

中大規模の木造建築における木質耐火部材の開発 —CLT 壁の耐火性能に関する大臣認定取得—

三宅朗彦 * 松岡直人 * 金森誠治 ** 清水峻 **

近年、木造建築に関連する法令の整備等を背景に中大規模の木造建築が実現しやすくなっている。筆者らは、中大規模の木造建築での使用を想定し、木材に普通硬質せっこうボードと断熱耐火パネルを被覆することによって、燃え止まり層が薄く、かつ表面仕上げ材の選択自由度の高い木質耐火部材（柱、梁、壁、床）の開発を進めている。本報では、そのうちのCLT壁に関して耐火に関する性能評価試験を行い、所定の耐火性能を確認し、国土交通大臣認定を取得したため、その開発内容について報告する。

キーワード：木造建築、木質耐火部材、CLT、燃え止まり層、大臣認定

1. はじめに

2010年の公共建築物等における木材の利用の促進に関する法律¹⁾の施行や、1992年、2000年以降の建築基準法の改正などを受け、近年、中大規模建築物において木造が選択しやすくなっており、5階建ての庁舎や10階建ての集合住宅など、木造および一部に木造を用いた混構造で設計、建設されている事例も増えてきている。

一方、中大規模の木造建築を実現させるための障壁のひとつとして、防・耐火性能がある。現在、Fig.1のように、建築基準法では、立地、規模、用途によって建築物や部材に対して一定水準の防・耐火性能が要求されている。一般に、4階建て以上の建物や不特定多数の人が利用する3階建て以上の建物などにおいては、耐火建築物としなければいけない。耐火建築物の主要構造部（本報で扱う「壁」とは、防・耐火性能上の「耐力壁」すなわち、常時の鉛直力を負担する壁のことを指す。）にはFig.2のような耐火性能が要求されるため、中大規模の建築物を設計するためにはこれらの耐火性能を満足した部材を使う必要がある。

このような背景を受け、現在住宅メーカーやゼネコン等を中心に、木質耐火部材の技術開発が行われている。しかし、現時点では2時間以上の耐火性能を満足した例は少なく、3時間の柱と梁の耐火性能の国土交通大臣認定を取得した例はごくわずかしかない。筆者らは、すべての耐火建築物に適用できるような耐火性能を目標として、木材に燃え止まり層として普通硬質せっこうボード、断熱耐火パネル、表面仕上げ材を被覆した木質耐火部材の開発を進めている。集成材に燃え止まり層を被覆することで、柱と梁のそれぞれ1時間、2時間、3時間の耐火性能を、直交集成板（以下、CLT）に燃え止まり層を被覆することで、床と壁のそれぞれ1時間、2時間の耐火性能を満

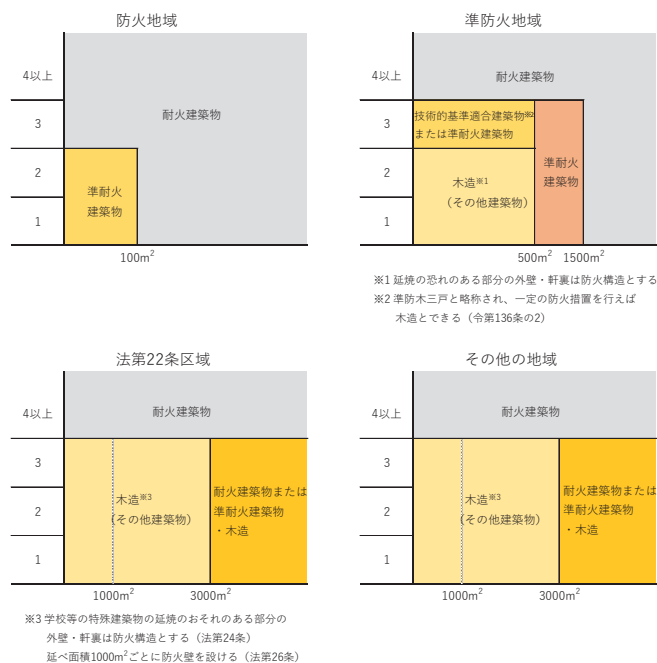


Fig.1 立地と規模による構造制限

建築物の階	建築物の部位			
	柱	梁	床	壁
最上階から	1時間	1時間	2時間	2時間
2				
3				
4				
5	2時間	2時間	2時間	2時間
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13				
14				
15	3時間	2時間	2時間	2時間
16				

