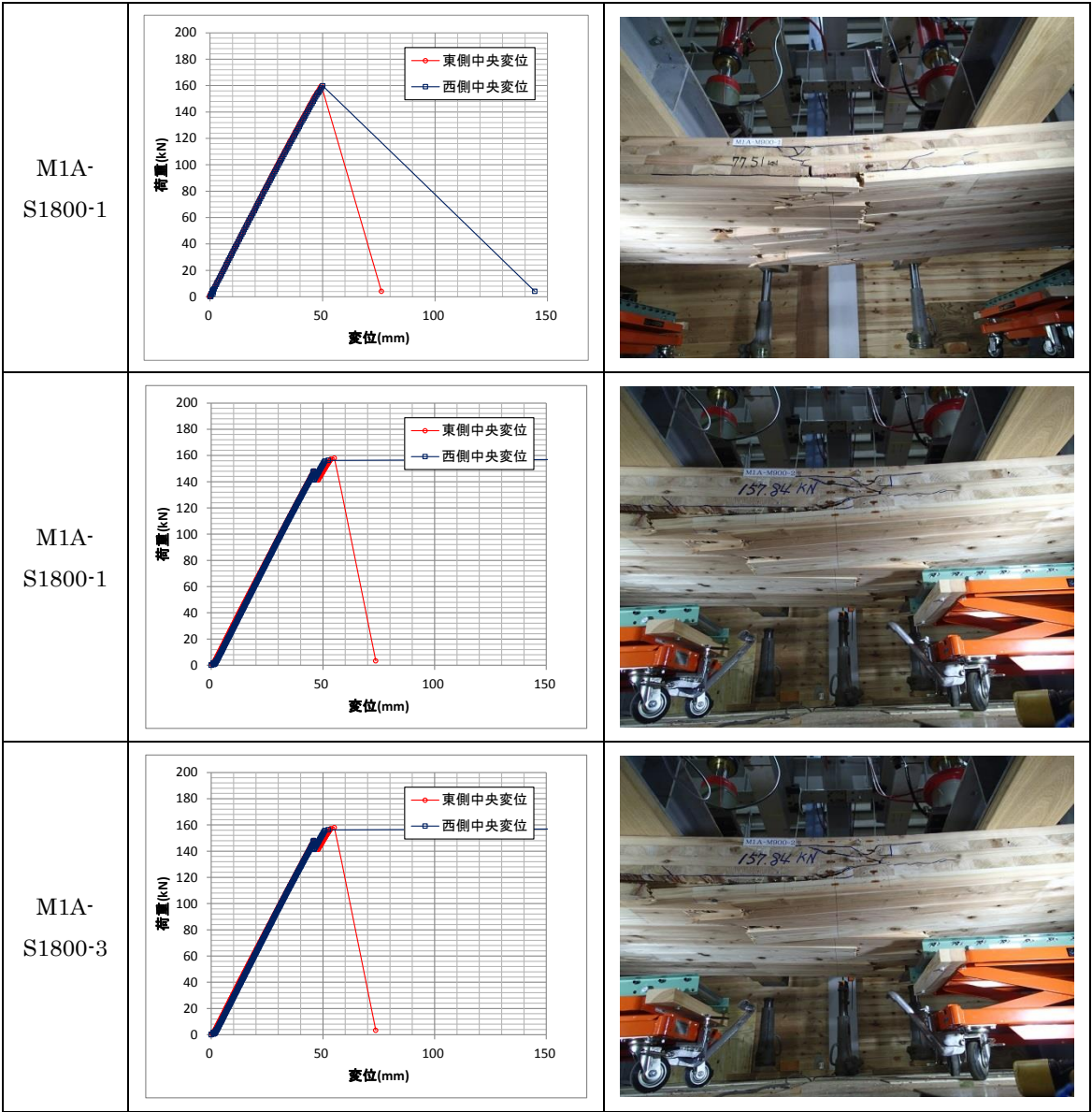


図 2.3-6 幅 900mm 面外せん断（幅はぎ有り）（1）

Y1A-S1800-1		
Y1A-S1800-1		
Y1A-S1800-3		
Y1A-S1800-4		

図 2.3-7 幅 900mm 面外せん断（幅はぎ有り）（2）

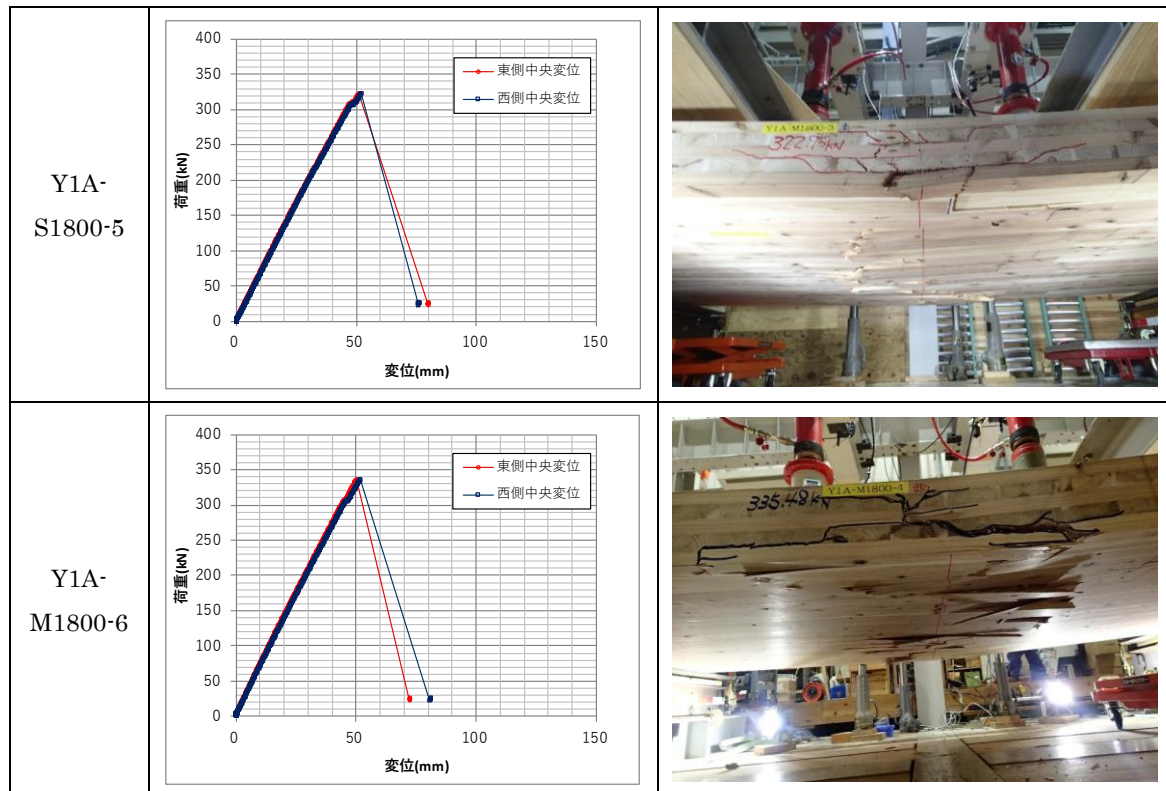


図 2.3-8 幅 600mm 面外せん断（幅はぎ無し）

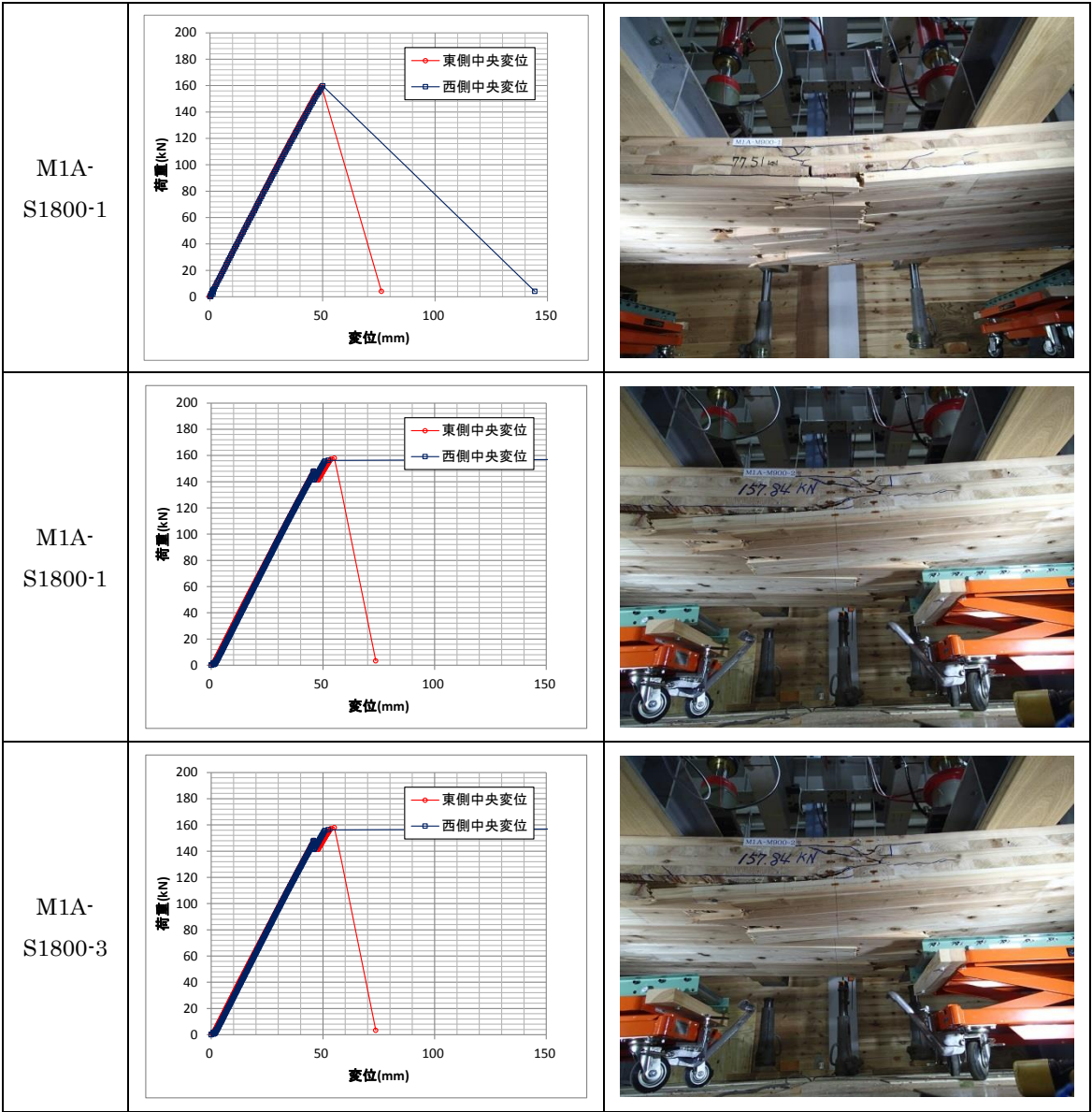


図 2.3-9 幅 600mm 面外せん断（幅はぎ有り）（1）

Y1A-S1800-1		
Y1A-S1800-1		
Y1A-S1800-3		
Y1A-S1800-4		

図 2.3-10 幅 600mm 面外せん断（幅はぎ有り）（2）

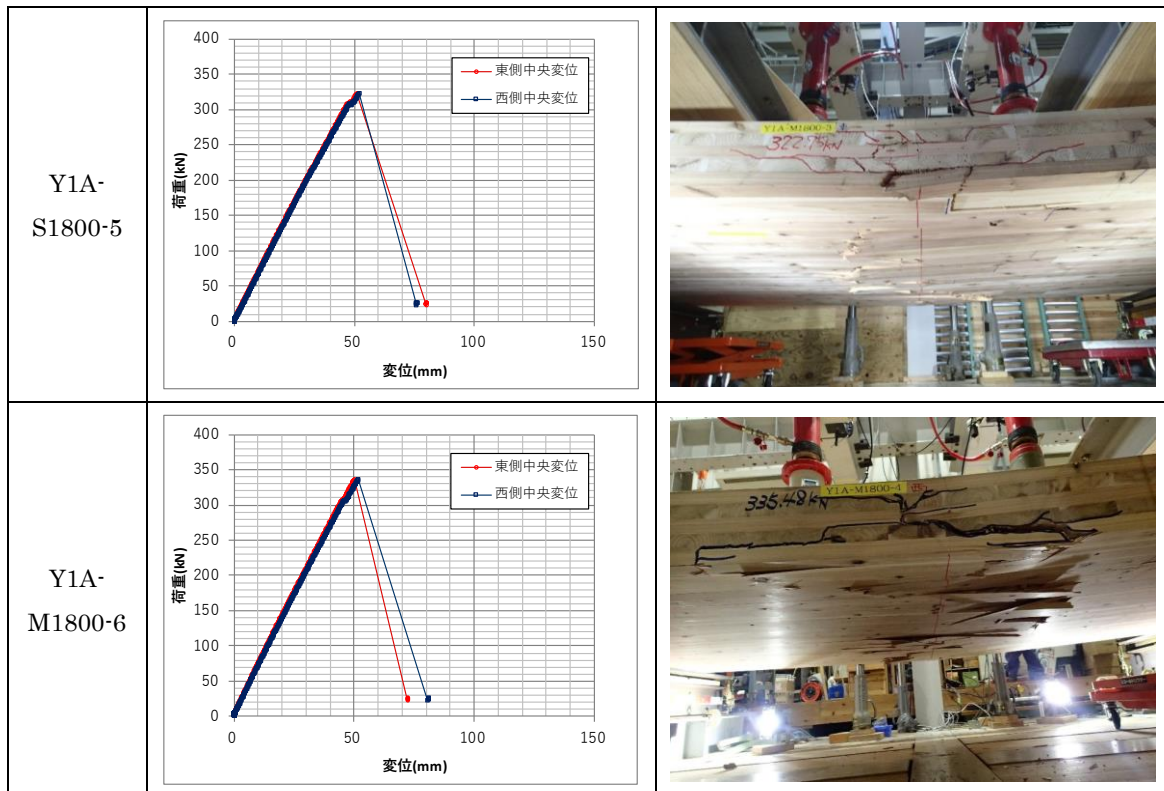


図 2.3-11 幅 300mm 面外せん断（幅はぎ無し）

<p>M1A-S1800-1</p>		
<p>M1A-S1800-1</p>		
<p>M1A-S1800-3</p>		

図 2.3-12 幅 300mm 面外せん断（幅はぎ有り）（1）

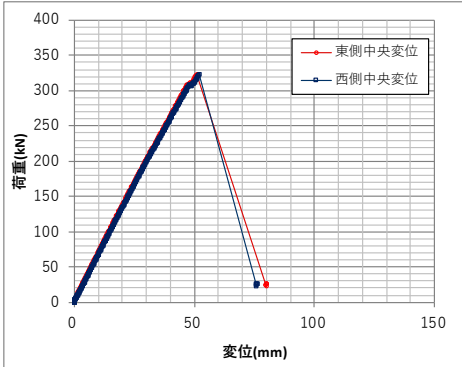

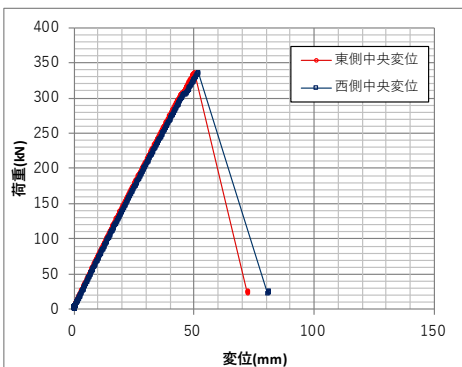
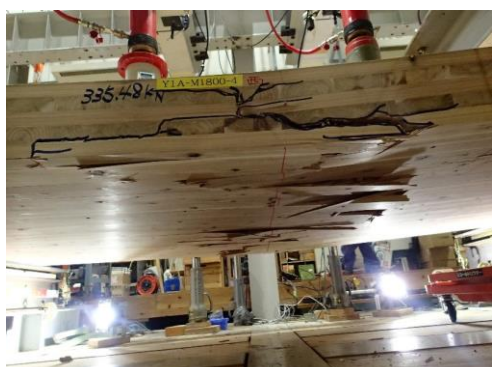
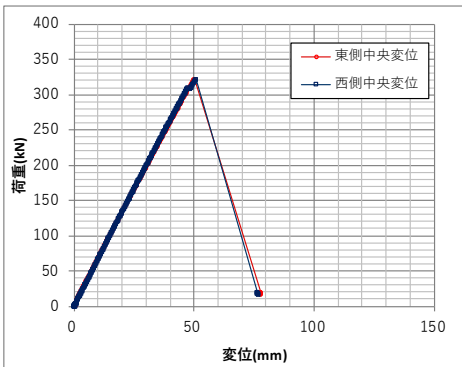

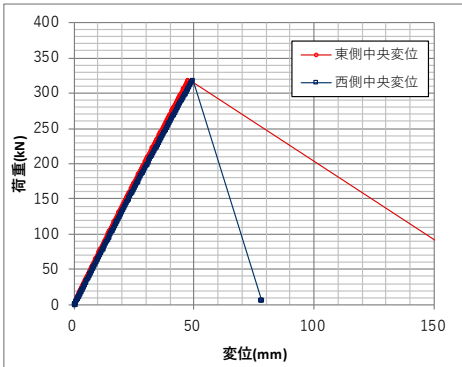

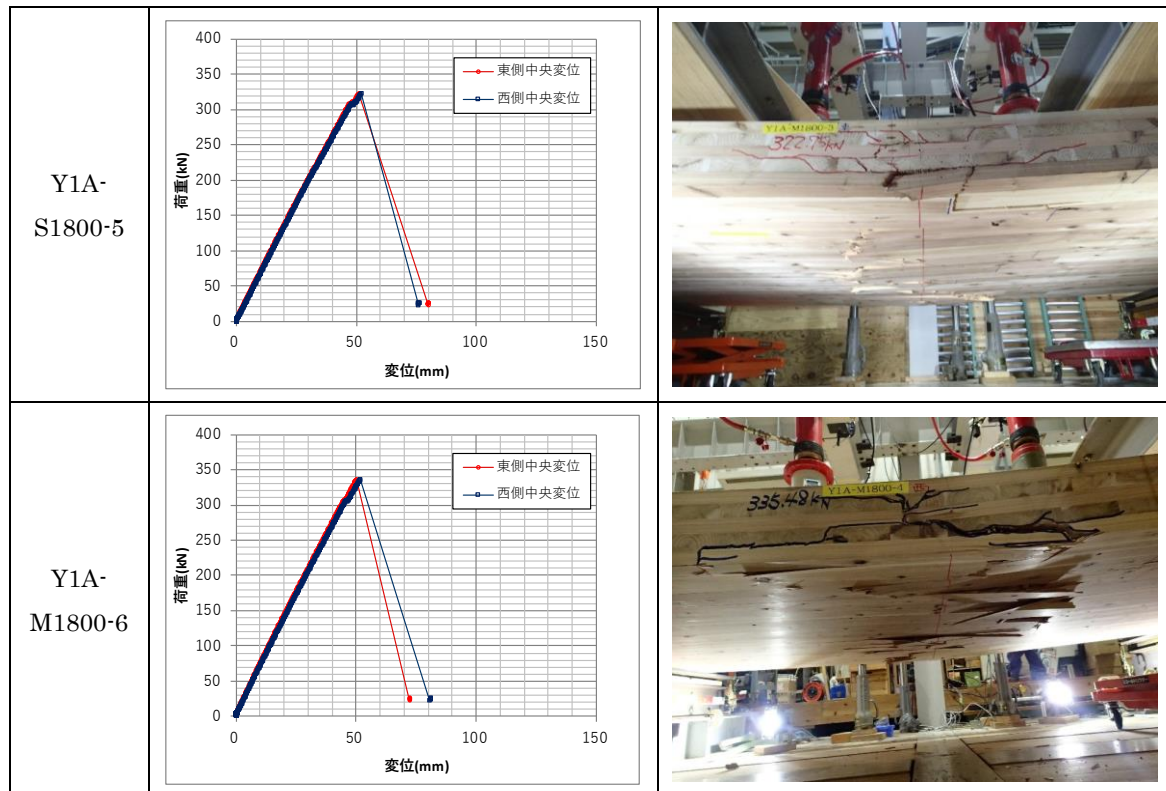
<p>Y1A-S1800-1</p>		
<p>Y1A-S1800-1</p>		
<p>Y1A-S1800-3</p>		
<p>Y1A-S1800-4</p>		

