

特 集

Feature Articles

特集 大規模木造建築の開発

Development of Large Scale Wooden Buildings

1 はじめに

Introduction

木村 秀樹 Hideki Kimura*¹ 長岡 勉 Tsutomu Nagaoka*²
宇佐美 徹 Tetsu Usami*³ 五十嵐 信哉 Shinya Igarashi*⁴

関東大震災をはじめとする地震時における広範囲に及ぶ木造建築の火災、大型台風による木造建築の被害、戦後枯渇した国内林産資源保護などを理由に、我が国は1950年の建築基準法制定によって一定規模を超える建築物の木造化を禁止してきた。しかし、2000年に建築基準法が性能規定化に向けて改正され、所定の耐火性能を満足した木構造を耐火構造として取り扱うことが可能となった。

一方、木材の活用は近年の環境意識の高まりとともに大きく注目されるようになった。なかでも森林のCO₂固定化による温室効果ガスの削減、森林や里山の荒廃を一因とした自然災害の防止などに向けた森と人間が共生できるサステナブルな社会の実現、すなわち“植林～育林～伐採～木材活用”を繰り返す「森林サイクル」の活性化が強く求められるようになった (Fig. 1参照)。特に伐採した木材からのCO₂の放出を抑制するという点で、木材を建築物に活用することが重要とされている。そのため、我が国では2010年に「公共建築物等の木材利用促進法」を制定し、建築分野における木材利用を高めることで「森林サイクル」の活性化を推進している。

このような背景のもと、当社では2001年より木造化が困難であった市街地において木材現しの大規模木造建築を実現するため、これまでに類をみない独創的な3層構造の燃え止まり耐火集成材「燃エンウッド®」の研究開発に取り組んできた。開発初期段階の2008年までは“自然性と耐火の相反する性能の確保”，2010年からはこの新たな耐火集成材をプロジェクトに適用するための多くの技術開発等を進めてきた。この研究開発の実績としては、2013年に国内初となる市街地の大規模木造建築3件を実現し、これ以外にも何件かのプロジェクトへの適用も進めている。また、本技術およびこのプロジェクト適用は、新たな木造建築の可能性を社会に広くアピールし、市街地の大規模木造建築という新たな分野の先導および「森林サイクル」活性化に向けた環境意識の高揚に対して大きく貢献した。その結果、2014年には「三層構造の燃え止まり耐火集成材の開発」で社団法人日本建築学会賞（技術）を受賞した。比較対象となる技術としては、集成材の表面を石膏ボードで被覆したメンブレン型、鉄骨の表面を木材で被覆した鉄骨ハイブリッドタイプなどがある。前者は戸建て住宅などで実績が多いものの、市街地の大規模木造建築への適用に至っていない。後者は大規模木造建築に数件の適用実績はあるものの構造体を鉄骨とする点で本技術とは異なる。

本報告では、市街地での大規模木造建築の実現を目的として行った技術開発について、防耐火関連の技術開発、構造関連の技術開発について説明するとともに適用事例を紹介する。



Fig. 1 森林サイクルと建築の関係
Relation of forest cycle and buildings

*1 技術研究所 構造部長 博士(工学) General Manager, Research & Development Institute, Dr. Eng.
*2 技術研究所 構造部 防火グループ長 博士(工学) Group Leader, Research and Development Institute, Dr. Eng.
*3 技術研究所 構造部 架構システムグループ長 博士(工学) Group Leader, Research & Development Institute, Dr. Eng.
*4 先進構造エンジニアリング本部 特殊架構グループ長 Group Leader, Advanced Structural Engineering Department

2 防耐火関連の技術開発

Development of Fire Safety Technology

長岡 勉 Tsutomu Nagaoka*¹ 大橋 宏和 Hirokazu Ohashi*² 永盛 洋樹 Hiroki Nagamori*³

本章では、耐火木造建築の基盤技術となる1時間耐火の柱と梁の開発や、その柱と梁の接合部の開発、さらに建物を構成する上で必要となる周辺技術として梁の配管貫通孔の開発、耐火壁の開発について記述する。また、現在、燃エンウッドなどの木現し耐火木造部材は、樹種を限定した上で耐火認定を取得しているが、多様な樹種でも建物を建てたいという社会ニーズが強くなり、この課題に対しても現在取り組んでおり、それらの内容も合わせて記述する。

2.1 耐火木造部材（柱・梁）の開発

Development of Fire Resisting Wood Elements (Column, Beam)

(1) はじめに

耐火木造部材の開発は、2000年に建築基準法が改正され、木造による耐火構造に道が作られた直後に開始した。当初は失敗の連続であったが、2006年に「カラマツとジャラ（高密度の木材）」の構成で初めて1時間の耐火認定を取得した。この認定は、木現しの耐火木造部材としては国内初であり、当時、不可能と思われていた木現しの耐火木造の可能性を実証できたという意味で大きな出来事であった。さらに2008年には「スギとモルタル」で1時間の耐火認定を取得し、ジャラといった希少材を用いない木現しの耐火木造部材を開発した。

その後、2010年に「公共建築物等における木材の利用促進に関する法律」が施行したことをきっかけとして、実用化研究に移行した。2008年までの認定条件では建物のスパンとしては構造的に5mが限界であったが、大規模建築物を実現する上では9m程度のスパンが望ましく、スパンの拡大が実用化に向けた最大の課題となった。そこで、構造的に優位なカラマツに焦点を絞り、さらに量産を視野に入れ、初期に開発した2仕様の耐火木造部材の長所を合わせて「カラマツとモルタル」による1時間耐火木造部材（Fig. 1）を開発した。

本節では、実用化した「カラマツとモルタル」による耐火木造部材を中心に述べる。なお、初期段階の研究については、文献¹⁻³⁾を参照していただきたい。

(2) 木現し耐火木造部材の概要

耐火木造部材の構成は、外層に集成材からなる「燃え代層」、中層に燃焼を食い止める「燃え止まり層」、内層に集成材からなる「荷重支持部」に層別し、それぞれの機能を明確化した断面構成とした（Fig. 2）。外層の「燃え代層」は、加熱中に炭化することで遮熱効果を発揮し、内部への熱エネルギーの流入を低減する層とした。中層の「燃え止まり層」は、熱容量の大きな材料を用いて加熱終了後の自己燃焼を続ける燃え代層の熱エネルギーを吸収することで燃焼を止める、もしくは断熱性能に優れた材料を用いて荷重支持部への熱の侵入を抑制する役割を持つ。外層の厚さは、加熱終了時に炭化部分が燃え止まり層まで到達しない最適な厚さとした。

(3) 1時間耐火性能の確認

竹中工務店技術研究所の大型耐火試験炉を用いて、認定試験⁴⁾と同様の方法で1時間の載荷加熱試験を実施⁵⁾し、耐火性能を確認した。

試験体はTable 1, Fig. 3に示すように、柱小：W470×D470mm、柱大：W670×D1220mm、梁小：W320×H535、梁大：W670×H1135の4体とした。試験体の長さは、柱は木部h=2670mm、梁は支持点間距離L=7500mmとした。柱はFig. 4に示すように耐火試験炉に設置し、柱中心に載荷した。梁はFig. 5に示すように耐火試験炉に設置し、3

Table 1 試験体一覧
Test specimen

部材	部材寸法		木材密度 (g/cm ³)	モルタルバー密度 (g/cm ³)
	全体	荷重支持部		
柱小	470×470	300×300	0.48	2.05
柱大	670×1220	500×1050	0.46	2.18
梁小	320×H535	150×H450	0.47	2.28
梁大	670×H1135	500×H1050	0.50	2.19

*1 技術研究所 構造部 防火グループ長 博士(工学) Group Leader, Research & Development Institute, Dr. Eng.

*2 技術研究所 主任研究員 Chief Researcher, Research & Development Institute

*3 技術研究所 研究員 Researcher, Research & Development Institute

等分2点载荷した。加熱はISO-834に準拠し1時間とし、その後、载荷した状態で23時間炉内に放置した。なお、梁は梁端部と耐火炉壁との取り合い部分（実験対象外）が加熱終了後に炉の影響で異常加熱しないように放水冷却した。また、実験終了後に試験体を切断し、炭化の状況を確認した。

Figs. 6～13に、各試験体の内部に設置したK型熱電対φ0.32で計測した温度と、試験体の変位と変形速度（柱は軸方向収縮量、梁は中央部たわみ量）を示す。耐火性能の判定は指定性能評価機関の業務方法書⁴⁾を参考にし、変形量の基準は柱： $h/100$ [mm]、梁： $L^2/400d$ [mm]、変形速度の基準は柱： $3h/1000$ [mm/分]、梁： $L^2/9000d$ [mm/分]とした。ここに、 h ：柱長さ [mm]、 L ：梁の支持点間距離 [mm]、 d ：梁せい [mm]である。また、業務方法書には明記されていないが、耐火木造に対してはこれまでの認定試験に際して「荷重支持部の温度が260℃以下」、かつ、「荷重支持部が炭化しないこと」、「試験終了時に赤熱や発煙がないこと」との判定基準が付加されており、今回の試験もこれに準じた。なお、本章の以降のすべての耐火試験に同様の判定基準とした。

Figs. 7, 9, 11, 13の変位計測結果において、変位量および変形速度ともに許容値を十分に下回った。ただし、梁小については、端部（試験対象外）の燃え込みにより支持点が移動したため、正しいたわみ量を計測できず、中央たわみの計測を約9時間で中止した。Figs. 6, 8, 10, 12に荷重支持部表面の温度を示すが、いずれも許容温度260℃を下回った。また、いずれの試験体も脱炉時において試験体に火や煙は無く、試験後の解体調査において荷重支持部に炭化は無かった。したがって、各大きさの柱、梁ともに1時間の耐火性能を有していると判断される。

なお、耐火木造の耐火試験では変位と変形速度の基準に比べて荷重支持部表面温度260℃以下または非炭化の基準が厳しく、実際にはこれらが試験の可否を分けている。

(4) 大臣認定

前途の試験とほぼ同様の仕様で、指定性能評価機関において1時間耐火の性能評価試験を受け、国土交通大臣認定を取得した。

一般的に柱と梁の耐火認定試験では、想定される最小断面寸法の試験体で試験を受け、それ以上の寸法については大臣認定条件に含まれることが多い。しかし、木現し耐火木造については知見が不足しており、部材の断面寸法と耐火性能の優劣関係が不明であるため、最小寸法で認定試験を実施すべきか最大寸法で試験を実施すべきかの協議を重ね、最小断面の試験体2体と最大断面の試験体1体の試験を実施することになった。具体的には、柱は部材断面470～670mm×470～1220mm（荷重支持部断面は各辺170mm減の300～500mm×300～1050mm）、梁は320～670mm×515～1135mm（荷重支持部断面は左右辺170mm減・下辺85mm減の150～500mm×450～1050mm）の範囲で2011年に1時間耐火認定を取得し、「カラマツとモルタルバー」の柱・梁（Fig. 1）でスパン9mの実現に目途をつけた。

