

# 木材と鉄筋コンクリート等を複合して用いた建築物に関する構造技術の開発

構造研究グループ 上席研究員 河合 直人

## 目次

### 研究プロジェクトの概要

- 1) 研究プロジェクトの目的
- 2) プロジェクトの全体概要
- 3) 研究体制

### 防火関連の研究成果の概要

- 1) 耐火部材の開発
- 2) その他の耐火性能確保方策の検討

### 構造関連の研究成果の概要

- 1) 各部構造に関する検討
- 2) 構造システムに関する検討
- 3) 複合システムに関する検討
- 4) 木質システムに関する検討

### 共同住宅の試設計

### まとめ

### 参考文献

### 研究プロジェクトの概要

#### 1) 研究プロジェクトの目的

建築材料としての木材は、建設時の二酸化炭素発生量が少なく、かつ、空気中の二酸化炭素を炭素として固定保存する炭素固定効果を有することから、建築物への木材の利用拡大は環境負荷の低減に効果的であると言われている。建築研究所では、以下の要素技術、及びその設計法・性能評価法を開発し、従来の木造では困難であった中層の事務所や集合住宅などの建築物を、木材を活用しながら実現するための技術環境整備を行うこと目的とした研究プロジェクトを進めてきた。

- (1) 木質材料と他の材料とを複合化した木質ハイブリッド部材 (図 - 1 参照)
- (2) 異種材料を用いた木質ハイブリッド接合部、及び木材と他

#### 材料の間のハイブリッド接合部

- (3) 木造と他の構造を複合化した木質ハイブリッド構造 (図 - 2 参照)

なお、本プロジェクトは、平成11年度から5カ年の計画で建設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」としてスタートし、現在、国土交通省国土技術政策総合研究所においては、総合技術開発プロジェクト「循環型社会及び安全な環境の形成のための建築都市基盤整備技術の開発」のうち中課題「木材活用型低環境負荷建築構造技術の開発」に、独立行政法人建築研究所においては中期計画における重点的研究開発「環境負荷の低い木質構法の汎用性を高める構造技術の開発」のうち「木質複合建築構造技術の開発」に位置づけられた。

## 2) プロジェクトの全体計画

木質複合建築構造の実現および普及に対して必要な技術環境整備は、部材・接合部の構造性能、構造物全体の構造性能、建築物の防火性能の3分野に整理できる。表-1に示すように、本プロジェクトの研究項目と全体計画はこれらの3分野に対応し、5カ年の研究計画に従って研究が進められた。

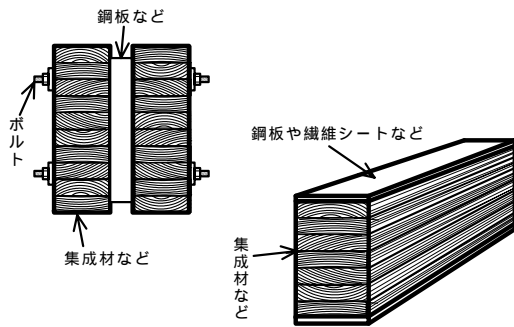


図-1 木質ハイブリッド部材の例

## 3) 研究体制

本プロジェクトでは、各界の幅広い分野の知識・技術・情報を集約するため、大学・国立研究所等の協力を得、さらに公益法人・業界団体と共同研究体制を構築して、産官学の連携を図っている。そのための研究活動、意見集約の場として、平成11年度より研究調整委員会とその下の分科会等から成る委員会を設置し、効率的な研究実施を図った。平成15年度の研究体制を図-3に示す。