図 2.3-13 幅 300mm 面外せん断（幅はぎ有り）（2）



2.3.3 考察

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

曲げ試験と同様に、幅の小さい試験体ほどばらつきが大きくなる傾向が認められた。また、図 3.2-6 に試験体幅とせん断強度との関係を示す。同図よりせん断強度には寸法効果が認められなかった。

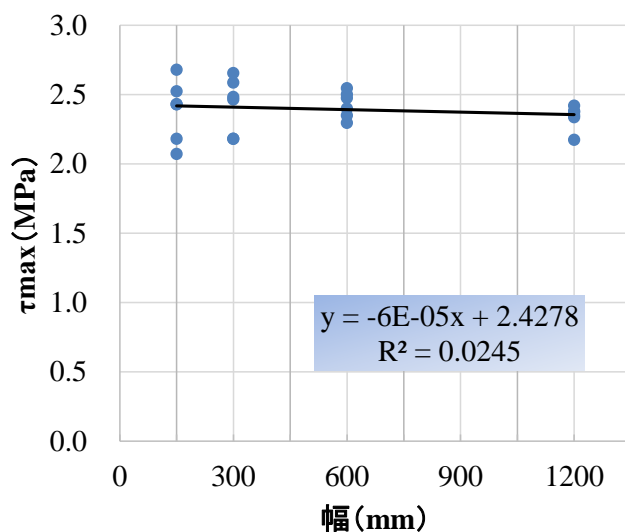


図 3.2-6 試験体幅とせん断強度の関係

2.3.4 まとめ

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

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

曲げ試験と同様に、幅の小さい試験体ほどばらつきが大きくなる傾向が認められたが、平均値で比較すると試験体幅によらずせん断強度は一定の値を示しており、せん断強度には明確な寸法効果は認められなかった。

2.4 引張り試験

2.4.1 試験方法

本試験で用いた CLT の概要を表 2.4-1 に示す。

表 2.4-1 本試験で用いた CLT の概要

等級・構成	幅はぎ接着	方向	大板番号	試験体寸法(mm) (厚さ×幅×長さ)	ラミナ幅 (mm)	試験体数	報告書の項
Mx60-5-5	あり	強軸	Y1-13～15-300	150×300×4000	105	6	2.4.2.イ.b
			Y1-13～15-600	150×600×4000		6	
	なし		M1-300	150×300×4000	105	2	2.4.2.ア
			M1-600	150×600×4000		2	

引張り試験に先立ち、縦振動法によるヤング係数および面外・面内方向の T.G.H.法（曲げたわみ振動法）による曲げヤング係数・せん断弾性係数を測定した。以上の非破壊測定方法は 1.9 項に示した方法と同様のため省略する。

引張り試験には、最大容量が 2000kN の横型引張り試験機（前川試験機製作所製、HZS-200-LB4）を用いた。引張り試験時のスパンチャック間距離は 3000mm、両つかみ部分の長さは約 500mm 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 または CDP-25M）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。幅 600mm の試験体の引張り試験の様子を写真 2.4-1 および 2.4-2 に示す。試験終了後、破壊部近傍から長さが約 30mm の含水率測定用試験体を切り出し、全乾法で含水率を測定した。



写真 2.4-1 幅 600mm の試験体の引張り試験の様子 写真 2.4-2 変位計およびヨークの取り付けの様子

2.4.2 試験結果

ア) 幅はぎ接着のない試験体

試験体の破壊状況の例を写真 2.4-3～2.4-6 に示すとともに、非破壊試験および引張り試験の結果を表 2.4-2、2.4-3 に示す。



写真 2.4-3 幅 300mm の試験体（幅面）



写真 2.4-4 幅 300mm の試験体（厚さ面）



写真 2.4-5 幅 600mm の試験体（幅面）



写真 2.4-6 幅 600mm の試験体（厚さ面）

表 2.4-2 非破壊試験および引張り試験の結果-M1-300

(Mx60-5-5、幅はぎ接着なし、ラミナ幅 105mm、試験体幅 300mm、強軸)

番号	密度(kg/m ³)	E _{fr}	E _{TGHf}	G _{TGHf}	E _{TGHe}	G _{TGHe}	E _t	σ _t	含水率 (%)
M1-300-1	403	5.50	7.53	0.261	5.45	0.696	5.44	14.2	9.09
M1-300-2	402	5.92	7.79	0.257	5.69	0.691	5.85	14.2	8.73
平均値	402	5.71	7.66	0.259	5.57	0.694	5.65	14.2	8.91

表 2.4-3 非破壊試験および引張り試験の結果-M1-600

(Mx60-5-5、幅はぎ接着なし、ラミナ幅 105mm、試験体幅 600mm、強軸)

番号	密度(kg/m ³)	E _{fr}	E _{TGHf}	G _{TGHf}	E _{TGHe}	G _{TGHe}	E _t	σ _t	含水率 (%)
M1-600-1	404	5.75	8.16	0.257	5.75	0.746	5.54	14.5	8.66
M1-600-2	408	5.76	7.96	0.261	5.74	0.760	5.50	11.9	9.05
平均値	406	5.75	8.06	0.259	5.74	0.753	5.52	13.2	8.86

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/mm^2)
 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/mm^2)
 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/mm^2)
 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/mm^2)
 E_t : 強度試験で得られた引張り弾性係数 (単位 kN/mm^2)
 σ_t : 強度試験で得られた引張り強さ (単位 N/mm^2)

イ) 幅はぎ接着のある試験体

イ a) 同一等級構成

この試験体の引張り試験は行わなかった。

イ b) 異等級構成

試験体の破壊状況の例を写真 2.4-7～2.4-10 に示すとともに、非破壊試験および引張り試験の結果を表 2.4-4、2.4-5 に示す。



写真 2.4-7 幅 300mm の試験体（幅面）



写真 2.4-8 幅 300mm の試験体（厚さ面）



写真 2.4-9 幅 600mm の試験体（幅面）



写真 2.4-10 幅 600mm の試験体（厚さ面）

表 2.4-4 非破壊試験および引張り試験の結果-Y1-13~15-300
(Mx60-5-5、幅はぎ接着あり、ラミナ幅 105mm、試験体幅 300mm、強軸)

番号	密度(kg/m ³)	Efr	ETGHf	GTGHf	ETGHe	GTGHe	Et	ot	含水率 (%)
Y1-13-300-ma-1	409	5.80	7.82	0.262	5.81	0.735	5.44	15.0	9.15
Y1-13-300-ma-2	409	5.64	8.13	0.254	5.81	0.758	5.24	12.7	8.99
Y1-14-300-ma-1	409	5.81	8.05	0.244	5.70	0.727	5.44	12.6	9.43
Y1-14-300-ma-2	408	5.77	8.06	0.248	5.77	0.676	5.54	12.4	9.31
Y1-15-300-ma-1	408	5.70	7.76	0.259	5.40	0.777	5.24	15.3	8.81
Y1-15-300-ma-2	392	5.71	7.96	0.241	5.71	0.679	5.38	16.6	9.03
平均値	406	5.74	7.96	0.251	5.70	0.725	5.38	14.1	9.12
最小値	392	5.64	7.76	0.241	5.40	0.676	5.24	12.4	8.81
最大値	409	5.81	8.13	0.262	5.81	0.777	5.54	16.6	9.43
標準偏差	6.82	0.0686	0.148	0.00840	0.155	0.0409	0.118	1.77	0.226
変動係数(%)	1.68	1.20	1.85	3.34	2.72	5.65	2.19	12.5	2.48

表 2.4-5 非破壊試験および引張り試験の結果-Y1-13~15-600
(Mx60-5-5、幅はぎ接着あり、ラミナ幅 105mm、試験体幅 600mm、強軸)

番号	密度(kg/m ³)	Efr	ETGHf	GTGHf	ETGHe	GTGHe	Et	ot	含水率 (%)
Y1-13-600-ma-1	410	5.82	8.15	0.270	5.86	0.757	5.40	16.0	8.80
Y1-13-600-ma-2	415	5.91	8.24	0.260	5.99	0.760	6.01	14.6	8.77
Y1-14-600-ma-1	408	5.81	7.94	0.262	5.89	0.745	5.51	14.7	8.60
Y1-14-600-ma-2	414	5.86	7.87	0.261	5.95	0.747	5.05	15.0	9.01
Y1-15-600-ma-1	405	5.72	7.81	0.269	5.84	0.747	5.36	13.2	8.34
Y1-15-600-ma-2	402	5.56	7.81	0.262	5.48	0.787	5.03	13.7	8.59
平均値	409	5.78	7.97	0.264	5.83	0.757	5.39	14.5	8.68
最小値	402	5.56	7.81	0.260	5.48	0.745	5.03	13.2	8.34
最大値	415	5.91	8.24	0.270	5.99	0.787	6.01	16.0	9.01
標準偏差	4.94	0.127	0.185	0.00436	0.183	0.0157	0.361	0.983	0.226
変動係数(%)	1.21	2.19	2.32	1.65	3.13	2.07	6.70	6.76	2.61

Efr：縦振動法による縦弾性係数（単位 kN/mm²）

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

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

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

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

Et：強度試験で得られた引張り弾性係数（単位 kN/mm²）

ot：強度試験で得られた引張り強さ（単位 N/mm²）

ウ) 幅はぎラミナを用いた試験体

この試験体の引張り試験は行わなかった。

2.4.3 考察

ア) 幅の影響 (2.4.2.イ.b 内の比較から)

幅はぎ接着ありの試験体について、試験体幅と引張り強度との関係を図 2.4-1 に示す。試験体幅を 300mm と 600mm とした CLT の引張り強度について t 検定を行った結果、本試験体では、有意水準 5% で平均値に有意差は認められなかった。なお、幅はぎ接着なしの試験体については、試験体数が 2 体ずつしかないため、幅の影響についての検討は行わなかった。

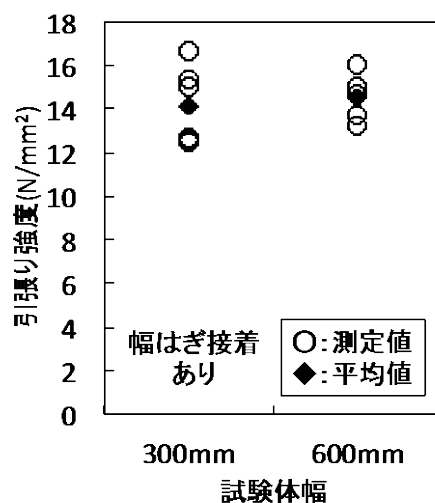


図 2.4-1 試験体幅と引張り強度との関係

2.5 まとめ

幅はぎ接着した CLT において、面外曲げおよび面外せん断の試験体については幅 300mm～1800mm、引張りの試験体については幅 300mm と 600mm で強度試験を行った。その結果、面外曲げにおいて平均値の若干の低下が見られ、累乗関数で近似し寸法調整係数を求めると 0.036 となった（図 2.5-1）。これまでに、幅 150mm～2400mm の範囲で幅はぎ接着していない CLT において、スギ CLT（図 2.5-1 中 Mx60）では 0.052、ヒノキ・スギの複合 CLT（図 2.5-1 中 Mx90）では 0.070 が得られている。これらの傾向を勘案すると、幅はぎ接着した CLT でも試験体幅が面外曲げ強度に与える影響は小さいながらもあると言えそうである。

一方、面外せん断および引張りについては、試験体幅の影響を受けないという結果になった。これは、幅はぎ接着していない CLT でこれまでに明らかになった傾向と同様である。また、引張りについてはそのバラツキが試験体幅の増加にともない小さくなる傾向が見られたが、この点も幅はぎ接着していない CLT の傾向と同様であった。

これらのことから、幅はぎ接着したプライで構成した CLT にあっても、試験体幅が面外曲げ、面外せん断、引張りの強度に与える影響の傾向は幅はぎ接着をしないプライで構成された CLT と変わらないと考えられた。

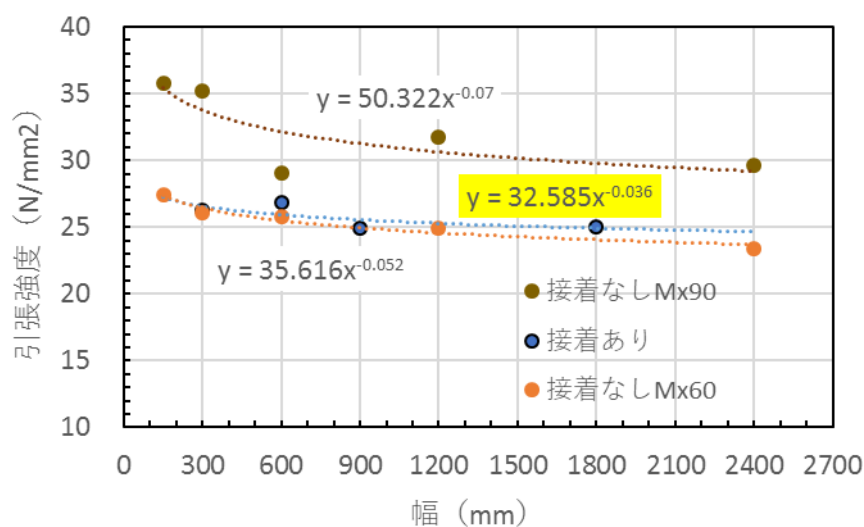


図 2.5-1 試験体幅が面外曲げ強度に及ぼす影響

3. CLT 用ラミナの適正製造条件の検討

3.1 幅はぎ接着ラミナの強度性能の特徴

幅はぎ接着ラミナの品質・材質変動とラミナの性能との関係を実験的に検証するため、幅はぎ接着ラミナの曲げ、引張、圧縮を行った。

3.1.1 供試体

樹種はスギとし、連続式グレーディングマシン（飯田工業㈱MGFE-251）により挽き板の曲げヤング係数をもとに表 3.1.1 のとおり 2 種にグレーディングし、これらを混ぜ合わせたものとの計 3 グレードのラミナを製造することとした。グレーディングした挽き板は、直交集成板の JAS 基準により節や腐れ等を選別し、4m に縦継ぎした（以下、縦継ぎラミナ）。断面寸法は幅 100mm、厚み 30mm とした。フィンガージョイント（以下、FJ）は、垂直型、フィンガー長：12mm、ピッチ：4.0mm、スカーフ傾斜比：1/8.9、先端厚さ：0.7mm、嵌合度：0.1mm とし、縦継ぎ接着には水性高分子イソシアネート系接着剤を使用した。幅はぎ接着ラミナ（以下、幅はぎラミナ）は幅を 250mm とし、縦継ぎラミナ 3 枚を幅 85mm、85mm、80mm に切削し、連続式幅はぎ接着用機械（㈱太平製作所 C70-E）により 3 枚ずつ幅はぎ接着して製造した。幅はぎ接着は水性高分子イソシアネート系接着剤を使用した。

なお、本節（3 章 1 節）では、40kgf/mm²以上 70kgf/mm²未満の挽き板から製造したラミナを異等級構成の内層用を目安にして「内層用」、70kgf/mm²以上 100kgf/mm²未満を異等級構成の外層用を目安にして「外層用」、2 つを混ぜ合わせたものを同一等級構成を目安として「同一用」と記載して報告する。



写真 3.1.1 幅はぎラミナ

表 3.1.1 ラミナの選別基準と結果

ラミナの区分名	挽き板の曲げヤング係数	グレーディング結果	
		曲げヤング係数の 平均値	枚数
内層用	40kgf/mm ² 以上 70kgf/mm ² 未満	58.3	842
外層用	70kgf/mm ² 以上 100kgf/mm ² 未満	82.2	898
同一用	40kgf/mm ² 以上 100kgf/mm ² 未満		
	計	70.6	1,740

3.1.2 非破壊試験

製造した 4m 縦継ぎラミナについて、音響振動測定器（リオン㈱ SA-78）を使用して縦振動法による縦弾性係数（以下、Efr）と密度を求め、幅はぎ接



写真 3.1.2 非破壊測定の様子

着後に E_{fr} と密度を求めた。また、切り出した試験体についても密度を測定し、一部は E_{fr} を測定した。

3.1.3 曲げ試験

(1) 試験方法

幅はぎラミナの試験体は、4m の幅はぎラミナから採取し、構成する 3 枚のラミナうち 2 枚以上に FJ が加力点間に存在するようにし、幅は 250mm、厚みは 30mm、長さは厚みの 25 倍となる 750mm とした。また、縦継ぎラミナ単体の試験体は、4m 縦継ぎラミナから採取し、加力点間中央に FJ が存在するようにし、幅 100mm、厚み 30mm、長さ 750mm とした。

曲げ試験は、木材圧縮・引張試験機（㈱エイ・アンド・デイ RTF-2410）を使用して行った。加力方式は 3 等分点 4 点荷重方式とし、スパンを厚さの 21 倍、630mm とした。スパン中央の材端から 15mm 内側の 2 箇所に変位計（東京測器研究所 CDP-25）を設置し、たわみを測定した。加力速度は 3~4mm/min とした。



写真 3.1.3-1 曲げ試験の様子

(2) 結果

幅はぎラミナの曲げ試験の結果を表 3.1.3-1、-2、-3 に、縦継ぎラミナ単体の結果を表 3.1.3-4 に示す。試験により得た幅はぎラミナの曲げヤング係数は、いずれの区分も、幅はぎ前の縦継ぎラミナ状態での E_{fr} 平均値と同程度となった。また、縦継ぎラミナ単体に対して、幅はぎラミナの曲げ強さはわずかに高くなった。曲げヤング係数はまちまちで、同程度であった。ばらつきは、両数値とも低くなった。

幅はぎラミナの破壊の状況例を写真 3.1.3-2、-3 に示す。いずれの破壊も FJ や節を起因としたものであった。また、破壊性状は、構成するラミナ 3 枚のうち 1 枚もしくは 2 枚同時による破壊（写真 3.1.3-2）のものが多く、それらは、その後残る 1 枚が荷重負担した後に完全破断した。

