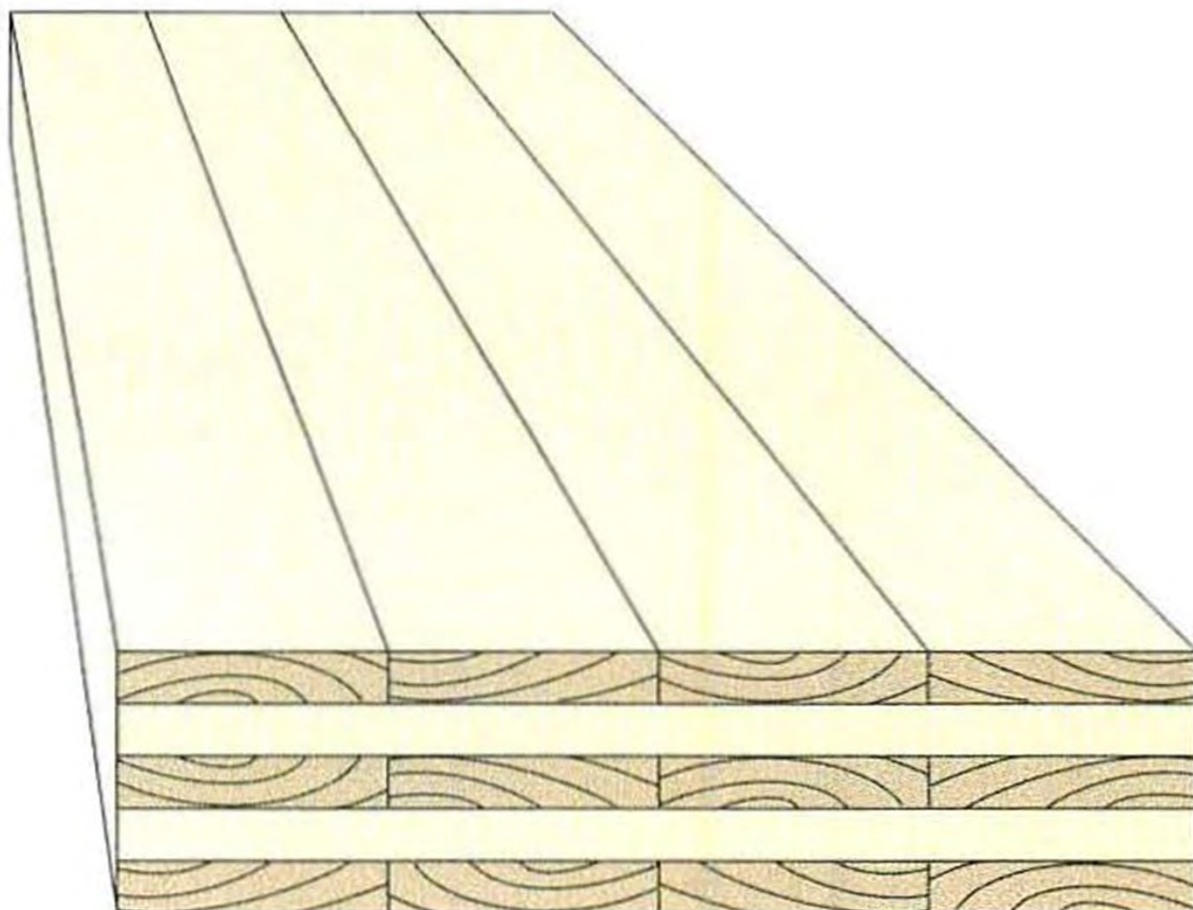


スギCLTの材料特性、床構面のせん断性能



木造の建築設計に求められる地域材によるCLT
(クロス・ラミネイティド・ティンバー)の品質と仕様
及び部材の仕様、構造モデルの検討と実証試験
平成24年度林野庁「木材利用技術整備等支援事業」

平成25年度3月
日本CLT協会

はじめに

欧州開発され、北米などでも利用が広がっているCLTは、日本でも合板、集成材、LVLに次ぐ、新たな木質材料となる可能性を持つ材料である。日本でも今後、中層・大規模の公共建築物、商業建築物や、住宅、アパート等、大きな建物から小さな建物まで多様な建築物に使われることが期待される。

しかし、日本でのCLTについての研究はまだ始まったばかりであり、実用化につなげるためには、基礎データの収集や研究を行っていくことが必要である。

そのため、平成24年度の林野庁補助事業のうち「地域材によるCLTの品質と仕様および部材の仕様、構造モデルの検討と実証実験」ではCLTの規格化を見据えたCLTパネルの基礎的性能の把握のための実験と、実用化を見据えた床の音響と構面性能の実験の2つを主として事業を行った。

正式な報告書は約150ページにわたるが、コンパクトに各実験のポイントをつかめる冊子としてこのダイジェスト版を作成した。多くの方に見ていただき、また、役立てていただきたい。

日本でのCLTの実用化に向けて本事業の成果が役立てられるよう、今後とも情報発信を続けていくとともに、引き続き、多くの方々の助言・ご協力をいただければ幸いである。

平成25年3月

日本CLT協会
会長 中島 浩一郎

実施体制

平成24年度 林野庁補助事業 木材利用技術整備等支援事業
「木造の建築設計に求められる地域材によるCLT (Cross Laminated Timber)の
品質と仕様及び部材の仕様、構造モデルの検討と実証試験」

CLTの木材利用技術整備委員会

スギCLTの材料特性・床構面せん断性能

- 独立行政法人 森林総合研究所
複合材料研究領域
宮武敦
渋沢龍也
平松靖
新藤健太
構造利用研究領域
杉本健一
井道裕史
長尾博文
三浦祥子
青木謙治
- 独立行政法人 建築研究所
中島史郎
- 広島県立総合技術研究所
林業技術センター
藤田和彦
川元満夫
- CLT製造
銘建工業(株)
山佐木材(株)

