

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7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 6 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 の曲げ性能に影響を及ぼす製造因子の検証.....	5
2.1	ラミナの集材および製造試験.....	5
2.2	CLT の曲げ性能に影響を及ぼす因子.....	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.....	19
3.1	目的.....	19
3.2	CLT 試験体の内部含水率シミュレーション.....	19
3.3	ラミナ間に隙間が連続する場合の 2 次元吸湿シミュレーション.....	22
3.4	内部含水率の長期モニタリング装置の概要.....	25
3.5	プローブ打ち込み深さが測定値に与える影響の検討.....	28
3.6	含水率計測定値の検証.....	30
3.7	長期荷重試験室内の含水率試験体の内部含水率変動の検討.....	37
3.8	絶縁抵抗計による多点含水率測定器の開発.....	41
3.9	CLT におけるヤング率の含水率依存性に関する評価方法.....	43
3.10	まとめ.....	48
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.....	49
4.1	CLT の短期曲げ試験 (R4 報告書再掲修正版).....	49
4.2	曲げ荷重下における長期挙動データの収集と解析.....	53
4.3	試験体の破断状況.....	59
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.....	61
5.	進行状況の管理.....	65
5.1	第 1 回検討委員会.....	65
5.2	現地検討会.....	74

5.3	第2回検討委員会.....	76
6.	事業成果の総括と残された課題.....	88
7.	付録(過年度報告書の再掲、採材図、実験写真等).....	89

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、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並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項目の事業を実施し、建物の設計に使用可能な特性値を導出する。

①CLTの曲げ性能に影響を及ぼす製造因子の検証

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抽出し、9層9プライ構成のCLTの曲げ性能試験によって検証する。

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及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

一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、共同提案者により共有・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

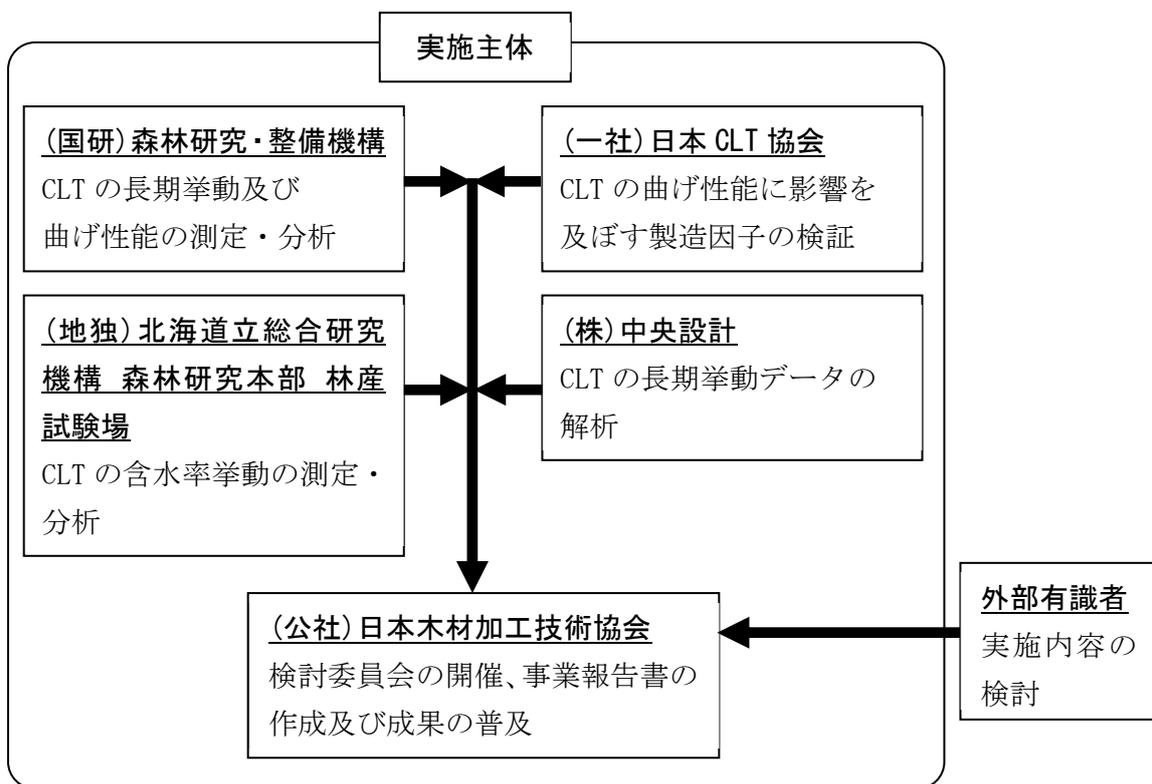
いて検討する。

⑤委員会開催・運営及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となる実験内容（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・議事録の作成及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 事業実施計画

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]	秋山 信彦	(国研)建築研究所
[委員]	荒木 康弘	国土技術政策総合研究所
[委員]	小関 真琴	木質建材評価サービス
[オブザーバー]	杉原 伸一	国土交通省住宅局課長補佐
[オブザーバー]	吉田 優一朗	国土交通省住宅局参事官（建築企画担当）付
[オブザーバー]	佐藤 秀憲	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]	上田 萌香	林野庁 木材産業課木材製品技術室
[オブザーバー]	中田 直	(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、河野幸喜
須藤竜大朗（～9月）

(一社) 日本 CLT 協会
西妻博康、坂部芳平、原周平

(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、高山光子、須賀雅人、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の曲げ性能に影響を及ぼす製造因子の検証

2.1 ラミナの集材および製造試験

Mx90のCLTを製造する場合、外層のM90ラミナにはヒノキなどスギよりも曲げヤング係数の高いラミナが通常使用されてきた。しかしながら本事業におけるこれまでの検証の結果、スギラミナにおいても一定の割合でM90ラミナが採材できることが明らかとなってきた。また、異等級構成CLTの内層にはM30のラミナが使用されるが、ラミナのヤング係数分布の都合上、内層にM60相当のラミナが使用されることもある。

そこで今年度は外層にスギラミナM90BあるいはヒノキラミナM90Bを用いてMx90のCLTを製造し、同等級における樹種の違いがCLTの曲げ強度性能に及ぼす影響を検討した。また、内層にスギM60BあるいはM30Bを用いてMx120、Mx90のCLTを製造し、内層のヤング係数の違いがCLTの曲げ強度性能に及ぼす影響を検討した。

スギM30B、スギM60B、スギM90B、ヒノキM90B、ヒノキM120Bのラミナを集材した。ラミナの集材地域は、スギは熊本県、岡山県、高知県、ヒノキは熊本県、高知県であった。本事業で集材したラミナについて、母集団と実際に使用したスギラミナおよびヒノキラミナの曲げヤング係数の分布図を図2-1-1～3に示す。図2-1-3には、直交集成板の日本農林規格（以下、CLTのJAS）のB種構成に用いるラミナのヤング係数の範囲を記載した。図2-1-3を見ると、スギM30Bは基準の範囲内の曲げヤング係数をいずれも使用しているものの、曲げヤング係数が高い範囲の比率が大きい。スギM60Bでは基準の範囲の低い側は使用されず、中程度～高い側が使用され、その比率は概ね一定であった。M90Bはスギラミナ、ヒノキラミナとも、低い側のラミナはさらに使用されず、中程度～高い側の比率はヒノキラミナの方がやや高い側に分布していた。ヒノキM120ではその傾向がさらに強まるが、比率としては中程度が最も大きくなっていた。

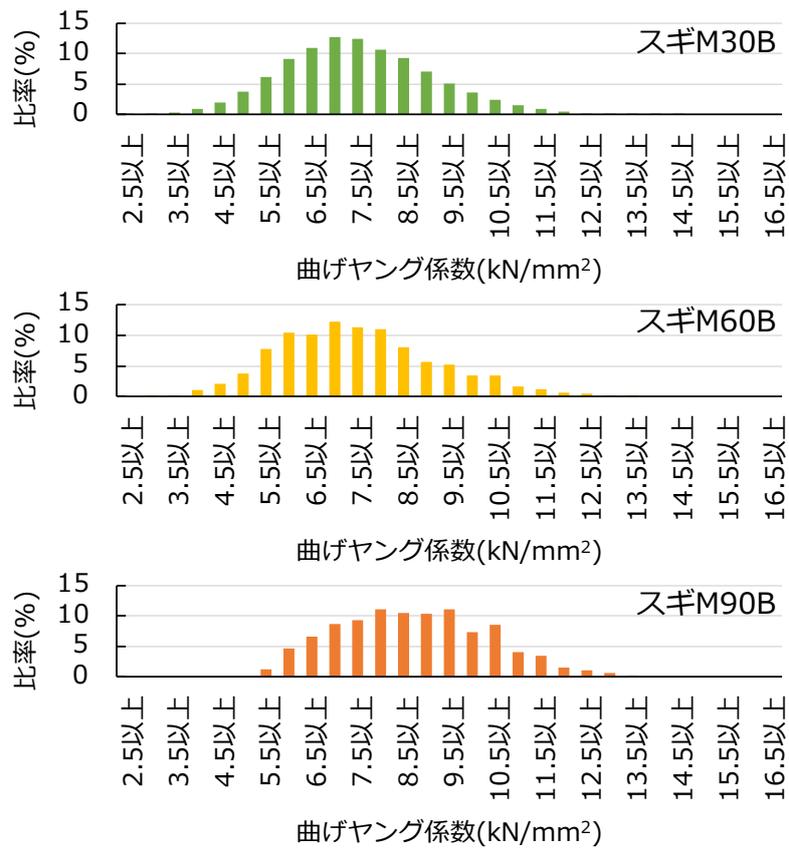


図 2-1-1 スギラミナ母集団における曲げヤング係数の分布

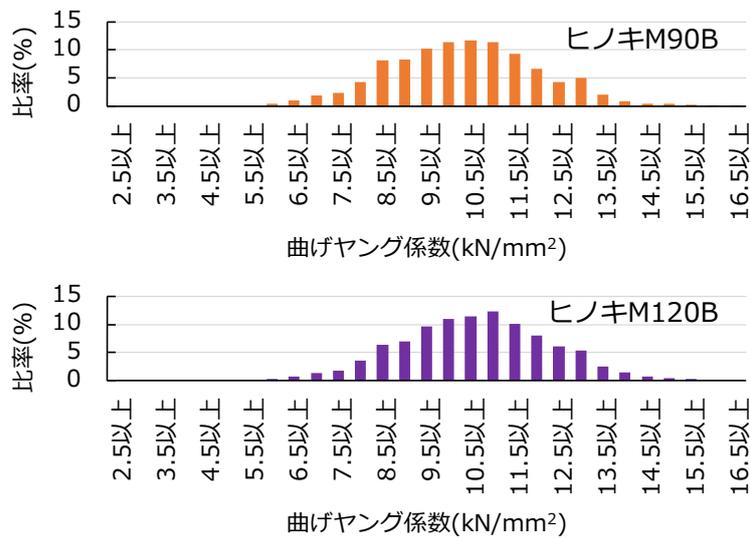


図 2-1-2 ヒノキラミナ母集団における曲げヤング係数の分布

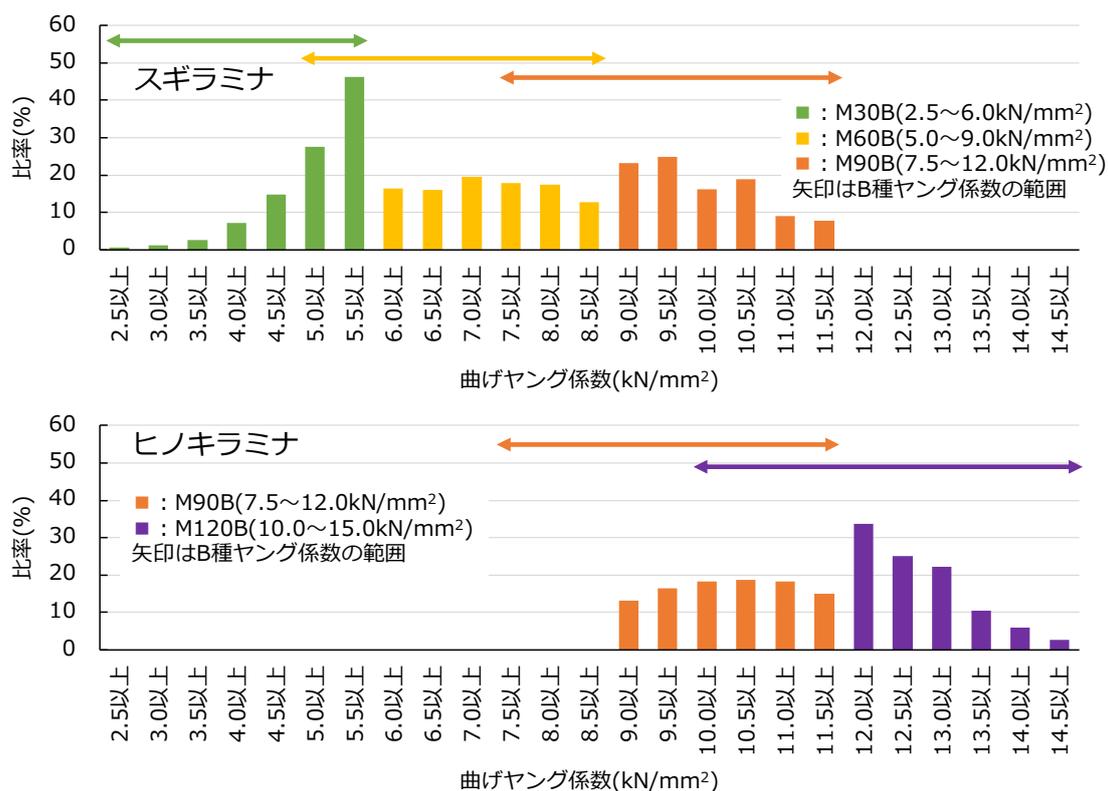


図 2-1-3 CLT 試験体製造およびラミナ試験体に使用したラミナの曲げヤング係数の分布

2.2 CLT の曲げ性能に影響を及ぼす因子

2.2.1 フィンガージョイントラミナの曲げ試験

図 2-1-3 に記載した分布からラミナの曲げ試験体を採取した。等級はスギ M30B、スギ M60B、スギ M90B、ヒノキ M90B、ヒノキ M120B である。寸法は長さ 750mm×幅 122mm×厚さ 30mm であり、長さの中央に水平フィンガージョイントを施してある。試験体数は各グループとも 30 体である。曲げ試験に先立って縦振動法によるヤング係数を測定した。その後、CLT の JAS のラミナの曲げ C 試験に従い、フラットワイズ方向の曲げ試験を行った。試験体長さ中央部に留めつけたアングルに変位計（東京測器研究所製 CDP-50）を設置して全たわみを測定した。荷重とたわみの関係から見かけの曲げヤング係数を求めるとともに、比例限度応力、曲げ強度を算出した。また、順位法により曲げ強度の 75%信頼水準における 5%下限値を算出した。試験の様子と破壊形態の例を図 2-2-1～2 に示す。曲げ試験終了後、フィンガージョイントの両側の破壊していない部分から長さが約 20mm の含水率測定用試験体を 2 体採取し、全乾法により含水率を測定した。含水率は 2 体の含水率測定用試験体の平均値とした。曲げ試験結果の概要を表 2-2-1 に示す。

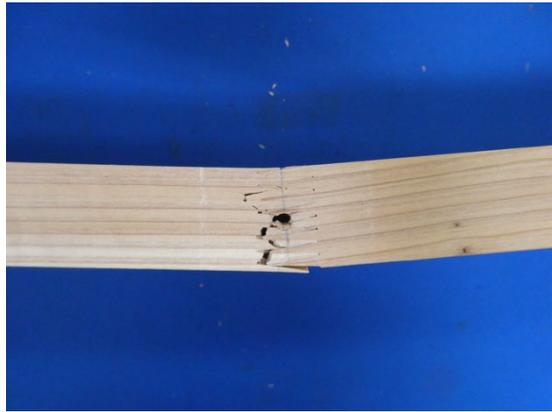
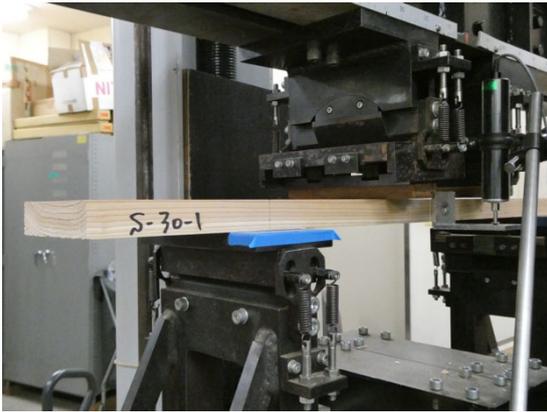


図 2-2-1 スギ M30B の曲げ試験の様子と破壊形態



図 2-2-2 ヒノキ M120B の曲げ試験の様子と破壊形態

表 2-2-1 フィンガージョイントラミナの曲げ試験結果の概要

樹種	等級		密度	縦振動法の ヤング係数	含水率	見かけの曲げ ヤング係数	比例限度 応力	曲げ強度	曲げ強度 5%下限値 (順位法)
			(kg/m ³)	(kN/mm ²)	(%)	(kN/mm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)
ヒノキ	M120B	試験体数	30	30	30	30	30	30	53.3
		平均値	488	14.5	10.8	13.8	48.6	61.1	
		最小値	452	13.1	9.85	11.6	32.6	53.3	
		最大値	563	16.6	12.1	15.6	61.7	74.0	
		標準偏差	28.2	0.817	0.631	0.848	8.14	4.61	
		変動係数(%)	5.78	5.63	5.85	6.12	16.8	7.54	
ヒノキ	M90B	試験体数	30	30	30	30	30	30	34.7
		平均値	494	12.0	12.4	11.4	33.0	47.7	
		最小値	449	9.78	11.2	9.27	16.2	34.3	
		最大値	560	13.9	14.0	13.2	47.3	64.7	
		標準偏差	26.2	1.04	0.618	1.03	8.11	7.93	
		変動係数(%)	5.30	8.67	5.00	9.05	24.5	16.6	
スギ	M90B	試験体数	30	30	30	30	30	30	31.6
		平均値	415	11.4	9.60	10.6	36.3	40.8	
		最小値	371	9.33	8.73	8.38	19.8	31.4	
		最大値	471	13.8	10.7	12.6	48.4	50.2	
		標準偏差	30.9	1.14	0.569	1.01	6.62	4.77	
		変動係数(%)	7.46	9.94	5.93	9.58	18.2	11.7	
スギ	M60B	試験体数	30	30	30	30	30	30	23.3
		平均値	401	8.41	9.67	7.94	29.1	33.5	
		最小値	342	7.07	8.39	6.58	18.1	23.1	
		最大値	446	10.1	11.3	9.22	37.3	41.6	
		標準偏差	24.2	0.813	0.817	0.780	4.72	4.47	
		変動係数(%)	6.03	9.67	8.45	9.83	16.2	13.4	
スギ	M30B	試験体数	30	30	30	30	30	30	28.0
		平均値	441	8.06	11.2	7.57	32.4	38.7	
		最小値	360	6.03	10.2	5.73	17.2	27.8	
		最大値	520	10.5	12.2	10.4	43.9	52.8	
		標準偏差	37.3	1.11	0.507	1.11	6.35	5.61	
		変動係数(%)	8.46	13.7	4.54	14.7	19.6	14.5	

各グループにおいて、密度、縦振動法によるヤング係数、見かけの曲げヤング係数、曲げ強度の箱ひげ図を図 2-2-3 に示す。

密度の平均値について、ヒノキ M120B とヒノキ M90B は同程度であったが、スギでは M30B が最も高かった。スギの丸太内横断面分布では髓付近でヤング係数が低く密度が高い傾向にあるが、スギ M30B にはその部分が多く含まれていたことが推察された。縦振動法のヤング係数と見かけの曲げヤング係数について、ヒノキラミナ、スギラミナともに等級が高くなるに従って平均値が大きくなる傾向にあった。ただし、スギ M60B とスギ M30B の差は大きくはなかった。また、ヒノキ M90B とスギ M90B ではヒノキ M90B の方がヤング係数の平均値が危険率 5% で有意に高かった。図 2-2-3 ではヒノキ M90B の分布がスギ M90B の分布よりも高い範囲の比率が大きいが、このことが影響した可能性がある。曲げ強度の平均値と 5% 下限値について、ヒノキラミナでは M120B の方が M90B

よりも高かった。一方、スギラミナでは高い順に、M90B>M30B>M60B となり、M30B と M60B の曲げ強度が逆転していた。これについて図 2-2-4 にすべての試験体の曲げ強度に対する密度と見かけの曲げヤング係数の関係を示す。見かけの曲げヤング係数だけでなく、特にスギラミナにおいて密度が大きいほど曲げ強度が大きい傾向にある。そのため、スギ M30B ラミナはスギラミナの中で密度が高かったことが、曲げ強度に影響したと考えられる。また、また、ヒノキ M90B とスギ M90B ではヒノキ M90B の方が曲げ強度の平均値が危険率 5%で有意に高かった。

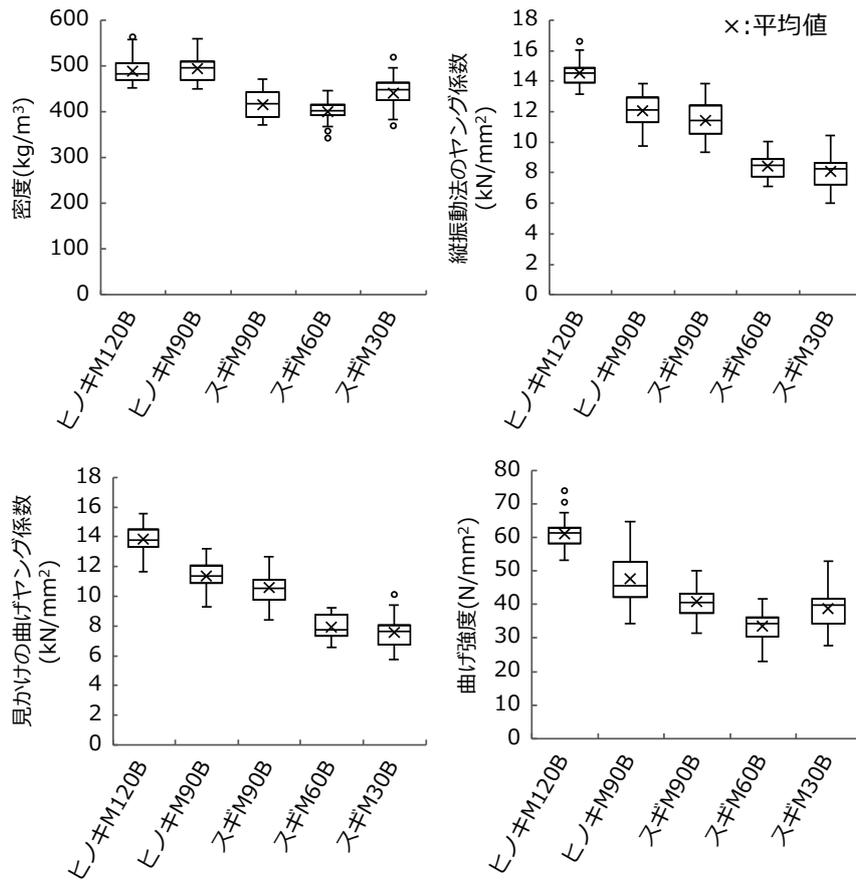


図 2-2-3 各グループの物性値

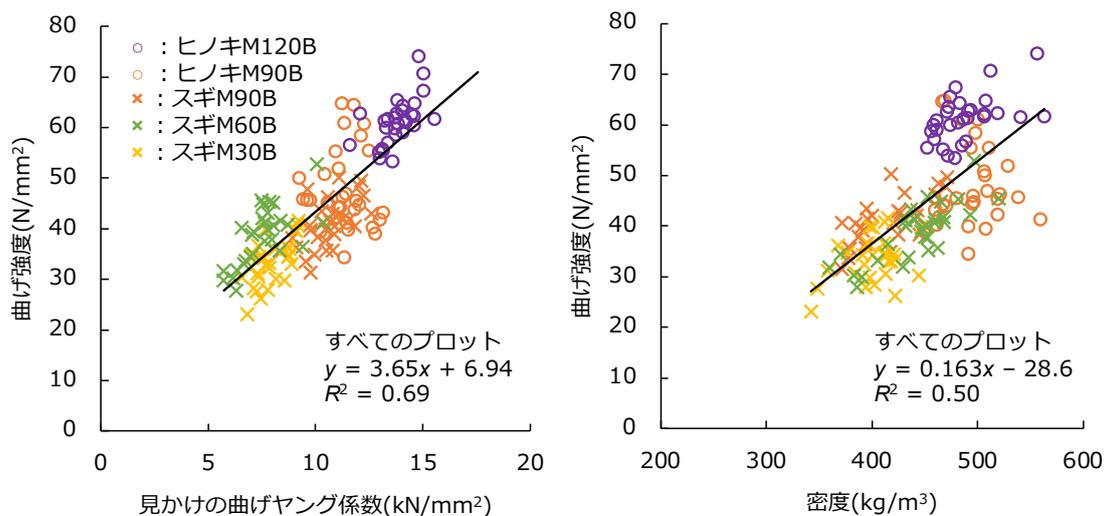


図 2-2-4 曲げ強度に対する見かけの曲げヤング係数と密度の関係

2.2.2 CLT の曲げ試験

CLT の曲げ試験体の構成、外層ラミナと内層ラミナの等級、寸法、試験体数を表 2-2-2 に示す。構成は 9 層 9 プライ、5 層 5 プライ、3 層 3 プライとし、外層はすべて強軸方向である。曲げ試験体の採材図は付録に示す。

表 2-2-2 CLT の曲げ試験体の構成、ラミナの等級、寸法、試験体数

通しNo.	構成	外層ラミナ	内層ラミナ	厚さ×幅×長さmm	試験体数
MB1	9層9プライ強軸	スギM90B	スギM30B	270×300×5990	8
MB2	9層9プライ強軸	ヒノキM90B	スギM30B	270×300×5990	8
MB3	5層5プライ強軸	スギM90B	スギM60B	150×300×3450	6
MB4	5層5プライ強軸	スギM90B	スギM30B	150×300×3450	6
MB5	5層5プライ強軸	ヒノキM90B	スギM60B	150×300×3450	6
MB6	5層5プライ強軸	ヒノキM90B	スギM30B	150×300×3450	6
MB7	5層5プライ強軸	ヒノキM120B	スギM60B	150×300×3450	6
MB8	5層5プライ強軸	ヒノキM120B	スギM30B	150×300×3450	6
MB9	3層3プライ強軸	スギM90B	スギM60B	90×300×2070	12
MB10	3層3プライ強軸	スギM90B	スギM30B	90×300×2070	12
MB11	3層3プライ強軸	ヒノキM90B	スギM60B	90×300×2070	12
MB12	3層3プライ強軸	ヒノキM90B	スギM30B	90×300×2070	12
MB13	3層3プライ強軸	ヒノキM120B	スギM60B	90×300×2070	12
MB14	3層3プライ強軸	ヒノキM120B	スギM30B	90×300×2070	12

曲げ試験に先立ち、縦振動法のヤング係数、面外方向の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測定した。その後、CLT の JAS の曲げ試験方法に従って、スパンを材せいの 21 倍とした 3 等分点 4 点荷重とした面外方向の曲げ試験を行った。9 層 9 プライの曲げ試験の模式図を図 2-2-5 に示すとともに試験

の様子を図 2-2-6 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 9 層 9 プライ、5 層 5 プライ、3 層 3 プライでそれぞれ 17mm/min、12mm/min、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 SDP-200D）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。

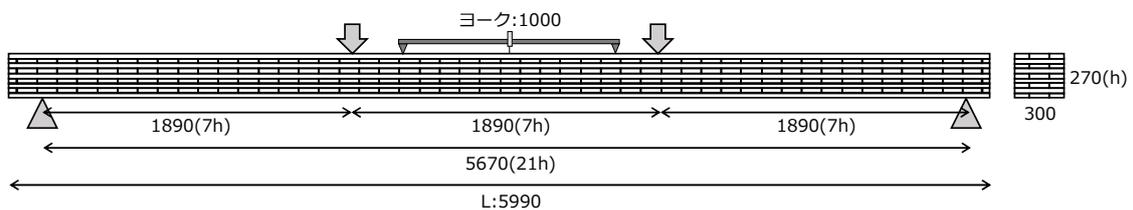


図 2-2-5 9 層 9 プライの曲げ試験の模式図



図 2-2-6 9 層 9 プライの曲げ試験の様子

非破壊試験および曲げ試験の結果の概要を表 2-2-3 に示す。また、破壊の様子を図 2-2-7～20 に示すとともに曲げ破壊数、せん断破壊数、せん断と曲げが混合した破壊数を表 2-2-4 に示す。MB1～6, 9～10 は荷重点内のフィンガージョイントあるいは節で破壊するものが大部分であったが MB7, 8 (5 層 5 プライで外層がヒノキ M120B の試験体), 11, 12, 13, 14 (3 層 3 プライで外層がヒノキ M120B またはヒノキ M90B の試験体) の半数以上がせん断破壊した。せん断破壊したものについても最大荷重から曲げ強度を求めた。

表 2-2-3 非破壊試験および曲げ試験結果の概要

グループ	No.	密度 (kg/m ³)	含水率 (%)	縦振動法の	曲げたわみ	TGH法の	TGH法の	見かけの	真の曲げ	曲げ強度 (N/mm ²)	
				ヤング係数 (kN/mm ²)	振動法の ヤング係数 (kN/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	せん断 弾性係数 (kN/mm ²)	曲げ ヤング係数 (kN/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)		
MB1	試験体数	8	8	8	8	8	8	8	8	8	
	構成:9L9P	平均値	390	11.3	4.98	6.68	7.21	0.27	6.68	7.48	17.0
	外層:スギM90B	最小値	386	11.0	4.90	6.38	7.06	0.26	6.44	7.12	14.7
	内層:スギM30B	最大値	396	11.7	5.16	6.95	7.54	0.28	7.06	8.08	18.7
		標準偏差	4.1	0.2	0.08	0.18	0.16	0.01	0.24	0.37	1.2
		変動係数(%)	1.0	2.0	1.70	2.71	2.26	3.60	3.64	4.97	6.8
MB2	試験体数	8	8	8	8	8	8	8	8	8	
	構成:9L9P	平均値	424	11.3	4.78	6.56	7.10	0.26	6.33	7.19	24.9
	外層:ヒノキM90B	最小値	416	10.8	4.63	6.43	6.97	0.25	5.91	6.78	20.2
	内層:スギM30B	最大値	433	11.7	4.91	6.72	7.23	0.27	6.53	7.53	28.1
		標準偏差	6.1	0.3	0.09	0.10	0.08	0.00	0.22	0.23	2.8
		変動係数(%)	1.4	2.5	1.91	1.53	1.11	1.46	3.52	3.26	11.5
MB3	試験体数	6	6	6	6	6	6	6	6	6	
	構成:5L5P	平均値	406	10.7	6.50	8.35	9.03	0.27	8.28	9.96	25.7
	外層:スギM90B	最小値	402	10.4	6.27	7.99	8.54	0.26	7.95	9.39	23.1
	内層:スギM60B	最大値	412	11.0	6.76	8.74	9.48	0.27	8.71	10.79	28.0
		標準偏差	4.1	0.3	0.19	0.33	0.37	0.01	0.31	0.60	1.8
		変動係数(%)	1.0	2.4	2.90	3.95	4.11	2.43	3.75	5.98	7.1
MB4	試験体数	6	6	6	6	6	6	6	6	6	
	構成:5L5P	平均値	393	11.1	6.23	8.51	9.14	0.26	8.33	10.03	27.8
	外層:スギM90B	最小値	387	10.9	5.94	8.07	8.68	0.26	8.10	9.44	24.2
	内層:スギM30B	最大値	400	11.4	6.48	9.05	9.67	0.27	8.71	10.77	32.2
		標準偏差	5.1	0.2	0.21	0.35	0.32	0.01	0.24	0.50	3.0
		変動係数(%)	1.3	1.5	3.42	4.07	3.56	2.15	2.89	5.03	10.7
MB5	試験体数	6	6	6	6	6	6	6	6	6	
	構成:5L5P	平均値	463	11.8	6.80	8.90	9.56	0.29	8.80	10.10	36.3
	外層:ヒノキM90B	最小値	446	11.4	6.41	8.51	9.28	0.28	8.57	9.83	34.7
	内層:スギM60B	最大値	478	12.1	7.13	9.41	10.14	0.30	9.14	10.73	38.8
		標準偏差	13.0	0.3	0.26	0.30	0.31	0.01	0.19	0.32	1.6
		変動係数(%)	2.8	2.4	3.80	3.35	3.25	2.85	2.18	3.22	4.4
MB6	試験体数	6	6	6	6	6	6	6	6	6	
	構成:5L5P	平均値	436	12.3	6.08	8.58	9.29	0.26	8.45	9.98	35.3
	外層:ヒノキM90B	最小値	425	12.0	5.86	8.13	8.72	0.25	7.96	9.67	30.4
	内層:スギM30B	最大値	441	12.8	6.27	8.88	9.66	0.26	8.65	10.26	40.7
		標準偏差	5.6	0.3	0.15	0.25	0.31	0.00	0.26	0.20	4.3
		変動係数(%)	1.3	2.6	2.40	2.93	3.34	1.48	3.04	1.98	12.1
MB7	試験体数	6	6	6	6	6	6	6	6	6	
	構成:5L5P	平均値	477	11.5	7.68	10.52	11.48	0.30	10.26	12.01	41.6
	外層:ヒノキM120B	最小値	462	11.2	7.35	10.18	11.16	0.29	9.94	11.58	34.3
	内層:スギM60B	最大値	488	12.1	7.90	10.83	11.70	0.30	10.59	12.52	46.5
		標準偏差	8.7	0.3	0.22	0.29	0.24	0.01	0.27	0.36	4.7
		変動係数(%)	1.8	3.0	2.88	2.76	2.07	2.10	2.66	3.02	11.2
MB8	試験体数	6	6	6	6	6	6	6	6	6	
	構成:5L5P	平均値	445	11.7	7.27	10.24	11.31	0.26	10.08	12.20	36.4
	外層:ヒノキM120B	最小値	438	11.2	7.10	10.15	11.22	0.26	9.76	12.06	32.2
	内層:スギM30B	最大値	456	12.3	7.51	10.37	11.44	0.28	10.28	12.55	41.1
		標準偏差	6.3	0.4	0.15	0.08	0.08	0.01	0.19	0.19	4.2
		変動係数(%)	1.4	3.5	2.07	0.82	0.75	2.53	1.93	1.57	11.6

