

# 木材を利用した耐火構造の技術開発

防火研究グループ 上席研究員 萩原 一郎

## 目 次

### はじめに

#### 「木質複合建築構造技術の開発」

- 1) 技術開発プロジェクトの研究目的
- 2) 防火分野の目標
- 3) 耐火試験方法と耐火構造の部材開発
- 4) 研究成果

#### 「木質複合建築構造技術の開発フォローアップ」

- 1) フォローアップの研究目的
- 2) 接合部、詳細部の耐火性能
- 3) 実大火災実験
- 4) 実大火災実験の結果

### 結語

### はじめに

我が国では、木造建築物に対する愛着は根強い。従来、木材では大断面部材の供給が困難であり構造材料としての限界、および火災時の防火性、避難安全性、都市大火を誘発する市街地火災等に対する法令上の規制があり、木材の利用は、住宅などの小規模建築物に限定される傾向があった。しかし、建設省総合技術開発プロジェクト「新木造建築技術の開発」(昭和61～平成2年)による木製防火戸等の部材開発、木造3階建て共同住宅および燃え代設計基準等々の技術開発により、建築基準法の防火規定が改正された結果、一定の性能を有する木造建築物の建築が可能となり木材の有効活用の道が開かれた。ただし、これらは防火木造、準耐火建築物に制限されてきた。2000年の建築基準法の改正では建築基準法に性能基準が導入され、合理的かつ自由度の広い防火設計が可能となり、建設省(後に国土交通省)総合技術開発プロジェクト「木質複合建築構造技術の開発」(平成11～15年度)において検討されてきた木材と他の鉄骨、コンクリート等を複合した木質ハイブリッド部材を利用した耐火建築物が実現可能となった。

ここでは、総合技術開発プロジェクト「木質複合建築構造技術の開発」(平成11～15年度)および当所で実施した「木質複合建築構造技術の開発フォローアップ」(平成16～17年度)における防火関係の研究成果を報告する。

#### 「木質複合建築構造技術の開発」

##### 1) 技術開発プロジェクトの研究目的

従来、木材では大断面の構造部材の供給は困難であったが、近年、エンジニアリングウッド(集成材に代表される工業化木質構造用材料)等の開発が行われ、大型部材の製造が可能となった。また、建築基準法の改正により、木材に対する従来の厳しい規制が緩和され、木材でも要求される性能を満たすことにより防火基準に適合させることが可能となった。すでに旧建築基準法第38条に基づく大臣認定により、木質構造によるドームなど、いくつかの大規模な木造構造物が建設されていたが、改正された建築基準法では、これらの特殊なものだけではなく、一般的な建築物にも木材の利用可能性が拡大している。

技術開発プロジェクトでは、これまでに主として構造、及び

防火分野で開発されてきた要素技術に加え、

木質材料と他の材料を複合化した木質ハイブリッド部材、  
 木材と木材を他の材料により接合した木質ハイブリッド接  
 合部、並びに木材と他の材料のハイブリッド接合部、  
 木造と他の構造を複合化した木質ハイブリッド構造

といった高性能でかつ信頼性の高い要素技術を開発するとともに、設計自由度の高い2方向ラーメン構造等を一般化し、中層事務所や大規模、大空間の木質構造建築物を構造的及び防火的に可能とすることを目的とした。木質ハイブリッド構造の普及促進を促すことになるとともに、開発技術の応用により、既存木造建築物の補強に資することが期待でき、木質構造の新たな産業基盤の発掘、さらには木材を基盤とする地域産業の活性化に貢献できる。また、木材の利用促進は二酸化炭素の削減、地球温暖化の防止にも貢献することが期待されている。防火分野の研究開発の体制を図1に示す。

2) 防火分野の目標

防火分野では、次の3項目を目標とした。

市街化区域(防火地域、準防火地域等)で、5階建て以上の木質ハイブリッド構造の事務所ビル、都市型ホテル、及び共同住宅等が、本プロジェクト終了時(現行建築基準法に適合)に建築可能となるような構造方法を見いだすとともに、性能に基づく評価法を開発する。