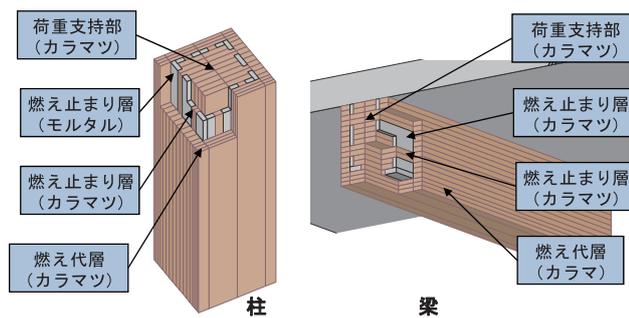


Fig. 1 燃え止まり層にモルタルとカラマツを用いた柱・梁部材のイメージ
 Illustration of column and beam elements

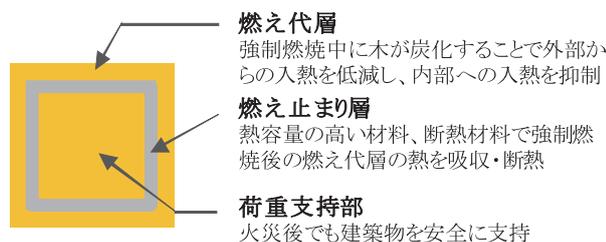


Fig. 2 耐火木造の断面構成の考え方
 Concept of cross-sectional division

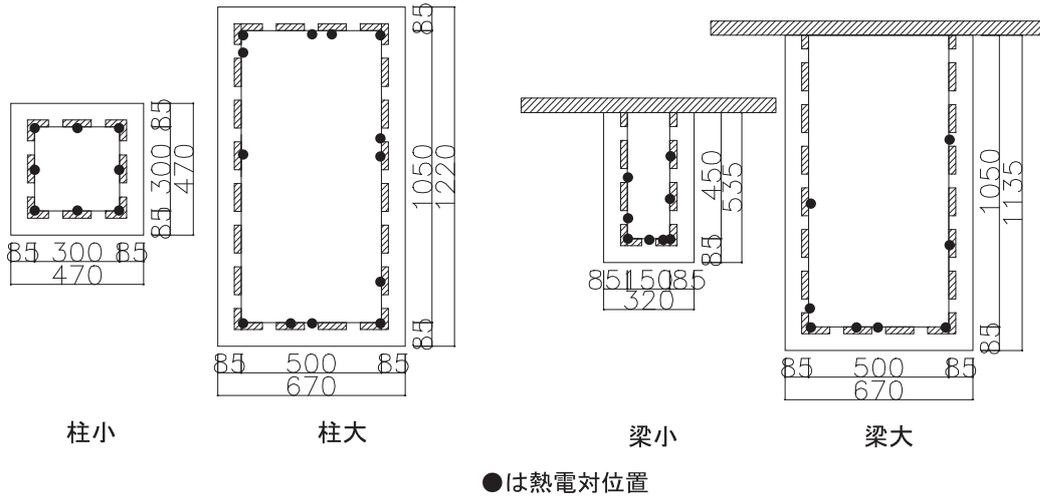


Fig. 3 試験体断面
Section of specimen

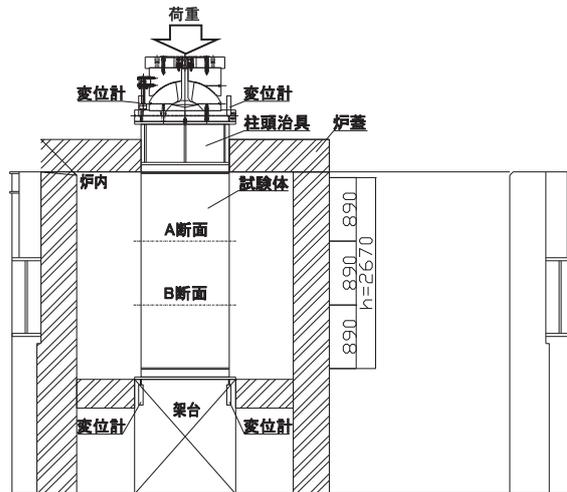


Fig. 4 試験体設置状況 (柱)
Installation of specimen in the furnace (column)

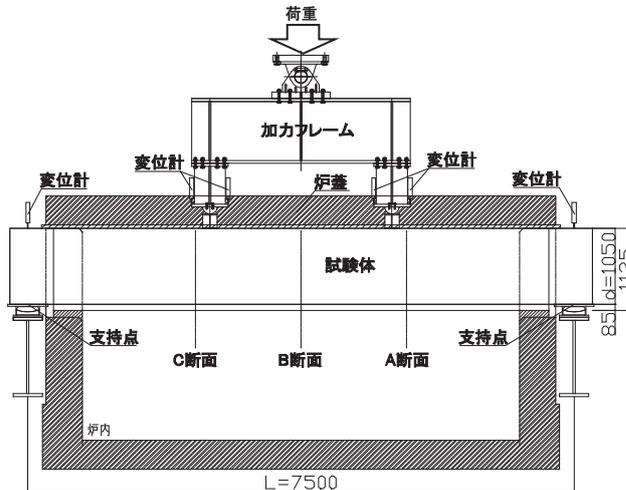


Fig. 5 試験体設置状況 (梁)
Installation of specimen in the furnace (Beam)

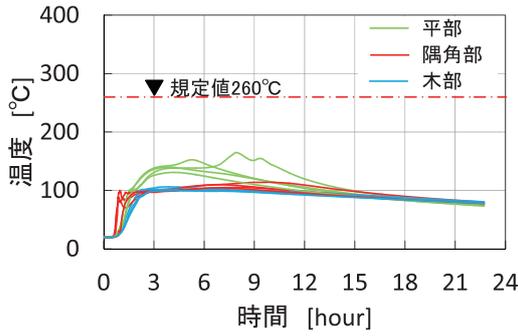


Fig. 6 柱小試験体の荷重支持部表面温度
 Temperature of load-bearing part
 (small column)

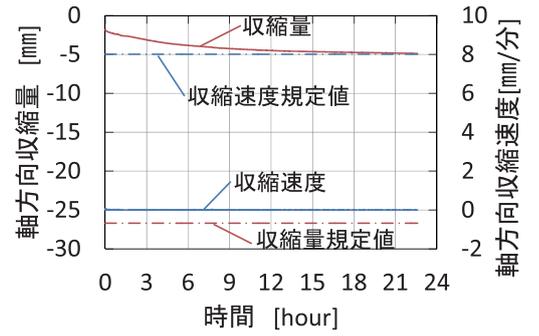


Fig. 7 柱小試験体の軸方向収縮
 Elongation in the axial direction
 (small column)

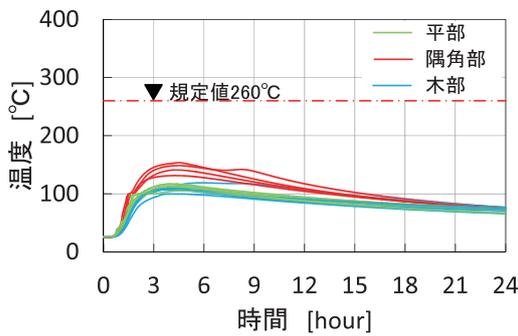


Fig. 8 柱大試験体の荷重支持部表面温度
 Temperature of load-bearing part
 (large column)

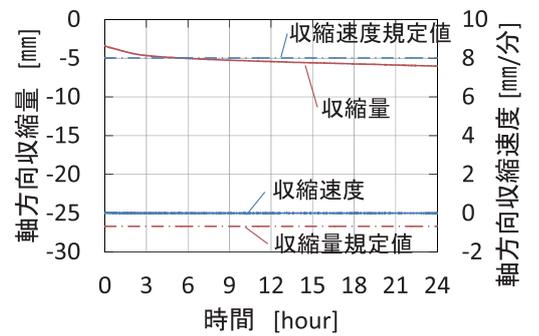


Fig. 9 柱大試験体の軸方向収縮
 Elongation in the axial direction
 (large column)

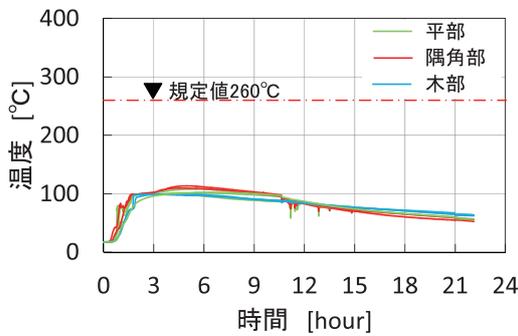


Fig. 10 梁小試験体の荷重支持部表面温度
 Temperature of load-bearing part
 (small beam)

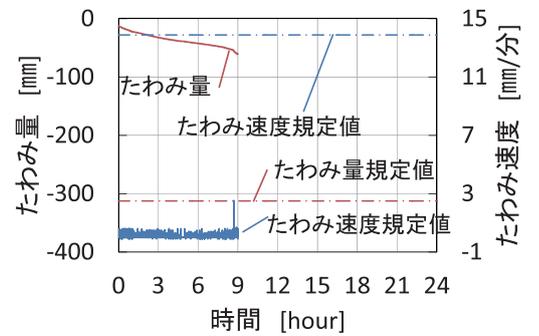


Fig. 11 梁小試験体の中央たわみ
 Deflection of the beam center
 (small beam)

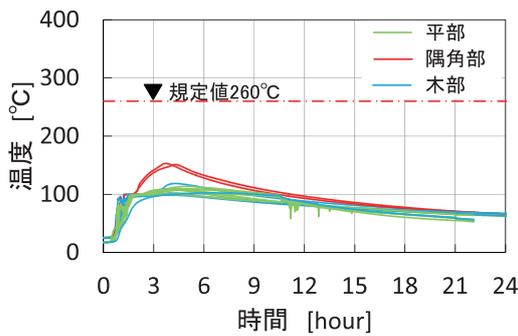


Fig. 12 梁大試験体の荷重支持部表面温度
 Temperature of load-bearing part
 (large beam)

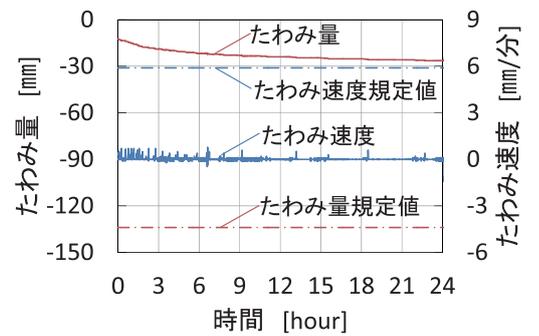


Fig. 13 梁大試験体の中央たわみ
 Deflection of the beam center
 (large beam)

2.2 柱梁接合部の耐火性能

Fire Resistance of Column-beam Joints

(1) はじめに

本節では、柱と梁の接合部の耐火性能について述べる。鉄骨造では、接合部は一般部と同様の耐火被覆を施し、その耐火性能は一般部と同等以上と考え、接合部の耐火性能を試験により確認することはない。しかし、耐火木造に関しては知見が極めて少なく、火災時の性能を予測することが困難であり、特に、火災の熱や燃焼により柱や梁が変形して接合面に隙間が生じる等の恐れがある。また、今回は建て方の利便性を考えて柱と梁の間に若干のクリアランスをあえて設けて目地処理をしており、その目地部分の耐火性能も合わせて確認することとした。

具体的には、耐火木造の柱に耐火木造の梁1本が接合する試験体を作成し、1時間の載荷加熱試験⁶⁾を実施し、接合部でも燃え止まることと、構造上支障をきたす著しい変形等が生じないことを確認した。

(2) 試験内容

Fig. 14に試験体を示す。柱・梁ともに2.1節で述べた仕様で、柱は470mm角、梁は470mm×H735mmとし、相互の荷重支持部をガセットプレート（GPL）およびベースプレート（BPL）からなる接合金物を介して接合し、接合部に25mmのクリアランスを設け、その隙間にロックウールブランケット（深さ85mm）を充填し、カラマツ材の木栓（深さ15mm）仕上げとした。

Fig. 15に示すように、多目的耐火試験炉の炉床中央部に試験体の柱を建て、その上部に梁を接合し、柱頭部と梁の一端を炉外に貫通させて設置した。試験体の支持条件は、柱脚は固定、柱頭は自由、梁端部はピン支持とした。柱には長期圧縮応力が生じるように柱中心に載荷した。同時に、梁には長期せん断応力が生じるように梁中央部に載荷した。載荷した状態でISO834標準加熱温度曲線で1時間加熱した。加熱終了後も載荷したまま炉内に23時間放置した。

Fig. 14に示すように、柱・梁の荷重支持部、GPL、BPL、ドリフトピン試験体内部温度（柱梁の荷重支持部、GPL、BPL、ドリフトピン）をK型熱電対φ0.32で測定した。合わせて炉内温度をK型シース熱電対φ3.2で測定した。これら以外に、柱・梁に与えた荷重、柱の軸方向収縮量、梁のたわみ量を測定した。また、23時間放置後に試験体を炉外で解体して接合部の燃え止まりを確認した。

なお、判定条件は以下とした。

- ・実験中における荷重支持部の温度が260℃未満
- ・実験終了時の試験体外観に赤熱や発煙がないこと
- ・荷重支持部に炭化が確認されないこと
- ・著しい回転変形やたわみが生じていないこと

