

# 論文 CLT と鉄筋コンクリートで構成される壁の火災加熱時における耐火性能に関する実験的検討

森田 武\*1・上原 大輔\*2・奥山 孝之\*3

**要旨：**本検討では、厚さ 90mm の CLT (Cross Laminated Timber) を型枠兼仕上げ材として用い、2 枚の CLT の間に厚さ 120mm のコンクリートを充填した、CLT と鉄筋コンクリートで構成される壁を対象とした。当該壁は、壁の両面に CLT があり、CLT と鉄筋コンクリートを一体化するために通しボルトが使われている。そこで、CLT や通しボルトが壁の耐火性能や温度性状に及ぼす影響を把握することを目的として加熱実験を実施した。実験条件は、壁の片側からの 1 時間加熱および 2 時間加熱とし、試験体数は各条件につき 1 体とした。実験の結果、当該壁は 1 時間および 2 時間の耐火性能を有することが確認された。

**キーワード：**鉄筋コンクリート, CLT, 直交集成板, 壁, 火災, 耐火性能, 温度性状

## 1. はじめに

本検討では、CLT (Cross Laminated Timber, 直交集成板) を型枠兼仕上げ材として用い、2 枚の CLT の間に鉄筋を配してコンクリートを充填した、CLT と鉄筋コンクリートで構成される壁を対象とした。なお、CLT とは、ひき板 (ラミナ) を並べた後、繊維方向が直交するように積層接着した木質系材料であり、建築分野では構造材としても使われている。

当該壁は、壁の両面に可燃性材料である CLT が使われており、また、CLT と鉄筋コンクリートを一体化するために CLT と鉄筋コンクリートを貫通する通しボルトを使っている。火災時において、CLT は、断熱層となる反面、加熱時の燃焼や加熱後の赤熱燃焼が壁の温度性状に影響を与える可能性がある。また、通しボルトは、熱橋となって加熱側の温度を非加熱側に伝え、局部的に非加熱側の温度上昇を助長する可能性がある。

そこで、CLT と鉄筋コンクリートで構成される壁の耐火性能 (遮熱性および遮炎性) や温度性状を把握することを目的として、1 時間および 2 時間の耐火性能を想定した壁の加熱実験を実施した。

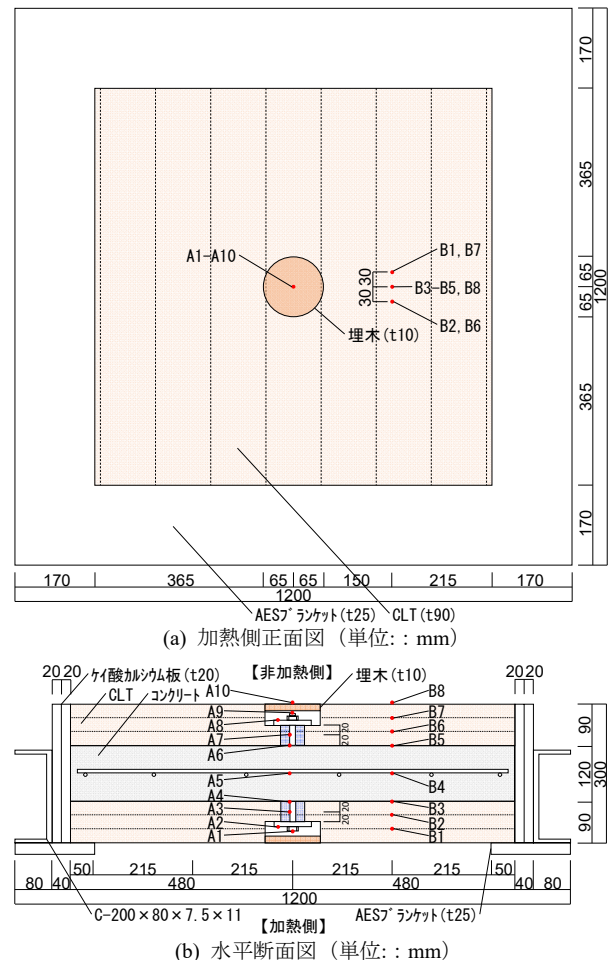
充填したものである。試験体の温度は、通しボルトが貫通する断面の鋼材・CLT の温度 (A1~A10)、および通しボルトのない壁一般部の断面の CLT・コンクリートの温度 (B1~B8) を測定した。温度測定には、素線径 0.65mm, クラス 2, ガラス被覆の K 熱電対を使用した。