表 3.1.3-1 幅はぎラミナ曲げ試験の結果（内層用）

[内層用] 通し 番号 試験体数30	縦継ぎ ラミナ* ₂ Efr* ₁ kN/mm ²	幅はぎラミナ* ₃		試験体* ₄ 密度 kg/m ³	曲げ試験		
		密度 kg/m ³	Efr kN/mm ²		最大荷重 Pmax N	曲げ強さ N/mm ²	曲げヤング 係数 kN/mm ²
最小値	5.44	349	5.29	355	8,134	22.6	5.3
平均	6.09	383	6.05	383	11,426	31.9	6.1
最大値	6.76	413	6.85	421	14,677	41.0	7.6
標準偏差	0.42	11.9	0.43	14.6	1514.4	4.2	0.5
変動係数	6.8%	3.1%	7.2%	3.8%	13.3%	13.3%	8.3%

*1：縦振動法による動的弾性係数

*2：幅はぎ接着する前の4m縦継ぎラミナ3枚のEfrの平均値

*3：幅はぎ接着した4mラミナの密度とEfr

*4：試験体寸法 W250*T30*L750mm

表 3.1.3-2 幅はぎラミナ曲げ試験の結果（外層用）

[外層用] 通し 番号 試験体数30	縦継ぎ ラミナ* ₂ Efr* ₁ kN/mm ²	幅はぎラミナ* ₃		試験体 密度 kg/m ³	曲げ試験		
		密度 kg/m ³	Efr kN/mm ²		最大荷重 Pmax N	曲げ強さ N/mm ²	曲げヤング 係数 kN/mm ²
最小値	7.22	394	7.38	380	11,551	32.4	7.0
平均	8.43	419	8.51	427	14,131	39.6	8.5
最大値	9.32	439	9.34	469	17,219	48.2	9.9
標準偏差	0.57	11.8	0.52	18.6	1616.3	4.5	0.7
変動係数	6.8%	2.8%	6.1%	4.3%	11.4%	11.5%	7.8%

*1：縦振動法による動的弾性係数

*2：幅はぎ接着する前の4m縦継ぎラミナ3枚のEfrの平均値

*3：幅はぎ接着した4mラミナの密度とEfr

*4：試験体寸法 W250*T30*L750mm

表 3.1.3-3 幅はぎラミナの曲げ試験の結果（同一用）

[同一用] 通し 番号 試験体数30	縦継ぎ ラミナ* ₂ Efr* ₁ kN/mm ²	幅はぎラミナ* ₃		試験体 密度 kg/m ³	曲げ試験		
		密度 kg/m ³	Efr kN/mm ²		最大荷重 Pmax N	曲げ強さ N/mm ²	曲げヤング 係数 kN/mm ²
最小値	5.86	375	5.82	365	8,127	22.7	5.4
平均	6.84	405	6.84	406	11,824	33.1	6.8
最大値	7.90	427	7.72	445	16,380	46.0	8.3
標準偏差	0.47	13.8	0.51	20.5	1851.7	5.2	0.7
変動係数	6.9%	3.4%	7.4%	5.0%	15.7%	15.7%	10.8%

*1：縦振動法による動的弾性係数

*2：幅はぎ接着する前の4m縦継ぎラミナ3枚のEfrの平均値

*3：幅はぎ接着した4mラミナの密度とEfr

*4：試験体寸法 W250*T30*L750mm

表 3.1.3-4 縦継ぎラミナ（単体）の曲げ試験の結果

上段：内層用 中段：外層用 下段：同一用

[内層用] 試験体数 30	縦継ぎラミナ* ₂		試験体* ₃		曲げ試験		
	密度 kg/m ³	Efr* ₁ kN/mm ²	密度 kg/m ³	Efr kN/mm ²	最大荷重 Pmax N	曲げ強さ N/mm ²	曲げヤング 係数 kN/mm ²
最小値	352	4.0	316	4.90	3,373	23.2	4.95
平均	388	6.1	387	6.27	4,455	30.8	6.33
最大値	437	7.6	463	7.62	6,537	45.4	7.63
標準偏差	22.44	0.9	37.80	0.85	808.7	5.7	0.81
変動係数	5.8%	14.4%	9.8%	13.5%	18.2%	18.4%	12.8%

[外層用] 試験体数 30	縦継ぎラミナ* ₂		試験体* ₃		曲げ試験		
	密度 kg/m ³	Efr* ₁ kN/mm ²	密度 kg/m ³	Efr kN/mm ²	最大荷重 Pmax N	曲げ強さ N/mm ²	曲げヤング 係数 kN/mm ²
最小値	372	7.0	346	6.93	3,351	23.3	5.13
平均	406	8.3	410	8.50	5,254	36.4	8.39
最大値	445	9.8	498	11.08	6,948	48.1	10.68
標準偏差	18.64	0.7	37.58	0.97	821.7	5.7	1.13
変動係数	4.6%	7.9%	9.2%	11.4%	15.6%	15.7%	13.4%

[同一用] 試験体数 30	縦継ぎラミナ* ₂		試験体* ₃		曲げ試験		
	密度 kg/m ³	Efr* ₁ kN/mm ²	密度 kg/m ³	Efr kN/mm ²	最大荷重 Pmax N	曲げ強さ N/mm ²	曲げヤング 係数 kN/mm ²
最小値	352	5.4	350	4.62	2,352	16.3	4.58
平均	407	6.9	417	7.03	4,594	31.9	7.08
最大値	436	9.2	502	9.19	6,539	45.3	9.25
標準偏差	21.00	0.9	32.22	1.22	1,178	8.1	1.19
変動係数	5.2%	13.2%	7.7%	17.4%	25.6%	25.5%	16.8%

*1：縦振動法による動的弾性係数

*2：4m縦継ぎラミナの密度及びEfr

*3：試験体寸法 W100*T30*L750mmの密度とEfr

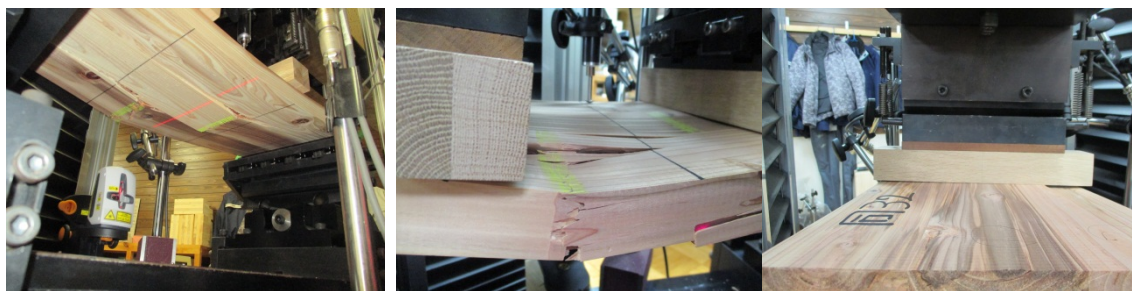


写真 3.1.3-2 曲げ破壊の状況

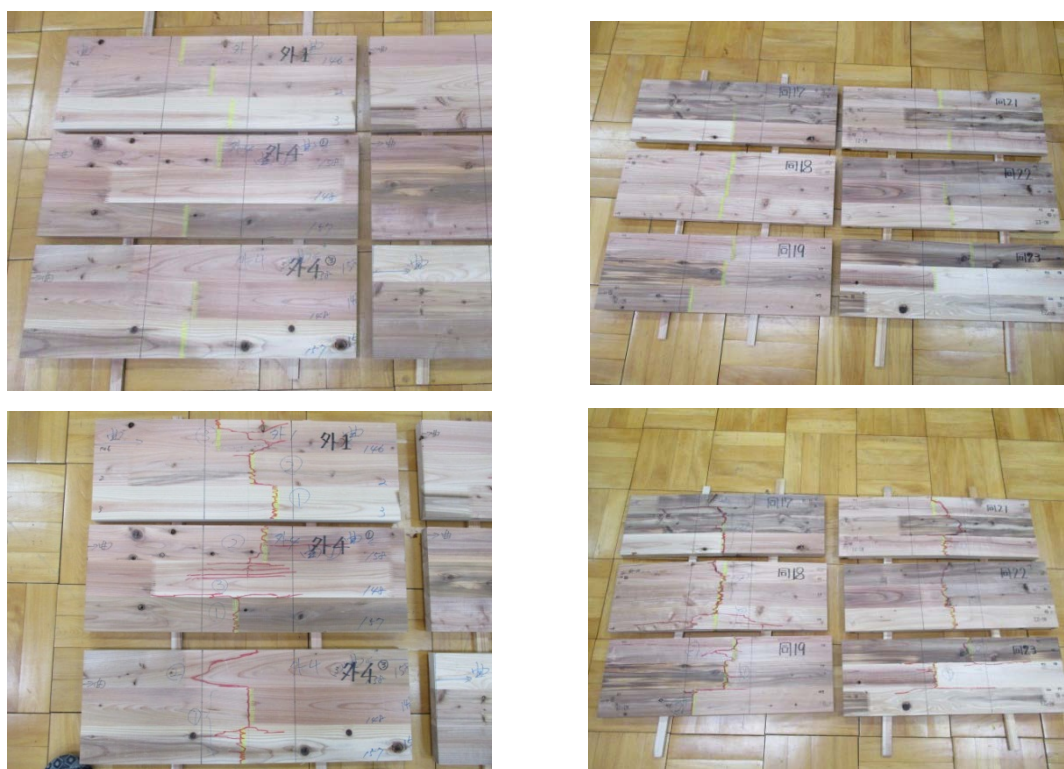


写真 3.1.3-3 曲げ破壊の状況 上段：破壊前 下段：破壊後

3.1.4 引張試験

(1) 試験方法

幅はぎラミナの試験体は、4m の幅はぎラミナから採取した。構成する 3 枚のラミナすべてに、FJ がチャック間に存在するようにし、寸法は幅 250mm、厚みは 30mm、長さは 2,000mm とした。引張試験は、実大木材引張試験機（株東京試験機 HT-40-S 最大容量 400kN）を使用して行った。チャック（はさむ部分）の長さは片側 555mm、チャック間長は 820mm とし、加力速度は 4mm/min とした。



写真 3.1.4-1 引張試験の様子

(2) 結果

引張試験の結果を表 3.1.4-1、-2、-3 に示す。引張強さの平均値は、内層用が 17.93N/mm^2 、外層用が 24.73N/mm^2 、同一用が 20.43N/mm^2 となり、変動係数は、順に 16.6%、12.2%、11.6% となり内層用のばらつきが高かった。

破棄状況を写真 3.1.4-2 に示す。破壊は、いずれも FJ や節が主な起因によるもので、一気に破断した。構成するラミナ 3 枚全てにおいてそれらにより破壊したものが多かったが、2 枚がそれらによる破壊で、残る 1 枚はその破壊近傍の木部で破壊したものもあった。

表 3.1.4-1 幅はぎラミナの引張試験の結果（内層用）

[内層用] 通し 番号 試験体数30	縦継ぎ ラミナ* ₂ Efr* ₁ kN/mm ²	幅はぎラミナ* ₃		試験体* ₄		引張試験	
		密度 kg/m ³	Efr kN/mm ²	密度 kg/m ³	Efr kN/mm ²	最大荷重 Pmax kN	引張強さ N/mm ²
最小値	5.02	349	5.01	342	4.65	89.2	11.85
平均	6.08	383	6.04	389	6.18	134.7	17.93
最大値	6.76	413	6.86	413	7.31	179.6	23.91
標準偏差	0.45	11.0	0.47	15.4	0.65	22.4	3.0
変動係数	7.4%	2.9%	7.7%	4.0%	10.5%	16.6%	16.6%

*1 : Efr 縦振動法による動的弾性係数

*2 : 幅はぎ接着する前の、4m縦継ぎラミナ3枚のEfrの平均値

*3 : 幅はぎ接着した4mラミナ (W250*T30mm) のEfr

*4 : 試験体寸法 W250*T30*L2,000mm

表 3.1.4-2 幅はぎラミナの引張試験の結果（外層用）

[外層用] 通し 番号 試験体数30	縦継ぎ ラミナ* ₂ Efr* ₁ kN/mm ²	幅はぎラミナ* ₃		試験体* ₄		引張試験	
		密度 kg/m ³	Efr kN/mm ²	密度 kg/m ³	Efr kN/mm ²	最大荷重 Pmax kN	引張強さ N/mm ²
最小値	7.58	394	7.63	393	7.67	112.8	15.02
平均	8.38	417	8.42	422	8.59	185.7	24.73
最大値	9.24	442	9.34	456	9.98	219.2	29.16
標準偏差	0.43	12.7	0.43	14.4	0.60	22.6	3.01
変動係数	5.1%	3.1%	5.1%	3.4%	7.0%	12.2%	12.2%

*1：Efr 縦振動法による動的弾性係数

*2：幅はぎ接着する前の、4m縦継ぎラミナ3枚のEfrの平均値

*3：幅はぎ接着した4mラミナ（W250*T30mm）のEfr

*4：試験体寸法 W250*T30*L2,000mm

表 3.1.4-3 幅はぎラミナの引張試験の結果（同一用）

[同一用] 通し 番号 試験体数30	縦継ぎ ラミナ* ₂ Efr* ₁ kN/mm ²	幅はぎラミナ* ₃		試験体* ₄		引張試験	
		密度 kg/m ³	Efr kN/mm ²	密度 kg/m ³	Efr kN/mm ²	最大荷重 Pmax kN	引張強さ N/mm ²
最小値	5.86	375	5.82	376	6.04	119.2	15.85
平均	6.80	404	6.78	414	7.09	153.4	20.43
最大値	7.69	429	7.95	441	8.81	197.9	26.45
標準偏差	0.46	13.7	0.53	16.1	0.74	17.7	2.36
変動係数	6.8%	3.4%	7.8%	3.9%	10.4%	11.5%	11.6%

*1：Efr 縦振動法による動的弾性係数

*2：幅はぎ接着する前の、4m縦継ぎラミナ3枚のEfrの平均値

*3：幅はぎ接着した4mラミナ（W250*T30mm）のEfr

*4：試験体寸法 W250*T30*L2,000mm

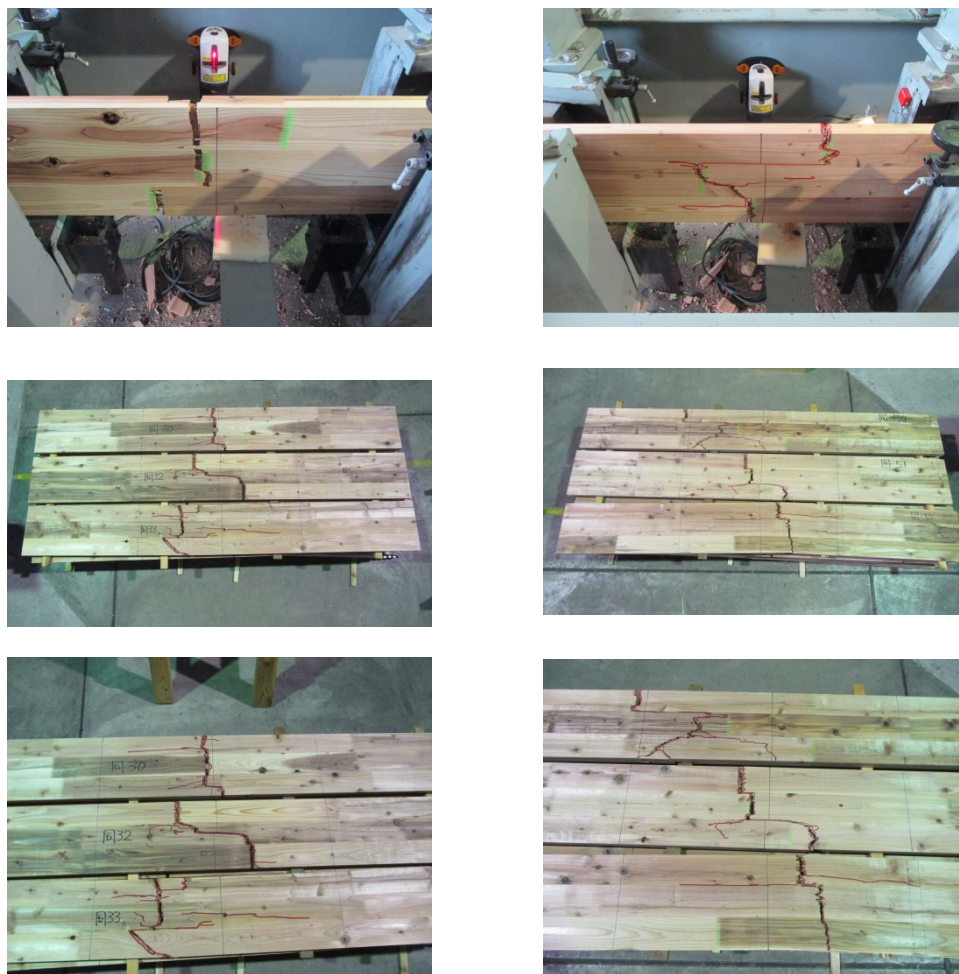


写真 3.1.4-2 引張破壊の状況

3.1.5 圧縮試験

(1) 試験方法

幅はぎラミナの試験体は、4m の幅はぎラミナから採取した。構成するラミナ 3 枚のうち 2 枚以上に、FJ が存在するようにし、寸法は幅 250mm、厚み 30mm、長さ短辺の 6 倍の 180mm とした。また幅はぎ接着無しのラミナ 3 枚を並列に並べた状態(以下、単体ラミナ並列)での試験も行った。各ラミナは縦継ぎラミナから採取し、幅は幅はぎラミナの組合せと同じ 85mm、85mm、80mm とした。圧縮試験は、木材圧縮試験機(榊前川試験機製作所 最大容量 3000kN)を使用して行い、圧縮スパンは試験体の長さ 180mm とした。



写真 3.1.5-1 圧縮試験の様子

(2) 結果

圧縮試験の結果を表 3.1.5-1、-2、-3 に示す。幅はぎラミナの圧縮強さの平均は内層用 32.1 N/mm^2 、外層用 38.3 N/mm^2 、同一用 34.2 N/mm^2 、変動係数は 8.5%、7.3%、8.2% となった。単体ラミナ並列の圧縮強さの平均は 30.8 N/mm^2 、 34.2 N/mm^2 、 32.1 N/mm^2 、変動係数は 7.4%、8.6%、8.9% となった。幅はぎラミナと単体ラミナ並列の結果を比較すると、圧縮強さの平均は、単体ラミナ並列に対し幅はぎラミナの方が、内層用で 4%、外層用で 12%、同一用で 7% 高くなった。

破壊の状況例を写真 3.1.5-2 に示す。破壊は、幅はぎラミナ及び単体ラミナ並列いずれも、主に **FJ** や節を起因としたもので、どこか破壊が生じると荷重が降伏した。**FJ** の圧縮破壊が進むと、**FJ** が幅方向に倒れる、それに伴い縦割れするものが共通して見られた。幅はぎラミナでは、**FJ** の圧縮破壊が進むと隣接するラミナに同じ高さで圧縮破壊が拡大する、表裏への座屈が起こらないなどの幅はぎ拘束による特徴が見られた。単体ラミナ並列では、各ラミナの **FJ** などの欠点がそれぞれ破壊する、表裏への座屈が起こるなどの特徴が見られた。

表 3.1.5-1 幅はぎラミナと単体ラミナ並列の引張試験の結果（内層用）

[内層用 幅はぎラミナ]