(3) 試験結果

多目的耐火炉の観測窓から見えた範囲では、加熱開始約3分で試験体表面が燃焼し始め、その後全体が炎に覆わ

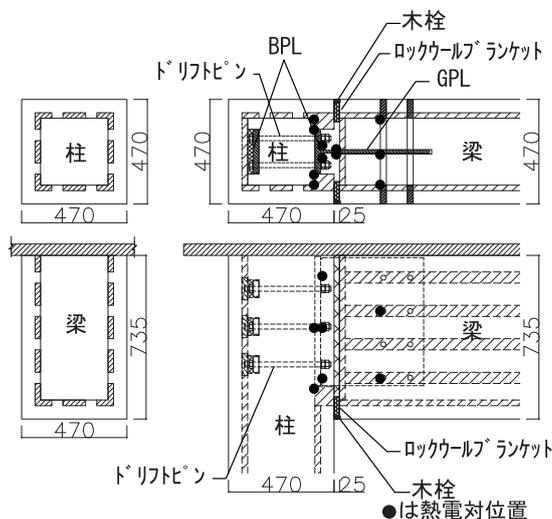


Fig. 14 接合部の試験体
Specimen of column-beam joints

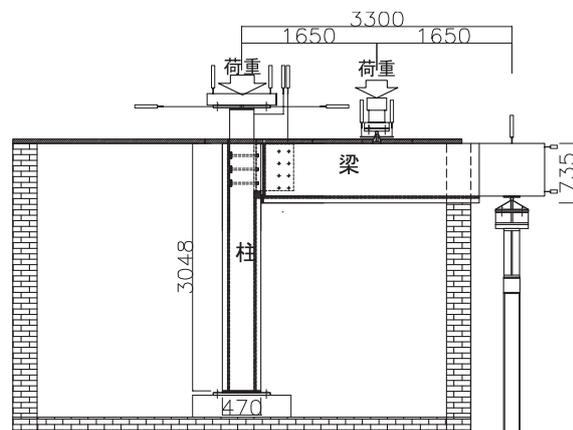


Fig. 15 試験体設置図
Installation of specimen in the furnace

れた。1時間で炉の加熱を終了したが、しばらくの間、試験体表面の燃焼が継続し、約72分（炉加熱停止後12分）で試験体表面の炎は消えたが、赤熱が点在した。23時間放置後の試験終了時点では、全ての測定温度が約50℃に下降し、試験体外観に赤熱や発煙は見られなかった。

Fig. 16～18に柱の荷重支持部、梁の荷重支持部、金物（GPL、BPL、ドリフトピン）の温度測定結果を示す。柱の荷重支持部の温度は最大100℃であり、判定条件260℃と比較すると大幅に余裕を持った性能であることが分かる。また、梁の荷重支持部の温度も200℃以下であり、余裕を持った性能である。

目視によると接合部の著しい回転変形やたわみは見られなかった。また、Photo 1～2に示すように、試験後に試験体を解体したところ、接合部に炭化は生じていないことが確認できた。

(4) まとめ

耐火木造の柱梁接合部の载荷加熱実験を実施した結果、本接合部には著しい変形や、荷重支持部の炭化が見られず、また、荷重支持部の温度が許容温度260℃と比較して大幅に低く、余裕を持った耐火性能を有していることが確認できた。

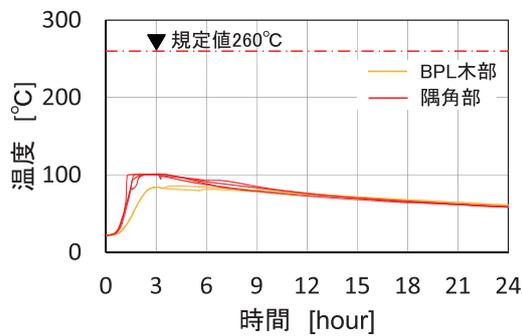


Fig. 16 荷重支持部温度（柱）
 Temperature of load-bearing part (column)

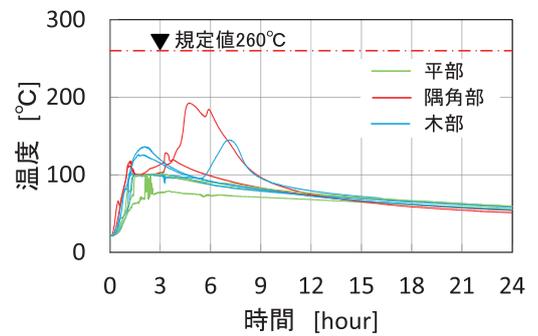


Fig. 17 荷重支持部温度（梁）
 Temperature of load-bearing part (beam)

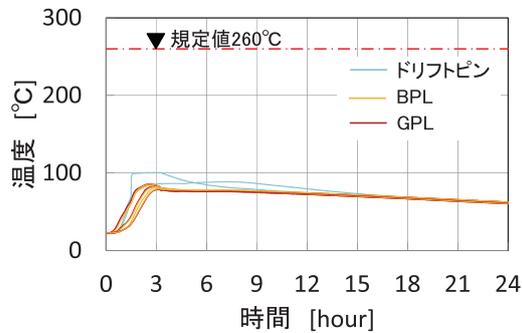


Fig. 18 接合金物温度
 Temperature of metal plate



Photo 1 試験後の接合部の外観
 Specimen after burning test



(柱側の接合部内部)
 Column Side



(梁側の接合部内部)
 Beam Side

Photo 2 試験後の接合部の内部
 Inside of column-beam joints

2.3 梁貫通孔の耐火性能

Fire Resistance of Beams with Holes (Openings)

(1) はじめに

木造の梁には、意匠的、構造的、耐火的に出来る限り貫通孔を設けないことが望ましいが、空調の冷媒管やスプリンクラー配管など、やむを得ない理由により貫通孔を設ける場合がある。梁に貫通孔を設ける際の耐火上の課題は、貫通孔に熱気が進入し、荷重支持部が加熱されて燃焼することの防止である。そのために貫通孔の外周を被覆して荷重支持部を防御する対策を講じ、その耐火性能を試験⁶⁾により確認した。

(2) 試験内容

試験体は2.1節に示した仕様の耐火木造の梁（W370×H985×L8000mm）に内径100mmの貫通孔を設けたものとした。Table 2とFig. 19に表すように、貫通孔の仕様は4種類とし、仕様A～Cはモルタル管（t25mm）の内側に内径100mmの発泡性塩ビパイプ（t7mm）を直接設置し、仕様Dはモルタル管（t25mm）と発泡性塩ビパイプ（t7mm）の間にロックウールブランケット（製品厚さ t25mm）を設置した。また、仕様AとCに関しては、モルタル管と燃え止まり層のモルタルバーが接する部分に1成分型変成シリコン系シーリング（以下、シール）を施し、仕様Aではモルタル管小口にプライマーを塗布した後にシールを施工し、Cはプライマー無しでシールのみ施工した。

Table 2 梁貫通孔の試験条件
Test condition of beams with holes

仕様	ロックウール ブランケット	シール	
			プライマー処理
A	なし	あり	あり
B		なし	—
C		あり	なし
D	あり	なし	—

Fig. 20に示すように、1本の梁試験体に6か所の貫通孔を設けた。なお、仕様Dは同じ仕様を3ヶ所とした。試験体を多目的耐火炉に設置し、3等分2点荷重により梁中央部に長期許容曲げモーメントが生じる荷重を与えながら、ISO834標準加熱温度曲線で1時間加熱した。加熱終了後も荷重したまま炉内に23時間放置した。

Fig. 19に示すように、モルタル管と荷重支持部の間の温度を各孔9点測定（小口4ヶ所×2面、中央上部1ヶ所）した。また、炉内温度と、試験体に加えた荷重および加力点での変位を測定した。

なお、判定条件は以下とした。

- ・荷重支持部が260℃未満
- ・脱炉時に表面に赤熱、残炎、発煙がない
- ・荷重支持部に炭化がない
- ・たわみ量 $\delta \leq L^2/400d = 156.25$ [mm]
- ・たわみ速度 $V_s \leq L^2/9000d = 6.94$ [mm/分]

ここで、L：梁の支点間距離 [mm]，d：梁せい [mm]。

(3) 実験結果

多目的耐火炉の観測窓から見えた範囲では、加熱開始約2分で試験体表面が燃焼し始め、その後全体が炎に覆われた。1時間で炉の加熱を終了したが、しばらくの間、試験体表面の燃焼が継続し、約78分（炉加熱停止後18分）で試験体表面の炎は消えたが、赤熱が点在した。23時間放置後の試験終了時点では、全ての測定温度が80℃以下に下降し、試験体外観に赤熱や発煙は見られなかった。

Fig. 21～24に各仕様の荷重支持部の温度を示す。その結果、仕様A、C、Dは140℃以下であり許容値の260℃と比較して十分に低かったが、仕様Bの1点のみは467℃まで上昇し、不合格となった。仕様Bはモルタル管と燃え代層のモルタルバーの間にシールを施工しておらず、その隙間から熱気が進入したことが原因と推察される。

Photo 3に試験後に解体して燃え止まり層を取り除いた状態の試験体を示す。幾つかの写真に見られる木部の汚れは煤交じりの水蒸気や水が進入した跡と推察されるが、仕様A、Cはシールを施工しており、モルタル管の端部が汚れておらずシールの効果は高いと推察される。なお、各仕様において、木部から上下に筋状に汚れが見られるが、これは熱電対配線のための溝に水蒸気や水が進入したためと推察される。

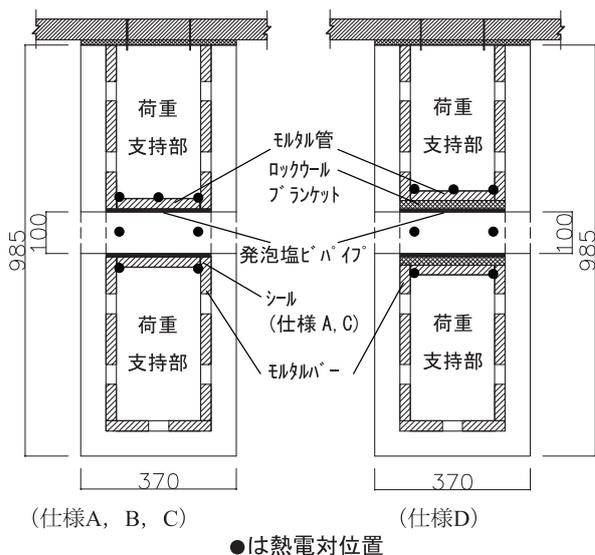


Fig. 19 梁貫通孔の断面図
 Cross-section of beams with holes

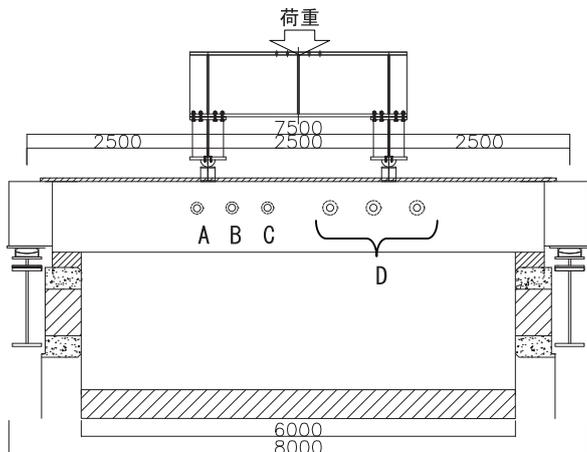


Fig. 20 試験体の設置図
 Installation of specimen in the furnace

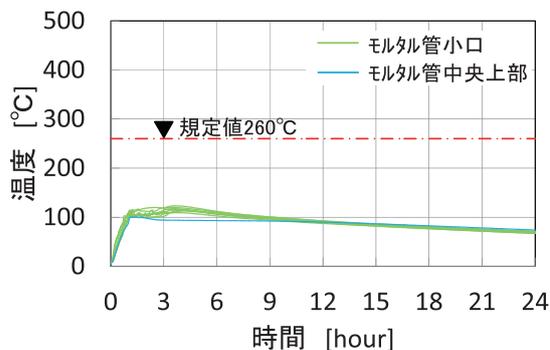


Fig. 21 仕様Aの荷重支持部の温度
 Temperature of load-bearing part (specification-A)