## 2. 試験体

### 2.1 試験体の種類・形状・寸法

本検討では、1 時間加熱および 2 時間加熱の各条件に対して、同仕様の試験体を 1 体ずつ製作した。

試験体の正面図と断面図 (温度測定箇所記載) を図-1 に、通しボルト部分の詳細図を図-2 に示す。試験体は、型枠兼仕上げ材の厚さ 90mm の CLT の間に厚さ 120mm の中空部を設け、その中空部に異形棒鋼 D10 を 200mm 間隔で縦横にシングル配筋して、コンクリートを



注) 図中の赤点は熱電対, A1~A10, B1~B8 は熱電対番号を示す。

図-1 試験体図

\*1 清水建設 (株) 技術研究所 建設基盤技術センター 主席研究員 博士 (工学) (正会員)

\*2 清水建設 (株) 建築総本部 設計本部 設計長

\*3 清水建設 (株) 技術研究所 建設基盤技術センター 研究員 (正会員)

## 2.2 使用材料

### (1) コンクリート

使用材料を表-1 に示し、調合を表-2 に示す。コンクリートは、設計基準強度 24N/mm<sup>2</sup>、スランブ 18cm、粗骨材の最大寸法 20mm の普通コンクリートである。コンクリートの圧縮強度および含水率を表-3 に示す。

### (2) CLT およびその他の主な使用材料

CLT およびその他の主な使用材料を表-4 に示す。使用した CLT は、ラミナがスギであり、各層のラミナが直交するように積層接着された 3 層 3 プライのものを使用した。その他、通しボルト、座金、ノロ止め用充填材（押出成形ポリスチレンフォーム）を使用した。

なお、加熱実験直前に試験体の加熱側および非加熱側の CLT の水分率を木材水分計（ケット科学研究所：MT700、測定可能範囲 7~35%）を使用して、各面に対して縦横 100mm ピッチで測定した。加熱側および非加熱側の CLT の水分率は概ね 7~10% の範囲であった。

## 2.3 試験体・供試体の製作および養生

試験体の製作状況を写真-1 に示す。コンクリートの打込みは夏期の 8 月に行った。写真-1(a) は、手前側の CLT を取り付ける前の配筋、および試験体の四周に鋼製フレームを取り付けるためのインサートナットを途中まで取り付けた状況である。写真-1(b) は、CLT 型枠の設置が完了した状態である。写真-1(c) は、バケツを用いて CLT 型枠内部にコンクリートを打ち込んでいる状況であり、内部に配線した熱電対が損傷しないように添板を斜めに設置してコンクリートを型枠内に流し込み、棒状バイブレータで締め固めた。写真-1(d) は、打込み・締め固めが終了した直後の状況である。

コンクリート打込み後、加熱実験まで、温度・湿度がほぼ外気と同等な屋内で試験体を養生した。試験体と同時に採取した、加熱実験時の圧縮強度測定用および含水率測定用のコンクリート供試体（φ100mm×200mm）は、試験体と同一の環境下で封かん養生とした。

## 3. 実験方法

### 3.1 実験装置（壁炉）

加熱実験に使用した壁炉を図-3 に示し、壁炉に試験体を設置した状況を写真-2 に示す。壁炉は、都市ガスを燃料とするガスバーナーを 4 基備えている。加熱は試

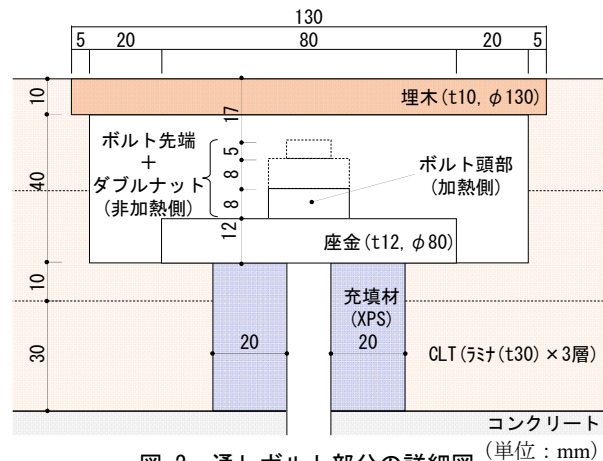


図-2 通しボルト部分の詳細図 (単位：mm)