通し 番号 試験体数30	縦継ぎ ラミナ* ₂ Efr* ₁ kN/mm ²	幅はぎ ラミナ* ₃ Efr kN/mm ²	試験体 * ₄ 密度 kg/m ³	圧 縮 試 験	
				最大荷重 Pmax kN	圧縮強さ N/mm ²
最小値	5.44	5.32	352.7	196.9	26.2
平均	6.04	6.03	390.4	241.4	32.1
最大値	6.68	6.73	444.8	270.7	36.0
標準偏差	0.30	0.32	19.5	20.4	2.7
変動係数	5.0%	5.3%	5.0%	8.5%	8.5%

*1：縦振動法による動的弾性係数

*2：幅はぎ接着する前の、4m縦継ぎラミナ3枚のEfrの平均値

*3：幅はぎ接着した4mラミナのEfr

*4：試験体寸法 W250*T30*L180mm

[内層用 単体ラミナ並列]

	縦継ぎ ラミナ* ₅ Efr kN/mm ²	並列 試験体* ₆ 密度 kg/m ³	圧 縮 試 験	
			最大荷重 Pmax kN	圧縮強さ N/mm ²
	5.05	354.90	198.4	26.3
	6.01	393.21	232.1	30.8
	6.66	428.37	261.1	34.7
	0.40	17.25	17.2	2.3
	6.7%	4.4%	7.4%	7.4%

*5：組み合わせた4m縦継ぎラミナのEfrの平均値

*6：試験体の全体寸法は幅はぎラミナと同じ

表 3.1.5-2 幅はぎラミナと単体ラミナ並列の引張試験の結果（外層用）

[外層用 幅はぎラミナ]

通し 番号 試験体数30	縦継ぎ ラミナ* ₂ Efr* ₁ kN/mm ²	幅はぎ ラミナ* ₃ Efr kN/mm ²	試験体 * ₄ 密度 kg/m ³	圧 縮 試 験	
				最大荷重 Pmax kN	圧縮強さ N/mm ²
最小値	7.22	7.38	364.3	229.1	30.5
平均	8.41	8.41	422.8	287.3	38.3
最大値	9.19	9.42	468.8	324.2	43.2
標準偏差	0.59	0.61	24.5	20.6	2.8
変動係数	7.1%	7.3%	5.8%	7.2%	7.3%

*1：縦振動法による動的弾性係数

*2：幅はぎ接着する前の、4m縦継ぎラミナ3枚のEfrの平均値

*3：幅はぎ接着した4mラミナのEfr

*4：試験体寸法 W250*T30*L180mm

[外層用 単体ラミナ並列]

	縦継ぎ ラミナ* ₅ Efr kN/mm ²	並列 試験体* ₆ 密度 kg/m ³	圧 縮 試 験	
			最大荷重 Pmax kN	圧縮強さ N/mm ²
	7.45	378.2	221.3	29.4
	8.14	405.2	257.7	34.2
	9.11	457.8	310.7	41.4
	0.45	18.4	22.1	2.9
	5.5%	4.5%	8.6%	8.6%

*5：組み合わせた4m縦継ぎラミナのEfrの平均値

*6：試験体の全体寸法は幅はぎラミナと同じ

表 3.1.5-3 幅はぎラミナと単体ラミナ並列の引張試験の結果（同一用）

[同一用 幅はぎラミナ]

通し 番号 試験体数30	縦継ぎ ラミナ* ₂	幅はぎ ラミナ* ₃	試験体 * ₄	圧 縮 試 験	
	Efr* ₁ kN/mm ²	Efr kN/mm ²	密度 kg/m ³	最大荷重 Pmax kN	圧縮強さ N/mm ²
最小値	5.86	5.81	376.6	225.9	30.30
平均	6.79	6.84	417.3	257.3	34.26
最大値	7.90	7.72	462.0	318.6	42.36
標準偏差	0.59	0.61	26.4	21.3	2.80
変動係数	8.7%	8.9%	6.3%	8.3%	8.2%

[同一用 単体ラミナ並列]

	縦継ぎ ラミナ* ₅	並列 試験体* ₆	圧 縮 試 験	
	Efr kN/mm ²	密度 kg/m ³	最大荷重 Pmax kN	圧縮強さ N/mm ²
	6.35	372.4	204.4	27.1
	7.32	407.8	242.3	32.1
	8.41	494.6	288.0	38.2
	0.51	28.2	21.6	2.9
	7.0%	6.9%	8.9%	8.9%

*1：縦振動法による動的弾性係数

*2：幅はぎ接着する前の、4m縦継ぎラミナ3枚のEfrの平均値

*3：幅はぎ接着した4mラミナのEfr

*4：試験体寸法 W250*T30*L180mm

*5：組み合わせた4m縦継ぎラミナのEfrの平均値

*6：試験体の全体寸法は幅はぎラミナと同じ

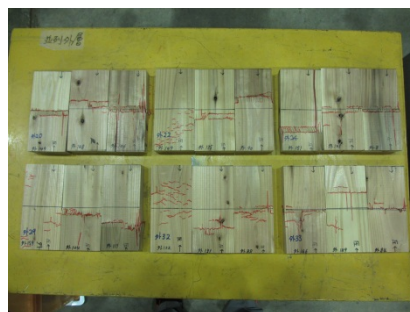
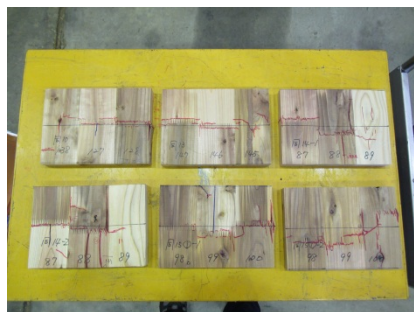
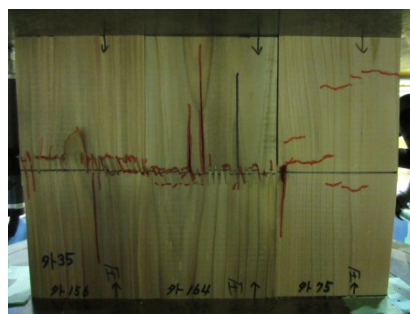


写真 3.1.5-2 圧縮破壊の状況 左：幅はぎラミナ 右：単体ラミナ並列

4. 長期性能に関する検討

木質材料は粘弾性体であることから、木質材料を用いた建築物に荷重等の外力が長期間作用すると、変形の増大や最悪の場合、建築物の倒壊を招く恐れがある。したがって、想定する建物の使用期間に合わせて、作用する外力による影響を適切に構造的設計に反映できるように、材料の強度等級や断面寸法を選択する必要がある。特に、CLT は主応力方向と繊維方向が直交する層(直交層)を有するため、適切な材料選択のためには、材料の断面構成が強度性能に与える影響を定量的に評価する必要がある。

本章では、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 の長期変形挙動に影響を与える因子として、試験期間中の含水率変動と直交層の強度的性能を取り上げ、それらの影響を検討するとともに、当該条件下における長期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。

4.1 長期性能試験時の含水率変動の検討

4.1.1 目的

木質材料の強度的性能は一般に含水率の影響を受ける。そのため、試験時には試験体の含水率に関して十分注意することが求められる。しかしながら、CLT は従来無かった構造の木質材料のため、周囲の雰囲気と含水率の関係等の熱湿気物性に関する知見が少なく、試験時に材料がどのような含水率条件にあるかが明確ではない。本研究ではその第一歩として、シミュレーション等に必要な CLT の熱湿気物性値の検討、材内含水率の外気変動に対する応答とその予測手法の検討、および森林総合研究所の長期荷重試験装置の温湿度環境の検討を行った。

なお、本項で使用した試験体は、特に断りの無い限りラミナの組み合わせを JAS に準じて異等級構成強度等級 **Mx60** とした幅はぎ加工のないスギ CLT である。

4.1.1 熱湿気物性値の検討

吸放湿シミュレーションにおいては、対象とする材料の熱湿気物性値が必要となる。今回測定対象としたのは、熱伝導率、透湿率、平衡含水率の 3 つである。これらは、今後 CLT を用いた建築物の断熱、防露設計を行う場合にも必要となると考えられる。

1) 熱伝導率

熱伝導率の測定は JIS A 1412-2:1999「熱絶縁材の熱抵抗及び熱伝導率の測定方法―第 2 部：熱流計法（HFM 法）」に準拠して行った。試験の詳細を以下に示す。

- ・試験装置 EKO HC-074（英弘精機株式会社製）
- ・装置の型式：試験体 1 枚・対称構成方式
- ・校正用標準板の種類：ビーズ法ポリスチレンフォーム（NIST 標準板）
- ・試験体姿勢：水平

- ・熱流方向：上向き
- ・温度条件：23℃

試験装置の外観を写真 4.1-1、および写真 4.1-2 に示す。また、概要図を図 4.1-1 に熱流計の配置図を図 4.1-2 に示す。試験体は 3ply、4ply、5ply の 3 種類とした。試験体寸法は 60cm 角である。試験体数は各 ply につき 1 である。試験体はあらかじめ 20℃65%RH の環境下で 1 ヶ月、23℃50%RH の環境下で 1 週間の養生を行った後、試験に供した。

得られた結果を表 4.1-1 に示す。ply 数の増加によって、ごくわずかに増加する傾向が見られたものの、概ね 0.11W/mK 前後であり、これは既報の文献¹⁾によるスギの熱伝導率に近い。このことから熱伝導率に関しては、木材素材とほぼ同等と扱って良いと考えられた。



写真 4.1-1 測定装置の外観



写真 4.1-2 測定装置の内部

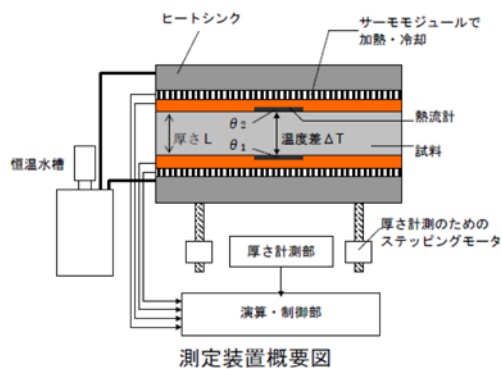


図 4.1-1 測定装置の概要

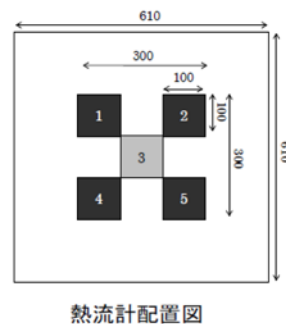


図 4.1-2 熱板の熱流計の配置

表 4.1-1 熱伝導率測定結果

試験体	3ply	4ply	5ply
密度(kg/m^3)	399	404	405
設定中心温度($^{\circ}\text{C}$)	23	23	23
試験室室温($^{\circ}\text{C}$)	23	23	23
定常に要した時間(h)	5	5	6
恒温側表面温度($^{\circ}\text{C}$)	33.0	33.0	33.0
低温側表面温度($^{\circ}\text{C}$)	13.1	13.1	13.1
試験体平均温度($^{\circ}\text{C}$)	23.0	23.1	23.1
試験体温度差($^{\circ}\text{C}$)	20.0	20.0	20.0
単位面積あたりの熱流量(W/m^2)	23.3	18.0	15.0
熱抵抗($\text{m}^2\text{K/W}$)	0.857	1.108	1.335
試験体厚さ(mm)	91.7	122	152
熱伝導率(W/mK)	0.107	0.110	0.114

2) 透湿率

透湿率の測定は JIS A 1324 : 1995「建築材料の透湿性測定方法」に準拠して行った。すなわち、吸湿材の塩化カルシウムを内部に入れたアルミニウム製のカップに試験体を取付け、 23°C 50%RH の環境下におき重量を経時的に測定した。重量変化量が一定となった時点での吸湿量から透湿率を算出した。試験体の概略を図 4.1-3 および写真 4.1-3、写真 4.1-4 に示す。

試験体は 5ply の CLT とした。5Ply の CLT は 150mm 程度の厚さを有するため、そのままでは透湿抵抗の測定は不可能である。そこで、CLT を厚さ方向に分割し、接着層を有する部分と接着層を有さない部分に分割して試験に供した。接着層を有さない試験体の場合、本試験体は幅はぎ接着を行っていないため、試験体は分割状態となった。そこで、幅はぎ部分を表裏からアルミテープでシールして透湿を防いだ(図 4.1-4)。なお、透湿抵抗の算出においてアルミテープ部分は透湿面積から除いた。

一方、強軸方向および弱軸方向の透湿抵抗に関しては、JIS 規格の試験方法のまま試験体を作製すると一部のラミナが透湿に寄与しなくなるため、写真 4.1-5 のように試験体周囲にスペーサーとなる樹脂板を取り付けて試験体(150×150mm)のラミナ全層が透湿に寄与するように努めた。全試験において試験体厚は 10mm、試験体数は JIS 規格に準拠して各条件 $n=3$ とした。なお、試験体製作に際して、試験体を貫通する節を有する部分を極力除外した。試験体は切削加工後に 23°C 50%RH の条件下で 1 週間養生したのち、測定に供した。

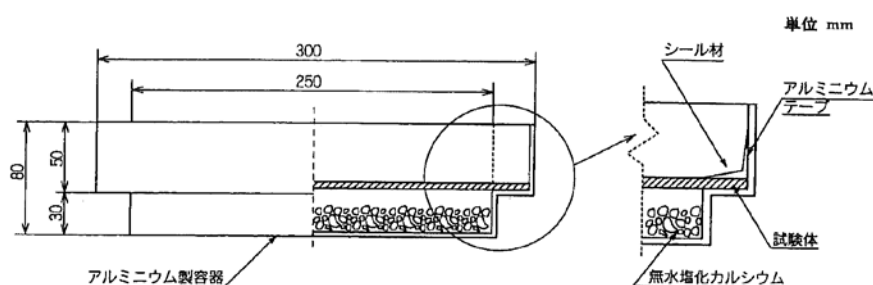


図 4.1-3 透湿性能試験の概略図(JIS A 1324 より引用)



写真 4.1-3 透湿試験体



写真 4.1-4 透湿試験体の設置状況



写真 4.1-5 幅接ぎ部分のシール状況



写真 4.1-5 強軸方向の試験体

得られた透湿率を図 4.1-4 および図 4.1-5 に示す。エラーバーは標準偏差である。厚さ方向の透湿率は、接着層の有無によって大きく変化した。本結果からは接着層が透湿を阻害していると考えられるが、既往の報告²⁾では接着層の有無は透湿に影響を与えないとしている。これについては今後の検討が必要と考えられる。一方、強軸方向と弱軸方向の透湿率は厚さ方向に比べ非常に大きな透湿率を示した。また、強軸方向と弱軸方向では強軸方向が高い数値となった。これは、5ply の CLT の構造として強軸方向に高い透湿率を持つ軸方向のラミナの層が多くなっているためと考えられる。なお、既往の報告²⁾は強軸、弱軸方向の表記が無かったが、今回の強軸の測定値と近い値となっている。

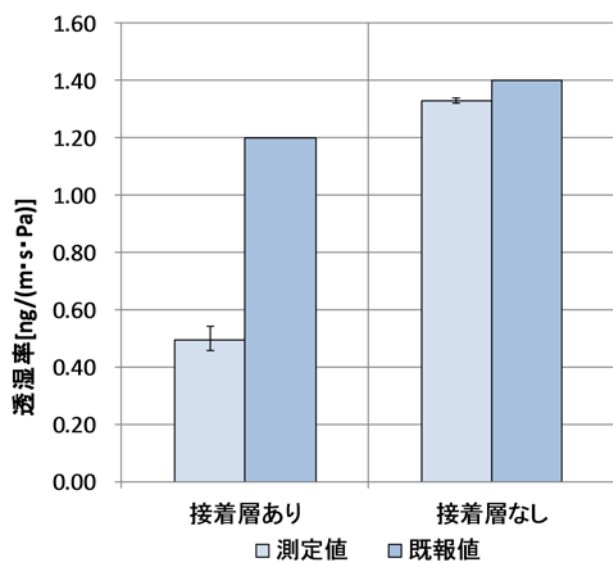


図 4.1-4 厚さ方向の透湿率

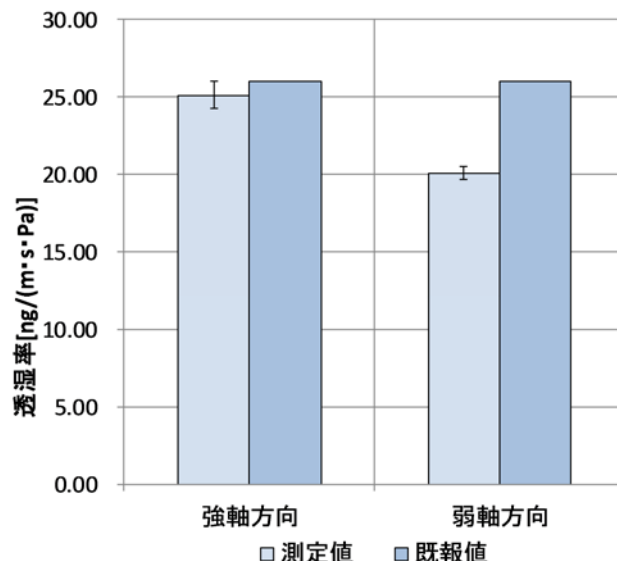


図 4.1-5 強軸，弱軸方向の透湿率

3) 平衡含水率（EMC）

CLT パネル（強軸方向 75～114cm×弱軸方向 30cm：5 層 5ply、5 層 7ply、7 層 7ply）より、強軸方向で厚さ 30mm の板を 2 体ずつ切り出し、1 枚を 20℃用、他方を 23℃用とした。幅はぎ方向に 6 列、層方向に ply 数の小試験体に切り分けた。その際ラミナの境目で鋸断して接着層を含まないようにした。

各湿度条件につき 2～3 個の小試験体を選び、40℃の電気恒温器にて 24 時間前乾燥を行った後、20℃、23℃の恒温室にて塩飽和水溶液（表 4.1-2）を置いたデシケータ内に小試験片を静置し、5～10 日の間隔で試験体重量を測定し、24 時間あたりの重量変化率が 0.1% を下回った時点で平衡と判断し、103℃の電気恒温器で全乾にして平衡含水率を算出した。ただし、23℃の 75%については実験中にデシケータが不具合を起こしたので、集計から除外した。

表 4.1-2 JIS A 1575（2004）による塩飽和水溶液の相対湿度（%）

	LiCl ₂	MgCl ₂	Mg(NO ₃)	NaCl	KCl	KNO ₃	K ₂ SO ₄
20℃	11	33	54	75	85	95	98
23℃	11	33	53	75	85	94	97

※小数点以下は四捨五入した

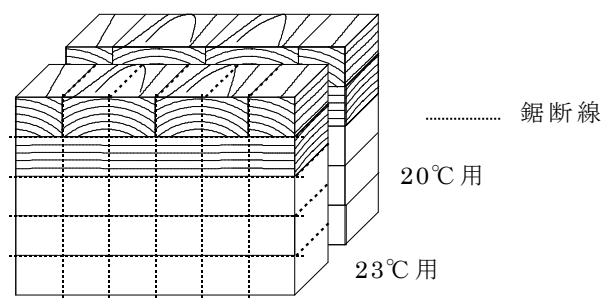


図 4.1-6 試験体模式図



写真 4.1-6 小試験体

得られた平衡含水率を表 4.1-3、表 4.1-4、図 4.1-7、図 4.1-7、図 4.1-8 および図 4.1-9 に示す。エラーバーは標準偏差である。CLT の構成による平衡含水率の差は、20℃と 23℃ともに認められなかった。20℃と 23℃で比較すると、高湿度条件でやや両者に差が見られた。

