

令和5年度 林野庁補助事業

CLT・LVL等の建築物への利用環境整備事業のうち  
CLT・LVL等を活用した建築物の低コスト化・検証等事業  
(9層9プライ CLTの長期挙動データ等の収集・分析)  
成果報告書

令和6年3月

国立研究開発法人 森林研究・整備機構 森林総合研究所

一般社団法人 日本CLT協会

地方独立行政法人 北海道立総合研究機構 林産試験場

株式会社 中央設計

公益社団法人 日本木材加工技術協会

令和 5 年度林野庁補助事業  
「森林・林業・木材産業グリーン成長総合対策補助金等  
(CLT・LVL 等の建築物への利用環境整備事業のうち  
CLT・LVL 等を活用した建築物の低コスト化・検証等事業)  
(9 層 9 プライ CLT の長期挙動データ等の収集・分析)」  
成果報告書

目次

1.	事業計画.....	1
1.1	目的.....	1
1.2	実施内容.....	2
1.3	事業実施体制.....	3
1.4	外部有識者委員会及び事業実施者.....	4
2.	CLT の長期挙動及び曲げ性能に影響を及ぼす製造因子の抽出.....	5
2.1	CLT の長期挙動に影響を及ぼす製造因子の抽出 (R4 報告書再掲).....	5
2.2	CLT の曲げ性能に影響を及ぼす因子の抽出.....	9
3.	CLT の長期変形挙動に関する測定方法の妥当性の検討.....	19
3.1	目的.....	19
3.2	実施内容.....	19
3.3	透湿抵抗に与える試験湿度の影響.....	19
3.4	接着層を考慮した CLT 内部含水率のシミュレーション手法の検討.....	22
3.5	CLT ラミナ間の隙間が熱伝導率, 内部含水率変動に与える影響.....	24
3.6	CLT 内部含水率の長期モニタリング手法の検討.....	27
4.	決定した測定方法における CLT の長期挙動データの収集と解析.....	36
4.1	CLT の短期曲げ試験 (R4 報告書再掲・一部修正).....	36
4.2	曲げ荷重下における長期挙動データの収集と解析.....	40
4.3	試験体の破断状況.....	46
4.4	短期曲げ試験と長期荷重試験結果の比較による破断時の変位に関する検討.....	48
5.	進行状況の管理.....	53
5.1	第 1 回検討委員会.....	53
5.2	現地検討会.....	61
5.3	第 2 回検討委員会.....	63
6.	事業成果の総括と残された課題.....	71
7.	付録.....	72



## 1. 事業計画

### 1.1 目的

戦後造成した人工林が本格的な利用期を迎える中、農林水産業・地域の活力創造プランに基づき、鉄筋コンクリート造や鉄骨造が主流となっている中層・大規模建築物等の分野における木質の新製品・新技術の開発を加速化し、新たな木材需要を創出していく必要がある。

現在、新規の木質材料として、ひき板を構成要素とした「CLT:Cross Laminated Timber」が欧米を中心として実用化されている。CLTは、ひき板を並列することで単層を構成し、その単層の軸方向を直交させながら積層接着した大きな断面を持つ面状の集成加工材料であり、合板の構成要素を単板から製材に置き換えたもの、と考えると理解しやすい。CLTは、床・壁に使用することで、木材を多用する新しい木造建築構法を実現できることから、わが国でも木材資源の大きな需要先として期待を集めており、CLTを対象とした「直交集成板の日本農林規格」の制定、材料強度の告示（特殊な許容応力度及び特殊な材料強度を定める件（平成13年国土交通省告示第1024号、最終改正令和4年国土交通省告示第413号））の制定、さらには林野庁事業による普及促進により、その利用が本格化したところである。

しかしながら、CLTは新しい木質材料であるため、国内の研究開発はいまだ萌芽段階にあり、原料として利用可能な製材の品質や得られる製品の強度性能の水準、使用可能な接着剤の種類と接着性能の担保の方法など、解決すべき製造上の問題点が存在する。また、わが国では建築材料としての使用実績が少なく、一般的な構造計画手法が確立されていないため、製品の性能特性値・調整係数の導出や設計手法の確立など、解決すべき利用上の問題点が多い。特に、現在告示において9層9プライ構成のCLTについては、積層方向かつ強軸方向の長期に生ずる力に対する許容応力度を計算する場合の曲げ及びせん断の基準強度の適用対象外となっているため、当該構成の製法・性能に関する技術データの蓄積ならびにその適正利用のために材料の強度・耐久・耐火性能など、幅広い検討が必要である。特に、建築物は長期間利用されるものであることから、耐用年数の間、確実に安全が確保されるよう、材料の長期挙動に関するデータの蓄積は必須である。さらに、長期挙動のデータ収集には、実際の使用時を想定した測定環境・条件を考案し、長期間にわたる測定・観察が必要であることから、他のデータ収集に先駆けて集中的に実施する必要がある。

本事業は、9層9プライ構成のCLTの長期挙動データを収集し、中層・大規模建築物の木造化に必須である長期性能の設計に資することでCLTの開発・普及を促進することを目的とするものである。今後、CLTの基礎的性質の解明や、製造方法・利用方法など、技術的な検討を進めることは、CLTの実用化を促進し、国内の木材資源の利用拡大につながるものと考えられる。

## 1.2 実施内容

本事業では、9層9プライ構成のCLTの曲げ性能について長期挙動データを収集する。具体的には、以下5項目を実施し、建物の設計に使用可能な特性値を導出する。

### ①CLTの長期挙動に影響を及ぼす製造因子の抽出

CLTの製造条件として、目標とするJAS規格における等級や層構成、使用する樹種、ラミナの幅・厚さ・長さ、ラミナたて継ぎに使用するフィンガージョイントの仕様等、種々の因子が存在する。このような因子のうち、特に長期に生ずる力に対する曲げ性能に影響を及ぼしうるものを製造試験によって抽出し、9層9プライ構成のCLTの長期挙動データの解析に資する。

### ②CLTの長期変形挙動に関する測定方法の妥当性の検討

建築基準法の規定によると、建築物の基礎、主要構造物その他安全上、防火上又は衛生上重要として政令に定められている部分に使用する材料で、平成12年建設省告示第1446号に規定された建築材料は、同告示（別表第一）に定める日本工業規格（JIS）又は日本農林規格（JAS）に適合するか、又は同告示（別表第二）に定める技術基準（測定方法等）に適合するものとして、国土交通省大臣の認定を受けたものとしなければならない。CLTの長期変形挙動に関する測定方法等については、当該技術基準（測定方法等）に準じ、測定結果に影響を与える主要な因子である含水率挙動について検討し、収集したCLT長期挙動データの信頼性および実用性を向上する。

### ③決定した測定方法におけるCLTの長期挙動データの収集

昨年度に決定した荷重水準に相当する静荷重をスギ等の国産針葉樹材を用いた断面構成を有するCLT試験体に対して作用させ、荷重継続時間と変形量の関係を測定精度2%以下となるように電氣的に記録する。得られたデータは電磁的記録として保存し、共同提案機関により共有・管理する。なお、データ収集には長期間を要するため、本事業では単年度で収集可能な範囲のデータ収集を実施し、データ収集は次年度以降も継続する。

### ④収集したCLTの長期挙動データの解析

#### ア) 曲げ荷重下における長期挙動の解析

③により得られたCLTの荷重継続時間と曲げ変形量の関係より曲げ荷重下における長期挙動を定量的に表現する数値を導出する。導出する手法としては、「相対曲げ変形の逆数の常用対数」と「荷重継続時間の常用対数」との関係性を直線回帰し、当該直線上の荷重継続時間が50年に相当する曲げ変形比から曲げ変形量の予測を行う方法と荷重継続時間と相対曲げ変形量の関係をべき乗関数曲線で回帰し、当該曲線上の荷重継続時間が50年に相当する曲げ変形比から曲げ変形量の予測を行う方法の2つを用いる。さらに、得られた数値の可用性について確認する。

#### イ) 断面構成等CLTの製造因子が長期挙動に与える影響の分析

④ア)により求めたCLTの長期挙動の指標となる数値に、CLTの断面構成等の製造因子が与える影響について分析し、今後のCLTの製造方法にフィードバックする方法につ

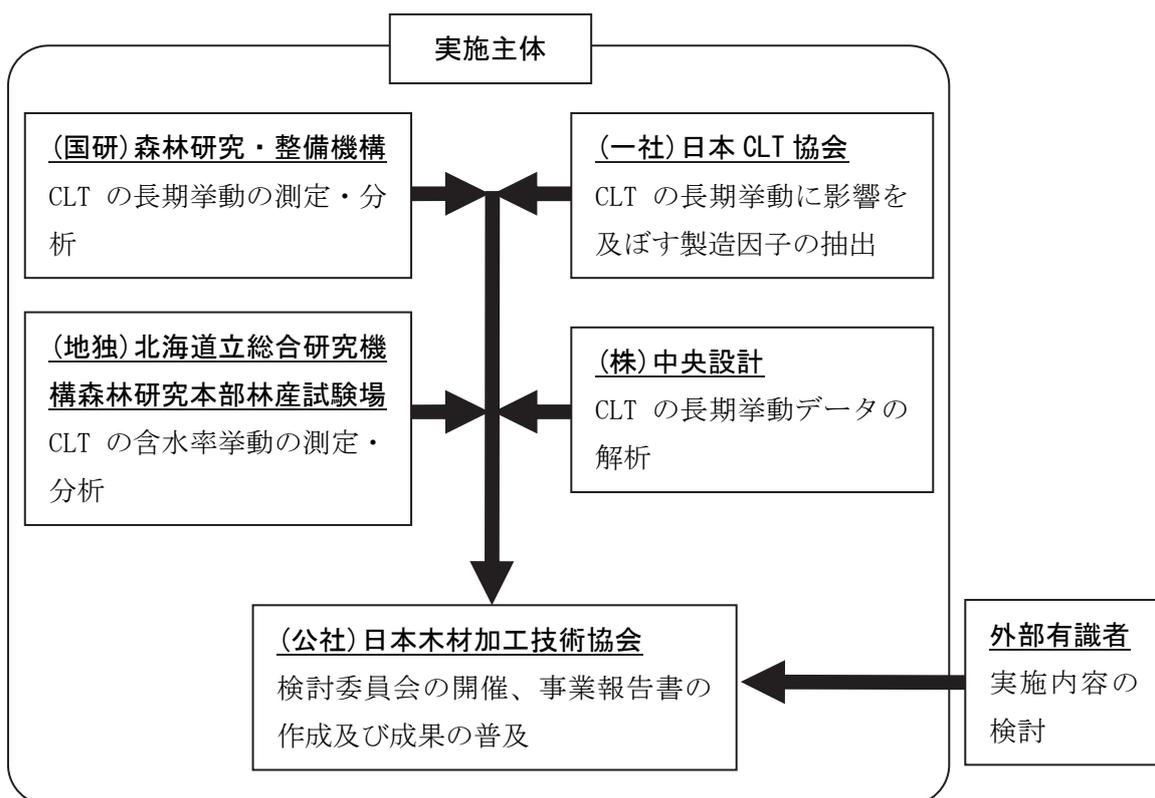
いて検討する。

#### ⑤委員会開催・運営および成果の取りまとめ

本提案の円滑な進行のため、共同提案機関の構成員及び林野庁と協議の上選定した外部学識経験者 3 名以上で構成する委員会を公益社団法人日本木材加工技術協会に設置し、9 層 9 プライ構成の CLT の長期挙動に関する建築関係基準の整備に必要な実験内容（試験方法、試験データの評価等）の検討を行う。計画に従って上記①～④の長期挙動データに掛かる実験を実施し、その結果を分析し、当該委員会における意見を踏まえ、建築関係基準の整備等に活用するデータとして国土交通省へ提供できるよう整理する。公益社団法人日本木材加工技術協会が当該委員会の招集・議事録の作成、および本事業の成果報告の取りまとめを行い、国土交通省や CLT の普及事業の実施者に情報提供を行うとともに、今後の長期挙動データの収集について助言を行う。

### 1.3 事業実施体制

本事業は次の体制で実施した。



## 1.4 外部有識者委員会及び事業実施者

### 外部有識者委員

[委員長]	安村 基	静岡大学名誉教授
[委員]	河合 直人	工学院大学建築学部建築学科
[委員]	青木 謙治	東京大学大学院農学生命科学研究科
[委員]	槌本 敬大	(国研)建築研究所
[委員]	小関 真琴	(公財)日本合板検査会
[委員]	荒木 康弘	国土技術政策総合研究所
[委員]	秋山 信彦	国土技術政策総合研究所
[オブザーバー]	納富 昭光	国土交通省住宅局参事官(建築企画担当)付
[オブザーバー]	川原 聡	農林水産省 新事業・食品産業部食品製造課基準認証室
[オブザーバー]	福島 純	林野庁 木材産業課木材製品技術室
[オブザーバー]	巻田 和丈	林野庁 木材産業課木材製品技術室
[オブザーバー]	山内 一浩	(独)農林水産消費安全技術センター

### 事業実施者

(国研) 森林研究・整備機構 森林総合研究所

宮本康太、渋沢龍也、井道裕史、平松靖、宮武敦、須藤竜大朗、河野幸喜

(一社) 日本 CLT 協会

西妻博康、坂部芳平

(地独) 北海道立総合研究機構 森林研究本部 林産試験場

朝倉靖弘、近藤佳秀、須賀雅人、山崎亨史、秋津裕志

(株) 中央設計

戸田淳二

(公社) 日本木材加工技術協会

村田光司、黒田尚宏

## 2. CLTの長期挙動及び曲げ性能に影響を及ぼす製造因子の抽出

### 2.1 CLTの長期挙動に影響を及ぼす製造因子の抽出（R4 報告書再掲）

#### 2.1.1 CLT 原板の製造条件と試験体仕様の決定

9層9プライ CLT の長期挙動測定に供する試験体原板の製造条件の検討にあたり、既往の5層5プライ CLT ならびに7層7プライ CLT の長期挙動測定での試験体の製造条件を参照して決定した。表2-1-1に9層9プライ CLT 試験体の仕様及び既往の試験体仕様との比較を示す。本事業で得られた成果を5層5プライ CLT ならびに7層7プライ CLT で既に得られている結果と比較可能とするため、既往の製造条件と可能な限り揃えることとした。結果として、ラミナ幅とフィンガージョイントのみ既往の仕様と異なるものとなったが、現行の生産状況を踏まえて選択した。併せて、CLT 原板を効率的に製造するため、初期試験及び長期挙動試験に供する試験体の仕様と試験条件を検討した（表2-1-1）。その結果、試験体長さは、原板からの採材効率を考慮して約6m（試験体厚さtの約22.2倍）を設定した。既往の試験体の試験体長さ（23t）よりもやや短い設定であるが、支点間距離及び荷重点距離はそれぞれ21t、7tと既往と同様であることから、試験結果への影響は極めて少ないとみなした。

以上の検討から製造する9層9プライ CLT 原板は、下記のサイズと枚数に決定した。

- ・長さ 12,030mm×幅 2,806mm×厚さ 270mm、計 3 枚
- ・長さ 12,030mm×幅 2,074mm×厚さ 270mm、計 1 枚

表 2-1-1 9層9プライ CLT 試験体の仕様及び既往の試験体仕様との比較

		以前の事業(H25～)		本事業	
		5層5プライ	7層7プライ	9層9プライ	
CLT 原板の 製造条件		構成	5層5プライ	7層7プライ	9層9プライ
		樹種	スギ		スギ
		等級	Mx60B		Mx60B
		接着剤	水性高分子－ イソシアネート系樹脂		水性高分子－ イソシアネート系樹脂
		ラミナ厚さ(mm)	30		30
		ラミナ幅(mm)	105		122
		フィンガージョイント	垂直		水平
		試験体厚さ(mm)	150	210	270
試験 方法・ 試験体 サイズ	共通条件	加力方法	3等分点4点加力		3等分点4点加力
		試験体長さ(mm)	3,450(23t)	4,830(23t)	5,990(約22.2t)
		試験体幅(mm)	300		300
		支点間距離(mm)	3,150(21t)	4,410(21t)	5,670(21t)
		荷重点間距離(mm)	1,050(7t)	1,470(7t)	1,890(7t)
	初期 (静的曲げ試験)	試験体数	16		16
		平均最大荷重(kN)	42.5	68.9	本事業で測定
	長期 (曲げクリープ 破壊試験)	応力比	66～94% (2%括約) 計15水準		66～94% (2%括約) 計15水準
		試験体数	2体/1水準		2体/1水準

t：試験体厚さ

## 2.1.2 ラミナの集材

2.1.1 で決定した 9 層 9 プライ CLT 原板を製造するため、M60B 及び M30B のラミナを集材した。M60B については、鳥取県を産地とする 1 ロットから使用する全てのラミナ計 750 枚を得た。M30B については、高知県、熊本県及び鳥取県を産地とする各ロットから抽出し、計 2,265 枚を得た。表 2-1-2 に M60B 及び M30B ラミナの抽出の詳細を示す。表 2-1-3 に M30B ラミナについて、産地及びロット別に抽出の詳細を示す。また付録に M60B 及び M30B ラミナの曲げヤング係数についての分布図を示す。

表 2-1-2 M60B 及び M30B ラミナの抽出詳細

曲げヤング 係数(GPa)	M60B				M30B			
	母集団		実際の使用		母集団		実際の使用	
	枚数	比率(%)	枚数	比率(%)	枚数	比率(%)	枚数	比率(%)
30 未満	0	0	0	0	0	0	0	0
30 以上	0	0	0	0	13	0.04	13	0.57
35 以上	0	0	0	0	60	0.17	60	2.65
40 以上	2	0.09	0	0	124	0.34	124	5.47
45 以上	4	0.17	0	0	319	0.89	319	14.08
50 以上	5	0.22	0	0	620	1.72	620	27.37
55 以上	14	0.61	0	0	1,129	3.14	1,129	49.85
60 以上	34	1.47	34	4.53	1,980	5.5	0	0
65 以上	54	2.33	54	7.2	2,763	7.68	0	0
70 以上	93	4.02	93	12.4	3,464	9.62	0	0
75 以上	165	7.13	165	22	3,968	11.02	0	0
80 以上	183	7.91	183	24.4	4,088	11.36	0	0
85 以上	221	9.55	221	29.47	3,881	10.78	0	0
90 以上	234	10.12	0	0	3,422	9.51	0	0
95 以上	283	12.24	0	0	3,050	8.47	0	0
100 以上	223	9.64	0	0	2,252	6.26	0	0
105 以上	234	10.12	0	0	1,760	4.89	0	0
110 以上	178	7.7	0	0	1,188	3.3	0	0
115 以上	119	5.14	0	0	758	2.11	0	0
120 以上	110	4.76	0	0	501	1.39	0	0
125 以上	66	2.85	0	0	294	0.82	0	0
130 以上	41	1.77	0	0	181	0.5	0	0
135 以上	22	0.95	0	0	94	0.26	0	0
140 以上	20	0.86	0	0	48	0.13	0	0
145 以上	3	0.13	0	0	14	0.04	0	0
150 以上	2	0.09	0	0	9	0.03	0	0
155 以上	3	0.13	0	0	5	0.01	0	0
160 以上	0	0	0	0	1	0	0	0
165 以上	0	0	0	0	1	0	0	0
170 以上	0	0	0	0	0	0	0	0
175 以上	0	0	0	0	0	0	0	0
180 以上	0	0	0	0	0	0	0	0
NG	0	0	0	0	4	0.01	0	0
計	2,313	100	750	100	35,991	100	2,265	100

表 2-1-3 M30B ラミナの産地及びロットごとの抽出詳細

産地	ロット No.	枚数	M30B の枚数	M30B の出現割合 (%)
高知県	1	4,077	263	7
	2	1,812	79	4
	3	2,264	217	10
	4	3,607	391	11
	5	3,493	172	5
	6	3,000	58	2
	7	5,861	231	4
鳥取県	1	2,313	25	1
熊本県	1	2,267	100	4
	2	2,201	121	6
	3	2,439	334	14
	4	2,657	274	10
計		35,991	2,265	6

### 2.1.3 試験体の採材位置

製造後の 9 層 9 プライ CLT 原板から、長期変形挙動に関する測定方法の妥当性の検討のための含水率挙動に関する試験（3 章）、長期挙動データ導出のための荷重水準の決定のための静的曲げ試験（4.1 章）及び長期挙動データの収集のための曲げクリープ破壊試験（4.2 章）に用いる試験体をそれぞれ採取した。試験内容の詳細は各章に記載する。表 2-1-4 にそれぞれの試験体サイズと数量を示す。また、図 2-1-1 に原板からの各試験体の採材位置の概要を示す。初期試験に供する試験体は、各原板から 4 体ずつとした。長期挙動試験に供する試験体は、一つの原板の中で同じ荷重水準の無い配置とした。詳細な採材図は付録に記載する。

表 2-1-4 試験体サイズと数量

試験項目	試験体サイズ(mm)	試験体数
初期試験（静的曲げ試験）	5,990 × 300 × 270	16
長期挙動（曲げクリープ破壊試験）	5,990 × 300 × 270	30
含水率挙動の評価	2,995 × 300 × 270	2
	300 × 300 × 270	16
予備	5,990 × 300 × 270	4

原板No.1：寸法：270×2,806×12,030(mm)	
	300 600 900 1200 1500 1800 2100 2400 2700 3000 3300 3600 3900 4200 4500 4800 5100 5400 5700 6000 6300 6600 6900 7200 7500 7800 8100 8400 8700 9000 9300 9600 9900 10200 10500 10800 11100 11400 11700 12000
300	初期01
600	66-1
900	72-1
1200	初期03
1500	78-1
1800	84-1
2100	予備1

原板No.2：寸法：270×2,806×12,030(mm)	
	300 600 900 1200 1500 1800 2100 2400 2700 3000 3300 3600 3900 4200 4500 4800 5100 5400 5700 6000 6300 6600 6900 7200 7500 7800 8100 8400 8700 9000 9300 9600 9900 10200 10500 10800 11100 11400 11700 12000
300	90-1
600	初期05
900	68-1
1200	74-1
1500	初期07
1800	80-1
2100	86-1

原板No.3：寸法：270×2,806×12,030(mm)	
	300 600 900 1200 1500 1800 2100 2400 2700 3000 3300 3600 3900 4200 4500 4800 5100 5400 5700 6000 6300 6600 6900 7200 7500 7800 8100 8400 8700 9000 9300 9600 9900 10200 10500 10800 11100 11400 11700 12000
300	予備3
600	92-1
900	初期09
1200	70-1
1500	76-1
1800	初期11
2100	82-1

原板No.4：寸法：270×2,074×12,030(mm)	
	300 600 900 1200 1500 1800 2100 2400 2700 3000 3300 3600 3900 4200 4500 4800 5100 5400 5700 6000 6300 6600 6900 7200 7500 7800 8100 8400 8700 9000 9300 9600 9900 10200 10500 10800 11100 11400 11700 12000
300	初期13
600	含水率2
900	88-1
1200	初期15
1500	94-1

図 2-1-1 9層9プライ CLT 原板における試験体の採材概要  
(図中の色は表 2-1-2 の試験体の種類と一致)

## 2.2 CLTの曲げ性能に影響を及ぼす因子の抽出

### 2.2.1 ラミナの集材及び製造試験

9層9プライCLTの長期挙動の評価については、これまでの他の層構成の長期挙動データ収集と同様に、直交集成板の日本農林規格に規定される曲げ試験の条件（3等分点4点荷重方式、スパン：試験体厚さの21倍）で実施している。今後、CLTの短期曲げ試験の結果から長期挙動の予測を可能とするには、どのような因子を用いることが有効であるかを検証しなければならない。そのためには、CLTの曲げ性能に及ぼす諸因子の影響を詳細に明らかにする必要がある。また特に、9層9プライのように厚さが大きいCLTでは試験体長さも大きくなるため、試験を実施する上でスパンを確保することが困難になる場合も想定される。既往の研究等では、CLTの曲げ試験におけるスパン変更の影響について系統立てて実証した事例は少なく、その影響の程度は明らかとなっていない。そこで本事業では、9層9プライCLTの曲げ性能に及ぼすスパンの影響を調べるため、次に示す製造実験と実証試験を実施した。

本事業で使用する9層9プライCLT試験体は、2.1で示す長期挙動試験と同仕様とした。まずM60B及びM30Bのラミナを集材した。ラミナの集材地域は、岡山県、熊本県、高知県、奈良県であった。本事業で集材したM60B及びM30Bラミナについて、母集団及び実際に製造に使用したラミナの曲げヤング係数の分布図を図2-2-1～4に示す。

9層9プライCLT試験体の製造条件や層構成に関する仕様は表2-1の通りである。なお本事業では、強軸方向と弱軸方向の両者においてスパンの影響を把握するため、それぞれの原板を製造した。原板サイズは長さ12,030mm×幅1,830mm×厚さ270mmとし、強軸・弱軸それぞれ計1枚を製造した。原板から計8本の曲げ試験体を採材した。曲げ試験体の採材図は付録に示す。