表-1 コンクリートの使用材料

材料	仕様
セメント (C)	普通ポルトランドセメント、密度: 3.15g/cm <sup>3</sup>
細骨材 (S1, S2)	S1: 砕砂(栃木県佐野市)、表乾密度: 2.72g/cm <sup>3</sup> S2: 砂(千葉県君津市)、表乾密度: 2.58g/cm <sup>3</sup>
粗骨材 (G1, G2)	砕石 2005(栃木県佐野市)、表乾密度: 2.64g/cm <sup>3</sup> 砕石 2005(栃木県佐野市)、表乾密度: 2.72g/cm <sup>3</sup>
化学混和剤 (Ad)	AE 減水剤(遅延型 I 種)

表-2 コンクリートの調合

W/C (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) <sup>*</sup>						
		W	C	S1	S2	G1	G2	Ad
57.2	46.3	183	320	590	240	665	294	3.52

※ 細骨材 S1:S2 = 7:3, 粗骨材 G1:G2 = 7:3

表-3 コンクリートの密度・圧縮強度・含水率

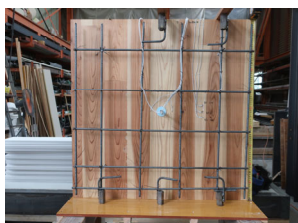
密度 (kg/m <sup>3</sup> )	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )		含水率 <sup>**2</sup> (wt%)
実験時(66 日)	28 日 <sup>**1</sup>	実験時(66 日)	実験時(66 日)
2343	28.6	39.2	4.24

※1 標準養生した供試体(φ10×20cm) 3 体の平均。

※2 乾燥前質量(W<sub>w</sub>)と 105°C 乾燥後質量(W<sub>d</sub>)から、次式により算定した値。  
含水率(%) = (W<sub>w</sub> - W<sub>d</sub>) / W<sub>d</sub> × 100

表-4 CLT およびその他の主な使用材料

材料	仕様
CLT	スギ S60A-3-3 使用環境 B (3 層 3 プライ) 全幅 960mm × 全高 960mm, 厚さ 90mm ラミナ: 幅 120mm, 厚さ 30mm
埋木	スギ, 外径 φ130mm, 厚さ 10mm
固定用通しボルト類	熔融亜鉛メッキボルト・ナット (M12), 長さ 255mm 座金 (SS400), 外径 φ80mm, 貫通孔 φ14mm, 厚さ 12mm
ノロ止め用充填材	押出成形ポリスチレンフォーム (XPS), 外径 φ52mm, 貫通孔 φ12mm, 厚さ 40mm
鉄筋	異形棒鋼 D10(SD295)



(a) 内部の配筋状況



(b) コンクリート打込み前



(c) コンクリート打込み状況



(d) コンクリート打込み後

写真-1 試験体製作状況

験体の片面から行い、非加熱面は温度・湿度が概ね外気と同等な空気に暴露される条件とした。試験体の有効加熱範囲は、860mm×860mmである。炉内温度は、試験体の加熱面から100mm離れた位置に熱電対の測温接点を配置して測定した。

### 3.2 加熱条件

炉内温度の時間経過が式(1)で表される数値になるように、壁炉制御装置のプログラム設定器によって自動制御した。式(1)において、Tは平均炉内温度(℃)、tは経過時間(分)である。

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

加熱時間は1時間および2時間とし、所定時間の加熱を終了した後は、試験体を壁炉に設置した状態で、試験体温度がすべて最高温度を示したことが確認されるまで、壁炉への給気および排気を維持したまま徐冷した。

### 3.3 測定および評価

#### (1) 測定項目

測定項目は、炉内温度(5点、図-3)、試験体温度(A断面10点、B断面8点、合計18点、図-1)とした。

#### (2) 耐火性能の評価

防耐火性能試験・評価業務方法書<sup>9)</sup>等に準じて、実験終了時(最長で「加熱時間+24時間」経過後)まで次の基準を満足した場合に耐火性能を有すると判断した。

**遮熱性:** 試験体の裏面温度上昇が、平均で140K以下、最高で180K以下であること。

**遮炎性:** 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。非加熱面で10秒を超えて継続する発炎がないこと。火炎が通る亀裂等の損傷を生じないこと。

**燃え止まり・燃え尽き:** 加熱側のCLTが燃え止まるか燃え尽きて、残炎・残じんがないこと。

## 4. 実験結果および考察

コンクリートの材齢が66日の時点で1時間加熱、74日の時点で2時間加熱の実験を実施した。各試験体の試験前・後の加熱側・非加熱側の状況を写真-3および写真-4に示し、温度測定結果を図-4および図-5に示す。

### 4.1 実験結果概要と耐火性能の評価

#### (1) 試験体の状況

写真-3および写真-4に示すように、実験後の加熱側CLTは、1時間耐火試験体(以下、1hr試験体)では1層分のラミナが残存していたが、2時間耐火試験体(以下、2hr試験体)では周辺部を除いてラミナがなくなっていた。また、非加熱側のCLT表面は、1・2hr試験体のいずれにおいても、大きな変状は認められなかった。