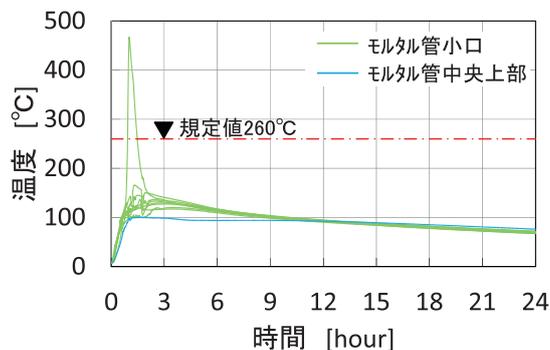


Fig. 22 仕様Bの荷重支持部の温度
 Temperature of load-bearing part (specification-B)

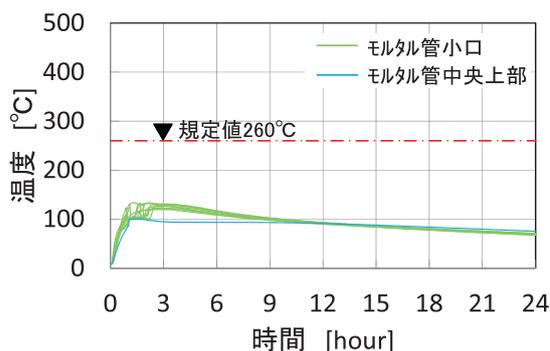


Fig. 23 仕様Cの荷重支持部の温度
 Temperature of load-bearing part (specification-C)

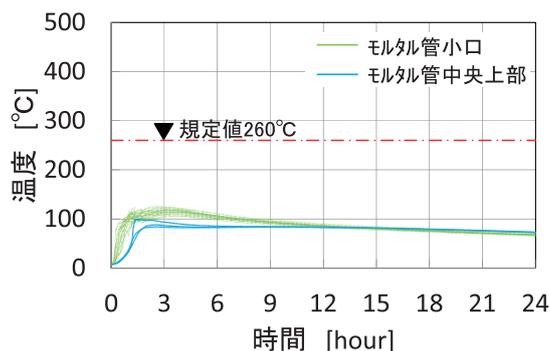


Fig. 24 仕様Dの荷重支持部の温度
 Temperature of load-bearing part (specification-D)

Fig. 25によると、梁加力点のたわみ量は10.7mmで許容値の7%弱、たわみ速度は最大0.61mm/分で許容値の9%弱と十分に余裕があった。よって、梁の荷重支持能力は低下していないと判断される。以上の結果、仕様B以外は1時間耐火性能を有することが分かった。

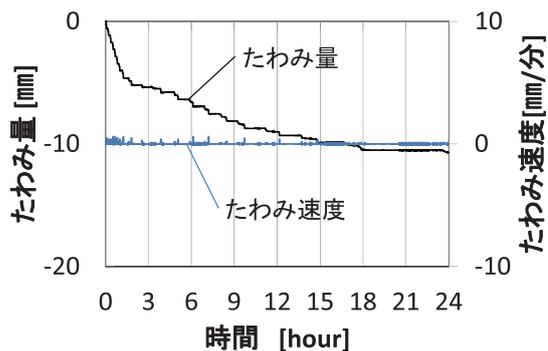


Fig. 25 梁加力点のたわみ
Deflection of load application point

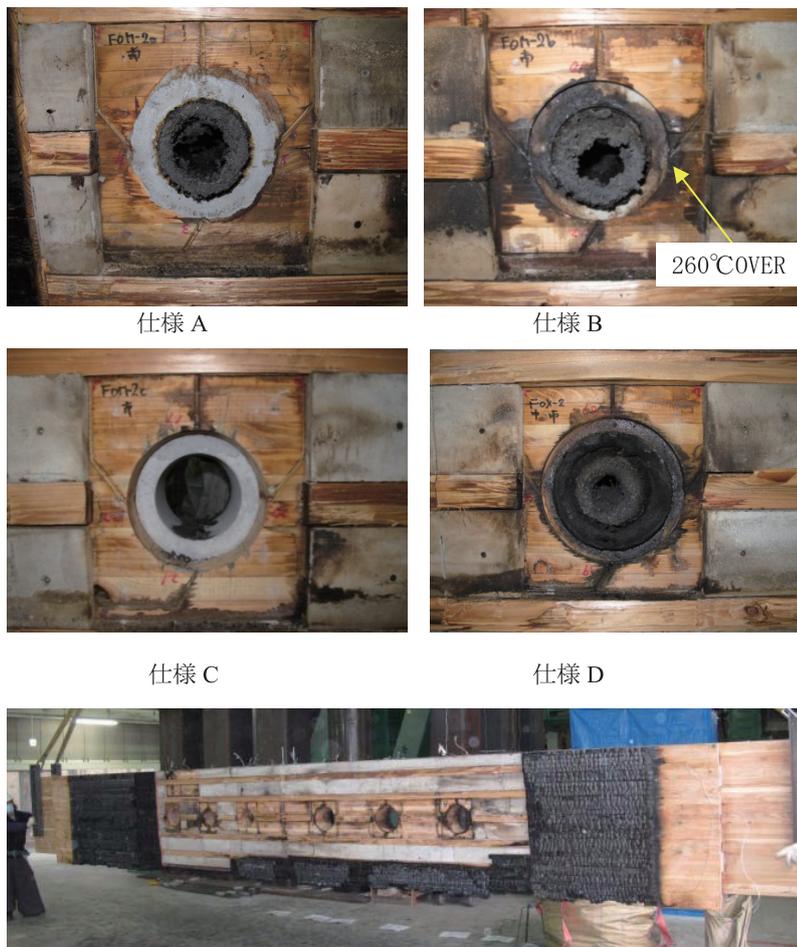


Photo 3 試験後の燃え止り層除去後の様子
Specimen after burning test (charcoal surface removed)

(4) 考察

仕様Bは一部の荷重支持部温度が許容値を超えており不合格となり、仕様Dはロックウールブランケットの分荷重支持部の欠損が大きく構造的に不利である。仕様AとCはいずれも耐火性能を十分に有すると判断できるが、プライマーが無い仕様Cが施工上優れていると考えられる。

以上の結果、木現し木質構造梁に、貫通孔を設ける場合には、下記の仕様が適すると判断した。

- ・貫通孔内部に熱吸収体であるモルタル管を設置
- ・モルタル管小口にシール処理（プライマー不要）
- ・モルタル管内部に熱発泡性塩ビパイプを設置

2.4 防火区画壁の取り合い部の開発 Development of Fire Resisting Partition Walls

(1) はじめに

万一火災が発生した場合に、延焼拡大を防止し、階段等の避難経路を防護するために、建物内に防火区画が設けられる。防火区画は耐火造の柱・梁・床・壁と、防火設備（防火扉、防火シャッター、防火ダンパー）等によって形成される。特に、壁としては施工の容易さとコスト、仕上がりを考慮して、軽量鉄骨下地（LGS）と石膏ボードで構成された乾式耐火壁を採用することが多い。乾式耐火壁の周囲を木現し耐火木造の柱や梁とした場合、柱や梁の燃え代層と乾式耐火壁が取り合うことになり、防火区画された一方の区画が火災になった際に柱や梁の燃え代層が燃え抜けて、非火災区画に延焼が及ぶことが懸念される。そこで加熱実験⁷⁾を実施して遮炎性能を確認することとした。

(2) 実験内容

Fig. 26に示すように、3700×3600mmの構成フレームに、2.1節に記述した耐火木造の柱と梁をT字型に設置し、その柱の左右に2体の試験体を設置した。試験体は、乾式耐火壁（吉野石膏S12目透かし：強化石膏ボード（以下GB-F）両面2枚張りの1時間耐火の性能を有する仕様）とし、乾式耐火壁と耐火木造の柱および梁との取り合い部の補強方法を、Table 3, Fig. 27に示すように、異なる仕様とした。試験体AではLGSを留め付けるコースレッドの長さを長くした以外は通常の乾式耐火壁と同様の納まりとし、試験体BではLGSと耐火木造の柱・梁との間にGB-Fを挿入し、さらに梁以外に柱にもLGSをコースレッドで留め付け、梁のコースレッドに関しては千鳥で留め付けるといった補強を行った。

Table 3 取り合い部の補強方法
 Reinforcement of connections between beam/column and fire resisting partition walls

試験体	柱	梁
A	補強なし	・コースレッド（L51, 中心）
B	・スタッドと柱の間にGB-Ft12.5mm挿入 ・コースレッド（L65, 中心）	・ランナーと梁の間にGB-Ft12.5mm挿入 ・コースレッド（L65, 千鳥）

なお、耐火木造の柱・梁は全断面を再現しておらず、2.2節で示した仕様で接合することができないため、非加熱側をC型鋼で固定し、柱と梁の間の隙間をロックウールと耐火シールで塞いだ。Photo 4に試験前の試験体加熱面の状況を示す。

2体の試験体を同時に、ISO834標準加熱温度曲線で1時間加熱し、その後、炉内で23時間放置した。なお、試験体Aは加熱終了後放置中に非加熱面へ燃え抜けた（1時間52分）ため、水をかけて消火し、Photo 5に示すように耐火材にて養生を行った。

試験体の非加熱面温度（K型ディスク熱電対φ0.64）、耐火木造部材の内部温度・荷重支持部表面温度・耐火木造部材と壁の取り合い部の温度・各部の非加熱面シール材温度（K型熱電対φ0.64）を測定した。また、適宜、写真およびビデオ撮影を行った。耐火性能は加熱時間中および放置時間中の試験体非加熱面の温度上昇（最高180K、平均140K）、燃え抜けの有無で判定した。なお、実験は公益財団法人日本住宅・木材技術センターの壁炉で実施した。

(3) 実験結果

Table 4に実験結果を、Photo 6～8に実験後の柱・梁の断面を示す。また、Fig. 28～29に梁と耐火壁の取り合い部

Table 4 実験結果
 Test results

判定基準	試験体A	試験体B
裏面温度	平均140K以下 OK 2点が180K以上NG	平均140K以下 OK 最高180K以下 OK
火炎噴出	非加熱側へ燃え抜けNG	火炎の噴出なし OK
発炎	非加熱側へ燃え抜けNG	発炎なし OK
亀裂・損傷	非加熱側へ燃え抜けNG	亀裂等の損傷なし OK
耐火性能	なし	あり

分の温度を示す。

試験体AはPhoto 6~7に示すように、壁裏面付近まで燃え代層が炭化した。またFig. 28によると、深さ85mmまで260℃を超えており、この深さ以上に炭化したことが分かる。

一方、試験体BはPhoto 6, 8に示すように、壁裏面まで燃え代層の炭化は到達しなかった。Fig. 29によると、深さ45mmまで260℃を超えているが、65mmでは260℃を超えておらず、そこまでは炭化しなかったことが分かる。

試験体Aは耐火木造部材と耐火壁との取り合い部で燃え抜け、遮炎性能が無く、判定条件を満たさなかった。一方、試験体Bは遮熱・遮炎性能を満足しており、耐火性能を有すると言える。

試験体Bは取り合い部にGB-Fを挿入しており、燃え代層が赤熱燃焼した際にGB-Fの熱容量と水分の潜熱により、赤熱燃焼の継続を断ち切ったことにより燃え抜けが防止できたと推察される。

また、目視観察によると加熱開始50分で試験体Aの乾式耐火壁が加熱側に面外変形し、耐火木造柱と取り合う乾式耐火壁のこば面が一部（目視ではボード厚さ程度）炉内に露出した。乾式耐火壁の非加熱面温度は試験体AとBで大きな差が無いことから、この面外変形により乾式耐火壁内部に多量の熱が進入した可能性は低いと考えられるが、乾式耐火壁のLGSと耐火木造の柱の間に高温の気流が進入して燃え代層の燃え抜けを助長した可能性もあると推察され、乾式耐火壁のLGSを耐火木造の柱にコースレット等で固定することは耐火性能の向上に有効であると考えられる。