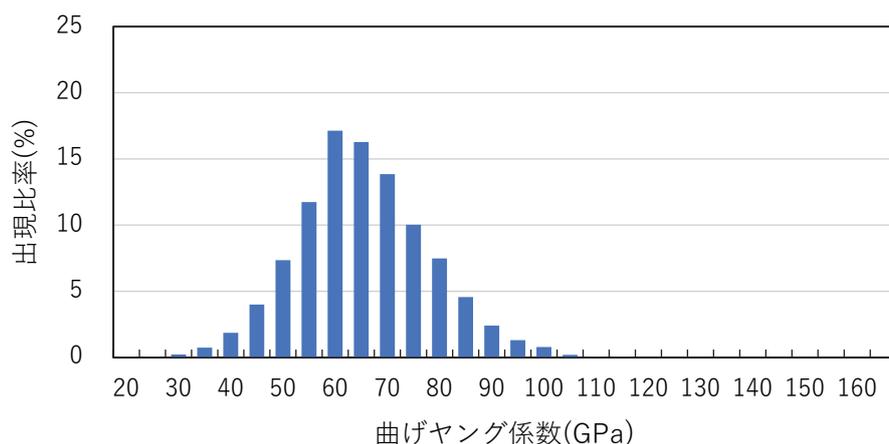


図 2-2-1 M60B ラミナ母集団における曲げヤング係数の分布

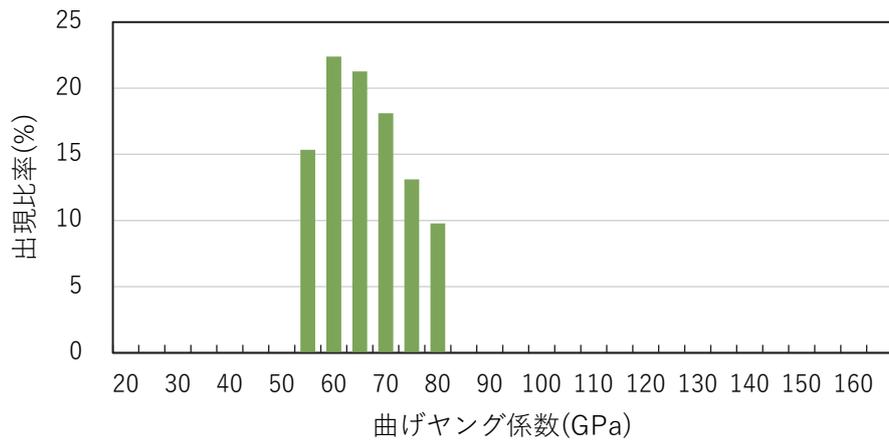


図 2-2-2 CLT 試験体製造に使用した M60B ラミナの曲げヤング係数の分布

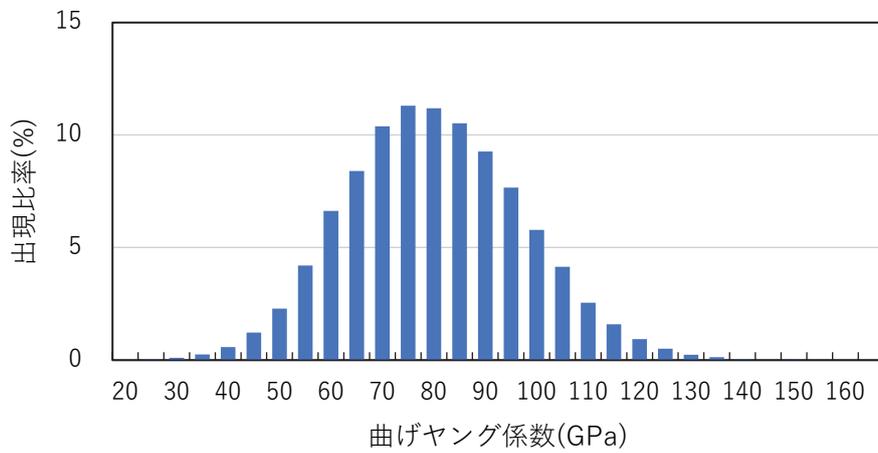


図 2-2-3 M30B ラミナ母集団における曲げヤング係数の分布

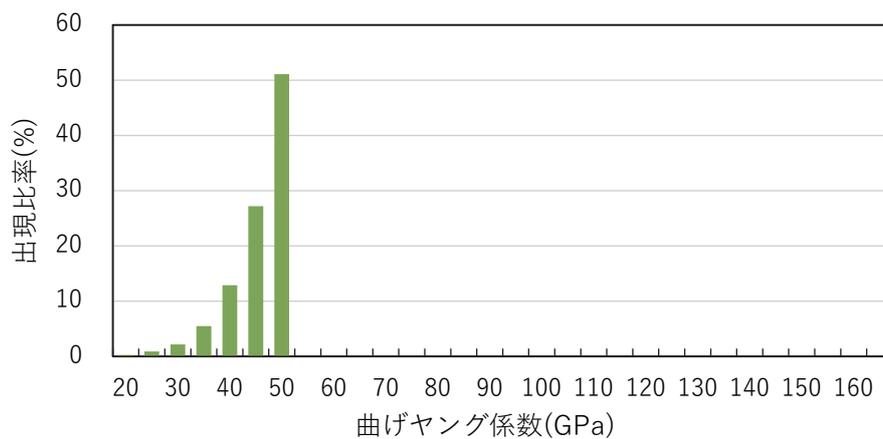


図 2-2-4 CLT 試験体製造に使用した M30B ラミナの曲げヤング係数の分布

## 2.2.2 CLT の曲げ性能に影響を及ぼす因子

直交集成板の日本農林規格（以下 CLT の JAS とする）の曲げ試験の方法は、標準条件として、スパンが梁せいの 21 倍の 3 等分点 4 点荷重方式が示されている。一方、試験体や試験機の制約で 21 倍のスパンが取れない場合も想定される。その際、荷重点間距離あるいはシアスパン（荷重点支点間距離）を 7 倍より小さくする可能性がある。シアスパンを変更すると、測定される見かけの曲げヤング係数が変化するため、調整式により見かけの曲げヤング係数を標準条件での値に調整する必要がある。試験時条件によるヤング係数  $E_T$  と標準条件によるヤング係数  $E_s$  との調整式は以下のとおりである。

$$E_T = E_s \frac{\{1 + 2.4h_0^2 \times \left(\frac{E}{G}\right) \div (3L_0^2 - 4a_0^2)\}}{\{1 + 2.4h^2 \times \left(\frac{E}{G}\right) \div (3L^2 - 4a^2)\}}$$

ここで、 $h$  は材せい、 $L$  はスパン、 $a$  はシアスパン、下付きの 0 があるものは標準条件、下付きの 0 がないものは試験時条件である。

上記の調整式を用いるには CLT 全体としての  $G$ （せん断弾性係数）が必要であり、CLT Handbook などでは、層ごとの  $G$  の値として、強軸方向： $G=E/16$ 、弱軸方向： $G=E/(16 \times 10)$ （10 はローリングシア考慮）が用いられている。CLT の JAS のヤング係数では CLT 全体の  $E/G$  を大きめに見積もって 50 とし、真の曲げヤング係数に上記の式で求められる低減係数 0.9 を乗じて、標準条件の曲げヤング係数を算出している。 $E/G$  が大きくなる（ $G$  が小さくなる）と全変形に対するせん断たわみの影響が無視できなくなるが、 $E/G$  を実験的に測定した例は限られている。そこで本試験では、 $E$  と  $G$  を動的に測定する TGH 法と静的に測定する変動スパン法を用いて  $E$ 、 $G$ 、 $E/G$  を非破壊的に算出し、それぞれの値を検討した。また、最終的に曲げ破壊試験を行い、曲げ強度等を求めた。

### 2.2.2.1 動的な方法（TGH 法）と静的な方法（変動スパン法）から算出したヤング係数 $E$ とせん断弾性係数 $G$

試験体はいずれも Mx60B で 9 層 9 プライ強軸試験体（9L9P-Ma）8 体と 9 層 9 プライ弱軸試験体（9L9P-Mi）8 体とした。試験体寸法は長さが 5990mm、幅が 300mm、厚さ（材せい）が 270mm である。すべての試験体について、密度、縦振動法のヤング係数を測定した。その後、スパンを材長の 0.552 倍（3312mm）として、曲げたわみ振動法のヤング係数、TGH 法のヤング係数、TGH 法のせん断弾性係数を求めるため、面外における動的たわみ振動を測定した。動的たわみ振動測定の様子を写真 2-2-1 に示す。



写真 2-2-1 動的たわみ振動測定の様子

続いて静的な方法として、変動スパン法によりヤング係数、せん断弾性係数を求めた。方法は「構造用木材の強度試験マニュアル」に従った。スパン条件を図 2-2-5 に示す。

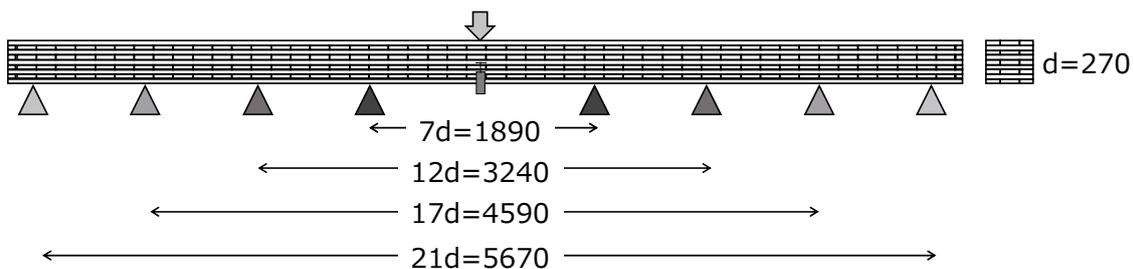


図 2-2-5 変動スパン法のスパン条件（単位：mm）

各スパン条件から得られた  $[(材せい d/スパン L)^2]$  と  $[1/見かけの曲げヤング係数 (E_m, app)]$  との関係の例を図 2-2-6～7 に示す。いずれの試験体も良好な直線関係が得られた。

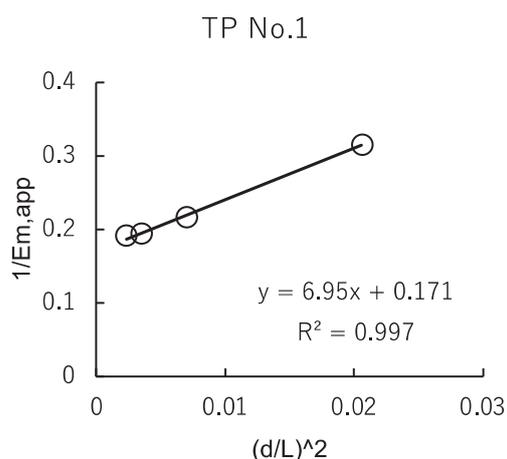


図 2-2-6 9L9P-Ma の例

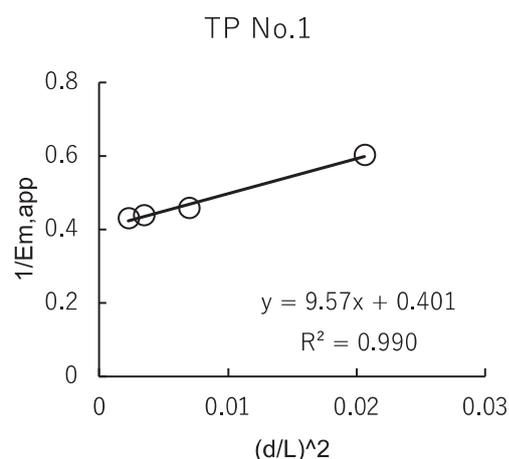


図 2-2-7 9L9P-Mi の例

これらのグラフから得られた傾きと切片から変動スパン法のヤング係数 (=1/切片) とせん断弾性係数 (=1.2/傾き) を求めた。

非破壊試験の結果を表 2-2-1 に示す。

表 2-2-1 非破壊試験の結果

等級 記号	構成	強軸/ 弱軸	試験体 番号	縦振動法	曲げたわみ 振動法	TGH法	TGH法	変動スパン法	変動スパン法
				ヤング係数	ヤング係数	ヤング係数	せん断弾性係数	ヤング係数	せん断弾性係数
				(kN/mm <sup>2</sup> )					
Mx60	9L9P	Ma	1	4.44	5.66	6.13	0.232	5.85	0.173
Mx60	9L9P	Ma	2	4.20	5.48	5.97	0.244	5.68	0.177
Mx60	9L9P	Ma	3	4.49	5.51	6.03	0.235	5.65	0.208
Mx60	9L9P	Ma	4	4.65	5.97	6.50	0.264	6.07	0.202
Mx60	9L9P	Ma	5	4.44	5.72	6.17	0.235	5.88	0.179
Mx60	9L9P	Ma	6	4.61	5.86	6.27	0.248	6.08	0.182
Mx60	9L9P	Ma	7	4.27	5.36	5.83	0.241	5.62	0.179
Mx60	9L9P	Ma	8	4.49	5.52	6.14	0.246	5.92	0.187
平均				4.45	5.64	6.13	0.243	5.84	0.186
変動係数(%)				3.46	3.67	3.29	4.18	3.10	6.82
Mx60	9L9P	Mi	1	3.21	2.44	2.63	0.207	2.49	0.125
Mx60	9L9P	Mi	2	3.23	2.41	2.52	0.207	2.42	0.144
Mx60	9L9P	Mi	3	3.40	2.40	2.63	0.206	2.45	0.145
Mx60	9L9P	Mi	4	3.26	2.27	2.45	0.220	2.28	0.133
Mx60	9L9P	Mi	5	3.16	2.28	2.51	0.210	2.33	0.131
Mx60	9L9P	Mi	6	3.17	2.27	2.37	0.220	2.34	0.156
Mx60	9L9P	Mi	7	3.23	2.30	2.50	0.214	2.35	0.154
Mx60	9L9P	Mi	8	3.20	2.47	2.61	0.214	2.52	0.122
平均				3.23	2.36	2.53	0.212	2.40	0.139
変動係数(%)				2.31	3.58	3.62	2.76	3.53	9.15

ヤング係数 E、せん断弾性係数 G、E/G のそれぞれについて動的な方法と静的な方法を比較したものを図 2-2-8～9 に示す。動的と静的の方法を比較すると、強軸と弱軸ともに、ヤング係数は概ね同等、せん断弾性係数は動的の方が静的よりもやや大きかった。そのため E/G は静的の方が動的よりも大きくなった。強軸と弱軸を比較すると、動的と静的ともにヤング係数の差に比べてせん断弾性係数の差は小さかった。そのため E/G は強軸の方が弱軸よりも大きくなった。E/G の平均値は強軸動的、強軸静的、弱軸動的、弱軸静的の順でそれぞれ 25.2、31.6、11.9、17.5 であり、個別の試験体の範囲は 11～34 であった。

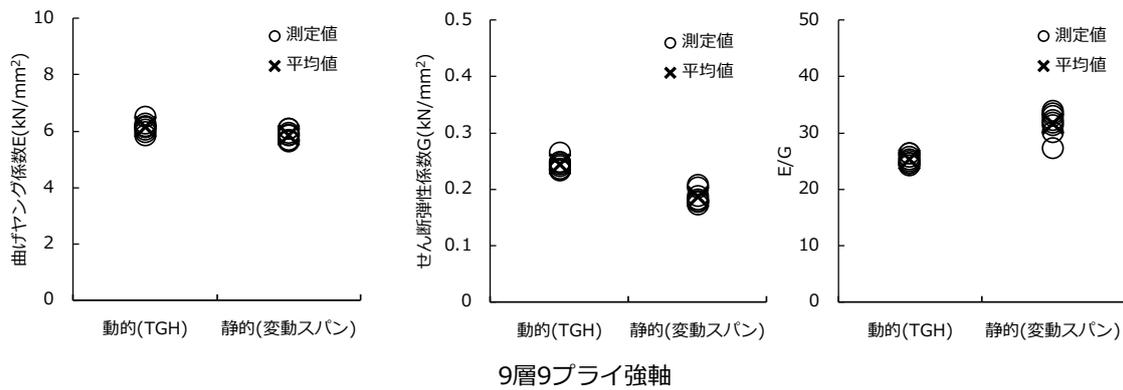


図 2-2-8 動的な方法と静的な方法の比較 (9 層 9 プライ強軸)

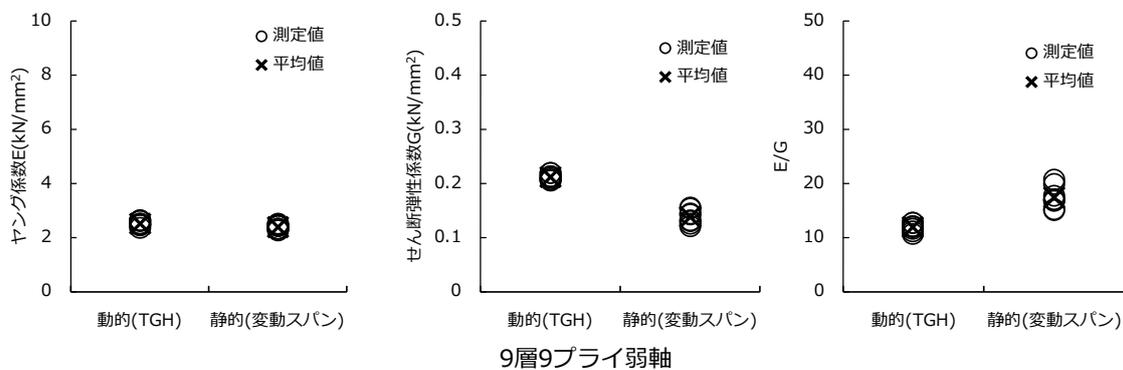


図 2-2-9 動的な方法と静的な方法の比較 (9 層 9 プライ弱軸)

強軸動的、強軸静的、弱軸動的、弱軸静的の E、G、E/G から、それぞれの条件で全たわみに対する曲げたわみとせん断たわみの割合を算出した。荷重条件はスパンが材せい  
の 21 倍の 3 等分 4 点荷重とした。曲げたわみは  $(23/648) \times (P/2) \times L^3 / (EI)$ 、せん断た  
わみは  $P \times (2L/3) \times k / (4GA)$  で求めた。ここで P は荷重、L はスパン (=5670mm)、E は各  
条件のヤング係数、I は断面 2 次モーメント (=49207500mm<sup>4</sup>)、k は形状係数 (ここ  
では 1.2 とした)、G は各条件のせん断弾性係数、A は断面積 (=81000mm<sup>2</sup>) である。各条

件から求めた E、G、E/G、全たわみに対する曲げたわみの割合、全たわみに対するせん断たわみの割合を表 2-2-2 に示す。E/G が大きい強軸静的でせん断たわみの割合が最も大きく、その値は 0.06 であった。

表 2-2-2 全たわみに対する曲げたわみとせん断たわみの割合

構成	測定方法	E (N/mm <sup>2</sup> )	G (N/mm <sup>2</sup> )	E/G	全たわみに対する 曲げたわみの割合	全たわみに対する せん断たわみの割合
9L9P-Ma	動的	6130	243	25.2	0.95	0.05
	静的	5840	186	31.6	0.94	0.06
9L9P-Mi	動的	2530	212	11.9	0.98	0.02
	静的	2400	139	17.5	0.96	0.04

注：E、G、E/G は各条件の試験体 8 体の平均である。

### 2.2.2.2 曲げ破壊試験

CLT の JAS の曲げ試験に従い、スパンを材せい h の 21 倍とした 3 等分点 4 点曲げ方式により曲げ試験を行った。試験の模式図を図 2-2-10 に示すとともに試験の様子を写真 2-2-2~3 に示す。最大容量が 1000kN の実大木材強度試験機（前川試験機製作所製 SAH-100-SS）により载荷した。クロスヘッド速度は 15mm/min とした。試験体の側面中央部に変位計（東京測器研究所製 SDP-200E）を設置し試験体の全たわみを測定するとともに、試験体の上部材面圧縮面上に変位計（東京測器研究所製 CDP-10）を取り付けた袴型治具（スパン 1000mm）を載せ、荷重点間における曲げたわみを測定した。試験終了後、全たわみから求めた見かけの曲げヤング係数、荷重点間のたわみから求めた真の曲げヤング係数、比例限度応力、曲げ強度を算出した。また、破壊部近傍から長さが約 30mm の含水率測定用試験体を切り出し、全乾法で含水率を測定した。

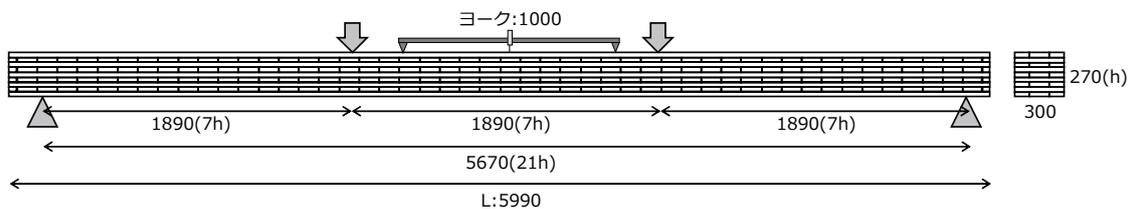


図 2-2-10 曲げ試験の模式図 (単位: mm)



写真 2-2-2~3 曲げ試験の様子(左：強軸試験体、右：弱軸試験体)

曲げ試験の結果を表 2-2-3 に示すとともに、破壊形態の例を写真 2-2-4~7 に示す。強軸試験体は引張り側の FJ が起点となり破壊した。弱軸試験体は引張り側から 2 層目の強軸ラミナの FJ の破壊箇所の付近で引張り側外層が破壊した。

曲げ試験から求めた真の曲げヤング係数は TGH 法あるいは変動スパン法のヤング係数と同様にせん断の影響を含まないものであるが、曲げ試験による真の曲げヤング係数は TGH 法と変動スパン法のヤング係数よりも低い値であった。

表 2-2-3 曲げ試験の結果

等級 記号	構成	強軸/ 弱軸	試験体 番号	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	含水率 (%)	見かけの 曲げヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	真の 曲げヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	比例限度 応力 (N/mm <sup>2</sup> )	曲げ強度 (N/mm <sup>2</sup> )
Mx60	9L9P	Ma	1	380	10.9	5.24	6.17	12.4	16.6
Mx60	9L9P	Ma	2	380	10.5	5.13	5.64	12.3	19.6
Mx60	9L9P	Ma	3	383	10.0	5.28	5.95	12.8	18.4
Mx60	9L9P	Ma	4	388	10.7	5.82	6.36	13.9	18.7
Mx60	9L9P	Ma	5	384	10.4	5.21	5.78	13.0	21.2
Mx60	9L9P	Ma	6	381	10.2	5.67	6.54	12.2	18.9
Mx60	9L9P	Ma	7	385	11.2	5.30	6.14	11.8	17.8
Mx60	9L9P	Ma	8	383	10.6	5.44	5.89	12.3	17.7
平均				383	10.6	5.39	6.06	12.6	18.6
変動係数(%)				0.698	3.52	4.51	4.96	5.21	7.35
Mx60	9L9P	Mi	1	388	10.7	2.36	2.60	5.85	12.0
Mx60	9L9P	Mi	2	384	10.8	2.48	2.81	4.74	9.43
Mx60	9L9P	Mi	3	382	10.1	2.26	2.33	5.82	11.8
Mx60	9L9P	Mi	4	381	9.69	2.32	2.47	5.19	9.56
Mx60	9L9P	Mi	5	382	10.4	2.31	2.37	5.77	10.5
Mx60	9L9P	Mi	6	380	9.10	2.23	2.46	5.42	9.81
Mx60	9L9P	Mi	7	384	10.0	2.30	2.41	5.36	10.1
Mx60	9L9P	Mi	8	374	9.04	2.31	2.48	5.78	8.93
平均				382	10.0	2.32	2.49	5.49	10.3
変動係数(%)				1.06	6.60	3.28	6.06	7.14	10.8



写真 2-2-4~5 9L9P-Ma の破壊形態の例



写真 2-2-6~7 9L9P-Mi の破壊形態の例

見かけの曲げヤング係数と曲げ強度の平均値と 5%下限値を JAS 基準値または基準強度と比較したものを表 2-2-4 に示す。見かけの曲げヤング係数について、いずれの特性値も JAS 基準値または基準強度を上回っていた。

なお、今年度用いた 9 層 9 プライ強軸試験体の見かけの曲げヤング係数と曲げ強度は、昨年度用いた同構成の試験体よりもやや高い値を示した。今年度はラミナ試験体の強度試験は行っていないが、使用されたラミナの曲げヤング係数が昨年度に比べて高かった可能性がある。

表 2-2-4 見かけの曲げヤング係数と曲げ強度の平均値と 5%下限値

		見かけの曲げヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	曲げ強度 (N/mm <sup>2</sup> )
9L9P-Ma	平均値	5.39 JAS 基準値 : 3.2	18.6
	5%下限値 (正規分布仮定)	4.86 JAS 基準値 : 2.6	15.6 基準強度 : 7.86
9L9P-Mi	平均値	2.32 JAS 基準値 : なし	10.3
	5%下限値 (正規分布仮定)	2.15 JAS 基準値 : なし	7.84 基準強度 : 3.18
(参考)	平均値	4.79	16.0
昨年度 9L9P-Ma	5%下限値 (正規分布仮定)	4.26	13.8

### 3. CLTの長期変形挙動に関する測定方法の妥当性の検討

#### 3.1 目的

CLTの長期荷重試験において、試験体含水率の変動は大きな影響因子となる。木材の粘弾性的性質は試験中に含水率が経時的に変化する非平衡状態では、平衡状態とその性質が大きく異なることが知られている。しかしながら、CLTのように過去に検証を受けていない材料では、含水率変動が力学的性能に与える影響に関しては今後の検討を待たねばならない。CLTの長期荷重試験を実施する上で、試験実施中の試験体内部の含水率変化は結果の検討に影響を及ぼす主要な因子であると考えられることから、これをシミュレーションで予測する手法および実測において把握する手法を検討した。

#### 3.2 実施内容

今年度は以下の項目について検討を行った。

- ・透湿抵抗に与える測定湿度の影響
- ・接着層を考慮したCLT内部含水率のシミュレーション手法の検討
- ・CLTラミナ間の隙間が熱伝導率、内部含水率変動に与える影響
  - 1) 熱伝導率に与える影響
  - 2) 内部含水率変動に与える影響
- ・CLT内部含水率の長期モニタリング手法の検討
  - 1) 長期モニタリング試験の結果
  - 2) 含水率データ長期収集装置の検討

#### 3.3 透湿抵抗に与える試験湿度の影響

木材・木質材料の透湿抵抗は、試験湿度（含水率）の影響を受けるとされる。そこで、測定時の湿度を3段階に変化させた場合の透湿抵抗を比較した。

透湿抵抗の測定にはJIS A 1324:1995「建築材料の透湿性能測定方法」におけるカップ法を用いた。同測定方法は、図3-1に示す内部に吸湿剤である塩化カルシウムを入れたアルミニウム製のカップに試験体を取り付け、これを任意の温湿度環境下におくことによって、材料を通過する水分量を重量変化（吸湿量）として測定し、吸湿量を算出する方法である。CLTの接着層の影響を測定するために、“3.6 長期モニタリング試験”における含水率測定試験体と同じマザーボードから切り出された厚さ（製品厚さ）270mm、幅（弱軸方向）300mm、長さ（強軸方向）300mmのCLTを切削し、接着層1層を含む厚さ20mmの“接着層あり”試験体を得た。また、CLTに用いられたものと同等のラミナ（厚さ30mm、幅120mm、長さ2000mm）について、長さを300mm、厚さを20mmに切削して、“接着層なし”の試験体とした（図3-2）。これらを23℃50%RHの恒温室内で、24時間当たりの重量変化が0.1%以下になるまで調湿し試験に供した。試験体の透湿面以外の部分をアルミテープで断湿し、吸湿剤を500g入れたカップにアルミテープとパラフィンで固定した。なお、“接着層なし”については、アルミテープによる防湿を行った120mm