なお、非加熱側CLTを取り外して通しボルト部の状況

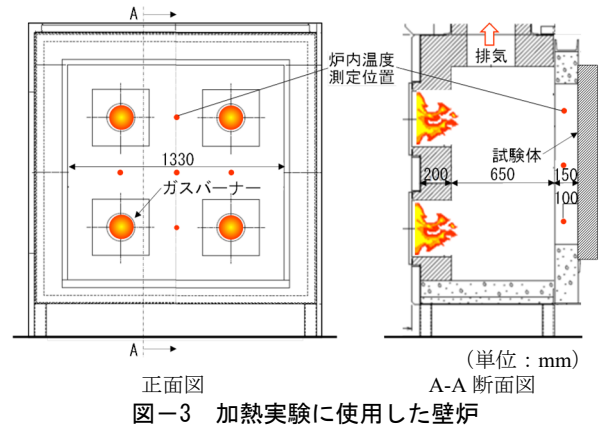


図-3 加熱実験に使用した壁炉



写真-2 壁炉への試験体の設置状況

を確認したところ、1hr試験体では充填材(XPS)に変状は認められなかったが、2hr試験体では収縮していた。ポリスチレンの融点は100℃程度とされており、図-5に示すように、A7(非加熱側充填材内のボルト)、A8(非加熱側座金表面)、A9(非加熱側ボルト先端)の鋼材最高温度がそれぞれ119、98、100℃であったことから、充填材が熔融に近い状態となり、収縮したものと考えられる。

#### (2) 壁の耐火性能

裏面温度上昇は、1hr試験体のA10(非加熱側埋木表面)で15K、B8(非加熱側CLT表面)で11Kであり、2hr試験体のA10で45K、B8で16Kであった。そして、1・2hr試験体のいずれにおいても、非加熱側へ10秒を超えて継続する火炎の噴出、非加熱面で10秒を超えて継続する発炎、火炎が通る亀裂等の損傷は生じなかった。また、加熱開始から約24時間経過した後、試験体の加熱面を観察したところ、1hr試験体では燃え止まり、2hr試験体では燃え止まりならびに燃え尽きが確認された。

以上より、本検討の対象とした壁は、1時間耐火および2時間耐火の性能を有すると判断される。

### 4.2 温度性状

#### (1) 炉内温度

図-4(a)、(b)および図-5(a)、(b)に示すように、炉内温度は設定温度(式(1))よりも高く推移した。この原因は、炉の容積に対してCLTの燃焼エネルギーが大きく、自動温度制御によってバーナーの出力が最低燃焼状態になっていたにもかかわらず、温度を下げるできなかったためである。1hr試験体の加熱中の炉内温度が常に設定温度よりも高くなったのは、熱分解によって可燃

