

令和元年度 林野庁補助事業 木材産業・木造建築活性化対策
中高層建築物を中心とした CLT 等新たな木質建築部材利用促進・定着事業のうち
CLT・木質耐火部材等の製品・技術の開発

柱梁鉄骨造・床 CLT 構造の建築に用いる ローコスト型 CLT 板の開発

研究成果報告書

令和2年3月

山佐木材株式会社

目 次

	頁
1. 背景および目的	1
2. 事業計画	1
3. 事業の実施項目および実施方法	2
3.1 実施項目	
3.2 実施方法	
3.3 補助事業委員会の設置	
4. 試験結果	4
4.1 面外曲げ試験	4
4.1.1 面外曲げ試験の目的	
4.1.2 試験対象とする CLT のラミナ構成	
4.1.3 面外曲げの基準強度の計算式	
4.1.4 面外曲げ試験結果	
(1) A 試験体 (ラミナ構成: 3 層 4 プライ 150mm 厚 (45・30・30・45))	
(2) B 試験体 (ラミナ構成: 3 層 4 プライ 180mm 厚 (45・45・45・45))	
(3) C 試験体 (ラミナ構成: 3 層 4 プライ 180mm 厚 (45・45・45・45) 角欠けラミナ使用)	
4.2 面外せん断試験	20
4.2.1 面外せん断試験の目的	
4.2.2 試験対象とする CLT のラミナ構成	
4.2.3 面外せん断の基準強度の計算式	
4.2.4 面外せん断試験結果	
(1) A 試験体 (3 層 4 プライ 150mm 厚 (45・30・30・45))	
(2) B, C 試験体 (ラミナ構成: 3 層 4 プライ 180mm 厚 (45・45・45・45))	
4.3 面内せん断性能	25
4.3.1 面内せん断試験試験体一覧	
4.3.2 面内せん断試験載荷方法	
4.3.3 面内せん断基準強度の計算式	
4.3.4 面内せん断試験結果	
4.4 荷重継続時間の調整係数	31
4.4.1 DOL 試験装置	
4.4.2 DOL 試験結果	

4.5 クリープの調整係数	36
---------------	----

5. 結果の検証および考察	37
---------------	----

- (1) 45mm ラミナの性能の確認
- (2) 面外曲げ試験結果
- (3) 面外せん断試験結果
- (4) 面内せん断試験結果
- (5) 荷重継続時間の調整係数
- (6) クリープの調整係数

6. まとめ	41
--------	----

別添資料1： 「ローコスト型CLT板の開発研究」	42
--------------------------	----

—面内せん断実験 実験結果報告書—

福岡大学工学部建築学科助教 倉富 洋

別添資料2： 「新たな断面構成CLTの長期曲げ性能の評価」	117
-------------------------------	-----

地方独立行政法人北海道立総合研究機構 森林研究本部 林産試験場

1. 背景および目的

戦後植林された大量の人工林が活用期を迎える一方、思ったように木材利用が進んでいないという現実がある。我々は、この問題の克服のためには、新しい木材需要の開拓の為、ビル型の多層中大規模建築（超高層オフィスビル等）への木材の積極活用を提案してきた。しかし現実として、我が国は世界的に見ても有数の地震国であり、大型建物の木造化を図ることは、決して容易な事ではない。そのために現実的な対応策として、柱梁は従来通り鉄骨構造とし、床のみ CLT 構造とする、混構造建築の開発を行ってきた。

最近になって CLT を用いた建築の建設は徐々に進みつつあるが、そのような建築の建設コストは、RC 造等の従来工法に比べ、まだかなり高額であるという指摘もある。我々はそのような状況を打破するために、昨年は建設コストの内でも建築工事段階に着目し、①CLT 床と鉄骨梁の取り付け方法のローコスト化、および②CLT 床の耐火被覆材の取り付け手間の削減の 2 つの新工法の開発を行った。しかし、さらに CLT 建築コスト削減のためには、CLT 板そのものの製造単価の削減が是非とも必要と考える。

以上の趣旨から、今年度は柱梁鉄骨造・床 CLT 構造建築に用いるローコスト型の床専用 CLT 板の開発を試みる。本事業の成果により、CLT の鉄骨造建築への部分的利用が促進され、我が国の木材需要のさらなる拡大に繋がれば幸いである。

2. 事業計画

今年度の補助事業のテーマは、柱梁鉄骨造・床 CLT 構造の建築に特化した、床専用のローコスト CLT 板の開発である。

従来の CLT マザーボード製造段階における問題点としては、以下の 3 点が上げられる。

①多様な層構成の要求に応えていない

・一方向板床スラブの場合、強軸方向の性能を重視して、例えば中央層のみ直交層とした 3 層 5 プライなどの製品への要求が存在するが、従来は応えられていない。床の使い方に応じた多様な層構成の製品への要求に応えることが必要である

②異なる層厚のラミナの採用

・接着層を少なくするために、例えば外層ラミナは 45mm、内層ラミナは 30mm（3 層 4 プライ、内層 2 層は直交層）といった異なる厚さのラミナ構成の CLT の開発

③内層ラミナのローコスト化

床は力学的に観ると、外層ラミナの負担は重く、内層ラミナの負担は小さい。従って、内層ラミナのローコスト化を図ることは、合理性がある。例えば、

- ・ CLT を構成するラミナ製造段階における歩留まりの改善
- ・ かんな掛け等の簡略化による CLT 製造コストの削減
- ・ 接着層を少なくすることによる製造コストの削減

等が、考えられよう。以上の検討を進めることにより、CLT 製造段階におけるコスト削減を図ることが、本事業の主な目的である。

3. 事業の実施項目および実施方法

3.1 実施項目

実施予定の CLT 板の層構成は以下とする。

CLT 番号	1	2	3
層構成	3 層 4 プライ	3 層 4 プライ	3 層 5 プライ
CLT 厚	150	180	180
ラミナ構成	45/30/30/45	45/45/45/45	36/36/36/36/36

また、今回開発する CLT 板の妥当性を立証するための具体的な検討項目としては以下とする。

- ・面外曲げ性能
- ・面外せん断性能
- ・面内せん断性能
- ・荷重継続時間の調整係数
- ・クリープの調整係数

この事業を進める上での基本方針は以下である。

- ・ 37 条指定材料認定の事前準備作業と位置付ける
- ・ 想定した層構成・詳細仕様の妥当性を確認する
- ・ 将来に向けて実験環境を整備する

3.2 実施方法

- ・ 試験体の作成を始めとする実作業は、山佐木材内部で行うが、試験装置等の問題から、社内で行うことが非効率と思われる事項については一部業務を外部機関に委託する。
- ・ 面外曲げ試験、および面外せん断試験については、鹿児島県工業技術センターに委託して実施する。
- ・ 面内せん断試験については、福岡大学工学部建築学科に委託して実施する。
- ・ 荷重継続時間の調整係数、クリープの調整係数については、実施できる外部機関が少なく、試験機の確保が困難なことから、山佐木材社内に一時的に同程度の試験が可能な環境を整えるものとする。但し、山佐木材社内だけでは、各試験に関するノウハウも少なく、試験機の数も足りないことから、北海道林産試験場に一部の業務を委託する。

3.3 補助事業委員会の設置

事業を進めるに当たり、学識経験者および専門家の助言・評価をお願いする主旨から、補助事業委員会を設置する。委員会の構成は以下とする。

分類	委員名	所属	専門
事業者	佐々木幸久	山佐木材（株）	木質材料
	稲田達夫	同上	建築構造
	塩崎征男	同上	木質構造
	新永智士	同上	事務局
	佐々木真理	同上	事務局
学識経験者	五十田博	京都大学生存圏研究所教授	木質構造
	槌本敬大	建築研究所材料研究グループ	木質材料
	倉富洋	福岡大学工学部建築学科助教	構造実験
	中原亨	鹿児島県工業技術センター研究員	力学実験
民間団体	海老澤渉	三菱地所（株）CLTユニット	設計監理
	山崎心	松尾建設（株）（（株）インフォメディア）	設計施工

4. 試験結果

4.1 面外曲げ試験

4.1.1 面外曲げ試験の目的

45mm ラミナを主な構成要素とする本 CLT の曲げ基準強度の妥当性を確認するのが、本試験の目的である。具体的には、CLT 関連告示等解説書（以下「解説書」）の第 5 章に定められた試験方法に基づいて曲げ試験を行い CLT の基準強度を求め、その値が解説書の第 4 章に定められた計算式より求まる基準強度を上回ることを確認する。

4.1.2 試験対象とする CLT のラミナ構成

試験を実施する、CLT のラミナ構成は以下である・

(1) A 試験体

ラミナの層構成： 3 層 4 プライ 150mm 厚 (45・30・30・45)

樹種：スギ

外層ラミナのヤング係数： 6000N/mm²

内層ラミナのヤング係数： 3000N/mm²

(2) B 試験体

ラミナの層構成： 3 層 4 プライ 180mm 厚 (45・45・45・45)

樹種：スギ

外層ラミナのヤング係数： 6000N/mm²

内層ラミナのヤング係数： 3000N/mm²

(3) C 試験体

ラミナの層構成： 3 層 4 プライ 180mm 厚 (45・45・45・45)

樹種：スギ

外層ラミナのヤング係数： 6000N/mm²

内層ラミナのヤング係数： 3000N/mm²

ラミナの形状： 角欠け

4.1.3 面外曲げの基準強度の計算式

- ・解説書に定められた面外曲げの基準強度の計算式は以下である。

$$Fb0 = \sigma_{b_oml} \times (IA/I0) \times 0.65$$

$$Fb1 = \sigma_{b_oml95} \times (IA/I0) \times 0.65$$

$$Fb = \sigma_{b_oml} \times (IA/I0) \times 0.65 \times 0.75$$

$$IA = \sum (Ei \times Ii + Ei \times Ai \times zi^2) / E0$$

ここに、

Fb0： 面外曲げの基準強度(N/mm²) (σ_{b_oml} より求まる値)

Fb1： 面外曲げの基準強度(N/mm²) (σ_{b_oml95} より求まる値、変動係数に応じた 5%下限値)

Fb： 面外曲げの基準強度(N/mm²) (告示式より求まる値、5%下限値への調整係数 0.75 考慮)

σ_{b_oml} ： 外層ラミナの曲げ強度 (N/mm²) (平均値)

σ_{b_oml95} ： 外層ラミナの曲げ強度 (N/mm²) (変動係数に応じた 5%下限値)

I0： 直交集成板の断面 2 次モーメント (mm⁴)

Ei： i 番目の層に使用するラミナの曲げヤング係数(N/mm²)

Ii： i 番目の層の断面 2 次モーメント(mm⁴)

Ai： i 番目の層の断面積 (mm²)

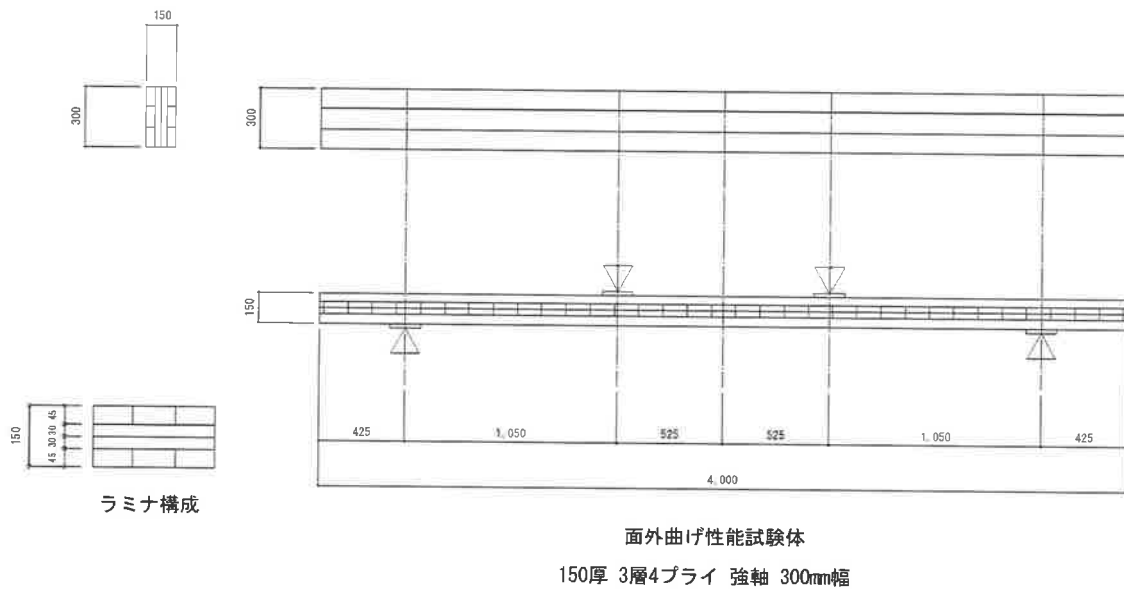
zi： 直交集成板の中立軸と i 番目の層のラミナの重心の距離(mm)

E0： 外層に使用するラミナの曲げヤング係数(N/mm²)

4.1.4 面外曲げ試験結果

(1) A 試験体 (ラミナ構成：3層4プライ 150mm 厚 (45・30・30・45))

a) 試験体図



b) 第1回面外曲げ試験

①目的

- ・主として、DOL 試験機の動作確認等を行うことを目的として、3層4プライ 150mm 厚 (45・30・30・45) 試験体を6体、先行して面外曲げ試験を実施した。
- ・45mm ラミナを主構成材とする CLT の性能の妥当性を確認することも目的の一つである。
- ・DOL 試験機の動作確認を主目的とした予備試験的位置づけの試験であることから、ラミナの性能確認試験は行っていない。従って、45mm ラミナの曲げ強度 σ_{b_oml} は告示解説、p70、表 1 より 27.0N/mm² として、面外曲げの計算基準強度を求めている。

②計算より求まる CLT の面外曲げ強度

●曲げ面外強度 (強軸) の場合

Mx60-3-4 [外層 :M60A、内層 :M30A]

部材幅(B) :300mm、部材厚さ(H) :150mm

各層厚さ(h) :外層45mm、内層30mm

外層用ラミナ等級 :M60A 等級区分機による等級)、E1,E4=6000N/mm²

内層用ラミナ等級 :M30A 等級区分機による等級)、E2,E3=0N/mm²

$\sigma_{b,0ml}=27.0\text{N/mm}^2$ 告示解説、p70、表1による)

層	ラミナ等級	応力負担	Ei (N/mm ²)	B (mm)	hi (mm)	Ai (mm ²)	Zi (mm)	①Ei · Ii (×10 ⁹ Nmm ²)	②Ei · Ai · Zi ² (×10 ⁹ Nmm ³)	Σ①+② (×10 ¹² Nmm ²)
1	M60A	あり	6000	300	45.0	13500	52.5	13.66875	223.25625	0.474
2	M30A	なし	0	300	30.0	9000	15	0	0	
3	M30A	なし	0	300	30.0	9000	15	0	0	
4	M60A	あり	6000	300	45.0	13500	52.5	13.66875	223.25625	

$$E_0=E_1,E_4=6000\text{N/mm}^2$$

$$I_A = \Sigma E_i \cdot A_i \cdot Z_i^2 / E_0 = 0.474 \times 10^{12} / 6000 = 79000000 (\text{mm}^4)$$

$$I_0 = B \times H^3 / 12 = 300 \times 150^3 / 12 = 84375000 (\text{mm}^4)$$

$$F_{b0} = \sigma_{b,0ml} \times I_A / I_0 \times 0.65 = 27.0 \times 79000000 / 84375000 \times 0.65 = 16.4 \text{N/mm}^2$$

$$F_b = \sigma_{b,0ml} \times I_A / I_0 \times 0.65 \times 0.75 = 27.0 \times 79000000 / 84375000 \times 0.65 \times 0.75 = 12.3 \text{N/mm}^2$$

$$E = 6000 \times 79000000 / 84375000 = 5617 \text{N/mm}^2$$

③面外曲げの実大実験より求まる CLT の最大応力

試験体番号	崩壊荷重 (kN)	標準偏差	試験体番号	降伏荷重 (kN)	最大たわみ (mm)	P (kN)	I (mm ⁴)	L (mm)	E (N/mm ²)	標準偏差
1	39.3	4.65	1	39.3	37.7	19.7	84375000	3150	6853	334.6
2	41.9	2.05	2	41.9	43.0	21.0	84375000	3150	6406	112.5
3	47.5	3.55	3	47.5	47.1	23.8	84375000	3150	6630	111.5
4	42.9	1.05	4	42.9	44.2	21.5	84375000	3150	6381	137.7
5	41.8	2.15	5	41.8	43.4	20.9	84375000	3150	6332	186.7
6	50.3	6.35	6	50.3	50.8	25.2	84375000	3150	6509	9.1
平均値	44.0	3.75						平均値	6519	178.4
95%下限値	35.2							下限値	6102	

$$P_{avr} = 44.0 / 2 = 20.5 \text{kN}$$

$$M_{avr} = 22.8 \times 3150 / 3 = 23100 \text{kNmm}$$

$$Z = 300 \times 150^2 / 6 = 1125000 \text{mm}^3$$

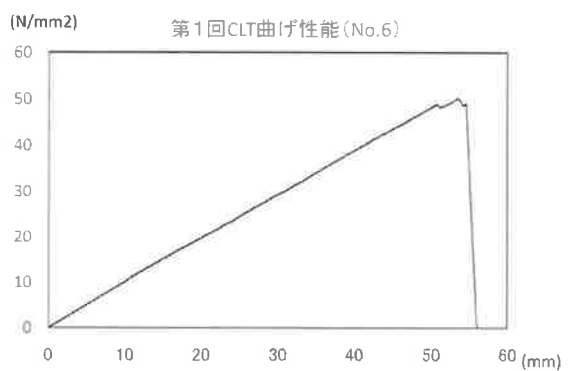
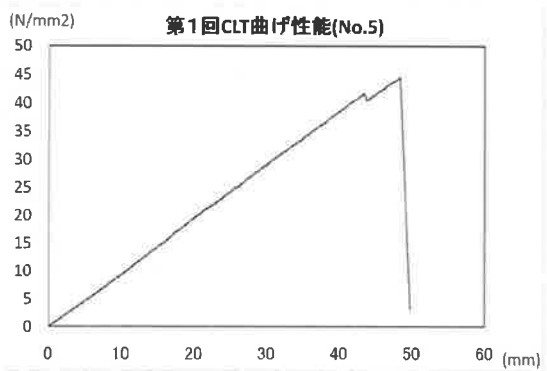
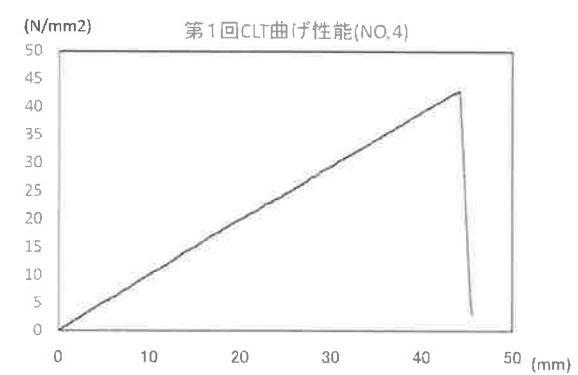
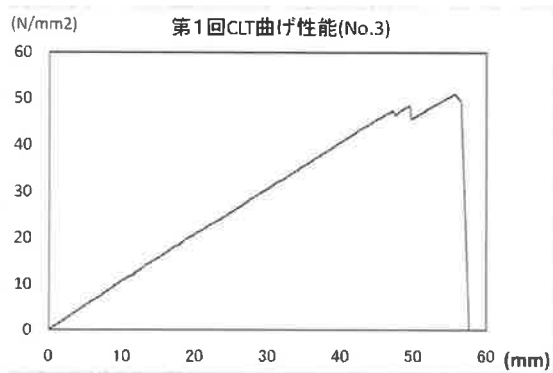
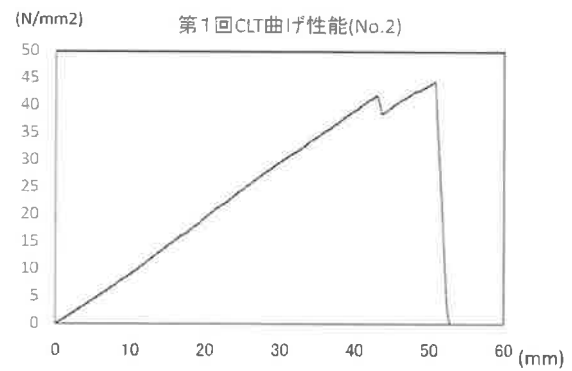
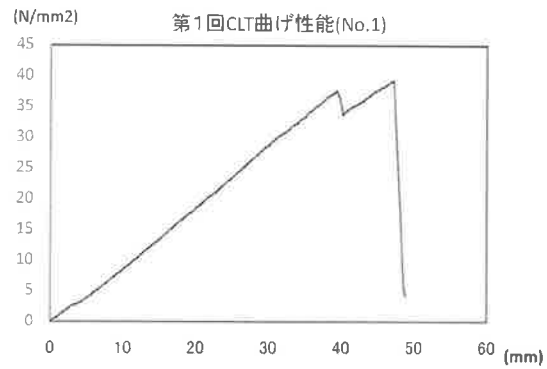
$$\sigma_{bavr} = 23100 \times 1000 / 1125000 = 20.5 \text{N/mm}^2$$

$$P_{95} = 35.2 / 2 = 16.4 \text{kN}$$

$$M_{avr} = 16.4 \times 3150 / 3 = 18472 \text{kNmm}$$

$$\sigma_{bavr} = 18472 \times 1000 / 1125000 = 16.4 \text{N/mm}^2$$

④第1回面外曲げ試験荷重変形関係



C) 第2回面外曲げ試験結果

①目的

- ・第1回試験（予備試験）の結果を踏まえ、A試験体（ラミナ構成：3層4プライ 150mm厚（45・30・30・45））の本試験として実施する。
- ・45mm ラミナの性能把握を目的として、今回使用した 45mm ラミナの曲げ強度、曲げヤング係数について、性能確認試験を実施している。

②45mm ラミナの曲げ特性

NO	樹種	サイズ(mm)			含水率 (%)	破壊荷重 (kN)	ヤング (N/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)	標準偏差	
		厚さ	幅	スパン					ヤング	曲げ強度
1	スギ	45	70	700.0	12	6.62	7.48	32.69	0.92	4.77
4	スギ	45	70	700.0	12	6.27	6.83	30.96	0.27	6.50
5	スギ	45	70	700.0	12	9.26	6.47	45.73	0.09	8.27
7	スギ	45	70	700.0	12	7.55	6.46	37.28	0.10	0.17
8	スギ	45	70	700.0	12	7.48	6.13	36.94	0.44	0.52
10	スギ	45	70	700.0	12	7.98	6.30	39.41	0.26	1.95
11	スギ	45	70	700.0	12	6.88	6.56	33.98	0.00	3.48
13	スギ	45	70	700.0	12	6.62	6.76	32.69	0.20	4.77
16	スギ	45	70	700.0	12	8.20	6.39	40.49	0.17	3.03
17	スギ	45	70	700.0	12	9.20	6.22	45.43	0.34	7.97
18	スギ	45	70	700.0	12	6.78	6.56	33.48	0.00	3.98
20	スギ	45	70	700.0	12	5.61	6.54	27.70	0.02	9.76
21	スギ	45	70	700.0	12	8.24	6.43	40.69	0.14	3.23
23	スギ	45	70	700.0	12	5.99	6.71	29.58	0.15	7.88
24	スギ	45	70	700.0	12	7.34	6.56	36.25	0.00	1.21
25	スギ	45	70	700.0	12	7.45	6.08	36.79	0.48	0.67
26	スギ	45	70	700.0	12	8.64	6.79	42.67	0.22	5.21
27	スギ	45	70	700.0	12	7.94	6.24	39.21	0.32	1.75
30	スギ	45	70	700.0	12	9.14	6.18	45.14	0.39	7.68
33	スギ	45	70	700.0	12	6.44	6.66	31.80	0.10	5.66
36	スギ	45	70	700.0	12	7.10	6.15	35.06	0.41	2.40
41	スギ	45	70	700.0	12	9.47	7.29	46.77	0.73	9.31
44	スギ	45	70	700.0	12	7.45	6.98	36.79	0.42	0.67
49	スギ	45	70	700.0	12	7.48	7.43	36.94	0.87	0.52
50	スギ	45	70	700.0	12	6.54	6.16	32.30	0.40	5.16
52	スギ	45	70	700.0	12	8.02	6.38	39.60	0.18	2.15
54	スギ	45	70	700.0	12	7.12	6.90	35.16	0.34	2.30
56	スギ	45	70	700.0	12	7.29	6.01	36.00	0.55	1.46
61	スギ	45	70	700.0	12	6.55	6.17	32.35	0.39	5.11
65	スギ	45	70	700.0	12	9.98	6.26	49.28	0.30	11.83
66	スギ	45	70	700.0	12	9.15	6.06	45.19	0.50	7.73
68	スギ	45	70	700.0	12	7.36	6.06	36.35	0.50	1.11
73	スギ	45	70	700.0	12	8.46	7.08	41.78	0.52	4.32
76	スギ	45	70	700.0	12	8.05	6.44	39.75	0.12	2.29
80	スギ	45	70	700.0	12	8.50	7.06	41.98	0.50	4.52
82	スギ	45	70	700.0	12	9.00	6.46	44.44	0.10	6.99
83	スギ	45	70	700.0	12	7.29	6.26	36.00	0.30	1.46
84	スギ	45	70	700.0	12	7.44	6.84	36.74	0.28	0.72
85	スギ	45	70	700.0	12	7.90	7.35	39.01	0.78	1.55
89	スギ	45	70	700.0	12	6.70	6.90	33.09	0.34	4.37
91	スギ	45	70	700.0	12	6.98	6.61	34.47	0.05	2.99
94	スギ	45	70	700.0	12	6.44	6.21	31.80	0.36	5.66
95	スギ	45	70	700.0	12	9.64	6.53	47.60	0.03	10.15
96	スギ	45	70	700.0	12	5.90	6.93	29.14	0.36	8.32
98	スギ	45	70	700.0	12	8.03	6.88	39.65	0.32	2.20
100	スギ	45	70	700.0	12	5.46	6.06	26.96	0.50	10.50
									0.39	5.43

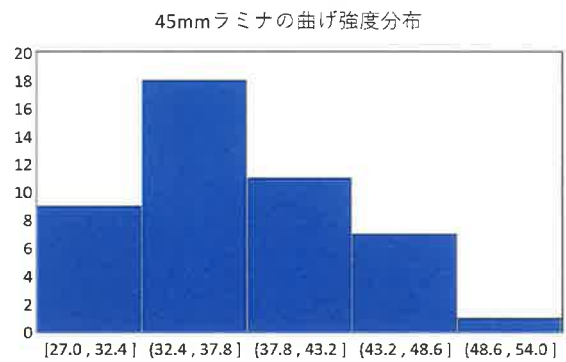
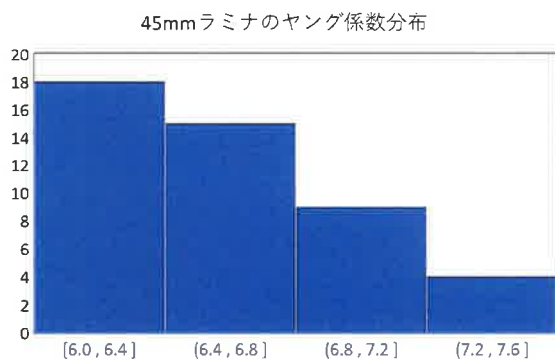
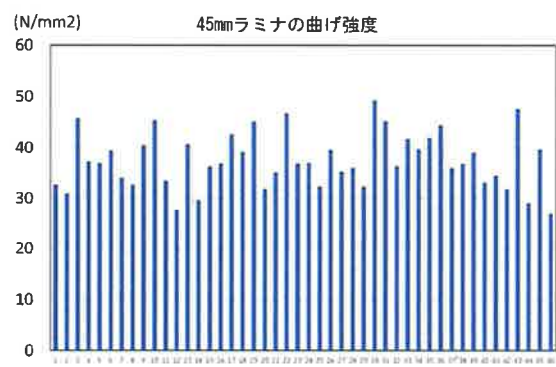
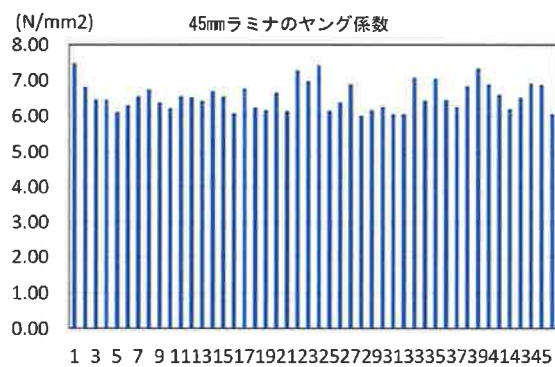
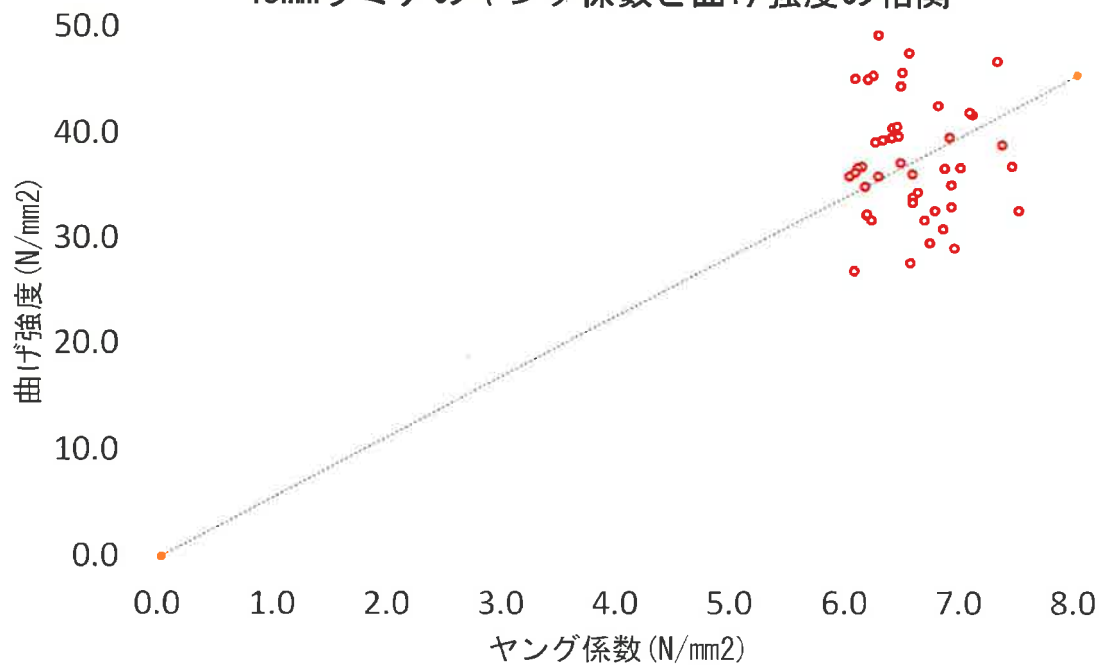
ヤング係数平均	6.56
ヤング係数下限	6.01
ヤング係数最大	7.48

曲げ強度平均	37.46
曲げ強度下限	26.96
曲げ強度最大	49.28

K	1.82
ヤング (TL)	5.85
曲げ強度(TL)	27.58

$\sigma_{b_o\text{ml}}=37.4\text{N/mm}^2$
 $\sigma_{b_o\text{ml}95}=27.5\text{N/mm}^2$
 $E_{bl}=6560\text{N/mm}^2$
 $E_{bl95}=5850\text{N/mm}^2$