構造造分科会で検討されている各種構造に対して、防火規制の観点からの実現可能性を評価し、本プロジェクト終了時までには建築可能な構造方式を選択する。

木質ハイブリッド構造の普及に関して、将来の法令改正等に役立つ資料を整備し、具体案を提言する。

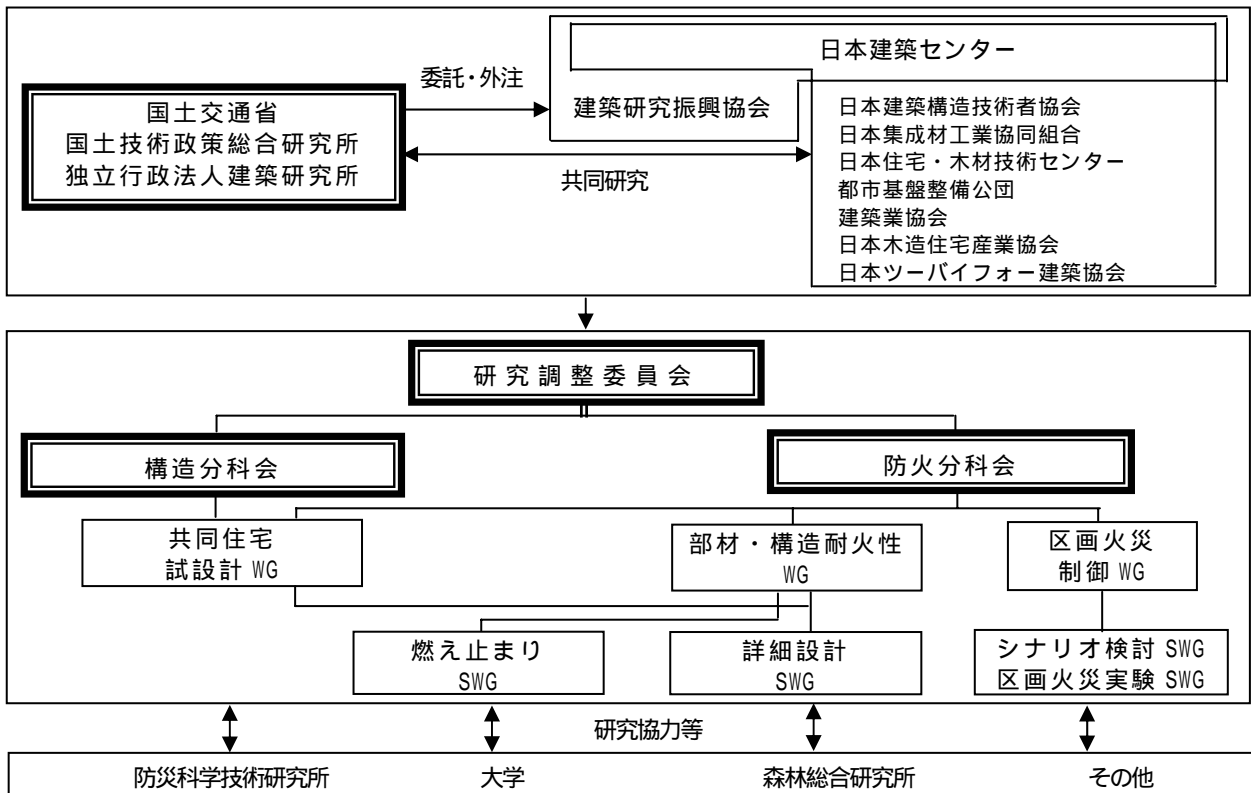


図1 技術開発プロジェクト研究体制

### 3) 耐火試験方法と耐火構造の部材開発

実験による耐火性能の検証を通じて耐火構造の部材開発を行った。建築基準法の性能規定化に対応して、耐火性能の評価基準が定められたが、木材のような可燃材料を含む部材に対して適切な試験方法が用意されていなかったため、具体的な手順を整備した。火災による加熱終了後も可燃材料の燃焼が継続することを考慮し、試験では要求される耐火時間（表 1 参照）終了後も加熱した時間の 3 倍の時間、部材を加熱炉にそのまま放置し、その後炉外に出して、炭化の進行の停止状況を観察した。

表 1 耐火構造に要求される耐火時間

建築物の階		最上階及び最上階から数えた階数が 2 以上で 4 以内の階	最上階から数えた階数が 5 以上で 14 以内の階	最上階から数えた階数が 15 以上の階
建築物の部分	間仕切り壁 (耐力壁に限る。)	1 時間	2 時間	2 時間
	外壁 (耐力壁に限る。)	1 時間	2 時間	2 時間
	柱	1 時間	2 時間	3 時間
	床	1 時間	2 時間	2 時間
	はり	1 時間	2 時間	3 時間
	屋根	30 分間		
	階段	30 分間		

#### (1) 柱等の構造部材の開発

部材の開発は大きく 2 つの工法について実施した。大断面集成材の部材を不燃材料で被覆した「被覆工法」と、集成材被覆による鉄骨構造の「燃え止まり工法」である。後者は、火災時において形成される木材の炭化層の断熱効果と鉄骨の熱容量を期待している。それぞれの工法に対して 1 時間、又は 2 時間の耐火性能を有する仕様を検討した。

#### 短柱試験体を用いた実験

検討対象となる部材には多種多様な材料の組み合わせが考えられるため、数多くの火災実験が必要になる。そこで実大規模の試験体を用いた実験を行う前に、簡便な評価として短柱の試験体を用いた実験を行った。図 2 に示すように、試験体は実寸