(4) まとめ

耐火木造部材と乾式耐火壁との取り合い部において燃え代層が燃え抜ける、または、取り合い部からの熱の進入により非加熱側表面温度が上昇するなどの懸念があり、耐火実験を実施して遮熱性能・遮炎性能を確認した。

実験の結果、取り合い部の仕様を以下とすれば、1時間耐火壁の性能を確保できることが確認できた。

- ・乾式耐火壁のLGSと耐火木造部材の間に強化石膏ボード（GB-F）t12.5mmを挿入する。
- ・乾式耐火壁のLGSを強化石膏ボードと共に耐火木造の柱にも固定する。
- ・コースレット等の配置は壁芯配置（ただし、炭化深さが壁芯を超えないことが条件）または千鳥配置とする。

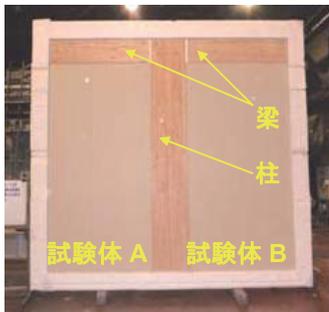


Photo 4 加熱面（加熱前）
Heated surface
(before test)

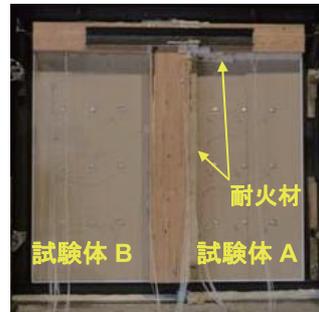


Photo 5 非加熱面（加熱後）
Non-heated surface
(after test)



Photo 6 柱断面
Cross-section of column

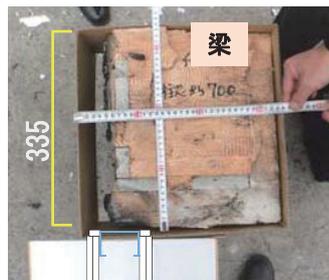


Photo 7 試験体A梁断面
Cross-section of beam
(specimen-A)

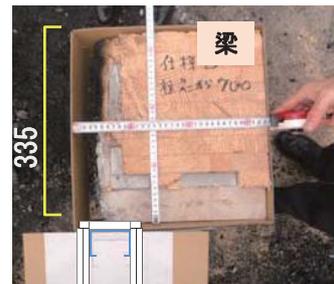


Photo 8 試験体B梁断面
Cross-section of beam
(specimen-B)

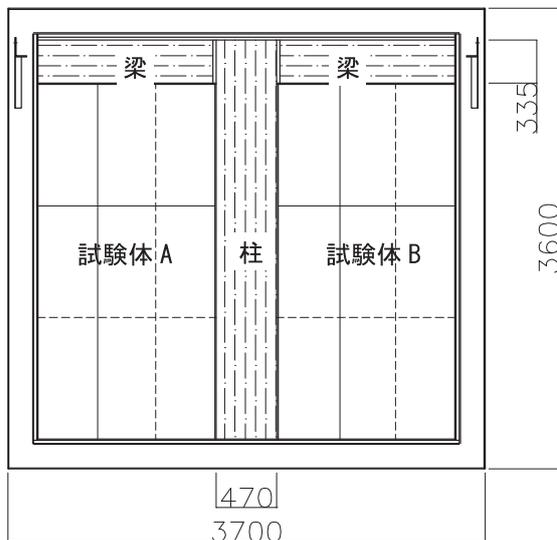


Fig. 26 試験体図
 Specimen of connections between beam/column
 and fire resisting partition walls

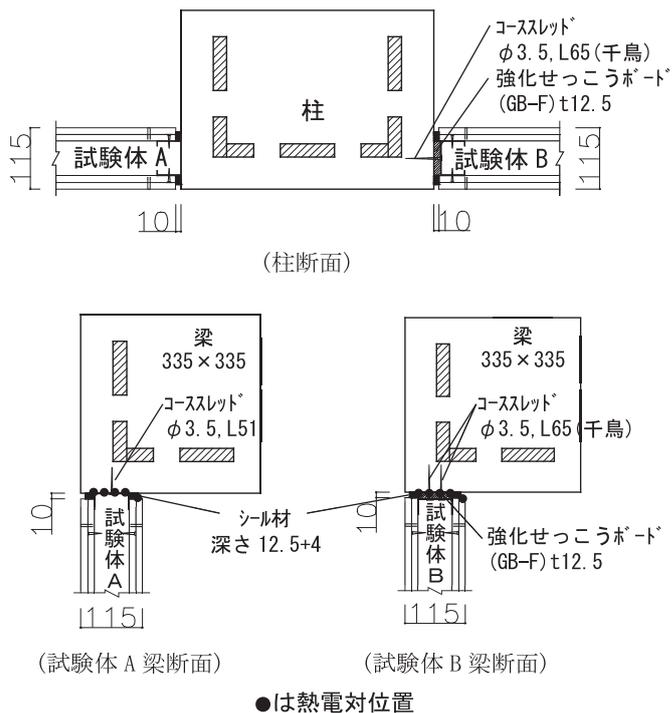


Fig. 27 試験体の取り付け部詳細
 Details of connections between beam/column and fire resisting
 partition walls

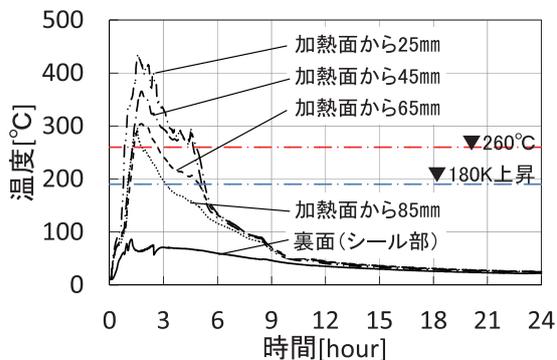


Fig. 28 試験体Aと梁の取り付け部温度
 Temperature of connections between
 beam and fire resisting partition-A

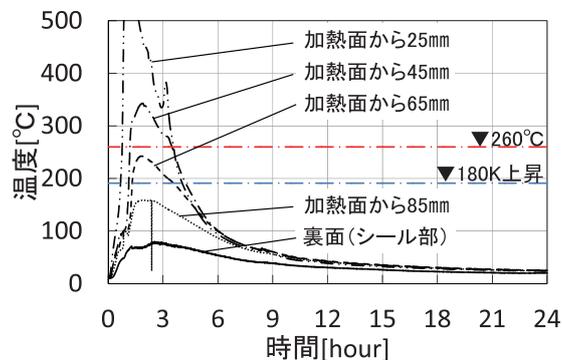


Fig. 29 試験体Bと梁の取り付け部温度
 Temperature of connections between
 beam and fire resisting partition-B

2.5 樹種拡大への取り組み

Applicability of Other Wood Types

(1) はじめに

木現し耐火木造部材（柱・梁）は、国土交通大臣認定を取得して、実際の建築物に適用されているが、いずれの認定条件も木材が単一樹種に限定されている。これにより、国内の多様な樹種による木造建築物の普及拡大の障害となっている。これは、現在のところ木材種類の違いによる耐火性能の有利・不利を判断する際の客観的な知見が不足しているためである。

また、木材の着火、燃焼および温度等と木材密度の関係を論じた既往の研究^{8), 9)}があるが、これらは材料素材を対象としており、集成材を組み合わせた構造部材を対象とはしていない。構造部材を対象とした研究では燃え代設計に寄与したもの^{10), 11)}や、耐火構造部材を扱ったもの¹²⁾はあるが木材密度と耐火性能の関連を扱ったものはない。

そこで、荷重支持部に用いる木材種類（樹種）の違いによる耐火性能への影響を把握し、今後の耐火認定における樹種拡大に資することを目的として、実験的研究¹³⁾を行った。

(2) 耐火性能実験

試験体はFig. 30の断面の柱状の試験体とし、燃え代層と燃え止まり層はカラマツとし、荷重支持部の樹種をパラメータとした。荷重支持部の樹種は、国産針葉樹の中から低密度のスギ、高密度のスギ、ヒノキ、カラマツの4種類とし、n=2で計8体とした。Table 5に試験体の一覧を示す。なお、これらの木材の密度は359～522kg/m³の範囲であった。また、2体の試験体を上下に積み、それらを試験炉に2セット設置することにより、一度の加熱で4体の試験体を同時に実験した。Table 6に加熱時の試験体の組み合わせを示す。

Table 5 試験体一覧
Specimen

試験体	荷重支持部の樹種	密度 (kg/m ³)	含水率 (%)	繰返し数
スギ (密度小)	杉集成材	373	9.9	2
スギ (密度大)	杉集成材	477	11.8	2
ヒノキ	檜集成材	462	10.3	2
カラマツ	唐松集成材	515	10.3	2

Table 6 試験体の組み合わせ
Combination of specimen

	1回目の加熱実験		2回目の加熱実験	
上	スギ (密度大)	スギ (密度小)	カラマツ	ヒノキ
下	カラマツ	ヒノキ	スギ (密度大)	スギ (密度小)

ISO834標準加熱温度曲線で1時間加熱した後、炉内に24時間放置した。実験終了時に目視で燃え止まりを確認して実験を終了した。試験体内部温度をFig. 31に示すように各試験体の2断面で、Fig. 30に示す10点で、K型熱電対φ0.32を用いて測定した。

(3) 実験結果と考察

Fig. 32に各試験体の6時間までの内部温度を示す。さらに、Table 7に荷重支持部表面の到達温度を表す。ここで到達温度とは、荷重支持部表面であればFig. 30に示す10ヶ所の計測点が達した最高温度の平均値である。耐火認定試験において合否の鍵を握る荷重支持部表面の到達温度について、樹種による違いは10℃以下であり、樹種による影響は小さいといえる。

さらに、荷重支持部表面の到達温度と荷重支持部の木材密度の関係をFig. 33に示す。前述の通り木材密度は到達温度に対して大きく影響を与えるパラメータでないが、若干の負の相関を持っていることが分かる。すなわち木現し耐火木造部材の耐火試験において、荷重支持部については密度が小さな木材を試験体として試験すれば、安全側の試験（危険側の条件設定）が行えると言える。

(4) まとめ

これまで、木現し耐火木造部材の国土交通大臣認定は、単一樹種に限定されていたが、今後は荷重支持部については密度を条件にして多樹種の耐火性能を評価できることが分かった。なお、今回の実験範囲は、国産針葉樹で木材密度が359～522kg/m³である。

Table 7 荷重支持部表面の到達温度
 Maximum temperature of load-bearing part

試験体	加熱実験の順番	荷重支持部表面の到達温度 (°C)
スギ (密度小)	1回目	102.3
	2回目	107.1
スギ (密度大)	1回目	98.5
	2回目	103.0
ヒノキ	1回目	103.9
	2回目	100.3
カラマツ	1回目	100.0
	2回目	100.2

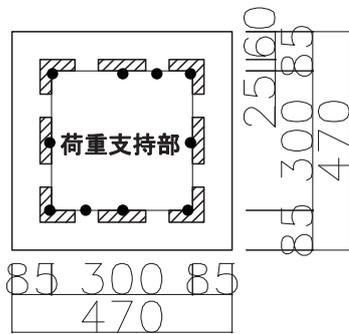


Fig. 30 試験体断面および温度測定位置
 Cross-section of specimen and points of temperature measurement