※階段、屋根は全階30分

Fig.2 耐火建築物の主要構造部に要求される耐火性能

* 技術本部 新技術創造センター 開発第3グループ
 ** 技術本部 技術研究所 基盤技術研究室

足するような部材を開発し、国土交通大臣認定の取得を目標としている。

本報では、開発中の木質耐火部材の概要と、すでに大臣認定を取得した CLT 壁の 1 時間と 2 時間の耐火試験の試験内容を報告する。

2. 木質耐火部材の概要

建築基準法第 2 条第七号における耐火構造の耐火性能に関する技術的基準は施行令第 4 章第 107 条に示されており、簡単に言い換えると以下の 3 つの性能が掲げられている。

- ・非損傷性：構造耐力上支障のある変形，溶融，破壊その他の損傷を生じないこと
- ・遮熱性：非加熱面の温度が一定以上に上昇しないこと
- ・遮炎性：非加熱面に火炎を出す原因となる亀裂等の損傷を生じないこと

つまり、耐火建築物の主要構造部は、Fig. 2 に示すような所定の時間の火熱が加えられた際、非損傷性、遮熱性、遮炎性を満足し、かつ告示等の構造方法に定められているものか、国土交通大臣認定を受けたものである必要がある。一方、国土交通省の告示²⁾では主要構造部の耐火仕様が示されているが、木造に関しては 1 時間の耐火性能のものまでしかないので、適用できる建築物の範囲が限定されている。そこで筆者らは、すべての耐火建築物に適用できる木質耐火部材の開発を進めている。

技術的、コスト的検討の結果、筆者らは Fig. 3 のように木材の荷重支持部（芯材）に普通硬質せっこうボード、断熱耐火パネル、表面仕上げ材を燃え止まり層として被覆する木質耐火部材を考案した。荷重支持部は、柱と梁の場合は構造用集成材、床と壁の場合は CLT としている。表面仕上げ材は、20mm 以下の木材（樹種の指定なし）、アクリル樹脂系フィルム、塩ビ系フィルム、壁紙、有機塗料、普通硬質せっこうボードの素地仕上げのいずれとしてもよいこととし、表面仕上げ材の選択の自由度を高くすることで実際の建築物に使いやすい仕様とした。

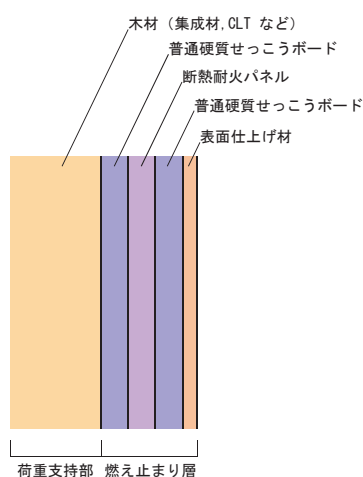


Fig. 3 木質耐火部材の概略図

3. CLT 壁の性能評価試験

3. 1 大臣認定に係る性能評価方法

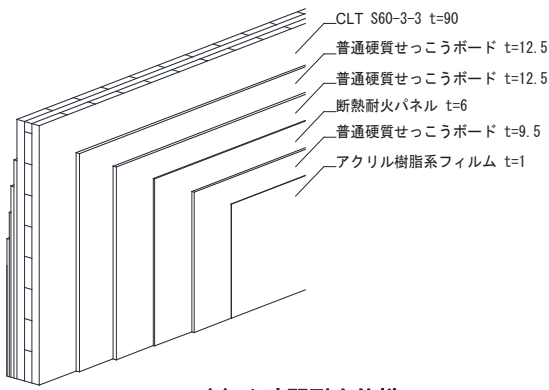
木造の壁の大臣認定に係る性能評価のための判定基準は、前章で記述した非損傷性、遮熱性、遮炎性をもとにした 6 つの基準をすべての試験体が満たし、かつ荷重支持部に炭化が見られないことである。壁の試験体の個数は原則として加熱面ごとに 2 体とするが、断面構成が対称の壁については片面の試験とすることができる。なお、荷重支持部の炭化については、荷重支持部の木材が一度炭化すると炭化がどこで止まるかを定量的に評価できていないことから、現在では試験により荷重支持部の木材が炭化しないことをもって耐火構造として認定されている³⁾。以下に性能評価のための判定基準を示す。

