

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5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 4 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.....	1
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の適正製造条件導出と仕様決定.....	5
2.1	CLT原板の製造条件と試験体仕様の決定.....	5
2.2	ラミナの集材.....	6
2.3	試験体の採材位置.....	7
3.	CLTの長期変形挙動に関する測定方法の妥当性の検討.....	9
3.1	目的.....	9
3.2	実施内容.....	9
3.3	実施成果.....	9
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.....	19
4.1	長期挙動データ導出のための荷重水準の決定.....	19
4.2	曲げ荷重下における長期挙動データの収集と解析.....	26
4.3	試験体の破断状況.....	30
5.	進行状況の管理.....	32
5.1	第 1 回検討委員会.....	32
5.2	第 2 回検討委員会.....	36
6.	事業成果の総括と残された課題.....	41
7.	付録.....	42
7.1	ラミナの集材状況.....	42
7.2	試験体採材図.....	43
7.3	長期挙動試験における試験体の破断状況.....	47

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、最終改正平成30年国土交通省告示第1324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、現在告示において材料強度の適用対象外である9層9プライ構成のCLTについて、製法・性能に関する技術データの蓄積が必要であり、また、その適正利用のためには、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、長期挙動データの蓄積は、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 4 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 の適正製造条件導出と仕様決定

9 層 9 プライ構成の CLT の製造条件として、目標とする JAS 規格における等級、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。これらについて検討することで、得られる性能と製造のしやすさのバランスをとった適正製造条件を導出し、供試する試験体の仕様を決定する。仕様の決定にあたっては、後述する事業計画⑤により設置する外部学識経験者からなる委員会により検討を行う。

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の影響について検討し、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

ア) 長期挙動データ導出のための荷重水準の決定

CLT を使用する際に最も重要であり、かつ CLT の品質管理に使用される強度性能として曲げ性能を取り上げる。その長期挙動データを収集するためには、一定温湿度環境下で一定荷重水準に相当する静荷重を作用させる必要がある。本課題では、静的曲げ試験の結果を踏まえて作用させるべき荷重水準を決定する。

イ) 長期挙動データの収集

②により決定した測定条件下において、③ア) により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、本提案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イ) 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。

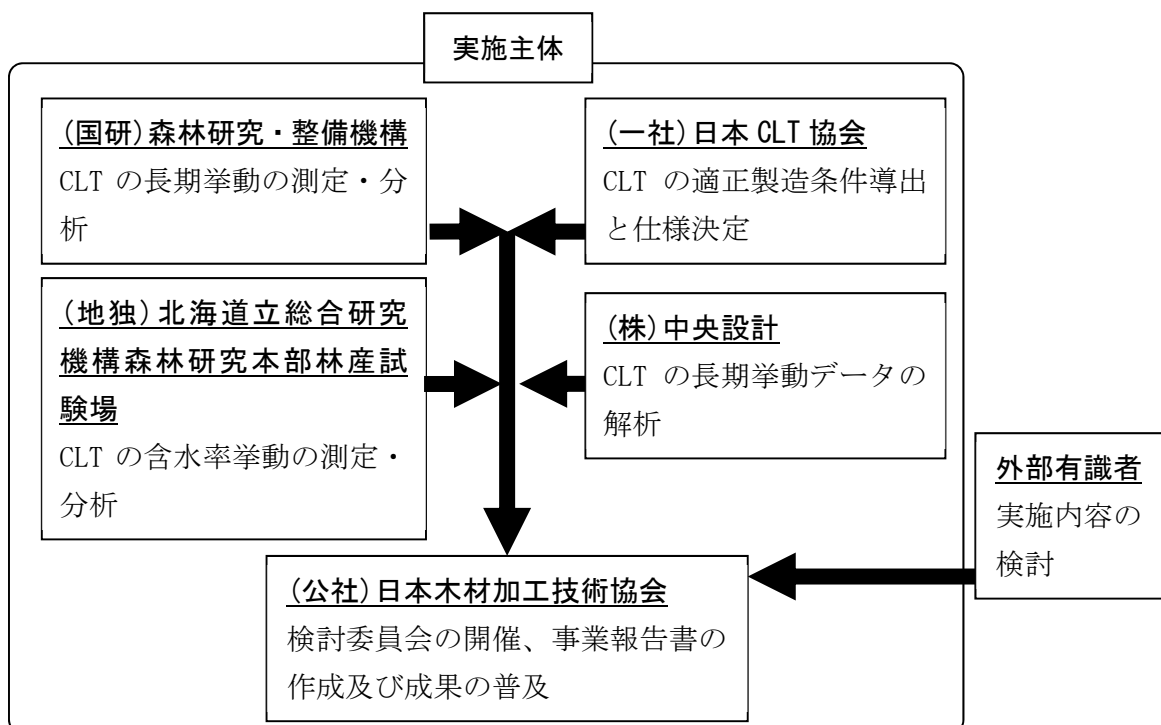
イ) 断面構成等 CLT の製造因子が長期挙動に与える影響の分析

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

本事業の円滑な進行のため、共同提案機関の構成員およ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となる実験内容（実験を進める手順、試験体の種類、調達方法等）の検討を行う。なお、試験体の種類としては、JAS 規格に規定される異等級構成を基本とするとともに、30 試験体以上の実験結果が得られるよう計画することとする。計画に従って上記①～④に述べる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、および本提案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



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]	尾方 伸次	(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]	日向 潔美	林野庁 木材産業課木材製品技術室
[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]	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、渋谷龍也、原田真樹、井道裕史、平松靖、宮武敦

(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 の適正製造条件導出と仕様決定

2.1 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（23 t ）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 21 t 、7 t 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
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	
		等級	Mx60B	
		接着剤	水性高分子ー イソシアネート系樹脂	
		ラミナ厚さ(mm)	30	
		ラミナ幅(mm)	105	
		フィンガー ジョイント	垂直	
		試験体厚さ(mm)	150	210
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	
		試験体長さ(mm)	3,450(23 t^*)	4,830(23 t)
		試験体幅(mm)	300	
		支点間距離(mm)	3,150(21 t)	4,410(21 t)
		荷重点間距離(mm)	1,050(7 t)	1,470(7 t)
	初期 (静的曲げ試験)	試験体数	16	
		平均最大荷重(kN)	42.5	68.9
	長期 (曲げクリープ 破壊試験)	応力比	66～94% (2%括約) 計 15 水準	
		試験体数	2 体/1 水準	
			66～94% (2%括約) 計 15 水準	

* t ：試験体厚さ

2.2 ラミナの集材

2.1 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 2-2-1 に M60B 及び M30B ラミナの抽出の詳細を示す。表 2-2-2 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 2-2-1 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 2-2-2 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

2.3 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 2-3-1 にそれぞれの試験体サイズと数量を示す。また、図 2-3-1 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 2-3-1 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

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

1) CLT 接着層の透湿抵抗の測定と含水率挙動シミュレーションの検討

- ・ねらい：CLT 内部の含水率挙動に及ぼす接着層の影響把握とシミュレーションによる含水率挙動予測手法を検証する。
- ・試験項目等：
 - (1) CLT を構成するラミナの厚さ方向の接着層および軸方向のフィンガージョイント部分の透湿抵抗を測定し、透湿抵抗値を明らかにする。
 - (2) 得られた透湿抵抗値にて含水率挙動シミュレーションを行い、CLT 内部の含水率変化を予測するとともに、小型試験体を用いた吸湿試験による検証を行う。

2) CLT 内部含水率の長期モニタリング手法の検討

- ・ねらい：CLT 内部の含水率を長期測定する手法を検討し、長期荷重試験における内部含水率の経時変化のモニタリングを可能とする。
- ・試験項目等：
 - 電気抵抗式含水率計のプロブを改良し、CLT 内部の任意の位置の含水率を長期的に測定しうる手法を開発する。小型試験体による検証を行った後、実大の 9 層 9 プライの CLT をもちいて実証実験を行う。

3.3 実施成果

1) CLT 接着層の透湿抵抗の測定と含水率挙動シミュレーションの検討

(1) 透湿抵抗の測定

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 3-3-1 に示すような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 23℃50%RH の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、長期荷重試験体と同じマザーボードから切り

出された 30cm 角の CLT を厚さ方向に切削し、接着層を含む厚さ 2mm 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 3-3-2）。これらの透湿面以外の部分をアルミテープで断湿したのち、吸湿剤を 500g 入れたアルミ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、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、3-3-4）。

ラミナのフィンガー部分の測定については、上記と同等のラミナから、フィンガーを有する部分と隣接する有しない部分を裁断し、それぞれ（厚さ 30mm、幅 120mm、長さ 100mm）の試験体を得た（図 3-3-5）。これらの木口以外の部分をアルミテープで断湿し、吸湿剤を 250g 入れた容量 1,200ml のステンレスカップに、試験体を通るサイズの角孔を開けたポリプロピレン板を用いて固定した。それぞれの接着・固定には 2 液性エポキシ樹脂接着剤とアルミテープを併用し、パラフィンによって防湿を行った（図 3-3-6）。

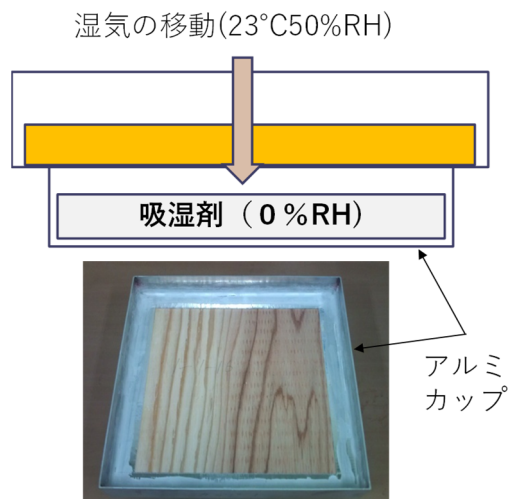


図 3-3-1 透湿試験の概要



接着層あり



接着層なし

図 3-3-2 透湿試験用の試験体

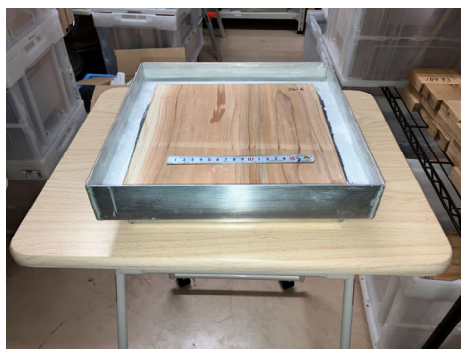


図 3-3-3 透湿試験（接着層あり）



図 3-3-4 透湿試験（接着層なし）



図 3-3-5 フィンガー部分の透湿試験体
(左：フィンガーあり 右：なし)

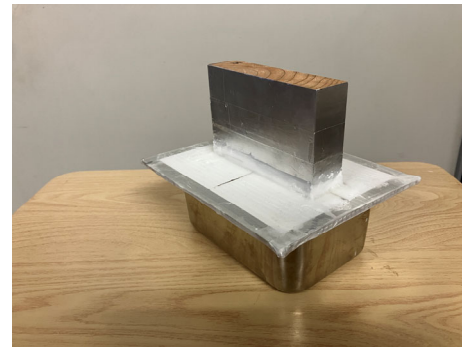


図 3-3-6 フィンガーの透湿試験
(ステンカップ内に乾燥剤)

なお、試験体はカップに固定する前に 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を行った。

試験体を固定したカップを 23℃50%RH の恒温恒湿室内に設置し、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。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 3-3-1 に示す。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 $[(m^2 \cdot s \cdot Pa) / ng]$ 、 G は透湿量 $[ng/s]$ 、 A は透湿面積 $[m^2]$ 、 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。

得られた透湿抵抗を表 3-3-1 内に示す。接着層の存在によって透湿抵抗が増加することが示された。また、接着層がある場合は無い場合比べて透湿抵抗は厚さ方向で約 2.7 倍、フィンガージョイント部では約 1.4 倍となり、両者では接着層の存在の影響度が異なることがわかった。