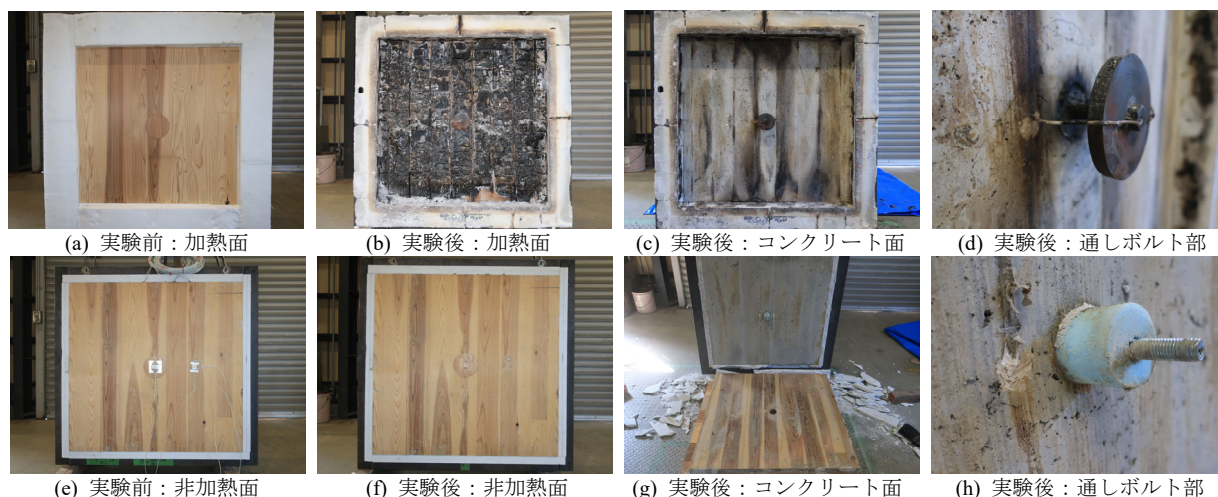


写真-3 1時間耐火試験体の加熱実験前・後の状況（上段：加熱側，下段：非加熱側）

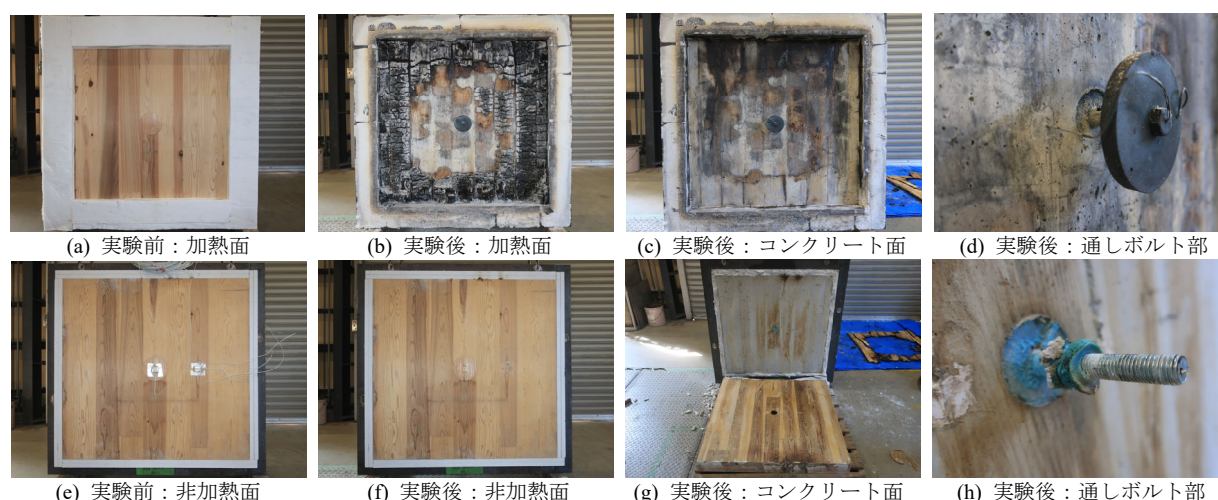


写真-4 2時間耐火試験体の加熱実験前・後の状況（上段：加熱側，下段：非加熱側）

性ガスを発生しうるラミナが残存していたためであり、2hr試験体の炉内温度が加熱終了間際に設定温度と同程度になったのは、CLTがほぼ燃え尽きて、ラミナからの可燃性ガスの発生がなくなっていたためだと推定される。

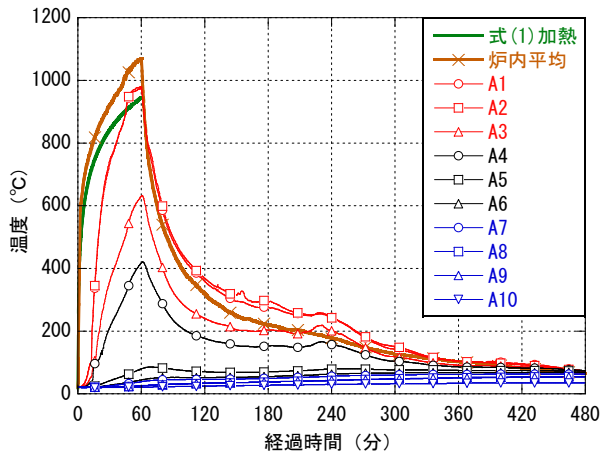
## (2) ボルト貫通部（A断面）の温度

全体傾向：図-4(a), (c)および図-5(a), (c)に示すように、1・2hr試験体ともに、A1（加熱側ボルト頭部）からA4（CLT-コンクリート境界部）の鋼材温度は、温度上昇勾配が大きく、最高温度は400℃以上に達した。これに対し、A5（コンクリート層厚中央）以降の鋼材温度は、加熱面からの距離が大きいほど、温度上昇勾配が小さく、最高温度もA4に比べて300℃以上低くなった。

