

令和6年度 CE×CN の同時達成に向けた
木材再利用の方策等検証事業

(5) 仮設建築物に使用した木材の
再利用可能性に係る性能調査について

調 査 報 告 書

令和7年3月

一般社団法人 日本 CLT 協会

目次

1.	仮設建築物に使用した木材の再利用可能性に係る性能調査について	2
1)	はじめに	2
(1)	調査の背景と目的	2
(2)	過年度の実施結果と今年度の実施概要	2
(3)	検討体制	3
2)	屋内環境における長期载荷試験	5
(1)	試験体 CLT について	5
(2)	载荷試験概要	7
3)	屋内長期载荷が材料性能に及ぼす影響の検討	11
(1)	弾性係数の非破壊計測について	11
(2)	面外/面内曲げ試験について	15
(3)	面外/面内せん断試験について	27
(4)	縦圧縮試験について	38
(5)	ブロックせん断試験について	43
(6)	減圧加圧剝離試験について	46
4)	屋外環境における長期曝露試験	47
(1)	日本館のモックアップによる長期曝露試験について	47
(2)	試験体について	47
(3)	試験体設置方法	49
(4)	各部の納まり	56
(5)	ハイグロクロン埋め込み位置	59
5)	屋外長期曝露が材料性能に及ぼす影響の検討	62
(1)	目視調査について	62
(2)	現地調査	82
(3)	目視調査の所感	91
(4)	屋外曝露試験における含水率計測について	91
6)	CLT をリユースする際の検査方法の検討	124
(1)	屋内環境下で用いられる CLT のリユースの可否に関する考え方について	124
(2)	屋外環境下で用いられる CLT のリユースの可否に関する考え方について	124
(3)	CLT のリユースの可否の判断	125
7)	まとめ	126
(1)	屋内環境における長期载荷試験について	126
(2)	屋外環境における長期曝露試験について	126
(3)	CLT のリユースの可否を判断するための検査方法について	127
(4)	リユースに関する今後の課題について	128

1. 仮設建築物に使用した木材の再利用可能性に係る性能調査について

本章では、強度試験等の実験結果を整理しているため、多数の図表を記載しており、且つ文章中で参照する図表も多岐にわたる。そのため、理解しやすいように本章においては図表番号を記載した。

1) はじめに

(1) 調査の背景と目的

大型の木質パネルである CLT は国産材の新たな利用法として需要拡大が期待されている。(一社)日本 CLT 協会では、様々な建築物での国産 CLT の利用を進めているが、本調査では大規模なイベントで建設される大型の仮設建築物への CLT の利用について検討を実施した。仮設建築物では、短い工期や施工の簡便さ、供用後の解体のしやすさなどが求められることから、CLT パネルの優位性が活かしやすいと期待されている。また、循環型社会の実現に向けて CLT パネルのリユースが求められているが、CLT パネルをチップ等としてサーマルリサイクルするのではなく、構造材等としてマテリアルリユースすることで省 CO2 効果を高めようとする動きも出てきている。今後、リユースの分野でも国産 CLT の使用事例を増やすためには、リユース材の性能を担保することが求められ、仮設建築物で使用された CLT が供用期間に設計荷重を受けても、十分な材料性能を維持していることが確かめる必要がある。さらには、リユース時に材料性能を維持していることを簡便な評価方法で確認することも重要になる。

そこで本調査では、屋内外それぞれで使用履歴のある CLT パネルのリユース可能性を検討した。

(2) 過年度の実施結果と今年度の実施概要

令和 3 (2021) 年度、4 (2022) 年度では、屋内での 6 ヶ月間の載荷が 5 層 5 プライ CLT の材料強度への影響が認められなかったこと、簡便な材料性能評価方法として JAS の接着剝離試験及びブロックせん断試験を採用して最適な試験条件及び基準強度を明らかにした。なお、これらの調査は令和 2 (2020) 年度及び令和 3 (2021) 年度の林野庁補助事業¹²として実施したものである。

令和 5 (2023) 年度では、「令和 5 年度 木材の再利用による CE×CN の同時達成方策評価検証事業委託業務」において、屋外での 6 ヶ月間の載荷履歴のある 5 層 5 プライ

¹ 令和 2 (2020) 年度林野庁補助事業「木材製品の消費拡大対策事業のうち CLT 建築実証支援事業のうち CLT 等木質建築部材 技術開発・普及事業」における「建築物で使用した CLT をリユースするための評価方法」(令和 4 (2022) 年 2 月)

² 令和 3 (2021) 年度林野庁補助事業「木材製品の消費拡大対策事業のうち CLT 建築実証支援事業のうち CLT 等木質建築部材 技術開発・普及事業」における「CLT パネルのリユースを実施するための性能評価手法の検討」(令和 5 (2023) 年 2 月)

CLT に対し、接着剝離試験及びブロックせん断試験により得られた試験結果のみを判断材料として強度と剛性の低下の有無を評価することが難しいことが明らかとなった。

これらの調査結果に基づき、「再利用 CLT（直交集成板）の JAS に規定する品質に係る確認の手引き」を作成し、（一社）日本 CLT 協会の HP で公開した³。

今年度は、銘建工業（株）（岡山県真庭市）敷地内において、屋内載荷試験と屋外曝露試験を実施した。前者では、過年度に 5 層 5 プライ CLT を対象に行われた屋内載荷試験を通じて確立した簡便な材料評価方法が、3 層 3 プライ CLT に対しても有効であることを確認した。後者では、大阪・関西万博の日本館を模した“モックアップ”を製作し、それを屋外環境下に曝露することで、屋外における使用履歴のある CLT パネルに関するリユース可能性を調査した。

（3） 検討体制

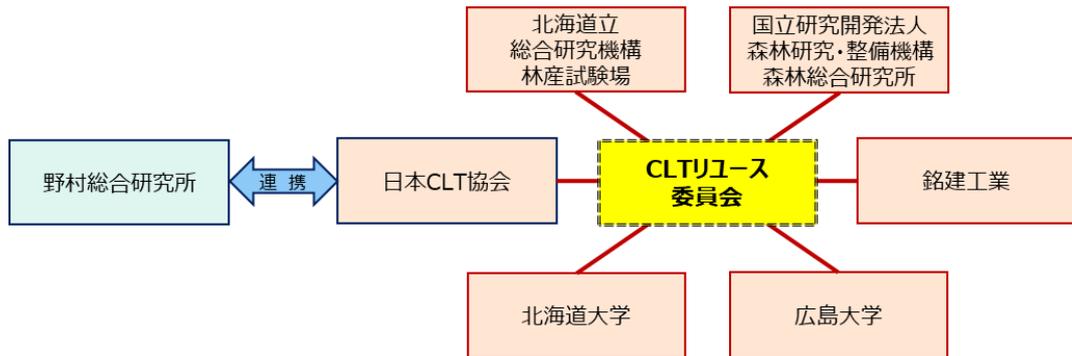
今年度も過年度事業と同様に、以下のとおり CLT リユース委員会を設置し、委員会において試験状況に関する報告・検討を行い、各委員よりアドバイスを得ながら事業を遂行した。

（A） 委員名簿

委員長	中島 史郎	（大）宇都宮大学	教授
委員	森 拓郎	（大）広島大学	教授
	高梨 隆也	（大）北海道大学	助教
	宮本 康太	（国研）森林研究・整備機構	森林総合研究所 室長
	宮武 敦	（国研）森林研究・整備機構	森林総合研究所 研究専門員
	大橋 義徳	（地独）北海道立総合研究機構	林産試験場 研究主幹
	宮崎 淳子	（地独）北海道立総合研究機構	林産試験場 主査
事務局	坂部 芳平	（一社）日本 CLT 協会	専務理事
	谷口 翼	（一社）日本 CLT 協会	
	芳村 勇毅	（一社）日本 CLT 協会	
	井上 郁人	銘建工業（株）	開発部

³ 再利用 CLT（直交集成板）の JAS に規定する品質に係る確認の手引き，（一社）日本 CLT 協会，2024.
（https://clta.jp/wp-content/uploads/2021/04/241115_Guide-to-reusing-CLT.pdf）。

(B) 検討実施体制



[図.CLT リユース委員会検討体制図]

(C) 委員会開催日（全3回）

- A) 第1回：令和6（2024）年 9月 2日
- B) 第2回：令和6（2024）年 11月 8日
- C) 第3回：令和7（2025）年 2月 28日

2) 屋内環境における長期載荷試験

(1) 試験体 CLT について

樹種はスギを用いた。ラミナの断面寸法は幅 122 mm、厚さ 30 mm とした。強度性能のばらつきを抑えるために、ラミナ強度等級は集成材の JAS で規定されているラミナ強度等級の L70 に区分されたものを全層に用いた。層構成は 3 層 3 プライ (積層厚さ 90 mm) とした。載荷方向はいずれも強軸方向で面外曲げ、面内曲げ、縦圧縮とした。面外載荷試験体の寸法は幅 300 mm、長さ 1980 mm、面内載荷試験体の寸法は幅(面内)180 mm、長さ 3300 mm、縦圧縮載荷試験体の寸法は幅 100 mm、長さ 1000 mm とした。

本試験体の基準強度は、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) ⁴によると以下の通り計算される。

面外曲げ基準強度は以下の式で表される。

$$F_b = 0.4875 \times \sigma_{b_oml} \frac{I_A}{I_0}$$

ただし、

$$I_A = \frac{\sum(E_i I_i + E_i A_i z_i^2)}{E_0}$$

ここで、 σ_{b_oml} : 最も外側の層に使用する強軸ラミナの曲げ強度、 E_i : 一方の外層から数えて i 番目の層に使用するラミナの曲げヤング係数 (弱軸ラミナはゼロ)、 I_i : i 番目の層の断面二次モーメント、 A_i : i 番目の層の断面積、 z_i : CLT の中立軸と i 番目の層のラミナの重心との距離、 E_0 : 最も外側の層に使用する強軸ラミナの曲げヤング係数、 A_0 : CLT の断面積、 I_0 : CLT の断面二次モーメント。

本研究での試験体を強度等級 Mx60 と考え、 σ_{b_oml} を 27.0 N/mm²、 E_i ($i = 1, 3$) を 6000 N/mm² とすると面外曲げ基準強度 F_b は 12.7 N/mm² と算出される。

面内曲げ基準強度は以下の式で表される。

$$F_b = 0.6 \times \sigma_{b_oml} \frac{A_A}{A_0}$$

ただし、

$$A_A = \frac{\sum E_i A_i}{E_0}$$

ここで、 σ_{b_oml} : 最も外側の層に使用する強軸ラミナの曲げ強度、 E_i : 一方の外層から数えて i 番目の層に使用するラミナの曲げヤング係数 (弱軸ラミナはゼロ)、 A_i : i 番目の層の断面積、 E_0 : 最も外側の層に使用する強軸ラミナの曲げヤング係数、 A_0 : CLT の断面積

面外曲げ基準強度と同様に強度等級 Mx60 として σ_{b_oml} を 27.0 N/mm²、 E_i ($i = 1, 3$) を 6000 N/mm² とすると面内曲げ基準強度 F_b は 10.8 N/mm² と算出される。

⁴ 国土交通省: 平成 13 年国土交通省告示第 1024 号「特殊な許容応力度及び特殊な材料強度を定める件」(2001、最終改正令和 4 年国土交通省告示第 413 号(2022))

面外せん断基準強度は樹種により規定されており、スギでは 0.9 N/mm^2 である。
 面内せん断基準強度は以下の式で表される。

$$F_s = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{v_lam_0} \\ f_{v_lam_90} \frac{t_{net}}{t_{gross}} \\ \frac{3bn_{ca}}{8t_{gross}} \cdot \frac{1}{\frac{1}{f_{v_tor}} \left(1 - \frac{1}{m^2}\right) + \frac{2}{f_R} \left(\frac{1}{m} - \frac{1}{m^2}\right)} \end{array} \right\}$$

ここで、 $f_{v_lam_0}$ ：ラミナの繊維方向のせん断強度（スギの場合 2.7 N/mm^2 ）、 $f_{v_lam_90}$ ：ラミナの繊維方向と直交する方向のせん断強度（スギの場合 8.1 N/mm^2 ）、 t_{net} ：外層に直交する層の厚さの合計、 t_{gross} ：CLT の厚さ、 b ：ラミナの幅、 n_{ca} ：CLT の直交接着層の数、 f_{v_tor} ：接着された直交する 2 つのラミナの交差面のねじりせん断強度（スギの場合 3.0 N/mm^2 ）、 f_R ：ローリングシア強度（スギの場合 1.5 N/mm^2 ）、 m ：各層のラミナの幅方向の数のうち最小の値

本研究での試験体では $t_{net} = 30 \text{ mm}$ 、 $t_{gross} = 90 \text{ mm}$ 、 $n_{ca} = 2$ 、 $m = 2$ となりこれらを代入すると面内せん断基準強度は $F_s = 1.7 \text{ N/mm}^2$ となる。

圧縮基準強度は

$$F_c = 0.75 \times \alpha_{c_oml} \frac{A_A}{A_o}$$

ただし、

$$A_A = \frac{\sum E_i A_i}{E_o}$$

ここで、 α_{c_oml} ：最も外側の層に使用する強軸ラミナの圧縮強度、 E_i ：一方の外層から数えて i 番目の層に使用するラミナの曲げヤング係数（弱軸ラミナはゼロ）、 A_i ： i 番目の層の断面積、 E_o ：最も外側の層に使用する強軸ラミナの曲げヤング係数、 A_o ：CLT の断面積。

曲げ基準強度と同様に強度等級 Mx60 として α_{c_oml} を 21.6 N/mm^2 、 E_i ($i = 1, 3$) を 6000 N/mm^2 、とすると圧縮基準強度 F_c は 10.8 N/mm^2 と算出される。

(2) 載荷試験概要

(A) 載荷方法

長期載荷試験は、銘建工業（株）の工場敷地内の屋内環境下で 6 ヶ月間行った（令和 6（2024）年 7 月 24 日～令和 7（2025）年 1 月 20 日）。載荷状況を図 2.-2）-（1）-1～図 2.-2）-（1）-3 に示す。試験体数は、面外載荷試験体 8 体、面内載荷試験体 8 体、縦圧縮載荷試験体 4 体とした。また、同一のパネル内で同寸法の試験体を同数採材し、同じく銘建工業（株）の工場敷地内の屋内環境下で載荷せずに 6 ヶ月間静置した。なお下、屋内載荷及び静置環境は空調設備のない温湿度無調整の環境であった。すなわち試験体は、屋内無載荷、屋内載荷の 2 つの条件下で実施した。なお、試験期間中は、面外及び面内載荷試験体についてはスパン中央のたわみ量を測定した。

載荷試験での載荷荷重は 2.-1）節で計算した基準強度を参考に、1 体あたりの荷重として面外載荷試験体で 640 kg、面内載荷試験体で 392 kg、縦圧縮載荷試験体で 2754 kg とした。この荷重により生じる曲げ及びせん断応力は、面外曲げ基準強度の 37%、面外せん断基準強度の 19%、面内曲げ基準強度の 37%、面内せん断基準強度の 10%、縦圧縮基準強度の 28%に相当するものであった。



[図 2.-2）-（1）-1 面外載荷試験の状況]



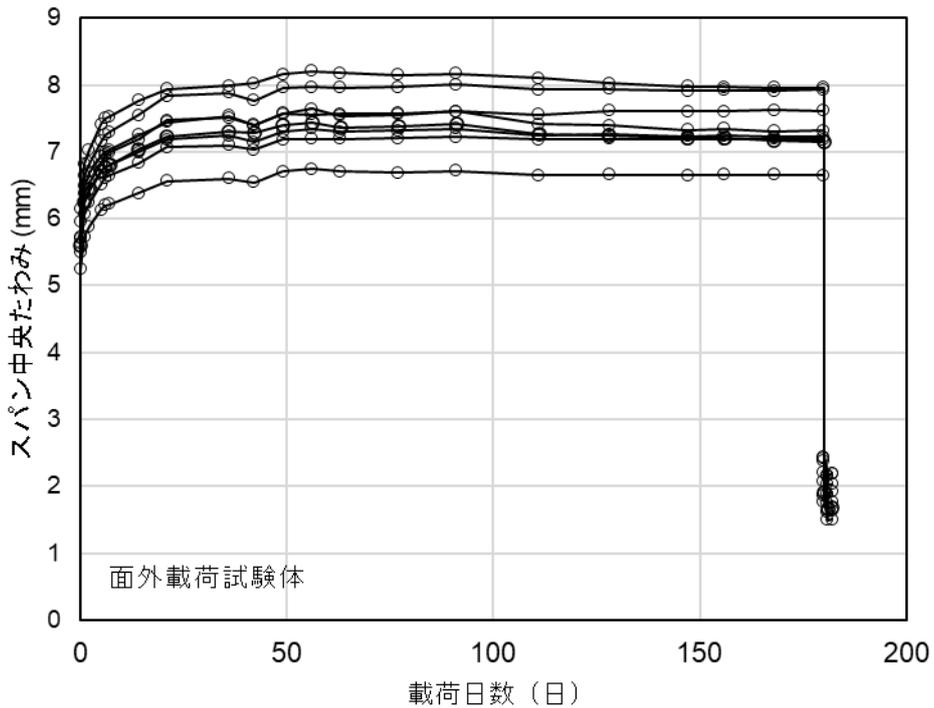
[図 2.2) - (1) -1 面内載荷試験の状況]



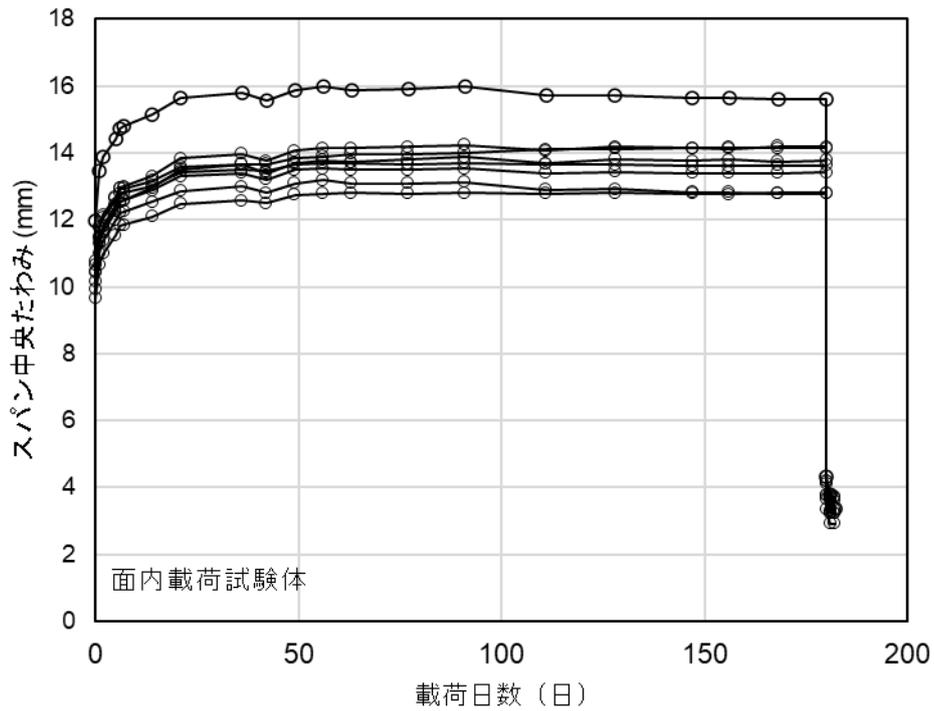
[図 2.2) - (1) -1 縦圧縮載荷試験の状況]

(B) 結果

面外及び面内載荷試験におけるスパン中央のたわみ量の測定結果を図 2.-2) - (2) -1 及び図 2.-2) - (2) -2 に示す。載荷直後の初期変形は面外載荷で約 5~6 mm、面内載荷で約 10~12 mm となり、試験体のヤング係数が同等であったことが示された。令和 6 年 7 月 24 日の試験開始から 22 日経過した時点でたわみ量の増加はほぼ止まり、以降は除荷に至るまで同程度のたわみで推移した。また、載荷直後のたわみと除荷時のたわみ回復量を表 2.-2) - (2) -1 及び表 2.-2) - (2) -2 に示す。除荷直後に初期変形に相当する量のたわみが回復したことが確認された。



[図 2.-2) - (2) -1 面外載荷試験体のスパン中央たわみの推移]



[図 2.-2) - (2) -1 面内載荷試験体のスパン中央たわみの推移]

[表 2.-2) - (2) -1 面外載荷試験体の載荷直後のスパン中央たわみと除荷時のたわみ回復量 (単位 : mm)]

試験体 No.	OBIL.1	OBIL.2	OBIL.3	OBIL.4	OBIL.5	OBIL.6	OBIL.7	OBIL.8
載荷直後たわみ量	5.24	5.70	5.63	5.95	5.50	5.73	6.14	5.60
除荷時たわみ回復量	4.88	5.17	5.14	5.51	4.98	5.46	5.59	5.24

[表 2.-2) - (2) -1 面内載荷試験体の載荷直後のスパン中央たわみと除荷時のたわみ回復量 (単位 : mm)]

試験体 No.	IBIL.1	IBIL.2	IBIL.3	IBIL.4	IBIL.5	IBIL.6	IBIL.7	IBIL.8
載荷直後たわみ量	10.16	10.76	10.67	9.65	9.94	10.42	10.46	11.97
除荷時たわみ回復量	9.59	10.00	10.05	9.16	9.45	9.66	9.86	11.27

3) 屋内長期載荷が材料性能に及ぼす影響の検討

(1) 弾性係数の非破壊計測について

(A) 試験体及び試験方法

2) の屋内長期載荷試験で用いた試験体のうち無載荷試験体及び載荷試験体それぞれで、面外試験体及び面内試験体 7 体、縦圧縮試験体 3 体で、次のとおり非破壊計測を行った。面外及び面内試験体では、静置・載荷前後で縦振動法による動的ヤング係数 (E_{fr})、たわみ振動法による曲げヤング係数 (E_{afb}) を測定した。 E_{afb} は面外試験体では積層方向、面内試験体では幅方向で測定した。縦圧縮試験体では縦振動法による動的ヤング係数 (E_{fr}) を測定した。なお、弾性係数の算出に用いた試験体寸法は測定時の寸法とした。

(B) 結果

結果を表 3.-1) - (2) -1～表 3.-1) - (2) -6 及び図 3.-1) - (2) -1 に示す。すべての試験体で静置及び載荷前後での弾性係数の変化は生じなかった。

[表 3.-1) - (2) -1 面外無載荷試験体の弾性係数非破壊測定の結果]

試験体 No.	静置前		静置後		静置後 / 静置前	
	E_{fr}	E_{afb}	E_{fr}	E_{afb}	E_{fr}	E_{afb}
	kN/mm ²	kN/mm ²	kN/mm ²	kN/mm ²		
OBIN.1	5.40	6.63	5.59	6.85	1.04	1.03
OBIN.2	5.22	6.38	5.45	6.58	1.04	1.03
OBIN.3	5.19	6.44	5.35	6.81	1.03	1.06
OBIN.4	4.89	6.00	5.09	6.25	1.04	1.04
OBIN.5	5.37	6.62	5.55	6.93	1.03	1.05
OBIN.6	4.96	6.51	5.18	6.76	1.04	1.04
OBIN.7	4.83	5.99	5.02	6.08	1.04	1.01
平均値	5.12	6.37	5.32	6.61	1.04	1.04
標準偏差	0.23	0.27	0.23	0.33	0.01	0.01
変動係数	4.5%	4.2%	4.2%	4.9%	0.5%	1.3%

E_{fr} : 縦振動ヤング係数、 E_{afb} : たわみ振動法による曲げヤング係数

[表 3.-1) - (2) -2 面外載荷試験体の弾性係数非破壊測定の結果]

試験体 No.	載荷前		載荷後		載荷後 / 載荷前	
	E_{fr}	E_{afb}	E_{fr}	E_{afb}	E_{fr}	E_{afb}
	kN/mm ²	kN/mm ²	kN/mm ²	kN/mm ²		
OBIL.1	5.36	6.75	5.55	6.81	1.04	1.01
OBIL.2	5.01	6.10	5.24	6.41	1.04	1.05
OBIL.3	5.07	6.39	5.26	6.56	1.04	1.03
OBIL.4	4.80	5.81	5.02	6.03	1.05	1.04
OBIL.5	5.10	6.30	5.26	6.55	1.03	1.04
OBIL.6	4.61	5.85	4.81	6.07	1.04	1.04
OBIL.7	4.66	5.73	4.86	6.00	1.04	1.05
平均値	4.94	6.13	5.14	6.35	1.04	1.04
標準偏差	0.27	0.37	0.26	0.32	0.01	0.01
変動係数	5.4%	6.1%	5.1%	5.0%	0.5%	1.4%

E_{fr} : 縦振動ヤング係数、 E_{afb} : たわみ振動法による曲げヤング係数

[表 3.-1) - (2) -3 面内無載荷試験体の弾性係数非破壊測定の結果]

試験体 No.	静置前		静置後		静置後 / 静置前	
	E_{fr}	E_{afb}	E_{fr}	E_{afb}	E_{fr}	E_{afb}
	kN/mm ²	kN/mm ²	kN/mm ²	kN/mm ²		
IBIN.1	4.53	4.11	4.80	4.26	1.06	1.04
IBIN.2	5.17	4.91	5.42	4.91	1.05	1.00
IBIN.3	4.86	4.50	5.15	4.69	1.06	1.04
IBIN.4	5.16	4.79	5.43	4.96	1.05	1.04
IBIN.5	5.11	5.06	5.35	5.06	1.05	1.00
IBIN.6	4.84	4.53	5.11	4.67	1.06	1.03
IBIN.7	5.14	4.86	5.37	4.84	1.05	1.00
平均値	4.97	4.68	5.23	4.77	1.05	1.02
標準偏差	0.24	0.32	0.23	0.26	0.01	0.02
変動係数	4.8%	6.9%	4.4%	5.6%	0.5%	2.0%

E_{fr} : 縦振動ヤング係数、 E_{afb} : たわみ振動法による曲げヤング係数

[表 3.-1) - (2) -4 面内載荷試験体の弾性係数非破壊測定の結果]

試験体 No.	載荷前		載荷後		載荷後 / 載荷前	
	E_{fr}	E_{afb}	E_{fr}	E_{afb}	E_{fr}	E_{afb}
	kN/mm ²	kN/mm ²	kN/mm ²	kN/mm ²		
IBIL.1	5.05	4.68	5.36	4.84	1.06	1.03
IBIL.2	4.94	4.61	5.23	4.78	1.06	1.04
IBIL.3	4.94	4.74	5.19	4.74	1.05	1.00
IBIL.4	5.47	5.24	5.73	5.27	1.05	1.01
IBIL.5	5.20	5.10	5.47	5.09	1.05	1.00
IBIL.6	5.05	5.03	5.33	5.02	1.06	1.00
IBIL.7	4.99	4.76	5.26	4.75	1.05	1.00
平均値	5.09	4.88	5.37	4.93	1.05	1.01
標準偏差	0.19	0.24	0.18	0.20	0.00	0.02
変動係数	3.8%	4.9%	3.4%	4.1%	0.5%	1.7%

E_{fr} : 縦振動ヤング係数、 E_{afb} : たわみ振動法による曲げヤング係数

[表 3.-1) - (2) -5 縦圧縮無載荷試験体の弾性係数非破壊測定の結果]

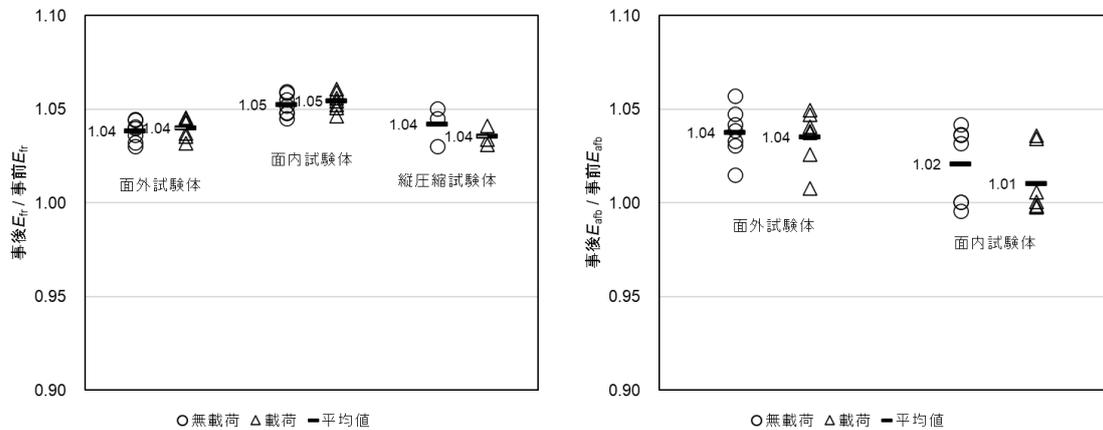
試験体 No.	載荷前	載荷後	載荷後 / 載荷前
	E_{fr}	E_{fr}	E_{fr}
	kN/mm ²	kN/mm ²	
CIN.1	5.19	5.45	1.05
CIN.2	5.33	5.49	1.03
CIN.3	4.94	5.16	1.05
平均値	5.15	5.37	1.04
標準偏差	0.20	0.18	0.01
変動係数	3.9%	3.4%	1.0%

E_{fr} : 縦振動ヤング係数

[表 3.-1) - (2) -6 縦圧縮载荷試験体の弾性係数非破壊測定の結果]

試験体 No.	载荷前	载荷後	载荷後 / 载荷前
	E_{fr}	E_{fr}	E_{fr}
	kN/mm ²	kN/mm ²	
CIL.1	4.66	4.86	1.04
CIL.2	4.68	4.83	1.03
CIL.3	5.05	5.22	1.03
平均値	4.80	4.97	1.04
標準偏差	0.22	0.22	0.01
変動係数	4.5%	4.4%	0.5%

E_{fr} : 縦振動ヤング係数



[図 3.-1) - (2) -1 静置・载荷前後の弾性係数の比]

(図中の数字は平均値。事前 E_{fr} 、事前 E_{afb} : 静置・载荷前に測定した弾性係数、事後 E_{fr} 、事後 E_{afb} : 静置・载荷後に測定した弾性係数)

(2) 面外/面内曲げ試験について

(A) 面外曲げ試験

(a) 試験体及び試験方法

2) の屋内長期載荷試験で用いた面外載荷試験体のうち、無載荷試験体及び載荷試験体それぞれ4体で、面外曲げ試験を行った。試験は木材実大強度試験を用いて行った(図3.)-2) - (1) - (A) -1)。面外載荷試験体の寸法は厚さ 90 mm×幅 300 mm×長さ 1980 mm である。荷重条件は支点間スパンを 1680 mm、支点から荷重点までの距離を 600 mm、荷重点間距離を 480 mm とした4点荷重方式、クロスヘッドの移動速度は 12 mm/分とした。構造用木材の強度試験マニュアル⁵を参考に、以下の式によりみかけの曲げヤング係数 (E_m)、曲げ強度 (σ_b)を算出した。

$$E_m = \frac{a(3L^2 - 4a^2)\Delta P}{4bh^3\Delta\delta_t}$$

$$\sigma_b = \frac{3aP_{\max}}{bh^2}$$

ここで、 a ：支点から荷重点までの距離 (600 mm)、 L ：支点間スパン (1680 mm)、 ΔP ：比例域における上限荷重と下限荷重の差、 b ：試験体幅、 h ：試験体材せい、 $\Delta\delta_t$ ： ΔP に対応する支点間たわみ、 P_{\max} ：最大荷重

試験終了後、試験体から切片を採取し、全乾法により試験時の含水率を算出した。



[図3.)-2) - (1) - (A) -1 面外曲げ試験の様子]

(b) 結果

結果を、計算値と合わせて表3.)-2) - (1) - (B) -1 及び表3.)-2) - (1) - (B) -2 及

⁵ (公財)日本住宅・木材技術センター：構造用木材の強度試験マニュアル (2011)

び図 3.) -2) - (1) - (B) -1 に、荷重-スパン中央たわみの関係を図 3.) -2) - (1) - (B) -2 に示す。表 3.) -2) - (1) - (B) -1 及び表 3.) -2) - (1) - (B) -2 には試験前に行った非破壊測定による弾性係数の結果もあわせて示し、図 3.) -2) - (1) - (B) -3 にたわみ振動法曲げヤング係数とみかけの曲げヤング係数、たわみ振動法曲げヤング係数と曲げ強度の関係を示す。また、図 3.) -2) - (1) - (B) -4 及び図 3.) -2) - (1) - (B) -5 に各試験体の破壊形態を示す。曲げヤング係数の計算値は以下の式により平均値に相当する値を算出した。

$$\text{曲げヤング係数計算値} = \frac{\sum(E_i I_i + E_i A_i z_i^2)}{I_0}$$

ここで、 E_i ：一方の外層から数えて i 番目の層に使用するラミナの曲げヤング係数（弱軸ラミナはゼロ）、 I_i ： i 番目の層の断面二次モーメント、 A_i ： i 番目の層の断面積、 z_i ：CLT の中立軸と i 番目の層のラミナの重心との距離、 I_0 ：CLT の断面二次モーメント。パネル強度等級 Mx60 として $E_i (i=1, 3) = 6000 \text{ N/mm}^2$ とした。

また、曲げ強度の計算値は以下の式により平均値に相当する値及び下限値に相当する値を算出した。

$$\text{曲げ強度計算値} = \Phi \sigma_{b_oml} \frac{\sum(E_i I_i + E_i A_i z_i^2)}{E_0 I_0}$$

ここで、 Φ ：係数（平均値に相当する値の算出では 0.65、下限値に相当する値の算出では 0.4875）、 E_0 ：最も外側の層に使用する強軸ラミナの曲げヤング係数、 σ_{b_oml} ：最も外側の層に使用する強軸ラミナの曲げ強度（ σ_{b_oml} には CLT の JAS に規定される M60 ラミナの曲げ強度平均値 27.0 N/mm² を用いた）。

破壊形態は、すべての試験体で平行層ラミナのフィンガージョイント部を起点とする曲げ破壊であった。また、曲げヤング係数及び曲げ強度の実験値は計算値を上回った。無載荷試験体の性能特性値を基準としたときの載荷試験体の性能特性値の比を表 3.) -2) - (1) - (B) -3 に示す。載荷試験体の特性値が低下する傾向がみられたが、実験値のばらつきが大きさによりもたらされたものと考えられる。以上より、載荷による面外曲げ性能の低下が起こる可能性は低いと考えられる。

[表 3.) -2) - (1) - (B) -1 無載荷試験体の面外曲げ試験結果]