表 3-3-1 透湿試験結果

	厚さ方向		ラミナ	
	接着層あり	接着層なし	フィンガーあり	フィンガーなし
透湿面積(m ²)	0.0625	0.05	0.00367	0.00368
透湿距離(m)	0.0201	0.0201	0.100	0.100
透湿抵抗 (m ² ・s・Pa/ng)	0.0402	0.0150	0.00161	0.00116

(2) 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製した。

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(2)、(3)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、 α_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。(1)式および境界条件(2)、(3)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。計算に用いたモデルとしては、9 層 9 プライの CLT とした(図 3-3-7)。また、ラミナ間の接着層を考慮したモデルと無視したモデルの 2 つを設定し、計算を行った。

また、モデルの妥当性を検討するために、長期荷重試験体と同じマザーボードから試験体を採取し、20℃65%RH の恒温恒湿室内で調湿した後に、軸方向をアルミテープにより密封して幅方向と厚さ方向の 2 次元方向にのみ水分が移動すると見なせるようにした。その後、試験体を 20℃85%RH の恒温恒湿槽に 3 週間静置し吸湿させ、重量を経時的に測定した(図 3-3-8)。

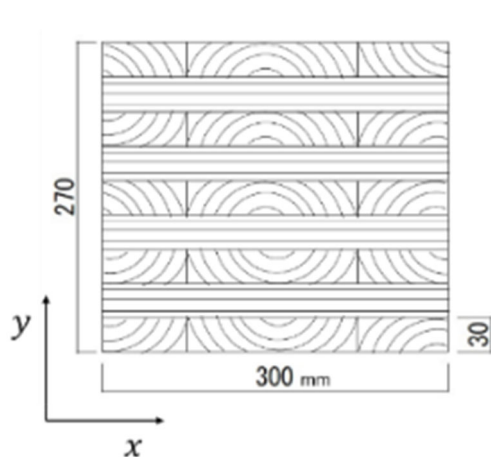


図 3-3-7 シミュレーションに用いたモデル
(二次元シミュレーションモデル)

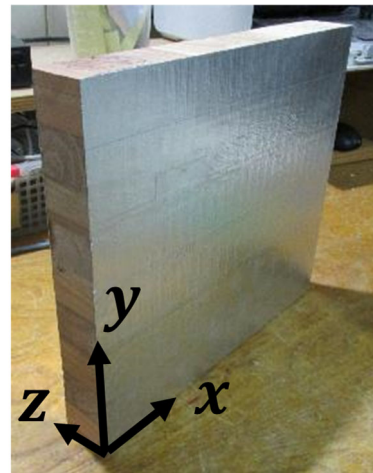


図 3-3-8 吸湿量測定用試験体
(水分移動方向を二次元に制限)

図 3-3-9 に重量の経時変化の実測値と解析値（シミュレーションによる計算値）を示す。実測値に対する解析値の最大相対誤差は接着層の影響を考慮した条件で約 2.42%、影響を無視した条件で約 2.38%となり、やや解析値はやや過小評価となったが重量変化を概ね再現できていると考えられた。また、シミュレーションによる内部の含水率分布を検討したところ、接着層が厚み方向の防湿層として機能していることが示されたが、試験体全体の重量変化（吸湿量）では接着層の有無による差はほとんど見られなかった（図 3-3-10）。これは、面内方向（接着層と平行方向）の吸湿量が多く、面外方向の水分の移動における接着層の影響が相対的に小さかったためと考えられる。

以上から、シミュレーションモデルの妥当性を確認すると共に、今回の試験体の形状、吸湿方向および吸湿時間では接着層が含水率変動に与える影響は内部の局所的な部分の含水率の差にとどまり、試験体全体では小さいことが分かった。

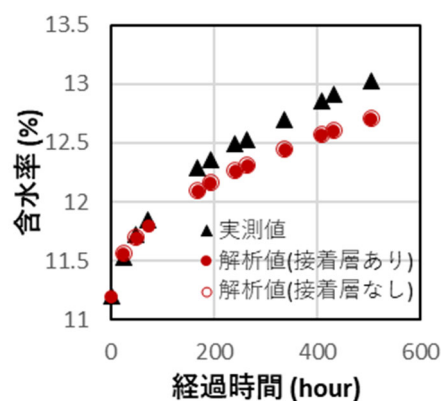


図 3-3-9 実測値と解析値（シミュレーションによる計算値）の比較

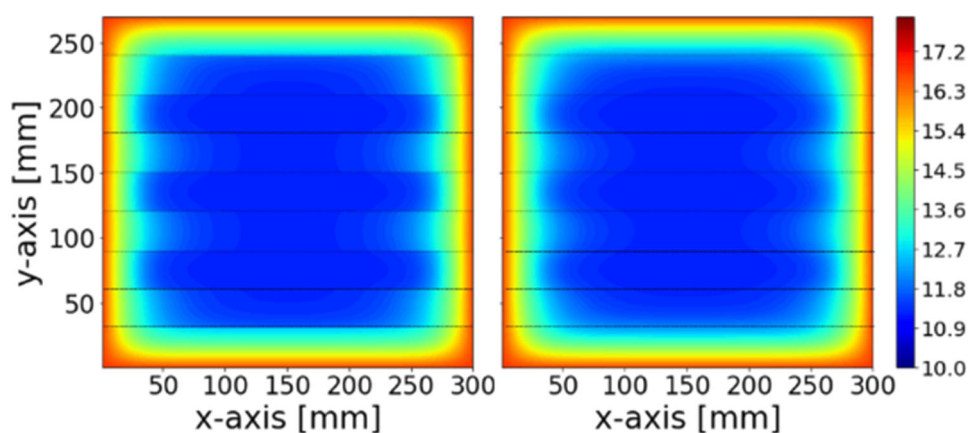


図 3-3-10 9 層 9 プライ CLT の吸湿試験時の内部含水率分布
(左：接着層あり 右：接着層なし)

2) CLT 内部含水率の長期モニタリング手法の検討

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。従来から、クギや導線等を木材内部に挿入することで内部含水率を測定する試みがなされてきたが、今回は現場で施工可能な簡易な手法で CLT 内部の含水率を測定する手法を検討した。

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 3-3-11)。これに導線を接続して測定用のプローブを作成し(図 3-3-12)、目的とする場所に先端が来るように CLT に打ち込み、導線に接続した電気抵抗式含水率計(kett 社製：MT-900)によって含水率を読み取った。

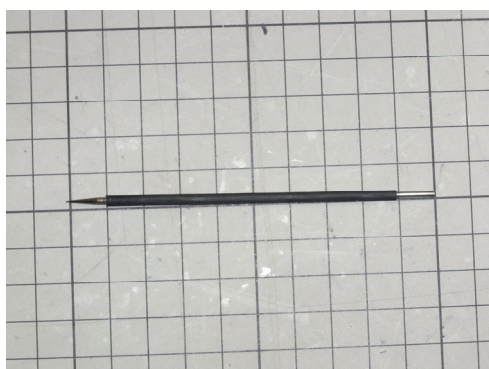


図 3-3-11 測定プローブの例
(直径 2mm のステンレス針の側部を熱収縮チューブで絶縁被覆)

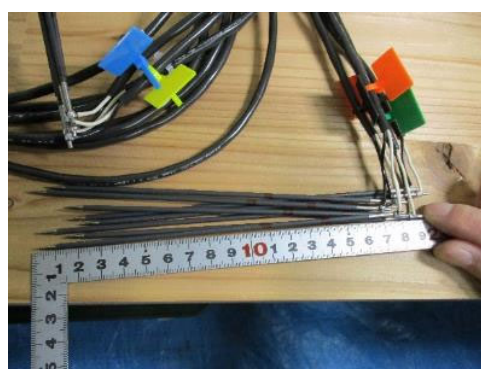


図 3-3-12 測定プローブへのリード線の接続

打ち込みにおいて、直径 3mm の先孔をパラレルシャンクツイストドリル（(株)不二越製：長さ 200mm）を用いて施工した。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）（図 3-3-13）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。プローブの木材への浸入量および間隔距離は MT-900 付属の測定端子（標準電極）の仕様に準拠している。

予備試験として、厚さ 30mm、幅 120mm、長さ 100mm の CLT 用ラミナを用いた小型試験体を様々な湿度条件で調湿し、MT-900 付属の標準電極と測定プローブを使用した場合で含水率を計測して両者を比較した（図 3-3-14）。その結果、表示値を誤差は低含水率域でやや大きくなるが、補正を行うことにより測定は可能と考えられた。

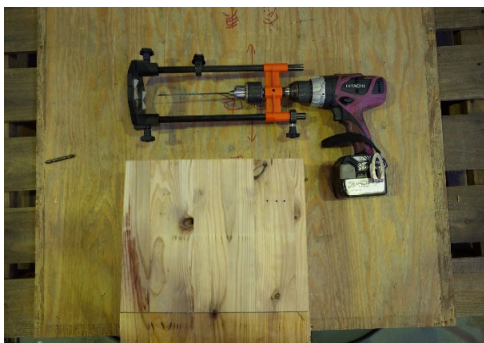


図 3-3-13 先孔切削用ドリルとドリルガイド
(孔深の設定が可能)

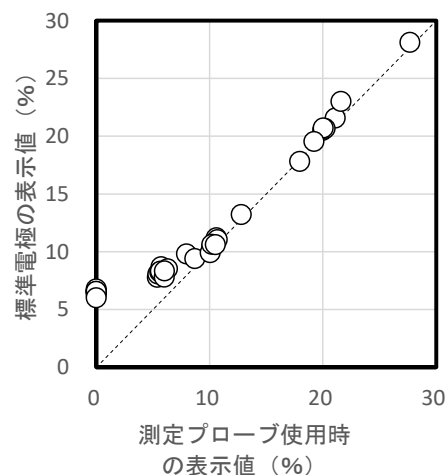


図 3-3-14 プローブ使用時と標準電極

森林総合研究所の CLT 長期挙動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。なお、測定に先立ち測定プローブの位置決めや先孔の加工について、林産試験場に設置された同寸法の CLT を用いて検討と加工の予行を行った。試験体の含水率測定位置を図 3-3-15 に示す。試験体に先孔を施工後（図 3-3-16）、プローブをハンマーによって打ち込んだ（図 3-3-17）。また、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 3-3-19）。

また、測定においては森林総合研究所所有の多点型含水率記録計（コーナー札幌製：KNS-LOG）を用いた。長さ 6m の長期強度試験体の長さ方向中央部（3m）の部分は、見かけ上水分の動きが中立となり断湿状態と見なせるため、3m の含水率測定試験体の片側端部をアルミテープで防湿して断湿状態を模した。

