

序 文

平成 22 年 10 月に「公共建築物等における木材の利用の促進に関する法律」が施行され、公共建築物を中心に積極的に木材利用を推進するという政府方針が明確となった。この法律では、構造躯体に木質系の材料を用いる「木造化」、および内装その他に木質系の材料を用いる「木質化」の促進がうたわれており、さらには備品への木製品の活用や木質バイオマスの利用も言及されている。このため、多面的な木材利用、特に国産材の利用が今後より一層促進されることが関連産業界で期待されている。

しかしながら、この法律の施行によって、従来からの木材利用に関連した法的制限が緩和される訳ではない。木造化であれ木質化であれ、現行の建築基準法をはじめとする様々な法的規制の下で木材を利用しなければならないことは言うまでもない。

特に木材の可燃性に関連した規制は諸外国と比較しても厳しいものであり、大型公共建築物への多面的な応用にあたってはまずこの障害を乗り越えなければならない。このため、本法律施行のはるか以前から、木質系材料の耐火性向上技術の開発と高度化が叫ばれてきた。

このような社会的情勢の中で、森林総合研究所では、国産材を利用した新たな耐火性木質構造材料の開発を目指し、東京農工大学、大阪大学、鹿島建設株式会社と共同研究に着手した。この研究は、幸いなことに農林水産省「新たな農林水産政策を推進する実用技術開発事業」の研究課題として採用され、平成 20 年度から 22 年度の 3 カ年にわたり、「国産材の新需要創造のための耐火性構造材料の開発（課題番号 2009）」が実施された。

この研究課題の内容は、難燃処理耐火集成材の開発、鉄骨コンクリートと集成材を組合せた木質系ハイブリッド部材の開発、開発した部材の LCA 評価などであったが、得られた研究成果の中で、最も特筆すべきは 1 時間の耐火性能を有するスギ耐火集成材が開発され、2 時間の耐火性能も可能であることが示されたことであった。これによって国産材の利用範囲が大きく広がる可能性が高まった。もちろん、製造コストの低減といった実用に向けての問題点はいくつか残されてはいるが、この成果がわが国の木材利用技術の歴史上、新たな第一歩となることは疑いないところであろう。

本研究成果資料集は、当該研究課題で得られた多くのデータと成果をコンパクトにまとめたものである。木材の難燃処理研究の一層の発展に役立つことを祈念したい。

なお、研究の推進に当たっては、長谷見雄二早稲田大学教授、河合直人建築研究所上席研究員（現工学院大学教授）、遊佐秀逸（財）ベターリビング環境・防耐火試験部長より、適切なるご指導とご助言をいただいた。ここに深くお礼申し上げる。

平成 23 年 12 月

独立行政法人 森林総合研究所
研究コーディネータ（木質資源利用担当）
林 知行

新たな農林水産政策を推進する実用技術開発事業
「国産材の新需要創造のための耐火性木質構造材料の開発」
成果資料集

序 文	1
森林総合研究所 研究コーディネータ 林 知行	
目 次	
研究実施体制	3
全体概要	4
森林総合研究所 原田寿郎	
I 難燃処理耐火集成材の開発	5
I-1 集成材への耐火性能付与技術の開発	5
森林総合研究所 上川大輔、原田寿郎	
I-2 合理的、効率的な耐火集成材製造技術の開発	13
東京農工大学 服部順昭、安藤恵介	
I-3 実用化に向けた木造耐火構造の開発と評価	17
鹿島建設 西村光太、宮本圭一、抱憲誓、和田環、久保田淳、田中裕樹	
(付録) 耐火集成材を用いたオフィスの試設計	27
II 木質系ハイブリッド(EWECS)部材の開発と耐火性能評価	51
II-1 EWECS 柱部材の構造安全性の解明	51
大阪大学 倉本洋、瀧野敦夫	
II-2 EWECS 柱-梁接合部のせん断抵抗機構の解明	61
森林総合研究所 新藤健太、宮武敦、平松靖、原田真樹、軽部正彦	
II-3 EWECS 部材の耐火性能評価	69
森林総合研究所 新藤健太、宮武敦、平松靖、原田真樹、軽部正彦 原田寿郎、上川大輔	
III 耐火性木質構造材料の LCA 評価	75
東京農工大学 服部順昭、安藤恵介	
発表業績一覧	79

研究実施体制

本研究は、農林水産省「新たな農林水産政策を推進する実用技術開発事業」において、「国産材の新需要創造のための耐火性構造材料の開発（課題番号 2009）」として実施された。

研究項目	担当機関	研究担当者
研究総括者	(独) 森林総合研究所木材改質研究領域	◎ 原田寿郎
1. 難燃処理耐火集成材の開発	(独) 森林総合研究所木材改質研究領域	○ 原田寿郎
(1) 集成材への耐火性能付与技術の開発	(独) 森林総合研究所木材改質研究領域	△ 原田寿郎 上川大輔
(2) 合理的、効率的な耐火集成材製造技術の開発	東京農工大学大学院共生科学技術研究院	△ 服部順昭 安藤恵介
(3) 実用化に向けた木造耐火構造の開発と評価	鹿島建設(株)技術研究所 鹿島建設(株)建築設計本部	△ 宮本圭一 大内富夫(～2009.3) 抱憲誓 西村光太 田上淳 久保田淳 和田環 田中裕樹
2. 木質系ハイブリッド(EWECS)部材の開発と耐火性能評価	(独) 森林総合研究所複合材料研究領域	○ 新藤健太
(1) EWECS 柱部材の構造安全性の解明	大阪大学大学院工学研究科	△ 倉本洋 岸本一蔵 瀧野敦夫
(2) EWECS 柱-梁接合部のせん断抵抗機構の解明	(独) 森林総合研究所複合材料研究領域 (独) 森林総合研究所構造利用研究領域	△ 新藤健太 宮武敦 平松靖 原田真樹 軽部正彦
(3) EWECS 部材の耐火性能評価	(独) 森林総合研究所複合材料研究領域 (独) 森林総合研究所構造利用研究領域 (独) 森林総合研究所木材改質研究領域	△ 新藤健太 宮武敦 平松靖 原田真樹 軽部正彦 原田寿郎 上川大輔
3. 耐火性木質構造材料の LCA 評価	東京農工大学大学院共生科学技術研究院	○ 服部順昭 安藤恵介

◎：研究総括者、○：中課題責任者、△：小課題責任者

全体概要

研究総括者

原田 寿郎

わが国においては、4 階建以上の建物、防火地域内の延床面積 100m² 以上の建物は耐火建築物でなければ建設することができない。建築基準法の改正により、木質であっても耐火構造認定取得の道は開かれたが、通常の木材や集成材の梁や柱では、火災終了後に燃え止まらず、耐火性がないと見なされるため、耐火建築物に使用することができない。

耐火建築物に木材が使用できれば、スギ等国産材の需要拡大に資するとともに地球環境保全にも大いに貢献することとなる。石こうボードで木材を被覆すれば、耐火構造とすることも可能だが、それでは景観性、居住性、触感性に優れた木材が材料の表面に現れない（以下材料表面に木材が現れる使用方法を「現わし」という）。耐火建築物の梁や柱として木材を「現わし」で使用することができれば、木材の優しさや潤いの漂う新たな都市空間の創造が可能となる。

木材が「現わし」となった梁・柱を耐火構造とするには、木材に耐火性能を付与する方法と、不燃系の構造材料を木材で被覆する方法の二つがある。本研究では、以下の課題に取り組んだ。

- I. 難燃処理耐火集成材の開発
- II. 新しい木質系ハイブリッド構造である Engineering Wood Encased Concrete-Steel（以下「EWECS」と略す）部材の開発と耐火性能評価
- III. 耐火性木質構造材料のライフサイクルアセスメント（Life Cycle Assessment）による評価（「LCA 評価」という）

難燃処理集成材の開発では、無処理の荷重支持部分の周りに難燃薬剤を含浸させた木材を配置することで、鋼材や石膏ボードなどを用いずに 1～2 時間の耐火性能を集成材に付与する技術を開発した。1 時間耐火構造については、柱－梁の接合部、梁－床の取合い、柱－壁の取合い部分の耐火性能を確認したほか、実際の建物を想定した試設計も行った。なお、実用化に向けた取組みとして、鹿島建設は、別途、自社で試験を行い、国産スギ材のみで構成された純木質部材である大断面耐火集成材の柱、梁について 1 時間耐火構造の大臣認定を取得した。

EWECS 部材の開発では、鉄骨コンクリートの周りをスギ集成材で被覆した新たな木質ハイブリッド部材（EWECS 部材）を開発して、EWECS 柱、柱-接合部の正負交番繰り返し載荷実験を行った。これにより、L30-40 クラスの強度や剛性が劣る国産スギ集成材を用いた場合でも、EWECS 部材は優れた耐震性を有することを明らかにした。また、その部材に 14 階建までの建築物の建設を可能とする 2 時間耐火性能を付与する技術を開発した。

LCA 評価においては、耐火集成材と EWECS 部材の部材製造時の環境への潜在的な影響負荷額（社会コスト）を算出した。また、耐火集成材については、仕様を揃えたモデル建築（地上 3 階建、延床面積：約 1,500 m²、建築面積：507 m²、階高：3.8 m、耐火建築物）を設定し、構造部と基礎に用いられる材料製造までのインベントリ調査を行って、S 造、RC 造との比較を行い、耐火処理集成材造＜S 造＜RC 造の順に社会コストが大きくなることを明らかにした。

これらの成果は、都市部の中層までの建築物の柱や梁にスギ材を「現わし」でを使用することを可能にするものである。また、この木材の新需要創造は、スギ国産材の需要拡大に資するとともに、地球環境保全に資する優しさと潤いの漂う新たな都市空間の創造に寄与するものとしても期待される。

I 難燃処理耐火集成材の開発

I - 1 集成材への耐火性能付与技術の開発

森林総合研究所 上川大輔、原田寿郎

<要約>

荷重支持部の集成材の周囲に難燃薬剤処理を施したラミナ、さらに外側に無処理の表面層を配置した1時間耐火集成材断面を設計し、スギ、カラマツそれぞれの耐火集成材柱について載荷加熱試験を行った。その結果、どちらの樹種についても1時間の耐火性能を有することを明らかにした。この成果を基に同様のコンセプトで2時間耐火仕様のスギ集成材柱を作製、載荷加熱試験により2時間の耐火性能をもつことを明らかにした。また、より小さな断面からなるスギ集成材柱、より高い接着性が得られる難燃薬剤により処理したスギ集成材柱について1時間の載荷加熱試験を実施し、いずれも燃え止まり性能、非損傷性に問題がないことを明らかにした。これにより耐火集成材断面寸法の自由度向上と、品質向上が可能となり実用性が増した。

1. 研究の背景と目的

本課題の研究目的は、燃え止まり部分に限定的に難燃処理を行ったラミナを積層することで、最小限の処理で集成材に1時間の耐火性能を付与する技術を開発すること、さらに2時間の耐火性能付与に向けた課題を抽出し、2時間耐火構造の性能付与に向けた技術開発を行うことである。

2000年の建築基準法改正により、木質部材であっても求められる性能を持つことを示すことで耐火建築物を建てるのが可能となっている。それには下図に示すように通称ルートA～Cの3つの方法が存在するが¹⁾、ルートA以外はアトリウムや体育館のような可燃物の少ない大空間の、床から5.5m以上離れた高い部分にしか木現し部材を使用することが出来ない。個々の建築の用途や条件に制約を受けず、より広範囲での利用を想定する場合は、柱・梁などの構造部材について耐火構造認定を受けるルートAの方法とする必要がある。