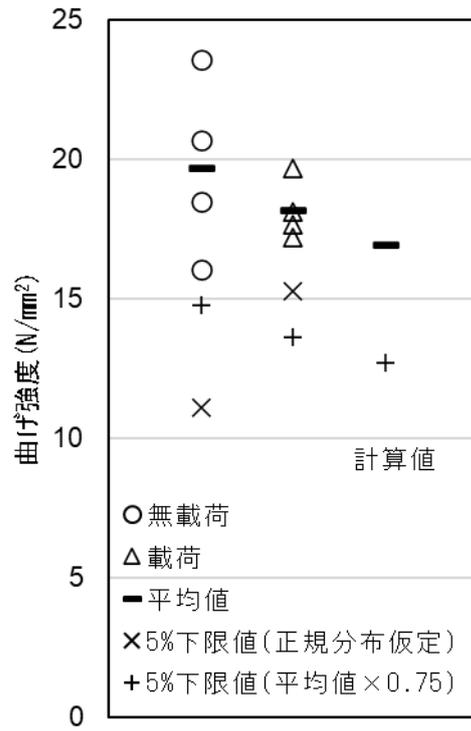
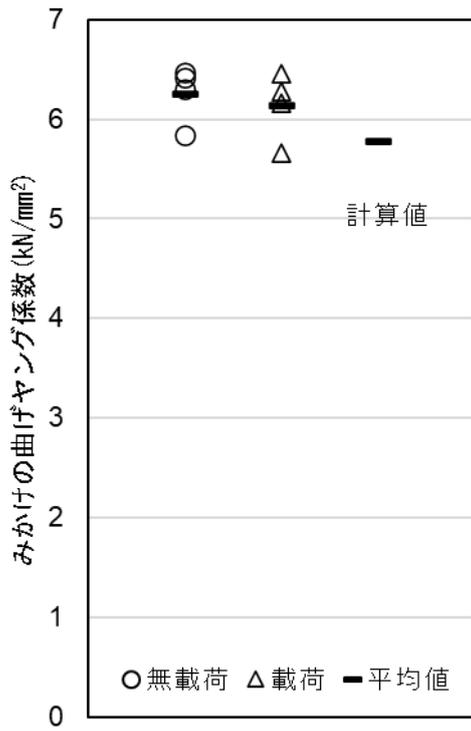
試験体 No.	E_{fr}	E_{afb}	E_m	σ_b	破壊形態	破壊時間	含水率
	kN/mm ²	kN/mm ²	kN/mm ²	N/mm ²		分	%
OBIN.1	5.59	6.85	6.42	23.6	曲げ	2.0	11.1
OBIN.3	5.35	6.81	6.30	18.5	曲げ	1.6	11.0
OBIN.5	5.55	6.93	6.47	20.7	曲げ	2.0	11.0
OBIN.7	5.02	6.08	5.84	16.0	曲げ	1.5	11.0
平均値	5.38	6.66	6.26	19.7			
標準偏差	0.26	0.40	0.29	3.2			
変動係数	4.8%	5.9%	4.6%	16.3%			

E_{fr} : 縦振動ヤング係数、 E_{afb} : たわみ振動法による曲げヤング係数、
 E_m : 曲げ試験によるみかけの曲げヤング係数、 σ_b : 曲げ強度

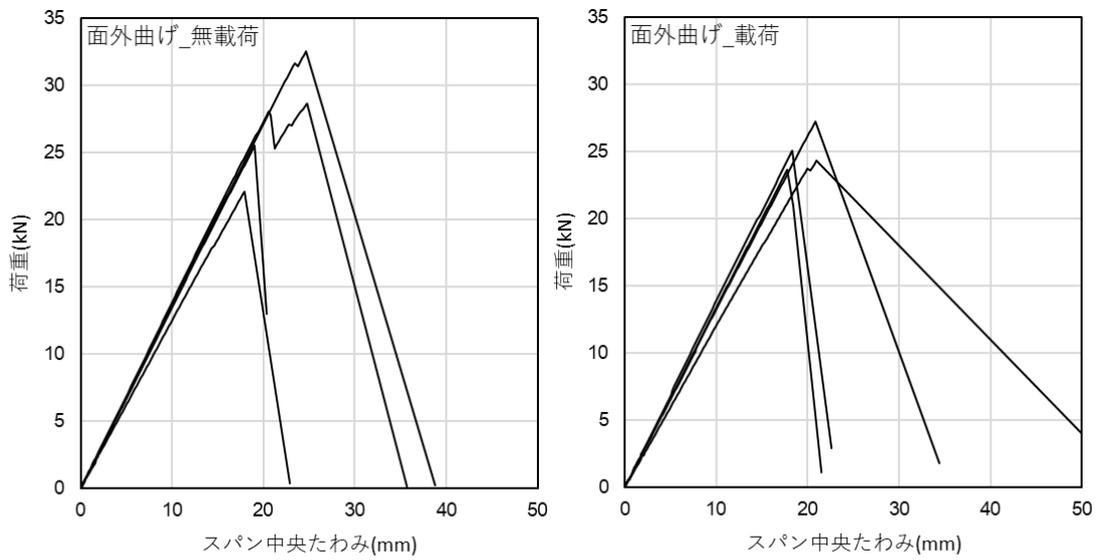
[表 3.) -2) - (1) - (B) -2 載荷試験体の面外曲げ試験結果]

試験体 No.	E_{fr}	E_{afb}	E_m	σ_b	破壊形態	破壊時間	含水率
	kN/mm ²	kN/mm ²	kN/mm ²	N/mm ²		分	%
OBIL.1	5.55	6.81	6.46	18.1	曲げ	1.5	10.8
OBIL.3	5.26	6.56	6.16	19.7	曲げ	1.7	10.7
OBIL.5	5.26	6.55	6.28	17.2	曲げ	1.6	11.0
OBIL.7	4.86	6.00	5.67	17.6	曲げ	1.7	10.7
平均値	5.23	6.48	6.14	18.2			
標準偏差	0.28	0.34	0.34	1.1			
変動係数	5.4%	5.3%	5.5%	5.9%			

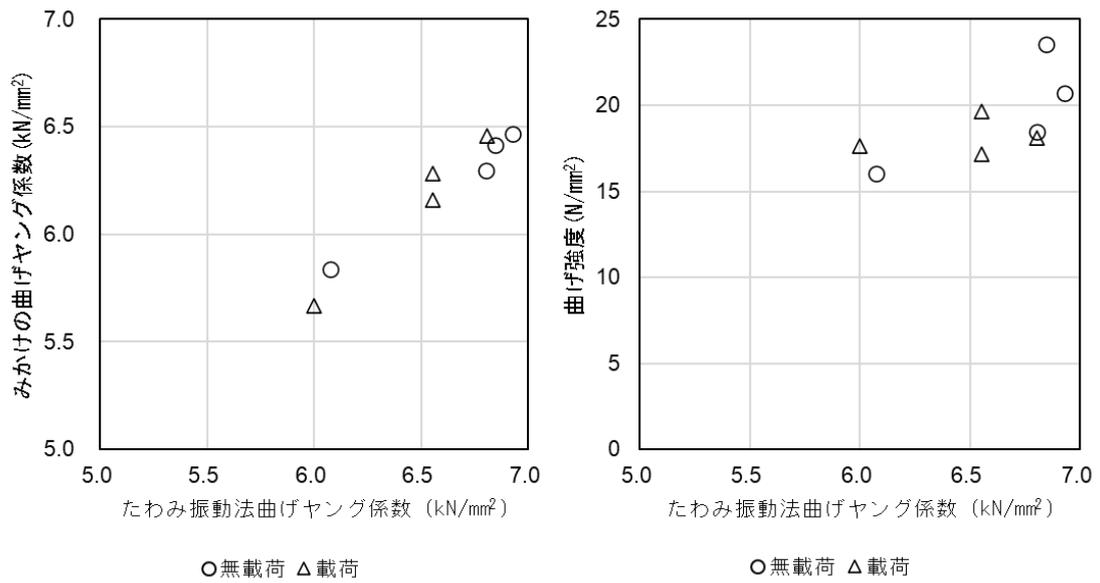
E_{fr} : 縦振動ヤング係数、 E_{afb} : たわみ振動法による曲げヤング係数、
 E_m : 曲げ試験によるみかけの曲げヤング係数、 σ_b : 曲げ強度



[図 3.) -2) - (1) - (B) -1 面外曲げ試験の結果]



[図 3.) -2) - (1) - (B) -2 面外曲げ試験の荷重-変位曲線]



[図 3.) -2) - (1) - (B) -3 たわみ振動法曲げヤング係数とみかけの曲げヤング係数及びたわみ振動法曲げヤング係数と曲げ強度の関係 (面外曲げ試験)]



[図 3.) -2) - (1) - (B) -4 面外曲げ試験の破壊形態 (無載荷試験体)]



[図 3.) -2) - (1) - (B) -5 面外曲げ試験の破壊形態(載荷試験体)]

[表 3.) -2) - (1) - (B) -3 無載荷試験体の性能特性値を基準としたときの載荷試験体の性能特性値の比 (面外曲げ試験)]

特性値	曲げ強度	無載荷 / 載荷
みかけの曲げヤング係数	平均値	0.982
曲げ強度	平均値	0.922
曲げ強度	5%下限値(正規分布仮定)	1.378

(B) 面内曲げ試験

(a) 試験体及び試験方法

2) の屋内長期載荷試験で用いた面内載荷試験体のうち、無載荷試験体及び載荷試験体それぞれ4体で、面内曲げ試験を行った。試験は木材実大強度試験を用いて行った(図3.)-2) - (2) - (A) -1)。面内載荷試験体の寸法は厚さ 90 mm×幅 180 mm×長さ 3300 mm である。荷重条件は支点間スパンを 3000 mm とした 3 等分点 4 点荷重方式、クロスヘッドの移動速度は 12 mm/分とした。構造用木材の強度試験マニュアル⁶を参考に、以下の式によりみかけの曲げヤング係数 (E_m)、曲げ強度 (σ_b)を算出した。

$$E_m = \frac{a(3L^2 - 4a^2)\Delta P}{4bh^3\Delta\delta_t}$$

$$\sigma_b = \frac{3aP_{\max}}{bh^2}$$

ここで、 a : 支点から荷重点までの距離 (600mm)、 L : 支点間スパン (1680mm)、 ΔP : 比例域における上限荷重と下限荷重の差、 b : 試験体幅、 h : 試験体材せい、 $\Delta\delta_t$: ΔP に対応する支点間たわみ、 P_{\max} : 最大荷重

試験終了後、試験体から切片を採取し、全乾法により試験時の含水率を算出した。



[図 3.) -2) - (2) - (A) -1 面内曲げ試験の様子]

(b) 結果

結果を、計算値とあわせて表 3.) -2) - (2) - (B) -1 及び表 3.) -2) - (2) - (B) -2、図 3.) -2) - (2) - (B) -1 に、荷重-支点間たわみの関係を図 3.) -2) - (2) - (B) -2 に示す。表 3.) -2) - (2) - (B) -1 及び表 3.) -2) - (2) - (B) -2 には試験前に行った非破壊

⁶ (公財)日本住宅・木材技術センター：構造用木材の強度試験マニュアル (2011)

測定による弾性係数の結果もあわせて示し、図 3.) -2) - (2) - (B) -3 にたわみ振動法曲げヤング係数とみかけの曲げヤング係数、たわみ振動法曲げヤング係数と曲げ強度の関係を示す。また、図 3.) -2) - (2) - (B) -4 及び図 3.) -2) - (2) - (B) -5 に各試験体の破壊形態を示す。曲げヤング係数の計算値は以下の式により平均値に相当する値を算出した。

$$\text{曲げヤング係数計算値} = \frac{\sum(E_i A_i)}{A_o}$$

ここで、 E_i ：一方の外層から数えて i 番目の層に使用するラミナの曲げヤング係数（弱軸ラミナはゼロ）、 A_i ： i 番目の層の断面積、 A_o ：CLT の断面積。パネル強度等級 Mx60 として $E_i (i = 1, 3) = 6000 \text{ N/mm}^2$ 。

また、曲げ強度の計算値は以下の式により平均値に相当する値及び下限値に相当する値を算出した。

$$\text{曲げ強度計算値} = \Phi \sigma_{b_oml} \frac{\sum(E_i A_i)}{E_o I_o}$$

ここで、 Φ ：係数（平均値に相当する値の算出では 0.8、下限値に相当する値の算出では 0.6）、 E_o ：最も外側の層に使用する強軸ラミナの曲げヤング係数、 σ_{b_oml} ：最も外側の層に使用する強軸ラミナの曲げ強度（ σ_{b_oml} には CLT の JAS に規定される M60 ラミナの曲げ強度平均値 27.0 N/mm^2 を用いた）。

破壊形態は、すべての試験体で平行層ラミナのフィンガージョイント部を起点とする曲げ破壊であった。曲げヤング係数及び曲げ強度の実験値は計算値を上回った。無載荷試験体の性能特性値を基準としたときの載荷試験体の性能特性値の比を表 3.) -2) - (2) - (B) -3 に示す。載荷試験体の 5%下限値が低下する傾向がみられたが、実験値のばらつきが大きさによりもたらされたものと考えられる。以上より、載荷による面内曲げ性能の低下が起る可能性は低いと考えられる。

[表 3.) -2) - (2) - (B) -1 無載荷試験体の面内曲げ試験結果]

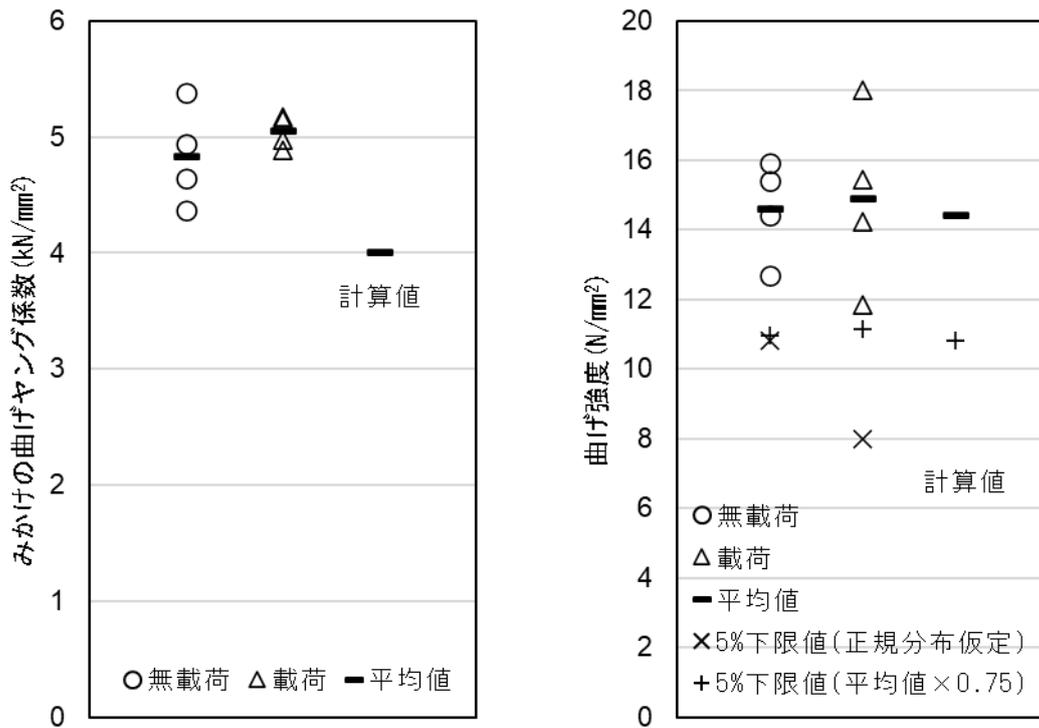
試験体 No.	E_{fr}	E_{afb}	E_m	σ_b	破壊形態	破壊時間	含水率
	kN/mm ²	kN/mm ²	kN/mm ²	N/mm ²		分	%
IBIN.1	4.80	4.26	4.37	12.7	曲げ	2.6	11.4
IBIN.3	5.15	4.69	4.65	15.9	曲げ	3.1	10.8
IBIN.5	5.35	5.06	5.38	15.4	曲げ	2.8	11.0
IBIN.7	5.37	4.84	4.94	14.4	曲げ	2.5	11.1
平均値	5.17	4.71	4.83	14.6			
標準偏差	0.27	0.34	0.43	1.4			
変動係数	5.1%	7.2%	9.0%	9.7%			

E_{fr} ：縦振動ヤング係数、 E_{afb} ：たわみ振動法による曲げヤング係数、
 E_m ：曲げ試験によるみかけの曲げヤング係数、 σ_b ：曲げ強度

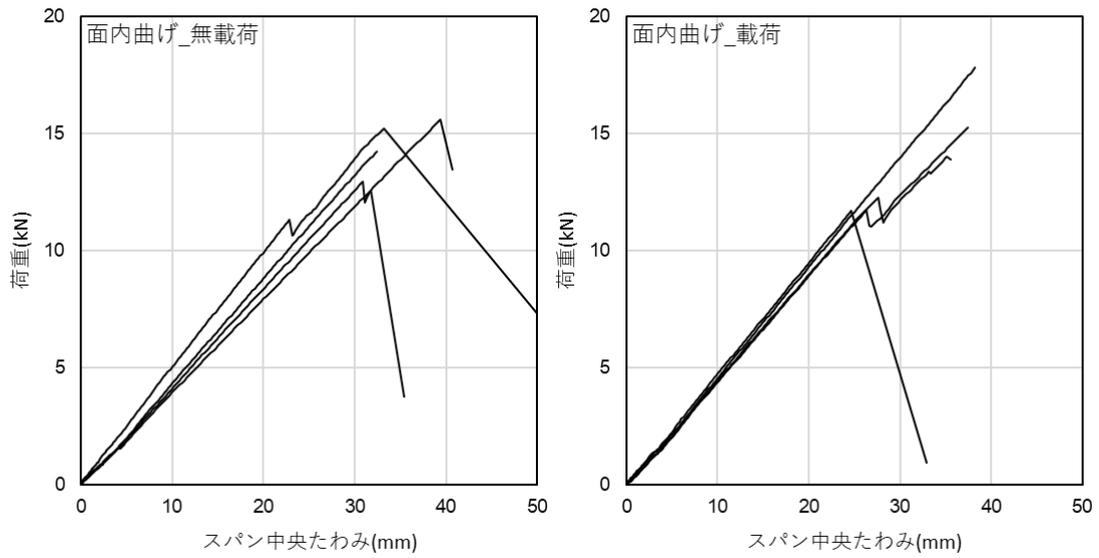
[表 3.) -2) - (2) - (B) -2 載荷試験体の面内曲げ試験結果]

試験体 No.	E_{fr}	E_{afb}	E_m	σ_b	破壊形態	破壊時間	含水率
	kN/mm ²	kN/mm ²	kN/mm ²	N/mm ²		分	%
IBIL.1	5.36	4.84	5.15	18.0	曲げ	3.0	11.7
IBIL.3	5.19	4.74	4.98	14.2	曲げ	2.8	10.8
IBIL.5	5.47	5.09	5.17	11.8	曲げ	2.1	10.8
IBIL.7	5.26	4.75	4.89	15.4	曲げ	2.9	11.1
平均値	5.32	4.86	5.05	14.9			
標準偏差	0.12	0.16	0.14	2.6			
変動係数	2.2%	3.3%	2.7%	17.3%			

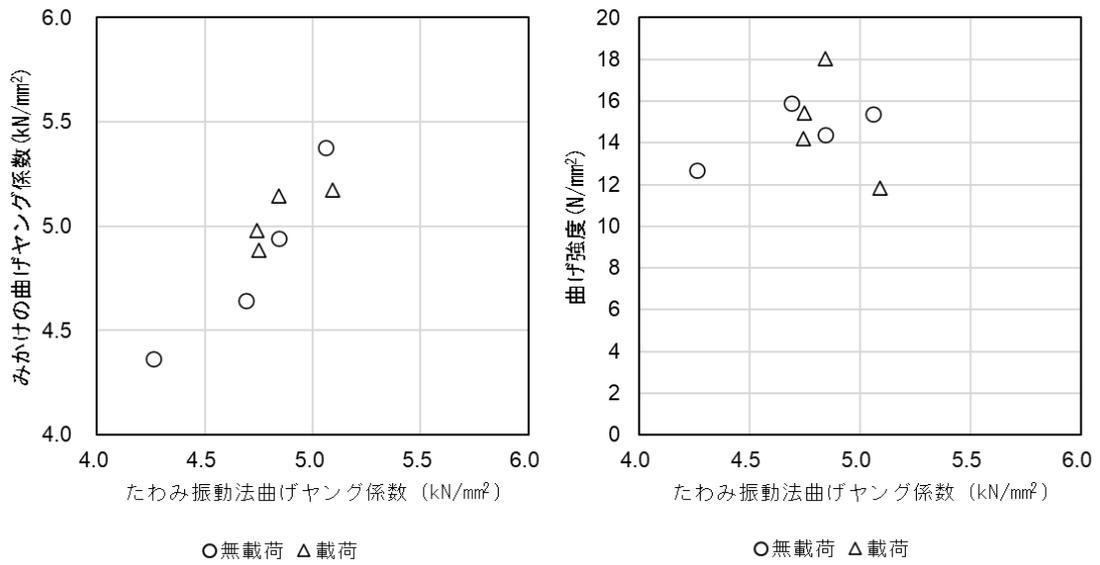
E_{fr} : 縦振動ヤング係数、 E_{afb} : たわみ振動法による曲げヤング係数、
 E_m : 曲げ試験によるみかけの曲げヤング係数、 σ_b : 曲げ強度



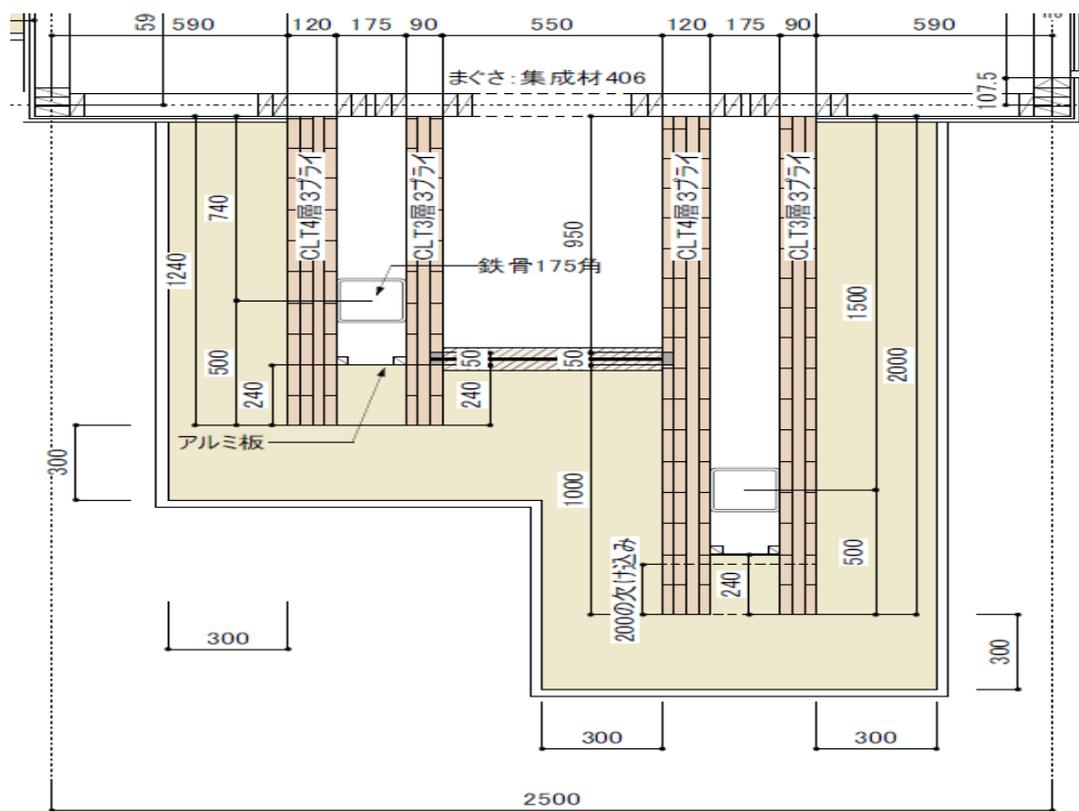
[図 3.) -2) - (2) - (B) -1 面内曲げ試験の結果]



[図 3.) -2) - (2) - (B) -2 面内曲げ試験の荷重-変位曲線]



[図 3.) -2) - (2) - (B) -3 たわみ振動法曲げヤング係数とみかけの曲げヤング係数及びたわみ振動法曲げヤング係数と曲げ強度の関係 (面内曲げ試験)]



[図 3.) -2) - (2) - (B) -4 面内曲げ試験の破壊形態(無載荷試験体)]



[図 3.) -2) - (2) - (B) -5 面内曲げ試験の破壊形態(載荷試験体)]

[表 3.) -2) - (2) - (B) -3 無載荷試験体の性能特性値を基準としたときの載荷試験体の性能特性値の比 (面内曲げ試験)]

特性値	曲げ強度	無載荷 / 載荷
みかけの曲げヤング係数	平均値	1.044
曲げ強度	平均値	1.019
曲げ強度	5%下限値(正規分布仮定)	0.740

(3) 面外/面内せん断試験について

(A) 面外せん断試験

(a) 試験体及び試験方法

2) の屋内長期荷重試験で用いた面外荷重試験体のうち、無荷重試験体及び荷重試験体それぞれ3体において、せん断応力が生じていた両端600 mm 区間から2体採材し、それぞれ6体の試験体で、面外せん断試験を行った。試験は木材実大強度試験を用いて行った(図3.)-3)-(1)-(A)-1。荷重条件は支点間スパン450 mm とした中央集中3点荷重方式、クロスヘッドの移動速度は3mm/分とした。支点及び加力点の加圧版の幅は90 mm とした。以下の式によりせん断強度(σ_s)を算出した。

$$\sigma_s = \frac{3P_{\max}}{4bh}$$

ここで、 P_{\max} : 最大荷重、 b : 試験体幅、 h : 試験体材せい

試験終了後、試験体から切片を採取し、全乾法により試験時の含水率を算出した。



[図3.)-3)-(1)-(A)-1 面外せん断試験の様子]

(b) 結果

結果を、基準強度値とあわせて表3.)-3)-(1)-(B)-1及び表3.)-3)-(1)-(B)-2、図3.)-3)-(1)-(B)-1に、荷重-クロスヘッド移動量の関係を図3.)-3)-(1)-(B)-2に示す。また、図3.)-3)-(1)-(B)-3及び図3.)-3)-(1)-(B)-4に破壊形態を示す。破壊形態は、多くの試験体で直交層のローリングシア破壊が先行し破壊に至るものであった。一部の試験体では平行層引張側の曲げ破壊で最大荷重を記録した。CLTの面外せん断基準強度はスギで0.9 N/mm²であり、すべての試験体で基準強度値を上回った。ただし、基準強度値は安全側評価となっている傾向がある。

無載荷試験体のせん断強度を基準としたときの載荷試験体のせん断強度の比を表 3.) -3) - (1) - (B) -3 に示す。載荷試験体は若干のせん断強度の低下がみられたが、無載荷試験体のばらつきの範囲内にあると考えられる。以上より、載荷による面外せん断強度の低下が起こる可能性は低いと考えられる。

[表 3.) -3) - (1) - (B) -1 無載荷試験体の面外せん断試験結果]

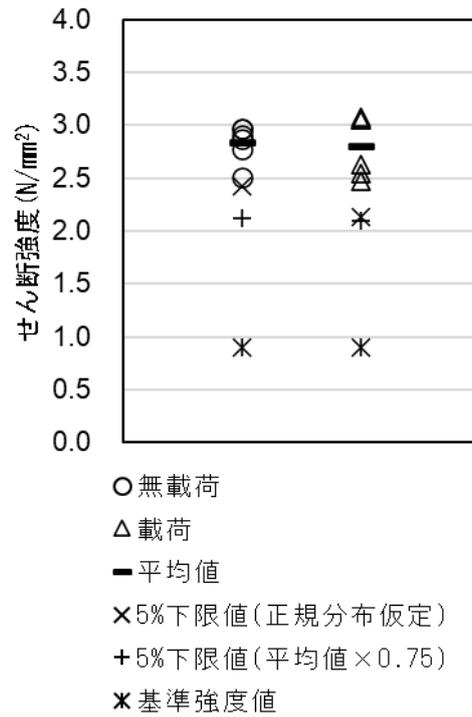
試験体 No.	σ_s	破壊形態	破壊時間	含水率
	N/mm ²		分	%
OBIN.2.1	2.9	せん断	3.3	11.9
OBIN.2.2	2.5	曲げ	2.6	11.9
OBIN.4.1	2.8	せん断曲げ同時	3.1	11.1
OBIN.4.2	2.9	せん断曲げ同時	3.1	11.1
OBIN.6.1	3.0	せん断曲げ同時	3.4	11.4
OBIN.6.2	3.0	せん断曲げ同時	2.9	11.4
平均値	2.8			
標準偏差	0.2			
変動係数	6.2%			

σ_s : せん断強度

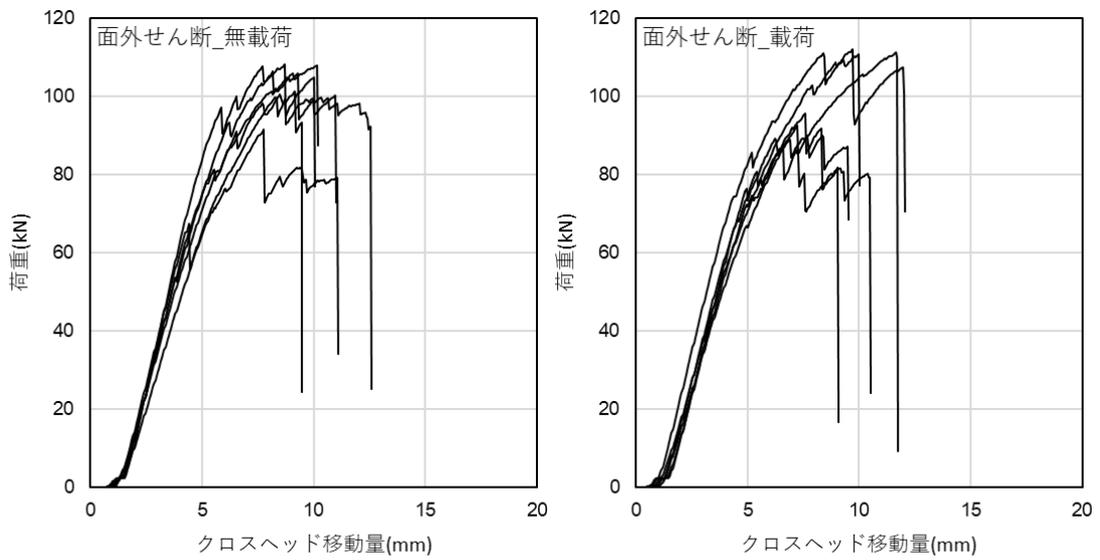
[表 3.) -3) - (1) - (B) -2 載荷試験体の面外せん断試験結果]

試験体 No.	σ_s	破壊形態	破壊時間	含水率
	N/mm ²		分	%
OBIL.2.1	3.1	せん断曲げ同時	3.2	11.4
OBIL.2.2	2.5	曲げ	2.4	11.4
OBIL.4.1	2.5	せん断曲げ同時	2.8	11.4
OBIL.4.2	3.1	せん断曲げ同時	2.8	11.4
OBIL.6.1	3.0	せん断曲げ同時	3.9	11.0
OBIL.6.2	2.6	せん断曲げ同時	2.5	11.0
平均値	2.8			
標準偏差	0.3			
変動係数	10.2%			

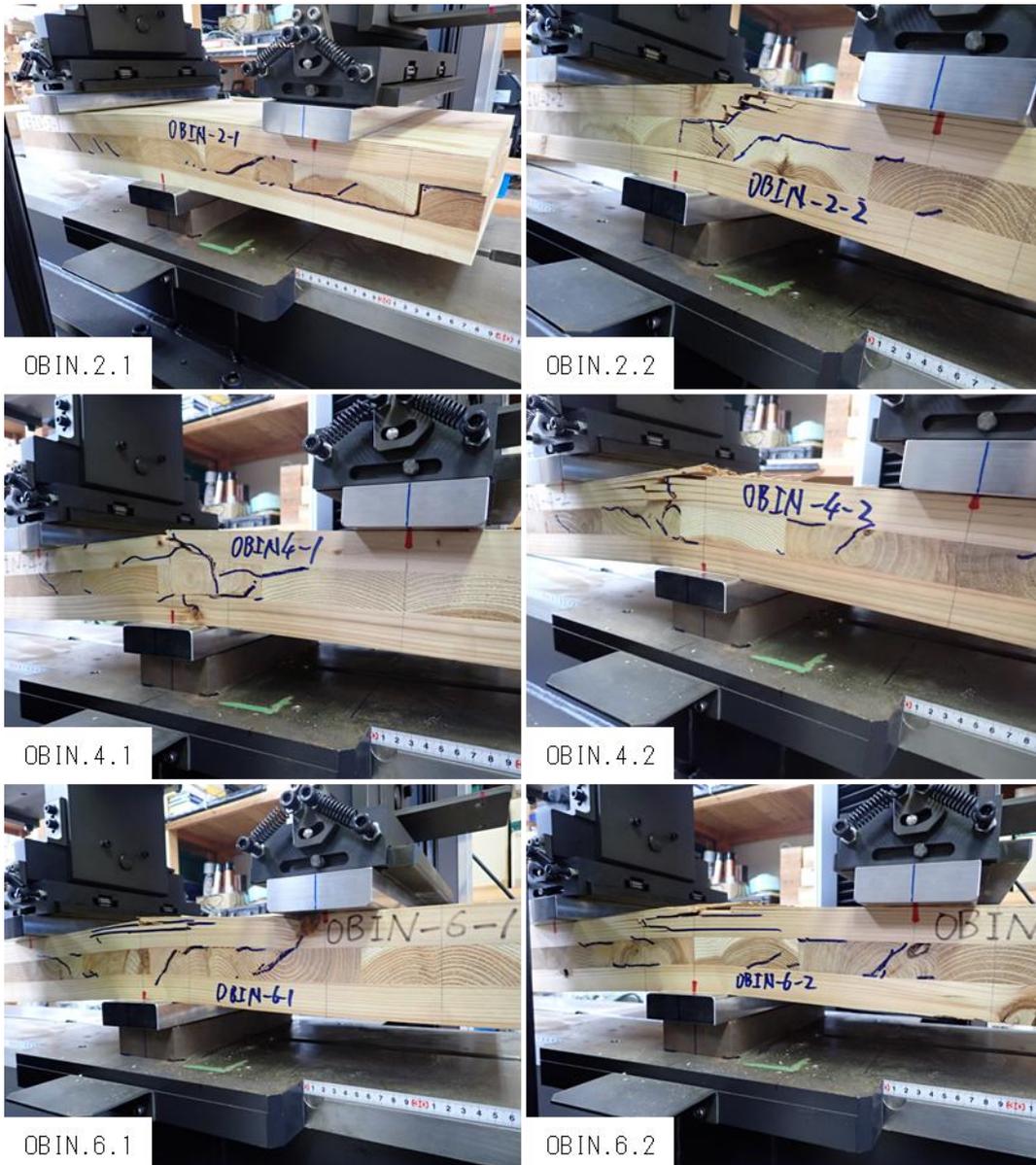
σ_s : せん断強度



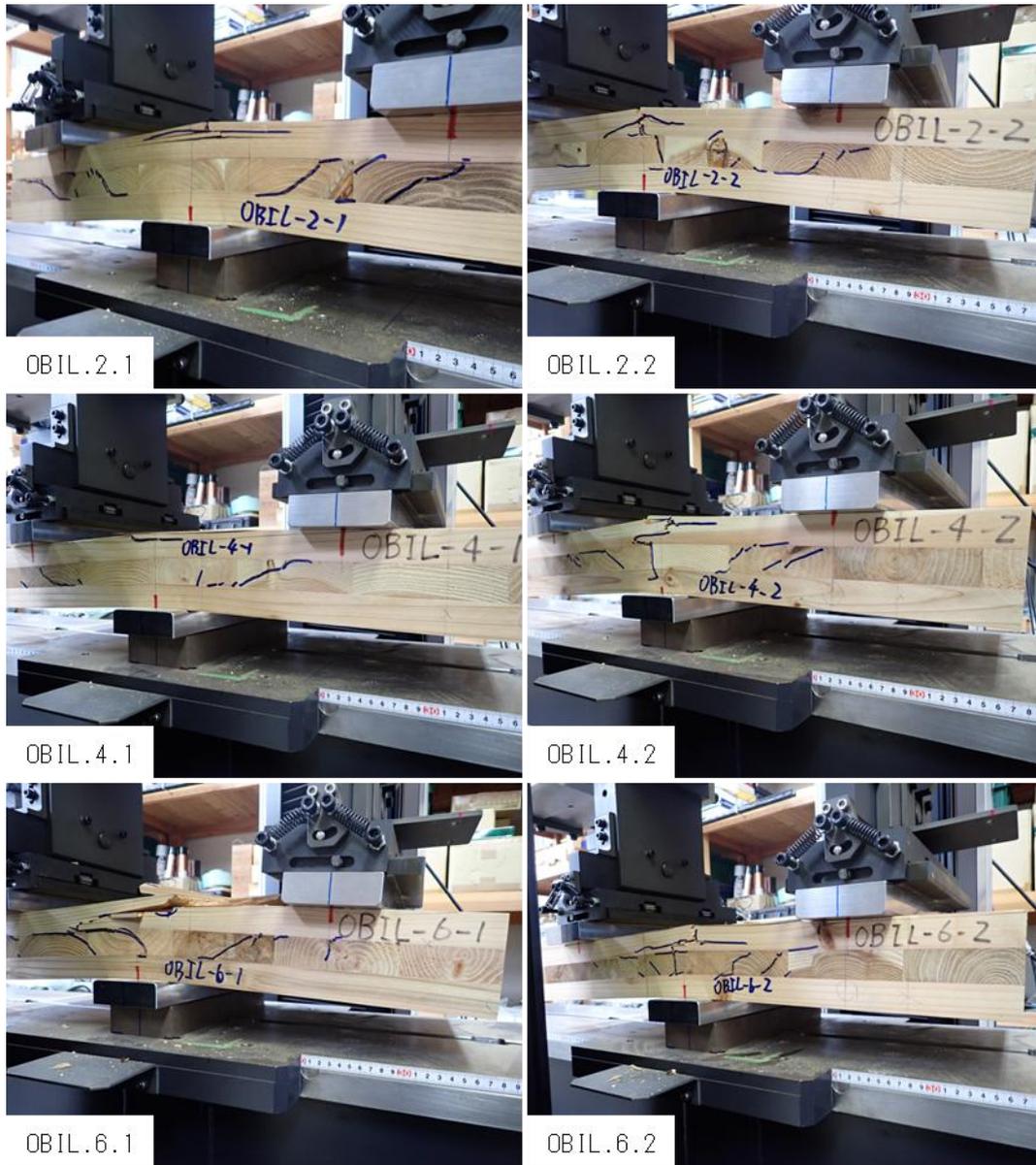
[図 3.) -3) - (1) - (B) -1 面外せん断試験の結果]