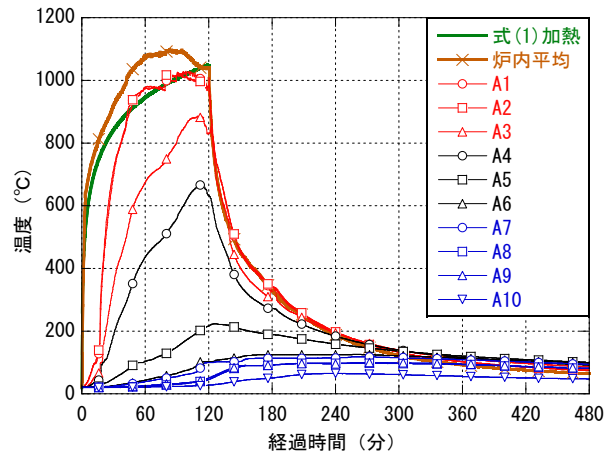
埋木の効果：1hr試験体では加熱開始後13分頃に、2hr試験体では加熱開始後17分頃に埋木が脱落して、A1とA2（加熱側座金表面）の鋼材温度が急激に上昇した。埋木が脱落する直前の炉内平均温度とA1・A2の温度は、1hr試験体でそれぞれ約770℃、約100℃、2hr試験体で約820℃、約150℃であり、厚さ10mmの埋木であっても、脱落しなければ高い断熱性能があると言える。

スギの炭化速度は0.7mm/分程度<sup>2)</sup>であり、厚さ10mmの埋木の全厚が炭化するまでの時間は14分程度と推定される。本実験における埋木の脱落時間は13、17分であり、全厚炭化時間の計算値と概ね一致している。したがって、埋木の厚さの調整によって、通しボルトが火災加熱に直接曝されるまでの時間を遅延できる時間は、全厚炭化時間を計算することで概ね推定できると考えられる。

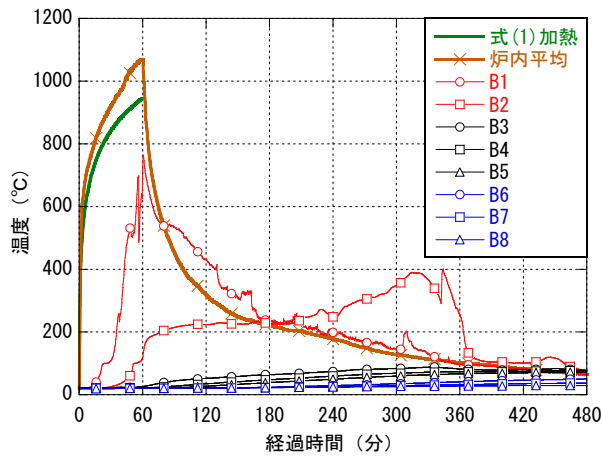
通しボルト（熱橋）とコンクリートの冷却効果：1hr試験体の場合、図-4(c)に示すように、A4（コンクリート層の加熱側表面）の鋼材最高温度は421℃、B3（加熱側CLTとコンクリートの境界）の最高温度は88℃で、その差は333℃である。この差は、通しボルト位置における埋木の脱落、通しボルト廻りのCLTと充填材の焼失、および壁一般部（通しボルトのない部分）におけるCLTの断熱効果などに起因している。一方、コンクリート層厚中央においては、A5の鋼材最高温度が85℃、B4のコンクリート最高温度が73℃であり、その差は小さい。温度差が小さい理由は、通しボルトが熱橋となってボルトの軸方向に伝導する熱エネルギーが、コンクリート層の加