表 4.1-3 20℃における平衡含水率

平衡含水率(%)							
RH(%)	11	33	54	75	83	93	97
5層5ply	5.1	8.7	10.8	11.4	15.4	18.8	21.3
5層7ply	5.0	8.5	10.2	12.1	14.2	19.0	21.6
7層7ply	5.2	8.0	10.5	11.9	14.1	19.2	21.6
全体	5.1	8.4	10.5	11.7	14.7	18.9	21.5

標準偏差

RH(%)	11	33	54	75	83	93	97
5層5ply	0.18	0.29	1.31	0.57	1.51	1.14	0.70
5層7ply	0.13	0.53	0.81	0.97	0.50	0.48	0.43
7層7ply	0.19	0.29	0.66	0.93	0.62	0.48	0.75
全体	0.18	0.46	1.04	0.87	1.21	0.82	0.66

表 4.1-4 23℃における平衡含水率

平衡含水率(%)						
RH(%)	11	33	53	83	93	97
5層5ply	6.3	8.8	10.5	12.3	16.6	18.7
5層7ply	6.3	8.0	10.8	13.2	15.7	18.2
7層7ply	6.3	8.3	10.3	12.9	16.1	17.9
全体	6.3	8.4	10.5	12.7	16.2	18.3

標準偏差

RH(%)	11	33	53	83	93	97
5層5ply	0.28	0.59	0.91	1.49	1.04	1.19
5層7ply	0.26	0.31	1.08	1.18	0.25	0.19
7層7ply	0.33	0.44	1.28	1.36	0.80	0.29
全体	0.29	0.57	1.10	1.41	0.88	0.84

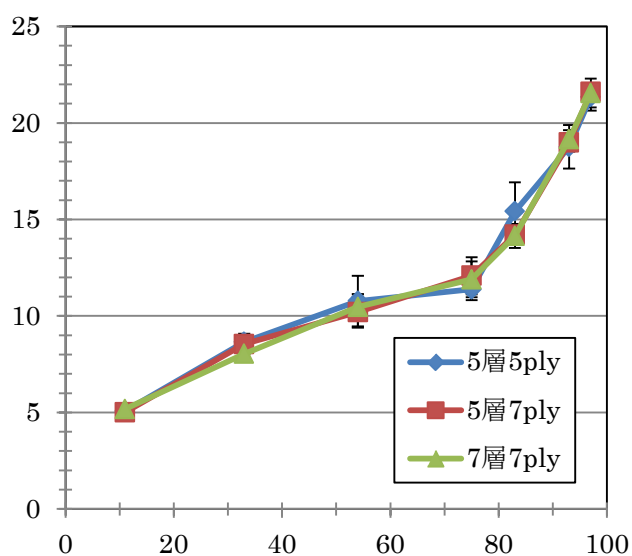


図 4.1-7 平衡含水率 (20℃)

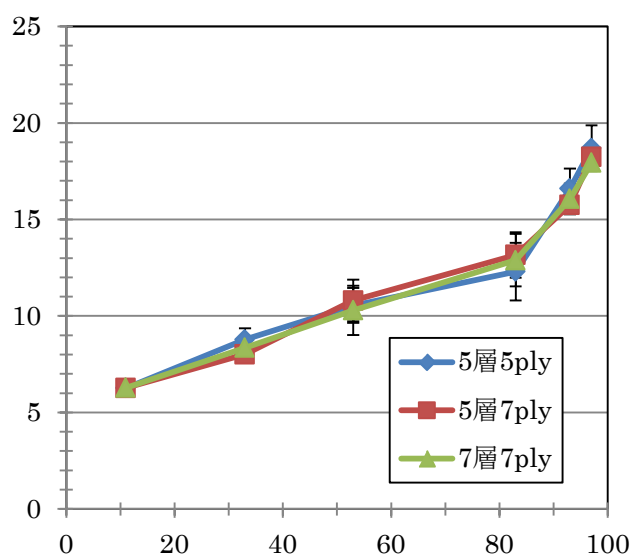


図 4.1-8 平衡含水率 (23℃)

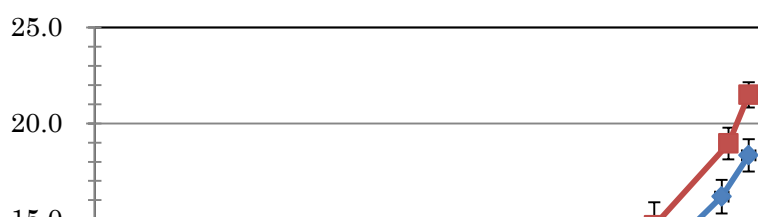


図 4.1-9 平衡含水率の比較

4.1.2 CLT 試験体の吸湿試験と吸湿シミュレーション

CLT 試験体周囲の温湿度を急激に変動させた場合の吸放湿量とシミュレーション結果を比較した。試験体はスギ 5plyCLT であり、強軸方向 800×弱軸方向 300×厚さ 150mm の供試 CLT から強軸方向に 3 分割しエンドマッチ試験体を 3 体得た。分割した試験体を A,B,C とし、A は厚さ方向のみの吸放湿を得るために弱軸面、強軸面をアルミテープでシールした。B、C はそれぞれ弱軸面および、強軸面のみをシールした(図 4.1-10)。これらを 20℃65%RH の恒温恒湿室内で 3 ヶ月間養生し、試験に用いた。試験は 20℃90%RH に設定された恒温恒湿器内に試験体を投入し、1～2 日の間隔で経時的に測定をおこなった。試験体数は 2 体とした。

面外方向の吸湿が同一試験体では同様であると仮定し、A の吸湿量を B、C の吸湿量から除すことによって強軸方向、弱軸方向の吸湿量を得た。得られた単位面積あたりの吸湿量(g/m^2)を図 4.1.11 に示す。強軸方向の吸湿量は軸方向のラミナが多いことから弱軸方向の吸湿より高くなった。厚さ方向(面外方向)の吸湿は両者より小さい。

測定結果から、実際の長期挙動試験の場合の試験体寸法 $L=3450\text{mm}$ での各面の吸湿量を算出したものが図 4.1-12 である。強軸方向の吸湿は、吸湿面積が小さいため全体への影響は小さいが、弱軸方向の吸湿は厚さ方向を上回ることが示唆された。積層数が増すことによって弱軸方向の吸湿の影響はより大きくなると考えられる。

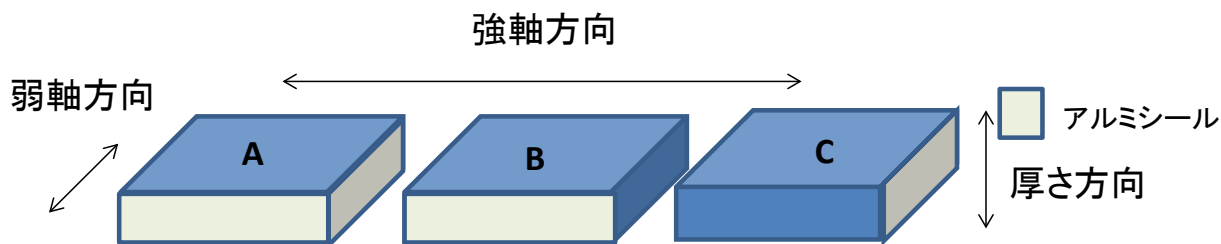


図 4.1-10 試験体の製作の概略図

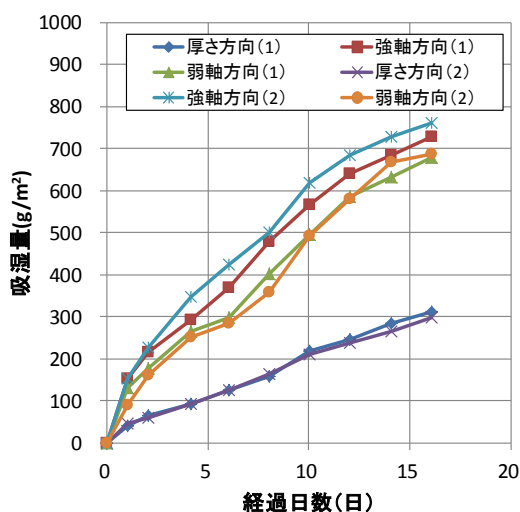


図 4.1-11 各面の吸湿量

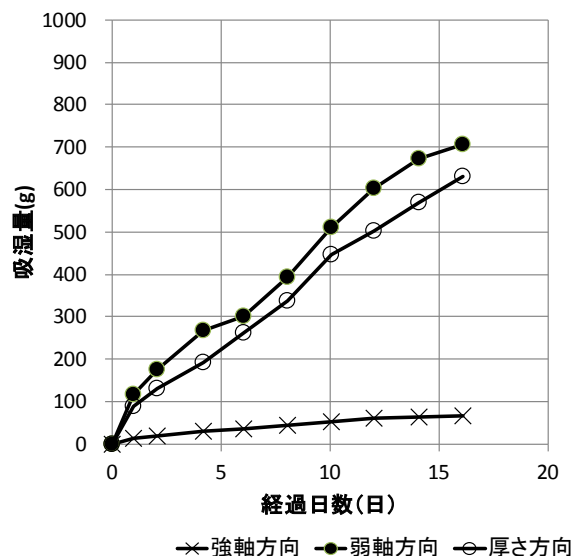


図 4.1-12 長期荷重試験体の吸湿量

4.1.1において、接着層の有無によって透湿抵抗が大きく変わることが明らかとなった。そこで、厚さ方向の吸湿を検討するために、CLTを両者の積層とみなしたシミュレーションモデルを想定した(図 4.1-13)。シミュレーションには材内の熱水分同時移動を取り扱う独フランクフォード研究所製の“WUFI”を用いた。熱伝導率、透湿率、平衡含水率のパラメータには、本報告で測定した数値を用いた。シミュレーション結果を図 4.1-14。吸湿初期がやや過大評価となる傾向があるが、概ね同様の吸湿量を得ることが出来た。一方、強軸方向の吸湿量のシミュレーション結果を図 4.1-15 結果と実測値は概ね一致していると考えられた。以上のことから、シミュレーションモデルは概ね妥当と考えられた。

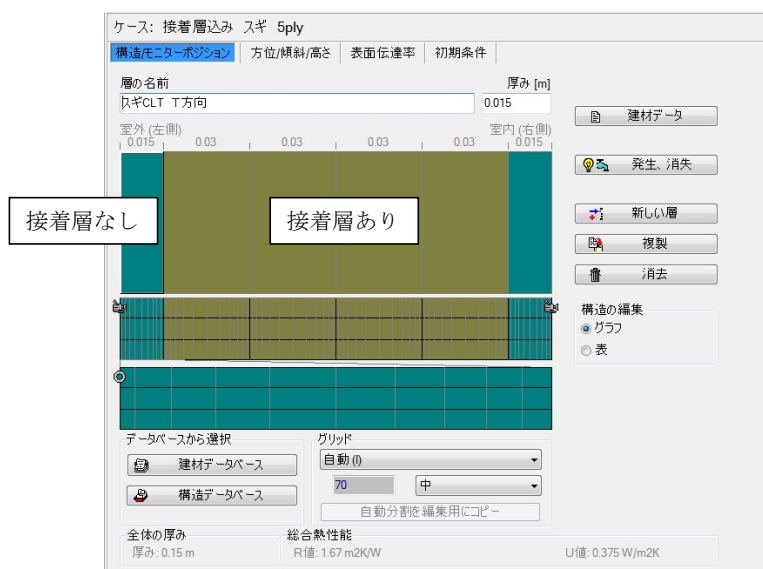


図 4.1-13 厚さ方向のシミュレーションモデル

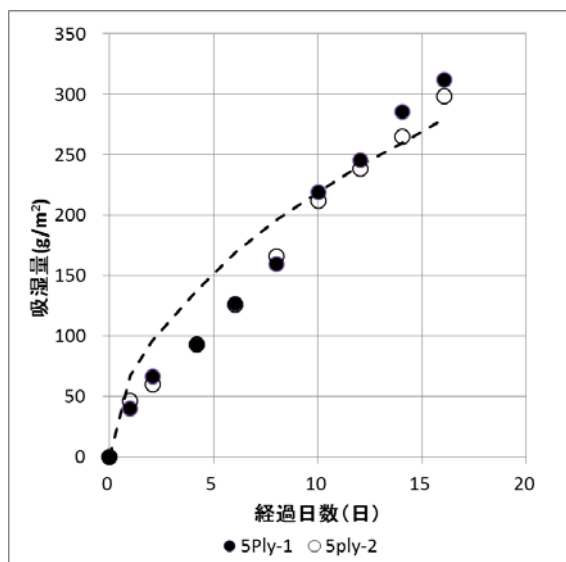


図 4.1-14 厚さ方向の重量変化

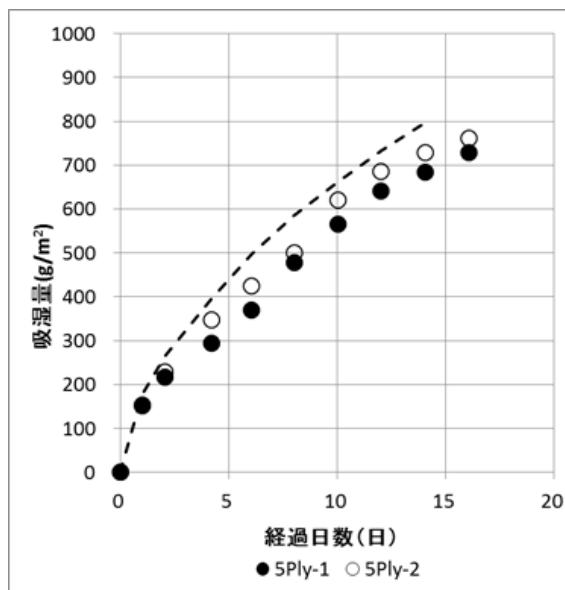


図 4.1-15 強軸方向の重量変化

長期荷重試験体（スギ CLT：5py 長さ:3450mm、幅 300mm、厚さ:150mm）を想定して試験時の含水率のシミュレーションを行った。なお、計算の簡略化のために以下の仮定を用いた。計算には前述と同様に“WUFI”を用いた。

- ・長さ方向の吸放湿は幅方向、厚さ方向に比べて小さいため無視した。
- ・ラミナの初期含水率は 15% 一定とした。
- ・試験温湿度は 20℃ 65%RH 一定とした。
- ・熱伝導率、透湿率、平衡含水率は実測値を用いた。

得られた結果を図 4.1-16 に示す。含水率は初期に大きく低下するが、その後は平衡含水率に対してゆっくりと漸近する。平衡含水率の 1% 以内に達するまでに約 200 日を必要としている。このため、含水率の安定と言う視点からは、長期荷重試験用の試験体製造時のラミナの含水率管理は注意するべきであると考えられる。

24 時間あたりの重量変化率を図 4.1-17 にしめす。試験体の重量が大きいいため、変化率はごく初期に 0.1% 以下となる。そのため、重量変化率から平衡状態を見きわめるのは難しいと考えられ、重量法による含水率の確認が必要であると考えられる。

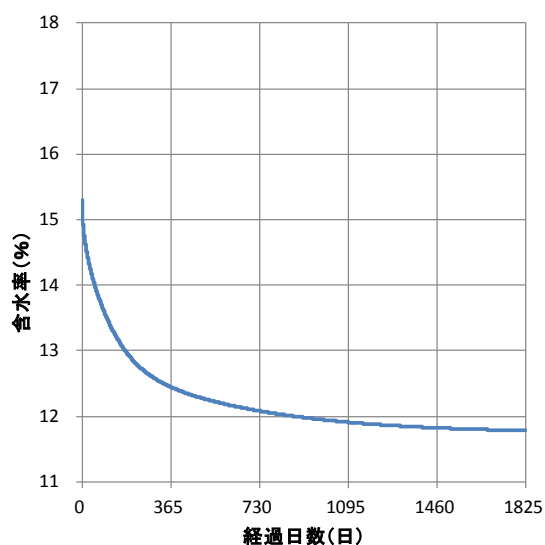


図 4.1-16 長期荷重試験体の含水率変化

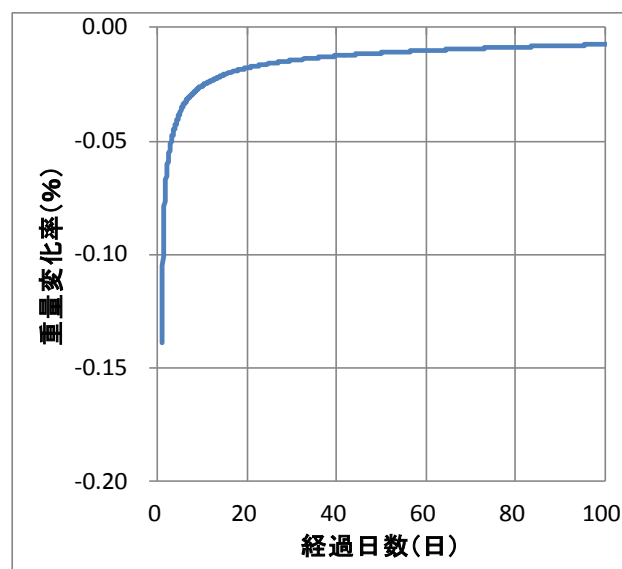


図 4.1-16 24 時間あたりの重量変化率

4.1.3 長期荷重試験の温湿度管理

森林総合研究所内に設置された長期荷重試験装置に関しては、装置周囲の温湿度を経時的に遠隔地である北海道立総合研究機構 林産試験場から測定できる体制を構築している。本項では、試験装置起動から約 1 年（平成 27 年 3 月 4 日～平成 28 年 2 月 26 日）の測定結果を示す。

温湿度センサーとして TR-72wf-H（ティアンドデイ社製：温度精度 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ 、湿度精度 $\pm 2.5\%\text{RH}$ ）を用いた。また、同センサーは出荷時に校正を受けたものを使用した（校正温湿度 $20^{\circ}\text{C} 65\%\text{RH}$ ）。同センサーは長期荷重試験室の無線 LAN ネットワークに接続され、クラウドサーバにデータが送られる。データはユーザー名とパスワードで保護される。図 4.1-17 にセンサーの設置位置を示す。センサーは各試験体につき 4 箇所設置した。センサーはマグネットスタンドを用いて試験装置に固定され、試験体交換時に容易に取り外せるようにしている。センサーの位置は JIS A 1470-1（建築材料の吸放湿性試験方法－第一部：湿度応答法）を参考に、試験体近傍 5cm の位置に設置した。センサーの設置状況を図 4.1-18 に示す。サンプリング間隔は 5～10 分、データ送信は 30 分とした。