- (1) 最大軸方向収縮量が規定値 ($h/100$: mm) 以下であること
 - (2) 最大軸方向収縮速度が規定値 ($3h/1,000$: mm/分) 以下であること
 - (3) 加熱中の試験体の裏面温度上昇が規定値（平均で 140K, 最高で 180K）以下であること
 - (4) 非加熱側へ 10 秒を超えて継続する火炎の噴出がないこと
 - (5) 非加熱面で 10 秒を超えて継続する発炎がないこと
 - (6) 火炎が通る亀裂等の損傷及び隙間の発生がないこと
- ここで、 h ：試験体の初期高さ (mm)。

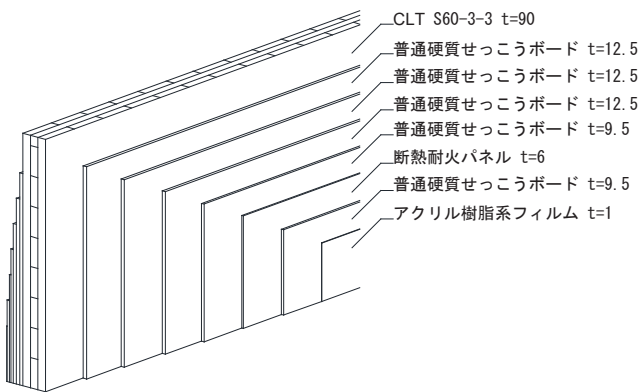
3. 2 試験体

試験体仕様を Fig. 4 に示す。試験体寸法は試験機の都合上見附幅 3,000mm、高さ 3,100mm とし、荷重支持部には JAS 規格に適合したスギの同一等級構成 S-60 の直交集成板の 3 層 3 プライ ($t=90\text{mm}$) を用いた。1 時間の燃え止まり層は、Fig. 4(a) のように、普通硬質せっこうボード 3 枚 ($t=12.5\text{mm} \times 2$ 枚, $t=9.5\text{mm} \times 1$ 枚)、断熱耐火パネル 1 枚 ($t=6\text{mm}$)、アクリル樹脂系フィルム ($t=1\text{mm}$) を組み合わせたものとした。2 時間の燃え止まり層は、Fig. 4(b) のように、普通硬質せっこうボード 5 枚 ($t=12.5\text{mm} \times 3$ 枚, $t=9.5\text{mm} \times 2$ 枚)、断熱耐火パネル 1 枚 ($t=6\text{mm}$)、アクリル樹脂系フィルム ($t=1\text{mm}$) を組み合わせたものとした。1 時間耐火仕様、2 時間耐火仕様ともに燃え止まり層の表面側の普通硬質せっこうボード ($t=9.5\text{mm}$) の内層に断熱耐火パネル ($t=6\text{mm}$) を積層することで、それより内側の普通硬質せっこうボードが結晶水を失い無水せっこうになり、脆弱化して壁面から燃え落ちるのを防ぐ効果に期待した。

表面仕上げ材については木材を除いて総発熱量最大のアクリル樹脂系フィルム ($t=1\text{mm}$) を試験することで、最も危険側の状態を再現し、他の材料の安全性を担保した。木材については、20mm 以下を開発仕様としており、20mm 以下であれば 1 時間で十分燃えつきると判断できるため、



(a) 1時間耐火仕様



(b) 2時間耐火仕様

Fig. 4 試験体仕様 (単位 : mm)

Table 1 試験体緒元

構成材料	厚み [mm]	1時間耐火仕様 (1h-1, 1h-2)		2時間耐火仕様 (2h-1, 2h-2)	
		密度 [g/cm ³]	含水率 [%]	密度 [g/cm ³]	含水率 [%]
CLT	90	0.38	9.4	0.40	10.1
普通硬質せっこうボード	12.5	1.18	0.2	1.19	0.3
普通硬質せっこうボード	9.5	1.17	0.2	1.16	0
断熱耐火パネル	6.0	0.81	1.1	0.77	1.0
アクリル樹脂系フィルム	0.2	1140*	-	1170*	-

*: 面密度 [g/m²]