表 2-2-3 非破壊試験および曲げ試験結果の概要 (続き)

グループ	No.	密度	含水率	縦振動法の ヤング係数	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	見かけの 曲げ ヤング係数	真の曲げ ヤング係数	曲げ強度
		(kg/m ³)	(%)	(kN/mm ²)	(kN/mm ²)	(kN/mm ²)	(kN/mm ²)	(kN/mm ²)	(kN/mm ²)	(N/mm ²)
MB9	試験体数	12	12	12	12	12	12	12	12	12
構成:3L3P	平均値	407	10.5	7.65	9.91	10.60	0.27	9.60	11.64	30.1
外層:スギM90B	最小値	395	10.2	7.23	9.58	10.17	0.23	9.14	10.77	26.5
内層:スギM60B	最大値	428	11.2	7.99	10.20	11.11	0.32	9.96	11.96	39.4
	標準偏差	10.5	0.3	0.22	0.21	0.33	0.03	0.23	0.41	3.3
	変動係数(%)	2.6	2.9	2.90	2.12	3.12	10.24	2.41	3.50	11.1
MB10	試験体数	12	12	12	12	12	12	12	12	12
構成:3L3P	平均値	414	10.5	7.94	10.24	11.13	0.27	9.90	12.26	32.0
外層:スギM90B	最小値	407	9.9	7.38	9.87	10.60	0.26	9.40	11.26	24.0
内層:スギM30B	最大値	431	11.1	8.61	10.88	12.13	0.31	10.46	13.97	40.0
	標準偏差	7.1	0.3	0.33	0.30	0.42	0.02	0.35	0.72	6.0
	変動係数(%)	1.7	2.9	4.17	2.90	3.77	6.35	3.50	5.84	18.8
MB11	試験体数	12	12	12	12	12	12	12	12	12
構成:3L3P	平均値	502	11.7	7.94	9.95	10.48	0.31	9.88	11.56	45.2
外層:ヒノキM90B	最小値	489	11.0	7.52	9.18	9.32	0.28	9.21	10.47	33.1
内層:スギM60B	最大値	514	12.7	8.35	10.37	11.13	0.37	10.54	12.51	53.8
	標準偏差	8.0	0.5	0.29	0.42	0.60	0.03	0.43	0.67	6.1
	変動係数(%)	1.6	4.1	3.69	4.24	5.70	8.67	4.33	5.83	13.6
MB12	試験体数	12	12	12	12	12	12	12	12	12
構成:3L3P	平均値	481	12.4	7.99	9.84	10.57	0.29	9.69	11.56	44.1
外層:ヒノキM90B	最小値	473	11.9	7.67	9.08	9.89	0.24	8.95	10.17	32.8
内層:スギM30B	最大値	488	13.2	8.61	10.50	11.19	0.32	10.43	12.84	52.8
	標準偏差	5.0	0.4	0.28	0.46	0.44	0.03	0.43	0.80	4.5
	変動係数(%)	1.0	3.0	3.54	4.66	4.15	9.89	4.49	6.91	10.2
MB13	試験体数	12	12	12	12	12	12	12	12	12
構成:3L3P	平均値	482	11.2	9.46	11.63	12.79	0.27	11.28	13.93	44.4
外層:ヒノキM120B	最小値	460	10.7	8.90	10.90	12.05	0.26	10.58	13.19	38.1
内層:スギM60B	最大値	492	11.7	9.92	12.17	13.49	0.29	11.92	14.55	50.5
	標準偏差	8.9	0.3	0.28	0.33	0.41	0.01	0.41	0.41	3.6
	変動係数(%)	1.8	2.6	3.01	2.83	3.18	3.69	3.61	2.91	8.1
MB14	試験体数	12	12	12	12	12	12	12	12	12
構成:3L3P	平均値	472	12.2	9.91	12.24	13.36	0.28	11.82	14.14	44.0
外層:ヒノキM120B	最小値	443	11.7	9.36	11.70	12.57	0.25	10.95	13.51	37.3
内層:スギM30B	最大値	493	12.7	10.53	12.82	14.25	0.34	12.36	14.97	51.4
	標準偏差	16.0	0.4	0.39	0.40	0.52	0.02	0.44	0.52	4.3
	変動係数(%)	3.4	3.0	3.92	3.30	3.87	8.13	3.74	3.67	9.8



図 2-2-7 MB1 9L9P スギ M90B-スギ M30B



図 2-2-8 MB2 9L9P ヒノキ M120B-スギ M30B



図 2-2-9 MB3 5L5P スギ M90B-スギ M60B



図 2-2-10 MB4 5L5P スギ M90B-スギ M30B



図 2-2-11 MB5 5L5P スギ M90B-スギ M60B



図 2-2-12 MB6 5L5P ヒノキ M90B-スギ M30B



図 2-2-13 MB7 5L5P スギ M120B-スギ M60B



図 2-2-14 MB8 5L5P ヒノキ M120B-スギ M30B

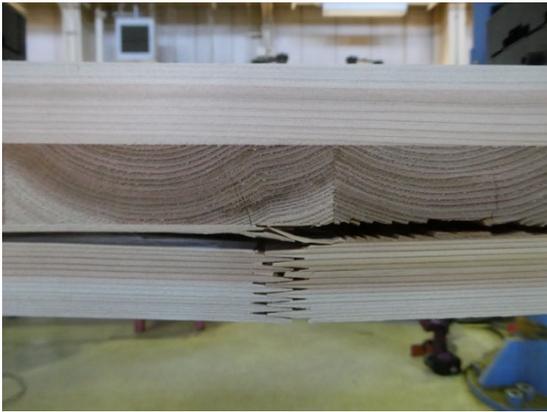


図 2-2-15 MB9 3L3P スギ M90B-スギ M60B



図 2-2-16 MB10 3L3P スギ M90B-スギ M30B



図 2-2-17 MB11 3L3P ヒノキ M90B-スギ M60B

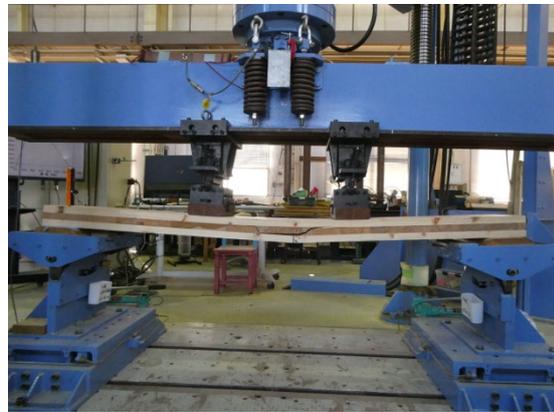


図 2-2-18 MB12 3L3P ヒノキ M90B-スギ M30B



図 2-2-19 MB13 3L3P ヒノキ M120B-スギ M60B



図 2-2-20 MB14 3L3P ヒノキ M120B-スギ M30B

表 2-2-4 各グループの破壊形態の数

通しNo.	構成	外層ラミナ	内層ラミナ	曲げ破壊数	せん断破壊数	せん断+曲げ破壊数
MB1	9層9プライ強軸	スギM90B	スギM30B	8	0	0
MB2	9層9プライ強軸	ヒノキM90B	スギM30B	8	0	0
MB3	5層5プライ強軸	スギM90B	スギM60B	5	0	1
MB4	5層5プライ強軸	スギM90B	スギM30B	6	0	0
MB5	5層5プライ強軸	ヒノキM90B	スギM60B	6	0	0
MB6	5層5プライ強軸	ヒノキM90B	スギM30B	6	0	0
MB7	5層5プライ強軸	ヒノキM120B	スギM60B	3	2	1
MB8	5層5プライ強軸	ヒノキM120B	スギM30B	2	3	1
MB9	3層3プライ強軸	スギM90B	スギM60B	9	1	2
MB10	3層3プライ強軸	スギM90B	スギM30B	11	0	1
MB11	3層3プライ強軸	ヒノキM90B	スギM60B	4	6	2
MB12	3層3プライ強軸	ヒノキM90B	スギM30B	3	5	4
MB13	3層3プライ強軸	ヒノキM120B	スギM60B	5	5	2
MB14	3層3プライ強軸	ヒノキM120B	スギM30B	3	7	2

内層がスギ M30B で、外層がスギ M90B またはヒノキ M90B と、外層の等級は同じで樹種を変化させたものの曲げ強度を図 2-2-21 に示す。また同様に、内層がスギ M60B で、外層がスギ M90B またはヒノキ M90B とした曲げ強度を図 2-2-22 に示す。図には曲げで破壊したものとせん断が関与して破壊したもののプロットを分けて示した。すべての組み合わせで外層にヒノキ M90B を使用したもののほうがスギ M90B を使用したものより曲げ強度の平均値は高かった。ラミナの曲げ試験においてヒノキ M90B の曲げ強度がスギ M90B の曲げ強度よりも高かったことを考えると、妥当な結果となった。また、せん断が関与した破壊が曲げ破壊よりも強度が低いということとはなかった。

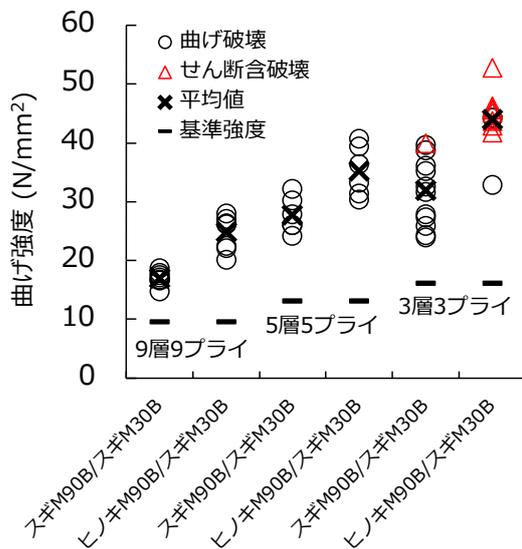


図 2-2-21 樹種による曲げ強度の違い
(外層 M90B 内層 M30B)

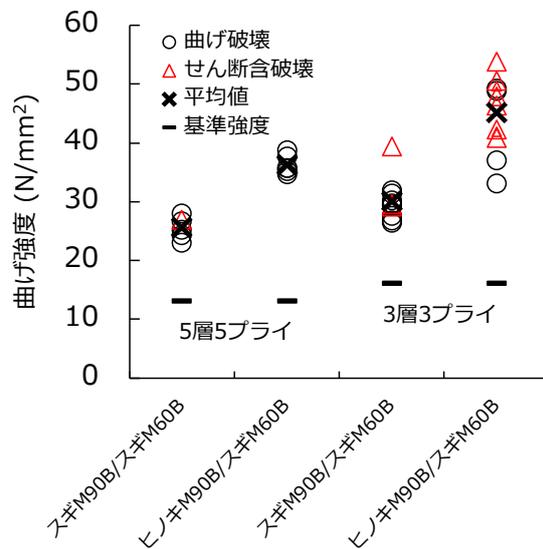


図 2-2-22 樹種による曲げ強度の違い
(外層 M90B 内層 M60B)

次に、外層の等級は同じで内層の等級をスギ M60B とスギ M30B に変化させた場合の曲げ強度を図 2-2-23～24 に示す。また、ラミナの曲げ試験の縦振動法のヤング係数と曲

げ強度の平均値を用いて、等価断面法により推定した曲げヤング係数と曲げ強度の平均値と実測値の平均値を表 2-2-5 に示す。曲げ強度の平均値について、5 層 5 プライ、3 層 3 プライとも、等価断面法による推定値では差がないが、実測値ではグループによってややばらつきがあった。ただし、平均値の大小はスギ M60B とスギ M30B の違いによる傾向はなかった。

また、推定値と実測値を比較すると、曲げヤング係数はいずれのグループもよく推定できていた。曲げ強度はいずれも実測値の方が大きかった。

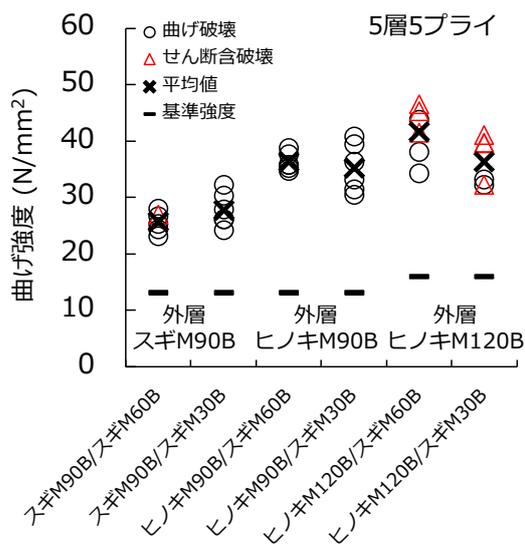


図 2-2-23 内層の違いによる曲げ強度 (5 層 5 プライ)

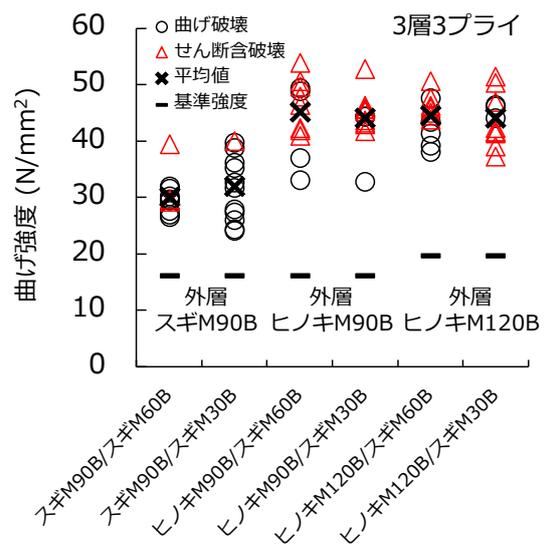


図 2-2-24 内層の違いによる曲げ強度 (3 層 3 プライ)

表 2-2-5 曲げヤング係数と曲げ強度 (平均値) の等価断面法による推定値と実測値

通しNo.	構成	外層ラミナ	内層ラミナ	曲げヤング係数(kN/mm ²)			曲げ強度(N/mm ²)		
				推定値	実測値	推定/実測	推定値	実測値	推定/実測
MB1	9層9プライ強軸	スギM90B	スギM30B	6.42	6.68	0.96	16.6	17.0	0.98
MB2	9層9プライ強軸	ヒノキM90B	スギM30B	6.70	6.33	1.06	19.2	24.9	0.77
MB3	5層5プライ強軸	スギM90B	スギM60B	8.10	8.28	0.98	20.9	25.7	0.82
MB4	5層5プライ強軸	スギM90B	スギM30B	8.10	8.33	0.97	20.9	27.8	0.75
MB5	5層5プライ強軸	ヒノキM90B	スギM60B	8.53	8.80	0.97	24.5	36.3	0.67
MB6	5層5プライ強軸	ヒノキM90B	スギM30B	8.53	8.45	1.01	24.5	35.3	0.69
MB7	5層5プライ強軸	ヒノキM120B	スギM60B	10.29	10.26	1.00	31.3	41.6	0.75
MB8	5層5プライ強軸	ヒノキM120B	スギM30B	10.29	10.08	1.02	31.3	36.4	0.86
MB9	3層3プライ強軸	スギM90B	スギM60B	9.88	9.60	1.03	25.5	30.1	0.85
MB10	3層3プライ強軸	スギM90B	スギM30B	9.88	9.90	1.00	25.5	32.0	0.80
MB11	3層3プライ強軸	ヒノキM90B	スギM60B	10.40	9.88	1.05	29.9	45.2	0.66
MB12	3層3プライ強軸	ヒノキM90B	スギM30B	10.40	9.69	1.07	29.9	44.1	0.68
MB13	3層3プライ強軸	ヒノキM120B	スギM60B	12.57	11.28	1.11	38.2	44.4	0.86
MB14	3層3プライ強軸	ヒノキM120B	スギM30B	12.57	11.82	1.06	38.2	44.0	0.87

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することとし、今年度は以下の3項目について、検討を行った。

- 1) 9層 CLT 試験体の長期シミュレーション (3.2)
- 2) ラミナ間に隙間が連続する場合の吸湿による含水率の変動 (3.3)
- 3) 長期荷重試験時の内部含水率モニタリング手法の精度検討 (3.4~3.8)

また、CLT は大きな厚さを有するため、内部が均一になるには長い期間を要すると考えられるため、長期荷重試験や実際の使用時には材料の内外層に含水率差が発生している可能性があり、力学的性能にも影響を与えることが考えられる。そこで、この検討の予備的な検証として、小型モデル試験体を用いて、吸湿時の動的ヤング率の測定を行い、それを、構成するラミナの含水率と動的ヤング率の関係から予測することを試みた (3.9)。

3.2 CLT 試験体の内部含水率シミュレーション

1) 解析の条件

試験体の解析モデルを図 3-2-1 に示す。材幅は 300mm、ラミナ厚は 30mm とし、材厚せいは 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^3 、初期含水率は 12.1% とした。接着層の湿気伝達率は透湿抵抗試験から算出し、 $28.6\text{ng/m}^2\text{sPa}$ 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。平衡含水率については Hailwood-Horrobin 式による平衡含水率曲線¹⁾から求めた値を用いた。試験体の温度は 20°C で一定とし、位置刻み $\Delta x=0.5\text{mm}$ 、 $\Delta y=0.1\text{mm}$ 、時間刻み $\Delta t=100\text{s}$ で 634 日経過まで数値計算を行った。

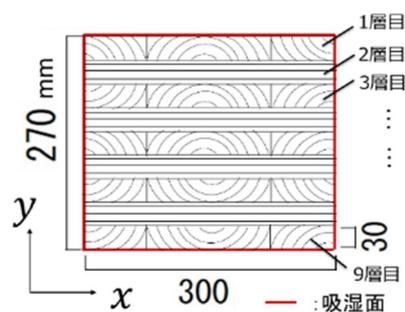


図 3-2-1 試験体モデル

2) 試験体および実験方法

試験体の概要を図 3-2-2 に示す。試験体寸法は材長 40mm、材幅 300mm、材厚せい 270mm とした。試験体数は 5 体とした。試験体を 20°C65%RH の恒温恒湿室内で調湿した後、図 3-2-2 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°C85%RH に設定した恒温恒湿槽内に 634 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。

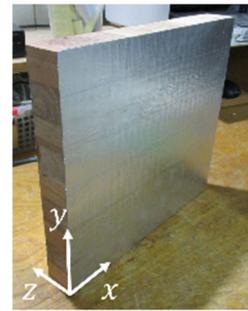


図 3-2-2 試験体概要

3) 結果

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 3-2-3 に、温湿度記録計から取得した恒温恒湿槽内の温湿度の時間変化を図 3-2-4 に示す。実験期間中に渡って温度は約 20°C、相対湿度は約 83%から 87%の間で推移した。経過日数 74 日から 78 日目の約 5 日間は恒温恒湿槽の温湿度制御エラーによる影響で、272 日目、418 日目、628 日目は試験場内設備の点検に伴う停電による影響で温湿度が大きく変動する期間があったが、解析における含水率変動の傾向は実験期間全体に渡って実験値とよく一致した。経過日数 53 日目まで解析値は実験値と特によく一致し、実験値に対する解析値の絶対誤差は接着層の影響を考慮した条件で最大約 0.15%pt、影響を無視した条件で最大約 0.23%pt であった。経過日数 74 日から 78 日目には恒温恒湿槽内の平均温度が約 37.1°C、平均相対湿度が約 91.4%に上昇した影響で吸湿速度が大きくなり、経過日数 53 日の測定点から 79 日の測定点で含水率変化も大きくなった。また、経過日数 186 日から 270 日の測定点では試験体の平均含水率が小さくなっていった。これは経過日数 146 日から 187 日目までは相対湿度が平均約 86.2%で吸湿が進んでいた一方、187 日から 270 日目まで平均相対湿度が 83.0%となり放湿による乾燥が進んでいったためである。また、経過日数 270 日から 632 日目までは相対湿度が平均約 84.1%、633 日からは約 86.8%に上昇した影響により、経過日数 270 日の測定点から 451 日および 634 日の測定点で含水率が再び大きくなった。実験値に対する解析値の最大絶対誤差は、経過日数 634 日において接着層の影響を考慮した条件で約 0.53%pt、影響を無視した条件で約 0.58%pt となった。実験期間中全体に渡って接着層の影響を考慮した条件と無視した条件では実験値との誤差に大きな差はなく、接着層が試験体全体の平均含水率変動に与える影響は小さい結果となった。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 3-2-5 に、吸湿開始後 53 日目の試験体内部の含水率分布を図 3-2-6 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。また、日数が経過するにつれ各ラミナの含水率はその時点の温湿度における平衡含水率に収束していく結果となった。以上より、接着層の存在が、吸湿の状況によってはラミナ

層間に大きな含水率差を生じさせる場合があることが示唆された。なお、本事業における長期荷重試験は20°C65%RHに保たれた恒温恒湿室内で実施されているため、材料内部において大きな水分移動および含水率差は生じていないと考えられる。

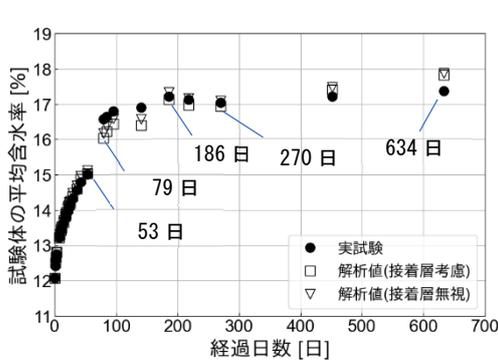


図 3-2-3 試験体の平均含水率
経時変化

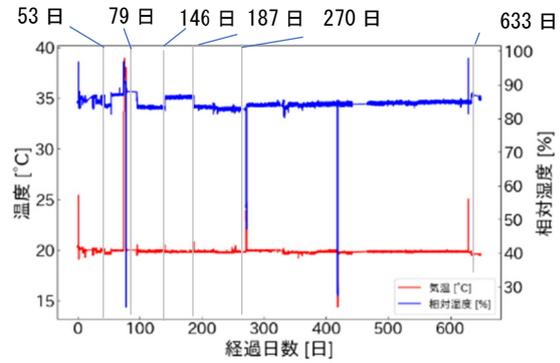


図 3-2-4 温湿度記録計から取得した
温湿度の時間変化

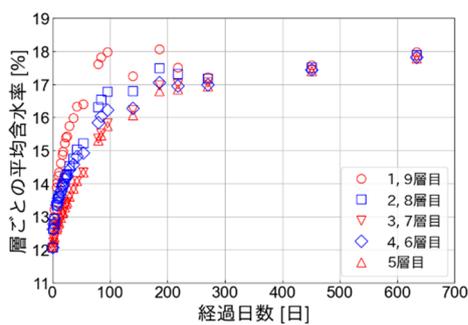
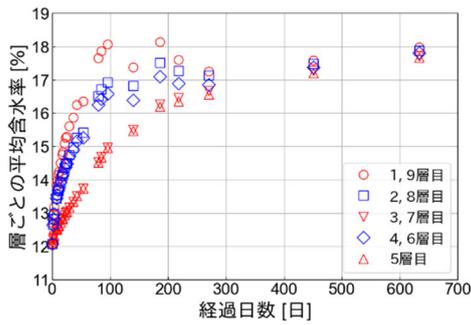


図 3-2-5 各層における平均含水率の経時変化の解析値
(左:接着層考慮, 右:接着層無視)

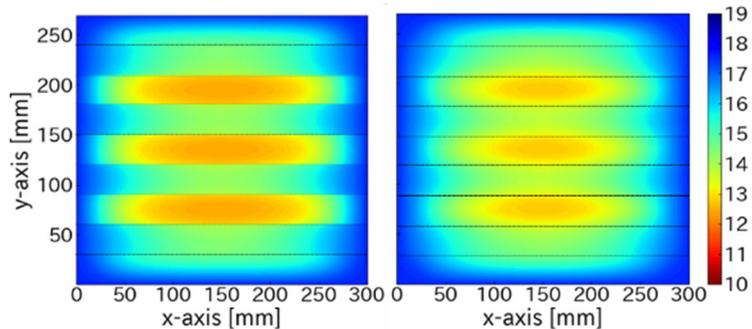


図 3-2-6 解析から求めた 53 日経過時の試験体内部の含水率分布
(左:接着層考慮, 右:接着層無視)

3.3 ラミナ間に隙間が連続する場合の2次元吸湿シミュレーション

1) 解析の条件

本解析で仮定する試験体の隙間の発生状態を図3-3-1に、試験体の解析モデルを図3-3-2に示す。解析対象とする断面で仮定する隙間の発生状態は実際の製造工程ではほぼ起こりえないと考えられるが最も極端な場合を想定し、各ラミナの幅方向、厚さ方向の接触箇所すべてに隙間が生じている状態とした。試験体モデルの材幅は300mm、ラミナ厚は30mmとし、材厚せいは270mmとした。図3-3-2における条件(a)の隙間なしモデルにおいては、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。条件(b)および条件(c)の隙間ありモデルにおいては条件(a)の隙間なしモデルを基として各ラミナの幅方向、厚さ方向の接触箇所すべてに隙間が生じている状態を仮定し、偶数層は隙間により空間が空いているものとし、奇数層のラミナ間には幅6mmの隙間を設けた。これにより隙間ありモデルでは試験体内部の隙間はすべて外気と連続した空間となるため、各ラミナの四周すべてを吸湿面と設定した。条件(d)のモデルではラミナに塗布された接着剤が一部隙間内にもとより存在、もしくはプレスにより隙間に押し出される等した状態を仮定し、奇数層の幅方向に隣り合うラミナの間には隙間を設けた一方、偶数層は接着剤で充填され断湿状態となった条件を設定した。条件(a)および条件(c)のモデルでは接着層の影響を考慮し、ラミナの厚さ方向積層面に防湿層を設定した。試験体の絶乾密度は 327kg/m^3 、初期含水率は12.1%とした。接着層の湿気伝達率は透湿抵抗試験から算出し、 $28.6\text{ng/m}^2\text{sPa}$ とした。平衡含水率についてはHailwood-Horrobin式による平衡含水率曲線¹⁾から求めた値を用いた。外気温度は 20°C 、相対湿度は85%、試験体の温度は 20°C で一定とし、位置刻み $\Delta x=0.1\text{mm}$ 、 $\Delta y=0.5\text{mm}$ 、時間刻み $\Delta t=100\text{s}$ で300日経過まで数値計算を行った。

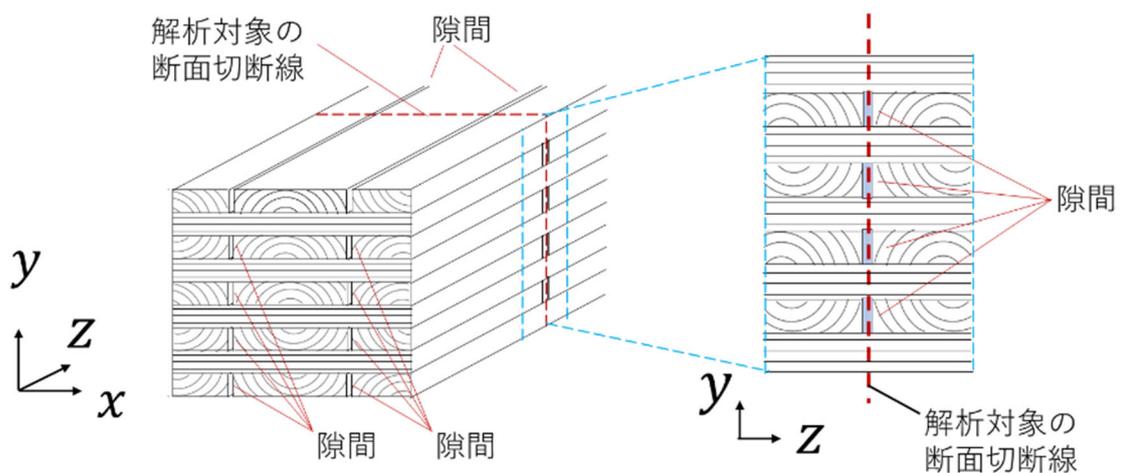


図3-2-1 本解析で仮定する試験体の隙間の発生状態

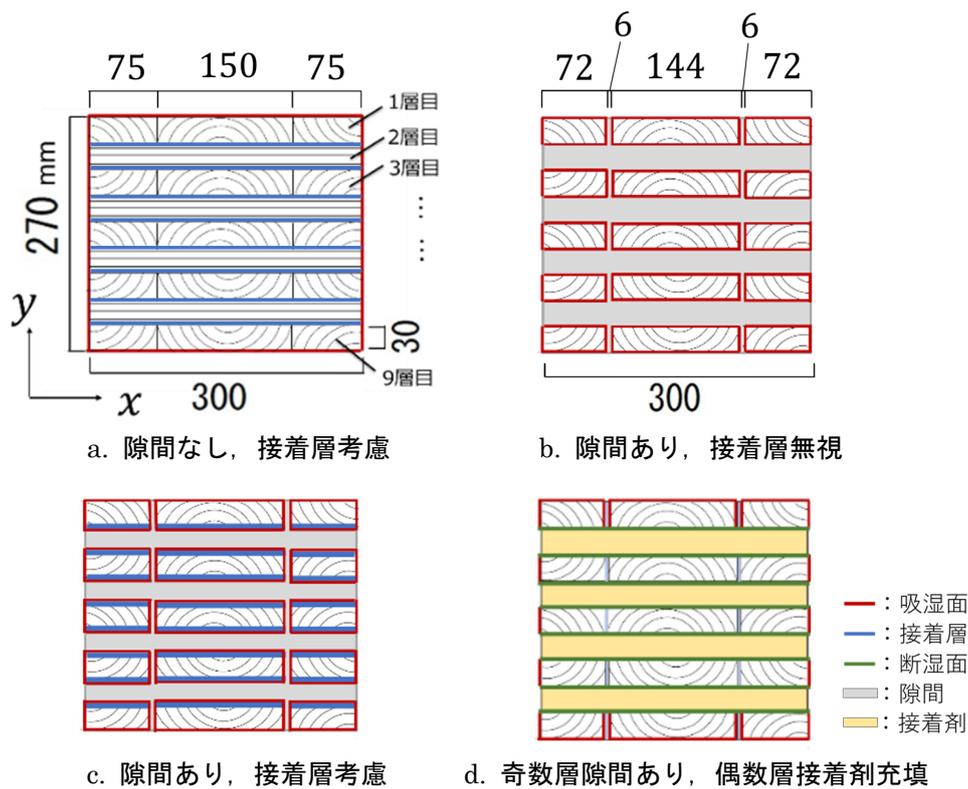


図 3-3-2 試験体モデル

2) 結果

図 3-3-3 に解析結果から求めた各層の平均含水率の経時変化、図 3-3-4 に各層の 1 日あたりの含水率変化量を示す。図 3-3-3、図 3-3-4 より、隙間なしの条件(a)と比較して隙間ありの条件(b, c)の方が吸湿速度が大きく、含水率変動は大きくなった。隙間ありの条件においては接着層考慮の条件(c)のほうが接着層無視の条件(b)と比較して吸湿速度が小さかったことから、隙間がある場合でもラミナの厚さ方向積層面に存在する接着層は防湿層として機能することがわかった。条件(a)から(d)の内、偶数層に接着剤が充填されているとした条件(d)が吸湿速度が最も小さかった。図 3-3-3 より、条件(a)において外層(1, 9 層目)と内層(3, 5, 7 層目)の含水率差が最も大きくなったのは 69 日目で、その時の各層の平均含水率は 1, 9 層目で約 16.8%、3, 5, 7 層目で約 13.9%であった。同様に条件(b)から(d)において 69 日経過時の各層の平均含水率を求めると条件(b)では各層ともに約 17.9%、条件(c)では 1, 9 層目で約 17.7%、3, 5, 7 層目で約 17.0%、条件(d)では 1, 9 層目で約 17.2%、3, 5, 7 層目で約 13.0%であった。解析から求めた 69 日経過時の内部含水率分布を図 3-3-5 に示す。69 日経過時の試験体全体の平均含水率は条件(a)で約 15.4%、条件(b)で約 17.9%、条件(c)で約 17.3%、条件(d)で約 14.7%となった。以上より、隙間なしの条件(a)と比較して隙間ありの条件(b, c)では各ラミナの四周全てが吸湿面となるため吸湿速度は非常に大きくなる一方、偶数層の隙間に接着剤が充填されているとする条件(d)では充填箇所断湿されるため、内層の吸湿速度が非常に小さくなる結果となった。

本解析モデルは非常に極端な隙間の発生状態を仮定している。そのため万が一実製品で隙間が発生した場合においても、本解析モデルのようにラミナ四周全てが吸湿面となる可能性は低い。また、本解析条件のような極端な隙間の発生に伴い条件(d)のように試験体断面の大部分で断湿状態となる可能性も低いいため、隙間の有無が9層 CLT の含水率変動に与える影響は本解析の結果よりも極めて小さくなるものと考えられる。