[図 3.) -3) - (2) - (B) -2 面外せん断試験の荷重-クロスヘッド移動量曲線]



[図 3.) -3) - (1) - (B) -3 面外せん断試験の破壊形態(無載荷試験体)]



[図 3.) -3) - (1) - (B) -4 面外せん断試験の破壊形態(载荷試験体)]

[表 3.) -3) - (1) - (B) -3 無载荷試験体のせん断強度を基準としたときの载荷試験体のせん断強度の比 (面外せん断試験)]

せん断強度	载荷 / 無载荷
平均値	0.989
5%下限値(正規分布仮定)	0.881

(B) 面内せん断試験

(a) 試験体及び試験方法

2) の屋内長期載荷試験で用いた面内載荷試験体のうち、無載荷試験体及び載荷試験体それぞれ3体を2分割して長さ1650 mmとしたそれぞれ6体の試験体で面内せん断試験を行った。試験は木材実大強度試験を用いて行った(図3.)-3)-(2)-(A)-1)。荷重条件はせん断力一定区間を360 mmとした逆対称4点荷重方式、クロスヘッドの移動速度は3 mm/分とした。加圧版の幅は、支点では120 mm、加力点では100 mmとした。以下の式によりせん断強度(σ_s)を算出した

$$\sigma_s = \frac{3P_{\max}}{4bh}$$

ここで、 P_{\max} : 最大荷重、 b : 試験体幅、 h : 試験体材せい

試験終了後、試験体から切片を採取し、全乾法により試験時の含水率を算出した。



[図3.)-3)-(2)-(A)-1 面内せん断試験の様子]

(b) 結果

結果を、基準強度値とあわせて表3.)-3)-(2)-(A)-1及び表3.)-3)-(1)-(B)-2、図3.)-3)-(2)-(A)-1に、荷重-クロスヘッド移動量の間係を図3.)-3)-(2)-(A)-2に示す。また、図3.)-3)-(2)-(A)-3及び図3.)-3)-(2)-(A)-4に破壊形態を示す。破壊形態は、せん断力が卓越する中央区間の交差接着部のねじりせん断破壊や、平行層ラミナでの繊維並行方向のせん断破壊、左側支点上側または右側荷重点下側での曲げ破壊が混在していた。本試験での試験体の面内せん断基準強度は以下の式により計算した。

$$F_s = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{v_lam_0} \\ f_{v_lam_90} \frac{t_{net}}{t_{gross}} \\ \frac{3bn_{ca}}{8t_{gross}} \cdot \frac{1}{\frac{1}{f_{v_tor}} \left(1 - \frac{1}{m^2}\right) + \frac{2}{f_R} \left(\frac{1}{m} - \frac{1}{m^2}\right)} \end{array} \right\}$$

ここで、 $f_{v_lam_0}$ ：ラミナの繊維方向のせん断強度（スギの場合 2.7 N/mm²）、 $f_{v_lam_90}$ ：ラミナの繊維方向と直交する方向のせん断強度（スギの場合 8.1 N/mm²）、 t_{net} ：外層に直交する層の厚さの合計、 t_{gross} ：CLT の厚さ、 b ：ラミナの幅、 n_{ca} ：CLT の直交接着層の数、 f_{v_tor} ：接着された直交する 2 つのラミナの交差面のねじりせん断強度（スギの場合 3.0 N/mm²）、 f_R ：ローリングシアー強度（スギの場合 1.5 N/mm²）、 m ：各層のラミナの幅方向の数のうち最小の値

本研究での試験体では $t_{net} = 30$ mm、 $t_{gross} = 90$ mm、 $n_{ca} = 2$ 、 $m = 2$ となりこれらを代入すると面内せん断基準強度は $F_s = 1.7$ N/mm² となる。

すべての試験体で実験値は基準強度値を上回った。なお、基準強度値は安全側評価となっている傾向がある。

無載荷試験体のせん断強度を基準としたときの載荷試験体のせん断強度の比を表 3.) - 3) - (2) - (B) - 3 に示す。載荷試験体のせん断強度の低下はみられなかった。以上より、載荷による面内せん断強度の低下が起こる可能性は低いと考えられる。

[表 3.) -3) - (2) - (B) -1 無載荷試験体の面内せん断試験結果]

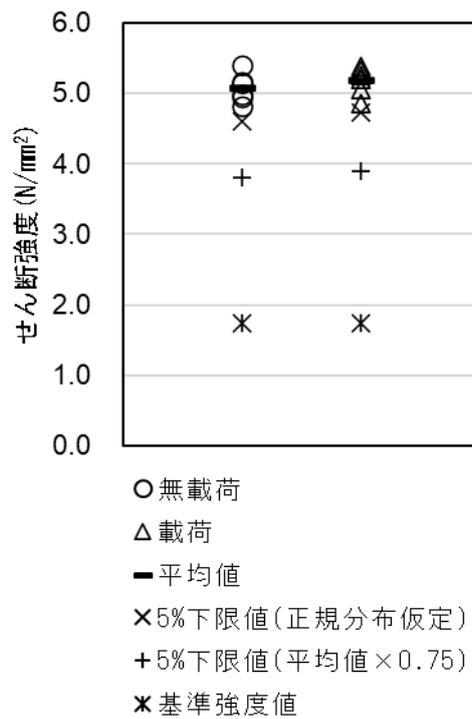
試験体 No.	σ_s N/mm ²	破壊形態	破壊時間 分	含水率 %
IBIN.2.1	5.1	せん断曲げ同時	2.8	11.3
IBIN.2.2	5.4	曲げ	2.6	11.3
IBIN.4.1	5.2	せん断曲げ同時	2.7	11.2
IBIN.4.2	4.9	せん断	2.5	11.2
IBIN.6.1	5.0	せん断	2.9	11.1
IBIN.6.2	4.8	せん断	2.7	11.1
平均値	5.1			
標準偏差	0.2			
変動係数	4.0%			

σ_s ：せん断強度

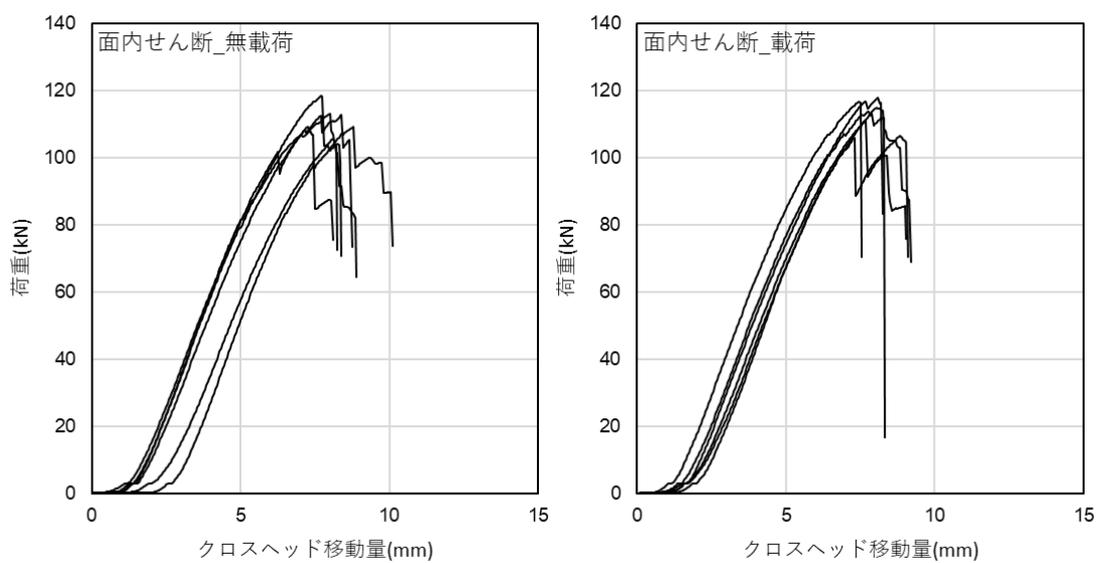
[表 3.) -3) - (2) - (B) -2 載荷試験体の面内せん断試験結果]

試験体 No.	σ_s	破壊形態	破壊時間	含水率
	N/mm ²		分	%
IBIL.2.1	5.3	せん断	2.5	11.1
IBIL.2.2	5.4	曲げ	2.7	11.1
IBIL.4.1	5.1	せん断曲げ同時	2.6	11.1
IBIL.4.2	4.9	せん断	3.0	11.1
IBIL.6.1	5.2	せん断	2.6	11.2
IBIL.6.2	5.3	せん断	2.7	11.2
平均値	5.2			
標準偏差	0.2			
変動係数	3.8%			

σ_s : せん断強度



[図 3.) -3) - (2) - (B) -1 面内せん断試験の結果]



[図 3.) -3) - (2) - (B) -2 面内せん断試験の荷重-クロスヘッド移動量曲線]



[図 3.) -3) - (2) - (B) -3 面内せん断試験の破壊形態(無載荷試験体)]



[図 3.) -3) - (2) - (B) -4 面内せん断試験の破壊形態(载荷試験体)]

[表 3.) -3) - (2) - (B) -3 無载荷試験体のせん断強度を基準としたときの载荷試験体のせん断強度の比 (面内せん断試験)]

せん断強度	载荷 / 無载荷
平均値	1.020
5%下限値(正規分布仮定)	1.027

(4) 縦圧縮試験について

(A) 試験体及び試験方法

2) の屋内長期載荷試験で用いた縦圧縮載荷試験体のうち、無載荷試験体及び載荷試験体それぞれ3体で、縦圧縮試験を行った試験は木材実大強度試験(東京衡機製造所製、最大荷重容量1000kN)を用いて行った(図3.)-4)-(1)-1)。縦圧縮載荷試験体の寸法は厚さ90mm×幅100mm×長さ1000mmである。荷重条件は両端を試験体面外方向のみに回転するピン条件とした圧縮試験、クロスヘッドの移動速度は2mm/分とした。以下の式により縦圧縮強度(σ_c)を算出した。

$$\sigma_c = \frac{P_{\max}}{bh}$$

ここで、 P_{\max} : 最大荷重、 b : 試験体幅、 h : 試験体材せい

試験終了後、試験体から切片を採取し、全乾法により試験時の含水率を算出した。



[図3.)-4)-(2)-(A)-1 縦圧縮試験の様子]

(B) 結果

結果を、計算値とあわせて表3.)-4)-(2)-1及び表3.)-4)-(2)-2、図3.)-4)-(2)-1に示す。また、図3.)-4)-(2)-2及び図3.)-4)-(2)-3に破壊形態を示す。縦圧縮強度の計算値は、以下の式により平均値に相当する値及び下限値に相当する値を算出した。

$$\text{縦圧縮強度計算値} = \Phi \sigma_{c,oml} \frac{\sum(E_i A_i)}{E_o I_o}$$

ここで、 Φ : 係数(平均値に相当する値の算出では0.8、下限値に相当する値の算出では0.6)、 E_i : 一方の外層から数えて*i*番目の層に使用するラミナの曲げヤング係数(弱軸ラミ

ナはゼロ)、 A_i : i 番目の層の断面積、 I_0 : CLTの断面二次モーメント、 E_0 : 最も外側の層に使用する強軸ラミナの曲げヤング係数、 σ_{c_oml} : 最も外側の層に使用する強軸ラミナの圧縮強度。パネル強度等級 Mx60 として $E_i (i=1, 3) = 6000 \text{ N/mm}^2$ 、 σ_{c_oml} には CLT の JAS に規定される M60 ラミナの圧縮強度平均値 21.6 N/mm^2 を用いた。

破壊形態すべて面外方向座屈であり、平行層のフィンガージョイント部を起点として圧縮破壊して座屈に至るものであった。また、すべての試験体で縦圧縮ヤング係数及び縦圧縮強度の実験値は計算値をおおむね上回った。ただし、ここでの計算値は安全側評価と考えられる。

無載荷試験体の縦圧縮強度を基準としたときの載荷試験体の縦圧縮強度の比を表 3.) - 4) - (2) - (B) - 3 に示す。載荷試験体の縦圧縮強度の低下はみられなかった。以上より、載荷による縦圧縮強度の低下が起こる可能性は低いと考えられる。

[表 3.) -4) - (2) - (B) -1 無載荷試験体の縦圧縮試験結果]

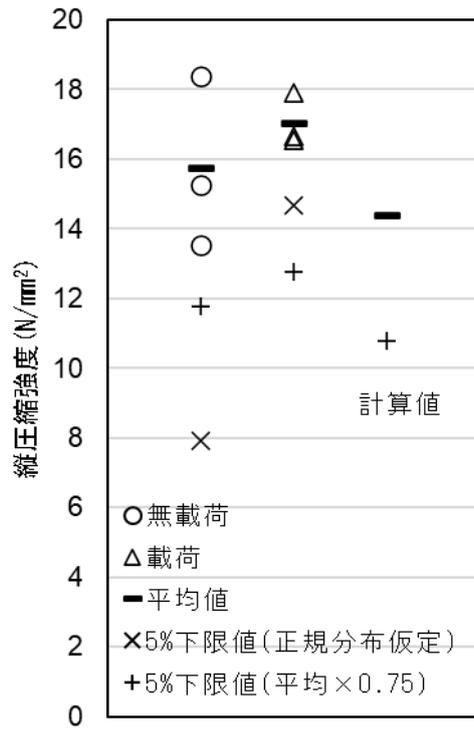
試験体 No.	α_c	破壊形態	破壊時間	含水率
	N/mm ²		分	%
CIN.1	15.3	面外座屈	2.0	9.6
CIN.2	13.5	面外座屈	2.1	9.8
CIN.3	18.4	面外座屈	2.5	10.2
平均値	15.7			
標準偏差	2.5			
変動係数	15.7%			

α_c : 縦圧縮強度

[表 3.) -4) - (2) - (B) -2 載荷試験体の縦圧縮試験結果]

試験体 No.	α_c	破壊形態	破壊時間	含水率
	N/mm ²		分	%
CIL.1	16.7	面外座屈	2.5	9.7
CIL.2	17.9	面外座屈	2.7	9.9
CIL.3	16.5	面外座屈	2.3	9.9
平均値	17.0			
標準偏差	0.7			
変動係数	4.4%			

α_c : 縦圧縮強度



[図 3.) -4) - (2) - (B) -1 縦圧縮試験の結果]



CIN.1

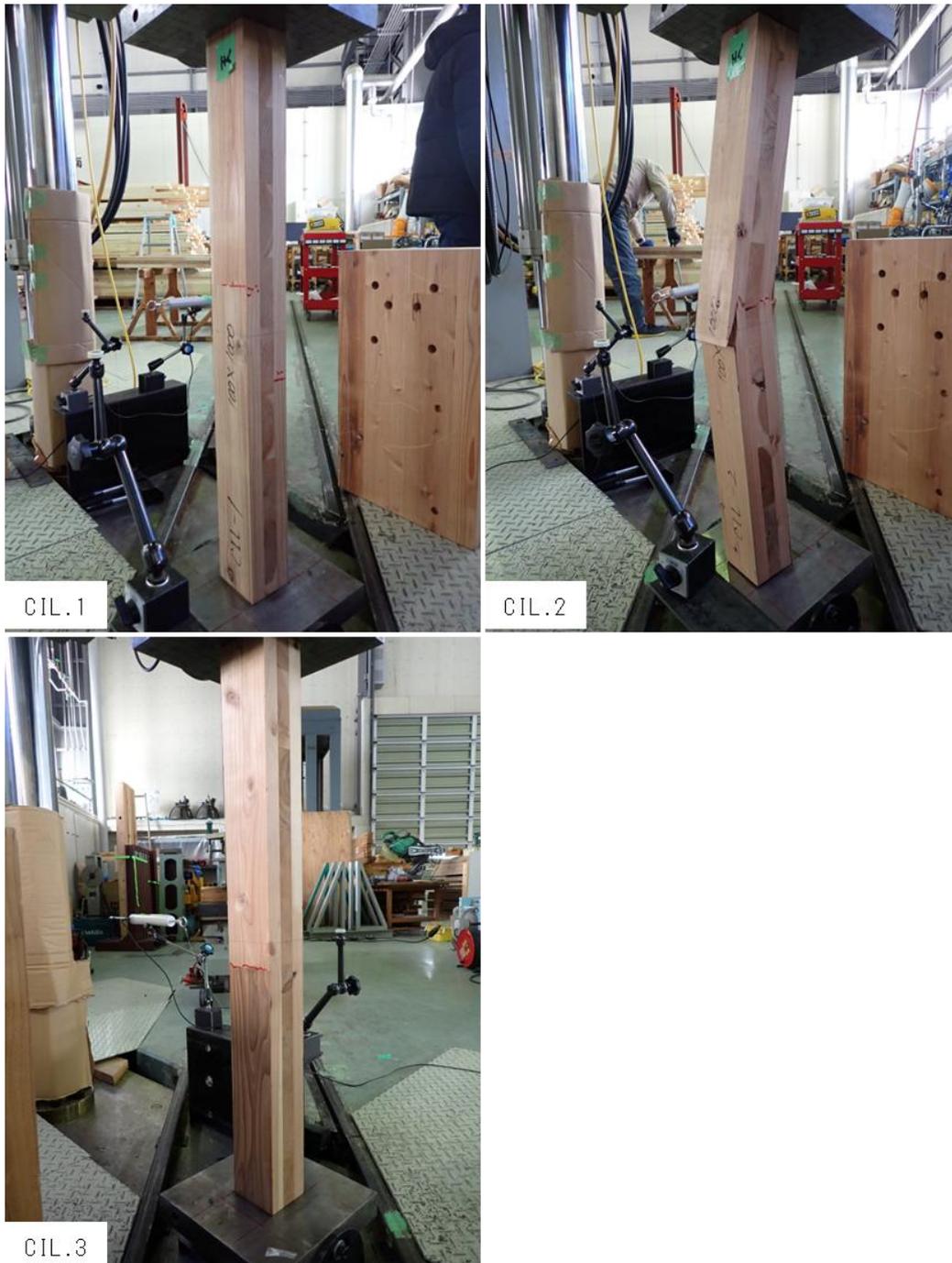


CIN.2



CIN.3

[図 3.) -4) - (2) - (B) -2 縦圧縮試験の破壊形態(無載荷試験体)]



[図 3.) -4) - (2) - (B) -3 縦圧縮試験の破壊形態(載荷試験体)]

[表 3.) -4) - (2) - (B) -3 無載荷試験体の縦圧縮強度を基準としたときの載荷試験体の縦圧縮強度の比]

縦圧縮強度	載荷 / 無載荷
平均値	1.084
5%下限値(正規分布仮定)	1.851

(5) ブロックせん断試験について

(A) 試験体及び試験方法

試験片は、集成材の JAS に規定される形状を参考に、せん断面積が 25×25 mm 及び 35×35 mm (面外・面内試験体のみ)となるように成形した 2 接着層が連続した溝あり連続型とした。溝深さ及び幅は 2 mm とした。2) の屋内長期載荷試験で用いた無載荷試験体及び載荷試験体それぞれで、面外試験体、面内試験体、縦圧縮試験体 1 体ずつから採材した。含水率を測定するための 25×25mm 角の切片をブロックせん断試験片と隣接する位置で採材した。

ブロックせん断試験は試験片 1 体につき全 2 層の接着層で実施した。試験は、試験片に回転モーメントが生じないようにせん断治具を用い、一定速度にて載荷し、破壊までの最大荷重を計測し、最大荷重をせん断面積で除した値をブロックせん断強度とした。また、せん断破断面における木部破断率を算出した。切片切り出し時及びブロックせん断試験時の重量を測定し、最後に絶乾重量を測定して、各時点の含水率を算出した。

(B) 結果

ブロックせん断試験の結果を表 3.) -5) - (2) -1、表 3.) -5) - (2) -2、図 3.) -5) - (2) -1 に示す。また、切片切り出し時及びブロックせん断試験時の含水率を表 3.) -5) - (2) -3 に示す。さらに、表 3.) -5) - (2) -4 に無載荷試験体を基準としたときのブロックせん断強度の比を示す。無載荷及び載荷試験体の比較において、載荷試験体のブロックせん断強度は無載荷試験体のブロックせん断強度のばらつきの範囲内にあると考えられる。木部破断率が CLT の JAS の基準値である 70%を下回った接着層はなかった。以上より、載荷による接着層のブロックせん断強度及び木部破断率への影響はないものと考えられる。

[表 3.) -5) - (2) -1 ブロックせん断試験の結果(せん断面積 25 mm×25 mm)]

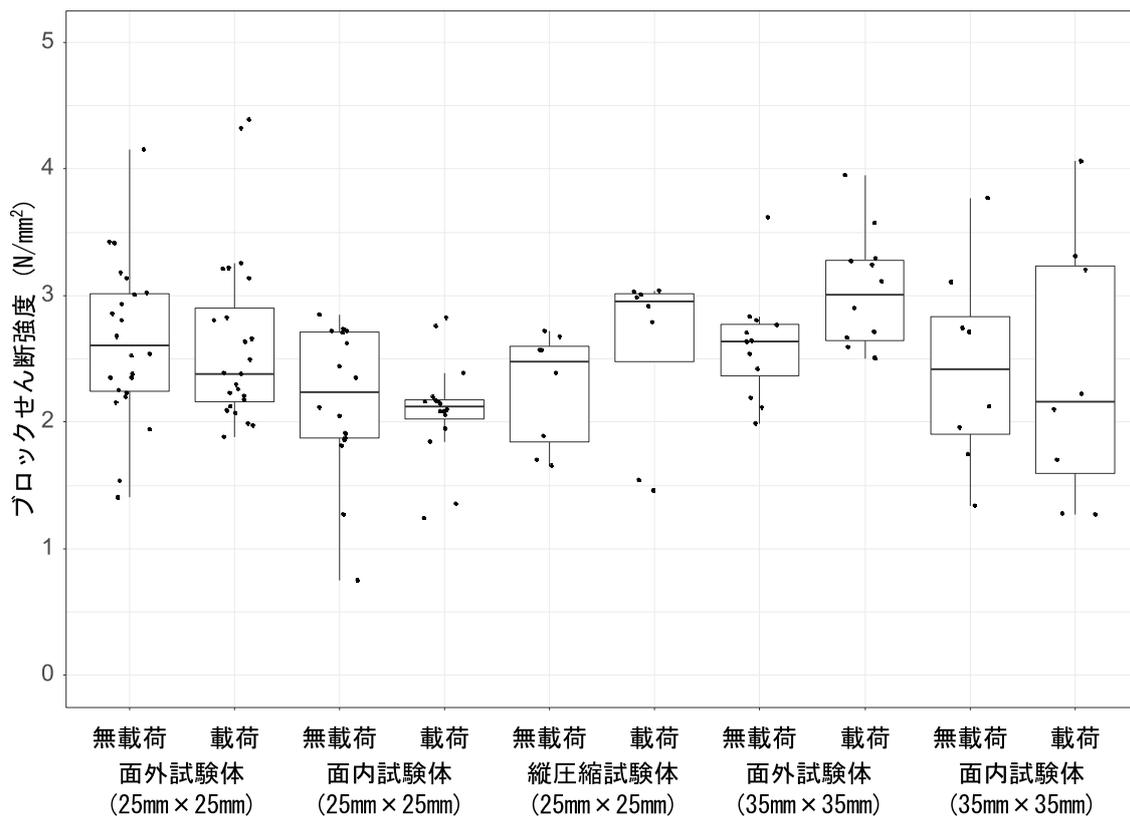
		面外試験体		面内試験体		縦圧縮試験体	
		無載荷	載荷	無載荷	載荷	無載荷	載荷
試験回数		24	24	16	16	8	8
ブロック せん断強度 (N/mm ²)	最大値	4.15	4.39	2.85	2.83	2.72	3.04
	平均値	2.63	2.63	2.17	2.10	2.27	2.60
	最小値	1.41	1.89	0.75	1.24	1.66	1.46
	標準偏差	0.62	0.68	0.59	0.40	0.45	0.68
	変動係数	23.4%	25.8%	27.1%	19.2%	19.7%	26.2%
	5%下限値	1.60	1.64	1.04	1.36	1.41	1.25
木部破断率(%)	最大値	100	100	100	100	100	100
	平均値	99	100	100	99	100	99
	最小値	89	98	97	91	99	95

※5%下限値は母集団が対数正規分布に従うと仮定して算出した。

[表 3.) -5) - (2) -2 ブロックせん断試験の結果(せん断面積 35 mm×35 mm)]

	試験回数	面外試験体		面内試験体	
		無載荷	載荷	無載荷	載荷
ブロック せん断強度 (N/mm ²)	最大値	3.62	3.95	3.77	4.06
	平均値	2.60	3.03	2.44	2.39
	最小値	1.99	2.50	1.34	1.27
	標準偏差	0.43	0.46	0.79	1.03
	変動係数	16.3%	15.2%	32.5%	42.9%
	5%下限値	1.86	2.21	1.11	0.84
木部破断率(%)	最大値	100	100	100	100
	平均値	100	99	99	100
	最小値	100	92	94	97

※5%下限値は母集団が対数正規分に従うと仮定して算出した。



[表 3.) -5) - (2) -1 ブロックせん断強度]

※箱中央の実線は中央値、ひげの長さは箱の長さの 1.5 倍以内にある
最大値と最小値までの距離を表す

[表 3.) -5) - (2) -3 含水率測定用切片の測定結果]

		面外試験体		面内試験体		縦圧縮試験体	
		無載荷	載荷	無載荷	載荷	無載荷	載荷
試験体数		12	12	8	8	4	4
切片切り出し時 (%)	最大値	9.5	9.7	10.7	10.0	9.5	9.5
	平均値	9.3	9.4	9.9	9.6	9.3	9.3
	最小値	9.1	9.2	9.2	9.4	9.0	9.2
ブロックせん断 試験時 (%)	最大値	9.8	9.9	11.1	10.2	9.8	10.0
	平均値	9.6	9.7	10.3	10.0	9.6	9.8
	最小値	9.5	9.4	9.7	9.8	9.3	9.6

[表 3.) -5) - (2) -4 無載荷試験体を基準としたときの載荷試験体のブロックせん断強度の比]

		せん断面積 25 mm×25 mm	せん断面積 35 mm×35 mm
平均値	面外試験体	0.998	1.162
	面内試験体	0.964	0.983
	縦圧縮試験体	1.142	-
5%下限値	面外試験体	1.024	1.189
	面内試験体	1.299	0.756
	縦圧縮試験体	0.885	-

(6) 減圧加圧剥離試験について

(A) 試験体及び試験方法

試験片は、2)の屋内長期載荷試験で用いた無載荷試験体及び載荷試験体それぞれで、面外試験体、面内試験体、縦圧縮強度試験体1体ずつから採材した。試験片寸法は厚さをそのまま75×75 mmとした。試験片の初期重量を測定した後、減圧加圧処理を行った。試験片を減圧加圧装置内で室溫水中に浸漬し、0.085 MPaで10分間減圧した後、0.5 MPaで1時間加圧した。この処理を2回繰り返した後、試験片を70°Cの乾燥機に入れ、重量が試験前の100～110%の範囲になるまで乾燥した。試験片の4側面を目視観察し、接着層の剥離の長さを計測し、次式のとおり全接着層及び単一接着層の剥離率を算出した。

$$\text{剥離率 (\%)} = (\text{4側面の剥離長さの合計}) / (\text{4側面の接着層の長さの合計}) \times 100$$

(B) 結果

減圧加圧剥離試験の結果を表 3.) -6) - (2) -1 に示す。すべての試験体で剥離はみられなかった。以上より、載荷による剥離率への影響はないものと考えられる。

[表 3.) -6) - (2) -1 減圧加圧剥離試験の結果]

		面外試験体		面内試験体		縦圧縮試験体	
		無載荷	載荷	無載荷	載荷	無載荷	載荷
試験体数		12	12	8	8	4	4
全接着層剥離率(%)	最大値	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

4) 屋外環境における長期曝露試験

(1) 日本館のモックアップによる長期曝露試験について

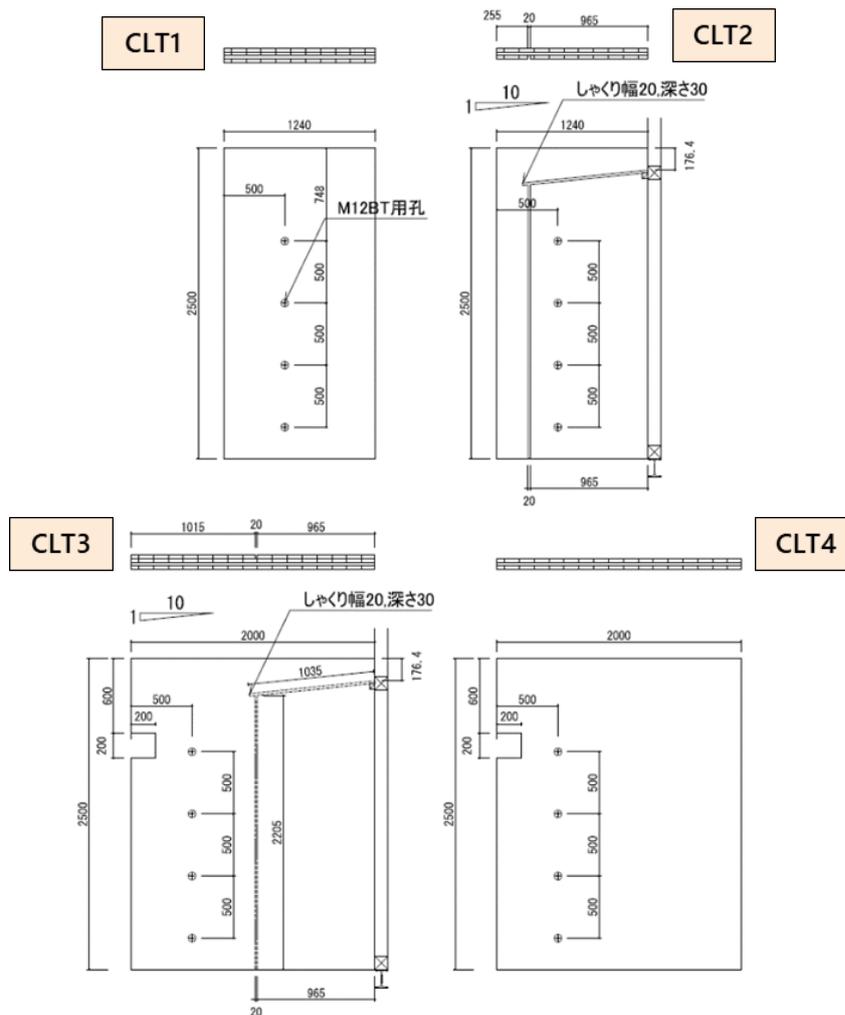
令和6(2024)年9月1日から令和7(2025)年2月28日までの約6ヵ月間、屋外環境下において大阪・関西万博の日本館を模したCLTのモックアップの曝露試験を実施し、屋外曝露がCLTパネルに及ぼす影響を調査した。