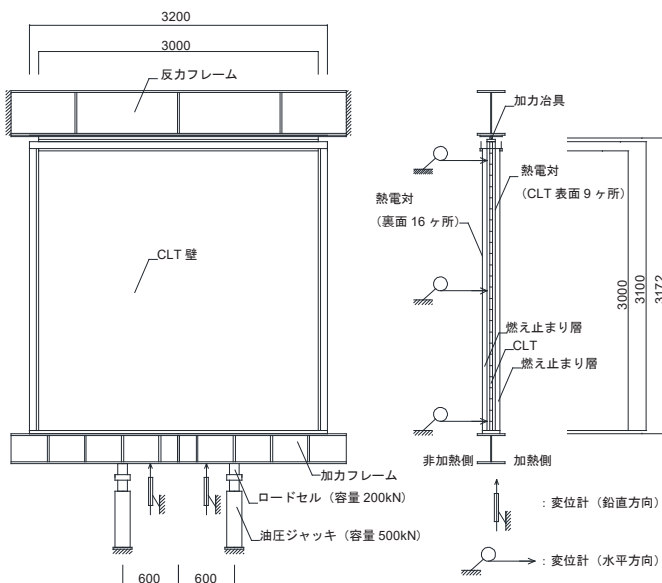


Fig. 5 試験概略図 (単位 : mm)

アクリル樹脂系フィルムより安全側であるとしている。

試験体数は、試験体が対称の構造であるため片面加熱とし、1時間耐火仕様、2時間耐火仕様ともに2体ずつとした。試験体名は1時間耐火仕様を1h-1, 1h-2, 2時間耐火仕様を2h-1, 2h-2とした。試験体の緒元をTable 1に示す。

3. 3 試験方法

CLT壁の性能評価試験の概略図をFig. 5に示す。試験方法は一般財団法人建材試験センターの「防耐火性能試験・評価業務方法書」⁴⁾に準拠した。なお、「防耐火性能試験・評価業務方法書」は建築基準法第2条第七号に基づいたものである。

性能評価試験は、載荷加熱試験とし、壁に一定の荷重を試験体下方から油圧ジャッキにより加えながら、所定の時間(1時間耐火仕様の場合60分、2時間耐火仕様の場合120分)において炉内のバーナーにより一面加熱を行った。

載荷条件は、CLTの圧縮座屈の長期許容応力度に相当する応力度が生じるように試験荷重を設定した。以下に試験荷重の計算式(1), (2), (3)を示す。

$$\lambda = \frac{l_k}{i} = \frac{3100}{\frac{90}{\sqrt{12}}} = 119.3 \quad \text{式 (1)}$$

$$f_k = \frac{1.1}{3} \times \frac{3000}{\lambda^2} \times F_c \quad (\lambda > 100 \text{ の場合}) \\ = \frac{1.1}{3} \times \frac{3000}{119.3^2} \times 10.8 = 0.83 \quad \text{式 (2)}$$

$$P = f_k \times A_0 \\ = 0.83 \times 90 \times 998 \times 3 \times \frac{1}{1000} = 225 \quad \text{式 (3)}$$

ここで、 λ : 有効細長比, l_k : 座屈長さ (mm), i : 断面二次半径 (mm), f_k : 座屈許容応力度 (N/mm²), F_c : 圧縮強度 (N/mm²), P : 試験荷重 (kN), A_0 : 断面積 (mm²) .

また、加熱条件は、ISO834に準拠し、炉内熱電対によって測定した温度の時間経過が、許容誤差内で式(4)に表される数値となるよう調整した。

$$T = 345 \log_{10}(8t + 1) + 20 \quad \text{式 (4)}$$

ここで、 T : 平均炉内温度 (°C), t : 試験の経過時間 (分). 加熱終了後、試験体の温度が十分下がり、火災等の残存がなく、それ以上温度上昇が見込まれないことを確認してから試験体を脱炉した。

Fig. 5のように変位計により試験体の面外方向の水平変位と鉛直方向変位を測定し、CLTの加熱側表面に9ヶ所、試験体の非加熱側に16ヶ所熱電対を貼り、それぞれCLT表面の温度と裏面温度を測定した。

3. 4 結果と考察

Table 2にCLT壁の性能評価試験における判定結果を示す。性能評価試験の結果より、本研究により開発したCLT壁は判定基準を満足し、十分な耐火性能を有していることを確認した。温度および変形の計測結果をFig. 6に、試験前後の試験体の写真をPhoto. 1, 2に示す。