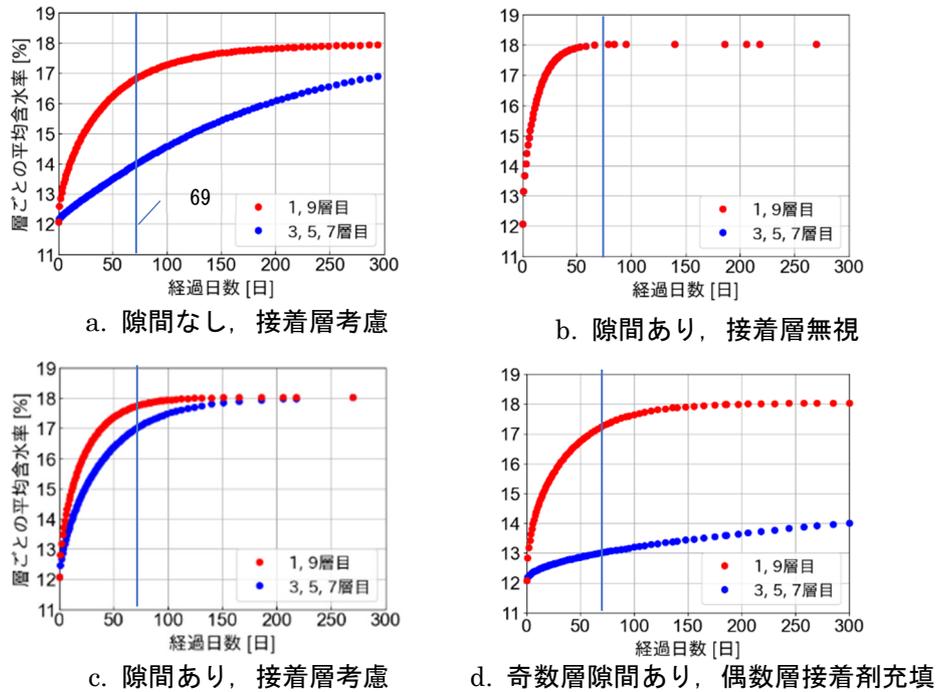


図 3-3-3 各層の平均含水率の経時変化の解析値

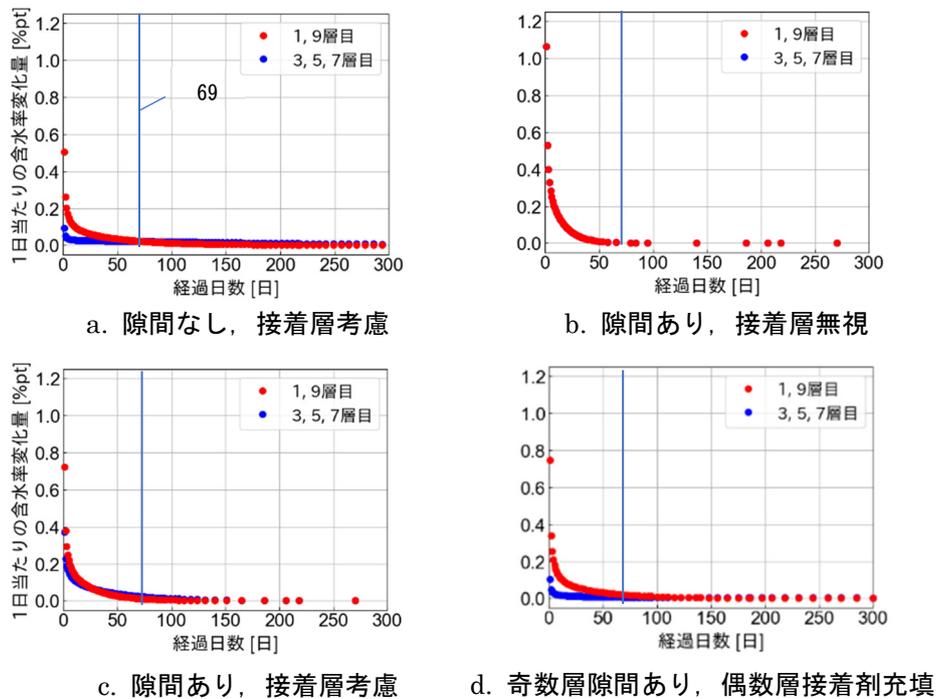


図 3-3-4 解析から求めた各層の1日あたりの含水率変化

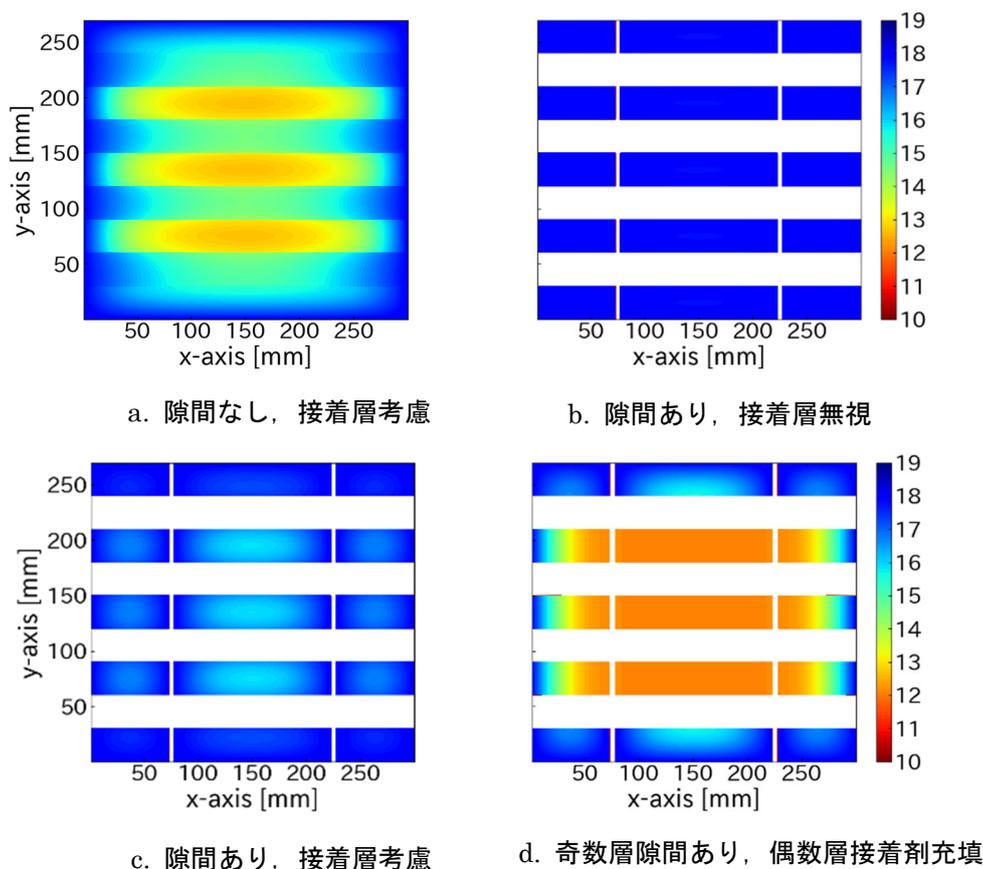


図 3-3-5 解析から求めた 69 日経過後の内部含水率分布

【参考文献】

1)Siau, J. F. :” Wood: Influence of moisture on physical properties” , Virginia Polytechnic Institute and State University, N.Y., 1995, pp.138-139

3.4 内部含水率の長期モニタリング装置の概要

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 3-4-1）。これに導線を接続して測定用のプローブを作成し（図 3-4-2）、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:DS14DBL）にドリルガイド（神沢鉄工(株)：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（図 3-4-3、3-4-4）。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（図 3-4-5）。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：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 3-4-6）。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 3-4-7）。

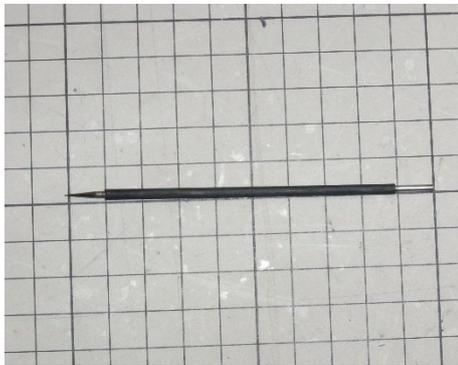


図 3-4-1 測定プローブの例
（直径 2mm のステンレス針の側部を熱収縮チューブで絶縁被覆）



図 3-4-2 測定プローブへのリード線の接続



図 3-4-3 先孔切削用ドリルとドリルガイド（孔深の設定が可能）

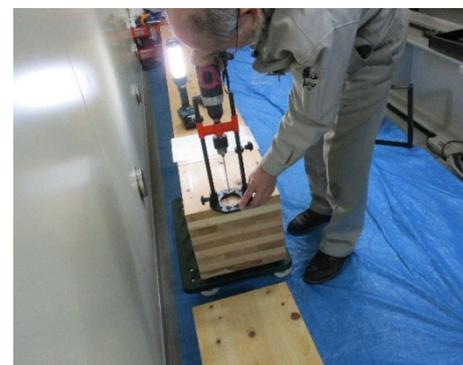


図 3-4-4 先孔切削作業の状況

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:KNS-LOG)を接続し、含水率を一定間隔で経時的に記録し(図3-4-8、3-4-9)、近傍の温湿度を温湿度ロガー(T&D:TR-72wf)で測定した(図3-4-10)。なお、試験体の含水率測定位置は図3-4-11に示す。

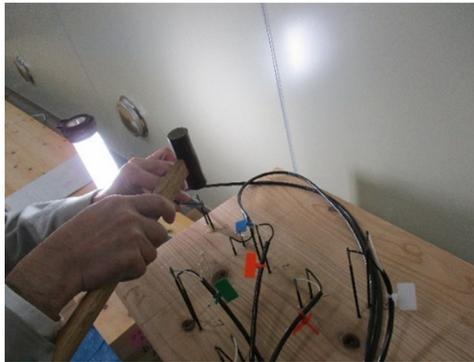


図3-4-5 ハンマーによるプローブの打ち込み



図3-4-6 プローブの固定状況(エポキシ接着剤充填)

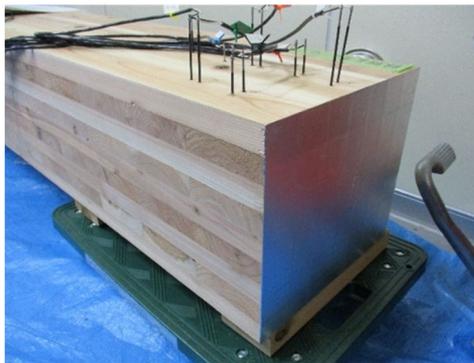


図3-4-7 プローブの設置状況とアルミテープによる断湿状況

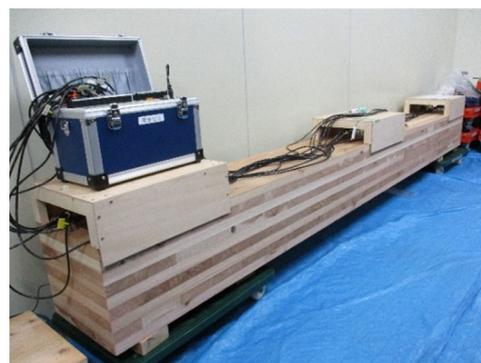


図3-4-8 設置完了状態の様子(プローブ保護カバー取り付け後)



図3-4-9 使用した含水率記録計(コーナー札幌:KNS-LOG)



図3-4-10 温湿度の測定状況(T&D:TR-72wf)

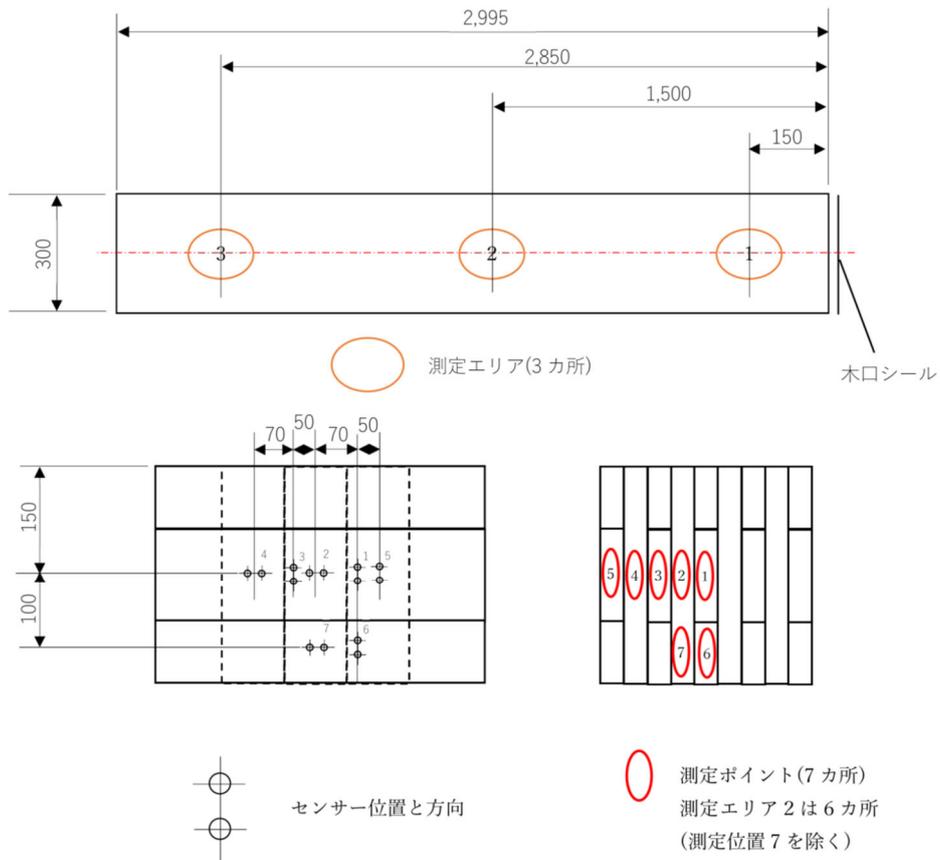


図 3-4-11 含水率の内部測定位置

※各測定エリアの 6～7 は予備測定点である。

なお、測定エリア②の測定点は 1～6 とした。

3.5 プローブ打ち込み深さが測定値に与える影響の検討

1) 実験方法

CLT の含水率測定に用いる抵抗式水分計のプローブは直径 2mm、長さ 180mm の細長いステンレス棒であり、先端以外を絶縁体で被覆して不要な場所の含水率を拾わないようにしている。しかし、深さの異なる部位の計測を続けている内に絶縁体で被覆していても周囲に木材があると測定値に影響を及ぼしている可能性があるとの懸念が生じた。本試験は、絶縁被覆の外側に木材が存在している場合、抵抗式含水率計の測定値が変動するかを確かめるために行った。CLT ラミナ (スギ) の端材 (幅 120mm×厚さ 30mm×長さ 320mm または 370mm) から幅 100mm×厚さ 30mm×長さ 50mm のブロックを 5 ないし 6 枚切り出し、1 枚を試験ブロックとした。残りの 4 ないし 5 枚のブロックに通し穴を開け、プローブを覆う中間ブロックとした。供試したブロックは 20℃65%RH の恒温恒湿器で 2 週間以上養生してから、試験に用いた。図 3-5-1 に中間ブロックを 4 枚セットした試験

体を示す。一番下が含水率測定用の試験ブロックである。試験体は3体用意した。

図 3-5-1 の状態で恒温恒湿器内に静置し、KNS-LOG に接続して、1 時間毎に約 1 日含水率を測定した。KNS-LOG による計測の前後に比較対象として MT-900 を用い 3 種類の測定レンジ (15 (スギ)、SFT (針葉樹)、1 MOD (カウント値 : MT-900 のレンジ変換前の測定値)) で含水率を測定した (図 3-5-2)。

一連の測定が終了した後、中間ブロックを一つ外し、同様の測定を行った。これを中間ブロックがなくなるまで繰り返した後、試験ブロックからプローブを取り外し、MT-900 の標準電極で測定した。また、実際の 9 層 CLT に近い条件として、測定試験体の後ろにも中間ブロックが存在している状況を再現し、20℃65%RH 環境下で KNS-LOG および MT-900 で含水率を測定した (図 3-5-3)。

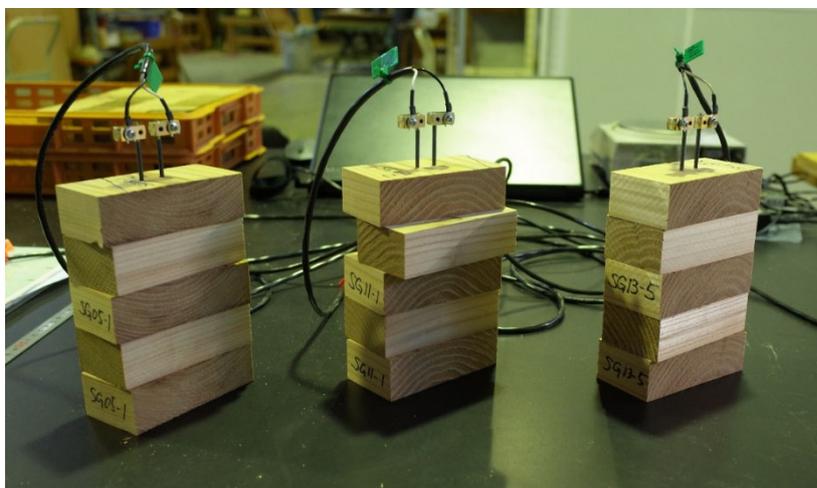


図 3-5-1 ブロック積層試験体



図 3-5-2 各ブロックの含水率測定



図 3-5-3 9 層 CLT を模した試験状況

2) 結果

試験結果を図 3-5-4 に示す。図は 3 体の平均値で示している。KNS-LOG の測定値は、24 時間の測定値の平均である。MT-900 の測定値は、KNS-LOG による測定が終了した直後の値を示した。直前の値は、恒温恒湿機から試験体を出してセッティングし、戻した直後のため、外乱による変動が生じていると考えたためである。KNS-LOG の測定値はどの条件でもほぼ同じであった。一方、MT-900 の測定値は、やや変動したが、誤差の範囲と考えられた。この試験において、プローブ周辺の木材が含水率計の読みに与える影響は無かったと考えられ、測定深さによる影響は無いものと言えた。なお、MT-900 による測定においては、人体が測定器に近づくと数値が変動したため、可能な限り離れて測定した。

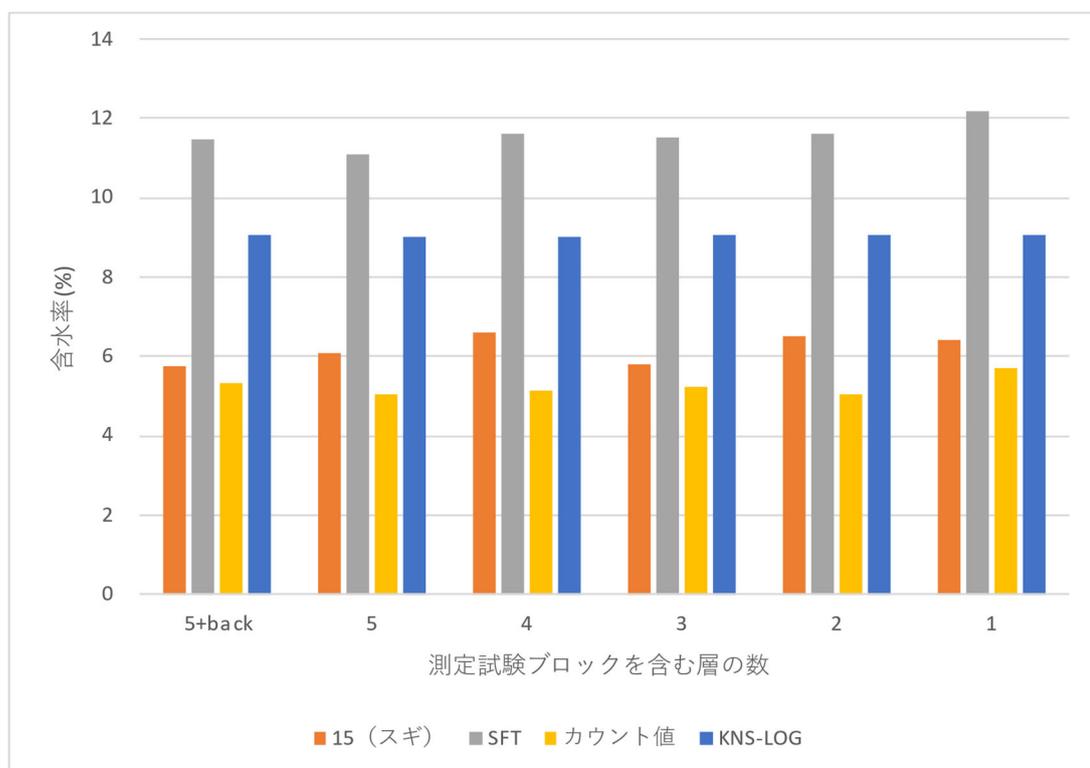


図 3-5-4 試験ブロックの積層数と含水率表示値の関係

3.6 含水率計測定値の検証

R6 年度の試験において、電気抵抗式多点型含水率記録計（コーナー札幌：KNS-LOG）による測定値間、特に表層と中心部とで含水率値に差があったことから、今年度は、9 層 9 プライの CLT を裁断した薄板を用いて、幾つかの温湿度条件において KNS-LOG の含水率測定値の検証を行った。

1) 実験方法

はじめに、プローブを接続する KNS-LOG のチャンネルにより、表示される含水率値が異なることが懸念されたため、水分表示値チェッカー（(株)サンコウ電子研究所）により、各チャンネルの表示値を確認した。その結果 1~20 チャンネル全てにおいて同一

の値が表示されることを確認した。

含水率測定用の試験体には 23°C50%RH の恒温恒湿室内で養生してあった 8 体のエンドマッチの板（幅 300×高さ 270×厚さ 30mm）を用いた（試験体 No. 23）。長期モニタリング試験と同様に 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ものに導線を接続して測定用のプローブを作成し、図 3-6-1 に示すように、表層から 1 層目、3 層目、5 層目のラミナの中央にプローブを打ち込んだ（図 3-6-2）。プローブの先端の被覆チューブから露出した部分が測定するラミナの厚さ方向中央に来るように打ち込み深さを管理して、ラミナの幅方向中央に繊維に直行する向きに 2 本のプローブを打ち込んだ。プローブ間の距離は 15mm とした。なお、今回の試験では KNS-LOG による含水率測定後に全乾法で含水率を測定するためプローブを抜く必要があったため、2 液性エポキシ接着剤のプローブへの塗布と施工箇所への充填は行わなかった。プローブを打ち込んだ試験体を 23°C50%RH の恒温恒湿器（エスペック社：PR-3J）に設置し、プローブからの導線を KNS-LOG に接続し、含水率を 1 時間ごとに数日間測定した（図 3-6-3）。測定終了後、プローブ先端のラミナを切り出し、全乾法で含水率を求めた。さらに、別の試験体 2 体（試験体 No. 13）を用いて、長期モニタリング試験を実施した森林総合研究所の CLT 長期強度試験棟内の温湿度環境と同じ 20°C65%RH の温湿度条件で、同様に KNS-LOG と全乾法による含水率の測定を実施した。試験体は 23°C50%RH で養生していたものを 20°C65%RH の恒温恒湿器内で約 2 週間養生した後、試験に供した。また、「3.8 含水率データ長期収集装置の検討」において温湿度 23°C90%RH の恒温恒湿器内で試験を行った試験体について、そのままの状態でも KNS-LOG に接続して 23°C90%RH における含水率を測定した後、切断して全乾法で含水率を測定した。

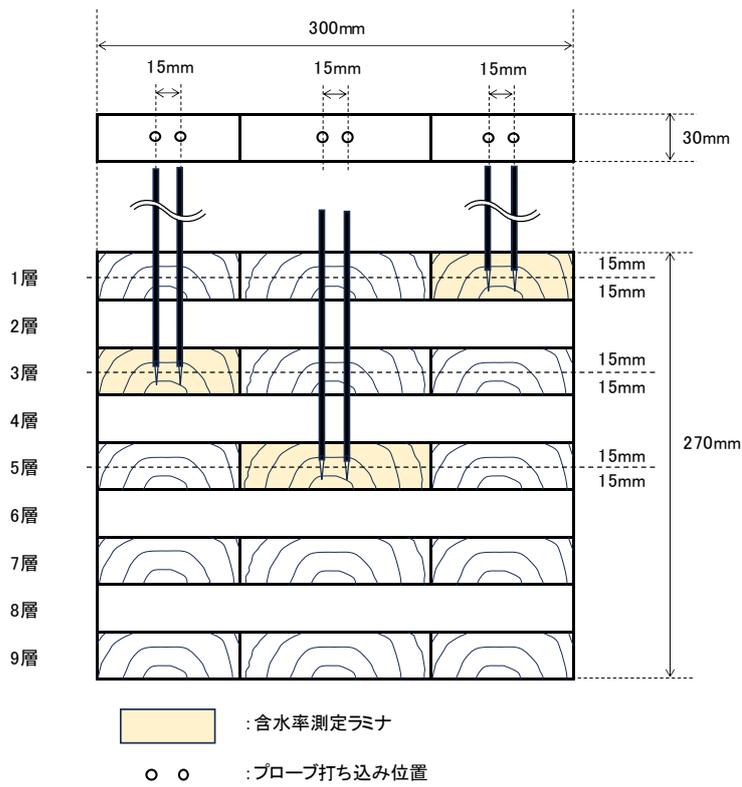


図 3-6-1 プローブの設置位置

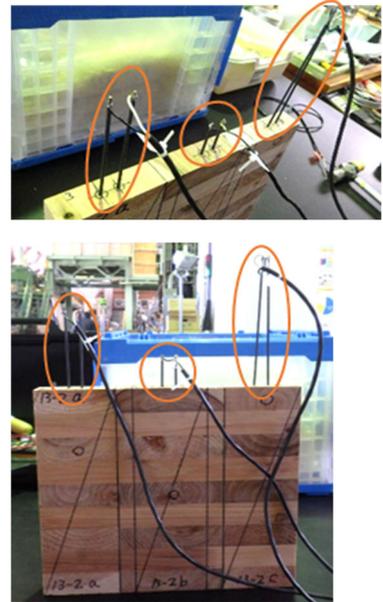


図 3-6-2 プローブの設置状況

○ : プローブの電極部分

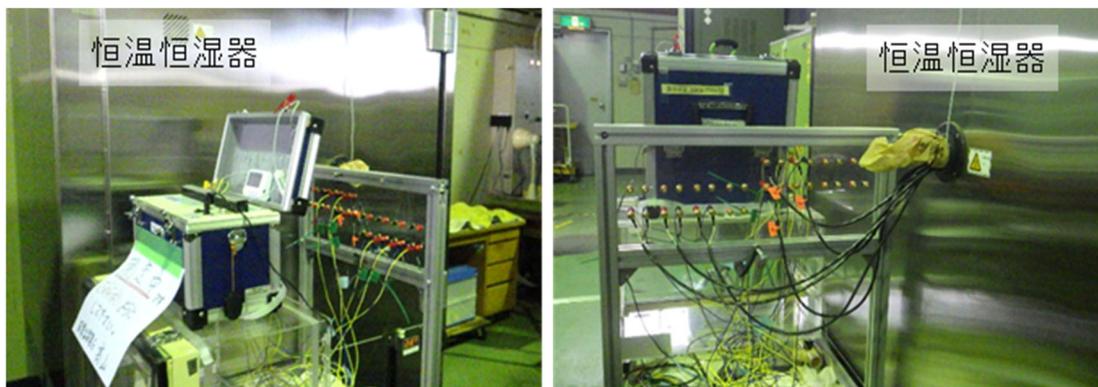


図 3-6-3 測定の様子

2) 結果

KNS-LOG による含水率測定値の事例を図 3-6-4 に示す。KNS-LOG による測定値は試験体や測定する層によって測定値が安定せず上下の変動が続くものが見られた。ただし、変動幅に大小はあるが測定期間をとおして概ね一定の幅で変動を繰り返しており、ある程度の測定期間で見れば大きな問題は無いと思われた。変動の原因は現時点では不明であるが、どの試験体も中央の 5 層目は概ね変動がなく安定している傾向が見られたことから、プローブの打ち込み状態、恒温恒湿器内の送風の影響などが考えられる。

表 3-6-1、図 3-6-5 に KNS-LOG による含水率測定値の測定期間の平均値と全乾法で測定した含水率を示す。図 3-6-5 において、高含水率側に向かって傾きが大きくなっているが、概ね一直線上に並ぶ傾向が見られたことから、KNS-LOG の測定値から測定箇所の含水率を一次式によって算出できる可能性が示された。また、図 3-6-6 に KNS-LOG で測定した含水率と全乾法による含水率の差を測定位置ごとに示す。KNS-LOG で測定した含水率は全乾法の含水率と比較して 23℃65%RH および 20℃65%RH では低めの、23℃90%RH では高めの値となる傾向が見られた。KNS-LOG と全乾法の測定値の差は 23℃65%RH では 1 層目、3 層目が 2%前後、5 層目が 1%前後あったが、20℃65%RH では差が小さくなり、1 層目、3 層目が 0.5~2%程度で 5 層目はほぼ差がなかった。20℃90%については 1 体のみの試験結果であるが、5 層目の差が大きく 3.4%差があった。今回の試験では試験体数が 20℃65%RH は 2 体、23℃90%RH は 1 体のみと少ないため、さらに試験体数を増やして検証し、補正式等により KNS-LOG の測定値の精度を高めていく。また、長期モニタリング試験の含水率測定試験体については、裁断して全乾法等で測定した測定点付近のラミナの含水率と比較し検証する予定である。

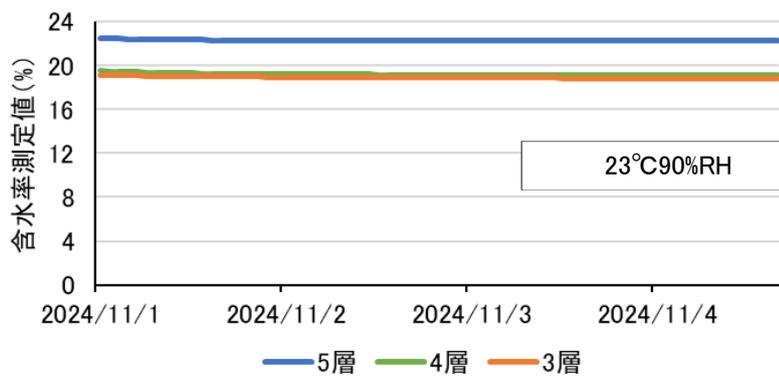
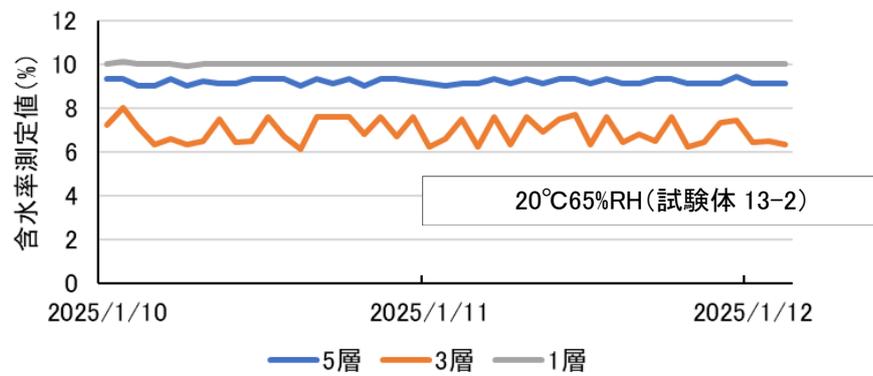
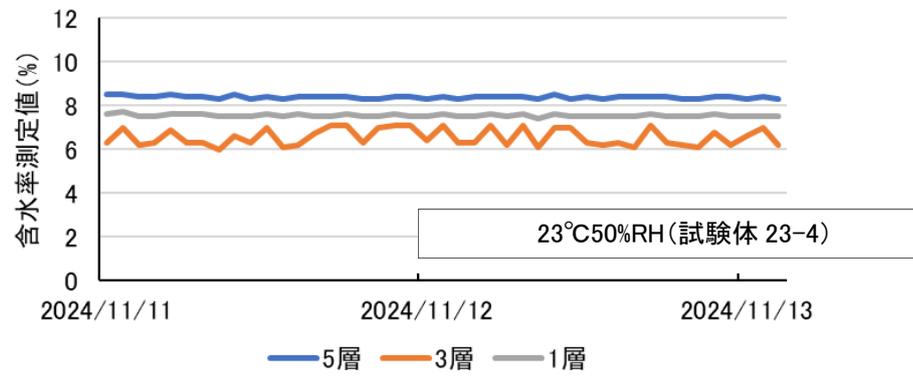
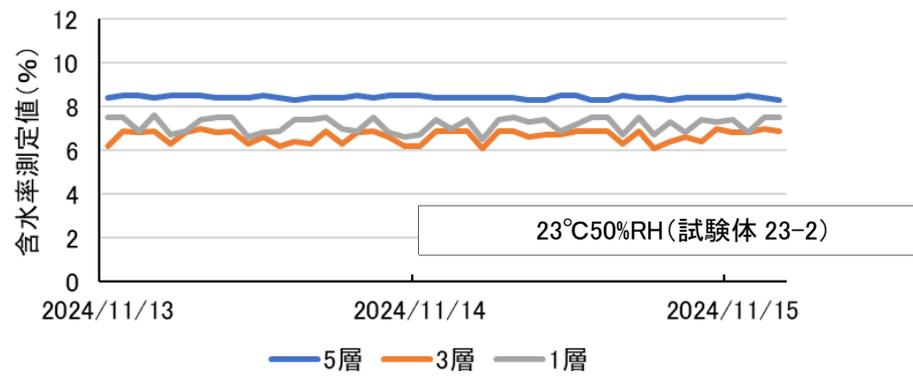