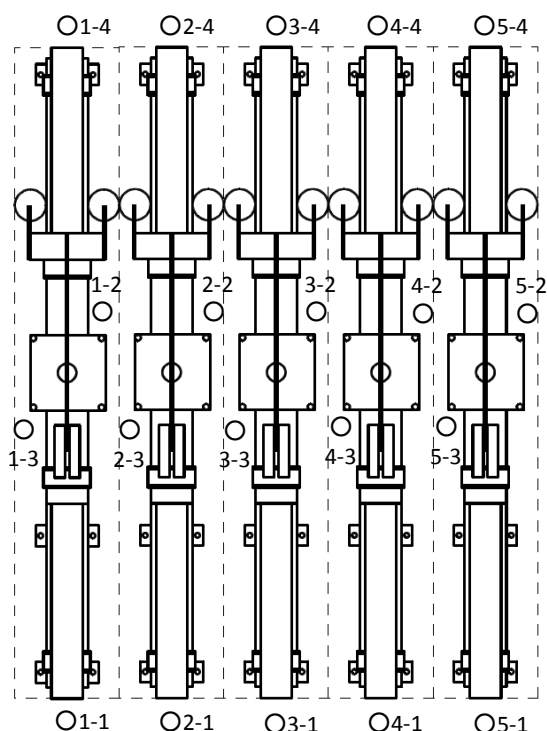


図 4.1-17 温湿度センサーの設置位置



図 4.1-18 温湿度センサーの設置状況

表 4.1-4 に測定点ごとの月平均温度、湿度およびそれぞれの標準偏差を示した。また全測定点の平均温度、湿度の月ごと平均値の変化を図 4.1-19 および図 4.1-20 示す。平均温度は夏期にやや上昇し冬期に向かって低下した。これは外気温および日射の影響により測定室の母屋内の温度の影響を受けた可能性がある。その変化幅は最大 0.5°C であった。一方、湿度は夏期にやや低く、冬期に増加した。その変化幅は最大 2.3% であった。

測定点間の変動を検討するために、測定点ごとの年平均温湿度およびそれぞれの標準偏差を図 4.1-21～図 4.1-24 に示した。なお、表 4.1-4 から明らかなように平成 27 年の 3 月は

温湿度とも標準偏差が大きくなっている。これは、空調機の起動直後であったため試験室躯体の温度が安定していなかったこと、試験初期の試験体の入れ替えや見学等が頻繁であったため扉の開放期間が長かったこと等に起因すると考えられた。そこで、今回は年平均温湿度の検討から除外した。温度に関しては、試験体両端である“装置番号-1”および“装置番号-4”の温度がやや高い傾向が見られた。また標準偏差からも同様の傾向が見られ、両端の温度変動がやや大きいと考えられた。しかしながら、測定点間の差は 0.2°C 程度であり、標準偏差の最大値は 0.3 であった。一方、湿度に関してもやや試験体両端の湿度が低く、標準偏差が大きかった。しかしながら、平均湿度の差は最大 1.9% であり、標準偏差は最大で 1.3 であった。

以上の結果から、測定室内温湿度の年変動、測定点間の差および各測定点における年変動は極めて小さく、各センサーの測定精度内の変動と見なせることが判った。故に、森林総合研究所の長期荷重試験装置に関しては、良好に温湿度条件が保たれていると判断された。

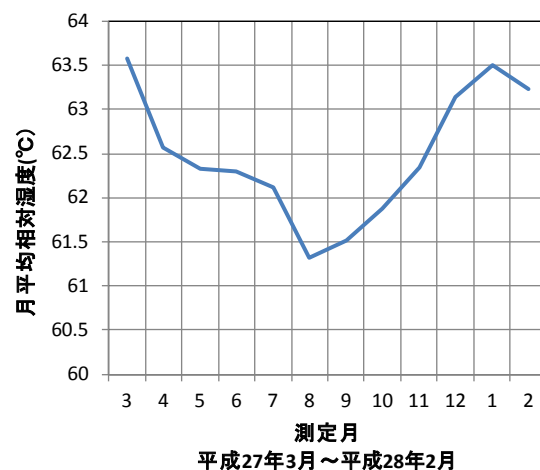
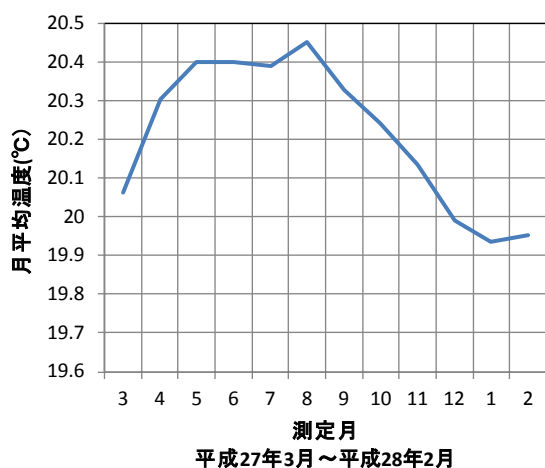


図 4.1-19 月平均温度（全測定点平均）

図 4.1-20 月平均相対湿度（全測定点平均）

表 4.1-4 各測定点の月平均温湿度と標準偏差

		平成27年(2015)										平成28年(2016)		平均	平均(3月を除く)
		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2		
1-1	平均温度	20.1	20.4	20.5	20.5	20.5	20.6	20.4	20.3	20.2	20.0	19.9	20.0	20.3	20.3
	標準偏差	0.5	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.3	0.3
	平均湿度	63.7	62.6	62.2	62.2	62.1	61.2	61.5	61.9	62.4	63.4	64.0	63.6	62.5	62.3
1-2	標準偏差	3.4	0.6	0.2	0.2	0.6	1.0	0.5	0.6	0.6	0.9	0.4	0.8	1.6	1.1
	平均温度	20.1	20.3	20.4	20.4	20.3	20.4	20.3	20.2	20.1	20.0	20.0	20.0	20.2	20.2
	標準偏差	0.4	0.1	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2
1-3	平均湿度	63.5	62.2	61.8	61.8	61.7	60.8	60.7	60.9	61.2	61.9	62.3	62.0	61.7	61.5
	標準偏差	3.6	0.6	0.1	0.1	0.6	1.0	0.5	0.5	0.5	1.1	0.3	0.7	1.6	0.9
	平均温度	20.1	20.3	20.4	20.4	20.3	20.4	20.3	20.2	20.1	20.0	20.0	20.0	20.2	20.2
1-4	標準偏差	0.4	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.4	0.2	0.2
	平均湿度	63.9	63.2	63.0	63.0	62.9	62.2	62.4	62.9	63.3	63.9	64.3	63.8	63.1	63.0
	標準偏差	3.4	0.5	0.1	0.1	0.6	0.9	0.5	0.4	0.5	1.0	0.3	1.5	1.5	1.0
2-1	平均温度	19.9	20.2	20.3	20.3	20.4	20.5	20.3	20.2	20.1	19.9	19.8	19.8	20.2	20.2
	標準偏差	0.5	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3	0.3
	平均湿度	64.5	63.4	63.1	63.0	62.8	61.9	62.3	62.7	63.3	64.4	65.0	64.6	63.3	63.1
2-2	標準偏差	3.5	0.6	0.2	0.2	0.6	1.0	0.5	0.6	0.6	1.1	0.4	0.8	1.7	1.3
	平均温度	20.1	20.3	20.4	20.4	20.4	20.5	20.3	20.2	20.1	20.0	19.9	19.9	20.2	20.3
	標準偏差	0.5	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.3	0.2
2-3	平均湿度	63.5	62.4	62.1	62.1	62.1	61.3	61.5	61.9	62.4	63.2	63.6	63.3	62.4	62.2
	標準偏差	3.4	0.6	0.2	0.2	0.6	1.0	0.5	0.6	0.6	0.9	0.3	0.7	1.5	1.0
	平均温度	20.1	20.3	20.4	20.4	20.4	20.4	20.3	20.2	20.1	20.0	20.0	20.0	20.3	20.3
2-4	標準偏差	0.4	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2
	平均湿度	63.2	62.1	61.9	61.9	61.8	61.1	61.2	61.4	61.8	62.5	62.9	62.6	62.0	61.8
	標準偏差	3.5	0.5	0.1	0.1	0.6	0.9	0.5	0.5	0.5	1.1	0.3	0.7	1.5	0.9
3-1	平均温度	20.1	20.3	20.4	20.4	20.4	20.4	20.3	20.2	20.2	20.1	20.0	20.0	20.2	20.3
	標準偏差	0.4	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	0.2	0.2
	平均湿度	63.4	62.7	62.5	62.5	62.3	61.6	61.8	62.0	62.3	63.0	63.4	63.1	62.4	62.3
3-2	標準偏差	3.4	0.5	0.1	0.1	0.6	0.9	0.5	0.5	0.5	1.0	0.3	0.7	1.4	0.9
	平均温度	20.0	20.3	20.4	20.4	20.4	20.5	20.3	20.2	20.1	20.0	19.9	19.9	20.2	20.3
	標準偏差	0.5	0.1	0.0	0.0	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3	0.2
3-3	平均湿度	64.3	63.1	62.8	62.7	62.6	61.8	62.1	62.4	62.9	63.8	64.1	63.8	62.9	62.8
	標準偏差	3.5	0.6	0.1	0.2	0.6	1.0	0.5	0.6	0.5	1.0	0.3	0.7	1.6	1.1
	平均温度	20.1	20.3	20.4	20.4	20.4	20.5	20.4	20.3	20.2	20.0	20.0	20.0	20.2	20.3
3-4	標準偏差	0.5	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.3	0.1	0.1	0.3	0.2
	平均湿度	63.5	62.8	62.7	62.7	62.6	61.9	62.0	62.5	63.0	63.8	64.1	63.8	62.8	62.7
	標準偏差	3.3	0.6	0.1	0.2	0.6	1.0	0.5	0.6	0.6	0.6	0.3	0.7	1.5	1.0
4-1	平均温度	20.2	20.3	20.3	20.3	20.3	20.3	20.3	20.2	20.1	20.0	20.0	20.0	20.2	20.2
	標準偏差	0.3	0.1	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2
	平均湿度	63.3	63.3	63.2	63.2	63.0	62.3	62.5	62.8	63.2	63.7	64.0	63.8	63.1	63.0
4-2	標準偏差	3.1	0.5	0.1	0.1	0.6	0.9	0.5	0.5	0.5	1.1	0.3	0.7	1.3	0.9
	平均温度	20.2	20.3	20.3	20.3	20.3	20.4	20.2	20.2	20.1	20.0	20.0	20.0	20.2	20.2
	標準偏差	0.2	0.1	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	0.2	0.2
4-3	平均湿度	62.9	62.9	62.8	62.8	62.6	61.8	62.1	62.4	62.7	63.3	63.6	63.4	62.7	62.6
	標準偏差	3.1	0.5	0.1	0.1	0.6	0.9	0.5	0.5	0.5	1.1	0.3	0.7	1.3	0.9
	平均温度	20.0	20.3	20.5	20.5	20.5	20.6	20.4	20.3	20.2	20.0	19.9	19.9	20.3	20.3
4-4	標準偏差	0.5	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3	0.3
	平均湿度	63.6	62.2	61.9	61.9	61.8	60.9	61.2	61.6	62.2	63.1	63.6	63.4	62.2	62.0
	標準偏差	3.6	0.6	0.1	0.2	0.6	1.0	0.6	0.6	0.6	1.0	0.3	0.7	1.7	1.2
5-1	平均温度	20.0	20.3	20.4	20.4	20.4	20.5	20.3	20.2	20.1	20.0	19.9	19.9	20.2	20.3
	標準偏差	0.4	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3	0.3
	平均湿度	63.1	61.7	61.4	61.4	61.1	60.2	60.5	60.9	61.3	62.2	62.6	62.3	61.4	61.2
5-2	標準偏差	3.5	0.6	0.1	0.2	0.6	1.0	0.5	0.5	0.5	1.0	0.3	0.7	1.6	1.1
	平均温度	20.0	20.3	20.4	20.4	20.5	20.6	20.5	20.4	20.2	20.0	19.9	19.9	20.3	20.3
	標準偏差	0.6	0.1	0.0	0.0	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.3	0.3
5-3	平均湿度	63.6	62.6	62.3	62.3	61.6	60.7	60.9	61.4	62.2	63.2	63.6	63.3	62.1	61.9
	標準偏差	3.5	0.6	0.1	0.2	0.6	1.0	0.5	0.6	0.6	0.8	0.3	0.8	1.7	1.2
	平均温度	20.0	20.3	20.4	20.4	20.5	20.5	20.4	20.3	20.1	20.0	欠測	19.9	20.3	20.3
5-4	標準偏差	0.5	0.1	0.0	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	欠測	0.1	0.3	0.2
	平均湿度	64.3	63.1	62.9	62.6	62.1	61.2	61.9	62.3	63.0	63.6	欠測	63.8	62.7	62.6
	標準偏差	3.7	0.6	0.1	0.6	1.0	0.5	0.5	0.6	0.5	1.2	欠測	0.9	1.7	1.0
5-5	平均温度	20.0	20.3	20.3	20.3	20.3	20.3	20.2	20.2	20.1	20.0	19.9	19.9	20.2	20.2
	標準偏差	0.4	0.1	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	0.2	0.2
	平均湿度	63.8	62.8	62.7	62.7	62.7	62.0	62.0	62.2	62.6	63.3	63.6	63.4	62.8	62.6
5-6	標準偏差	3.5	0.5	0.1	0.1	0.6	0.9	0.5	0.6	0.5	1.1	0.3	0.7	1.4	0.9
	平均温度	20.0	20.3	20.4	20.4	20.4	20.5	20.4	20.2	20.1	19.9	19.8	19.8	20.2	20.2
	標準偏差	0.5	0.1	0.0	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3	0.3
	平均湿度	63.2	61.7	61.4	61.3	61.2	60.3	60.5	61.0	61.7	62.8	63.3	63.0	61.7	61.5
	標準偏差	3.7	0.6	0.1	0.2	0.6	1.0	0.5	0.6	0.6	1.0	0.3	0.7	1.8	1.3