スギCLT床の 音響試験

事務局
事業主体

日本CLT協会

1. 試験の概要

【目的】CLTの基本的な強度性能を、ラミナの強度等級区分基準や区分されたラミナの構成が与える影響とともに明らかにする。

【試験項目】 図1-1参照

1. 面外方向の荷重に対する曲げ性能(床CLT、壁CLT)
2. 面内方向の荷重に対する曲げ性能(壁・まぐさCLT)
3. 面外方向の荷重に対する面外(層内)せん断性能(床CLT、壁CLT)
4. 面内方向の荷重に対する縦圧縮性能(壁CLT)
5. 局所的な圧縮に対するめり込み性能・(床CLT、壁CLT)
6. 面外方向の長期的な荷重に対する性能(床CLT)

【試験体】

- ラミナの仕様:スギ、厚さ30mm×幅110mm
- 連続式グレーディングマシンで測定した曲げヤング係数によるラミナ強度等級区分(表1-1参照)
- ラミナたて継ぎ:フィンガー長15mm、幅はぎ接着なし
- 大板パネル(2.7m×6.0m)を3種類のラミナ構成、5層5プライ・同一等級構成、5層5プライ・異等級構成、7層7プライ・同一等級構成(図1-2参照)で作製
- たて継ぎ及び積層用接着剤は水性高分子イソシアネート系樹脂接着剤
- 各種強度試験体は大板パネルから所定寸法で所定位置から切断して採取(図1-3参照)

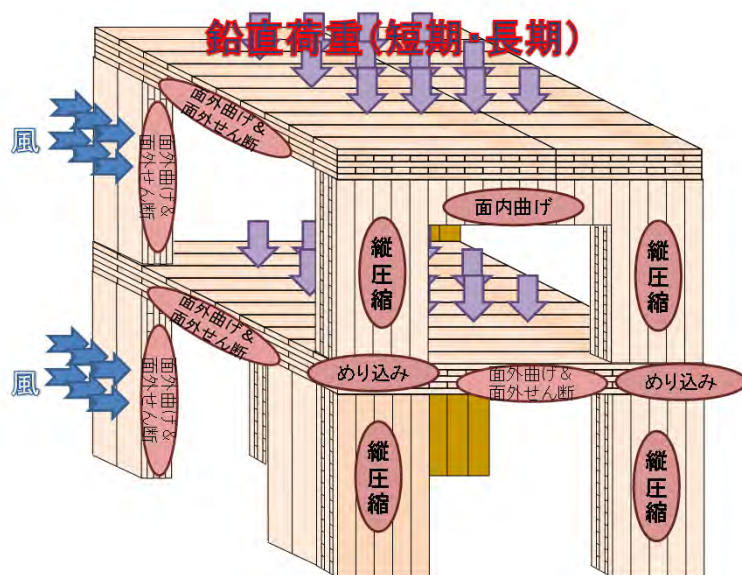
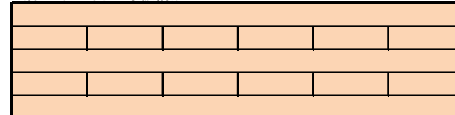


図1-1 強度試験項目

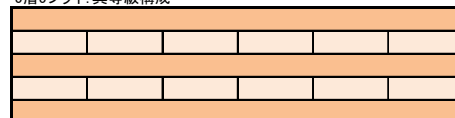
表1-1 ラミナの強度等級区分基準値

評価項目	構成	用途	区分基準
強度試験	同一等級構成	全層用	4~7kN/mm ²
		平行層用	6~8kN/mm ²
	異等級構成	直交層用	3~6kN/mm ²
長期性能試験	同一等級構成	全層用	6~7kN/mm ²

5層5プライ:同一等級構成



5層5プライ:異等級構成



7層7プライ:同一等級構成

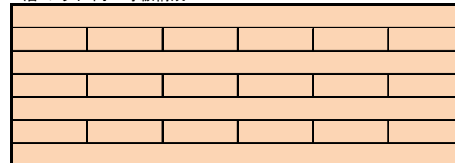


図1-2 ラミナ構成

試験体 採材パターン1

採材パターン1		1層	2層	3層	4層	5層																		
一強軸方向		300	600	900	1200	1500	1800	2100	2400	2700	3000	3300	3600	3900	4200	4500	4800	5100	5400	5700	6000 mm			
↓弱軸方向																								
330	面内曲げ・強軸	1a1		FJ配置留意																				
660	面内曲げ・強軸	1a2		FJ配置留意																				
990	面内曲げ・強軸	1a3		FJ配置留意																				
1320	面外曲げ・強軸	1b1		FJ配置留意								面外曲げ・強軸		1b2		FJ配置留意								
1650	面外曲げ・強軸	1b3		FJ配置留意								面外曲げ・強軸		1b4		FJ配置留意								
1980	圧縮 中間柱・強軸	1c1		FJ配置留意								層内せん断(逆対称式)				1e1		層内せん断(水平)					1d1	
2310	圧縮 中間柱・強軸	1c2		FJ配置留意								層内せん断(逆対称式)				1e2		層内せん断(水平)					1d2	
2640	圧縮 中間柱・強軸	1c3		FJ配置留意								層内せん断(逆対称式)				1e3		層内せん断(水平)					1d3	