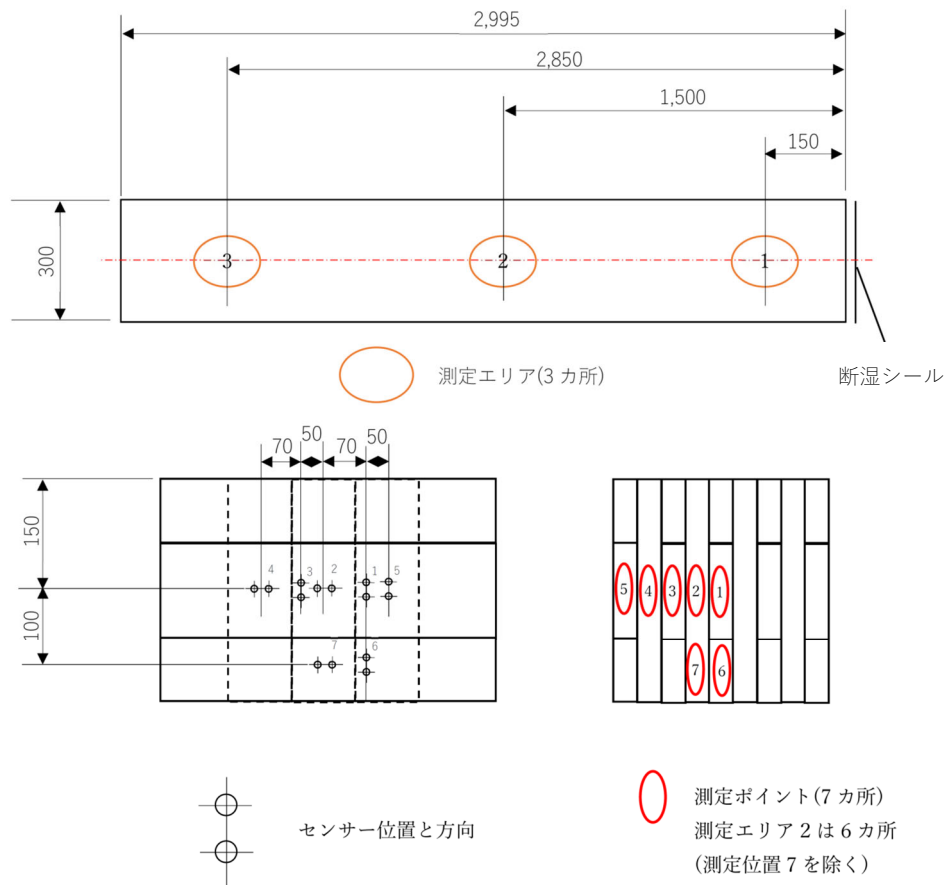


図 3-3-15 含水率の内部測定位置

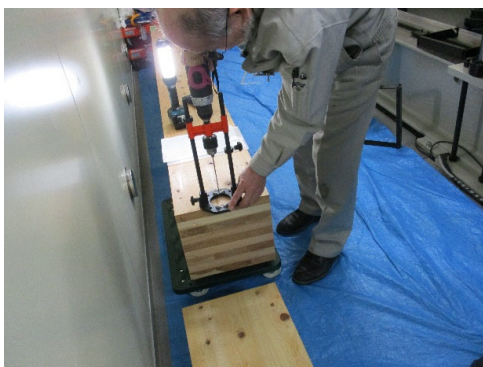


図 3-3-16 先孔切削作業の状況

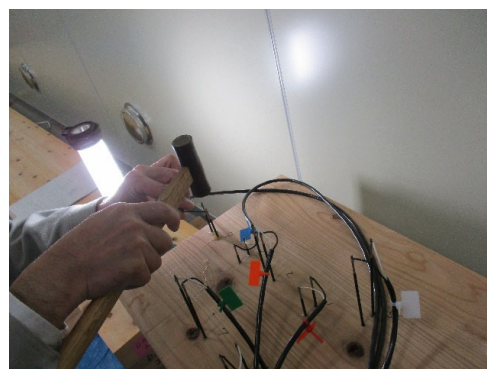


図 3-3-17 ハンマーによるプローブの打ち込み

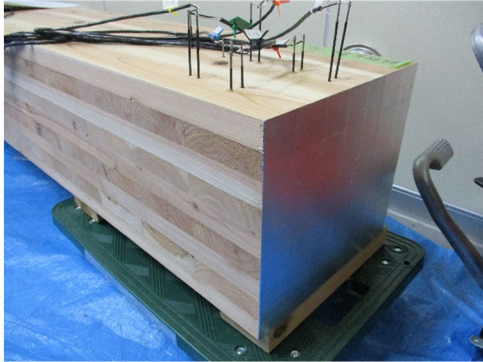


図 3-3-18 プローブの設置状況と
木口シールの状況



図 3-3-19 プローブの固定状況
(エポキシ接着剤充填)



図 3-3-20 使用した含水率ロガー
(コーナー札幌製：KNS-LOG)

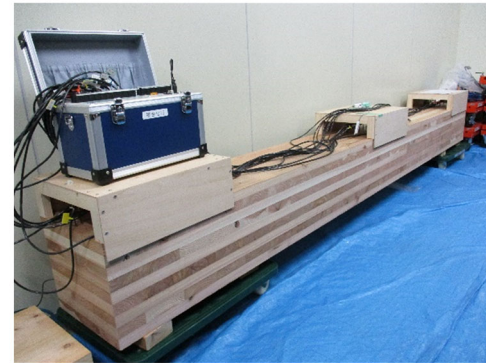


図 3-3-21 設置完了状態の様子
(プローブ保護カバー取り付け後)

設置後 1 週間の測定を行い装置の動作を確認した。測定結果を図 3-3-22～図 3-3-25 に示す。測定期間内に長期荷重試験体の入れ替えがあったため、試験室の解放による外気流入等により温湿度と含水率の変動が認められたが、その他の部分では概ね安定した測定結果が得られた。なお、一部の測定点 (①-7) は、測定値が安定しなかったため欠測扱いとした。また、各エリアのポイント 1～5 の平均含水率は、概ね 9.5% から 11.5% の範囲内にあり、中心層の含水率が低く、表層は高い傾向があることが示された (図 3-3-26～図 3-3-28)。

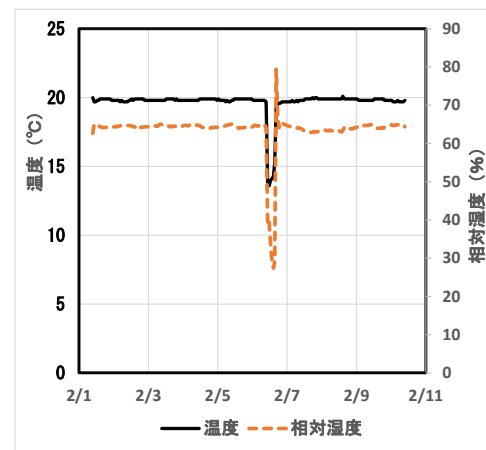


図 3-3-22 試験中の温湿度変化
(2 月 6 日に荷重試験体入替作業)

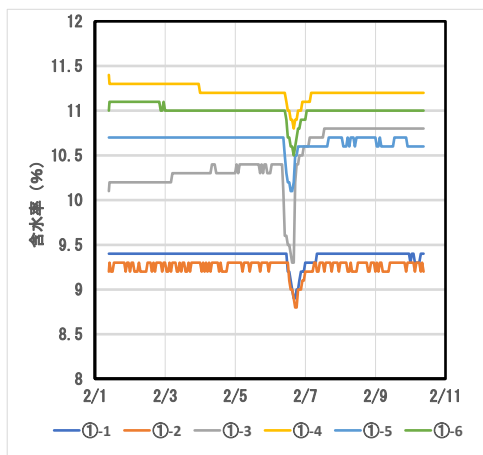


図 3-3-23 測定エリア①の含水率変化
(測定点番号：エリアーポイント)

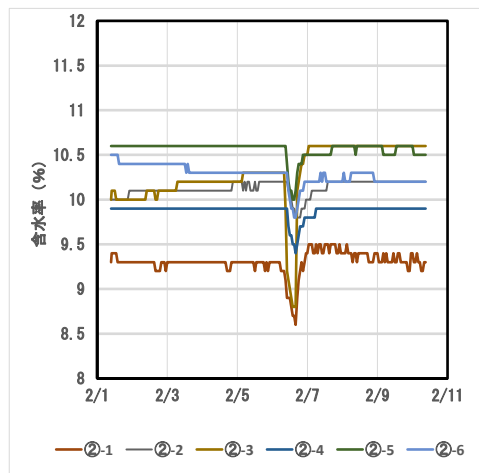


図 3-3-24 測定エリア②の含水率変化
(測定点番号：エリアーポイント)

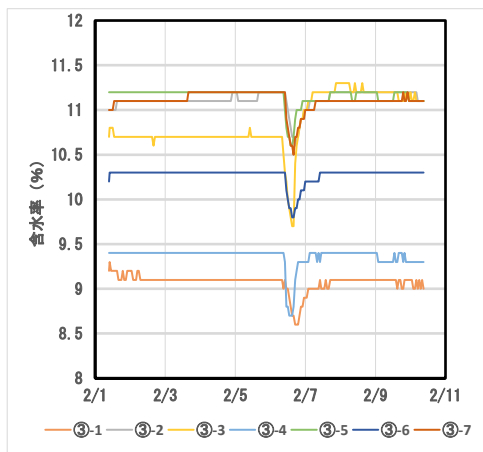


図 3-3-25 測定エリア③の含水率変化
(測定点番号：エリアーポイント)

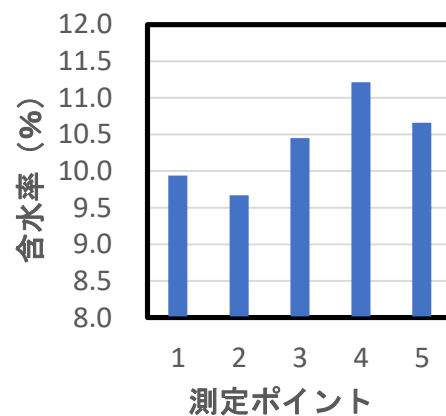


図 3-3-26 測定エリア①の平均含水率
(①-1～①-5)

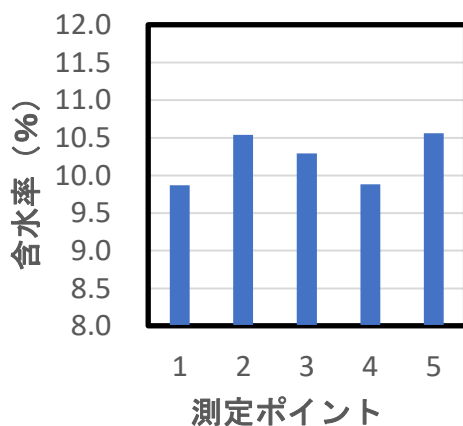


図 3-3-27 測定エリア②の平均含水率
(②-1～②-5)

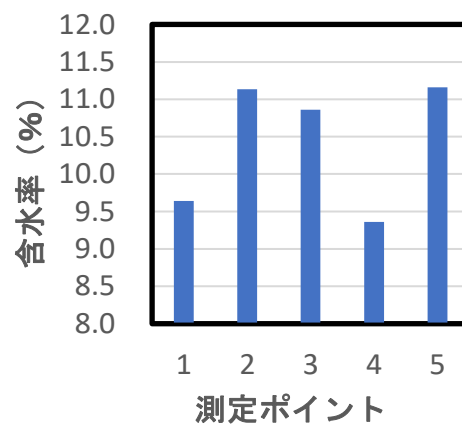


図 3-3-28 エリア③の平均含水率
(③-1～③-5)

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 長期挙動データ導出のための荷重水準の決定

4.1.1 ラミナのフラットワイズ曲げ試験

(1) 供試体と試験方法

M60B、M30B のラミナ各 20 体を供試体とした。寸法はいずれも厚さ 30mm×幅 122mm×長さ約 1300mm であり、長さ方向中央にフィンガージョイント (FJ) を有している。

曲げ試験に先立ち、密度、縦振動法によるヤング係数を測定した。フラットワイズ曲げ試験は直交集成板の JAS のラミナの曲げ C 試験に従って行った。すなわち、スパン (630mm) を厚さ (30mm) の 21 倍とした 3 等分点 4 点曲げ試験とした。FJ は荷重点間中央かつ FJ のバット部 (写真 4-1-1) が引張り側になるように配置した。材料試験機 (ミネベア製 TCM10000) により載荷した。クロスヘッド速度は 10mm/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 CDP-50) を設置し試験体の全たわみを測定した。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、比例限度応力、曲げ強度を算出した。また、破壊後の試験体の FJ の両側から長さが約 20mm の含水率測定用試験体を 1 体ずつ切り出し、全乾法で含水率を測定した。試験体の含水率は両含水率試験体の平均値とした。曲げ試験の様子を写真 4-1-2～3 に示す。



写真 4-1-1 FJ の形状 (写真下部の FJ が垂直になっている部分がバット部)