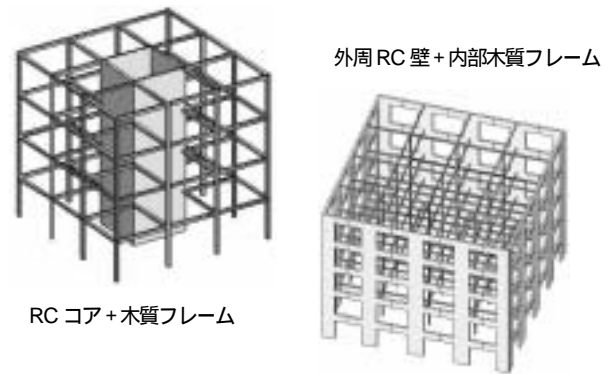


図-2 木質ハイブリッド構造の例

表-1 プロジェクトの全体計画

研究項目	平成11年度	平成12年度	平成13年度	平成14年度	平成15年度										
・木質ハイブリッド部材 ・接合部の開発	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 15%;">                     (1) 開発状況調査 (2) 基本性能・クリープ・耐久性等の性能調査 (3) 新規実用化開発・解析 (4) 設計法・評価法の開発                 </div> <div style="width: 15%; border-top: 1px solid black;">                     既存技術の調査分析                 </div> <div style="width: 15%; border-top: 1px solid black;">                     試験体製作                 </div> <div style="width: 15%; border-top: 1px solid black;">                     性能試験                 </div> <div style="width: 15%; border-top: 1px solid black;">                     基礎開発                 </div> <div style="width: 15%; border-top: 1px solid black;">                     実用化開発                 </div> <div style="width: 15%; border-top: 1px solid black;">                     性能評価                 </div> <div style="width: 15%; border-top: 1px solid black;">                     素案作成                 </div> <div style="width: 15%; border-top: 1px solid black;">                     詳細検討                 </div> </div>														
・木質ハイブリッド構造 骨組の開発						<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 15%;">                     (1) 開発状況調査 (2) 構造形式の構築 (3) 新規実用化開発・解析 (4) 設計法・評価法の開発                 </div> <div style="width: 15%; border-top: 1px solid black;">                     既存技術の調査分析                 </div> <div style="width: 15%; border-top: 1px solid black;">                     概念構築・モデル化                 </div> <div style="width: 15%; border-top: 1px solid black;">                     ケーススタディ・最適化設計                 </div> <div style="width: 15%; border-top: 1px solid black;">                     基礎開発                 </div> <div style="width: 15%; border-top: 1px solid black;">                     実用化開発                 </div> <div style="width: 15%; border-top: 1px solid black;">                     素案作成                 </div> <div style="width: 15%; border-top: 1px solid black;">                     詳細検討                 </div> </div>									
・木質ハイブリッド構造 の防火性能の把握											<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 15%;">                     (1) 開発状況調査 (2) 部材等の性能把握 (3) 設計法・評価法の開発                 </div> <div style="width: 15%; border-top: 1px solid black;">                     既存技術の調査分析                 </div> <div style="width: 15%; border-top: 1px solid black;">                     性能試験                 </div> <div style="width: 15%; border-top: 1px solid black;">                     性能評価                 </div> <div style="width: 15%; border-top: 1px solid black;">                     素案作成                 </div> <div style="width: 15%; border-top: 1px solid black;">                     詳細検討                 </div> </div>				