図1-3 試験体の採材パターンの例 強度試験用5層5プライの場合

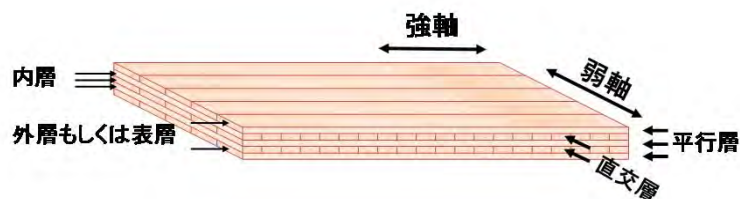


図1-4 CLTの関連用語

2. 面外曲げ

【目的】 CLTが床・屋根等を使用される場合、鉛直荷重に対する性能としてもっとも重要となる面外曲げ性能についての知見を収集することを目的とする。

【方法】 5層5プライ、7層7プライのCLTを用い、試験体幅を300または900mmとし、スパンは試験体厚さの18倍として、3等分点4点曲げ試験を行った。加力速度は荷重制御とし、破壊時間は 5 ± 2 分であった。

【結果及びまとめ】

- 強軸の曲げ強度は $16 \sim 20 \text{ N/mm}^2$ 、曲げヤング係数は $3.5 \sim 4.0 \text{ kN/mm}^2$ 、弱軸の曲げ強度は 10 N/mm^2 、曲げヤング係数は $1.0 \sim 1.5 \text{ kN/mm}^2$ であった。
- 比例限度荷重は破壊荷重の80～90%であった。
- 最弱部分の破壊ののちの応力再配分による荷重負担能と塑性変形能は低いものと考えられる。
- 測定された面外曲げ性能の変動係数は、大きくても10%程度の数値を示し、曲げ強度、曲げヤング係数とも全体的にばらつきは少なかった。
- 曲げ試験体の幅が大きいと測定される曲げ性能の平均値は若干低いが有意な差は見られなかった。
- 層構成が同じ場合、同一等級構成より異等級構成の方が高い異方性を示す。
- 7層7プライの場合、5層5プライと比較して異方性は緩和された。



写真2-1 900mm幅試験状況

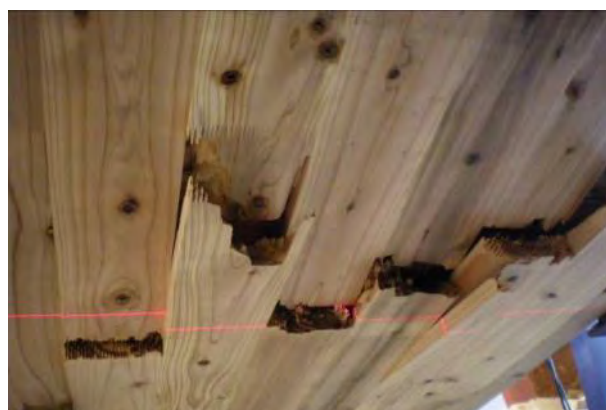


写真2-2 900mm幅破壊状況

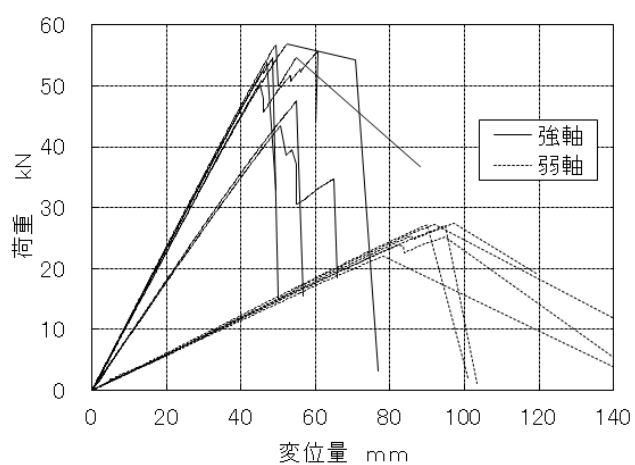


図2-1 300mm幅異等級構成
強軸と弱軸の荷重と変形の関係

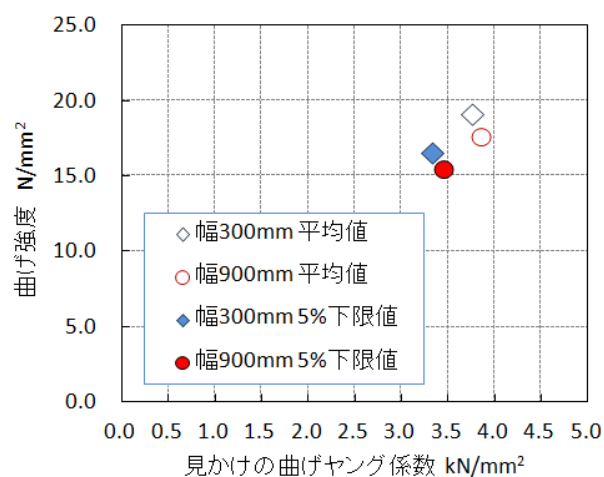


図2-2 同一等級構成強軸の
幅300mmと900mmの相違

表2-1 曲げ性能試験結果（試験体幅300mm）

ラミナ構成	強軸 MOE (kN/mm ²)	強軸 MOR (N/mm ²)	弱軸 MOE (kN/mm ²)	弱軸 MOR (N/mm ²)
同一 5層5プライ	3.8	19.1	1.2	9.7
異等級 5層5プライ	4.4	20.7	1.2	10.3
同一 7層7プライ	3.5	16.7	1.6	10.3

3. 面内曲げ（強軸・弱軸）

【目的】スギCLTの“ラミナの積層接着面に平行な荷重に対する性能（面内曲げ性能）”を明らかにする。

【方法】5層5プライ（幅（積層方向）150×厚さ（ラミナの幅方向）300mm×長さ6000mm）、7層7プライ（幅210×厚さ300×長さ6000mm）について、強軸、弱軸方向の3等分点4点荷重式面内曲げ試験（スパン5400mm）を行った（写真3-1）。