この認定を受ける方法で耐火構造の認定を受けるには、指定性能評価機関の定める業務方法書²⁾に基づく試験を実施し、求められる性能を満たすことを明らかにしなければならない。

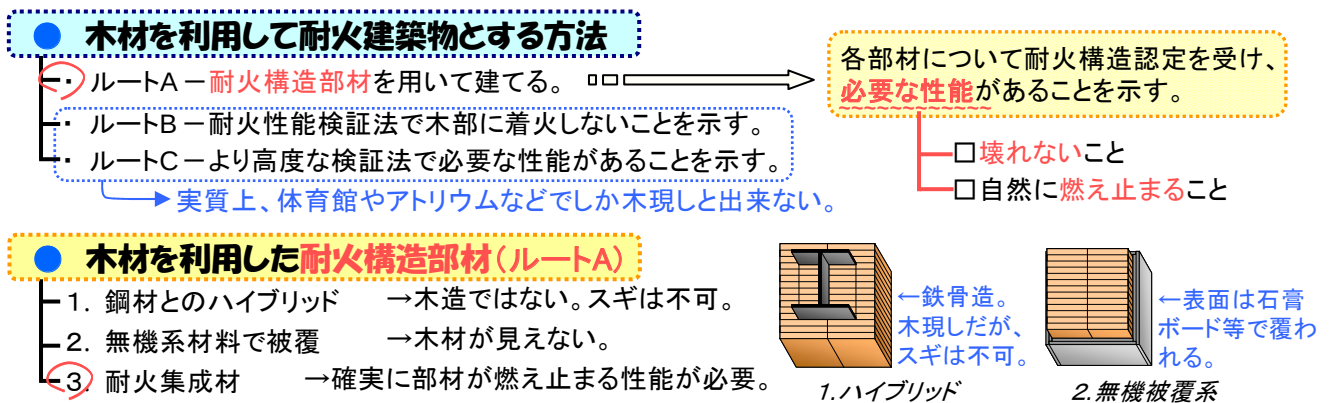


図1 建築基準法上の耐火集成材の位置づけ

柱や梁の試験では、耐火炉に試験体を設置し、断面性能に応じた荷重を載荷した状態で、ISO834-1³⁾に規定される加熱温度曲線に従って要求耐火時間の加熱を行った後、その3倍時間試験体を放置し、変形量や変形速度が基準値を超えないなどの性能を示すことが求められる。さらに、木質材料など可燃性の材質の場合には加熱終了後に自然に火気がなくなり（燃え止まり）、荷重支持部に炭化等が生じないことが求められる。通常の集成材を上記の方法で試験すると、熱容量の大きな大断面集成材であっても、加熱終了後も消炎せず燃焼し続けてしまうため^{4,5)}（写真1参照）、少なくとも荷重支持部周囲に何らかの断熱等の工夫が必要となる。

木質系耐火構造の梁や柱の具体例としては、H型鋼などの周りをカラマツやベイマツの集成材で被覆したいわゆる木質ハイブリッド⁶⁾や集成材の周りを石膏ボード等の無機材料で被覆する方法⁷⁾がある。前者は耐火被覆としての木材使用であり実質は鋼構造であるほか、スギ材で被覆したものは燃え止まらないため、スギを用いることが出来ない。後者の木質部材の周囲を石膏ボード等の無機材料で被覆する方法は、少なくとも人の目に触れる部分は必ず被覆されてしまうため、木材を現わして使用することが出来ない。木材で荷重を支持し、木材現しとなる構造部材として、ジャラやモルタルといった高密度材を集成材内部に燃え止まり層として配置し、表層部分は燃えても高密度材の部分で燃え止まらせる方法⁸⁾が提案され、1時間耐火構造の認定を取得しているほか、難燃処理合板とせっこうボードを内部に配置した梁についても載荷加熱試験で性能が確認されたとの報告がある⁹⁾。

また、本研究グループのこれまでの研究で、スギ及びカラマツ集成材においてコア部分には可能な限り難燃薬剤を注入せず、表層の燃えしろ部分と、その内側に口の字に配置する燃え止まり部分に限定的に難燃薬剤を注入した集成材が、1時間の無載荷状態での耐火加熱試験で、燃え止まることを明らかにしている。本研究課題では、木現しで断面がすべて一般的に使用される木材で構成され、無機材料を用いないで燃え止まり性能ならびに非損傷性を確保する方法として上記のように難燃薬剤処理した木材を用いる方法を基本とした。



写真1

耐火試験後の300mm角無処理集成材
（加熱終了から8時間経過後）

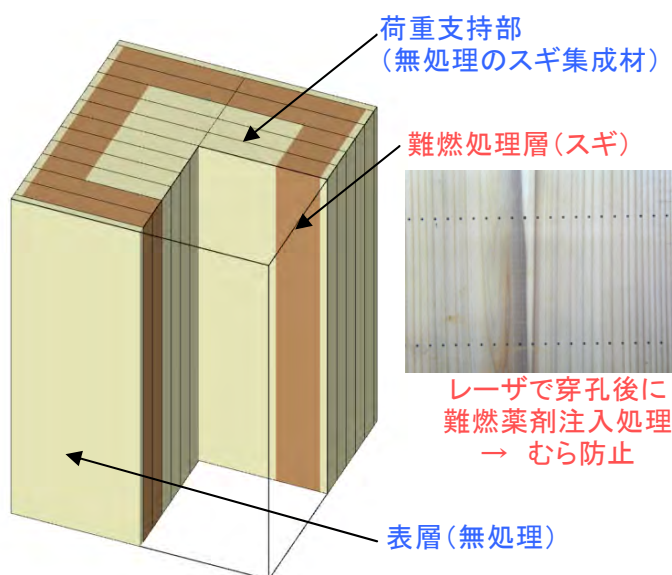


図2 耐火集成材断面構成コンセプト

2. 1時間耐火性能を持つ断面仕様の検討

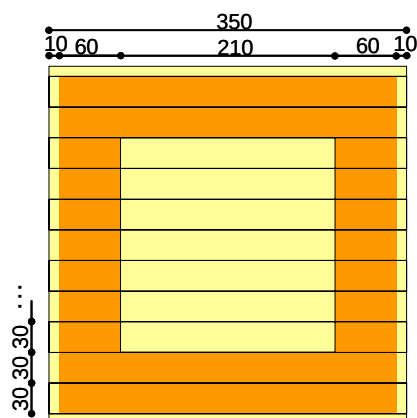


図3 1時間耐火スギ集成材断面

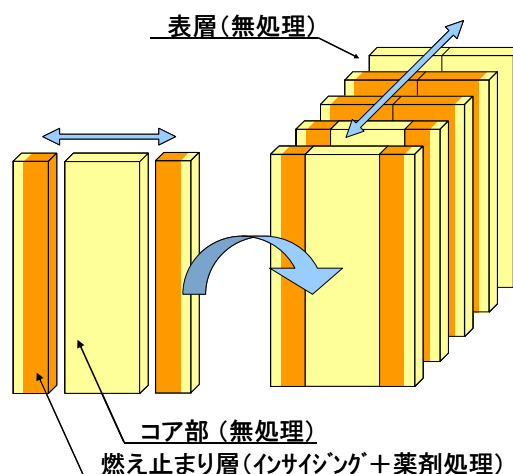


図4 製造工程概念図

・耐火性能付与の基本的なコンセプト

基本的に断面は外側から表層・燃え止まり層・コア部の順で構成される。燃え止まり層にあたる部分は、加熱終了時に熱分解が生じる温度域の先端がその範囲内で留まる部分であり、それ自体が発炎燃焼することの無いよう難燃薬剤により準不燃材料レベルの性能を付与することとした。部材の表層については、難燃薬剤の析出による、いわゆる白華の問題を防ぎ、なるべく無垢の木材の質感に近い仕上げとすることを念頭に、無処理あるいは低濃度の薬剤注入にとどめる仕様としている。ラミナへの薬剤注入は減圧・加圧法により行い、薬剤注入前に燃え止まり層の部分に対してCO₂レーザインサイジング処理を施すこととしている。これは十分な薬剤固定量を確保するとともにラミナ内の薬剤ムラを抑えることを目的としている。

・試験体仕様と製造工程

一般的に用いられる樹種としてスギとカラマツを選択し、それぞれ断面を設計、試験体を作製した。表層以外のラミナ厚を30mmとし、表層：10mm、燃え止まり層：60mm、荷重支持部：210×210mmという断面構成とした。カラマツについては、角部の炭化進行が大きいため、荷重支持部の4隅を切り欠いた断面配置とした。あらかじめ燃え止まり層にインサイジング処理（孔密度ースギ：1,600個/m²、カラマツ：12,500個/m²）した上で窒素・リン酸系薬剤を主体とする難燃薬剤を注入、別途作製した無処理コアラミナと幅はぎ接着（側面接着）したものを積層し作製した（図3、図4参照）。ラミナ側面の無処理表層部分は隣接する燃え止まり層部分と同一ラミナであるが、薬剤処理前に各ラミナの表層相当部分の表面と木口をウレタン樹脂系下塗り剤でシールし、該当部分への薬剤浸透を防いだ。試験体はいずれも外寸350mm角、試験体高さ3,300mm（加熱範囲3,000mm）である。コア部分は同一等級構成集成材で強度等級はスギでE65-F255、カラマツでE95-F315、圧縮基準強度はスギで20.6 N/mm²、カラマツで26.0 N/mm²である。

・1時間載荷加熱試験

いずれも（財）建材試験センターの柱炉において1時間の載荷加熱試験を実施した。試験体に加えた荷重は、荷重支持部に長期許容圧縮応力が生じる値で、スギ：251.7 kN、カラマツ：317.7 kNで、試験終了まで加力し続けた。加熱条件はいずれもISO834-1の標準加熱温度曲線に

従ったもので、1時間の加熱を加えた。その後は炉内に試験体を設置したままで放置し、加熱時間の3倍時間（3時間）以上放置し、燃え止まりの有無が判別可能と判断された時点で試験終了とした。

図5にスギ試験体の温度推移を、写真2に試験後の試験体断面を示す。いずれの試験体も加熱終了後は炉温の低下に従って赤熱が見られなくなり、脱炉時の観測でも赤熱燃焼や発煙は見られなかった。試験体を切断し炭化深さを計測したところ、炭化深さはカラマツ試験体では角部で58～83mm、その他で41～59mm、スギ試験体では22～39mmであった。いずれも荷重支持部への炭化は見られず燃え止まりが確認された。また、それぞれの鉛直変位は、カラマツ試験体で最大2.29mm、スギ試験体で最大2.48mmであり、いずれも十分な非損傷性を有することを確認した。これにより、スギ、カラマツそれぞれを用いて1時間の耐火性能を付与することが可能であることが示された。

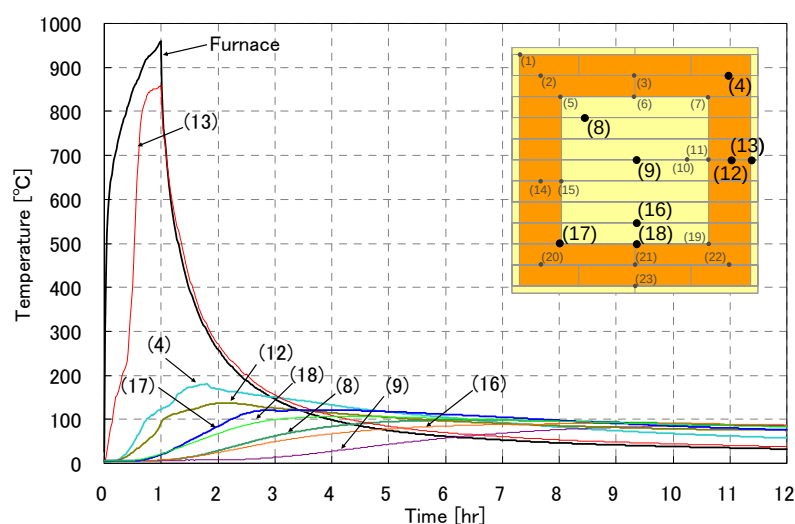


図5 スギ試験体の温度推移
(図中の括弧内の数字は熱電対番号を示す)