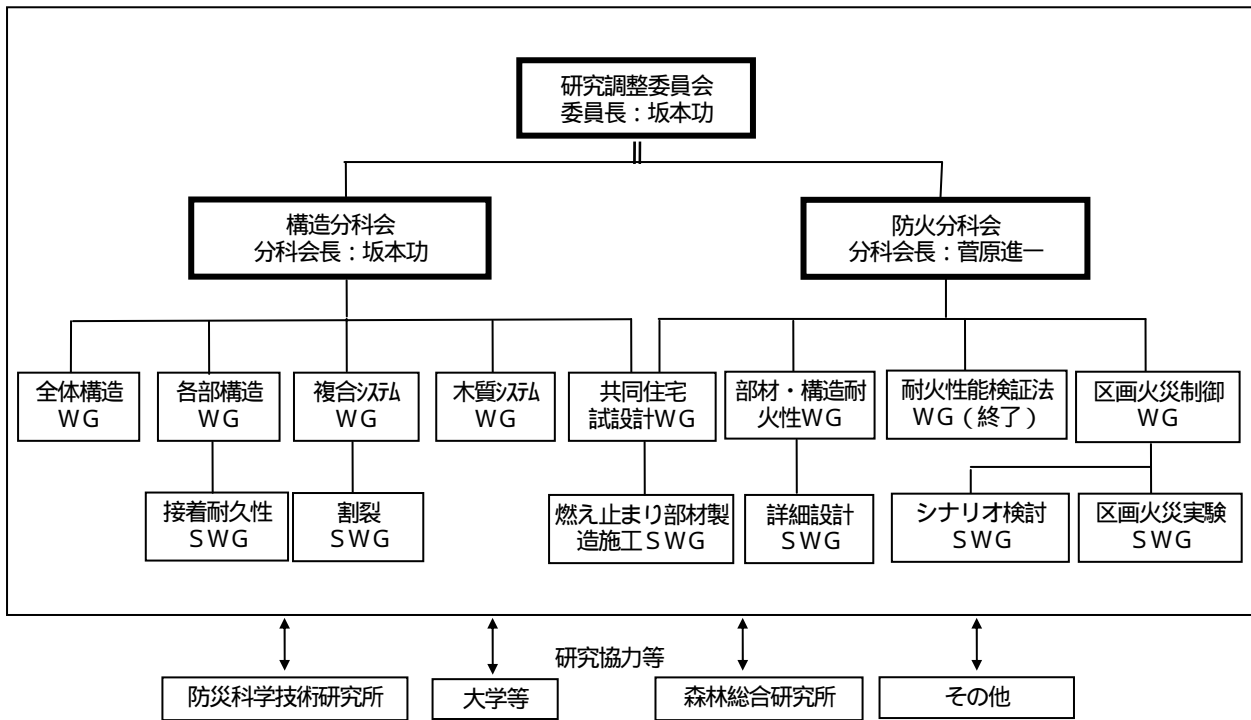


図 - 3 平成15年度研究組織図

## 防火関係の研究成果の概要

### 1) 耐火部材の開発

4階建て以上の木質ハイブリッド構造を建設する場合、現行法規の下では、その主要構造部を耐火構造とすることが求められる。建築物の部分と建築物の階に対して建築基準法施行令が要求している耐火時間は表 - 2 に示す通りである。これからわかるように、5階建ての2～5階及び4階建ての各階では1時間、5階建ての1階では2時間の耐火時間が要求されることになる。

上記の要求に対して、部材の耐火構造に関する検討として、平成13年度から平成15年度にかけて、柱、梁、壁、床の各部材について、耐火性能に関する実験的検証が行われた。その結果、床、壁については石膏ボード等の耐火被覆を用いる方法により、また、木材を使用した柱梁部材についても、2種類の部材、すなわち「燃え止まり部材」と「被覆系部材」について耐火性能の確認が行われた。燃え止まり部材は、図 - 4 (a) のように、内部が鋼材で周囲に集成材等の木材を接着材等により張り付けた部材であり、木材が完全に燃え尽きることなく途中で「燃え止まる」ため、火災後の荷重支持能力を維持するものである。一方、被覆系部材は図 - 4 (b) のように、修正材等の木材の周囲を強化石膏ボード等で被覆して耐火性能を高めた部材である。どちらも現行の建築基準法に基づく耐火性能試験法において、特定の仕様の場合に耐火1時間又は2時間の

性能が得られること、すなわち、燃え止まり部材については「1時間耐火であれば」1時間の加熱 + 3時間の放置 + 炉から取り出して放置」の過程で炭化が止まること、被覆系部材では木材の炭化が生じないか又はわずかに生じても炭化が止まることが確認されている。

このように木材活用型の柱梁部材で耐火構造を実現可能なことが明らかとなったことを受け、構造側の検討として、木材と鋼材の構造的な複合効果が期待できる燃え止まり部材の曲げ性能についての実験的検討を行うとともに、これを用いた構造物の試設計により実際の建築物への適用性を確認した。

### 2) その他の耐火性能確保方策の検討

さらに、現行の基準法の下では実現が困難と考えられるが、木材を構造及び意匠に活用した設計が可能となる以下の2つの耐火性能確保方策について、将来の基準法改正の提案も視野に入れながら検討を進めた。

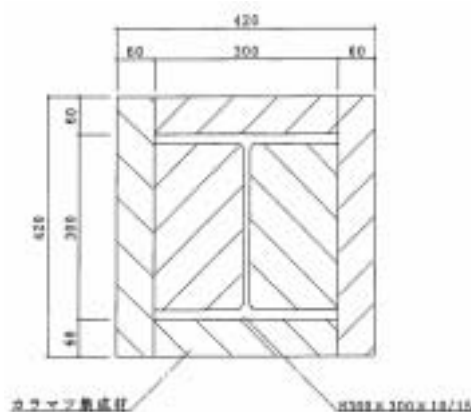
一つ目は構造レベルのハイブリッド化による耐火性能の実現で、木造部分が燃え尽きても、他の耐火構造の部分が残って構造物としては倒壊せずに形態が維持されるという構造の可能性である。現行基準では木造部分も主要構造部と見なされて耐火性能が要求されるため、木造部分が極めて小規模な場合を除き、この考え方では建設が不可能であると思われる。