45mmラミナのヤング係数と曲げ強度の相関



③計算より求まる CLT の面外曲げ強度

●曲げ面外強度（強軸）の場合

Mx60-3-4「(外層：M60A、内層：M30A)」

部材幅(B)：300mm、部材厚さ(H)：150mm

各層厚さ(h)：外層45mm、内層30mm

外層用ラミナ等級：M60A（等級区分機による等級）、E1,E4=6560N/mm²

内層用ラミナ等級：M30A（等級区分機による等級）、E2,E3=0N/mm²

$\sigma_{b_oml}=37.46\text{N/mm}^2$

層	ラミナ 等級	応力 負担	Ei (N/mm ²)	B (mm)	hi (mm)	Ai (mm ²)	Zi (mm)	①Ei・li (×10 ⁹ Nmm ²)	②Ei・Ai・Zi ² (×10 ⁹ Nmm ²)	Σ①+② (×10 ¹² Nmm ²)
1	M60A	あり	6560	300	45.0	13500	52.5	14.9445	244.0935	0.518
2	M30A	なし	0	300	30.0	9000	15	0	0	
3	M30A	なし	0	300	30.0	9000	15	0	0	
4	M60A	あり	6560	300	45.0	13500	52.5	14.9445	244.0935	

E0=E1,E4=6560N/mm²

$I_A = \Sigma Ei \cdot Ai \cdot Zi^2 / E0 = 0.518 \times 10^{12} / 6560 = 78963414(\text{mm}^4)$

$I0 = B \times H^3 / 12 = 300 \times 150^3 / 12 = 84375000(\text{mm}^4)$

$Fb0 = \sigma_{b_oml} \times I_A / I0 \times 0.65 = 37.4 \times 78963414 / 84375000 \times 0.65 = \mathbf{22.7N/mm^2}$

$Fb1 = \sigma_{b_oml} \times 95 \times I_A / I0 \times 0.65 = 27.5 \times 78963414 / 84375000 \times 0.65 \times 0.75 = \mathbf{16.7N/mm^2}$

$Fb = \sigma_{b_oml} \times I_A / I0 \times 0.65 \times 0.75 = 37.46 \times 78963414 / 84375000 \times 0.65 \times 0.75 = \mathbf{17.1N/mm^2}$

$E = 6560 \times 78963414 / 84375000 = \mathbf{6139N/mm^2}$

④面外曲げの実大実験より求まる CLT の最大応力

試験体 番号	崩壊荷重 (kN)	標準偏差	試験体 番号	崩壊荷重 (kN)	最大たわみ (mm)	P (kN)	I (mm ⁴)	L (mm)	E (N/mm ²)	標準偏差
1	60.8	4.83	1	60.8	59.9	30.4	84375000	3150	6673	23.5
2	58.2	7.43	2	58.2	57.4	29.1	84375000	3150	6666	16.3
3	66.3	0.67	3	66.3	64.4	33.2	84375000	3150	6768	118.7
4	73.7	8.07	4	73.7	75.2	36.9	84375000	3150	6443	206.4
5	67.7	2.07	5	67.7	66.1	33.9	84375000	3150	6733	83.8
6	67.1	1.47	6	67.1	66.7	33.6	84375000	3150	6614	35.9
平均値	65.6	5.01							6649	104.7
95%下限値	53.9								6405	

$P_{avr} = 65.6 / 2 = 32.8\text{kN}$

$M_{avr} = 32.8 \times 3150 / 3 = 34440\text{kNmm}$

$Z = 300 \times 150^2 / 6 = 1125000\text{mm}^3$

$\sigma_{bavr} = 34440 \times 1000 / 1125000 = \mathbf{30.6N/mm^2}$

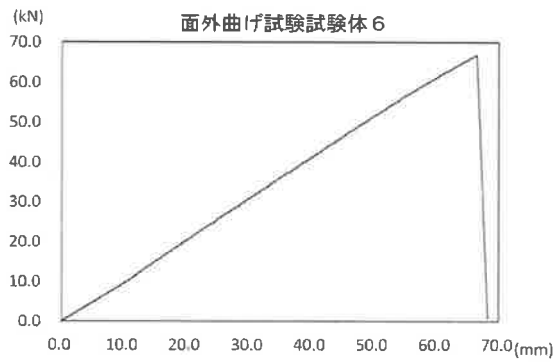
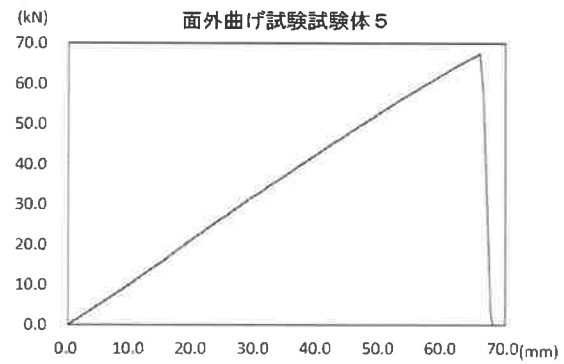
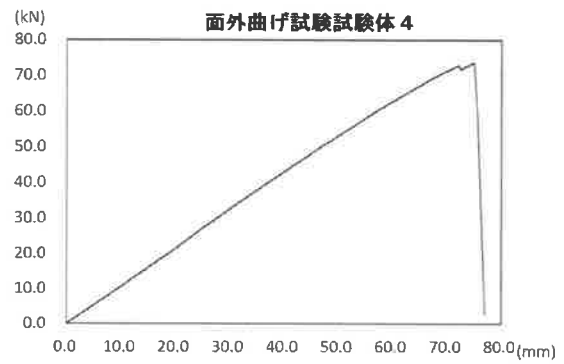
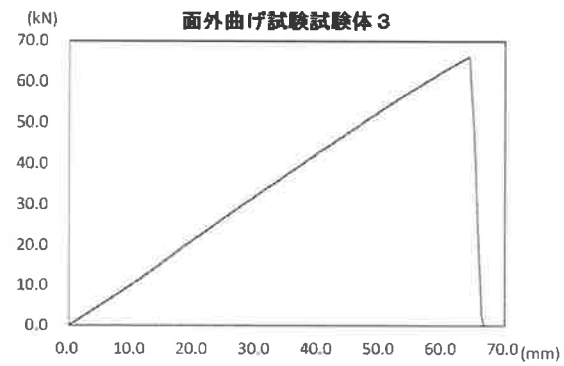
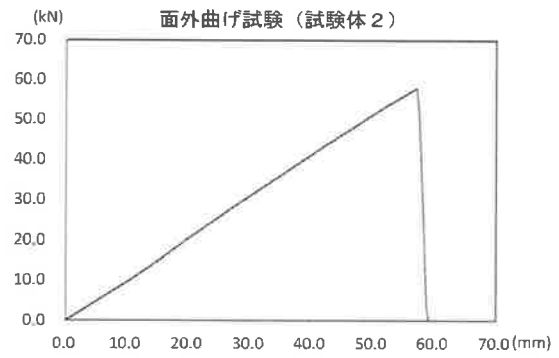
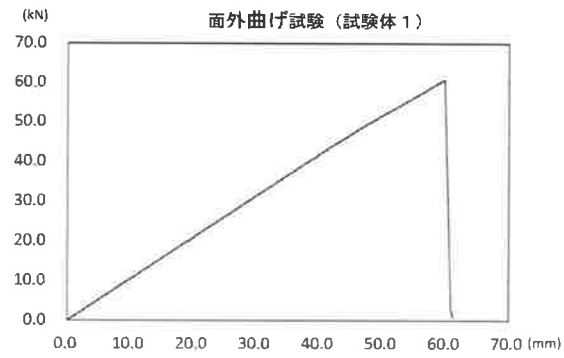
$P_{95} = 53.9 / 2 = 27.0\text{kN}$

$M_{avr} = 27.0 \times 3150 / 3 = 28314\text{kNmm}$

$\sigma_{bavr} = 28314 \times 1000 / 1125000 = \mathbf{25.2N/mm^2}$

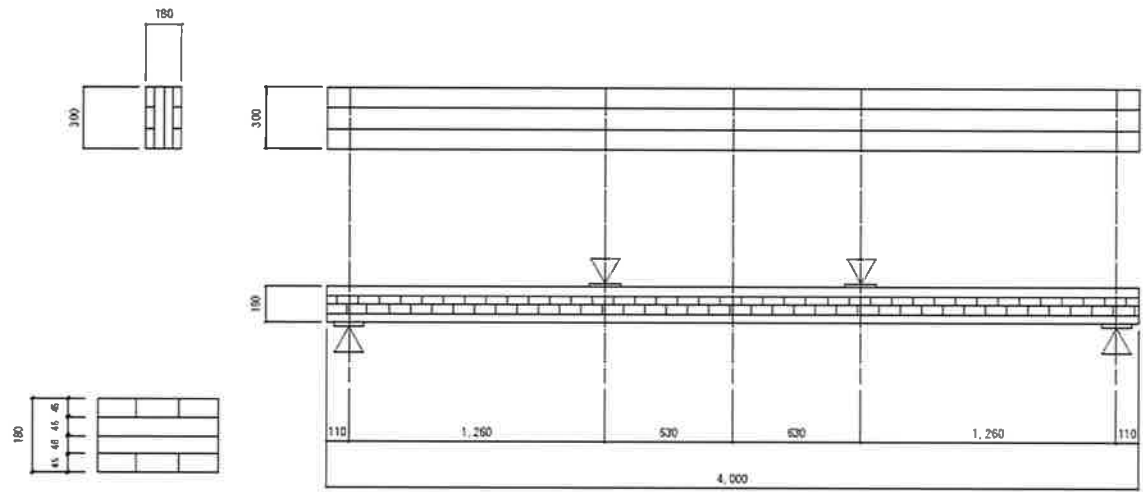
実験値と計算値の比較			
	計算値	実験値	計算値 / 実験値
Fb0 (kN/mm ²)	22.7	30.6	0.742
Fb1 (kN/mm ²)	16.7	25.2	0.663
Fb (kN/mm ²)	17.1	25.2	0.679

⑤ A試験体第2回実大曲げ試験荷重変形関係



(2) B試験体 (ラミナ構成：3層4プライ 180mm 厚 (45・45・45・45))

a) 試験体図



面外曲げ性能試験体

180厚 3層4プライ 強軸 300mm幅

6体

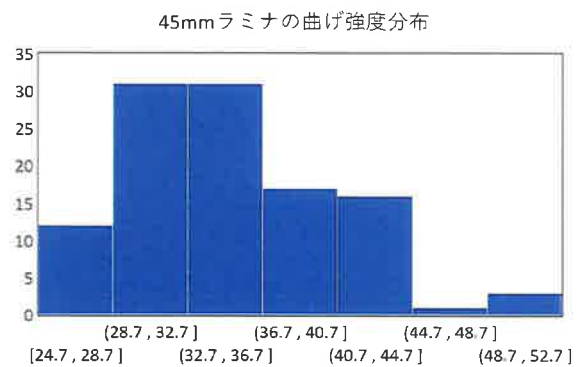
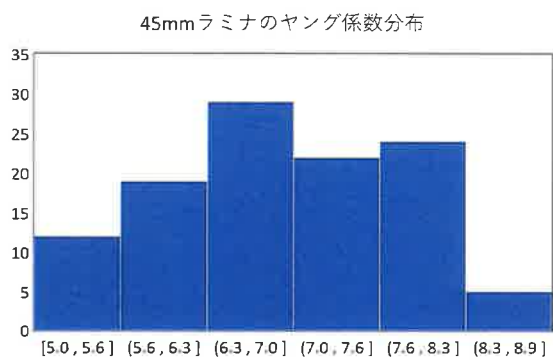
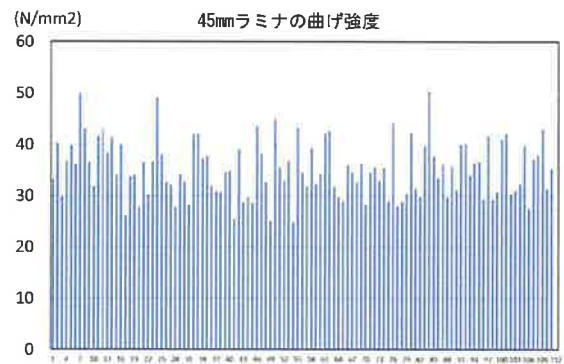
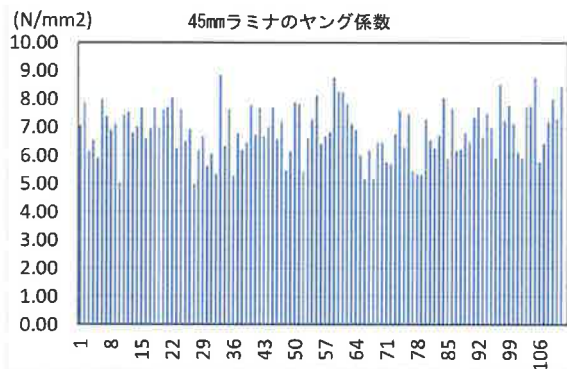
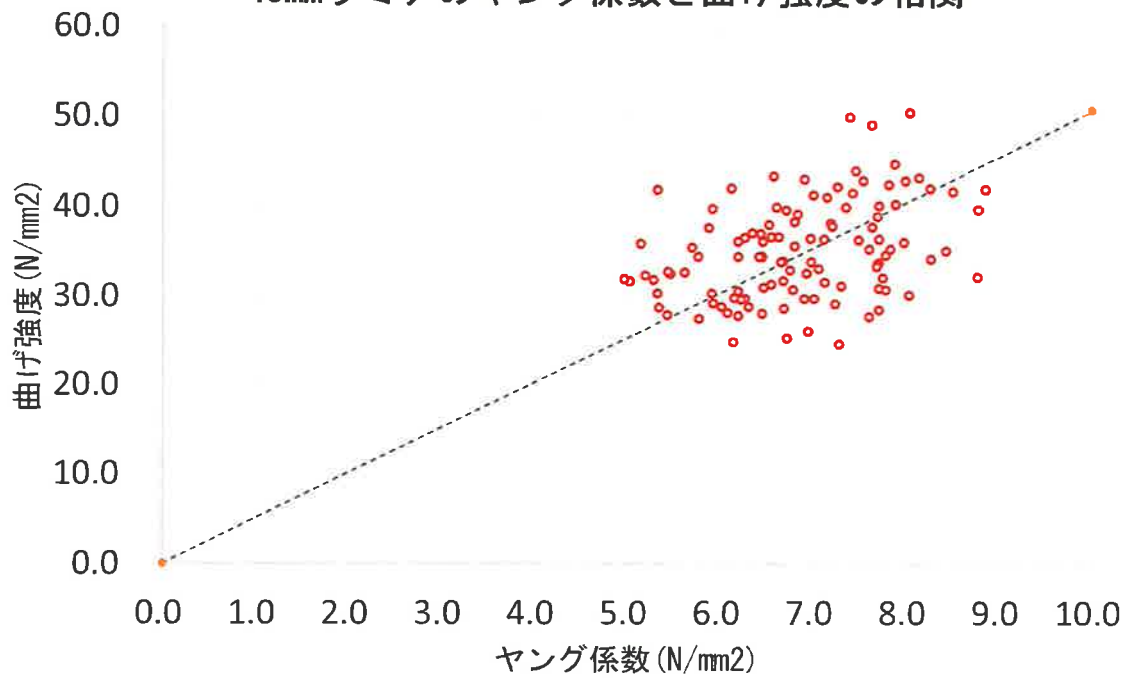
b) 面外曲げ試験結果

①45mm ラミナの曲げ特性

NO	樹種	サイズ(mm)			含水率 (%)	破壊荷重 (kN)	ヤング (N/mm2)	曲げ強度 (N/mm2)	標準偏差			
		厚さ	幅	スパン					ヤング	曲げ強度		
1	スギ	45.0	105	945	12	7.46	7.06	33.16	0.19	1.99	ヤング係数平均	6.866
2	スギ	45.0	105	945	12	9.08	7.88	40.36	1.02	5.21	ヤング係数下限	4.977
3	スギ	45.0	105	945	12	6.72	6.15	29.87	0.72	5.27	ヤング係数最大	8.848
4	スギ	45.0	105	945	12	8.26	6.55	36.71	0.32	1.57		
5	スギ	45.0	105	945	12	8.97	5.92	39.87	0.95	4.73	曲げ強度平均	35.1
6	スギ	45.0	105	945	12	8.13	7.97	36.13	1.11	0.99	曲げ強度下限	24.7
7	スギ	45.0	105	945	12	11.22	7.39	49.87	0.53	14.73	曲げ強度最大	50.4
8	スギ	45.0	105	945	12	9.70	6.90	43.11	0.03	7.97		
9	スギ	45.0	105	945	12	8.20	7.11	36.44	0.25	1.30	K	1.758
10	スギ	45.0	105	945	12	7.14	5.03	31.73	1.83	3.41	ヤング (TL)	5.592
11	スギ	45.0	105	945	12	9.36	7.43	41.60	0.56	6.46	曲げ強度 (TL)	27.5
12	スギ	45.0	105	945	12	9.66	7.54	42.93	0.67	7.79		
13	スギ	45.0	105	945	12	8.64	6.80	38.40	0.07	3.26	$\sigma b_{onl}=35.1\text{N/mm}^2$	
14	スギ	45.0	105	945	12	9.30	7.00	41.33	0.14	6.19	$\sigma b_{onl95}=27.5\text{N/mm}^2$	
15	スギ	45.0	105	945	12	7.62	7.71	33.87	0.84	1.27		
16	スギ	45.0	105	945	12	9.00	6.60	40.00	0.26	4.86	Ebl =6866N/mm2	
17	スギ	45.0	105	945	12	5.88	6.95	26.13	0.08	9.01	Ebl 95=5592N/mm2	
18	スギ	45.0	105	945	12	7.58	7.69	33.69	0.82	1.45		
19	スギ	45.0	105	945	12	7.64	6.97	33.96	0.11	1.19		
20	スギ	45.0	105	945	12	6.24	7.60	27.73	0.74	7.41		
21	スギ	45.0	105	945	12	8.20	7.71	36.44	0.84	1.30		
22	スギ	45.0	105	945	12	6.80	8.03	30.22	1.16	4.92		
23	スギ	45.0	105	945	12	8.24	6.26	36.62	0.60	1.48		
24	スギ	45.0	105	945	12	11.04	7.62	49.07	0.76	13.93		
25	スギ	45.0	105	945	12	8.56	6.52	38.04	0.34	2.90		
26	スギ	45.0	105	945	12	7.34	6.93	32.62	0.06	2.52		
27	スギ	45.0	105	945	12	7.20	4.98	32.00	1.89	3.14		
28	スギ	45.0	105	945	12	6.26	6.19	27.82	0.67	7.32		
29	スギ	45.0	105	945	12	7.66	6.67	34.04	0.19	1.10		
30	スギ	45.0	105	945	12	7.36	5.61	32.71	1.25	2.43		
31	スギ	45.0	105	945	12	6.34	6.07	28.18	0.79	6.96		
32	スギ	45.0	105	945	12	9.44	5.32	41.96	1.54	6.81		
33	スギ	45.0	105	945	12	9.46	8.85	42.04	1.98	6.90		
34	スギ	45.0	105	945	12	8.36	6.34	37.16	0.53	2.01		
35	スギ	45.0	105	945	12	8.50	7.63	37.78	0.76	2.64		
36	スギ	45.0	105	945	12	7.18	5.28	31.91	1.59	3.23		
37	スギ	45.0	105	945	12	6.92	6.78	30.76	0.09	4.39		
38	スギ	45.0	105	945	12	6.90	6.19	30.67	0.68	4.47		
39	スギ	45.0	105	945	12	7.76	6.45	34.49	0.41	0.65		
40	スギ	45.0	105	945	12	7.80	7.78	34.67	0.92	0.47		
41	スギ	45.0	105	945	12	5.72	6.72	25.42	0.15	9.72		
42	スギ	45.0	105	945	12	8.78	7.69	39.02	0.82	3.88		
43	スギ	45.0	105	945	12	6.46	6.68	28.71	0.18	6.43		
44	スギ	45.0	105	945	12	6.70	7.01	29.78	0.15	5.36		
45	スギ	45.0	105	945	12	6.42	7.70	28.53	0.84	6.61		
46	スギ	45.0	105	945	12	9.78	6.57	43.47	0.29	8.33		
47	スギ	45.0	105	945	12	8.60	7.19	38.22	0.32	3.08		
48	スギ	45.0	105	945	12	7.32	5.46	32.53	1.41	2.61		
49	スギ	45.0	105	945	12	5.62	6.14	24.98	0.73	10.16		
50	スギ	45.0	105	945	12	10.08	7.87	44.80	1.01	9.66		
51	スギ	45.0	105	945	12	7.96	7.83	35.38	0.96	0.24		
52	スギ	45.0	105	945	12	7.38	5.44	32.80	1.43	2.34		
53	スギ	45.0	105	945	12	8.26	6.63	36.71	0.24	1.57		
54	スギ	45.0	105	945	12	5.56	7.28	24.71	0.41	10.43		
55	スギ	45.0	105	945	12	9.74	8.13	43.29	1.27	8.15		

56	スギ	45.0	105	945	12	7.76	6.41	34.49	0.45	0.65
57	スギ	45.0	105	945	12	7.16	6.67	31.82	0.19	3.32
58	スギ	45.0	105	945	12	8.84	6.83	39.29	0.04	4.15
59	スギ	45.0	105	945	12	7.26	8.77	32.27	1.90	2.87
60	スギ	45.0	105	945	12	7.70	8.26	34.22	1.40	0.92
61	スギ	45.0	105	945	12	9.48	8.25	42.13	1.39	6.99
62	スギ	45.0	105	945	12	9.58	7.81	42.58	0.95	7.44
63	スギ	45.0	105	945	12	7.12	7.12	31.64	0.26	3.50
64	スギ	45.0	105	945	12	6.70	6.91	29.78	0.04	5.36
65	スギ	45.0	105	945	12	6.50	6.01	28.89	0.86	6.25
66	スギ	45.0	105	945	12	8.08	5.14	35.91	1.73	0.77
67	スギ	45.0	105	945	12	7.76	6.19	34.49	0.68	0.65
68	スギ	45.0	105	945	12	7.30	5.19	32.44	1.68	2.70
69	スギ	45.0	105	945	12	8.14	6.46	36.18	0.41	1.04
70	スギ	45.0	105	945	12	6.32	6.45	28.09	0.41	7.05
71	スギ	45.0	105	945	12	7.76	5.76	34.49	1.10	0.65
72	スギ	45.0	105	945	12	8.00	5.70	35.56	1.17	0.41
73	スギ	45.0	105	945	12	7.42	6.75	32.98	0.11	2.16
74	スギ	45.0	105	945	12	7.96	7.60	35.38	0.74	0.24
75	スギ	45.0	105	945	12	6.50	6.30	28.89	0.56	6.25
76	スギ	45.0	105	945	12	9.92	7.46	44.09	0.59	8.95
77	スギ	45.0	105	945	12	6.28	5.43	27.91	1.44	7.23
78	スギ	45.0	105	945	12	6.48	5.33	28.80	1.53	6.34
79	スギ	45.0	105	945	12	6.84	5.32	30.40	1.54	4.74
80	スギ	45.0	105	945	12	9.52	7.26	42.31	0.40	7.17
81	スギ	45.0	105	945	12	7.06	6.55	31.38	0.32	3.76
82	スギ	45.0	105	945	12	6.70	6.26	29.78	0.60	5.36
83	スギ	45.0	105	945	12	8.92	6.71	39.64	0.16	4.50
84	スギ	45.0	105	945	12	11.34	8.03	50.40	1.16	15.26
85	スギ	45.0	105	945	12	8.48	5.88	37.69	0.99	2.55
86	スギ	45.0	105	945	12	7.52	7.68	33.42	0.81	1.72
87	スギ	45.0	105	945	12	8.14	6.19	36.18	0.68	1.04
88	スギ	45.0	105	945	12	6.68	6.22	29.69	0.65	5.45
89	スギ	45.0	105	945	12	8.04	6.79	35.73	0.07	0.59
90	スギ	45.0	105	945	12	6.98	6.46	31.02	0.40	4.12
91	スギ	45.0	105	945	12	9.00	7.35	40.00	0.48	4.86
92	スギ	45.0	105	945	12	9.04	7.71	40.18	0.84	5.04
93	スギ	45.0	105	945	12	7.64	6.65	33.96	0.21	1.19
94	スギ	45.0	105	945	12	8.18	7.49	36.36	0.62	1.21
95	スギ	45.0	105	945	12	8.22	6.97	36.53	0.10	1.39
96	スギ	45.0	105	945	12	6.58	5.93	29.24	0.94	5.90
97	スギ	45.0	105	945	12	9.40	8.50	41.78	1.63	6.64
98	スギ	45.0	105	945	12	6.56	7.23	29.16	0.37	5.99
99	スギ	45.0	105	945	12	6.92	7.78	30.76	0.92	4.39
100	スギ	45.0	105	945	12	9.25	7.15	41.11	0.28	5.97
101	スギ	45.0	105	945	12	9.48	6.12	42.13	0.75	6.99
102	スギ	45.0	105	945	12	6.84	5.90	30.40	0.96	4.74
103	スギ	45.0	105	945	12	6.96	7.71	30.93	0.84	4.21
104	スギ	45.0	105	945	12	7.24	7.74	32.18	0.88	2.96
105	スギ	45.0	105	945	12	8.96	8.78	39.82	1.91	4.68
106	スギ	45.0	105	945	12	6.18	5.77	27.47	1.10	7.67
107	スギ	45.0	105	945	12	8.34	6.43	37.07	0.44	1.93
108	スギ	45.0	105	945	12	8.52	7.20	37.87	0.34	2.73
109	スギ	45.0	105	945	12	9.66	7.99	42.93	1.13	7.79
110	スギ	45.0	105	945	12	7.02	7.30	31.20	0.44	3.94
111	スギ	45.0	105	945	12	7.92	8.43	35.20	1.56	0.06

45mmラミナのヤング係数と曲げ強度の相関



②計算より求まる CLT の面外曲げ強度

●曲げ面外強度 (強軸) の場合

Mx60-3-4 [外層 :M60A、内層 :M30A]

部材幅(B) :300mm、部材厚さ(H) :180mm

各層厚さ(h) :外層45mm、内層45mm

外層用ラミナ等級 :M60A 等級区分機による等級)、E1,E4 = 6866N/mm²

内層用ラミナ等級 :M30A 等級区分機による等級)、E2,E3 = 0N/mm²

$\sigma_{b_0ml}=35.10\text{N/mm}^2$

層	ラミナ等級	応力負担	Ei (N/mm ²)	B (mm)	hi (mm)	Ai (mm ²)	Zi (mm)	①Ei · Ii (× 10 ⁹ Nmm ²)	②Ei · Ai · Zi ² (× 10 ⁹ Nmm ²)	Σ①+② (× 10 ¹² Nmm ²)
1	M60A	あり	6000	300	45.0	13500	67.5	13.66875	369.05625	0.765
2	M30A	なし	0	300	45.0	13500	15	0	0	
3	M30A	なし	0	300	45.0	13500	15	0	0	
4	M60A	あり	6000	300	45.0	13500	67.5	13.66875	369.05625	

E0=E1,E4=6866N/mm²

$I_A = \Sigma Ei \cdot Ai \cdot Zi^2 / E0 = 0.765 \times 10^{12} / 6866 = 111418584(\text{mm}^4)$

$I0 = B \times H^3 / 12 = 300 \times 180^3 / 12 = 145800000(\text{mm}^4)$

$Fb0 = \sigma_{b_0ml} \times I_A / I0 \times 0.65 = 35.1 \times 111418584 / 145800000 \times 0.65 = 17.4\text{N/mm}^2$

$Fb = \sigma_{b_0ml} \times I_A / I0 \times 0.65 \times 0.75 = 35.1 \times 111418584 / 145800000 \times 0.65 \times 0.75 = 13.1\text{N/mm}^2$

$E = 6866 \times 111418584 / 145800000 = 5247\text{N/mm}^2$

②面外曲げの実大実験より求まる CLT の最大応力・ヤング係数

試験体番号	崩壊荷重 (kN)	標準偏差
1	51.0	4.47
2	46.5	8.97
3	56.3	0.83
4	58.1	2.63
5	60.7	5.23
6	60.2	4.73
平均値	55.5	5.13
95%下限値	43.5	

試験体番号	ヤング係数(N/mm ²)
1	5383.4
2	5313.1
3	5270.3
4	5217.9
5	5226.9
6	5363.9
平均値	5295.9

実験値と計算値の比較			
	計算値	実験値	計算値 / 実験値
Fb0 (kN/mm ²)	17.4	18.0	0.967
Fb1 (kN/mm ²)	13.7	14.1	0.972
Fb (kN/mm ²)	13.1	14.1	0.929

$P_{avr} = 55.5 / 2 = 27.7\text{kN}$

$M_{avr} = 27.7 \times 3150 / 3 = 29120\text{kNmm}$

$Z = 300 \times 180^2 / 6 = 1620000\text{mm}^3$

$\sigma_{bavr} = 29120 \times 1000 / 1620000 = 18.0\text{N/mm}^2$

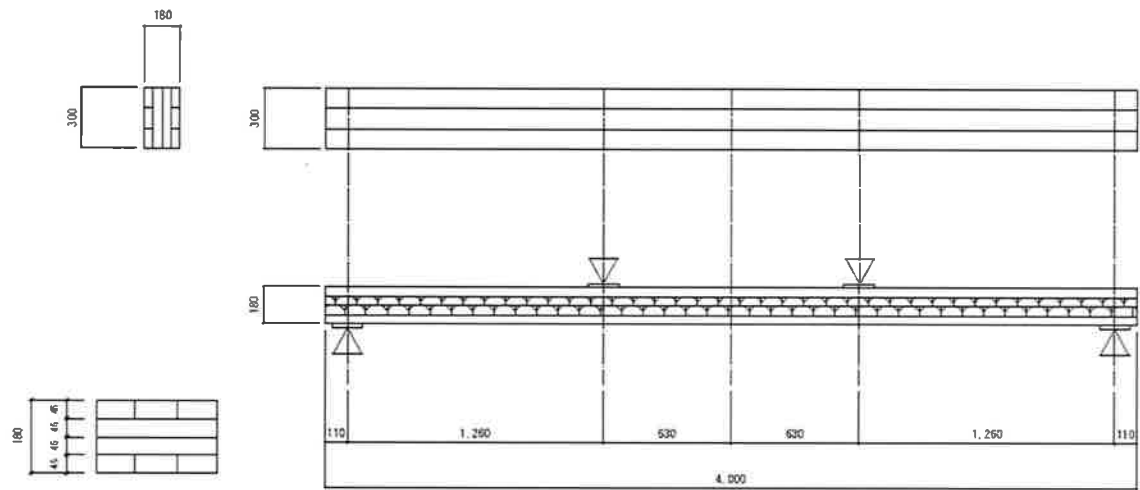
$P_{95} = 43.5 / 2 = 21.7\text{kN}$

$M_{avr} = 21.7 \times 3150 / 3 = 22831\text{kNmm}$

$\sigma_{bavr} = 22831 \times 1000 / 1620000 = 14.1\text{N/mm}^2$

3) C試験体 (ラミナ構成: 3層4プライ 180mm 厚 (45・45・45・45) 角欠けラミナ使用)