写真2 1時間耐火試験の試験後断面
(左：スギ試験体、右：カラマツ試験体)

3. 2時間耐火性能を持つスギ耐火集成材断面仕様の検討

前項までの成果により、1時間の耐火性能を持つスギもしくはカラマツ耐火集成材開発について目処がついた。1時間の耐火構造部材は、耐火建築物の最上階から数えて4階層目までの部分に使用できる。仮に2時間の耐火性能が確保されれば、同様に最上階から14階層目までの部分に用いることが可能となり、これは中層木造ビルでの木材利用を促進する上で大変意義深い。

そこで前項の1時間耐火性能を持つ耐火集成材についての成果を基に、燃え止まり層を倍増した2時間耐火仕様のスギおよびカラマツ集成材柱をそれぞれ作製し、2時間の荷重加熱試験を実施した。試験体寸法は、外寸470mm角、試験体高さ3,300mm（加熱範囲3,000mm）である。荷重支持部は1時間耐火集成材と同一の210mm角、表層10mmで、燃え止まり層を120mmとした。燃え止まり層の処理方法や製造方法は前項と同一である。コア部分も1時間耐火試験体と同様に同一等級構成集成材で強度等級はスギでE65-F255、カラマツでE95-F315、圧縮基準強度はスギで20.6 N/mm²、カラマツで26.0 N/mm²である。

・2時間荷重加熱試験

いずれも（財）建材試験センターの柱炉において2時間の荷重加熱試験を実施した。加熱条件はいずれもISO834-1の標準加熱温度曲線に従ったもので、2時間の加熱を加えた。その後は炉内に試験体を設置したままで放置し、加熱時間の3倍時間（6時間）以上放置し燃え止まりの有無が判別可能と判断された時点で試験終了とした。試験体に加えた荷重は、1時間耐火試験体と同値で（コア断面が同じであるため）、スギ：251.7 kN、カラマツ：317.7 kNで、試験終了まで加力し続けた。試験時の試験体内部温度の推移、鉛直変位などを計測し、試験後に試験体を切断、炭化深さを計測した。

スギ試験体については図6に示すように加熱終了後速やかに試験体の温度が低下し、燃え止まりが確認された。炭化深さは51～73mm、平均62.7mmでコア部への炭化も見られなかった（写真3）。また、最大収縮量は1.86mm、最大変形速度は0.03mm/minであり、耐火構造に求められる基準を十分に満たす値であった。これにより難燃処理ラミナを燃え止まり層としてコア部周囲に配置する方法により2時間の耐火性能を確保することが可能であることが明らかになった。

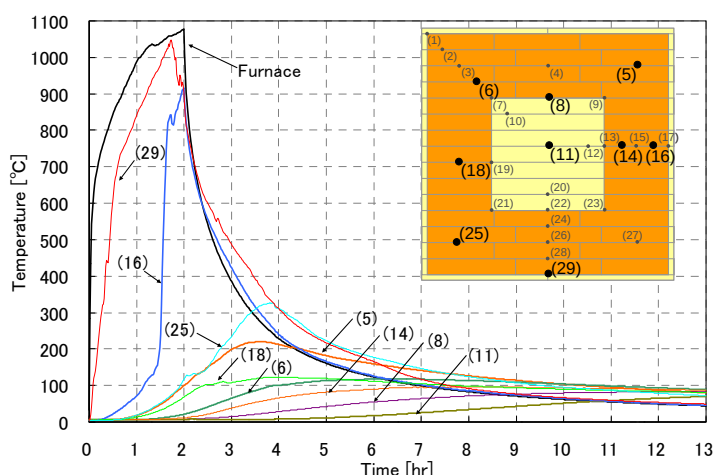


図6 試験体内部の温度推移

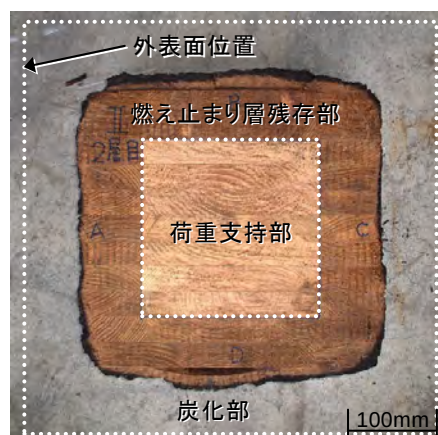


写真3 試験後の断面

注) 炭化部分を削り落とした状態

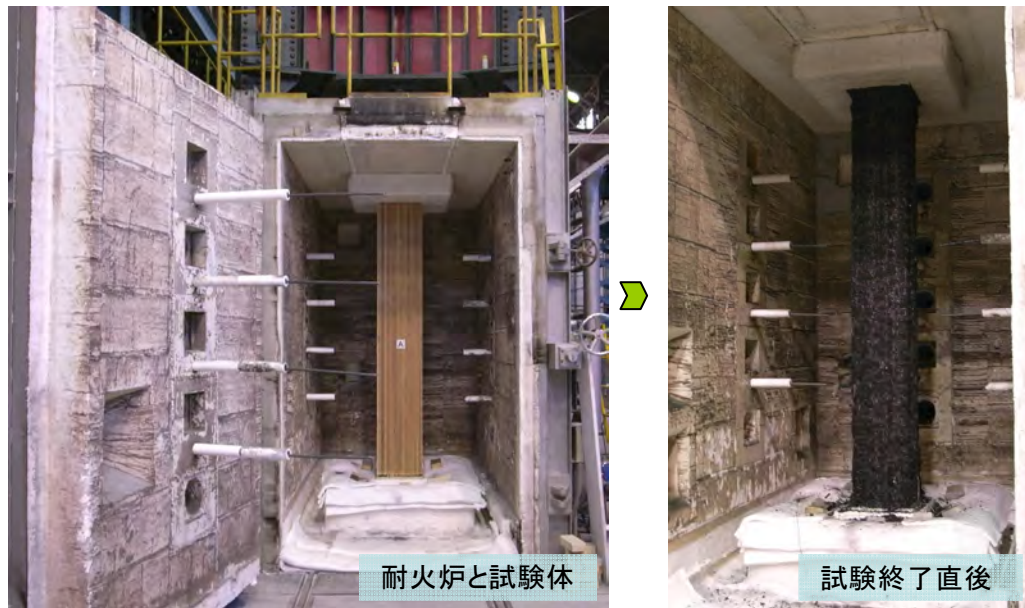


写真 4 スギ 2 時間耐火集成材柱 試験前後

カラマツ試験体は加熱終了後にも赤熱燃焼が継続し、最終的に燃え止まらなかった。カラマツは難注入性の樹種であり、試験体の燃え止まり層の平均薬剤固定量は 90kg/m^3 程度であった。2 時間加熱の場合は 1 時間加熱と比較して時間が倍になるだけでなく、温度もより高温となるため、2 時間加熱に対する燃え止まり性能を付与するためには難燃処理層の厚みだけではなくより多くの難燃薬剤固定量が必要となることが明らかになった。

4. 耐火集成材仕様の自由度・品質向上についての検討

- ・より接着性の高い難燃薬剤を使用したスギ耐火集成材

将来的に耐火集成材での JAS 認定を目指した場合、コア部分のみならず、集成材全体での接着耐久性が求められることになる。その場合、難燃処理部分についても常態でのブロックせん断強さだけでなく繰り返し剥離試験でも所定の性能を示す必要がある。この点について中課題 1 の小課題 2「合理的、効率的な耐火集成材製造技術の開発」において、より接着性の高い難燃薬剤が明らかとなったため、その新薬剤（リン酸系）を用いて実大のスギ試験体を作製し、これまでの薬剤と同じ仕様で耐火性能が確保されるかを 1 時間耐火試験により確認した。試験体寸法、断面構成、載荷条件、試験法等は第 2 項と同一である。

その結果、この新薬剤を用いた仕様においても従来の難燃薬剤の場合と同様に燃え止まりが確認され、炭化深さは $38\sim 60\text{mm}$ 、平均 46.5mm でコア部への炭化も見られなかった。また、最大収縮量は 4.56mm 、最大変形速度は 0.04mm/min であり、非損傷性についても基準を十分に満たす値であった。これにより、この接着性の高い難燃薬剤を用いた耐火集成材の開発が可能となり、剥離等の問題が生じにくい、より高品質な耐火部材の提供が可能となる。また、構造計算上は荷重支持部のみで荷重を負担する想定となるのに対し、実際は周囲の燃え止まり層との接着強度が十分に高いことから燃え止まり層部分も荷重を負担することになるため、本仕様で建築物を建てた場合、地震等の水平荷重に対して設計よりも大幅に安全なものとなるといえる。

・より小さい断面の耐火集成材

実際に建築物を設計する場合、スパンや荷重に応じて部材の寸法は様々な大きさとなる。耐火上はより小さい断面寸法の部材のほうが熱容量が小さく、火災に弱くなると考えられる。本研究で扱う耐火集成材においても断面寸法が小さくなると燃え止まり性能や非損傷性に問題が生じる可能性があり、どの程度の寸法があれば耐火性能が担保されるのかを把握することは非常に重要である。

そこで、荷重支持部分をより小さな断面としたスギ耐火集成材柱試験体を作製し、1時間の載荷加熱試験を行った。試験体寸法は、外寸 240mm 角、試験体高さ 3,300mm(加熱範囲 3,000mm)で、荷重支持部は 120mm 角、表層 10mm、燃え止まり層 50mm である(図 7 参照)。燃え止まり層の処理方法や製造方法は第 2 項と同一である。コア部分は同一等級構成集成材で強度等級は E65-F255、圧縮基準強度は 20.6 N/mm^2 である。

試験の結果、この小断面仕様においても燃え止まりが確認され、炭化深さは 24~50mm、平均 33.1mm でコア部への炭化も見られなかった。また、最大収縮量は 2.32mm、最大変形速度は 0.02mm/min であり、非損傷性についても基準を十分に満たす値であった。

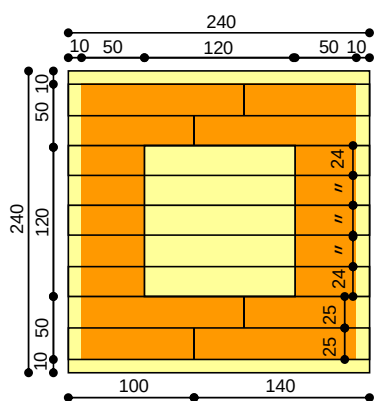


図 7 小断面試験体 断面

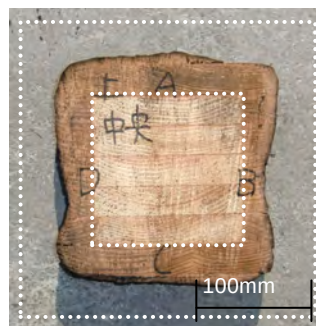


写真 5
小断面試験体の試験後切断面

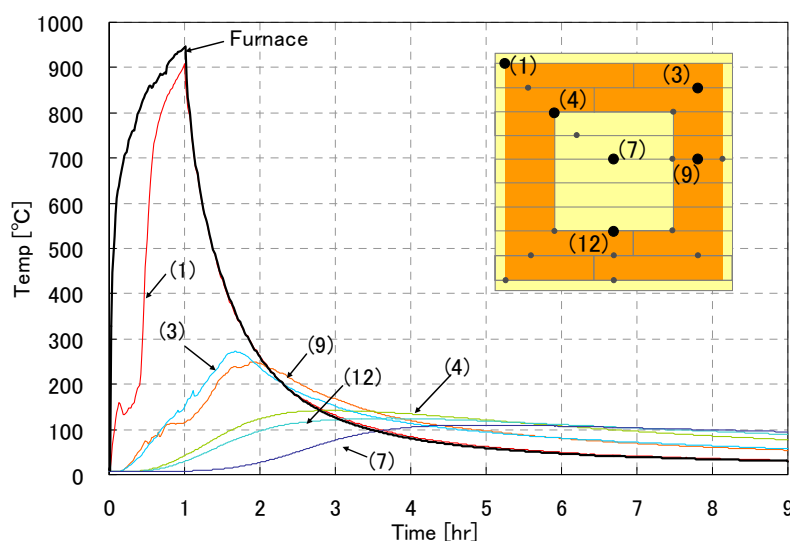


図 8 小断面試験体の温度推移
(図中の括弧内の数字は熱電対番号を示す)