図 3-6-4 KNS-LOG による含水率測定値の事例

表 3-6-1 KNS-LOG および全乾法による含水率測定結果

温湿度条件	試験体 No.	測定位置	含水率測定値 (%)		KNSと全乾法との差 (%)	全乾密度	
			KNS-LOG	全乾法			
23°C50%RH	23-1	1層	6.9	9.2	-2.3	0.35	
	23-2	1層	6.8	9.5	-2.7	0.35	
	23-3	1層	7.2	9.3	-2.1	0.34	
	23-4	1層	7.5	9.3	-1.8	0.34	
	23-6	1層	7.5	9.6	-2.1	0.34	
	23-7	1層	7.8	9.4	-1.6	0.34	
	23-8	1層	7.7	10.0	-2.3	0.34	
	23-10	1層	7.7	9.6	-1.9	0.35	
	23-1	3層	6.5	8.6	-2.1	0.28	
	23-2	3層	6.4	8.4	-2.0	0.28	
	23-3	3層	6.5	8.6	-2.1	0.28	
	23-4	3層	6.6	8.6	-2.1	0.28	
	23-6	3層	6.7	8.8	-2.1	0.28	
	23-7	3層	6.8	8.4	-1.7	0.28	
	23-8	3層	6.7	9.0	-2.3	0.28	
	23-10	3層	6.6	8.5	-1.9	0.28	
	23-1	5層	8.5	9.0	-0.5	0.28	
	23-2	5層	8.5	9.3	-0.8	0.28	
	23-3	5層	8.5	9.7	-1.2	0.28	
	23-4	5層	8.4	9.8	-1.5	0.31	
	23-6	5層	8.7	9.3	-0.6	0.30	
	23-7	5層	8.7	9.0	-0.3	0.28	
	23-8	5層	8.2	9.4	-1.2	0.28	
	23-10	5層	8.9	9.1	-0.3	0.28	
	平均値		1層	7.4	9.5	-2.1	0.34
			3層	6.6	8.6	-2.0	0.28
			5層	8.5	9.3	-0.8	0.29
	20°C65%RH	13-1	1層	9.8	10.4	-0.7	0.40
		13-2	1層	10.0	10.5	-0.5	0.40
		13-1	3層	8.1	8.9	-0.8	0.30
13-2		3層	7.1	8.9	-1.8	0.31	
13-1		5層	9.8	9.8	0.0	0.45	
13-2		5層	9.3	9.4	-0.2	0.39	
平均値		1層	9.9	10.5	-0.6	0.40	
		3層	7.6	8.9	-1.3	0.31	
		5層	9.5	9.6	-0.1	0.42	
23°C90%RH	-	3層	18.8	17.5	1.3	0.30	
	-	4層	19.1	17.4	1.7	0.34	
	-	5層	22.3	18.9	3.4	0.35	

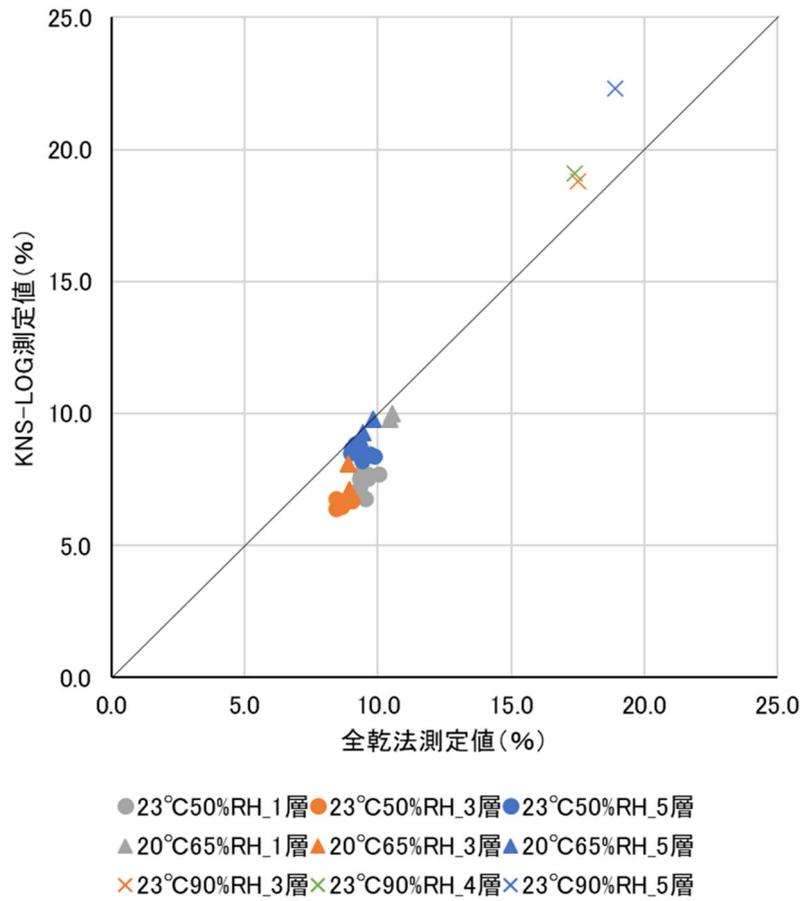


図 3-6-5 KNS-LOG および全乾法による含水率測定結果

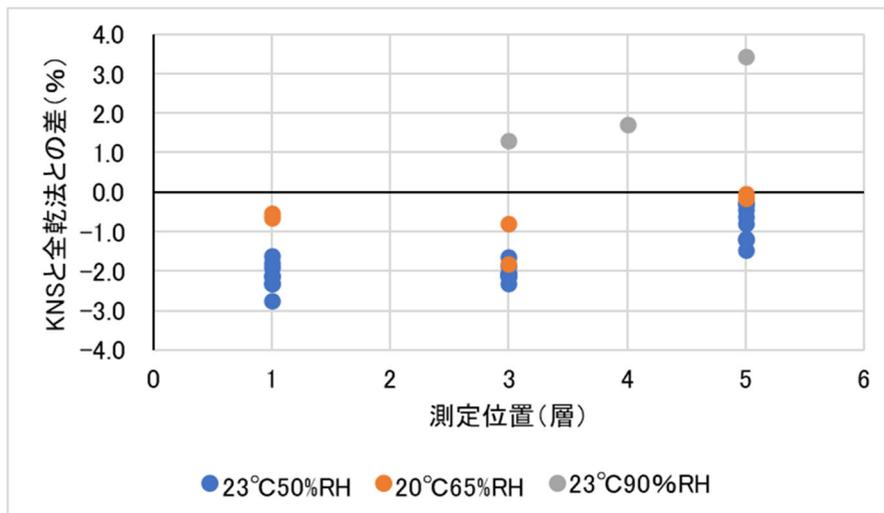


図 3-6-6 KNS-LOG と全乾法との含水率測定値の差

3.7 長期荷重試験室内の含水率試験体の内部含水率変動の検討

1) 内部含水率の測定結果

2023年11月に試験体を設置してから2024年6月までの、試験体周囲温湿度を図3-7-1に示す。途中、試験体の交換、機械・設備の点検等で温湿度が変化しているが、それ以外では試験温湿度である20°C65%RH近傍に維持されていた。

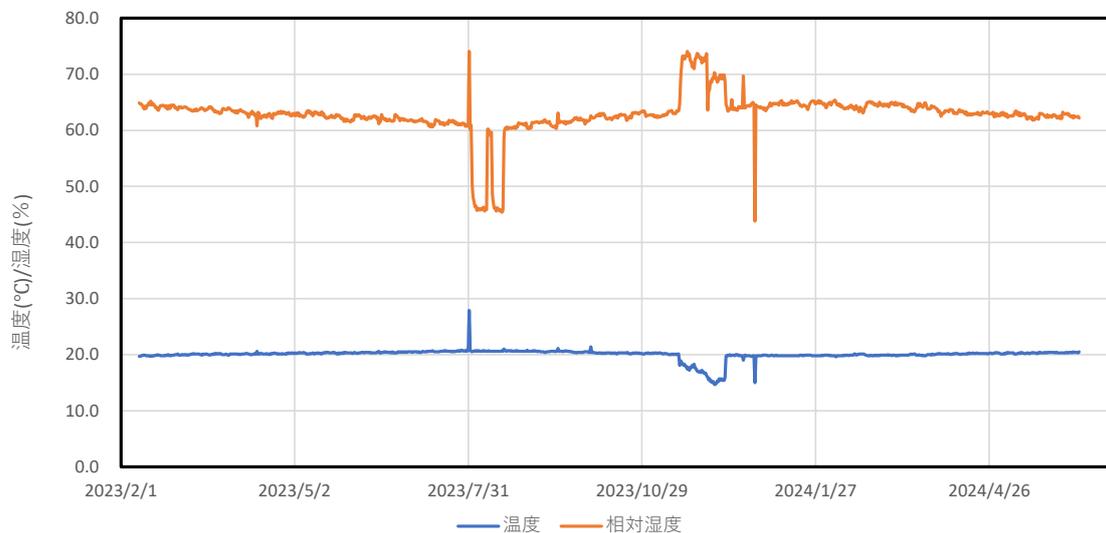


図 3-7-1 CLT 内部含水率の経時変化

今回用いた含水率計 KNS-LOG には、製造企業により次式の温度補正式が示されている。

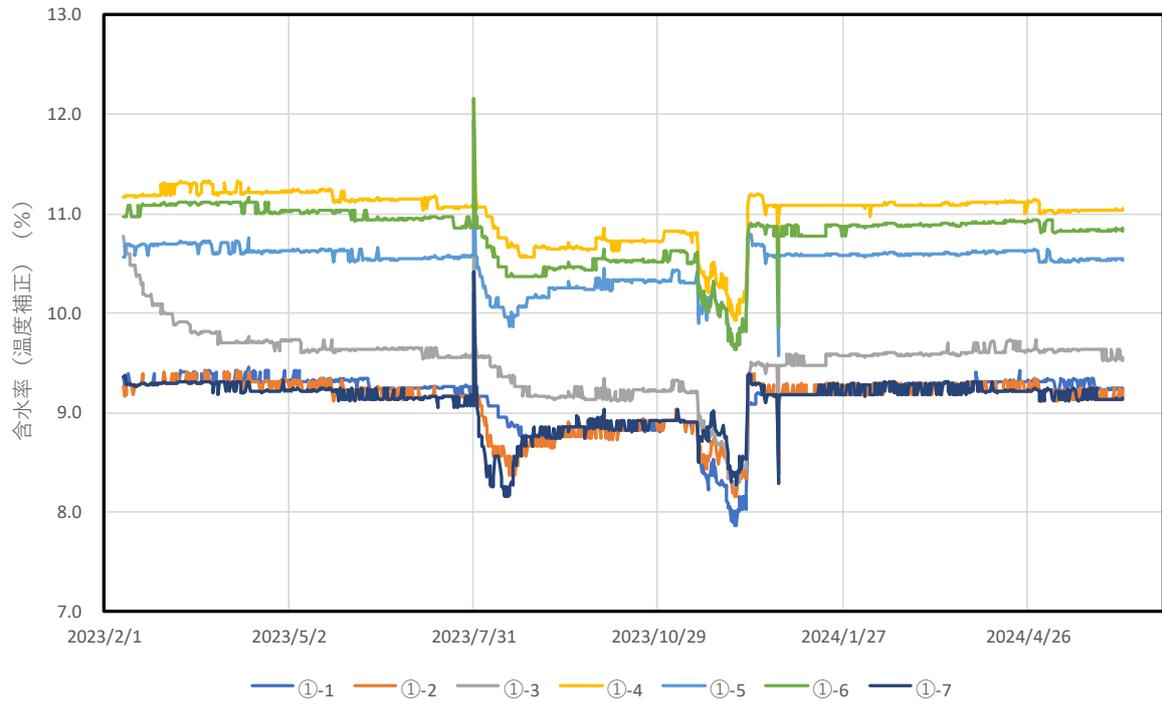
$$\Delta u = (0.0025 u_{kns} + 0.08) \cdot \Delta t \quad (3-7-1)$$

ここで、 Δu は含水率測定値の補正值、 u_{kns} は含水率計測定値、 Δt は 20°C と測定値の差 ($\Delta t = t - 20$) である。測定値に対して昨年は本式による補正のみを行ったが、今回は図 3-6-5 の含水率計表示値と全乾含水率の関係から、次式の校正直線を算出し補正を行った。

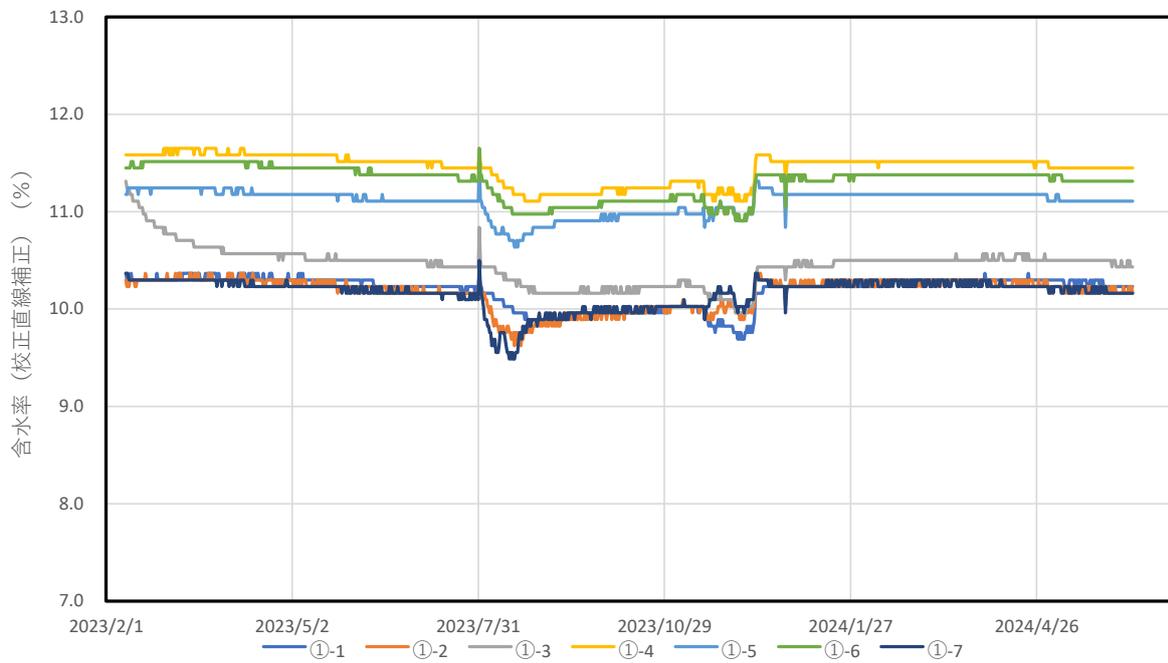
$$u_c = 0.6763 u_{kns} + 4.008 \quad (3-7-2)$$

ここで、 u_c は補正後の含水率 (%) を示す。

図 3-3-2 から 3-3-4 に試験体内部の含水率の経時変化を示す。なお、上段が昨年と同様の温度補正のみであり、下段が今回得られた校正直線を適用した値 (u_c) である。校正直線の適用により測定点間の含水率差は小さくなったが、依然として表層 (※-5) と中心層 (※-1) では最大 1% 程度の差が発生していた。今年度の検討 (図 3-5-4) により、測定深さが測定に与える影響はほぼ無いと考えられるが、図 3-2-5 に示すようにラミナが同一性状である場合には、周囲の湿度変化が 35%RH の厳しい環境においても、250 日後にはラミナ間の含水率差は 1% 以下となると予測される。これらのことから、本試験体内の含水率差はラミナごとの温湿度に対する平衡含水率、含水率と電気抵抗の関係の個体差等による可能性がある。今後は、試験体を解体して材内の含水率分布を全乾法で調査する等の検討が必要といえた。

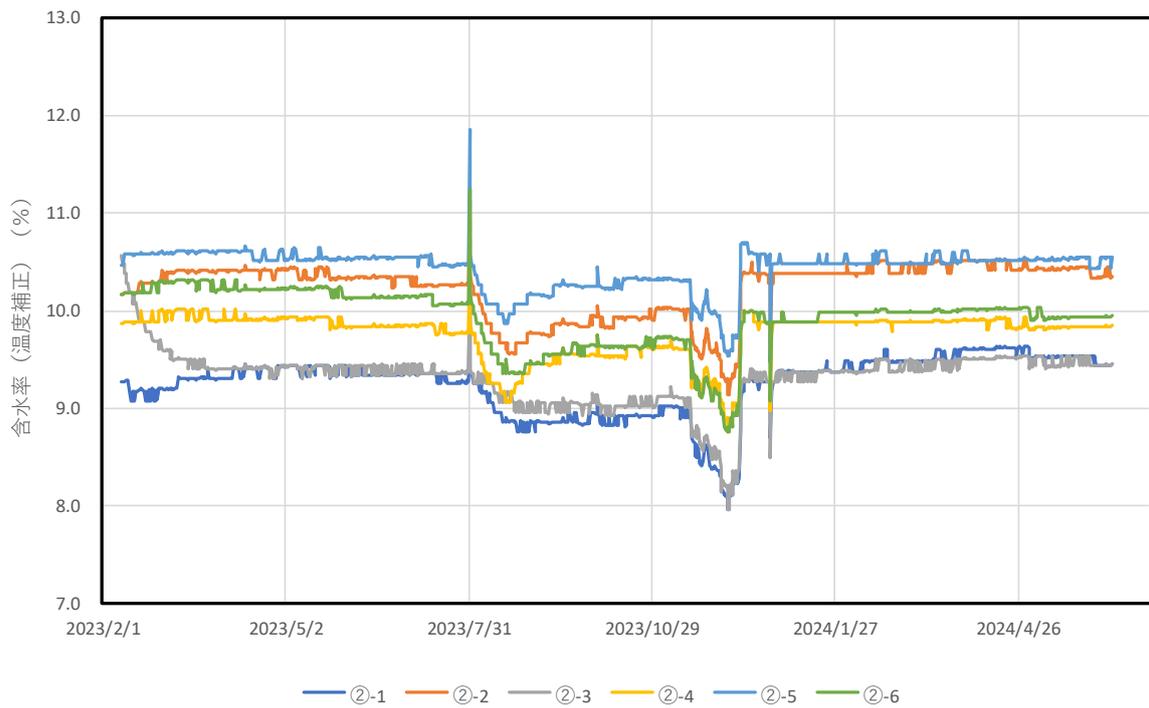


温度による補正

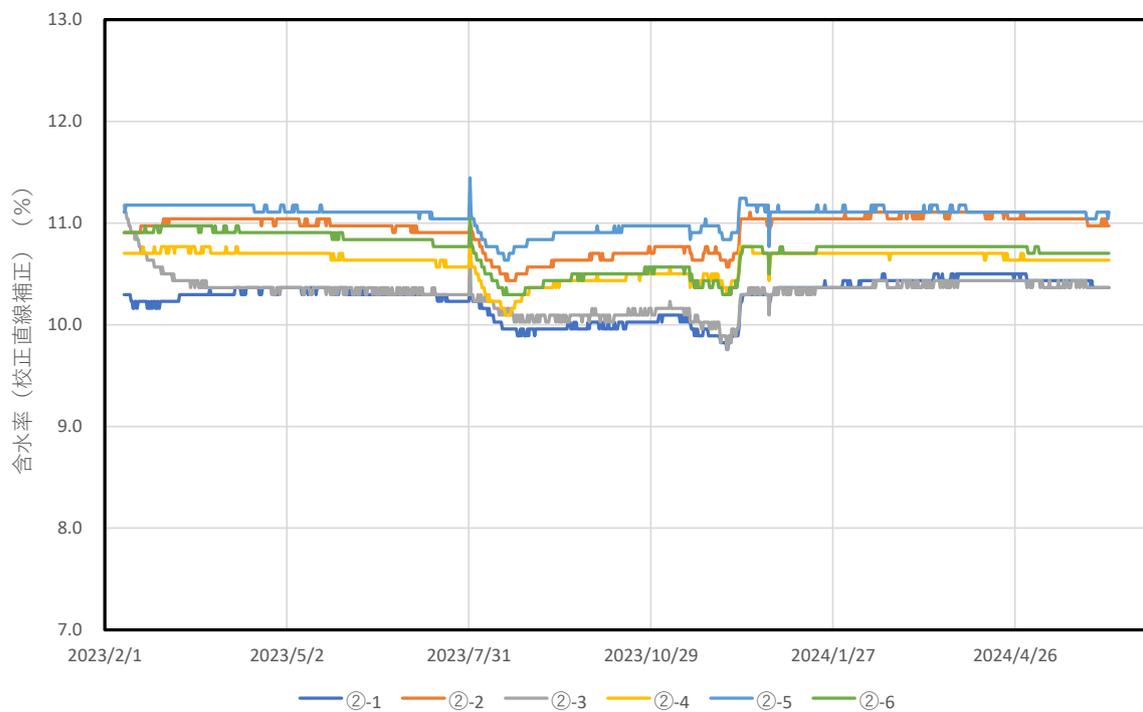


校正直線による補正

図 3-7-2 内部含水率の経時変化 (1)

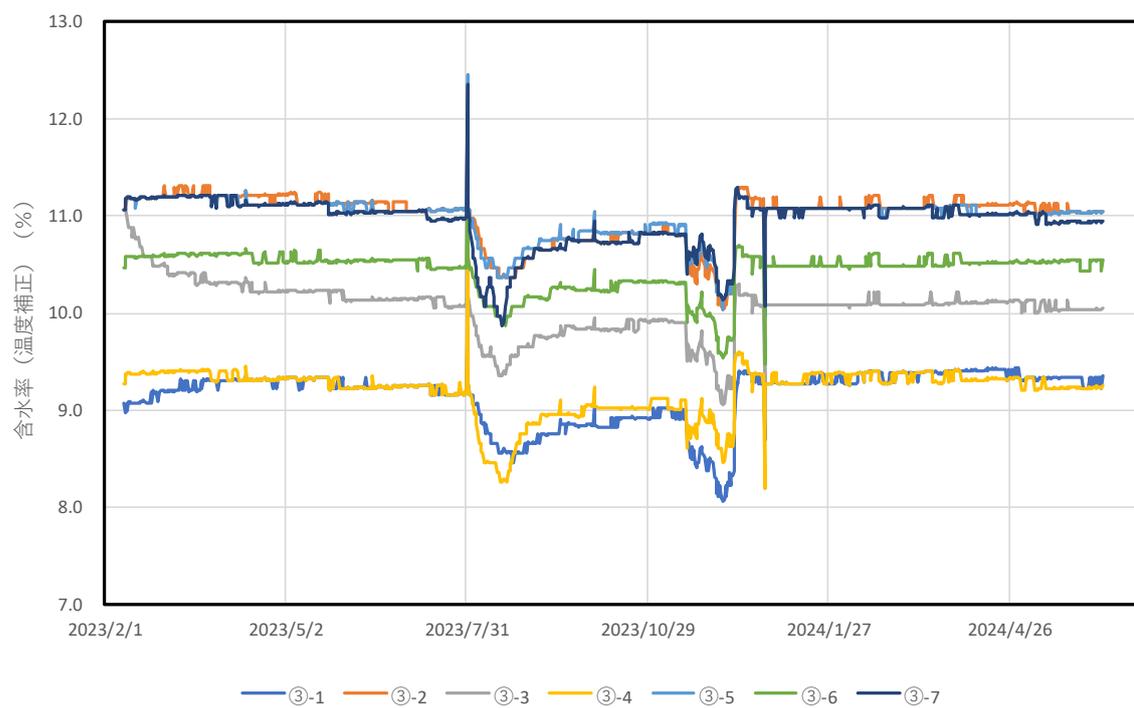


温度による補正

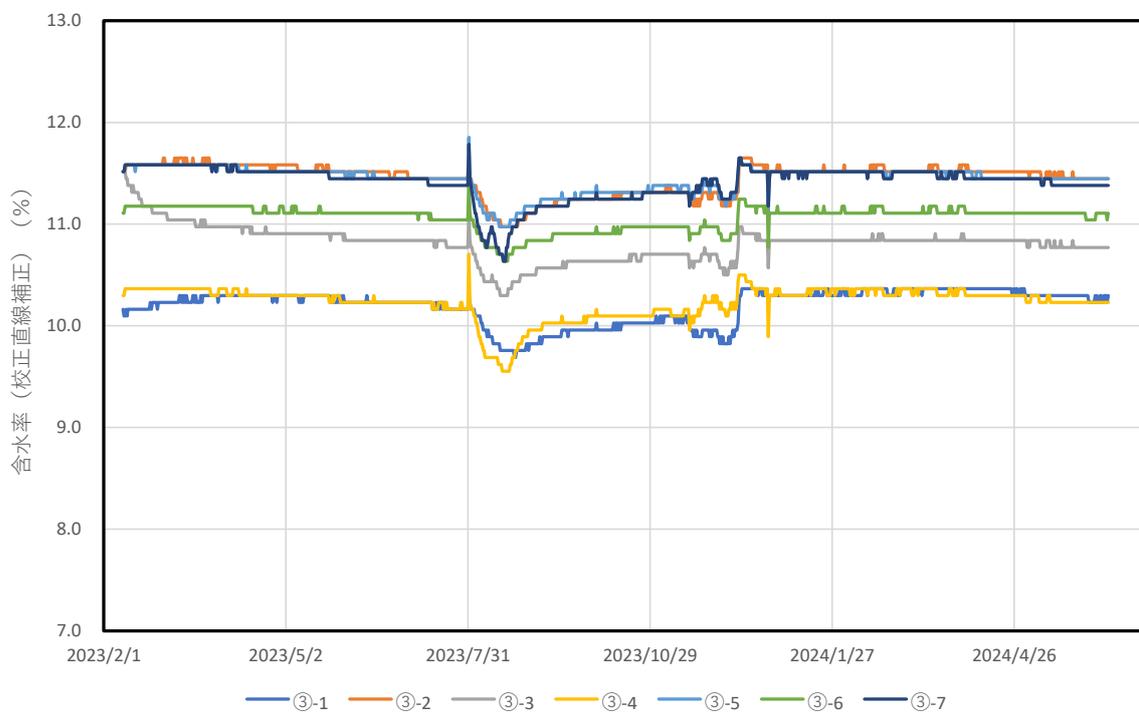


校正直線による補正

図 3-7-3 内部含水率の経時変化 (2)



温度による補正



校正直線による補正

図 3-7-4 内部含水率の経時変化 (3)

3.8 絶縁抵抗計による多点含水率測定器の開発

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。

1) 実験方法

製作したデータ収集装置の概略を図 3-8-1 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 3-4-2 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。令和5年度は、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が、今回は昨年度と同じ試料について全乾法により含水率を求め、校正曲線を得た。

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3-8-2)。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、内部含水率を約9ヶ月経時的に測定した。測定は1日に2回(10時と16時)行うように設定した。

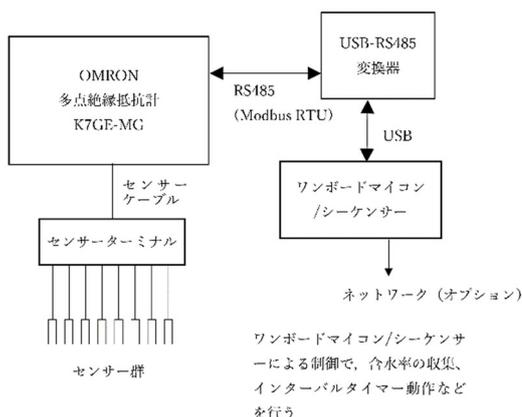


図 3-8-1 含水率データ長期収集装置の概略図

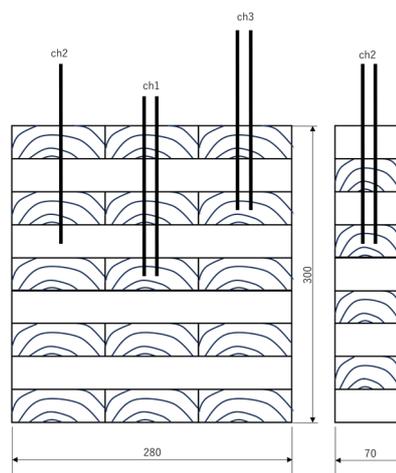


図 3-8-2 使用した CLT 試験体とプローブの設置位置

2) 結果

電気抵抗と全館含水率の関係を図 3-8-3 に示す。また、全乾法による含水率測定から得られた、MT-900 の指示値と含水率の関係を図 3-8-4 に示す。

得られた含水率の経時変化を図 3-8-5 に示す。測定終了後にプローブ先端のラミナを切り出し、全乾法で含水率を求めた。含水率は図 3-8-5 に併せて示す。繊維方向の長さが長い ch2 について、定常に達するまでの時間が ch1、ch3 に比べ長くかかっていることから、CLT 内部への水分の侵入経過をモニターできているものと考えられる。

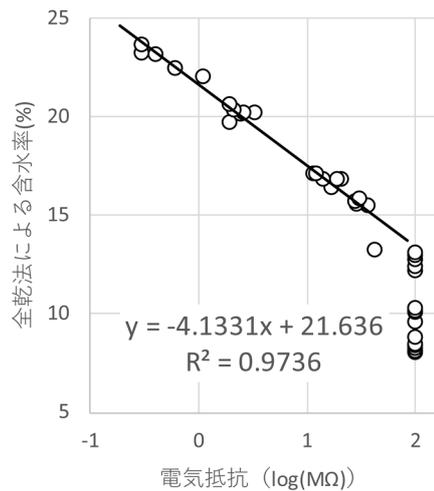


図 3-8-3 電気抵抗と含水率の関係

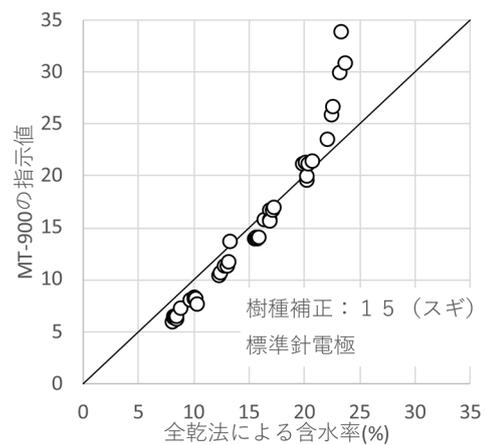


図 3-8-4 含水率と MT-900 の指示値の関係

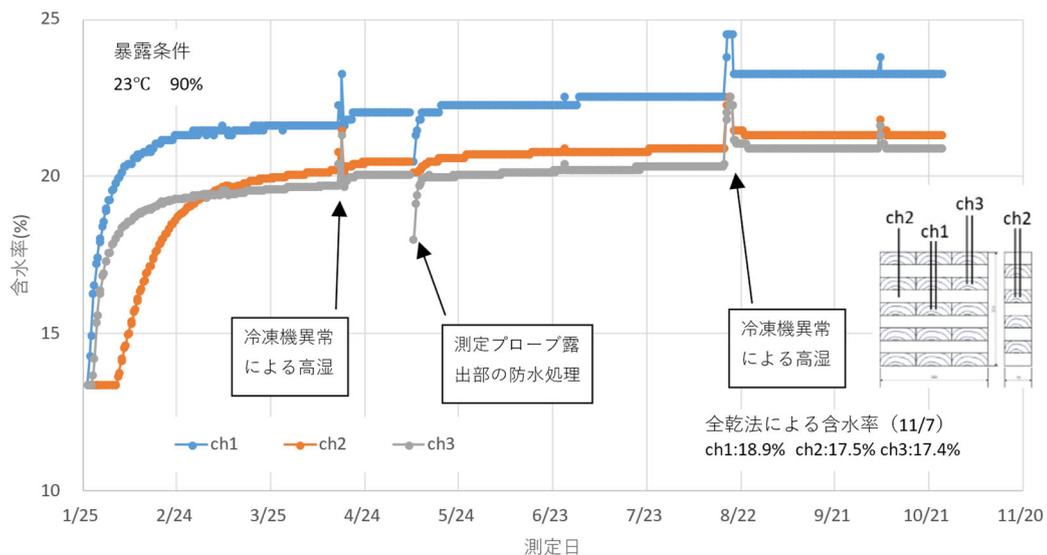


図 3-8-5 CLT 内の含水率経時変化

ただし、全乾法による含水率と本装置が示す値は大小関係は同じであったが、全体に本装置の値が高くなった。この原因として、測定プローブの間にわずかな水分が滞留し抵抗値を下げていることが考えられる。図 3-8-5 では 2 回恒温恒湿機に異常があったことを示したが、このときの湿度は 100%であり、異常が解消された後も本装置の測定値が高いままであることは、高含水率部分が残留している可能性がある。

今後は、雨掛かりのない屋外などの環境下における CLT の内部含水率変動など、より実践的な環境下の測定を行い、本装置の完成度を高めていく予定である。

3.9 CLT におけるヤング率の含水率依存性に関する評価方法

1) 供試材料

用いた材料はスギラミナ M60 (厚さ 30mm×幅 120mm×長さ 2000mm) を母材として 1 本から厚さ方向に 2 枚、長さ方向に 2 枚を取り、計 4 枚のラミナを得、それらを厚さ 5mm×幅 120mm×長さ 600mm の寸法に加工した。厚さ方向にサイドマッチした一方を CLT にもう一方をラミナとして用い、CLT 用ラミナ 30 枚、サイドマッチラミナ 30 枚を得た。それらを 23℃、50%RH の恒温恒湿室で調湿を行った。

2) CLT の製造

恒量に達した CLT 用ラミナとエンドマッチラミナを縦振動法により動的ヤング率を測定した。動的ヤング率が高いラミナを最外層とし、5 層 5 プライの CLT (厚さ 25mm×