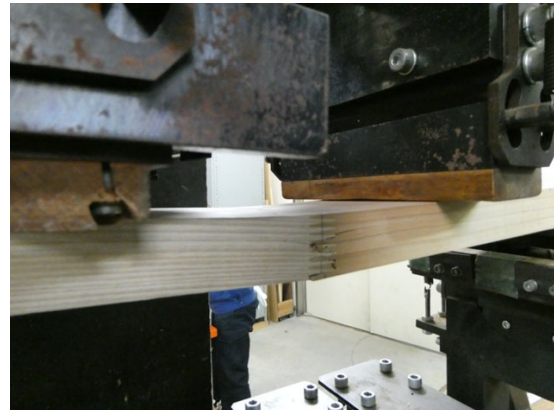
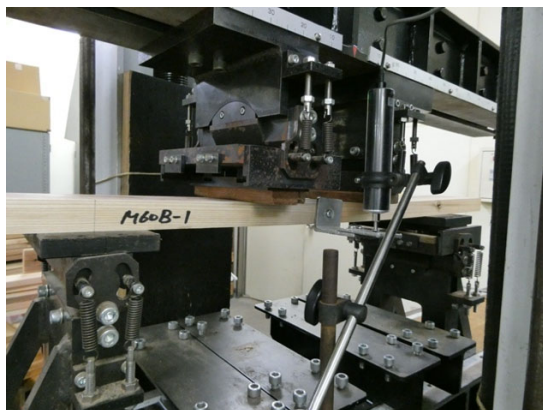


写真 4-1-2～3 フラットワイズ曲げ試験の様子

(2) 結果

フラットワイズ曲げ試験の結果の概要を表 4-1-1 に示すとともに、破壊形態の例を写真 4-1-4～7 に示す。ほぼすべての試験体が FJ 部で破壊した。

表 4-1-1 フラットワイズ曲げ試験の結果の概要

等級	試験体番号	密度 (kg/m ³)	含水率 (%)	縦振動法の ヤング係数 (kN/mm ²)	見かけの 曲げヤング係数 (kN/mm ²)	比例限度 応力 (N/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)
M60B	試験体数	20	20	20	20	20	20
	平均値	357	10.6	8.18	7.42	26.2	29.2
	最小値	322	9.42	5.61	5.23	17.0	22.8
	最大値	397	11.9	9.41	9.05	35.3	35.7
	標準偏差	22.1	0.654	1.20	1.01	4.54	3.12
	変動係数(%)	6.20	6.18	14.7	13.7	17.3	10.7
M30B	試験体数	20	20	20	20	20	20
	平均値	333	9.21	5.85	5.23	19.4	20.2
	最小値	294	8.63	4.67	4.30	13.6	14.2
	最大値	367	10.3	6.93	6.41	23.6	27.5
	標準偏差	20.6	0.507	0.669	0.596	2.92	3.47
	変動係数(%)	6.19	5.50	11.4	11.4	15.1	17.2

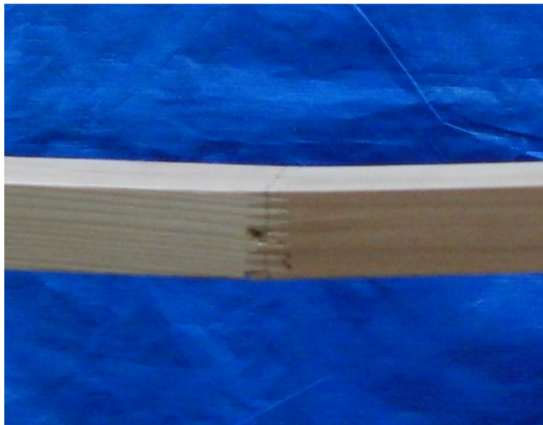


写真 4-1-4～5 M60B の破壊形態の例 (M60B-1)

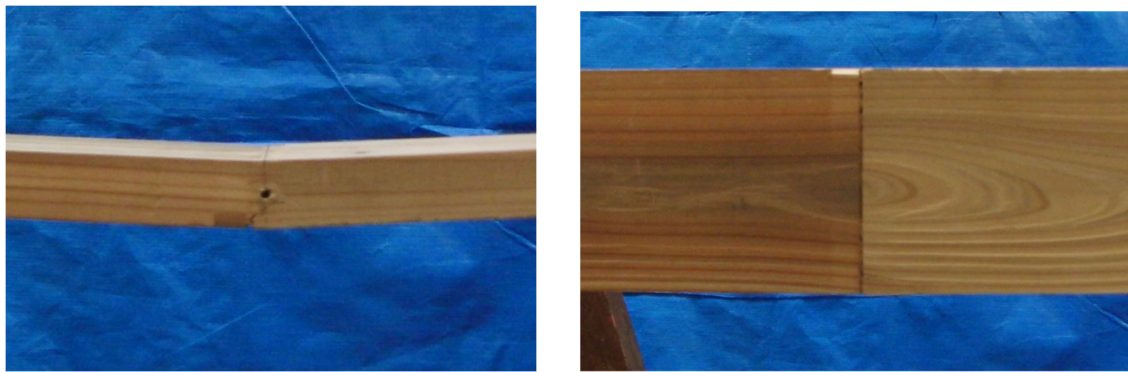


写真 4-1-6～7 M30B の破壊形態の例 (M30B-1)

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。なお、上限値は比較していない。見かけの曲げヤング係数について、両等級とも平均値・5% 下限値に関わらず、JAS 基準値を上回っていた。曲げ強度は M30B の 5% 下限値以外はいずれも 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

等級		見かけの曲げヤング係数 (kN/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)
M60B	平均値	7.42 JAS 基準値 : 6.0	29.2 JAS 基準値 : 27.0
	5% 下限値 (正規分布)	5.46 JAS 基準値 : 5.0	23.2 JAS 基準値 : 20.0
M30B	平均値	5.23 JAS 基準値 : 3.0	20.2 JAS 基準値 : 19.5
	5% 下限値 (正規分布)	4.08 JAS 基準値 : 2.5	13.5 JAS 基準値 : 14.5

4.1.2 CLT の短期曲げ試験

(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。

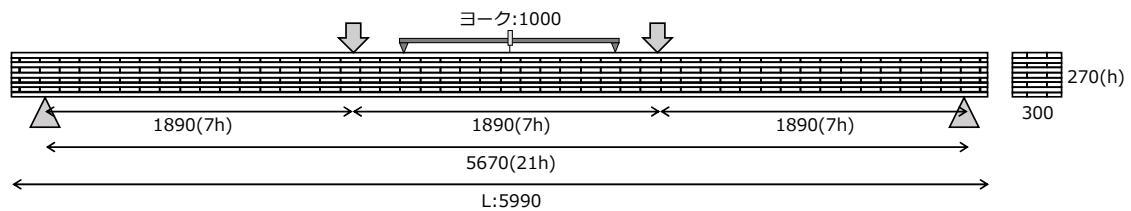


図 4-1-1 CLT の短期曲げ試験の模式図



写真 4-1-8～9 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 4-1-3 に示すとともに、破壊形態の例を写真 4-1-10～13 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 4-1-3 短期曲げ試験の結果

等級 記号	試験体 番号	密度 (kg/m ³)	含水率 (%)	縦振動法 ヤング係数 (kN/mm ²)
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 ヤング係数 (面内) (kN/mm ²)	TGH法 ヤング係数 (面内) (kN/mm ²)	TGH法 せん断弾性係数 (面内) (kN/mm ²)	曲げたわみ振動法 ヤング係数 (面外) (kN/mm ²)	TGH法 ヤング係数 (面外) (kN/mm ²)	TGH法 せん断弾性係数 (面外) (kN/mm ²)
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 曲げヤング係数 (kN/mm ²)	真の 曲げヤング係数 (kN/mm ²)	比例限度 応力 (N/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)
Mx60-9-9	1	4.14	4.84	9.9	14.6
Mx60-9-9	2	4.24	4.57	14.0	14.0
Mx60-9-9	3	4.03	4.46	9.5	13.8
Mx60-9-9	4	3.88	4.29	14.3	14.3
Mx60-9-9	5	4.40	4.95	10.3	15.8
Mx60-9-9	6	3.68	4.06	8.4	13.1
Mx60-9-9	7	3.71	3.87	10.8	13.5
Mx60-9-9	8	3.84	4.20	10.7	14.0
Mx60-9-9	9	3.99	4.55	7.6	13.5
Mx60-9-9	10	3.76	4.07	14.2	15.7
Mx60-9-9	11	3.72	3.91	9.7	14.8
Mx60-9-9	12	4.01	4.74	9.0	16.5
Mx60-9-9	13	3.75	4.14	13.2	13.2
Mx60-9-9	14	3.71	4.03	14.6	15.2
Mx60-9-9	15	3.73	4.17	8.2	14.5
Mx60-9-9	16	3.99	4.27	13.5	14.5
平均		3.91	4.32	11.1	14.4
変動係数(%)		5.50	7.66	21.9	6.81



写真 4-1-10～11 破壊形態の例 (Mx60-9-9_2)



写真 4-1-12～13 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
のを表 4-1-4 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
を上回っていた。

表 4-1-4 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 ²)	曲げ強度 (N/mm ²)
平均値	3.91 JAS 基準値 : 3.2	14.4
5% 下限値 (正規分布)	3.49 JAS 基準値 : 2.6	12.5 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 4-1-5～6 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 割程度小さい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 2 割程度大きいという結果となった。

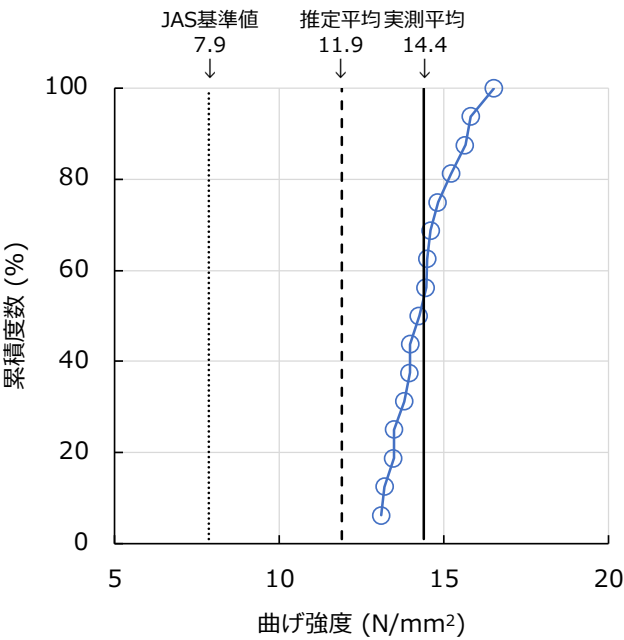


図 4-1-2 曲げ強度の累積度数分布

表 4-1-5 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	曲げヤング係数	曲げヤング係数	曲げ強度
M60B (kN/mm ²)	M30B (kN/mm ²)	(kN/mm ²)	M60B (N/mm ²)
7.42	5.23	0	29.2

表 4-1-6 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	曲げヤング係数	曲げヤング係数	曲げ強度	曲げ強度	曲げ強度
(kN/mm ²)	(kN/mm ²)		(N/mm ²)	(N/mm ²)	
3.91	4.41	0.89	14.4	11.9	1.21

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、4.1.2章で述べた短期曲げ試験によって、短期曲げ試験による最大荷重の平均値 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、応力比 86、88、90、92 及び 94%の試験を行った。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（応力比 86～94%）の試験体諸元と試験条件

応力比 (%)	試験体 No.	試験機	密度 (kg/m ³)	含水率 (%)	試験荷重 (kN)*	重錘 (整数丸め) (kg)	実応力比 (%)
94	MB4-DOL94-1	2	366.7	12.0	58.48	119	93.7
92	MB3-DOL92-1	3	373.5	12.5	57.23	117	92.2
90	MB2-DOL90-1	1	366.0	11.5	55.99	114	89.8
88	MB4-DOL88-1	5	371.7	11.0	54.75	112	88.2
86	MB2-DOL86-1	4	368.5	11.0	53.50	109	85.9