5. まとめ

荷重支持部の集成材の周囲に難燃薬剤処理を施したラミナ、さらに外側に無処理の表面層を配置した1時間耐火集成材断面を設計、載荷加熱試験を実施し、スギ・カラマツそれぞれの耐火集成材柱について1時間の耐火性能をもつ断面仕様を明らかにした。さらに同様のコンセプトで2時間耐火仕様のスギ集成材柱を作製、載荷加熱試験により2時間の耐火性能をもつことを明らかにした。また、より小さな断面からなるスギ集成材柱、より高い接着性が得られる難燃薬剤により処理したスギ集成材柱について1時間の載荷加熱試験を実施し、いずれも燃え止まり性能、非損傷性に問題がないことを明らかにした。これにより耐火集成材断面寸法の自由度向上と、品質向上が可能となり実用性が増した。

共同研究者である鹿島建設により、スギの柱および梁について1時間の耐火構造認定が取得されており、さらに接合部についても実大耐火試験により防耐火性能を確認している。実際の普及に際しては、レーザーインサイジング工程を実施する製造ラインを整備、コストの低減に向けた取組みが必要となる。

参考文献

- 1) 上川大輔：木質耐火建築物に関する取り組み、木材工業、62(12)、pp.596-601 (2007)
- 2) 例えば“建材試験センター：防耐火性能評価試験・評価業務方法書（2000年6月1日制定）”，
<http://www.jtccm.or.jp/seino/siryo/houhousho/boutaika.pdf>, (参照 2010-03-15).
- 3) International Organization for Standardization: Fire resistance tests – Elements of building construction. Part 1: General requirements ISO/FDIS 834-1, ISO, Geneva, Switzerland, 1997
- 4) 遊佐秀逸、増田秀昭、川合孝明、上杉三郎、並木勝義：木質ハイブリッド構造の耐火性能に関する研究（その1）、平成15年度日本火災学会研究発表会概要集、pp.106-109 (2003)
- 5) 原田寿郎、服部順昭、安藤敬介、宮林正幸：1時間耐火加熱試験における大断面集成材柱の内部温度上昇、第56回日本木材学会大会研究発表要旨集、秋田 p.112 (2006)
- 6) 白岩昌幸、遊佐秀逸、増田秀昭、川合孝明、並木勝義、斉藤春重：木質系構造の耐火性能に関する研究（その8）、日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2、北海道、pp.137-138 (2004)
- 7) 遊佐秀逸、増田秀昭、川合孝明、並木勝義、斉藤春重：木質系構造の耐火性能に関する研究（その6）、日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2、北海道、pp.133-134 (2004)
- 8) 大橋宏和、安部裕、岡日出夫、堀長生、山口純一、高橋晃一郎：燃え止まり性能を有する木質構造部材に関する研究（その3）、日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2、関東、pp.89-90 (2006)
- 9) 中田達也、長谷見雄二、永盛洋樹、景山悠太郎、原田浩司、飯島泰男、板垣直行、常世田昌寿：スギ難燃処理合板を利用した木質耐火構造の開発(その5)、日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2、東北、pp.319-320 (2009)

I-2 合理的、効率的な耐火集成材製造技術の開発

国立大学法人 東京農工大学：服部順昭、安藤恵介

<要約>

本小課題では、集成材表面から少し内部に入った燃え止まりを期待する領域を限定的に難燃処理したラミナを積層することで耐火性能を付与した梁・柱を開発するために、難燃薬剤の必要量を確実に注入するための前処理であるレーザを用いたラミナへの穴あけ加工（以下「インサイジング」という）の方法やラミナの積層方法など、より合理的で効率的な耐火集成材製造技術を開発することを目的とした。これらの目的を達成するために、強度低下の少ないインサイジング方法やインサイジングパターンの検討を行い、難燃処理薬剤と接着剤の相性も検討することで、硬化阻害による性能低下の少ない集成材の製造方法を開発した。

1. 研究の背景と目的

耐火建築物の躯体に木材が使用できれば、スギ等国産材の需要拡大に資するとともに地球環境保全にも貢献することが期待できる。その上、耐火建築物の梁や柱に木材を現わして使用することができれば、木材の優しさや潤いの漂う新たな都市空間の創造が防火地域や準防火地域で可能となる。木材が現わしとなった梁・柱に耐火性能を付与するには、高密度の樹種を燃え止まり領域に用いる方法などにより可能ではあるが、特殊な樹種であるため入手が困難であり、実用化には至っていない。そこで、蓄積の多い国産材であるスギやカラマツを用いて耐火構造を実現するために、燃え止まりを期待する領域を限定的に難燃処理したラミナを積層することで耐火性能を付与した集成材の開発を本中課題で行うこととなった。具体的には、必要量の難燃薬剤の確実な注入を可能とするCO₂レーザを用いたラミナへのインサイジング方法やラミナの積層方法、接着性のよい薬剤と接着剤の組み合わせなど、より合理的で効率的な耐火集成材製造技術の開発である。

2. インサイジング方法の検討

従来のインサイジングパターンでは、繊維直交方向の間隔が繊維方向のそれに比べて短いために、応力集中と曲げ強度の低下が懸念された。そこで、この点を改良したパターンを考案した。従来のものは、単一穴からの繊維方向及びその直交方向の浸潤長の範囲を菱形と仮定して、その形を千鳥型に置くパターンであったが、改良パターンとして、これらの浸潤長を長径と短径とする楕円と仮定し、これを従来パターンと同様に千鳥型に配置したものをbパターン、楕円に内接する長方形と仮定し、その位置をずらせながら配置したものをcパターンとして、検討した(図1)。

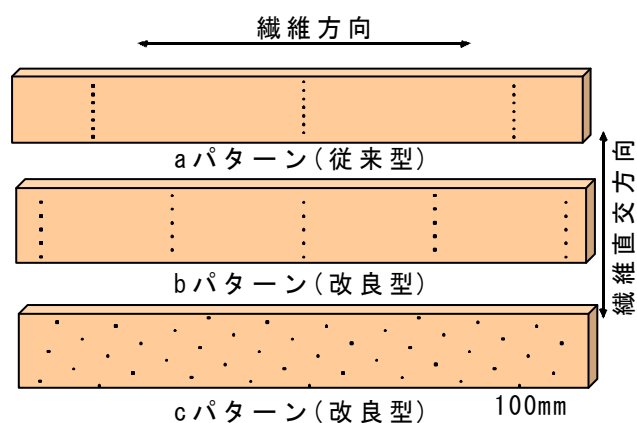


図1 インサイジングパターン

注：図は木材ラミナを板目面から見たもので、
・はインサイジング穴の位置を示す。

これらについて写真1に示したように4点曲げ強度試験を行い、パターン別に検定を行った結果、表1のようになった。なお、aパターンは従来パターンを、a'、b'は曲げスパン中央にインサイジング列が位置することの影響を確認するために、a、bパターンの位相をずらせたものである。インサイジングを行わないものについてもdとして、あわせて検討を行った。その結果、改良インサイジングパターンはいずれも従来パターンに比べて有意に強度低下が少ないことが明らかになった。また、bパターンとcパターンを比較すると、cパターンの方が強度がやや高い



写真1 強度試験の様子

傾向を示したが、今年度は注入及び耐火試験を実施してパターンを決定することが困難なことから、耐火性能が確認されている従来パターンに近いbパターンを最適インサイジングパターンとした。

表1 パターン別有意差検定結果※1

	a	a'	b	b'	c	d
a	—	D	F	N	F	F
a'	A	—	E	N	F	F
b	A	A	—	N	D	F
b'	A	C	N	—	F	F
c	A	A	C	A	—	F
d	A	A	A	A	A	—

※1:A:1%有意水準で有意に強い、B:5%有意水準で有意に強い
C:10%有意水準で有意に強い、D:10%有意水準で有意に弱い
E:5%有意水準で有意に弱い、F:1%有意水準で有意に弱い
N:10%有意水準で有意差なし

さらに、これまで用いてきた照射条件(1500 W, 100 ms、以下、レーザ大と記す)に加えて、レーザインサイジング穴の直径を小さくする照射条件(200 W, 300 ms、以下レーザ小と記す)、及び直径2 mmと1.5 mmのドリルを用いて貫通穴をあける方法(以下、それぞれドリル大、ドリル小と記す)により、30 mm×75 mm×750 mmのスギ及びカラマツ材にインサイジングパターンが

ドリル CO₂レーザ
1.5mm 1500w,100ms 200w,300ms

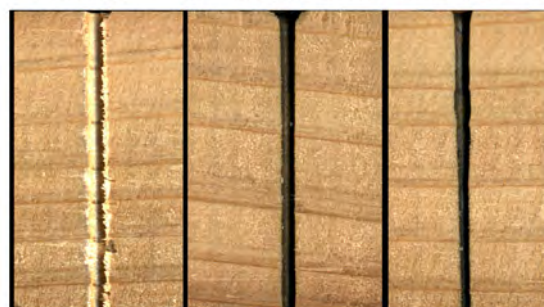


写真2 インサイジング穴の縦断面

a、b、c となるインサイジングを施し(写真 2)、インサイジング前後のヤング率を載荷法によって測定した。その後、薬剤注入量の比較を行うため、減圧加圧注入法で水を注入し、注入量を比較した。

インサイジングにドリルを用いた場合には、スギ材、カラマツ材ともに追い栓に近い木取りでは、ドリルが木理に沿って曲がり、通直な穴があげられなかったり、多くのドリルが破損した。両樹種とも早晚材の密度差が大きく、カラマツ材では高いインサイジング密度が必要なこともあり、全ての条件でインサイジングが出来なかった。また、インサイジング面の裏面では、穴の位置が、ドリルの曲がりにより、大きくずれる場合が頻発し、裏面ではなく側面に穴があく場合もあったことから、注入量が十分であったとしても、注入ムラの可能性が大で、このインサイジング方法は実用に適さないことが判明した。スギ材の場合、注入量は無加工のものを含めて約 600 kg/m³ 以上となり、インサイジング前後のヤング率を比較しても、インサイジング方法とパターンによる明確な差は見られなかったことから、消費エネルギーが小さく、穴径が小さいレーザインサイジングを用いることとした。図 2 にカラマツ材における注入量の結果を示した。難注入材であるカラマツの場合には、インサイジングの効果は明らかであり、パターンの比較ではインサイジング密度の高い c パターンで注入量がやや多くなる傾向を示したが、3 通りのインサイジング方法間で大きな差は見られなかったことから、安全を見て注入量が多めの c パターンを用いることとした。