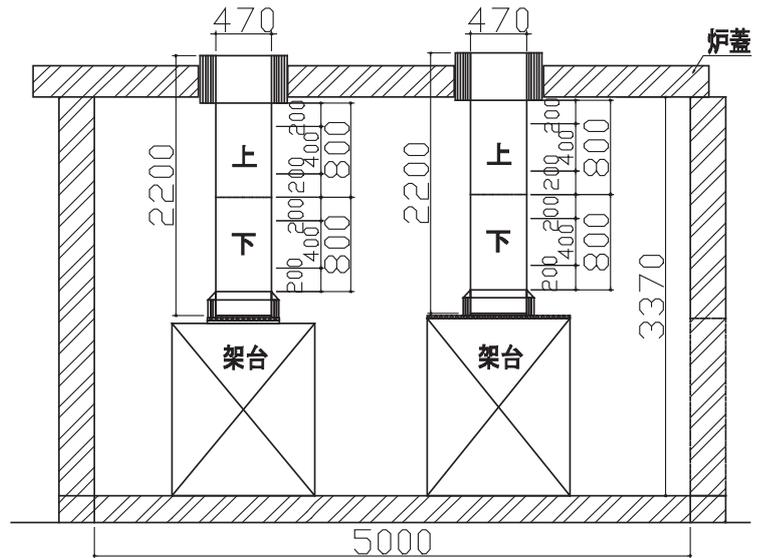


Fig. 31 各試験体の温度測定位置
 Height of temperature measurement

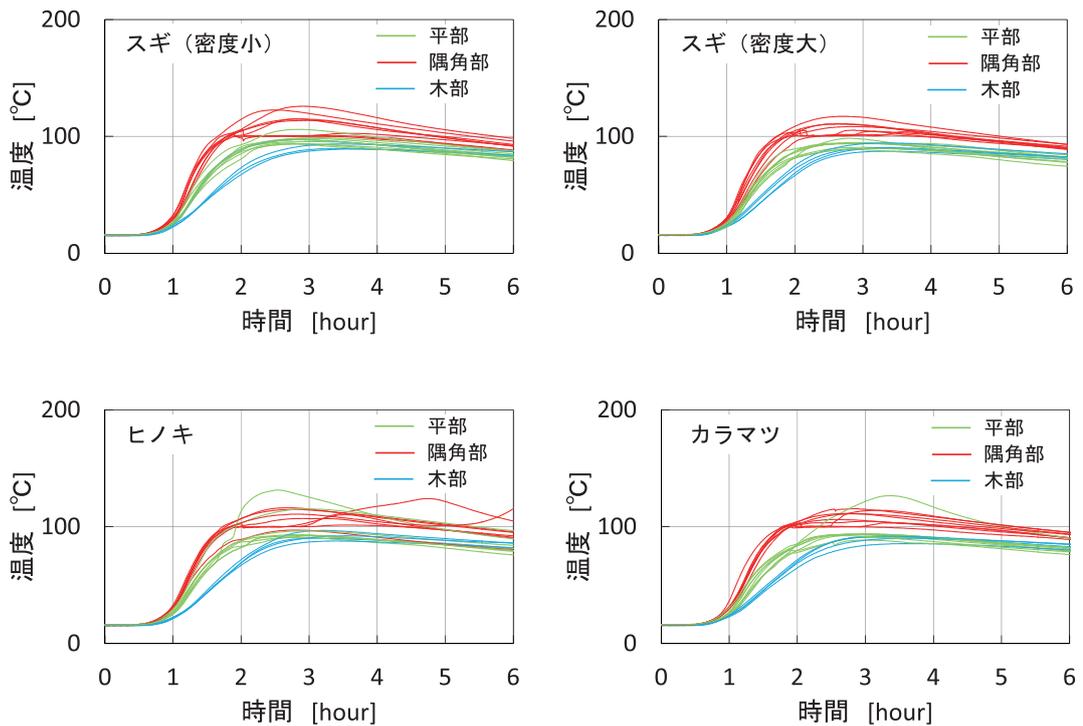


Fig. 32 荷重支持部表面の温度 (各樹種とも1回目の実験の結果を代表して示した)
 Temperature of load-bearing part (illustrations only first time test)

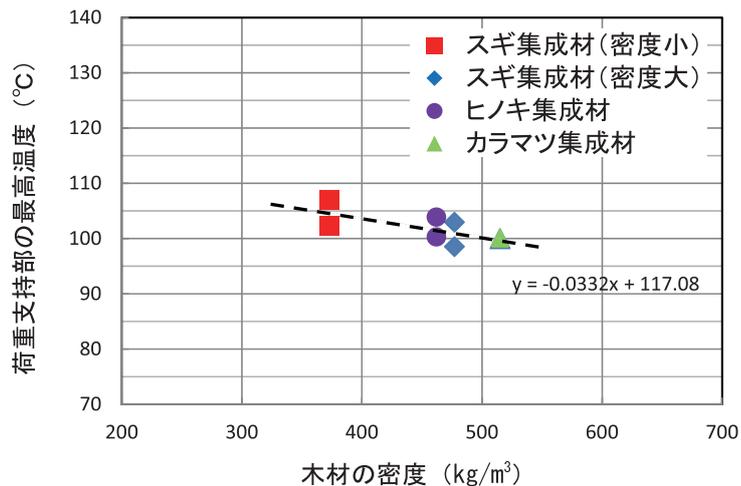


Fig. 33 木材の密度と荷重支持部表面温度の関係
Relationship between wood density and load-bearing part temperature

参考文献

- 1) 安部 裕, 他: 耐火性能を有する木質構造部材の開発, 竹中技術研究報告, No.62, 2006.
- 2) 岡日出夫, 他: モルタルを内蔵したスギ集成材の燃え止まりに関する研究, 竹中技術研究報告, No.64, 2008.
- 3) 岡日出夫, 他: 環境にやさしく火災に強い木造建築を目指して一国产スギを用いた耐火集成材の開発, 竹中技術研究報告, No.65, 2009.
- 4) 例えば, 一般財団法人 ベターリビングおよび財団法人建材試験センター: 防耐火性能試験・評価業務方法書.
- 5) 大橋宏和, 他: 耐火木造部材の耐火性能に関する研究 その1~2, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-2, 2012.
- 6) 永盛洋樹, 他: 耐火木造部材の耐火性能に関する研究 その5 貫通孔を有する梁の裁可加熱実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-2, 2013.
- 7) 永盛洋樹, 他: 耐火木造部材の耐火性能に関する研究 その7 耐火木造部材と乾式耐火壁の取り合い部に関する遮熱性・遮炎性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-2, 2014.
- 8) 原田寿郎: 木材の燃焼性および耐火性能に関する研究, 森林総研研報 No.378, pp.1-85, 2000.
- 9) 長岡勉, 他: 木材の密度と着火時間の関係, 日本建築学会構造系論文集 第559号, pp.233-236, 2002.9.
- 10) 中村賢一, 他: 構造用集成材の耐火性能実験, 建設省建築研究所 建築研究資料 No.56, 1985.
- 11) 中村賢一, 他: 大断面木材の耐火性 (1), 木材工業 Vol.40-12, pp.563-567, 1985.
- 12) 原田寿郎, 他: 耐火集成材の開発 (その1~18), 日本建築学会大会学術梗概集 A-2, 2006~2013.
- 13) 大橋宏和, 他: 耐火木造部材の耐火性能に関する研究 その6 荷重支持部に用いる木材種類の耐火性能に与える影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-2, 2014.

3 構造関連の技術開発 Development of Structural Technology

宇佐美 徹 Tetsu Usami*1 楠 寿博 Toshihiro Kusunoki*2 栗原 嵩明 Takaaki Kurihara*3

燃エンウッドは、集成材の心材に燃え止まり層と燃え代層を有する断面を持つが (Fig. 1)、構造的にどの部分まで有効であるかや断面としての一体性に課題を持つ。それに加え、一般的に空間を広くとるのに伴い部材断面が大きくなるが、3層構造の燃エンウッドを使用する大断面木質構造ではより断面が大きくなることから、階高を抑えるために必然的に梁の貫通孔が必要となる。しかしながら、この種の研究は希薄であり設計手法がない。また、梁断面を大きくすることなく大スパン化を実現できる技術のニーズも高い。さらに柱-梁接合部や柱脚は、燃え代層や燃え止まり層の存在から接合金物とのディテールが複雑になり、かつ必要な性能を確保する必要がある。以上から、下記の項目について構造実験を実施し、力学性能を把握することとした。

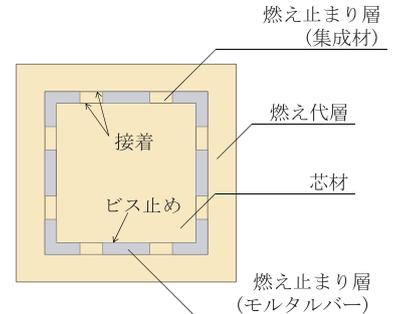


Fig. 1 燃エンウッド (柱) の断面模式図
 Cross section of fire resisting wood element

1. 燃エンウッド部材の基本的な構造性能 (圧縮性能, 曲げ性能)
2. 梁部材の設計合理化に伴う構造性能 (有孔梁, 合成梁)
3. 接合部の構造性能 (柱-梁仕口部, 柱脚)

3.1 燃エンウッド部材の基本的な構造性能 Structural Performance of Fire Resisting Wood Members

燃エンウッドは3層構造となっているが (Fig. 1)、火災後に燃え止まり層と燃え代層は構造的に機能しないと考え、現状の設計では芯材のみを構造体として利用している。しかしながら、火災に遭わなければ燃え止まり層、燃え代層により剛性や耐力が上昇すると考えられ、この性能を構造設計に見込むことで部材断面の低減が期待できる。一方、燃え止まり層のモルタルバーは芯材にビス止めされるのみで、モルタルバー周囲には1mm程度の空隙があり、また燃え止まり層はモルタルバー間の幅50mm以下の集成材部分を介してのみ芯材と接着されるので (Photo 1)、断面の一体性に疑問がある。これにより、燃え止まり層の集成材部の破壊が先行し、早期の耐力低下や燃え代層の脱落が懸念された。



Photo 1 燃え代層・燃え止まり層の接着状況
 Bonding process of surface layer and load-bearing part

そこで、実験によって燃エンウッドの基本的な構造性能を把握することにした。ここで、確認すべき事項は以下の2点である。

- ・燃エンウッド全断面の耐力・剛性が芯材断面の耐力・剛性を上回ること
- ・試験体が破壊するまで燃え止まり層が分離脱落しないこと

(1) 圧縮性能

先にも述べたが、燃エンウッド部材は芯材のみで設計を行うこととしており、柱部材では鉛直荷重がまず芯材に作用し、燃え止まり層を介して燃え代層に伝達されると想定している。圧縮実験では直接荷重を受ける芯材部の変形に燃え代層の変形が追従し、所定の構造性能が発揮されるか否かを確認した。Photo 2に加力状況を示す。上下の芯材端面を凸状にして軸力が芯材を介して燃え代層に伝達される状況を再現した。実験の結果、試験体の性能は燃エンウッドの全断面の性能には達しなかったものの、剛性、耐力ともに芯材の性能を上回ることを確認した。最終破壊は、芯材の圧壊に伴い燃え代層が押し割られ急激な耐力低下に至ったが、その段階まで燃え代層と芯材が分離することはなかった。

*1 技術研究所 構造部 架構システムグループ長 博士(工学) Group Leader, Research & Development Institute, Dr. Eng.
 *2 技術研究所 構造部 架構システムグループ 主任研究員 博士(農学) Group Chief Researcher, Research & Development Institute, Dr. Agr.
 *3 技術研究所 架構システムグループ 研究員 Researcher, Research & Development Institute



Photo 2 圧縮実験
Set up of compression test



Photo 3 最終破壊状況
Failure appearance

(2) 曲げ性能

圧縮性能に続き、曲げモーメント作用時に関しても柱、梁部材について構造実験を実施した。Photo 4に加力状況を示す。両端単純支持の二点載荷により、部材中央部に等曲げモーメントを与え、梁部材に関しては芯材のみに加力した。実験の結果、燃エンウッド全断面の曲げ耐力、曲げ剛性は芯材のそれを上回っており、燃え代層、燃え止まり層を含めた全断面が一体的に挙動していることが分かった。また、曲げ破壊により急激に耐力低下した終局状態になるまで、燃え代層が分離・脱落することもなく、燃え代層が先行して破壊することも観察されなかった。