(2) 試験体について

本試験には以下4種類のスギCLT壁パネルを供試した。

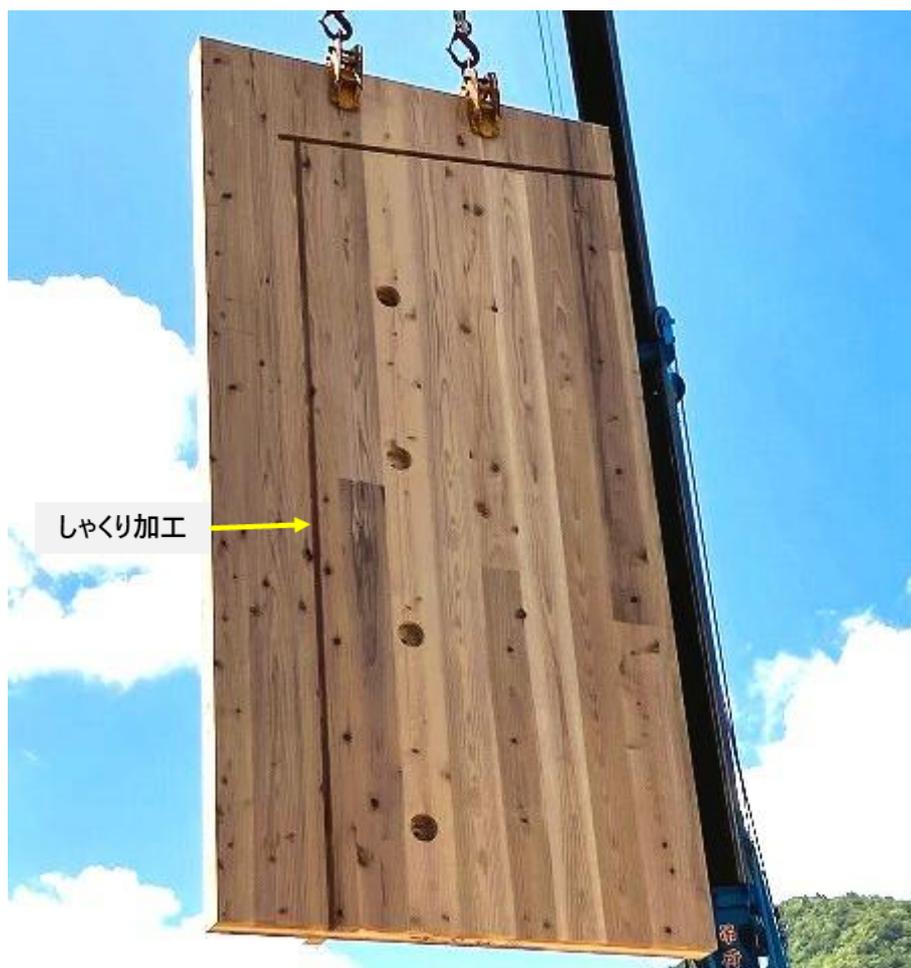
- ・CLT1 : 厚 120mm × 幅 1240mm × 高さ 2500mm
- ・CLT2 : 厚 90mm × 幅 1240mm × 高さ 2500mm
- ・CLT3 : 厚 120mm × 幅 2000mm × 高さ 2500mm
- ・CLT4 : 厚 90mm × 幅 2000mm × 高さ 2500mm

CLTを構成するラミナは、断面寸法が幅122mm×厚さ30mmであり、強度はCLTのJASで規定されるMx60、ラミナ層間の接着には水性高分子イソシアネート系接着剤を用いた。層構成は3層3プライ(t90mm)及び、3層3プライの外側にラミナ1枚を平行に貼った構造(以下、「3層3プライ+1」という)(t120mm)とした。試験体の概形を図4-1)-1に示す。



[図 4.-1)-1. CLT パネル試験体の概形]

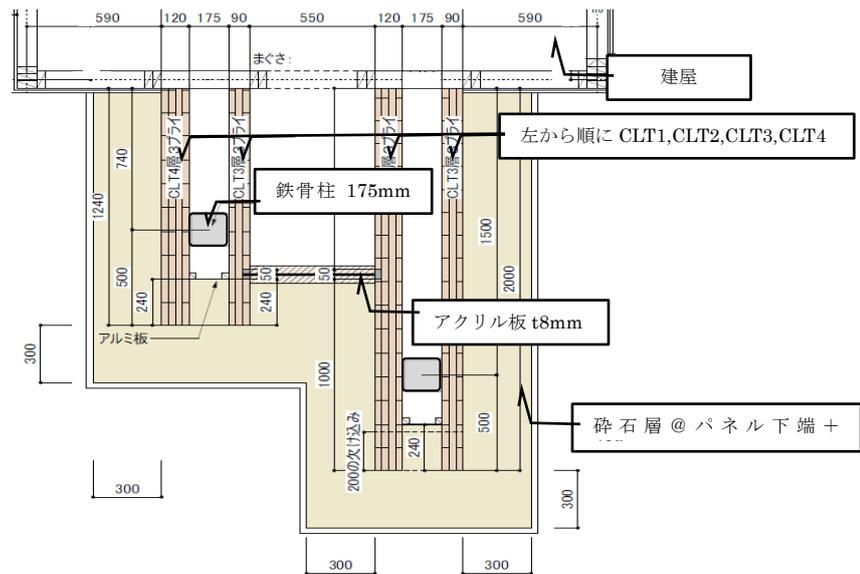
次節で触れる通り、納まりの関係からすべてのパネルは M12 ボルト用の孔及び埋木用座彫り加工を、CLT2、CLT3 は幅 20mm、深さ 30mm のしゃくり加工を有する（下図の溝状部分）。また、CLT3、CLT4 には 200mm 角の欠き込み部を設けることで、表面に切削加工等のないフラットな CLT パネルよりも厳しい条件下で曝露試験を実施した。



[図 4.-1)-2. CLT2 のしゃくり加工及びボルト用孔/座彫り加工]

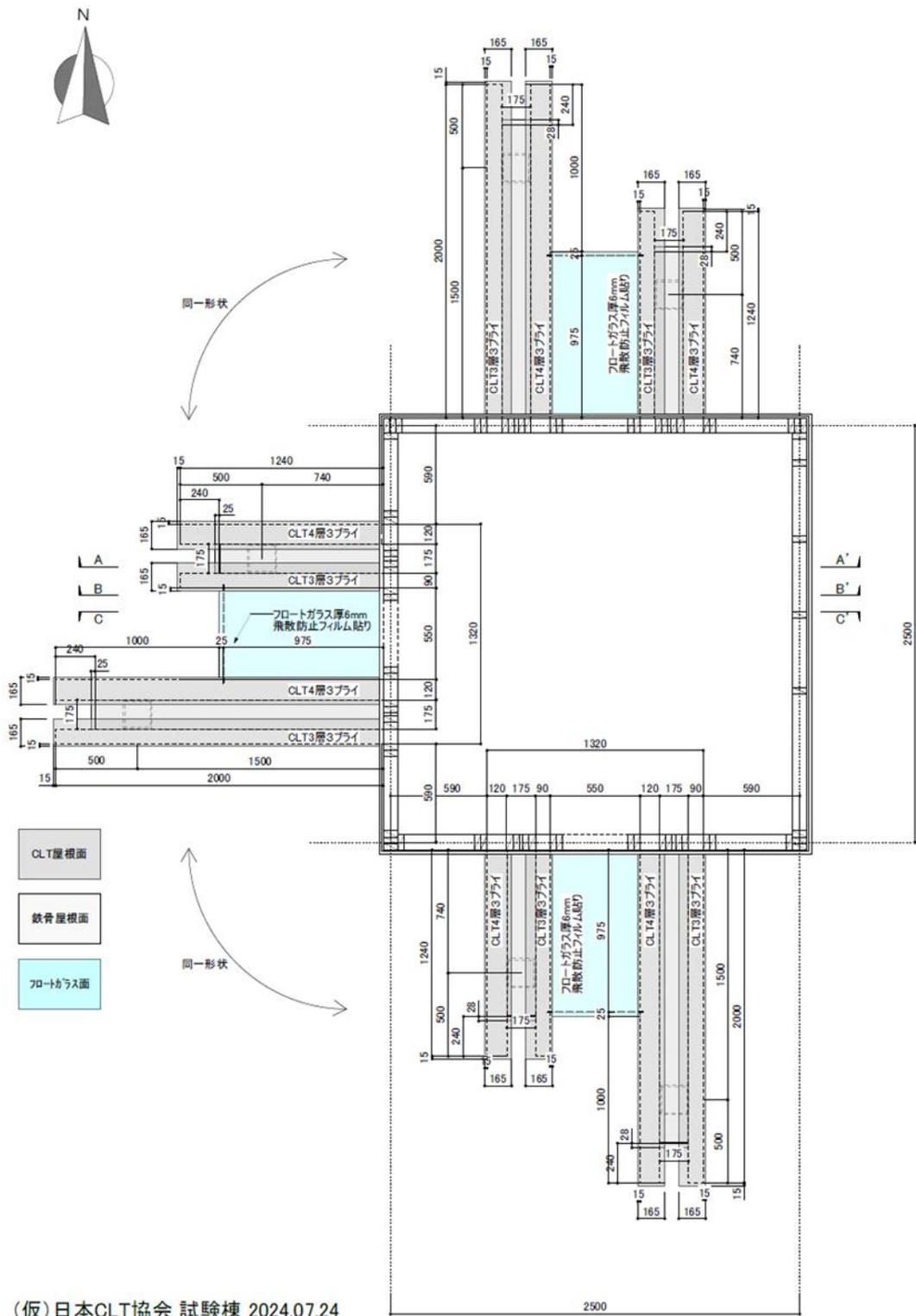
(3) 試験体設置方法

図 4.-2)-1 に示す通り、CLT1 と CLT2、CLT3 と CLT4 は、鉄骨柱 175mm 角を介して 1 組の構造とした (以降、各組を CLT1-CLT2、CLT3-CLT4 と呼ぶ)。また、CLT2 と CLT3 の間にはアクリル板 t8mm を設け、パネルとアクリル板が接する部分には前述のしゃくり加工を有する。加えて、試験体の下端から高さ方向+485mm の位置に、後述する碎石層を設け、パネルが雨水の跳ね返りを受ける環境とした。また、図 4.-2)-2. 平面図に示す通り、碎石層を設けていない面は各パネルを支持する軸組建屋と接続させた。



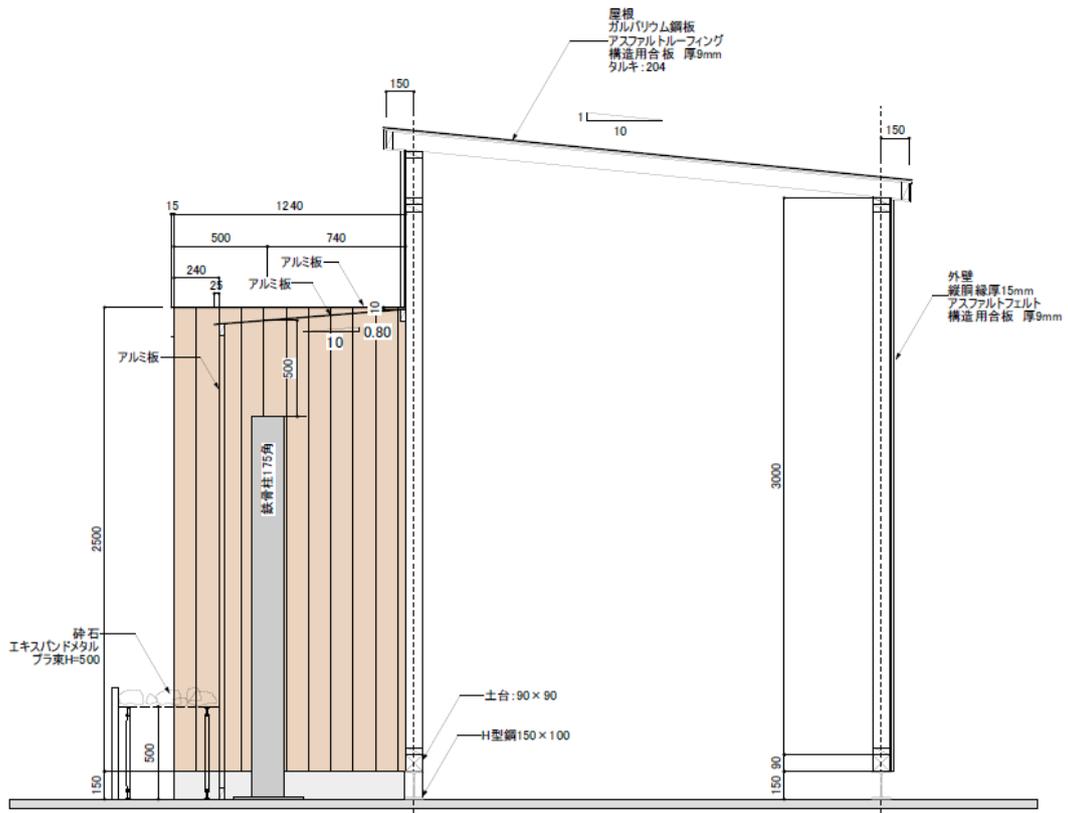
[図 4.-2)-1. CLT1,CLT2,CLT3,CLT4 の配置 (見下げ図,南面)]

CLT1-CLT2、CLT3-CLT4 は、建屋北面、西面、南面の 3 方角に設置した。試験体の設置状況を図 4.-2)-2 ~ 図 4.-2)-7 に示す。

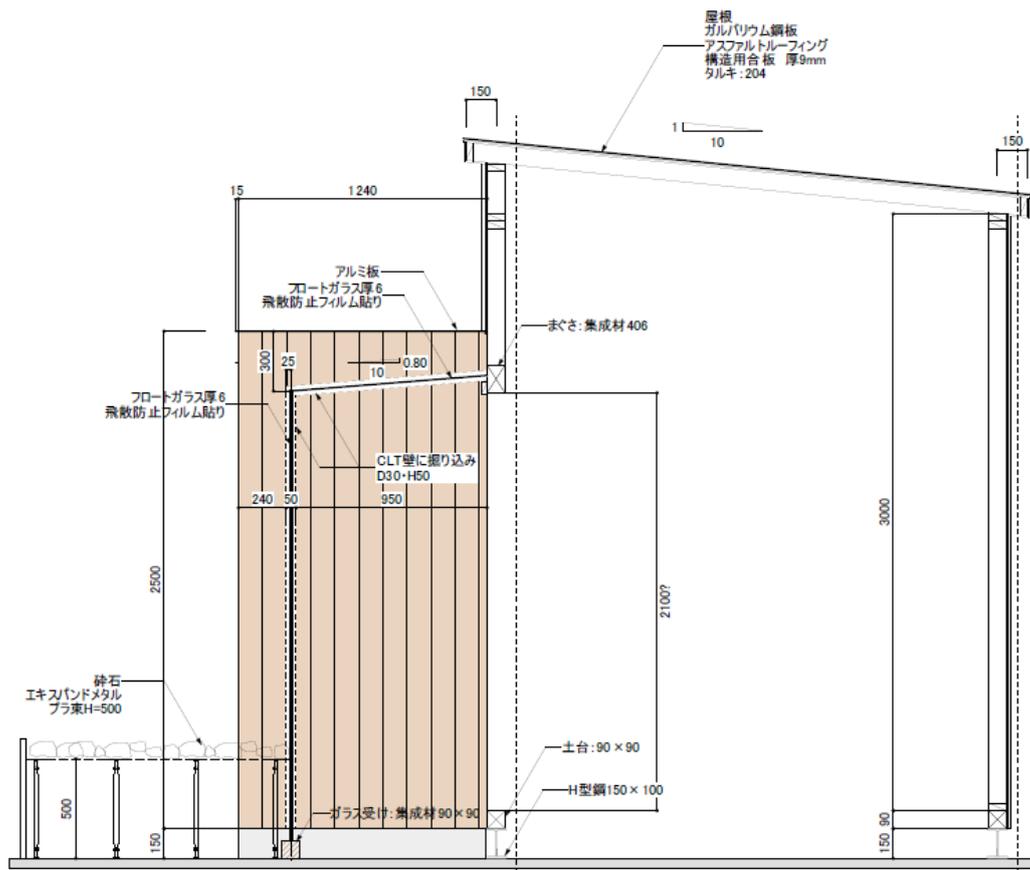


(仮)日本CLT協会 試験棟 2024.07.24

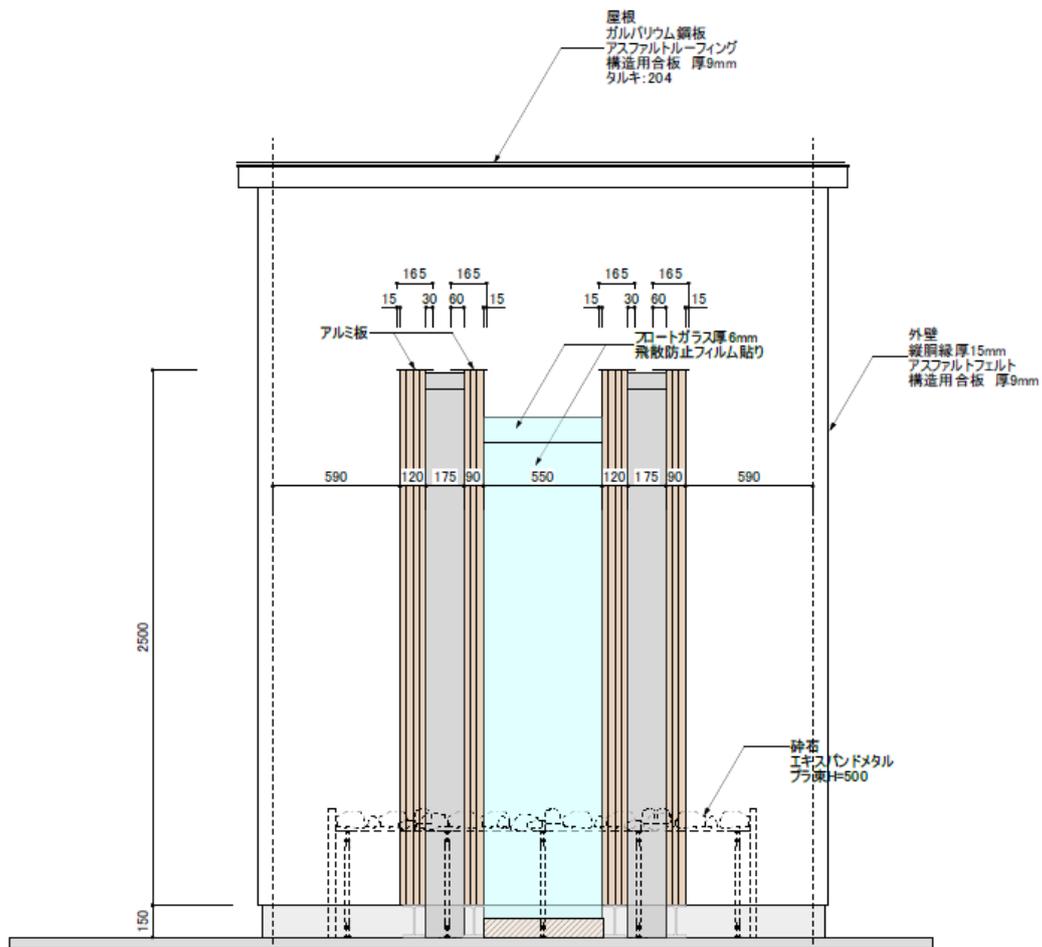
[図 4.2)-3. 屋根伏図]



[図 4.-2)-4. A-A' 断面]



[図 4.-2)-5. B-B' 断面]



[図 4.-2)-7. 西立面図]

(4) 各部の納まり

以下にモックアップの特徴的な納まりを一部説明する。

▶鉄骨柱 175mm 角 (CLT1-CLT2 間及び CLT3-CLT4 間)

鉄骨基礎を伏せたのち、CLT 壁パネルを留め付けるため鉄骨柱を設置した。鉄骨柱に溶接した M12 ボルトでパネルを留めたのち、雨水の侵入防止のため埋木処理をした。



▶採光スペース (CLT2-CLT3 間)

前述の通り、CLT2 と CLT3 の間にはしゃくり加工を施した箇所に透明アクリル板 t8mm に囲まれた空間を設け、採光スペースと呼ぶこととした。パネルとアクリル板の接合部は雨水の侵入防止のため建屋内外両側からコーキング処理をした。



▶砕石層

壁パネルを設置したのち、鋼製のバットを設け、砕石を敷いた。バットは雨水を透過できるものとし、砕石天端がパネル下端から+485mm となるように調整した。



▶アルミ遮光板 (CLT4 の中央部)

日射による材面の退色具合を調査するため、各方角の CLT4 の中央部にアルミ製の遮光板 t1 mm×300 mm 角を設置した。雨水の浸入防止のため、パッキン付ビス及び三方コーキングを施した。



▶鋼製天板・鋼製側板（CLT1-CLT2間及びCLT3-CLT4間）

パネル間の雨受けとして鋼製天板を設置した。加えて側面部には鋼製側板を設置した。天板は約一寸勾配で、雨水が滞留しない設計とした。なお、天板、側板ともにパネルとの接合部はコーキングによる防水処置を講じた。留め付けにはパッキン付ビスを用いた。



▶鋼製笠木（CLT1,CLT2,CLT3,CLT4の壁頭部）

パネルに幅75mmのブチルテープを貼った上、鋼製笠木を設置して雨受けとした。留め付けはパッキン付ビスによるが、コーキングによる防水処置は講じなかった。

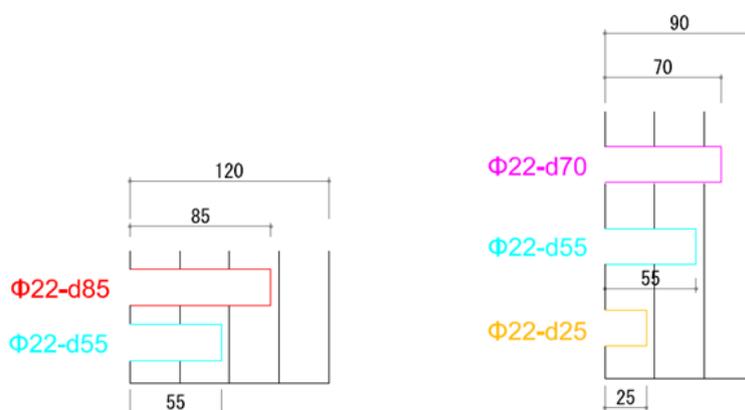


(5) ハイグロクロン埋め込み位置

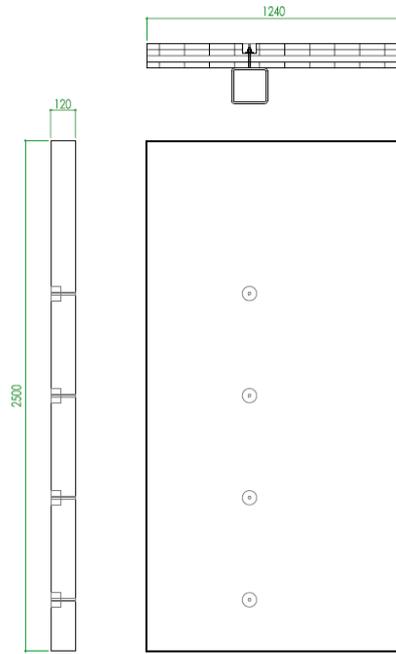
以下、温湿度のデータを長期間にわたって記録することが可能なデータロガーであるハイグロクロン埋め込み位置を、表 4.4)-1 及び図 4.4)-2 ~ 図 4.4)-5 に示す。また、埋め込み深さは 4 種類あり、凡例を図 4.4)-1 に示す。

[表 4.4)-1. ハイグロクロン埋め込み位置及び番号一覧]

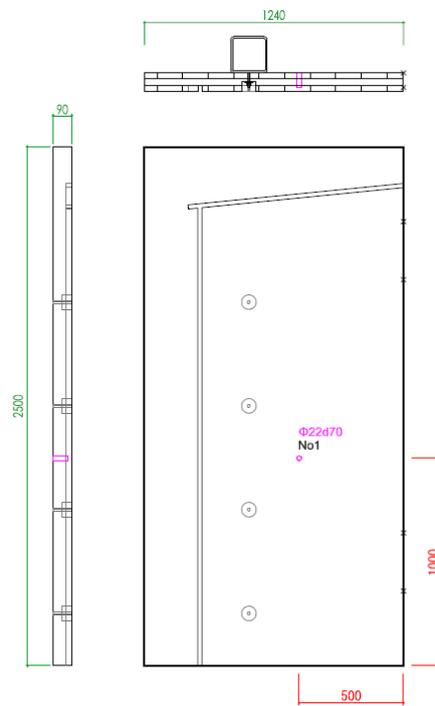
CLT 番号	パネル下端からの距離	建屋外壁ツラからの距離	埋め込み深さ	繊維方向	北面	南面	西面
CLT 2	1000mm	500mm	70mm	繊維方向	No.1	No.23	No.45
CLT 3	2300mm	1250mm	85mm	繊維方向	No.2	No.24	No.46
〃	2300mm	1800mm	85mm	繊維方向	No.3	No.25	No.47
〃	550mm	200mm	85mm	繊維方向	No.4	No.26	No.48
〃	550mm	1900mm	85mm	繊維方向	No.5	No.27	No.49
〃	550mm	1900mm	55mm	繊維直角方向	No.6	No.28	No.50
〃	200mm	200mm	85mm	繊維方向	No.7	No.29	No.51
〃	200mm	200mm	55mm	繊維直角方向	No.8	No.30	No.52
〃	200mm	1250mm	55mm	繊維直角方向	No.9	No.31	No.53
〃	200mm	1900mm	85mm	繊維方向	No.10	No.32	No.54
CLT 4	2300mm	200mm	70mm	繊維方向	No.11	No.33	No.55
〃	2300mm	1250mm	70mm	繊維方向	No.12	No.34	No.56
〃	2300mm	1900mm	70mm	繊維方向	No.13	No.35	No.57
〃	550mm	200mm	55mm	繊維直角方向	No.14	No.36	No.58
〃	550mm	200mm	70mm	繊維方向	No.15	No.37	No.59
〃	550mm	1250mm	25mm	繊維方向	No.16	No.38	No.60
〃	550mm	1900mm	70mm	繊維方向	No.17	No.39	No.61
〃	200mm	200mm	55mm	繊維直角方向	No.18	No.40	No.62
〃	200mm	200mm	70mm	繊維方向	No.19	No.41	No.63
〃	200mm	1250mm	55mm	繊維直角方向	No.20	No.42	No.64
〃	200mm	1900mm	55mm	繊維直角方向	No.21	No.43	No.65
〃	200mm	1900mm	70mm	繊維方向	No.22	No.44	No.66



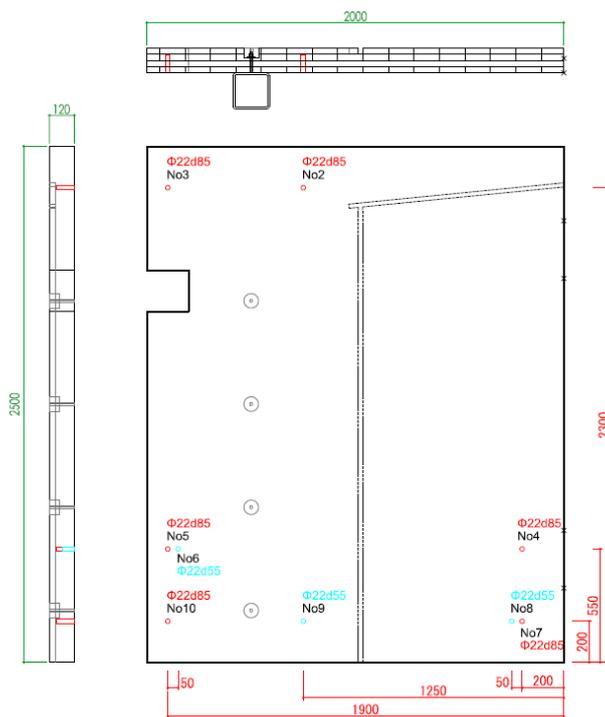
[図 4.4)-1. ハイグロクロン埋め込み深さの凡例]



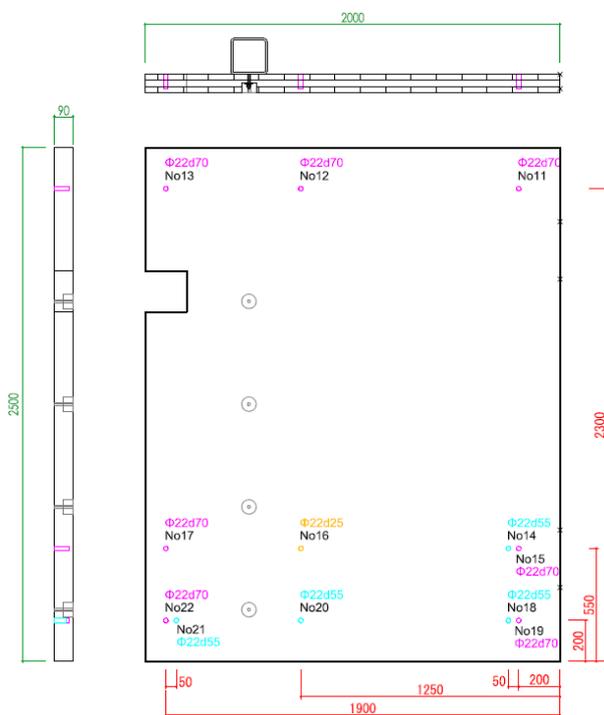
[図 4.-4)-2. CLT 1 (ハイグロクロン埋め込みなし)]



[図 4.-4)-3. CLT 2 (No1 を埋め込み (例 : 北面))]



[図 4.4)-4. CLT 3 (No2~No10 を埋め込み (例 : 北面))]



[図 4.4)-5. CLT 4 (No11~No22 を埋め込み (例 : 北面))]

5) 屋外長期曝露が材料性能に及ぼす影響の検討

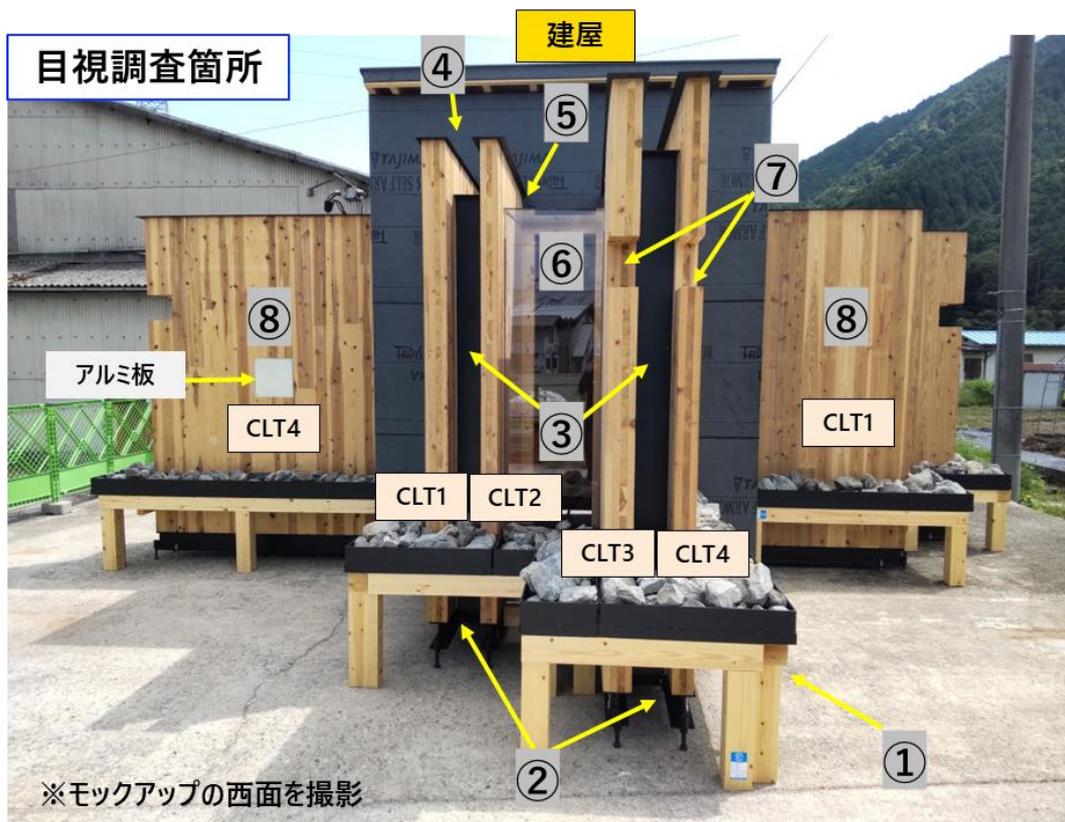
(1) 目視調査について

(A) 目視調査内容

モックアップの経時的劣化を撮影し、屋外曝露が CLT パネルに及ぼす影響を調査した。ここでは、令和 6 (2024) 年 9 月 5 日の初回撮影と令和 7 (2025) 年 2 月 26 日の最終撮影の経時的劣化を比較する。

(a) 調査箇所

劣化の程度が大きいと予想される部分を中心に経時的劣化を調査するため、建屋外周の北面・南面・西面の 3 方角それぞれにおいて下図の①～⑧に示す部分を撮影した。



[図.各面の調査箇所①～⑧]

モックアップは上図の中央にある建屋を中心に CLT パネルを各面に 4 枚ずつ設置した。また、これら 4 枚のパネルを識別するため、各面を正面から見たときに左から CLT1、CLT2、CLT3、CLT4 とした。CLT1 と CLT2、CLT3 と CLT4 は、パネル間にそれぞれ鉄骨を組する構造である。各パネルには鋼製笠木を被せ、足元には H 型鋼を設けてパネルを載せた。

また、CLT2 と CLT3 の間には透明アクリル板に囲まれた採光スペースを設置した。パネルと鉄骨、各パネルと建屋、アクリル板、鋼製笠木との接触部にはコーキングによる防

水処置を施した一方、パネルと H 型鋼の接触部には防水処置を施していない。

(b) 撮影箇所詳細

上図で示した調査箇所①～⑧について、北面を例に以下に詳細を図示する。なお、図中に書かれているアルファベットの“N”とは北面を指し、それに続く数字の“1”から“4”は CLT1 から CLT4 に対応しており、例えば“N-1”という表記は、北面の CLT1 を指す。また、CLT1 と CLT2、CLT3 と CLT4 は鉄骨を介して互いに連結した構造となっており、CLT1-CLT2、CLT3-CLT4 と表記する。

▶①下部-建屋接触部

モックアップ下部において各面の CLT4 と建屋が接触する周辺部分を指す。



[図. 調査箇所①下部-建屋接触部 (例：北面)]

▶②砕石層の下側

モックアップ下部において CLT1-CLT2 と CLT3-CLT4 それぞれの足元周辺部分を指す。



[図. 調査箇所②砕石層の下側・CLT1-CLT2 (例: 北面)]



[図. 調査箇所②砕石層の下側・CLT3-CLT4 (例: 北面)]

▶③中間部

モックアップ高さ方向において CLT1-CLT2 と CLT3-CLT4 それぞれのラミナ木口面が存在する、側面中間部を指す。



[図. 調査箇所③中間部・CLT1-CLT2 (例: 北面)]



[図. 調査箇所③中間部・CLT3-CLT4 (例：北面)]

▶④上部-鋼製笠木周辺部

モックアップ上部において CLT1-CLT2 と CLT3-CLT4 それぞれの鋼製笠木周辺部を指す。令和 6 (2024) 年 11 月 17 日より各パネルの側面 (鉄骨と CLT パネルで囲まれた部分) も調査を実施した。



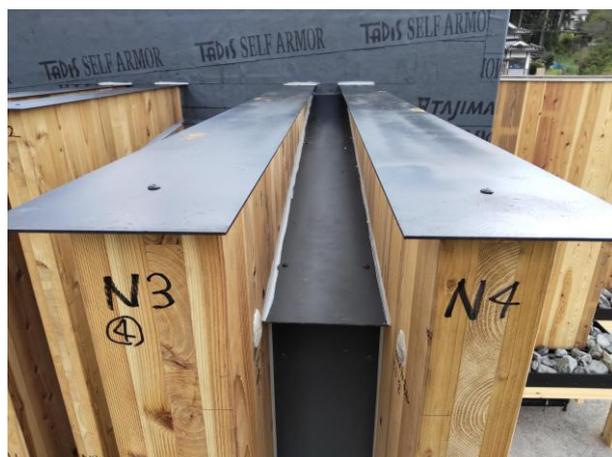
[図. 調査箇所④上部-鋼製笠木周辺部・CLT1-CLT2 (例：北面)]



[図. 調査箇所④上部-鋼製笠木周辺部・CLT1側面（例：北面）]