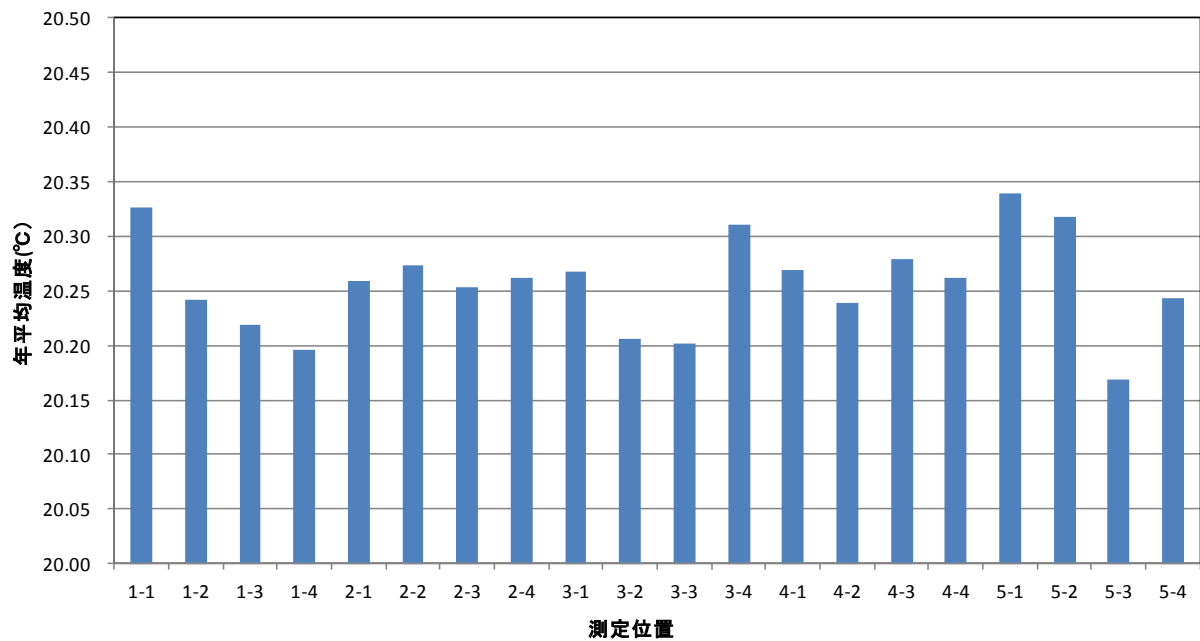


図 4.1-21 各測定点の年平均温度

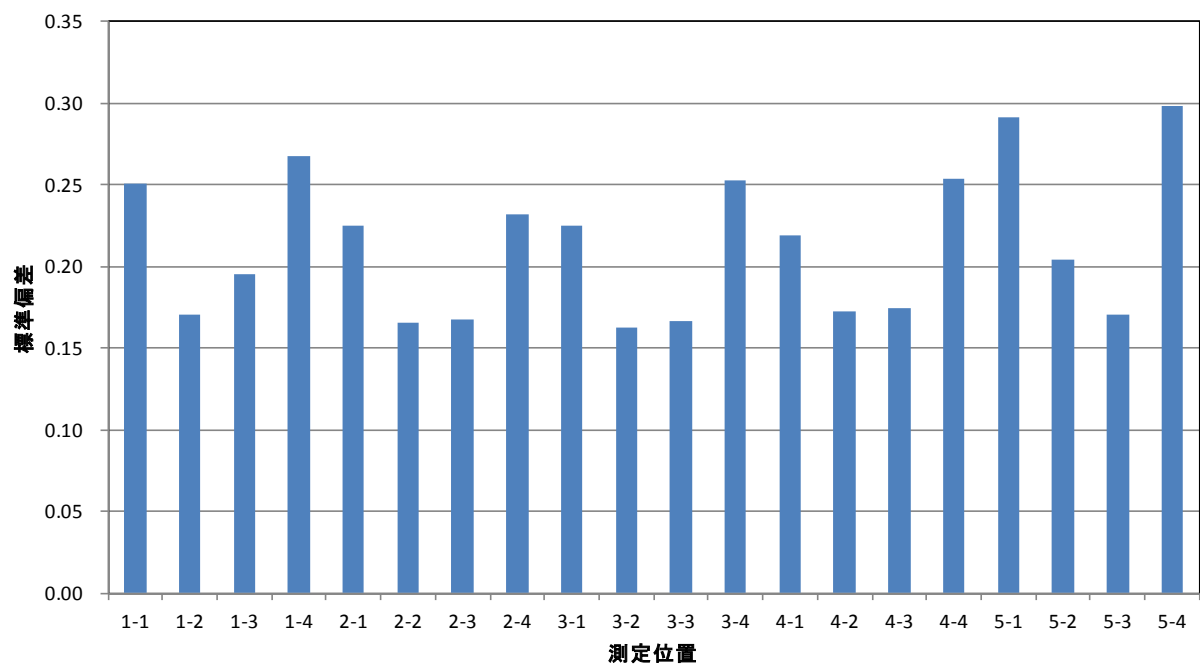


図 4.1-22 各測定点の温度の標準偏差

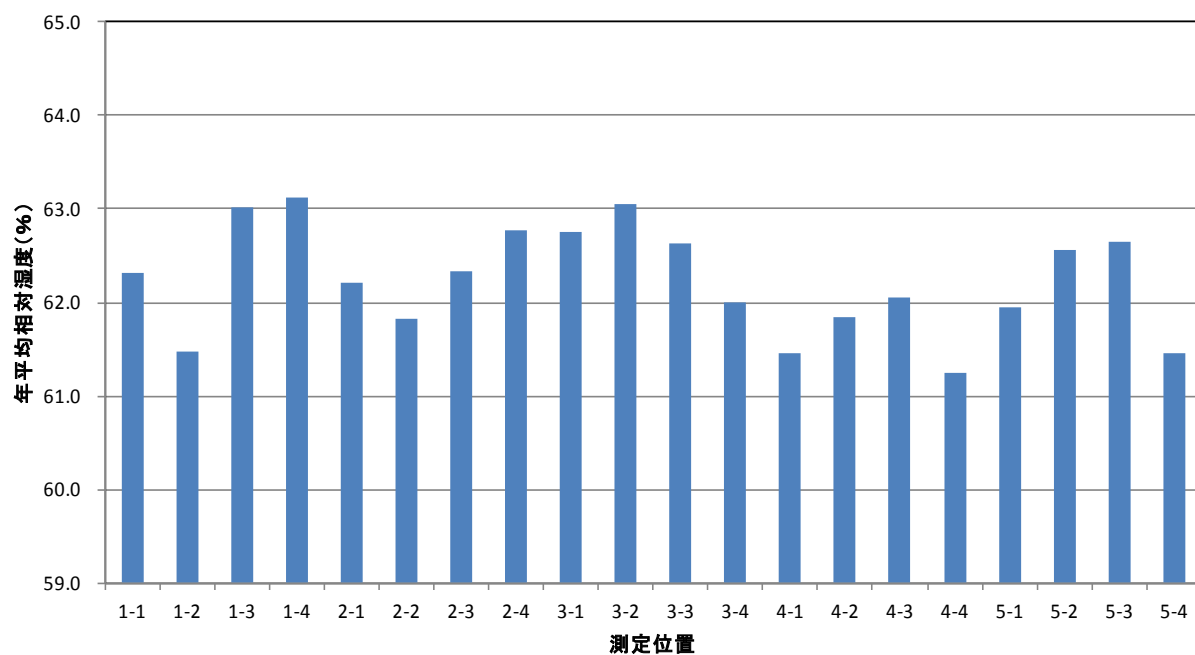


図 4.1-23 各測定点の年平均相対湿度

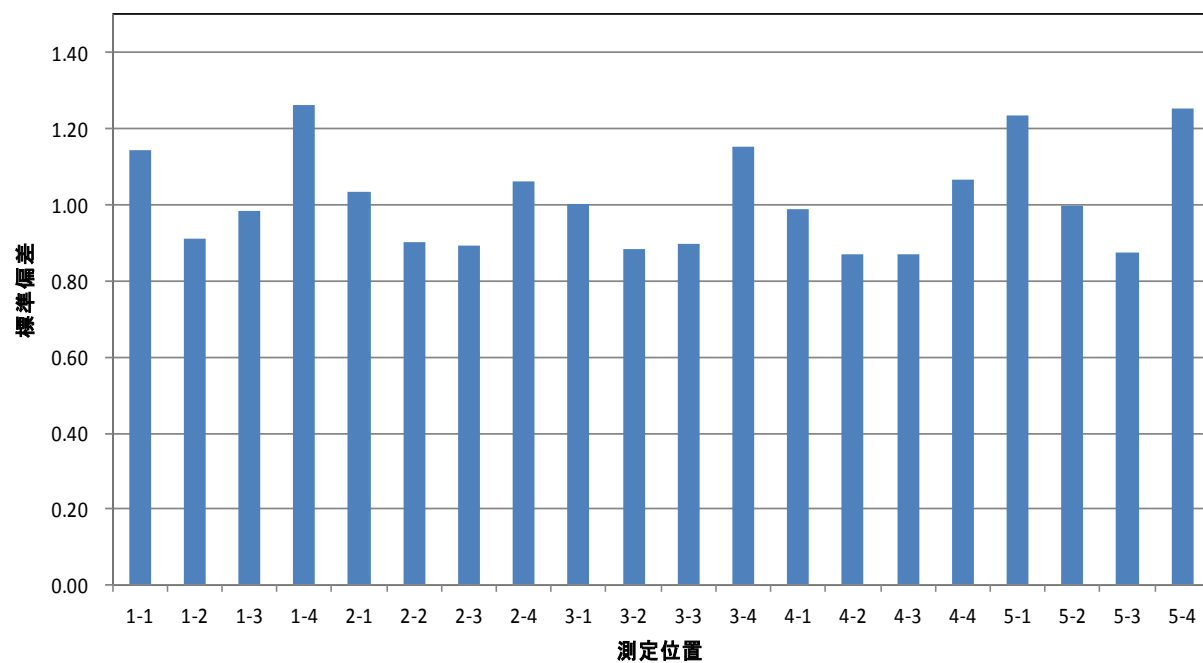


図 4.1-24 各測定点の相対湿度の標準偏差

4.1.4 まとめ

スギ 5ply の CLT の熱湿気性能を検討したところ、概ね原料となったスギと同等と扱って良いと考えられた。ただし、接着層の与える影響に関しては今後の検討が必要である。

長期荷重試験体の周囲湿度変化に対する吸湿試験を検討したところ、側面からの吸湿が大きな影響を与える可能性が示唆された。また、シミュレーション結果から、含水率が 15% 程度の状態で製造された試験体を長期化荷重試験に供する場合には、内部水分が安定するまで長期を要する可能性があることから、試験体製造時の含水率管理が重要であると考えられた。

森林総合研究所の長期荷重試験装置の温湿度環境を 1 年にわたり検討したところ、極めて安定した試験条件にある事がわかった。

今後は、含水率と強度的性能との関係の検討が必要と考えられる。

4.2 積層接着されているラミナの縦弾性係数の推定

4.2.1 目的

CLT として積層接着されている各ラミナの繊維方向の縦弾性係数を非破壊的に推定するため、弾性波の伝達時間について検討した。

4.2.2 伝達時間の校正

測定に用いる装置の伝達時間の校正值を検討した。

4.2.2.1 実験方法

弾性波の伝達時間の測定には、超音波方式とハンマーの打撃で生じる応力波（以下、応力波）方式の2種類の装置を用いた。超音波方式は、発信周波数 22 kHz の Concepts bois structure 社製 Sylvatest Duo（以下、シルバテスト）を用いた。応力波方式は、Fakopp enterprise 社製 FAKOPP microsecond timer（以下、ファコップ）を用いた。両装置とも発振用と受振用の2つのセンサーを持つ（写真 4.2-1）。本来は、シルバテストは測定材面に設けた先穴にセンサー先端部をはめ込んで測定するが、本実験では、先穴を設けず、センサー先端を測定材面に垂直に押し当てて測定した。ファコップは、測定材面に針状のセンサー先端部を打ち込んで測定する。発振・受振両センサーの針径が異なるため、本実験では、打ち込み深さを発振側 1 cm、受振側 1.5 cm とし、測定材面に垂直にセンサーを打ち込んで測定した。なお、両測定方法をまとめて、以下、伝播法と呼ぶ。

試験体には、縦継ぎの無い乾燥スギラミナ（厚さ 30 mm×幅 105 mm×長さ 2000 mm）4 本を用いた。ラミナを 250mm ずつ短くし、各長さにおける繊維方向の伝達時間（以下、単に伝達時間と略す）、縦振動の固有振動数、重量と寸法を測定した。



ア) シルバテスト



イ) ファコップ

写真 4.2-1 測定装置のセンサー部（それぞれ左が受振側、右が発振側）

4.2.2.2 結果と考察

図 4.2-1 に例を示すように、両伝播法とも測定距離と伝達時間の関係は線形であった。回帰直線から求めた測定距離 0 での伝達時間を補正值とし、表 4.2-1 に示す。補正後の伝達時間は実測値から補正值を引いた値である。平均値を用いて補正したところ、両伝播法の伝達時間の一致が改善された（図 4.2-2）。

ところで、密度 ρ 、縦弾性係数 E の材中を縦波（弾性波）が伝達速度 v で伝わる時、 $E = v^2 \rho$ の関係がある。一方、自由支持された同材の長さ L の棒の縦振動の 1 次固有振動数が f であるとき、 $E = (2fL)^2 \rho$ の関係がある。弾性波伝播法も縦振動法も材中を伝わる縦波の速度から縦弾性係数を評価する方法であり、縦振動法では、縦波の材内の伝達時間 t は $t = 1/(2f)$ と表せる。

図 4.2-3 に示すように、両伝播法とも縦振動法で評価した縦弾性係数に比べ、わずかに高い値を示すが、一致する傾向が確認された。伝播法と縦振動法の伝達時間を比較すると、特に伝達時間が大きいとき、伝播法は縦振動法によりも若干小さい値を示す傾向がみられた（図 4.2-4）。

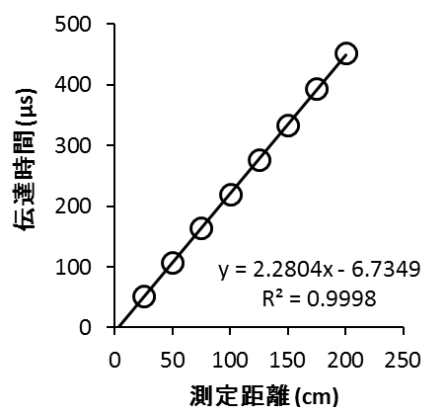


図 4.2-1 測定距離と伝達時間の関係（ラミナ 1、超音波）

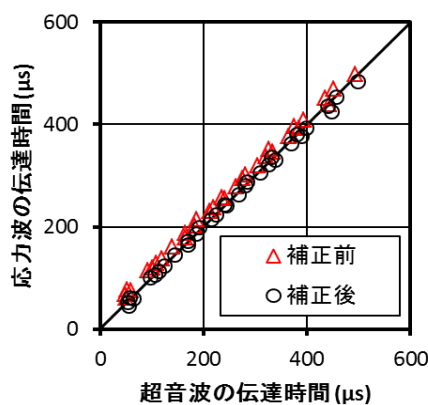


図 4.2-2 補正前後の伝達時間の比較

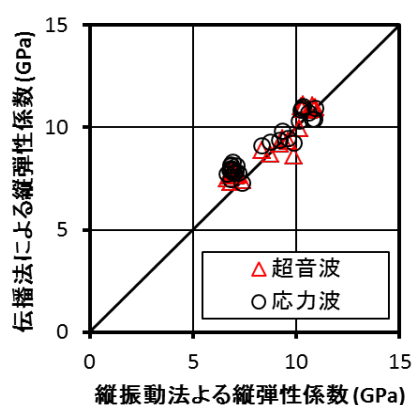


図 4.2-3 評価した縦弾性係数の比較（補正後の値）

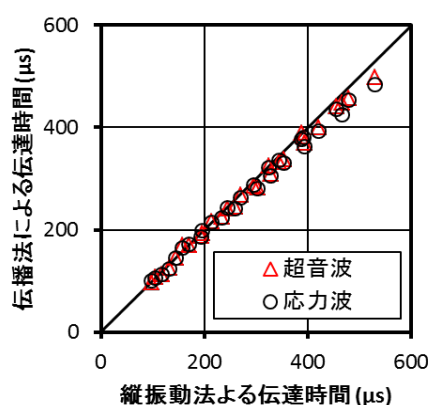


図 4.2-4 伝達時間の比較

表 4.2-1 補正值 t_0 (μs)

試験体	シルバテスト	ファコップ
ラミナ 1	-6.73	14.91
ラミナ 2	-7.51	8.28
ラミナ 3	-6.18	16.71
ラミナ 4	-0.81	21.40
平均値	-5.31	15.33

4.2.2.3 まとめ

両伝播法の伝達時間の補正方法を得た。また、伝達時間が大きいとき、伝播法の伝達時

間は縦振動による評価よりも若干小さくなる傾向がみられたが、実際の縦弾性係数の非破壊評価としては無視できる程度であった。

4.2.3 積層接着されたラミナの縦弾性係数の推定

CLT として積層接着されている状態の各ラミナの縦弾性係数の非破壊測定方法を検討した。

4.2.3.1 実験方法

試験体には公称 Mx60 の 5 層 5 プライ CLT（強軸方向 800 mm、弱軸方向 400 mm、厚さ 150 mm、ラミナ等厚、幅はぎ接着なし）6 体を用いた。ラミナ幅は 4 体が 105 mm、2 体が 125 mm であった。見かけの密度は 386～443（平均 412） kg/m^3 であった。

実験は、まず、各ラミナが積層接着された状態（以下、裁断前）で、伝播法にて各ラミナの繊維方向の伝達時間を求めた。伝播法は超音波方式と応力波方式の 2 種類を用いた。測定装置および使用方法は 4.2.2 で述べた通りであった。伝達時間の補正には表 4.2-1 の平均値を用いた。次に、帯鋸により試験体を層ごとに裁断し、さらに各ラミナを分離した（以下、この状態を裁断後と呼ぶ）。再び、両伝播法にて各ラミナの伝達時間を求めた。



写真 4.2-2 試験体および測定装置（左がファコップ、右がシルバテスト）

注）実験では、シルバテストはラミナ木口面にセンサー先端部を押し当てて測定した。

4.2.3.2 結果と考察

図 4.2-5 に示すように、裁断後では、両伝播法の伝達時間はよく一致した。裁断後の伝達時間が各ラミナの物性を正しく表しているものとする、積層接着された裁断前の状態では、一部のラミナの超音波の伝達時間が大きな値を示した。

図 4.2-6 に裁断前後の超音波の伝達時間の関係を、図 4.2-7 に裁断前後の応力波の伝達時間の関係を示す。内層（平行層）のラミナは、裁断前の超音波の伝達時間が大きな値を示した。この傾向の縦継ぎとの明確な関係は確認できなかった。他の位置に配置されたラミナにはこのような顕著な傾向はみられず、裁断後に比べ、裁断前の伝達時間は 5%程度大きな値であった。応力波でも、内層（平行層）のラミナは裁断前の伝達時間がわずかに大きくなったが、他のラミナの伝達時間の傾向とほぼ同程度であった。

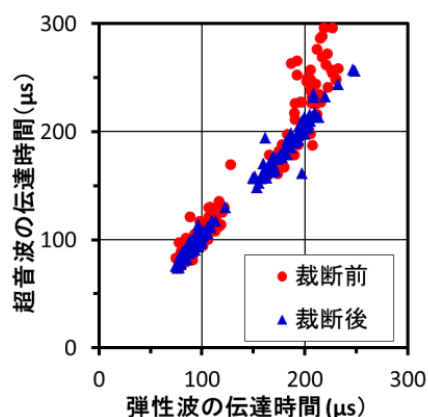


図 4.2-5 両伝播法の伝達時間の関係

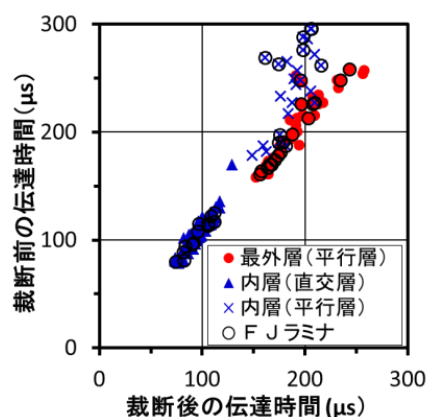


図 4.2-6 裁断前後の超音波の伝達時間の関係

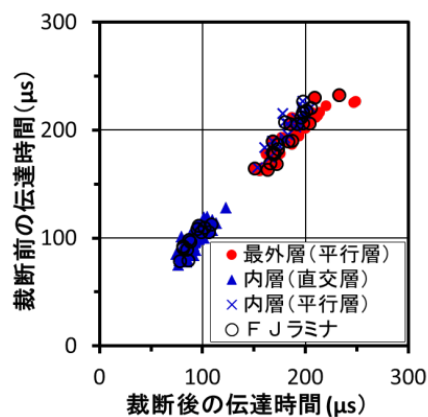


図 4.2-7 裁断前後の応力波の伝達時間の関係

4.2.3.3 まとめ

原因は明らかではないが、CLT の内層（平行層）ラミナは、ラミナ単独の状態に比べ、超音波の伝達時間が大きく評価される場合があることが観察された。

一方、他の位置に配置されたラミナは、ラミナ単独の状態と積層接着された状態とで伝達時間はほぼ変わらなかった。また、応力波方式では、どの位置に積層接着されたラミナも単独状態と伝達時間はほぼ変わらなかった。

このことから、積層接着された状態で CLT の各ラミナの縦弾性係数のおおよその値を非破壊的に評価する場合、材長 80cm 程度までは、応力波方式はほぼそのまま適用できると考えられる。超音波方式も、同様に適用できるが、内層（平行層）ラミナは著しく伝達時間が大きく評価されることがあるため、適用には注意を要する。

4.3 スギ CLT の長期性能の測定

4.3.1 試験の概要

直交集成板の JAS 規格によると、CLT は、ひき板又は小角材をその繊維方向を互いにほぼ平行にして幅方向に並べ又は接着したものを、主としてその繊維方向を互いにほぼ直角にして積層接着し 3 層以上の構造を持たせた一般材であり、製材や集成材と構造が異なっている。このことにより CLT の長期載荷荷重に対する性能が製材や集成材と異なる可能性がある。このため、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 の力学的な性状に関する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。

4.3.2 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とおりとした。

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

樹種：スギ

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

長さ 4830mm×厚さ 210mm×幅 300mm(Mx60-7-7)

4.3.3 試験方法

クリープ破壊試験を以下に記す載荷条件及び荷重量により実施した。

加力方法：3 等分点 4 点加力

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

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

載荷荷重：曲げ試験により得られた最大荷重より決定

試験体数：30 体

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

応力レベル決定の過程は以下の通りである。

短期曲げ試験による Mx60-7-7 の試験体 16 体の最大荷重は、平均 68.88kN、標準偏差 5.87kN(COV8.52%)であった。応力レベルを最大荷重の 66～94%の範囲で 2%括約の数値とした。試験装置は、てこによる増力装置を介して重錘のデッドロードを 50 倍に拡大載荷するが、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となる。従って載荷すべき重錘重量は 92.77kg であるが、これを 1.0kg 括約に丸め、93kg 載荷するものとした。このとき、実際の応力レベルは 66.16% 二相当する。図 4.3-1 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ったと言える。

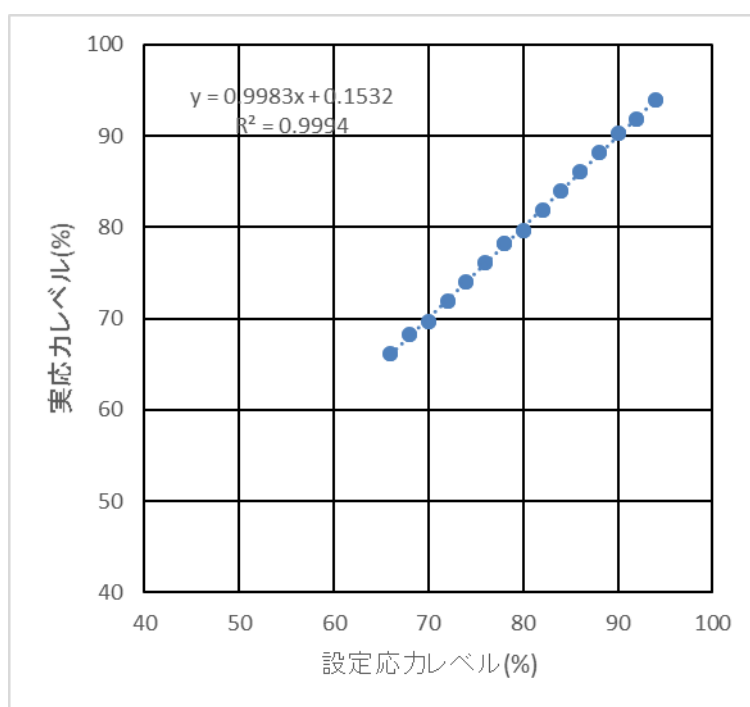


図 4.3-1 設定応力レベルと実応力レベルの関係

4.3.5 スギ CLT の長期性能の測定結果

写真 4.3-1 にクリープ破壊試験の実施風景を示す。写真では向かって左側の試験装置 2 台で Mx60-5-5 の測定、右側 3 台で Mx60-7-7 の測定をしている。試験空間が狭く、他の測定結果に影響を与えうるため、全ての試験体が破断するまで試験体の入れ替えを行うことは困難である。図 4.3-2 に測定中の変形量の経時的変化の一例を示す。応力レベル 68% の場合、加力開始直後の加力点変位は約 37.8mm 試験体中央部変位は 43.2mm であった。およそ 6 ヶ月 (21,340,752 秒) 後にはそれぞれ 47.2mm、54.3mm に増大していた。