Table 2 性能評価試験判定結果

判定基準	1時間耐火仕様		2時間耐火仕様	
	1h-1	1h-2	2h-1	2h-2
荷重支持部の炭化の有無	なし	なし	なし	なし
(1) 最大軸方向収縮量 [mm] (規定値)	0.8 (31.0)	0.9 (31.0)	0.9 (31.0)	0.9 (31.0)
(2) 最大軸方向収縮速度 [mm/分] (規定値)	0.1未満 (9.3)	0.1未満 (9.3)	0.1未満 (9.3)	0.1未満 (9.3)
(3) 裏面温度上昇 [K] (規定値)	平均 11 (140)	13 (140)	11 (140)	9 (140)
	最高 28 (180)	24 (180)	36 (180)	22 (180)
(4) 非加熱側へ10秒を超えて継続する 火炎の噴出の有無	なし	なし	なし	なし
(5) 非加熱面で10秒を超えて継続する 発炎の有無	なし	なし	なし	なし
(6) 火炎が通る亀裂等の損傷の有無	なし	なし	なし	なし

3. 4. 1 非損傷性について

Photo. 1(c), 2(c)より、試験後に CLT 壁の荷重支持部に炭化や損傷は見られなかったため加熱による荷重支持部の断面欠損がなかったといえる。一般に、木材の着火危険温度は 250℃程度とされているが、Fig. 6(b)より CLT の表面温度は 1 時間仕様、2 時間仕様ともに最高でも 120℃程度を示しており、十分安全な性能を有しているといえる。また、Fig. 6(b)の温度測定結果はいずれも 100℃付近で温度上昇が停滞しており、普通硬質せっこうボードの結晶水が水蒸気となり放出される効果により温度上昇を抑えていると考えられる。また、Photo. 1(b), 2(b)および Photo. 3より、表面側の普通硬質せっこうボード (t=9.5mm) は一部壁面から燃え落ちているが、その内層の断熱耐火

パネル (t=6mm) は壁体に保持されていることが分かる。断熱耐火パネルが燃え抜けにくく、内層側の普通硬質せっこうボードが壁面から燃え落ちるのを保護していたため、普通硬質せっこうボードの耐火性能を最大限に引き出していたと考えられる。以上のことより、本仕様に用いた普通硬質せっこうボードと断熱耐火パネルの組み合わせが耐火性能上有効であることが分かった。

また、Fig. 6(d), (e)をみると、载荷による変形量およ

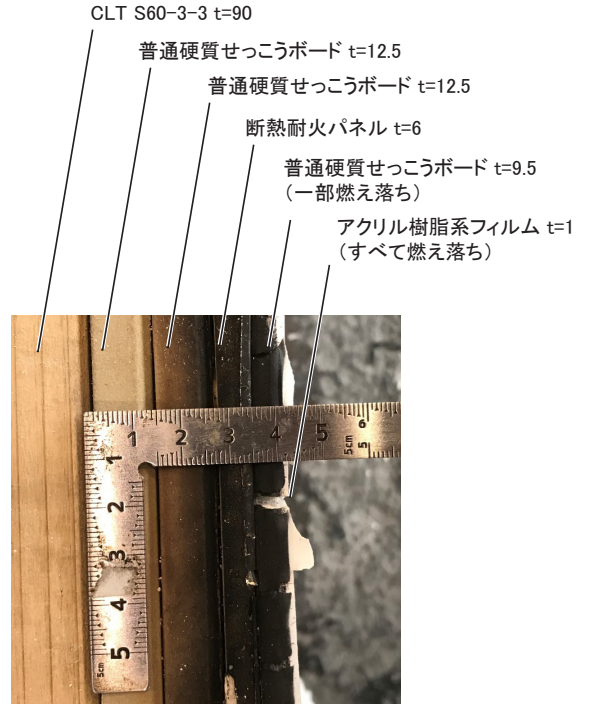
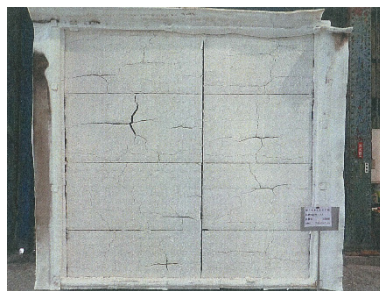


Photo. 3 試験後の燃え止まり層断面



(a) 試験前 (加熱側)



(b) 試験後 (加熱側)