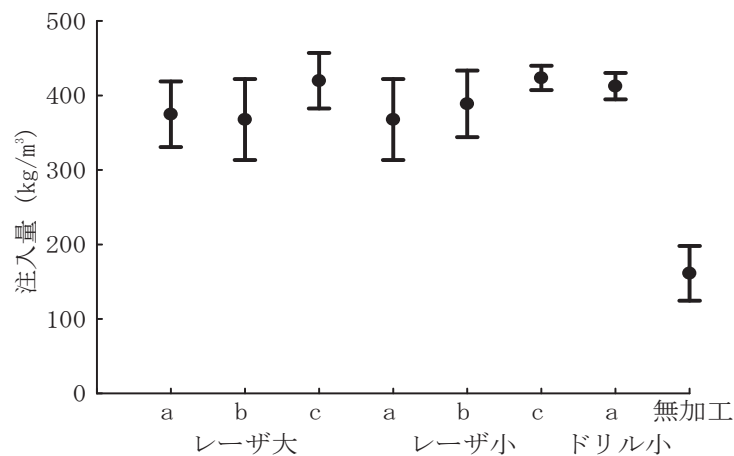


図2 カラマツ材におけるインサイジング条件およびパターンと注入量の関係

3. 難燃薬剤・接着剤の組合せと接着性能

より信頼性の高い接着性が得られる難燃薬剤と接着剤の組合せを検討するため、これまでの実験で燃え止まった集成材に用いた難燃薬剤と同じ窒素・リン酸系薬剤とは主成分が異なる新たな難燃薬剤Bを選定し、それによる接着性能試験（ブロックせん断試験、減圧・加圧はく離試験）を行い、得られた結果をこれまで用いてきた難燃薬剤Aのそれと比較した。接着剤には、液体硬化剤を用いるレゾルシノール樹脂接着剤(I)と粉末硬化剤を用いるレゾルシノール樹脂接着剤(II)を試用したので、組み合わせは4通りとなった。

薬剤を注入し、接着した試験体のせん断ブロック試験、減圧加圧はく離試験結果から、薬剤Bと接着剤IIが良好な組合せであること、その接着性はJASの構造用集成材の接着性に求められる性能を満たすことが判明した。

表2 難燃薬剤・接着剤の組合せと接着性能

	難燃薬剤A			難燃薬剤B			
	ブロックせん断試験		はく離試験	ブロックせん断試験		はく離試験	
	せん断強さ	木部破断率	繰返し1回目 はく離率	せん断強さ	木部破断率	繰返し1回目 はく離率	2回目 はく離率
	[N/mm2]	[%]	[%]	[N/mm2]	[%]	[%]	[%]
接着剤 I	0~6.06	0~55	100	7.28~9.41	55~90	0	10.49
	平均 4.05	平均 18.3		平均 8.56	平均 68.33		
判定	×	×	×	○	△	○	×
接着剤 II	7.62~11.08	85~100	87.0	8.62~9.85	75~95	0	0
	平均 8.84	平均 92.5		平均 9.35	平均 86.67		
判定	○	○	×	○	○	○	○

4. 小型炉による総合評価

前項までに記載した個々の検討結果の中から最適の因子を組み合わせると、合理的、効率的な耐火集成材の製造条件が得られることが期待されるが、総合的な評価は実大試験体による耐火試験結果を待たなければならない。そこで、小型炉を作成し、この試験炉で試作した小型試験体を、炉内温度の設定を実大炉と一致させて、耐火試験し、総合的な評価を行った。

その結果、図3に示したように、小型試験炉においても実大耐火炉での試験時と同様に、個々の試験体は加熱終了後速やかに赤熱燃焼がおさまり、燃え止まり性能を持つことが確認された。また、実大と比較してより細かく熱電対を配置することが可能であることから、より精緻に試験体内部温度の推移を計測することができ、1時間の耐火加熱試験の参考になる結果が得られることが分かった。

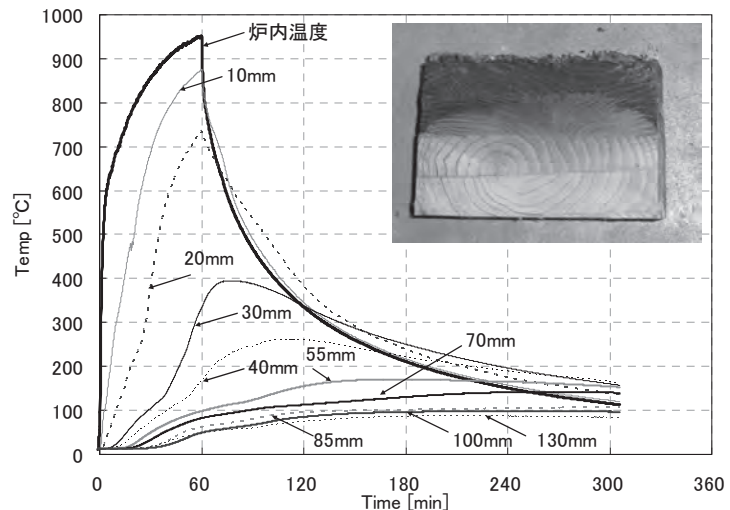


図3 スギ処理材の小型耐火炉試験体内部温度推移と試験後断面

5. まとめ

より合理的で効率的な耐火集成材製造技術を開発することを目的として、インサイジング方法やインサイジングパターン、難燃処理薬剤と接着剤の相性などについて検討した。その結果、より強度低下が少なく、かつ注入ムラの生じにくいインサイジング方法・パターンを明らかにし、小型試験炉により燃え止まり性能についても十分な性能があることを示した。また、いくつかの難燃薬剤と接着剤との組み合わせを検討し、より信頼性の高い接着性が得られる組合せを明らかにした。これら成果により、耐火集成材のインサイジング工程が効率化されるとともに、ムラの無い安定した注入量を得られることから、再注入工程の省略も可能となり、耐火集成材製造工程の合理化、効率化が図られる。また、これら成果は耐火集成材の品質向上に対しても大きく寄与するものである。

I－3 実用化に向けた木造耐火構造の開発と評価

鹿島建設：西村光太 宮本圭一 抱憲誓 和田環 久保田淳 田中裕樹

<要約>

大規模木質耐火建築物を実現するには、木造柱や木造梁といった構造部材に加えて、柱と梁の接合部や、柱と壁あるいは梁と天井床の接合部についても耐火性能が求められる。

筆者らは可燃物である木材に難燃薬剤を注入することにより耐火性能を付与した木質耐火部材「耐火集成材」を開発し、柱と梁について単一樹種構成（国産スギ材のみ）としては国内初となる 1 時間耐火構造の耐火大臣認定を取得した。また、柱や梁単体だけではなく、柱梁接合部などについても同様に耐火性能を確認し、木質耐火構造の実現に向けた開発は実用化段階に進んでいる。また、耐火集成材を適用した 3、4 階建ての「木造オフィス」の試設計を実施し、構造計算により問題なく実現可能であることを確認した。

1. 研究の目的

近年、省 CO₂ などの環境対策や森林資源の有効活用の面から、「植林、育成、伐採、利用」が繰り返し可能な循環型天然資源である木材の利用が注目されており、特に木材需要の 4 割を占める建築分野で木造建築物の建設が期待されている。一方で木造建築物は火災に弱いとされ、建設地域や規模が法律により制限されていた。

しかし、2000 年に、建築基準法が性能規定化され、木質構造であっても十分な耐火性能が確保されれば、耐火構造として認定されることが可能となった。木質系部材の耐火構造認定にあたっては、「要求耐火時間の加熱＋その 3 倍時間（＋ α ）炉内放置の間の変形や変形速度による非損傷性（構造安全性）の判定」に加え、自然に「燃え止まる」ことが求められる。

本開発事業では、鋼材や石膏ボードを一切用いずに、かつ、単一の樹種（スギ）で、難燃薬剤処理ラミナの部分的使用により、木質構造部材を燃え止まらせる技術を検討し、耐火性能を有する集成材「耐火集成材」を開発すること、および、開発した「耐火集成材」を実用化し、木質耐火建築物を実現することを目的としている。

検討対象は、柱や梁といった構造部材単体に加えて、柱と梁の接合部や柱と壁あるいは梁と天井床の接合部、および、設計の自由度を高めるために中断面部材や 2 時間耐火構造部材とし、それぞれについて開発と評価を行った。本開発事業で検討対象とした部材断面を図 1 に示す。

2. 開発した「耐火集成材」の概要および特徴

図 2 に本開発事業において開発した「大断面耐火集成材」の概要を示す。「耐火集成材」の概要および特徴は以下の通りである。

- ①国産スギ材のみを利用した単一樹種構成の純木質耐火構造部材（柱、梁）
- ②大断面耐火集成材の柱、梁について 1 時間耐火構造の大臣認定を取得
- ③無処理の荷重支持部の外周に難燃薬剤を注入した燃え止まり層を配置することで可燃物である木材に 1 時間の耐火性能を付与
- ④レーザーインサイジング処理（孔あけ処理）により薬剤注入量と薬剤注入分布を均一化
- ⑤実大試験体による加熱実験で耐火性能及び火災時の構造安全性能を確認
- ⑥部材単体以外に柱梁接合部や、柱と壁、梁と天井床の接合部でも耐火性能を確認

- ⑦ホルムアルデヒド放散量は少なく JAS F☆☆☆☆（最高等級）の基準を満足し室内空気環境への悪影響はないことを確認
- ⑧光合成により CO₂ を吸収した木材を構造部材として建築物に利用するので、建物にある構造部材内部に炭素を貯蓄保存可能