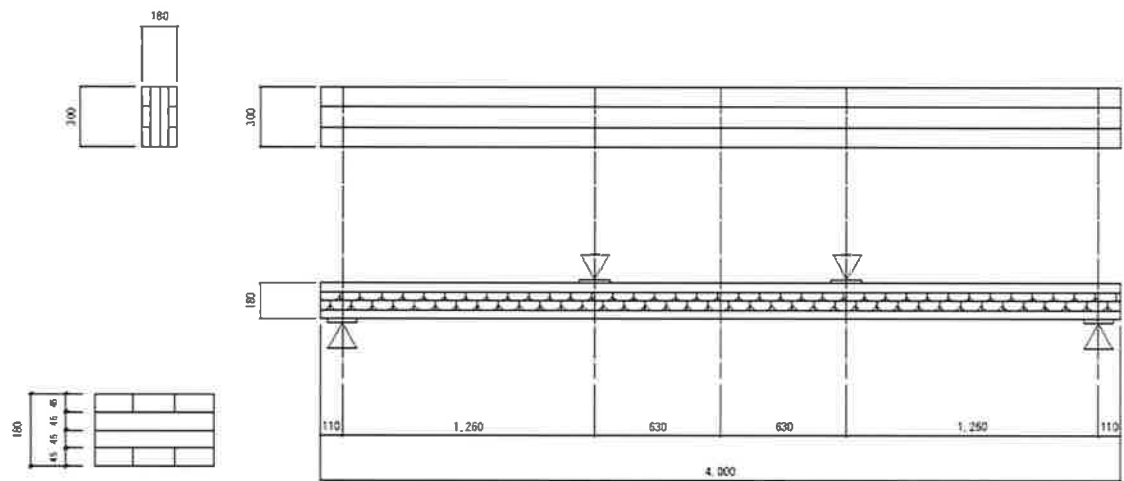
a) 試験体図



面外曲げ性能試験体

180厚 3層4プライ 強軸 (角欠け: 上) 300mm幅

3体



面外曲げ性能試験体

180厚 3層4プライ 強軸 (角欠け: 下) 300mm幅

3体

b) 面外曲げ試験結果

①面外曲げの実大実験より求まる GLT の最大応力・ヤング係数

試験体番号	崩壊荷重 (kN)	標準偏差
下角欠け1	54.6	1.95
下角欠け2	60.5	3.95
下角欠け3	59.0	2.45
上角欠け1	60.1	3.55
上角欠け2	54.5	2.05
上角欠け3	50.6	5.95
平均値	56.6	3.60
95%下限値	48.1	

試験体番号	ヤング係数(N/mm ²)
角欠け上1	5467.8
角欠け上2	5183.7
角欠け上3	5615.7
角欠け下1	5123.9
角欠け下2	5166.6
角欠け下3	5598.1
平均値	5359.3

実験値と計算値の比較			
	計算値	実験値	計算値 / 実験値
Fb0 (kN/mm ²)	17.4	18.3	0.951
Fb1 (kN/mm ²)	13.7	15.6	0.878
Fb (kN/mm ²)	13.1	15.6	0.840

$$\begin{aligned}
 P_{avr} &= 56.6 / 2 = 28.3 \text{ kN} \\
 M_{avr} &= 28.3 * 3150 / 3 = 29689 \text{ kNmm} \\
 Z &= 300 * 180^2 / 6 = 1620000 \text{ mm}^3 \\
 \sigma_{bavr} &= 29689 * 1000 / 1620000 = \mathbf{18.3 \text{ N/mm}^2}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_{95} &= 48.1 / 2 = 24.1 \text{ kN} \\
 M_{avr} &= 24.1 * 3150 / 3 = 25278 \text{ kNmm} \\
 \sigma_{bavr} &= 25278 * 1000 / 1620000 = \mathbf{15.6 \text{ N/mm}^2}
 \end{aligned}$$

4.2 面外せん断試験

4.2.1 面外せん断試験の目的

45mm ラミナを主な構成要素とする CLT のせん断基準強度の妥当性を確認するのが、本試験の目的である。具体的には、CLT 関連告示等解説書（以下「解説書」）の第5章に定められた試験方法に基づいてせん断試験を行い CLT の基準強度を求め、その値が解説書の第4章に定められた計算式より求める基準強度を上回ることを確認する。

4.2.2 試験対象とする CLT のラミナ構成

試験を実施する、CLT のラミナ構成は以下である・

(1) A 試験体

ラミナの層構成： 3層4プライ 150mm 厚 (45・30・30・45)

樹種：スギ

外層ラミナのヤング係数： 6000N/mm²

内層ラミナのヤング係数： 3000N/mm²

(2) B 試験体

ラミナの層構成： 3層4プライ 180mm 厚 (45・45・45・45)

樹種：スギ

外層ラミナのヤング係数： 6000N/mm²

内層ラミナのヤング係数： 3000N/mm²

(3) C 試験体

ラミナの層構成： 3層4プライ 180mm 厚 (45・45・45・45)

樹種：スギ

外層ラミナのヤング係数： 6000N/mm²

内層ラミナのヤング係数： 3000N/mm²

ラミナの形状： 角欠け

4.2.3 面外せん断の基準強度の計算式

・面外せん断の基準強度の計算式は以下である。

せん断の基準強度 $F_s = 0.9 \text{ (N/mm}^2\text{)}$

せん断弾性係数 $G = a^2 / (h_1 / (2 \times G_1) + \sum_{i=2}^{n-1} (h_i / G_i) + h_n / (2 \times G_n)) \times 1 / t_{\text{gross}}$

a : 表裏外層の重心間距離

h_i : i 番目の層の厚さ

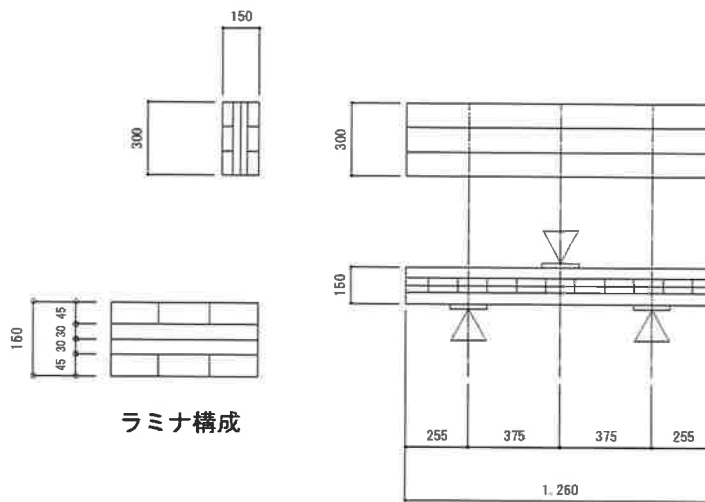
G_i : i 番目の層のせん断弾性係数 (平行層 $G_i = E_i / 16$ 、直交層 $G_i = E_i / 160$)

t_{gross} : CLT パネルの厚さ(mm)

4.2.4 面外せん断試験結果

(1) A試験体 (3層4プライ 150mm 厚 (45・30・30・45))

a) 試験体図



ラミナ構成

面外せん断性能試験体

150厚 3層4プライ 強軸 300mm幅

ｂ）Ａ試験体面外せん断試験結果

①計算より求まる CLT の面外せん断強度と剛性

●面外せん断弾性係数（強軸）の場合

Mx60-3-4「(外層：M60A、内層：M30A)」

部材断面高さ(H)：300mm、部材断面厚さ(B)：150mm

各層厚さ(h)：外層45mm、内層30mm

外層用ラミナ等級：M60A（等級区分機による等級）、E1,E4=6560N/mm²

内層用ラミナ等級：M30A（等級区分機による等級）、E2,E3=0N/mm²

層	ラミナ 等級	応力 負担	Ei (N/mm ²)	Gi (N/mm ²)	hi (mm)	hi/Gi	a	tgross	G (N/mm ²)
1	M60A	あり	6560	410.0	45.0	0.1098	105	150	24
2	M30A	なし	3280	20.5	30.0	1.4634			
3	M30A	なし	3280	20.5	30.0	1.4634			
4	M60A	あり	6560	410.0	45.0	0.1098			

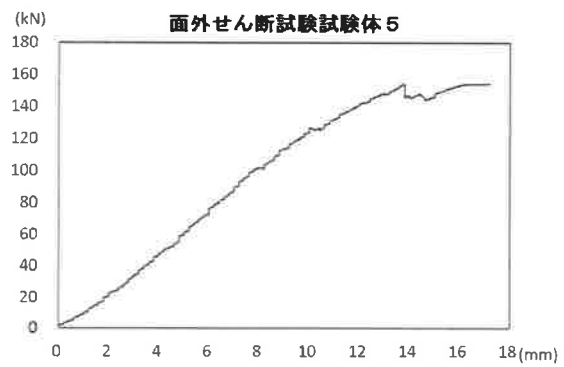
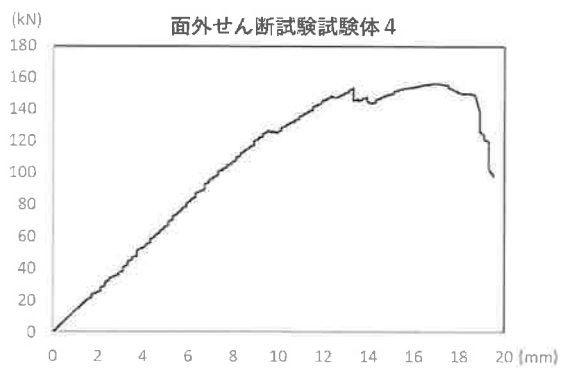
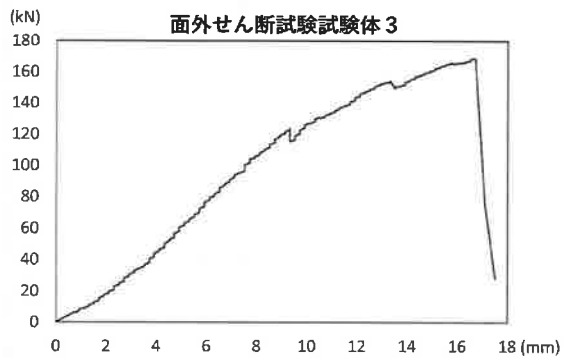
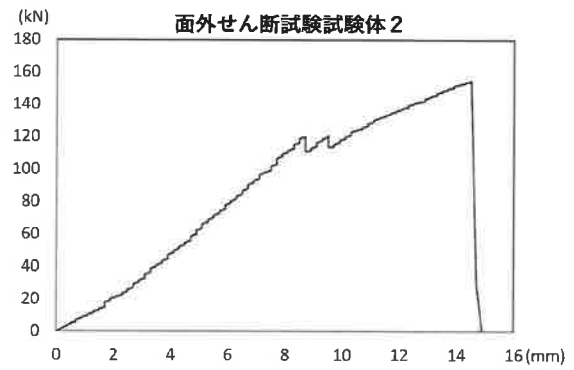
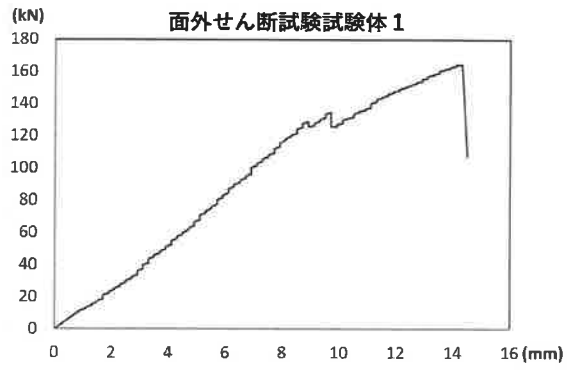
G= 24 N/mm²

②面外せん断の実大実験より求まる CLT の最大応力と剛性

崩壊 荷重 P(kN)	試験体寸法			$\sigma_s=3P/(4B \cdot H)$		最大 たわみ (mm)	弾性限		E (N/mm ²)	I (mm ⁴)	曲げ 変形 (mm)	せん断 変形 (mm)	せん断弾性係数	
	B (mm)	H (mm)	L (mm)	崩壊荷重 (N/mm ²)	標準 偏差		荷重 (kN)	たわみ (mm)					G (N/mm ²)	標準 偏差
164.8	300	150	750	2.75	0.011	14.3	100.0	6.9	6673	84375000	0.39	6.51	64	4.930
155.3	300	150	750	2.59	0.148	14.5	100.6	7.5	6666	84375000	0.39	7.11	59	0.097
169.0	300	150	750	2.82	0.081	16.7	100.3	7.7	6768	84375000	0.39	7.31	57	1.938
157.0	300	150	750	2.62	0.119	20.3	100.8	7.8	6443	84375000	0.41	7.39	57	2.263
167.5	300	150	750	2.79	0.056	18.7	100.8	7.8	6733	84375000	0.39	7.41	57	2.397
171.3	300	150	750	2.86	0.119	16.9	100.8	7.3	6614	84375000	0.40	6.90	61	1.765
平均値				2.74	0.100							平均値	59	2.647
下限値				2.50								下限値	53	
						$f_s=0.9(N/mm^2)$								

	強さ(N/mm ²)	Pmax(kN)
6-1	2.81	168.7
6-2	2.32	139.3
6-3	2.56	153.6
6-4	2.10	126.1
6-5	2.21	132.8
6-6	1.51	90.5
	強さ(N/mm ²)	Pmax(kN)
1	2.75	164.8
2	2.59	155.3
3	2.82	169
4	2.62	157
5	2.79	167.5
6	2.86	171.3

③面外せん断試験荷重変形関係



(2) B, C 試験体 (ラミナ構成 : 3 層 4 プライ 180mm 厚 (45・45・45・45))

a) 面外せん断試験結果

①計算より求まる CLT の面外せん断強度と強度、ヤング係数

●面外せん断弾性係数 (強軸) の場合

Mx60-3-4 (外層 :M60A、内層 :M30A)]

部材断面高さ(H) :300mm、部材断面厚さ(B) :180mm

各層厚さ(h) :外層45mm、内層45mm

外層用ラミナ等級 :M60A (等級区分機による等級)、 $E1, E4 = 6866 \text{ N/mm}^2$

内層用ラミナ等級 :M30A (等級区分機による等級)、 $E2, E3 = 3433 \text{ N/mm}^2$

層	ラミナ	応力	E_i	G_i	h_i	h_i/G_i	a	tgross	G
1	M60A	あり	6866	429.1	45.0	0.1049	105	150	17
2	M30A	なし	3433	21.5	45.0	2.0973			
3	M30A	なし	3433	21.5	45.0	2.0973			
4	M60A	あり	6560	410.0	45.0	0.1098			

$$G = 17 \text{ N/mm}^2$$

②面外せん断の実大実験より求まる CLT の最大応力

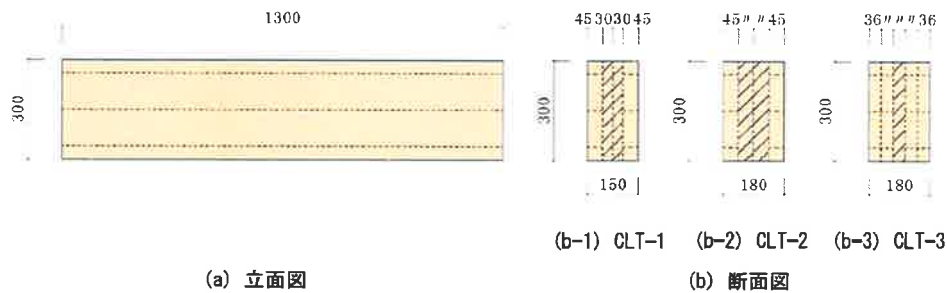
試験体番号	$P_{\max}(\text{kN})$	強さ(N/mm^2)
1	145.6	2.02
2	135.2	2.50
3	127.2	2.36
4	138.5	2.56
5	134.1	2.48
6	142.0	2.63
平均値	137.1	2.43

試験体番号	$P_{\max}(\text{kN})$	強さ(N/mm^2)
角欠け上1	143.6	2.66
角欠け上2	111.1	2.06
角欠け上3	111.3	2.06
角欠け下1	128.7	2.38
角欠け下2	133.7	2.48
角欠け下3	127.1	2.35
平均値	125.9	2.33

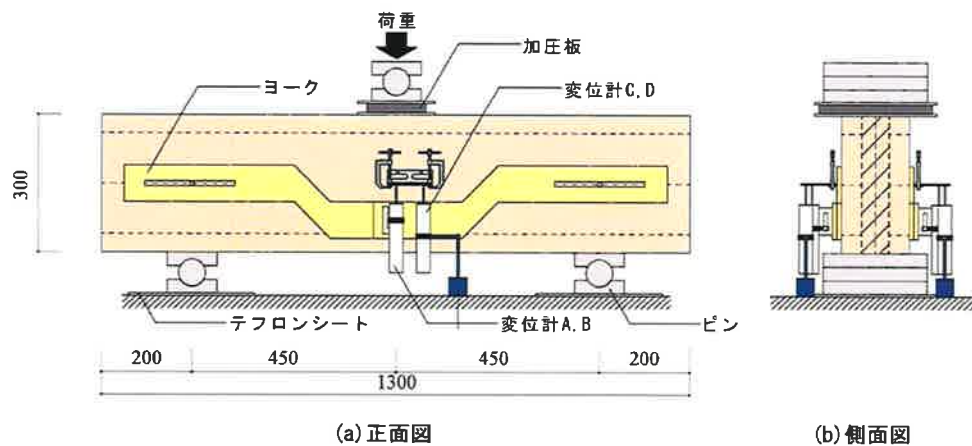
4.3 面内せん断性能

4.3.1 面内せん断試験試験体一覧

試験体名	層構成	ラミナ厚 (mm)	厚さ (mm)	せい (mm)	長さ (mm)	FJの有無
CLT-1 FJ	Mx60-3-4	45/30/30/45	150	300	1300	有
CLT-1	Mx60-3-4	45/30/30/45	150	300	1300	無
CLT-2	Mx60-3-4	45/45/45/45	180	300	1300	無
CLT-3 FJ	Mx60-3-5	36/36/36/36/36	180	300	1300	有
CLT-4FJ	Mx60-3-4	45/45/45/45	180	300	1300	有
CLT-4FJw	Mx60-3-4	45/45/45/45	180	300	1300	有



4.3.2 面内せん断試験載荷方法



4.3.3 面内せん断基準強度の計算式

本実験におけるCLT板の最大せん断応力度を評価するため、CLT関連告示等解説書に記載されているせん断基準強度 F_s を参考にし、式(1)で評価することとした。

$$F_s = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{v_lam_0} \\ f_{v_lam_90} \frac{t_{net}}{t_{gross}} \\ \frac{bn_{ca}}{2t_{gross}} k_{5th} \frac{1}{\frac{1}{f_{v_tor}} \left(1 - \frac{1}{m^2}\right) + \frac{2}{f_R} \left(\frac{1}{m} - \frac{1}{m^2}\right)} \end{array} \right. \quad (1)$$

ここで、 $f_{v_lam_0}$ ：ラミナの繊維方向のせん断強度、 $f_{v_lam_90}$ ：ラミナの繊維方向と直交する方向のせん断強度、 f_{v_tor} ：接着された直交する二つのラミナの交差面のねじりせん断強度、 f_R ：ローリングシア強度、 n_{ca} ：直交集成板の直交接着層の数、 b ：ラミナの幅、 t_{gross} ：直交集成板の厚さ、 m ：各層のラミナの幅方向の数のうち最小の値、 k_{5th} ：95%下側許容限界値算出係数（3/4）である。

計算で得られた結果を表6に示す。本実験条件におけるせん断基準強度は式（1）より、モードⅢで決定される。同表における実験の最大せん断応力度の平均値に対するせん断基準強度の比は、2.73～3.60となり、実験値を安全側に評価している。ここで、試験体によるばらつきを考慮して、CLT関連告示等解説書に記載されている式（2）を用いて実験値を評価する。

$$TL = x - Ks \quad (2)$$

ここで、 TL ：信頼水準75%の95%下限許容限界値、 x ：実験から得られた平均値、 K ：試験体数に依存する係数（=2.336）、 s ：標準偏差である。

式（2）で得られた値を、同じく表5中に示す。下限許容限界値を用いて計算値と比較すると、実験値に対する計算値の比は3.94～11.85となり、FJの有無に拘らず、安全側に評価できているものと考えられる。また、せん断弾性係数 G の算出結果を表6に示す。算出に当たって、せん断変形成分は、全体変形から曲げ変形成分を差し引くことによって求めている。おおよそ、413N/mm²～779N/mm²の範囲になっている。

4.3.4 面内せん断試験結果

①せん断強度についての実験値と計算値の比較

試験体名	K (kN/mm)	P_{max} (kN)	δ_{max} (mm)	R_{max} (%)	τ_{max} (N/mm ²)	F_S (N/mm ²)			τ_{max}/F_S	TL	TL/F_S
						式(1)上段	式(1)中段	式(1)下段			
CLT-1FJ①	59.5	237	4.68	1.04	7.87	2.7	3.24	0.844	9.32		
CLT-1FJ②	66.3	270	4.50	1.00	8.98	2.7	3.24	0.844	10.63		
CLT-1FJ③	56.6	205	4.88	1.08	6.82	2.7	3.24	0.844	8.08		
CLT-1FJ④	56.4	174	3.20	0.71	5.78	2.7	3.24	0.844	6.85		
CLT-1FJ⑤	65.1	222	3.52	0.78	7.37	2.7	3.24	0.844	8.73		
CLT-1FJ⑥	61.2	221	3.97	0.88	7.35	2.7	3.24	0.844	8.70		
平均	60.8	222	4.12	0.92	7.36	2.7	3.24	0.844	8.72	5.09	6.03
CLT-1①	60.6	264	5.28	1.17	8.81	2.7	3.24	0.844	10.43		
CLT-1②	66.2	325	6.15	1.37	10.8	2.7	3.24	0.844	12.78		
CLT-1③	72.4	279	4.42	0.98	9.27	2.7	3.24	0.844	10.98		
CLT-1④	63.3	284	5.47	1.22	9.42	2.7	3.24	0.844	11.16		
CLT-1⑤	54.8	313	8.20	1.82	10.4	2.7	3.24	0.844	12.31		
CLT-1⑥	59.0	292	6.99	1.55	9.69	2.7	3.24	0.844	11.48		
平均	62.7	293	6.08	1.35	9.73	2.7	3.24	0.844	11.53	8.16	9.66
CLT-2①	68.1	349	6.35	1.41	9.67	2.7	4.05	0.844	11.46		
CLT-2②	71.6	314	6.22	1.38	8.73	2.7	4.05	0.844	10.34		
CLT-2③	58.4	250	5.25	1.17	6.92	2.7	4.05	0.844	8.20		
CLT-2④	65.8	332	6.82	1.52	9.20	2.7	4.05	0.844	10.90		
CLT-2⑤	78.6	326	6.23	1.38	9.00	2.7	4.05	0.844	10.67		
CLT-2⑥	66.6	291	5.20	1.15	8.08	2.7	4.05	0.844	9.58		
平均	68.2	310	6.01	1.34	8.60	2.7	4.05	0.844	10.19	6.52	7.72
CLT-3 FJ①	84.7	304	4.68	1.04	8.43	2.7	1.62	0.633	13.32		
CLT-3 FJ②	84.3	293	4.21	0.94	8.12	2.7	1.62	0.633	12.84		
CLT-3 FJ③	92.0	342	7.28	1.62	9.47	2.7	1.62	0.633	14.96		
CLT-3 FJ④	88.1	300	4.82	1.07	8.30	2.7	1.62	0.633	13.11		
CLT-3 FJ⑤	84.6	299	3.86	0.86	8.27	2.7	1.62	0.633	13.06		
CLT-3 FJ⑥	83.5	319	4.54	1.01	8.83	2.7	1.62	0.633	13.95		
平均	86.2	310	4.90	1.09	8.57	2.7	1.62	0.633	13.54	7.50	11.85

K : 初期剛性, P_{max} : 最大耐力, δ_{max} : P_{max} 発揮時のたわみ量, R_{max} : P_{max} 発揮時の変形角 ($=\delta_{max}/l \times 100$), l : 支点から載荷点までの長さ450mm, τ_{max} : 実験のせん断応力度, F_S : CLTパネルの基準せん断強度

試験体名	K (kN/mm)	P_{max} (kN)	δ_{max} (mm)	R_{max} (%)	τ_{max} (N/mm ²)	F_S (N/mm ²)			τ_{max}/F_S	TL	TL/F_S
						式(1)上段	式(1)中段	式(1)下段			
CLT-4FJ①	65.2	228	4.12	0.92	4.22	2.7	4.05	0.738	5.72		
CLT-4FJ②	68.8	217	3.87	0.86	4.02	2.7	4.05	0.738	5.44		
CLT-4FJ③	70.2	237	4.26	0.95	4.38	2.7	4.05	0.738	5.94		
CLT-4FJ④	65.4	205	3.54	0.79	3.80	2.7	4.05	0.738	5.15		
CLT-4FJ⑤	65.6	233	6.64	1.48	4.32	2.7	4.05	0.738	5.85		
CLT-4FJ⑥	67.6	217	3.77	0.84	4.02	2.7	4.05	0.738	5.45		
平均	67.1	223	4.36	0.97	4.13	2.7	3.24	0.844	4.89	3.66	4.34
CLT-4FJw①	59.5	205	3.56	0.79	3.79	2.7	4.05	0.738	5.13		
CLT-4FJw②	61.5	221	4.12	0.91	4.10	2.7	4.05	0.738	5.55		
CLT-4FJw③	59.4	193	3.99	0.89	3.57	2.7	4.05	0.738	4.84		
CLT-4FJw④	59.1	191	3.35	0.75	3.54	2.7	4.05	0.738	4.79		
CLT-4FJw⑤	63.0	212	3.73	0.83	3.93	2.7	4.05	0.738	5.33		
CLT-4FJw⑥	64.7	218	4.78	1.06	4.03	2.7	4.05	0.738	5.46		
平均	61.2	207	3.92	0.87	3.83	2.7	3.24	0.844	4.53	3.32	3.94

K : 初期剛性, P_{max} : 最大耐力, δ_{max} : P_{max} 発揮時のたわみ量, R_{max} : P_{max} 発揮時の変形角 ($=\delta_{max}/l \times 100$), l : 支点から載荷点までの長さ450mm, τ_{max} : 実験のせん断応力度, F_S : CLTパネルの基準せん断強度

②実験結果より求まるせん断弾性係数

試験体名	K (kN/mm)	P_{max} (kN)	δ_{max} (mm)	E (N/mm ²)	I (mm ⁴)	δ_b (mm)	δ_s (mm)	G (N/mm ²)
CLT-1FJ①	59.5	237	4.68	6000	337500000	0.446	0.554	538
CLT-1FJ②	66.3	270	4.50	6000	337500000	0.497	0.503	659
CLT-1FJ③	56.6	205	4.88	6000	337500000	0.424	0.576	491
CLT-1FJ④	56.4	174	3.20	6000	337500000	0.423	0.577	488
CLT-1FJ⑤	65.1	222	3.52	6000	337500000	0.488	0.512	637
CLT-1FJ⑥	61.2	221	3.97	6000	337500000	0.459	0.541	565
平均	60.8	222	4.12	6000	337500000	0.456	0.544	559
CLT-1①	60.6	264	5.28	6000	337500000	0.455	0.545	555
CLT-1②	66.2	325	6.15	6000	337500000	0.496	0.504	657
CLT-1③	72.4	279	4.42	6000	337500000	0.543	0.457	793
CLT-1④	63.3	284	5.47	6000	337500000	0.474	0.526	602
CLT-1⑤	54.8	313	8.20	6000	337500000	0.411	0.589	465
CLT-1⑥	59.0	292	6.99	6000	337500000	0.443	0.557	529
平均	62.7	293	6.08	6000	337500000	0.470	0.530	592
CLT-2①	68.1	349	6.35	6000	405000000	0.426	0.574	494
CLT-2②	71.6	314	6.22	6000	405000000	0.447	0.553	540
CLT-2③	58.4	250	5.25	6000	405000000	0.365	0.635	383
CLT-2④	65.8	332	6.82	6000	405000000	0.411	0.589	466
CLT-2⑤	78.6	326	6.23	6000	405000000	0.491	0.509	644
CLT-2⑥	66.6	291	5.20	6000	405000000	0.416	0.584	475
平均	68.2	310	6.01	6000	405000000	0.426	0.574	495
CLT-3 FJ①	84.7	304	4.68	6000	405000000	0.529	0.471	749
CLT-3 FJ②	84.3	293	4.21	6000	405000000	0.527	0.473	742
CLT-3 FJ③	92.0	342	7.28	6000	405000000	0.575	0.425	902
CLT-3 FJ④	88.1	300	4.82	6000	405000000	0.550	0.450	816
CLT-3 FJ⑤	84.6	299	3.86	6000	405000000	0.529	0.471	748
CLT-3 FJ⑥	83.5	319	4.54	6000	405000000	0.522	0.478	728
平均	86.2	310	4.90	6000	405000000	0.539	0.461	779

K : 初期剛性 (変形角0.5%における割線剛性), P_{max} : 最大耐力, δ_{max} : P_{max} 発揮時のたわみ量, E : 弾性係数, I : 断面二次モーメント, δ_b : 全体変形1.0mmにおける曲げ変形成分, δ_s : 全体変形1.0mmにおけるせん断変形成分, G : せん断弾性係数

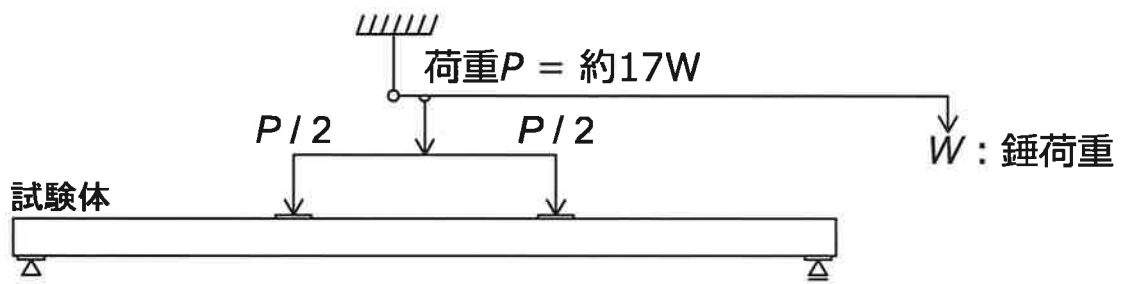
試験体名	K (kN/mm)	P_{max} (kN)	δ_{max} (mm)	E (N/mm ²)	I (mm ⁴)	δ_b (mm)	δ_s (mm)	G (N/mm ²)
CLT-4FJ①	65.2	228	4.12	6000	405000000	0.407	0.593	458
CLT-4FJ②	68.8	217	3.87	6000	405000000	0.430	0.570	503
CLT-4FJ③	70.2	237	4.26	6000	405000000	0.438	0.562	521
CLT-4FJ④	65.4	205	3.54	6000	405000000	0.409	0.591	461
CLT-4FJ⑤	65.6	233	6.64	6000	405000000	0.410	0.590	463
CLT-4FJ⑥	67.6	217	3.77	6000	405000000	0.422	0.578	487
平均	67.1	223	4.36	6000	405000000	0.419	0.581	482
CLT-4FJw①	59.5	205	3.56	6000	405000000	0.372	0.628	394
CLT-4FJw②	61.5	221	4.12	6000	405000000	0.384	0.616	416
CLT-4FJw③	59.4	193	3.99	6000	405000000	0.371	0.629	394
CLT-4FJw④	59.1	191	3.35	6000	405000000	0.369	0.631	390
CLT-4FJw⑤	63.0	212	3.73	6000	405000000	0.394	0.606	433
CLT-4FJw⑥	64.7	218	4.78	6000	405000000	0.405	0.595	453
平均	61.2	207	3.92	6000	405000000	0.382	0.618	413