[図. 調査箇所④上部-鋼製笠木周辺部・CLT1側面（例：北面）]



[図. 調査箇所④上部-鋼製笠木周辺部・CLT3-CLT4（例：北面）]



[図. 調査箇所④上部-鋼製笠木周辺部・CLT3 側面 (例：北面)]



[図. 調査箇所④上部-鋼製笠木周辺部・CLT4 側面 (例：北面)]

▶⑤上部-建屋接触部

モックアップ上部において各面の CLT1 と CLT4 が建屋と接触する周辺部分を指す。



[図. 調査箇所⑤上部-建屋接触部・CLT1側（例：北面）]



[図. 調査箇所⑤上部-建屋接触部・CLT4側（例：北面）]

▶⑥CLTパネル間採光スペース

モックアップ上部において各面の CLT2 と CLT3 がアクリル板と接触する周辺部分を指す。令和6（2024）年11月17日より調査に加えた。



[図. 調査箇所⑥CLTパネル間採光スペース（例：北面）]

▶⑦欠き込み部

モックアップ各面の CLT3 と CLT4 には切削加工による欠き込み部が存在する。この部分の上端部と下端部それぞれの目視調査も実施した。



[図. 調査箇所⑦欠き込み部・上端部 (例：北面)]



[図. 調査箇所⑦欠き込み部・下端部 (例：北面)]

▶⑧CLTパネル表面

モックアップ各面の CLT1 と CLT4 のパネル表面を指す。なお、日射の影響によるパネル面の退色の程度を調査するために、各方角の CLT4 には 300mm 角のアルミ遮光板を取り付け、目地をコーキング材で充填して防水処理を施した。



[図. 調査箇所⑧パネル表面・CLT1 (例：北面)]



[図. 調査箇所⑧パネル表面・CLT4 (例：北面)]

(B) 目視調査結果

屋外長期曝露による経時的劣化が顕著であった部分について報告する。以下に示す劣化はCLTのモックアップに限定されず、屋外曝露履歴のある木材全般で起こる黒色変色等である。なお、約6ヵ月の屋外曝露を通じてコーキング材を充填した部分に目地の切れ等の劣化は確認されず、建屋接触部(調査箇所⑤)や採光スペース(調査箇所⑥)においても、一般的な木材に見られる退色等は確認されたものの、特筆すべき劣化は確認されなかった。

(a) 下部-建屋接触部

北面と西面の一部に斑点状の黒色変色が確認され(下図○)、西面では汚れのような黒色変色が確認された(下図○)。また、北面と南面ではH型鋼との接触部周辺に広範囲で水痕が確認された(下図○)。



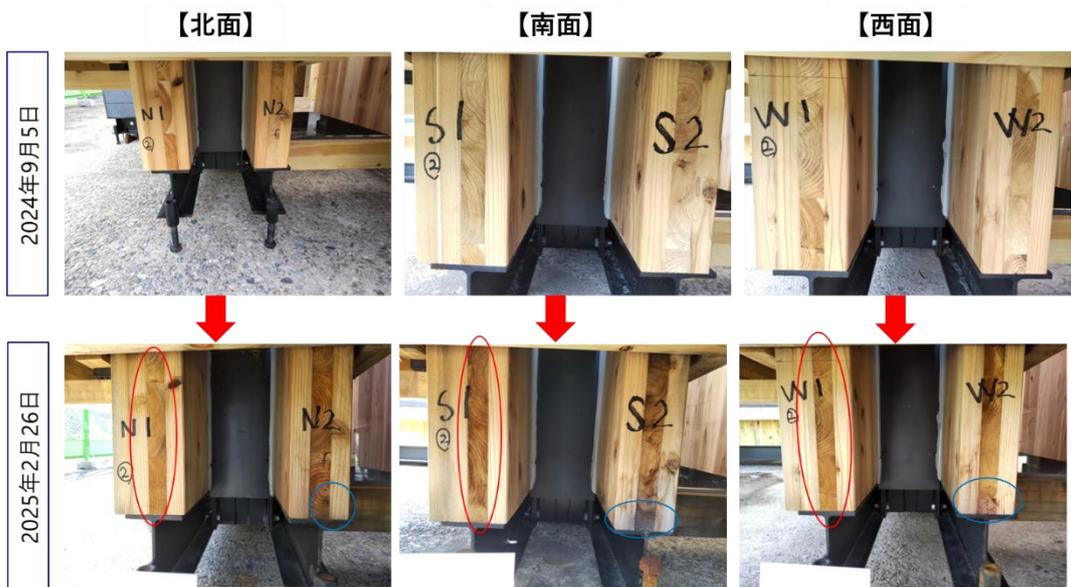
[図. 調査箇所①下部・建屋接触部]



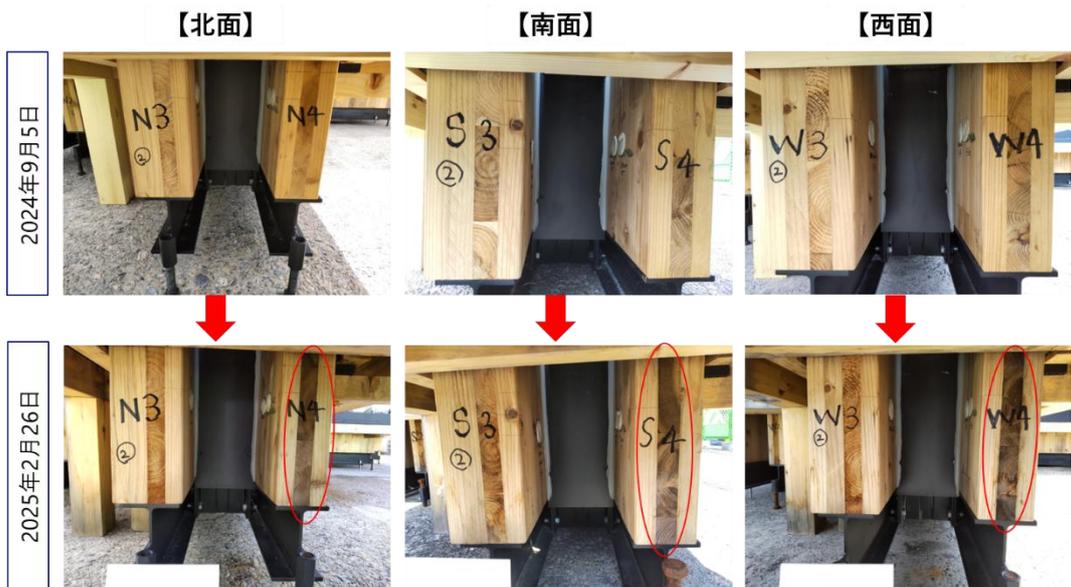
[図. 調査箇所①下部・建屋接触部 北面と西面の○部分拡大図]

(b) 砕石層の下側

いずれの方位も木口面が変色していた（下図○）。CLT1-CLT2 では、H 型鋼との接触部周辺に水痕が見られた（下図○）。



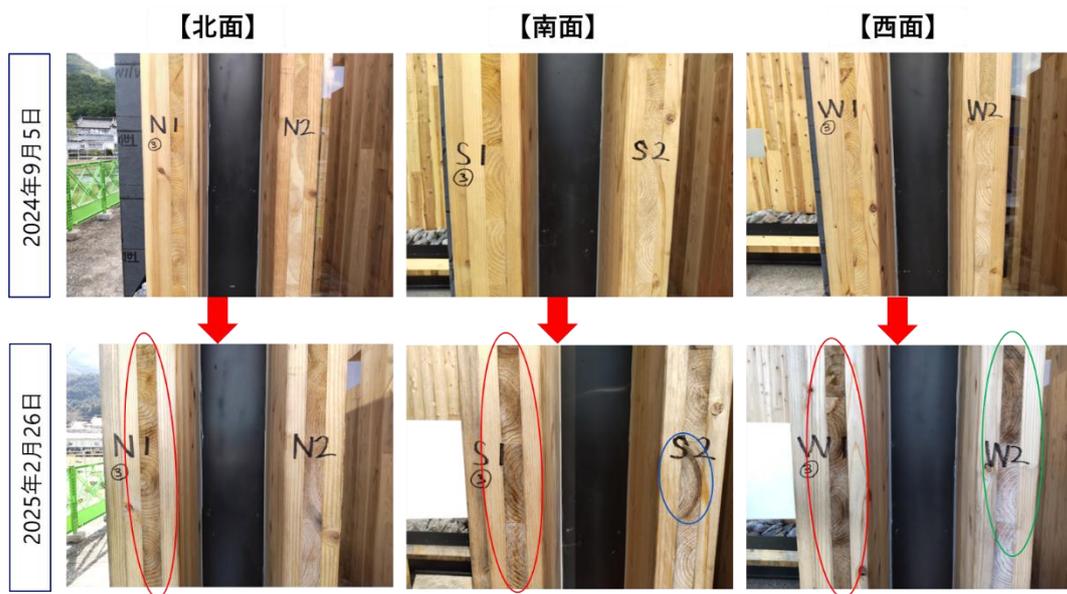
[図. 調査箇所②碎石層の下側・CLT1-CLT2]



[図. 調査箇所②碎石層の下側・CLT3-CLT4]

(c) 中間部

いずれの方位も木口面が変色していた（下図○）。また、CLT1-CLT2 では年輪の径に沿った変色（下図○）や、ラミナ毎に変色の程度が異なる様子が確認された（下図○）。



【図. 調査箇所③中間部・CLT1-CLT2】

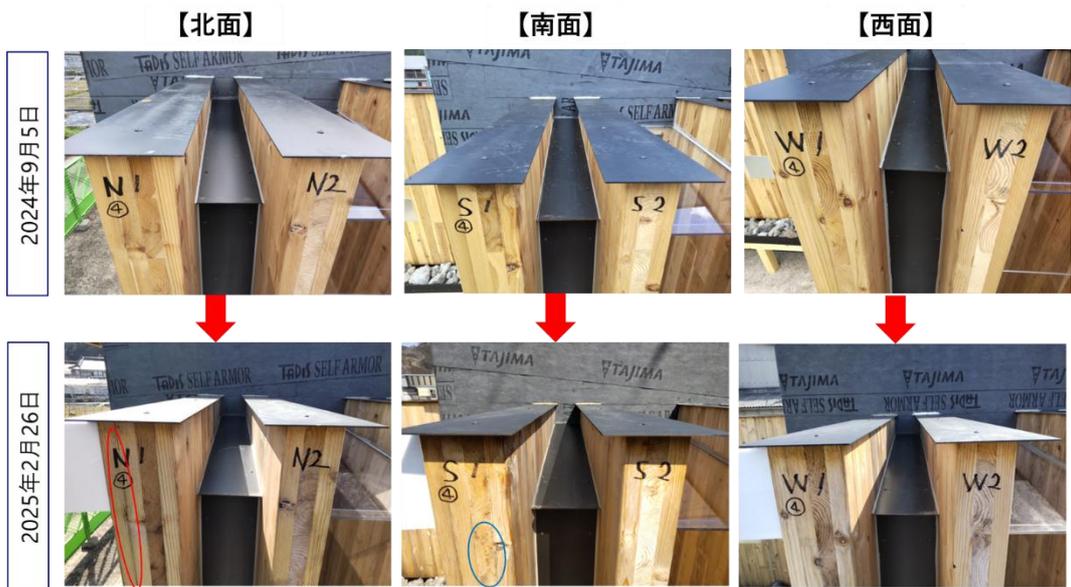


【図. 調査箇所③中間部・CLT3-CLT4】

(d) 上部-鋼製笠木周辺部

▶CLT1-CLT2の様子

北面 CLT1 の辺材部に黒色変色が確認された（下図○）。また南面 CLT1 の一部に斑点状の黒色変色が確認された。

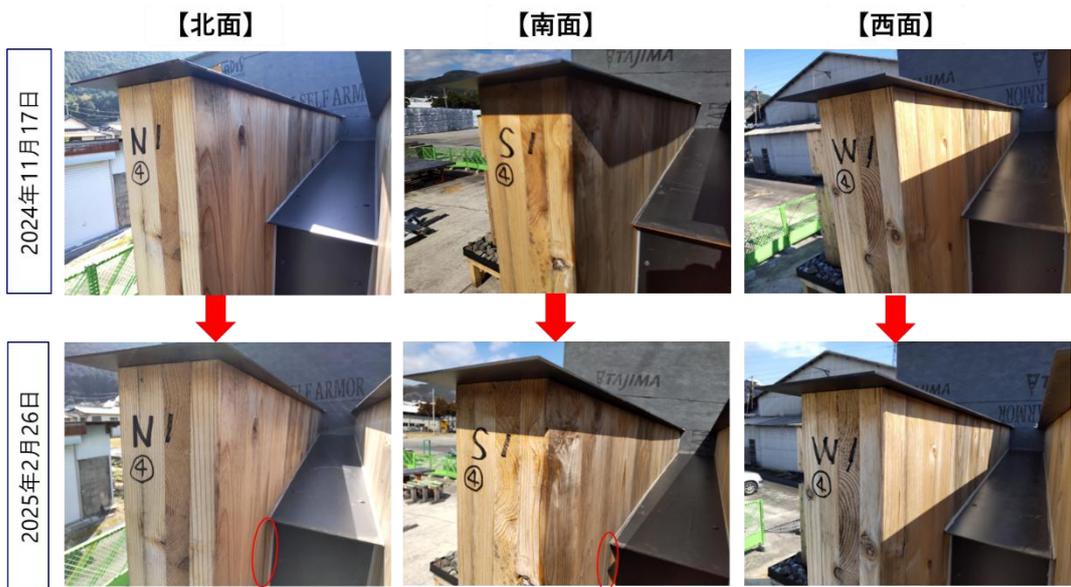


[図. 調査箇所④上部-鋼製笠木周辺部・CLT1-CLT2]

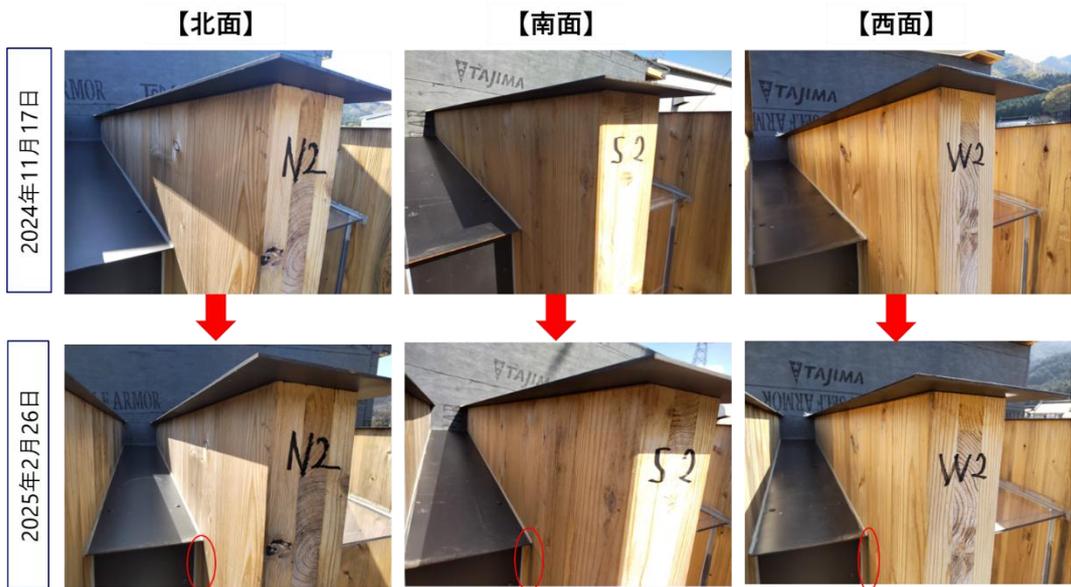


[図. 調査箇所④上部-鋼製笠木周辺部・CLT1-CLT2 南面の○部分拡大図]

令和6(2024)年11月17日より調査箇所に追加したCLT1及びCLT2の側面部に関しては、西面のCLT1以外で、CLT1-CLT2間にある鋼板から伝うような帯状の黒色変色が確認された(下図○)。



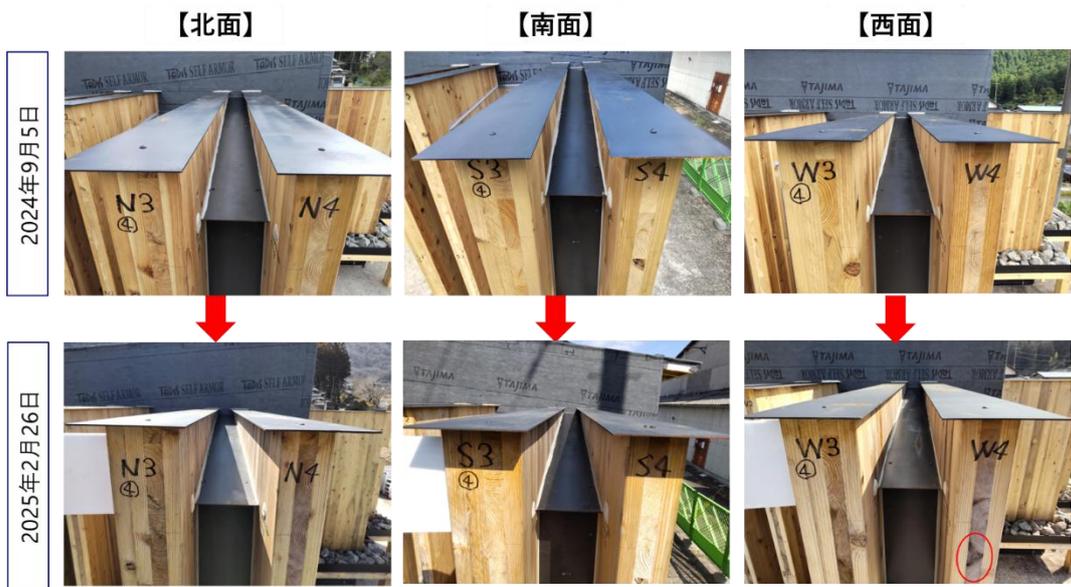
[図. 調査箇所④上部-鋼製笠木周辺部・CLT1 側面]



[図. 調査箇所④上部-鋼製笠木周辺部・CLT2 側面]

▶CLT3-CLT4 の様子

いずれも木口面に黒色変色が確認され、西面 CLT4 は年輪の辺材部分で黒色変色が確認された（下図○）。

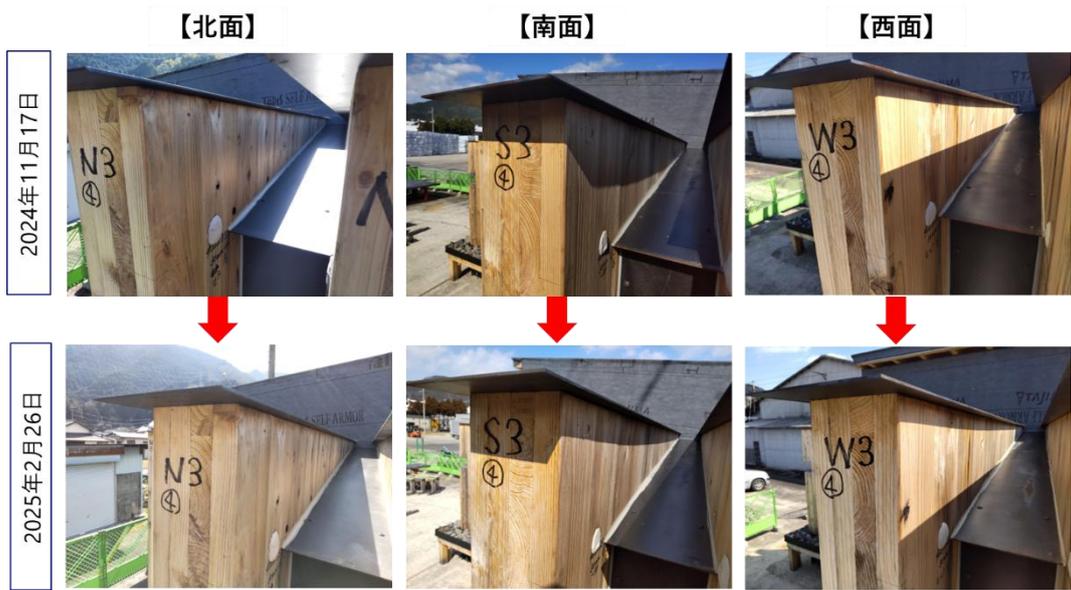


[図. 調査箇所④上部-鋼製笠木周辺部・CLT3-CLT4]

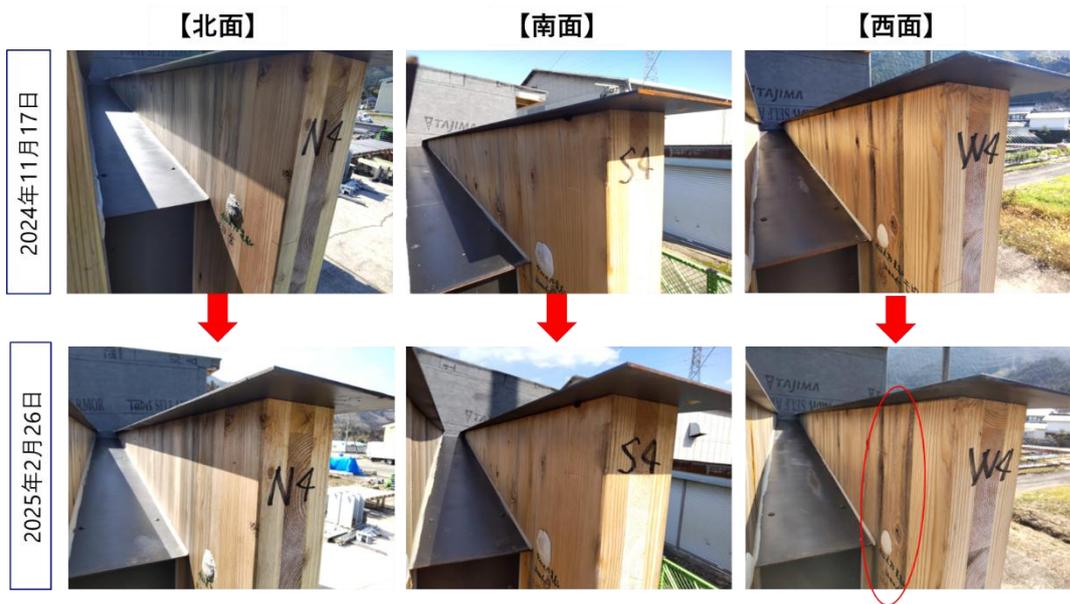


[図. 調査箇所④上部-鋼製笠木周辺部・CLT3-CLT4 西面の○部分拡大図]

令和6(2024)年11月17日より調査箇所追加したCLT3の側面に関しては、目立った差異は確認されなかったが、CLT4の側面には明確な帯状の黒色変色が確認された(下図○)。



[図. 調査箇所④上部-鋼製笠木周辺部・CLT3 側面]



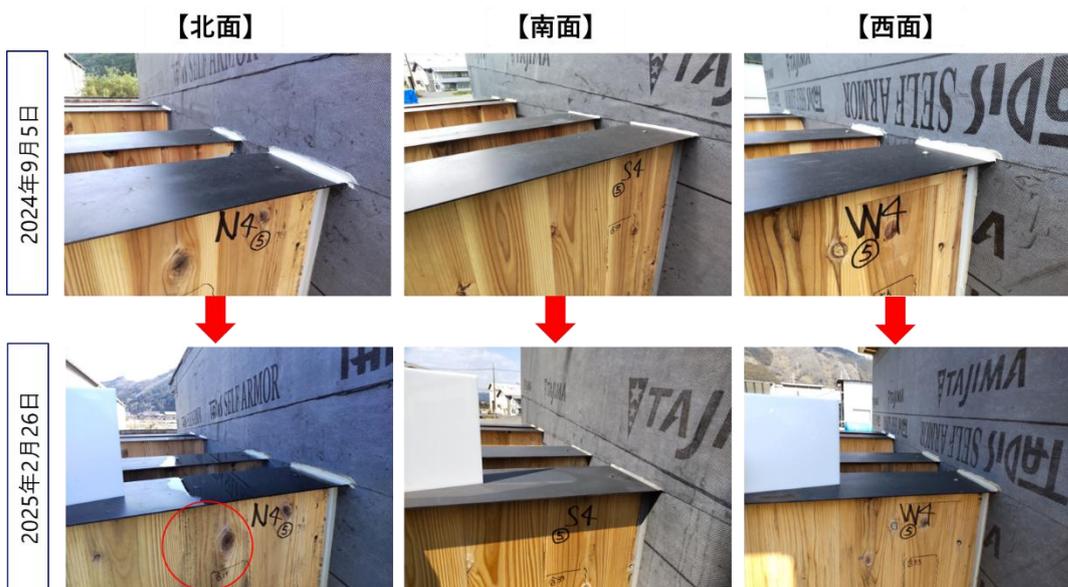
[図. 調査箇所④上部-鋼製笠木周辺部・CLT4 側面]

(e) 上部-建屋接触部

CLT1 側ではコーキング部含めパネルの劣化は確認されなかったが、CLT4 側では北面の一部に斑点状の黒色変色が確認された（下図○）。



[図. 調査箇所⑤上部-建屋接触部・CLT1 側面]



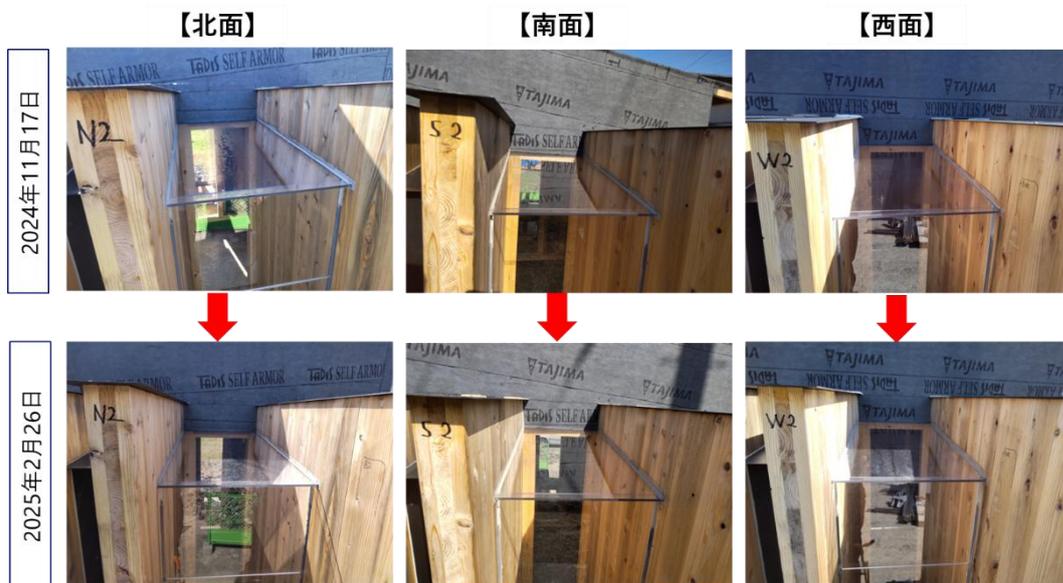
[図. 調査箇所⑤上部-建屋接触部・CLT4 側面]



[図. 調査箇所⑤上部・建屋接触部・CLT4 側面 北面の○部分拡大図]

(f) CLT パネル間採光スペース

令和6(2024)年11月17日より調査箇所に追加したCLT2とCLT3の間にある採光スペースを模した亚克力板で囲まれた部分に関しては、目立った差異は確認されなかった。

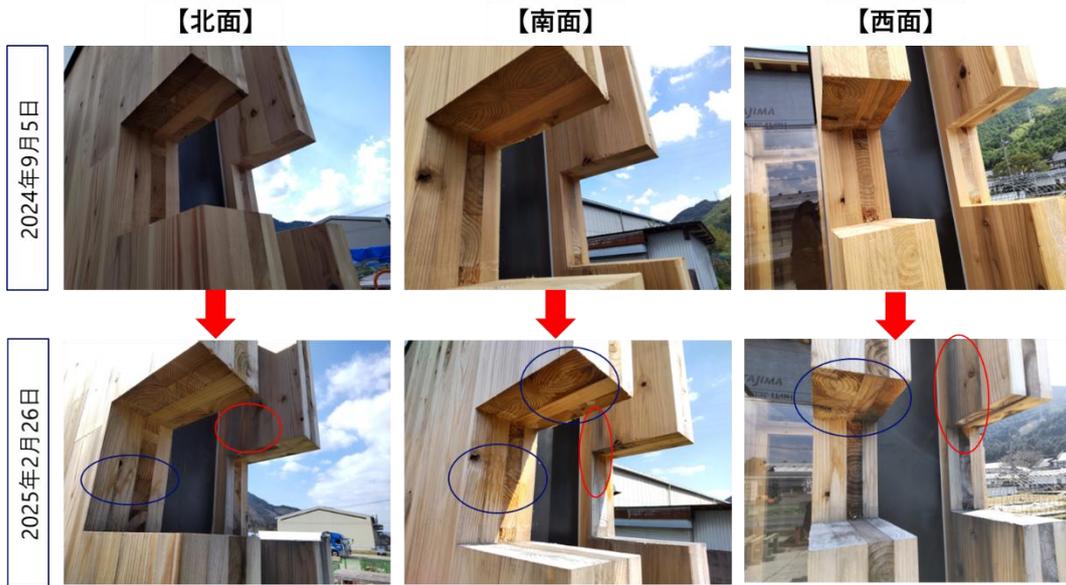


[図. 調査箇所⑥CLT パネル間 (CLT2-CLT3 間) 採光スペース]

(g) CLT3-CLT4 の欠き込み部

▶欠き込み 上端部

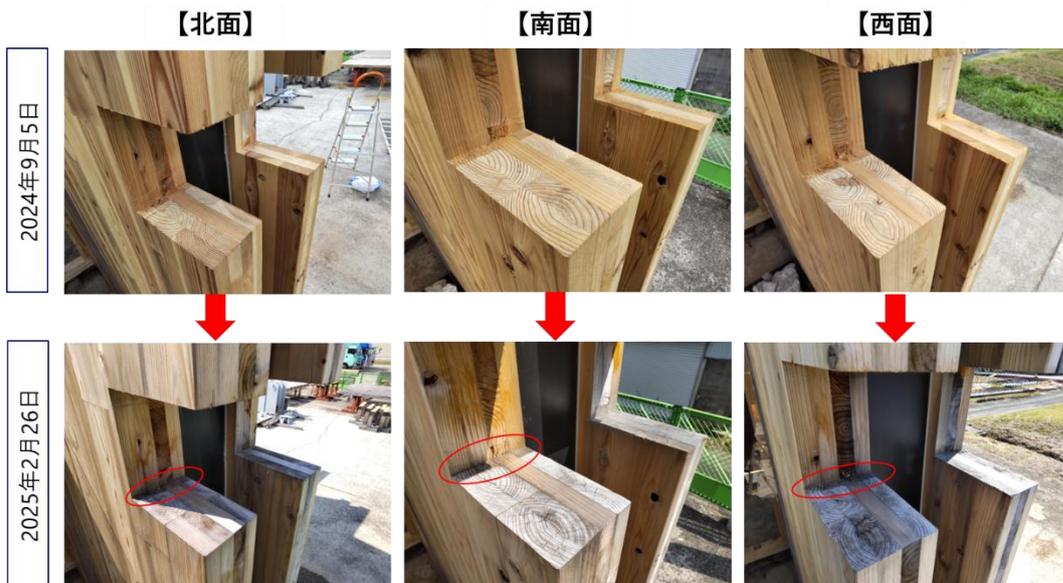
付け根部に帯状の黒色変色が確認された（下図○）。また、水痕も確認された（下図○）。



〔図. 調査箇所⑦欠き込み部 上端部の黒色変色○と水痕○〕

▶欠き込み 下端部

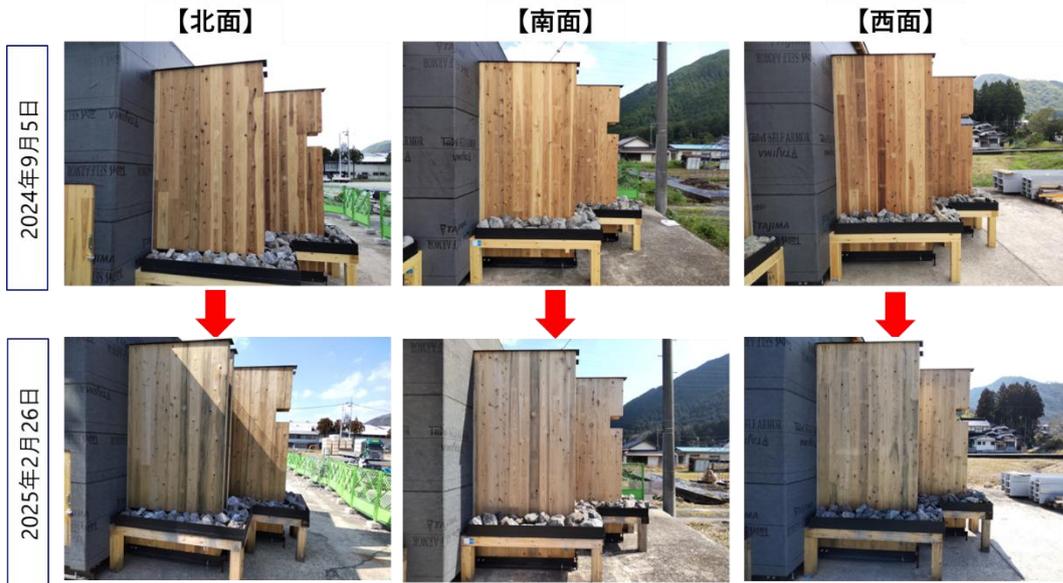
付け根部分に帯状の薄い黒色変色が確認された（下図○）。この部分は曝露当初から切削加工により表面が粗い状態であった。



[図. 調査箇所⑦欠き込み部 下端部の黒色変色○]

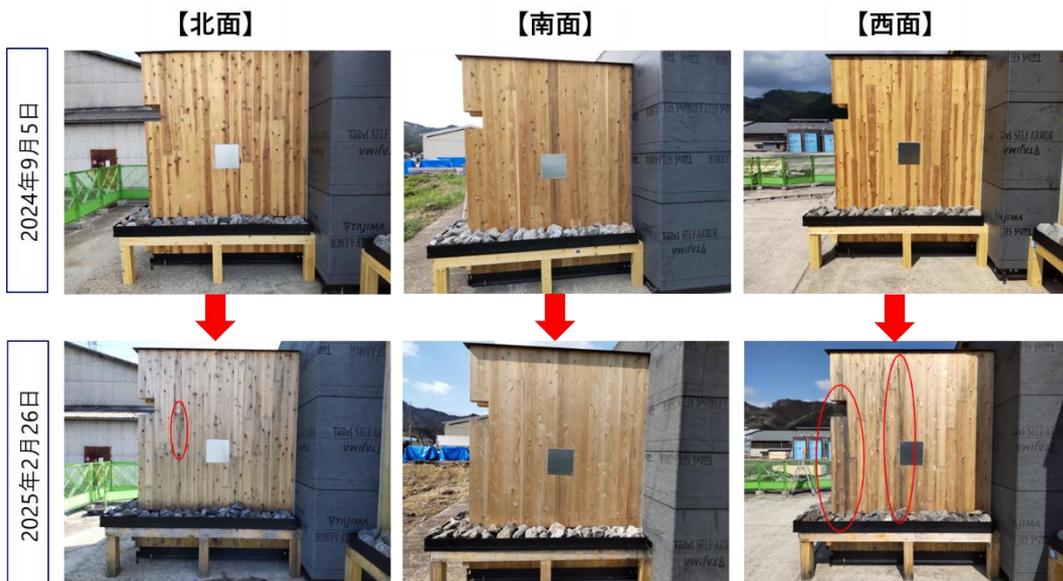
(h) パネル表面

CLT1では、表面全体ではなく、辺材を含むラミナの黒色変色が確認された。



[図. 調査箇所⑧パネル表面・CLT1]