のラミナを2枚並べる形で設置し、両者の接する部分をアルミテープとパラフィンで防湿した（図3-3、3-4）。

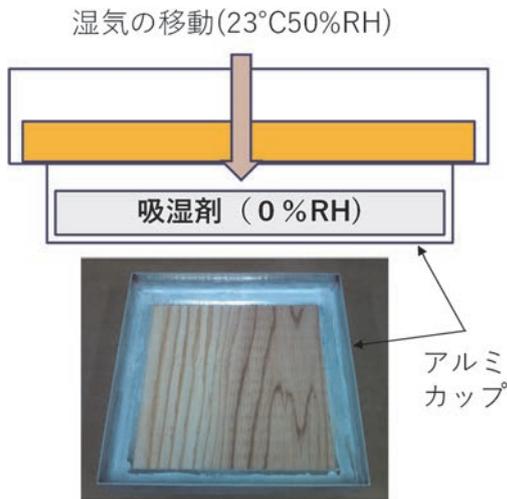


図 3-1 透湿試験の概要 (JIS の標準条件の場合)



接着層あり



接着層なし

図 3-2 透湿試験用の試験体

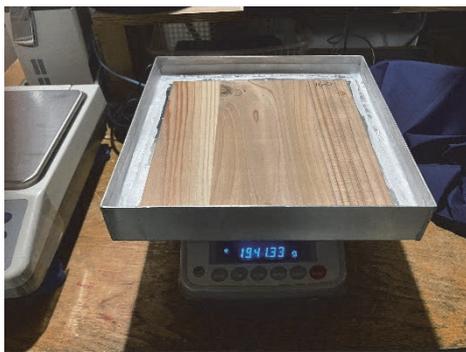


図 3-3 透湿試験 (接着層あり)

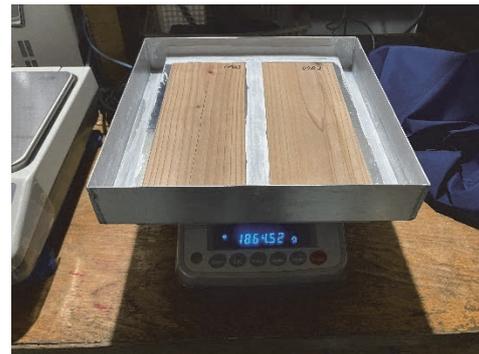


図 3-4 透湿試験 (接着層なし)

試験体を固定したカップを 23°C50%RH の恒温恒室に設置し、経時的に重量を 0.001g 精度の電子天秤（エーアンドディ社製：FX-3000i）で測定した。このとき、試験体内の平均湿度は 25%RH と見なせる。透湿試験における透湿面積、透湿距離（湿気の通過する距離）等を表 3-1 にしめす。重量増加がほぼ一定となった時点で材料を通過する湿気量が一定になったと見なし、次式によって透湿抵抗を算出した。

$$Z_p = \frac{A|P_1 - P_2|}{G} \quad (3-1)$$

ここで、 $Z_p$ は透湿抵抗 [(m<sup>2</sup>・s・Pa)/ng]、 $G$ は透湿量[ng/s]、 $A$ は透湿面積[m<sup>2</sup>]、 $P_1$ は恒温室の水蒸気圧[Pa]、 $P_2$ はカップ内部の水蒸気圧[0Pa]を示す。

試験終了後、カップを 23°C90%RH に設定された恒温恒室器（東洋アドバンテック社：THN062PB）内に設置し、同様に測定を行った（図 3-5）。このときの試験体内の平均湿度は 45%RH と見なせる。90%RH での測定が終了した後、試験体を一旦カップから取り外

して、塩化カルシウムの代わりに蒸留水を 400ml 入れたカップに同様に取り付けおよびシールを行った。このカップを 23°C80%RH の恒温恒湿器内におくと、湿気はカップ内部から外部に流れて重量が減少（放湿）するので、これを吸湿試験と同様に経時的に測定した。このときのカップ内の湿度は 100%RH となるため、試験体の平均湿度は 90% RH と見なせる。なお、吸湿と放湿では材内の湿気移動方向が同様となるように、試験体の上下を交換した。また、試験体数は接着層あり、接着層なしで各 4 体とした。

得られた透湿抵抗を表 3-1 および図 3-4 内に示す。接着層あり、接着層なしの試験体とも、試験平均湿度の増加と共に透湿抵抗は低下した。なお、合板では試験湿度の上昇とともに湿気伝導率が上昇（透湿抵抗が低下）するとされている<sup>1)</sup>。接着層あり、接着層無し間の比較では接着層ありの試験体の透湿抵抗は高く、接着層が透湿抵抗体として作用していると考えられた。また、両者の差異は試験平均湿度の増加と共に減少する傾向が見られた。

表 3-1 透湿試験結果

	透湿面積 (m <sup>2</sup> )	透湿距離 (m)	透湿抵抗 (m <sup>2</sup> ·s·Pa/ng)					
			試験平均湿度 25%		45%		90%	
			平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差
接着層あり	0.0625	0.0201	0.0557	0.0092	0.0153	0.0013	0.0022	0.0002
接着層なし	0.0500	0.0201	0.0154	0.0024	0.0083	0.0007	0.0017	0.0003



図 3-5 透湿カップの設置状況

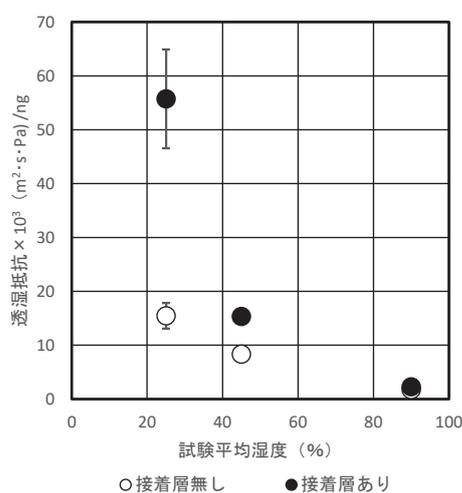


図 3-6 透湿抵抗と湿度との関係

### 3.4 接着層を考慮した CLT 内部含水率のシミュレーション手法の検討

透湿抵抗の測定により、CLT 内部の水分移動は接着層の影響を受ける可能性が示唆された。そこで、厚さ方向の接着層の影響を考慮した CLT 内部の 2 次元水分移動シミュレーションモデルを作成した。

繊維飽和点以下の木材内部における水分の 2 次元非定常等温水分拡散は次式のような 2 階偏微分方程式で表される。

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_x \frac{\partial M}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_y \frac{\partial M}{\partial y} \right) \quad (3-2)$$

ここで、 $M$ は含水率、 $t$ は時間、 $x$ および $y$ は距離、 $D_x$ および $D_y$ は木材中の水分の見かけの拡散係数を表す。また、外気から木材表面へと移動する水分流速 $J_{M_c}$ および接着層を通じて隣接するラミナ表面間を移動する水分流速 $J_{M_{ad}}$ はそれぞれ次の(3-3)、(3-4)式で表される。

$$J_{M_c} = \alpha_w (M_c - M_{w\_outermost}) \quad (3-3)$$

$$J_{M_{ad}} = \alpha_{adhesion} (M_{w\_n} - M_{w\_n+1}) \quad (3-4)$$

ここで、 $\alpha_w$ は木材の湿気伝達率、 $M_c$ は外気の温湿度に対応する木材の平衡含水率、 $M_{w\_outermost}$ は外気に接する木材表面の含水率、 $\alpha_{adhesion}$ は接着層の湿気伝達率、 $M_{w\_n}$ および $M_{w\_n+1}$ はそれぞれ接着層を通じて隣接する  $n$  層目および  $n+1$  層目のラミナの、接着層に接する木材表面の含水率を表す。(3-2)式および境界条件(3-3)、(3-4)式をもとに、接着層を含む木質材料の内部含水率挙動を計算する 2 次元解析プログラムを作成した。2 階偏微分方程式の離散化手法は有限差分法とし、数値計算法にはクランク=ニコルソン法を用いた。プログラム言語には Python を用いた。

試験体の解析モデルを図 3-7 に示す。材幅は 300mm、ラミナ厚は 30mm とし、材厚は 270mm とした。奇数層は $x$ 軸に平行な方向が繊維直交方向、偶数層は $x$ 軸に平行な方向が繊維平行方向となるようにした。奇数層の隣接するラミナ幅方向の隙間の影響は無視し、一様な木材とみなした。試験体の絶乾密度は 327kg/m<sup>3</sup>、初期含水率は 11.2%とした。接着層の湿気伝達率は透湿抵抗試験から算出し、28.6ng/m<sup>2</sup>sPa とした。入力する温湿度条件については吸湿試験において恒温恒湿槽内に設置した温湿度記録計から 10 分間隔で取得したデータを用いた。試験体の温

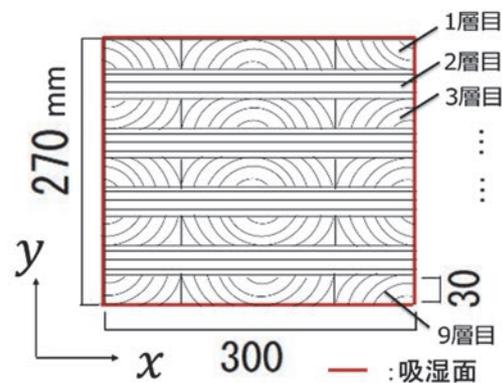


図 3-7 試験体モデル

度は 20℃で一定とし、位置刻み $\Delta x=1.5\text{mm}$ 、 $\Delta y=0.3\text{mm}$ 、時間刻み $\Delta t=600\text{s}$  で 206 日経過まで数値計算を行った。

試験体の概要を図 3-8 に示す。試験体寸法は材長 (z) 40mm、材幅 (x) 300mm、材厚 (y) 270mm とした。試験体数は 5 体とした。試験体を 20℃65%RH の恒温恒湿室内で調湿した後、図 3-8 中の z 軸方向に直交する 2 面をアルミテープにより密封し、xy 方向の 2 次元方向にのみ木材表面から水分が移動するようにした。その後、試験体を 20℃85%RH に設定した恒温恒湿槽内に 206 日間静置した。その間、一定時間ごとに試験体を取り出して重量を測定し含水率を計算した。

実験および解析により求めた試験体の平均含水率の経時変化を図 3-9 に示す。実験値に対する解析値の最大絶対誤差は、経過日数 53 日において接着層の影響を考慮した条件で約 0.47 ポイント、影響を無視した条件で約 0.77 ポイントとなった。解析値は実験値とよく一致しており、わずかな差であるが接着層を考慮した条件の方が精度の高い結果となった。解析により求めた各層における平均含水率の経時変化を図 3-10 に、吸湿開始後 54 日経過時の試験体内部の含水率分布を図 3-11 に示す。接着層の影響を考慮した条件では接着層の影響を無視した条件と比較して各ラミナ間の含水率差が大きくなったことから、接着層は材料厚さ方向の防湿層として機能していることがわかった。以上より、接着層が試験体の含水率変動に与える影響は材料全体でみると小さいものの、長期的な温湿度変動下ではラミナ層間に含水率差を生じさせる場合があることが示唆された。

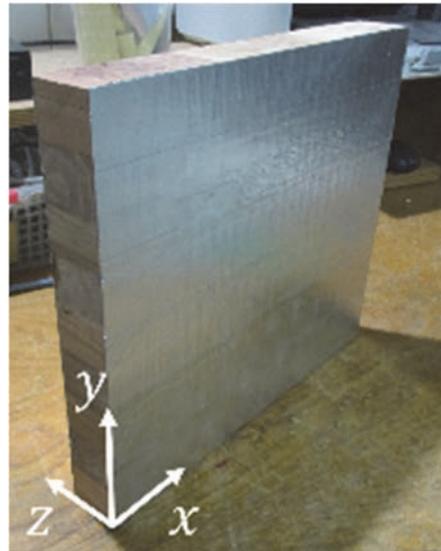


図 3-8 試験体の概要

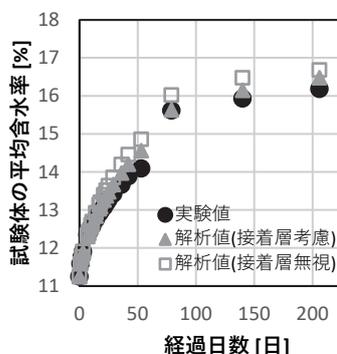


図 3-9 平均含水率の経時変化

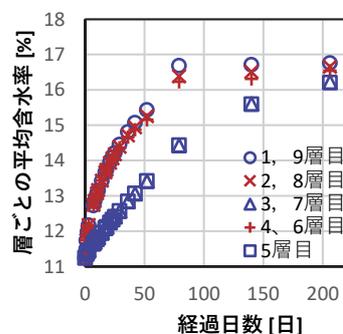
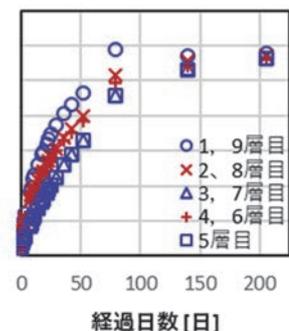


図 3-10 各層における平均含水率の経時変化の解析値  
(左:接着層考慮, 右:接着層無視)



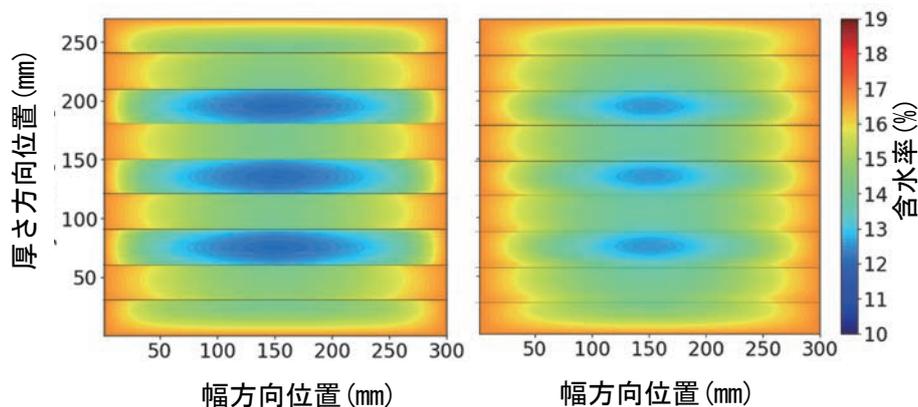


図 3-11 解析から求めた 54 日経過時の試験体内部の含水率分布  
(左:接着層考慮, 右:接着層無視)

### 3.5 CLT ラミナ間の隙間が熱伝導率、内部含水率変動に与える影響

#### 1) 熱伝導率に与える影響

木質材料の熱伝導率については、信田らの報告<sup>2)</sup>をはじめとして多くの検討がなされている。そこで、既往の研究を元に材内の隙間が熱伝導に与える影響を検討した。

木質材料の熱伝導は、木材実質と隙間(空気)それぞれの熱伝導率の直列モデルと並列モデルで考えられる(図 3-12)。CLT の各層における隙間の存在による熱伝導を木材実質と隙間の並列モデル、各層の積層による熱伝導は隙間のない直列モデルとなると仮定した。

並列モデルによる  $i$  番目の層の熱伝導率  $\lambda_i$  [W/ (m·K)] は次式による。

$$R_i = \frac{d_i^2}{\lambda_w \cdot A_{w_i} \cdot d_i + \lambda_a \cdot A_{a_i} \cdot d_i^2} \quad (3-5)$$

$$\lambda_i = \frac{d_i}{R_i} \quad (3-6)$$

ここで、 $R_i$  は CLT の  $i$  番目の層の熱抵抗 [(m<sup>2</sup>·K)/W]、 $d_i$  は CLT の  $i$  番目の層の厚さ [m]、 $\lambda_w$  は木材実質(ラミナ)の熱伝導率 [W/ (m·K)]、 $\lambda_a$  は隙間(空気)の熱伝導率 [W/ (m·K)]、 $A_{w_i}$  は  $i$  番目の層の木材実質(ラミナ)の面積 [m<sup>2</sup>]、 $A_{a_i}$  は  $i$  番目の層の隙間の面積 [m<sup>2</sup>]である。

また、各層の直列モデルによる材全体の熱伝導率  $\lambda$  [W/ (m·K)] は次式による。

$$R = \frac{d_1}{\lambda_1 \cdot A} + \frac{d_2}{\lambda_2 \cdot A} + \dots + \frac{d_i}{\lambda_i \cdot A} \quad (3-7)$$

$$\lambda = \frac{d}{R} \quad (3-8)$$

ここで、 $R$  は CLT 全体の熱抵抗 [(m<sup>2</sup>·K)/W]、 $\lambda_i$  は  $i$  層目の熱伝導率 [W/ (m·K)]、 $d$  は CLT

の厚さ [m]、 $A$ はCLT全体の面積 [m<sup>2</sup>] である。

これらの関係から任意の積層数、材面積、厚さ、隙間の幅、隙間の面積に対する存在率から熱伝導率を算出するシミュレーションモデルを作成した。なお、本モデルでは隙間の空気が発生する熱対流、各層間の接着剤の熱抵抗は無視している。

CLTの製品寸法を3m角、CLTの製品寸法を3m角、ラミナ厚さ30mm、ラミナ幅120mmとし、JAS 3079:「直交集成板」内に規定のラミナ幅方向の隙間について許容される最大値が6mmであることから、隙間の幅を6mm一定とした。各層における隙間の存在率を面積当たり0~10%まで変化させた場合の熱伝導率の変化を図3-13に示す。隙間に熱伝導率の小さい空気層があるため隙間の増加とともに全体の熱伝導率は低下するが、10%の隙間が存在した場合でも熱伝導率の低下は0.3%程度であると言えた。

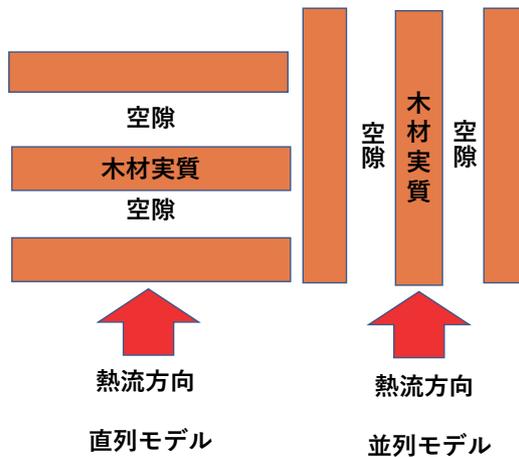


図 3-12 熱伝導モデルの概略

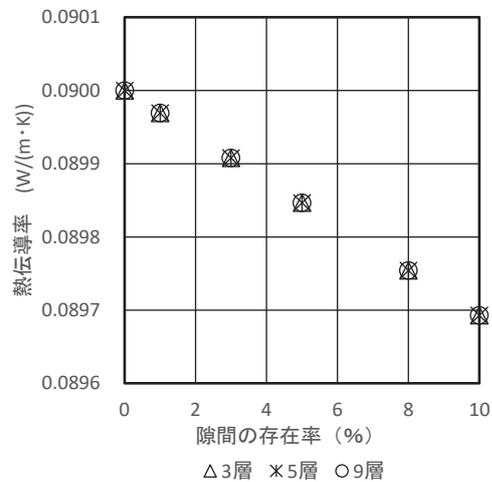


図 3-13 ラミナ間隙間と熱伝導率の関係

## 2) 内部含水率変動に与える影響

木質材料の内部構造が湿気移動に与える影響についての検討は、熱伝導に比べて十分とは言えない。そこで、隙間の存在がラミナ間の水分移動に与える影響について、シミュレーションと実測によって検討を行った。

試験体の解析モデルを図3-14に示す。試験片の寸法は材幅25mm、材厚30mmとし、隙間を設けないモデルでは試験片2個を繊維直交方向である材幅方向で接触させ、材幅50mm、材厚30mmとした。隙間を設けたモデルでは熱伝導率の検討と同様に内部の隙間を6mmとした。材幅は56mm、材厚は30mmとした。試験体の絶乾密度は290kg/m<sup>3</sup>、初期含水率は12.7%とした。入力する温湿度条件については、吸湿試験において恒温恒湿槽内に設置した温湿度記録計から10分間隔で取得したデータを用いた。隙間における水分移動の計算についてはまず、各試験片の隙間に接

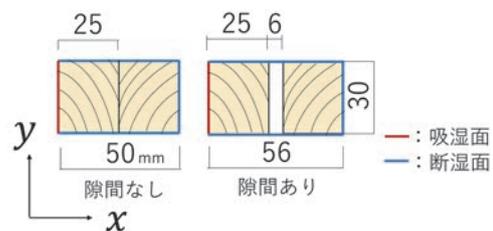


図 3-14 試験体の解析モデル

する両表面の含水率をある相対湿度の時の平衡含水率とみなし、その時の各相対湿度を計算した。それらの平均をとった値を隙間の相対湿度と仮定し、隙間に接する各表面の含水率を再計算することで隙間における水分移動を求めた。 $x$ 軸方向の位置刻みは $\Delta x=0.25\text{mm}$ 、時間刻みは $\Delta t=400\text{s}$ とし、解析モデルの片側側面を吸湿面、その他の面を断湿面として吸湿面から $x$ 軸方向にのみ水分が移動するように設定し、50日経過まで1次元水分拡散の数値計算を行った。

試験体の概要を図3-15に示す。試験片の寸法は材長100mm、材幅25mm、材厚30mmとし、隙間を設けない条件では試験片2個を繊維直交方向である材幅方向に接触させ、材長100mm、材幅50mm、材厚30mmの試験体とした。隙間を設けた条件では内部の隙間の寸法について1mm、3mm、6mmの3条件とし、材長100mm、材幅はそれぞれ51mm、53mm、56mm、材厚は30mmの試験体とした。試験体数は各条件5体とした。試験片を $20^{\circ}\text{C}65\%\text{RH}$ の恒温恒湿室内で調湿した後、図3-15中の吸湿面以外の5面をアルミテープにより密封し、 $x$ 軸方向の1次元方向にのみ木材表面で吸湿されるようにした。その後、試験体を $20^{\circ}\text{C}85\%\text{RH}$ に設定した恒温恒湿槽内に50日間静置した。その間、一定時間ごとに試験体を取り出して重量を測定し含水率を計算した。

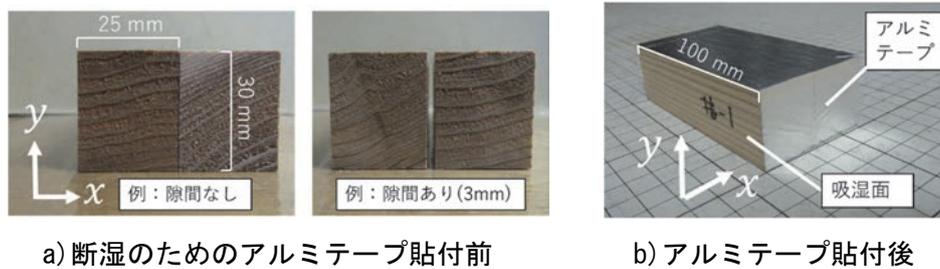


図3-15 使用した試験体とアルミテープ処理

実験と解析により求めた試験体の平均含水率の経時変化を図3-16に、試験体の1日あたりの含水率変化量を図3-17に示す。実験値について、隙間を設けない条件と隙間を設けた条件の間で平均含水率の経時変化および1日あたりの含水率変化量の値にはともに差はみられなかった。また、隙間の大きさによる差もみられなかった。実験値と解析値はよく一致しており、試験体平均含水率について隙間を設けない条件と隙間6mmを設けた条件による実験値と解析値との最大絶対誤差を計算した結果、隙間を設けない条件および設けた条件ともに経過日数50日において、それぞれ0.04ポイント、0.10ポイントとなった。解析から求めた経過日数50日における試験体内部の含水率分布を図3-18に示す。隙間を設けた条件では2つの試験片の間には0.1%弱のごくわずかながら含水率差が生じているが、隙間を設けない条件との間に大きな差はみられなかった。以上より、隙間の存在が繊維直交方向に隣接するラミナ間の水分移動に与える影響はごくわずかであり、CLT製造時に生じる可能性のあるラミナ間の隙間はCLTの幅方向の含水率変動にはほとんど影響を与えない可能性が示唆された。今後は、CLTの厚さ方向の水分移動を含めた検討を行う必要がある。

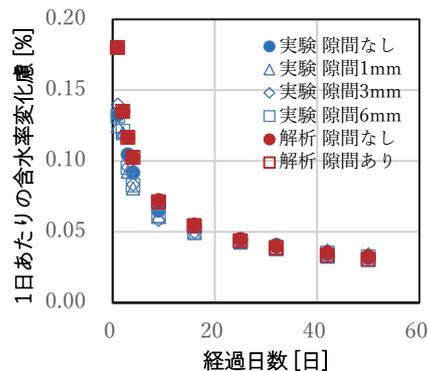
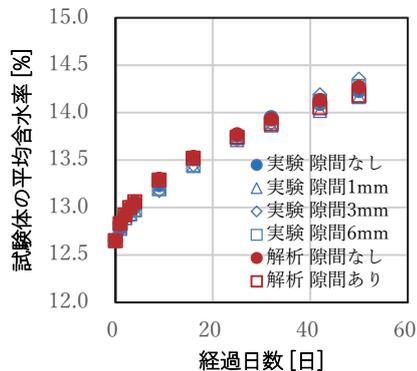


図 3-16 試験体の平均含水率経時変化

図 3-17 試験体の 1 日あたりの含水率変化量

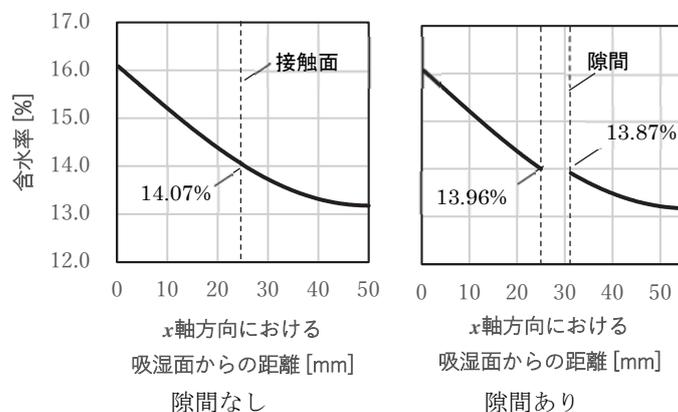


図 3-18 シミュレーションによる経過日数 50 日時の試験体内部含水率

### 3.6 CLT 内部含水率の長期モニタリング手法の検討

#### 1) 長期モニタリング試験の結果

木材の含水率計には様々な手法があるが、現場にて容易に使用できる含水率計には電気抵抗式と高周波式がある。このうち電気抵抗式含水率計は、木材の含水率に応じて電気抵抗が変化する性質を利用し、被測定木材に測定端子についた針を打ち込み針間の電気抵抗を測定することで含水率を測定するものである。本事業では、昨年引き続き、電気抵抗式含水率計によって CLT 内部の含水率を測定する手法を検討した。