【結果】

- 面内曲げ強度特性の弱軸に対する強軸の比は、5層5プライの場合、同一等級、異等級構成に関わらず約1.5倍、7層7プライの場合約1.2倍であった（図3-1、表3-1）。このことから、CLTの面内曲げ強度特性は、繊維方向が荷重に直交するラミナの強度特性に依拠していると推察された。
- 破壊時の変位は等級構成、プライ数に関わらず80～140mmであった（図3-1）。
- 破壊形態は圧縮側まで破断するような破壊であり、強軸の試験体ではラミナのFJ部を含む破壊が主であった。

【まとめ】面内曲げ強度の特性には繊維方向が荷重に直交するラミナの強度特性が寄与していること、ラミナの強度特性からCLTの強度特性が推定可能であることが明らかになった。

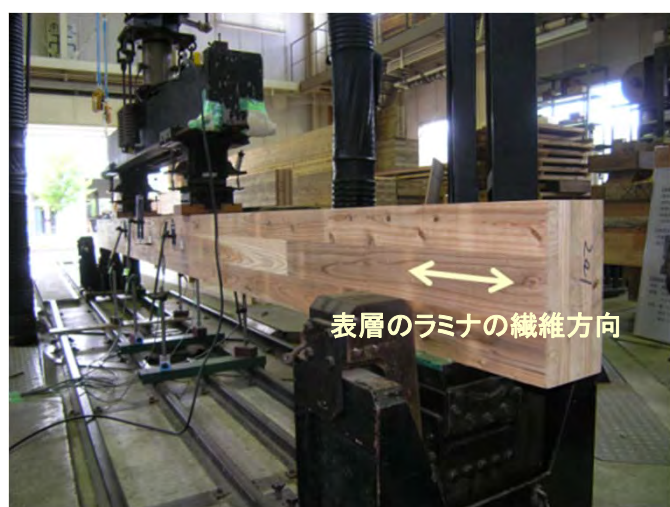


写真3－1 面内曲げ試験(左:強軸方向、右:弱軸方向)

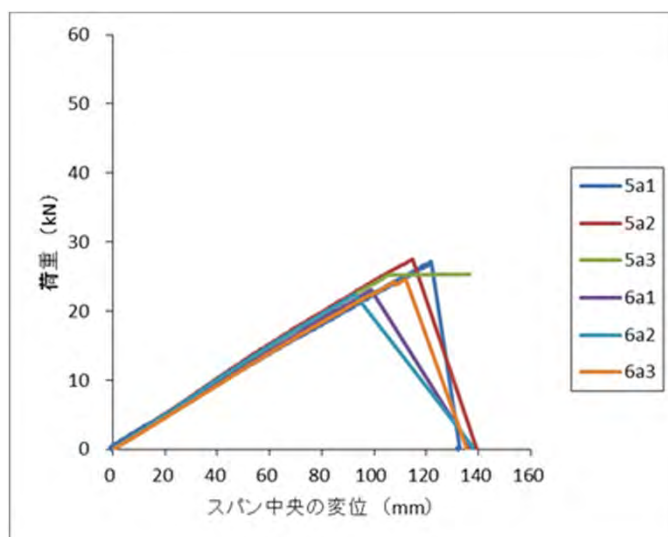
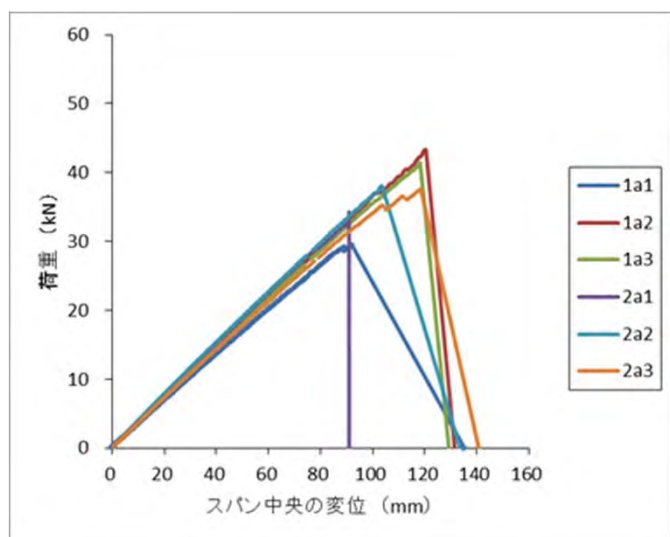


図3－1 同一等級CLTの面内曲げ試験結果(左:強軸、右:弱軸)

表3－1 面内曲げ試験結果(平均値)

ラミナ構成		強軸		弱軸	
		MOE (GPa)	MOR (MPa)	MOE (GPa)	MOR (MPa)
同一等級	5層5プライ	2.96	14.8	1.98	9.89
異等級	5層5プライ	3.62	17.2	2.15	11.1
同一等級	7層7プライ	3.09	13.9	2.34	11.6

4. 面外(層内)せん断(強軸)

【目的】 スギCLTの面外(層内)せん断性能を、大野式逆対称載荷ならびに短スパンの中央集中(水平せん断)載荷方式による試験を行って評価した。

【方法】 5層5プライ試験体における載荷方法を図4-1に示す。大野式における加圧板幅は150mmとし、加圧板端間のせん断スパン比(M/Qd)は、5層5プライで1.50、7層7プライで1.55とした。また水平せん断式における加圧板端間のせん断スパン比は、5層5プライで1.33、7層7プライで1.55とした。

【結果】

- 大野式では、直交層がせん断破壊した時点で最大荷重に達することからせん断強度の評価に適することがわかった。(図4-2～4-3、写真4-1参照)
- 水平せん断式では、まずせん断破壊が生じるが、最終的には曲げ破壊時に最大荷重に達することから、せん断強度を過大に評価することがわかった。(図4-4、写真4-2参照)
- せん断スパン比が同じ7層7プライ試験体では、大野式と比べて、水平せん断式の方が平均約13%、せん断強さが高くなった。(表4-1、表4-2参照)