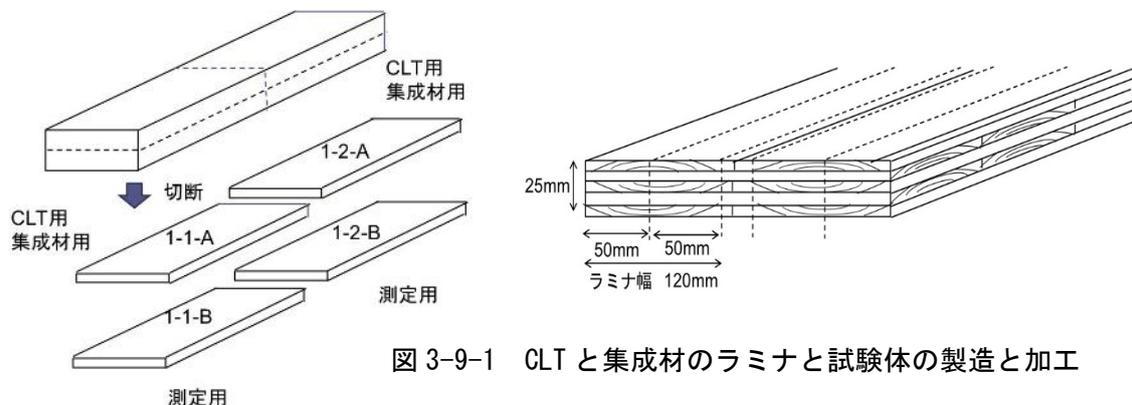


図 3-9-1 CLT と集成材のラミナと試験体の製造と加工



図 3-9-2 防水テープを貼り調湿中の CLT と集成材

幅 600mm (最外層に対し直交方向) × 長さ 600mm (最外層に平行方向)) を 2 枚、比較として 5 層の集成材 (厚さ 25mm × 幅 120mm × 長さ 600mm) を 2 枚製造した。用いた接着剤は水性高分子イソシアネート系接着剤 (オーシカ・ピーアイボンド) で、主剤 100 部 : 架橋剤 15 部で塗布量 250g/m² で、圧縮圧 10kg/m²、圧縮時間 1 時間であった。接着終了後、1 日養生したあと CLT と集成材とも長さを表層の繊維方向とし、ラミナの幅はぎ部分が入らないように幅を 48mm とし、1 枚の CLT から 10 本、集成材から 2 本で、合計 CLT20 本、集成材 4 本を得た (図 3-9-1)。

3) 試験体の調整

各試験体を 23°C、50%RH の恒温恒湿室で調湿し、恒量になった段階で、動的ヤング率を測定し、CLT と集成材については、側面 4 面に防湿テープを貼り表層 2 面から吸湿することとした (図 3-9-2)。動的ヤング率測定後、湿度を 70%RH とし、同時に調湿しているラミナが恒量に達した段階で動的ヤング率を測定したあと、湿度を 90%RH とし、同様の作業を繰り返した。この段階では CLT、集成材とも恒量には達しておらず、材内には面外方向への含水率傾斜が発生していると考えられる。

4) 動的ヤング率の測定

CLT と集成材では最外層のヤング率が全体に影響を及ぼすことから、たわみ振動法を用い、また、試験体のヤング率の平均となる縦振動法と比較することとした。ラミナに関しては、長さ寸法から、共振周波数が約 60Hz となり、測定が困難なため縦振動のみとした。

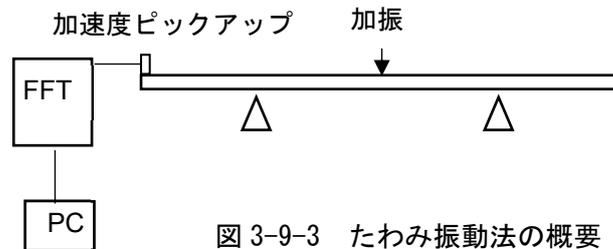


図 3-9-3 たわみ振動法の概要



図 3-9-4 たわみ振動法測定状況

たわみ振動法は、図 3-9-3、図 3-9-4 に示すように試験体の 1 次モードの節となる位置を支持台にのせ、端部に加速度ピックアップを取り付け、中央を加振したときの振動を FFT（キーエンス：NRTX）に取り込み、減衰波形からフーリエ変換されたパワースペクトルによって共振周波数を得た。たわみ振動法の減衰波形とパワースペクトルの一例を図 3-9-5 に示す。

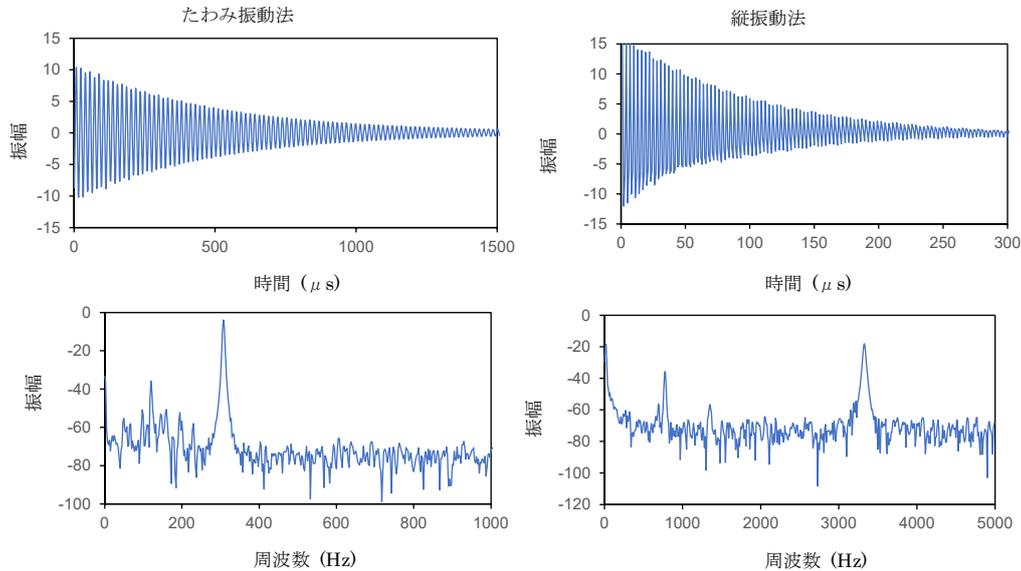


図 3-9-5 たわみ振動法と縦振動法での減衰波形とパワースペクトル

得られた共振周波数から式 3-9-1 から動的ヤング率 (E_f) を算出した。

$$E_f = \frac{48\pi\rho l^4 f^2}{m^4 t^2} \quad (3-9-1)$$

E_f : たわみ振動法による動的ヤング率、 ρ : 密度、 l : 長さ、 f : 共振周波数、 m : 定数、 t : 厚さ

縦振動法は、中央で支持し、一方の端部木口に加速度ピックアップを取り付け、他端を加振し、その振動を FFT に取り込みたわみ振動法と同様に行った。縦振動法で得られた共振周波数から式 3-9-2 で動的ヤング率 (E_l) を算出した。

$$E_l = (2lf)^2 \rho \quad (3-9-2)$$

E_l : 縦振動法による動的ヤング率

5) CLT 各層の含水率の測定

90%RH での動的ヤング率の測定が終了した CLT 試験体をラミナごとに昇降盤を用いて分割し、迅速に重量を電子天秤(エー・アンド・ディ社製:FX-5000i、最小表示値 0.01g)を用いて測定した後に 105℃のオーブンで全乾状態とし、各層の含水率を算出した。

6) 結果

表 3-9-1 ラミナと CLT の含水率と動的ヤング率の平均値

	50%	70%	90%
ラミナ含水率	8.5	11.1	16.5
CLT 含水率	8.7	9.6	12.9
集成材含水率	8.2	9.1	12.5
ラミナ E_l	10.67	10.67	9.83
CLT E_f	7.77	7.90	7.57
CLT E_l	6.69	6.75	6.55
集成材 E_f	10.32	10.54	9.95
集成材 E_l	10.58	10.70	10.28

表 3-9-2 分割した層の含水率

層	含水率
1	14.0
2	11.6
3	11.1
4	12.2
5	14.2

ラミナと CLT の含水率と動的ヤング率の平均値を表 3-9-1 に、試験終了後の CLT の各層の含水率を表 3-9-2 に示す。CLT は側面 4 面を防湿シートで貼ってあるため、表 3-9-1 に示すようにラミナと CLT の含水率を比較すると CLT の変化が小さい。動的ヤング率については、ラミナでは、50%RH と 70%RH の場合とほとんど違いがなかったが、90%RH では含水率が高くなり、動的ヤング率の低下が見られた。CLT においても 90%RH で低下がみられ、CLT の E_f と E_l を比較したところ、 E_f が高い値を示したが、集成材はほぼ同じ値であった。

これらのデータから CLT の含水率と動的ヤング率の関係を明らかにするため、平行層理論を用いて、 E_f と E_l を推定する方法を検討した。 E_f の推定においては、ラミナの長さが厚さに対して長い場合、たわみ振動法での測定が不可能であることがわかり、一部のラミナをたわみ振動の測定が可能な寸法（幅 30mm、長さ 300mm）に加工してたわみ振動法で動的ヤング率を測定した。それらの値が加工前の縦振動法で得られた動的ヤング率とほぼ同じであることから、縦振動法の値を用いた。湿度 50% と 70% ではラミナの E_l がほぼ同じ値であった。ラミナごとの含水率と動的ヤング率の関係を図 3-9-6 に示す。ラミナの 50%、70%、90% の動的ヤング率の変化は、50% から 70% ではほぼ 1 となり、70% から 90% では、0.7 から 1.0 であった。当初はサイドマッチしたラミナの動的ヤング率から CLT の動的ヤング率の推定値を算出する予定であったが、CLT に用いたラミナ(A)と測定用ラミナ(B)で動的ヤング率が異なり、後述する CLT の E_l の推定にサイドマッチし

た測定用ラミナ(B)の値を用いた結果、実測値と大きな違いが生じたため、実際に CLT に使用したラミナ(A)の値を用いた。70%のヤング率として 50%のヤング率を用い、90%のヤング率については、表 3-3 の各層の含水率を補正し、測定用ラミナの 70%と 90%の関係(図 3-9-6)を用いて補間したヤング率を用いた。 E_f の推定には式 3-9-3 を用いて、 $E_2 = E_4 = 0$ とした。その結果を図 3-9-7 に示す。 E_f がすべての湿度状態において、実測値より高い値を示した。このことについては今後検討する必要がある。

$$E_f I = \sum(E_i I_i) \quad (3-9-3)$$

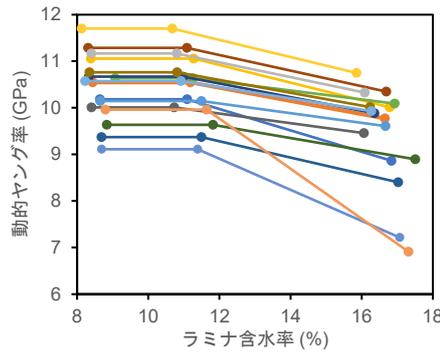


図 3-9-6 ラミナ含水率と動的ヤング率の関係

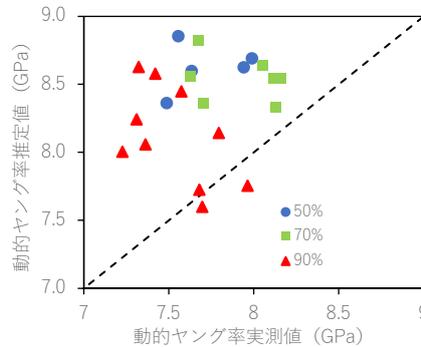


図 3-9-7 湿度ごとのたわみ振動法による動的ヤング率の実測値と推定値の比較

E_l については、各ラミナのヤング率の平均値、 E_f と同様に $E_2 = E_4 = 0$ とした次式と

$$E_l = \frac{E_1 + E_3 + E_5}{5} \quad (3-9-4)$$

強軸方向の 3 層を 1 層と仮定した次式の 2 つを用いて算出し、結果を比較した。

$$E_l = \left(2l \frac{f_1 + f_3 + f_5}{3} \right)^2 \frac{\rho_1 + \rho_3 + \rho_5}{3} \quad (3-9-5)$$

また、サイドマッチしたラミナ B を式 3-9-45 に代入して得られたヤング率を併せて算出した。結果を図 3-9-8 に示す。両式の比較から式 3-9-4 を用いた CLT の推定値が実

測値に最も近い結果が得られたことから、これを用いて各湿度の推定値に算出した（図 3-9-9）。その結果、各湿度状態において CLT の推定値が実測値とほぼ一致した。

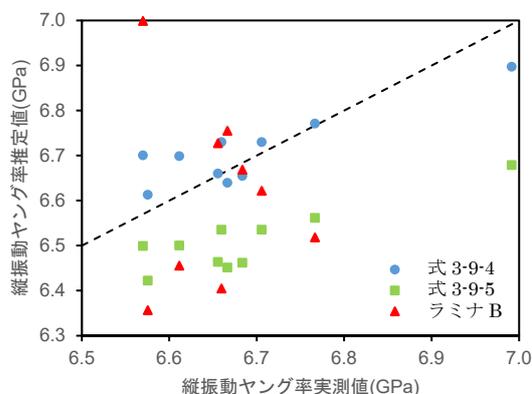


図 3-9-8 各式による推定値とラミナ B による推定値の比較

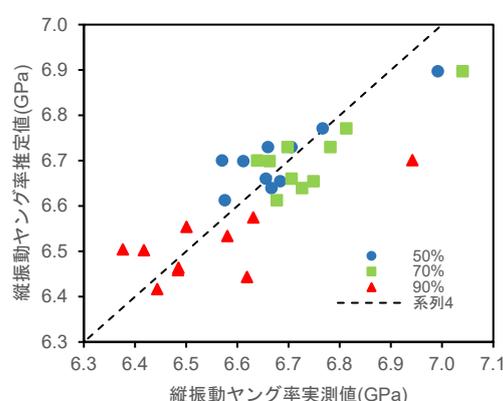


図 3-9-9 各湿度における実測値と推定値の比較

3.10 まとめ

- 1) CLT の接着層の存在が、吸湿の状況によってはラミナ層間に大きな含水率差を生じさせる場合があることが示唆された。
- 2) ラミナ間に隙間が発生した場合、含水率変動に影響を与える可能性が示唆されたが、実際の製品では接着剤の充填などにより、その影響は小さくなると考えられる。
- 3) CLT 内部の含水率測定方法について、誤差要因を検討した。その結果、測定開始から 1 年半が経過した時点でも表層と中心層で 1% の差が確認された。この原因を明らかにするためには、試験体を解体し、内部含水率を全乾法で測定するなどの追加検討が必要である。
- 4) 市販の絶縁抵抗計を用いた多点含水率測定器の検討を行い、含水率 13% 以上において計測的な測定が可能であることを確認した。今後は精度向上を図るとともに、学会等で仕様を公開し、壁体内結露などの研究への活用を検討する。
- 5) CLT におけるヤング率の含水率依存性に関する評価方法として、3 つの異なる湿度条件で平衡状態となったラミナの動的ヤング率を用い、吸湿時に材内に含水率傾斜を有する CLT の動的ヤング率を推定した。その結果、実測値と推定値が一致することを確認したが、この手法については今後も引き続き検証を行う必要がある。

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 報告書再掲修正版)

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。

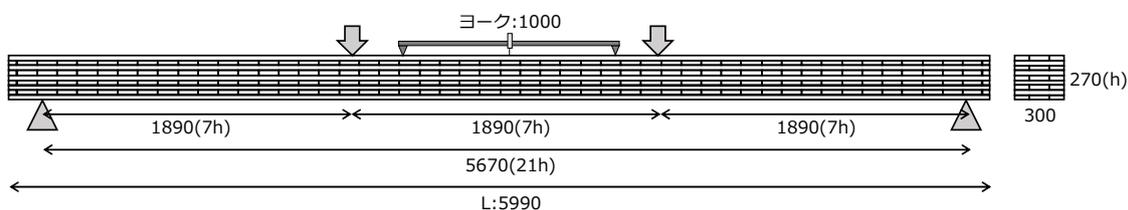


図 4-1-1 CLT の短期曲げ試験の模式図



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 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	TGH法	TGH法	曲げたわみ振動法	TGH法	TGH法
		ヤング係数	ヤング係数	せん断弾性係数	ヤング係数	ヤング係数	せん断弾性係数
		(面内)	(面内)	(面内)	(面外)	(面外)	(面外)
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 応力 (N/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)
		曲げヤング係数 (kN/mm ²)	曲げヤング係数 (kN/mm ²)		
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 ²)	曲げ強度 (N/mm ²)
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。

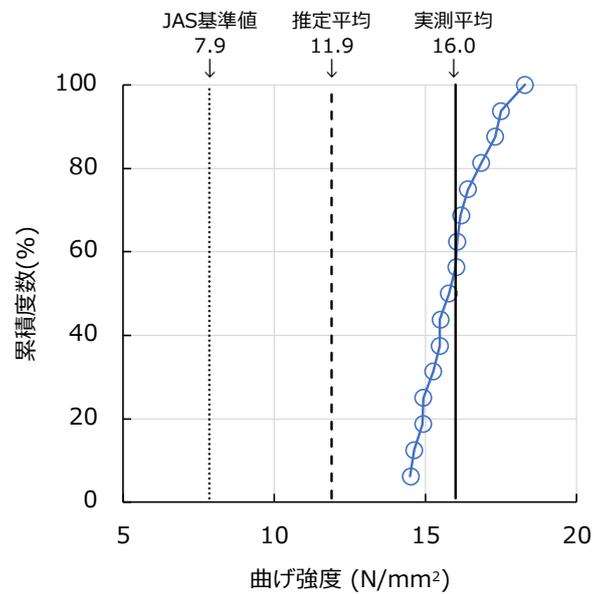


図 4-1-2 曲げ強度の累積度数分布

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 ²)	曲げヤング係数 M30B (kN/mm ²)	曲げヤング係数 (kN/mm ²)	曲げ強度 M60B (N/mm ²)
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 ²)	曲げヤング係数 (kN/mm ²)	曲げヤング係数	曲げ強度 (N/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)	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の詳細は、本報告書付録に掲載の通りである。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、令和 4～5 年度に実施した、応力比 86～94% の各 1 体、76～84% の各 2 体に加えて、66、68、70、72 及び 74% の各 1 体、86、88、90、92 及び 94% の各 1 体（繰り返し 2 体目）について、長期荷重試験を実施した。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 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 曲げクリープ破壊試験の様子

表 4-2-1 長期挙動試験の試験体諸元と試験条件

試験順	応力比 (%)	試験体 No.	繰返し	密度 (kg/m ³)	含水率 (%)	試験荷重 (kN)*	実応力比 (%)	実施年度
1	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	
2	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	
3	84	MB3-DOL84-2	2	367.5	7.8	52.26	84.3	R6
	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	
4	74	MB2-DOL74-1	1	372.5	11.0	46.04	74.0	R6
	72	MB1-DOL72-1	1	360.4	10.0	44.79	71.7	
	70	MB3-DOL70-1	1	382.5	9.0	43.55	70.1	
	68	MB2-DOL68-1	1	365.4	12.0	42.30	67.7	
	66	MB1-DOL66-1	1	357.1	12.5	41.06	66.2	
5	94	MB1-DOL94-2	2	362.4	10.8	58.48	93.7	R6
	92	MB2-DOL92-2	2	368.6	9.0	57.23	92.2	
	90	MB3-DOL90-2	2	374.7	10.3	55.99	89.8	
	88	MB1-DOL88-2	2	358.9	9.8	54.75	88.2	
	86	MB2-DOL86-2	2	365.2	12.3	53.50	85.9	

4.2.2 試験結果

図 4-2-2～9 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。図の掲載順は表 4-2-1 と合わせた。なお、応力比 92%及び 94%の試験体については、設定した荷重に達する前に破断したため、データ解析からは除くこととした。また、応力比 68、70、72 及び 74%の試験体については、試験実施の都合から、200 日以上経過した段階で破断に至る前に試験を終了した。

加力開始後、設定荷重に達した時点の変形量は、66～74%のシリーズではおよそ 60～70mm、86～94%のシリーズでは 80mm 前後となり、応力比が高くなるほど変形量は大きくなる傾向がみられた。設定荷重に達した後、変形量は時間の経過に伴って微増した。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行している箇所は、再加力の影響に起因するものである。特に応力比72%、66%については、2回目の再加力時に変形量が増大しているが、目視による破断の進展等は明確には分からず、原因は明らかにはなっていない。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。

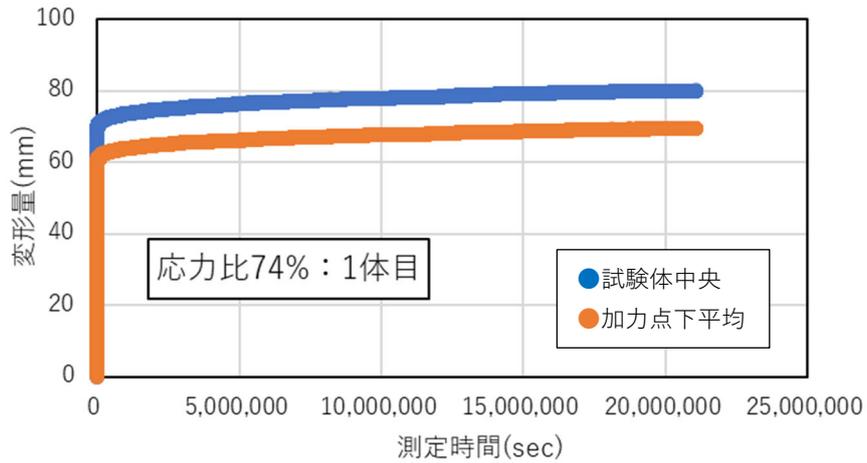


図 4-2-2 9層9プライ CLT の応力比 74%の曲げクリープ破壊試験における変形量の経時変化(1体目)

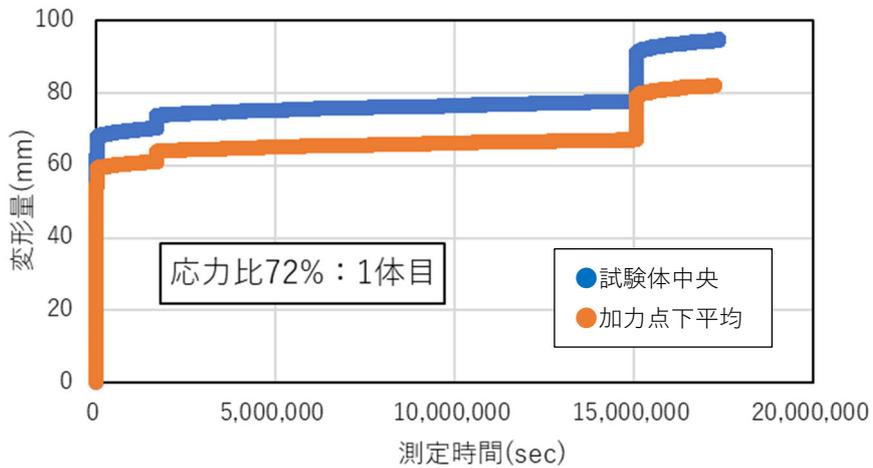


図 4-2-3 9層9プライ CLT の応力比 72%の曲げクリープ破壊試験における変形量の経時変化(1体目)

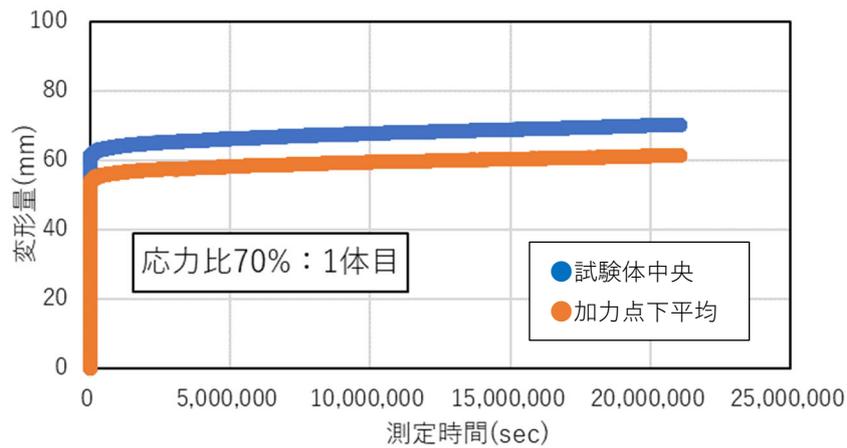


図 4-2-4 9層9プライ CLT の応力比 70%の曲げクリープ破壊試験における変形量の経時変化(1体目)

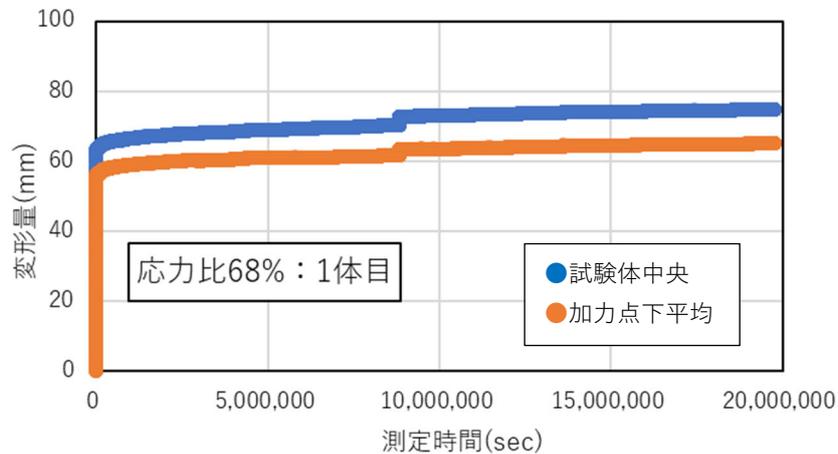


図 4-2-5 9層9プライ CLT の応力比 68%の曲げクリープ破壊試験における変形量の経時変化(1体目)

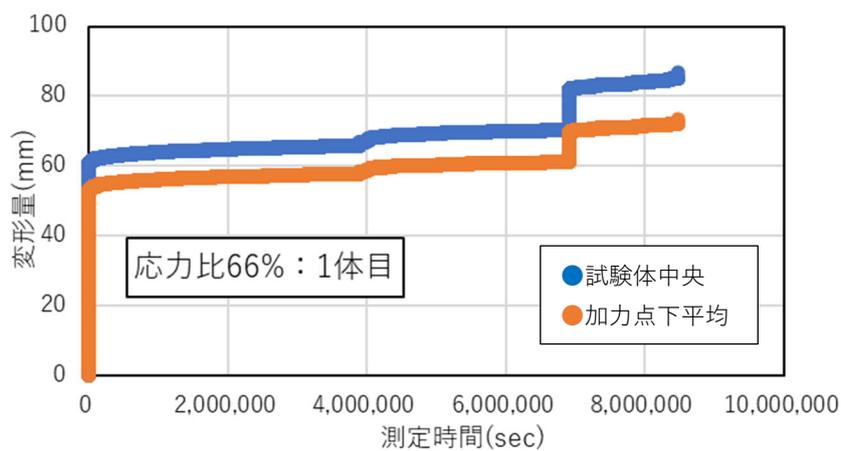


図 4-2-6 9層9プライ CLT の応力比 66%の曲げクリープ破壊試験における変形量の経時変化(1体目)

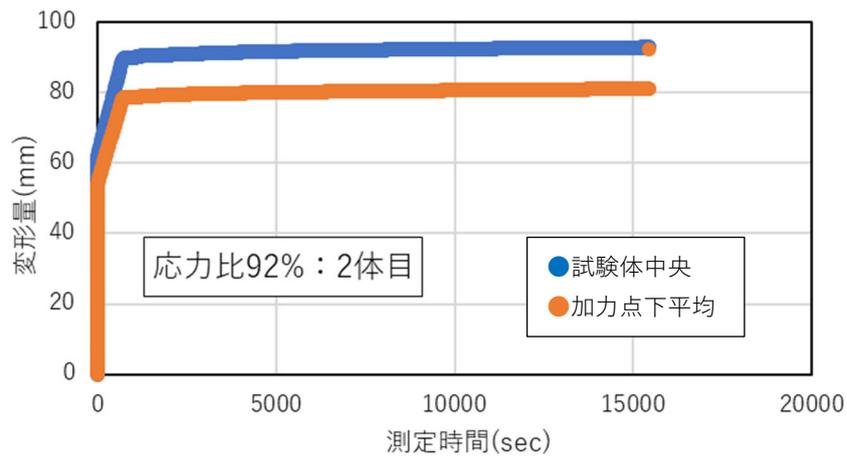


図 4-2-7 9層9プライ CLT の応力比 92%の曲げクリープ破壊試験における変形量の経時変化(2体目)

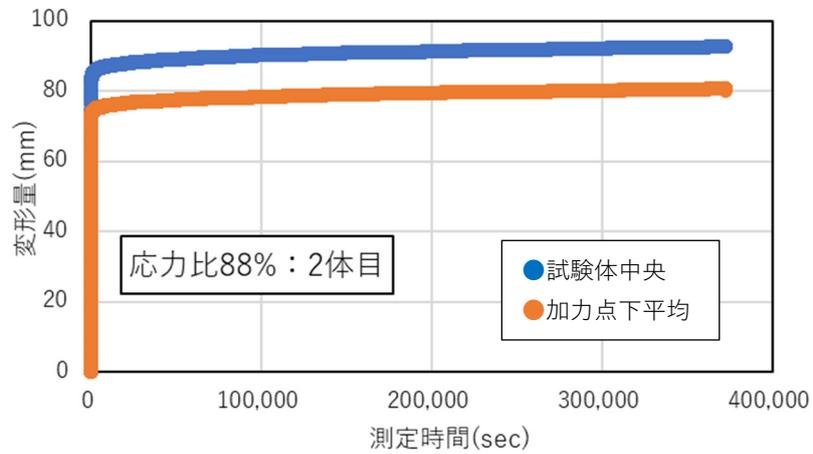


図 4-2-8 9層9プライ CLT の応力比 88%の曲げクリープ破壊試験における変形量の経時変化(2体目)

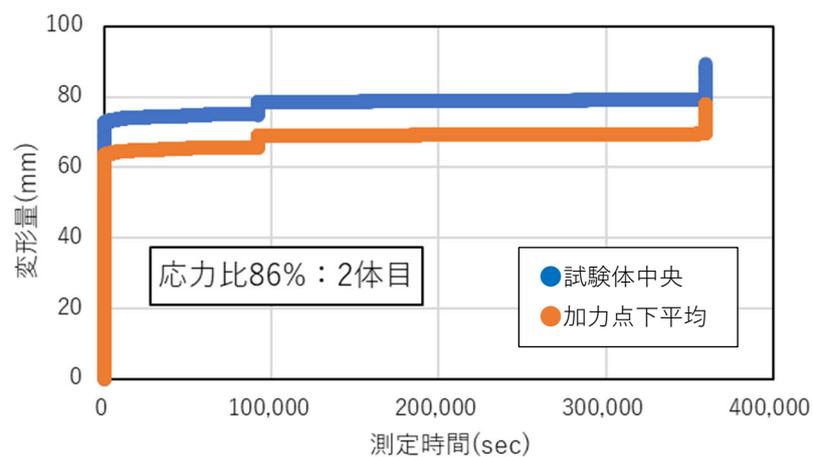


図 4-2-9 9層9プライ CLT の応力比 86%の曲げクリープ破壊試験における変形量の経時変化(2体目)

図 4-2-10 に破壊時間と応力比の関係について、令和 4～5 年度の結果と合わせて示す。本年度実施分については、破断によって試験体を終了した試験体と、破断には至らないものの試験を終了した試験体を分けて記載した。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。

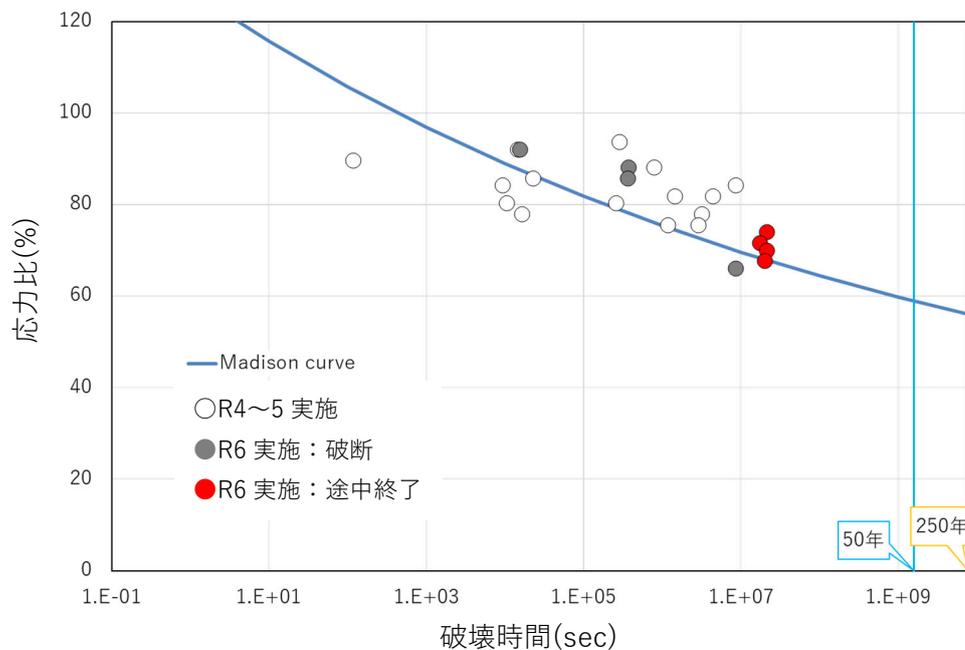


図 4-2-10 9 層 9 プライ CLT の曲げクリープ破壊試験による破壊時間と応力比の関係 (令和 4～5 年度の結果も合わせて記載)

4.3 試験体の破断状況

応力比66%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-66-1 破壊全体状況



写真 4-3-2 DOL-66-1 破断状況①



写真 4-3-3 D0L-66-1 破断状況②



写真 4-3-4 D0L-66-1 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 %

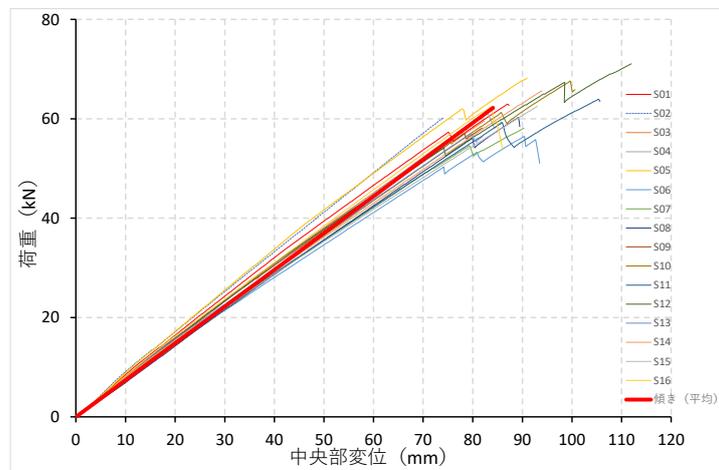


図4-4-1 短期曲げ試験の荷重変形関係と中央部変位による見かけの傾き（平均値）

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66～94%までの試験体とした。76～84%の応力比については2体目の結果も含まれている。