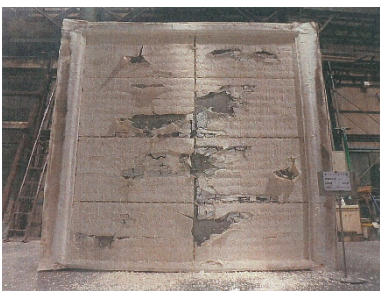


(c) 試験後の CLT 表面 (加熱側)

Photo. 1 試験前後の試験体の状況 (1h-1)



(a) 試験前 (加熱側)



(b) 試験後 (加熱側)



(c) 試験後の CLT 表面 (加熱側)

Photo. 2 試験前後の試験体の状況 (2h-1)

び速度は軸方向、面外方向ともに小さいことが分かった。軸方向の収縮量は規定値 31.0mm に対していずれの仕様も 0.8~0.9mm 程度であり、収縮速度は規定値 9.3mm/分に対していずれの仕様も 0.1mm/分未満であり、火災時にも十分な構造安定性を担保していることが確認できた。

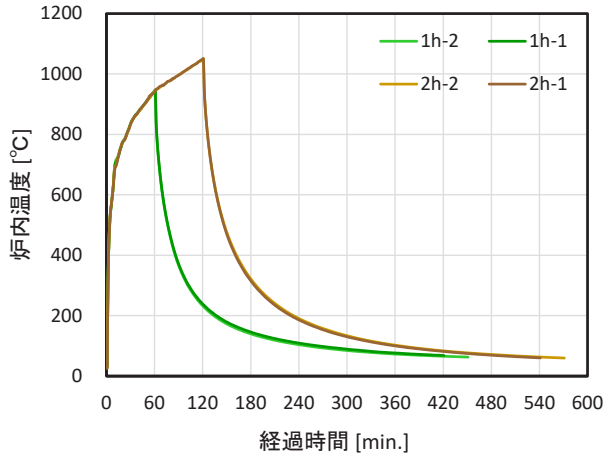
3. 4. 2 遮熱性について

Fig. 6(c)のように、非加熱側の温度上昇は、平均値で規定値 140K に対して 10K 程度、最高値で規定値 180K 対

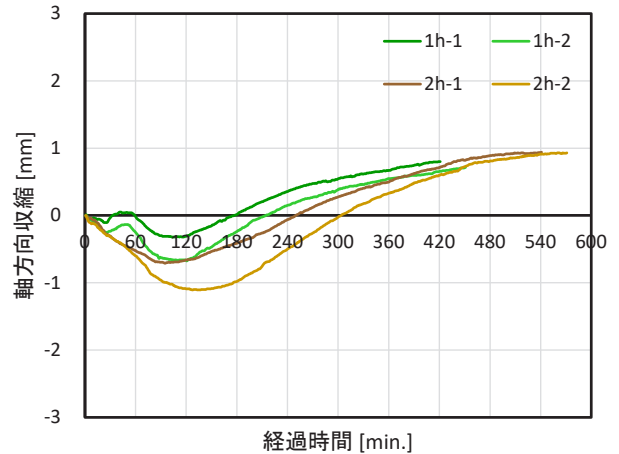
して 20~35K 程度を示しており、本仕様は十分遮熱性を担保できる構造であると考えられる。

3. 4. 3 遮炎性について

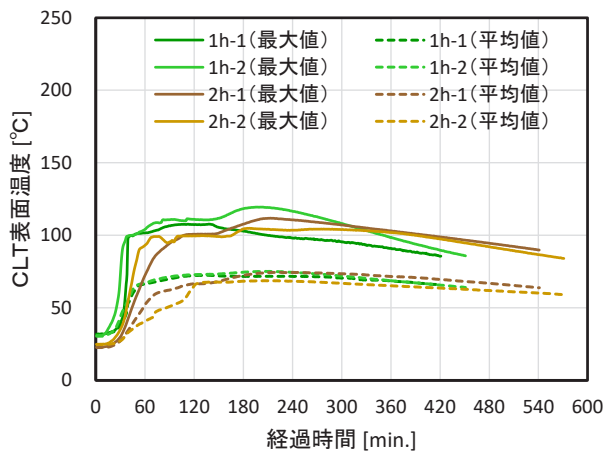
試験中および試験後においても非加熱側での火炎の噴出や発炎、火炎が通る亀裂等が発生しなかったため、本仕様の遮炎性は担保でき、本仕様は火災時にも十分火炎の突破を防ぐ能力を持っているといえる。