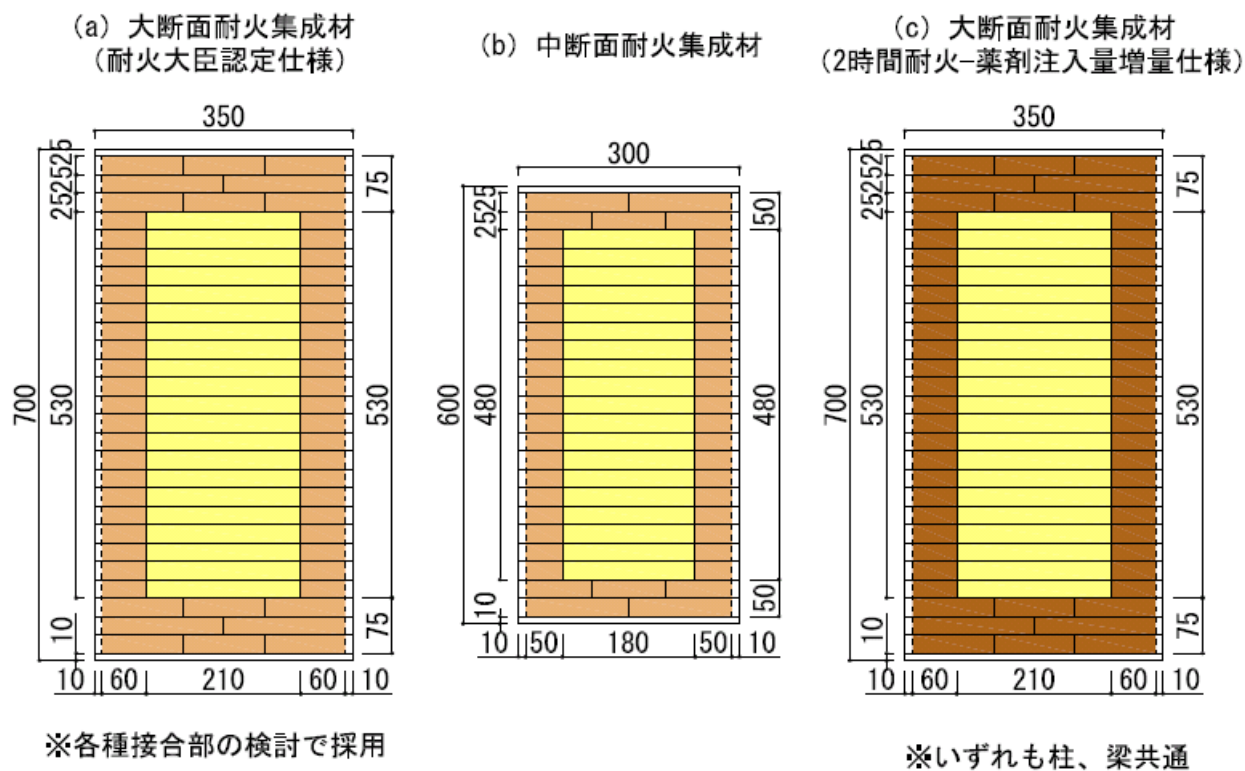


図 1 検討対象部材断面

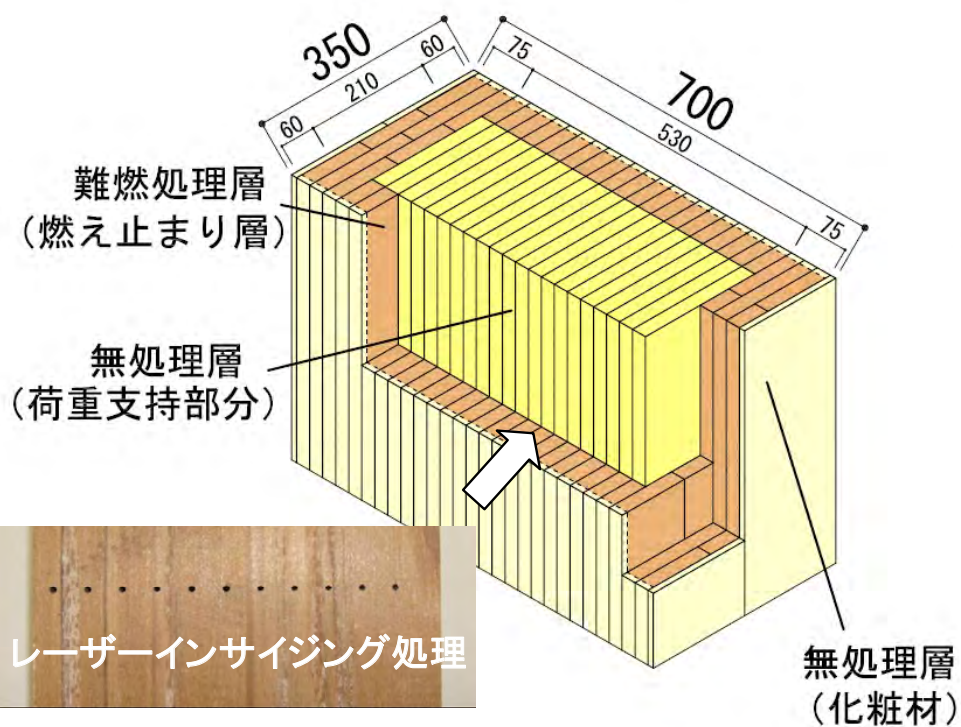


図 2 「大断面耐火集成材」の概要（耐火大臣認定仕様）

3. 中断面耐火集成材の検討

2009 年 8 月に大断面耐火集成材（350mm×700mm（荷重支持部 210mm×530mm）以上）の柱と梁について 1 時間耐火構造の耐火大臣認定を取得し、実適用できる状態になっている。

一方、住宅のような小規模建物の場合、大断面耐火集成材では過剰なスペックとなり経済的かつ合理的な設計が出来ない。また、小さく細い部材は大断面耐火集成材の認定範囲外になるため使用できず、意匠的にも魅力的な空間が実現できない。

そこで、経済的かつ合理的な設計を行い意匠的にも魅力的な空間が実現できる部材となるよう、大断面よりもやや小さい中断面耐火集成材（300mm×600mm（荷重支持部 180mm×480mm）以上）の開発を行った。

3. 1 中断面耐火集成材（柱、梁）の開発^{1,2)}

図 1 の（b）に示すように、中断面耐火集成材の断面寸法は、柱、梁共通で 300mm×600mm（荷重支持部 180mm×480mm）とした。難燃処理層は大断面耐火集成材よりも薄くし、幅方向、積層方向ともに 60mm（無処理層または化粧材 10mm を含む）とした。

実験は ISO834 の標準加熱曲線に従い 1 時間加熱した後、11 時間耐火炉内に放置した。実験中は载荷しながら加熱を行うので、耐火性能（燃え止まり）と非損傷性（構造安全性）を評価できる。柱の試験方法を図 3 に、梁の試験方法を図 4 に示す。

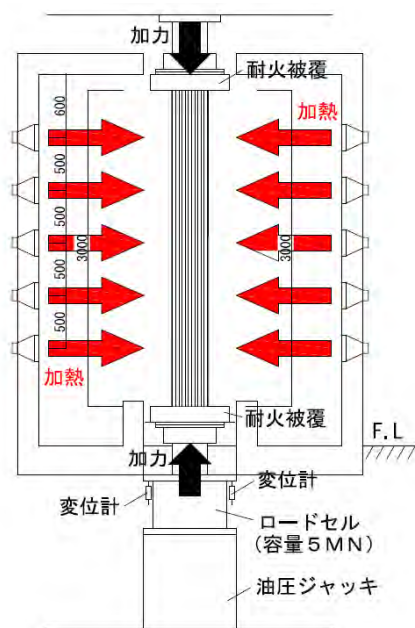


図 3 柱試験方法

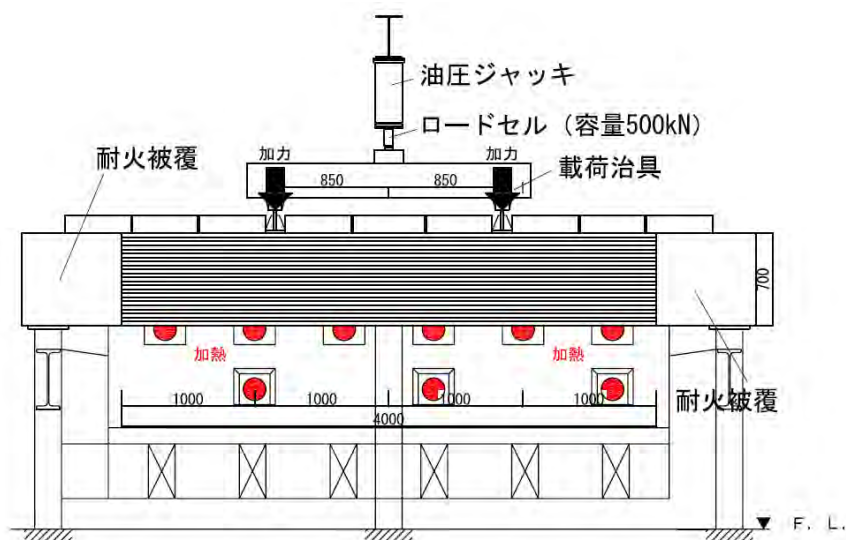


図 4 梁試験方法

結果は、柱、梁いずれも難燃処理層と荷重支持部の境界で計測した温度が、一般的に木材の炭化温度とされている 260℃に達することなく 150℃程度におさまった。実験終了後、加熱後の試験体を切断し断面炭化状況を確認し、荷重支持部に炭化が進行していないことを目視確認できたので、中断面耐火集成材は耐火性能（燃え止まり）を有すると評価した。

また、中断面耐火集成材は、1 時間の火災加熱を受けても、柱、梁いずれも変形量はわずかなことから、十分な非損傷性（構造安全性）を有していることを確認した。図 5 に柱試験体の中央断面における温度推移を、図 6 に柱の試験体の軸方向変形推移を、写真 1 に加熱前後の柱試験体状況を、写真 2 に柱試験体および梁試験体の断面の炭化状況を示す。

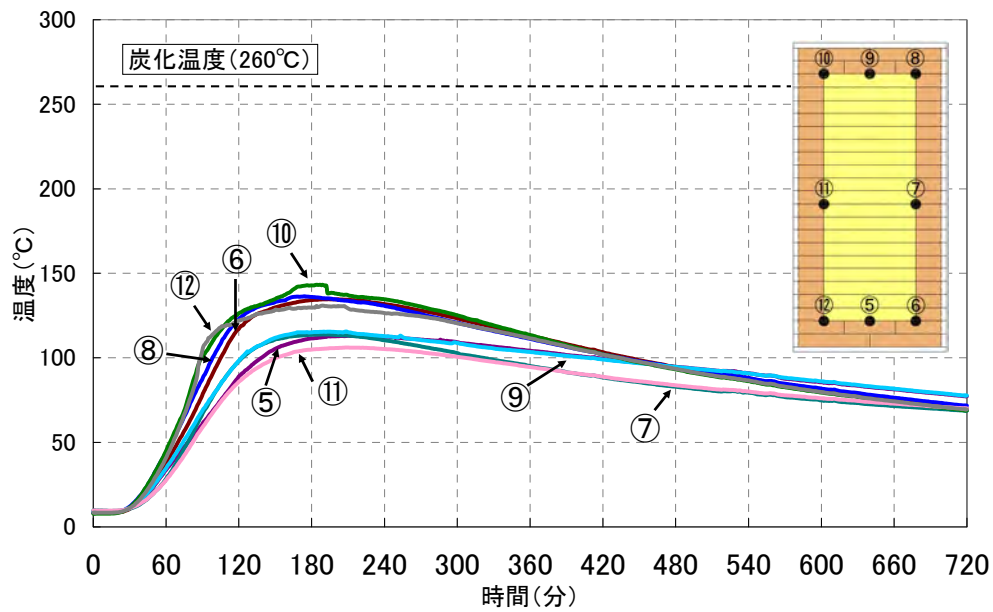


図 5 柱試験体温度推移（中央断面）

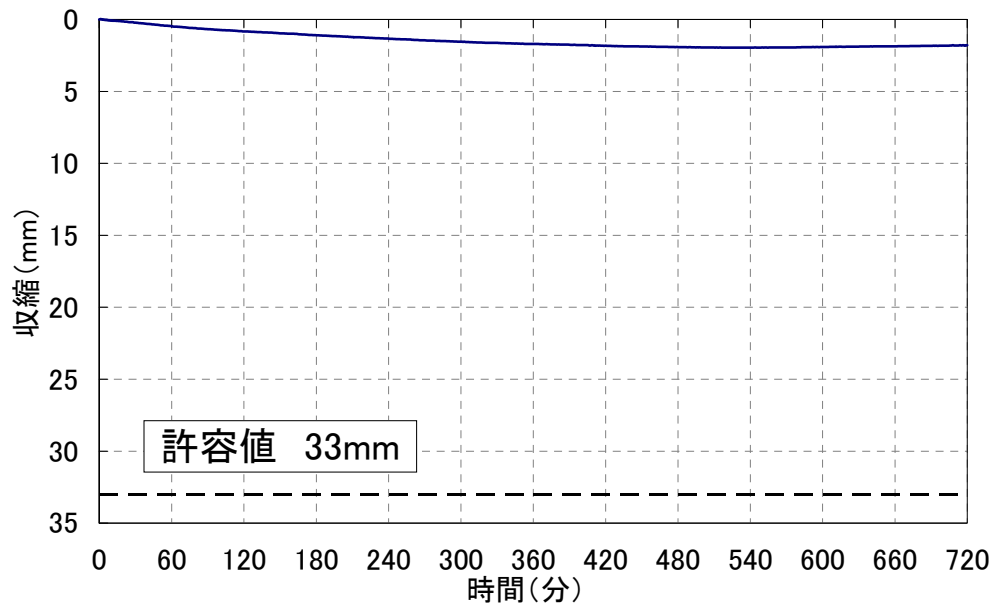


図 6 柱試験体の変形推移



(a) 加熱前



(b) 加熱後

写真 1 加熱前後の柱試験体状況



(a) 柱試験体



(b) 梁試験体

写真 2 断面の炭化状況

4. 耐火集成材を用いた各種接合部の検討

建築物には柱や梁が単体で存在する以外に、柱と梁の接合部や柱と壁、あるいは梁と天井床の接合部が生じる。木質耐火建築物を実現するには、これらの箇所についても部材単体時と同様に耐火性能が求められる。本開発事業では図1の(a)に示す大断面耐火集成材を用いて各種接合部の耐火性能について評価した。加熱前の試験体状況として、写真3にドリフトピン接合による柱・梁接合部試験体を、写真4にドリフトピンおよびボルト接合による柱・梁接合部試験体を示す。また、写真5に柱・壁接合部試験体を、写真6に梁・天井床接合部試験体を示す。加熱後の試験体状況として、写真7にドリフトピン付近を、写真8にボルト付近を、写真9に柱・壁接合部試験体を、写真10に梁と天井床境界近傍の梁部材断面を示す。