K : 初期剛性 (変形角0.5%における割線剛性), P_{max} : 最大耐力, δ_{max} : P_{max} 発揮時のたわみ量, E : 弾性係数, I : 断面二次モーメント, δ_b : 全体変形1.0mmにおける曲げ変形成分, δ_s : 全体変形1.0mmにおけるせん断変形成分, G : せん断弾性係数

4.4 荷重継続時間の調整係数

4.4.1 DOL 試験装置

山佐木材 DOL 試験装置設計図

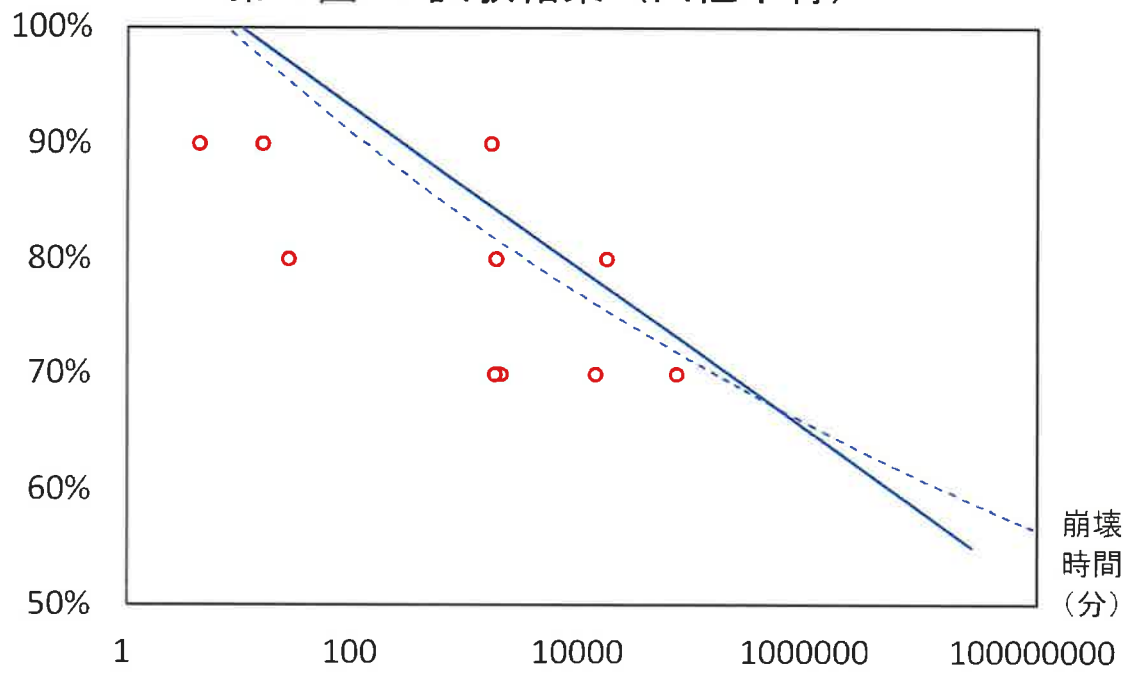


DOL 試験装置の加力機構

4.4.2 DOL 試験結果

荷重レベル

第 1 回DOL試験結果（山佐木材）

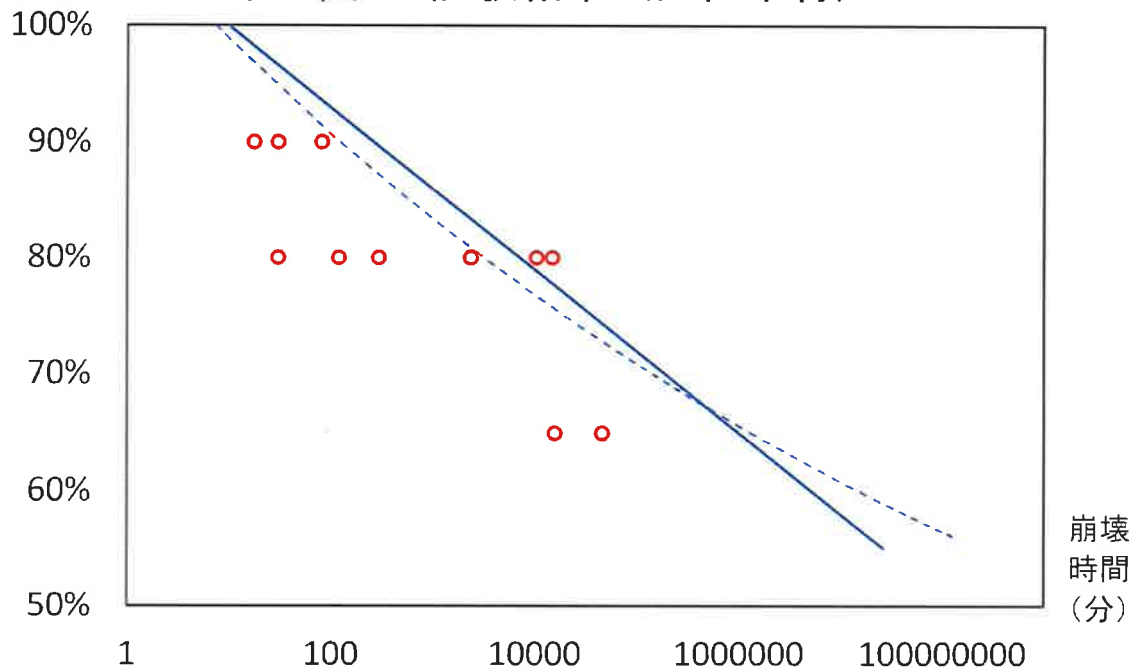


	試験体 番号	崩壊荷重 (kN)
面外曲げ 試験結果	1	39.3
	2	44.6
	3	51.5
	4	43.2
	5	44.6
	6	50.3
	平均	45.6

荷重レベル	載荷荷重 (kN)	崩壊時間 (分)
90%	41.0	16
90%	41.0	1592
90%	41.0	4
80%	36.5	26
80%	36.5	1762
80%	36.5	16345
70%	31.9	1924
70%	31.9	1717
70%	31.9	12958
70%	31.9	67007

荷重レベル

第2回DOL試験結果（山佐木材）

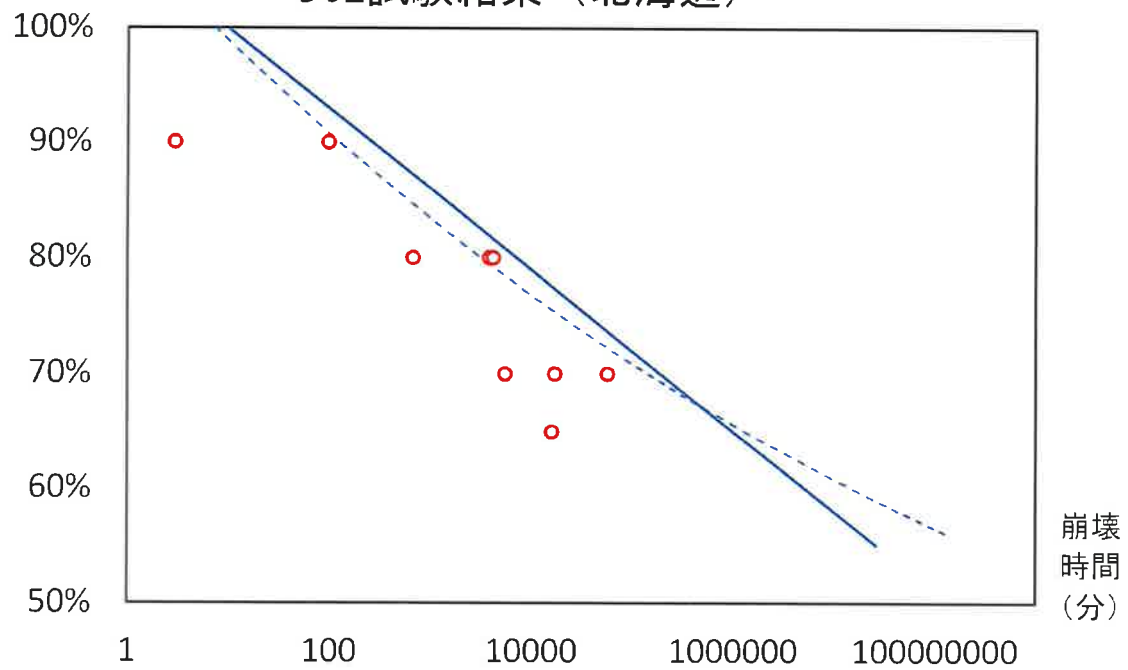


	試験体 番号	崩壊荷重 (kN)
面外曲げ 試験結果	1	60.8
	2	58.2
	3	66.3
	4	73.7
	5	67.7
	6	67.1
	平均	65.6

荷重 レベル	載荷荷重 (kN)	崩壊時間 (分)
90%	59.1	18
90%	59.1	31
90%	59.1	83
80%	52.5	121
80%	52.5	2362
80%	52.5	299
80%	52.5	31
80%	52.5	14838
80%	52.5	10473
65%	42.7	45718
65%	42.7	45209
65%	42.7	15730

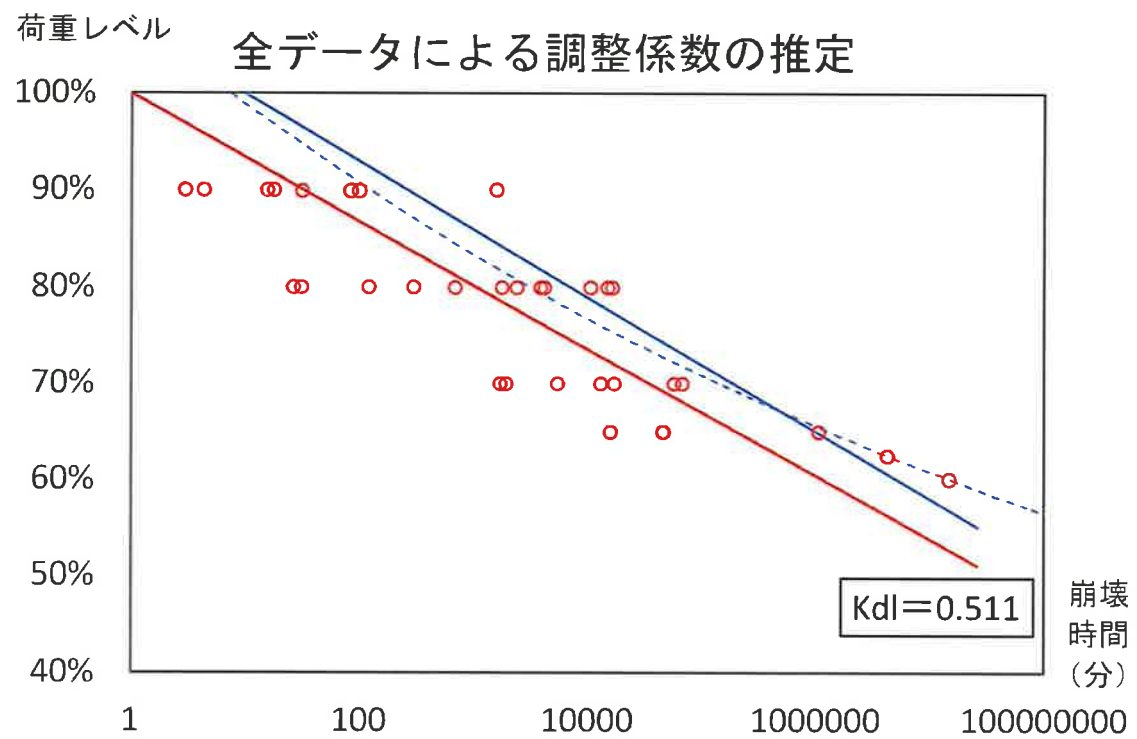
荷重レベル

DOL試験結果（北海道）



	試験体 番号	崩壊荷重 (kN)
面外曲げ 試験結果	1	60.8
	2	58.2
	3	66.3
	4	73.7
	5	67.7
	6	67.1
	平均	65.6

荷重レベル	載荷荷重 (kN)	崩壊時間 (分)
90%	59.1	3
90%	59.1	3
90%	59.1	98
80%	52.5	678
80%	52.5	3859
80%	52.5	4175
70%	45.9	5459
70%	45.9	17170
70%	45.9	56494
65%	42.7	15822
65%	42.7	継続中
65%	42.7	継続中



	計算値	実験値
Fb	17.1	25.2
荷重継続時間の調整係数	0.55	0.511
Fdl	9.41	12.88

4.5 クリープの調整係数

表 1 クリープ変形試験の結果

試験体 No.	$\delta_{1min.}$ (mm)	クリープ係数 ($\delta_{50years}/\delta_{1min.}$)	
		告示法	非線形回帰法
3-2	18.62	1.22	1.56
3-4	17.32	1.29	1.81
3-6	18.35	1.24	1.66

※ $\delta_{1min.}$: 載荷 1 分後のスパン中央たわみ, $\delta_{50years}$: 50 年後のたわみ予測値

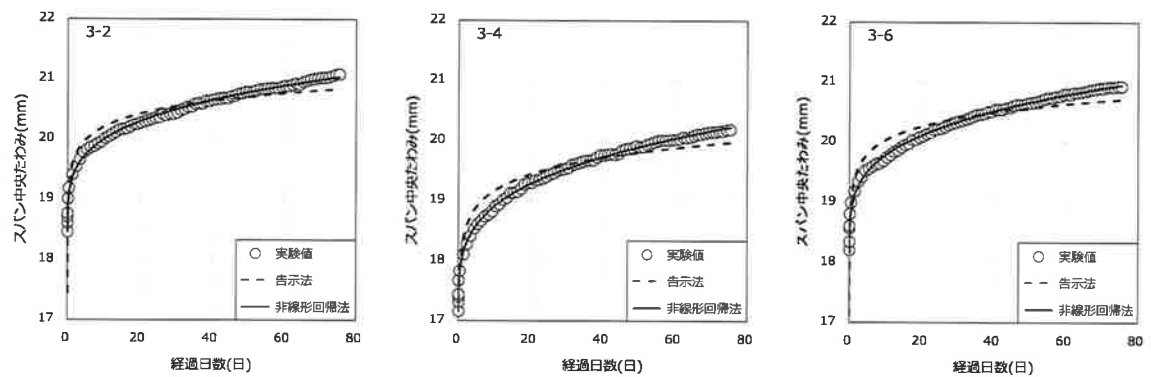


図 3 クリープ変形試験でのスパン中央たわみ実測値と各評価法の推定曲線

5. 結果の検証および考察

(1) 45mm ラミナの性能の確認

45mm ラミナについて、従来の 30mm ラミナに比べ性能的に問題が無いか、検討を行った。45mm ラミナの検討は、A 試験体用ラミナ 46 体および B 試験体用ラミナ 111 体について、調査を行っている。結果は第 4 章 4.1 参照のこと。ここでは両試験体のラミナ 157 体全体をまとめて分析を行ったので、以下に示す。強度については告示に示されて値 (27kN/mm²) を十分上回っており、特に性能的に問題無いことが確認できる。

ヤング係数平均	6.78
ヤング係数下限	4.98
ヤング係数最大	8.85

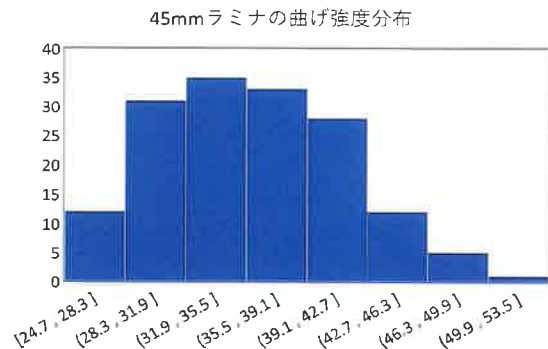
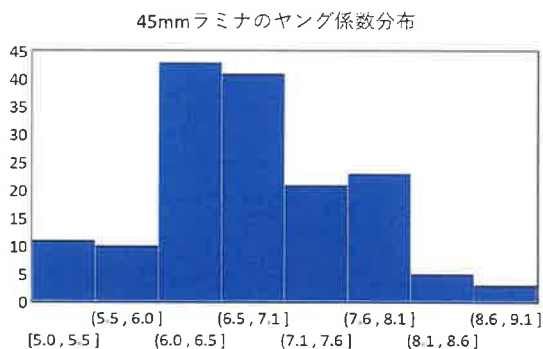
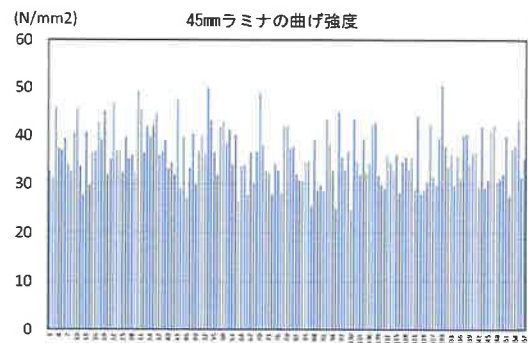
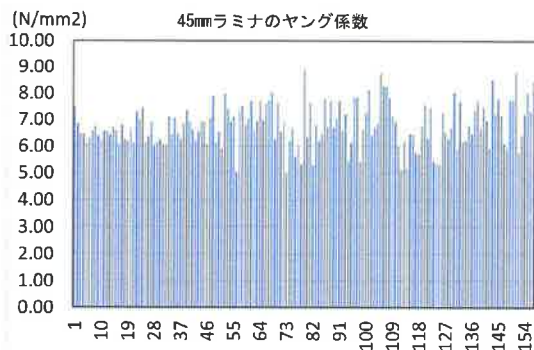
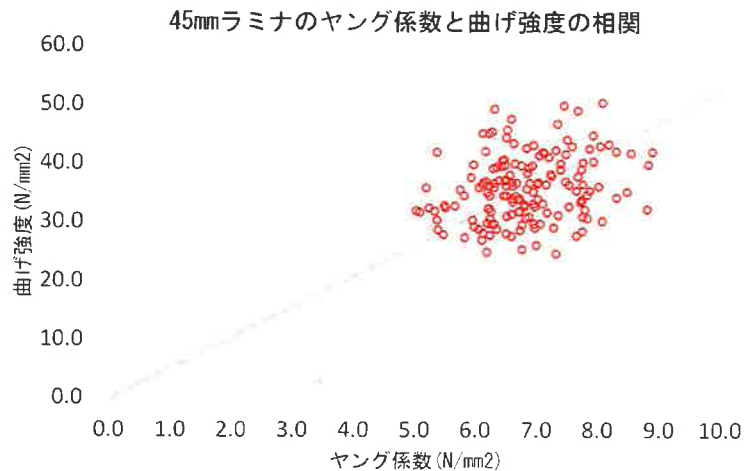
曲げ強度平均	35.8
曲げ強度下限	24.7
曲げ強度最大	50.4

K	1.82
ヤング (TL)	5.82
曲げ強度 (TL)	27.41

ヤング標準偏差	0.64
曲げ強度標準偏差	4.53

$\sigma_{b_oml} = 35.8 \text{ N/mm}^2$
 $\sigma_{b_oml\ 95} = 27.4 \text{ N/mm}^2$

$E_{bl} = 6780 \text{ N/mm}^2$
 $E_{bl\ 95} = 5820 \text{ N/mm}^2$



(2) 面外曲げ試験

a) 性能の検証の方法

- ・ 現行の設計規準より求まる基準強度 F_b に対し、実大曲げ試験より求まる CLT の降伏時の最大曲げ応力度 σ_b を比較し、 σ_b が F_b を上回っていることを確認する。
- ・ 検討は、実大曲げ試験より求まる σ_b の平均値、および変動係数に応じた 5% 下限値についても実施する。
- ・ ヤング係数については、設計規準より求まる値と、実大試験より求まる値が概ね整合することを確認する。この場合の検討項目としては、それぞれの平均値についての比較とする

b) 検証結果

	A試験体(3層4ﾌﾟﾗｲ150mm厚)				B試験体 (3層4ﾌﾟﾗｲ180mm厚)		C試験体(角欠け) (3層4ﾌﾟﾗｲ180mm厚)	
	第1回		第2回		計算強度	実験強度	計算強度	実験強度
	計算強度	実験強度	計算強度	実験強度				
平均値 (N/mm ²)	16.4	20.5	22.7	30.6	15.3	18.0	15.3	18.3
95%下限値 (N/mm ²)	12.3	16.4	17.1	25.2	11.5	14.1	11.5	15.6

- ・ 現行の設計規準式より求まる F_b に対し、面外曲げ試験より求まる σ_b が、大きく上回っていることを確認した。
- ・ また、ヤング係数についても、現行設計規準より求まる値に対し、面外せん断試験より求まる E は、概ね整合する結果を示していることを確認した。

c) 考察・懸念事項

- ・ 当初 DOL 試験機の動作確認のために実施した予備実験（第1回試験）において、DOL 試験の低い荷重レベルの試験結果で崩壊に至る時間が想定より短いケースが頻発した。この時点では、45 mm ラミナの曲げ強度の測定は実施していなかったが、フィンガージョイントに製造上の問題があったのではないかと懸念された。
- ・ その後、45mm ラミナについて適切な品質管理を行い第2回の実大曲げ試験および DOL 試験を実施したところ、実大曲げ試験における CLT 破壊強度は第1回に比べかなり大きな値となった。但し、DOL 試験では、低い荷重レベルにおいて崩壊に至る時間が予想に比べ短い現象については、改善は見られなかった。
- ・ 試みに、第1回の実大曲げ試験結果について、ラミナの曲げ強度を設計規準が定める 27N/mm² と仮定し検討を行うと、現行の設計規準式より求まる F_b に対し、面外曲げ試験より求まる CLT の σ_b を比較すると、後者が基準強度を大きく上回っている。
- ・ また、ヤング係数についても、現行設計規準より求まる値と、面外曲げ試験より求まる値は概ね整合している。

(3) 面外せん断試験

a)性能の検証の方法

- ・ 現行の設計規準より求まる基準強度 F_s に対し、実大面外曲げ試験より求まる CLT の降伏時の最大せん断応力度 σ_s を比較し、 σ_s が F_s を上回っていることを確認する。
- ・ 検討は、実大せん断試験より求まる σ_s の平均値について実施する。
- ・ ヤング係数については、設計規準より求まる値と、実大試験より求まる値が概ね整合することを確認する。この場合の検討項目としては、それぞれの平均値とする

b)検証結果

	A試験体 (3層4プライ150mm厚)		B試験体 (3層4プライ180mm厚)		C試験体(角欠け) (3層4プライ180mm厚)	
	計算強度	実験強度	計算強度	実験強度	計算強度	実験強度
平均値 (N/mm ²)	0.90	2.74	0.90	2.43	0.90	2.33

- ・ 現行の設計規準式より求まる基準強度 F_s に対し、面外せん断試験より求まる CLT の破壊時の応力度が大きく上回っていることを確認した。
- ・ また、せん断弾性係数についても、現行設計規準より求まる値が 24N/mm² であるのに対し、面外せん断試験より求まる G は、平均で 58N/mm² と概ね整合する結果を示している。

b)考察・懸念事項

- ・ 特に無し。

(4) 面内せん断試験

a)性能の検証の方法

- ・ 現行の設計規準より求まる基準強度 F_s に対し、実大面内せん断試験より求まる CLT の降伏時の最大せん断応力度 σ_s を比較し、 σ_s が F_s を上回っていることを確認する。
- ・ 検討は、実大面内せん断試験より求まる σ_s の 95%下限値について実施する。
- ・ ヤング係数については、設計規準より求まる値と、実大面内せん断試験より求まる値が概ね整合することを確認する。この場合の検討項目としては、それぞれの平均値とする

b)検証結果

	A試験体 (3層4プライ150mm厚)		B試験体 (3層4プライ180mm厚)		C試験体(角欠け) (3層4プライ180mm厚)	
	計算強度	実験強度	計算強度	実験強度	計算強度	実験強度
95%下限値 (N/mm)	0.84	5.09	0.84	3.66	0.84	3.32

- ・ 現行の設計規準式より求まる基準強度に対し、面内せん断試験より求まる CLT の破壊時の応力度は基準強度を大きく上回っている。
- ・ また、せん断弾性係数についても、現行設計規準より求まる値に対し、面内せん断試験より求まる G は概ね整合する結果を示している。

b) 考察・懸念事項

- ・ 特に無し。

(5) 荷重継続時間の調整係数

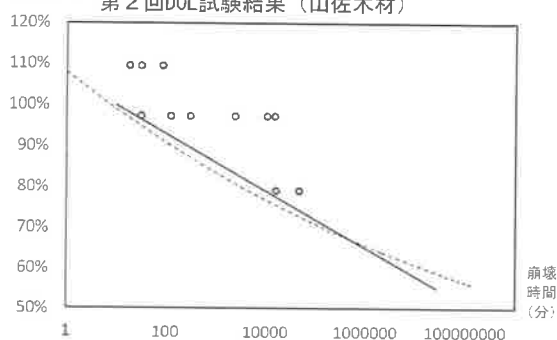
a) 検討結果

- ・ 山佐木材および北海道林産試験場で行われた、DOL 試験結果によれば、実験結果は概ね Madison カーブおよび現行設計規準に比較的良好に整合しており、概ね原稿設計規準と同等の結果を示しているものと判断される。

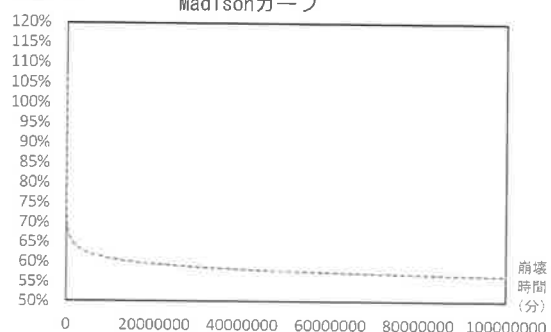
b) 考察・懸念事項

- ・ 現行設計規準の要求事項である、「少なくとも 1 以上の応力レベルについて、その応力レベルを与えた試験体の半数以上の破壊荷重継続時間が 6 か月以上となるようにしなければならない」を満足する応力レベルを特定することはできていない。
- ・ 当初、基準となる破壊荷重を面外曲げ試験より求まる破壊荷重の平均値としたが、基準となる破壊荷重を変動係数に応じた 5% 下限値として試験結果のグラフを書き直してみた。結果としては破壊に要する時間は、平均値を基準としたものに比べいずれも過大な値となり、各カーブとの整合は良いとは言えなかった。(下左図)
- ・ 試みに Madison カーブの横軸の対数表記を解除してみると、荷重レベル 65% から 60% 付近で、大きく変化する傾向にあることが分かる。これから類推すると、今回設定した荷重レベルは、上記の要求事項を満足するためには、やや過大であった可能性がある。(下右図)

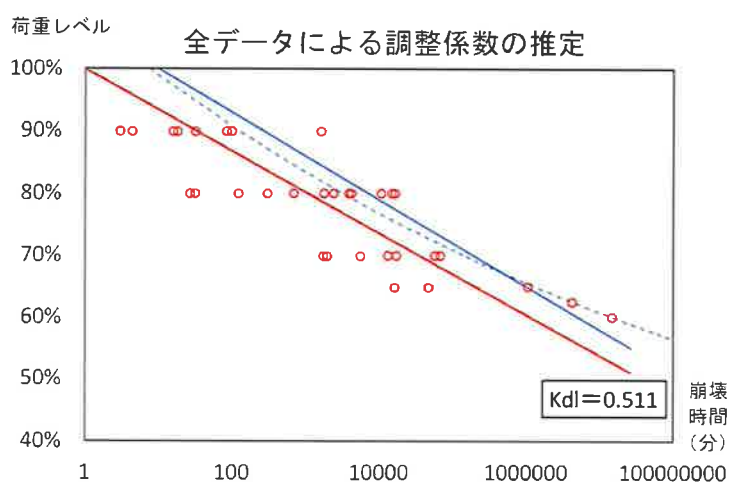
荷重レベル 第 2 回 DOL 試験結果 (山佐木材)



荷重レベル Madisonカーブ



- ・山佐木材第1回、第2回および北海道林産試験場で行った DOL 試験全データを一纏めにして、荷重継続時間の調整係数 K_{dl} の推定を行うと、0.511 となる。この値は、設計規準等によく用いられる 0.55 ともよく整合しており、また曲げ強度 F_d の値を考慮して、 K_{dl} を考慮した曲げ強度を求めてみると、実験値は計算値を大きく上回っており、要求事項を十分満たしていることが確認できる。
- ・尚、現在荷重レベル 65%については北海道林産試験場で、また 62.5%、60%については山佐木材で、試験がそれぞれ継続中である。下左図の推定では、これらの崩壊時間は Madison 曲線からの推定値を採用している。



	計算値	実験値
F_b	17.1	25.2
荷重継続時間の調整係数	0.55	0.511
F_{dl}	9.41	12.88

(6) クリープの調整係数

a) 検証結果

- ・北海道林産試験場で行われた、クリープ試験結果によれば、実験結果は概ね現行設計規準によく整合している。

b) 考察・懸念事項

- ・特に無し。

6. まとめ

以上より、45mm ラミナを主構成要素とする床専用ローコスト CLT の実大実験より求まる性能は、告示が定める性能を十分満たしていることが確認された。特に、異等厚のラミナ構成や、内層に角欠きラミナを含む CLT についても、告示の定める基準を十分満足することが確認できた。

従って、今回の事業により、床専用ローコスト型 CLT について、その実現可能性については、ほぼ確認できたと考えている。今後は、基準法 37 条認定に向けての作業を進めることになる。

2019年度 林野庁補助事業

ローコスト型CLT板の開発研究
一面内せん断実験 実験結果報告書一

福岡大学 倉富 洋

【目次】

1. 序論	・ ・ ・ 1
2. 実験計画	
2.1 試験体	・ ・ ・ 2
2.2 载荷装置	・ ・ ・ 10
3. 実験結果	
3.1 荷重－変形関係	・ ・ ・ 12
3.2 実験値と計算耐力の比較	・ ・ ・ 26
4. 結論	・ ・ ・ 73
謝辞・参考文献	・ ・ ・ 73

1. 序論

2010年代前半に本格的に我が国の研究開発が実施されたクロス・ラミネイティド・ティンバー（以下、CLTと略記）の普及促進が叫ばれて久しいが、未だ一般建築物まで広く普及しているとは言い難い。その課題は、コスト、施工、設計、供給体制等、様々な観点から議論され、その甲斐あってかCLTという言葉自体は広く知れ渡ってきたように推察される。

筆者らは木材市場活性化のため、非住宅建築物をターゲットとし、主に柱梁鉄骨造の床材にCLTを利活用する構法を提案している。本構法普及のためには、鉄筋コンクリートスラブとのコスト差をいかに埋めるかが課題となる。そこで、本研究課題では、CLT板自体のローコスト化を目指すことに取り組んだ。具体的には、厚さ45mmのラミナを使用することで接着層を減らすことおよび、内層ラミナの品質を落とすことで、CLT板のコスト削減を企図するものである。一方、こうしたラミナを使用することはCLT関連告示等解説書に規定されている範囲を逸脱することから、同解説書の第5章「CLTの企画・品質に関する技術的基準の解説書に記載されている力学的検討（構造実験）」を行なう必要がある。本報告書では、床構面内に発生するせん断力に対する性能を調べるために、面内せん断実験を実施したため、実験結果を中心に記述する。