写真 4.3-2 に試験体の破断状況を示す。破壊は引張側最外層のフィンガージョイント部から生じることが多く、最外層の剝離と直交層のローリングシア破壊が生じると変形が増大し、破断に到る。最外層ラミナのフィンガージョイントが近接している場合、比較的早期に破断するように思われる。

図 4.3-3 にこれまでに破断した試験体の破断時間と応力レベルの関係を示す。図中の曲線は FPL の Wood の研究による製材の破断時間と応力レベルの関係 (Madison curve) である。Mx60-5-5、Mx60-7-7 とともに概ね製材と同様の傾向を示すが、データの変動が大きく、更にデータの蓄積が必要と考えられる。

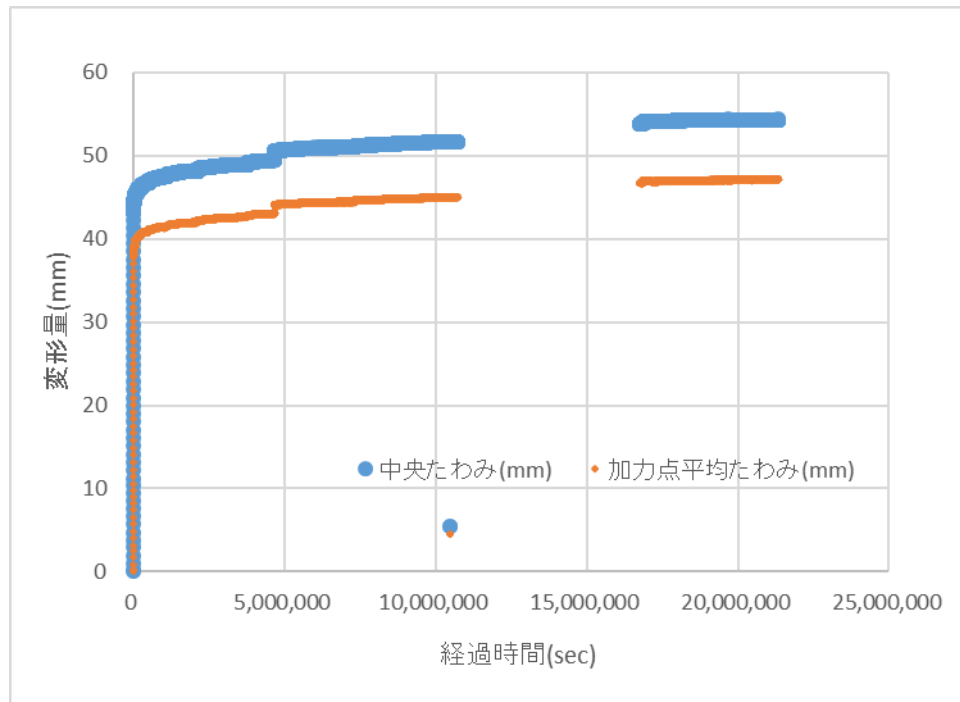


図 4.3-2 変形の経時変化(応力レベル 68%)



写真 4.3-1 クリープ破壊試験の実験風景



写真 4.3-1 試験体の破断状況

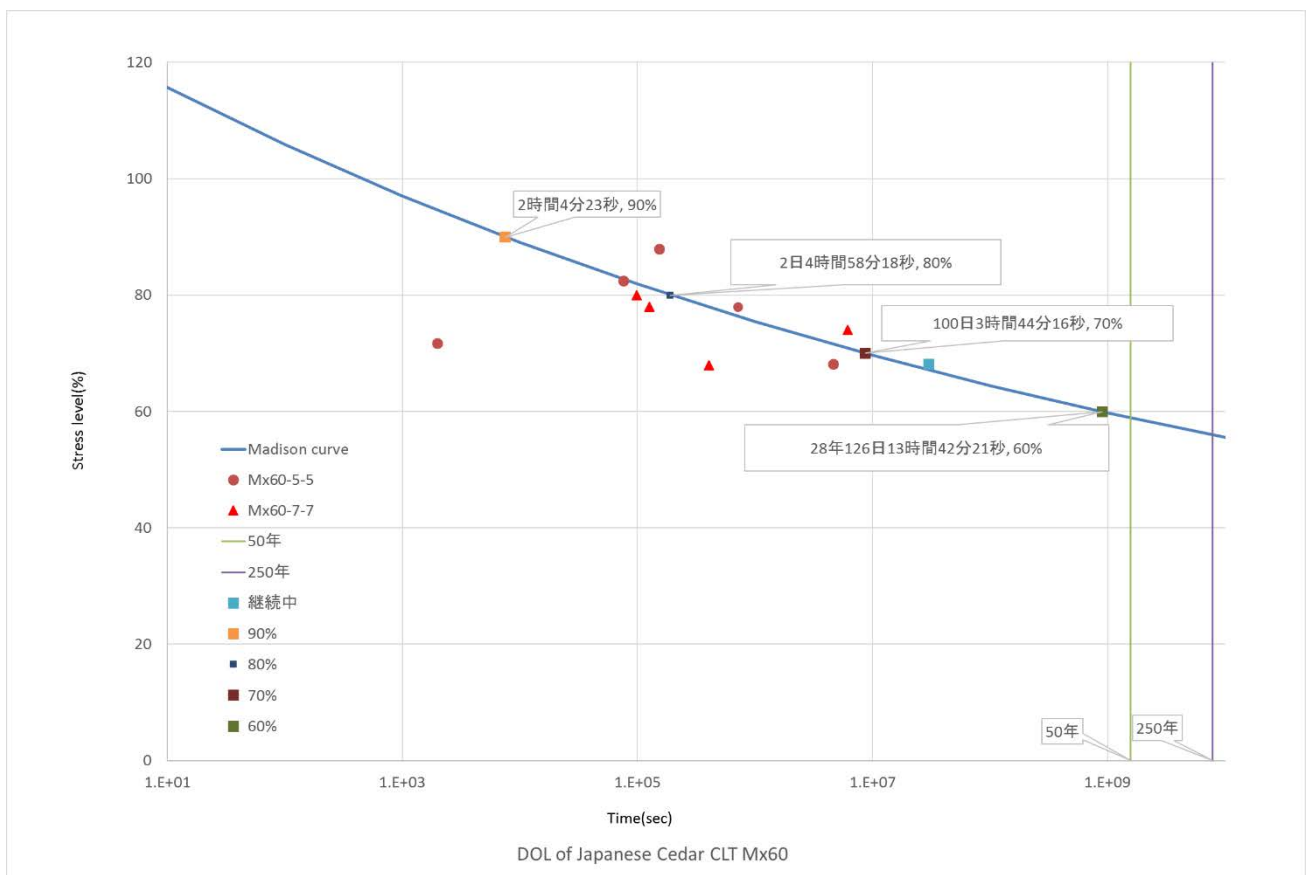


図 4.3-3 設定応力レベルと実応力レベルの関係

【謝辞】

熱伝導率の測定に際して、北海道立総合研究機構建築研究本部北方建築研究所の機材及び同研究所の遠藤卓氏の測定協力を得た。ここに感謝の意を表す。

【文献】

- 1) (社)日本建築学会：建築設計資料集成 2，丸善株式会社，pp.778(1976)
- 2) 日本木材防腐工業組合：CLT 等新製品・新技術利用促進事業のうち耐久性等品質向上事業報告書，pp.97(2016)
- 3) 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)
- 4) Wood, L.W., “Relation of Strength of Wood Duration of Load”, F.P.L. Report No. R1916(1951)
- 5) Liska, J.A., “Effect of Rapid Loading on the Compression and Flexural Strength of Wood”, F.P.L. Report No. R1767(1950)
- 6) Borg Madsen, “Structural Behaviour of Timber”, Timber Engineering LTD., (1992)
- 7) 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)
- 8) “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)

林野庁委託事業「CLT等新たな製品・技術の開発・普及事業（CLT強度データ収集）」
第1回進行管理委員会 議事録

日 時： 平成 27 年 10 月 13 日（火）15:00～17:00

場 所： 林友ビル 6 階中会議室（東京都文京区後楽 1-7-12）

議 題：

- 1) 挨拶
- 2) 委員紹介 資料 1
- 3) 本年度事業について
試験計画の概要 資料 2、資料 3、参考資料 1、参考資料 3
進行計画 資料 4
- 4) その他

配付資料

- 資料 1 委員名簿
- 資料 2 仕様書
- 資料 3-1 企画書
- 資料 3-2 試験体仕様
- 資料 3-3 CLT における直交層挙動の解析
- 資料 3-4 座屈荷重とクリープ破壊についての検討
- 資料 3-5 長期挙動試験時の含水率推定手法の検証
- 資料 4 スケジュール

林野庁提出資料

（森林総研委託事業・北海道事業のスケジュール、DOL 実験と基準強度制定との関係、カラマツ DOL 実験状況）

- 参考資料 1 25 年度補正事業報告書（短期）
- 参考資料 2 25 年度補正事業報告書（長期）
- 参考資料 3 26 年度事業報告書（短期）
- 参考資料 4 26 年度事業報告書（長期）
- 参考資料 5 CLT 強度データ

出席者（順不同、敬称略）

- 委 員： （委員長）安村 基 静岡大学農学部
（委 員）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）中川 貴文 国土交通省国土技術政策総合研究所
（委 員）尾方 伸次 公益財団法人日本合板検査会

	(委 員) 鴛海 四郎	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
オブザーバー：	加賀谷 徹	国土交通省大臣官房官庁営繕部整備課
	高木 直人	国土交通省住宅局建築指導課
	牧野 弥生	〃
	中熊 靖	農林水産省食料産業局食品製造課食品規格室
	大村 敏幸	〃
	香月 英伸	林野庁木材産業課木材製品技術室
	高畑 啓一	〃
	西村 紘明	〃
	坂 賢	〃
課題担当者：	槌本 敬大	国立研究開発法人 建築研究所
	荒木 康弘	〃
	朝倉 靖弘	北海道立総合研究機構 林産試験場
	秋津 裕志	〃
	佐々木貴信	秋田県立大学 木材高度加工研究所
	園田 里見	富山県農林水産総合技術センター 木材研究所
	藤田 和彦	広島県立総合技術研究所林業技術センター
	中原 亨	鹿児島県工業技術センター
	村田 忠	一般社団法人日本CLT協会
	孕石 剛志	〃
	宮武 敦	国立研究開発法人 森林総合研究所
	平松 靖	〃
	新藤 健太	〃
	渋沢 龍也	〃
	長尾 博文	〃
	塔村 真一郎	〃
	宮本 康太	〃
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

3) 本年度事業について

事業の目的は、基準強度を制定するためのデータ収集を行うことであり、今年度は主に短期的強度を調べる。25年度補正では、3層3プライ～9層9プライの6種類のラミナ構成全てについて、ラミナ構成がスギ CLT の強度性能に与える影響をみた。26年度では、

ラミナ等級を変え、外層にヒノキのラミナ、内層にスギを用いるものをメインにして強度性能を調べた。これらの試験体については、幅はぎ接着を行わないで製造したものをメインとした。今年度は、幅はぎ接着の有無が CLT の強度性能にどのように影響するかをみる。

事業内容は、ア 幅はぎ接着が各種強度性能に及ぼす影響の解明、イ 寸法効果に及ぼす幅はぎ接着の影響の解明、ウ 幅はぎ接着ラミナの強度性能の検討、エ 長期挙動に関する検討の 4 つである。

具体的には、ア 強度性能については、面外曲げ性能、面外せん断性能、面内曲げ性能、圧縮性能、引張り性能、面内せん断性能を行うが、直交層挙動の解明を新たに追加した。

イ 寸法効果については、面外曲げと引張に関して試験体の幅の影響をみる。実際には CLT は幅 1 m、2 m の幅の広い材料が使われることが想定されるので、幅 1 m を超える試験体について面外曲げと引張り試験を行う。

ウ 幅はぎ接着については、乱尺幅ラミナの有効利用を考え、乱尺幅のラミナを順に幅はぎし、その後一定の幅に切断したラミナを使って製造した CLT の強度を検証する。

エ 長期挙動については、25 年度補正、26 年度当初予算を通じて現在試験データを収集中で、このデータについて評価を行う。

各担当については、面外曲げについては、広島県林業技術センターと鹿児島県工技センター、面外せん断と面内曲げについては森林総研が担当する。圧縮性能については、長柱を建築研究所で、短柱を森林総研で実施する。引張りについては、森林総研が実施する。面内せん断については、おおかがりな試験を建研で、簡易な方法を森林総研で取り組む。直交層挙動の解析については、富山県木材研究所で評価を行う。

(2) 製品幅の影響について、面外曲げと面外せん断については秋田県立大学が、引張については森林総研が担当する。(3) CLT ラミナの適正製造条件については、幅はぎ接着ラミナの強度性能を愛媛県林業研究センターで担当する。幅はぎ接着ラミナを用いた CLT の強度性能については、曲げを広島県と鹿児島県で、面外せん断を森林総研で実施する。(4) 長期性能については、従来どおり森林総研と北林産試が従来通り担当する。また、北林産試において、CLT 長期試験体の含水率変動のシミュレーションを行い、長期試験で温湿度が変動した場合の試験体に与える影響を検討する。

その他、次回進行管理委員会開催日を仮決めし、平成 28 年 2 月 8 日(月) 18:00~20:30 とした。

林野庁委託事業「CLT等新たな製品・技術の開発・普及事業（CLT強度データ収集）」
第2回進行管理委員会 議事録

日 時： 平成 28 年 2 月 8 日（月）18:00～20:00

場 所： 林友ビル 6 階中会議室
TEL:03-3816-8081、 FAX:03-3816-7880

議 題：

- 1) 挨拶
- 2) 本年度事業の結果について
- 3) その他

資 料：

H27 林野事業 報告書 目次案

1. ラミナ・プライの仕様が短期的強度性能に与える影響の評価
 - 1.1 試験体の仕様（担当：宮武）
 - 1.2 面外曲げ試験：5 層 5 プライ（担当：藤田）
 - 1.3 面外曲げ試験：7 層 7 プライ（担当：中原）
 - 1.4 面外せん断試験（担当：新藤）
 - 1.5 面内曲げ試験（担当：平松）
 - 1.6 面内せん断試験（担当：荒木）
 - 1.7 圧縮試験（短柱）（担当：野田）
 - 1.8 圧縮試験（長柱・中間柱）（担当：中島）
 - 1.9 引張り試験（担当：井道）
 - 1.10 直交層挙動（担当：園田）
 - 1.11 まとめ（担当：宮武）
2. 試験体寸法が幅はぎ接着プライで構成した CLT の強度性能に与える影響
 - 2.1 試験体の仕様（担当：宮武）
 - 2.2 面外曲げ試験（担当：佐々木）
 - 2.3 面外せん断試験（担当：佐々木）
 - 2.4 引張り試験（担当：井道）
 - 2.5 まとめ（担当：宮武）
3. CLT 用ラミナの適正製造条件の検討
 - 3.1 幅はぎ接着ラミナの強度性能の特徴（担当：玉置）
 - 3.2 幅はぎ接着ラミナの強度性能（担当：中原）
4. 長期性能に関する検討

- ・長期挙動試験時の含水率推定手法の検証（北海道立林産試験場）
- ・長期性能に関する検討（森林総研）

出席者（順不同、敬称略）

委員：	（委員長）安村 基	静岡大学農学部
	（委員）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）中川 貴文	国土交通省国土技術政策総合研究所
	（委員）尾方 伸次	公益財団法人日本合板検査会
	（委員）鴛海 四郎	公益財団法人日本住宅・木材技術センター
	（委員）岡部 実	一般財団法人ベターリビングつくば建築試験研究センター
	（委員）川上 修	一般財団法人建材試験センター 中央試験所
	（委員）横田 俊峰	独立行政法人農林水産消費安全技術センター

オブザーバー：	中熊 靖	農林水産省食料産業局食品製造課食品規格室
	香月 英伸	林野庁木材産業課木材製品技術室
	高畑 啓一	〃
	西村 紘明	〃
	坂 賢	〃

課題担当者：	槌本 敬大	国立研究開発法人 建築研究所
	荒木 康弘	〃
	朝倉 靖弘	北海道立総合研究機構 林産試験場
	大崎 久司	〃
	秋津 裕志	〃
	佐々木貴信	秋田県立大学 木材高度加工研究所
	園田 里見	富山県農林水産総合技術センター 木材研究所
	藤田 和彦	広島県立総合技術研究所林業技術センター
	野沢 浩二	〃
	渡辺 靖崇	〃
	中原 亨	鹿児島県工業技術センター
	村田 忠	一般社団法人日本CLT協会（代 西牧 聡）
	宮武 敦	国立研究開発法人 森林総合研究所
	平松 靖	〃
	新藤 健太	〃
	野田 康信	〃
	塔村 真一郎	〃

宮本 康太

〃

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 2) 本年度事業結果について

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

1. ラミナ・プライの仕様が短期的強度性能に与える影響の評価

幅はぎ接着有り、無しのスギ5層5プライ及び7層7プライのCLTを製造しているが、幅はぎ接着なしの結果についての報告があった。面外曲げ、面内曲げ、圧縮、引張りの各試験結果が報告された。面外曲げ試験では、ラミナ幅105mmと251mmで曲げ強さに差は見られなかった。引張り強さについても、ラミナ幅による差はなかった。面内曲げ強さは、強軸方向、弱軸方向とも、5層5プライと7層7プライでほぼ同じ値であった。直交層挙動では、直交層の層内せん断剛性と耐力及び直交層のヤング率の検討が行われた。

2. 試験体寸法が幅はぎ接着プライで構成したCLTの強度性能に与える影響

5層5プライのCLTについて、試験体の幅を変えて(300mm～1800mm)面外曲げ試験を行い、曲げ強さに及ぼす試験体幅の影響を見た。また、幅300mm及び600mmのCLTの引張り試験を行い、ラミナ幅の影響、及び幅はぎ接着の影響を検討した。

3. CLT用ラミナの適正製造条件の検討

幅はぎ接着ラミナの強度試験を行い、幅はぎによりラミナ強度がどのようになるかを検討した。圧縮強さが示されたが、縦振動から求めたヤング係数と直線関係が見られた。引張りと曲げについても同様の検討を行った。

4. 長期性能に関する検討

長期挙動試験体の厚さ方向と強軸方向の吸湿量をシミュレーションした結果、実測値とほぼ一致することが認められた。

DOL試験の結果、5層5プライのCLTはほぼ木材と同じような挙動を示した。7層7プライについては試験を継続中である。

5. その他

林野庁より、北海道林産試験場で行っている、カラマツCLT(Mx120)のDOL試験結果の紹介があった。試験は継続中であるが、算定したDOLの値は、3層3プライでは0.57、5層5プライで0.52であった。