表4-4-2 長期荷重試験（応力比66～94%）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
3	84	MB3-DOL84-2	52.26	84.3
	82	MB1-DOL82-2	51.01	81.9
	80	MB2-DOL80-2	49.77	80.3
	78	MB3-DOL78-2	48.52	78.0
	76	MB1-DOL76-2	47.28	75.6
4	74	MB2-DOL74-1	46.04	74.0
	72	MB1-DOL72-1	44.79	71.7
	70	MB3-DOL70-1	43.55	70.1
	68	MB2-DOL68-1	42.30	67.7
	66	MB1-DOL66-1	41.06	66.2

図 4-4-2 に応力比 80~94%、図 4-4-3 に応力比 66~78%の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、所定の試験荷重に達すると、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。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。

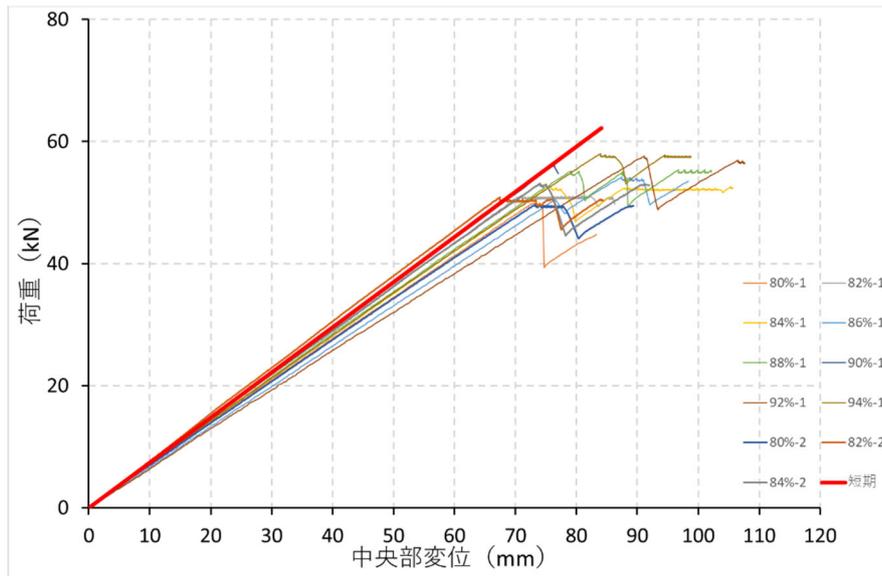


図 4-4-2 長期荷重試験の荷重変形関係（応力比 80~94%）

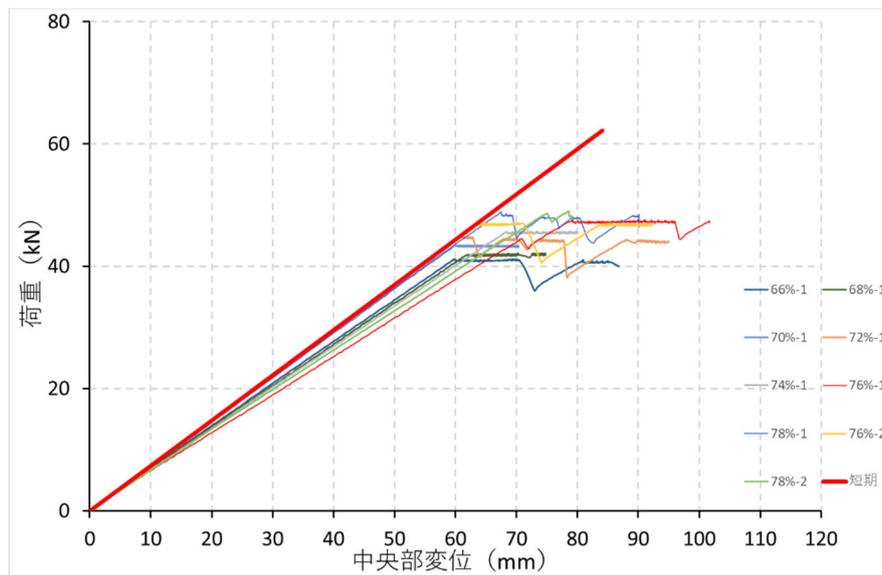


図 4-4-3 長期荷重試験の荷重変形関係（応力比 66~78%）

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.	応力比 (%)	破壊時間 (YDHMS)	破壊時間 (sec)	試験荷重 (kN)	破断時中央部変位 (mm)
MB4-DOL94-1	94	3日6時間7分30秒	281,250	58.48	98.82
MB3-DOL92-1	92	4時間3分15秒	14,596	57.23	107.60
MB2-DOL90-1	90	1分56秒	116	55.99	77.00
MB4-DOL88-1	88	9日1時間55分29秒	784,530	54.75	102.14
MB2-DOL86-1	86	6時間14分3秒	22,444	53.50	98.38
MB1-DOL84-1	84	98日15時間34分	8,523,240	52.26	108.74
MB3-DOL84-2		2時間34分13秒	9,254	52.26	91.94
MB3-DOL82-1	82	50日17時間57分40秒	4,384,660	51.01	86.30
MB1-DOL82-2		16日14時間24分48秒	1,434,289	51.01	84.40
MB2-DOL80-1	80	2時間56分2秒	10,563	49.77	83.28
MB2-DOL80-2		2日22時間36分2秒	254,162	49.77	89.36
MB1-DOL78-1	78	36日6時間25分47秒	3,133,547	48.52	90.12
MB3-DOL78-2		4時間30分41秒	16,242	48.52	79.16
MB3-DOL76-1	76	32日23時間52分1秒	2,850,722	47.28	101.68
MB3-DOL76-2		13日11時間12分16秒	1,163,536	47.28	92.28
MB2-DOL74-1	74	243日16時間2分30秒	21052950.5	46.04	80.02
MB1-DOL72-1	72	201日2時間52分13秒	17376733	44.79	94.90
MB3-DOL70-1	70	243日16時間6分22秒	21053182.7	43.55	70.38
MB2-DOL68-1	68	228日21時間45分30秒	19777530.5	42.30	74.78
MB1-DOL66-1	66	98日1時間54分57秒	8474097.8	41.06	86.84

ここで長期荷重試験の荷重変位関係を短期曲げ試験で得られた見かけの傾きを補正し、初期変位に達した以降は応力比の荷重を維持したまま直線的に変位し破断するモデルと仮定し、長期荷重試験における破断時の中央部変位の検討式を求めた。

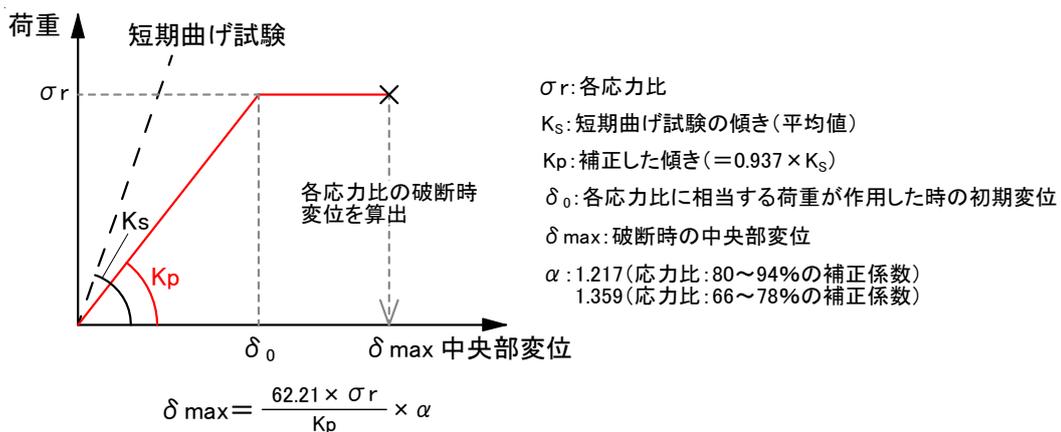


図 4-4-4 各応力比の破断時の中央部変位算定モデルと検討式

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。これと検討式による算定値を比較したものを表 4-4-4 に示した。概ね破断時の中央部変位を捉えており、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検討式による算定値は近い値を示していた。検討式では時間に関する変数が不要なため、長期荷重試験をこれから実施しようとする際に最大変位を簡易的に求めることができる利点がある。今後実施される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。

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

$\delta(t)$: クリープ変形を含む全変位量

δ_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 4-4-4 学会推定式と検討式による算定値の比較

試験体No.	破壊時間 (sec)	実験値		算定値	
		初期変位量 δ_0 (mm)	破断時 中央部変位 (mm)	学会推定式 クリープ変位 (mm)	検討式 破断時中央部変位 (mm)
MB4-DOL94-1	281,250	82.30	98.82	103.14 (4.19)	102.66 (3.73)
MB3-DOL92-1	14,596	90.48	107.60	103.16 (4.3)	100.47 (7.09)
MB2-DOL90-1	116	76.06	77.00	80.11 (3.88)	98.29 (21.65)
MB4-DOL88-1	784,530	78.28	102.14	102.62 (0.46)	96.10 (6.27)
MB2-DOL86-1	22,444	86.36	98.38	99.55 (1.17)	93.92 (4.74)
MB1-DOL84-1	8,523,240	75.18	108.74	112.85 (3.63)	91.74 (18.53)
MB3-DOL84-2	9,254	72.64	91.94	81.93 (12.21)	91.74 (0.22)
MB3-DOL82-1	4,384,660	70.74	86.30	101.77 (15.2)	89.55 (3.63)
MB1-DOL82-2	1,434,289	67.42	84.40	91.07 (7.32)	89.55 (5.75)
MB2-DOL80-1	10,563	72.64	83.28	82.18 (1.33)	87.37 (4.67)
MB2-DOL80-2	254,162	73.22	89.36	91.39 (2.22)	87.37 (2.27)
MB1-DOL78-1	3,133,547	67.10	90.12	94.62 (4.75)	95.12 (5.25)
MB3-DOL78-2	16,242	74.64	79.16	85.33 (7.22)	95.12 (16.78)
MB3-DOL76-1	2,850,722	78.58	101.68	110.20 (7.73)	92.68 (9.7)
MB3-DOL76-2	1,163,536	63.68	92.28	85.10 (8.43)	92.68 (0.43)
MB2-DOL74-1	21052950.5	68.4	80.02	109.46 (26.89)	90.25 (11.33)
MB1-DOL72-1	17376733	61.06	94.90	96.34 (1.49)	87.81 (8.07)
MB3-DOL70-1	21053182.7	59.94	70.38	95.92 (26.62)	85.37 (17.55)
MB2-DOL68-1	19777530.5	62.04	74.78	98.82 (24.32)	82.93 (9.82)
MB1-DOL66-1	8474097.8	59.72	86.84	89.61 (3.08)	80.49 (7.89)

() 内は実験値と算定値の誤差(%)を表している。

5. 進行状況の管理

5.1 第1回検討委員会

開催日時：令和6年6月25日（火） 15:00～16:50

開催場所：文京区民センター（東京都文京区本郷4-15-14）（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 （木質建材評価サービス）

外部有識者委員（web出席）

委員 秋山 信彦 （(国研)建築研究所）

委員 槌本 敬大 （(国研)建築研究所）

オブザーバー（対面出席）

福島 純 （林野庁木材産業課木材製品技術室）

上田 萌香（林野庁木材産業課木材製品技術室）

オブザーバー（Web出席）

吉田 優一朗（国土交通省住宅局参事官（建築企画担当）付）

佐藤 秀憲 （農林水産省新事業・食品産業部食品製造課基準認証室）

中田 直 （(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、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、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：

外部有識者委員 河合 直人（工学院大学建築学部建築学科）

荒木 康弘（国土技術政策総合研究所）

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) 事業内容について

(1) 事業計画の概要（資料 2-1、資料 2-2）

本事業実施者主査の森林総研・宮本室長から、資料 2-1 に沿って「9 層 9 プライ CLT の長期挙動データ等の収集・分析という課題名で、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。CLT に関わる 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じ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おり、本事業により 9 層 9 プライが告示に載るように基礎的データを蓄積する。」と本事業の目的の説明があった。また、「本事業は 5 項目で構成しており、①CLT の曲げ性能に影響を及ぼす製造因子の影響、②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委員会の開催・運営及び成果の取りまとめとなっている。実行体制は昨年度と同様である。実施内容や進捗について外部有識者の先生方に報告し、ご意見いただく。」と説明した。さらに、資料 2-2 により、「検討委員会は、本日 6 月 25 日に第 1 回を行い、第 2 回は仮として秋頃に現地検討会等企画したい。年度末には第 3 回のまとめの検討委員会を予定している。曲げ性能の試験体についての製造試験は担当が CLT 協会である。本日、試験体案を審議・御了解いただければ、速やかに発注・製造という流れを考えている。曲げ性能試験の担当は森林総研である。試験体ができるまでの間は準備期間とし、試験体ができ次第、実施・解析を行う。長期試験については、森林総研と中央設計で担当する。これまでの試験を継続して行うこととなる。併せて、北林産試の含水率試験も同様の継続した実施計画になっている。報告書は、年度末にかけてデータが揃った段階で作成するというスケジュールとしている。」と説明した。

(2) 曲げ性能試験の実施計画（資料 3-1）

曲げ性能試験の実施計画について、森林総研・井道室長が「CLT の曲げ性能に影響を及ぼす製造因子の検証を検討している。E/G、つまり、ヤング係数とせん断弾性係数が、CLT の各構成でどのような値を持つかなどを検討した。現在の直交集成板 JAS の曲げヤング係数の基準は、E/G=50 として設計されている。CLT は様々な構成があるが、どんな E/G を有するかについて、網羅的に測定されたことはなかった。今回の測定で、E/G が 50 を下回ると、低減係数は計算上 0.9 より大きくなるので安全側、もし 50 を上回ると低減係数は計算上 0.9 より小さくなるので危険側になる。9 層 9 プライから 3 層 3 プライの強軸、弱軸も含めて、各構成で変動スパン法と TGH 法によってヤング係数 E、せん断弾性係数 G 及び E/G を算出した。3 層 4 プライの強軸、静的だけ、50 を超えることが分かった。弱軸ではその傾向は見られなかった。下限値ギリギリで製造した CLT は、基準のヤング係数を少し下回るおそれもあるということが分かった。今年度は、9 層 9 プライ CLT については、外層スギ M90、内層スギ M30 の構成と、ヒノキ M90、スギ M30 の構成の Mx90 の仕様について、スギとヒノキでの比較検証を行いたい。また、ヒノキの M90 を使った場合に、内層がスギ M60 の場合と M30 の場合でどう違うか、同様にヒノキの M120 を使った場合についても検討したい。」と説明した。安村委員長が、「全体の G は、構成によって異なる。RT の層が多くあれば、それだけ G は小さくなるということではないか。RT 自体の G はおそらく小さいのでは。結果は層の影響を受けているか。」と質問し、「弱軸の層が多くなると G が小さくなる。層の影響を受けている。」と回答した。さらに、安村委員長が、「E/G=50 というのは、CLT の場合、50 ということか。これは一般的なことか。RT の G がどれくらいかは分かるか。」と質問し、「直交集成板 JAS の場合、50 と設定して設計している。RT の G は、測定していないので分からない。教科書等載っていると思うので確認する。」と答えた。青木委員が、「せん断の弱軸で、その差が大きくなった理由は、どういうことが考えられるか。」と質問し、「動的と静的の違い等、原因は不明である。構成が極端なものの方が下がりやすいという印象はある。」と井道室長が回答した。さらに青木委員が「構成が極端というのは、強軸と弱軸の差が大きい方ということか。」と問い、「強軸と弱軸の位置と割合である。」と回答した。安村委員長が「動的とは、鉛直方向の振動か。」と質問し、井道室長が「鉛直方向で、CLT を寝かせたときの鉛直方向の振動である。」と回答した。さらに安村委員長が「普通、動的の方が E は高くなると思う。縦と鉛直で違うか分からないが、縦だとせん断が入らないから、真に近い。動的の E と静的の E が同じになるとはどういうことか。」と問い、井道室長が「具体的には全く一緒ではないが、傾向的には一緒である」答えた。青木委員が、「今までの JAS も CLT の規格も、結局は全て E/G を 50 で設定して、基準を決めているということか。」と確認し、「その通り。」と井道室長が答えた。

銘建工業の渡部氏が宮本室長のラミナの強度に関するコメントの求めに対して、「ヤング係数として出現が一番多いのが 7.0~8.0、次いで 8.0~9.0 であり、大体 8 前後に平均が来るようになっている。6.0 未満となると、5.0~6.0 の右側のところが、いわゆ

る 6.0 未満という、M30 に該当するような材料になっており、基本的には同一等級に近いような構成になっている。もちろん、産地などによる多少のブレや、ロットの違い等はあるが、大体 8 から 9 ぐらいに平均が来ているので、外層材については、高い方のヤングで値を設定して、試験体を製造したい。」とコメントした。これに対し、小関委員より、「ヤング係数のデータは等級区分機のデータか。それとも実際に曲げたデータか。ラミナの厚さは 30 ミリくらいか。昨年の現地検討会で厚いラミナでは縦振動が効かないと聞いたが。」と質問があり、渡部氏が「等級区分機のデータである。試験機にかける時のラミナの厚さが約 33 ミリである。実際には、ラミナの厚さが大きくなると、どうしてもたわみにくいものがあり、測りにくくなるという傾向がある。打撃式グレーディングマシンと連続曲げ式マシンの両方で現在データを取っている」と回答した。

(3) 含水率挙動試験の実実施計画（資料 3-2）

北林産試・朝倉研究主幹が、「CLT の接着層が透湿性能にどれぐらい影響を与えるかというデータを測定している。材料を薄くして中に接着層 1 層だけ残した試験体を使い、まず面外方向の試験を実施している。それ以外にも、各ラミナの接着層やフィンガージョイントが、どのように影響を与えるかを測定した。やはり、接着部があるとかなり透湿抵抗が増えることが分かり、これらをシミュレーションに取り込んだ。このデータ蓄積を引き続き行っていきたい。CLT 内部の含水率シミュレーションでは、接着層がどのような影響を与えるかを検討した。接着層の存在によって、含水率の分布に差が生じる可能性があり、今後の検証で考慮していかななくてはならない点だと考えている。モデル自体はほぼ完成している。また、CLT 内部の含水率も直接測定している。森林総研の長期試験の試験室に設置した試験体の含水率は、長期荷重試験の試験体を入れ替えた際の雰囲気温湿度の変動に対応して、少し変動するという傾向が見て取れたが、試験期間中はほぼ一定になっており、試験は安定的に行われているだろう。今年度の実実施計画は、まず①透湿抵抗に及ぼす影響検討ではデータの蓄積を行う。②長期のモニタリング手法の検証と改良では、長期間の含水率測定が可能な測定ロガーにおける含水率とその電気抵抗の関係性の構成曲線をより確かなものにして、誤差の要因の整理とロガーの検討を行う。③含水率分布と動的ヤング率の関係性の検討では、小型の CLT モデル試験体を造り、吸湿時の動的ヤング率の経時変化を測る。③において、まずシミュレーションで、試験体周囲の相対湿度、20℃の 65%を 85%に変更したときに、どのように内部の含水率が変動するかを検証する。これにより、層の含水率の経時変化を把握できる。これらを元に、その含水率に各層の含水率水準に置いたラミナを用意し、動的ヤングを測定する。さらに小型の試験体を作って実際に吸湿させ、吸湿量の経時変化を測定し、各時点での動的ヤングを測定する。動的ヤングを平行層理論によって推定を試み、果たしてそれが可能か、どのくらい合致するかを実施する。」と説明した。青木委員より、「動的ヤングの測定について、試験体の含水率の変動をずっと追いつけることと思うが、それをやりながら定期的に計測してみるということか。動的はたわみ振動か。木口にアル

ミテープを貼っているが、その状態のまま計測するのか。」質問があり、「定期的に計測するつもりであり、縦振動である。アルミテープは剥がした方がよいとは思いますが、うまく剥がせるかどうかは検討していきたい。」と朝倉研究主幹が回答した。「貼ったり、剥がしたりはあまり望ましくないため、それを踏まえてたわみ振動かと尋ねた。」と青木委員がコメントした。安村委員長が、「最終的には、さっき述べていたような CLT 内部の構造と合わせてシミュレーションし、全体のものを出していくということになるのか。含水率が場所によって異なると、その場所によって強度が違うことになる。それを何かシミュレーションして、強度の推定ができるということか。」と問い、「層内の含水率は予めシミュレーションを行う。また、各試験体数を多くし、経時的に吸湿させていくときに、試験体を少しずつ壊していったら、内部の含水率を実際に全乾法で測ることも並行して進めたいと考えている。期間中に何回測定するかは検討中だが、任意の時点での各ラミナの含水率分布でラミナを調整して、そのときのヤング率を測定する。各層のラミナの中でも含水率分布は発生していると思うが、今回に関しては、それは一定としてみなして検討していく。」と回答したのに対し、「各層のラミナの含水率というのは、どうやって測るのか。」と問い、「同じように吸湿させた CLT の試験体を別に用意しておき、その CLT のヤング率を測るときに、各層をばらばらに切断して、全乾法で測っていくつもりだ。」と回答し、さらに、「熱伝達のようなもので測れるのかと思ったが」と問い、「今回の含水率測定器での測定も考えているが、それより全乾法で測った方が早いと思っている。」と答えた。渋谷研究ディレクターが、「もし含水率と弾性係数の間にリニアの相関があったとすると、縦振動を取った場合は、含水率分布によらず平均含水率で議論ができると思う。たわみ振動にすると、外の含水率が高くて動的弾性係数が下がっていると、たわみ振動で取れる複合体のヤング係数はぐっと下がるということがあるので、たわみ振動も合わせて取った方が反応性が高いことも考えられる。両方測定してはいいかか。」とコメントし、「検討する。」と朝倉研究主幹が応じた。安村委員長が、「長さ方向にもし分布があるとすると、質量も違うのか。どうやって計算しているのかよく分からないが、たわみだと質量が多少ずっとあるわけで、それが変わっていったりするのということも少し気になるが、あまり影響ないかもしれない。それもやってみれば分かるだろう。」とコメントし、「測定については少し検討すべきところがあると思うので、今後実施する予備試験で早急に検討を進めていきたい。」と応じた。渋谷研究ディレクターが、「恐らく、たわみ震動の回数によって、含水率の長手方向の分布の差は影響が違ふと思う。端部の含水率の高低は、端部が節になる場合はあまり影響がなく、端部が腹になるような高次のものだと影響が出るといった可能性もあると思うので、その辺りはちょっと面白いと思う。」とコメントした。

(4) 長期挙動試験の進捗・実施計画 (資料 3-3、3-4)

宮本室長が、「一昨年度から 9 層 9 プライの長期試験を始めており、試験条件は、応力比の水準が 66~94%の 2%の刻み、各応力比について N=2、基本的には応力比の高い

方から1体ずつ実施するという形で進めている。試験機が5台なので、5体ずつ繰り返し、現在のところ4サイクル目まで実施している。昨年度、84～76%の水準を2回繰り返すことができた。4サイクル目が一番応力比が低い、一番長く試験が続くであろう荷重水準を、今年（2024年）の初めぐらいから開始しており、今も継続している。66%は破断してしまったが、68～74%の応力比のものはまだ今も継続しており、もうすぐ5か月ぐらいになる。現状、マジソンカーブの上側に届いているので、半年ぐらいは実施するつもりだが、どこかで次の試験に切り替えるタイミングを決めなければと思っている。今のところ、想定外に全体の傾向から外れるような試験結果は無い状況であり、順調な進捗と思っている。最終的に試験時間の最も長いものを試験するので、どうしても試験の開始が秋から冬にはなると想定すると、最終的な結果が出るのは来年度になると見込んでいる。」と説明した。青木委員が、「確認だが、既に終わっている試験体の中で、破断ではなく、試験入れ替えの時期が来たから終えたというものは含まれているか。」と質問し、宮本室長が、「全部破断して終わっている。」と答え、「今回初めてそういう時間的に終了させることができそうかどうか。その辺が分かるようなプロットにするとよいと思う。」とコメントした。

戸田社長が長期試験時の破断状況と試験結果の解析について、「R5年度は76、78、80、82、84%の各2体を実施しており、引張側のフィンガージョイント部の破断が生じて、断面性能が低下、それから変形の増大が起き、結果的にローリングシアが発生して破壊している。応力比80%の場合を示しているが、同様に82%でも、引張側のフィンガージョイント部が破断をして、ローリングシアが発生して破壊に至っている。他の試験体も同様な破壊で、結果的には、ローリングシアで壊れてしまう。短期荷重試験の結果も、このような破壊性状であった。資料3-4のグラフは、これらの長期荷重試験と短期荷重試験の結果を踏まえたものであり、グラフ中の赤の線が短期荷重試験の傾きの平均になっている。細い線は長期荷重試験の結果であり、中央部が75～85mm程度で変形が増大して行って破壊に至る。短期荷重試験の傾きに対して、傾きを超えた方向辺りで破壊が生じていることが読み取れる。この点線の部分が短期荷重試験の傾きだとすると、この赤の線のような形で、ある補正した傾きを作り、先ほどの応力比の荷重を入れると、そのときの壊れる変位をある程度予測できないかと考えた。長期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と、短期の見かけの傾きを傾き低下率とすると、およそ平均で0.733となる。黄色の0.984は即座に壊れてしまった試験体なので、除いて平均を算出している。この傾き低下率を使って補正した傾きが青の直線であり、このいろいろな塗りつぶしの丸が破断時の変形を表しているが、この青の補正した傾きの近傍に実験値があることが分かった。これを用いて今後長期試験を実施する応力比で、この簡易な方法で実験値と破断時の変形が予測可能か、という検証を進めていきたいと思っている。」と説明した。渋谷研究ディレクターが、「もしかすると、この傾き低下率という数字自体が何かの関数になっている可能性もあって、一つの数値にならないかもしれない。例えば、応力レベルとの関係があるとか、破壊時間との関係があるとか、何か

そういう性質を持っている数値かもしれない。」とコメントした。小関委員より、「短期の場合は、完全に弾性みだいなたわみ荷重曲線を描いて壊れるのか。」と聞かれ、井道室長が「その通り。塑性域はほとんどなかった。」と答えた。小関委員が「そうすると長期の方を見ていると、壊れてグーッと下がって、また上がるような挙動で、応力が再配分されているみたいなどころも見えるかと思うが。」とコメントし、「短期でも一瞬再配分されるが、荷重が進んでいるためにすぐ壊れる。」と応じた。小関委員は、「長期は、何かどこか壊れてもというところはあるのか。」と質問し、「壊れていく様子をずっと観察しているわけではないので推測が入るが、少しずつ波を打って壊れているところがあって、最初は引張側のフィンガージョイントで、何かしらメキメキと壊れていくとか、接着層付近が破断するとかがありながら耐えており、さらに変形が進んでいくとか断面性能が低下していくところで、耐えられるところまで耐えて壊れているのではないかと推測している。」と戸田室長が答えた。渋沢研究ディレクターが、「実は長期の試験のときは、小破断が起こったときにそのまま加力し続けると、下にたたきつけてしまう可能性があるのも、変形の増大速度がすごく大きかったり、または絶対変形がすごく大きかったり、それから荷重が急激に下がってしまったようなときに、荷重をかけ続けるのではなくて、試験を一旦止める安全機構がかかっている。したがって、通常の短期の試験よりも応力再配分は起こりやすいというか、そういうことはある可能性はある。そのままずっと加力し続けるようにはなっていないため。」とコメントした。青木委員が、「だとすると、実体と若干変わってくる可能性がある。長期で壊れるのはまずないだろうが、もしそういう現象が起きたときには、常にデッドロードが載っている状態なので、今のようないかなにか破壊現象が起き始めたときに、止めようとする動きはないはずだから、意外と短期の試験に近いような状態で、一気に破壊が進む可能性もある。」コメントした。戸田社長が、「今の青木委員の話に、直接お答えできるかどうか分からないが、学会の推定式があり、荷重が乗り続けている状態の中で、変形がどうなるかという式になっていると思う。このときに破壊時間などを入れて、学会推定式を用いて実験時の破壊時間などを入れると、学会推定式のクリープ変位量、いわゆる荷重が乗り続けた状態の変形に対して、先ほどの簡易な方法であるが、数字が結構似通っているところがある。この辺は20mmぐらい違うが、先ほどの荷重が伸びていって破断しているという状況に対して、補正した青の直線があったと思うが、乗り続けているものの変形の増大と予測が合っているというので、その実験と加力が止まる、もしくは急激な変位が進んだときに、それ以上加力し続けないとかという加力上の補正は入るものの、今まで検討されてこられたクリープ変位量とは近いところがある。もしかするとあまり心配がいらぬのかとは勝手ながら思っている。」と説明し、青木委員が了解した。宮本室長が、「実験上は、破断を検出して、そのまま耐えているものもある。それについては再加力しているが、駄目なものはいきなり破断するので、実体と違うといえは違うが、大きく違わないとも考えられる。」とコメントし、青木委員が、「急激な進行を、試験機を壊すのを防ぐため、ちょっとそういうストッパー的な機能があるけどということか。現象は変わっているわ

けじゃない。」と受け、渋沢研究ディレクターが「再加力するときには、荷重が一回止まったところと、次の再加力をして、そこに上がったところまでの時間はなかったことにして、ずらして取っているので、その部分はないものとみなせるだろうと思っている。」と述べ、「荷重水準に依るが、再加力のときに、どうしても変形が進んでしまうことはある。」と宮本室長が述べた。

安村委員長が、「設計上は、破壊した、しないということだけではなくて、こうやってギュッと上がっていったら、事実上、駄目なわけだろう。そういうクライテリアのようなどこまで上がったらというのがあるか分からないけれども、例えば地震の場合だと、最大を超えて落ちてきても、あるところまで取っている。要するに、そこで8割というのも何だが、そこで壊れなくても、もうそこでおしまいというような、何かそういうクライテリアが入ってもよいかもしいない。」とコメントし、渋沢研究ディレクターが、「資料のグラフを見ても分かるとおりに、塑性変形はクリープでもほとんどなくて、壊れるまで直線的で0.8~0.9Maxまでみたいな、粘り部分はほとんど見られないといえる。」と応じた。安村委員長が、「ほとんど弾性的にというか、あまり変形が進まない、粘りがなくて壊れるという形なのか。それは怖い壊れ方と言える。変形がどれぐらいまで壊れるのですか。例えばスパンに対して何%まで行ったら壊れたとか。」と質問し、井道室長が、「長期荷重試験の荷重変形関係と短期荷重試験の傾きのところで見ると、短期試験は平均80mmぐらいで壊れている。」と答え、「スパンは幾らか。」と聞き、青木委員が、「270mmの21倍。80mmとの比は1,000分の14。」と補足した。安村委員長が、「1,000分の14か、100分の1じゃなくて。結構小さいと思える。壊れ方として結構厳しい。普通250分の1とかなので3倍ぐらいだ。80mmというと、結構短期だけど、怖いとも言える」と述べた。青木委員が、「同じぐらいの集成材と比べたらどうなのか。」と聞き、「製材だったら粘るだろう」と安村委員長が述べ、井道室長が、「製材だったら間違いなく粘る。集成材はどうだろうか。フィンガージョイントがあるので、同じように壊れるかもしれない。」と答えた。青木委員が、「やっぱり欠点を抱えている。」と述べ、安村委員長が、「やっぱり引張で壊れるから、粘りはない。」と述べ、青木委員が、「製材も節があったらだめでは。」と聞き、井道室長が、「その通りだが、節は意外と粘るときもある。」と答えた。安村委員長が、「製材は、変形がビュッと少しは上がる。変形は増える。」と述べ、「製材の塑性域は、集成材、CLTよりも大きい。」と井道室長が述べた。渋沢研究ディレクターが、「塑性域が大きいのか、比例限が低いのかというのは、どちらで議論すべきなのか。確かにそこは違くと、通常の変形でアウトという場合と違う可能性がある。」と述べた。安村委員長が、「逆に言うと、割に床とか、たわみの方は変形で決まるから大丈夫だという意識がある。だけど、その余裕があまりないとすると、結構強度的に厳しい。変形で決まっているということになるかも分からない。そういうことが分かっていたら、それも頭に置いて設計すればいい。割に床とかは変形で決まるから、強度とかは大丈夫みたいな意識が強い。」と述べ、渋沢研究ディレクターが「それはやっぱり比例限の上限荷重が低いからかという気がする。そうすると、実際に設計

をするときの応力のレベルが、そんなところまで行くのかということなのかもしれない。そのため、変形はオーケーという言い方はして大丈夫なのかどうか。弾性域と見ていいのは、耐えられる荷重に対してどれぐらいかというところの比率が違うという意味かもしれない。」と述べた。安村委員長が、「どちらにしても、鉄にしても、イールドポイントを超えると壊れる。倒壊するので、地震と違って、もう超えたら駄目であるが。一般的にギシギシ言っても大丈夫だった——大丈夫というのは危ないのが分かるとか、そういう意識を持って、これはこういうものだとして理解をする。設計のクライテリアとしては、完全にそういうことは決まっているので、そこで壊れたら、それは設計どおりという話である。」と述べた。