森林総合研究所の CLT 長期強度試験棟に設置された長さ 3m の含水率測定試験体（長期強度試験体の半分の長さ）に内部含水率測定用のプローブを設置し、多点型の含水率記録装置を取り付けて長期モニタリングを行うシステムを構築した。2mm 径のステンレス針に電工用の熱収縮チューブを用いて両端部以外を絶縁した(図 3-19)。これに導線を接続して測定用のプローブを作成し(図 3-20)、目的とする場所に先端が来るように CLT に打ち込んだ。穴開け施工においては、充電式ドリル（(株)日立工機製：DS14DBL）にドリルガイド（神沢鉄工(株)製：K-802-2）を取り付けて材面に対して垂直な穿孔お

よび任意の穿孔深さが得られるようにした。また、プローブが測定目標位置において、先端が7mm木材に浸入するように先孔深さと打ち込み量を管理した。なお、プローブ間の距離は20mmとした。浸入深さ、プローブ間距離は市販の電気抵抗式含水率計（kett社製：MT-900）のプローブを参考にした。なお、プローブの挿入時には2液性のエポキシ接着剤をプローブ側面に塗布して、先孔との間の隙間を埋めると共に、打ち込み後に再度上部からエポキシ樹脂接着剤を施工部分に充填し、プローブの固定と先孔からの水分の移動を防止した（図3-21）。また、長期荷重試験用の試験体は材長が6mであるが、材長方向中央の3mの部分は材長方向の水分移動については中立層となり水分の移動がない断湿面と見なせる。このことから、長さが半分の含水率測定試験体においては、片側の端部をアルミテープで防湿して長期荷重試験体の材長方向中央部の断湿面を模した（図3-22）。

試験体の含水率測定位置を図3-23に示す。プローブから伸びる導線に電気抵抗式多点型含水率記録計（コーナー札幌製：KNS-LOG）を接続し、含水率を一定間隔で経時的に記録した（図3-24、25）。

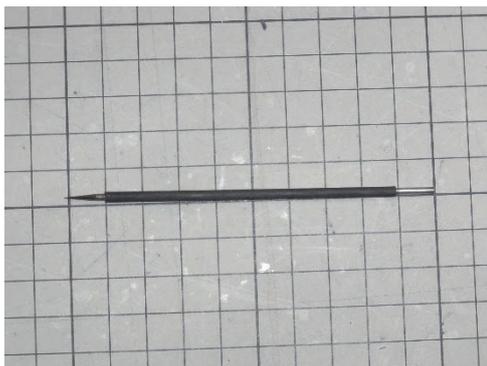


図3-19 測定プローブの例  
（直径2mmのステンレス針の側部を熱収縮チューブで絶縁被覆）



図3-20 測定プローブへのリード線の接続



図3-21 プローブの固定状況  
（エポキシ接着剤充填）



図3-22 プローブの設置状況と  
アルミテープによる断湿状況

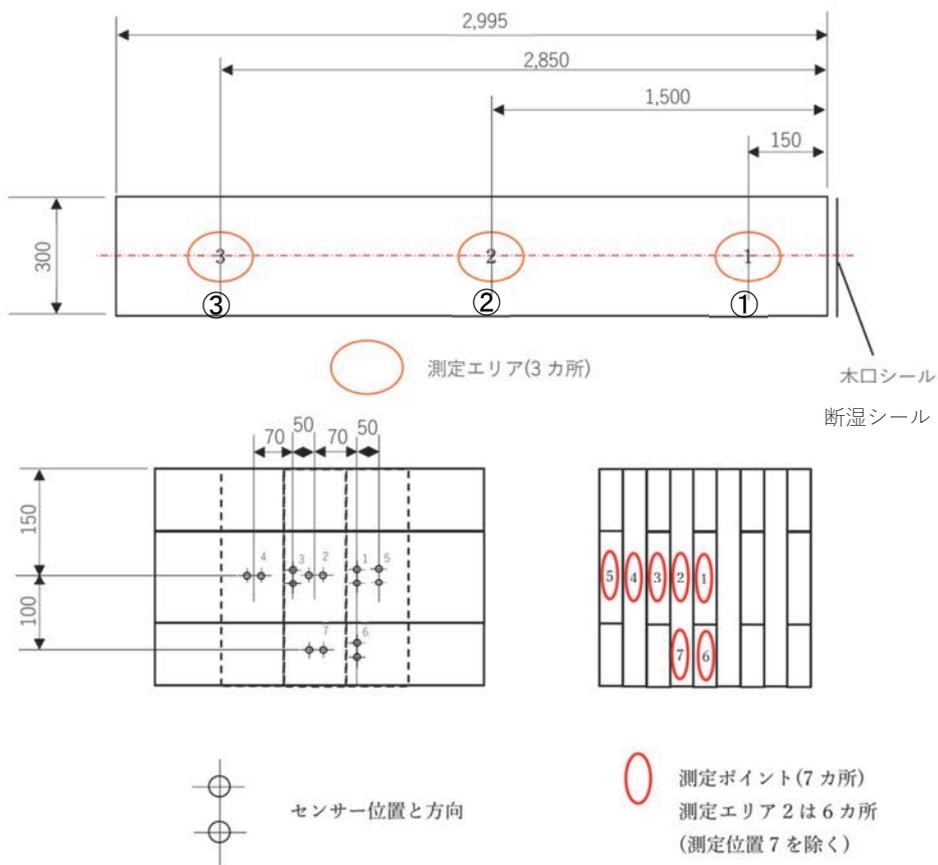


図 3-23 含水率の内部測定位置

※各測定エリアの 6-7 は動作確認用の予備測定点

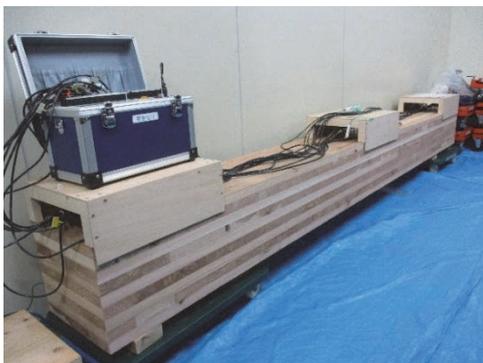


図 3-24 設置完了状態の様子  
(プローブ保護カバー取り付け後)



図 3-25 使用した含水率記録計  
(コーナー札幌製 : KNS-LOG)

設置後約1年間の測定を行った。長期荷重試験体は、各試験ごとに材料を交換しているが、含水率測定試験体は測定装置の安定性を確認することも目的の一つであるため、1年を通じて同じものを使用した。測定期間内に長期荷重試験体の入れ替えによる扉の開放、装置類のメンテナンス等があったため温湿度に変動が見られた。そこで、長期荷重試験の測定スケジュールと室内の温湿度変化から測定期間を表3-2のように区分けして検討を行った。

得られた温湿度、含水率の推移を図3-26および図3-27に示す。また、各期間の平均値、最大値、最小値、及びそれぞれの変化幅 $\Delta$ を表3-3に示す。なお、測定点間の含水率値の差の原因については、測定点があるラミナの位置による水分移動の差異、ラミナの個体差、測定手法による影響等、が考えられるが現時点では検討が不十分であるため、ここでは各測定値の変動安定性について検討を行う。

期間Aにおいては、一部のラミナ（表層から3層目）に含水率変動が見られた。これはCLT生産時のラミナ仕上げ含水率から、荷重試験時の含水率への変化であると考えられた。しかしながら、この変動は2ヶ月から3ヶ月程度で収まり、その後は全層でほぼ変動が少ない安定した挙動を示した。その後期間Bで温湿度が大きく変化したことから、含水率もその影響を受け短期間に全体的な低下が見られた。温湿度が再び安定した期間Cでは含水率は徐々に増加し、3ヶ月で最大0.6%の変化が見られた。なお、期間Cの平均含水率は期間Aに比べて、0.4%低い傾向となった。この原因としては水分吸放湿におけるヒステレシス等が考えられたが今後の検討を要する。また、期間Dでは温度低下と湿度上昇により、短期間に含水率が上昇する傾向が見られた。温湿度が安定した期間Eでは再び含水率の変動は小さくなった。

これらのことから、長期荷重試験中の含水率変動は小さく、試験が安定的に行われていることが示された。しかしながら、荷重試験中に長期間の温湿度変動があった場合には試験体の内部含水率が短期間に変動し、その影響が温湿度安定後も長期に渡る可能性があるため、試験中の温湿度管理には十分な注意が必要と言えた。前述のように、今回の試験では測定点間の含水率値に差が見られた。この要因については、含水率測定試験体を裁断して測定点付近のラミナの含水率を全乾法等で測定する等の検討が必要と考えられる。

表 3-2 測定期間と試験状況の関係

期間名	A	B	C	D	E
期間	2023/2/10 -7/24	2023/7/25 -8/29	2023/8/30 -11/15	2023/11/16 -12/26	2023/12/27 -2024/2/8
状況	測定 1	入れ替え等	測定 2	入れ替え等	測定 3

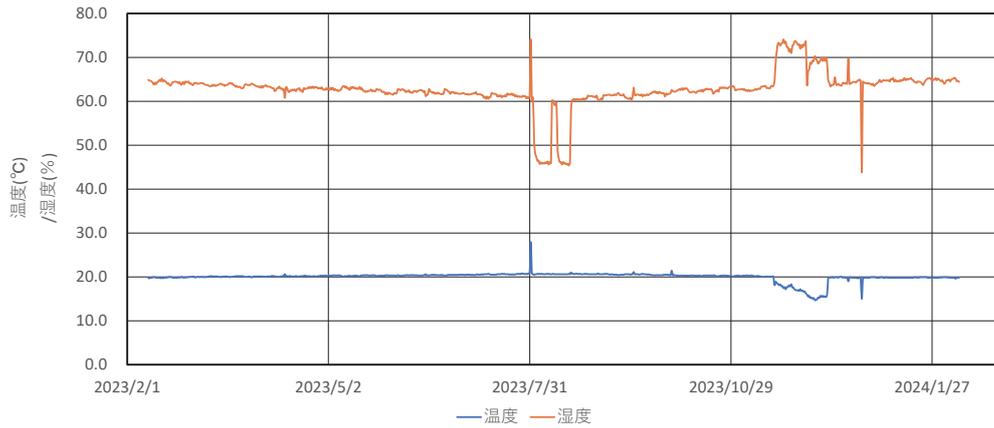


図 3-26 含水率試験体周囲の温湿度変化

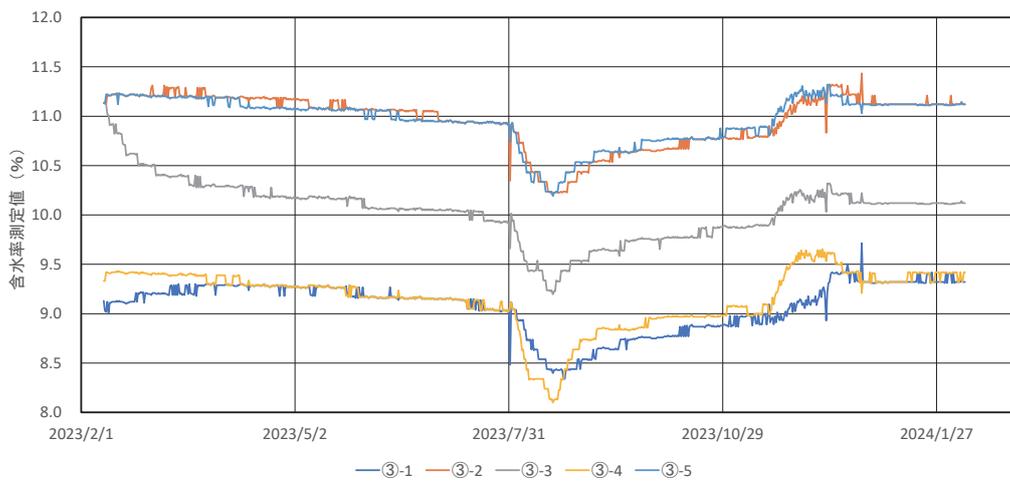
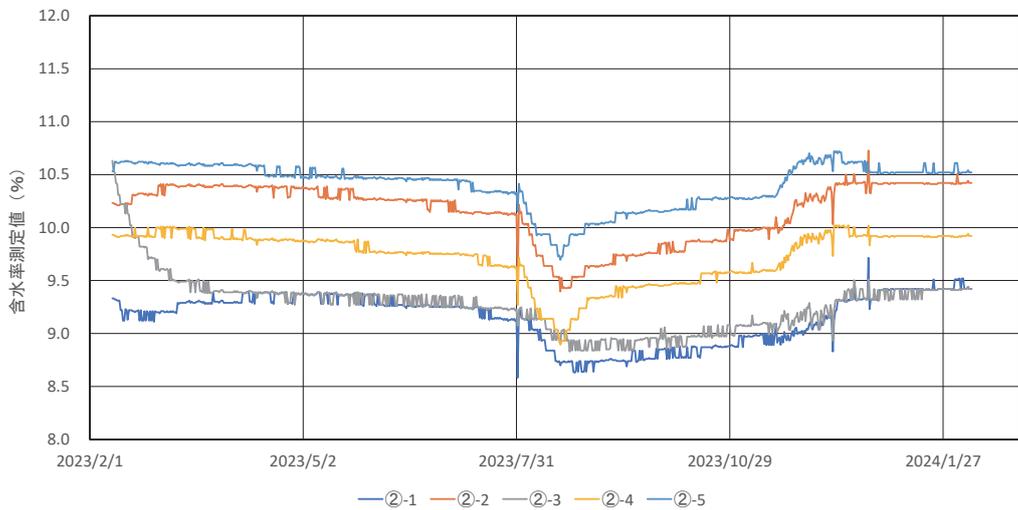
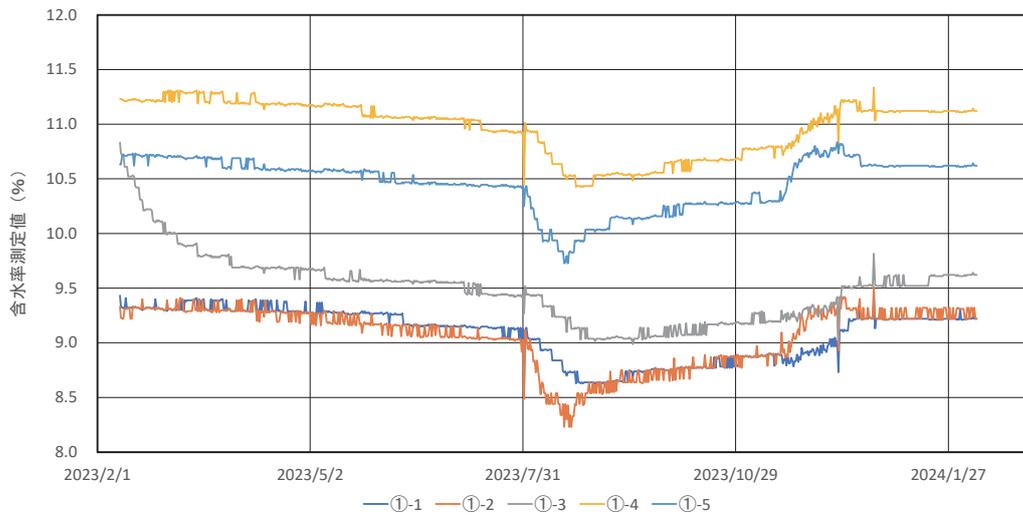


図 3-27 内部含水率の経時変化

表 3-3 各期間の温度、湿度および内部含水率

	温度 (°C)	湿度 (%)	含水率表示値 (%)															
			①-1	①-2	①-3	①-4	①-5	②-1	②-2	②-3	②-4	②-5	③-1	③-2	③-3	③-4	③-5	平均
A : 2/10-7/24	平均	20.2	9.3	9.2	9.7	11.1	10.6	9.3	10.3	9.4	9.8	10.5	9.2	11.1	10.2	9.3	11.1	10.0
	最高	20.7	9.4	9.4	10.8	11.3	10.7	9.4	10.4	10.6	10.0	10.6	9.3	11.3	11.1	9.4	11.2	10.3
	最低	19.7	9.0	9.0	9.4	10.9	10.4	9.1	10.1	9.2	9.6	10.3	9.0	10.9	9.9	9.0	10.9	9.8
	Δ	1.0	0.4	0.4	1.4	0.4	0.3	0.3	0.3	1.4	0.4	0.3	0.3	0.4	1.2	0.4	0.3	0.5
B : 7/25-8/29	平均	20.8	8.9	8.6	9.3	10.7	10.1	8.9	9.8	9.1	9.3	10.0	8.7	10.5	9.6	8.6	10.5	9.5
	最高	27.9	9.1	9.1	9.5	11.0	10.4	9.2	10.2	9.2	9.7	10.4	9.1	10.9	10.0	9.1	10.9	9.9
	最低	20.5	8.6	8.2	9.0	10.4	9.7	8.6	9.4	8.8	8.9	9.7	8.3	10.2	9.2	8.1	10.2	9.2
	Δ	7.4	0.6	0.9	0.5	0.6	0.7	0.7	0.8	0.4	0.8	0.7	0.8	0.7	0.8	1.0	0.7	0.7
C : 8/30-11/15	平均	20.4	8.8	8.8	9.1	10.6	10.2	8.8	9.8	9.0	9.5	10.2	8.8	10.7	9.8	8.9	10.7	9.6
	最高	21.4	8.9	9.0	9.3	10.8	10.4	9.0	10.0	9.2	9.7	10.3	9.0	10.9	9.9	9.1	10.9	9.8
	最低	20.0	8.6	8.5	9.0	10.5	10.0	8.6	9.6	8.8	9.3	10.0	8.4	10.4	9.5	8.7	10.5	9.4
	Δ	1.4	0.3	0.4	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3	0.4	0.3	0.6	0.5	0.4	0.4	0.4
D : 11/15-12/26	平均	17.9	9.0	9.2	9.4	11.0	10.7	9.1	10.3	9.2	9.9	10.6	9.2	11.1	10.2	9.5	11.1	10.0
	最高	20.1	9.4	9.5	9.8	11.3	10.8	9.7	10.7	9.5	10.0	10.7	9.7	11.4	10.3	9.7	11.3	10.3
	最低	14.7	8.7	8.9	9.0	10.7	10.3	8.8	9.9	8.9	9.6	10.3	8.9	10.8	9.9	9.0	10.8	9.6
	Δ	5.4	0.7	0.6	0.8	0.6	0.5	0.9	0.8	0.6	0.4	0.4	0.8	0.6	0.4	0.7	0.5	0.6
E : 12/27-2/8	平均	19.8	9.2	9.3	9.6	11.1	10.6	9.4	10.4	9.4	9.9	10.5	9.3	11.1	10.1	9.4	11.1	10.0
	最高	19.9	9.3	9.3	9.6	11.1	10.6	9.5	10.5	9.4	9.9	10.6	9.4	11.2	10.1	9.4	11.1	10.1
	最低	19.6	9.1	9.2	9.5	11.0	10.6	9.2	10.3	9.3	9.8	10.5	9.3	11.1	10.1	9.3	11.1	10.0
	Δ	0.3	0.2	0.1	0.1	0.0	0.3	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1
全期間	平均	20.0	9.1	9.1	9.5	11.0	10.5	9.1	10.2	9.3	9.7	10.4	9.1	11.0	10.0	9.2	11.0	9.9
	最高	27.9	9.4	9.5	10.8	11.3	10.8	9.7	10.7	10.6	10.0	10.7	9.7	11.4	11.1	9.7	11.3	10.5
	最低	14.7	8.6	8.2	9.0	10.4	9.7	8.6	9.4	8.8	8.9	9.7	8.3	10.2	9.2	8.1	10.2	9.2
	Δ	13.2	0.8	1.3	1.8	0.9	1.1	1.1	1.3	1.8	1.1	1.0	1.4	1.2	1.9	1.6	1.1	1.3

## 2) 含水率データ長期収集装置の検討

CLT内部含水率の長期モニタリング試験に用いた含水率ロガーは現在生産中止となっており、後継機種が存在していない。また同様の多チャンネル型の含水率測定装置は市販されておらず、今回のような長期間、複数部位の含水率を測定する場合の問題となっている。そこで、木材関係の研究者や技術者がある程度容易に構築可能な含水率データ長期収集装置の検討を行った。

製作したデータ収集装置の概略を図 3-28 に示す。市販されている多チャンネル型の絶縁抵抗器に図 3-19 に示した測定プローブを接続した。また、絶縁抵抗器で測定された抵抗値は、コントロール装置（ワンボードマイコン/シーケンサー）にて一定間隔で記録される。絶縁抵抗器は1台あたりの測定チャンネルは最大8チャンネルまで増設可能であり、コントロール装置には絶縁抵抗器が31台まで制御できることから、1台のコントロール装置で最大248点まで測定可能である。

本試作装置で得られる数値は電気抵抗値であるため、含水率への変換が必要である。今回は、複数の相対湿度条件下にて平衡状態においたCLTスギラミナ材(M30B)について、市販の電気抵抗式含水率計(kett社:MT-900)と試作装置で測定を行った(図3-29)両者の関係に二次関数を当てはめ、電気抵抗から含水率を得た。

9層9プライのCLTを裁断し、W280×H300×T70mmの試験体を得た。これを23°C50%RHの恒温恒湿室内で6ヶ月以上養生した後、測定プローブを設置した(図3-30)。この状態の試験体を23°C90%RHの恒温恒湿器(エスペック社:PR-3J)に設置し、内部含水率を2週間経時的に測定した。測定は1日に2回(10時と16時)行うように設定した。

得られた含水率の経時変化を図3-31に示す。装置が順調に作動しデータの収集が行われていることを確認した。今後は、電気抵抗と含水率の校正曲線の高精度化、温度に対する変動等を検討し、実用化につなげる。

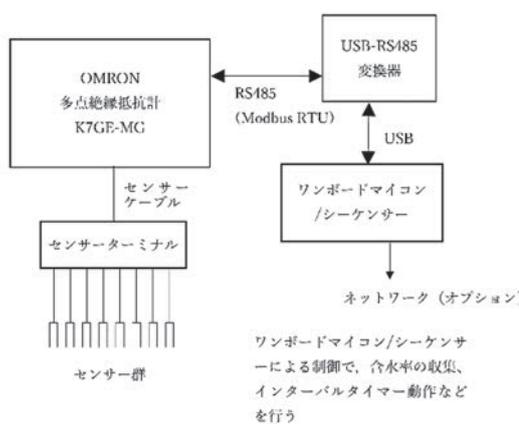


図 3-28 含水率データ長期収集装置の概略

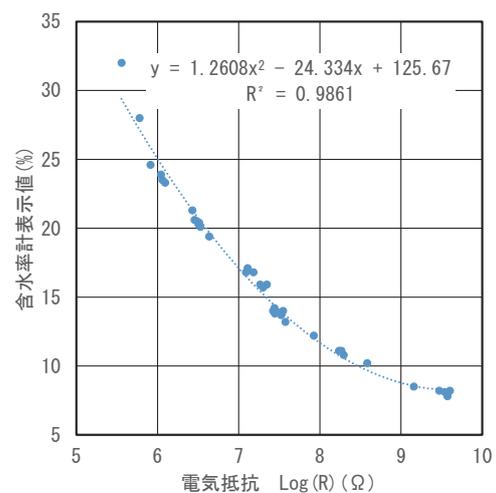


図 3-29 絶縁抵抗と含水率の関係

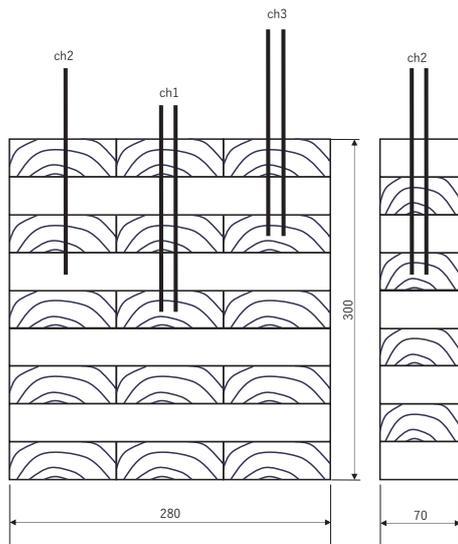


図 3-30 使用した CLT 試験体とプローブの設置位置

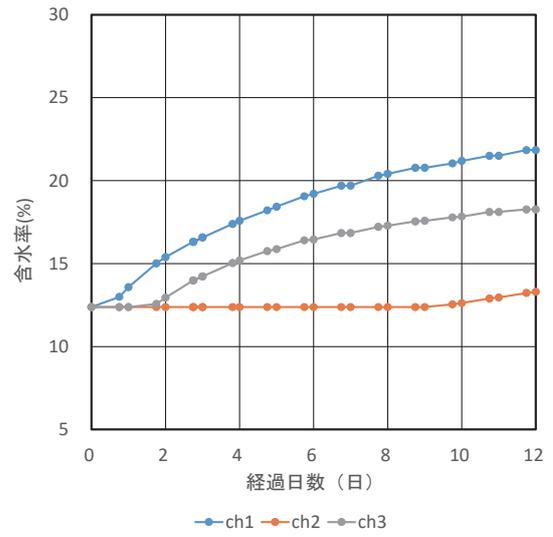


図 3-31 CLT 内の含水率経時変化

【参考文献】

- 1) 日本建築学会：湿気物性に関する測定規準・同解説，34（2006）
- 2) 信田聡，大熊幹章：木材学会誌，27(11)，775-781（1981）

#### 4. 決定した測定方法における CLT の長期挙動データの収集と解析

##### 4.1 CLT の短期曲げ試験 (R4 報告書再掲・一部修正)

R4 報告書に記載した CLT の見かけの曲げヤング係数、真の曲げヤング係数、比例限度応力、曲げ強度の数値に誤りがあったため、内容を修正して再掲する。

###### (1) 供試体と試験方法

9層9プライの Mx60B 16 体を供試体とした。試験体寸法は長さが 5990mm、幅が 300mm、厚さ (材せい) が 270mm である。短期曲げ試験に先立ち、密度、縦振動法のヤング係数、面外および面内における曲げたわみ振動法、TGH 法のヤング係数、TGH 法のせん断弾性係数を測定した。