法の断面とし、長さ 1m の短柱とした。試験体に用いた被覆材または集成材の樹種は、杉、ベイマツ、カラマツおよびヒノキである。樹種の密度と含水率を表 2 に示す。

試験の結果、「燃え止まり工法」では、鉄骨にカラマツ集成材とベイマツ集成材で厚 60mm を被覆したものが 1 時間耐火の性能を得ることができたが、杉およびヒノキ集成材では燃え止まりの効果を得られなかった。一方「被覆工法」では、杉集成材部材の表面に強化石膏ボード厚 12.5mm を 3 層に合板厚 12mm で被覆したものは 1 時間耐火を有し、更に同じ杉集成材部材に強化石膏ボード厚 21mm の 3 層 + 強化石膏ボード厚 12.5mm の 2 層貼りの被覆したものは 2 時間の耐火性能を得ることができた。加熱試験前後の試験体の様子を図 3 に示す。

表 2 使用した木材の樹種の密度と含水率

樹種	密度(g/cm <sup>3</sup> )	含水率(%)
杉	0.39	12.0
ベイマツ	0.51	12.8
カラマツ	0.56	11.5
ヒノキ	0.47	15.3

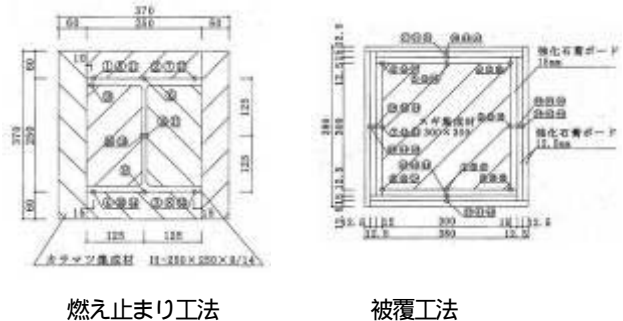


図 2 短柱試験体の例



図 3 加熱試験前後の短柱試験体

実大部材を用いた実験

短柱試験体による実験で所定の性能が得られた仕様について、  
 図4~7に示すような実大規模の試験体による実験を行った。通常行なわれる耐火構造の大臣認定と同様に、実寸法の柱、はり等の部材を用いて載荷加熱試験により性能を確認している。

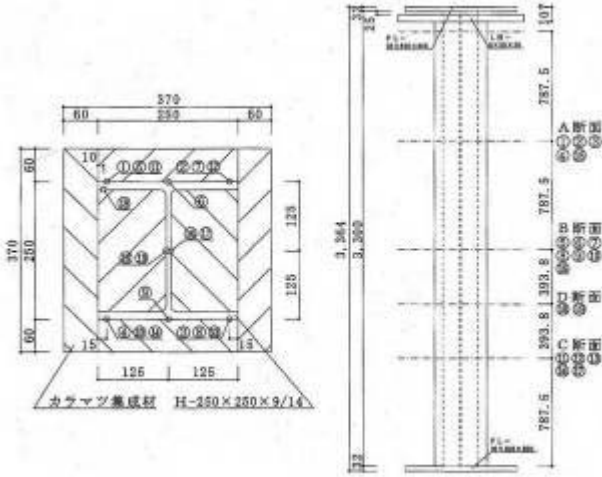


図4 柱試験体の例

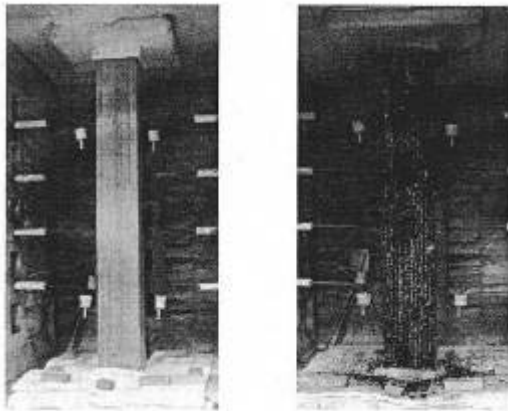


図5 載荷加熱前後の柱

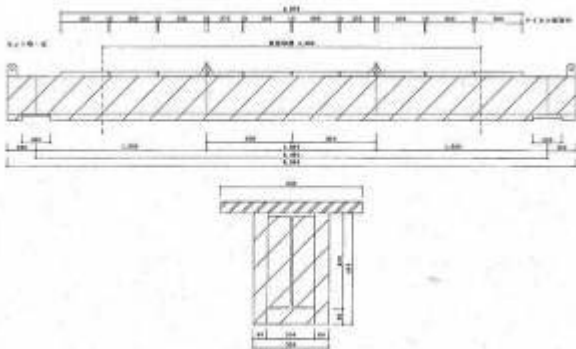


図6 はり試験体の例



図7 載荷加熱後のはり

壁、床、階段は、木材の断面が小さいことから燃え止まり効果を期待することができない。図8、9に示す枠組壁工法の部材を不燃材料で覆ったメンブレン工法の部材を用いて耐火性能を確かめる実験を行った。