【まとめ】

- スギCLTの面外せん断性能は、せん断スパン比1.5程度の大野式載荷で適切に評価することができた。

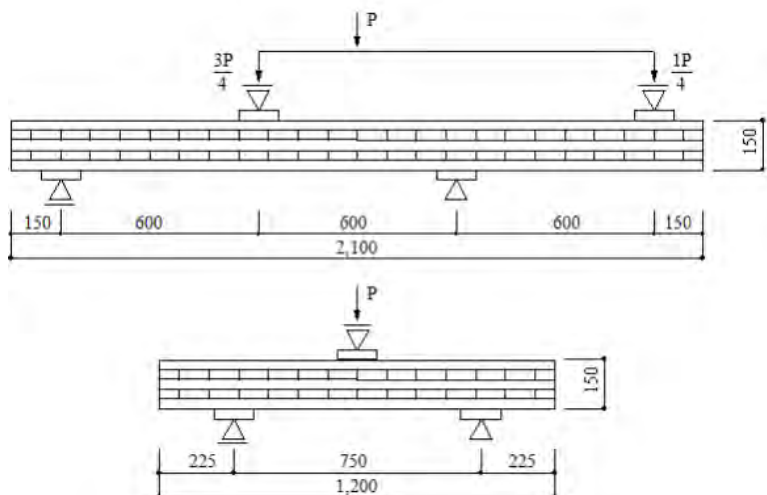


図4-1 5層5プライ試験体における大野式載荷(上)
および水平せん断式載荷(下)

表4-1 大野式載荷試験結果

ラミナ構成	強度区分	繊維方向	試験体数	幅 (mm)	厚さ (mm)	せん断スパン比	せん断強さ (N/mm ²)
5層5プライ	同一等級	強軸方向	6	300	150	1.50	1.88 (1.72-2.01)
5層5プライ	異等級		6	300	150	1.50	1.95 (1.80-2.06)
7層7プライ	同一等級	弱軸方向	2	300	210	1.55	1.83 (1.82-1.83)

表4-2 水平せん断式載荷試験結果

ラミナ構成	強度区分	繊維方向	試験体数	幅 (mm)	厚さ (mm)	せん断スパン比	せん断強さ (N/mm ²)
5層5プライ	同一等級	強軸方向	6	300	150	1.33	2.11 (1.97-2.35)
5層5プライ	異等級		6	300	150	1.33	2.33 (2.02-2.65)
7層7プライ	同一等級	弱軸方向	3	300	210	1.55	2.07 (2.02-2.14)



写真4-1 大野式破壊性状(7層7プライ)



写真4-2 水平せん断式破壊性状(7層7プライ)

せん断力(kN)

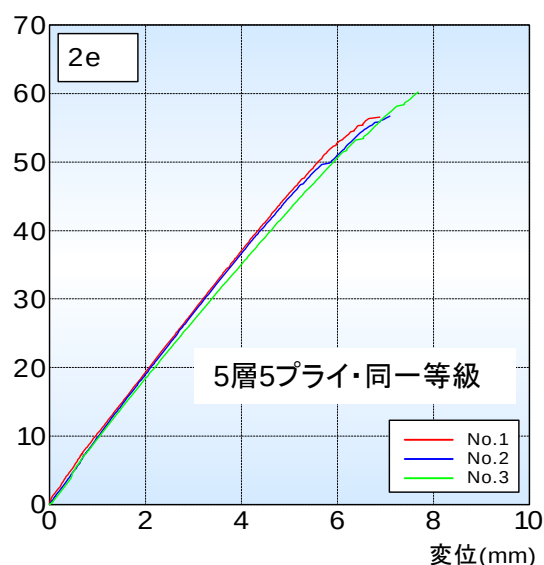


図4-2 大野式 荷重－変形曲線

せん断力(kN)

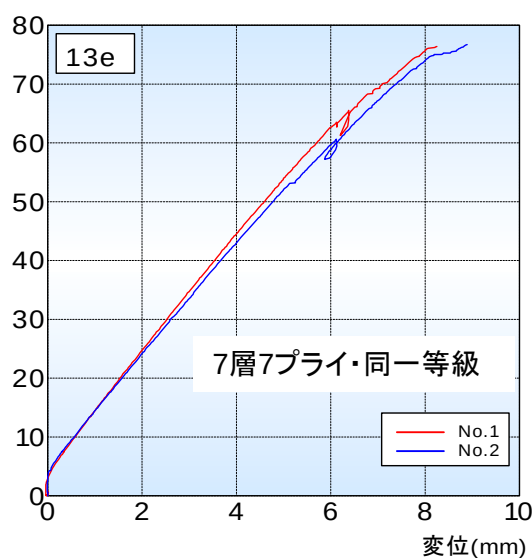


図4-3 大野式 荷重－変形曲線

せん断力(kN)