直交集成板の JAS の曲げ試験に従い、スパンを材せい  $h$  の 21 倍とした 3 等分点 4 点曲げ方式により短期曲げ試験を行った。試験の模式図を図 4-1-1 に示すとともに試験の様子を写真 4-1-8~9 に示す。最大容量が 1000kN の実大木材強度試験機 (前川試験機製作所製 SAH-100-SS) により荷重レンジを 100kN として載荷した。クロスヘッド速度は 15mm/min とした。試験体の側面中央部に変位計 (東京測器研究所製 SDP-200E) を設置し試験体の全たわみを測定するとともに、試験体の上部材面圧縮面上に変位計 (東京測器研究所製 CDP-10) を取り付けた袴型治具 (スパン 1000mm) を載せ、荷重点間における曲げたわみを測定した。試験終了後、全たわみから求めた見かけの曲げヤング係数、荷重点間のたわみから求めた真の曲げヤング係数、比例限度応力、曲げ強度を算出した。また、破壊部近傍から長さが約 30mm の含水率測定用試験体を切り出し、全乾法で含水率を測定した。

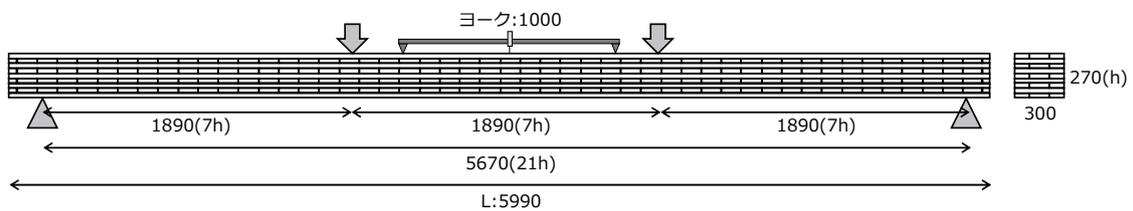


図 4-1-1 CLT の短期曲げ試験の模式図



写真 4-1-1~2 CLT の短期曲げ試験の様子

## (2) 結果

短期曲げ試験の結果を表 4-1-1 に示すとともに、破壊形態の例を写真 4-1-3～6 に示す。いずれの試験体も引張り側の FJ が起点となり破壊した。

表 4-1-1 短期曲げ試験の結果

等級 記号	試験体 番号	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	含水率 (%)	縦振動法 ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
Mx60-9-9	1	359	10.2	4.04
Mx60-9-9	2	359	10.2	4.36
Mx60-9-9	3	355	10.8	4.03
Mx60-9-9	4	360	10.1	3.96
Mx60-9-9	5	365	10.4	4.08
Mx60-9-9	6	360	10.4	3.77
Mx60-9-9	7	366	10.7	3.80
Mx60-9-9	8	366	11.1	3.97
Mx60-9-9	9	372	10.6	4.10
Mx60-9-9	10	370	11.4	3.90
Mx60-9-9	11	376	11.1	3.93
Mx60-9-9	12	359	11.3	4.01
Mx60-9-9	13	366	10.9	3.97
Mx60-9-9	14	372	10.3	4.07
Mx60-9-9	15	366	10.8	3.74
Mx60-9-9	16	357	10.9	3.96
平均		364	10.7	3.98
変動係数(%)		1.67	3.71	3.71

等級 記号	試験体 番号	曲げたわみ振動法	TGH法	TGH法	曲げたわみ振動法	TGH法	TGH法
		ヤング係数 (面内) (kN/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (面内) (kN/mm <sup>2</sup> )	せん断弾性係数 (面内) (kN/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (面外) (kN/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (面外) (kN/mm <sup>2</sup> )	せん断弾性係数 (面外) (kN/mm <sup>2</sup> )
Mx60-9-9	1	3.94	4.20	0.649	5.00	5.51	0.220
Mx60-9-9	2	4.08	4.45	0.722	5.54	6.17	0.225
Mx60-9-9	3	3.63	3.92	0.726	4.93	5.46	0.230
Mx60-9-9	4	3.68	4.00	0.691	5.01	5.60	0.224
Mx60-9-9	5	3.60	3.87	0.730	5.25	5.77	0.246
Mx60-9-9	6	3.42	3.67	0.701	4.51	5.15	0.225
Mx60-9-9	7	3.48	3.78	0.753	4.58	5.07	0.245
Mx60-9-9	8	3.61	3.91	0.706	4.75	5.22	0.226
Mx60-9-9	9	4.23	4.47	0.659	5.18	5.73	0.226
Mx60-9-9	10	3.64	3.94	0.812	4.78	5.24	0.254
Mx60-9-9	11	3.85	4.01	0.706	4.70	5.16	0.241
Mx60-9-9	12	3.55	3.81	0.709	4.67	5.09	0.237
Mx60-9-9	13	3.74	3.96	0.694	4.74	5.24	0.230
Mx60-9-9	14	4.09	4.29	0.701	5.00	5.56	0.232
Mx60-9-9	15	3.22	3.54	0.848	4.58	5.11	0.231
Mx60-9-9	16	3.65	4.02	0.711	5.31	5.93	0.226
平均		3.71	3.99	0.720	4.91	5.44	0.232
変動係数(%)		7.20	6.45	6.97	6.03	6.13	4.12

等級 記号	試験体 番号	見かけの	真の	比例限度	曲げ強度
		曲げヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	曲げヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	応力 (N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )
Mx60-9-9	1	5.07	5.93	10.9	16.2
Mx60-9-9	2	5.19	5.60	15.5	15.5
Mx60-9-9	3	4.92	5.45	10.5	15.3
Mx60-9-9	4	4.74	5.24	15.8	15.8
Mx60-9-9	5	5.38	6.05	11.4	17.5
Mx60-9-9	6	4.50	4.97	9.31	14.5
Mx60-9-9	7	4.53	4.73	12.0	14.9
Mx60-9-9	8	4.70	5.14	11.9	15.5
Mx60-9-9	9	4.89	5.56	8.44	14.9
Mx60-9-9	10	4.59	4.97	15.7	17.3
Mx60-9-9	11	4.55	4.78	10.7	16.4
Mx60-9-9	12	4.92	5.81	10.0	18.3
Mx60-9-9	13	4.59	5.07	14.6	14.6
Mx60-9-9	14	4.54	4.92	16.1	16.8
Mx60-9-9	15	4.57	5.10	9.07	16.0
Mx60-9-9	16	4.88	5.22	15.0	16.0
平均		4.79	5.28	12.3	16.0
変動係数(%)		5.52	7.70	21.9	6.81



写真 4-1-3~4 破壊形態の例 (Mx60-9-9\_2)



写真 4-1-5~6 破壊形態の例 (Mx60-9-9\_7)

見かけの曲げヤング係数と曲げ強度の平均値と 5%下限値を JAS 基準値と比較したものを表 4-1-2 に示す。見かけの曲げヤング係数について、いずれの特性値も JAS 基準値を上回っていた。

表 4-1-2 見かけの曲げヤング係数と曲げ強度の JAS 基準値との比較

	見かけの曲げヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	曲げ強度 (N/mm <sup>2</sup> )
平均値	4.79 JAS 基準値 : 3.2	16.0
5%下限値 (正規分布)	4.26 JAS 基準値 : 2.6	13.8 JAS 基準値 : 7.9

曲げ強度の累積度数分布を図 4-1-2 に示す。また、平成 13 年 6 月 12 日国土交通省告示第 1024 号第 3 九号ハに記載された方法と同じ方法（等価断面法）により、曲げヤング係数と曲げ強度の平均値を推定した。推定値の算出に用いた入力値と推定結果をそれ

ぞれ表 4-1-3～4 に示す。図 4-1-2 には推定値と実測値も合わせて示してある。推定の結果、曲げヤング係数は実測値の方が推定値より 1 割程度大きいのが概ね推定できていた。一方、曲げ強度は実測値の方が推定値より 34%程度大きい結果となった。この原因は現在のところ明らかでない。

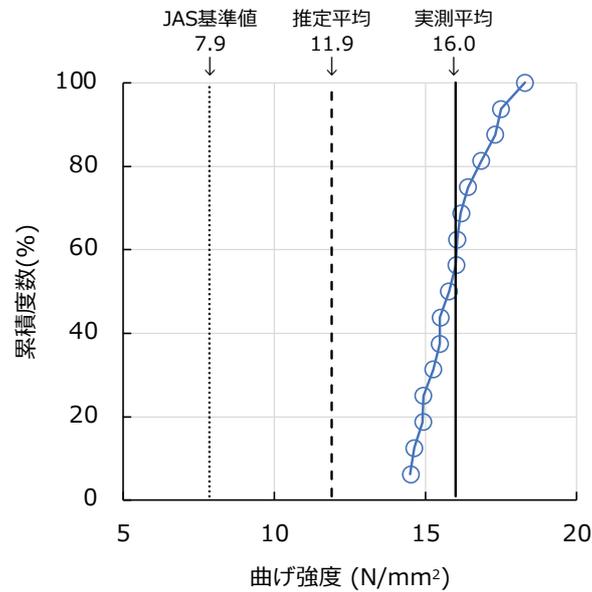


図 4-1-2 曲げ強度の累積度数分布

表 4-1-3 等価断面法での実測による入力値（平均値）

外層平行層	内層平行層	直交層	外層
曲げヤング係数 M60B (kN/mm <sup>2</sup> )	曲げヤング係数 M30B (kN/mm <sup>2</sup> )	曲げヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	曲げ強度 M60B (N/mm <sup>2</sup> )
7.42	5.23	0	29.2

表 4-1-4 等価断面法による CLT の推定値と実測値との比較（平均値）

実測	推定	実測/推定	実測	推定	実測/推定
曲げヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	曲げヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	曲げヤング係数	曲げ強度 (N/mm <sup>2</sup> )	曲げ強度 (N/mm <sup>2</sup> )	曲げ強度
4.79	4.41	1.09	16.0	11.9	1.34

## 4.2 曲げ荷重下における長期挙動データの収集と解析

### 4.2.1 試験方法

9層9プライ CLT の長期荷重試験として曲げクリープ破壊試験を実施した。試験体サイズ及び試験条件は、第2章で示した通りである。また、4.1章で述べたように、短期曲げ試験による最大荷重平均値 62.21kN、標準偏差 4.23kN、変動係数 6.80%が得られた。長期荷重試験の応力比は 66～94%の範囲で、2%括約で計 15 水準設定した。この最大荷重平均値と応力比の積により、各試験体の適用する試験荷重を算出した。試験体数は 1 水準あたり 2 体とした。試験は応力比の高い方から、各応力比 1 体ずつ順に行うこととした。試験開始前に試験体の寸法、重量及び含水率を測定した。

本事業では、昨年度の応力比 86、88、90、92 及び 94%に加えて、76、78、80、82 及び 84%の試験を 2 体ずつ行った。表 4-2-1 に試験体の諸元と試験条件を示す。当該試験装置は、重錘の重量をてこにより 50 倍に増幅して加力する仕組みである。重錘の最小重量は 1.0kg であることから、算出された試験荷重に最も近くなる重錘の重量を選択することとした。選択した重錘重量から算出した実際の試験荷重と短期曲げ破壊試験から得られた最大荷重平均値との比を実応力比とした。図 4-2-1 に曲げクリープ破壊試験の様子を示す。

表 4-2-1 長期挙動試験の試験体諸元と試験条件

応力比 (%)	試験体 No.	繰返し	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	含水率 (%)	試験荷重 (kN)*	実応力比 (%)	実施年度
94	MB4-DOL94-1	1	366.7	12.0	58.48	93.7	R4
92	MB3-DOL92-1	1	373.5	12.5	57.23	92.2	
90	MB2-DOL90-1	1	366.0	11.5	55.99	89.8	
88	MB4-DOL88-1	1	371.7	11.0	54.75	88.2	
86	MB2-DOL86-1	1	368.5	11.0	53.50	85.9	
84	MB1-DOL84-1	1	356.2	11.3	52.26	84.3	R5
82	MB3-DOL82-1	1	369.6	9.8	51.01	81.9	
80	MB2-DOL80-1	1	370.5	10.8	49.77	80.3	
78	MB1-DOL78-1	1	353.1	10.3	48.52	78.0	
76	MB3-DOL76-1	1	371.5	9.5	47.28	75.6	
84	MB3-DOL84-2	2	367.5	7.8	52.26	84.3	
82	MB1-DOL82-2	2	364.2	7.5	51.01	81.9	
80	MB2-DOL80-2	2	360.5	7.5	49.77	80.3	
78	MB3-DOL78-2	2	372.0	9.3	48.52	78.0	
76	MB1-DOL76-2	2	359.1	7.8	47.28	75.6	



図 4-2-1 曲げクリープ破壊試験の様子

#### 4.2.2 試験結果

図 4-2-2～11 に、曲げクリープ破壊試験における最終破断までの変形量の経時変化を応力比ごとに示す、所定の荷重がかかると、変形量は 80mm 程度まで進行し、その後時間の経過に伴って微増する傾向がみられた。いずれの試験体も引張側の最外層のラミナのフィンガージョイントが外れるもしくは破断することが最初の破断検出となった。その後、所定の荷重まで再度加力しても荷重を維持することができた試験体については、試験を継続した。図中で変形が急激に進んでいる箇所は、再加力の影響に起因するものである。特に応力比 76% の 2 体目は再加力によって大きく変形量が増加したが、この原因は明らかとはなっていない。最終的な破断時の変形量と応力比の関係については、今回の範囲では一意の傾向はみられなかったが、引き続き測定を続けることで評価を行う。

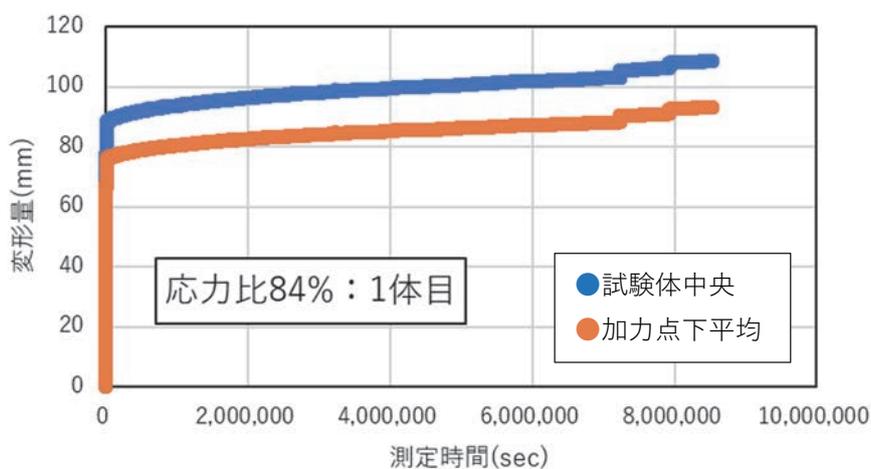


図 4-2-2 9 層 9 プライ CLT の応力比 84% の曲げクリープ破壊試験における変形量の経時変化 (1 体目)

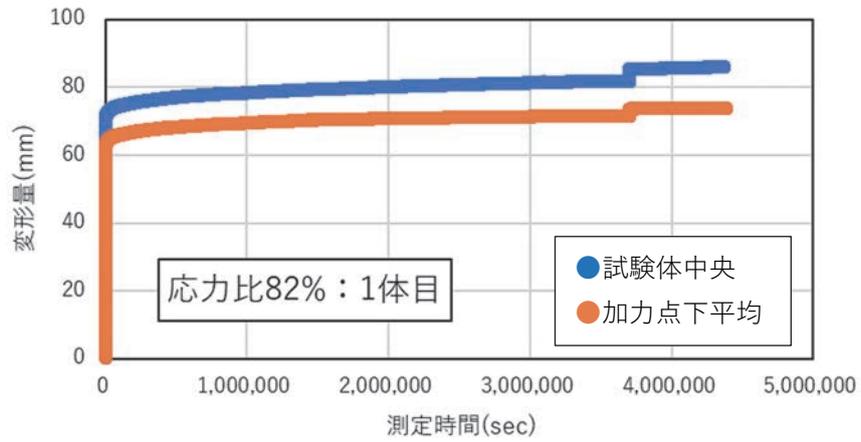


図 4-2-3 9 層 9 プライ CLT の応力比 82% の曲げクリープ破壊試験における変形量の経時変化 (1 体目)

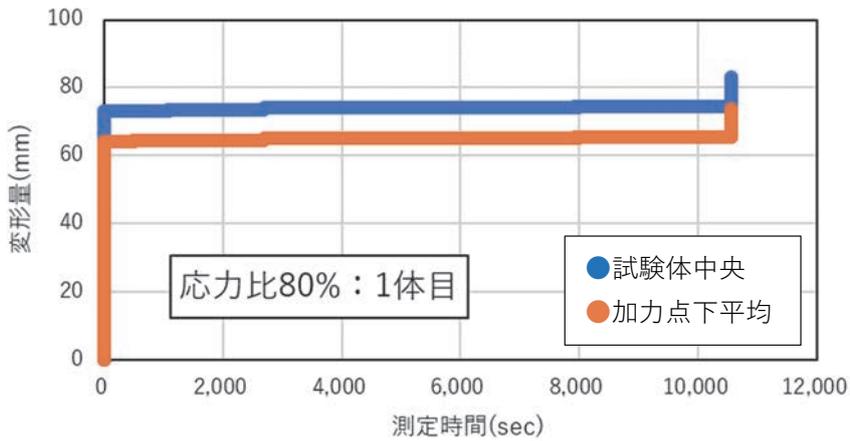


図 4-2-4 9 層 9 プライ CLT の応力比 82% の曲げクリープ破壊試験における変形量の経時変化 (1 体目)

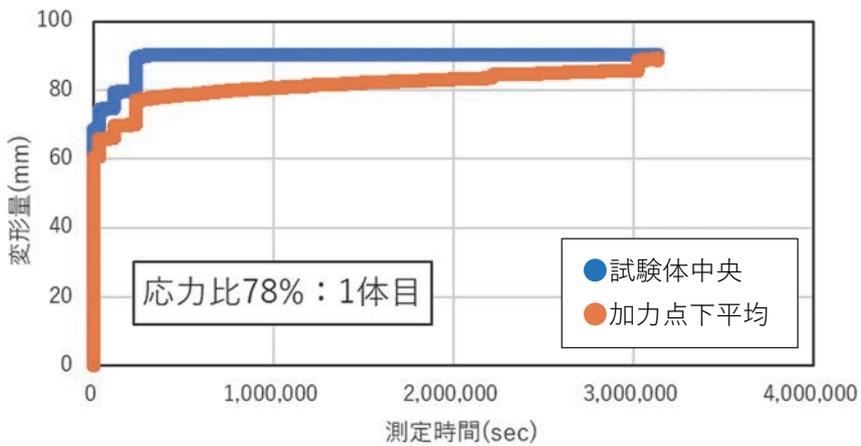


図 4-2-5 9 層 9 プライ CLT の応力比 78% の曲げクリープ破壊試験における変形量の経時変化 (1 体目) 注) 試験体中央の変位は途中から測定エラーを生じた。

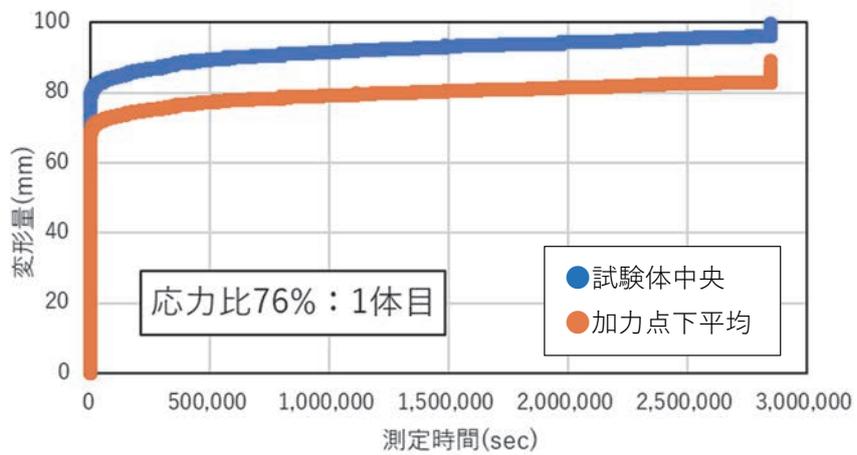


図 4-2-6 9 層 9 プライ CLT の応力比 76% の曲げクリープ破壊試験における変形量の経時変化 (1 体目)

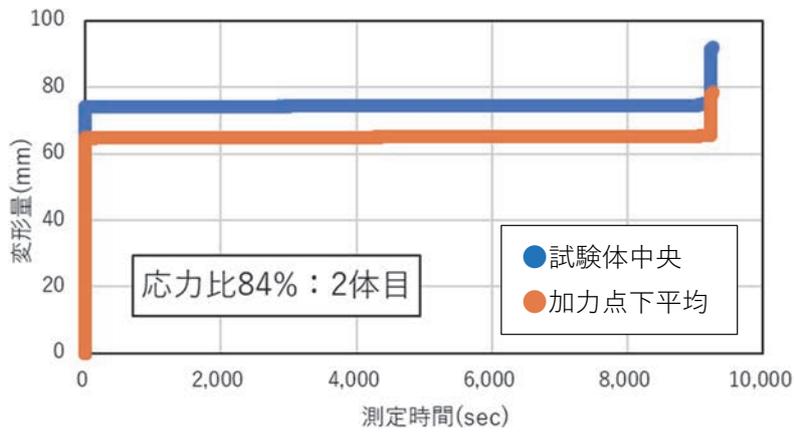


図 4-2-7 9 層 9 プライ CLT の応力比 84% の曲げクリープ破壊試験における変形量の経時変化 (2 体目)

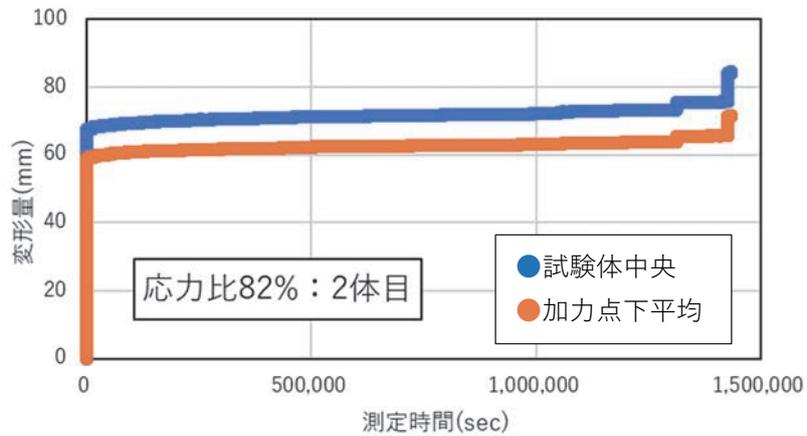


図 4-2-8 9 層 9 プライ CLT の応力比 82% の曲げクリープ破壊試験における変形量の経時変化 (2 体目)

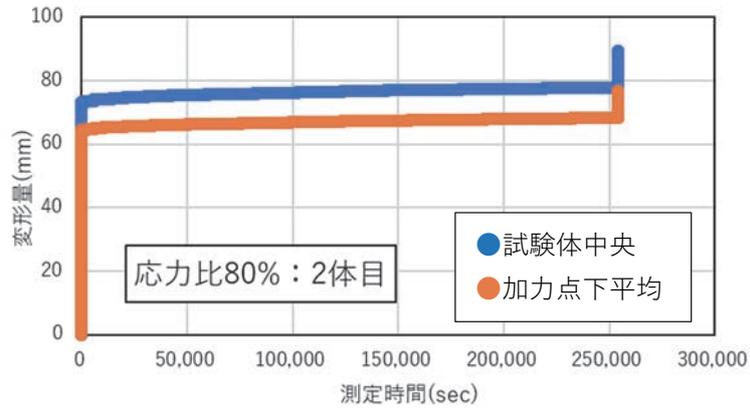


図 4-2-9 9 層 9 プライ CLT の応力比 80% の曲げクリープ破壊試験における変形量の経時変化 (2 体目)

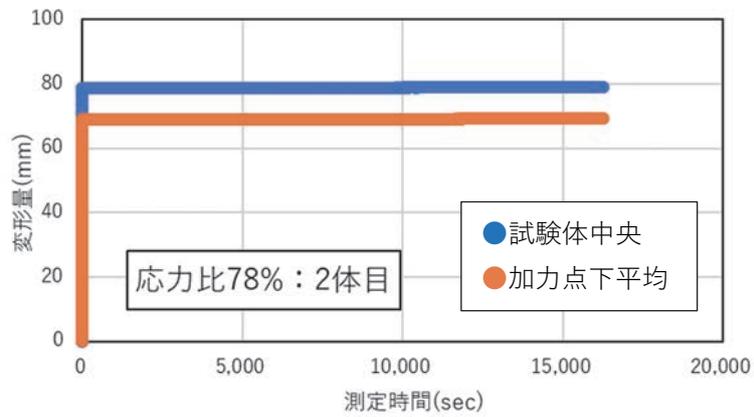


図 4-2-10 9 層 9 プライ CLT の応力比 78% の曲げクリープ破壊試験における変形量の経時変化 (2 体目)

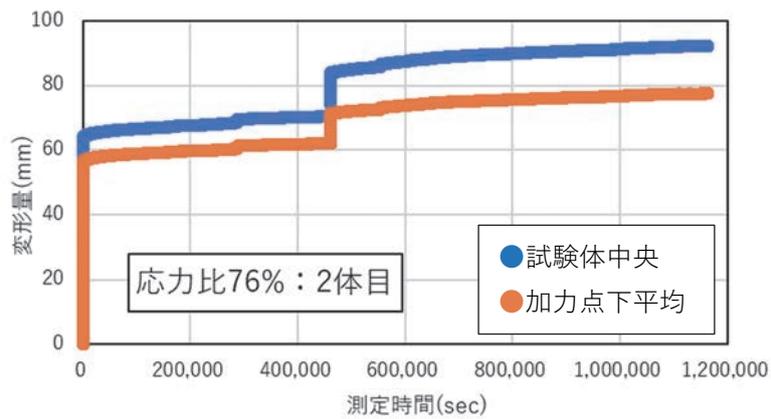


図 4-2-11 9 層 9 プライ CLT の応力比 76% の曲げクリープ破壊試験における変形量の経時変化 (2 体目)

表 4-2-2 に 9 層 9 プライ CLT の曲げクリープ破壊試験による応力比ごとの破壊時間を、図 4-2-12 に破壊時間と応力比の関係についてそれぞれ示す。9 層 9 プライ CLT の長期挙動を明らかにするには、引き続き、他の応力比の試験を継続する必要がある。