しかしながら、実際には避難安全性が確保される可能性があり、

表 - 2 現行基準法の要求耐火時間（非損傷性）

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		

(a)燃え止まり部材の例



(b)被覆系部材の例

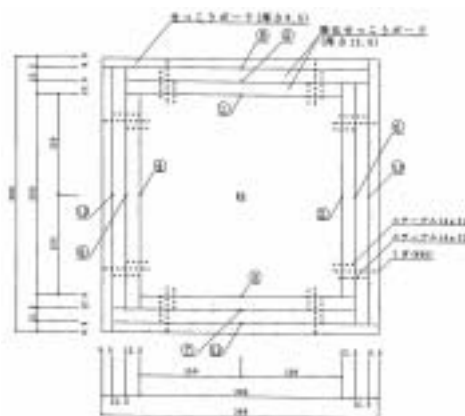


図 - 4 耐火性能が確認された部材の例

防火性能の点から見ても安全な設計が実現できる可能性がある。

二つ目はスプリンクラーの積極的な利用である。現在の我が国のスプリンクラーは初期消火を主目的とするが、スプリンクラー等の能動的消火設備を有効に作動させることにより、可燃物の燃焼抑制効果や、木材表面への散水による着火防止及び炭化進行の停止などが期待できる。これらに関する将来の基準改正も視野に入れた検討として、実験や解析による基礎資料の蓄積が行われた。

### 構造関係の研究成果の概要

#### 1) 各部構造に関する検討

各部構造に関する検討としては、木質ハイブリッド部材、木質ハイブリッド構造に用いる接合部、床システムを主たる対象として、剛性耐力の算定式、理論式と実験との照合、耐力剛性に及ぼす影響因子、構造システムから見た部材・接合部に対する要求、接着耐久性の評価法等の検討を行った。

木質ハイブリッド部材については、応力の種類と抵抗機構による分類整理を行った上で、木質ハイブリッド部材の剛性耐力に関する理論式を提案し、鋼材やFRPで補強した木質ハイブリッド部材、鋼材を内部に挿入した木質ハイブリッド部材について、曲げ、せん断、座屈に対する加力実験を行い理論式との照合を行った。木質ハイブリッド部材相互の接合部については、接合部の分類整理を行った上で、コンクリートと木材との接合において高耐力が期待されるグールドインロッド形式の接合部について、せん断型接合、引張型接合の加力試験を行い、理論式の適用性を検証した（図 - 5、図 - 6 参照）。併せて、木質ハイブリッド構造での使用が想定される木材同士の接合部に対する各種の補強方法を取り上げ、接合部補強の考え方を整理した上で、補強効果に関する実験的検討を行った。

木質ハイブリッド構造に使用される床システムについては、層構成等による分類を行った上で、代表的な床システム4種類について、既往データの少ない面内せん断性能に関する実験を行い、剛性耐力

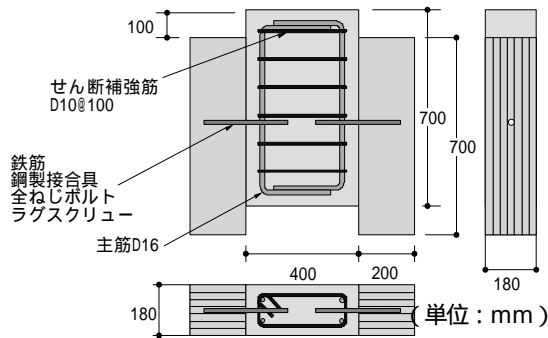


図 - 5 グレードインロッド接合部のせん断試験体

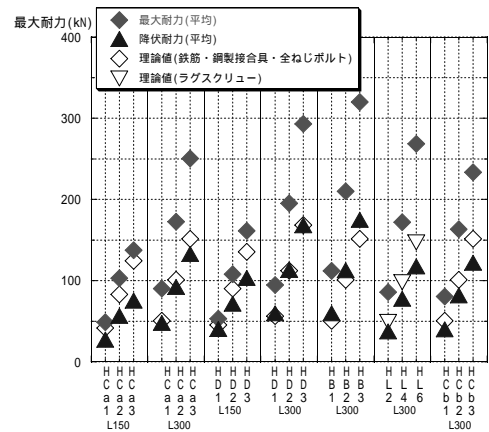


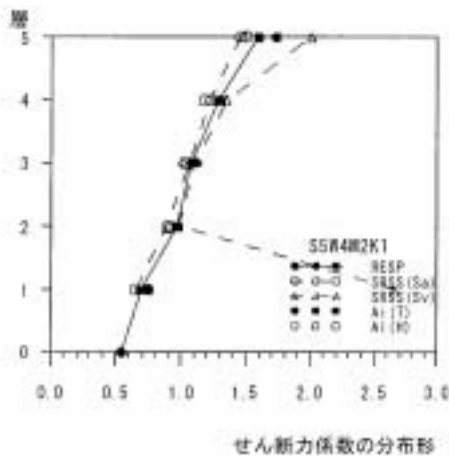
図 - 6 耐力の理論値と実験値の比較

の計算式を提案して、その照合を行った。

以上の他、剛性耐力に及ぼす各種の影響因子について考え方を整理し、特に長期荷重に対する性能評価及び長期的な性能劣化に関する検討として、木質ハイブリッド部材のクリープ変形の実験的検討、ハイブリッド部材の耐力に及ぼす荷重継続時間の影響に関する考察、接着耐久性の評価法に関する実験的検討を行った。