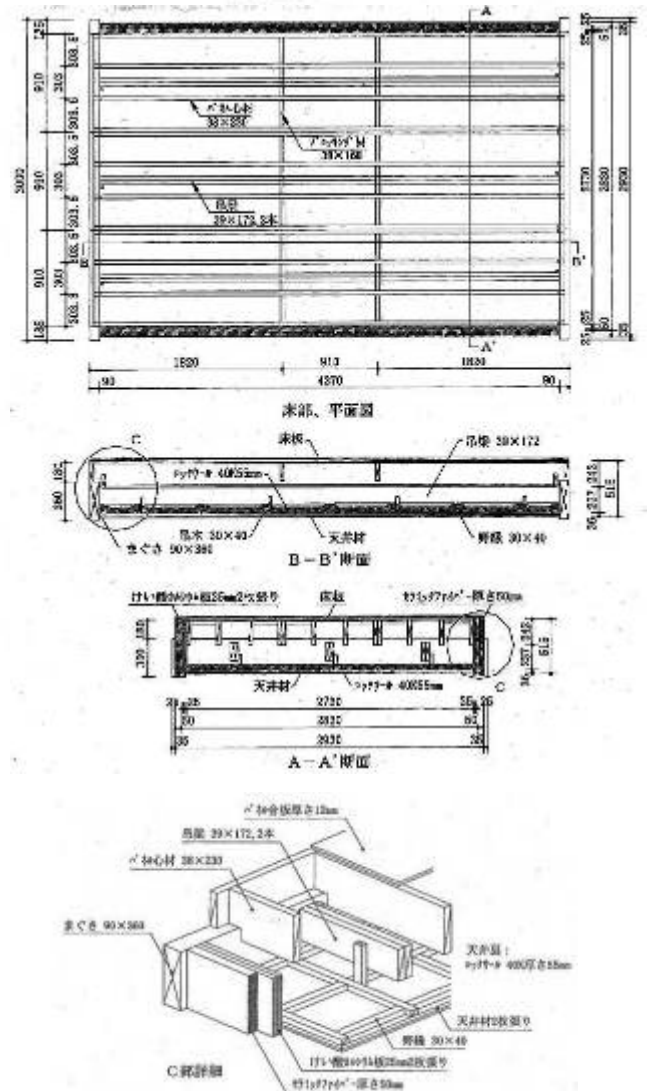


図8 床試験体の例

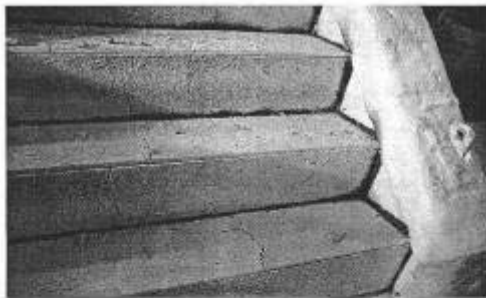
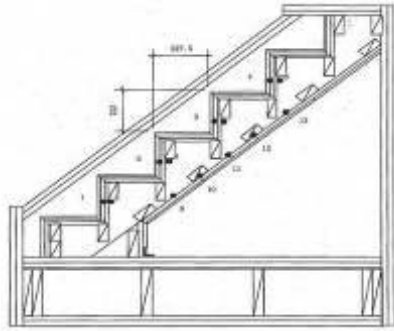