表 4-2-2 9 層 9 プライ CLT の応力比 76~94%における曲げクリープ破壊試験の破壊時間

試験体 No.	実応力比(%)	破壊時間(YDHMS)	破壊時間(sec)
MB4-DOL94-1	93.7	3 日 6 時間 07 分 30 秒	281,250
MB3-DOL92-1	92.2	4 時間 03 分 15 秒	14,596
MB2-DOL90-1	89.8	01 分 56 秒	116
MB4-DOL88-1	88.2	9 日 1 時間 55 分 29 秒	784,530
MB2-DOL86-1	85.9	6 時間 14 分 03 秒	22,444
MB1-DOL84-1	84.3	98 日 15 時間 34 分 00 秒	8,523,240
MB3-DOL82-1	81.9	50 日 17 時間 57 分 40 秒	4,384,660
MB2-DOL80-1	80.3	2 時間 56 分 02 秒	10,563
MB1-DOL78-1	78.0	36 日 06 時間 25 分 47 秒	3,133,547
MB3-DOL76-1	75.6	32 日 23 時間 52 分 01 秒	2,850,722
MB3-DOL84-2	84.3	2 時間 34 分 13 秒	9,254
MB1-DOL82-2	81.9	16 日 14 時間 24 分 48 秒	1,434,289
MB2-DOL80-2	80.3	2 日 22 時間 36 分 02 秒	254,162
MB3-DOL78-2	78.0	4 時間 30 分 41 秒	16,242
MB1-DOL76-2	75.6	13 日 11 時間 13 分 06 秒	1,163,587

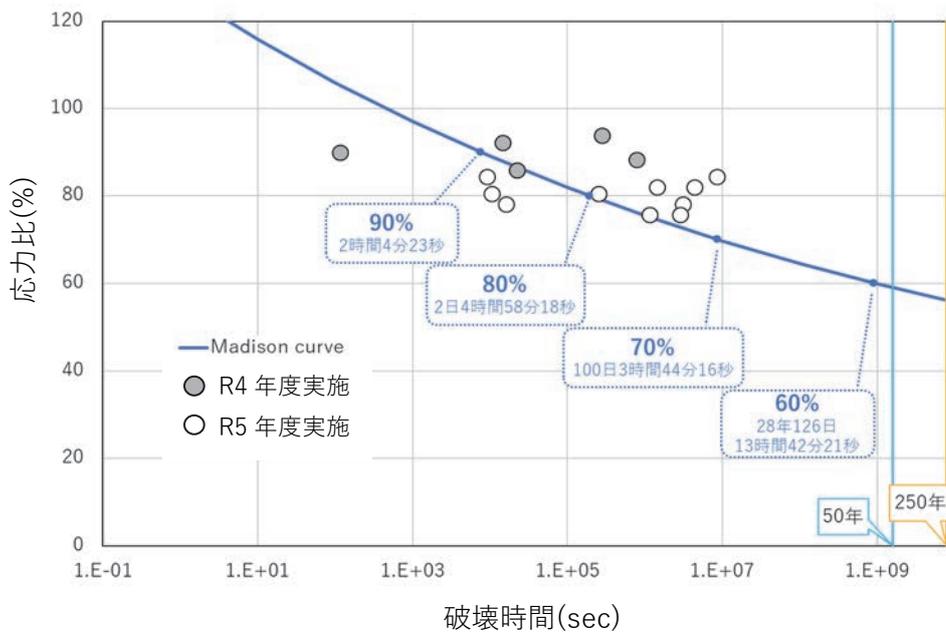


図 4-2-12 9 層 9 プライ CLT の曲げクリープ破壊試験による破壊時間と応力比の関係 (応力比 76~94%の結果を反映)

### 4.3 試験体の破断状況

応力比84%の破断状況を以下に示す。その他の応力比の破断状況は付録に掲載した。



写真 4-3-1 DOL-84-1 破壊全体状況



写真 4-3-2 DOL-84-1 破断状況①



写真 4-3-3 DOL-84-1 破断状況②



写真 4-3-4 DOL-84-1 引張側フィンガージョイント部分の破断

#### 4.4 短期曲げ試験と長期荷重試験結果の比較による破断時の変位に関する検討

16体の短期曲げ試験により最大荷重が得られ、これらの荷重変形関係から中央部変位による見かけの傾きを算出した。表4-4-1に短期曲げ試験結果を、図4-4-1に16体の荷重変形関係と中央部変位による見かけの傾きの平均値（図中の赤太線）を示す。

表 4-4-1 短期曲げ試験結果（16体）

-	最大荷重	見かけの傾き（中央部変位）
平均値	62.21 kN	0.739 kN/mm
標準偏差	4.23 kN	0.039 kN/mm
変動係数	6.80 %	5.40 %

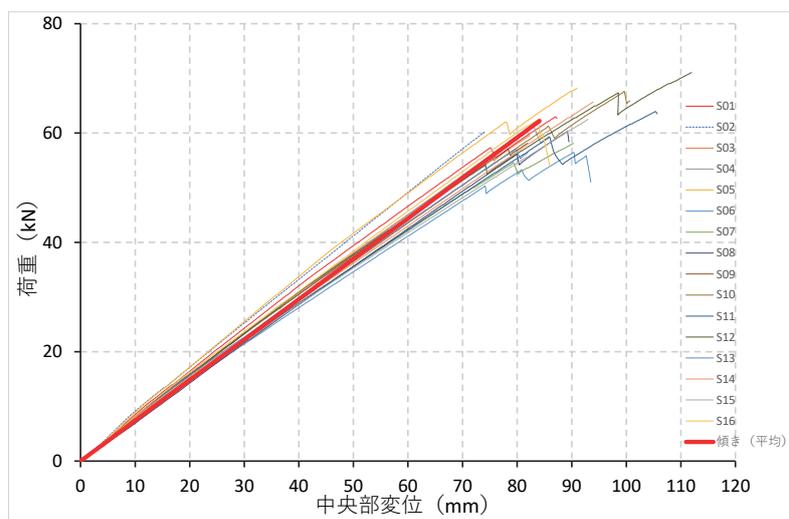


図 4-4-1 短期曲げ試験の荷重変形関係と中央部変位による見かけの傾き（平均値）

長期荷重の応力比は66～94%の範囲で2%括約し計15水準設け、短期曲げ試験による最大荷重の平均値と応力比の積により、各試験体に適用する試験荷重を定めている。今年度、短期荷重と比較する長期荷重の応力比は76～94%までの試験体とした。

表 4-4-2 長期荷重試験（応力比76～94%）の試験荷重

cycle	応力比 (%)	試験体No.	試験荷重 (kN)	実応力比 (%)
1	94	MB4-DOL94-1	58.48	93.7
	92	MB3-DOL92-1	57.23	92.2
	90	MB2-DOL90-1	55.99	89.8
	88	MB4-DOL88-1	54.75	88.2
	86	MB2-DOL86-1	53.50	85.9
2	84	MB1-DOL84-1	52.26	84.3
	82	MB3-DOL82-1	51.01	81.9
	80	MB2-DOL80-1	49.77	80.3
	78	MB1-DOL78-1	48.52	78.0
	76	MB3-DOL76-1	47.28	75.6

図 4-4-2 に長期荷重試験の荷重変形関係を示す。長期荷重試験では所定の試験荷重に向け荷重を増加させていくと、短期曲げ試験と同様に荷重と変位の関係は直線性を保ちながら、中央部変位は 75~85mm 程度まで進行する。その後、時間の経過に伴って部分的な破壊を繰り返しながら変位が増加していき破断に至る。図中赤太線は短期曲げ試験の中央部変位による見かけの傾き（平均値）を示している。短期曲げ試験より長期荷重試験の傾きが、やや緩やかであるのは、恒温恒湿室内で長期荷重試験を実施している影響と考えている。また長期荷重試験の破断時の中央部変位は、短期曲げ試験の見かけの傾きを超えた範囲に存在しているのがわかる。表 4-4-3 に長期荷重試験の破壊時間と破断時の中央部変位を示す。

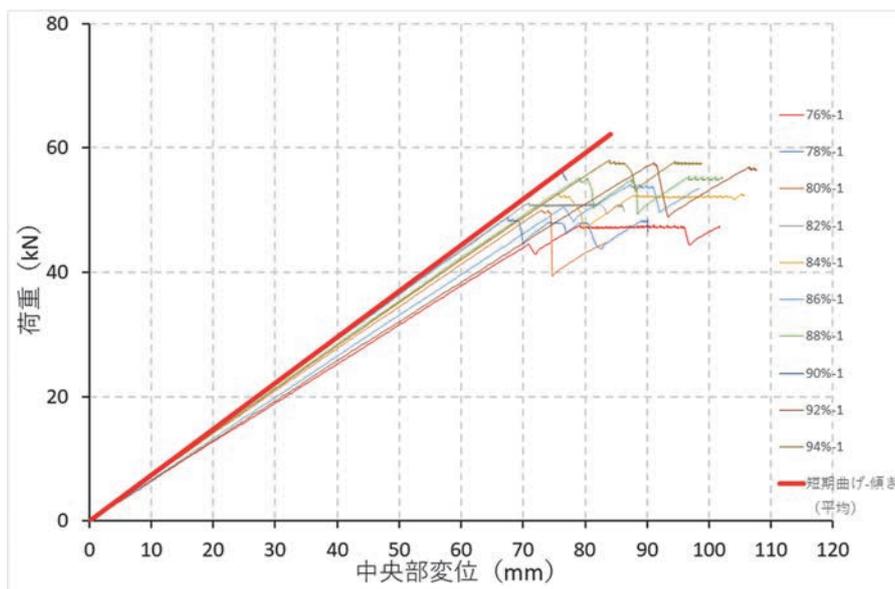


図 4-4-2 長期荷重試験の荷重変形関係

表 4-4-3 長期荷重試験の破壊時間と破断時の中央部変位

試験体No.	破壊時間 (YDHMS)	破壊時間 (sec)	実応力比 (%)	試験荷重 (kN)	破断時 中央部変位 (mm)
MB4-DOL94-1	3日6時間7分30秒	281,250	93.73	58.48	98.82
MB3-DOL92-1	4時間3分15秒	14,596	92.16	57.23	107.60
MB2-DOL90-1	1分56秒	116	89.79	55.99	77.00
MB4-DOL88-1	9日1時間55分29秒	784,530	88.22	54.75	102.14
MB2-DOL86-1	6時間14分3秒	22,444	85.85	53.50	98.38
MB1-DOL84-1	98日15時間34分	8,523,240	84.28	52.26	108.74
MB3-DOL82-1	50日17時間57分40秒	4,384,660	81.92	51.01	86.30
MB2-DOL80-1	2時間56分2秒	10,563	80.34	49.77	83.28
MB1-DOL78-1	36日6時間25分47秒	3,133,547	77.98	48.52	90.12
MB3-DOL76-1	32日23時間52分1秒	2,850,722	75.61	47.28	101.68

ここで短期曲げ試験で得られた見かけの傾きを補正することで、長期荷重試験における破断時の中央部変位を予測可能か検討を行った。

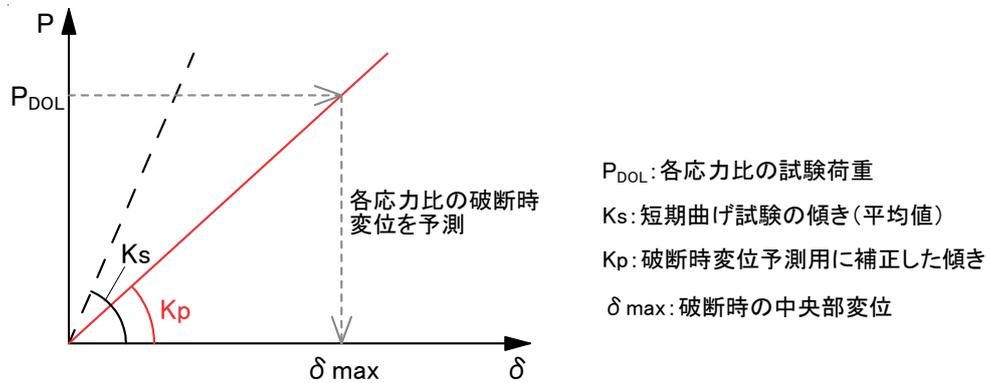


図 4-4-3 破断時の中央部変位予測

表 4-4-4 に長期荷重試験の試験荷重と破断時の中央部変位から算出した破断時の傾き及び短期曲げ試験の見かけの傾き（平均値）に対する傾き低下率を示す。MB2-DOL90-1 のように破壊時間が極めて短い場合、短期曲げ試験と同様な挙動を示しているようで傾きは、短期曲げ試験と変わらない。MB2-DOL90-1 を除き、長期荷重を受ける試験体の破断時の傾きは、平均値で短期曲げ試験の 0.733 倍に低下している。

表 4-4-4 傾き低下率（長期/短期）

試験体No.	破壊時間 (sec)	中央部変位による		傾き低下率 (長期/短期)
		長期荷重試験 破断時の傾き (kN/mm)	短期曲げ試験 見かけの傾き (平均値) (kN/mm)	
MB4-DOL94-1	281,250	0.592	0.739	0.801
MB3-DOL92-1	14,596	0.532		0.720
MB2-DOL90-1	116	0.727		0.984
MB4-DOL88-1	784,530	0.536		0.725
MB2-DOL86-1	22,444	0.544		0.736
MB1-DOL84-1	8,523,240	0.481		0.650
MB3-DOL82-1	4,384,660	0.591		0.800
MB2-DOL80-1	10,563	0.598		0.809
MB1-DOL78-1	3,133,547	0.538		0.729
MB3-DOL76-1	2,850,722	0.465		0.629
平均値*				0.733

※傾き低下率0.984を除いた平均値

短期曲げ試験で得られた見かけの傾きに、傾き低下率を乗じて補正し長期荷重試験における破断時の変位の算出を試みた。長期荷重試験における実験値と予測値を比較した結果を表 4-4-5 に示す。一部、誤差が大きいものもみられるが、概ね実験値を予測値は捉えている。

表 4-4-5 長期荷重試験における破断時の中央部変位予測

試験体No.	試験荷重 (kN)	長期荷重予測用 傾き(kN/mm)	破断時の中央部変位		誤差(%)
			実験値 (mm)	予測値 (mm)	
MB4-DOL94-1	58.48	0.739×0.733	98.82	107.93	8.44
MB3-DOL92-1	57.23		107.60	105.64	1.86
MB2-DOL90-1	55.99		77.00	103.34	25.49
MB4-DOL88-1	54.75		102.14	101.04	1.09
MB2-DOL86-1	53.50		98.38	98.75	0.37
MB1-DOL84-1	52.26		108.74	96.45	12.74
MB3-DOL82-1	51.01		86.30	94.15	8.34
MB2-DOL80-1	49.77		83.28	91.86	9.34
MB1-DOL78-1	48.52		90.12	89.56	0.62
MB3-DOL76-1	47.28		101.68	87.26	16.52

木質構造設計基準・同解説（日本建築学会発行）によれば、以下のクリープ変位量の推定式がある。製材や集成材の場合、一般的に  $a=0.2$ 、 $N=0.2$  程度とあり、これを準用し、長期荷重試験では初期変位量や破壊時間が得られていることから推定式を用いて変位量を算出した。表 4-4-6 に示すように学会推定式を用いて算出したクリープ変位を含む全変位量と予測値は近い値を示しており、短期曲げ試験の傾きを補正して長期荷重試験の破断時の変位を簡易的に求めても、それほど大きな問題はなさそうであるが、さらなる検討が必要である。

$$\frac{\delta(t)}{\delta_0} = 1 + at^N$$

$\delta(t)$ : クリープ変形を含む全変位量

$\delta_0$ : 初期変位量(クリープ荷重載荷直後の変位量)

$a, N$ : 定数

$t$ : 荷重継続期間(秒、分、時間、日)

表 4-4-6 学会推定式と予測値の比較

試験体No.	破壊時間 (sec)	実験値		計算値	
		初期変位量 $\delta_0$ (mm)	破断時 中央部変位 (mm)	学会推定式 クリープ変位量 (mm)	予測値
MB4-DOL94-1	281,250	83.98	98.82	105.25	107.93
MB3-DOL92-1	14,596	91.08	107.60	103.84	105.64
MB2-DOL90-1	116	76.26	77.00	80.33	103.34
MB4-DOL88-1	784,530	79.16	102.14	103.77	101.04
MB2-DOL86-1	22,444	87.44	98.38	100.80	98.75
MB1-DOL84-1	8,523,240	75.62	108.74	113.51	96.45
MB3-DOL82-1	4,384,660	70.94	86.30	102.06	94.15
MB2-DOL80-1	10,563	73.06	83.28	82.66	91.86
MB1-DOL78-1	3,133,547	67.36	90.12	94.99	89.56
MB3-DOL76-1	2,850,722	79.02	101.68	110.82	87.26

短期曲げ試験で得られた中央部変位による見かけの傾きを 0.733 倍して補正した傾きで各応力比における破断時の中央部変位を予測すると、概ね実験値を捉えることができていた。図 4-4-4 に短期曲げ試験の中央部変位による見かけの傾きを補正した傾きに対する実験値の関係を示す。図中の塗りつぶした丸印が長期荷重試験における各応力比の試験体の破断時を表している。補正した傾き近辺に破断時の実験値があることがわかる。今後は、今回検証した応力比以外の長期荷重試験において、この簡易な方法で実験値を捉えることができるか、検討を重ねていく必要がある。

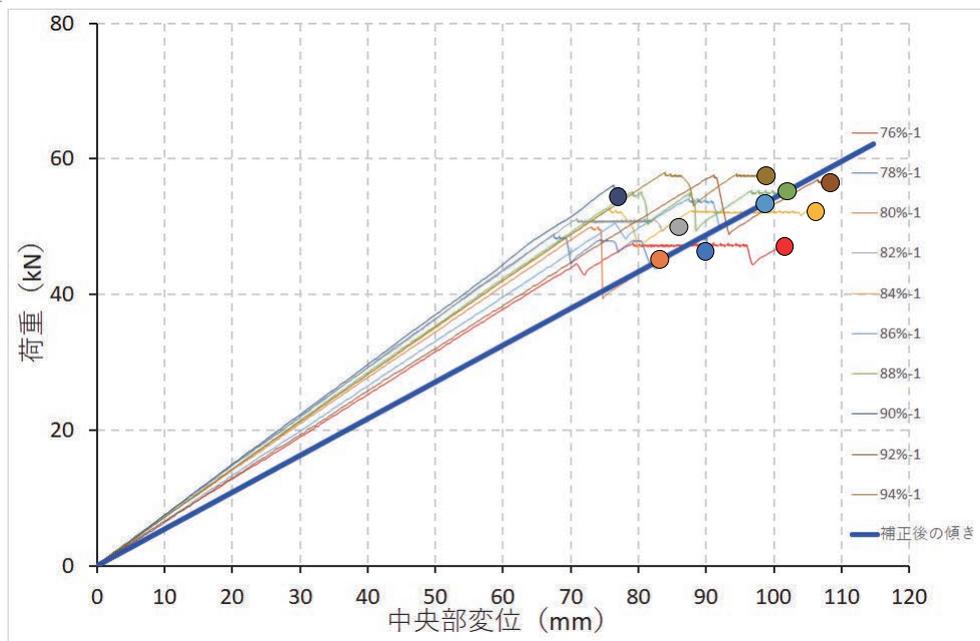


図 4-4-4 補正後の傾きと実験値の関係

## 5. 進行状況の管理

### 5.1 第1回検討委員会

開催日時：令和5年7月6日（木） 15:00～16:20

開催場所：林友ビル会議室（東京都文京区後楽1-7-12）（対面・Web併催）

出席者（敬称略）：

外部有識者委員（対面出席）

委員長 安村 基 （静岡大学名誉教授）

委員 青木 謙治 （東京大学大学院農学生命科学研究科）

委員 小関 真琴 （（公財）日本合板検査会）

委員 植本 敬大 （（国研）建築研究所）

外部有識者委員（Web出席）

委員 荒木 康弘 （国土技術政策総合研究所）

委員 秋山 信彦 （国土技術政策総合研究所）

オブザーバー（対面出席）

福島 純 （林野庁木材産業課木材製品技術室）

巻田 和丈 （林野庁木材産業課木材製品技術室）

オブザーバー（Web出席）

杉原 伸一 （国土交通省住宅局参事官（建築企画担当）付）

甲斐 菜月 （国土交通省住宅局参事官（建築企画担当）付）

川原 聡 （農林水産省新事業・食品産業部食品製造課基準認証室）

山内 一浩 （（独）農林水産消費安全技術センター）

事業実施者

（国研）森林研究・整備機構 森林総合研究所

宮本 康太、渋沢 龍也、井道 裕史、河野 幸喜（対面出席）

平松 靖、宮武 敦、須藤 竜大朗（Web出席）

（一社）日本 CLT 協会

坂部 芳平、安東 真吾、西妻 博康、谷口 翼、河合 誠（Web出席）

（地独）北海道立総合研究機構 林産試験場

朝倉 靖弘、近藤 佳秀、須賀 雅人、秋津 裕志（Web出席）

（株）中央設計

戸田 淳二（Web出席）

（公社）日本木材加工技術協会

村田 光司、黒田 尚宏（対面出席）

関係者

渡部 博（銘建工業（株））（対面出席）

欠席者（敬称略）：

外部有識者委員 河合 直人（工学院大学建築学部建築学科）

資料：資料 1 出席者名簿

資料 2-1 事業概要

資料 2-2 事業スケジュール

資料 3-1 長期挙動試験の進捗及び今後の試験計画

資料 3-2 曲げ試験によるせん断弾性係数(G)と E/G の検討

議事：

1. 挨拶

福島課長補佐よりご挨拶いただいた。

2. 委員紹介

出席委員を名簿順に紹介した。

3. 事業について

1) 試験計画の概要

事業実施者主査の森林総研・宮本室長より、資料 2-1「事業概要」に従って、事業の概要について説明があった。事業の目的は、9 層 9 プライの長期挙動データを収集し、中層・大規模建築物の木造化に必須である長期性能の設計に資することで CLT の開発・普及を促進することである。事業の内容は、①CLT の長期挙動に影響を及ぼす製造因子の抽出、②CLT の長期変形挙動に関する測定方法の妥当性の検討、③決定した測定方法における CLT 長期挙動データの収集、④収集した CLT の長期挙動データの解析、⑤委員会開催・運営及び成果の取りまとめである。具体的な内容としては、ア、検討委員会の開催等（検討委員会を 3 回開催し、事業実施計画の検討、経過報告、検討事項の継続、結果報告、報告書の取りまとめ等々を行う）、イ、製品・技術の試験、分析及び検証等（試験、分析及び検証方法と手法、6 月から 8 月、9 月ぐらいまで製造試験を実施、測定方法の検証は年間を通じて実施、曲げ性能への影響因子の抽出を製造試験で試験体ができ上がってからの秋口に実施、期挙動データの収集・解析は年間を通じて実施する）、ウ、技術の普及活動の実施（事業報告書と併せて実施する）、エ、事業報告書の作成及び成果の普及（報告書は 50 部の印刷を予定。普及方法は、国交省並び CLT 普及事業の実施者に情報提供を行う）。実行体制は、昨年度と同様にはなるが、森林研究・整備機構では長期挙動の測定、分析、北海道立総合研究機構森林研究本部林産試験場では CLT の含水率挙動の測定・分析、日本 CLT 協会では CLT の長期挙動に影響を及ぼす製造因子の抽出、株式会社中央設計では CLT の長期挙動データの解析、日本木材加工技術協会では検討委員会の開催、報告書の取りまとめ、成果の普及を行う。

2) 事業スケジュール

続いて、森林総研・宮本室長より、資料 2-2「事業スケジュール」の説明があった。本日の第 1 回検討委員会で今年度の計画について外部有識者委員から御意見をいただ

き、内容を確定してから、試験体の発注、製造を行い、それから、試験体を使う試験については実験の準備、解析へ進んでいく。銘建工業で試験体の製造を行うので、現地検討会を、製造現場を見ながらできればと考えている。来年2月には第3回の検討委員会を行って、報告書の取りまとめを行う予定である。

安村委員長より「長期試験、3月まで昨年からやられて実際、解析ができてきているのか。試験が終わったところから解析していくのか」と質問があり、「今年度中には試験が終わらないと考えていて、継続してやらないといけない。少しデータも溜まってきたので、進めたいと思う」と宮本室長が回答した。青木委員より「去年からこの事業は始まっているが、ざっくりと去年の結果をまとめるとどうか。時間がかかるので、まだ全体像は見えていないかなと思うが」と質問があり、「次のスライドの進捗のところで少し説明する」と回答した。小関委員より「ラミナの含水率を、調湿だとか標準状態で、養生してから作製したのか説明していただきたい」と質問があり、銘建工業・渡部氏が「基本的には、製造時、ラミナ含水率は大体7%、8%が含まれ、平均的には10%前後ぐらいと過乾燥気味に設定しているが、スギはばらつきが大きいので、ある程度全数低いところを狙っておいて、15%以下にする。既製品だと大体10%で仕上げ、その後の吸湿などで10%から12%ぐらいの試験体になってくる」と回答した。

### 3) 長期挙動試験の進捗及び今後の試験計画

森林総研・宮本室長より、資料3-1「長期挙動試験の進捗及び今後の試験計画」の説明があった。昨年は短期試験も行って、それにより得た曲げ強度を100%として、応力比の設定の水準は66%から94%の間で、2%括約とした。各応力比について、試験体数は2体とした。試験方法について、応力比の高い方から、N=1で試験を2回繰り返す、94、92、90%というように、1体ずつ実施した。1サイクルで5体ずつ試験を実施できるので、最初の5体は86%から94%で1体ずつ、昨年度中にデータを収集した。76~84%の水準を実施中で、84%の試験体をまだ計測している。試験体の密度は、少し軽めで、平均で370kg/m<sup>3</sup>弱である。試験体の含水率は、9.5~12.5%である。試験荷重は、静的曲げ試験で得られた最大荷重の平均値62.21kNを100とし、それぞれ応力比を乗じて求めた。試験は錘を載せて実施するため、計算上の試験荷重を精密に掛けることができず、実応力比（実際に錘をかけたときの応力比）が設定応力比と差が少なくなるようにした。途中経過を破壊時間（対数）-応力比のグラフで示すと、7層7プライと傾向は似ているような状況である。すでにサイクル1,2は終了しており（実応力比84.3%は継続中）、サイクル3（実応力比75.6~84.3%）を8月から開始する。サイクル3を終了後、レーザー変位計の調整を実施し、試験期間が最も長いと予想される応力比66~74%を2月頃から開始する予定である。その後、今度は応力比が高いもの、低いものというような形で進めていき、来年度ぐらいまではかかるだろうと見込んでいる。