木質ハイブリッド部材、接合部等については、様々な種類の部材・接合部が無数に考えられ、木質ハイブリッド構造の構造性能評価、構造設計においては、これらの部材、接合部等に対する各種の試験データをもとに各部の構造特性を把握し、構造性能評価、構造設計に繋げていくことが想定される。そのような場合を想定して、既往の試験規格や本プロジェクトで実施された試験の方法などを参考にしながら、木質ハイブリッド部材、接合部等の標準試験法の提案を行った。

(a) 1階と上階の層間変形角(平均値)の比が1:10の場合



(b) 1階と上階の層間変形角(平均値)の比が1:2.5の場合

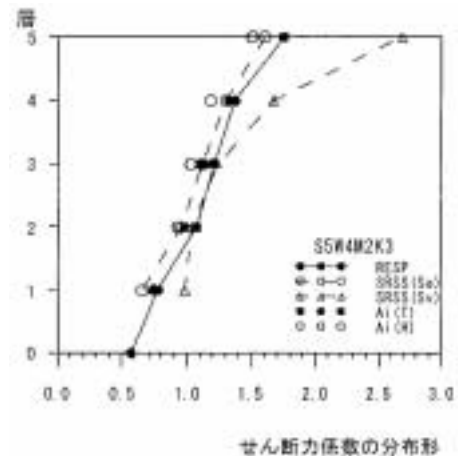


図 - 7 1階RC造、2~5階木造の場合のせん断力係数の分布形の比較

(RESP: 弾性応答計算結果、SRSS: 固有値解析に基づく結果、Ai: 現行基準)

## 2) 構造システムに関する検討

構造システムに関する検討としては、木質ハイブリッド構造の構造物全体の構造設計法及び構造性能評価法の作成に必要であり、かつ現在不足しているデータの蓄積を目的として、以下の研究課題を抽出して検討を重ねた。

内部他構造+周辺木造、周辺他構造+内部木造などの平面的な複合システム、及び1階RC造+2~5階木質構造のような立面的複合システムを対象とし、立面的な複合システムにおける地震力の高さ方向の分布、平面的ハイブリッドにおける等価線形化法の適用範囲等について解析的な検討を行った。1階RC造、2~5階木造を想定した立面的複合システムについては、現行の地震層断力分布係数  $A_i$  が妥当であり、現行基準で要求される剛性率による割増しは必要がないことが確認された(図-7参照)。

本プロジェクトでは中層の事務所建築物、集合住宅等を開発の対象に想定しており、床の面外変形や振動に対しても戸建て住宅のレベルを超える高い性能が要求される。そのため、面外方向の構造性能が比較的高い層構成を取り上げて、木造床、木造床+RC造の床、木造+ALCの床について面外曲げ及び振動性状に関する実験及び解析的検討を行い、解析の有効性を確認した。

一方、木質構造と他構造との接合部分においては、構造物の長期的挙動の問題が予見されるため、クリープ変形や膨潤収縮等による変形量の差に起因する段差等の障害及び2次応力の発生について検討を加えた。そのための基礎データとして、既往データの乏しい大断面集成材の繊維方向のクリープ特性に関する実験を行い、実大材のクリープ特性の把握を行った。

木質ハイブリッド構造を現行基準に従って設計する場合には、構造性能の検証ルートとして限界耐力計算の適用が最も妥当と考えられる。その中の耐震性能検証法について、適用可能性の検討と課題の抽出を行った。平面的な複合システムについては、限界耐力計算の適用に際して、ねじれモードが卓越しないこと、水平構面での先行破壊が生じないことなどが条件として必要であることが示された。

以上の検討結果を踏まえ、木質ハイブリッド構造を対象とした構造性能評価の原則を、限界耐力計算の適用を念頭に置いて、適用範囲、荷重外力、限界値の設定、応答予測、使用上の支障その他の検討課題、標準試験法・評価法として整理し、とりまとめた。