2. 実験計画

2.1 試験体

新たな層構成としたCLTの面内せん断性状を検討するため、三点曲げ載荷実験を実施した。試験体詳細を図1に、試験体一覧を表1に、それぞれ示す。同図中、載荷方向に対して弱軸方向となるラミナを斜線で示している。実験変数は層構成（ラミナ厚、枚数）、フィンガージョイントの有無および内層ラミナの材質である。本実験では、ラミナ厚として30mm、36mmおよび45mmを使用し、三種類の層構成のCLTを製作した。試験体名の末尾にFJと記載されている試験体は、フィンガージョイントを有している。また、CLT-4FJwの「w」は内層ラミナに15mmの角欠きを設けた試験体である。なお、CLTにはスギMx60を使用した。

試験体CLT-1では、外層に45mm厚のラミナを、内層に30mm厚のラミナを使用したものである。本試験体はフィンガージョイントの有無をそれぞれ用意し、比較検討する。試験体CLT-2および試験体CLT-4は、外層および内層ともに45mm厚のラミナを使用し、床厚180mmを構成する。本シリーズにおけるCLT-4FJwのみ、角欠け内層ラミナを使用している。次に、試験体CLT-3は、外層および内層ともに36mm厚のラミナを用いている。ラミナ厚36mmは現行のCLT関連告示等解説書の規定内（24mm～36mm）であるが、3層5プライの層構成は認められていない。弱軸層を真中一層のみに配置した個の層構成は、主に一方向板としての使用を想定したものである。特にCLTの場合、強軸層の多寡によって性能が左右されるため、一方向板として使用する際の挙動を把握することは重要であると考えられる。試験体は各条件につき6体ずつ、合計36体実施した。

試験体は全長1300mmとし、支点間距離は900mmである。せいは300mmで統一し、せん断スパン比1.5としてせん断破壊先行とした。試験実施前に寸法、重量、含水率を測定した結果を表2から表4にそれぞれ示す。寸法測定箇所、含水率測定箇所は、図2および図3をそれぞれ参照されたい。なお、含水率計測には、写真1に示す高周波木材水分計HM-520（日本住宅・木材技術センター）を使用した。

表1 試験体一覧

試験体名	層構成	ラミナ厚 (mm)	厚さ (mm)	せい (mm)	長さ (mm)	FJの有無
CLT-1 FJ	Mx60-3-4	45/ <u>30</u> / <u>30</u> /45	150	300	1300	有
CLT-1	Mx60-3-4	45/ <u>30</u> / <u>30</u> /45	150	300	1300	無
CLT-2	Mx60-3-4	45/ <u>45</u> / <u>45</u> /45	180	300	1300	無
CLT-3 FJ	Mx60-3-5	36/36/ <u>36</u> /36/36	180	300	1300	有
CLT-4FJ	Mx60-3-4	45/ <u>45</u> / <u>45</u> /45	180	300	1300	有
CLT-4FJw	Mx60-3-4	45/ <u>45</u> / <u>45</u> /45	180	300	1300	有

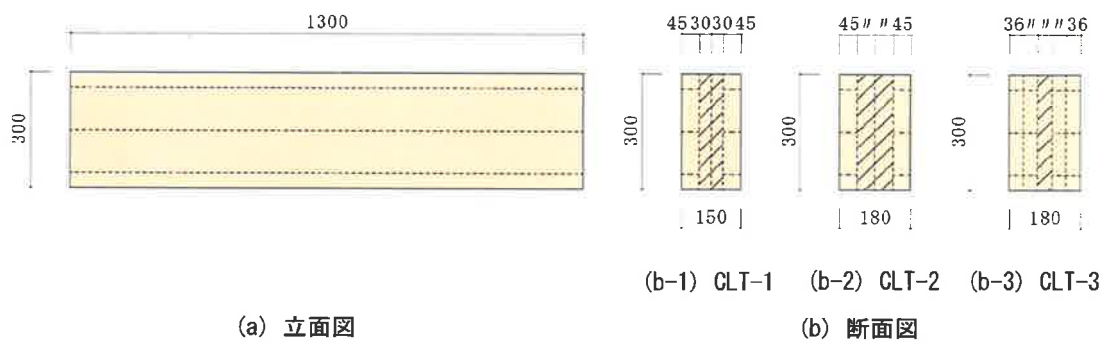


図1 試験体詳細

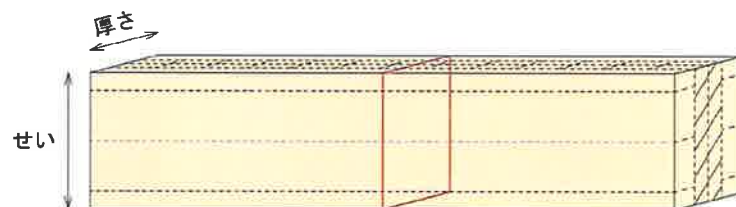


図2 寸法測定箇所（赤線で記載）

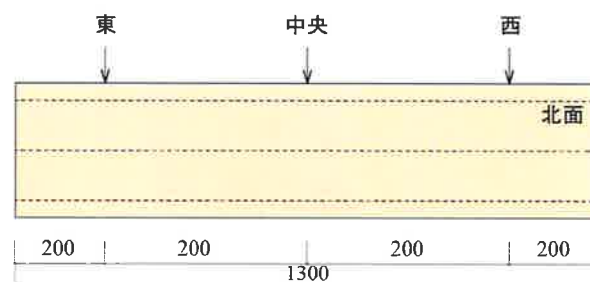


図3 含水率測定箇所



写真1 含水率計

表2-1 寸法測定結果

試験体No.	厚さ 上部 (mm)	厚さ 下部 (mm)	平均 (mm)	せい 北面 (mm)	せい 南面 (mm)	平均 (mm)
CLT-1FJ①	150.0	150.5	150.25	300.5	301.0	300.75
CLT-1FJ②	150.4	150.5	150.45	300.0	300.0	300.00
CLT-1FJ③	150.9	150.0	150.45	300.5	300.0	300.25
CLT-1FJ④	151.0	150.8	150.90	300.0	300.0	300.00
CLT-1FJ⑤	151.0	150.6	150.80	300.5	300.0	300.25
CLT-1FJ⑥	150.5	150.0	150.25	300.0	300.5	300.25
CLT-1①	150.0	150.0	150.00	300.0	300.5	300.25
CLT-1②	150.0	151.0	150.50	300.0	300.0	300.00
CLT-1③	150.5	150.5	150.50	300.5	300.0	300.25
CLT-1④	150.5	150.8	150.65	300.0	300.0	300.00
CLT-1⑤	150.0	150.9	150.45	300.5	300.0	300.25
CLT-1⑥	150.8	150.5	150.65	300.0	300.0	300.00
CLT-2①	180.5	180.5	180.50	300.3	300.0	300.15
CLT-2②	180.0	180.0	180.00	300.0	300.0	300.00
CLT-2③	180.2	180.0	180.10	300.0	300.5	300.25
CLT-2④	180.5	180.5	180.50	300.0	300.0	300.00
CLT-2⑤	181.0	180.8	180.90	300.5	300.0	300.25
CLT-2⑥	180.0	180.0	180.00	300.0	300.0	300.00
CLT-3 FJ①	180.6	180.3	180.45	300.0	300.0	300.00
CLT-3 FJ②	180.8	180.2	180.50	300.3	300.0	300.15
CLT-3 FJ③	180.5	180.8	180.65	300.5	300.0	300.25
CLT-3 FJ④	180.0	180.2	180.10	300.5	301.0	300.75
CLT-3 FJ⑤	180.8	181.0	180.90	300.0	300.5	300.25
CLT-3 FJ⑥	180.8	180.2	180.50	300.0	300.0	300.00

表2-2 寸法測定結果

試験体No.	厚さ 上部 (mm)	厚さ 下部 (mm)	平均 (mm)	せい 北面 (mm)	せい 南面 (mm)	平均 (mm)
CLT-4FJ①	180.7	181.0	180.85	300.0	300.0	300.00
CLT-4FJ②	180.8	180.8	180.78	300.0	300.0	300.00
CLT-4FJ③	180.5	180.2	180.35	300.0	300.0	300.00
CLT-4FJ④	181.0	180.9	180.95	300.0	300.0	300.00
CLT-4FJ⑤	181.0	181.1	181.05	300.0	300.0	300.00
CLT-4FJ⑥	180.9	180.6	180.75	299.9	300.0	299.95
CLT-4FJw①	180.7	180.4	180.55	300.0	300.0	300.00
CLT-4FJw②	180.4	180.5	180.45	300.0	300.0	300.00
CLT-4FJw③	180.8	180.8	180.78	299.8	300.0	299.90
CLT-4FJw④	180.6	180.4	180.50	300.0	300.0	300.00
CLT-4FJw⑤	180.6	180.5	180.53	300.0	300.0	300.00
CLT-4FJw⑥	180.6	180.5	180.55	300.0	300.0	300.00

表3-1 重量計測結果

試験体No.	厚さ 平均 (cm)	せい 平均 (cm)	材長 (cm)	重量 (g)	比重 (g/cm ³)
CLT-1FJ①	15.03	30.08	130	24970	0.425
CLT-1FJ②	15.05	30.00	130	24060	0.410
CLT-1FJ③	15.05	30.03	130	24120	0.411
CLT-1FJ④	15.09	30.00	130	23840	0.405
CLT-1FJ⑤	15.08	30.03	130	22980	0.390
CLT-1FJ⑥	15.03	30.03	130	24120	0.411
CLT-1①	15.00	30.03	130	24430	0.417
CLT-1②	15.05	30.00	130	24650	0.420
CLT-1③	15.05	30.03	130	24410	0.415
CLT-1④	15.07	30.00	130	25170	0.428
CLT-1⑤	15.05	30.03	130	24300	0.414
CLT-1⑥	15.07	30.00	130	24090	0.410
CLT-2①	18.05	30.02	130	30440	0.432
CLT-2②	18.00	30.00	130	30460	0.434
CLT-2③	18.01	30.03	130	30360	0.432
CLT-2④	18.05	30.00	130	29820	0.424
CLT-2⑤	18.09	30.03	130	30210	0.428
CLT-2⑥	18.00	30.00	130	30690	0.437
CLT-3 FJ①	18.05	30.00	130	30740	0.437
CLT-3 FJ②	18.05	30.02	130	29750	0.422
CLT-3 FJ③	18.07	30.03	130	31040	0.440
CLT-3 FJ④	18.01	30.08	130	29790	0.423
CLT-3 FJ⑤	18.09	30.03	130	30150	0.427
CLT-3 FJ⑥	18.05	30.00	130	30360	0.431

表3-2 重量計測結果

試験体No.	厚さ 平均 (cm)	せい 平均 (cm)	材長 (cm)	重量 (g)	比重 (g/cm ³)
CLT-4FJ①	18.09	30.00	130	27980	0.397
CLT-4FJ②	18.08	30.00	130	27900	0.396
CLT-4FJ③	18.04	30.00	130	28050	0.399
CLT-4FJ④	18.10	30.00	130	27950	0.396
CLT-4FJ⑤	18.11	30.00	130	27870	0.395
CLT-4FJ⑥	18.08	30.00	130	28350	0.402
CLT-4FJw①	18.06	30.00	130	28060	0.398
CLT-4FJw②	18.05	30.00	130	28110	0.399
CLT-4FJw③	18.08	29.99	130	27430	0.389
CLT-4FJw④	18.05	30.00	130	27340	0.388
CLT-4FJw⑤	18.05	30.00	130	27570	0.392
CLT-4FJw⑥	18.06	30.00	130	27200	0.386

表4-1 含水率測定結果

試験体No.	東 (%)	中央 (%)	西 (%)	平均 (%)
CLT-1FJ①	10.5	16.5	15.0	14.0
CLT-1FJ②	20.5	13.0	12.0	15.2
CLT-1FJ③	14.0	11.5	10.5	12.0
CLT-1FJ④	14.5	14.0	17.5	15.3
CLT-1FJ⑤	17.0	14.5	11.0	14.2
CLT-1FJ⑥	16.0	11.5	10.5	12.7
CLT-1①	17.0	15.0	16.0	16.0
CLT-1②	15.5	16.0	15.0	15.5
CLT-1③	15.5	15.0	16.5	15.7
CLT-1④	16.5	16.0	16.0	16.2
CLT-1⑤	17.0	14.5	16.5	16.0
CLT-1⑥	17.5	13.5	15.0	15.3
CLT-2①	21.0	15.0	15.5	17.2
CLT-2②	18.0	22.0	16.5	18.8
CLT-2③	16.5	20.0	17.0	17.8
CLT-2④	20.0	15.5	16.5	17.3
CLT-2⑤	21.0	15.0	17.5	17.8
CLT-2⑥	18.0	22.5	20.5	20.3
CLT-3 FJ①	16.5	14.0	17.0	15.8
CLT-3 FJ②	17.0	19.5	16.0	17.5
CLT-3 FJ③	17.5	16.0	19.0	17.5
CLT-3 FJ④	16.0	12.0	17.5	15.2
CLT-3 FJ⑤	17.5	15.5	14.0	15.7
CLT-3 FJ⑥	14.5	12.5	14.5	13.8

表4-2 含水率測定結果

試験体No.	東 (%)	中央 (%)	西 (%)	平均 (%)
CLT-4FJ①	13.0	14.0	12.0	13.0
CLT-4FJ②	12.5	13.5	12.5	12.8
CLT-4FJ③	12.0	19.5	12.5	14.7
CLT-4FJ④	11.5	18.0	14.0	14.5
CLT-4FJ⑤	12.0	13.0	17.0	14.0
CLT-4FJ⑥	13.0	14.0	14.0	13.7
CLT-4FJw①	14.0	16.0	20.0	16.7
CLT-4FJw②	13.5	16.5	17.5	15.8
CLT-4FJw③	15.5	20.5	16.0	17.3
CLT-4FJw④	14.0	20.0	14.5	16.2
CLT-4FJw⑤	13.5	17.5	19.0	16.7
CLT-4FJw⑥	15.0	18.0	17.5	16.8

2.2 載荷方法

載荷装置を図4に示す。試験方法は三点曲げ載荷実験とした²⁾。試験機には福岡大学5000kN試験機を用い、一方向に単調に載荷した。支点は両端ローラー支承とし、載荷台とピンの間にグリスを塗布したテフロンシートを敷いた（写真2および写真3参照）。載荷点はピンとテフロンシートで挟み込んだ加圧板を設置した。

変形は載荷点における鉛直変位を、中立軸位置における相対変位（変位計Aおよび変位計B）と絶対変位（変位計Cおよび変位計D）の二種類測定した。相対変位はスパン内にヨーク（図5参照）を設置して測定している。ヨークは試験体の支点位置に設けた10φの貫通孔に寸切りボルトを通し、手締めにて緩く固定した。CLT側には中立軸位置に素ガラスを固定したアングルをビス留めし、変位計の先端を設置した。絶対変位は載荷台にマグネットスタンドを設置し、上述した素ガラスに当てている。

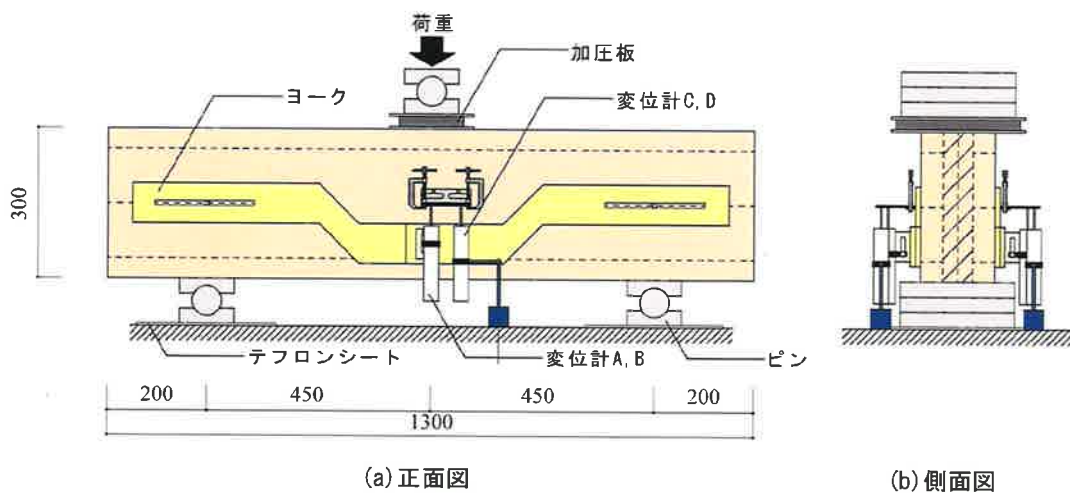


図4 載荷方法

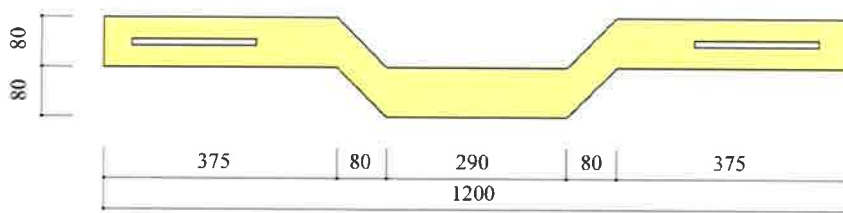
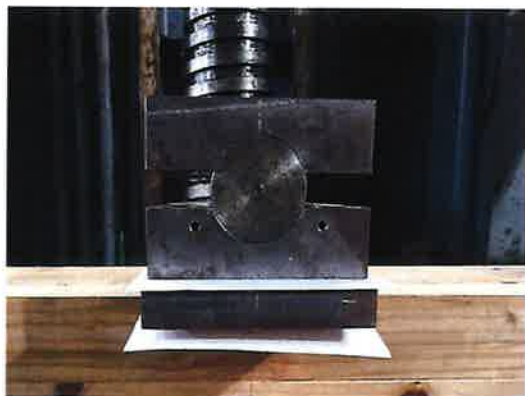


図5 ヨーク寸法



(a) 上部



(b) 下部

写真2 ピンの様子



(a) 北面



(b) 南面

写真3 設置風景

3. 実験結果

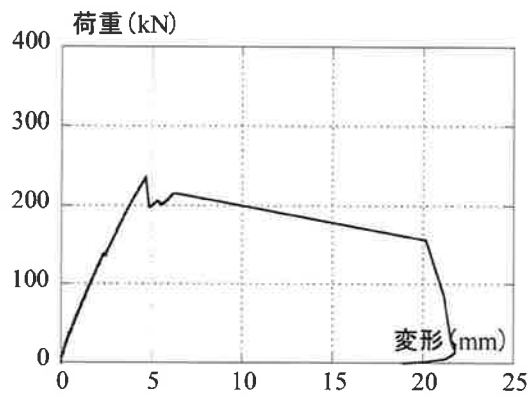
3.1 荷重－変形関係

実験で得られた荷重－変形関係を図6に示す。縦軸は5000kN試験機から得られた値を、横軸の変形にはヨーク変位計の平均値をとっている。本実験では同一条件で6試験体ずつ実施しているため、①～⑥の通し番号で管理している。図7では各試験体シリーズにおいて、6体分をまとめたグラフを記載している。また、主要な実験結果一覧を表5に、各試験体の実験後の写真を写真4に、それぞれ示す。なお、同表中、初期剛性 K は変形2.25mm（変形角にして0.5%）における割線剛性とし、変形角 R はヨークに取りつけた二本の変形の平均値を試験区間長さ450mmで除した値である。せん断応力度 τ は荷重 P を断面積で除した値に3/2を乗じた。

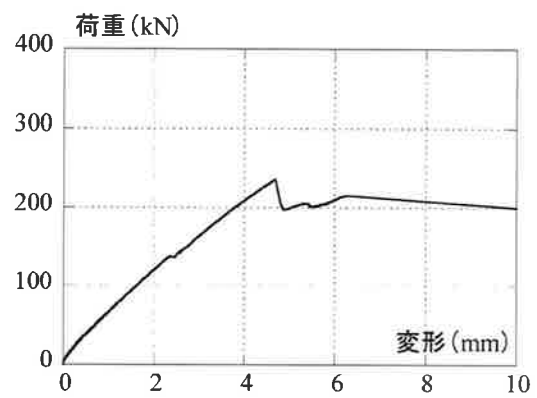
まず、フィンガージョイント（以下、FJと略記）の有無による比較を行なう。FJ有の試験体であるCLT-1 FJおよびCLT-3 FJ、CLT-4 FJは、試験体におけるばらつきは小さくみられた。一方、FJを設けなかった試験体CLT-1および試験体CLT-2はばらつきが大きかった。これは、FJ有の試験体がFJ部で破壊されたのに対し、FJ無の試験体は破壊位置が試験体によって異なったためだと推察される。FJ有のほとんどの試験体はFJ部で破壊されると同時に急激な耐力低下が見られたが、FJ無の試験体は変形の進行とともにこまめにラミナ表面に亀裂が生じ、耐力の増減を繰り返しながら破壊へと至った。最大耐力について試験体CLT-1 FJと試験体CLT-1で比較すると、FJ無の方が最大耐力は大きく発揮されていることが分かる（図7(a)および(b)参照）。これは、試験体CLT-2と試験体CLT-4との比較でも同様の傾向が見られている（図7(c)および(e)参照）。

次いで、ラミナの層構成の違いによる比較を行なう。試験体CLT-1と試験体CLT-2においては、最大耐力は断面積の大きい試験体CLT-2の方が大きく発揮されているが、せん断応力度に換算すると試験体CLT-1の方が大きくなっている。これは、総厚に対する強軸層の割合が影響しているものと考えられる。試験体CLT-1では、総厚に対する強軸層の割合は2/3に対して、試験体CLT-2では1/2である。このことは、試験体CLT-1 FJと試験体CLT-3 FJの比較にも同じことが云える。試験体CLT-3 FJの総厚に対する強軸層の割合は4/5であるため、割合1/2である試験体CLT-1 FJよりせん断応力度は大きく発揮されている。このことより、最大耐力の大きさは総厚に依存するが、せん断応力度に換算すると、値が大きくなるのは強軸層の割合が大きい層構成を有していることが云える。

試験体CLT-4 FJと試験体CLT-4 FJwの比較により、内層に角欠けラミナを使用した影響について考察する。荷重－変形関係においては、いずれも挙動に明瞭な差異は見られなかった。しかしながら、表6-2より初期剛性および最大耐力に着目すると、いずれの数値とも内層角欠けラミナを使用した試験体CLT-4 FJwは試験体CLT-4 FJの90%ほどとなり、僅かながらラミナ角欠けの影響が見られた。表7-2に示したせん断弾性係数では、試験体CLT-4 FJは482N/mm²に対し、内層角欠け試験体CLT-4 FJwは413N/mm²となり、85%ほどに低く発揮されている。

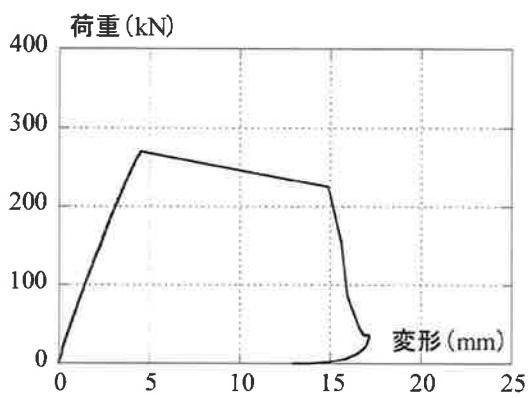


(a-1) 全体

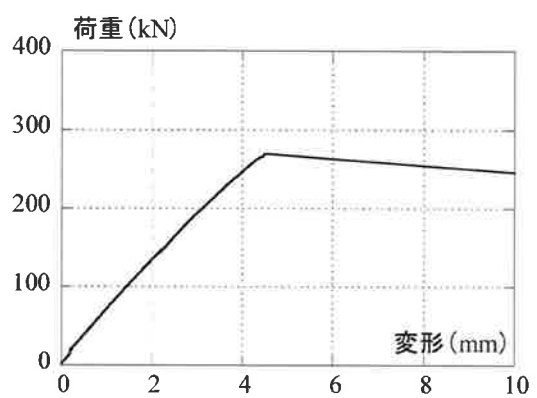


(a-2) 10mmまでの拡大

(a) CLT1-FJ①

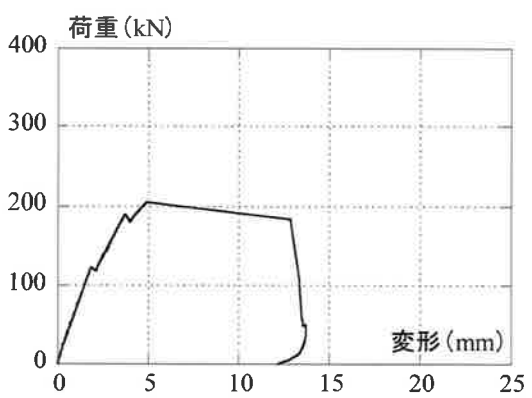


(b-1) 全体

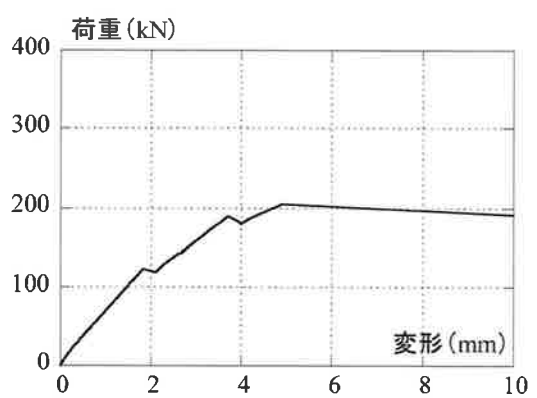


(b-2) 10mmまでの拡大

(b) CLT1-FJ②



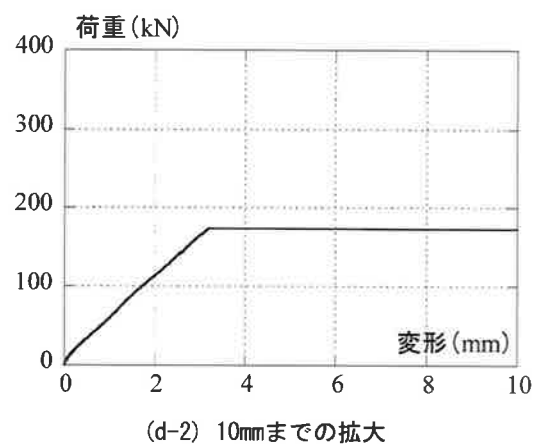
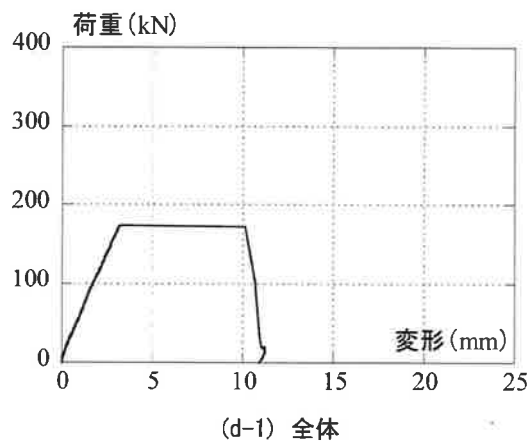
(c-1) 全体



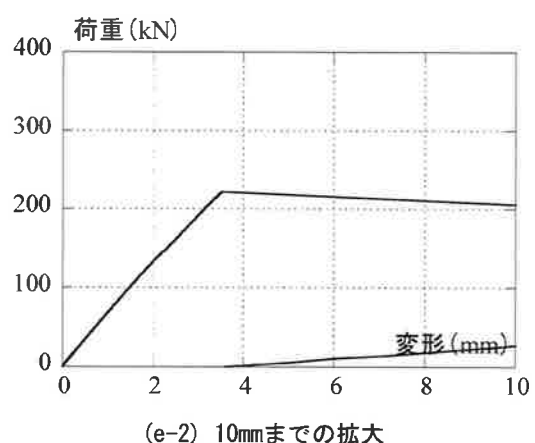
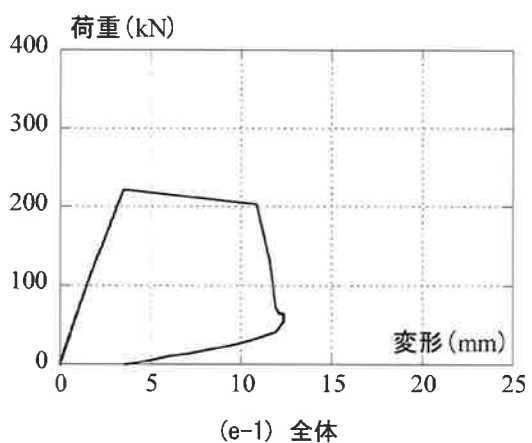
(c-2) 10mmまでの拡大

(c) CLT1-FJ③

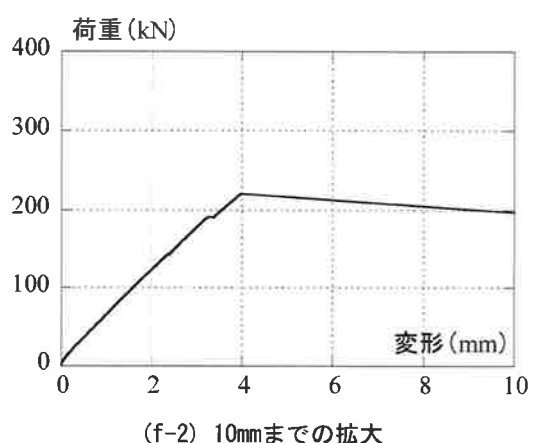
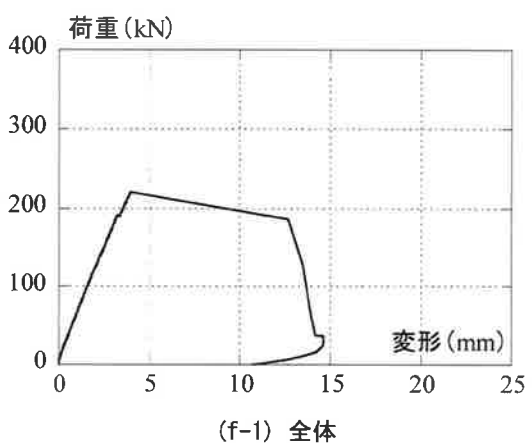
図6 荷重－変形角関係（つづく）



(d) GLT1-FJ④

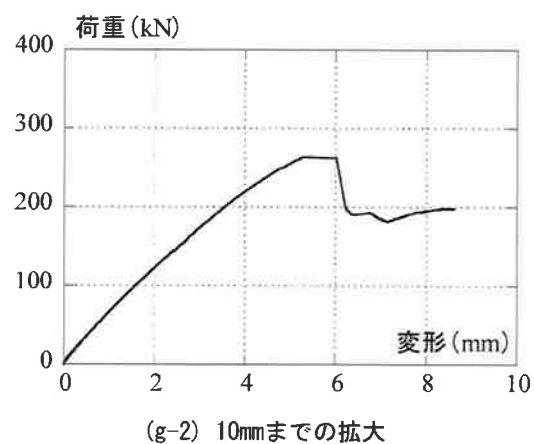
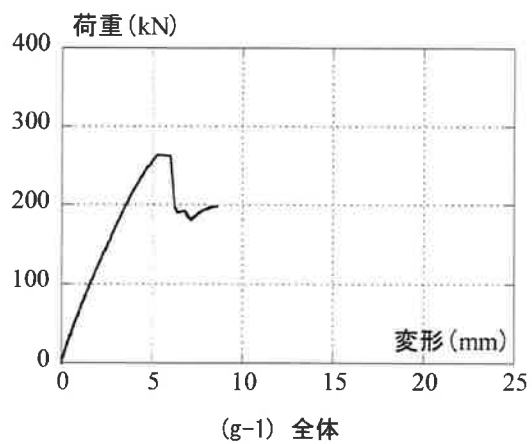