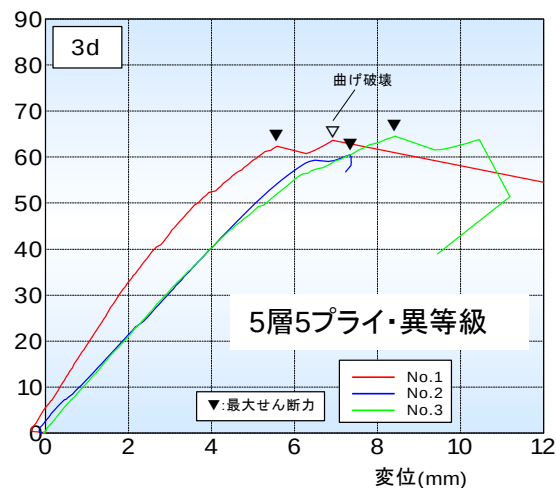


図4-4 水平せん断式 荷重－変形曲線

5. 縦圧縮

【目的】 断面構成の異なるCLTについて、短柱の縦圧縮試験（細長比 $\lambda = 20$ ）を行い、強度性能を明らかにする。

【方法】 容量3000kNの圧縮試験機を用いて、上端ピン、下端固定にて載荷した。標点距離300mm間の変形量を測定した（写真5-1）。

【結果およびまとめ】

- ヤング係数（ E_c ）は、5層5プライの強軸で3.7～4.2kN/mm²、弱軸で2.0～3.1kN/mm²、また、7層7プライの強軸で3.4～3.7kN/mm²、弱軸で2.3～2.5kN/mm²であった。
- 縦振動法によるヤング係数（ E_{fr} ）と実験時に求めたヤング係数（ E_c ）とを比較すると2～13%の差であった。
- 圧縮強さは、5層5プライの強軸で18.8～21.0 N/mm²、弱軸で13.1～15.4N/mm²、7層7プライの強軸で18.7～18.9N/mm²、弱軸で13.4～14.3N/mm²であった。
- 破壊は節やフィンガージョイントの近傍から生じた。
- 強軸と弱軸の圧縮強さを比較すると、弱軸が強軸のほぼ7割であり、試験体の断面積に占める載荷方向と繊維が平行であるラミナの割合に比例した。

表5－1 試験体の寸法および試験体数

ラミナ構成	試験体寸法 (mm)	試験体数
5層5プライ	150 × 300 × 865	同一・異等級(強軸・弱軸) 各6
7層7プライ	210 × 300 × 1210	同一(強軸・弱軸) 各3

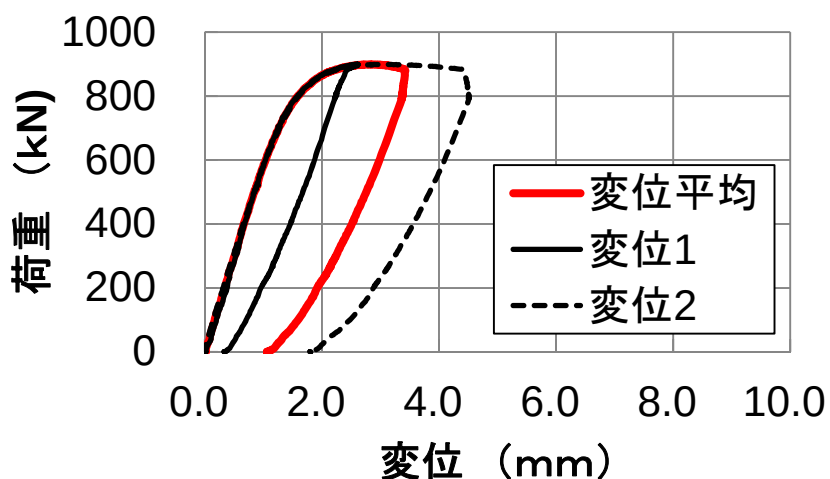


写真5－1 試験の様子

図5－1 荷重－変位曲線の例

表5－2 縦圧縮試験結果

ラミナ構成	強軸 E_c (kN/mm ²)	弱軸 E_c (kN/mm ²)	強軸 σ_c (N/mm ²)	弱軸 σ_c (N/mm ²)
同一 5層 5プライ	3.82	2.61	19.4	14.1
異等級 5層 5プライ	3.86	2.83	20.2	14.2
同一 7層 7プライ	3.52	2.37	18.7	13.8

6. めり込み

【目的】 CLTの作製条件と加圧条件を変化させてめり込み試験を行い、めり込み強度性能を明らかにする。

【方法】 積層数、ラミナ構成、外層ラミナの方向、荷重方向に対する試験体の配置、の4つのパラメータを組み合わせ、ISO 13910に準じてめり込み試験を行った（図6－1参照）。

【結果】

- めり込み強度は、積層数およびラミナ構成にかかわらず、「弱軸・縦使い」の試験体の強度性能が最も大きく、次いで、「強軸・縦使い」、「強軸・平使い」、「弱軸・平使い」の順であった（表6－1参照）。
- めり込み強度性能には、試験体の配置と外層ラミナの影響が大きく、積層数とラミナ構成の影響は小さいことがわかった（表6－1参照）。