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 4-2-2～6 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。応力比 90%の試験体は、そのまま試験体全体の破断に至った。応力比 94、92、86%の試験体は、再度加力しても荷重を維持することができたため、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。応力比 88%は、2 度の再加力を行った。最終的な破断時の変形量と応力比の関係については、今回の試験体 5 体の範囲では明らかではなかったが、引き続き測定を続けることで評価を行う。

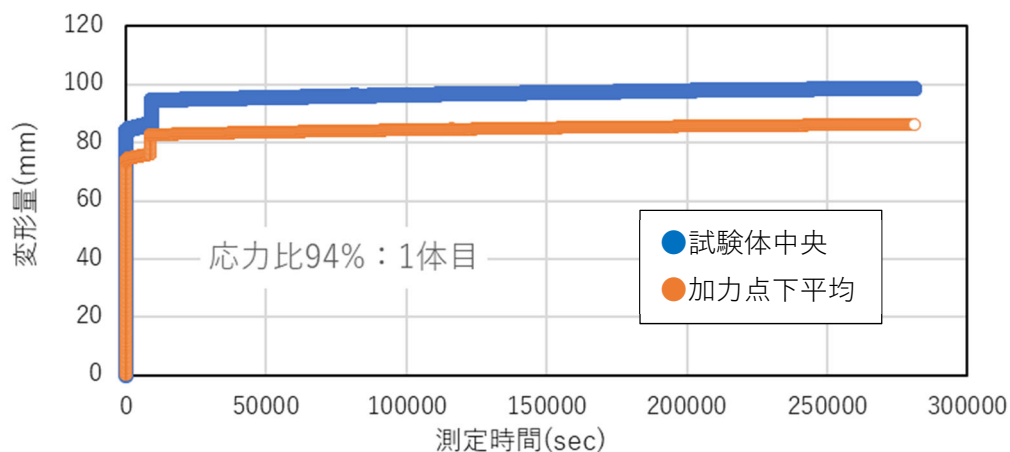


図 4-2-2 9 層 9 プライ CLT の応力比 94%の曲げクリープ破壊試験における変形量の経時変化

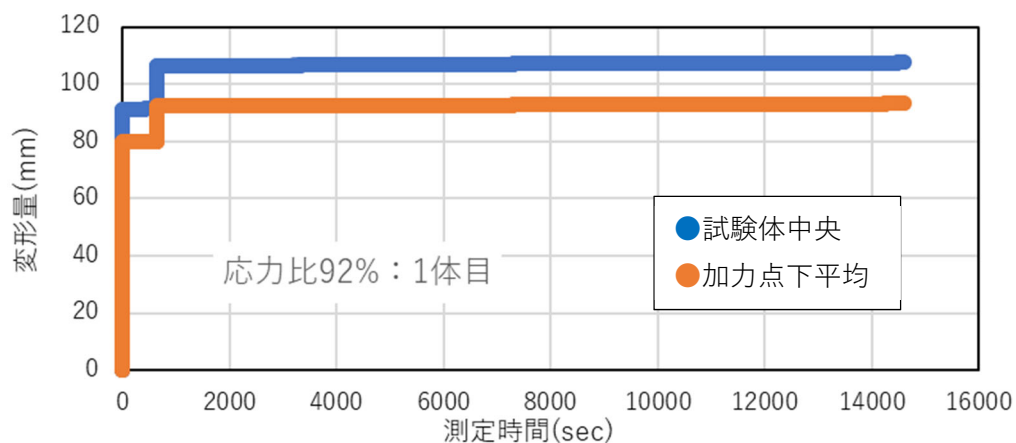


図 4-2-3 9 層 9 プライ CLT の応力比 92%の曲げクリープ破壊試験における変形量の経時変化

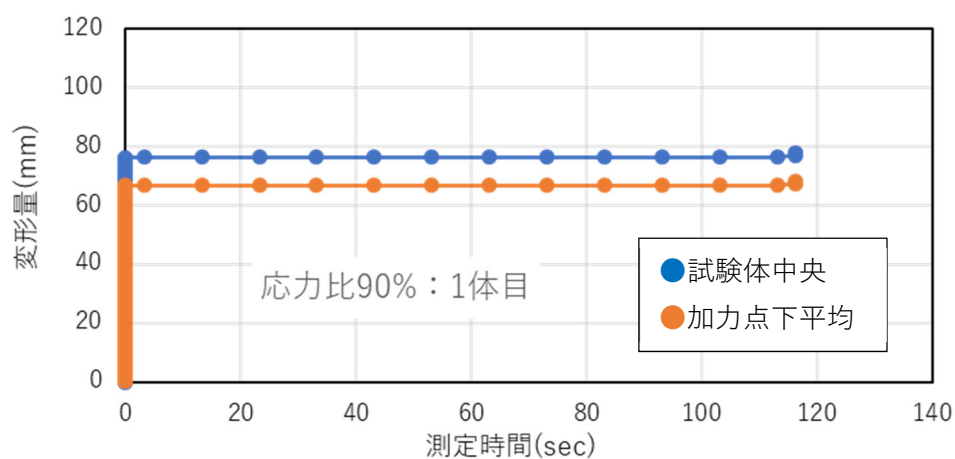


図 4-2-4 9 層 9 プライ CLT の応力比 90%の曲げクリープ破壊試験における変形量の経時変化

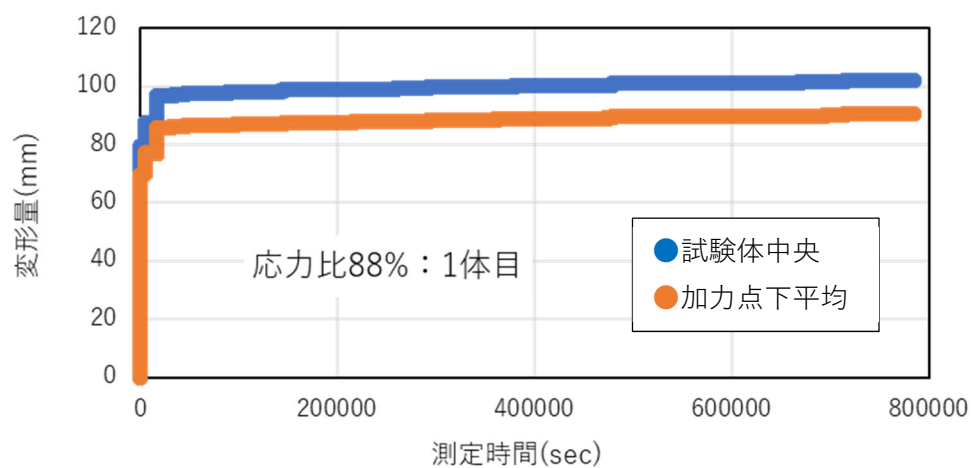


図 4-2-5 9 層 9 プライ CLT の応力比 88%の曲げクリープ破壊試験における変形量の経時変化

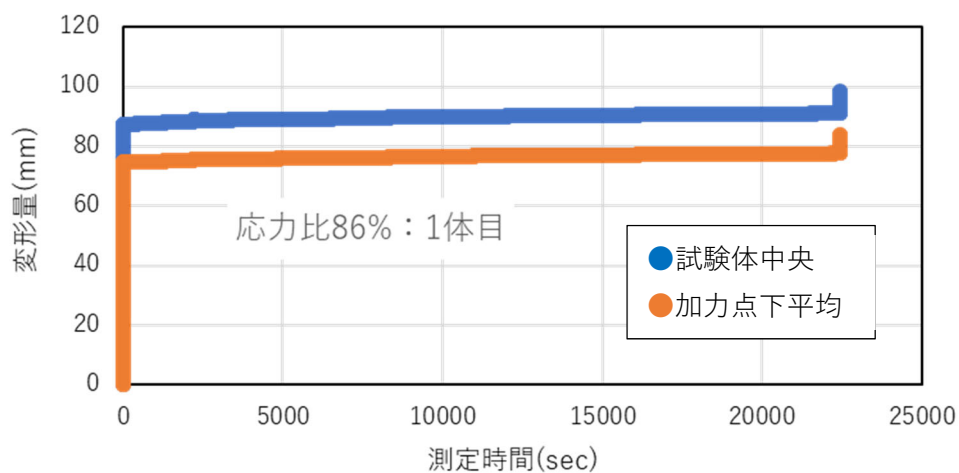


図 4-2-6 9 層 9 プライ CLT の応力比 86%の曲げクリープ破壊試験における変形量の経時変化

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 4-2-7 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 86～94%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

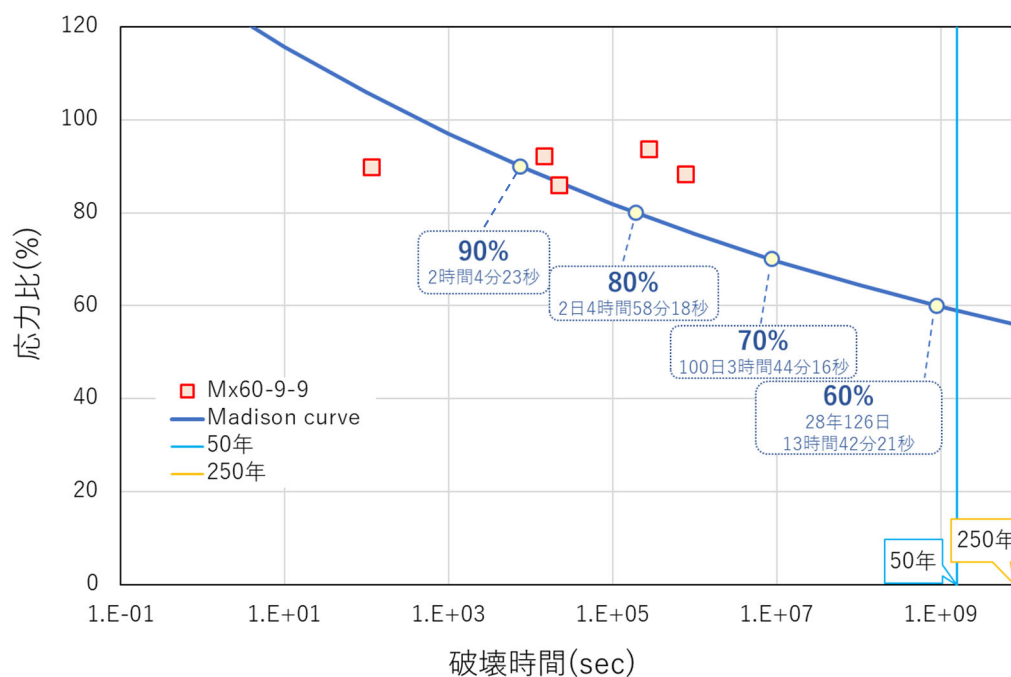


図 4-2-7 9 層 9 プライ CLT の曲げクリープ破壊試験による破壊時間と応力比の関係
(応力比 86～94%の結果を反映)

4.3 試験体の破断状況

応力比94%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-94-1 破壊全体状況



写真 4-3-2 DOL-94-1 破断状況



写真 4-3-3 DOL-94-1 梁下端フィンガージョイント部分の破断①



写真 4-3-4 DOL-94-1 梁下端フィンガージョイント部分の破断②

5. 進行状況の管理

5.1 第1回検討委員会

開催日時：令和4年7月7日（木） 13:00～14:30

開催場所：東京都中央区立産業会館

出席者：

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 尾方 伸次 （（公財）日本合板検査会）

委員 槌本 敬大 （（国研）建築研究所）

委員 荒木 康弘 （国土技術政策総合研究所）

外部有識者委員（web出席）

委員 河合 直人 （工学院大学建築学部建築学科）

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）

日向 潔美 （林野庁木材産業課木材製品技術室）

山内 一浩 （（独）農林水産消費安全技術センター）

オブザーバー（web出席）

納富 昭光 （国土交通省住宅局参事官（建築企画担当）付）

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、原田 真樹、平松 靖、宮武 敦（対面出席）

井道 裕史、その他（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、小田佑二（対面出席）

（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、山崎 亨史、秋津 裕志、須賀 雅人（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