青木委員より、「試験の進め方として、試験体が全部壊れてから総取替えというやり方をしている。これは段取的にしようがないのか。スペースの関係で一気にやらない

と難しいのか。早めに壊れたものから入れ替えて試験した方が、データとしてはいっぱい溜まるだろうけど、現実的にそこはなかなか難しいのか」と質問があり、「物理的に試験体を入れ替える作業ができない。1体の試験機の両脇に錘をかけており、それが隣と近いため、作業しているとどうしても錘同士がぶつかったりする。その場合、加力が50倍に伝わる、また、恒温恒湿の室内環境も半日ぐらいで変わってしまうので、作業効率と試験の安全を考えて現在の方法で実施している」と宮本委員が回答した。さらに、青木委員より「今、残っている試験体は、マディソンカーブから見れば、もう十分に安全側の方に振れている。これが残っているために次に移れないのは、何かもったいない気がしたが、かといって無理やり終わらせるのもということもある。限られた時間でやっているということから、その辺を上手くやっていただきたい」との意見があり、「例えば、現在継続している試験体も、ある程度のところで見切りをつけるとしても、十分評価ができるところまでは試験を行う。その後、7月末に試験体を入れ替える日を決めている。もし試験が継続していてもその時点までのデータとして扱うことを考えている」と回答し、渋谷ディレクターが「残っている試験体は、次の入替えの時点で破断したという扱いをして、次の区分に進むというふうにしたいと思う」と補足した。

安村委員長より、「1体が壊れていないが、例えば、荷重に載せたときにヤングを測るだとかで、他との違いが分からないか」と質問があり、「まだデータは解析していないが、最初、想定される荷重の0.1倍ぐらいの荷重をかけて変位だけとって、また戻してという試験を実施している。今までのデータを見てみないとということはあるが、それほど他と違いがあるような感じはない」と回答した。渋谷ディレクターが、「むしろ密度が少し低いぐらい。面白いが、曲げのMORとかMOE自体は変動的に5%ぐらいしかないが、DOLになると大分ばらつきが大きい。なぜだかは分からないが恐らく、最初の取っかかり、破壊のところでいろいろが決まるような気がして、それは曲げの強度を測るという、違う決定因子にあるのではないかという気がしている」と述べた。榎本委員が、「短期強度は最弱に依存する。DOLはそういうことではないような感じがする。最初クリーブだけど、要するに試験法そのものが、短期強度と長期強度が比例関係にあって、短期強度を100にして実施しているが、そうではない」と意見し、「完全に破断する鞍点みたいなものがある。MORは破壊が始まるとそのまま破断に向かうけれども、DOLは取っかかりとして、全体が壊れるような超えなきゃいけない鞍点みたいなものがあり、そこより手前だと、再度荷重をかけてももつ」と渋谷ディレクターが受けた。榎本委員が、「我々が短期強度を目途にやっているような品質管理は、DOLの強度区分、DOLの性能区分とは全く関係ないような感じがしている。同じ強度でも、私の数少ない経験で言うと、フィンガージョイントと接着強度とは全然DOLが違うというのは、そういうことなのか。最弱として認識されないところもまた効いてくる」と述べた。また榎本委員が、「繊維がつながっていない直交層、これが影響している。だから、3層3プライ、5層5プライ、7層7プライだんだんDOLが落ちてきているという指摘がある。落ちていませんか」と質問し、「5層より7層の方がよかった」と回答した。さらに榎本委員が、「3、

5、7、9のデータを並べてみて比べてみるとか」と意見し、「最終的には、7層のデータと9層のデータを重ねてみて、どうだろうというのは検討したい」と回答した。

安村委員長より、「破壊されたのはフィンガージョイント部からか」と質問があり、「そうだ。曲げのスパンの間に幅方向にラミナは3枚ある。試験体は、必ず、その3枚ともフィンガーが入るように製造している。したがって、その状況はどのレベルでも同じで、いずれも、最初はどこかは分からないが、フィンガーが外れるのは同じ。ただ最初に外れたところで必ず破断が大きく生じているかという点、必ずしもそうではない」と回答した。また安村委員長より、「そのうちのどれかが外れる。変位はとっているか。どれくらいの変異で壊れたか」と質問があり、「測っている。データを十分に整理していないが把握している。試験体によっては再加力しているものがある。一度も再加力していない試験体と直接比較するのは今後の検討課題である」と宮本室長が回答した。さらに安村委員長が、「立体的に解析する必要がある」と意見し、「破壊の仕方であるとか、または先程の鞍点のような節目を超えると破断に向かうというのも検討したい」と回答した。

#### 4) 曲げ試験によるせん断弾性係数 (G) と E/G の検討

森林総研・井道室長より、資料3-2「曲げ試験によるせん断弾性係数 (G) と E/G の検討」の説明があった。JASの曲げ試験の方法、標準条件、スパン  $L_0$  から梁せい  $h_0$  の21倍の3等分点で、7倍、7倍、7倍で21倍の試験方法となっている。9層9プライほどの厚い材料になると、21倍のスパンが取れないことがあり得ると考えられ、その際、荷重点間  $S$  とか、シアスパン  $a$  を、7倍よりも短くして試験するということが考えられる。シアスパンを変更すると、測定される見かけの曲げヤング係数が変化するので、調整式を使って、見かけの曲げヤング係数を標準の条件の値に調整する必要がある。調整式は、木質構造設計基準の中にも書いてある式である。調整式を用いるにはCLT全体としてのG値が必要である。CLT Handbookによると、CLT全体ではなく層ごとのGの値にして、強軸方向のGは1/16、弱軸方向はローリングシアを考慮してさらに1/10して、1/160という数字が用いられている。また一方で、JASのヤング係数だと、CLT全体のE/Gを恐らく大きめに見積もって50として、真の曲げヤング係数に低減係数0.9を乗じて、標準条件の曲げヤング係数を算出していると考えられる。ここで、3点曲げでなく、中央集中による曲げたわみとせん断たわみの関係を見ると、曲げがかかると、たわみは、純粋な曲げたわみとせん断たわみ、両方を足したものとなる。全たわみは、曲げたわみの式とせん断たわみの式を足したものであるが、ここでE/Gが大きくなる、つまり、Gが小さくなると、ここの部分が大きくなるので、全体に関わるせん断たわみについて、無視できなくなる。例えば、せいが270、スパンが3,780で、14倍、E/Gが50の場合、全たわみ分のせん断たわみは0.23となる。したがって、全体のたわみの23%ぐらいが、せん断たわみとなる。昨年度、9層9プライの短期曲げ試験において、TGH法で動的にEとGを算出し結果、平均のEが5.44kN、Gが0.232kN、E/Gは23.4で50よりは小さいが、それなりの値であった。13%ぐらいがせん断たわみになるということである。JAS

(3等分点4点荷重)では、低減係数0.95に相当する。今年度は、変動スパン法という方法を用いて、静的にEとG、それからE/Gを算出したい。変動スパン法は、一つの試験体に対して、スパンをL1、L2、L3、L4と4点、試験体を壊さずに順に曲げ試験を行って、ヤング係数などを測定していく。静的のE/Gと動的のE/Gを比較し、さらには、荷重条件が標準条件と違う場合に調整式はどうしたらいいのかということを検討したい。

安村委員長より、「 $E_T$ というのはトータルか」と質問があり、「試験のテスト(T)である。 $E_S$ がスタンダード。SがスタンダードでTがテストで、私が付けた記号である」と井道室長が回答した。青木委員より、「スタンダードは幅が21。JASの標準的な状態か。式の中に出てくるEは何なのか」と質問があり、「JASの標準的な状態である。Eは試験体の真のヤング係数である」と井道室長が回答した。安村委員長より、「7層になるのか」と質問し、「特にCLTじゃなくても、何でもそうである。一般的な式である」と井道室長が回答した。また安村委員長より、「CLT Handbookで、16という値、これは層ごとにGを求めている、下はどうか」と質問があり、「CLTの前に、JASもそうだが、1層ごとに計算して全体にして、そのときにEとGが減るときに、その値を使っている」と井道室長が回答した。青木委員が「我々は15を入れる。普通15である」と助言した。安村委員長が「Gの値に強軸効果が出るのか」と質問し、井道室長が「ある。下だけにあるという意味でなく、下の方がすごく大きいという意味である」と回答した。

小関委員より、「21倍されなかったときにどうするかという話なのか、それともラミナと製品の強度の関係全体に反映させる話なのか」と質問があり、「とりあえず21倍とれなかったときに、E/Gに何を入れればよいかということである」と井道室長が回答した。小関委員が「もしかしたら規格の方に反映される可能性も出てくるのか」と質問し、渋谷ディレクターが「現実問題として、総数が少なくて製品が厚さが厚くなると、21倍取りまわせない場合に、できる方法で測ったときに、どう換算していくかというところは考えておかなければならない」と回答した。井道室長が「E/Gが変わっても、そんなに影響はないという話もある。影響がないなら、ないでいい。でも、どれぐらい出るのか把握しておきたい」と述べた。

調整式に用いるGの計算式の1/16、1/160の根拠について議論があり、青木委員が「文献値などを見ると、大体Gの値はそのぐらいの比率になっている。縦方向のGと横方向のGが10倍ぐらい違う」と述べた。安村委員長が「CLT Handbookの値は、何となく全体のEとGでグラフを用いて、値を決めていると思う。実際は、分布している数値があり、何かそういうのが分かった上で、そういう話になってきたのだろう」と述べた。

渋谷ディレクターより、「TGH法で測ったものと、こちらのスパン変動法で測ったものと、傾向的には同じになりそうか」と質問があり、「想像がつかないが、同じになると思う」と井道室長が回答した。安村委員長が「動的ヤングを測っている。そもそもCLTは動的に測ったヤングと強度と相関があるのか」と質問し、井道室長が「ヤングと強度

は測ってない。見かけのヤングに対しては結構、静的ヤングは相関がある」と回答した。

#### 5) 含水率挙動試験について

北林産試・朝倉研究主幹より「含水率挙動試験について」の説明があった。DOL 試験室に、DOL 試験体の半分の長さの試験体を置き、含水率を測定している。金属製の針の横を絶縁し、この針の先端だけに電気が通るようにし CLT の中に差し込み、任意の場所の含水率を電気抵抗式の含水率計で測定するという方法である。試験体に穴を開けて様々な深さで試験体を測っている。測定点としては3ヶ所測定して、それぞれ断面で7ヶ所測っている。端はアルミテープで断湿し、DOL の試験体の中央部分に近いところを想定している。2月中旬から6月ぐらいまでの4ヶ月間測定した結果、9%強から11%強の間でラミナの含水率が測定された。表層に近い2ヶ所は10%をちょっと超えた辺りで一定の数値が出ていた。中央部に近い2ヶ所は9.5%前後のところまで推移した。データの取得は、ほぼ良好にできていると判断した。一部のラミナを除いて、含水率は試験開始から安定的に推移しており、長期の荷重試験としては安定した状況で試験できていることが確認できたと考えている。将来的に含水率が変化したときに、試験体の強度にどのような影響を与えるのかということを検討するときの第一段として、含水率を予測する方法も考える。その方法の一つとして、まずそれぞれの透湿抵抗の試験、湿気がどれぐらい通るかというデータを把握するため、去年はJISカップ法試験を行った。積層方向の透湿抵抗を測ったところ、接着層なしに比べて接着層ありの場合の透湿抵抗は約3倍程度になるということが分かった。ラミナのフィンガー部分の透湿抵抗は、フィンガーのないところで差があるのかを検討した。フィンガーありの場合は、なしに比べて、確かに透湿抵抗は高いが、積層方向ほどは大きくなかった。木材の場合、透湿抵抗は含水率によって変わるが、接着層がある場合も同じように扱えるのか、どのようになるのかというのを今年検討したいと考えている。内部の含水率の変化シミュレーションについて、昨年度、モデルを作成して検討した結果、シミュレーションとしてはかなり上手く当たっていると判断している。接着層があると想定した場合と、ないと想定した場合で計算させてみたところ、重量変化では、含水率変化では両者には差がほとんど見られなかった。試験体全体で見たときには、現在の試験状況では接着層の影響は少ないと判断した。今年度の実施内容は、CLT の接着層の湿度環境等が透湿抵抗に及ぼす影響の把握、シミュレーションによる長期変動予測の検討、長期モニタリング手法の検証と改良である。

青木委員より、「各ラミナの含水率を測っているが、真ん中の写真のように端子を打ち込んで測っているのか。打ち込んでいる場所は、どこが何層目とか分かっているのか。含水率の変動とかを、ラミナの木口からの距離とかによって影響の度合いが変わると思うが」と質問があり、「そういう形になっている。針を打っている深さは規定している。変わる可能性があると思う。今回はアルミテープでそれを塞ぎ、影響を少なくしようと考えている。この場合、なかなか同じ位置に打てない」と朝倉研究主幹が回答した。また青木委員が「側面側も同じで、直交層のラミナもある。各ラミナの木口面からの距離

をできれば統一した位置に打ち込んだ方が、変な影響が入らないで、正しい値が取れるのでは」と質問し、朝倉研究主幹が「極力そうしたいと考えているが、今のところ、この方法だと打つのが難しいときがある。ご指摘の点は考慮してやっていきたい」と回答した。

小関委員より、「シミュレーションには、一般的にどういった手法を使ったのか。市販のソフトを使ったのか、御自身でプログラムしたのか。どんな方法を使用したのか」と質問し、「自作のシミュレーションプログラムを使用した。有限差分法を使っている」と、朝倉研究主幹が回答した。渋沢研究ディレクターが、「繊維方向はすごく抵抗が少ないということか。シミュレーションのグラフにおいて、接着層の影響がほとんどないというのは矛盾していると思う。3倍ぐらいの透湿抵抗の差でも、含水率変化には差が出ないということか」と質問し、「そうだ。今回は3週間のシミュレーションモデルで、3週間の間でそう大きくは出なかった。これを長期にしたときにどうなるかというのは、今後やっていきたい。要は、差が出るところまで湿気が達していない、湿気の影響が大きくないということ、大きく変動しなかったということ」と、朝倉研究主幹が回答した。また渋沢研究ディレクターが「接着層「あり」と「なし」について、「なし」のプロットが見えないというのは、「あり」とほぼ重なっているということか。そうすると、最初から実は接着層があってもなくてもほぼ変わらないことという気がするが」と質問し、「重なっている。9層9プライのように大きいマスの場合はそうだ。周囲だけに限定されおり、内部の方までは影響が入っていないので、接着層のところまで行っても、例えば、今回の3倍の数字があっても全体の重量変化には影響がなかったということだと考えている」と回答した。さらに渋沢ディレクターより、「木口面は断湿か。X軸方向とY軸方向の、それぞれの原点を通る部分の面から水分を吸っているのか。真ん中の方まで含水率変動が起きていないので接着層の影響が出ていないか」との質問があり、「木口の方は断湿している。中心では、影響が出にくいということである」と、朝倉研究主幹が回答した。

#### 6) その他

宮本室長より、「銘建工業(株)でCLTの製造現場を視察したい。後日、日程調整をしたい」と、現地検討会の開催についてアナウンスがあった。また、宮本室長より、先日、長谷川総務大臣政務官がCLT実験施設を視察したことが紹介された。

オブザーバーの簡単なコメントの後、安村委員長より「今日は短時間で非常に有意義な議論ができ、私も本事業の成果に大いに期待している」との所感をいただき、第1回検討会は終了した。

## 5.2 現地検討会

開催日時：令和5年11月22日（水） 10:00～

場所：銘建工業株式会社 CLT 工場他、CLT 工場会議室（岡山県真庭市目木1-6）

出席者（敬称略）

外部有識者委員：安村 基 （静岡大学名誉教授）

槌本 敬大 （（国研）建築研究所）

小関 真琴 （（公財）日本合板検査会）

オブザーバー： 増井 僚 （林野庁木材産業課木材製品技術室）

事業実施者：

（国研）森林研究・整備機構 森林総合研究所

渋沢龍也、井道裕史、須藤竜大朗、宮武敦、河野幸喜、宮本康太

（北海道立総合研究機構）朝倉靖弘、須賀雅人

（日本木材加工技術協会）信田聡、村田光司

関係者：渡部博、布施美月（銘建工業(株)）

### 1. 見学会

銘建工業株式会社本社社屋、CLT 工場等を見学した（写真5-1）。

### 2. 議事：

#### 1) 挨拶

林野庁木材産業課・増井建築用木材担当専門職よりご挨拶いただいた。

#### 2) 事業の進捗状況の報告

それぞれの担当者が進捗状況を報告した。

長期挙動試験については、これまでに3サイクル終了し、現在データ解析中である。4サイクル目は、これから実施するが低い応力レベルの試験体であり、破断までには時間がかかる見込みである。

曲げ試験の試験体は製造中である。試験体が年内には納入され、その後試験を実施する予定である。

含水率挙動の測定については、現在透過性能を調べており、シミュレーションで接着層の変動を検討している。長期モニタリングにおいて、含水率の変動がほとんどなく、雰囲気の変化より0.5%程度の変動しかない。

#### 3) その他

2月中に第2回検討委員会を開催する。報告書原稿の提出締め切りは追って設定する。



写真 5-1 現地検討会の様子

### 5.3 第2回検討委員会

開催日時：令和6年2月28日（水）17:00～18:30

開催場所：林友ビル会議室（東京都文京区後楽1-7-12）（対面・Web併催）

出席者（敬称略）：

外部有識者委員（対面出席）

委員長 安村 基 （静岡大学名誉教授）

委員 河合 直人 （工学院大学建築学部建築学科）

委員 青木 謙治 （東京大学大学院農学生命科学研究科）

委員 小関 真琴 （（公財）日本合板検査会）

外部有識者委員（Web出席）

委員 槌本 敬大 （（国研）建築研究所）

オブザーバー（対面出席）

福島 純 （林野庁木材産業課木材製品技術室）

巻田 和丈 （林野庁木材産業課木材製品技術室）

オブザーバー（Web出席）

杉原 伸一 （国土交通省住宅局参事官（建築企画担当）付）

山内 一浩 （（独）農林水産消費安全技術センター）

増井 僚 （林野庁木材産業課木材製品技術室）

事業実施者

（国研）森林研究・整備機構 森林総合研究所

宮本 康太、渋沢 龍也、井道 裕史、宮武 敦、河野 幸喜（対面出席）

平松 靖（Web出席）

（一社）日本 CLT 協会

坂部芳平、西妻 博康（Web出席）

（地独）北海道立総合研究機構 林産試験場

朝倉 靖弘（対面出席）、近藤 佳秀、須賀 雅人、秋津 裕志（Web出席）

（株）中央設計

戸田 淳二（Web出席）

（公社）日本木材加工技術協会

村田 光司、黒田 尚宏（対面出席）

関係者

渡部 博、布施美月（銘建工業（株））（対面出席）

欠席者（敬称略）：

委員 荒木 康弘 （国土技術政策総合研究所）

委員 秋山 信彦 （国土技術政策総合研究所）

- 資料： 資料 1 委員名簿  
資料 2 議事録（案）（第 1 回検討委員会・現地検討会）  
資料 3 成果報告書目次（案）  
資料 4 事業成果の概要

議事：

1. 前回議事録（案）確認（資料 2）

第 1 回検討委員会（7/6 開催）及び現地検討会（11/22 開催）についての議事録案について、意見聴取と討議を行った後、承認された。

2. 事業結果について（資料 3、4）

1) 目次案および事業計画

事業実施者主査の森林総研・宮本室長より、資料 3 に沿って、今年度の成果報告書の目次（案）について、「1 章は事業計画で課題提案時のものである。2 章は長期挙動及び曲げ性能に影響を及ぼす製造因子の抽出で、昨年度の試験体仕様を再掲するとともに、2.2 で CLT の曲げ性能に影響を及ぼす因子の抽出について記載する。3 章は CLT の長期変形挙動に関する測定方法の妥当性の検討で、9 層 9 プライのような大断面の内部の含水率挙動を実験的に追跡したものである。4 章は長期挙動データの収集と解析である。5 章が議事録など事業の進捗のまとめ、6 章が総括となっている」と説明があった。

2) ラミナの集材及び製造試験

以降、資料と報告書案を示す形で、各担当者より今年度成果の報告と質疑があった。まず、宮本室長よりラミナの集材及び製造試験について報告があった。9 層 9 プライの試験体はスギラミナを用い、CLT の構成はこれまでの 5 層 5 プライ、7 層 7 プライと同じように、Mx60 の B 種構成である。マザーボードから図に示す試験体の採材を行った。接着剤には水性高分子－イソシアネート系接着剤を使用した。ラミナのグレーディングと産地について、B 種構成としたため M30B のラミナを集めるのに苦労し、産地としては少し幅広くなった。表に、過去の事業と比べた試験体仕様を示した。試験方法として、3 等分点 4 点加力方式を採用した。試験体サイズは、本来、試験体の長さ自体は 23t であるが、採材効率上、22.2t とした。試験体幅は 300mm、曲げスパンは 21t、荷重点間距離は 7t である。初期の性能を求めるための短期曲げ試験は 16 体で行った。長期挙動の試験体は合計 30 体とした。マザーボードは計 4 枚で、長期挙動及び短期曲げ試験体をマザーボード間をまたぐようにマッチングさせた。

3) CLT の曲げ性能に影響を及ぼす因子の抽出

森林総研・井道室長より短期曲げ試験について、CLT の曲げ性能に影響を及ぼす因子として、曲げヤング係数 E とせん断弾性係数 G、その比である E/G について検討した結

果が説明された。直交集成板の JAS の標準の曲げ試験方法は、スパンが梁せいの 21 倍、3 等分点 4 点荷重である。しかし、9 層 9 プライのように梁せいが大きくなると長さが 6m を超える場合もあり、試験体の採材や試験装置に制約がかかってしまう可能性がある。このような場合、長さを短くして試験を行うことが考えられるが、そのまま長さを短くすると見かけのヤング係数が変わるため、それを JAS の 21 倍 3 等分点に合わせるために計算式を用いて調整する必要がある。E は実際に試験をしたときのヤング係数、ES が標準のヤング係数である。h が材せい、L が長さ、a が荷重点と支点間の距離である。E/G の数値を決定する必要があるが、現在の直交集成板の JAS では大きめに見積もって 50 として計算している。G が小さくなると、せん断の変形が大きくなりせん断の変形を無視できないため、大きめに見積もって E/G を 50 にしているが、実際にどの程度であるか検証した事例は少なく、本事業で実験的に検討した。今回、動的と静的、両方法を用いて曲げヤング係数 E と、せん断弾性係数 G を測定した。支点間隔を 4 条件設定し、順に非破壊の曲げ試験を行い、得られた 4 点からヤング係数 E とせん断弾性係数 G を算出した。(材せい d/スパン L) 2 と 1/見かけの曲げヤング係数 (Em, app) の間には直線関係が得られ、静的な方法でも適切に測定可能であることが分かった。E は、強軸では、動的と静的でおおよそ同様の値が得られ、G は動的の方が大きい結果となった。静的の G が低いので E/G は静的の方が大きくなった。E/G については、動的が約 25、静的が約 30 であり、JAS における 50 より小さいことは、安全側であると言える。一方、弱軸では、E は動的も静的もあまり変わらず、G は動的の方がやや高い傾向がある。E/G も同じく、静的の方が少し大きい。ただ、元々、E に対して G は、大きく変わらないため、強軸の方より E/G そのものの値が低く、10~20 という値が得られた。強軸の曲げ強度の平均は今年度が 16.8、昨年が 14.4 であり、昨年よりも若干高い結果であった。

安村委員長より「E を求める試験では、長い試験体をスパンだけ替えたのか、それぞれ短くしたのか。」と質問があり、井道室長が「長いまま外にはみ出させるように実施した。」と回答した。安村委員長が「外の部分の影響はないのか。」と質問し、「押さえつけてから少し荷重をかけて始めており影響はないと考えているが、絶対ないとは言えない。」と回答した。安村委員長より「力学的には計算したらゼロかもしれないが、考慮する必要はないか。」と質問があり、井道室長が「できるだけキャンセルできる形で実施している」と回答した。安村委員長より「動的試験はどう実施したのか」と質問があり、「動的は加速度計を試験体の上に貼り付け、その近傍をハンマーで軽く叩き、FFT アナライザーにより周波数のピークを測定し、TGH 法を用いて曲げヤング係数とせん断弾性係数を算出した。動的は一つの支点に決めて幾つかのピークを出して、その幾つかのピークによって、支点をどこにするかで若干異なるという考えもあるが、今回は同じとみなした。」と回答した。安村委員長より「そもそも木材の繊維方向と直交方向の G は比較可能か」と質問があり、「通常、製材の G は 0.1 とか、もっと低いと思う。繊維方向はたくさんある。」と井道室長が回答した。安村委員長から「強軸・弱軸方向では、おそらく直交方向のせん断変形が大きいと考えられ、かなりその影響を受けると思うが、

この実験結果の方法で適切かどうかという観点である」とコメントがあり、「CLT では直交方向の影響を結構受けていると思う。製材は、Eは変わってもGはあまり変わらないとよく言われているが、この結果からCLTではGも多少は変わっているため、製材ほど一定ではないと考えられる。」と回答した。安村委員長から「直交方向のラミナの数が増えると変形も増える可能性が考えられる。ただ、応力分布があるという放物線形になると、真ん中の方が効いてくるのどうか気になる点はある。結果のまとめはこれでもいいと思う。基本的な理論と合っているデータだろうと考えられる。」と意見を述べた。小関委員より「動的なヤング係数とせん断弾性係数の算出は、日本住宅・木材技術センターのマニュアルの方法か」と質問し、「その方法である」と井道室長が回答した。

#### 4) CLT の長期変形挙動に関する測定方法の妥当性の検討

北林産試・朝倉研究主幹より、透湿抵抗に与える測定湿度の影響、接着層を考慮したCLT 内部含水率のシミュレーション手法、CLT のラミナ間の隙間が熱伝導率及び内部含水率変動に与える影響の検討、CLT 内部含水率の長期モニタリング手法の検討を実施した報告があった。CLT の接着層によって湿度変化に対してどのように含水率が変化するかカップ法で測定した。恒温恒湿器を用いて試験体の周囲の湿度を変化させた。平均相対湿度が25%、45%、90%となるに従い、急速に透湿抵抗が下がった。湿度があると接着層の影響で木材自体も影響を受けて変化し、接着層があるとまた大きく変化していくようである。接着層を考慮したCLT 内部含水率のシミュレーション手法の検討では、幅と高さが9層9プライCLTを鋸断した形のモデルに対して、実際にその試験体を相対湿度65%から85%の環境下に置いて吸湿させたときの平均含水率の変化をシミュレートした。200日超まで実験を行った結果、実測値と計算値がほぼ一致し、シミュレーションがほぼ妥当であると判断された。シミュレーションでは層ごとに計算するため、接着層がある場合、ラミナ内では含水率が変化し差を生じる場合もあり、時期的な問題だが、大小を繰り返す挙動を示す。一番差が大きかったとき、54日間の経過時の含水率、内部含水率の分布のシミュレーションから、接着層があるとやや障壁になり、接着剤を考慮しない場合と差が若干生まれてくる。接着層は、それなりに内部の含水率、水分の移動を阻害する要因にはなっているが、全体として見てみるとそれほど大きくはない。しかし、内部の一部分だけピンポイントで見ると差が生じる可能性もある。