### 3) 複合システムに関する検討

木造とRC造又は木造とS造のように、異種構造を平面的に複合した「複合システム」に関する構造設計法の開発を目標として、

現行基準では認められていない木質系耐火構造の試設計による検討、複合システムの実大振動実験による地震時挙動の把握(図-8参照)設計の自由度を拡大するための割裂強度算定式の提案、設計指針の内容の検討等を行った。

### 4) 木質システムに関する検討

木質システムには、木質ハイブリッド部材で構成される構造システムと、木質ラーメン構造と木質耐力壁工法の併用構造のような木質構造どうしの複合構造が含まれる。また、立面的複合システム(1階RC造、2~5階枠組壁工法等の木質構造)の試設計も併せて検討対象に加えている。

構造要素に関しては、木質ハイブリッド部材や木質部材を用いた構造システムでの使用が想定される、H形鋼を用いた接合部について、継手及び柱梁接合部の実験的研究、及び剛性・耐力の計算法の提案を行った。また、木質システムの実現に際して必要となる、木質ハイブリッド部材等による構造骨組や高性能耐力壁の開発的検討を進めた。耐力壁については、真壁方式の枠組壁工法用耐力壁、及びタイダウン金物(耐力壁引き抜き防止用金物)を用いた連層壁についての水平加力試験を行い、耐震設計用の性能評価を行った。

さらに1階をRC造、2~5階を枠組壁工法とする立面型複合システムのホテルの試設計を行った。2~5階の水平力を枠組壁で負担する場合とRC造のコアで負担する場合の2つのケースについて、高性能耐力壁及びタイダウン金物の実験結果を用いて構造計算を行い、安全性の確認を行った。また、1階を集成材構造、RC造又はS造、2~4階を軸組構造とした住宅の試設計を行い、構造関連諸基準の整理、及び構造計算による構造安全性の確認を行った。



図-8 複合システムの実大振動実験写真(左:2層の試験体、右:接合部の破壊状態)

### 共同住宅の試設計

燃え止まり部材、又は被覆系部材を用いた木質ハイブリッド構造の試設計を、共同住宅を対象として実施し、1階をS造、2～5階を燃え止まり部材の柱梁を用いたラーメン構造又は壁式構造とした場合の構造設計を行った（図-9、図-10参照）。構造、防火

以外の諸基準にも適合するよう、細部の検討を行っている。燃え止まり部材の耐火構造に関する大臣認定を必要とするが、ほぼ現行の基準法の枠内で実現可能な設計例となっている。このほか、木材を主体とした被覆型の部材を用いた場合の4階建て共同住宅の試設計も同様に行っている。