今田 多映（国土交通省住宅局）（web出席）

渡部 博（銘建工業（株））（対面出席）

資料： 資料 1 出席者名簿

資料 2-1 企画書

資料 2-2 仕様書

資料 3-1 9 層 9 プライ CLT 試験体仕様（案）・過去の試験体仕様との比較

資料 3-2 採材図案

議事録：

1. 林野庁挨拶

林野庁木材産業課・日向氏より、挨拶があった。

2. 委員紹介

資料 1「出席者名簿」に沿って、委員各位の紹介を行った。

3. 事業内容

(1) 事業概要・スケジュールについて

事業実施者の森林総研・宮本室長より、資料 2-1「企画書」に従って、事業の概要について説明があった。①CLT の適正製造条件とその仕様改定、②CLT の長期変形許容に関する測定方法の妥当性の検討、③決定した測量方法における CLT の挙動データの収集、④収集した CLT 挙動データの解析、⑤委員会の開催・運営および成果の取りまとめ、を実施する。実施機関の役割分担は、森林総合研究所が CLT の長期挙動の測定とデータの解析、全体の取りまとめ、日本 CLT 協会が CLT の製造、北海道立総合研究機構林産試験場が CLT の含水率挙動の測定・分析、株式会社中央設計が CLT 長期挙動データの解析、日本木材加工技術協会が検討委員会開催と報告書作成である。外部有識者委員には、実施内容に関する実施内容や事業の進捗について、コメント及び御意見をいただく。

森林総研・宮本室長より、資料 2-2「仕様書」に従って、事業のスケジュールについて説明があった。検討委員会は、7 月、秋口、年度末の 3 回を予定している。実施期間は 2023 年 3 月末までである。本年 9 月末から 10 月中旬ぐらいにマザーボードを製作完了し、試験体に加工する。10 月下旬辺りから初期試験を行う予定である。初期試験の結果を受けて、長期試験の荷重水準が決定し次第、速やかに長期試験を開始する。含水率試験は、試験体の製造・加工が進んだところで実施解析を進める。報告書の取りまとめは、2023 年 2～3 月ぐらいに行う。秋口の検討委員会は、試験実施とうまく合えば、現地で行いたい。榎本委員より「試験樹種は、スギとカラマツか。」との質問があり、事業実施者が「まずは主要樹種であるスギを試験樹種とし、カラマツは予定していないが、将来的にはスギ以外の樹種についてもあり得る。」と回答し、受け入れられた。

今年度の試験の計画について、まず、資料 3-1「9 層 9 プライ CLT 試験体仕様（案）・過去の試験体仕様との比較」、資料 3-2「採材図案」に従って、CLT 試験体の仕様及び試験体の採材の説明があった。CLT の構成は 9 層 9 プライ、樹種はスギ、等級は Mx60B、接着剤は水性高分子ーイソシアネート系樹脂、ラミナ厚は 30mm、ラミナ幅は 122mm、フィンガージョイント方向は水平、原板厚さは 270mm である。樹種、等級、接着剤、ラミナ厚は平成 25 年から実施してきた事業の試験体と同様である。試験方法について、加力方法は 3 等分 4 点加力、試験体長さは 5,990mm（約 22.2t）、試験体幅は 300mm、支点

間距離は 5,670mm (21t)、荷重点間距離が 1,890mm (7t) である。初期試験（静的曲げ試験）の試験体数は 16、過去のデータから平均最大荷重について約 80kN を見込んでい
る。長期試験（曲げクリープ破壊試験）の試験体数は 30、応力レベルが 66～94%である。
試験体の採材位置については、1 枚のマザーボードにおいて応力レベルの重複が無いよ
う、配置も考慮して計画した。

青木委員より「これまでの試験だとラミナ幅は 105mm だったので、1 試験体にラミナ
が 3 枚ぐらい入っていたが、122mm にすると、2 枚半になり、入っているラミナの割合
が変わるが、その影響は出ないのか。」との質問があり、宮本室長より「122mm では 3 枚
は必ずラミナがかかるので、両脇のラミナが偏らないよう、試験体幅方向の中心に 1 枚
のラミナの中心が配置されるようにする。」との回答があった。

安村委員長より「荷重の応力レベルについて、以前も同様に実施していると思うが、
何かこれではらつきについての考えはあるか。」と意見があり、森林総研・渋沢研究デ
ィレクターより「DOL の解析方法では、ばらつきを踏まえて相関が上がるような手法を
取っている。ただ、影響因子がたくさんあるので、その辺り、現状では結論がつかない
が、なるべく慎重を期すというような形で森林総研では今回提案の形で実施している。」
との説明があった。

河合委員より「初期試験で破壊したときの値から、今、緑色の長期挙動の試験体の破
壊強度というのは、同じマザーボードから取られる 4 枚の平均値ということになるの
か。」という質問があり、森林総研・渋沢研究ディレクターより「全部 16 体の平均値を
平均とみなすような形で応力レベルを算出した。」と説明があった。また「マザーボー
ドの間の差はそれほど大きくはないだろうということか。」との質問に対して「そのよ
うにみなした。」と回答があった。さらに河合委員より「含水率挙動の試験とは、曲げ
試験を 2 体と、強軸方向の圧縮試験を 16 体ということで、それらの含水率を変化させ
て見るということか。含水率挙動の試験の目的と試験法を説明してほしい。」との意見
に対し、北林産試・朝倉研究主幹より「長期試験時の内部含水率のモニタリングの目的
は、内部含水率の安定性はどうなっているのか、安定して試験できているのかというこ
とを直接確認し、試験結果の精度の信頼性を向上させるということである。内部モニタ
リングの手法の検討では、CLT に穴をあけてステンレスの針を押し込み、電気抵抗式の
含水率検査を行う。内部含水率変動の推定では、フィンガー、接着層の水分移動の影響
を検討し、シミュレーションによる水分変動を推定し、試験温湿度変動時の影響を検討
する。」と説明があった。渋沢研究ディレクターより「本年度に実施するのは、試験体
が大きいから、その中の含水率がどのように分布しているかというところの主眼
で、強度性能との関係まではまだ行かない。過去の事業で直交方向の短いラミナが結構
支配的に水分を伝えるということがわかり、今回、9 層 9 プライでどういう傾向になる
かということ、まず入り口で押さえない。」と補足説明があった。

安村委員長より「初期試験の基準の荷種と実際にかけているものが何%になるのか気
になる。CLT 試験体のラミナがどのような分布となっているのか。DOL をかけるときの

たわみと基準時のたわみとの関係がわかるだろうから、その辺のところでミクロの関係はわかるか。」との質問があり、渋沢研究ディレクターより「ラミナ全数のヤング係数の分布は分かるようにする。応力レベルが本当のところはどれだけだったかということに関しては、これは計算だけなので、全数ではなくて各原板ごとで計算するとか、その辺りは後々比較ができるようにしたい。」との回答があった。

榎本委員より「そもそもの強度が分からないことから色々行うが、例えば縦振動で弾性係数を測定した破壊強度と初期試験の16体を結び付けるということは、多分そんなに意味がないと思う。静的曲げの弾性係数と強度の関係から初期強度を予測したらどうなるのかを、7層7プライについて、まず追記してもらった方がよいと思った。短期のたわみは分かっているので、それでも良いので、何かそういうロジックがあり得ないかと思った。上手くいくのであれば初期強度の予測をなるべく正確に行った方が、無駄なデータを減らし、ケース的にも労力的にもよいと思う。」との意見が出された。渋沢研究ディレクターは、「破断時の変形と初期試験のときの破断時の変形は、相関は見られないけれども、概ね平均値どうして見ると、例えば長期の方が早く破断するとか、そういうことはあまりない。長期間試験をする前に、小荷重で少し曲げておくことはしたいが、簡単ではない。最初から目標荷重までかけずに止めて、戻してかけ直せばいいが、トンの単位まではかけないと変形が出ないと思う。今回は実験を実施するに当たって検討する。何か測ると分かるというようにできると良いとは思っている。樹種特性があると、例えば、外層がカラマツだが内層がスギの方がせん断が高めになって強いとか、そういうところも物性値から予測ができるとよい。」と回答した。

試験・解析方法について、資料4（昨年度の報告書の抜粋）にしたがって説明があった。スギの7層7プライCLTでラミナ厚さは平均30mmのもので試験をした。設定応力70、80、90%に対して、それぞれ2%括約で66~74%までが70%というような形で振った。荷重変形関係は、微小な破壊などが生じるので、どうしても変形量は連続的な曲線にはならないが、全体としては回帰ができるような形で増えていくというイメージである。破壊時間と応力比の関係から求めた50年後の数値が67.1%ということで、一応この試験結果でいくと、スギの7層7プライは、50年後の実験値としては67なので、2分の1.1というところで、運用しても問題なかろうと考えている。今回の試験も、前回を踏襲して試験を行いたい。

安村委員長より「破壊時間と応力比の関係で、直線回帰をすると0のところは100%になるか。」と質問があり、渋沢研究ディレクターが「ならない。」と回答した。安村委員長より「破壊性状を見ているのか。」という質問に対して、「破壊をするのが結構瞬間的であって、目の前で壊れてくれているときは見られるが、いつ壊れるか分からないので、全体の雰囲気は捉え切れてはいない。」と渋沢研究ディレクターが回答した。安村委員長より「スタティックの初期試験のときに、せん断で壊れるものはあるか。せん断はローリングシアで生じるので、普通の木材と比べると大分低いはずなので、それがかなり効いてくるような気がする。要するに、最外層のラミナの破壊が支配的で、その中

にある直交層も関係してくる。」との意見があった。「真ん中の層の直交層と外側にある直交層は何か違いがあるような気がする。」と渋沢研究ディレクターが回答した。

青木委員より「壊れなかった試験体の扱いはどうするのか。」との質問があり、渋沢研究ディレクターが「除荷したときに壊れたものとしている。」回答した。

槌本委員より「66%は壊れない可能性が高いのでは。66%から2%と言っているけど、68%から2%取るぐらいの方が良いのでは。」との意見が出された。「66%ではなくて67%で最初にそれをやってみて、昨年度までの考え方と変える」と回答した。

安村委員長より「破壊するときは、基本的にはフィンガージョイントからか。フィンガーが試験体のどの位置にあるかによって破壊形態が大分違ってくる。その辺はコントロールするのか。」との質問に対し、渋沢研究ディレクターが「ランダムである。ラミナには必ずフィンガージョイントが入っている。」と回答した。

槌本委員より「フィンガーの垂直、平行は、ここでは考慮する必要はないと思う。短期試験で差が出ていたのか、ここら辺の知見はあるのか？。あまり無いはずなので気にしなくていいはずだが、気にしなくていいという根拠はちゃんと揃えておいて欲しい」との意見があり、森林総研・宮武研究専門員が「結論とすれば同等ということで進んでいるが、実際はラミナ厚さで影響はあると思う。」と回答した。

安村委員長より「フィンガーの長さは、水平でも垂直でも同じなのか？」と質問があり、「同じく、15mm である。」との回答があった。

(2)その他については特になかった。事業実施者より、今後の検討会の日程として、第2回は初期試験の状況や結果について行う予定であることや可能なら現地検討も実施すると報告があった。試験体の仕様については了解を得た。採材についてもこの形で進めることとした。測定の実施に関しては、指摘事項を踏まえた形で、試験計画の変更案を作成し、外部有識者委員に提示することとした。委員会の最後に、国土交通省住宅局・今田氏より挨拶があった。

5.2 第2回検討委員会

開催日時：令和5年2月20日（月） 17:00～18:30

開催場所：林友ビル会議室

出席者（順不同、敬称略）：

外部有識者委員（対面出席）

委員 尾方 伸次 （（公財）日本合板検査会）

外部有識者委員（web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 秋山 信彦 （国土技術政策総合研究所）

委員 槌本 敬大 （（国研）建築研究所）

オブザーバー（対面出席）

日向 潔美 (林野庁木材産業課木材製品技術室)