直交集成板のJASではラミナ間の幅の隙間が6mmまで許容されているが、隙間がある場合に、熱伝導率と含水率状態にどれだけ影響を与えるかを検討した結果、ラミナ間の幅の隙間の存在率が10%の場合でも熱伝導率の変化は非常に小さく、ほぼ影響はないと考えられる。材と材との隙間があったときに、どのように水分が移動するか実験した結果、実験値とシミュレーション値はほぼ一致した。したがって、隙間があっても、含水率の変化に大きな影響はないと考えられる。

CLT 内部の長期モニタリング手法の検討では、ステンレス針をCLT 試験体の任意の深さに打ち込み、電気抵抗によって含水率を測定した。ほとんどのラミナで0.5%以下の

含水率変動であった。CLT 内部の含水率が温湿度の影響を受けることについては、今後さらに検討を進めたい。内部の含水率が、湿度に対する平衡含水率がラミナの個体によって異なるのか、含水率ではなくて電気抵抗が違うのか、検討を進めていく必要がある。市販の多点型の電気抵抗式測定器を組み合わせて試験装置を作製し、試験実施中である。安村委員長が「そもそも、製品の含水率は最初ばらついているかもしれないが、ある程度一定になってくる。当該試験の目的は透湿率の測定だと思うが、製品とどういう関係になっているかということが当初の目的か。表層の湿度が変わってきたときに含水率が増えるのか減るのかということだが、目的がどういうところにあるのか。」と質問し、朝倉研究主幹が「透湿挙動を全て測るのは別として、基本的には、今回の長期荷重試験が安定的に実施されていることを確認するのが目的の一つである。」と回答した。安村委員長が「これが確認された後、外部環境が変わったときの含水率の変化を把握することか。」と質問し、「外部環境が変化したときの試験は、吸湿だけではあるが、外部環境の湿度が20%になったときにどれだけ吸湿するかをシミュレーションで把握可能にしたということである。この手法を用いれば、任意の湿度変化があったときに内部の様子が把握できる。検証において、全体の含水率を調べるだけではなく、全体の重量変化とマッチングさせるという方法を用いており、試験体内部を分解して、それぞれ細かく含水率を測定することは実施していない。」と朝倉研究主幹が回答した。「現在は含水率だけ見ているが、この先には、こういう大断面部材の周囲環境において、内部含水率の分布状況の違いが、強度にはどういう影響があるのか、それとも無視してよいのか」という点を検討できればと考えている。現段階で測定手法とその妥当性を検討している。」と森林総研・渋沢ディレクターが補足した。安村委員長が「強度と変形に関して、長期荷重をかけてはいないが、乾燥もしくは湿度が高い場合に、それによって部材自体が変形するような要因は入ってくるのか。」と質問し、朝倉研究主幹「変形は測定していない」と回答した。安村委員長が「先ほど6mmまで隙間を許容するという話があったが、欧州ではCLTの変形を抑えるために隙間を空けるような話もある。要するに、直交方向が大きく変形するためぴったりくっつけていると変形が生じる。そういった挙動と関係があるか」と質問し、「今回の断熱性試験では、いわゆる断熱性能の計算など場合にはあまり影響ないと考えられる。」と朝倉研究主幹が回答した。安村委員長が「断熱性は、試験体の表裏で含水率が異なって仮に変形したとすると影響があるか」と質問し、「あり得る。」と朝倉研究主幹が回答した。安村委員長が「シミュレーションは、表と裏で雰囲気が違う場合でも可能か」と質問し、「可能である。そのようなことを目的としてシミュレーションモデルを作っている。」と朝倉研究主幹が回答した。小関委員より「シミュレーションのアルゴリズムを報告書に記載した方がよいと思う。」と意見を述べ、「担当者に直接伝える。基礎式は報告書に示した。」と朝倉研究主幹が応じた。河合委員より「含水率変動に与える隙間の影響について、こういうシミュレーション、計算や解析自体は結構だと思うが、隙間があった場合に、各層の隙間がそれぞれ連続している可能性がある。その場合、含水率の変動で湿気自体が動いていくこともあり得るので、今

回それは含まれていないと思うが、本来はもう少し話が複雑かと考えられるがいかがか。」質問し、朝倉研究主幹が「そのとおり。ただ、実際に製品を観察すると厚さ方向に隙間が開いて見えることはないため、今回は想定せずに検討した。ただ、偶然にも隙間があった場合には、特に熱はそれほど影響がないと思うが、湿気は水蒸気による物理的な移動なので、例えばトンネルのように通っていく可能性はゼロではない。」と回答した。安村委員長が「CLTは直交層が一層ずつ入っているから、直交層の隙間も併せると、点として存在するかもしれないが。」と意見を述べ、「隙間が点で連続する可能性はゼロではない。」と河合委員が述べた。渡部氏が「一概には言えないが、プレス時、ごく稀にラミナ間に隙間があることもあるが、側圧後に主圧をかける工程のため、基本的には接着性能には影響しないにしても、接着剤が回ってきて隙間を埋めているというケースはあると思う。」と述べた。朝倉研究主幹が「そういった場合と併せ、製品の厚さ方向に貫通する隙間が生じるのは、かなり稀なケースではないかと思う。これを検討するかは今後検討させていただきたい。」と述べた。渋谷ディレクターが「もし、そういうピンホールのものが最終的に9層まで貫通することがあった場合、単位面積当たり幾つあっても透湿には影響がないなど、定量的なことが言えればよいと思う。」と述べ、朝倉研究主幹が「熱に比べると、木材の場合、理論構築には実験的な検証が必要であるが、熱と同じようにあまり影響はないと考えている。また検討する。」と述べた。

##### 5) 決定した測定方法における CLT の長期挙動データの収集と解析

宮本室長が CLT の長期挙動データの収集と解析について説明した。昨年度は応力レベル 90%前後の 86~94%の 5 体で実施した。今年度はそれより低い応力レベル、80%前後、76~84%を実施した。試験機が 5 機のため、5 体ずつの試験サイクルとなる。横軸が試験時間、縦軸が変形量の図を報告書に記載する。図中、オレンジが加力点下の平均値、青が試験体の中央部であり、試験体中央部の方が若干大きいという傾向は、どの試験体も同じである。変形は最初に大きく増加し、以降微増しながら破断に向かう形となっている。所々変形が増加する箇所は、一度、少し破断検出されたときに、まだ荷重がある程度維持されていれば再加力している。したがって、再加力をしていても変位は進むが、まだしばらくは耐えたという形である。基本的には、どの応力レベルでも挙動自体は似た形であり、変形量に具体的に差があるかまだ見えてきてはいない。今回、1 試験体だけ他と異なる挙動をしていた。応力レベル 76%の 2 体目で、再加力の際に大きく変形が進んだ。他と比べて、最初の変形量が少し少なかったことも影響しているかもしれないが、何か実験的な原因なのか、こういう性質があったのか見極められてはいない。表には経過時間を載せた。同程度の応力レベルでも、ばらつきはある。これらのデータをマディソンカーブとともにグラフにプロットした。●の部分が昨年度実施した 5 体、○が今年実施した 10 体である。実験自体はおおむね良好に実施できていると考えられる。一概には言えないが、極端に早く壊れてしまう試験体が 7 層 7 プライのときよりは少ない印象がある。7 層 7 プライと比べると、中立軸が直交層なのか平行層なのかという違いも

あるかもしれないと考えている。現在、70%付近の試験体 5 体を継続実施しているところで、実際、1 か月ぐらい経ったが継続している状況である。残りは、同じように 70% 付近がさらにもう 1 サイクルと、あと、90%付近の 5 体があるという状況である。最初の 70%前後のデータが得られると、全体の傾きが見えてくるかと考えている。

次に、中央設計・戸田社長が長期荷重を受ける試験体の破断状況、応力レベル 84%について破断状況を説明した。中央部あたりで破壊している状況が見られ、破断の発端となっている引張側のフィンガージョイントが破断し有効せいが小さくなったことにより、水平方向に亀裂が入ってローリングシアによって破壊が進むという状況であった。その他の応力比については、同様に水平方向の亀裂が入る前には、必ずフィンガージョイントでの破断が起き、他の 82~80%のように、だんだん応力比が下がってきた状況でも、引張側のフィンガージョイント部で破断し、それによってまた破壊が進むというようなことが起きていた。短期曲げ試験においても同じような破断、破壊状況が見られており、ほとんどフィンガージョイントが破断したと同時に、このように繊維方向に亀裂が入って破断するという破壊状況については酷似していた。そのため、何かしら短期の曲げ試験と長期に荷重を掛ける試験につながりがあるのではないかという検討を進めている。応力比 76%等ある中で、短期の曲げ試験と長期試験結果の比較をすると、長期の破断時の変位の予測ができると考えた。その傾きは 5%程度の変動係数となっており、代表的な傾きが算出できると、それぞれ予測に何か結びつくのではないかと考えている。長期荷重時の破断を仮定したモデルで検討すると、学会規準のクリープ変形を含む全変位量の式等の変形量と同じような数値で予測ができるということが分かってきた。今後実施する応力比の中で、長期荷重の予測の検討を引き続き行っていきたいと考えている。青木委員より「今年度の長期試験は、全部破断まで行ったということか。」と質問があり、「破断まで実施し、破断したものを報告書に掲載した。現在、試験継続中のものが 5 体ある。」と宮本室長が回答した。渋谷ディレクターが「破断時の変形について、粘弾性的に考えたときに、破断時の変形量が大きくなるとか、それとも同じぐらいで破断してしまうのかというのは、これまで委員会の中でも指摘された。まだ、もう少し検討が必要であるが、例えば、クリープ限定的な発想で破断まで持っていかななくても予測できる、といったことにつながればということで解析を進めている。」と述べた。

## 6) 総括

渋谷ディレクターより、報告書の総括部分を説明があった。まず、今年度は 9 層 9 プライ CLT の長期挙動のデータの蓄積を図り、昨年度 5 体、今年度は 10 体が、今のところ破断をし、載荷中のものが 5 体あるという状況である。E/G の導出については、適正な 21t の実験ができないような場合にせん断の影響を予測できる有用な成果である。長期変形挙動に与える影響因子として、高透湿環境における含水率分布を検証した。最終的には強度性能に与える影響も検討していきたいが、測定に長期間を要するもので、まだそのところの議論ができるところまで残念ながら進んでいない。引き続き、この測定

については継続をしていく。木質の大断面の部材の優位な点として、異種材料と比べて熱的な性能が優れているというところもあり、居住環境も計算できるような形で、断熱性についても求めていきたいと考えている。最終的に、長期挙動データの収集について、昨年度からの積み上げで現在 15 体のデータが得られた。今後、現在継続中のものに加え、最も応力レベルが高いものが残っているため、来年度中、加力が終えられるかどうかは分からない。再来年度までかかってしまうかもしれないが、測定を終えた段階で示し、最終的に国交省にて検討できる形でデータの提供を考えたい。小関委員より「最終的に、E/G は JAS に反映する方向であるか。」と質問し、井道室長が「現段階では考えていない。ただし要望があれば、試験結果はある程度提供できる。」と回答した。小関委員が「E/G の数値自体を検討していくということか。」と質問し、「JAS には 50 くらいの値があるので、それに対して、本当にそれが正しいかというのを検証した。」と回答した。安村委員長が「本成果は、JAS 的にはよいと思うが、最終的に設計に持つていくときに、今、曲げの許容応力度を計算するようになっている。その場合に、 $\Sigma$  に掛ける係数とかがあるが、その辺りの検討も行うのか。」と質問し、渋沢ディレクターが「我々としてはデータを示し、検討は国交省にて実施されると考えている。前回の 7 層 7 プライのときにも、最終的には、国交省、農水省、林野庁及び当方で集まって検討したので、今回も、そういう形にはなると思う。」と答えた。安村委員長が「そのためのデータを揃えているということか。」と述べ、「そのとおりである。」と渋沢ディレクターが回答した。河合委員が「目標に向けて順調に進んでいると思うので、あとは、応力レベルがもう少し小さくなったところで、どういう挙動になるかというのをしっかりと確認し、長期許容応力度の設定につなげてもらいたい。」と意見を述べた。

### 3. その他

今年度報告書案について、有識者委員に早急に回覧し、ご意見を伺った後に最終的に取り纏めることで承諾を得た。第 2 回検討委員会の議事録(案)についても、早急に回覧し、報告書に掲載する方針で了承を得た。また主査より、次年度も本事業を継続する形で、林野庁補助事業に応募することで進めており、採択された場合には、本事業の外部有識者の各位に継続して委員を引き受けて頂きたい旨の依頼があった。

最後に、林野庁・福島課長補佐より次の挨拶をいただいた。能登半島地震に関する国交省の有識者委員会によると、奥能登で CLT を用いた建築物が 1 件あったが特段の被害はなかった。また、比較的新しい木造住宅の方は被害が少ないと状況と聞いている。調査結果の概要が 5、6 月に公表、秋頃には取りまとめの予定である。木造ということだけで、木造の建物が倦厭されることがないように、林野庁としても情報の提供に努めていく。本事業は、昨年度に引き続き実施しており、CLT の中でも最も厚い 9 層 9 プライであり、時間もかかる実験と解析であるが、現在 6 サイクル中 4 サイクル目ということで、この後も良い結果が出ることを期待している。長期戦になるが、確実なデータの蓄積ができるようお願いしたい。取りまとめに向けて尽力をお願いする。

## 6. 事業成果の総括と残された課題

本事業では、現在、許容応力度の対象となっていないCLT(直交集成板)の9層9プライ構成強軸方向の曲げに関する長期性能を測定し、既に許容応力度の対象となっている他の層構成のCLTと同様の算出方法を適用して良いか検討するため、曲げ性能を対象とした長期挙動データの収集を行っている。以下、得られた成果と残された課題について総括する。

CLTの曲げ性能に影響を及ぼす因子として曲げスパンを採り上げ、測定上の制限から曲げスパンを $21t$ ( $t$ :厚さ)取れなかった場合の測定結果の調整について検討した。調整には曲げヤング係数とせん断弾性係数の比( $E/G$ )が必要となることから、TGH法と変動スパン法で導出した。その結果、 $E/G$ の値は11~34程度となり、CLTのJAS規格における数値である50より若干低い値となった。また、 $E/G$ の測定に供試した試験体の曲げ性能を破壊試験で把握した。その結果、昨年度の測定結果と若干異なっており、製造に用いたラミナの物性の違いに起因すると考えられるが、供試材料の性能差はこうした測定において常に影響を与えうる因子であり、引き続き検討が必要である。

CLTの長期変形挙動に関する測定方法の妥当性について検討した。恒温恒湿環境にあっても、CLTのような大断面部材においては事前に十分な養生期間を取れないため、試験体性能に大きな影響を与える因子である含水率が非平衡状態にある。CLTについては、その影響の程度が検証されていないことから、その把握を目的としている。透湿抵抗に与える試験湿度の影響については、試験湿度が高いほど、透湿抵抗は低くなるが、接着層がある場合はない場合と比較して高い抵抗を示した。このことから、接着層を考慮したCLT内部の含水率のシミュレーション手法の検証を行い、高い予測精度を得た。

また、CLTラミナ間の隙間が熱伝導率、内部含水率変動に与える影響について検討した。隙間の増加とともに全体の熱伝導率は低下するが、その影響はわずかであることが分かった。内部含水率変動については、ほとんど影響は見られなかった。昨年度考案したCLT内部の含水率を長期モニタリングする手法による実証実験では、周囲の温湿度環境の変化に伴う含水率変化を捉えており、使用環境の温湿度管理の重要性が明らかとなった。さらに、モニタリングに用いるデータ収集装置の検討にも着手しており、次年度以降、継続することで実用化が可能と考えられる。

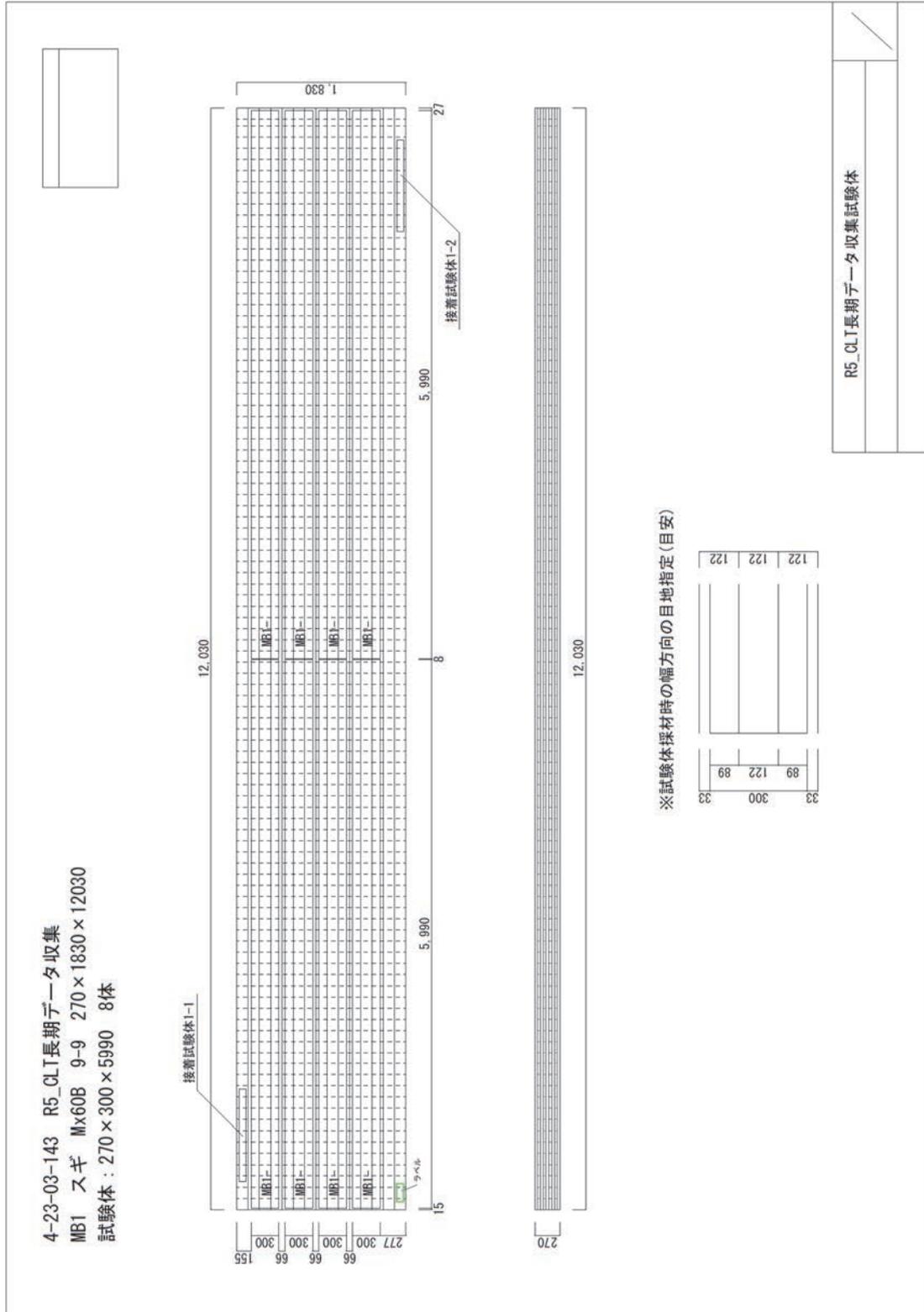
曲げ荷重下における長期挙動データの収集については破壊荷重の66%~94%の2%括約の各応力レベル2体ずつを供試する計画とし、昨年度の応力レベル86%~94%各1体から継続し、本報告書の執筆段階で応力レベル76%~84%の各2体の測定を終え、合計15体のデータを収集した。また、試験体の破断状況等について検討した。未実施の応力レベルとしてもっとも試験期間が長いと予測される66%~74%各2体があることから、本項目についても次年度以降の継続を要する。

なお、本事業成果については外部有識者委員会において審議・承認をいただいている。ここに衷心より謝意を表する。

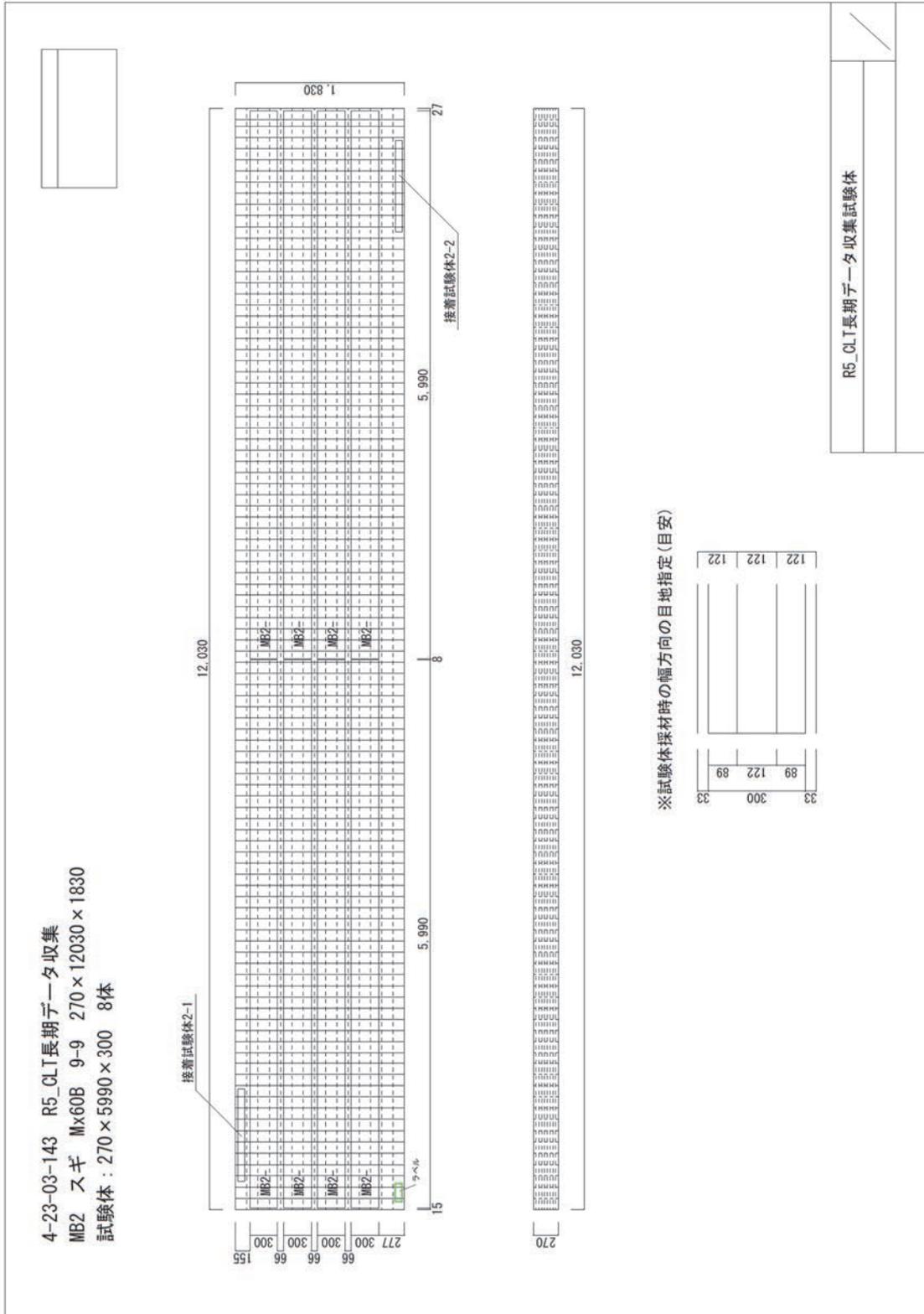
7. 付録

7.1 試験体採材図 (曲げ性能試験)

(1) 強軸方向試験体



(2) 弱軸方向試験体



## 7.2 試験体の破断状況

### (1) 応力比 84%



写真 7-1 DOL-84-2 破壊状況



写真 7-2 DOL-84-2 引張側フィンガージョイント部破断①



写真 7-3 DOL-84-2 引張側フィンガージョイント部破断②

(2) 応力比 82%



写真 7-4 DOL-82-1 破壊状況



写真 7-5 DOL-82-1 引張側フィンガージョイント部破断①

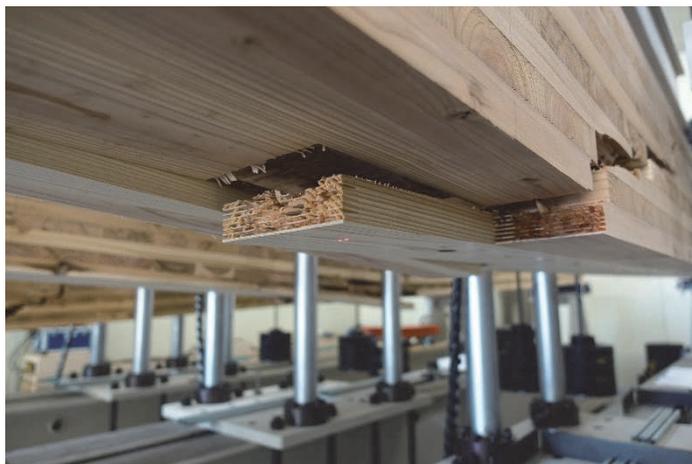


写真 7-6 DOL-82-1 引張側フィンガージョイント部破断②



写真 7-7 DOL-82-2 破壊状況①



写真 7-8 DOL-82-2 破壊状況②



写真 7-9 DOL-82-2 引張側フィンガージョイント部破断

(3) 応力比 80%



写真 7-10 DOL-80-1 破壊状況①



写真 7-11 DOL-80-1 破壊状況②



写真 7-12 DOL-80-1 引張側フィンガージョイント部破断



写真 7-13 DOL-80-2 破壊状況①



写真 7-14 DOL-80-2 破壊状況②



写真 7-15 DOL-80-2 引張側フィンガージョイント部破断

(4) 応力比 78%



写真 7-16 DOL-78-1 破壊状況①



写真 7-17 DOL-78-1 破壊状況②



写真 7-18 DOL-78-1 フィンガージョイント部破断



写真 7-19 DOL-78-2 破壊状況①



写真 7-20 DOL-78-2 破壊状況②



写真 7-21 DOL-78-2 フィンガージョイント部破断

(4) 応力比 76%



写真 7-22 DOL-76-1 破壊状況①



写真 7-23 DOL-76-1 破壊状況②



写真 7-24 DOL-76-1 破壊状況③



写真 7-25 D0L-76-2 破壊状況①



写真 7-26 D0L-76-2 破壊状況②



写真 7-27 D0L-76-2 フィンガージョイント部破断