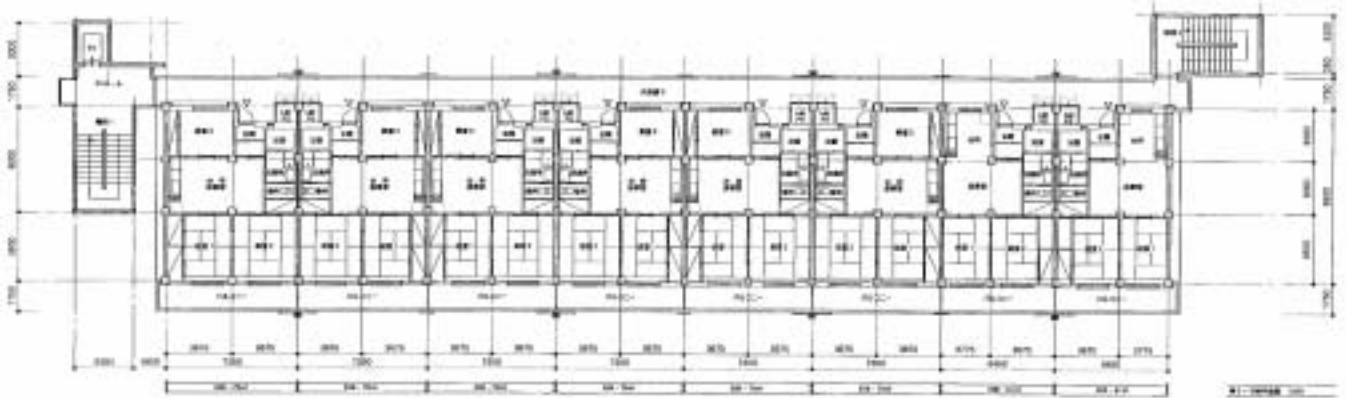


図-9 共同住宅試設計（平面図）

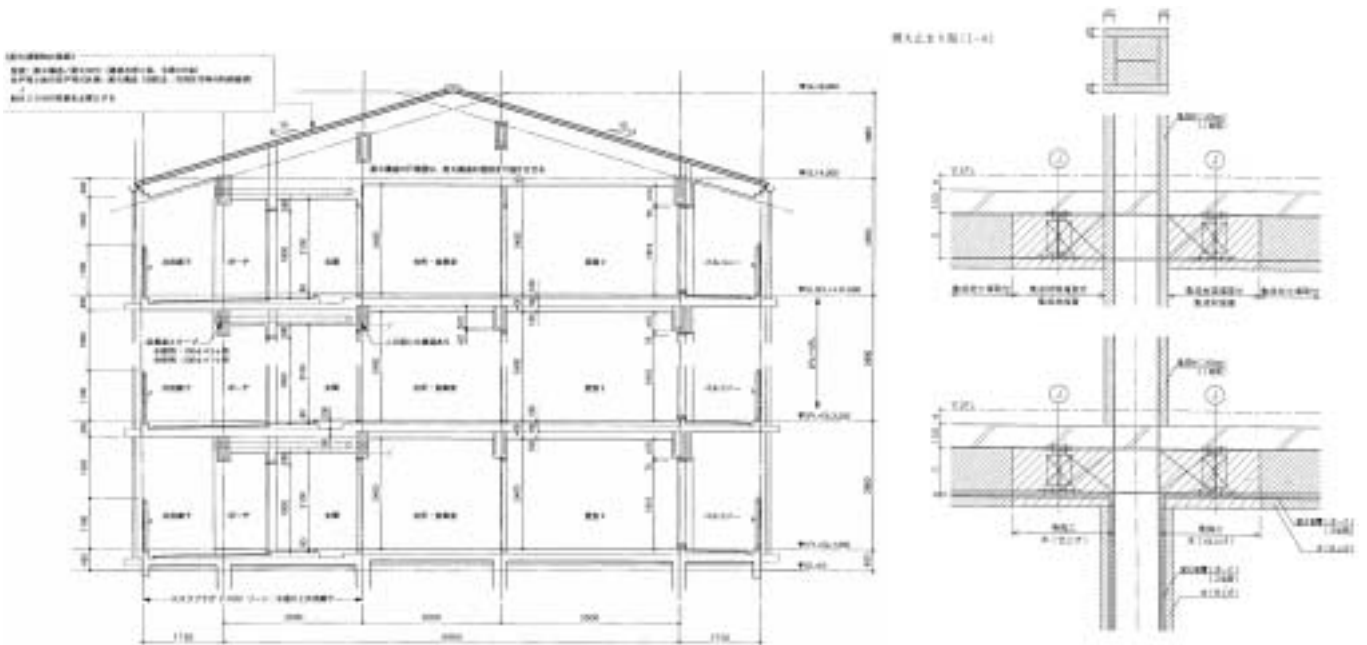


図-10 共同住宅試設計（断面図・断面詳細図）

## まとめ

平成11年度からの5カ年のプロジェクトとして、木質ハイブリッド構造の要素技術の開発、及び、構造性能、防火性能に関する設計法、性能評価法の開発が行なわれた。本プロジェクトにより、木材を活用した4階建て以上の耐火建築物が、ほぼ現行基準における性能評価法の枠内で可能となることが明らかになった。これらの性能評価に当たっての基本的な考え方は、木質複合建築構造の性能評価の原則としてとりまとめられ、また、実際の設計で必要となる、木質ハイブリッド部材の耐力等の算定式、標準試験法、構造性能検証法の適用に際しての留意事項、木質ハイブリッド部材の耐火性能評価法、耐火建築物とする場合の詳細設計等を木質複合建築構造の設計指針としてとりまとめた。

既に、本プロジェクトの成果を活かした具体的な建築物の実現も進められている。枠組壁工法の壁、床等については耐火構造の認定が降りており、「枠組壁工法による木質複合建築物設計の手引き」が(社)日本ツーバイフォー協会から出版され、枠組壁工法による耐火建築物の建設事例が現れている。また、特定の仕様の燃え止まり部材については耐火構造の認定が降りており、燃え止まり部材を用いた5階建ての商業建築物の建設計画も進められている。

一方で、木質複合建築構造の実用化を進め、普及をはかる上では、燃え止まり部材の製造法の合理化、簡易な構造設計法の開発等の課題が残されている。これらの課題については、引き続き建築研究所において平成16年度から2カ年の研究課題「木質複合建築構造技術の開発フォローアップ」として検討を進めているところである。