福島 純 (林野庁木材産業課木材製品技術室)

オブザーバー (web 出席)

山内 一浩 ((独) 農林水産消費安全技術センター)

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)

今田 多映 (国土交通省住宅局)

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 (対面出席)

井道 裕史、原田 真樹、平松 靖、宮武 敦 (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 (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)

谷口 翼 (銘建工業 (株)) (web 出席)

資料

資料 1 : 委員名簿

資料 2 : 第 1 回検討委員会議事録 (案)

資料 3 : 報告書目次案・1 事業計画

資料 4 : 2_適正製造条件の導出と仕様決定

資料 5 : 3_測定方法の妥当性の検討

資料 6 : 4.1_荷重水準の決定

資料 7 : 4.2_長期挙動データの収集と解析

資料 8 : 4.3_DOL 破壊状況

議事録 : 森林総研・渋沢研究ディレクターの司会により議事が進行された。

1. 第 1 回検討委員会議事録の確認

事務局案が確認され、承認された。

2. 事業結果の概要

(1) 報告書目次案・事業計画

事業実施者の森林総研・宮本室長より、資料 3「報告書目次案・1 事業計画」に従って、報告書目次（案）と本事業の事業計画について説明があった。

(2) 適正製造条件の導出と仕様決定

森林総研・宮本室長より、資料 4「適正製造条件の導出と仕様決定」に従って、試験用 CLT の製造条件と CLT の仕様について説明があった。CLT の製造条件は、スギ Mx60B、9 層 9 プライ、接着剤：水性高分子ーイソシアネート系木材接着剤、塗布量：230g/m²、圧縮時間：40 分、圧縮圧力：接着剤仕様書に基づく、である。ラミナ（厚さ 33×幅 125mm）は、M60B（産地：鳥取県）750 枚、M30B（産地：鳥取県、熊本県、高知県）2,200 枚である。過去の補助事業の試験用 CLT の製造方法と基本的には変わっていないが、プレス機とフィンガーの加工方法が異なっている。

安村委員長より、「M30B を一番使うが、これがなかなかないということか」と質問があり、「今回はそうであった。歩止りには影響するだろう」と回答があった。

(3) 測定方法の妥当性の検討

北林産試・朝倉研究主幹より、資料 5「測定方法の妥当性の検討」に従って、CLT の接着層の透湿抵抗の測定と含水率の挙動シミュレーションの検討および CLT 内部水分含水率の長期モニタリング手法の検討について説明があった。CLT の厚さ方向およびラミナのフィンガージョイント部の透湿抵抗値をカップ法にて測定した結果、接着層の存在によって透湿抵抗は増加した。ラミナ間の接着層を考慮したモデルと無視したモデルの 2 つを設定してシミュレーションした結果、実測値に対する解析値（予測値）の最大相対誤差は小さく、重量変化を概ね再現できた。今回の試験体の形状、吸湿方向及び吸湿時間では接着層が含水率変動に与える影響は内部の局所的な含水率分布の差にとどまり、試験体全体では小さいと考えられる。CLT 内部の含水率を測定するための手法を考案し、小型試験体を用いた予備試験より、測定可能であることを確認した。この手法により、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 の試験体（長期強度試験体の半分の長さ）で測定した結果、1 週間の各層の平均含水率では、中心層（第 5 層）の含水率が低く、表層（第 1 層）は高かった。含水率のモニタリングは引き続き実施中である。

安村委員長より、「試験用 CLT は外層を M60B にして、内層は M30B で製造したもので試験しているのか、幅接ぎはしているか、ラミナの含水率を最初に標準化しているか」と質問があった。「そうである。幅接ぎはしていない。ラミナは、恒温恒湿室で含水率が平衡に達していると判断されてから試験に供した。約 12%である。」と回答した。

(4) 荷重水準の決定

森林総研・井道室長より、資料 6「荷重水準の決定」したがって、FJ ラミナの静的曲げ試験、CLT 短期曲げ試験、等価断面法による推定のそれぞれの結果について説明があ

った。FJ ラミナの静的曲げ試験の結果、見かけのヤング係数、曲げ強度とも、M60B、M30B とも基準値と同程度、下限値も同程度であった。CLT 短期曲げ試験の結果、見かけのヤング係数の平均値が 3.91kN/mm^2 (JAS 基準値 3.2kN/mm^2)、下限値が 3.49kN/mm^2 (JAS 基準値 2.5kN/mm^2) であり、曲げ強度の平均値が 14.4N/mm^2 、下限値が 12.5N/mm^2 (JAS 基準値 7.9N/mm^2) であった。基準強度を算出する方向の等価断面法で曲げ強度を推定した結果、曲げヤング係数は実測値と推定値はほぼ同じ値が得られて推定できたが、曲げ強度では実測値が推定値より高かった。

安村委員長より、「曲げ強度は告示にある下限値か」と質問があり、「平均値で比べている」と回答した。安村委員長より、「等価断面では、最外層のラミナの部分の曲げ強度を入れるのか」と質問があり、「曲げ強度は最外層、曲げヤング係数は外層と内層の両方を入れる」と回答した。安村委員長より、「外層ラミナは引張強度になるが」と質問があり、「引張強度だが、ラミナの曲げ強度のデータを入れた。それでも、実測値のほうが推定値より高かった」と回答した。安村委員長より、「実測値は、端部で出しているのか、推定はどうか」と質問があり、「実測は矩形断面、推定は等価断面である」と回答した。安村委員長より、「フィンガージョイントで壊れたとのことだが、外層のラミナ、下側のラミナのフィンガージョイントか」と質問があり、「ほぼ全部の試験体で下側のラミナのフィンガージョイントで壊れた」と回答した。安村委員長より、「ラミナの幅方向の枚数は何枚か」と質問があり、「3枚入っている」と回答した。安村委員長より、「3枚の強度が違う可能性があるのか」と質問があり、「ある。推定では、M60Bの平均として計算した」と回答した。

(5) 長期挙動データの収集と解析及び DOL 破壊状況

森林総研・宮本室長より、資料7「長期挙動データの収集と解析」に従って、長期挙動 DOL 試験の進捗状況について説明があった。年末に加力を開始し、応力比 86~94%の5体の試験を終えたところである。破壊時間は、116~784,530秒であった。破壊時間と応力比の関係では、5体とデータ数が少ないので明言できないが、マディソンカーブ上にあるもの、それより上のものがあつた。さらに、中央設計・戸田社長より、資料8「DOL 破壊状況」に従って、CLT の破壊状況について説明があった。側面から観察すると水平方向にクラックが入っており、梁下端から観察すると梁下端のフィンガージョイント部分で破断していた。おそらく、フィンガージョイント部分の破断によって梁の有効せいが小さくなり変形が大幅に進み、層内せん断によって最終的に破壊したと考えられる。いずれの応力比でもこのような破壊が見られた。

安村委員長より、「応力比は、狙ったものか、何かの都合でこのようになったのか。サイドマッチングしているのか。応力比の値は、85%とか90%とか、狙ったものか、たまたまこうなったのか」と質問があり、渋沢研究ディレクターが「応力比は、16体の静的曲げ試験の最大荷重の平均値に対する載荷重の比である。サイドマッチングはしている。66%~94%で、2%括約で各応力レベル2体ずつという研究計画で狙った値である。しかし、

掛ける荷重の精度により、86%を狙っても 86.0%とならず 85.9%となってしまうのが実際の応力比である」と回答した。安村委員長より、「2%というのは、この 5 体が 2%なのか、1 体ずつが 2%なのか」と質問があり、渋沢研究ディレクターが「設定する応力比を 2%刻みにしている。これを繰り返して最終的に各応力比は 2 体ずつになるようにする予定である」と回答した。槌本委員より「1 分 56 秒というのは、静止した状態があったか」と質問があり、宮本室長が「資料の経時変化のとおりで、ピタッと止まったかという微妙である。見極めがつかないまま壊れたイメージである」と回答があった。渋沢研究ディレクターより「加力して荷重が上がっているときはカウントしておらず、梃子が平衡になった、つまり、設定荷重と実際に掛かっている荷重がほぼ同じになったところから時間をカウントし始めているので、その段階ではいったん止まったはずである。1 分幾らで壊れているのは、完全に静止せず、1 回釣り合ったところから変形が進んで壊れているというのは事実である」と補足説明があった。槌本委員より「測定時間と変形量のグラフは、平衡になった以降でなく、測定開始からのグラフか」と質問があり、「荷重用の数値が 0 から動き始めたところからカウントしており、初期の荷重がかかっているところも入っている。グラフの 0 は破壊荷重到達後の時間の 0 ではない」と渋沢研究ディレクターが回答した。槌本委員より「グラフが不連続になっている理由は何か」と質問があり、宮本室長が「最初に幅方向 3 枚のうちのどこかのフィンガーが外れて、その後少し荷重は下がるが、もっているものはもう一回加力したので、その時に少し変形が進んだイメージである。一部破壊している」と回答した。安村委員長より、「最初の静的実験をしたときの最大応力に達するまでどれぐらい時間がかかっているか」と質問があり、井道室長が「平均で 5 分くらい」と回答した。渋沢研究ディレクターが「まだ 5 体なので断言できないが、9 層のデータの散らばりは、7 層のデータの散らばりの上に今のところあると思われ、そこが 7 層と 9 層の差かもしれない」と補足した。槌本委員が「繊維の平行層の割合が 7 プライと比べて 9 プライでは減るのでは。そうすると DOL は低下するのでは。短期強度が出ていてもフィンガーが弱いと DOL は出ない。繊維が繋がっていることが DOL 性能を高める、係数を上げるという過去の経験から 9 層 9 プライは下がるはずだと思う。上がると今までの経験が生きなくなるが、下がっても 0.55 を超えて欲しいという望みがある」と意見を述べた。河合委員より「資料 7 の 2 ページ目のグラフの凡例で、試験体中央と加力点下平均が逆になっていないか」と質問があり、宮本室長より「ミスかもしれない。確認して後ほど連絡する」と回答し、了承された。

3. その他

宮本室長より、報告書案を 3 月中旬までにまとめて委員に回覧すること、本事業について 3 月 9 日の CLT 協会主催の保持事業報告会で報告すること、次年度の林野庁補助事業に本事業の継続事業を応募予定であり、委員には引き続き委員をお願いしたいことについて報告があった。

最後に、林野庁木材産業課木材製品技術室・日向課長補佐より挨拶があった。

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、他の層構成の CLT と同様の算出方法で許容応力度を設定して良いか検討するため、長期挙動データの収集に着手した。以下、得られた成果と残された課題について総括する。

CLT の適正製造条件について検討したところ、これまでに測定に供試した 5 層 5 プライ、7 層 7 プライの試験体仕様とラミナ幅とフィンガージョイント仕様のみが異なる試験体仕様とすることができた。製造した試験体は他の検討項目に供試した。なお、製造上の制限から試験体長さは $23t$ (t : 厚さ) ではなく $22.2t$ となっているが大きな影響はないものと考えられる。ただし、M30B 等級のラミナの集材は歩止まりの関係で難しく、将来の製品供給時には要検討である。また、フィンガージョイント仕様の違いが製品性能に影響を与えるかについても次年度以降検討する必要がある。

CLT の長期変形挙動の関する測定方法の妥当性について検討した。試験体性能に大きな影響を与える因子である試験体含水率が非平衡状態にあるが 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、その把握が必要であることがわかった。そこで、CLT 接着層の透湿抵抗を測定するとともにシミュレーションにより含水率挙動の予測手法の検証を行った。また、CLT 内部の含水率を長期測定する手法を考案し、実証実験に着手した。その結果、積層接着層が存在すると透湿抵抗は約 2.7 倍、フィンガージョイント部が存在すると透湿抵抗は約 1.4 倍となり、接着層が透湿抵抗に大きな影響を与えることがわかった。有限差分法を用いた 2 次元シミュレーション手法により概ね妥当な予測値を得られた。CLT の内部含水率の長期測定手法として電気抵抗式の含水率測定装置を用いたシステムを考案し、測定に着手した。安定的測定を実現するためには更に検討が必要である。