【まとめ】 めり込み強度性能を決定づけるパラメータは、ラミナの方角と試験体の配置であり、積層数やラミナ構成はめり込み強度性能にはあまり寄与しないことがわかった。

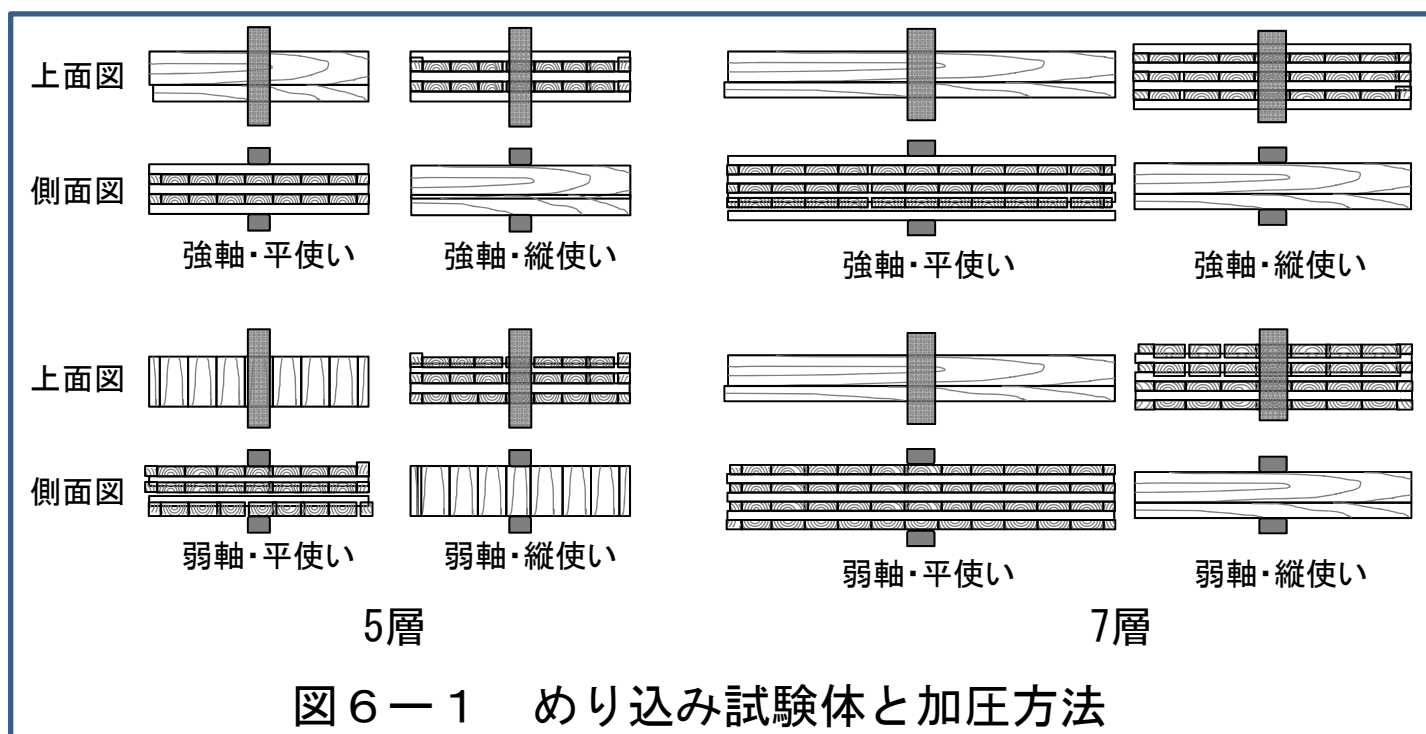


表6－1 めり込み試験結果(平均値)

積層数	ラミナ構成	外層ラミナ の方向	試験体の 配置	めり込み強度 (N/mm ²)
5	同一等級	強軸	平使い	9.12
5	同一等級	強軸	縦使い	17.6
5	同一等級	弱軸	平使い	6.94
5	同一等級	弱軸	縦使い	20.0
5	異等級	強軸	平使い	8.68
5	異等級	強軸	縦使い	17.1
5	異等級	弱軸	平使い	6.91
5	異等級	弱軸	縦使い	21.0
7	同一等級	強軸	平使い	8.83
7	同一等級	強軸	縦使い	18.5
7	同一等級	弱軸	平使い	7.13
7	同一等級	弱軸	縦使い	20.4

7. 長期性能(面外曲げ)

【目的】 長期的かつ継続的に作用する荷重に対するCLTの力学的な性状についての知見を収集することを目的とする。

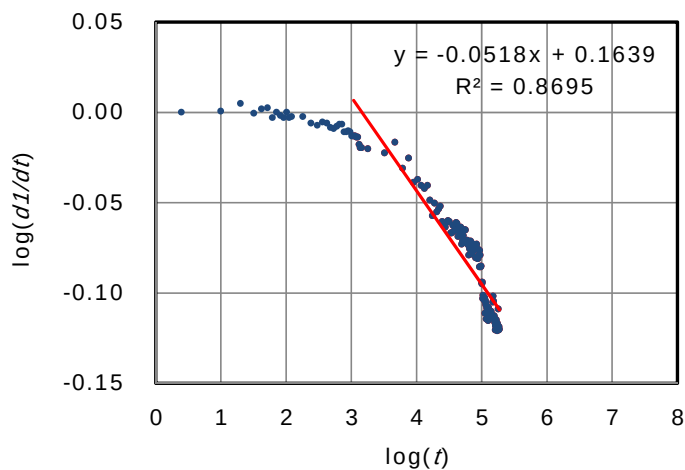
【方法】 スパン2700mmにて、スパンの3等分点に所定の荷重を載荷し、クリープ破壊試験（DOL試験）とクリープ試験を行った。なお、試験体は、寸法150mm（厚）×300mm（幅）×3000mm（長）、スギ（L60）を挽き板とする5層構成のCLTとした。

【結果】

- 平成12年国土交通省告示1446号の試験評価法により算出した変形増大係数は1.61であった（図7-1参照）。
- Power則を用いて算出した変形増大係数は2.23であった（図7-2参照）。
- 荷重比80%で載荷した6体の試験体のうち5体と荷重比75%で載荷した試験体3体のうち3体は、マディソンカーブで想定している破壊に至る時間以内に破壊することはなかった（図7-3参照）。