図9 載荷加熱後の階段

この状態で加熱炉の中に設置し、耐火試験を行った試験体の様子が図12である。散水により十分な水膜が形成された部分は炭化を防止する効果が現れている。

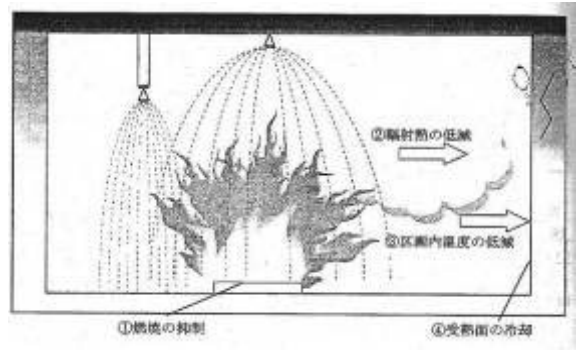


図10 火災抑制効果の概念図

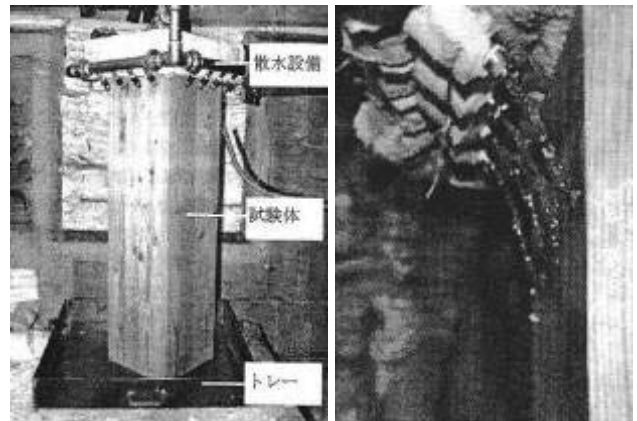


図11 散水ノズル

#### (2) 散水設備による炭化抑制効果の検討

防火設備あるいは消火設備により建物内で発生した火災の拡大を防ぐことは、火災安全上重要な意味を持つ。このような設備は多種多様であるが、火災抑制などの効果を概念的に整理すると図10に示すように、可燃物の燃焼の抑制あるいは消火、火炎からの輻射熱の低減、区画内温度の低下による対流熱の低減、構造部材の冷却等があげられる。本研究では、特にに着目し、散水設備の作動時における木質系構造部材の炭化性状などを明らかにすることを目的とした実験を実施した。

ここでいう散水設備とは、部材の表面に沿って水膜が形成されるよう散水する設備であり、木材の炭化を抑制し、木質構造部材の耐火性能を確保することを意図している。図11は、集材材柱の上部に散水ノズルを取り付けて、一定量の水を柱に沿って流している状態である。

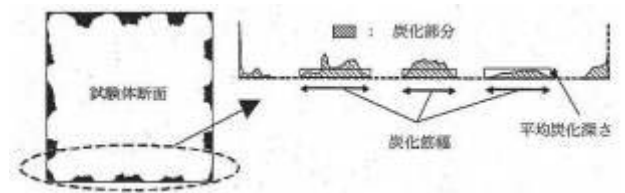


図12 散水設備による炭化抑制効果

#### 4) 研究成果

耐火建築物を構成する耐火構造の基本的な部材の仕様を明らかにした。また、本稿では割愛したが、これらの部材を用いた共同住宅設計ケーススタディを行うとともに、燃え止まり現象を明らかにするため熱伝導解析による予測手法等の検討を行っている。

## 「木質複合建築構造技術の開発フォローアップ」

### 1) フォローアップの研究目的

これまでの成果を踏まえ、主として「燃え止まり部材」の実用化に関する問題を解決するため、以下の 1)～8)に示す研究開発課題を設定した。

- 1) 燃え止まり部材の抵抗機構と破壊モードの検討
- 2) 燃え止まり部材の接合部における耐火性能試験
- 3) 燃え止まり部材及び接合部の典型的な仕様の開発
- 4) 構造部材としての応力伝達機構や燃え止まるメカニズムを踏まえた製造管理手法や組み合わせる部材の条件の検討
- 5) 燃え止まり部材の廃棄手法と再利用方法の開発
- 6) 新規提案部材の評価法・試験法の開発と評価項目の同等性の検討
- 7) 接着部分の耐久性などの長期的性能に関する検討
- 8) 各部のおさまりを含む詳細設計と試設計例の作成

### 2) 接合部、詳細部の耐火性能

一般の不燃材料で構成される耐火構造と異なり、木質ハイブリット構造の燃え止まり工法の特徴は、火災時に部材の炭化による断面欠損が進行する点である。柱、はり部材と壁構造部材若しくは床構造部材との取り付け部において、断面欠損が進行し、生じた隙間から燃え抜け、延焼拡大が生じることが危惧される。また、柱とはり部材の接合部、はり部材に生じるボルト接合の収まり、スイッチ、コンセントボックスのかき込み部等の防火対策が重要である。これらの防火対策の有効性については、実験により確認を行っている。

#### ボルト接合部分の耐火性能

柱とはり部材間の接合部およびはり部材での接合部は、通常ボルトによる接合が用いられる。燃え代設計では、概ね厚さ 60mm 以上の集成材による鉄骨被覆が行われるが、接合部ではボルトの頭およびプレートの厚み分だけ図 13 の様な切り込みが行われるため、耐火性能が十分に確保されない恐れがあり、燃え止まり効果も失われることが予想される。図 14 に示す実大はり部材にボルト接合を施し、載荷加熱に基づいて燃え止まりおよび構造耐力についての確認を行った。



図 13 ボルト接合部分の耐火被覆

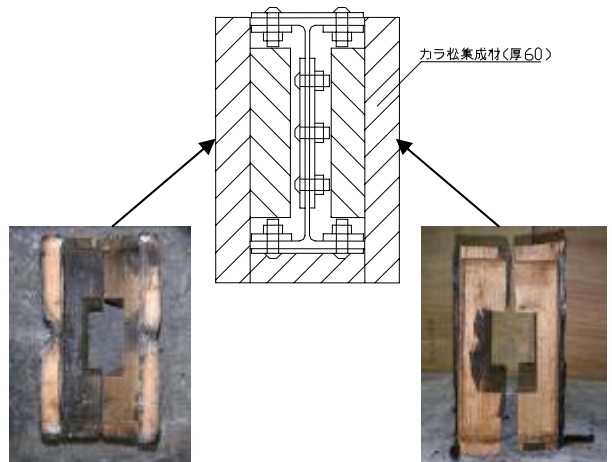


図 14 はりボルト接合の試験体と載荷加熱後の炭化状況

コンセント、スイッチボックス部分の耐火性能

コンセントやスイッチボックスが取り付けられた壁の場合、耐火被覆の切り込み部分などから壁内部に火炎が進入し、壁の耐火性能を著しく低下させたり、延焼拡大を助長させる恐れがある。取り付け部分には表3に示す防火処理を行い、耐火性能を確認する実験を行った。