長期挙動データ導出のための荷重水準の決定のため、ラミナのフラットワイズ曲げ試験および CLT の短期曲げ試験を実施した。ラミナの曲げ性能については、CLT の曲げ性能の推定値の算出に用いた。CLT の曲げヤング係数の実測値は推定値より低く、曲げ強度の実測値は推定値より高くなった。この結果についてはさらに検討を要するが、今回供試した CLT は密度が低いことが特徴的である。

上記の各項目を踏まえ、曲げ荷重下における長期挙動データの収集に着手した。応力レベルとして破壊荷重の 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、本事業では応力レベル 86~94% 各 1 体、計 5 体の試験体について加力を実施した。本項目についても次年度以降の継続を要する。各試験体の破断性状については、引張側最外層のフィンガージョイント部の破壊が最初の破断検出となっており、フィンガージョイント部が破断制御の役割を果たしていた。他の応力レベルを含め、今後の測定結果について検討することでさらなる知見が得られるものと考えられる。なお、本事業成果については外部有識者委員会において了承を得ている。ここに衷心より謝意を表する。

7. 付録

7.1 ラミナの集材状況

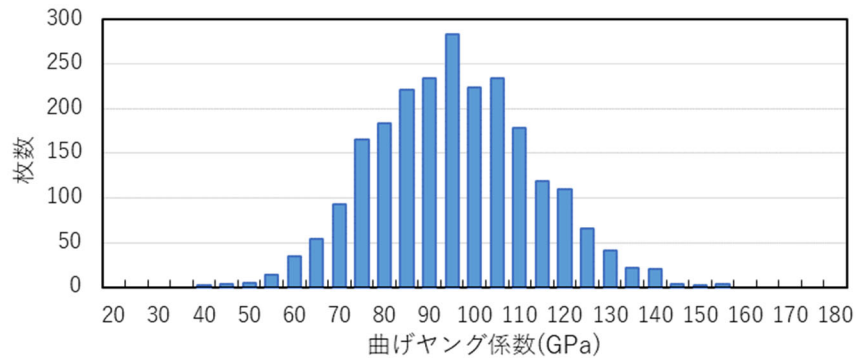


図 7-1-1 M60B ラミナ母集団における曲げヤング係数の分布

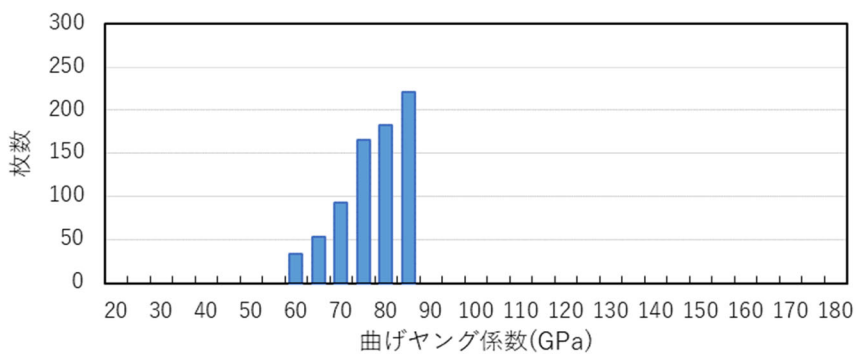


図 7-1-2 CLT 試験体製造に使用した M60B ラミナの曲げヤング係数の分布

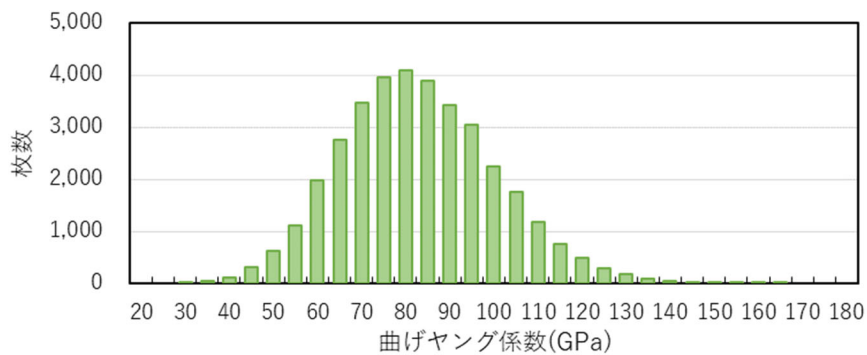


図 7-1-3 M30B ラミナ母集団における曲げヤング係数の分布

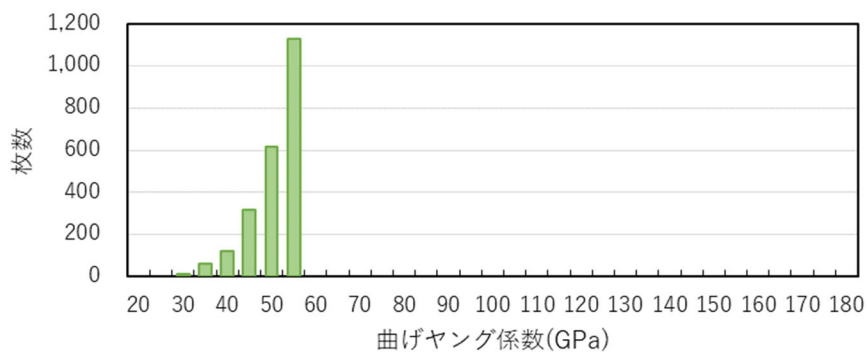
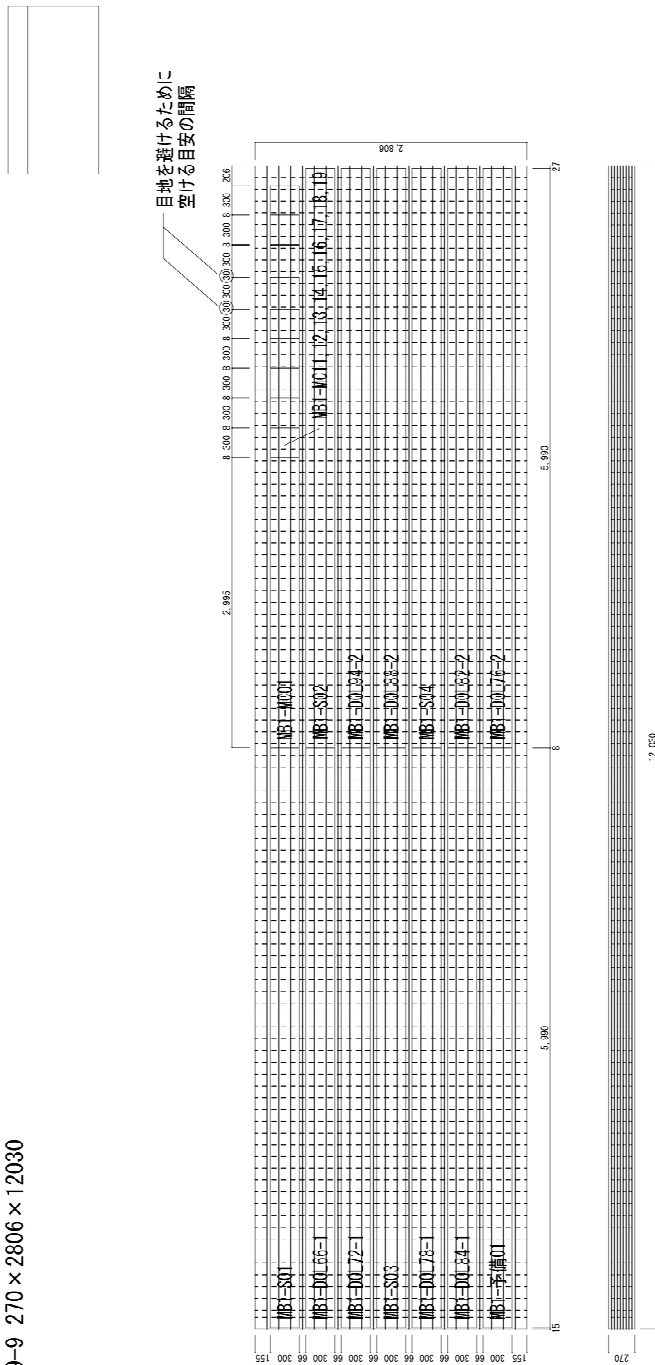


図 7-1-2 CLT 試験体製造に使用した M30B ラミナの曲げヤング係数の分布

7.2 試験体採材図

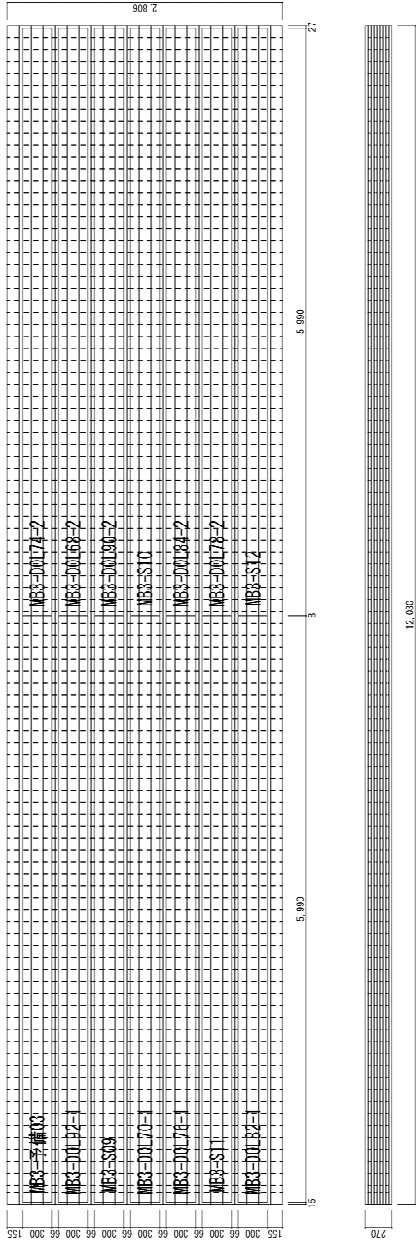
4-22-03-289 R4_CLT長期デ一タ収集
スズ Mx60B 9-9 270×2806×12030
試験体木取図



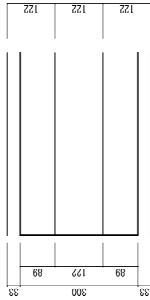
※試験体採材時の幅方向の目地指定(目安)

件名	R4_GIT長期データ収集試験体	No. 1 / 4
図面名称	試験体木取り図	
2022. 08. 09		

4-22-03-289 R4_CLT長期データ収集 試験体木取図
スギ Mx60B 9-9 270×2806×12030



※試験体採材時の幅方向の目地指定(目安)



件名	R4_CLT長期データ収集試験体	No. 3 / 4
図面名称	試験体木取図	
2022. 08. 09		

7.3 長期挙動試験における試験体の破断状況

(1) 応力比 86%



写真 7-3-1 DOL-86-1 破壊状況



写真 7-3-2 DOL-86-1 梁下端フィンガージョイント部破断①



写真 7-3-3 DOL-86-1 梁下端フィンガージョイント部破断②

(2) 応力比 88%



写真 7-3-4 DOL-88-1 破壊状況



写真 7-3-5 DOL-88-1 梁下端フィンガージョイント部破断①



写真 7-3-6 DOL-88-1 梁下端フィンガージョイント部破断②

(3) 応力比 90%



写真 7-3-7 DOL-90-1 破壊状況



写真 7-3-8 DOL-90-1 梁下端フィンガージョイント部破断①



写真 7-3-9 DOL-90-1 梁下端フィンガージョイント部破断②

(4) 応力比 92%



写真 7-3-10 DOL-92-1 破壊状況



写真 7-3-11 DOL-92-1 梁下端フィンガージョイント部破断①



写真 7-3-12 DOL-92-1 フィンガージョイント部破断②