4) その他

小関委員が、「今回の中で、特に含水率分布と動的ヤング係数の関係の検討というのを非常に注目している。JAS では、強度試験などの試料を 65%の相対湿度で、20℃で養生するという規定があるが、材料が大きくなると平衡に達するまで養生はできない。そうすると、含水率と強度の関係から、得られた強度をその含水率で補正するという作業が必要になる。実際に含水率の変動で強度やヤング係数がどれぐらい変わるかというのは非常に重要だが、これはなかなか実験ができていなくて、ASTM で用いている小試験片の含水率と強度の関係の値を使う以外なかった。これは実感として、変化率は非常に大きいと思う。そうすると、今回初めてなのか分からないが、実際に含水率分布と動的ヤング係数という形で関係が明らかになってくる。CLT でも集成材でも検証するということなので、それが最終的に静的なヤング係数とか強度との関係に落とし込めてもらえれば非常にありがたい。行政的な話ではあるが、合板検査会やメーカーさんも助かるのではないかと考えられるので、よろしく願いしたい。」とコメントした。

最後に、安村委員長が、「色々と話を聞き、大分データが色々出ていと理解した。それをもう少し継続して成果が出てくれば、大分いろんなことが分かってきて、実用になると思われるので、よろしく願います。」と所感を述べられ、検討会を終了した。

5.2 現地検討会

開催日時：令和6年11月25日（月）14:30～17:00

場所：（地独）北海道立総合研究機構林産試験場（旭川市）

出席者（敬称略）

外部有識者委員：安村 基 （静岡大学名誉教授）
榎本 敬大 （（国研）建築研究所）
小関 真琴 （木質建材評価サービス）

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、河野 幸喜、宮本 康太

（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、高山 光子、須賀 雅人、秋津 裕志

川西 博史、伊藤 洋一

（公社）日本木材加工技術協会

信田 聡、村田 光司

議事：

1) 挨拶

北海道立総合研究機構林産試験場・川西場長より、ご挨拶をいただいた。

2) 実験施設等現地見学

当事業で実施している、9層9プライ CLT の内部の含水率挙動に関する実験装置や実施中の実験状況について見学を行い、実験担当者から説明に対して質疑を行った。また関連して、木質材料の水熱物性の評価を行う施設等を見学した。

また、屋外に建築されている CLT 実験棟の見学を行うとともに、CLT の耐久性等に関して質疑を行った。

さらに同試験場の敷地内にある北海道立北の森づくり専門学院を見学し、木材や CLT 等木質材料を使用した校舎内を見学した。

3) 質疑・講評

2) の現地見学全体や実験の詳細について、質疑を行った。また、有識者委員各位より講評をいただいた。

4) その他

今後の予定として、2月中に第2回検討委員会を開催すること、報告書原稿の提出締め切りは追って設定することなどを決定した。



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7年2月19日（水）15:00～17:00

開催場所：TKP 飯田橋ビジネスセンター カンファレンスルーム 3C（対面・web 併催）
（東京都新宿区下宮比町 3-2 飯田橋スクエアビル 3階）

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）

外部有識者委員（web出席）：

委員 青木 謙治 （東京大学大学院農学生命科学研究科）

委員 秋山 信彦 （（国研）建築研究所）

委員 荒木 康弘 （（国土技術政策総合研究所）

委員 河合 直人 （工学院大学建築学部建築学科）

委員 小関 真琴 （木質建材評価サービス）

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）

上田 萌香 （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 （国土交通省住宅局課長補佐）

吉田 優一郎（国土交通省住宅局参事官（建築企画担当）付）

佐藤 秀憲 （農林水産省新事業・食品産業部食品製造課基準認証室）

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、井道 裕史、河野 幸喜（対面出席）

渋谷 龍也、平松 靖、宮武 敦（web出席）

（一社）日本 CLT 協会

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、須賀 雅人、秋津 裕志（対面出席）

近藤 佳秀（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）

資料：

- 資料 1 議事録（案）（第 1 回検討委員会）
- 資料 2 令和 6 年度成果報告書目次（案）
- 資料 3 CLT の曲げ性能に影響を及ぼす製造因子の検証
- 資料 4 CLT の長期変形挙動に関する測定方法の妥当性の検討
- 資料 5 CLT の長期挙動データの収集
- 資料 6 試験体の破断状況と破断時の変位に関する検討

議事：

1. 前回議事録（案）確認（資料 1）

第 1 回検討会の議事録案を確認した。

2. 今年度成果について

(1) 報告書目次（案）について（資料 2）

宮本室長が資料に基づき、「報告書は昨年度と同様の構成である。1 が事業計画、2 が CLT の曲げ性能に影響を及ぼす製造因子の検証（担当：森林総研）、3 が長期変形挙動に関する測定方法の妥当性の検討（担当：北林産試）、4 が長期挙動データの収集と解析（担当：森林総研・中央設計）、他、議事録、総括という形になる。」と説明した。

(2) CLT の曲げ性能に影響を及ぼす製造因子の検証（資料 3）

井道室長が、「スギのヤング率が高いラミナが採れることが分かってきた。今までスギだと最高でも M60 を使っていたが、M90 も一定の割合で採れるので、外層に M90 のスギを使った CLT を製造した。また、通常内層にはスギ M30B を多く使うが、内層にスギ M60B を使った場合の性能を、Mx120 と Mx90 の CLT 試験体を製造して検証した。使用したラミナのヤング係数の分布をみると、スギのラミナで M30B ではヤング係数の高い範囲からもたくさんラミナを採っており、M60B では規格の中でも使えるという 50 もしくは 55 以上というものは採っておらず、若干上側のものを使っている。M90B では、下の 75 から 85 以上ぐらいのものは使っていなかった。ヒノキのラミナは、M90B を採ったが、これはスギよりもさらに上側の等級のものを使っている。M120B では、真ん中辺りの 120 以上が一番多く、下のものは使っておらず、高いものはだんだん減っていくというものを使った。」と、使用したラミナのヤング係数の分布について説明した。引き続き、井道室長が強度試験の結果について、「ラミナの曲げ試験結果では、左が等級ごとの見かけの曲げヤング係数、右が等級ごとの曲げ強度、×が平均値である。見かけのヤング係数を見ると、等級ごとに大体きれいに推移しているのが分かり、ヒノキの M90B とスギ M90B、これはどちらも同じ等級であるが、恐らくヤングの採ったところの分布の影響だと思うが、スギの M90B が若干高くなっている。右側の曲げ強度も大体等級どおりだが、最後のスギ M60B と M30B が逆転しているのは、密度の影響と考えている。ヒノキの M90B とスギ M90B は、ヒノキの方が若干高い強度を示した。散布図において左の

図が見かけの曲げヤングと曲げ強度の関係で、当然ではあるが、きれいに正の相関が見取れる。一方、右の図は密度と曲げ強度の関係だが、フィンガージョイントのラミナは密度との曲げ強度の相関があり、これで見ると、スギの M30、緑の×が、スギの M60、黄色の×より密度が高い範囲に分布しているため、曲げ強度も大きくなったと考えられる。これらのラミナを使い、CLT を 14 種類製造して曲げ試験を行った。構成は、9 層 9 プライと 5 層 5 プライと 3 層 3 プライ、いずれも外層が強軸である。それぞれの構成の中で、9 層 9 プライだと外層がスギ M90B とヒノキ M90B のもの、5 層 5 プライだとスギ M90B、ヒノキ M90B、ヒノキ M120B が外層で、それぞれ内層がスギの 60 と 30 のもので、3 層 3 プライも 5 層 5 プライと同じ構成である。写真は 9 層 9 プライの曲げ試験の様子で、下側のフィンガージョイント部から壊れており、他の構成でも同様に壊れた。しかし、外層がヒノキの M120B という強いものを使うと、曲げでなく、せん断で壊れるものも幾つかあった。3 層 3 プライのヒノキ M90B では曲げで壊れ、外層がヒノキ M120B では右先端で壊れるものもあった。強度試験の結果は、9 層 9 プライも 5 層 5 プライも 3 層 3 プライも、外層スギよりも外層ヒノキの方が、等級が同じでも数値が大きいことが分かる。これはラミナの結果と同様に、ヒノキの強度が高かったことが影響したと思われる。内層をスギ M60B にして外層がスギ M90B かヒノキ M90B とした場合、ヒノキの方がどちらも曲げ強度が高かった。また、どの試験体も基準強度は十分に超えていることが分った。外層の等級は同じで、内層がスギ M60 とスギ M30 と違う場合、5 層 5 プライでは、外層がスギ M90B であろうとヒノキ M90B であろうと、外層ヒノキ M120B であろうと、傾向は明確ではなかった。一番左は内層がスギ M30B の方が大きく、一番右は内層がスギ M60B の方が大きいというような結果となった。3 層 3 プライも、大体どちらも同じという結果で、実態を等価断面法で推定すると、内層が変わってもほとんど強度は変わらず、実験結果と同様ということが分かった。いずれにせよ、外層はスギ M60 でも基準強度を大きく超えている点では問題ないと考えられる。」と説明した。安村委員長より、「これは一般論だが、このラミナ自体がスギの中でもヤング係数が高いという話だが、これは、例えば集成材製造用ラミナとして、最初から考えて採っているものなのか、全くそういうことを考えないで、とにかく集材しているようなものか、どちらなのか。」と質問した。銘建工業の渡部氏が「基本的には、普段 CLT 用に調達しているラミナであり、径級的には 24 から 28cm ぐらいの原木から採っている。」と答えた。安村委員長が「一般に CLT の製造者は、そのように CLT 用のラミナを採るだろうが、ある程度選別しているのでは。どのように行っているのか。丸太から作っているのか。」と質問し、「弊社のグループ会社の製材所から今回、基本的にはスギを材料調達しているが、原木の状態で購入してそのまま挽いている。試験体用に挽いてはいるが、他の用途でも使う一般的な原木から採材をしている。大断面用のラミナだと割と幅が広く、もう少しヤング係数が控え目な傾向にあるが、CLT 用は割合幅が狭いこともあって、近年は今回のようにヤング係数が高めになる傾向がある。」と答え、「昔だと、スギが弱いというイメージがあったが、最近のこのようなデータを見ていると、スギでもそんなに低いもの

はむしろ無いような感じがするが」と述べ、「ロットの差もあるとは思いますが、工場で統計を取っている限りは、平均的に大体ヤングで 8kN/mm^2 前後になっているような印象である。」と渡辺氏が答え、「検証してはいないが、最近のスギの大径化が影響していると思う。成熟外部が多くなり、その分、外側の材がたくさん採れるようになり、特に幅の狭いラミナでは樹皮に近い側が採れるので、そこが大分効いていると考えられる。」と補足した。安村委員長が「現段階でどうということではないが、そのように原材料が変わってきているということも頭に入れておく必要がある。」と述べた。榎本委員が「大径化は間違いないと思うが、そもそも今回の産地では、銘建工業社がそこから材料を入れ始めた当初から弾性係数は高めだった。地域ではなくて、品種によって数字が全然違うことがある。したがって、年々高くなっているという考え方はどうかと私は感じるが、いかがか。」と意見し、「本格的に統計を取って今回の産地での CLT を作り始めたのは 2011 年ぐらいから。そこから入れ始めたスギの弾性係数の分布が上がってきているのならそうだが、私はそうは思わない。最初から今回の産地のスギの弾性係数は高かったと認識している。」意見し、井道室長が「確かに品種の影響もあると思う。ただ、品種だけなのか、その他の影響もしているのかというところまでは分からない。」と応じた。渡部氏が「社内の統計のみの話で恐縮だが、最初の 5 年ぐらいの統計で M60 未満の材料の出現率は大体 3~4 割だったが、ここ 3、4 年の統計では 60 未満の出現率が 1 割を切るようなレベルになってきているため、感覚的には上がっている印象がある。」と述べた。榎本委員が「母集団が伐採した山が同等と見なせる場合には、それ一つだけでも大きな発見だが、山が違ったから弾性係数が違うというのはあり得ると思う。同じように採材した山とか、その環境に有意な差がない場合には、それが言えるのでは。」と述べ、渡部氏が「曖昧な回答だが、数万枚のデータから採っているのだから、そんな感触を得ている。」と答え、「いや数万枚といえども有意な差があったら、それは山が違うからだと思ってしまう。」と述べた。安村委員長が「いずれにしても、強度が高くなっているかどうかは別にしても、CLT の工場において、高いパフォーマンスのものが作れる材が入ってきているということか。」と問い、「その通りと思う。」と井道室長が答えた。渋谷研究ディレクターが「4 ページの右側のグラフでは密度も高めである。これがどういう理由なのかは分かりにくいだが、構造材に使う場合に、例えば密度が高め、現場での判断で重めなものを選ぶとか、そういうことは少しずつ行き渡っていると思う。本質的に日本のスギが強くなっているのかというのは難しい。」と述べた。青木委員が「スライド 7 枚目にせん断破壊をした写真があるが、これは外層を高い等級のものにした場合だけ出現したということでしょうか。」と質問し、井道室長が「全試験体であったかは定かでないが、確実に外層が高いものの方がせん断の確率は上がっている。」と答え、青木委員が「割合的にはどうか。」と問い、井道室長が「外層がヒノキ M120 で、5 層 5 プライも 3 層 3 プライも半分程度は出たように記憶している。」と答えた。青木委員が「結構出る。そのモードの違いによって強度が下がるようなことは特にないか。」と問い、井道室長が「極端に下がってはいないが、ばらつきもあり明確には分からない。」と答え、青木

委員が「違っていると面白いというか、傾向が見えるかと思ったが、そこは分けていないということか。」と問い、井道室長が「追加で検証してみる。」と答えた。安村委員長が「せん断で壊れたものは低いからよいということではなく、きちんと分けて、せん断で壊れたものがはっきり分かるようにしておいた方がいい。」と意見し、「対応する。」と応じた。

(3) CLTの長期変形挙動に関する測定方法の妥当性の検討(資料4)

朝倉研究主幹が「CLTの長期挙動に関する測定方法の妥当性の検討について、含水率の内部の変動を追ったものを今回御説明する。本年度の実施内容は、ラミナ間に隙間が連続する場合の吸湿による含水率の変動、長期荷重試験時の内部含水率モニタリング手法の精度検討、CLTにおけるヤング率の含水率依存性に関する評価方法である。まず、ラミナ間に隙間が連続する場合の吸湿による含水率の変動だが、こちらが、今回のシミュレーションモデルであり、上にあるのが仮想的に考えたモデルになり、強軸、弱軸両方とも全てのラミナ間に6mmの隙間が空いている形にしている。計算するのは、上の左側の図にある断面に対して、2次元シミュレーションを行った。右側のように、点線の箇所でシミュレーションを行っているが、下の図の真ん中のbのように、歯抜けのような形になる。外側と側面側が外気と接しているところは隙間がある。右側のように、実際には接着剤のはみ出しとか、接着剤がラミナの表面に存在するであろうと仮想して作ったモデルがcである。aは何も隙間がない。隙間がない場合、接着層があると、そこで湿度の動きが止まり、このように内部含水率に影響し、分布が生じることは示した。下が全体の含水率変動の経時変化だが、各層についてシミュレーションした。20℃、相対湿度50%から85%に上げて全体の重量変化を実測したところ、ほぼaは実測値に合った形になった。bの隙間がある場合、外気に接している形になるため、非常に吸湿が早くなり、重量が一気に上がる挙動といえる。右側のcの接着層があったとすると、接着剤によって湿気の吸収が抑えられ、若干緩い形になっていくことが分かった。もちろん、b、cは、本当に極端な例でまずあり得ないが、もし、あったとしたら最大値としてはこれぐらいになるということである。実際の製品は隙間がないものがほとんどである。昨年、銘建工業社でもデータを拝見したが、通気試験による検証を行っても空気の流れは全然ないという結果があるそうで、実際には一番左端のaになるということだと思う。もし隙間があると検証結果のような可能性もあるので、製造時には隙間がないように作るのがベターである、ということが今回の結果となる。次に、内部含水率モニタリング手法の検討では、実際に、CLTの内部含水率がどのように変動しているかを調べるために、長い針状のセンサーの両側にゴムのチューブをつけて先端だけ出して、その先端部のみ通電するようにする。試験体に穴を開け、深さに応じて針の位置を変えながら2本刺して電気抵抗式の含水率計として測定している。小さく切ったラミナを重ね、数を増やしたり縮めたりした試験体について測定を行ったが、含水率の測定値には差がなく、現段階では深さによる影響はないと判断している。また、ラフな含水率計である

ので、小型の試験体を使って、含水率の条件を幾つかに分けて、較正曲線を作成している。図は較正曲線を載せて補正した数字で、表層が高く内層が低いままで移行している。実際には、湿度に対する平衡含水率が同じ 50%としても、ラミナによって平衡含水率が違うことはよくあるので、その差が現れたのかもしれない。今のところは、こういった結果になっている。したがって、森林総研に置いてある実大の試験体を切り、直接その針が刺さったところの内部含水率を調べるという検証が必要と考えている。今回使っている多点式の含水率計が入手できないため、市販の絶縁抵抗計という建築用の設備の測定器を活用する検証を行っている。左側が構成図で、右側が電気抵抗と全乾含水率の間を測ったものであり、含水率が下がると電気抵抗が小さくなるが、機械の性能的に 13 ぐらいまでが下限限界と思われる。これ以上は比較的良好な一致性が見えているので、例えば壁体内の結露などに対するモニタリングには使えると考えている。」と説明した。

引き続き、CLT におけるヤング率の含水率依存性に関する評価方法について、秋津専門研究員が「1本のラミナから図のように4枚のラミナを採ってマッチングさせたものをCLTとした。1本の棒材のラミナから4枚のラミナを採り、枝番のAをCLT及び集成材に用い、枝番Bをそのままラミナの状態に用いてヤング率等を検討した。調湿は23°C50%RHで行い、まず、120枚のラミナを調湿し、縦振動法でヤング率を測定した。ヤング率の高いものをCLTの最外層に、低いものを弱軸側に用いて、残りを内層の両軸側と集成材に用いた。水性高分子-イソシアネート系接着剤を用いて、CLTと集成材を作った。でき上がった集成材を調湿し、たわみ振動法と縦振動法でヤング率を測定した。たわみ振動法では2点支持の一端に加速度ピックアップをつけて中央加振で固有振動数を測定してヤング率を測定した。縦振動法では、中央支持で木口面にピックアップを取り付けて、反対側から打音して衝撃を加えて固有振動数を測定する方法とした。集成材、CLTは4面、側面をシールして、上下面、表裏面から加湿する方法とした。最初に相対湿度50%にした状態で全ての試験体を測り、70%、90%にて測定し、一部を含水率測定用とし、残り半分は内部含水率分布を見るために各層をスライスして含水率を測定した。図がCLTの減衰波形とスペクトル波形の一例で、たわみ振動法の固有周波数は300~350Hzぐらい、縦振動はCLTで3,000~3,500Hzぐらい、集成材で4,000Hz前後であった。ラミナでは、湿度50%のときに含水率が8.5%、70%で11.1%と変化はしているが、ヤング率はほとんど変わらなかった。湿度90%になるとラミナの含水率が16.5%となり、それに対してヤング率も9.8GPaぐらいに下がった。CLTの含水率は、平均的に見るとほとんど変わっておらず、これをスライスして、湿度90%まで持ってくると表面と内部の内部含水率の分布が生じた。内部が11.1%となり、湿度70%と同程度の含水率になった。CLTと集成材での湿度による縦振動法とたわみ振動法のヤング率を比較すると、CLTに関してはたわみ振動法が高い値を示した。しかし、その中で湿度の違いによるヤング率の違いはそれほど変化がなく、90%になると若干低下した。集成材もそれほど大きな違いはなく、縦振動法とたわみ振動法では、若干、縦振動法のヤング率が高くなる傾向が示され、これは一般的なものと思われる。それぞれのマッチング

したラミナの値から CLT 及び集成材の動的ヤング率について、一般的な方法を用いて、弱軸側のヤング率を 0 として推定した。縦振動法の場合は、3 層と強軸側の平均を断面の中の割合で 5 分の 3 で算出した。たわみ振動法は一般的な方法でヤング率を推定した。その結果、たわみ振動法では推定値がいずれの湿度においても高く、90%では両方の値がやや近くなった。縦振動では推定値が低くなり、50%、70%ではある程度推定値に近くなったが、90%では明らかに推定値が低くなった。縦振動の場合、断面の平均値であるから、実際用いたラミナのヤング率は、90%の高い湿環境下では含水率が 2、3% 違う可能性があり、その影響で全体的に実測値が低くなったと推測される。たわみ振動の場合、今回の測定だけでは明確な理由は不明で今後検討したい。」と説明した。安村委員長が「ヤング率の含水率依存性に関する評価方法というので、たわみ振動と縦振動があるが、図の振幅は何の値か。単位は。」と質問し、「電気信号の値を振幅とした。加速度計のピックアップによる値なので電圧である。」と秋津専門研究員が答えた。小関委員が「最後のところはラミナの動的なヤング係数を使って集成材とか CLT のヤング係数を推定したということか。」と質問し、秋津専門研究員が「そうだ。これは動的な実測値及びラミナもその値を使って算出した。」と答え、小関委員が「集成材は剛性が担保されているので、例の曲げ剛性、断面二次モーメント、断面係数を使った式が出てくるが、CLT の場合はそれぞれの層に使っているラミナというのは横に並列しているので、ヤング係数の求め方は結構難しいのでは。」と述べ、秋津専門研究員が「幅 120mm のラミナで 60cm×60cm の CLT を作り、それを 5cm の幅で幅はぎの部分で強軸側の 1 本のラミナで判断できるように裁断したので、最外層は同じラミナのヤング率になると思う。」と答え、小関委員が「幅はぎ部分は接着しているか。」と問い、「接着していない。」と秋津専門研究員が答えた。「図を見ると、ヤング係数の実測値と推定値を比較したときに、実測値の方が高めに出ているということか。」と小関委員が問い、「たわみ振動は実測値が低めで、縦振動は実測値が高めという、逆の傾向になっている。」と答え、小関委員が「カウントしなかった弱軸のヤング係数も含め、なかなか難しいという気がした。」と述べた。渋谷ディレクターが「中立軸からの距離が同じ層に複数のヤング係数を持つものがあっても、そのヤング係数の平均値の層が一つあると置き替えてよいというのが平行層理論なので、小関委員の指摘のところは、もし、複数のラミナが入っていたとしても平均を取ればよいと思う。縦振動法の式だが、それぞれの層の固有振動数の平均値が全体の固有振動数と置いて、 $V=2fL$ で $V^2\rho$ で E を算出するのが正しいと思う。ここで 5 分の 3 を掛けてしまっているので、この分だけ下がっていると思う。ここは $(f_1+f_3+f_5)=f$ で、その f を使い、 $V=2fL$ 、 $E=\rho V^2$ と計算するともう少し合ってくると思う。もう一回、検討して欲しい。」と述べ、秋津専門研究員が「検討する。」と応じた。安村委員長が「これは M_x で行っていて、ラミナの配置は。同一ではない？縦振動というのは基本的に圧縮、引張で効くので、真ん中と外というのが、同じ割合という変だけれど、圧力がかかると思うが、曲げはたわみが外から効いてくる。その影響が、これで見ると出ているようだがいかがか。」と質問し、秋津専門研究員が「外側をヤングが

高いものを選びどう影響するかを検討したが、想定よりも計算すると高い。実際の測定自体も縦振動に比べて若干高く、その辺りをもう少し検討する余地はある。今回ラミナ自体は縦振動のみの測定であった。ラミナの縦寸法が長くて固有振動数が 60Hz ぐらいになってしまう。加えて、きれいに振動しなかったこともある。その後、たわみ振動で測れる寸法に切り出してたわみ振動と縦振動を測ったが、それほど大きな違いがなかったため、今回ラミナは縦振動の値を用いてたわみ振動を推定した。色々議論されると思う。」と答え、安村委員長が「これは複雑だが、例えばラミナは普通に曲げて測ったヤング係数なので、それを使って比べていけば分かるが、元々の縦振動で測っているというのが静的な曲げのヤング係数と違う。」と述べ、秋津専門研究員が「含水率の影響を見るため、恒温恒湿室に入る寸法にするという制約があった。その部分に対しては、もう少し大きな材長でたわみ振動で測れる寸法のラミナを用いて、常温もしくは恒温恒湿室で調湿したもので比較してみなければいけないと考えている。」と答え、安村委員長が「理解できるが、その目的が分かりにくい。含水率の影響という意味では分かるが、実際製造されるときの測り方で、例えば縦振動とたわみでどちらをどう使ったらどうなんですかという議論が混ざっているから分かりにくい。」と述べ、秋津専門研究員が「縦振動だと、断面の平均を採れるので非常に分かりやすいが、たわみ振動では層構成によってその値が変わるので、含水率の内部分布が出てきたときに、たわみ振動としてどのような挙動をとるのかも見たかったというのもあり、両方を測定した。」と述べ、安村委員長が「含水率の影響がないときに、CLT の縦振動とたわみ振動でどういう差があるかということは、既に分かっているということか。」と問い、秋津専門研究員が「初期の 23°C50%RH で調湿したものに関しては、ある程度は分かると考えていたが、違いがはっきりせず、そのまま続けた。来年度には基本的な形状のものをモデルとし、たわみと縦振動の違いを考察する必要があると思う。」と答え、安村委員長が「ラミナの場合は、多分、縦振動とたわみ振動か静的か知らないが、それはもう大体分かっている。縦振動でヤングを測っておいて現場で使う。しかし、CLT については、例えば製材だったら縦振動でやって、それでグレーディングするというのはあり得ると思うが、CLT は多分そういうわけにいかないだろう。その辺りはまだやられてはいないとは思いますが、どうなのか。」と問い、渋沢研究ディレクターが「本事業とは別に、非等厚構成の CLT という検証も始めている。ラミナの厚さが 30mm 前後より厚いラミナを使う場合、従来の小荷重による曲げ変形を与えるタイプのグレーディングマシンでは物理的に入らない、与えるべき荷重がすごく増えて変形が生じないという可能性がある。小荷重載荷型のグレーディングの代わりに、打音を使ったグレーディングを導入しなければいけないということは今後あると思う。一つは打音を使った弾性係数の測定を CLT でも今後やっていかなければいけなくなる。もう一つは、内部の含水率に関して、外層と内層で含水率が今回の発表の中では 1% ぐらいの違いだったが、それぐらい違ったまま推移する可能性があり、これが強度的な影響はないのかと指摘されており、この外層と内層で 1% ぐらいの差の場合には問題がないのかというところを実験的に確認した。今回、たわみ振動

で測定をするのか、縦振動で測定をするのかということも含めて、多くの試験を実施したので、影響因子を今の段階では弁別できていないが、もし縦振動で測定した結果で算出ができれば一番良いが、内部の含水率と外層の含水率の影響はたわみ振動で出やすいだろうということで、たわみ振動も行った。まだ今回の結果からは何とも言えないが、これらを検証するのが目的である。」と述べた。

(4) CLT の長期挙動データの収集 (資料 5、資料 6)

宮本室長が「試験の状況はこれまで通り、試験体は長さ約 6m、幅 30cm、厚さ 270mm、スギ Mx60B のもので継続している。応力の水準は 66%から 94%の 2%括約である。本事業では 70%、80%、90%付近をそれぞれ 10 体、2%ずつ区切った形で行っている。各応力比につき試験体数は 2 体で、試験の応力比の高い方から N=1 で試験を行うスケジュールである。令和 4 年度には一番応力比の高いものを 5 体行い、昨年度は 80%前後の計 10 体を行った。今年度は、一番応力比の低い水準である 70%前後のものを 5 体と、一番応力比の高いもの 5 体を行った。その結果、変位の経時変化の傾向は、加力初期に立ち上がって、変形がじわじわ進むものとなった。ところどころ段差があるが、これは軽微な破断を検出してもまだ荷重に耐えていることから再加力を行った箇所である。70%前後の水準では、今回、66%以外の 4 体はずっと加力が続いて試験が継続していたが、次の試験に切り替えるため、破断する前に除荷して試験を終了した。66%のものは最後のところで破断をした。再加力をした際に変形が幾分進む場合と進まない場合と両方あり、これが応力の再配分等の影響であるかを突き詰めることは難しいが、何か考察としては入れるべきと思う。例えば、この 72%のものは二度目の再加力をした際にすぐ壊れると予想されたが、試験は継続できたこともあり、なかなか現象としてもつかみにくいところがある。図の白い丸は令和 4、5 年度のデータである。今年度、赤い丸は途中終了したもので、このまま続けていれば、もう少し右に動いたかもしれない。黒丸は破断まで加力したものである。応力比 74%から 68%までは途中終了で、66%は破断した。90%前後は、90%と 94%が加力中に破断してしまったため、この図には含めていない。今は、すべてのデータに対して一定の関係を導くことはできないが、概ねマジソンカーブに対しては、図のような状況である。この後の予定は、残っている一番応力比の低い 66~74%の 5 体になる。加力中に破断してしまった水準はもう一度実施することを考えており、追試験は全体のデータが出た段階で条件を検討したい。」と説明した。続けて、戸田社長が「試験体の破断状況について、応力比 66%を一例として紹介する。試験体の加力点間のフィンガージョイント部で破断して変形が進む中で応力の再配分をし、最終的には層内せん断破壊で破断してしまう。また、短期曲げ試験結果を基に、長期荷重試験の破断時の変位を推定できないか検討している。16 体の短期曲げ試験結果をこの図で示すが、16 体の試験の中で、最大荷重の平均値と見かけの傾きが得られ、代表的な直線として太い赤線で示した。こちらを基に、対象となる応力比 66~94%の長期荷重の試験について検討した。76~84%については各 2 体を検討した。長期荷重試

験において、横軸は、時間ではなく変位であるが、まず、所定の試験荷重に向けて荷重が直線性を保ちながら増加し、各応力比の所定の試験荷重に達した以降については、時間経過に伴って部分的に壊れながら破壊を繰り返しながら変位が増加していき、最終的に破断に至る。ここで二つ、ざっくりとグラフを分けているが、右手に 66～78%、左手に 80～94%のグラフをまとめて示しており、見比べると、66%、応力比が低いものでは変位が少し長めに出ており、80～94%については少し短めに出ていることから、ざっくりとここで一つ区分した。長期荷重試験における破断時の中央部変位をどのような形で推定できるかということで、一つ目としては、短期曲げ試験、この点線で示している、この傾きを赤の線のように補正をした。直線的に変位が増加していき、応力比に達した以降については水平に変形していく、途中で破壊はあるが、破断に至るまでは直線で見なしたモデルとして仮定している。検討式は、応力比が分かれば δ_{max} 、各応力比の破断時の変位を算出できるのではないかと考えて、各実験的な補正値を基に、先ほどの 80～94%については α を 1.217、66～78%については 1.359 とし、実験からこのような形で仮定して δ_{max} を表す式を立てた。概ね破断時の中央部変位については、学会推定式を用いたものと検討式のもので近い値を示しており、学会推定式はある時間が経ったときの変位を求められるが、検討式では応力比だけ分かれば長期荷重試験における最大変位が簡易的に求めることができ、それは利点ではないかと考えている。長期荷重をかけて、これぐらいの変位に達するとそろそろ壊れるというのが、この式で分かればという形である。今得られている長期荷重試験の結果でこのぐらいの値になることが分かっており、これから、この簡易的な方法で繰り返した実験を捉えることができるか検討を重ねていきたい。」と説明した。安村委員長より「破壊が引張というかフィンガージョイントで壊れるものと層内せん断破壊というのは先にせん断で壊れるということか。これは本当にせん断で壊れているということか。」と質問し、「長期の曲げ試験結果なので壊れる瞬間というのは観察することはできないが、短期の曲げ試験結果では下端のフィンガージョイントで破断した後に変形が進んで、横走りするような層内せん断破壊が起きていることが長期荷重試験では起きているのではと考察した。」と戸田社長が答え、「必ずしもせん断がクリティカルではないということか。横というかローリングシアで壊れるというのではないのか。」と安村委員長が問い、「多くの試験体は破断してから見に行くことになるため、大きく折れてしまっているものもあり、その辺りは観察という意味では難しいところがある。」と宮本室長が述べた。小関委員が「最終的に 9 層 9 プライの短期と長期の基準強度を決めるための試験と考えていいのか。」と質問し、「そのとおり。」と宮本室長が答え、「長期の許容応力度というのは短期の 1/3 ぐらい、それに落とし込めるかどうかということを検証しているのか。」と小関委員が述べ、「基準強度に対して、長期の場合の荷重継続時間の調整係数がないと、許容応力度が計算できないため、それが木材と同じでよいかどうかを確認している。これまでも 7 層 7 プライとか、実験的な結果が得られていないものは、基準法上の対象外で許容応力度設計ができなかったが、実験的に確認ができたものから順次追加されている。」と渋沢研究ディレクタ

一が述べた。安村委員長が「短期曲げ試験と長期の比較は、どれが短期なのか。」と問い、「図の赤い直線が短期で、この代表的な直線を用いて長期の破断時の変位を予測できないかと考えている。」と戸田社長が答え、「短期の直線が途切れたところで壊れているということか。」と安村委員長が問い、「その通り。最大荷重と平均値を 62.21kN と定めたと考えている。長期荷重はこの荷重よりも 94%とか 60%という、低いことになるので、アッパーを決めている」と戸田社長が答えた。安村委員長が「以前、ツーバイフォーの壁の繰り返し試験、スタティックで壊したものの、7~9 割かの応力比で壊れるまで繰り返す試験をしたが、7 割ぐらいたとほとんど壊れないで幾らでも繰り返され、あるところから横に行った。8~9 割になると、10~20 回ぐらいで壊れるという感じで、この曲線とすごく似ていると思った。7 割ぐらいたと、変位が増えて塑性域で変位が増えていくが、壊れない。しかし、上がっていく、近づくと、スタティックにあるところでこうやってポンと壊れてしまうところが似ていると思った。」と述べ、渋沢研究ディレクターが「比例限の範囲、ばね定数的に振る舞うところとその上の塑性域の変形が出てくるところで、きっと振る舞いが違って、それが今、安村先生のおっしゃった、7 割だと壊れないけど、8 割、9 割だと行くというのは、こういう決まり方をしているというように私も思っている。」と述べた。