(e) GLT1-FJ⑤

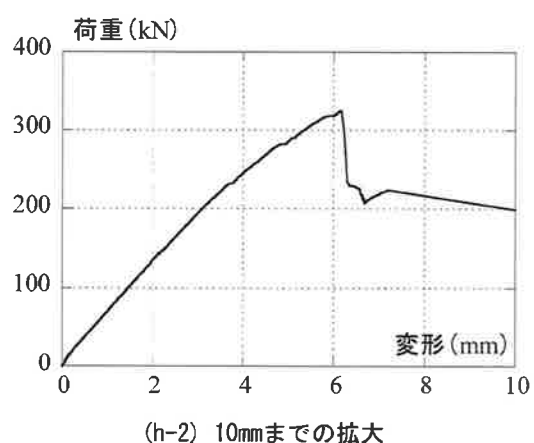
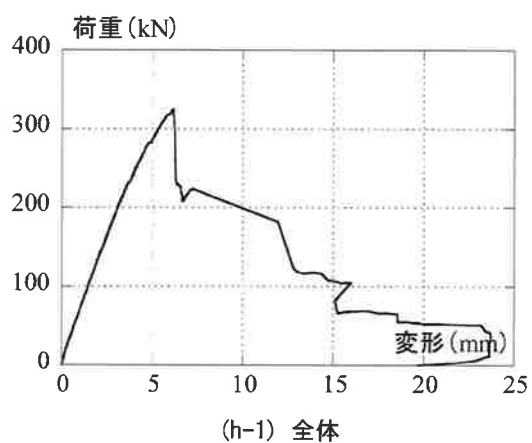


(f) GLT1-FJ⑥

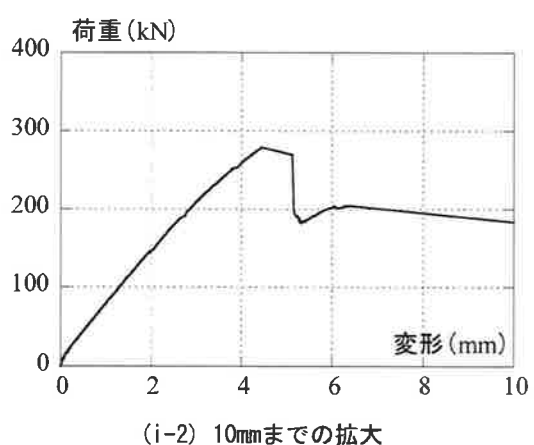
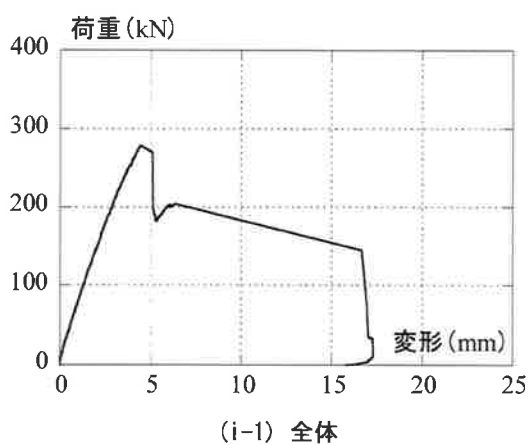
図6 荷重－変形角関係（つづく）



(g) CLT-1①

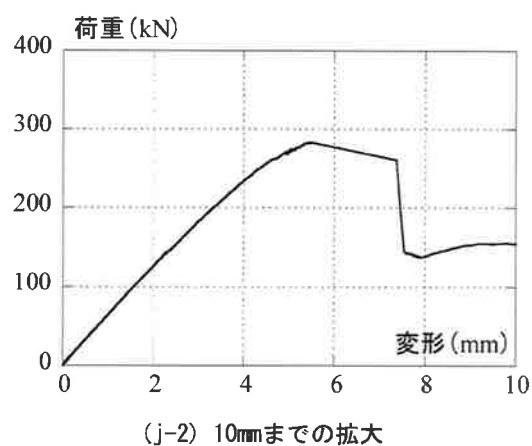
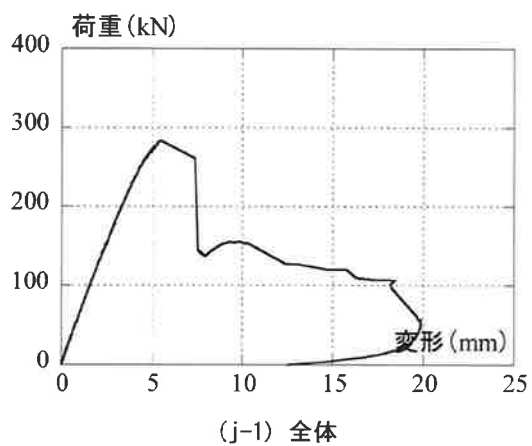


(h) CLT-1②

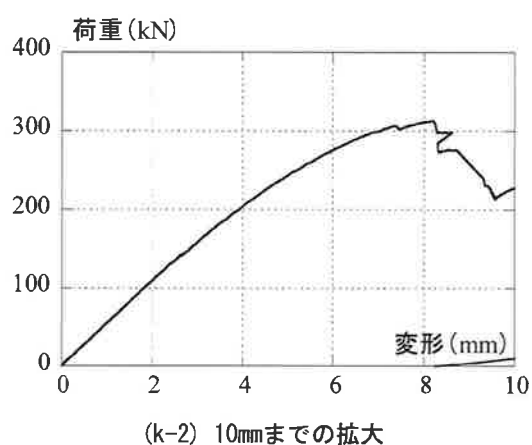
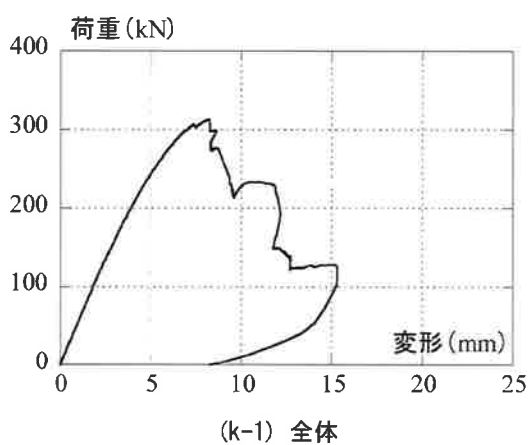


(i) CLT-1③

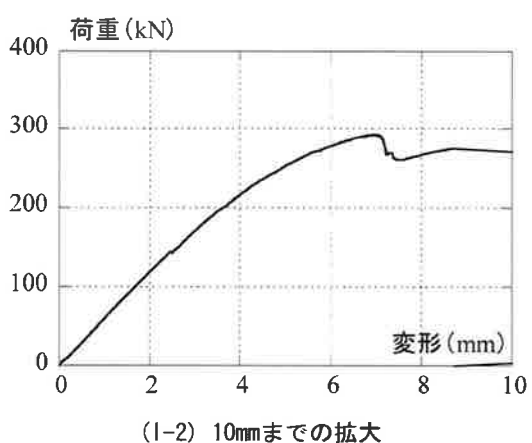
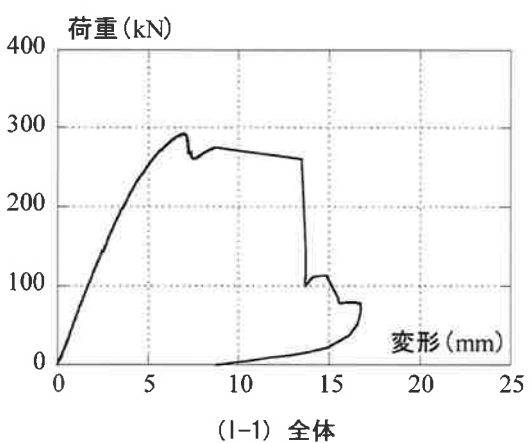
図6 荷重－変形角関係（つづく）



(j) CLT-1④

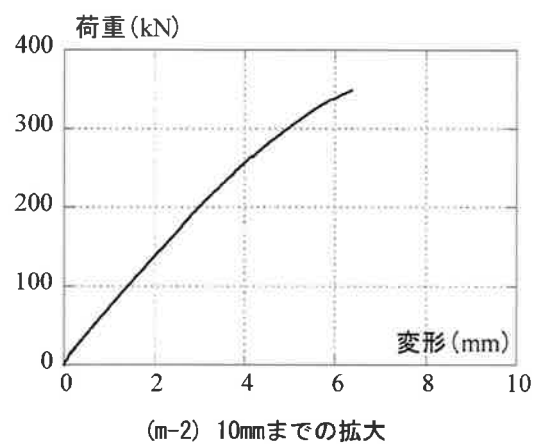
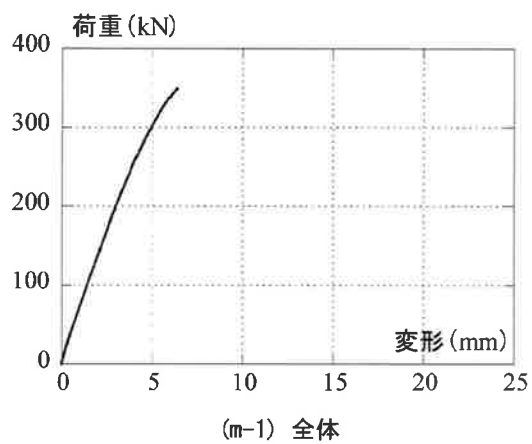


(k) CLT-1⑤

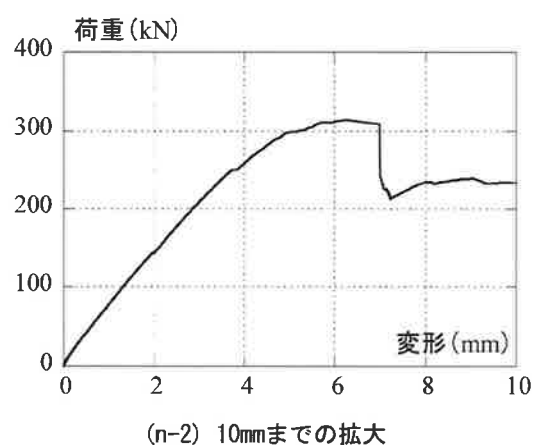
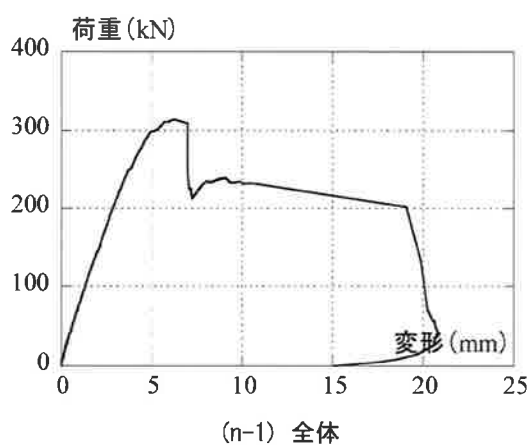


(l) CLT-1⑥

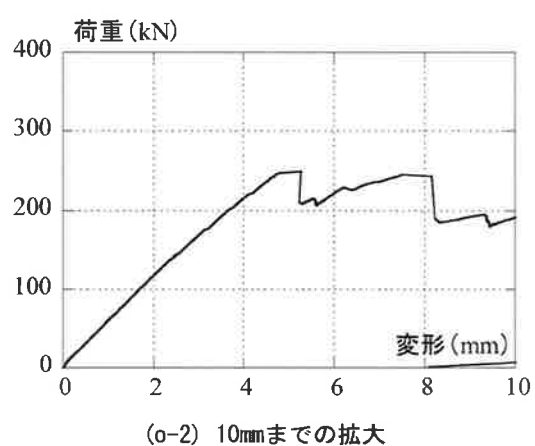
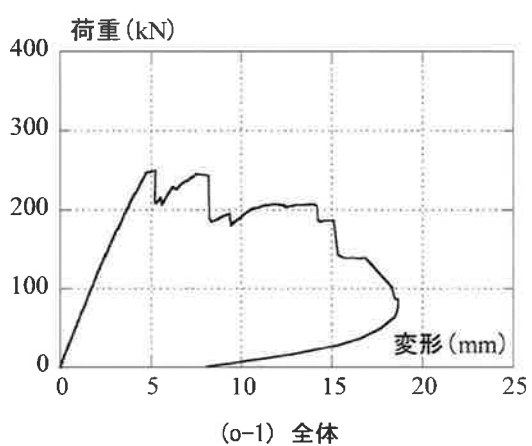
図6 荷重－変形角関係（つづく）



(m) CLT-2①

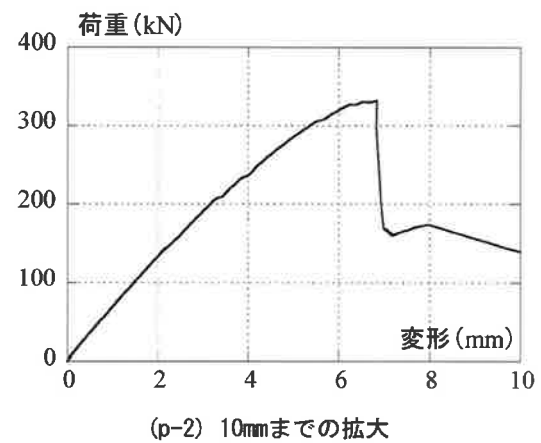
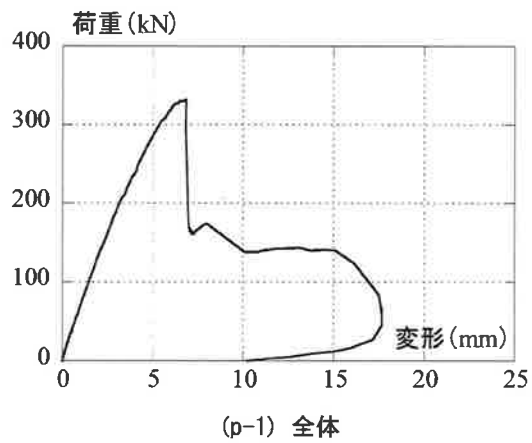


(n) CLT-2②

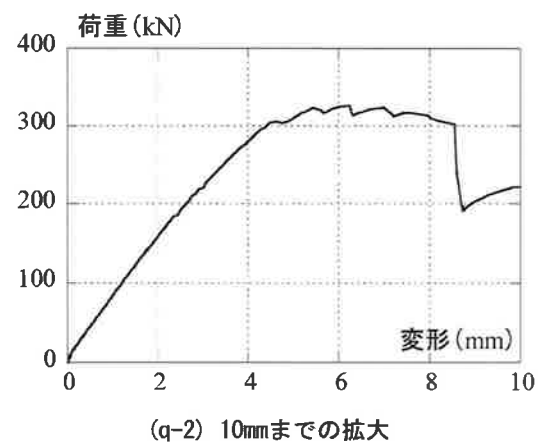
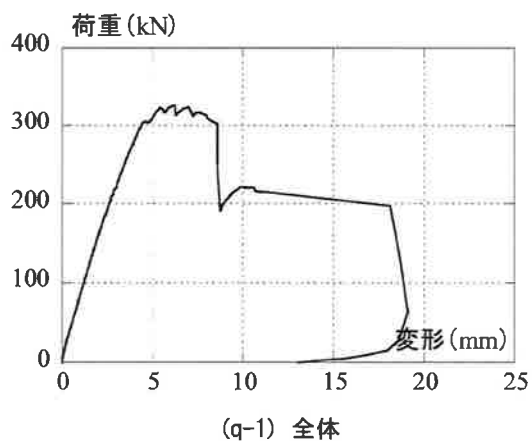


(o) CLT-2③

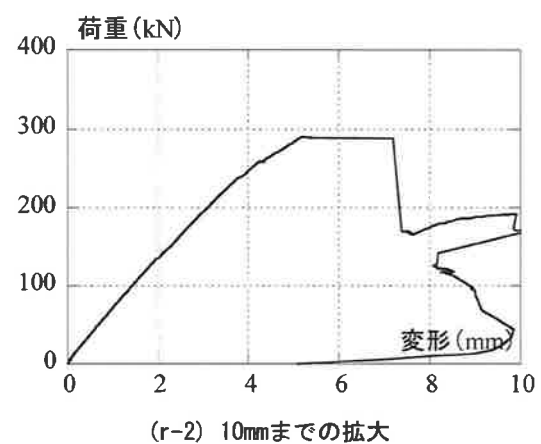
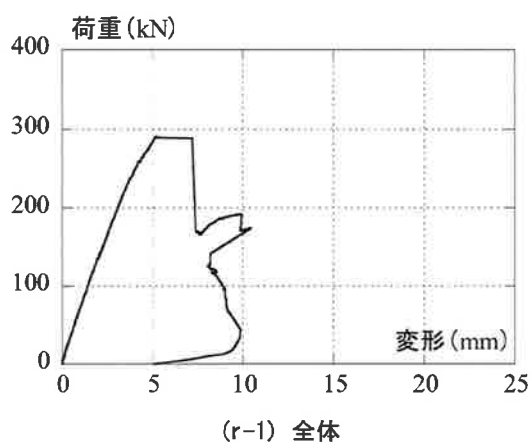
図6 荷重－変形角関係（つづく）



(p) CLT-2④

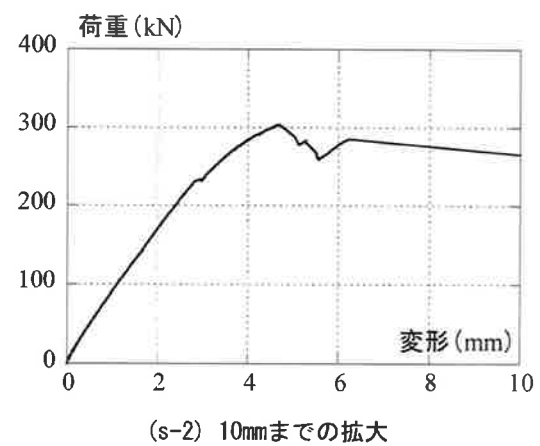
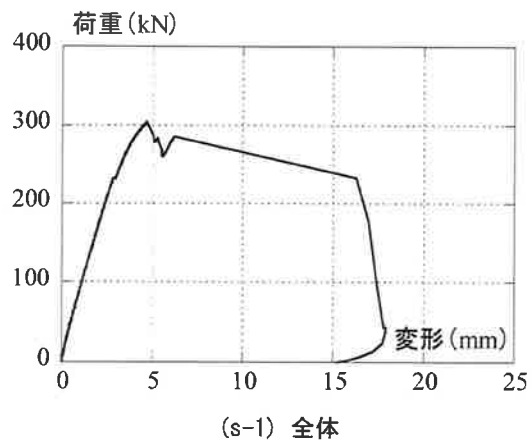


(q) CLT-2⑤

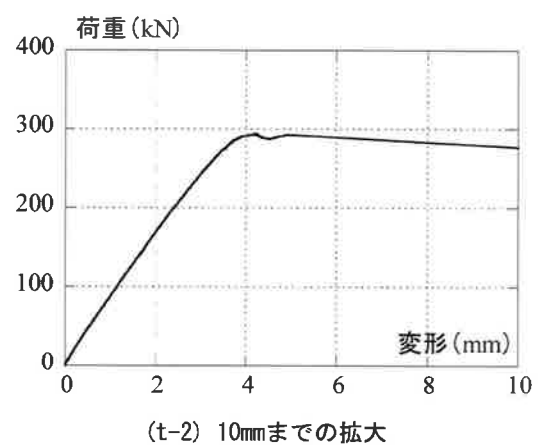
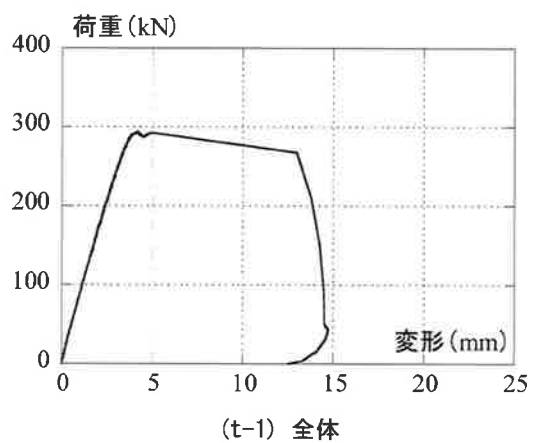


(r) CLT-2⑥

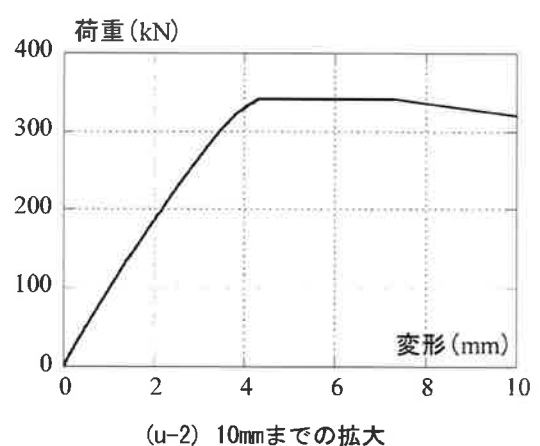
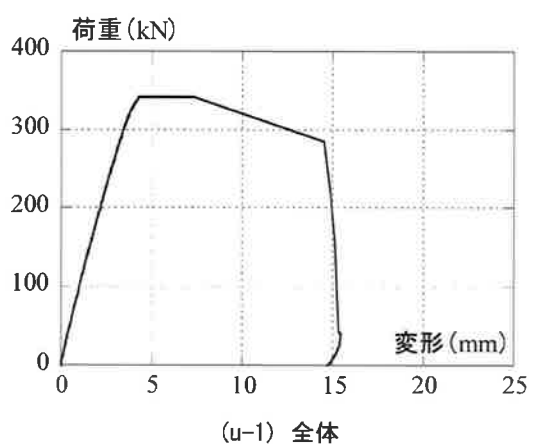
図6 荷重－変形角関係（つづく）



(s) CLT-3FJ①

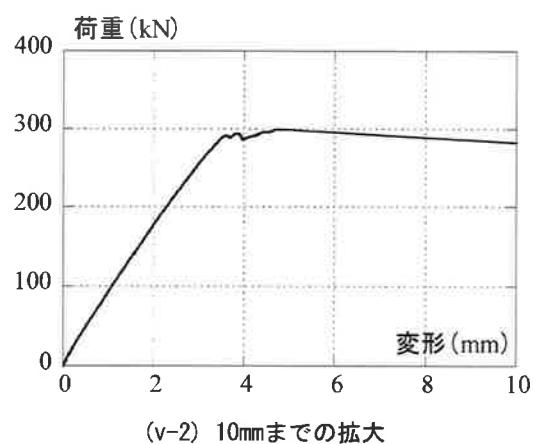
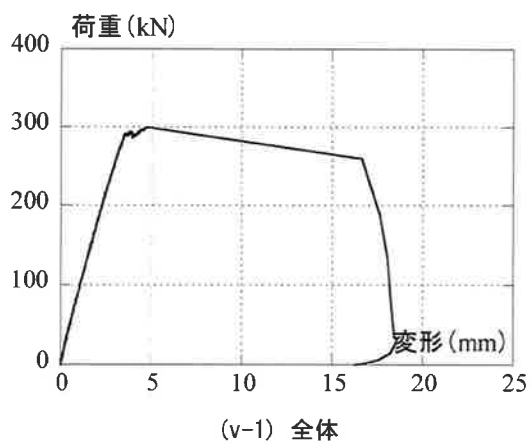


(t) CLT-3FJ②

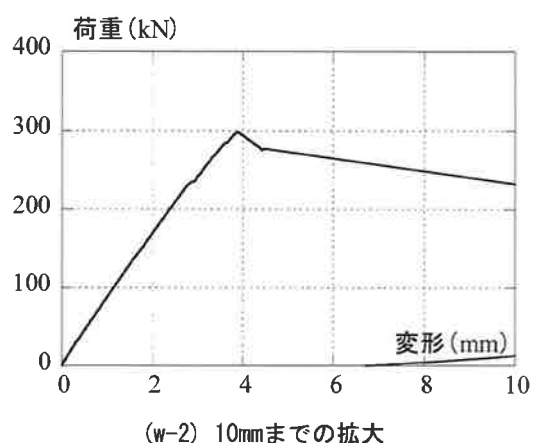
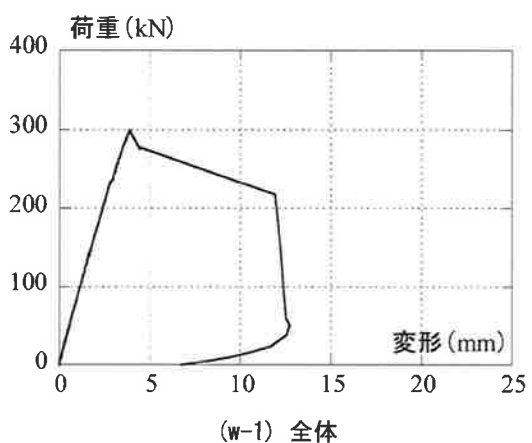


(u) CLT-3FJ③

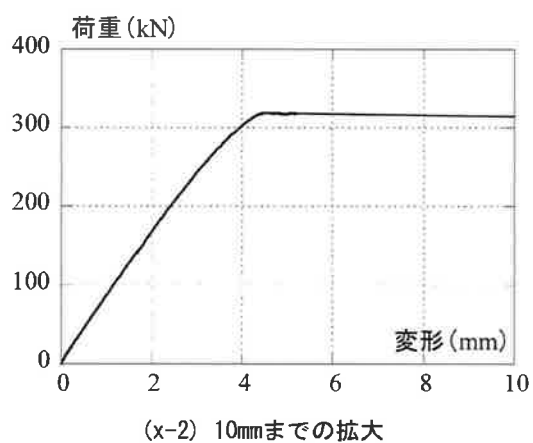
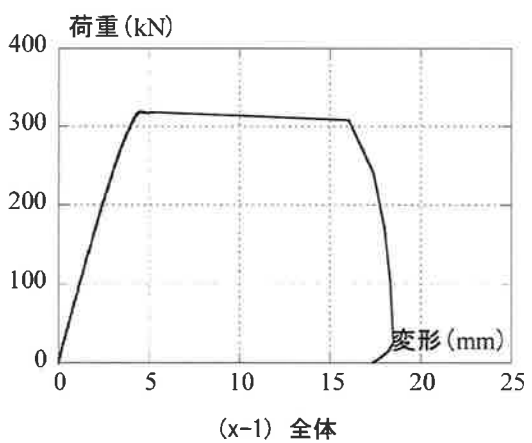
図6 荷重－変形角関係（つづく）



(v) CLT-3FJ④

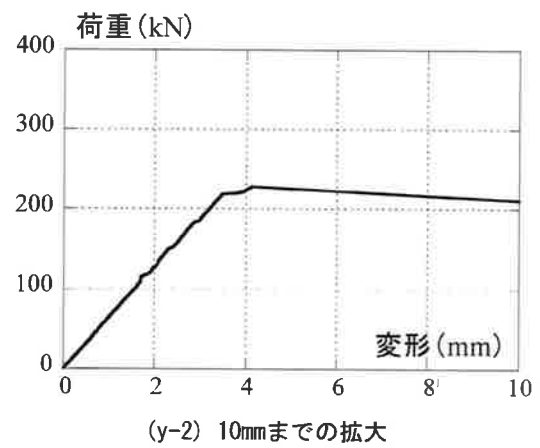
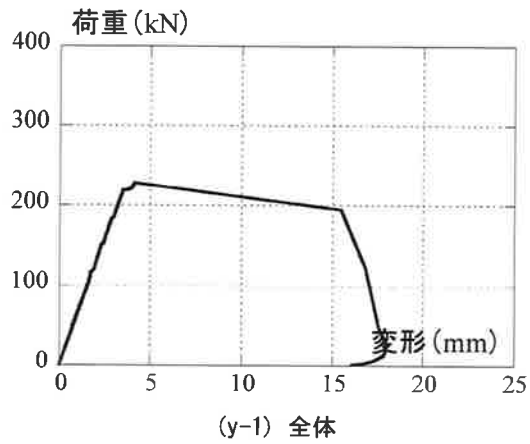


(w) CLT-3FJ⑤

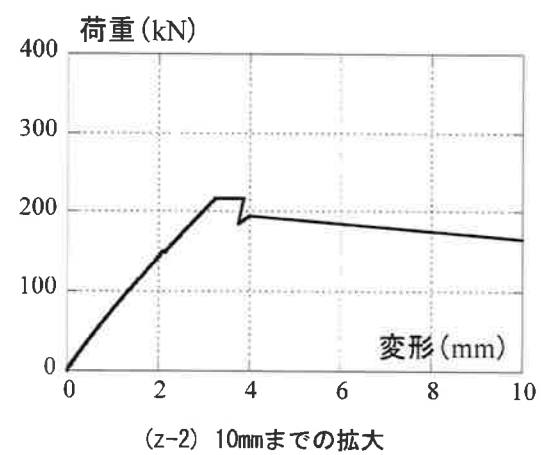
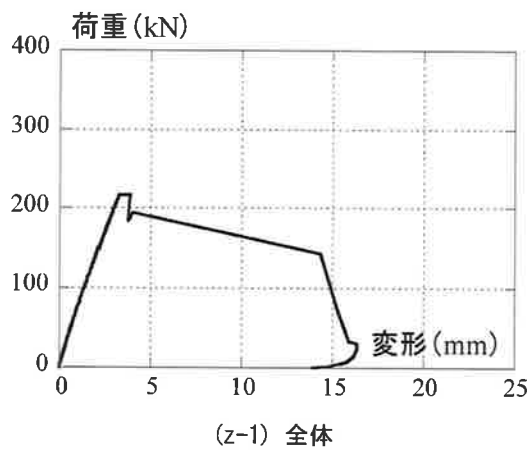


(x) CLT-3FJ⑥

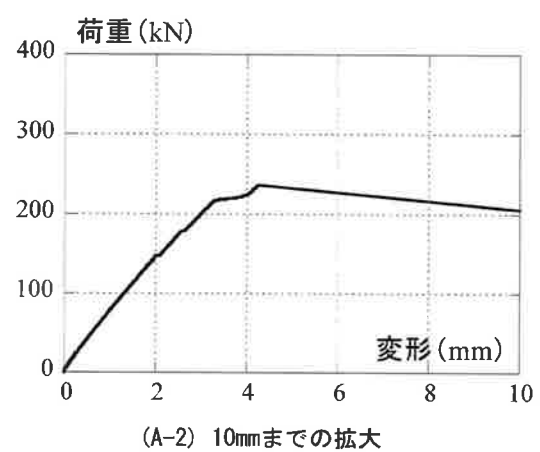
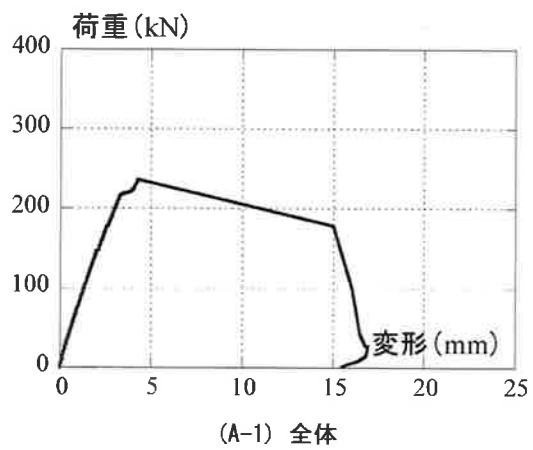
図6 荷重－変形角関係 (つづき)