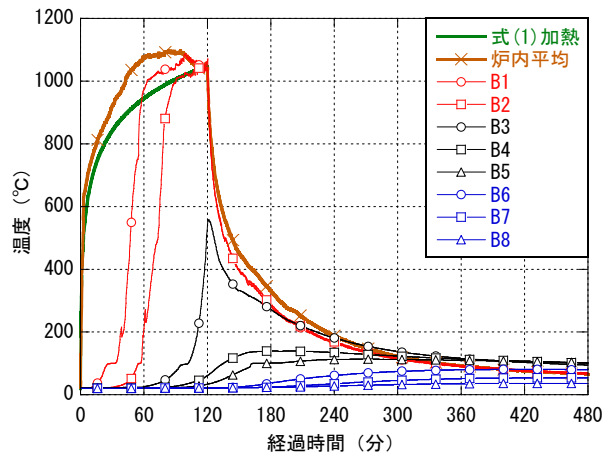
(a) 炉内温度および A 断面温度



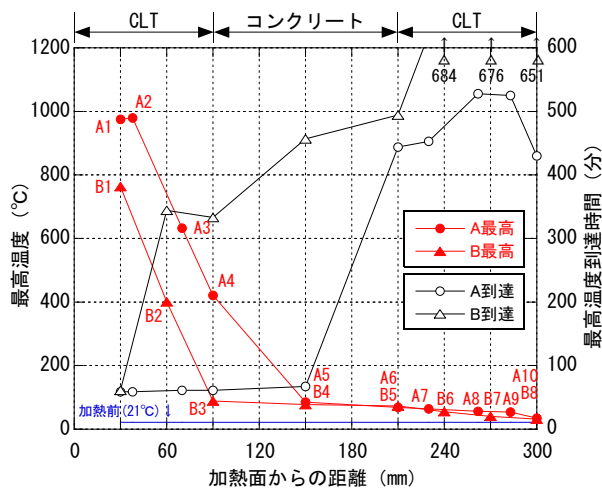
(a) 炉内温度および A 断面温度



(b) 炉内温度および B 断面温度

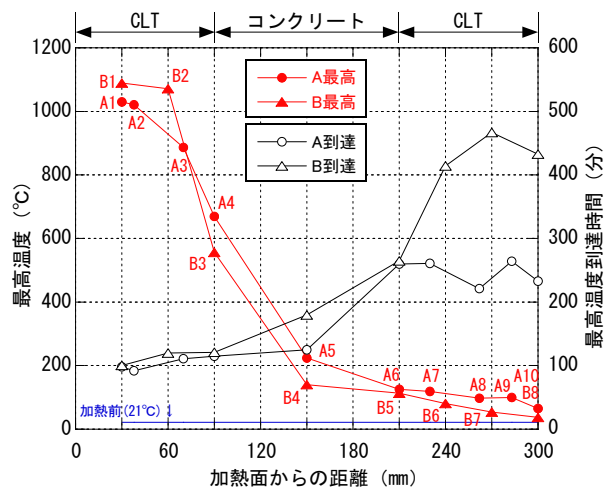


(b) 炉内温度および B 断面温度



(c) 壁内最高温度および最高温度到達時間

図-4 1時間加熱実験の温度測定結果



(c) 壁内最高温度および最高温度到達時間

図-5 2時間加熱実験の温度測定結果

熱側表面から層厚中央までの 60mm を伝導する間に、ボルト周囲のコンクリートによって吸熱されたためである。

2hr 試験体の場合、図-5(c)に示すように、A4 の鋼材最高温度は 670°C、B3 の最高温度は約 557°C で、その差は 113°C である。1hr 試験体と比べて差が小さいのは、加熱終了時に B3 位置の加熱側 CLT がほぼ燃え尽きていたためだと言える。一方、コンクリート層厚中央においては、A5 の鋼材最高温度が 224°C、B4 のコンクリートの

最高温度が 140°C であり、その差は 84°C で 1hr 試験体と異なり、熱橋の影響が見られる。さらに加熱側から離れた A6 (コンクリート層の非加熱側表面) の鋼材最高温度は 126°C、B5 (非加熱側 CLT とコンクリートの境界) の最高温度は 113°C で、その差は 13°C と小さく、1hr 試験体の A5 と B4 の最高温度の温度差と同程度である。

1・2hr 試験体の双方において、B6~B9 と A7~A10 の最高温度の差が若干増しているのは、通しボルトの周囲

の CLT が断熱材となり、通しボルトからの熱放出が抑制されたためである。しかし、通しボルトの鋼材最高温度は A6 から A9 に向かって低下している。したがって、コンクリート層の非加熱側表面における温度で評価すれば、加熱側に厚さ 90mm の CLT があり、1 時間耐火にあつては厚さ 60mm、2 時間耐火にあつては 120mm のコンクリート層があれば、通しボルトが熱橋になることによって非加熱側に与える影響を概ね抑制できると考えられる。

なお、通しボルトの熱エネルギーが周囲のコンクリートに吸熱されて温度上昇が抑制される効果は、耐火設計における断面形状係数<sup>3)</sup>の概念で評価できると考えられる。すなわち、通しボルトの単位長さ当たりの体積 V と円周廻りの表面積 A<sub>p</sub> の比率 A<sub>p</sub>/V が大きいほど吸熱効果が大きくなる。ボルトを丸鋼と見なせば A<sub>p</sub>/V は式(2)で表わされる。式(2)において r は丸鋼の断面の半径であり、半径が小さいほど熱橋になりにくいと言える。よって、コンクリート層が薄い場合などは、通しボルトの径を細くすると良いと考えられる。