また、地球環境問題の点からは、木材利用による空気中の二酸化炭素削減効果だけではなく、建築物の長寿命化、解体容易性、部材の再利用・再生利用等を含めた総合的な環境負荷評価が必要である。現時点では、多種多様な木質複合建築構造の可能性があり、一般解を得ることは困難であるが、具体的な事例に即して検討を進め、技術情報の蓄積を図ることが今後の課題であると思われる。

## 参考文献

- ・ Sakamoto, I., et. al., "Final Report of a Research and Development Project on Timber-based Hybrid Structures", Proceedings of the 8th WCTE, Vol. 2, pp.53-58, June, 2004
- ・ Isoda, H., et. al., "A Feasibility Study of Multi-storey Timber-based Construction with Fire-protection Systems", Proceedings of the 8th WCTE, Vol. 3, pp.487-490, June, 2004
- ・ Nakajima, S., et. al., "Creep Performance of Hybrid Timber Beams", Proceedings of the 8th WCTE, Vol. 2, pp.149-154, June, 2004

- ・ Inoue, M., et. al., "Moment Resisting Performance of Connection between Reinforced Concrete and Timber", Proceedings of the 8th WCTE, Vol. 3, pp.327-330, June, 2004
- ・ 社団法人日本ツーバイフォー建築協会「2004年 枠組壁工法による木質複合建築物 設計の手引」2004年7月
- ・ 五十田他「木質複合建築構造技術の開発 木造とRC造が平面的に組み合わせられた構造の振動台実験」建築学会大会、2004年8月
- ・ 飯島他「木質複合建築構造技術の開発 木質複合建築用材の接着耐久性試験法・評価法の検討」建築学会大会、2004年8月
- ・ 篠田他「木質複合建築構造技術の開発 エポキシ樹脂接着剤の接着強度発現に及ぼす養生条件の影響」建築学会大会、2004年8月
- ・ 柴田他「木質複合建築構造技術の開発 炭素繊維補強集成材の要素実験」建築学会大会、2004年8月
- ・ 中島他「木質複合建築構造技術の開発 木質複合部材の曲げクリープ特性と部材の変形性状」建築学会大会、2004年8月
- ・ 森他「木質複合建築構造技術の開発 H型鋼を用いた接合法 その4 . T型接合部の曲げ実験」建築学会大会、2004年8月
- ・ 宮本他「木質複合建築構造技術の開発 H型鋼を用いた接合法 その5 . 門型架構の水平加力実験」建築学会大会、2004年8月
- ・ 足立他「木質複合建築構造技術の開発 各種接合金物に対する仕口接合部の曲げ性能 その1」建築学会大会、2004年8月
- ・ 田中他「木質複合建築構造技術の開発 各種接合金物に対する仕口接合部の曲げ性能 その2」建築学会大会、2004年8月
- ・ 早川他「木質複合建築構造技術の開発 各種接合金物に対する仕口接合部の曲げ性能 その3」建築学会大会、2004年8月
- ・ 鈴木他「木質複合建築構造技術の開発 木質ハイブリッド床の鉛直振動特性に関する実験的研究(第2報)」建築学会大会、2004年8月
- ・ 石原「柔な水平構面により柔部分と剛部分が一体化された構造の地震応答に関する一考察」建築学会大会、2004年8月
- ・ 遊佐他「木質系構造の耐火性能に関する研究 その6 実験概要と今後の展望」建築学会大会、2004年8月
- ・ 大塚他「木質系構造の耐火性能に関する研究 その7 2時間耐火性能を有する柱部材試験」建築学会大会、2004年8月
- ・ 白岩他「木質系構造の耐火性能に関する研究 その8 燃え止まり柱部材の耐火性能」建築学会大会、2004年8月
- ・ 増田他「木質系構造の耐火性能に関する研究 その9 大断面梁部材の荷重加熱試験」建築学会大会、2004年8月
- ・ 岡村他「木質系構造の耐火性能に関する研究 その10 小断面燃え止まり梁部材の荷重加熱試験」建築学会大会、2004年8月
- ・ 川合他「木質系構造の耐火性能に関する研究 その11 壁部材の荷重加熱試験」建築学会大会、2004年8月
- ・ 上杉他「木質系構造の耐火性能に関する研究 その12 床の荷重加熱試験」建築学会大会、2004年8月
- ・ 伊藤他「木質系構造の耐火性能に関する研究 その13 コンセントボックス設置壁の耐火性能試験」建築学会大会、2004年8月