(y) CLT-4FJ①

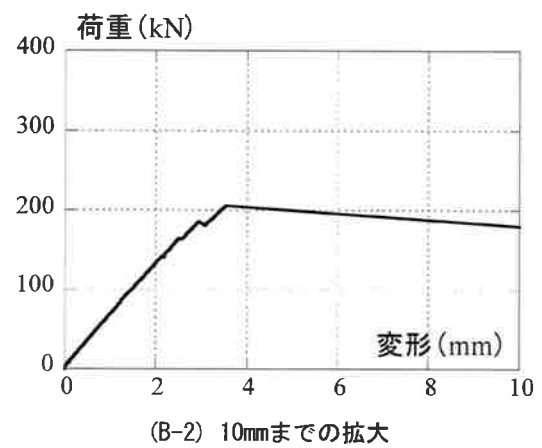
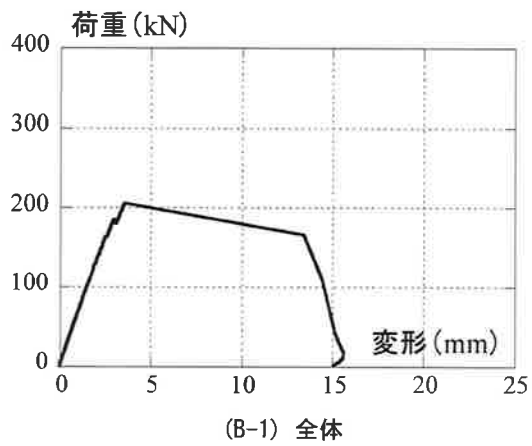


(z) CLT-4FJ②

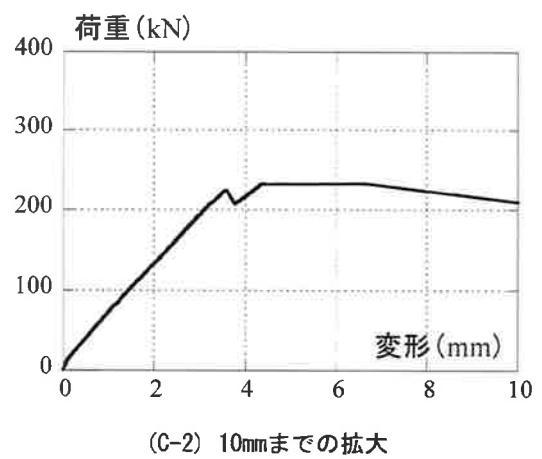
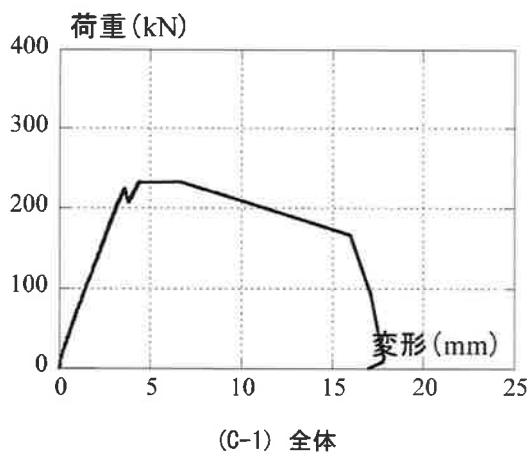


(A) CLT-4FJ③

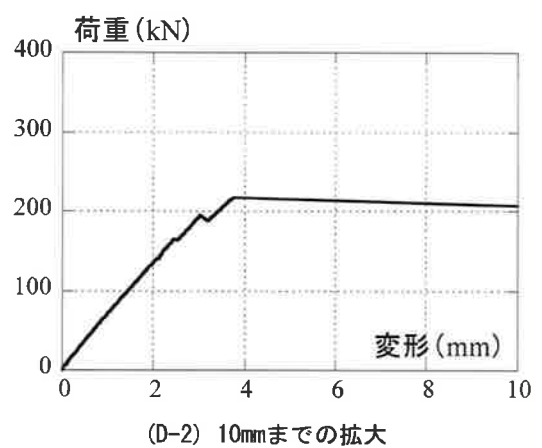
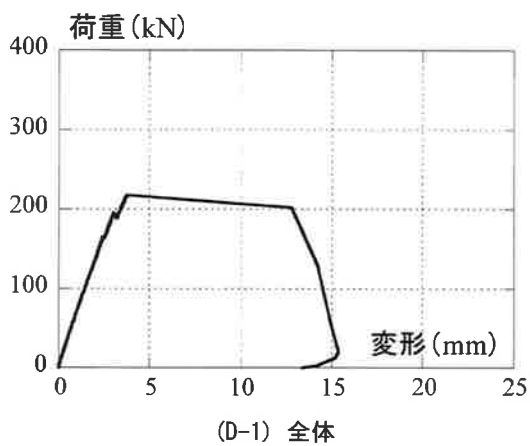
図6 荷重－変形角関係（つづく）



(B) CLT-4FJ④

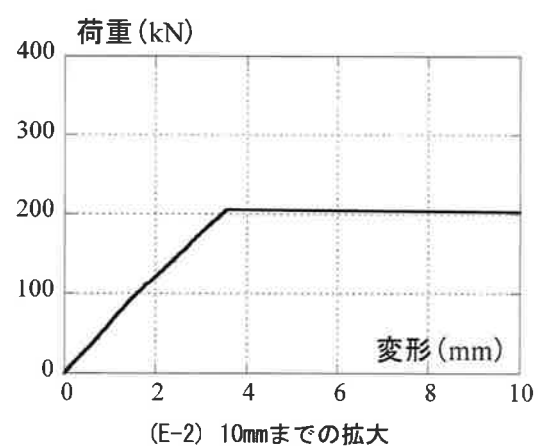
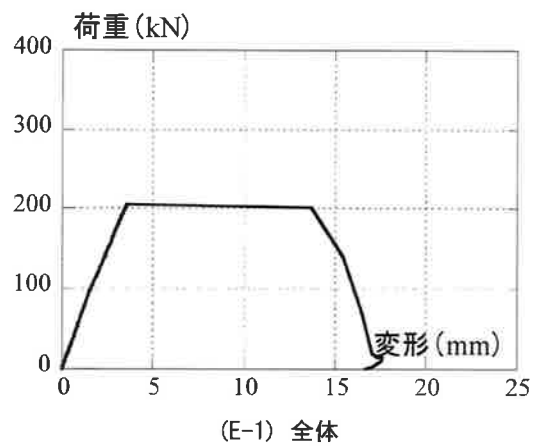


(C) CLT-4FJ⑤

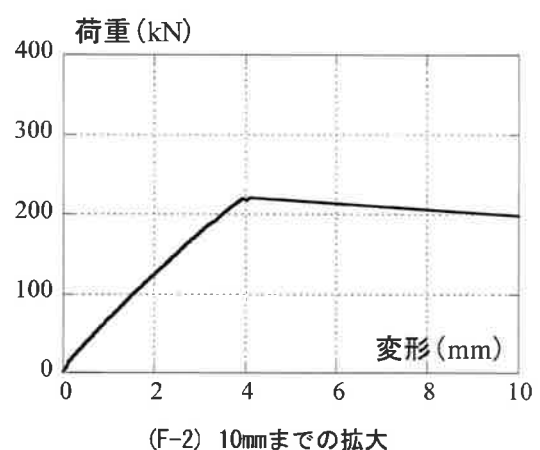
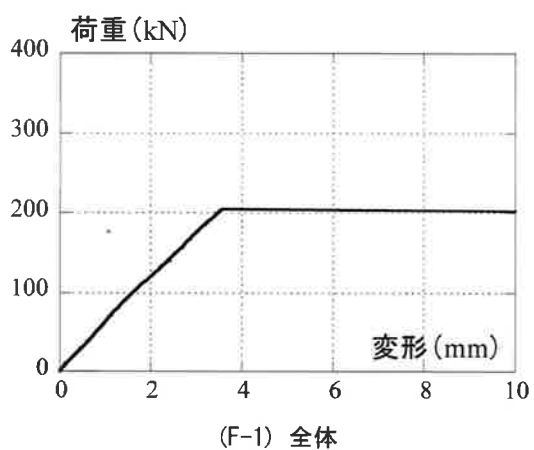


(D) CLT-4FJ⑥

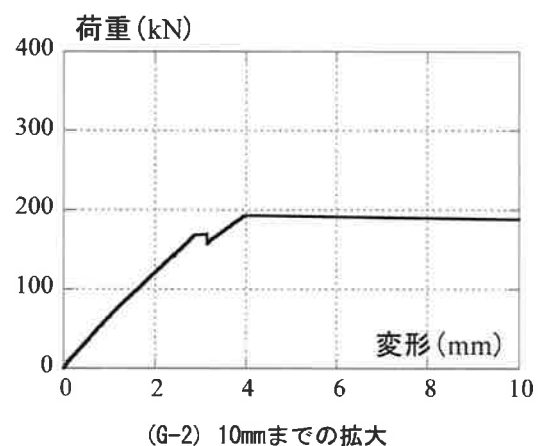
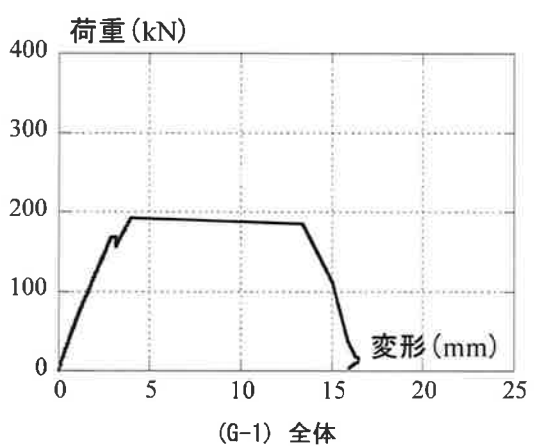
図6 荷重－変形角関係（つづく）



(E) GLT-4FJw①

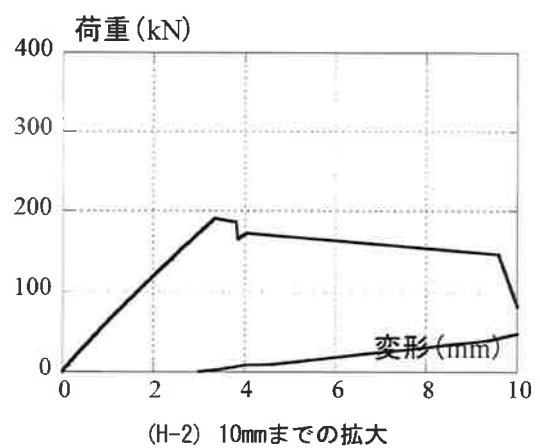
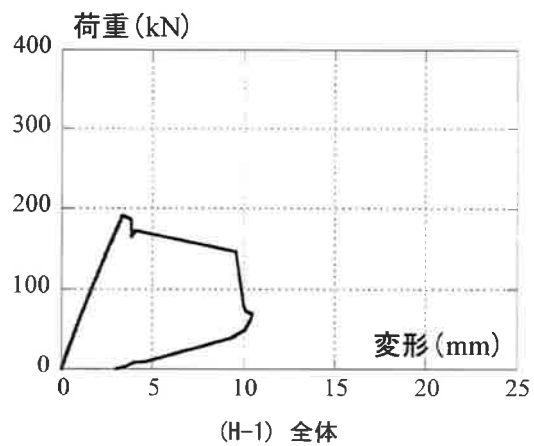


(F) CLT-4FJw②

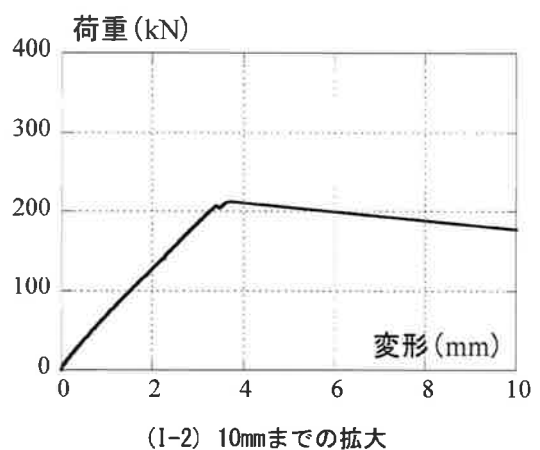
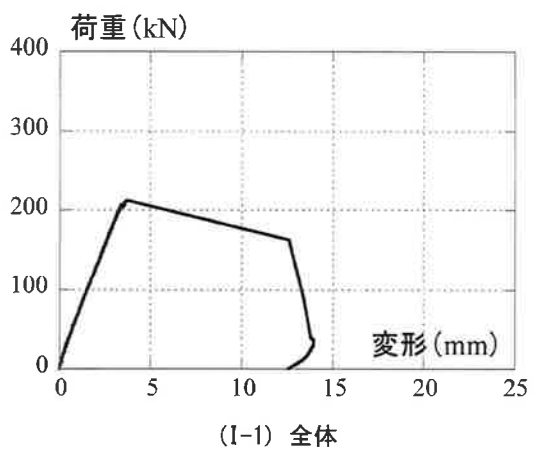


(G) CLT-4FJw③

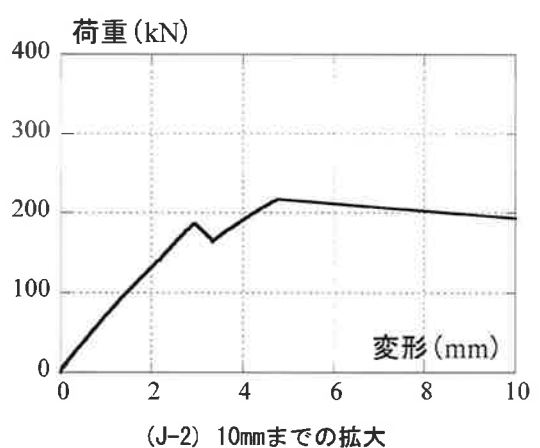
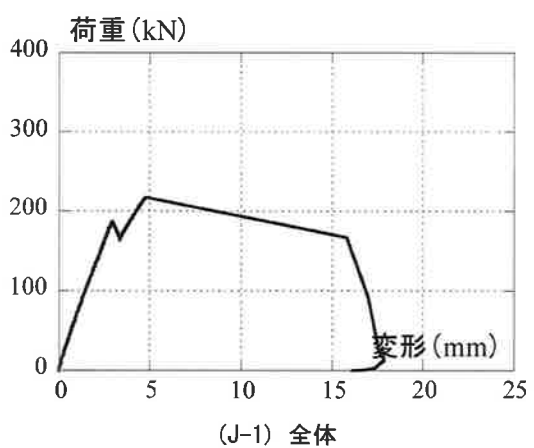
図6 荷重－変形角関係（つづく）



(H) GLT-4FJw④



(I) GLT-4FJw⑤



(J) GLT-4FJw⑥

図6 荷重－変形角関係（つづく）

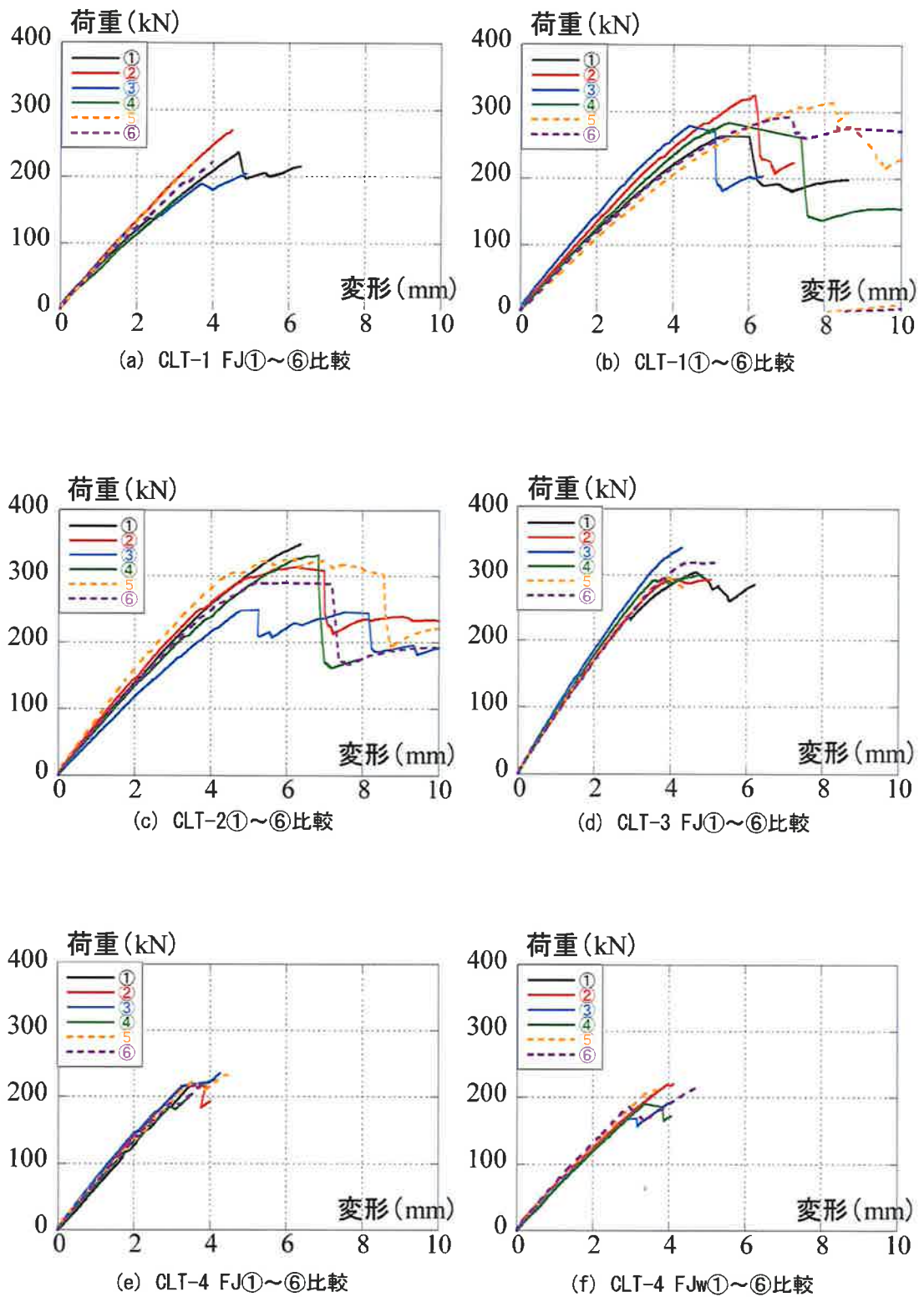


図7 荷重－変形関係

3.2 実験値と計算耐力の比較

本実験におけるCLT板の最大せん断応力度を評価するため、CLT関連告示等解説書に記載されているせん断基準強度 F_s を参考にし、式(1)で評価することとした。

$$F_s = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{v_lam_0} \\ f_{v_lam_90} \frac{t_{net}}{t_{gross}} \\ \frac{bn_{ca}}{2t_{gross}} k_{sth} \frac{1}{\frac{1}{f_{v_tor}} \left(1 - \frac{1}{m^2}\right) + \frac{2}{f_R} \left(\frac{1}{m} - \frac{1}{m^2}\right)} \end{array} \right. \quad (1)$$

ここで、 $f_{v_lam_0}$ ：ラミナの繊維方向のせん断強度、 $f_{v_lam_90}$ ：ラミナの繊維方向と直交する方向のせん断強度、 f_{v_tor} ：接着された直交する二つのラミナの交差面のねじりせん断強度、 f_R ：ローリングシア強度、 n_{ca} ：直交集成板の直交接着層の数、 b ：ラミナの幅、 t_{gross} ：直交集成板の厚さ、 m ：各層のラミナの幅方向の数のうち最小の値、 k_{sth} ：95%下側許容限界値算出係数（3/4）である。

計算で得られた結果を表6に示す。本実験条件におけるせん断基準強度は式（1）より、モードⅢで決定される。同表における実験の最大せん断応力度の平均値に対するせん断基準強度の比は、2.73～3.60となり、実験値を安全側に評価している。ここで、試験体によるばらつきを考慮して、CLT関連告示等解説書に記載されている式（2）を用いて実験値を評価する。

$$TL = x - Ks \quad (2)$$

ここで、 TL ：信頼水準75%の95%下限許容限界値、 x ：実験から得られた平均値、 K ：試験体数に依存する係数（=2.336）、 s ：標準偏差である。

式（2）で得られた値を、同じく表5中に示す。下限許容限界値を用いて計算値と比較すると、実験値に対する計算値の比は3.94～11.85となり、FJの有無に拘らず、安全側に評価できているものと考えられる。また、せん断弾性係数 G の算出結果を表6に示す。算出に当たって、せん断変形成分は、全体変形から曲げ変形成分を差し引くことによって求めている。おおよそ、413N/mm²～779N/mm²の範囲になっている。

表5-1 主要な実験結果一覧（つづく）

試験体名	K (kN/mm)	P_{max} (kN)	δ_{max} (mm)	R_{max} (%)	τ_{max} (N/mm ²)	F_S (N/mm ²)			τ_{max}/F_S	TL	TL/F_S
						式(1)上段	式(1)中段	式(1)下段			
CLT-1FJ①	59.5	237	4.68	1.04	7.87	2.7	3.24	0.844	9.32		
CLT-1FJ②	66.3	270	4.50	1.00	8.98	2.7	3.24	0.844	10.63		
CLT-1FJ③	56.6	205	4.88	1.08	6.82	2.7	3.24	0.844	8.08		
CLT-1FJ④	56.4	174	3.20	0.71	5.78	2.7	3.24	0.844	6.85		
CLT-1FJ⑤	65.1	222	3.52	0.78	7.37	2.7	3.24	0.844	8.73		
CLT-1FJ⑥	61.2	221	3.97	0.88	7.35	2.7	3.24	0.844	8.70		
平均	60.8	222	4.12	0.92	7.36	2.7	3.24	0.844	8.72	5.09	6.03
CLT-1①	60.6	264	5.28	1.17	8.81	2.7	3.24	0.844	10.43		
CLT-1②	66.2	325	6.15	1.37	10.8	2.7	3.24	0.844	12.78		
CLT-1③	72.4	279	4.42	0.98	9.27	2.7	3.24	0.844	10.98		
CLT-1④	63.3	284	5.47	1.22	9.42	2.7	3.24	0.844	11.16		
CLT-1⑤	54.8	313	8.20	1.82	10.4	2.7	3.24	0.844	12.31		
CLT-1⑥	59.0	292	6.99	1.55	9.69	2.7	3.24	0.844	11.48		
平均	62.7	293	6.08	1.35	9.73	2.7	3.24	0.844	11.53	8.16	9.66
CLT-2①	68.1	349	6.35	1.41	9.67	2.7	4.05	0.844	11.46		
CLT-2②	71.6	314	6.22	1.38	8.73	2.7	4.05	0.844	10.34		
CLT-2③	58.4	250	5.25	1.17	6.92	2.7	4.05	0.844	8.20		
CLT-2④	65.8	332	6.82	1.52	9.20	2.7	4.05	0.844	10.90		
CLT-2⑤	78.6	326	6.23	1.38	9.00	2.7	4.05	0.844	10.67		
CLT-2⑥	66.6	291	5.20	1.15	8.08	2.7	4.05	0.844	9.58		
平均	68.2	310	6.01	1.34	8.60	2.7	4.05	0.844	10.19	6.52	7.72
CLT-3 FJ①	84.7	304	4.68	1.04	8.43	2.7	1.62	0.633	13.32		
CLT-3 FJ②	84.3	293	4.21	0.94	8.12	2.7	1.62	0.633	12.84		
CLT-3 FJ③	92.0	342	7.28	1.62	9.47	2.7	1.62	0.633	14.96		
CLT-3 FJ④	88.1	300	4.82	1.07	8.30	2.7	1.62	0.633	13.11		
CLT-3 FJ⑤	84.6	299	3.86	0.86	8.27	2.7	1.62	0.633	13.06		
CLT-3 FJ⑥	83.5	319	4.54	1.01	8.83	2.7	1.62	0.633	13.95		
平均	86.2	310	4.90	1.09	8.57	2.7	1.62	0.633	13.54	7.50	11.85

K : 初期剛性, P_{max} : 最大耐力, δ_{max} : P_{max} 発揮時のたわみ量, R_{max} : P_{max} 発揮時の変形角 ($=\delta_{max}/l \times 100$), l : 支点から載荷点までの長さ450mm, τ_{max} : 実験のせん断応力度, F_S : CLTパネルの基準せん断強度

表5-2 主要な実験結果一覧（つづき）

試験体名	K (kN/mm)	P_{max} (kN)	δ_{max} (mm)	R_{max} (%)	τ_{max} (N/mm ²)	F_s (N/mm ²)			τ_{max}/F_s	TL	TL/F_s
						式(1)上段	式(1)中段	式(1)下段			
CLT-4FJ①	65.2	228	4.12	0.92	4.22	2.7	4.05	0.738	5.72		
CLT-4FJ②	68.8	217	3.87	0.86	4.02	2.7	4.05	0.738	5.44		
CLT-4FJ③	70.2	237	4.26	0.95	4.38	2.7	4.05	0.738	5.94		
CLT-4FJ④	65.4	205	3.54	0.79	3.80	2.7	4.05	0.738	5.15		
CLT-4FJ⑤	65.6	233	6.64	1.48	4.32	2.7	4.05	0.738	5.85		
CLT-4FJ⑥	67.6	217	3.77	0.84	4.02	2.7	4.05	0.738	5.45		
平均	67.1	223	4.36	0.97	4.13	2.7	3.24	0.844	4.89	3.66	4.34
CLT-4FJw①	59.5	205	3.56	0.79	3.79	2.7	4.05	0.738	5.13		
CLT-4FJw②	61.5	221	4.12	0.91	4.10	2.7	4.05	0.738	5.55		
CLT-4FJw③	59.4	193	3.99	0.89	3.57	2.7	4.05	0.738	4.84		
CLT-4FJw④	59.1	191	3.35	0.75	3.54	2.7	4.05	0.738	4.79		
CLT-4FJw⑤	63.0	212	3.73	0.83	3.93	2.7	4.05	0.738	5.33		
CLT-4FJw⑥	64.7	218	4.78	1.06	4.03	2.7	4.05	0.738	5.46		
平均	61.2	207	3.92	0.87	3.83	2.7	3.24	0.844	4.53	3.32	3.94

K : 初期剛性, P_{max} : 最大耐力, δ_{max} : P_{max} 発揮時のたわみ量, R_{max} : P_{max} 発揮時の変形角 ($=\delta_{max}/l \times 100$), l : 支点から載荷点までの長さ450mm, τ_{max} : 実験のせん断応力度, F_s : CLTパネルの基準せん断強度

表6-1 セン断弾性係数の算出（つづく）

試験体名	K (kN/mm)	P_{max} (kN)	δ_{max} (mm)	E (N/mm ²)	I (mm ⁴)	δ_b (mm)	δ_s (mm)	G (N/mm ²)
CLT-1FJ①	59.5	237	4.68	6000	337500000	0.446	0.554	538
CLT-1FJ②	66.3	270	4.50	6000	337500000	0.497	0.503	659
CLT-1FJ③	56.6	205	4.88	6000	337500000	0.424	0.576	491
CLT-1FJ④	56.4	174	3.20	6000	337500000	0.423	0.577	488
CLT-1FJ⑤	65.1	222	3.52	6000	337500000	0.488	0.512	637
CLT-1FJ⑥	61.2	221	3.97	6000	337500000	0.459	0.541	565
平均	60.8	222	4.12	6000	337500000	0.456	0.544	559
CLT-1①	60.6	264	5.28	6000	337500000	0.455	0.545	555
CLT-1②	66.2	325	6.15	6000	337500000	0.496	0.504	657
CLT-1③	72.4	279	4.42	6000	337500000	0.543	0.457	793
CLT-1④	63.3	284	5.47	6000	337500000	0.474	0.526	602
CLT-1⑤	54.8	313	8.20	6000	337500000	0.411	0.589	465
CLT-1⑥	59.0	292	6.99	6000	337500000	0.443	0.557	529
平均	62.7	293	6.08	6000	337500000	0.470	0.530	592
CLT-2①	68.1	349	6.35	6000	405000000	0.426	0.574	494
CLT-2②	71.6	314	6.22	6000	405000000	0.447	0.553	540
CLT-2③	58.4	250	5.25	6000	405000000	0.365	0.635	383
CLT-2④	65.8	332	6.82	6000	405000000	0.411	0.589	466
CLT-2⑤	78.6	326	6.23	6000	405000000	0.491	0.509	644
CLT-2⑥	66.6	291	5.20	6000	405000000	0.416	0.584	475
平均	68.2	310	6.01	6000	405000000	0.426	0.574	495
CLT-3 FJ①	84.7	304	4.68	6000	405000000	0.529	0.471	749
CLT-3 FJ②	84.3	293	4.21	6000	405000000	0.527	0.473	742
CLT-3 FJ③	92.0	342	7.28	6000	405000000	0.575	0.425	902
CLT-3 FJ④	88.1	300	4.82	6000	405000000	0.550	0.450	816
CLT-3 FJ⑤	84.6	299	3.86	6000	405000000	0.529	0.471	748
CLT-3 FJ⑥	83.5	319	4.54	6000	405000000	0.522	0.478	728
平均	86.2	310	4.90	6000	405000000	0.539	0.461	779

K ：初期剛性（変形角0.5%における割線剛性）， P_{max} ：最大耐力， δ_{max} ： P_{max} 発揮時のたわみ量， E ：弾性係数， I ：断面二次モーメント， δ_b ：全体変形1.0mmにおける曲げ変形成分， δ_s ：全体変形1.0mmにおけるせん断変形成分， G ：せん断弾性係数

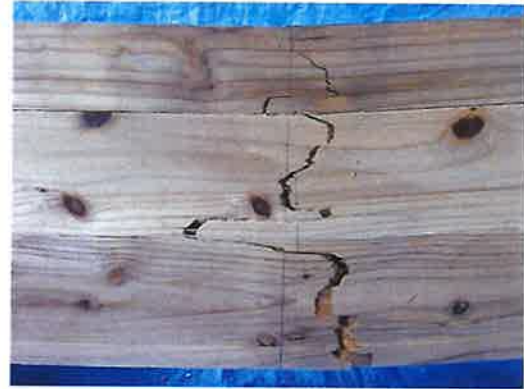
表6-2 セン断弾性係数の算出 (つづき)

試験体名	K (kN/mm)	P_{max} (kN)	δ_{max} (mm)	E (N/mm ²)	I (mm ⁴)	δ_b (mm)	δ_s (mm)	G (N/mm ²)
CLT-4FJ①	65.2	228	4.12	6000	405000000	0.407	0.593	458
CLT-4FJ②	68.8	217	3.87	6000	405000000	0.430	0.570	503
CLT-4FJ③	70.2	237	4.26	6000	405000000	0.438	0.562	521
CLT-4FJ④	65.4	205	3.54	6000	405000000	0.409	0.591	461
CLT-4FJ⑤	65.6	233	6.64	6000	405000000	0.410	0.590	463
CLT-4FJ⑥	67.6	217	3.77	6000	405000000	0.422	0.578	487
平均	67.1	223	4.36	6000	405000000	0.419	0.581	482
CLT-4FJw①	59.5	205	3.56	6000	405000000	0.372	0.628	394
CLT-4FJw②	61.5	221	4.12	6000	405000000	0.384	0.616	416
CLT-4FJw③	59.4	193	3.99	6000	405000000	0.371	0.629	394
CLT-4FJw④	59.1	191	3.35	6000	405000000	0.369	0.631	390
CLT-4FJw⑤	63.0	212	3.73	6000	405000000	0.394	0.606	433
CLT-4FJw⑥	64.7	218	4.78	6000	405000000	0.405	0.595	453
平均	61.2	207	3.92	6000	405000000	0.382	0.618	413