CLT4では、北面と西面で帯状の黒色変色が確認され、特に西面の欠き込み部の下側と遮光板付近が顕著であった（下図○）。



[図. 調査箇所⑧パネル表面・CLT4]

(i) 退色具合の比較

CLT4 については、曝露開始から約 6 か月後にアルミ製の遮光板を剥がすことで、被覆部と非被覆部の退色具合を比較した。この結果は、岡山県真庭市において約 6 か月間の屋外曝露による退色具合を示す一例となる。



[図. 調査箇所⑧パネル表面・CLT4 遮光板被覆部（中央部）/非被覆部（辺縁部）]

(2) 現地調査

(A) 現地調査の内容

令和 7(2025) 年 2 月 28 日のモックアップ解体当日に一部の委員により現地調査を実施した。調査は事前に碎石層を撤去後に実施した。



[図.現地調査の様子]

なお、調査内容の一部は以下の調査票に記録した。

[表.モックアップ調査票（原本）]

【モックアップ目視調査票】		◎調査者 ()		◎調査日：2025.2.28(金) 時 分 天候： 。					
◎パネルの方位 (北面 ・ 南面 ・ 西面)		◎パネルの種類 (CLT1 ・ CLT2 ・ CLT3 ・ CLT4)							
●目視調査部位 ※該当項目にチェック印	黒色 変色	黒 かび	腐朽	虫害	水痕	接合部 の隙間	表面の フレ	膨張・ 収縮	●状況コメント (劣化状況の詳細等)
①パネル下部-建屋接触部周辺	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
②砕石層を含む下側 (足まわり)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
③中間部 (鉄骨を挟んだパネル面)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
④パネル上部-屋根鉄板接触部周辺	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
⑤パネル上部-建屋接触部周辺	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
⑥パネル間ガラス層周辺 (CLT2,3のみ)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
⑦欠き込み部 (CLT3,4のみ)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
⑧パネル表面 (CLT4はアルミ板を剥がす)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
●その他の目視調査 ※気づいたこと	●状況コメント (劣化状況の詳細等)								
例. 北面 CLT 1 (足まわり)	H鋼金物と接触していた部分は、腐朽は確認されなかったものの、水が溜まっており、触るとブヨブヨしていた。								
01. 面 CLT ()									
02. 面 CLT ()									
03. 面 CLT ()									
04. 面 CLT ()									
05. 面 CLT ()									
06. 面 CLT ()									
07. 面 CLT ()									
08. 面 CLT ()									
09. 面 CLT ()									
10. 面 CLT ()									
●目視調査全般のコメント (リユース可否、他方面との比較等)									

(B) 現地調査結果

主に以下 (a) ~ (f) を確認することができた。

(a) 鋼製笠木撤去後のパネル接触面

各 CLT パネルから 10mm 程度突出していた鋼製笠木を撤去した。触診では湿り気を感じたが、各パネル面とも生物劣化及び黒色変色等は確認されなかった。下図に黒色のブチルテープ痕を確認できるが、パネル接触面の全体を被覆するようにブチルテープによる防水措置を講じた場合は、当該結果よりも湿気を通さない仕様になると考えられる。



[図.鋼製笠木除去後のパネル接触面の様子]

(b) 各パネルの黒色変色

各パネルの随所に黒色変色が確認されたが、黒色変色には斑点状に見えるものと帯状に見えるものがあった。



[図.斑点状の黒色変色の様子 (左：北面 CLT4 右：西面 CLT1)]



[図.帯状の黒色変色の様子（左：西面 CLT1 右：西面 CLT4）]

(c) 木口面の黒色変色

木口面の黒色変色は、年輪の辺材部に発現したものと心材部に発現したものがあつた。



[図.木口面の黒色変色の様子（左：北面 CLT4 辺材部 右：南面 CLT2 心材部）]

(d) 欠き込み部

西面 CLT4 の欠き込み部が、すべての調査箇所でも最も劣化が進行している印象を受けた。



[図.西面 CLT4 の欠き込み部の様子]

加えて、前述の西面の欠き込み部の下側の変色が顕著であった（以下の調査票のとおり）。

[表.西面 CLT4 調査票]

【モックアップ目視調査票】		◎調査者 (彦本)							◎調査日: 2025.2.28(金) 7 時 0 分頃 天候: _____	
		◎パネルの方位 (北面・南面・西面)							◎パネルの種類 (CLT1・CLT2・CLT3・CLT4)	
●目視調査部位 ※該当項目にチェック	黒色 変色	黒 カビ	腐朽	虫害	水痕	接合部 の隙間	表面の ワレ	膨張・ 収縮	●状況コメント (劣化状況の詳細等)	
①パネル下部-建屋接触部周辺	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	欠き部(周囲)	
②砕石層を含む下側 (足まわり)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	5	
③中間部 (鉄骨を挟んだパネル面)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
④パネル上部-屋根鉄板接触部周辺	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	地面に突き	
⑤パネル上部-建屋接触部周辺	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	?	
⑥パネル間ガラス層周辺 (CLT2,3のみ)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
⑦欠き込み部 (CLT3,4のみ)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	←濃らしい。	
⑧パネル表面 (CLT4はアルミ板を剥がす)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
●その他の目視調査 ※気づいたこと	●状況コメント (劣化状況の詳細等)									
例. 北面 CLT1 (足まわり)	H鋼金物と接触していた部分は、腐朽は確認されなかったものの、水が溜まっており、触るとプロブしていた。									
01. 面 CLT ()	欠き込みから下の変色目立つ。									
02. 面 CLT ()	南面西側 変色									
03. 面 CLT ()										
04. 面 CLT ()										
05. 面 CLT ()										
06. 面 CLT ()										
07. 面 CLT ()										
08. 面 CLT ()										
09. 面 CLT ()										
10. 面 CLT ()										
●目視調査全般のコメント (リユース可否、他方面との比較等)										
フィンガージョイント部のボルト部から上下に水侵入? 変色あり。										

また、北面の欠き込み上端部に関しては、CLT パネルの表面割れがあった（以下の調査票のとおり）。割れた部分よりパネル内部へ雨水が浸潤していた可能性がある。

[表.北面 CLT1 調査票 ※コメントは CLT3 に対するもの]

【モックアップ目視調査票】		◎調査者 (〆 〆)		◎調査日: 2025.2.28(金) 時 〆 〆 分 天候: (〆)					
		◎パネルの方位 (北面) ・ 南面 ・ 西面)		◎パネルの種類 (CLT1 ・ CLT2 ・ CLT3 ・ CLT4)					
●目視調査部位 ※該当項目にチェック	黒色 変色	黒 かび	腐朽	虫害	水痕	接合部 の隙間	表面の ワレ	膨張・ 収縮	●状況コメント (劣化状況の詳細等)
①パネル下部-建屋接触部周辺	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
②砕石層を含む下側 (足まわり)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
③中間部 (鉄骨を挟んだパネル面)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
④パネル上部-屋根鉄板接触部周辺	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
⑤パネル上部-建屋接触部周辺	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
⑥パネル間ガラス層周辺 (CLT2,3のみ)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
⑦欠き込み部 (CLT3,4のみ)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
⑧パネル表面 (CLT4はアルミ板を剥がす)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
●その他の目視調査 ※気づいたこと	●状況コメント (劣化状況の詳細等)								
例. 北面 CLT 1 (足まわり)	H鋼金物と接触していた部分は、腐朽は確認されなかったものの、水が溜まっており、触るとプロブしていた。								
01. 面 CLT ()									
02. 面 CLT ()									
03. 面 CLT ()									
04. 面 CLT ()									
05. 面 CLT ()									
06. 面 CLT ()									
07. 面 CLT ()									
08. 面 CLT ()									
09. 面 CLT ()									
10. 面 CLT ()									
●目視調査全般のコメント (リユース可否、他方面との比較等)	CLT と H 鋼の孔留りのくさびはくさびが多い 屋外外は割れ(クラック)								

(e) 各パネルの足元とH型鋼

各パネルともに H 型鋼表面に水が滞留していた。曝露期間中、降雨や寒暖差によって水が滞留し、木口面から水が吸い上げられていた可能性が示唆された。



[図.北面 CLT4 の足元 (左)、水痕 (中央)、H 型鋼表面の滞留水 (右) の様子]

(f) 3 層 3 プライ+1CLT パネルの反り

下図は、3 層 3 プライ CLT の片側に平行ラミナ層を 1 層追加した、3 層 3 プライ+1 の CLT パネルであるが、当初の予測通り、1 層追加した側に凸の反りが確認された。3 層 3 プライ各パネルは概ね 1.1mm~1.5mm 程度の反りであったが、片側にラミナ層を付加したためにパネルの表裏面の張力が異なり、反りが生じたと考えられる。



[図.北面 CLT3 の反りの様子 (左) と反りの程度 (右)]

(C) 解体材の様子

(a) 解体材の様子

解体完了後、各面の CLT パネル計 12 枚を倉庫に平置きし 1 枚ずつ撮影した。CLT2 と CLT3 に関しては、建屋内部曝露部（屋内側）と建屋外部曝露部（屋外側）が存在するため、それぞれを図に明記した。なお、CLT2 では栈木を残したままの写真である。

▶CLT1 の様子

ラミナ横断的ではなく、辺材部を含むラミナ単位で帯状の黒色変色が確認された。



[図.解体後の CLT1 の様子 北面（左）、南面（中央）、西面（右）]

▶CLT2 の様子

各方角とも足元に黒色変色が確認されたが全体では特段問題のない状態であると感じた。



[図.解体後の CLT2 の様子 北面（左）、南面（中央）、西面（右）]

▶CLT3 の様子

黒色変色は、北面が最も多く、西面は一部に確認されたが、南面が最も少なかった。



[図.解体後の CLT3 の様子 北面（左）、南面（中央）、西面（右）]

▶CLT4の様子

北面と西面は広い範囲で黒色変色が確認されたが、南面は黒色変色が非常に少なかった。



[図.解体後の CLT4の様子 北面（左）、南面（中央）、西面（右）]

(b) 黒色変色の研磨除去

現地での簡易的な確認として、解体材表面の黒色変色を除去した。除去には紙ヤスリによる手法とサンダーによる手法を用いた。いずれの手法においても、変色部分を容易に除去することができた。

(ア) 紙ヤスリによる研磨除去

30 秒程度実施し、変色部分を除去することができた。



[図.紙ヤスリによる研磨 実施前（左）、実施後（右）]

(イ) サンダーによる研磨除去

サンダーを掛けてから、約 10 秒後、20 秒後、30 秒後の様子を記録した。変色部分を概ね除去することができた。



[図.サンダーによる研磨 約 10 秒後 (左)、約 20 秒後 (中央)、約 30 秒後 (右)]

(3) 目視調査の所感

令和 6 (2024) 年 9 月 5 日の初回撮影から令和 7 (2025) 年 2 月 26 日の最終撮影、ならびに令和 7 (2025) 年 2 月 28 日の現地調査を通じ、屋外環境において約 6 ヶ月間曝露したモックアップの経時的劣化を調査した。当初の予測通り、他の木造建築物と同様に黒色変色を確認しており、その発生箇所も概ね予測通りであった。構造的に雨掛かりや水の滞留を極力減らす配慮が劣化外力軽減に直結すること、表面割れ等がパネル全体の劣化に影響すること、そして、企画段階からリユース先の使用環境条件を考慮した設計がパネルの寿命を延長させリユース自体の拡大に繋がること等が考えられる。

(4) 屋外曝露試験における含水率計測について

(A) 実験概要

(a) 含水率の計測概要

含水率計測は、表面含水率計測と内部含水率計測の 2 種類行った。

内部含水率の計測は、有木らが提案している写真 5.4-1 に示す温湿度データロガー (ハイグロクロン) を使用した手法 5.4-1) を採用した。なお、黄色のカバーは計測部保護と計測用空気容量を担保するために 3D プリンターで作製したキャップである。この方法は、木材内部に埋め込んだ温湿度データロガーのごく近傍を平衡状態にすぐに達すると仮定し、図 5.4-1 に示す Kollmann の平衡含水率曲線 5.4-2) に適用する手法であり、Kollmann の平衡含水率曲線を近似した斎藤らが提案している式 (5.4-1) 5.4-3) を使用して内部含水率を求めており、本精度については、有木らの研究 5.4-1) で説明されている。データロガーの設置においては、計測したい層まで $\phi 22\text{mm}$ の穴を空け、写真 5.4-1 に示すカバーを取り付けた状態で、計測部にスペースができるように配置した。また、計測したい層の木材の繊維方向による通気を可能とするようにウレタン棒と配管用パテ (AP-1000-I) を用いて穴を塞ぎ、外気との直接のやりとりも防いだ。

表面含水率の計測は、写真 5.4-2 に示す非破壊式高周波木材水分計 MERLIN (HM8-WS25 型) を用いて計測した。

⁷ 斎藤周逸、信田聡：日本の気候値平衡含水率、木材学会誌, 62 (5) , pp.182-189, 2016

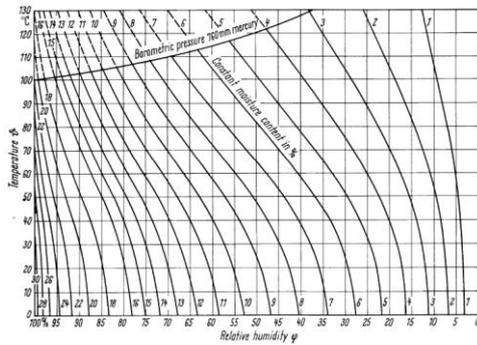


図 5.4-1 Kollman の平衡含水率曲線^{5.4-2) 8}



写真 5.4-1
温湿度データロガー



写真 5.4-2
MERLIN

$$EMC_1 = \frac{a+bx+cx^2+dy+ey^2+fy^3}{1+gx+hy+iy^2+jy^3} \quad (5.4-1)^9$$

EMC_1 : 平衡含水率 (%)

x : 温度 (°C) ($1 \leq x \leq 90$)

y : 相対湿度 (%) ($5 \leq y \leq 99.5$)

a : 1.33 b : 8.27×10^{-3} c : -6.40×10^{-5} d : 1.10×10^{-1} e : -2.28×10^3

f : 1.47×10^{-5} g : -1.16×10^{-5} h : -2.42×10^{-2} i : 2.54×10^{-4} j : -9.85×10^{-7}

(b) 計測概要

本実験では、モックアップを 2024/9/1~2024/2/27 の 180 日間屋外曝露し、その期間中内部含水率を計測した。温湿度データロガーを用いた内部含水率計測は、3 時間間隔で自動計測し、MERLIN を用いた表面含水率計測は 1 週間に 1 回、試験環境における温湿度は、環境中の温湿度データを収集・記録することが可能なデータロガーであるおんどとりを用いて 1 時間間隔で計測した。図 5.4-2、図 5.4-3 におんどとりで計測した温度と湿度のグラフをそれぞれ示す。計測は、屋内は北側 CLT1-2 間、北側 CLT3-4 間、南側 CLT1-2 間、南側 CLT3-4 間、南側上部の 5 か所、屋外は 1 か所の計 6 か所で計測していたが、CLT 間の温湿度はほとんど一致していたため、ここでは北側 CLT1-2 間 (下部)、南側上部、屋外の温湿度を示す。屋外は、温度、湿度ともに大きく変動し、特に湿度は屋内に比べて高い日が多い傾向を示した。南側上部は、CLT1-2 間としている下部と比べて、温度が高く、湿度が低い値を示す日が多く見られた。

⁸ Franz F.P. Kollmann, Wilfred A. Cote, Jr., Principle of Wood Science and Technology I Solid Wood, Springer, Berlin, Heidelberg, pp.189, 1968

⁹ 有木彩乃、他 2 名 : CLT 内部の含水率変動計測手法に関する研究, 日本建築学会中国支部研究報告集第 45 巻, pp.275-278, 2022

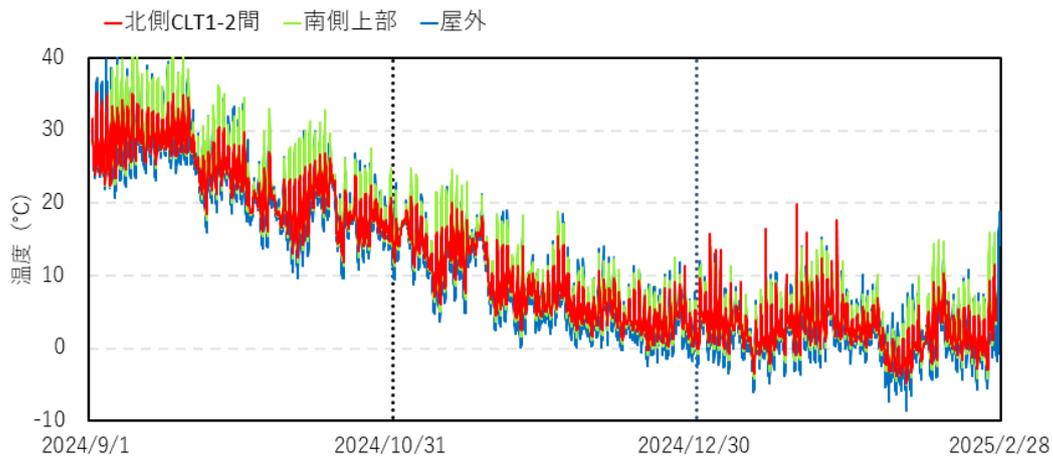


図 5.4-2 おんどとりで計測した温度

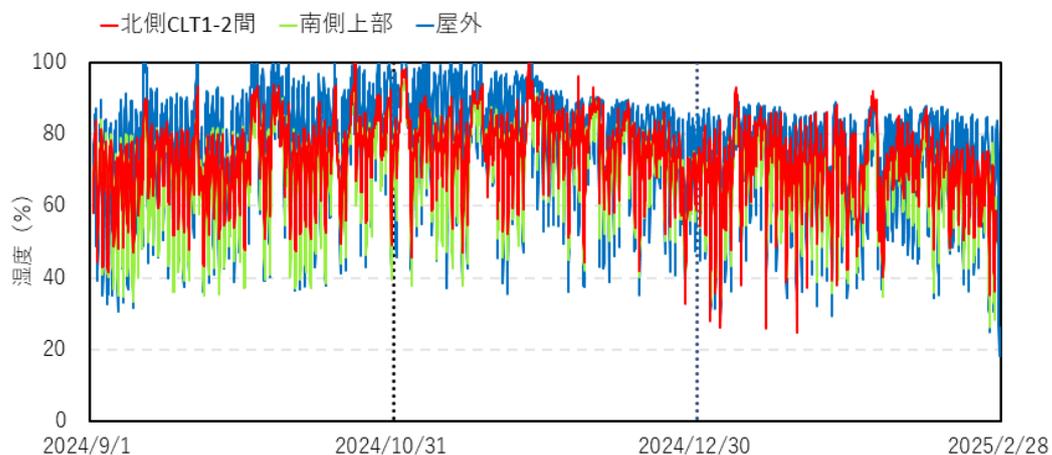


図 5.4-3 おんどとりで計測した湿度

(c) 試験体概要と計測位置

写真 5.4-3 に屋外曝露試験体を示す。CLT パネルは、CLT1 から CLT4 までの 4 枚を北、南、西の 3 方位に設置している。試験体配置の詳細は、4.2)試験体設置方法に示す。

図 5.4-4 から図 5.4-12 まで含水率計測箇所を示す。なお、計測箇所名は表 5.4-1 に示すルールとした。主距離とは CLT 下端からの距離、副距離はコアとなる壁からの距離、層数は写真 5.4-2 に示す CLT1 側 (左) から 1 層目としている。なお、この距離は基本的なもので、詳細は 4.4)ハイグロクロン埋め込み位置に示す。また、表面含水率も内部含水率と同様の位置を計測したため、番号を合わせており、その番号についても併せて示す。

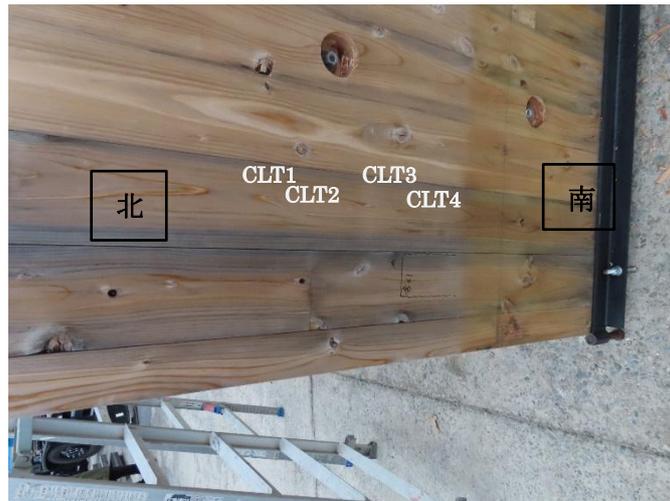


写真 5.4-3 西側からの屋外曝露試験体

表 5.4-1 計測箇所名

方角	CLT 番号	主距離	副距離	層数
・ N (北)	1	① (2300mm)	a (200mm)	1
・ S (南)	2	② (1000mm)	b (500mm)	2
・ W (西)	3	③ (550mm)	c (1250mm)	3
	4	④ (200mm)	d (1800mm)	

内部計測箇所	表面計測箇所
N2-②-b3	含 1

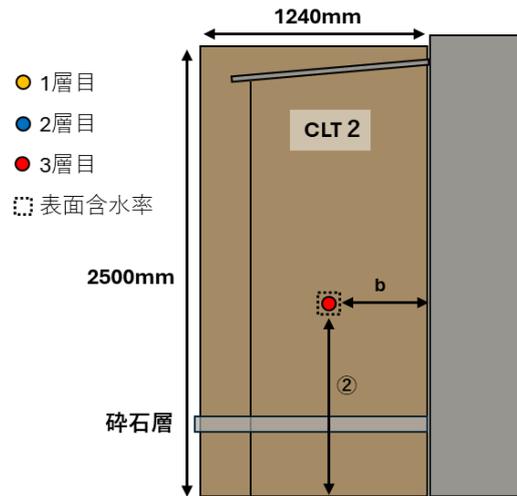


図 5.4-4 北側 CLT2 の含水率計測箇所

内部計測箇所	表面計測箇所
N3-①-c2	含 2
N3-①-d2	含 3
N3-③-a2	含 4
N3-③-d2	含 5
N3-③-d3	
N3-④-a2	含 7
N3-④-a3	
N3-④-c3	
N3-④-d2	

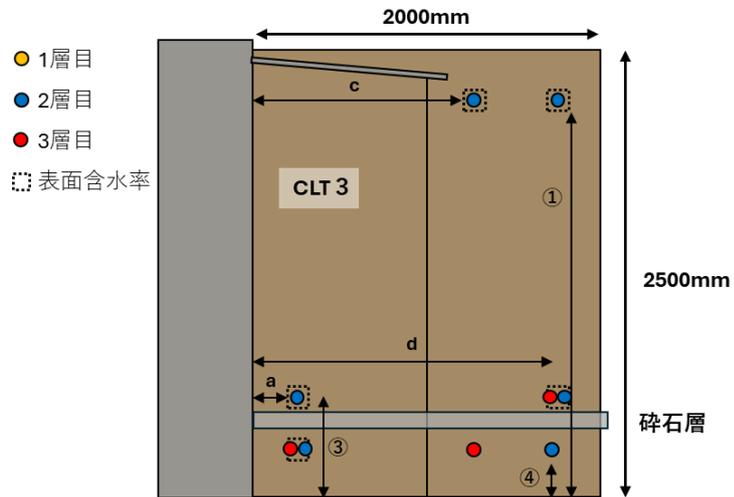


図 5.4-5 北側 CLT3 の含水率計測箇所

内部計測箇所	表面計測箇所
N4-①-a3	含 11
N4-①-c3	含 12
N4-①-d3	含 13
N4-③-a2	含 15
N4-③-a3	
N4-③-c1	含 16
N4-③-d3	含 17
N4-④-a2	
N4-④-a3	
N4-④-c2	
N4-④-d2	
N4-④-d3	

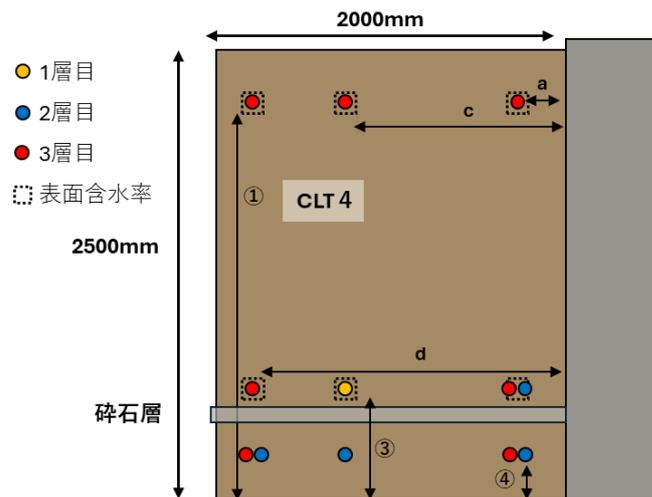


図 5.4-6 北側 CLT4 の含水率計測箇所

内部計測箇所	表面計測箇所
S2-②-b3	含 23

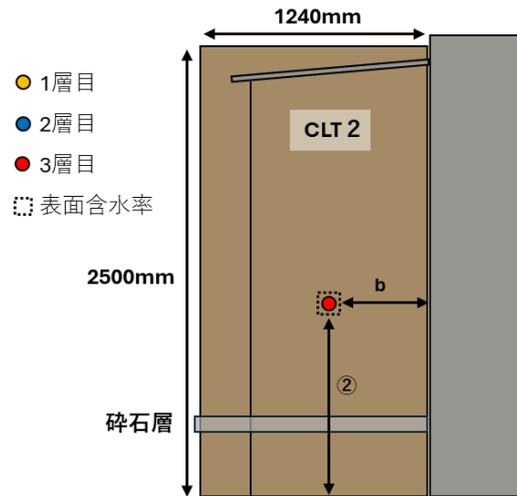


図 5.4-7 南側 CLT2 の含水率計測箇所

内部計測箇所	表面計測箇所
S3-①-c2	含 24
S3-①-d2	含 25
S3-③-a2	含 26
S3-③-d2	含 27
S3-③-d3	
S3-④-a2	含 29
S3-④-a3	
S3-④-c3	
S3-④-d2	

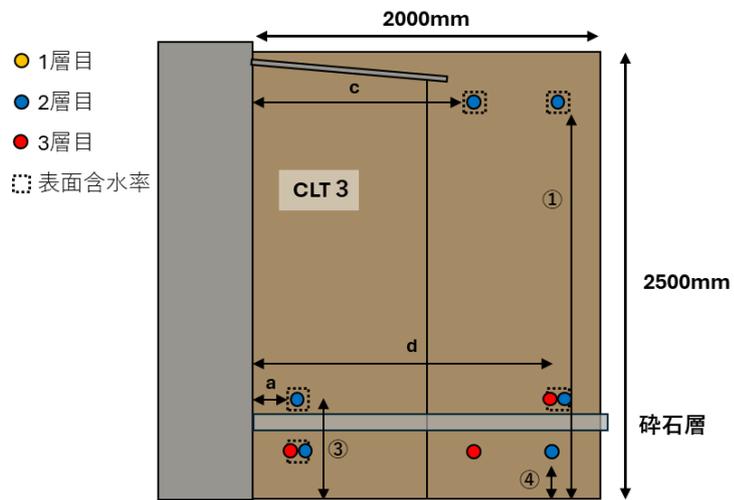


図 5.4-8 南側 CLT3 の含水率計測箇所

内部計測箇所	表面計測箇所
S4-①-a3	含 33
S4-①-c3	含 34
S4-①-d3	含 35
S4-③-a2	含 36
S4-③-a3	
S4-③-c1	含 37
S4-③-d3	含 38
S4-④-a2	
S4-④-a3	
S4-④-c2	
S4-④-d2	
S4-④-d3	

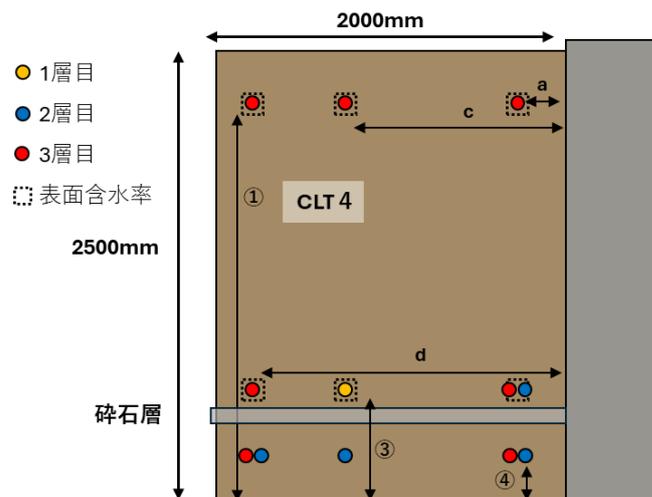


図 5.4-9 南側 CLT4 の含水率計測箇所

内部計測箇所	表面計測箇所
W2-②-b3	含 45

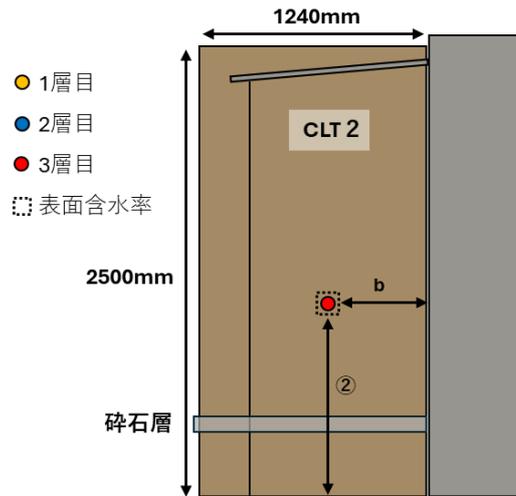


図 5.4-10 西側 CLT2 の含水率計測箇所

内部計測箇所	表面計測箇所
W3-①-c2	含 46
W3-①-d2	含 47
W3-③-a2	含 48
W3-③-d2	含 49
W3-③-d3	
W3-④-a2	含 51
W3-④-a3	
W3-④-c3	
W3-④-d2	

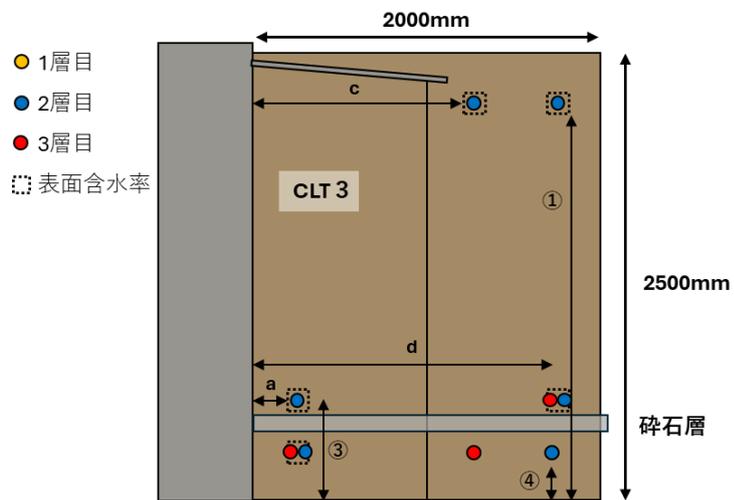


図 5.4-11 西側 CLT3 の含水率計測箇所

内部計測箇所	表面計測箇所
W4-①-a3	含 55
W4-①-c3	含 56
W4-①-d3	含 57
W4-③-a2	含 59
W4-③-a3	
W4-③-c1	含 60
W4-③-d3	含 61
W4-④-a2	
W4-④-a3	
W4-④-c2	
W4-④-d2	
W4-④-d3	

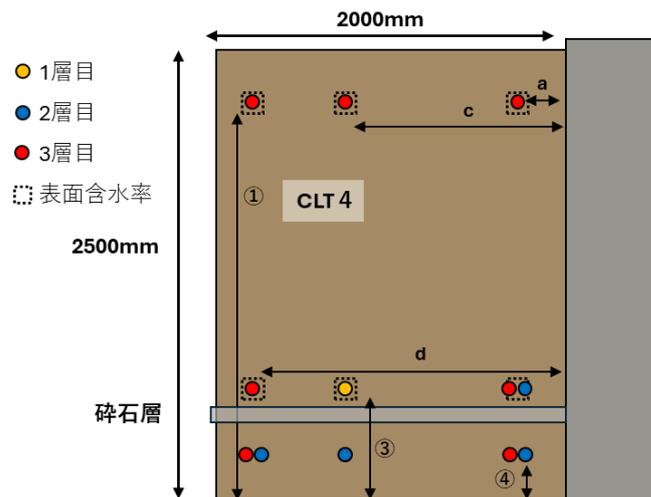


図 5.4-12 西側 CLT4 の含水率計測箇所

(d) (含水率変化からみる状態評価)

本試験体についてリユースすることを想定した、状態評価を考える。そこで、表 5.4-2 に示す集成材の JAS^{5.4-4)10}における使用環境条件をモデルとして考えてみることにした。これは、接着剤の要求性能を示す条件となっており、使用環境による負荷を考えているものと認識している。この使用環境区分で述べられている使用環境 A、B、C における含水率状態である 19%を一つの指標とした。加えて、一般的な製品としての評価に用いる含水率である 15%、最後に、腐朽リスクが高くなっていると考える 25%という線引きをした。まとめると、平衡含水率である含水率 15%未満を低含水率状態、15%以上 19%未満を中低含水率状態、19%以上 25%未満を中高含水率状態、繊維飽和点に近く危険な状態である 25%以上を高含水率状態として場合分けすることとした。なお、屋外曝露試験体の計測日数は 180 日あるためこの値を母数として割合を計算した。また、期間内での含水率変化の様子を確認するために 30 日ごとに 19%以上の状態になっている日数の比率も検討し、表に示した。次章の実験結果では、19%以上の状態が 5 割以上のものは表における計測位置のセルを赤、同様に 19%以上の状態が 2 割から 5 割のものを黄色で示す。

表 5.4-2 集成材の日本農林規格 (JAS)

使用環境 A	構造用集成材の含水率が長期間継続的に又は断続的に 19%を超える環境、直接外気にさらされる環境、太陽熱等により長期間断続的に高温になる環境、構造物の火災時でも高度の接着性能を要求される環境その他の構造物の耐力部材として、接着剤の耐水性、耐候性又は耐熱性について高度な性能が要求される使用環境をいう。
使用環境 B	構造用集成材の含水率が時々 19%を超える環境、太陽熱等により時々高温になる環境、構造物の火災時でも高度の接着性能を要求される環境その他の構造物の耐力部材として、接着剤の耐水性、耐候性又は耐熱性について通常の性能が要求される使用環境をいう。
使用環境 C	構造用集成材の含水率が時々 19%を超える環境、太陽熱等により時々高温になる環境その他の構造物の耐力部材として、接着剤の耐水性、耐候性又は耐熱性について通常の性能が要求される使用環境をいう。