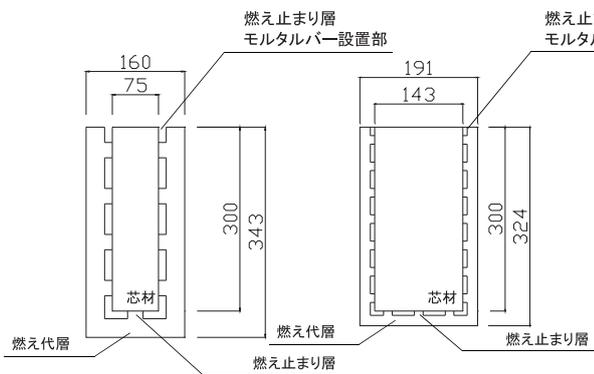


Fig. 2 梁試験体断面図
Cross section of beam specimen

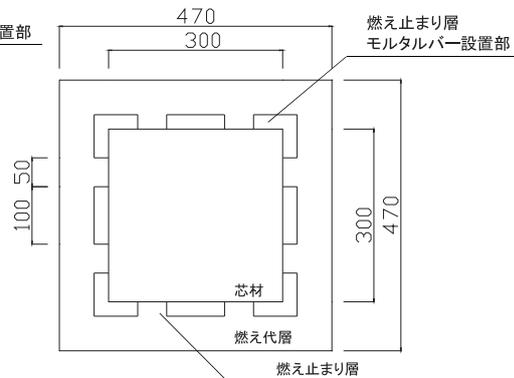


Fig. 3 柱試験体断面図
Cross section of column specimen



Photo 4 曲げ実験状況
Set up of bending test

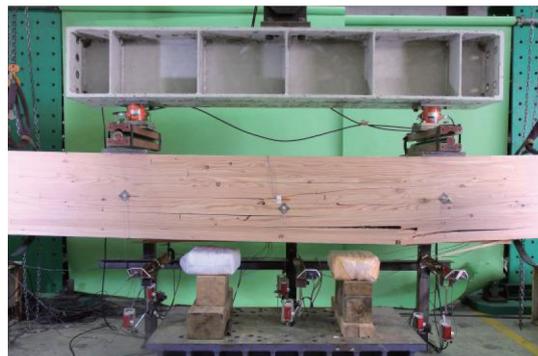


Photo 5 最終破壊状況
Cracking at failure

3.2 梁部材の合理化に伴う構造性能 Structural Performance of Beam Elements

(1) 有孔梁

規模の大きな建物を木造とする場合、空間を広く使うために柱を少なくし、スパンを大きく取ることが少なくない。この場合、必然的に梁せいが大きくなり、少しでも天井高を高く取ろうとすれば梁に貫通孔をあけて設備配管を通さざるを得ないことになる。現在までのところ、木造の有孔梁に関しては国内外の研究者によって有孔梁の強度の評価法について研究が進められ、様々な耐力算定法が提案されてきているが、世界的にオーソライズされた設計手法が存在しないのが実情である。更に、これらの既往の研究は有孔梁の基本的な条件に対して行われており、孔の数が多い場合や孔の位置が梁せいの上下に偏る場合等の特殊なケースについては、殆ど手付かずの状況にある。

当社では、燃エンウッドのような大スパンに渡す梁を対象として、比較的多くの孔を設けた場合について有孔梁の基礎的なデータを得るための曲げ強度実験を、長さ9mの実大試験体を用いて実施している (Photo 6)。



Photo 6 有孔梁の曲げ載荷実験
Set up of bending test

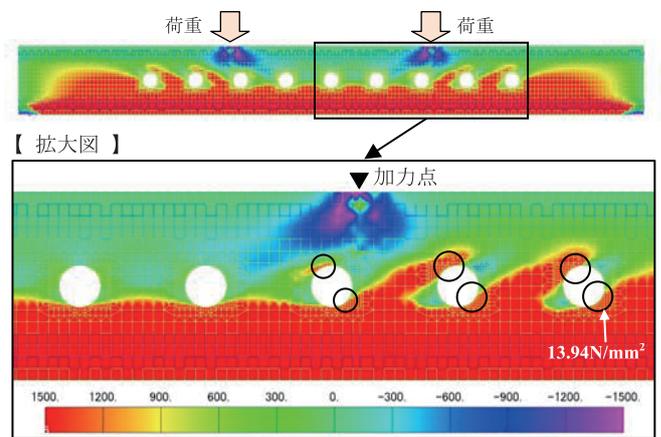


Fig. 4 有孔梁のFEM解析結果
Analytical results of FEM

この実大実験により、有孔梁に独特な破壊性状を把握することができ、孔の配置によっては孔のない梁に比べて耐力が大幅に低下することが確認できた。更にFEM解析を実施し、有孔梁の変形や応力だけではなく、ひび割れが発生する部分を概ね推定できることがわかった。Fig. 4はFEM解析による応力のコンター図である。○印の部分の引張応力が高くなっているのがわかるが、実際の試験体で割れが発生した箇所に対応している。このような新しい知見をもとに、現在、有孔梁の設計手法の構築に向けて検討を進めている。

(2) 合成梁

木構造による大スパン建築を実現するための技術は種々提案されているが、その一つとして集成材の梁とRCのスラブを組み合わせてT型断面の合成梁を構成する手法が挙げられる。集成材梁とRCスラブを組み合わせた構造は、構造性能の面から有利になるばかりでなく、遮音性やコンクリートの持つ熱吸収能力により防火性が向上することなど、合理的な複合方法である。特に構造面については、集成材梁の上にRCスラブが単に載っているだけの場合に比べ、両者を金属製の接合具を介して一体化した合成梁とすることで曲げに対する剛性を大幅に向上させることができる。このことは、大スパン化による集成材梁断面せいの増大を抑えることに役立ち、ひいては階高の縮小、施工コストの低減にも寄与しうる特長となる。

木材(集成材を含む)の梁とRCスラブを組み合わせた合成梁は、海外でも一般的にみられる工法であり、通常は木材梁上面に切り欠きや穴を設けてコンクリートとの勘合を期待するものや、ラグスクリュー等の接合具あるいは切り欠きと接合具を一緒に用いる複合型などの機械的な接合法により接合される。梁には集成材やLVL(単板積層材)などの木質材料が一般に用いられ、木造建築の他、木橋にも適用されている。ヨーロッパでは多くの実験や解析的な研究が行われており、Eurocode 5(木構造)では、付録の技術情報として合成梁の簡易計算法が示されているが、世界的にオーソライズされているとは言い難い。我が国においても若干の研究があるものの成果の蓄積は僅かで、今後合成梁の普及のために設計法の確立が望まれている。

当社では合成梁の特長のうち、特に断面の縮小に寄与しうる「剛性の向上」に注目して、集成材梁とRCスラブ

の接合方法を含めた技術開発を行うこととなった。合成梁の力学的な特性は、集成材梁とRCスラブの境界で両者を一体化する接合方法の力学特性に大きく依存するため、技術開発では数種類の接合方法を取り上げて基礎的な強度性能実験を実施した。その結果だけではなく、最終的に施工性やコストも含めて最適な接合方法を選定した。引き続き、選定した接合方法を用いた実大の合成梁を製作し、曲げ载荷実験を実施して強度および剛性を確認した。併せて有限要素法解析を実施して実験結果との対応を調べ、解析により合成梁の挙動を精度よく追跡できることを確認した。Photo 6に合成梁の曲げ载荷実験の装置構成を示す。合成梁の载荷スパンは9m（集成材梁長さ10m）である。Photo 8は接合部の構成である。直径75mm、深さ50mmの座彫りの中にラグスクリュー（M20）を深さ150mmまでねじ込んでいる。Photo 9は破壊状況の例である。結果として、合成梁とすることで集成材梁のみの場合に比べ、曲げ剛性が約3倍、曲げ耐力が約2倍に向上することが明らかとなった。図2は集成材梁とRCスラブの境界（接合部）における両者間の軸方向の相対変位（滑り）について、実験結果と有限要素法解析の結果を比較したものの例である。荷重は合成梁が弾性範囲内にある時点のものであるが、精度よく対応していることがわかる。

一方、この合成梁の構造計算方法についても検討を行い、新しい設計手法を作成した。現在、この設計手法について技術認定取得のための手続きを進めている。また、長期的な曲げ変形性状を把握するためのクリープ実験も実施中である（Photo 10）。

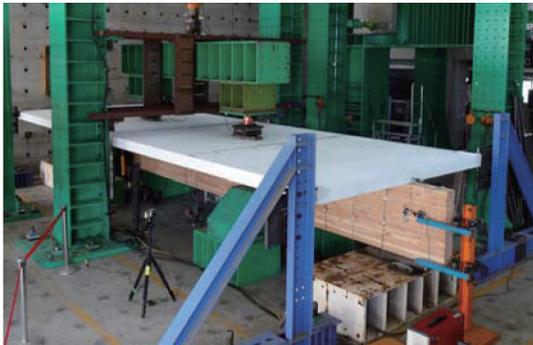


Photo 7 合成梁の曲げ载荷実験
Set up of bending test



Photo 8 接合部
Joint part



Photo 9 合成梁の破壊状況
Failure appearance



Photo 10 合成梁の曲げクリープ実験
Set up of bending creep test

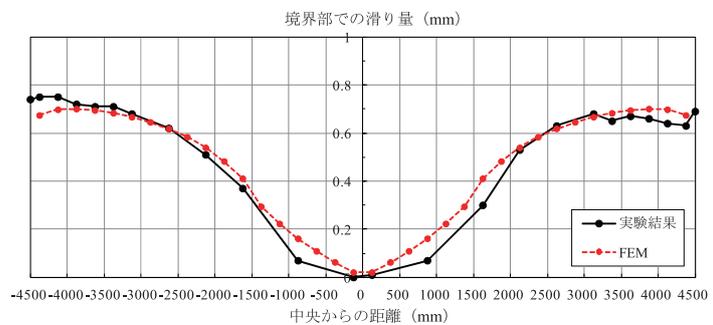


Fig. 5 集成材梁とRCスラブ境界での滑り量
Comparison of slip deformation at the interlayer between concrete slab and glulam

3.3 接合部の構造性能

Structural Performance of Joint Parts

(1) 柱－梁仕口部

耐火建築物では柱、梁といった部材のみならず接合部にも耐火性能が求められるのは言うまでもない。燃エンウッドについては、燃え代層が交錯する部分に接合金物をどう取め、設計上十分な接合性能を確保するかが大きな課題となる。検討の結果、梁端部は挿入鋼板式のドリフトピン接合とし、その挿入鋼板（ガセットプレート）には柱に引きボルトで固定するための直交鋼板を溶接し、T型接合金物とする新しい接合方法を考案した。Fig. 6に接合部構成を示す。柱梁接合部はボルトやドリフトピンといった接合具を用いるのが一般的であるが、特に前者の場合、ボルト端部が部材外部に現しになることが多く、耐火性能の観点で問題となる。新たに考案した接合部では、引きボルトとなる柱貫通ボルトの端部が燃え止まり層内に出ないように、柱の芯材内に収まる構成とした。梁は、柱貫通ボルトで柱に固定されたT型接合金物を介してドリフトピンにより固定されるが、ドリフトピンは梁外面（燃え止まり層の表側）から芯材内まで打ち込めるように燃え止まり層を貫通する通し孔をあけ、ドリフトピン打ち込み後に通し孔に木栓を打ち込んでいる。また、梁側のT型钢材の収まりについても、燃え止まり層の耐火性能が保持される構成とした。

この接合部は9mスパンを渡す長大燃エンウッド梁の接合部を想定しており、その構造上の安全性を確認するために実大の試験体を使用して曲げ剛性や曲げ耐力等の構造性能を確認することが必要となった。実験では実際のプロジェクトを想定して、具体的に接合部に求められた次の設計条件を満足することを確認した。

- ①柱梁部材および接合部が一次設計範囲（変形角1/200rad以下）では弾性状態にあること
- ②終局状態（変形角1/50rad）まで耐力が低下しないこと
- ③変形角1/10まで脆性的な破壊に至らないこと