4. 1 柱・梁接合部の耐火性能評価^{3,5)}

柱と梁の接合方法として一般的な木造建築物に採用されている「ドリフトピン接合」と「ボルト接合」を検討対象とし、耐火性能評価を行った。ドリフトピン接合の場合、接合用鋼板を木材内部に挿入しピンを打ち込み柱と梁を固定するため、温度上昇した鋼材が内部から木材に熱を与えることが懸念された。また、ボルト接合は接合後、接合部を火災加熱から守るため耐火被覆処理を行わなければならない。本開発事業では難燃薬剤処理した木材による耐火被覆方法を検討した。

結果は、火災時に木材内部に挿入された接合用鋼材は過剰に温度上昇することなく、内部から木材を熱することがないことを確認し、木質耐火建築物においても、ドリフトピン接合は有効な接合手段であることを確認した。また、難燃薬剤処理した木材により耐火被覆したボルト接合部の温度上昇が小さかったことから、難燃薬剤処理木材が耐火被覆として有効な役割を果たすことを確認した。

4. 2 「柱・壁」「梁・天井床」接合部の耐火性能評価^{6,7)}

壁と天井床には、日本ツーバイフォー建築協会が1時間耐火構造の耐火大臣認定を取得している木材を強化石膏ボードで被覆し耐火性能を確保する仕様を用いて検討した。柱と壁、梁と天井床との境界は突き付けで接しているのみで特別な処理は行っていない。

結果は突き付けで接しているのみの境界部においても、天井面材の強化石膏ボードが火災加熱により変形し隙間が生じるなどの不具合は生じなかった。また、床や天井内部の温度が過剰に上昇することなく、天井根太および床根太は健全な状態で残っていた。以上より、壁や天井床との接合部においても部材単体時と同様に1時間の耐火性能を有することが確認された。



写真3 柱・梁接合部試験体
(ドリフトピン接合)



写真4 柱・梁接合部試験体
(ドリフトピン・ボルト接合)



写真5 柱・壁接合部試験体
(加熱前)



写真6 梁・天井床接合部試験体
(加熱前)



写真7 加熱後の状況
(ドリフトピン接合部)



写真8 加熱後の状況
(ボルト接合部)



写真9 加熱後の状況
(柱・壁接合部試験体)

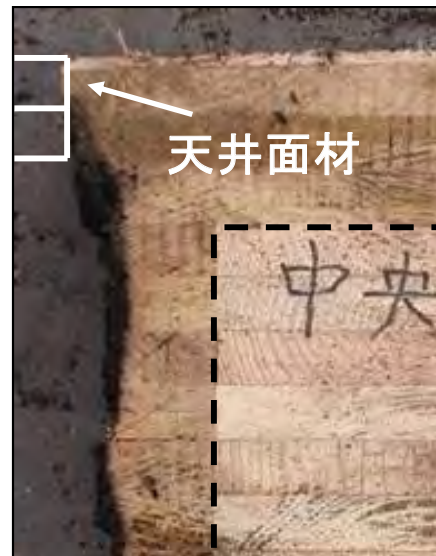


写真10 加熱後の状況
(梁と天井床境界近傍断面)

5. 2時間耐火構造耐火集成材の検討^{4,5)}

1時間耐火構造部材が建築物の上から4以内の階に適用可能なことに対して、2時間耐火構造部材は上から14以内の階まで適用可能となり、建設可能な建築の範囲が大きく広がる。

耐火集成材に2時間の耐火性能を付与する方法は、1時間の耐火性能を有する耐火集成材の「難燃処理層の拡大」または「難燃薬剤注入量の増量」が考えられる。本検討ではより小さい断面のニーズがあることから、後者の考えを用いて、部材断面の大きさおよび難燃処理層厚さは変えずに1時間耐火構造部材と同断面で薬剤注入量を増量させる方法で2時間耐火実現の検討を行った。図7に2時間耐火仕様の検討を示す。検討対象は図7(c)とした。

結果は、柱、梁共に非損傷性（構造安全性）は問題なく、十分な性能を有することを確認した。耐火性能（燃え止まり）については柱の荷重支持部の一部で炭化が進行し燃え込んだ。梁と柱梁接合部は梁下端隅角部に変色が見られた。また、柱試験体でラミナ間の剥離が見られた。これは薬剤注入量増量による接着性への悪影響と考えられる。写真11に柱試験体の剥離状況を、写真12に柱の荷重支持部炭化状況を、写真13に梁の荷重支持部変色状況を示す。

以上より、非損傷性、耐火性能の両方を有する2時間耐火「耐火集成材」を実現するには、難燃薬剤注入量を増量するよりも、難燃処理層を1時間耐火仕様より適切量拡大するのが最適と考えられる。

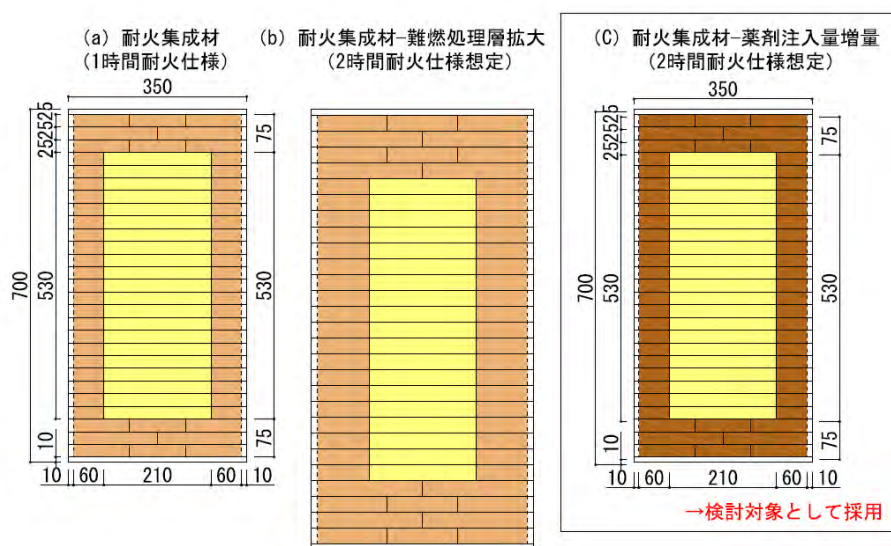


図7 2時間耐火仕様の検討



写真11 柱一部剥離 写真12 柱の荷重支持部「炭化」 写真13 梁の荷重支持部「変色」

6. 耐火集成材を用いた「木造オフィス」の試設計

開発した「耐火集成材」を一般的な建物（オフィス）へ適用する場合を想定し試設計を行った。試設計により防火地域における木造建築物実現の可能性を検討するとともに今後の課題抽出を行った。

試設計は3階建てと4階建ての2ケースについて実施した。いずれのケースも梁間 13.2m、桁行 38.4m、階高 3.8m であり、柱、梁に1時間耐火構造の耐火大臣認定を取得した部材断面 350mm×700mm の大断面耐火集成材を用いた木質耐火建築物である。図8に4階建て木造オフィスの外観パースを、図9に内観パースを示す。その他の設計条件や解析条件、検討内容は付録を参照とする。



図8 試設計「木造オフィス」外観パース

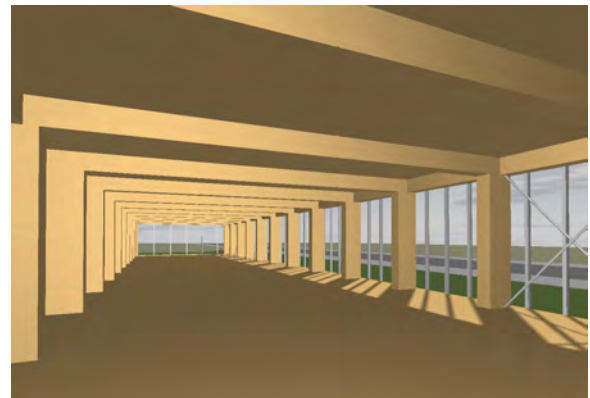


図9 試設計「木造オフィス」内観パース

試設計で行った構造計算により、「耐火集成材」を適用した3階建ておよび4階建ての木質耐火建築物である「木造オフィス」が実現可能であることを確認した。

ただし、「耐火集成材」を建物に適用するには、今後、以下に示す検討が必要である。

- ・ 梁間方向の柱梁接合部に鋼板挿入型ドリフトピン接合を採用し、この部分に回転ばねを設定して構造計算したが、鋼板挿入型ドリフトピン接合した柱梁接合部の構造性能確認が必要である。
- ・ 層間変形角の算出には、部材の断面性能として、荷重支持部に燃え止まり層を加えた全断面を考慮しており、その構造特性の確認が必要である。なお、実現象では燃え止まり層は構造性能に寄与すると考えられるが、薬剤処理されたラミナの取り扱いが JAS に規定されていないため、現状では構造計算に算入できない。
- ・ 試設計では柱部材に継手を設けないこととしたが、柱に継手を設ける場合は、継手部分の応力伝達が可能なディテールを検討する必要がある。
- ・ 試設計では耐火大臣認定取得状況を考慮し柱および梁部材の断面は 350mm×700mm としたが、合理的かつ意匠的にも魅力的な空間にするには、より小断面の部材の開発が必要である。

7. まとめ

検討結果概要の一覧を表 1 に示す。

本開発事業において、構造部材単体や各種接合部について 1 時間の耐火性能を有する技術を開発し、木質耐火建築物を実現するための技術、知見は出揃った。また、実際の建築物を想定した試設計を行い、構造計算により実現可能であることを確認した。