K : 初期剛性 (変形角0.5%における割線剛性), P_{max} : 最大耐力, δ_{max} : P_{max} 発揮時のたわみ量, E : 弾性係数, I : 断面二次モーメント, δ_b : 全体変形1.0mmにおける曲げ変形成分, δ_s : 全体変形1.0mmにおけるせん断変形成分, G : セン断弾性係数



北面（全体）



北面（拡大）



南面（全体）



南面（拡大）



下面（全体）



下面（拡大）

CLT-1 FJ ①

写真4 実験後写真（つづく）



北面（全体）



北面（拡大）



南面（全体）



南面（拡大）



下面（全体）



下面（拡大）

CLT-1 FJ ②

写真4 実験後写真（つづく）



北面（全体）



北面（拡大）



南面（全体）



南面（拡大）



下面（全体）



下面（拡大）

CLT-1 FJ ③

写真4 実験後写真（つづく）



北面（全体）



北面（拡大）



南面（全体）



南面（拡大）



下面（全体）



下面（拡大）

CLT-1 FJ ④

写真4 実験後写真（つづく）



北面（全体）



北面（拡大）



南面（全体）



南面（拡大）



下面（全体）



下面（拡大）

CLT-1 FJ ⑤

写真4 実験後写真（つづく）



北面（全体）



北面（拡大）



南面（全体）



南面（拡大）



下面（全体）



下面（拡大）

CLT-1 FJ ⑥

写真4 実験後写真（つづく）



北面（全体）



北面（拡大）



南面（全体）



南面（拡大）



下面（全体）



下面（拡大）

CLT-1 ①

写真4 実験後写真（つづく）



北面（全体）



北面（拡大）



南面（全体）



南面（拡大）



下面（全体）



下面（拡大）

CLT-1 ②

写真4 実験後写真（つづく）



北面（全体）



北面（拡大）



南面（全体）



南面（拡大）



下面（全体）



下面（拡大）

CLT-1 ③

写真4 実験後写真（つづく）



北面（全体）



北面（拡大）



南面（全体）



南面（拡大）



下面（全体）



下面（拡大）

CLT-1 ④

写真4 実験後写真（つづく）



北面（全体）



北面（拡大）



南面（全体）



南面（拡大）



下面（全体）



下面（拡大）

CLT-1 ⑤

写真4 実験後写真（つづく）



北面（全体）



北面（拡大）



南面（全体）



南面（拡大）



下面（全体）



下面（拡大）

CLT-1 ⑥

写真4 実験後写真（つづく）



北面（全体）



北面（拡大）



北面 東側（拡大）



南面（全体）



南面（拡大）

CLT-2 ①

写真4 実験後写真（つづく）



下面（全体）



下面（拡大）



下面 東側（拡大）

CLT-2 ①

写真4 実験後写真（つづく）



北面（全体）



北面（拡大）



南面（全体）



南面（拡大）



南面 東側（拡大）

CLT-2 ②

写真4 実験後写真（つづく）



下面（全体）



下面（拡大）



下面 東側（拡大）

CLT-2 ②

写真4 実験後写真（つづく）



北面（全体）



北面（拡大）



北面 東側（拡大）



南面（全体）



南面（拡大）



南面 西側（拡大）

CLT-2 ③

写真4 実験後写真（つづく）



下面（全体）



下面（拡大）



下面 東側（拡大）

CLT-2 ③

写真4 実験後写真（つづく）



北面（全体）



北面（拡大）



北面 東側（拡大）



南面（全体）



南面（拡大）



南面 中央下（拡大）

CLT-2 ④

写真4 実験後写真（つづく）



下面（全体）



下面（拡大）



下面 東側（拡大）

CLT-2 ④

写真4 実験後写真（つづく）



北面（全体）



北面（拡大）



北面 中央（拡大）



北面 東側（拡大）



南面（全体）



南面（拡大）

CLT-2 ⑤

写真4 実験後写真（つづく）



南面 東側（拡大）



下面（全体）



下面（拡大）



下面 東側（拡大）



下面 東側（拡大）

CLT-2 ⑤

写真4 実験後写真（つづく）



北面（全体）



北面（拡大）



北面 西側（拡大）



南面（全体）



南面（拡大）



南面 西側（拡大）

CLT-2 ⑥

写真4 実験後写真（つづく）



下面（全体）



下面（拡大）



下面 西側（拡大）

CLT-2 ⑥

写真4 実験後写真（つづく）



北面（全体）



北面（拡大）



南面（全体）



南面（拡大）



下面（全体）



下面（拡大）

CLT-3 FJ ①

写真4 実験後写真（つづく）



北面（全体）



北面（拡大）



南面（全体）



南面（拡大）



下面（全体）



下面（拡大）

CLT-3 FJ ②

写真4 実験後写真（つづく）



北面（全体）



北面（拡大）



南面（全体）



南面（拡大）



下面（全体）



下面（拡大）

CLT-3 FJ ③

写真4 実験後写真（つづく）



北面（全体）



北面（拡大）



南面（全体）



南面（拡大）



下面（全体）



下面（拡大）

CLT-3 FJ ④

写真4 実験後写真（つづく）



北面（全体）



北面（拡大）



南面（全体）



南面（拡大）



下面（全体）



下面（拡大）

CLT-3 FJ ⑤

写真4 実験後写真（つづく）



北面（全体）



北面（拡大）



南面（全体）



南面（拡大）



下面（全体）



下面（拡大）

CLT-3 FJ ⑥

写真4 実験後写真（つづく）



北面（全体）



北面（拡大）



南面（全体）



南面（拡大）



下面（全体）



下面（拡大）

CLT-4 FJ ①

写真4 実験後写真（つづく）



北面（全体）



北面（拡大）



南面（全体）



南面（拡大）



下面（全体）



下面（拡大）

CLT-4 FJ ②

写真4 実験後写真（つづく）



北面（全体）



北面（拡大）



南面（全体）



南面（拡大）



下面（全体）



下面（拡大）

CLT-4 FJ ③

写真4 実験後写真（つづく）



北面（全体）



北面（拡大）



南面（全体）



南面（拡大）



下面（全体）



下面（拡大）

CLT-4 FJ ④

写真4 実験後写真（つづく）



北面（全体）



北面（拡大）



南面（全体）



南面（拡大）



下面（全体）



下面（拡大）

CLT-4 FJ ⑤

写真4 実験後写真（つづく）



北面（全体）



北面（拡大）



南面（全体）



南面（拡大）



下面（全体）



下面（拡大）

CLT-4 FJ ⑥

写真4 実験後写真（つづく）



北面（全体）



北面（拡大）



南面（全体）



南面（拡大）



下面（全体）



下面（拡大）

CLT-4 FJw ①

写真4 実験後写真（つづく）



北面 (全体)



北面 (拡大)



南面 (全体)



南面 (拡大)



下面 (全体)



下面 (拡大)

CLT-4 FJw ②

写真4 実験後写真 (つづく)



北面（全体）



北面（拡大）



南面（全体）



南面（拡大）



下面（全体）



下面（拡大）

CLT-4 FJw ③

写真4 実験後写真（つづく）



北面（全体）



北面（拡大）



南面（全体）



南面（拡大）



下面（全体）



下面（拡大）

CLT-4 FJw ④

写真4 実験後写真（つづく）



北面（全体）



北面（拡大）



南面（全体）



南面（拡大）



下面（全体）



下面（拡大）

CLT-4 FJw ⑤

写真4 実験後写真（つづく）



北面（全体）



北面（拡大）



南面（全体）



南面（拡大）



下面（全体）



下面（拡大）

CLT-4 FJw ⑥

写真4 実験後写真（つづく）

4. 結論

CLTの層構成、ラミナ厚およびフィンガージョイントの有無を変数として、三点曲げ載荷実験による面内せん断実験を実施したところ、以下の知見を得た。

- 1) フィンガージョイント有りの試験体では、フィンガージョイントに沿って破壊したため、急激な耐力低下が見られた。フィンガージョイント無しの試験体と比較して最大耐力が低めに発揮されたものの、試験体によるばらつきはあまりみられなかった。
- 2) 総厚に対する強軸層の割合が大きいほど、せん断応力度およびせん断弾性係数も大きく発揮される傾向にある。
- 3) 角欠け内層ラミナを使用したCLTでは、通常のCLTに対して、初期剛性および最大耐力は90%ほど、せん断弾性係数は85%ほどに、それぞれ低く発揮される。
- 4) 試験体のばらつきを考慮して、実験で得られた最大せん断応力度と、CLT関連告示等解説書に記載されているせん断基準強度式を比較すると、実験値を安全側に評価した。

謝辞

本実験の載荷実験の実施にあたり、福岡大学教育技術職員の石橋宏一郎氏と大野敦宏氏にご協力いただいた。さらに、試験体準備、載荷実験の実施、データ整理には、2019年度福岡大学工学部建築学科倉富研究室の卒研究生である太田莉緒氏、瀬戸晋太郎氏、原口康平氏の多大なる協力を得た。ここに記して、深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本住宅・木材技術センター：CLT関連告示等解説書，2016.6
- 2) 宮崎県木材利用技術センター：宮崎県産スギを用いた新たなCLTの開発，206.3

区分	受託研究
研究期間	令和元年度

令和元年度受託研究報告書

新たな断面構成 CLT の長期曲げ性能の評価

令和 2 年 3 月

地方独立行政法人北海道立総合研究機構

森林研究本部 林産試験場

目次

1. はじめに	1
2. 試験方法	2
2.1. 試験体	2
2.2. 長期荷重試験	2
2.3. クリープ変形特性の評価	3
2.3.1. 告示法	3
2.3.2. パワー測	4
3. 結果	5
3.1. クリープ変形試験	5
3.2. クリープ破壊試験	6
4. おわりに	12
参考文献	12

新たな断面構成 CLT の長期曲げ性能の評価

(地独) 北海道立総合研究機構 森林研究本部 林産試験場
技術部 生産技術グループ 高梨隆也, 大橋義徳
石原亘, 松本和茂

1. はじめに

大型木質パネルである CLT (Cross Laminated Timber, 直交集成板) は, 国産材の新しい利用法として期待されており, 製造技術や利用技術に関する様々な研究開発が進められている。集成材や CLT の製造事業を行っている山佐木材 (株) (本社: 鹿児島県) は, 柱梁を鉄骨造, 床のみを CLT 構造とする混構造構法の開発を行い実用化している。この技術では, 床 CLT を一方向スラブとして考えた場合, 強軸方向への高い剛性が重視される。強軸方向の剛性を向上させる方法としては, 外層平行層の積層数や, 各プライの厚さを増やした断面構成が考えられるが, このような断面構成は直交集成板の日本農林規格 (JAS) ¹⁾ や建築基準法の関連告示 ²⁾ に沿わない部分があり, その材料性能の検討もなされていない。また, 直交集成板 JAS や関連告示に沿わない CLT を建築構造材料として用いるためには, 建築基準法第 37 条に基づく材料認定を取得する必要がある。37 条認定における材料性能評価項目には長期材料性能が含まれ, 実験により性能を実証することが求められている。

そこで本研究では, 外層の厚さを従来よりも厚くした 3 層 4 プライのスギ CLT の長期材料性能を明らかにすることを目的として, 長期荷重試験を行いクリープ変形特性およびクリープ破壊特性を明らかにすることとした。

2.1. 試験体

2.2. 長期荷重試験

鹿児島県工業技術センターにて行われた、同仕様の試験体を用いた同一荷重条件での短期荷重試験の結果を基に長期載荷荷重を決定した。短期荷重試験では、各グループ 6 体ずつで試験が行われ、最大荷重の平均値がグループ 1 では 45.6 kN (変動係数 10.0%), グループ 2 では 65.6 kN (変動係数 8.4%)であり、その値を各グループの荷重レベル 100%に相当する荷重とした。長期荷重試験で載荷した荷重レベルは、グループ 1 ではクリープ変形試験として 37%, グループ 2 ではクリープ破壊試験として 90%, 80%, 70%, 65%とした。試験体数は各荷重レベル 3 体ずつとした。

2



図 2 長期荷重試験の荷重状況

2.3. クリープ変形特性の評価

クリープ変形の評価法については、建築基準法第 37 条に関する技術的基準（平成 12 年建設省告示第 1446 号）³⁾が定める評価法を参考にした方法（以下、告示法）および、クリープ変形のモデル式を用いた評価法（以下、パワー則）を用いた。各方法の詳細を以下に記す。

2.3.1. 告示法

経過時間 t 分ごとに測定されたたわみに対する荷重 1 分後のたわみの比（クリープたわみ比 K_t ）を計算し、経過時間の常用対数 $\log_{10}(t)$ を説明変数、クリープたわみ比の常用対数 $\log_{10}(K_t)$ を目的変数として線形回帰し、回帰直線の切片および傾きを算出した。荷重後 10 分、100 分および 500 分後ならびにその後 24 時間ごとのデータを用いた場合と、荷重後 10 分、100 分および 500 分後のデータを除外した場合で回帰計算を行った。回帰直線上の時間が 50 年に相当するクリープたわみ比 $K_{50\text{year}}$ を求め、その逆数をクリープ係数として求めた。各式の関係を以下に示す。

$$K_t = \delta_{1\text{min.}} / \delta_{t\text{min.}} \quad (1)$$

$$\log_{10}(K_t) = e + f \log_{10}(t) \quad (2)$$

$$K_{50\text{year}} = 10^e \times t_{50\text{year}}^f = 10^e \times 26280000^f \quad (3)$$

ここで、 $\delta_{1\text{min.}}$ ：荷重 1 分後のたわみ、 $\delta_{t\text{min.}}$ ：荷重 t 分後のたわみ、 e ： $\log_{10}K_t$ と $\log_{10}t$ の回帰直線の切片、 f ： $\log_{10}K_t$ と $\log_{10}t$ の回帰直線の傾き、 $t_{50\text{year}}$ ：50 年分の時間 t で 26280000 分

2.3.2 パワー則

クリープ変形のモデル式を以下の通りとした。

$$\delta_t = \delta_0 + At^n \quad (4)$$

ここで、 δ_t ：任意時間 t でのたわみ、 δ_0 ：載荷開始直後のたわみ、 A および n は定数
式 (4) は対数変換により以下の式に帰着する。

$$\log_{10}(\delta_t - \delta_0) = n \log_{10}(t) + \log_{10}(A) \quad (5)$$

これより、説明変数を $\log_{10}(t)$ 、目的変数を $\log_{10}(\delta_t - \delta_0)$ として線形回帰し、回帰直線の傾き n 、切片 $\log_{10}(A)$ より定数 n および A を得た。回帰計算では載荷後 10 分、100 分および 500 分後ならびにその後 24 時間ごとのデータを用いた。この方法を以下「パワー則：対数変換」とする。

また、統計ソフトウェア R ver.3.6.2 を用いて非線形最小二乗法により式(4)を実測データにあてはめ、定数 A および n を得る方法も用いた。ここでは、1 分間隔で収集したすべてのスパン中央たわみのデータを用いて計算を行った。この方法を以下、「パワー則：非線形回帰」とする。

どちらの方法でも、1 分経過後のたわみ ($\delta_{1\text{min.}}$) および式 (4) より求めた 50 年経過後のたわみ ($\delta_{50\text{year}}$) より、クリープ係数 $\delta_{50\text{year}} / \delta_{1\text{min.}}$ を求めた。

3. 結果

3.1. クリープ変形試験

クリープ変形試験の結果を表 1 に示す。また、スパン中央たわみの実測値を各評価法によるたわみ推定曲線と併せて図 3～6 に示す。告示法による評価ではクリープ変形を実験値よりも小さく評価することとなった。そのほかの評価法ではおおむね実験値を表現するクリープ変形曲線が得られた。50 年経過後のクリープ係数について、木造建築の設計で用いられてきた従来値は 2.0 であり、本研究ではすべての試験体およびすべての評価法でこの値を下回った。本研究で用いた試験体についても、クリープ変形特性については従来の木造建築での考え方と同様の評価を用いることができると考えられる。

表 1 クリープ変形試験の結果

試験体 No.	$\delta_{1min.}$ (mm)	クリープ係数 ($\delta_{50years}/\delta_{1min.}$)			
		告示法	告示法 :	パワー則 :	パワー則 :
			24時間以内データ除外	対数変換	非線形回帰
3-2	18.62	1.22	1.27	1.48	1.56
3-4	17.32	1.29	1.37	1.75	1.81
3-6	18.35	1.24	1.30	1.49	1.66
平均		1.25	1.32	1.57	1.68

※ $\delta_{1min.}$: 載荷 1 分後のスパン中央たわみ, $\delta_{50years}$: 50 年後のたわみ予測値

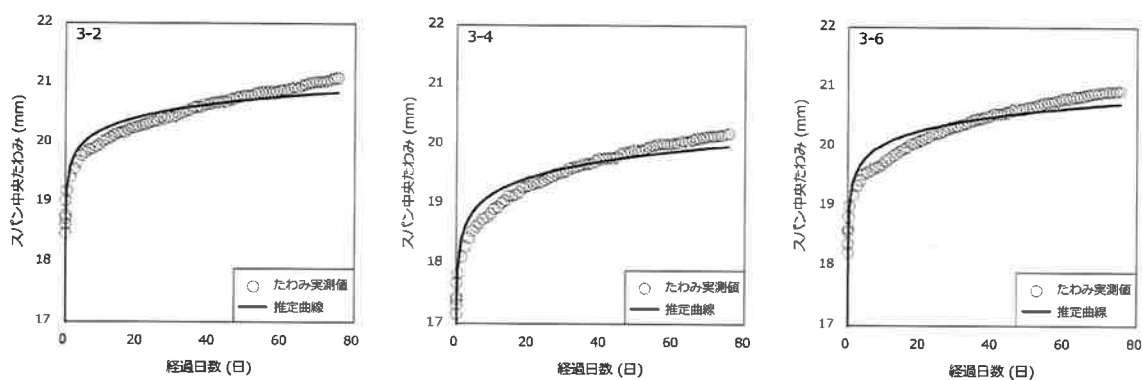


図 3 クリープ変形試験でのスパン中央たわみ実測値と推定曲線（告示法）

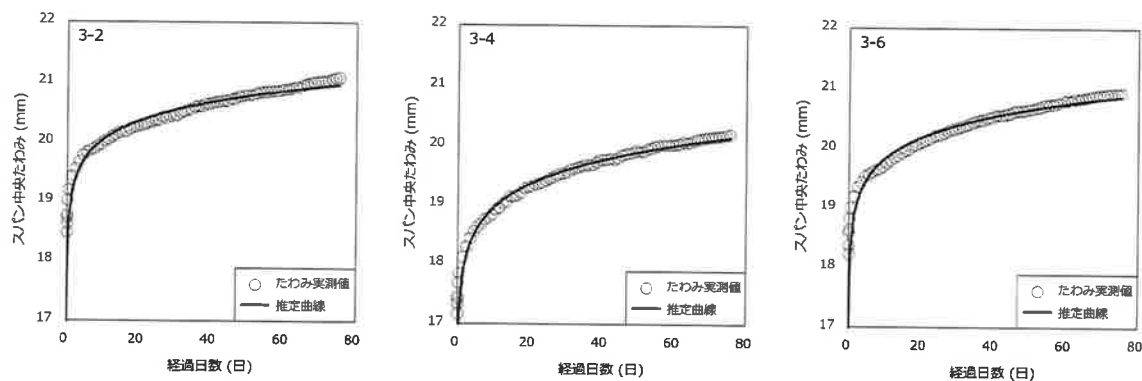


図 4 クリープ変形試験でのスパン中央たわみ実測値と推定曲線（告示法：24 時間以内データ除外）

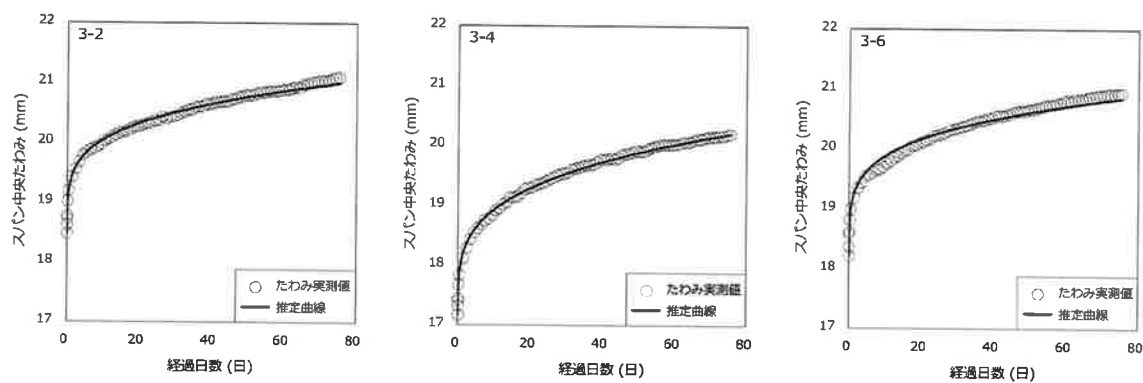


図 5 クリープ変形試験でのスパン中央たわみ実測値と推定曲線（パワー則：対数変換）

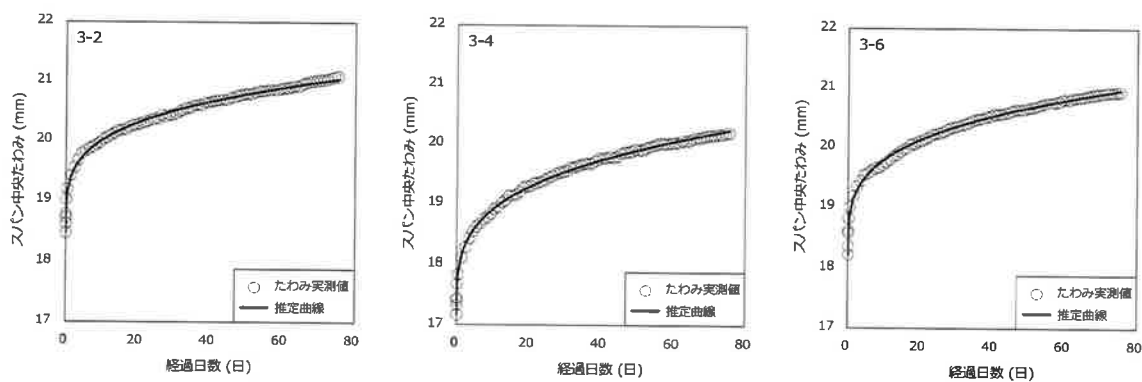


図 6 クリープ変形試験でのスパン中央たわみ実測値と推定曲線（パワー則：非線形回帰）

3.2. クリープ破壊試験

クリープ破壊試験の結果を表 2 に示す。また、山佐木材株式会社下住工場でも同様の試験が行われており、その結果も表 3 に示す。試験体の破壊性状は、主には引張側ラミナのフィンガージョイント部を起因とする破壊（図 7）であったほか、一部では引張側ラミナ

の節を起因とする破壊（図 8）も生じた。図 9 に荷重継続時間と荷重レベルの関係を、現行設計規準およびその元となった Madison Curve ⁴⁾ と併せて示す。おおむね従来値に近い荷重継続時間となった。荷重継続時間と荷重レベルの直線回帰の結果を、林産試験場での荷重レベル 65%を除く実験データ、山佐木材下住工場での実験データ、その二つを合わせた時でそれぞれ図 10～12 に示す。また、得られた 50 年後の荷重レベルを表 4 に示す。現行設計規準では 50 年後の荷重レベルは 0.55 とされている。本研究で用いた試験体についても、評価法の選択によるものの、おおむね現行設計値と同等と考えられる。

表 2 クリープ破壊試験の結果（道総研林産試験場での実験）

荷重レベル	載荷応力 (N/mm ²)	荷重継続時間 (分)
90%	27.6	3
90%	27.6	3
90%	27.6	98
80%	24.5	678
80%	24.5	3859
80%	24.5	4175
70%	21.4	5459
70%	21.4	17170
70%	21.4	56494
65%	19.9	15822
65%	19.9	継続中
65%	19.9	継続中

表 3 クリープ破壊試験の結果（山佐木材株式会社下住工場での実験）

荷重レベル	載荷応力 (N/mm ²)	荷重継続時間 (分)
90%	27.6	18
80%	24.5	121
80%	24.5	10473
80%	24.5	14838
65%	19.9	15730
65%	19.9	45209
65%	19.9	45718



図 7 フィンガージョイント部を起因とする破壊



図 8 節を起因とする破壊（中央のラミナ）

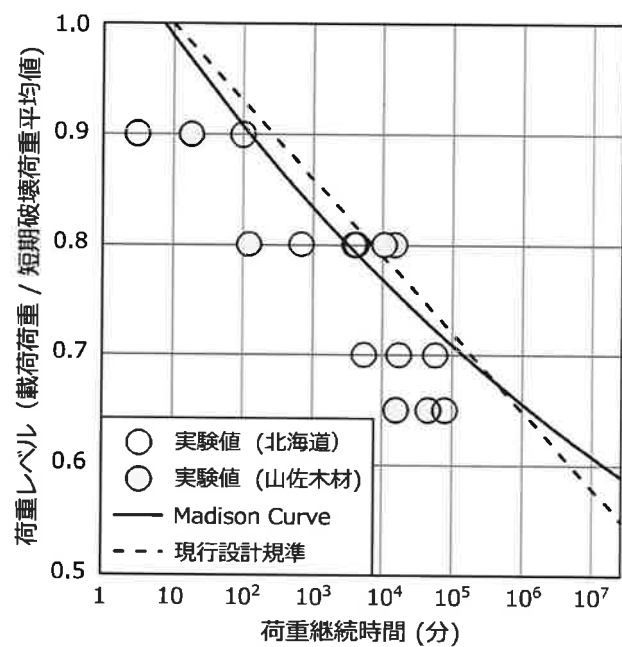


図 9 荷重継続時間と荷重レベルの関係

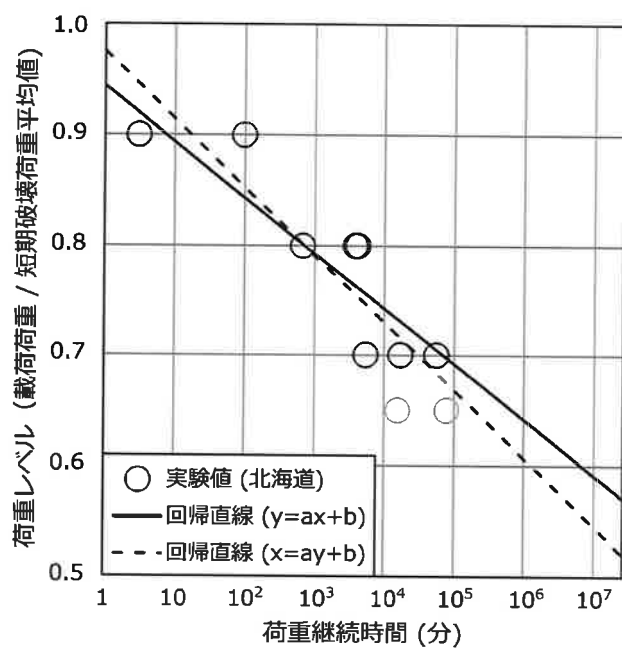


図 10 荷重継続時間と荷重レベルの回帰直線 (林産試験場での実験データ)

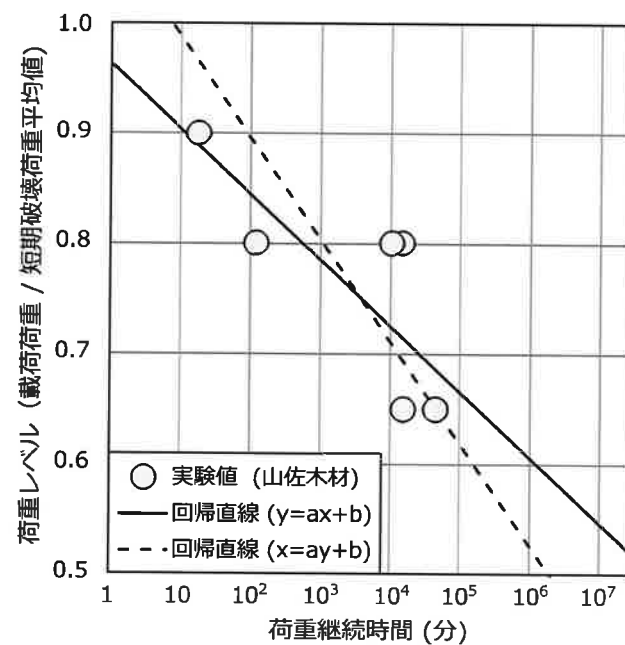


図 11 荷重継続時間と荷重レベルの回帰直線（山佐木材での実験データ）

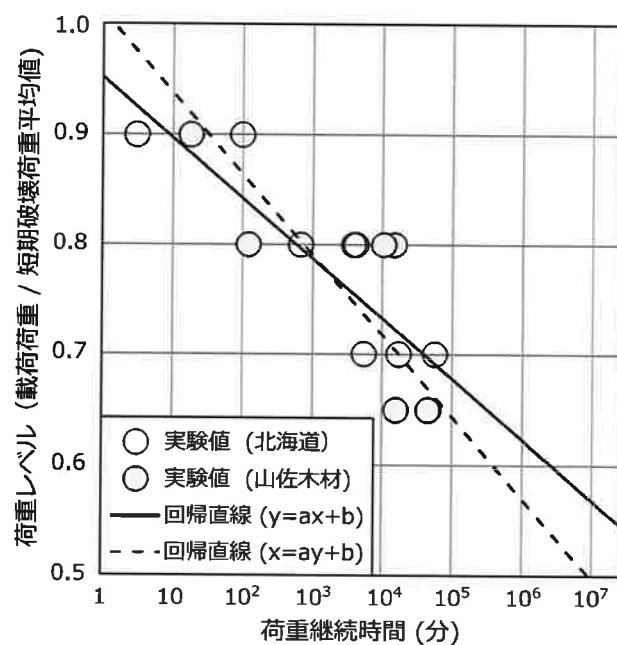


図 12 荷重継続時間と荷重レベルの回帰直線（両試験のデータ）

表 4 荷重継続時間と荷重レベルの直線回帰により得られた 50 年後の荷重レベル

データ	説明変数：荷重継続時間	説明変数：荷重レベル
	目的変数：荷重レベル	目的変数：荷重継続時間
北海道	0.57	0.52
山佐木材	0.52	0.39
北海道＋山佐木材	0.55	0.47

4. おわりに

外層の厚さを従来よりも厚くした 3 層 4 プライのスギ CLT で長期荷重試験を行い，クリープ変形特性およびクリープ破壊特性について検討を行った。クリープ変形特性およびクリープ破壊特性について，木造建築に関する従来の設計値とおおむね同等であることが確かめられた。

参考文献

- 1) JAS 3079：直交集成板の日本農林規格．農林水産省（2019）
- 2) 平成 13 年国土交通省告示 1024 号（最終改正：平成 30 年国土交通省告示 1324 号）
- 3) 平成 12 年建設省告示 1446 号
- 4) Wood L.：Relation of strength of wood to duration of load. USDA Forest Service Report No. 1916, Forest Products Laboratory, Madison, 1951

「柱梁鉄骨造・床 CLT 構造の建築に用いる
ローコスト型 CLT 板の開発」

研究成果報告書

令和 2 年 3 月発行

〒893-1206 鹿児島県肝属郡肝付町前田 972 番地

山佐木材株式会社

TEL 0994-31-4141 FAX 0994-31-4142