図15はロックウールによって防火処理を行った例であるが、下地の枠組み部材の炭化は認められなかった。

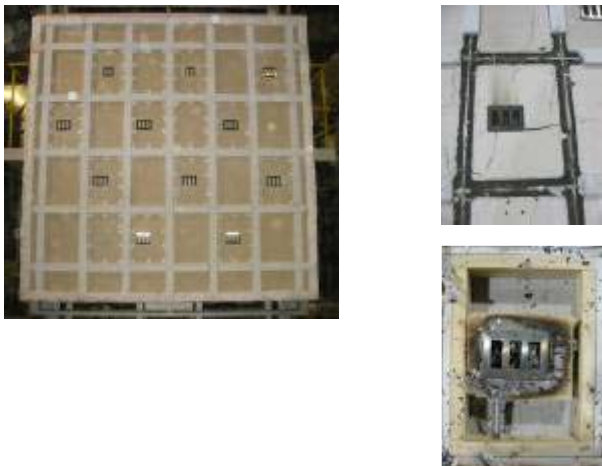


図15 耐火試験後のコンセント部分

表3 コンセントボックスの防火仕様

試験体No.	仕様	試験体No.	仕様
No.1	200-GW24K-ステー有り-配管	No.8	100-RW40K-ステー有り-配管
No.2	200-GW24K-ステーなし-配管	No.9	200-RW40K-ステー有り-配管-プラスチックカバー
No.3	200-RW40K-ステー有り-配管	No.10	200-発泡黒鉛系-ステー有り-配管-I社
No.4	200-RW40K-ステーなし-配管	No.11	200-発泡黒鉛系-ステー有り-配管-S社
No.5	200-RW60K-ステー有り-配管	No.12	200-発泡黒鉛系-ステー有り-配管-F社
No.6	200-RW60K-ステーなし-配管	No.13	比較用コンセントボックスなし
No.7	100-GW24K-ステー有り-配管	No.14	比較用コンセントボックスなし

GW:グラスウール, RW:ロックウール

壁と柱の取り付け部の耐火性能

壁と柱の取り付け部分では、柱の被覆材（カラマツ集成材）が炭化し、断面欠損して壁との間に隙間が生じることが危惧される。この部分には、壁の不燃層（石こうボードなど）を柱にちり納まりを施した結果、延焼防止の効果があることが確かめられた。図16に試験体を示す。

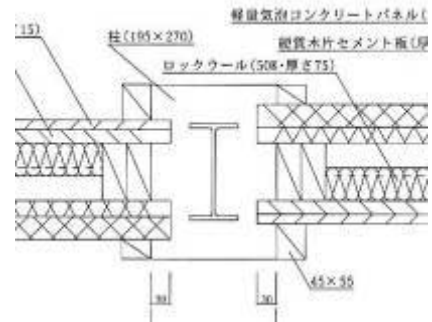


図16 耐火試験後の壁と柱の鳥合い部

3) 実大火災実験

実大火災実験は、4階建て事務所の1階部分を想定し、実火災における各部材の燃焼性状、火災終了後の被害状況、詳細部納まりの防火処理の有効性などを確認することを目的として実施した。また、鋼材断面寸法の異なる短柱部材を同時に燃焼させ、熱伝導解析に必要なデータ収集も行った。

(1) 実験の概要

実験日時 2005年6月9日(木)11:00点火

6月10日 火害調査

場所 長野県小県郡長門町 S木材工場敷地内

実験建物 4階建て事務所の1階部分を想定した約4×4mの平屋建てで、各部の仕様は表4の通りである。また、建物概要を図17~20示す。

表4 実験建物各部の仕様

柱、はり	H形鋼にカラマツ集成材(厚さ60mm)を被覆
床、天井	デッキプレート+コンクリート打ち
壁	2面はALCパネル(室内仕上げなし)、他2面は枠組み壁工法(外壁側サイディング張り、室内側強化石膏ボード張り)いずれも耐火1時間仕様
収納可燃物	事務用途を想定し 木材30kg/m <sup>2</sup>