小関委員が「CLT の実験体に製造に使ったラミナの、ヤング係数と密度の分布図に相関係数を入れたほうがいい。」と述べ、井道室長が「承知した。全体で 1 つ引くのもありだと思う。」と応じた。「ヤング係数の分布図は正規分布となるはずだが、山が 2 つ重なったようになっている。理由は。」と質問し、「等級区分した結果なので、山が 3 つある。30B だと右側が切れているので、右上がりに見えている。M30B なので、55 以上のところまではあるが、その上は採らなかった。M60B は真ん中辺りが採れていて、90B は上の方ということ。等級区分した結果としては、全部正規分布に近いと判断している。」と渋沢研究ディレクターが答えた。榎本委員が「クリープの学会式だが、あれは a と N に 2 を入れた数字の変形量を出しているということか。このクリープの変位が 103 と 82 が近いと言うのは怖いと思っている。どうですか。」と質問し、戸田社長が「a と N については製材と集成材の場合で、こういう値を一般的に使いますというところをそのまま使って、学会の関係式を出した。」と答え、「検証すればするほど、集成材も製材もよいではないかというふうに見えてくる。2 ではないという考えもある。」と榎本委員が述べた。

(5) その他

宮本室長より、今後のスケジュールに関して、月内に報告書の原稿を担当者が提出、印刷前の報告書の回覧、3/22 が林野庁への提出期限、3/7 に成果報告会にて報告、来年度も継続して事業に応募すること、採択された場合には有識者委員を引き続きお願いしたいこと、が報告された。

(6) 講評

安村委員長が「今日の熱心な討議にお礼申し上げます。全体を見て、大分まとまってきた感じで、あと一息と思うが、ここまで大分進んでいるので、この先も、今までのデータも活用しつつ、不足している部分を付け足していくということも含めて、よろしくお願ひしたい。」と述べた。

杉原課長補佐が「色々な意見が飛び交っており、すごくいい検討をされて議論も進んでいるなどと思う。先ほど来年もというところもあったが、不足している情報等、データ等を引き続き進めていただければと思う。」と述べた。

佐藤課長補佐が「この事業については特にはないが、お知らせとして、直交集成板の JAS は、昨年の 7 月に調査会を行って改正することになっており、今月中にその告示が出る予定である。」と述べた。

最後に、福島課長補佐が「本事業は一昨年からの引き続きで、JAS の CLT の中でも最も厚い 9 層 9 プライの強軸方向での長期挙動に関するデータ収集と解析、ラミナの強度の違いによる CLT の性能差、CLT 内部の含水率の変動といった、長期挙動の試験について実施していただいた。本事業の結果は CLT の基準強度の拡充やひいては CLT を利用した中大規模建築物をさらに広げるのに重要な取組である。また規制改革会議で国産材の利活用ということが一つのテーマとなっており、毎年進捗を訊ねられるが、ようやく明るい見通しを先方に回答できていると思っている。試験については、低い応力の 5 体の長期挙動のデータ収集と、先ほど追試験等がある可能性があるという報告があった。次年度には、それらのデータを加えて、告示の区分追加に向けてデータを国土交通省に渡せればと考えている。本事業により CLT をさらに普及することができればと思うので、残りわずかだが、取りまとめに向けて委員の先生方、それから皆様の尽力をよろしくお願ひする。」と挨拶した。

以上で検討会は終了した。

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、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製造因子としてラミナの樹種を採り上げ、スギ及びヒノキ M90B ラミナを外層に用いた Mx90 等級 CLT の強度性能を比較した。その結果、ヒノキを用いた CLT の方が曲げ性能が高く、ラミナの性能を反映していた。また、内層にスギ M60B ラミナまたはスギ M30B ラミナを用いた Mx90 及び Mx120 等級 CLT の強度性能を比較した。等価断面法による推定値においては差がなかった。実測値では、内層に M60B ラミナを用いた方が M30B を用いたものより大きい傾向が見て取れたものの、ばらつきが大きかった。内層ラミナの等級より外層樹種の影響が大きく外層がスギのものよりヒノキのものの方が曲げ性能が高くなった。試験体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。今年度は、ラミナ間の空隙及び接着層を考慮した CLT 内部のモデルを想定し、含水率変化のシミュレーションを行った。ラミナ間の空隙(JAS 規格で許容される最大値である 6mm を想定)の有無、接着層が透湿バリアとして作用する場合、作用しない場合の組み合わせで 4 つのモデルを想定したところ、空隙を想定したモデルでは含水率変化が最も大きく、接着剤を考慮すると含水率変化は若干低下する傾向を示した。さらに、偶数層ラミナを接着層に置換したモデルでは、内層の含水率変化が最も小さくなった。また、本事業で考案した CLT 内部の含水率を長期モニタリングする手法の実証実験では、プローブの打込み深さが測定に与える影響は小さく、適切な測定が可能であることを明らかにした。さらに、測定対象の断面中心部に近いほど、含水率が低い状態を維持する傾向を捉えることができた。さらに、CLT の断面内に含水率の分布が存在することを踏まえ、各層のラミナ含水率が強度性能に与える影響を検討するモデル実験にも着手した。これらについては、次年度以降も測定を継続することで精度を検証することが可能と考えられる。

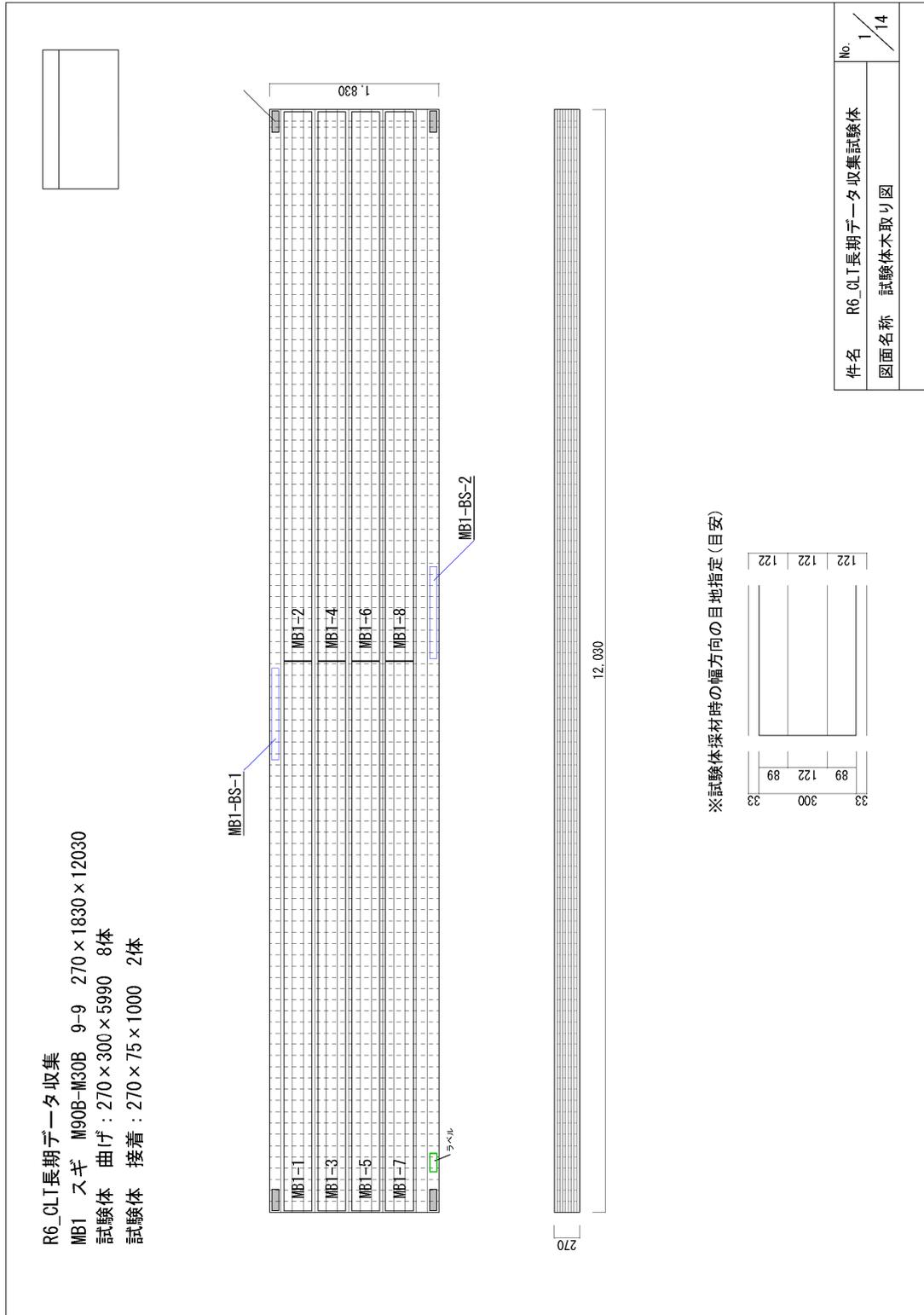
曲げ荷重下における長期挙動データの収集については破壊荷重の 66%~94%の 2%括約の各応力レベル 2 体ずつを供試する計画とし、一昨年度、昨年度に実施した応力レベル 86%~94%各 1 体、応力レベル 76%~84%各 2 体に加え、66~74%各 1 体、86%~94%各 1 体についてデータを収集した。さらに、試験体の破断状況の検討と合わせ、破断時の変形量の推定を行った。未実施の応力レベルとしてもっとも試験期間が長いと予測される 66%~74%各 1 体があることから、本項目についても次年度以降の継続を要する。

なお、本事業成果については外部有識者委員会において国土交通省及び林野庁のオブザーバーご臨席の下、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。

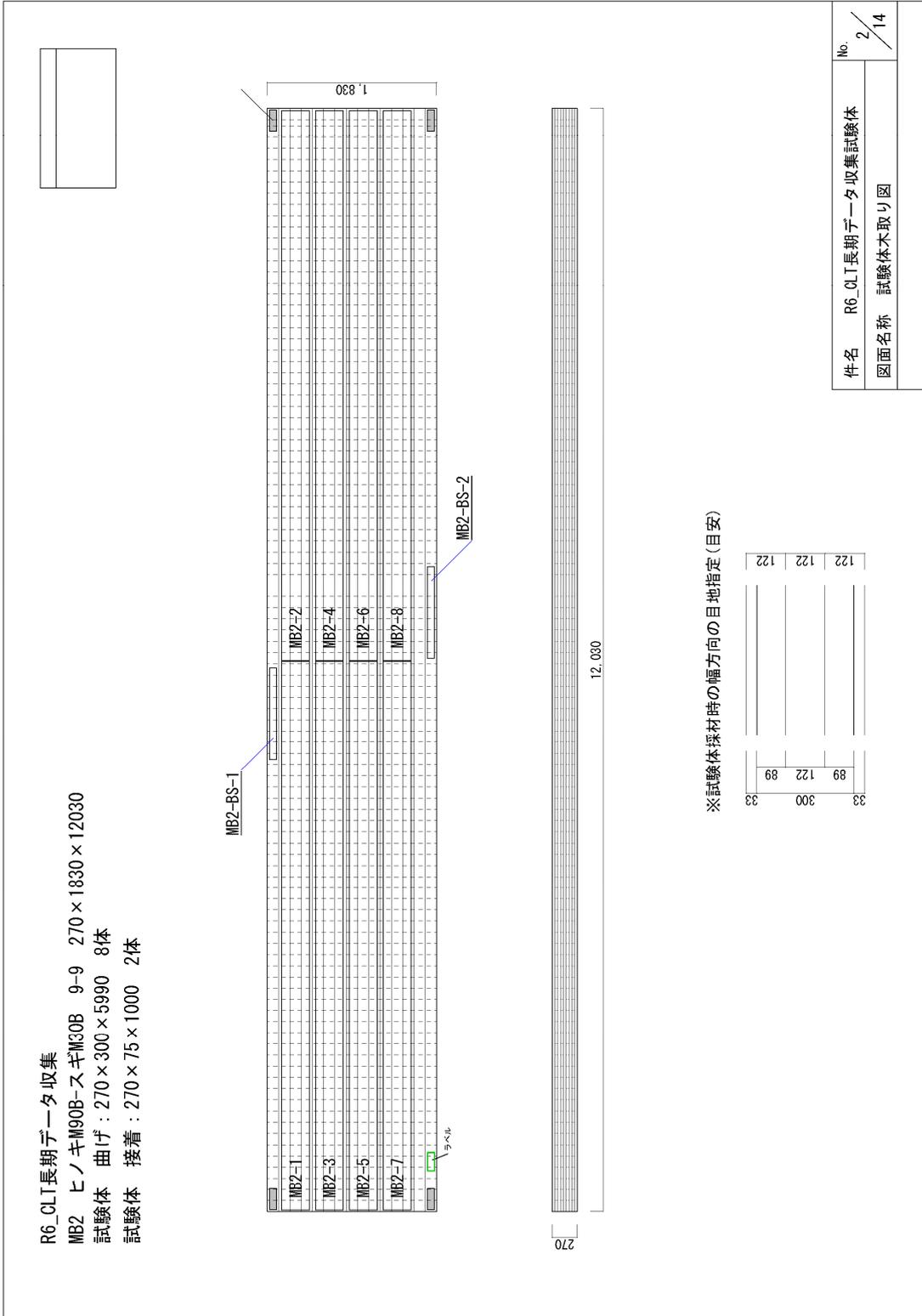
7. 付録

7.1 試験体採材図 (2.2.2 CLTの曲げ試験)

(1) MB1 9層9プライ スギM90B-スギM30B



(2) MB2 9層9プライ ヒノキ M90B-スギ M30B



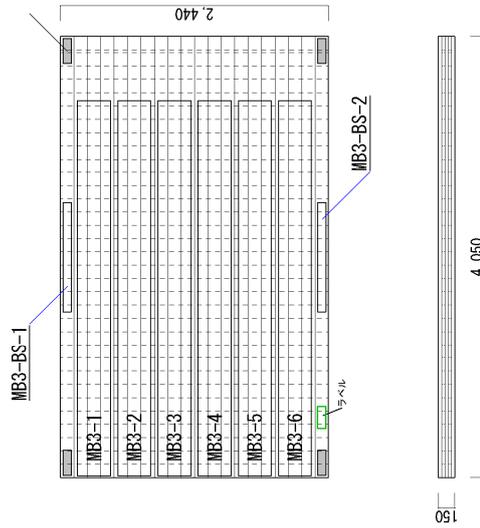
(3) MB3 5層5プライ スギ M90B-スギ M60B

R6_CLT長期データ収集

MB3 スギ M90B-M60B 5-5 150 × 2440 × 4050

試験体 曲げ : 150 × 300 × 3450 6体

試験体 接着 : 150 × 75 × 1000 2体



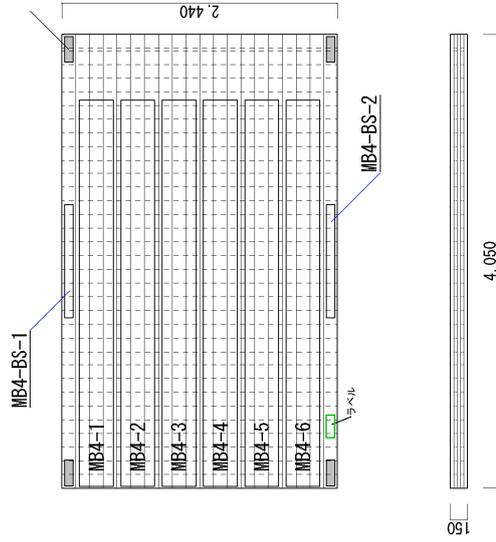
※試験体採材時の幅方向の目地指定(目安)

33	89	122	122	122	33
300	122	89			

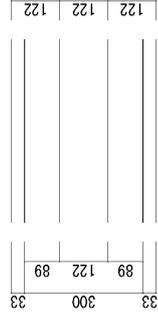
件名	R6_CLT長期データ収集試験体	No.	3 / 14
図面名称	試験体木取り図		

(4) MB4 5層5プライ スギ M90B-スギ M30B

R6_CLT長期データ収集
 MB4 スギ M90B-M30B 5-5 150×2440×4050
 試験体 曲げ : 150×300×3450 6体
 試験体 接着 : 150×75×1000 2体



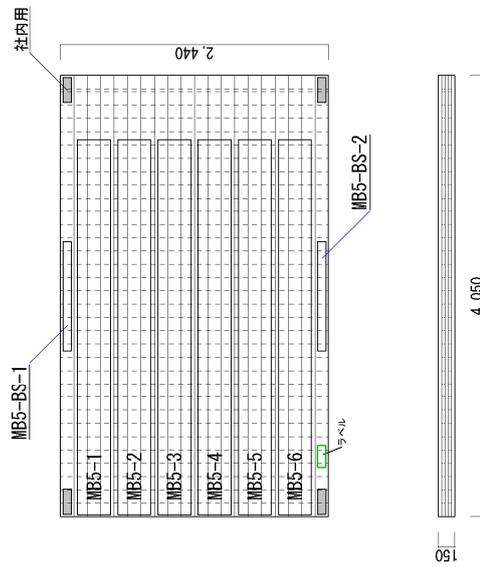
※試験体採材時の幅方向の目地指定(目安)



姓名	R6_CLT長期データ収集試験体	No. 4 / 14
図面名称	試験体木取り図	

(5) MB5 5層5プライ ヒノキ M90B-スギ M60B

R6_CLT長期データ収集
 MB5 ヒノキM90B-スギM60B 5-5 150×2440×4050
 試験体 曲げ: 150×300×3450 6体
 試験体 接着: 150×75×1000 2体



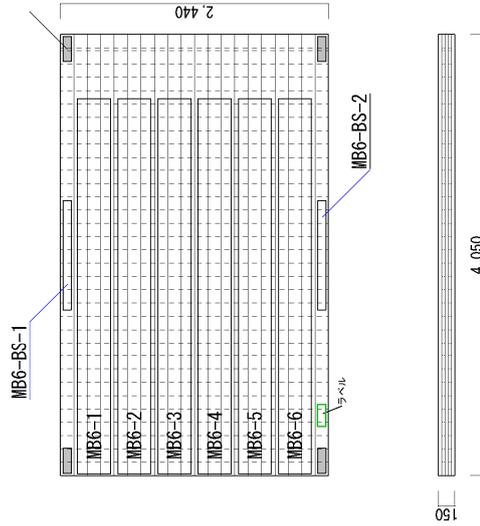
※試験体採材時の幅方向の目地指定(目安)

33	89	122	122	33
300	122	89	122	33

件名	R6_CLT長期データ収集試験体	No.	5 / 14
図面名称	試験体木取り図		

(6) MB6 5層5プライ ヒノキ M90B-スギ M30B

R6_CLT長期データ収集
 MB6 ヒノキM90B-スギM30B 5-5 150×2440×4050
 試験体 曲げ: 150×300×3450 6体
 試験体 接着: 150×75×1000 2体



※試験体採材時の幅方向の目地指定(目安)

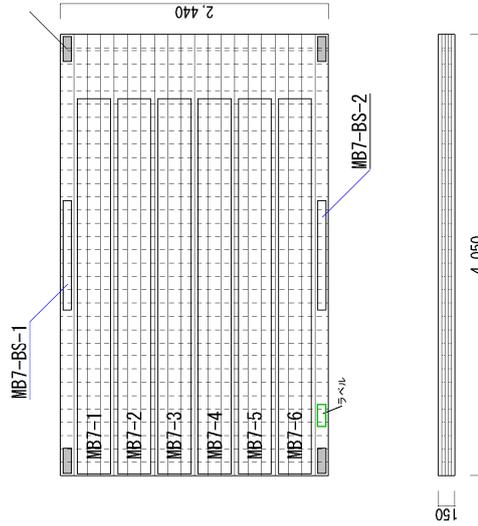
33	89	122	122	33
300	122	89	122	33

件名	R6_CLT長期データ収集試験体	No.	6 / 14
図面名称	試験体木取り図		

(7) MB7 5層5プライ ヒノキ M120B-スギ M60B



R6_CLT長期データ収集
 MB7 ヒノキM120B-スギM60B 5-5 150×2440×4050
 試験体 曲げ : 150×300×3450 6体
 試験体 接着 : 150×75×1000 2体



※試験体採材時の幅方向の目地指定(目安)

33	89	122	122	33
300	122	122	122	33

件名	R6_CLT長期データ収集試験体	No. 7 / 14
図面名称	試験体木取り図	

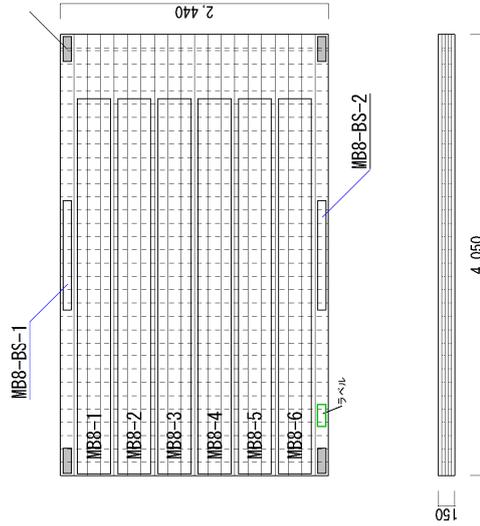
(8) MB8 5層5プライ ヒノキ M120B-スギ M30B

R6_CLT長期データ収集

MB8 ヒノキM120B-スギM30B 5-5 150×2440×4050

試験体 曲げ : 150×300×3450 6体

試験体 接着 : 150×75×1000 2体



※試験体採材時の幅方向の目地指定(目安)

33	89	122	122	33
300	122	89	122	33

件名	R6_CLT長期データ収集試験体	No.	8 / 14
図面名称	試験体木取り図		

(9) MB9 3層3プライ スギ M90B-スギ M60B

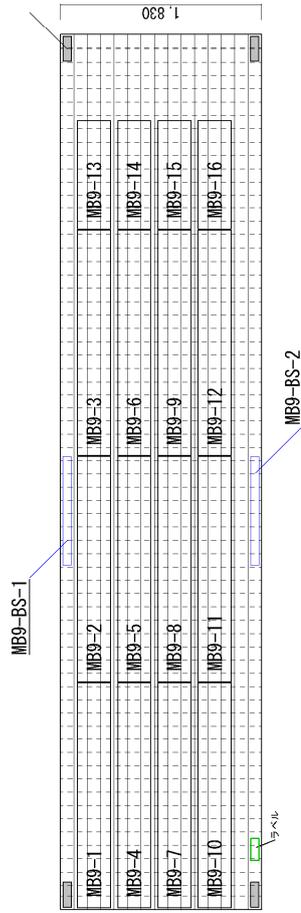
R6_CLT長期データ収集

MB9 スギ M90B-M60B 3-3 90×1830×8040

試験体 曲げ：90×300×2070 12体

試験体 予備：90×300×1000 4体

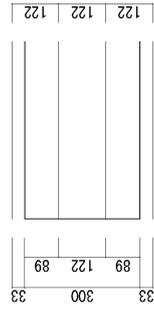
試験体 接着：90×75×1000 2体



90

8,040

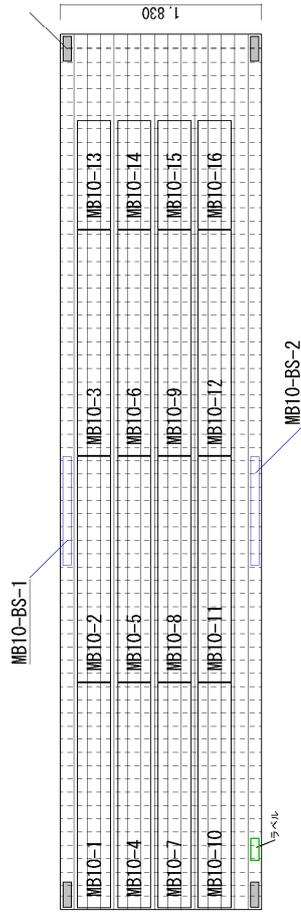
※試験体採材時の幅方向の目地指定(目安)



件名	R6_CLT長期データ収集試験体	No.	9 / 14
図面名称	試験体木取り図		

(10) MB10 3層3プライ スギ M90B-スギ M30B

R6_CLT長期データ収集
 MB10 スギ M90B-M30B 3-3 90×1830×8040
 試験体 曲げ：90×300×2070 12体
 試験体 予備：90×300×1000 4体
 試験体 接着：90×75×1000 2体

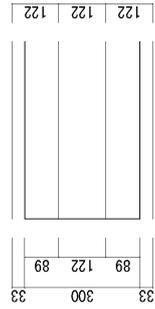


98

8,040

1,830

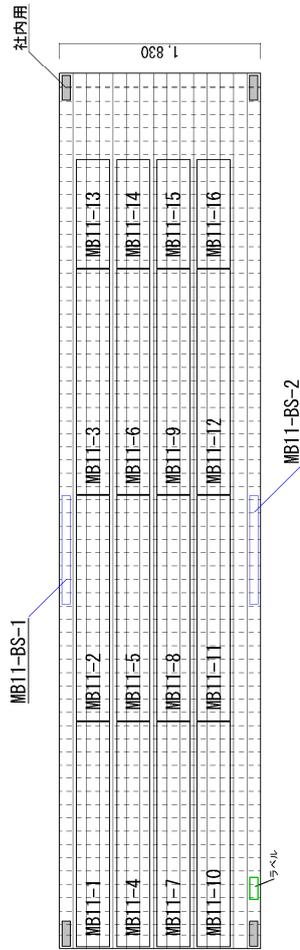
※試験体採材時の幅方向の目地指定(目安)



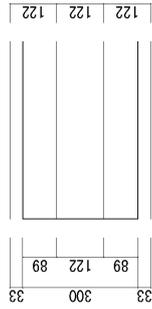
件名	R6_CLT長期データ収集試験体	No.	10 / 14
図面名称	試験体木取り図		

(11) MB11 3層3プライ ヒノキ M90B-スギ M60B

R6_CLT長期データ収集
 MB11 ヒノキM90B-スギM60B 3-3 90×1830×8040
 試験体 曲げ：90×300×2070 12体
 試験体 予備：90×300×1000 4体
 試験体 接着：90×75×1000 2体



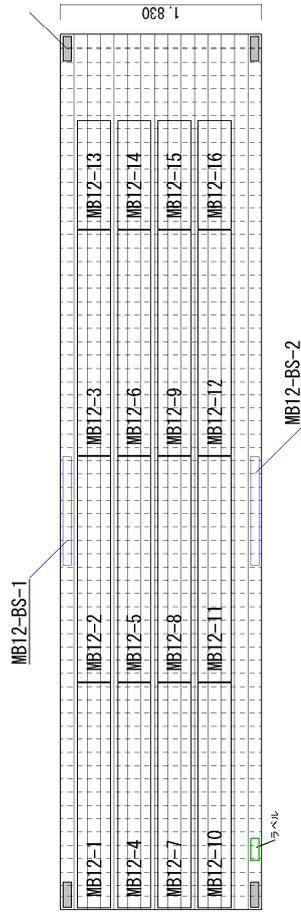
※試験体採材時の幅方向の目地指定(目安)



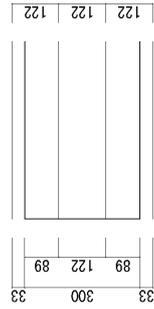
件名	R6_CLT長期データ収集試験体	No.	11 / 14
図面名称	試験体木取り図		

(12) MB12 3層3プライ ヒノキ M90B-スギ M30B

R6_CLT長期データ収集
 MB12 ヒノキM90B-スギM30B 3-3 90×1830×8040
 試験体 曲げ：90×300×2070 12体
 試験体 予備：90×300×1000 4体
 試験体 接着：90×75×1000 2体



※試験体採材時の幅方向の目地指定(目安)



件名	R6_CLT長期データ収集試験体	No.	12 / 14
図面名称	試験体木取り図		

(13) MB13 3層3プライ ヒノキ M120B-スギ M60B

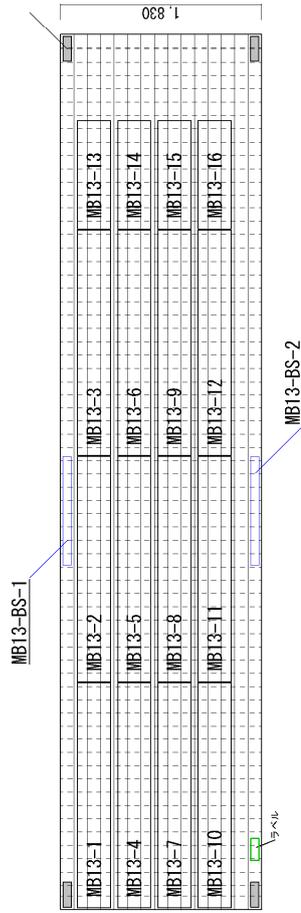
R6_CLT長期データ収集

MB13 ヒノキM120B-スギM60B 3-3 90×1830×8040

試験体 曲げ : 90×300×2070 12体

試験体 予備 : 90×300×1000 4体

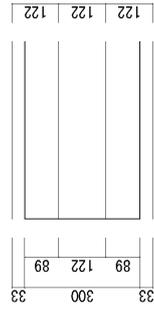
試験体 接着 : 90×75×1000 2体



90

8,040

※試験体採材時の幅方向の目地指定(目安)



件名	R6_CLT長期データ収集試験体	No.	13 / 14
図面名称	試験体木取り図		

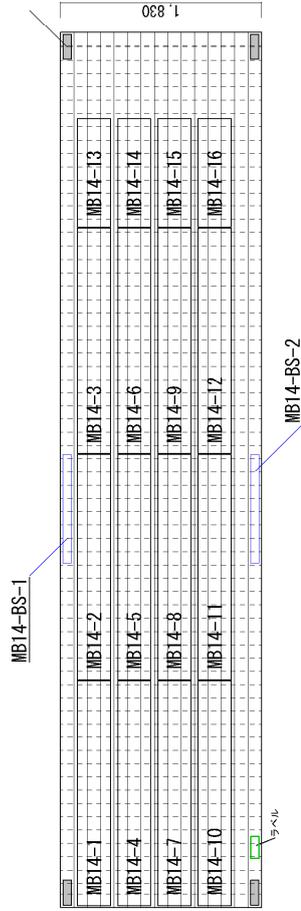
(14) MB14 3層3プライ ヒノキ M120B-スギ M30B

R6_CLT長期データ収集

MB14 ヒノキM120B-スギM30B 3-3 90×1830×8040

試験体 曲げ：90×300×2070 12体

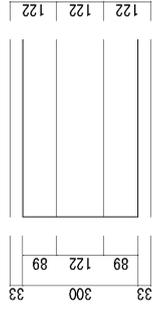
試験体 接着：90×75×1000 2体



90

8.040

※試験体採材時の幅方向の目地指定(目安)



件名	R6_CLT長期データ収集試験体	No.	14 / 14
図面名称	試験体木取り図		

7.2 試験体の破断状況

(1) 応力比 94%



写真 7-1 DOL-94-2 破壊状況



写真 7-2 DOL-94-2 引張側フィンガージョイント部破断①



写真 7-3 DOL-94-2 引張側フィンガージョイント部破断②

(2) 応力比 92%



写真 7-4 DOL-92-2 破壊状況



写真 7-5 DOL-92-2 引張側フィンガージョイント部破断①



写真 7-6 DOL-92-2 引張側フィンガージョイント部破断②

(3) 応力比 90%



写真 7-7 DOL-90-2 破壊状況①



写真 7-8 DOL-90-2 破壊状況②

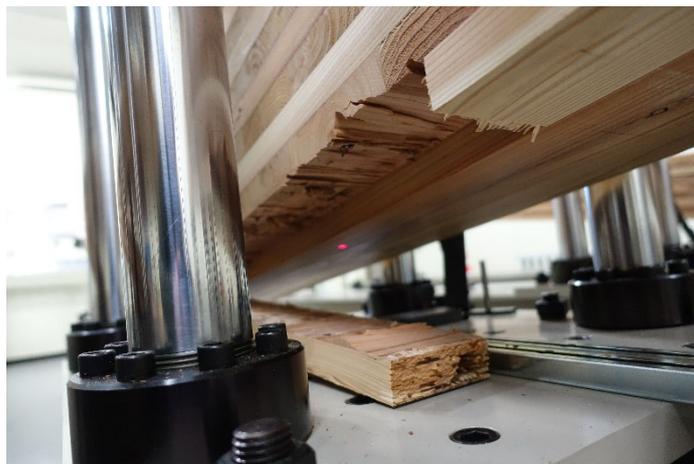


写真 7-9 DOL-90-2 引張側フィンガージョイント部破断

(4) 応力比 88%



写真 7-10 DOL-88-2 破壊状況①



写真 7-11 DOL-88-2 破壊状況②



写真 7-12 DOL-88-2 引張側フィンガージョイント部破断

(5) 応力比 86%



写真 7-13 DOL-86-2 破壊状況①



写真 7-14 DOL-86-2 破壊状況②



写真 7-15 DOL-86-2 引張側フィンガージョイント部破断

(6) 応力比 74%



写真 7-16 DOL-74-1 全体状況 (破壊に至らず)



写真 7-17 DOL-74-1 破壊に至らず



写真 7-18 DOL-74-1 破壊に至らず

(7) 応力比 72%



写真 7-19 DOL-72-1 破壊状況



写真 7-20 DOL-72-1 フィンガージョイント部破断



写真 7-21 DOL-72-1 フィンガージョイント部破断

(8) 応力比 70%



写真 7-22 DOL-70-1 全体状況 (破壊に至らず)



写真 7-23 DOL-70-1 破壊に至らず



写真 7-24 DOL-70-1 破壊に至らず

(9) 応力比 68%



写真 7-25 DOL-68-1 全体状況（破壊に至らず）



写真 7-26 DOL-68-1 破壊に至らず



写真 7-27 DOL-68-1 破壊に至らず

(10) 応力比 66%



写真 7-28 DOL-66-1 破壊状況①



写真 7-29 DOL-66-1 破壊状況②



写真 7-30 DOL-66-1 引張側フィンガージョイント部破断

7.3 令和4年度成果報告書 2.1章・再掲

2.1 CLTの長期挙動に影響を及ぼす製造因子の抽出

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	水性高分子ー イソシアネート系樹脂		水性高分子ー 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