(B) 内部含水率実験結果

(a) 北側の含水率計測結果

図 5.4-13 に北側 CLT2、図 5.4-14、図 5.4-15 に北側 CLT3、図 5.4-16、図 5.4-17 に北側 CLT4 の本計測期間における含水率計測結果を示す。CLT2 では、含水率は徐々に上昇しているものの、ほとんどすべての期間で 15%を下回った。CLT3 の 2 層目では、計測箇所 N3-④-a2、N3-④-d2 が CLT3 の 3 層目では、N3-④-a3 が他の箇所と比べて大きな含水率

¹⁰ 農林水産省：告示第 1587 号 (2012)

上昇が見られた。これらの箇所は、全て CLT 下端から 200mm に位置していたことから、雨のはね返りや写真 5.4-4 にあるように CLT の下にある H 形鋼に水がたまったことで含水率が上昇した可能性が示唆された。CLT4 の 3 層目は、CLT2、CLT3、CLT4 の 2 層目と比べて含水率変動が大きい傾向を示した。これは、CLT4 の 3 層目が最も外部環境に近いため外気の影響を大きく受けているからだと考えている。また CLT4 でも、N4-④-d2、N4-③-d3、N4-④-d3 と下部の計測位置の含水率上昇が大きい傾向を示した。CLT4 の 2 層目では N4-④-d2 のみ含水率が高い値を計測しており、2 層目のラミナの繊維方向は地面と平行で木口からの距離も近かったため、木口からの水分流入により上昇したと考える。

表 5.4-3 にそれぞれの含水率状態の日数を計算した結果、表 5.4-4 にそれぞれの含水率状態の全体の計測日数における割合、表 5.4-5 に 1 か月ごとに含水率が 19%以上となる日数の割合を示す。N4-③-d3、N4-④-d2、N4-④-d3 では含水率 19%以上の状態が全体の日数の 5 割以上となり、3 ヶ月目から徐々に含水率が上昇していることが分かった。これらの計測点は、下部かつ木口からの距離が最も近い計測点であり、今回のように水が滞留する H 形鋼などに接触するように設置すると木口付近の材料はかなり高含水率の状態となり、劣化のリスクが高い状態であったと考える。そのほかの計測点では、中高含水率状態が続くものはほとんど見られなかった。

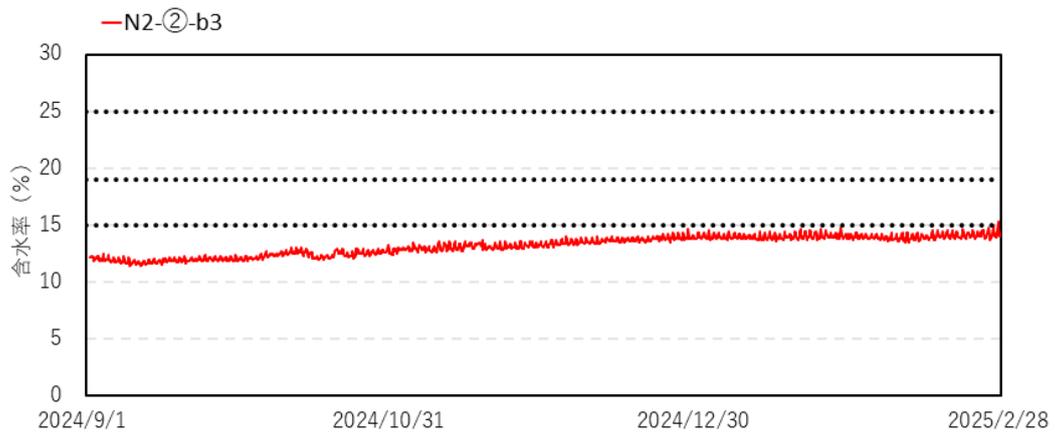


図 5.4-13 北側 CLT2 の含水率計測結果

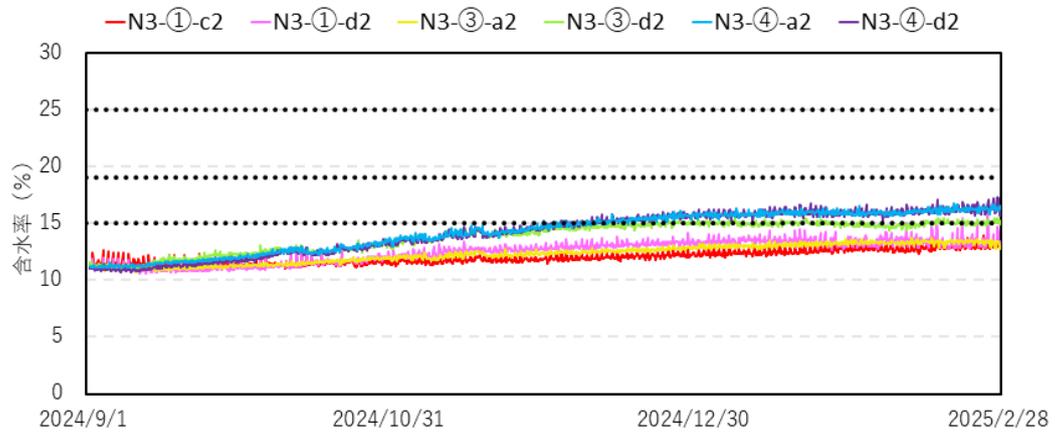


図 5.4-14 北側 CLT3 2層目の含水率計測結果

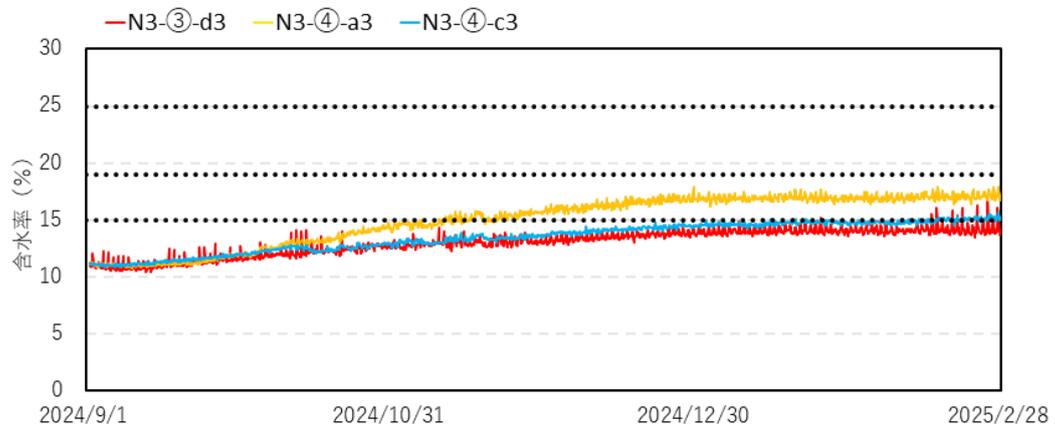


図 5.4-15 北側 CLT3 3層目の含水率計測結果

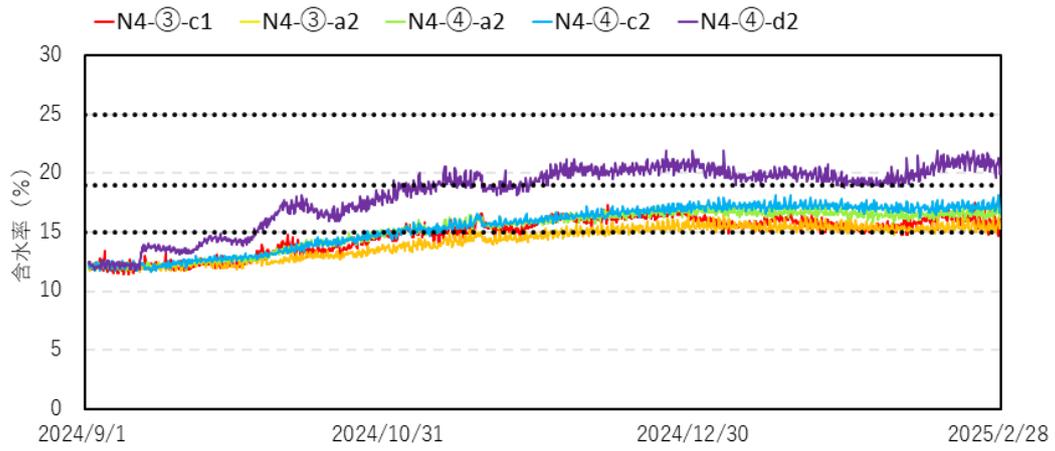


図 5.4-16 北側 CLT4 1、2 層目の含水率計測結果

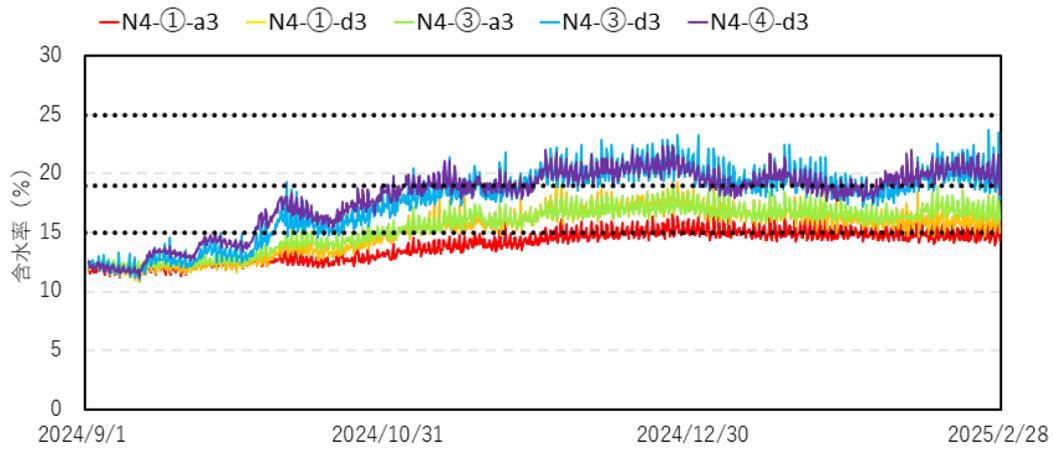


図 5.4-17 北側 CLT4 3 層目の含水率計測結果



写真 5.4-4 CLT 下部の写真

表 5.4-3 北側 日数計算

日数 (日)	低含水率状態	中低含水率状態	中高含水率状態	高含水率状態
N2-②-b3	179	1	0	0
N3-①-c2	180	0	0	0
N3-①-d2	176	4	0	0
N3-③-a2	180	0	0	0
N3-③-d2	114	66	0	0
N3-③-d3	170	10	0	0
N3-④-a2	89	91	0	0
N3-④-a3	69	111	0	0
N3-④-c3	154	26	0	0
N3-④-d2	90	90	0	0
N4-①-a3	87	93	0	0
N4-①-c3	72	108	0	0
N4-①-d3	56	120	4	0
N4-③-a2	85	95	0	0
N4-③-a3	49	131	0	0
N4-③-c1	60	120	0	0
N4-③-d3	32	32	116	0
N4-④-a2	58	122	0	0
N4-④-a3	46	134	0	0
N4-④-c2	56	124	0	0
N4-④-d2	33	28	119	0
N4-④-d3	33	31	116	0

表 5.4-4 北側 日数割合

割合 (%)	低含水率状態	中低含水率状態	中高含水率状態	高含水率状態
N2-②-b3	99.4	0.6	0	0
N3-①-c2	100	0	0	0
N3-①-d2	97.8	2.2	0	0
N3-③-a2	100	0	0	0
N3-③-d2	63.3	36.7	0	0
N3-③-d3	94.4	5.6	0	0
N3-④-a2	49.4	50.6	0	0
N3-④-a3	38.3	61.7	0	0
N3-④-c3	85.6	14.4	0	0
N3-④-d2	50	50	0	0
N4-①-a3	48.3	51.7	0	0
N4-①-c3	40	60	0	0
N4-①-d3	31.1	66.7	2.2	0
N4-③-a2	47.2	52.8	0	0
N4-③-a3	27.2	72.8	0	0
N4-③-c1	33.3	66.7	0	0
N4-③-d3	17.8	17.8	64.4	0
N4-④-a2	32.2	67.8	0	0
N4-④-a3	25.6	74.4	0	0
N4-④-c2	31.1	68.9	0	0
N4-④-d2	18.3	15.6	66.1	0
N4-④-d3	18.3	17.2	64.4	0

表 5.4-5 北側 1 か月ごとの日数割合

割合 (%)	1 か月	2 か月	3 か月	4 か月	5 か月	6 か月
N2-②-b3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
N3-①-c2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
N3-①-d2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
N3-③-a2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
N3-③-d2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
N3-③-d3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
N3-④-a2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
N3-④-a3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
N3-④-c3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
N3-④-d2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
N4-①-a3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
N4-①-c3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
N4-①-d3	0.0	0.0	0.0	13.3	0.0	0.0
N4-③-a2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
N4-③-a3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
N4-③-c1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
N4-③-d3	0.0	3.3	90.0	100.0	100.0	93.3
N4-④-a2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
N4-④-a3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
N4-④-c2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
N4-④-d2	0.0	0.0	96.7	100.0	100.0	100.0
N4-④-d3	0.0	6.7	100.0	100.0	86.7	93.3

(b) 南側の含水率計測結果

図 5.4-18 に南側 CLT2、図 5.4-19、図 5.4-20 に南側 CLT3、図 5.4-21、図 5.4-22 に南側 CLT4 の本計測期間における含水率計測結果を示す。CLT2 では、すべての期間で含水率 15%を下回った。CLT3 の S3-①-c2 では、含水率 25%を超える高含水率状態が 2 か月程度続き、その後徐々に低下する様子が見られた。この計測点付近では、写真 5.4-3 に示すように抜け節と複数の割れが確認でき、ここから計測箇所に入水したことで急激な含水率上昇が見られ、その後水が抜けていったと考えている。CLT3、CLT4 では CLT 下端から 200mm に位置している計測箇所が他の箇所と比べて含水率上昇が大きい傾向を示しており、雨のはね返りや CLT の下にある H 形鋼に水がたまったことで含水率が上昇した可能性が示唆された。CLT4 の 3 層目は、CLT2、CLT3、CLT4 の 2 層目と比べて含水率変動が大きい傾向を示しており、CLT4 の 3 層目が最も外部環境に近いこと外気の影響を大きく受けているからだと考えている。

表 5.4-6 にそれぞれの含水率状態の日数を計算した結果、表 5.4-7 にそれぞれの含水率状態の全体の計測日数における割合、表 5.4-8 に 1 ヶ月ごとに含水率が 19%以上となる日数の割合を示す。S3-①-c2、S4-④-d3 では含水率 19%以上の状態が全体の日数の 2 割以上 5 割未満となった。S3-①-c2 では 2 ヶ月目から 4 ヶ月目で高含水率状態が続いていたが、5 ヶ月目、6 ヶ月目では含水率 19%を超えることはほとんどなかった。S4-④-d3 では 4 ヶ月目から徐々に含水率が上昇していることが分かった。この計測点は、砕石層に近い木口からの距離が最も近い計測点であり、今回のように水が滞留する箇所付近に木口が存在する材料はかなり高含水率の状態となり、劣化のリスクが高い状態であったと考える。その他の計測点では、中高含水率状態が続くものはほとんど見られなかった。

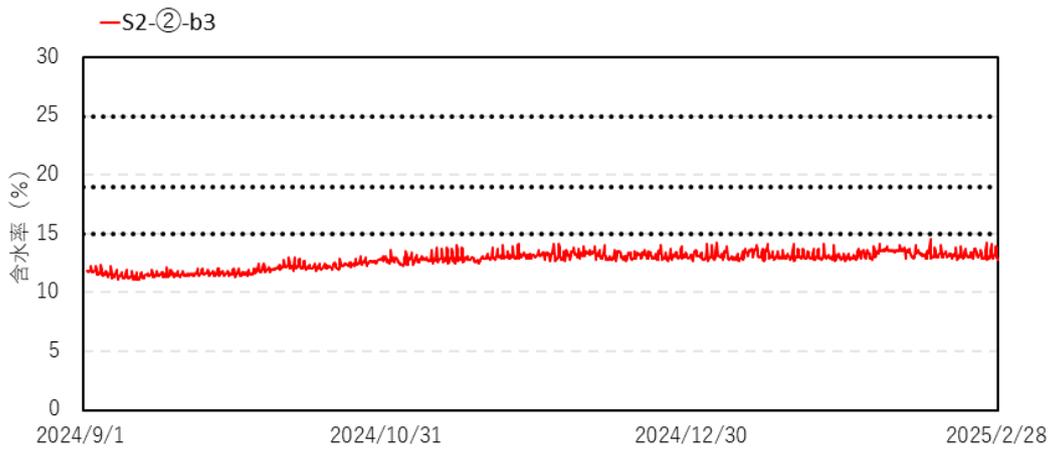


図 5.4-18 南側 CLT2 の含水率計測結果

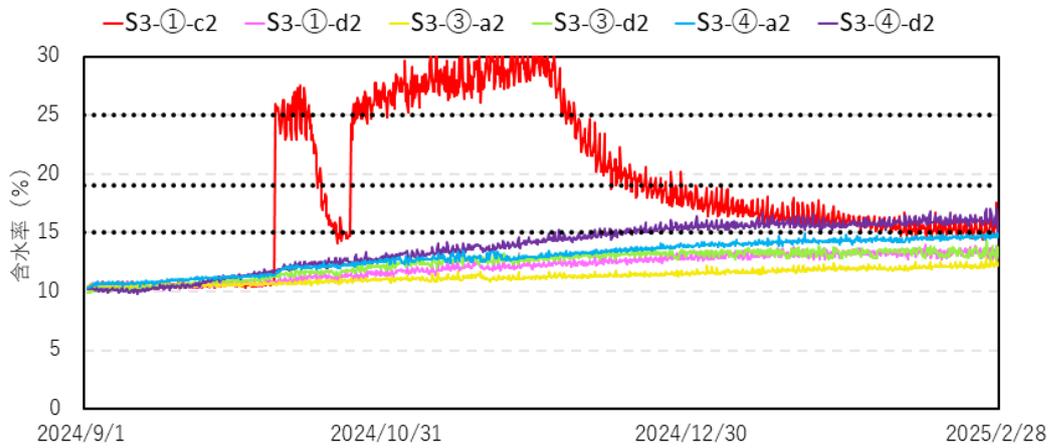


図 5.4-19 南側 CLT3 2層目の含水率計測結果

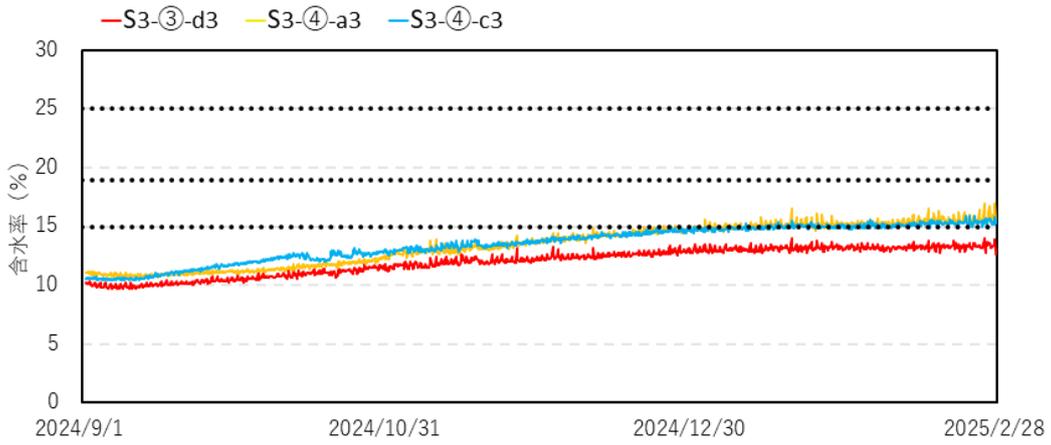


図 5.4-20 南側 CLT3 3 層目の含水率計測結果

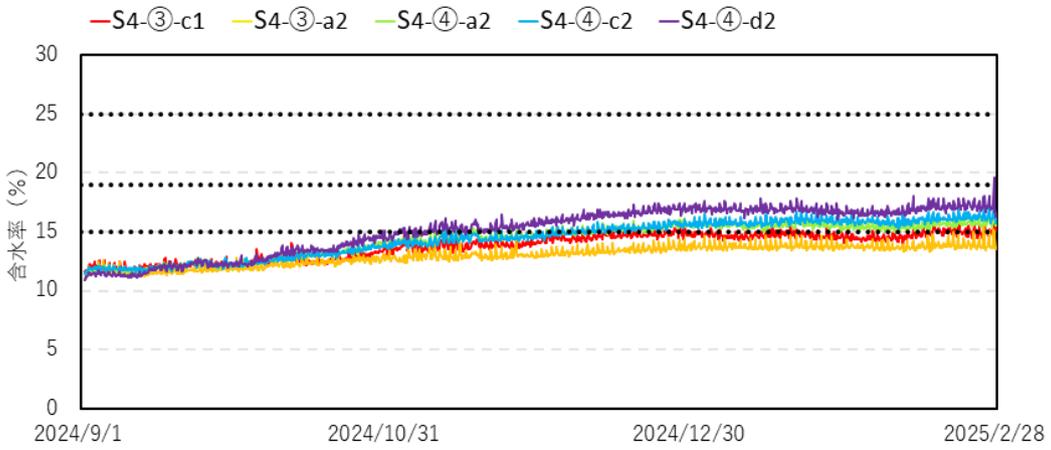


図 5.4-21 南側 CLT4 1、2 層目の含水率計測結果

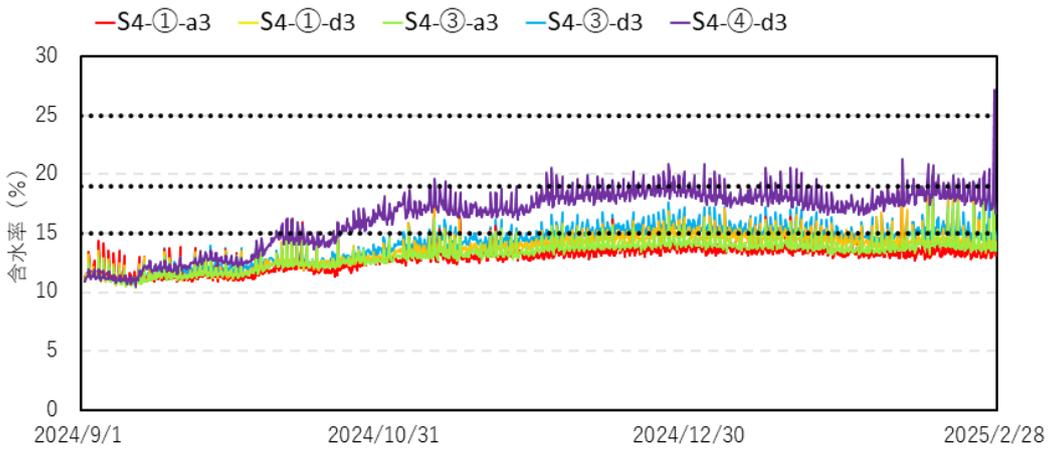


図 5.4-22 南側 CLT4 3 層目の含水率計測結果



写真 5.4-5 S3-①-c2 付近の写真

表 5.4-6 南側 日数計算

日数 (日)	低含水率状態	中低含水率状態	中高含水率状態	高含水率状態
S2-②-b3	180	0	0	0
S3-①-c2	37	65	26	52
S3-①-d2	180	0	0	0
S3-③-a2	180	0	0	0
S3-③-d2	180	0	0	0
S3-③-d3	180	0	0	0
S3-④-a2	180	0	0	0
S3-④-a3	116	64	0	0
S3-④-c3	126	54	0	0
S3-④-d2	97	83	0	0
S4-①-a3	120	59	1	0
S4-①-c3	161	19	0	0
S4-①-d3	89	90	1	0
S4-③-a2	175	5	0	0
S4-③-a3	126	54	0	0
S4-③-c1	137	43	0	0
S4-③-d3	69	106	5	0
S4-④-a2	78	102	0	0
S4-④-a3	50	129	1	0
S4-④-c2	84	96	0	0
S4-④-d2	60	119	1	0
S4-④-d3	41	73	65	1

表 5.4-7 南側 日数割合

割合 (%)	低含水率状態	中低含水率状態	中高含水率状態	高含水率状態
S2-②-b3	100	0	0	0
S3-①-c2	20.6	36.1	14.4	28.9
S3-①-d2	100	0	0	0
S3-③-a2	100	0	0	0
S3-③-d2	100	0	0	0
S3-③-d3	100	0	0	0
S3-④-a2	100	0	0	0
S3-④-a3	64.4	35.6	0	0
S3-④-c3	70	30	0	0
S3-④-d2	53.9	46.1	0	0
S4-①-a3	66.7	32.8	0.6	0
S4-①-c3	89.4	10.6	0	0
S4-①-d3	49.4	50	0.6	0
S4-③-a2	97.2	2.8	0	0
S4-③-a3	70	30	0	0
S4-③-c1	76.1	23.9	0	0
S4-③-d3	38.3	58.9	2.8	0
S4-④-a2	43.3	56.7	0	0
S4-④-a3	27.8	71.7	0.6	0
S4-④-c2	46.7	53.3	0	0
S4-④-d2	33.3	66.1	0.6	0
S4-④-d3	22.8	40.6	36.1	0.6

表 5.4-8 南側 1 か月ごとの日数割合

割合 (%)	1 か月	2 か月	3 か月	4 か月	5 か月	6 か月
S2-②-b3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
S3-①-c2	0.0	60.0	100.0	96.7	3.3	0.0
S3-①-d2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
S3-③-a2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
S3-③-d2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
S3-③-d3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
S3-④-a2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
S3-④-a3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
S3-④-c3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
S3-④-d2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
S4-①-a3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.3
S4-①-c3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
S4-①-d3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.3
S4-③-a2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
S4-③-a3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
S4-③-c1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
S4-③-d3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	16.7
S4-④-a2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
S4-④-a3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.3
S4-④-c2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
S4-④-d2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.3
S4-④-d3	0.0	0.0	13.3	86.7	53.3	66.7

(c) 西側の含水率計測結果

図 5.4-23 に北側 CLT2、図 5.4-24、図 5.4-25 に西側 CLT3、図 5.4-26、図 5.4-27 に西側 CLT4 の本計測期間における含水率計測結果を示す。CLT2 では、含水率は徐々に上昇しているものの、含水率 15% を超える日はほとんど見られなかった。CLT3、CLT4 の 2 層目では CLT 下端から 200mm に位置している計測箇所が他の箇所と比べて大きな含水率上昇が見られており、雨のはね返りや CLT の下にある H 形鋼に水がたまったことで含水率が上昇した可能性が示唆された。CLT4 の 3 層目では、W4-③-d3、W4-①-d3 で含水率変動が大きく、特に W4-③-d3 では含水率 25% を超える日もあった。この理由として、写真 5.4-6 や写真 5.4-7 にあるように割れや節から水分流入したと考える。CLT4 の 3 層目は、CLT2、CLT3、CLT4 の 2 層目と比べて含水率変動が大きい傾向を示した。これは、CLT4 の 3 層目が最も外部環境に近いいため外気の影響を大きく受けているからだと考えている。また CLT4 でも、N4-④-d2、N4-③-d3 と下部の計測位置の含水率上昇が大きい傾向を示した。CLT4 の 2 層目では N4-④-d2 が特に含水率が高い値を計測しており、2 層目のラミナの繊維方向は地面と平行で木口からの距離も近かったため、木口からの水分流入により上昇したと考える。

表 5.4-9 にそれぞれの含水率状態の日数を計算した結果、表 5.4-10 にそれぞれの含水率状態の全体の計測日数における割合、表 5.4-11 に 1 か月ごとに含水率が 19% 以上となる日数の割合を示す。W4-①-d3、W4-③-d3、W4-④-a3 では含水率 19% 以上の状態が全体の日数の 2 割以上 5 割以下、W4-④-d2、W4-④-d3 では含水率 19% 以上の状態が全体の日数の 5 割以上となった。W4-③-d3 では 2 か月目から W4-①-d3、W4-④-a3、W4-④-d2、W4-④-d3 では 3 か月目から含水率上昇が見られ、また他の計測箇所でも 1、2 か月高含水率が続く箇所も見られた。W4-①-d3、W4-③-d3、W4-④-d2、W4-④-d3 は下部かつ木口からの距離が最も近い計測点であり、今回のように水が滞留する H 形鋼などに接触するように設置すると木口付近の材料はかなり高含水率の状態となり、劣化のリスクが高い状態であったと考える。また、試験体上部でも割れが発生すると含水率が高い値を示す可能性が示唆された。

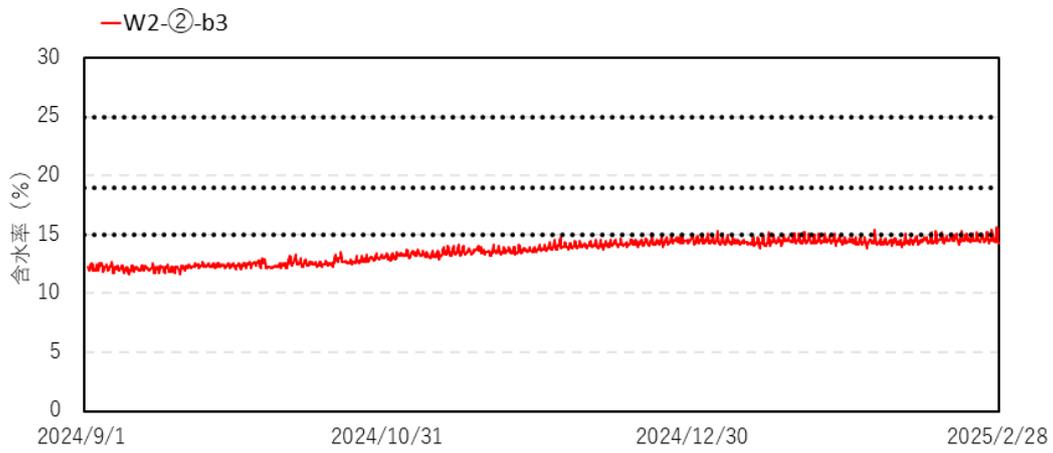


図 5.4-23 西側 CLT2 の含水率計測結果

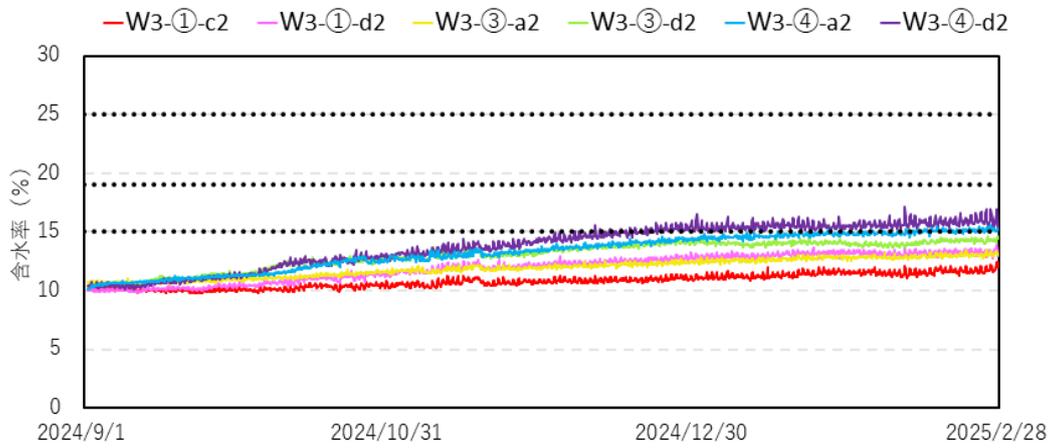


図 5.4-24 西側 CLT3 2層目の含水率計測結果

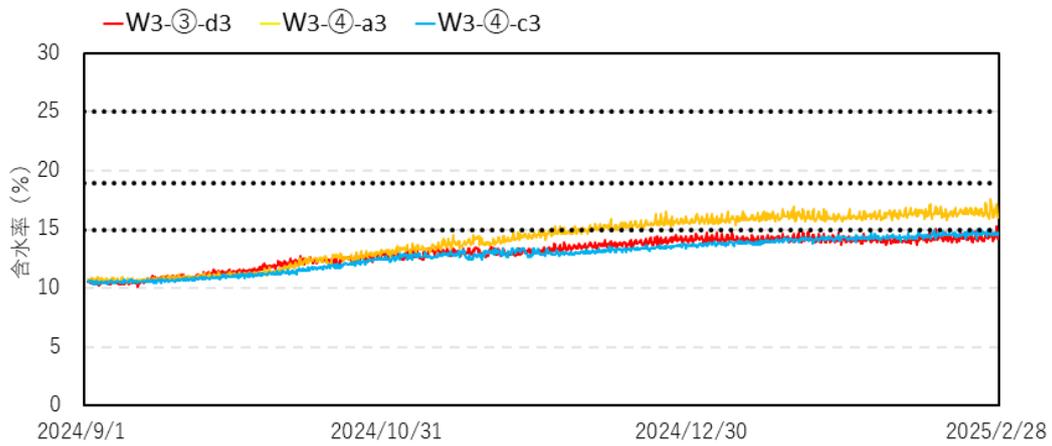


図 5.4-25 西側 CLT3 3層目の含水率計測結果

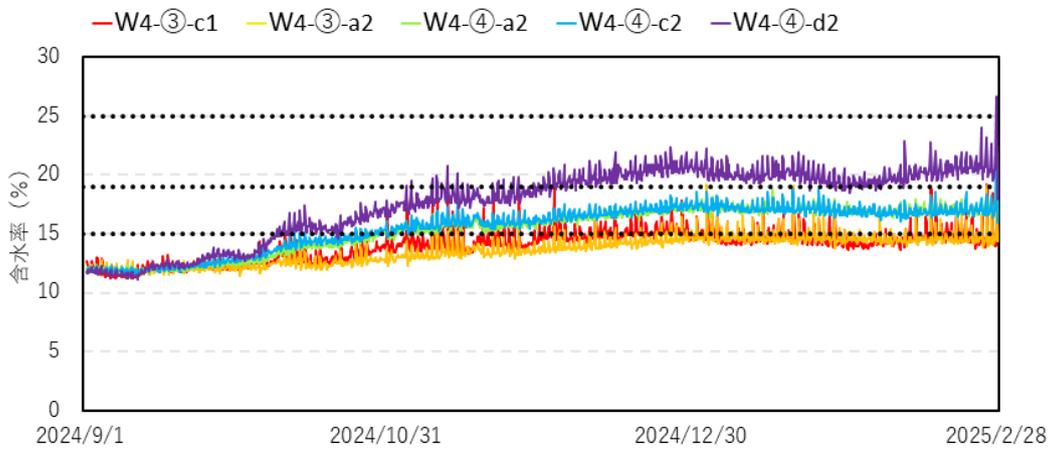


図 5.4-26 西側 CLT4 1、2層目の含水率計測結果

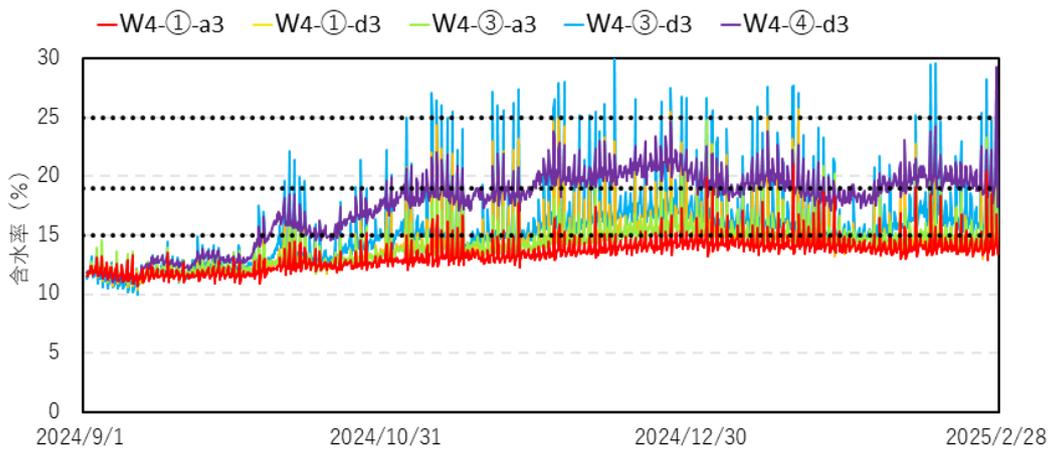


図 5.4-27 西側 CLT4 3層目の含水率計測結果



写真 5.4-6
W4-①-d3 の写真



写真 5.4-7
W4-③-d3 の写真

表 5.4-9 西側 日数計算

日数 (日)	低含水率状態	中低含水率状態	中高含水率状態	高含水率状態
W2-②-b3	151	29	0	0
W3-①-c2	180	0	0	0
W3-①-d2	180	0	0	0
W3-③-a2	180	0	0	0
W3-③-d2	180	0	0	0
W3-③-d3	178	2	0	0
W3-④-a2	148	32	0	0
W3-④-a3	93	87	0	0
W3-④-c3	179	1	0	0
W3-④-d2	99	81	0	0
W4-①-a3	109	67	4	0
W4-①-c3	89	87	4	0
W4-①-d3	65	63	48	4
W4-③-a2	105	72	3	0
W4-③-a3	64	98	18	0
W4-③-c1	80	99	1	0
W4-③-d3	43	50	53	34
W4-④-a2	53	126	1	0
W4-④-a3	45	99	35	1
W4-④-c2	49	130	1	0
W4-④-d2	38	35	106	1
W4-④-d3	34	37	108	1