図 17 実験建物の外観



図 18 柱とはりの接合部（被覆前）

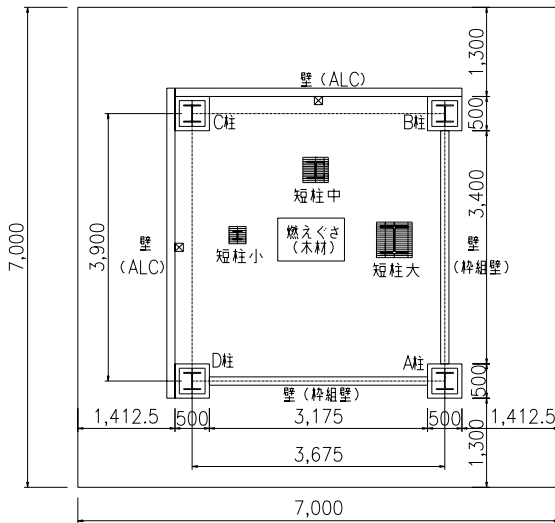


図 19 実験建物の平面図

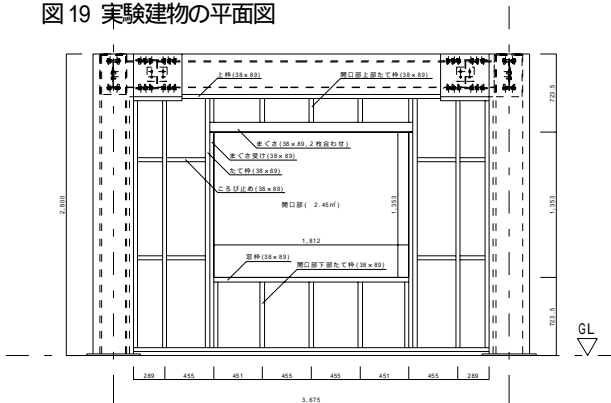


図 20 実験建物の断面図

## (2)測定項目および火害調査

耐火試験と実火災における耐火性能の比較のための測定

- ・火熱による集成材の炭化進行を調べるため、柱および梁構造部材の集成材の深さ方向にセンサーを埋め込んで内部温度ならびに鋼材温度履歴を測定
- ・耐火試験時の標準火災温度と実火災時の性状を比較するために火災室内の温度分布と火災室放射熱量を測定
- ・火災建物から周辺建物へ延焼、類焼の危険性を検討するために開口部噴出火炎の熱流束、温度、圧力を測定
- ・部材間の接合部などの火害状況把握のための測定
- ・柱部材と壁構造の取り合い部における燃え抜け防止工法検証のための温度測定
- ・外壁および区画壁を考慮した壁面の温度性状（裏面：屋外側、表面、壁体内部温度：2×4）
- ・スイッチボックス、コンセントなどの防火上の弱点部の防火処理の検討

構造部材の寸法など適用範囲拡大のための技術資料収集

- ・短柱試験体（鋼材断面大中小）を火災室に放置して、集成材と鋼材の温度を測定し耐火試験との炭化性状比較ならびに熱伝導解析用の技術資料を収集する
- 火災後の火害調査
- ・各部材および接合部などの燃え止まり状況調査
- ・実験建物から柱、梁、壁構造部材および短柱試験体をサンプリングして炭化深さを測定（持ち帰り調査）

## 4) 実大火災実験の結果

### (1)実験建物の火災性状

室内の温度変化は、耐火試験で用いられている標準的な加熱温度曲線に沿って上昇し、火災継続時間は図 21 に示す通り、概ね 40 分間であった。

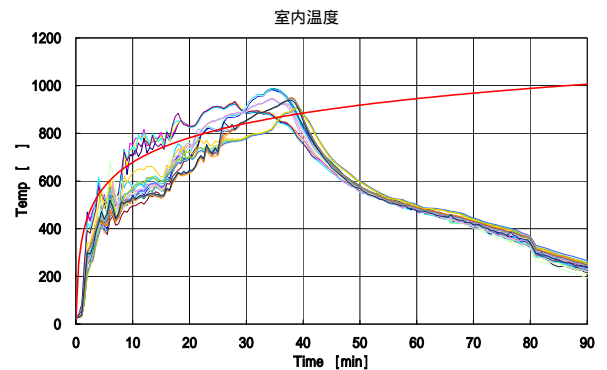


図 21 火災室内部の温度



## (2) 構造部材の温度

カラムツ集成材を用いた柱及び梁部材の代表例として、加熱が厳しいと考えられるALC板の外壁を取り付けた(内装材は取り付けていない)火熱の二面が曝されるC柱と、噴出火炎により外部側と室内からの加熱を受ける開口部上部A梁(図19平面図参照)の温度を図22、23に示す。

通常、耐火試験では、加熱時間に加えて3倍の時間加熱炉内部に放置し、さらに加熱炉から取り出して温度の上昇がないこと、燃え止まりの目視確認により性能評価が行われる。この実験では、点火後概ね一昼夜経過するまで温度測定を継続し、目視観察と併せて検討を行った。C柱部材の集成材内部は、加熱面より深さ30mmで最高温度約375(40分)を示した。また、鋼材温度の最高は、82(150分)であった。同様に、Aはり部材の集成材内部では、加熱面より深さ30mmで最高温度約240(60分)、鋼材温度の最高は、88(55分)を示した。