$$A_p/V = 2\pi r / (\pi r^2) = 2/r \quad (2)$$

### (3) 壁一般部 (B 断面) の温度

全体傾向：1hr 試験体の場合、図-4(b)に示すように、B1 (加熱側 CLT の 1-2 層目境界) および B2 (2-3 層目境界) の各温度は加熱終了時に炉内温度と 200℃以上の差があり、加熱側 CLT の 1 層目と 2 層目のラミナは加熱終了時に残存していたと考えられる。しかし、B1 の温度は加熱終了後直ちに低下しており、1 層目のラミナの残存厚さは極めて薄かった可能性がある。B2 の温度は加熱終了後も緩やかに上昇を続け、約 400℃まで上昇しており、この間 (加熱開始後約 340 分まで)、加熱側 CLT の 2 層目のラミナは赤熱燃焼の状態にあったものと考えられる。

2 時間加熱の場合、図-5(b)に示すように、B1 の温度は加熱開始後 60 分頃、B2 の温度は 90 分頃に炉内温度近くまで上昇し、かつ温度勾配が小さく定常に近い状態に遷移していることから、これらの時点において 1 層目と 2 層目のラミナはほぼ焼失したものと考えられる。加熱終了時の B3 (加熱側 CLT とコンクリートの境界) の温度は炉内温度と 400℃以上の差があることから、加熱側 CLT の 3 層目のラミナは加熱終了時に残存していたと考えられる。しかし、加熱終了後直ちに B3 の温度が低下していることから、3 層目のラミナの残存厚さは極めて薄く、放冷期間中に焼失・脱落したと言える(写真-4(b))。

CLT の断熱効果と赤熱燃焼の影響：図-4(b)の B2 の温度履歴に見られるように、加熱後に CLT が残存していると赤熱燃焼が長時間継続する。そのため、図-4(c)の B2～B8 の最高温度到達時間に見られるように、加熱側

CLT の残存部およびそれより以深の温度低下に長時間を要する。しかし、図-4 および図-5 の A4・B3 およびそれより以深の温度の経時変化や最高温度から明らかなように、加熱後の赤熱燃焼の影響よりも、加熱中における CLT の断熱効果の方がはるかに大きいと言える。

### (4) コンクリート層の厚さに関する一考察

コンクリート層の非加熱側表面における通しボルトの鋼材最高温度上昇が 140K<sup>3)</sup>になることを許容した場合のコンクリート層の厚さを推定する。図-4(c)と図-5(c)の各々において、加熱面からの距離 90～210mm の範囲 (コンクリート層) に関して、A4・A5・A6 の最高温度を結ぶ折れ線と加熱前温度 21℃で囲まれる面積を算定すると、1hr 試験体で 17250mm・K、2hr 試験体で 34800mm・K となる。この値が最高温度分布をもたらす熱エネルギーと等価だと仮定する。コンクリート層の加熱側表面から非加熱側表面の間の最高温度分布が直線になり、かつ A4 の最高温度がコンクリート層の厚さで変わらないと仮定して、最高温度上昇が 140K<sup>3)</sup>になる厚さを算定すると、1 時間加熱で 64mm、2 時間加熱で 88mm となる。よって、建設省告示第 1399 号に規定される鉄筋コンクリート壁の厚さ (1 時間耐火：70mm、2 時間耐火：100mm) があれば熱橋は問題にならないと考えられる。

## 5. まとめ

本検討結果をまとめると、以下のとおりである。

- (1) 型枠兼仕上げ材の CLT (厚さ 90mm、3 層 3 プライ) と鉄筋コンクリート (厚さ 120mm) で構成される壁は、1 時間および 2 時間の耐火性能を有する。
- (2) 加熱側に厚さ 90mm の CLT があり、1 時間耐火にあつては厚さ 60mm、2 時間耐火にあつては 120mm のコンクリート層があれば、通しボルトの有無にかかわらず、非加熱側の温度は双方とも同程度であり、通しボルトの熱橋の影響は概ね抑制される。
- (3) 加熱後における CLT の赤熱燃焼の影響よりも、加熱中における CLT の断熱効果の方がはるかに大きい。
- (4) コンクリート層の厚さが 1 時間耐火で 70mm、2 時間耐火で 100mm あれば、コンクリート層の非加熱側表面の温度上昇は 140K 以下に抑えられる。

## 参考文献

- 1) (例えば) 日本建築総合試験所：防耐火性能試験・評価業務方法書，2023.4
- 2) 日本建築学会：構造材料の耐火性ガイドブック，2017.2
- 3) European Committee for Standardization：Eurocode 3: design of steel structures – Part 1-2: General rules – structural fire design, 2005.4