表 5.4-10 西側 日数割合

割合 (%)	低含水率状態	中低含水率状態	中高含水率状態	高含水率状態
W2-②-b3	83.9	16.1	0	0
W3-①-c2	100	0	0	0
W3-①-d2	100	0	0	0
W3-③-a2	100	0	0	0
W3-③-d2	100	0	0	0
W3-③-d3	98.9	1.1	0	0
W3-④-a2	82.2	17.8	0	0
W3-④-a3	51.7	48.3	0	0
W3-④-c3	99.4	0.6	0	0
W3-④-d2	55	45	0	0
W4-①-a3	60.6	37.2	2.2	0
W4-①-c3	49.4	48.3	2.2	0
W4-①-d3	36.1	35	26.7	2.2
W4-③-a2	58.3	40	1.7	0
W4-③-a3	35.6	54.4	10	0
W4-③-c1	44.4	55	0.6	0
W4-③-d3	23.9	27.8	29.4	18.9
W4-④-a2	29.4	70	0.6	0
W4-④-a3	25	55	19.4	0.6
W4-④-c2	27.2	72.2	0.6	0
W4-④-d2	21.1	19.4	58.9	0.6
W4-④-d3	18.9	20.6	60	0.6

表 5.4-11 西側 1 か月ごとの日数割合

割合 (%)	1 か月	2 か月	3 か月	4 か月	5 か月	6 か月
W2-②-b3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
W3-①-c2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
W3-①-d2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
W3-③-a2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
W3-③-d2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
W3-③-d3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
W3-④-a2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
W3-④-a3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
W3-④-c3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
W3-④-d2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
W4-①-a3	0.0	0.0	0.0	0.0	6.7	6.7
W4-①-c3	0.0	0.0	0.0	3.3	10.0	0.0
W4-①-d3	0.0	0.0	43.3	50.0	50.0	30.0
W4-③-a2	0.0	0.0	0.0	0.0	6.7	3.3
W4-③-a3	0.0	0.0	3.3	10.0	26.7	20.0
W4-③-c1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.3
W4-③-d3	0.0	26.7	60.0	76.7	80.0	46.7
W4-④-a2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.3
W4-④-a3	0.0	0.0	3.3	46.7	56.7	13.3
W4-④-c2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.3
W4-④-d2	0.0	0.0	56.7	100.0	100.0	100.0
W4-④-d3	0.0	3.3	73.3	100.0	96.7	90.0

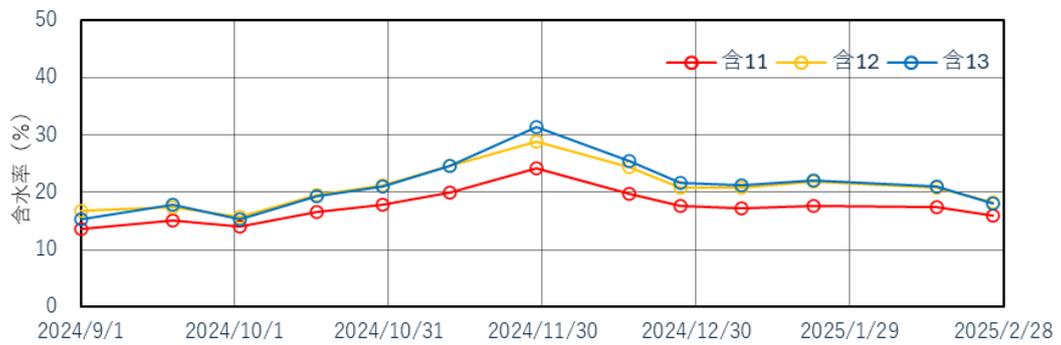
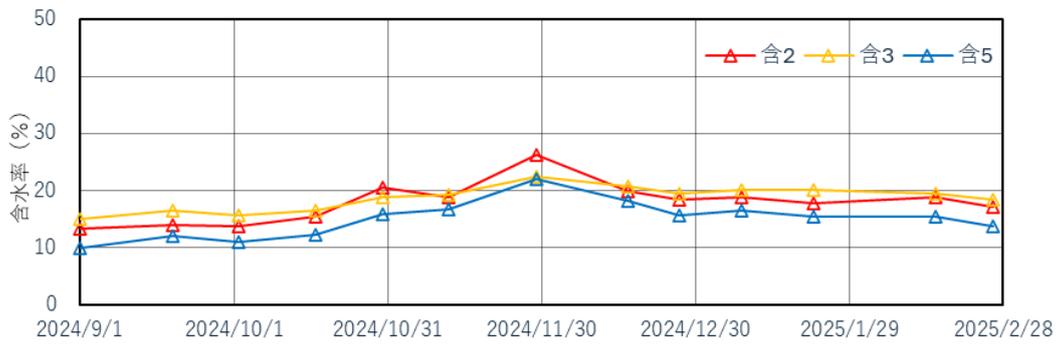
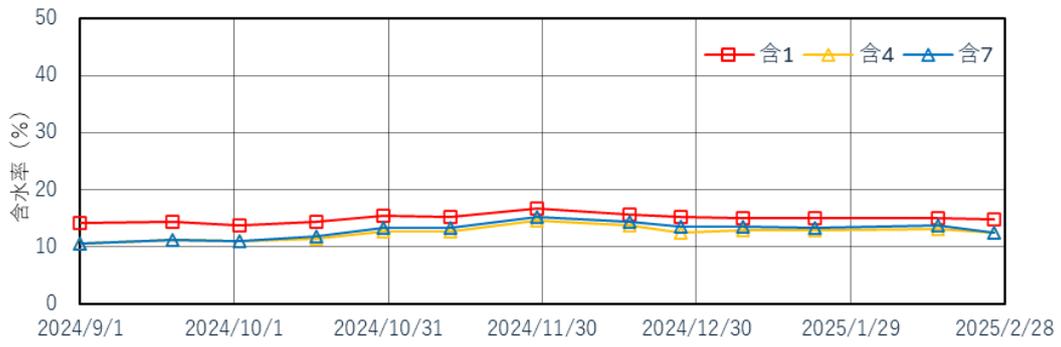
(d) 方角による比較

北側、南側、西側の結果を比較すると、すべての方角で試験体下部かつ木口付近で含水率上昇が見られた。北側と南側はほぼ同様の傾向を示したが、西側の特に CLT4 では他の 2 つの方角と比較すると、かなり含水率変動が大きい傾向を示した。また含水率 19%の日数が全体の日数の 2 割以上である箇所は、北側は 3 箇所、南側は 2 箇所、西側は 5 箇所であった。西側に多くなった原因としては、西側の CLT4 の板目面は広範囲で直接日光を受ける南側を向いているために他の方角と比較して温度上昇が大きくなることで、日変化が大きくなり、膨潤収縮量が大きくなった結果、ひび割れが増えて水分が流入しやすくなったのではないかと考える。

(C) 表面含水率計測結果

図 5.4-28 に北側 CLT、図 5.4-29 に南側 CLT、図 5.4-30 に西側 CLT の表面含水率計測結果を示す。すべてのグラフにおいて、同様のタイミングで含水率上昇、下降する傾向が見られた。また、大きく上昇している箇所については、どの方角においても同様の傾向であったため、計測箇所による違いも確認された。このことから、表面含水率は方角の違いではなく、外部環境の影響、計測箇所による影響が大きいことが確認された。

内部含水率では含水率 19%以上の状態が全体の日数の 2 割以上であった箇所は、表面含水率を計測した箇所においては N4-③-d3 (含 17)、S3-①-c2 (含 24)、W4-③-d3 (含 61)、W4-①-d3 (含 57)、W4-③-a3 (含 59) の 5 か所であった。それらの箇所の表面含水率は、含 17 は高い値を示しているものの、その他の箇所では高い含水率は見られなかった。このことから、表面含水率の変動は前述のように外部環境の影響を受けやすく、変化も素早いと思われる。内部含水率の場合には、一度上がると下がりにくく、変化の仕方が異なることが確認された。



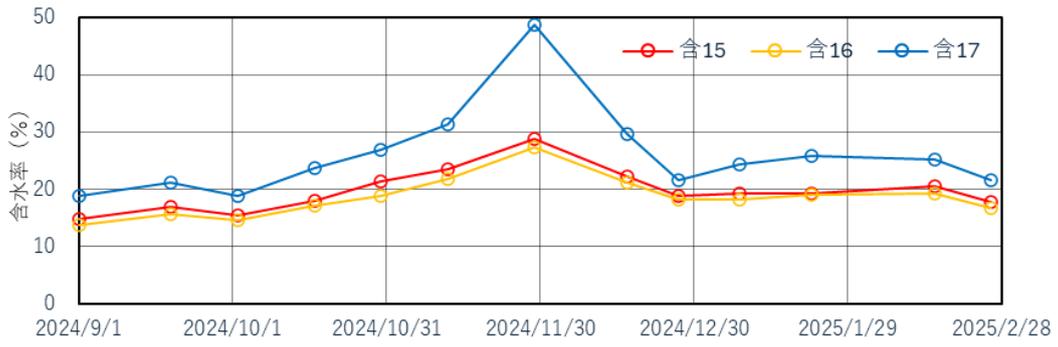
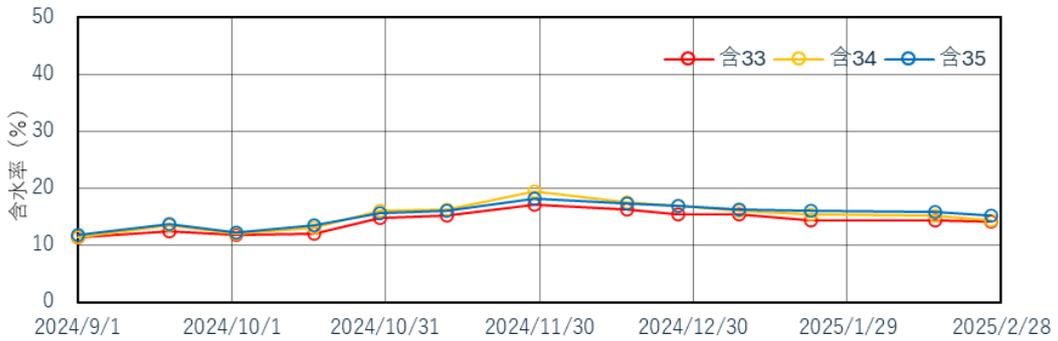
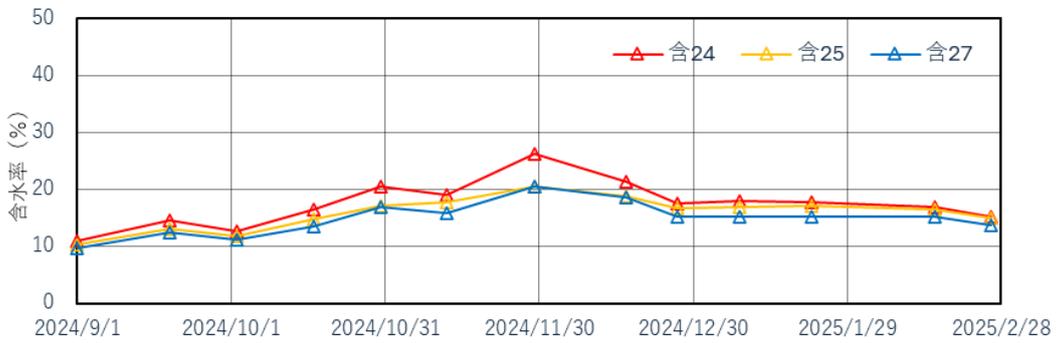
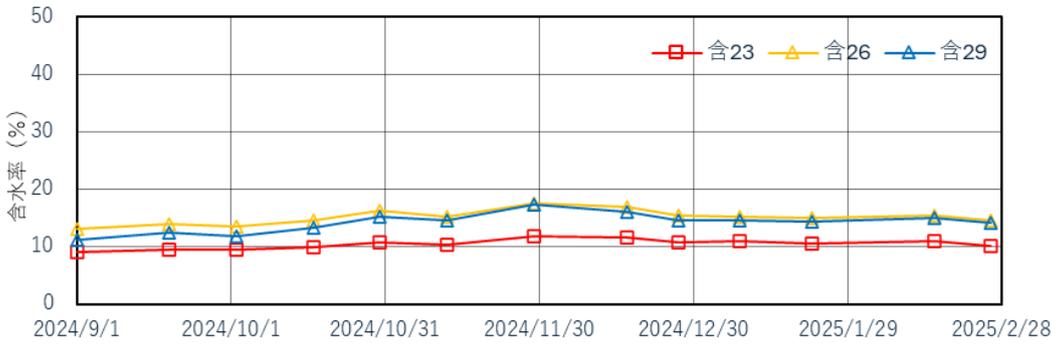


圖 5.4-28 北側 CLT 表面含水率計測結果



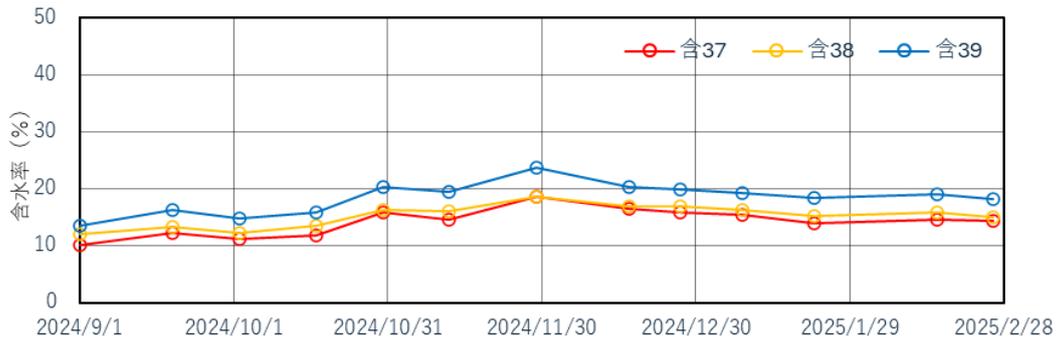
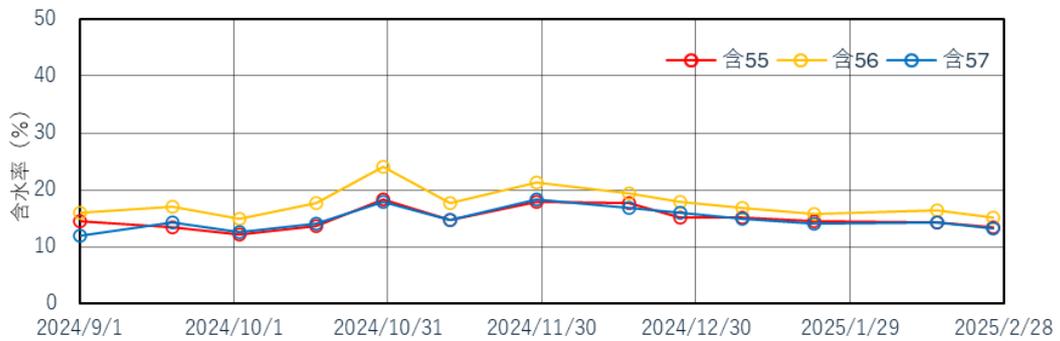
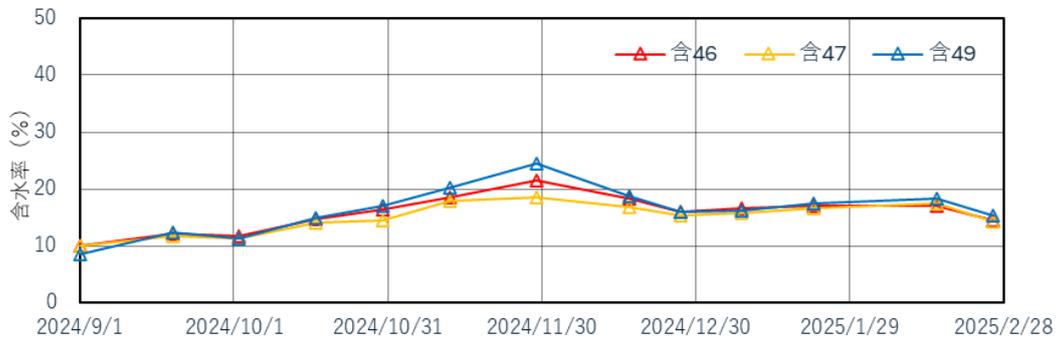
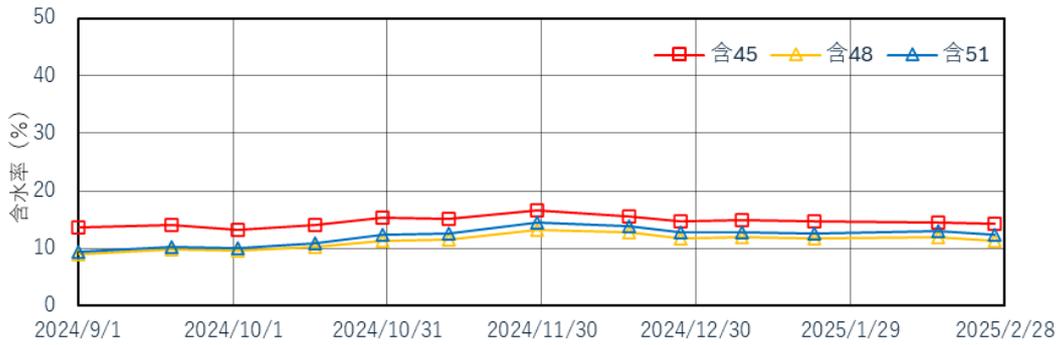


図 5.4-29 南側 CLT 表面含水率計測結果



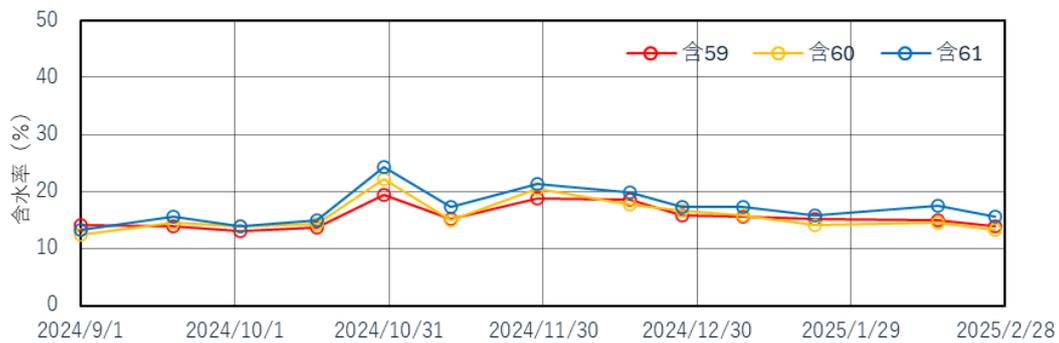


図 5.4-30 西側 CLT 表面含水率計測結果

(D) まとめ

含水率の計測による全体を総括して、以下のことがわかった。

全ての方角の試験体において CLT3、CLT4 の下部では他の箇所と比べて大きな含水率上昇が見られ、これらの箇所は全て CLT 下端から 200mm に位置していたことから、雨のはね返りや CLT の下にある H 形鋼に水が滞留したことで含水率が上昇した可能性が示唆された。CLT4 の 3 層目は、CLT2、CLT3、CLT4 の 2 層目と比べて含水率変動が大きい傾向を示し、CLT4 の 3 層目が最も外部環境に近いこと外気の影響を大きく受けているからだと考えられる。また CLT4 の 2 層目では、木口付近の計測箇所において含水率が高い値を計測しており、2 層目のラミナの繊維方向は地面と平行で木口からの距離も近かったために木口からの水分流入により上昇したと考えられるため、下部の直交層についても木口については注意が必要であると考え。また、割れや節からの水分の流入と思われる含水率の変動も見られたため、健全性の確保のためには表面の観察も重要であると考え。全体的に CLT 下部かつ木口付近の計測箇所は 3 ヶ月目から徐々に含水率が上昇しており、今回のように水が滞留する H 形鋼などに接触するように設置すると木口付近の材料はかなり高含水率の状態となり、劣化のリスクが高い状態となることが確認された。

方角による比較では、北側と南側はほぼ同様の傾向を示したが、西側の特に CLT4 では他の 2 つの方角と比較すると、かなり含水率変動が大きい傾向を示した。西側の CLT4 で高い含水率を示した原因としては、本 CLT の板目面は広範囲で直接日光を受ける南側を向いていることで他の方角と比較して温度の上昇と日変化が大きくなり、膨潤収縮量が大きくなった結果、ひび割れが増えて水分が流入しやすくなったのではないかと考える。

表面含水率については、同様のタイミングで含水率上昇、下降する傾向が見られた。また、大きく上昇している箇所については、どの方角においても同様の傾向であったため、計測箇所による違いも確認された。このことから、表面含水率は方角の違いではなく、外部環境の影響、計測箇所による影響が大きいことが確認された。

最後に、本試験によって、木材の状態確認の一つの手段と考える含水率の状況が、木口からの距離や、地面や水分滞留物からの距離、方角、割れや節、などが影響を与えることが確認された。これらと同様なデータの蓄積が進むことで、材料の評価方法の検討、評価

基準についての議論が、進められていくことを望む。

6) CLT をリユースする際の検査方法の検討

(1) 屋内環境下で用いられる CLT のリユースの可否に関する考え方について

屋内環境において使用される CLT については、原則、水分の作用や紫外線の作用などの顕著な劣化外力が作用しないので、CLT には劣化が生じにくいと考えられる。一方で希に発生する給排水管や開口部まわりの漏水や結露などによって、CLT に劣化が生じることがある。また、過度の乾燥により、CLT を構成する挽板が乾燥収縮し、材に割れが生じたり、接着層近傍において木材に割れが生じたりする場合もある。このような希に生じる水掛りや過度の乾燥によって CLT に生じた劣化や変形などを確認した上で、材の状態に適したリユースの方法を検討することが重要である。

CLT に生じた劣化や変形などを確認する方法としては、まずは目視により確認するのが適当と考えられる。目視により、CLT に水分が作用した痕跡がないか、また、著しい変形が生じていないかなどを確認する。万が一、水分が作用した痕跡（水染みなど）がある場合には、触診し、濡れているかどうかを確認するとともに、材の含水率を測定する。触ってみて材が乾いており、また、含水率が 20%程度以下であれば、リユースする時点では材は、ほぼ乾燥していると考えて良いので、リユース材として使用してもほぼ差し支えないと考えられる。一方、含水率が 25%程度以上であり、特に高い場合には、材が濡れた状態が長く続いている可能性があるため、生物劣化の有無を確認することが重要となる。材を触ってみて柔らかくなっている、材が白色あるいは褐色に変色して変形している場合には、生物劣化が生じている可能性が高いため、ピロディンなどの機器を使って腐朽の有無と程度を確認する必要がある。また、腐朽が生じている場合は、その範囲を特定し、CLT をリユースする際には、劣化している部分は用いないようにするのが良い。

一方、過度の乾燥により CLT に生じた変形については、その変形によって、接着層に著しい剥離や接着層近傍の材に著しい割れが生じている場合には、リユースの用途などについて考慮する必要がある。一般に、材に生じる軽微な乾燥割れは材の力学的な性状にはほとんど影響を与えないと考えて良い。

屋内環境下で使用される CLT については、屋外で用いられる場合に比べると劣化が生じるリスクはきわめて少ないと考えられるが、予期せぬ水分の作用と滞留、または、過乾燥によって、材に劣化や変形が生じていないかを確認することが重要となる。

(2) 屋外環境下で用いられる CLT のリユースの可否に関する考え方について

屋外環境下で用いられる CLT については、雨掛りとなったり、紫外線が作用したりするため、材には相当程度の劣化外力が作用する。この劣化外力の作用により、程度の差はあ

れ、CLTには変形または劣化、あるいはその両方が生じる。

屋外環境下で用いられたCLTのリユースの可否に関する考え方は、屋内環境下で用いられたCLTのリユースの可否を判断する考え方と基本的には同じとなる。一方で、屋外環境下で使用されるCLTについては、その使い方、すなわち耐久設計の良否によって作用する劣化外力の程度が異なる。例えば、屋外現しとする外壁について、軒の出などが大きくとられており雨掛りとならない場合と、軒の出がなく雨掛りとなる場合では、CLTに作用する劣化外力は大きく異なる。また、CLTはすべての断面（側面）に木材の木口面が現れるが、木材の木口面は木材の他の面よりも水分が吸水されやすい。CLTに限らず木材の木口面が上を向き、雨を受ける状態になっている場合には、木材は劣化しやすくなる。木材の木口面に限らず、雨を受ける材の上面の部分には、板金や笠木などを設けて雨水が直接当たらないようにする、あるいは、傾斜を設けて雨水が滞留しないようにすることが重要となる。見方を替えると、材の上面となる部分に前述のような対策が講じられていない場合には、CLTに限らず木質材料全般について、その部材をリユースするにあたっては慎重に検査を行うことが重要となる。

（3） CLTのリユースの可否の判断

CLTのリユースの可否の判断は、概ね以下による。なお、大阪・関西万博の日本館に用いられるCLTについては、リユースを行う際に、（一社）日本CLT協会が作成した「再利用CLT（直交集成板）のJASに規定する品質に係る確認の手引き」¹⁾にその品質を確認する方法が示されている。

- ① 目視により材の状態を確認する。
- ② ①の目視確認により材（または材の一部）に変形や変色が生じている場合には、その材（または材の一部）を触診し、材の状態を確認するとともに、含水率計やピロディンなどの機器を用いた計測により、材（または材の一部）についてその状態を確認する。
- ③ ②により含水率が著しく高い（例えば、繊維飽和点以上）場合や材が柔らかくなっている場合、または、材が著しく変形している場合には、その材（または材の一部）については、リユースを行うことが難しいという前提でその材（または材の一部）についてその扱いを検討する。
- ④ ③の検討を行うにあつて、材の一部にのみ劣化や著しい変形が生じている場合には、劣化や変形が生じている部分（範囲）を特定し、当該部分を取り除いてリユースすることを検討する。

7) まとめ

(1) 屋内環境における長期載荷試験について

屋内環境において約 6 ヶ月間、CLT に長期許容応力度相当の荷重を載荷し、6 ヶ月間荷重を載荷した CLT (以下、「載荷有の CLT」と呼ぶ) と荷重を載荷していない CLT (以下、「無載荷の CLT」と呼ぶ) について、以下の各特性値の比較を行った。

- ① 面外曲げ強度／弾性係数
- ② 面内曲げ強度／弾性係数
- ③ 面外せん断強度
- ④ 面内せん断強度
- ⑤ 圧縮（座屈）強度

いずれの特性値についても、載荷有の CLT の特性値が無載荷の CLT の特性値よりも小さくなる結果は得られなかった。このことから、屋内環境下で用いられる CLT について、約 6 ヶ月間、長期許容応力度相当の荷重を載荷しても、強度や弾性係数が低下することはないと言える。

(2) 屋外環境における長期曝露試験について

大阪・関西万博の日本館を再現したモックアップを製作し、約 6 ヶ月間屋外に曝露し、曝露期間中と曝露後の CLT の状態について目視により確認した。また、6 ヶ月の曝露期間中に定期的に CLT の含水率を測定するとともに、材表面の変色の程度を測定した。

曝露期間中の CLT の含水率については、雨が降った後の令和 6 (2024) 年 11 月 30 日の測定時に含水率が高く測定されたが、その後、含水率は低下し、曝露終了直前の令和 7 (2025) 年 2 月 28 日の測定時にはいずれの測定点についても含水率はほぼ 20%以下となっていた。このことから、雨掛りとなって CLT に水分が作用しても、水分が滞留する状態になれば、一時的に含水率が高くなっても、時間経過とともに材は乾燥するものと考えられる。なお、含水率の測定点のうち、1 か所については含水率が約 50%に達する点があった。この測定点は、CLT に欠き込みが設けられている部分の直下を測定している点であり、欠き込み部分から雨水が CLT 内に入り、含水率が高くなったものと推察される。ただし、この箇所についても令和 6 (2024) 年 12 月 20 日以降は含水率がほぼ 25%以下となっている。

目視による CLT の状態については、曝露開始の比較的早い段階から、材表面の色の変化（黒色に変化）が見られ、黒カビの発生などがその一因と考えられる。また、前述の欠き込みを設けた部分の近傍については、CLT に比較的大きな割れが生じていた。黒色の変色（黒カビの発生と思われる）については、すべての箇所について確認は行っていないが、サンダーにより表面を 0.2~0.5mm 程度研磨することによりほぼ削り取ることができ、材の表面のみが黒色に変色（黒カビの発生と思われる）していると考えられる。一方、欠き込みを設けた部分の近傍の CLT の割れについては、欠き込んだ部分の上面が雨水を受ける面

となり、さらにその面において雨水が滞留し、CLT を構成する挽板の木口面から材に雨水が浸潤したものと考えられる。欠き込み部分については、上面に笠木を設けて雨水の作用を軽減するか、少なくとも勾配を設けて雨水の滞留を軽減する設計上の対策が重要となる。

一方、下部の鉄骨の架台に接する CLT の下面は触診すると濡れていた。雨水が滞留しているか、あるいは、鉄骨の架台が結露して、架台と接する CLT が濡れていたものと考えられる。CLT 自体には生物劣化は看取されなかったが、同じ状況が長期間続くと腐朽のリスクが高くなるので、前述の欠き込み部分と合わせて、リユースを行う際には良く観察することが重要と思われる。

モックアップに用いた CLT の状態は総じて論ずると、生物劣化などの致命的な劣化はなかったと言える。これは、CLT が立った状態にあり、雨水が溜まる部分が少なかったことにも一因するものと考えられる。令和 5 (2023) 年度事業で実施した、屋外での長期荷重載荷試験に供した CLT (平置き) の状態に比べると、モックアップに用いた CLT は健全な状態にあった。

(3) CLT のリユースの可否を判断するための検査方法について

大阪・関西万博の日本館に用いられる CLT のリユースの可否の判断は概ね以下の方法により行うと良い。

- ① 「再利用 CLT (直交集成板) の JAS に規定する品質に係る確認の手引き」¹⁾ に則りその品質を確認する。
- ② 目視により材の状態を確認する。
- ③ ②の目視確認により材 (または材の一部) に変形や変色が生じている場合には、その材 (または材の一部) を触診し、材の状態を確認するとともに、含水率計やピロディンなどの機器を用いた計測により、材 (または材の一部) についてその状態を確認する。
- ④ 接着部分に劣化または変形が確認でき、挽き板どうしの接着性能が落ちている可能性があるが、目視の結果のみからは判断できない場合には、当該接着部分について接着層に対するせん断試験を行う。
- ⑤ ③により含水率が著しく高い (例えば、繊維飽和点以上) 場合や材が柔らかくなっている場合、または、材が著しく変形している場合には、その材 (または材の一部) については、リユースを行うことが難しいという前提でその材 (または材の一部) についてその扱いを検討する。
- ⑥ ⑤の検討を行うにあって、材の一部にのみ劣化や著しい変形が生じている場合には、劣化や変形が生じている部分 (範囲) を特定し、当該部分を取り除いてリユースすることを検討する。

なお、リユースには様々な方法がある。構造材としてリユースするのと、造作材としてリユースするのでは、材に必要とされる性能や品質は異なる。材の状態を見極めて、合理

的なリユースの方法を検討することが重要となる。

(4) リユースに関する今後の課題について

CLT をリユースする上での今後の課題には、大きく技術的な課題と仕組上の課題の2つがあると考えられる。

前者の技術的な課題としては、リユースに供する CLT の品質や性能を把握するための技術や知見を整備することが挙げられる。構造材としてリユースしようとする場合にどのような品質と性能が担保されている必要があり、必要とされる品質と性能をどのような方法により確認するかについて、技術的根拠に基づく合理的な解を示すことが重要となる。また、非構造材として用いる場合についても、リユースされる用途に応じて、必要とされる品質と性能を明らかにし、それを確認する方法を示す必要がある。このような技術的な課題に対する答えは、短期間で得られるものではなく、様々な取組によって得られた知見の蓄積により導かれるものである。本事業により得られた成果（知見）は、技術的な課題に対する答え導くための一つの知見として有用なものであったと考えられる。

後者の仕組上の課題としては、制度や市場を整備することが今後の課題と考えられる。制度に関しては、リユース材を新規の材料と同じように障壁なく使えるようにするための規格や基準等の整備が必要と考えられる。また、市場については、北米・欧州・豪州などによりリユース建材の市場を構築し、建材をリユースすることが特別なことではなく、日常的なこととなる環境を整備することが重要となる。なお、仕組上の課題についても、技術的な課題と同様に、その醸成にはそれなりの時間を要する。

建材のリユースに対する取組が、日本政府館に用いられる CLT をリユースするという一過性のもので終わるのではなく、継続的な取組を行っていくことが肝要である。

文献：

- 1) 再利用 CLT（直交集成板）の JAS に規定する品質に係る確認の手引き，一般社団法人日本 CLT 協会，2024.