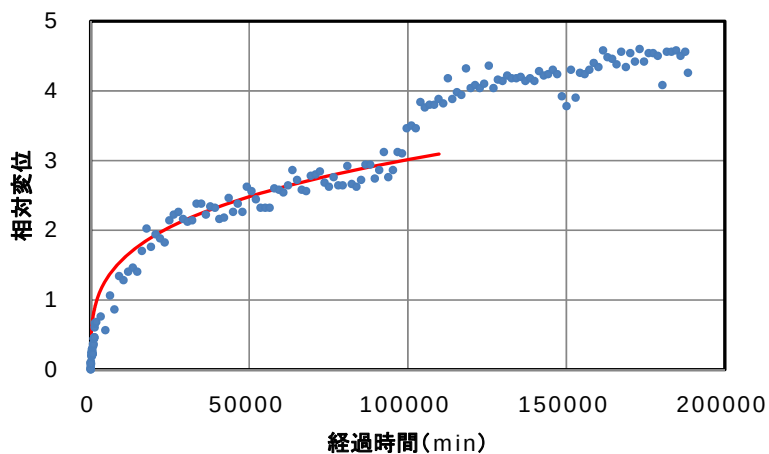
【まとめ】

- CLTのクリープ変形は木材に比べて幾分大きくなる可能性がある。
- CLTのクリープ破壊については、木材と同等の扱いをしても差し支えない。



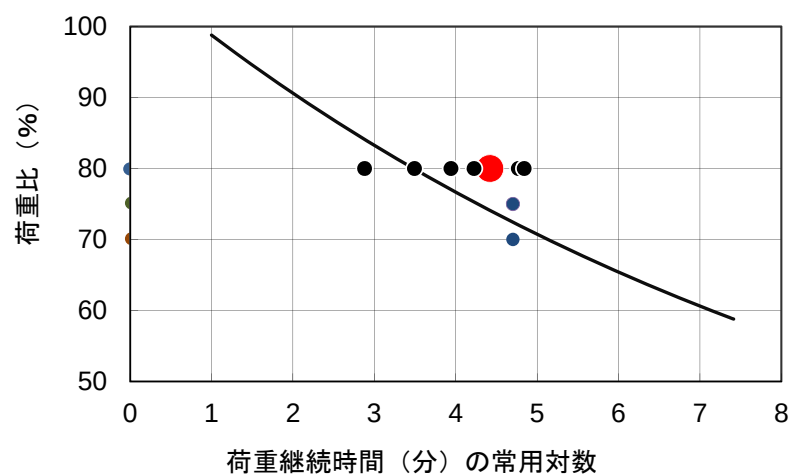
載荷する荷重を求めるために
実施した曲げ試験の様子

図7－1 相対変位の逆数の対数と時間の対数との関係(例)



長期荷重載荷試験の様子

図7－2 相対変位と経過時間との関係(例)



クリープ破壊の様子

図7－3 荷重比と荷重継続時間の常用対数との関係

8. 床構面のせん断性能

【目的】

CLTパネルを梁桁材にビス留めした実大床構面の水平せん断性能を実験的に検証し、存在床倍率評価を行うことを目的とする。

【試験体と試験方法】

カラマツ集成材で構成した床組（桁行7.28m、張間3.64m）に、厚さ135mmのCLTパネル（長さ3.64m、幅1.82m）を4枚並べ、2種類の仕様でビス留めした。

仕様①はパネル間接合部に斜めビスを用いたタイプ（写真1）、仕様②はパネル間接合部に合板スプライン材を用いたタイプ（写真2）である。

この試験体に対し、図1及び写真3に示す方法で水平力を加え、試験体に加えられ荷重と各部の変形量を測定した。

【試験結果】

仕様①②共に、高耐力を発揮しながらも変形性能に優れた性状を示した。床倍率の評価を行った結果、両仕様共に13倍以上の値を示し、一般的な施工方法による床倍率（床倍率3程度以下）の値を大きく上回る結果となった。

【まとめ】

CLTパネルをビス留めした床構面は、非常に高いせん断性能を示し、床倍率も極めて高い値を示した。

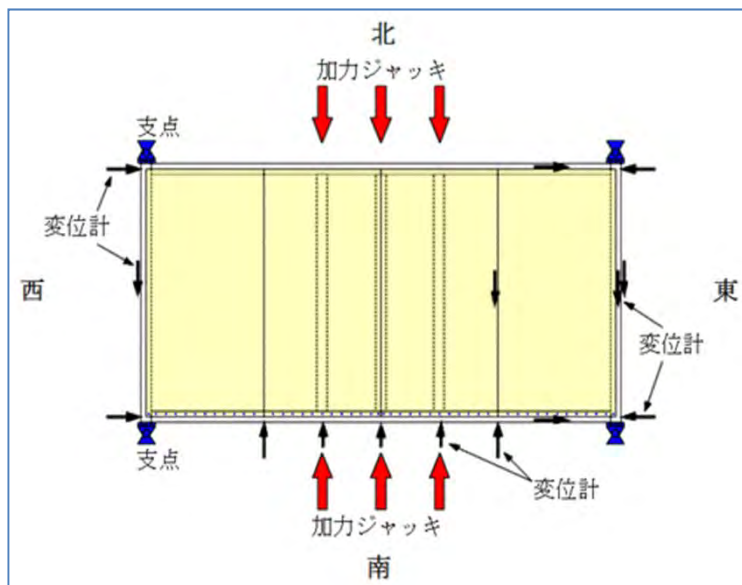


図1 加力方法概略



写真1 仕様①で使したビス(上)
と外周部施工状況(下)



写真3 水平せん断試験の様子



写真2 仕様②で使したビス(上)
とパネル間接合部施工状況(下)

表1 試験荷重と床倍率の算定結果

	試験荷重(kN)				基準せん断 耐力(kN/m)	床倍率
	P_y	$0.2P_u/D_s$	$2/3P_{max}$	$P(1/150)$		
仕様①	190.4	93.6	226.9	123.7	25.7	13.1
仕様②	115.9	97.0	142.2	117.0	26.7	13.6

おわりに

スギを用いてラミナ構成の異なる3種類のCLTを製造し、面外曲げ、面内曲げ、面外（層内）せん断、縦圧縮、めり込み、面外曲げの長期荷重に対する性能を実験的に明らかにした。これらの成果は、実大規模の試験体を用いてCLTの諸強度性能を網羅的に検証した非常に貴重なものであり、CLTの日本農林規格策定やCLTを用いた建物の構造設計を検討する上で活用されることが考えられる。関係者のご尽力に謝意を表する。

執筆者

1. 試験の概要
2. 面外曲げ
3. 面内曲げ
4. 面外（層内）せん断
5. 圧縮・短柱
6. めり込み
7. 長期性能・面外曲げ
8. 床構面のせん断性能

宮武敦
渋谷龍也・藤田和彦
平松靖
新藤健太
杉本健一
井道裕史
中島史郎・藤田和彦
青木謙治

平成25年3月