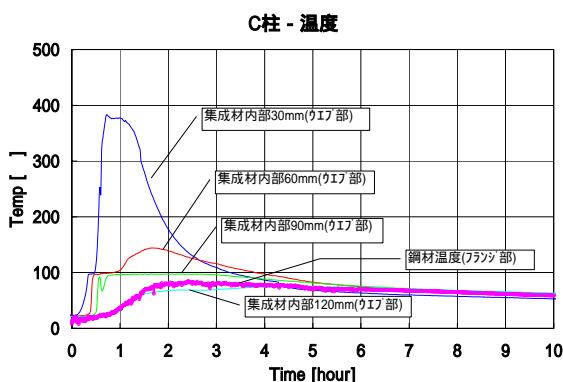


図22 C柱部材温度

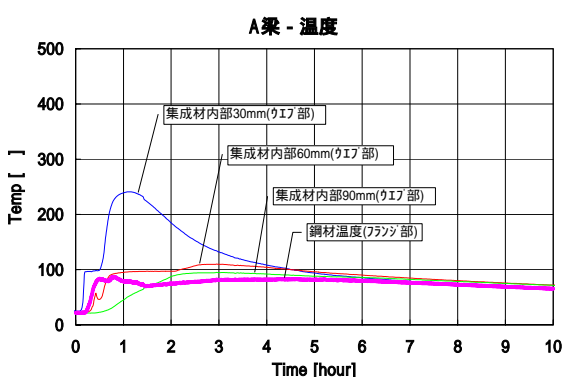


図23 Aはり部材温度

## (3) 詳細部

壁構造にスイッチまたはコンセントボックスなどを取り付けした場合、火災時に損傷を受け壁体内に火熱が進入して区画が突破されて延焼拡大する恐れがある。実験では、コンセントボックスに加熱発泡黒鉛系シートなどを充填して防火処理を行った。

温度測定の結果、金属製のボックス面で最高温度120程度に抑えられた。また、火害調査により、壁内部への火熱の進入が防止されていることが確認できた。(図24参照)



図24 実験後のコンセントボックス

## (4) 短柱試験体の炭化性状

構造部材の寸法など適用範囲を拡大するための技術資料を収集することを目的として、短柱試験体(H形鋼材 - 断面大400×400、中250×250および小125×125mm)を火災室に配置した。集成材と鋼材の温度を測定し、耐火試験との炭化性状の比較を行った。3つの試験体は、いずれも燃え止まりが確認された。

(図25参照)



図25 実験前後の短柱試験体

### (5)火害調査

実験開始から一昼夜経過した時点で火害調査を行った。外観調査では構造部材の燃え止まりが確認された。(図26参照)

また、実験建物からサンプリングを行い、柱および梁部材の集成材部分の炭化性状を図27、28に示す。柱の集成材部分には、鋼材に到達する燃え込みは認められなかった。柱Aは二面が枠組み壁構造の芯納まりで、火熱に曝された左上隅角部のみの炭化(30mm程度)が認められるが、壁との取り合い部からの火炎の貫通は防止された。また、C柱はALC板の外付け納まりのため火熱に曝された右および下の2面が均一に35mm程度燃え込んでいる。はりも火熱を受けた部分の炭化は鋼材まで達していないことが確かめられた。



図26 実験後の火災室内部



図27 柱部材の断面



図28 はり部材の断面

### (6)まとめ

実大火災実験においても、耐火試験と同様に構造部材の燃え止まりが確認された。被覆材として用いたカラマツ集成材の燃え止まりまでの炭化は火熱を受ける状態によって異なるが、最大で概ね30~35mmに達した。また、納まり部および詳細部の防火対策では、壁構造と柱構造との接合部において、柱部にちり納まり加工を行い壁の不燃仕上げ材を挿入した結果、燃え抜け防止効果の有効性が明らかとなった。さらに、枠組み壁メンブレン工法の火災室面に防火処理を施したスイッチボックスを取り付けて壁体内部への延焼を調べたが、火熱の進入は無く耐火性能上の有効性が確認された。



5分



15分



20分



45分

図29 火災の進展状況

### 結語

木質系耐火構造の部材が開発されたことにより、木材を利用した耐火建築物が可能となった。既に、実現されたものも少なくないが、試行錯誤をしながら進めており、技術的知見の蓄積が不十分な点は否めない。今後も、木質系の材料や部材が使われた空間における火災性状の解明を進めるとともに、具体的な防火対策を充実させ、標準施工マニュアルとして整備することが重要である。

火災分野では、現象の複雑さや法令による規制が障害となり、木材のような燃える材料を対象とした研究はあまり行なわれてこなかった。今回の木質系耐火構造の開発を契機として、今後は伝統的な木造建築物に潜んでいる防火技術など、木材の火災安全性能を評価し、利用の可能性を広げる新たな取り組みに期待したい。