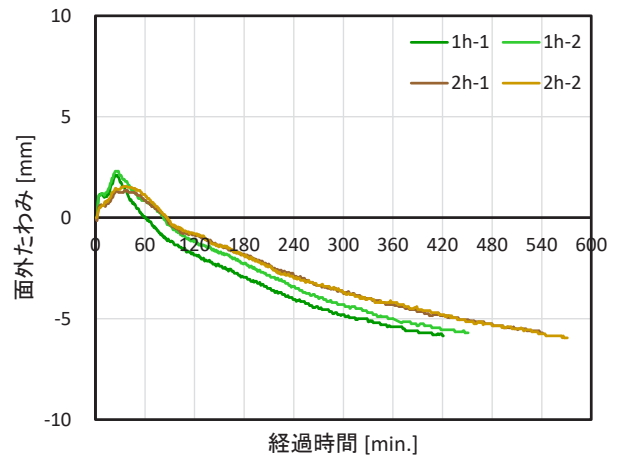
(a) 経過時間と炉内温度



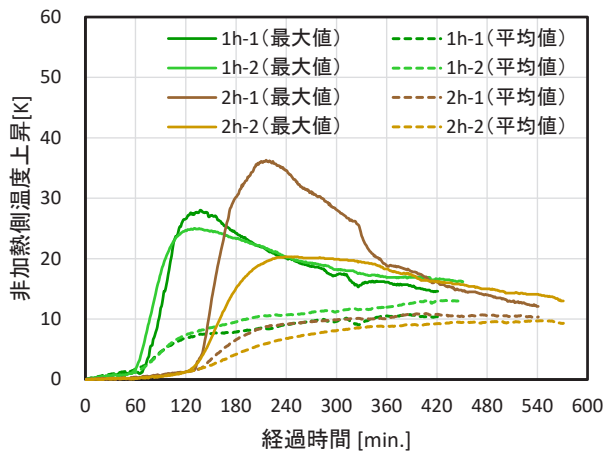
(d) 経過時間と軸方向収縮 (正: 収縮, 負: 膨張)



(b) 経過時間と CLT 表面温度



(e) 経過時間と面外たわみ



(c) 経過時間と非加熱側温度上昇

Fig.6 性能評価試験結果

4. まとめ

中大規模の木造建築物において、すべての耐火建築物に適用できるような耐火性能を目標とし、筆者らは燃え止まり層として普通硬質せっこうボード、断熱耐火パネル、表面仕上げ材を施した木質耐火部材の開発を進めている。本報では、CLT壁の1時間および2時間の耐火性能に関する大臣認定取得を目的とし、載荷加熱方式によりCLT壁の性能評価試験を実施した。試験の結果、開発したCLT壁は認定のための判定条件をすべて満たし、十分な非損傷性、遮熱性、遮炎性を有することを確認した。

今回行った壁の耐火性能確認と同様に、今後は本仕様を用いた柱、梁、床の耐火性能の確認および大臣認定の取得をする予定である。

参考文献

- 1) 平成22年10月1日 法律第36号：公共建築物等における木材の利用の促進に関する法律，2010.
- 2) 平成12年建設省告示第1399号：耐火構造の構造方法を定める件.
- 3) (一財)日本建築センター：木造建築物の防・耐火マニュアル—大規模木造を中心として—，p.91，2017.
- 4) (一財)建材試験センター：防耐火性能試験・評価業務方法書，pp.4-9，2000.

Development of Fire-Resistant Timber in Medium and Large-scale Wooden Architecture —Acquirement of Certification by the Minister of MLIT about Fire Resistance Performance of CLT Wall—

Akihiko MIYAKE, Naoto MATSUOKA, Seiji KANAMORI and Shun SHIMIZU

Abstract

In recent years, it has become easier to realize medium and large-scale wooden architecture against the background of legislation related to wooden architecture. Authors are developing fire-resistant timber: columns, beams, walls, and slabs with the aim of fire resistance performance that can be applied to all fireproof architecture, to be used in medium and large-scale wooden architecture. By coating timbers with hard plaster boards and fireproof insulating panels, authors have devised a unique fire resistance specification with a thin fire stoppage layer and the surface finishing materials chosen freely. Among them, fire resistance tests were conducted on CLT walls, the prescribed fire resistance performance was confirmed, and certification by the Minister of MLIT was obtained.

Key words: Wooden architecture, Fire-resistant timber, CLT, Fire stoppage layer, Certification by the minister