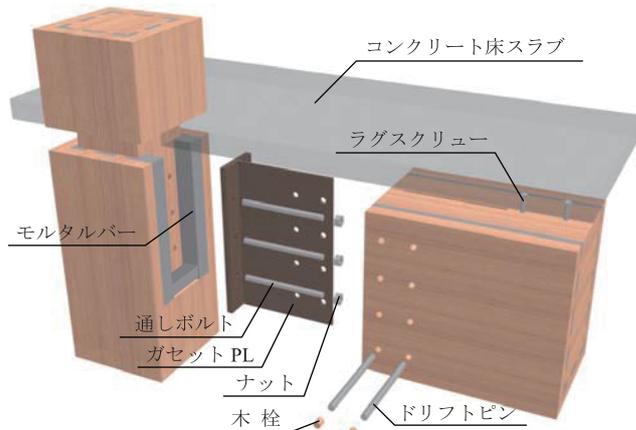


Fig. 6 接合部の構成
 Components of column-beam joint



Photo 11 接合部の曲げ載荷実験
 Bending test setup of joint part

(2) 柱 脚

燃エンウッド部材を用いて軸組架構を構築する場合、柱と基礎と連結する柱脚接合部をどのように構成するかが一つの大きな課題である。一般的な集成材軸組架構の場合、柱脚はボルトあるいはドリフトピンと挿入鋼板の組み合わせによる接合方法が用いられることが多い。燃エンウッド部材でもドリフトピンを使うことは可能であるが、燃え代層を貫通して長いドリフトピンを打ち込まねばならず施工性に難が生じ、耐力も相対的に小さくなるため非効率・不経済になる。そこでラグスクリューを柱底面（木口）から打ち込む接合方法を検討することとした。検討の結果、柱脚接合部に求められる耐力に見合うラグスクリューのねじ込み長さは約500mmとなり、一般には用いられない長さのものとなった。このような長い接合具を木口からねじ込む場合、集成材に被り厚が十分ないと曲げを受けた時に割裂による破壊が生じやすくなる。ラグスクリューの径や先穴径（予めラグスクリューの径よりも小さな径の穴を木材にあけておくことが使用条件になっている）をどのように決めればよいか、また、計算通りの耐力が得られるのかなど、不明な点が多かったため、実験による確認を行うこととした。長さ500mmのラグスクリューを用いた場合の引張耐力および抜け出し剛性を接合部実験により確認し、その結果に基づいてラグスクリューの径

と先穴径を決め、次に実大の燃エンウッド柱と新たに考案した接合部金物を組み合わせた試験体による曲げ性能実験を実施した。柱脚接合部に求められた設計性能は、柱梁接合部同様にルート3（保有水平耐力計算）のRC造（もしくは鉄骨造）の設計を想定し、変形角1/50までの変形性能が確保できる（即ち、変形角1/50まで脆性的な破断や著しい耐力低下が生じない）ことであった。Fig. 7に接合部の構成を示す。ここではFig. 8に示すように、ラグスクリーユの動きを拘束しないように接合鋼板の通し孔を大きめにして中心寄りに偏心させ、厚めのワッシャーを介して留める構成を考案した（特許申請中）。この効果は十分に得られ、最大耐力以前に集成材に割裂が生じることはなく、上記の設計条件も満足することを確認した。Photo 12は最大変形時（変形角1/7.8）の状態であるが、最大耐力の約50%を保持している。

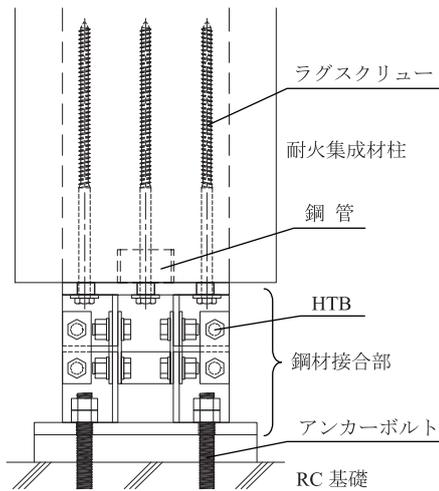


Fig. 7 接合部の構成
Detail of joint part

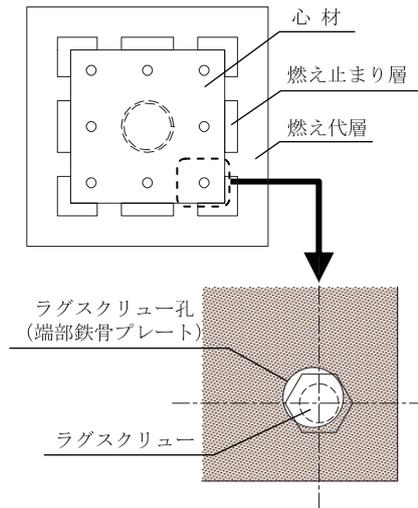


Fig. 8 ラグスクリーユ孔の配置
Eccentricity of lag-screw hole



Photo 12 接合部の曲げ載荷実験
Bending test of joint part

参考文献

- 1) 栗原嵩明, 楠寿博, 小野喜信, 麻生直木, 花井厚周, 大野正人: 「3層構造の燃え止まり型大断面耐火集成材の部材性能に関する研究 その1 柱・梁の要素実験」日本建築学会大会学術講演梗概集, 2013年9月.
- 2) 楠寿博, 大野正人, 畔柳歩: 「集成材有孔梁の構造特性に関する実験的研究」, 日本建築学会技術報告集, 2013年10月.
- 3) 畔柳歩, 楠寿博, 稲山正弘, 五十田博, 蒲池健, 北村俊夫, 鈴木創太: 「鉛直荷重を受ける集成材梁-R C床版合成梁に関する実験的研究 その1」, 日本建築学会構造系論文集, 2014年3月.

4 適用事例の紹介 Application of Technology

五十嵐 信哉 Shinya Igarashi*1 山本 秀一 Hidekazu Yamamoto*2

4.1 大阪木材仲買会館 Osaka Timber Trading Association Building

本事例は大阪木材仲買協同組合の会館の建て替え計画であり、建築主より木を随所に使用した、木の殿堂として社会へアピールできる建築を求められた。このような建築主ニーズを実現するため以下に示す事項を取入れた、これまでにない市街地の大規模木造オフィスを実施した。

【プロジェクトの特徴】

- ・本計画では耐火建築が求められるため、2～3階の木造部分に耐火集成材「燃エンウッド®」を採用した。採用箇所は述べ床面積の約50%である。
- ・構造形式は、燃エンウッド®および鉄筋コンクリートの混構造とし、地震時の設計荷重の全てを鉄筋コンクリート構造部分で負担する計画とした。また、建物北側の鉄筋コンクリート耐震壁については延焼防止機能も期待する計画とした。
- ・鉄骨造等と比べ強度や剛性の低い木造の梁により約10mスパン（支配幅2.7m）を実現するため、鉄筋コンクリート床版との一体性を考慮した合成梁として設計を行った。
- ・内装については、建物の3辺にバルコニーを配し火災時の避難安全性を高めた上でルートC避難安全検証を適用することで、不燃化処理を施していない自然の木質仕上げ材を多く採用した。

Table 1 建物概要
 Building summary

建築主	大阪木材仲買協同組合
所在地	大阪府大阪市西区南堀江4-18-10
主要用途	事務所
設計・監理	竹中工務店
施工	竹中工務店
敷地面積	1,226.40m ²
建築面積	453.27m ²
延床面積	1,032.19m ²
階数	地上3階
地域・地区	商業地域、防火地域
主体構造	木造+鉄筋コンクリート造（一部鉄骨造、鉄骨鉄筋コンクリート造）
杭・基礎	プレボーリング拡大根固め工法
工期	2012年7月～2013年3月



Photo 1 外観
 Exterior



Photo 2 事務室
 Office



Photo 3 バルコニーと事務室
 Balcony and Office



Photo 4 建方状況
 Construction

*1 先進構造エンジニアリング本部 特殊架構グループ長 Group Leader, Advanced Structural Engineering Department

*2 先進構造エンジニアリング本部 特殊架構グループ副部長 Senior Manager, Advanced Structural Engineering Department

- ・外装については、紫外線による劣化防止、メンテナンス用の軒庇を兼ねたバルコニーを設置するなどの配慮を行うことで木質材料を多く採用した。

4.2 サウスウッド Southwood

首都圏の「住みたい街」上位にランキングされ続ける横浜の港北ニュータウンは、東京の都心や横浜の都心への交通アクセスが良く、丘陵地の自然が残る住環境にある。サウスウッドは、この緑豊かな港北ニュータウンの中心にある横浜市営地下鉄センター南駅前広場のシンボルに相応しい、日本初の本造大型商業施設として計画された。

【プロジェクトの特徴】

- ・大規模複合商業施設を耐火木造建築とするため、商業スペース等の主架構に燃え止まり型の1時間耐火集成材「燃エンウッド®」の柱・梁を採用した。採用箇所は、2~4階部分の面積の約50%である。
- ・構造形式は、燃エンウッド®および鉄筋コンクリートの混構造とし、地震時の設計荷重の全てを鉄筋コンクリート構造部分で負担する計画とした。
- ・鉄骨造等に比べ強度や剛性の低い木造の梁でありながら商業施設のニーズに合致した9.0mスパン（支配幅4.5m）を実現するため、床構造には軽量かつ高強度な穴あきPC床版を採用した。
- ・燃エンウッド®の梁については、設備計画のフレキシビリティを高めるため、耐火集成材としては前例のない梁貫通技術を開発し、採用した。
- ・本施設の外装については、外部から燃エンウッド®の視認性を高めつつも燃エンウッド®の耐久性を損なわない、全面ガラス張りとした。
- ・本施設店舗の内装については燃エンウッド®を活かせるよう木質化に取り組んでいる。

Table 2 建物概要
Building summary

建築主	横浜都市みらい
所在地	神奈川県横浜市都筑区茅ヶ崎中央6-1
主要用途	ショッピングモール、事務所
設計	武松幸治+E.P.A環境変換装置建築研究所
施工	竹中工務店
敷地面積	3,507.980m ²
建築面積	2,941.73m ²
延床面積	10,874.33m ²
階数	地下1階、地上4階
地域・地区	商業地域、防火地域
主体構造	木造、鉄筋コンクリート造
杭・基礎	直接基礎一部深礎杭
工期	2012年7月~2013年9月



Photo 5 外観
Exterior

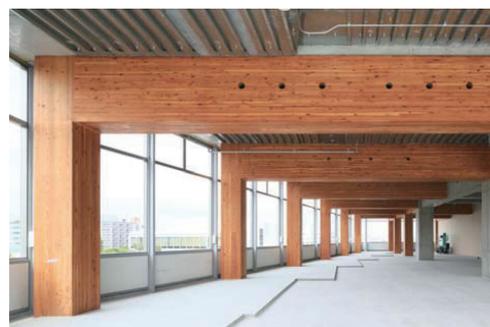


Photo 6 内観
Interior



Photo 7 建方状況
Construction



Photo 8 集成材柱（柱脚）
The column joint

5 おわりに Concluding Remarks

木村 秀樹 Hideki Kimura*¹ 長岡 勉 Tsutomu Nagaoka*²
宇佐美 徹 Tetsu Usami*³ 五十嵐 信哉 Shinya Igarashi*⁴

純木の「荷重支持部」、モルタルと木で構成された「燃え止まり層」、純木の「燃え代層」の3層で構成された新たな耐火集成材技術、この耐火集成材を適用した建築物の実現・普及に不可欠な関連技術を開発した。また、この開発成果を国内初となる防火地域での実プロジェクトに適用し大規模木造建築を実現した。本技術開発および本技術のプロジェクト適用は、サステイナブルで環境と人に優しい社会の実現に貢献できることを直感できる、新たな建築技術として社会に広くPRされ、建築分野のイメージアップに貢献すると共に、今後の市街地の大規模木造建築の道しるべになると考えている。

謝辞

本研究の一部は以下の助成・支援を受けて実施した。

- ・(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)「平成17年度 産業技術実用化開発助成事業」
- ・国土交通省「平成23・24年度 住宅・建築関連先導技術開発助成事業」
- ・東京都「平成25年度森林整備加速化・林業再生事業」
- ・林野庁「平成25年度 地域材供給倍増事業のうち木造住宅・木造公共建築物等の構造部材開発等支援事業」

*1 技術研究所 構造部長 博士(工学) General Manager, Research & Development Institute, Dr. Eng.

*2 技術研究所 構造部 防火グループ長 博士(工学) Group Leader, Research and Development Institute, Dr. Eng.

*3 技術研究所 構造部 架構システムグループ長 博士(工学) Group Leader, Research & Development Institute, Dr. Eng.

*4 先進構造エンジニアリング本部 特殊架構グループ長 Group Leader, Advanced Structural Engineering Department