今後、開発した技術を実用化するには、一定の品質を確保したうえで大量生産可能な製造体制を確立することや、商業ベースに乗る価格設定が求められる。

また、意匠的にも魅力があり、環境対策にもつながる木質耐火建築物の早期実現のためには、残された課題について検討する必要がある。

8. 文献等

- 1) 抱憲誓、宮本圭一、西村光太、服部順昭、安藤恵介、石垣弘之、原田寿郎、上川大輔、宮林正幸、大内富夫：日本建築学会 2009 年度大会学術講演梗概集 A-2、東北、pp.321-322 (2009)
- 2) 宮本圭一、抱憲誓、西村光太、服部順昭、安藤恵介、石垣弘之、原田寿郎、上川大輔、宮林正幸、大内富夫：日本建築学会 2009 年度大会学術講演梗概集 A-2、東北、pp.323-324 (2009)
- 3) 西村光太、抱憲誓、宮本圭一、服部順昭、安藤恵介、石垣弘之、原田寿郎、上川大輔、宮林正幸、大内富夫：日本建築学会 2009 年度大会学術講演梗概集 A-2、東北、pp.325-326 (2009)
- 4) 抱憲誓、宮本圭一、西村光太、服部順昭、安藤恵介、原田寿郎、上川大輔、宮林正幸：日本建築学会 2010 年度大会学術講演梗概集 A-2、北陸、pp.109-110 (2010)
- 5) 西村光太、抱憲誓、宮本圭一、服部順昭、安藤恵介、原田寿郎、上川大輔、宮林正幸：日本建築学会 2010 年度大会学術講演梗概集 A-2、北陸、pp.111-112 (2010)
- 6) 抱憲誓、宮本圭一、西村光太、服部順昭、安藤恵介、原田寿郎、上川大輔、宮林正幸：日本建築学会 2011 年度大会学術講演梗概集 A-2、関東、pp.109-110 (2011)
- 7) 西村光太、抱憲誓、宮本圭一、服部順昭、安藤恵介、原田寿郎、上川大輔、宮林正幸：日本建築学会 2011 年度大会学術講演梗概集 A-2、関東、pp.111-112 (2011)

表 1 検討結果概要一覧

2008			2009
年度			
試験体写真 (加熱前)			
断面寸法 (荷重支持部)	300×600 (180×480)	300×600 (180×480)	350×700 (210×530)
想定部位	柱	梁	柱
加熱時間 (放置時間)	1 (11)	1 (11)	1 (11)
載荷	あり	あり	なし
耐火性能 (内部最高温度)	○ (149℃)	○ (159℃)	○ (138℃)
非損傷性 (変形量)	○ (2mm)	○ (8mm)	○ (7.6mm)
2009			2010
年度			
試験体写真 (加熱前)			
断面寸法 (mm)	350×700 (210×530)	350×700 (210×530)	350×700 (210×530)
想定部位	梁	柱梁接合部	柱壁接合部
加熱時間 (放置時間)	2 (10)	2 (1.5)	1 (15)
載荷	あり	なし	なし
耐火性能 (内部最高温度)	△ (266℃)	△ (273℃)	○ (121℃)
非損傷性 (変形量)	○ (13mm)	—	—

耐火集成材を用いたオフィスの試設計

1. 3階建てオフィスの試設計
2. 4階建てオフィスの試設計

1. 3階建てオフィスの試設計

(1)目的

1時間の耐火認定を取得した耐火集成材（柱、梁）を用いて、室内に木材を現しとしたオフィスの試設計を行い、防火地域における木造建築の実現の可能性を検討するとともに今後の課題を抽出する。

(2)建物概要

平面形状は、梁間 13.2m、桁行 38.4mの長方形形状で、階高 3.8mの3階建ての事務所である。用途地域が防火地域で、延床面積が 100 m²以上となることから、耐火建築物（主要構造部 1 時間、屋根 30 分）とすることが要求される。

用途：事務所

用途地域：防火地域

延床面積：1521 m²

構造階数：木造、3 階建て

軒高：11.4m



図1 外観パースCG

(3)各部の仕様

屋 根：鋼板葺き

外 壁：カーテンウォール

柱：350mm×700mm（荷重負担部 210×530） E65-F255 スギ 1 時間耐火認定品

梁：350mm×700mm（荷重負担部 210×530） E65-F225 スギ 1 時間耐火認定品

屋根下地：木質断熱複合パネル 下面：石膏ボード張り 30 分耐火認定品

床：根太(210@450) 上面：石膏ボード+構造用合板 下面：石膏ボード張り

梁間方向柱梁接合部：ドリフトピン接合(36-DP14) 接合部回転剛性 20000kNm/rad.

桁行方向柱梁接合部：ピン接合 ブレース併用

基 礎：R C 造



図 2 正面立面図

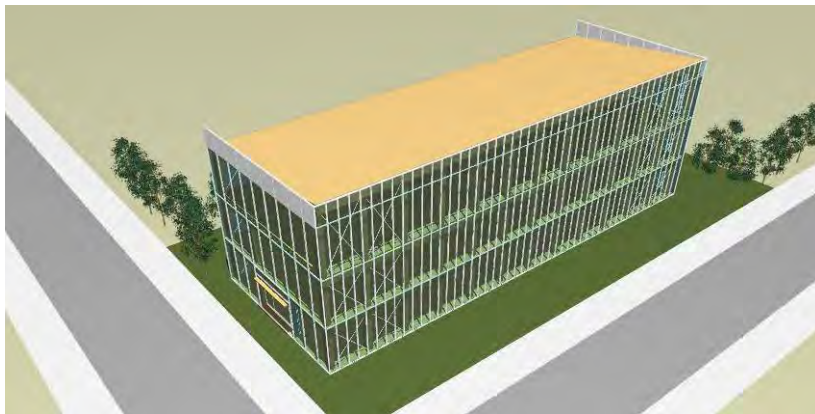


図 3 鳥瞰図

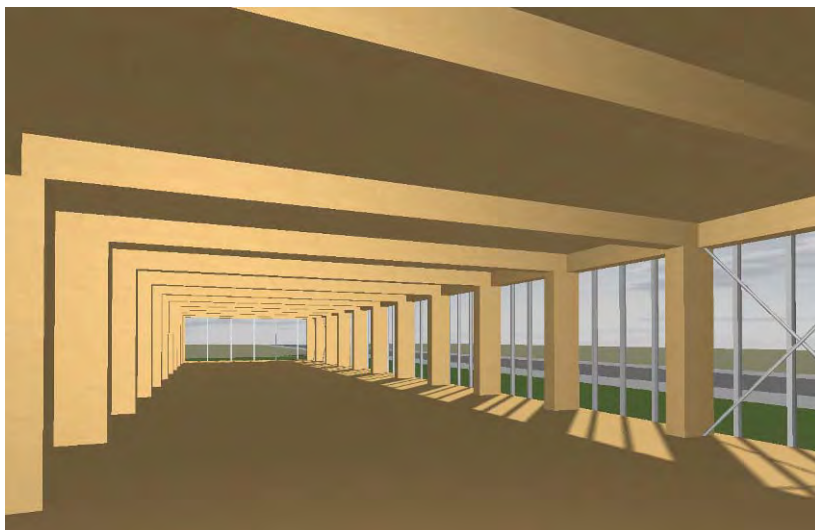


図 4 内観

(4)構造・耐火設計方針

- ・柱、梁に耐火集成材（350mm×700mm 1時間耐火大臣認定品）を採用。
- ・屋根に木質断熱複合パネル（30分耐火大臣認定品）を採用。
- ・床は、石膏ボード張りによる耐火仕様（1時間耐火）とする。
- ・集成材建築物としてルート2で検証
層間変形角 $\leq 1/200$ 偏心率 ≤ 0.15 剛性率 ≥ 0.6 を確認
- ・梁間方向はラーメン構造、桁行方向はブレース構造にて水平力を負担。
- ・水平外力は、風荷重＜地震荷重のため、地震荷重にて決定。
- ・柱梁接合部には鋼板挿入型のドリフトピン接合とし、接合部の回転剛性を考慮。
- ・部材の断面性能として、剛性には、燃え止まり層も含めた全断面を考慮するが、部材耐力には、荷重負担部のみの断面性能を考慮する。
- ・床と梁の合成梁効果は考慮しない。

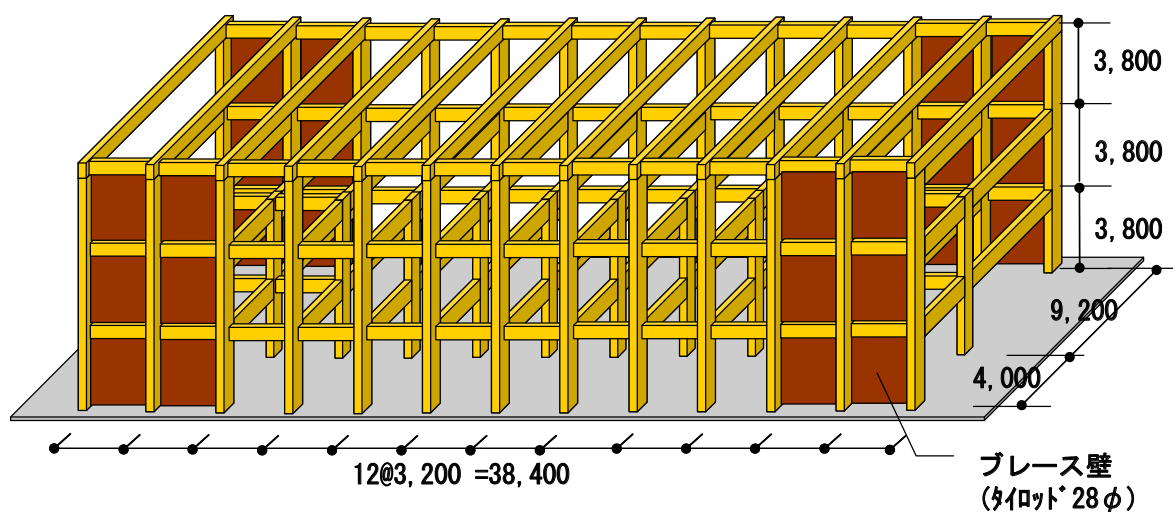


図5 構造架構イメージ図

(5)耐火集成材の性能（柱・梁部材）

1 時間耐火認定を受けた部材の仕様は下記の通りである。

樹 種 : スギ
部材断面 : 350mm×700mm
荷重負担部分 : 210mm×530mm
柱 強度等級 : E65-F255
圧縮基準強度 : 20.6N/mm²
梁 強度等級 : E65-F225
曲げ基準強度 : 22.5N/mm²
部材平均密度 : 5.0kN/m³ （薬剤処理部含む）

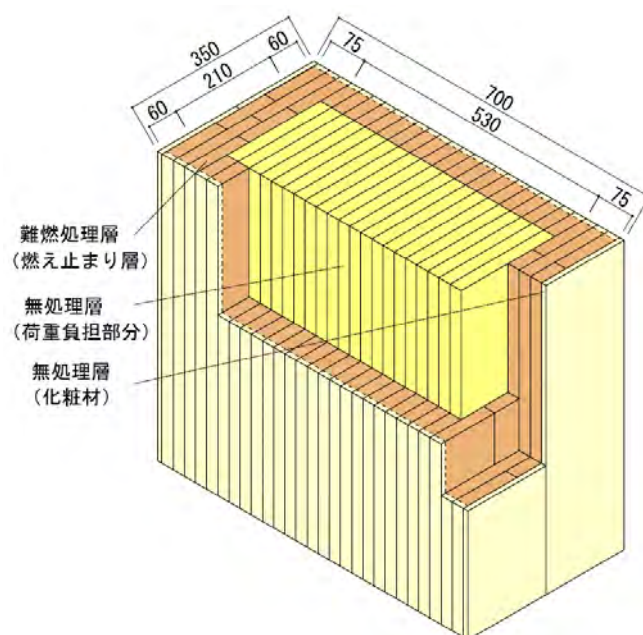


図6 耐火集成材の断面形状

(6)解析条件

梁間方向、桁行方向について、それぞれ1フレーム分の平面モデルを作成し、許容応力度計算を行う。図7および、図8に各構面の解析モデルを示す。なお、桁行方向のブレースは引張ブレースとしてのみ考慮した。

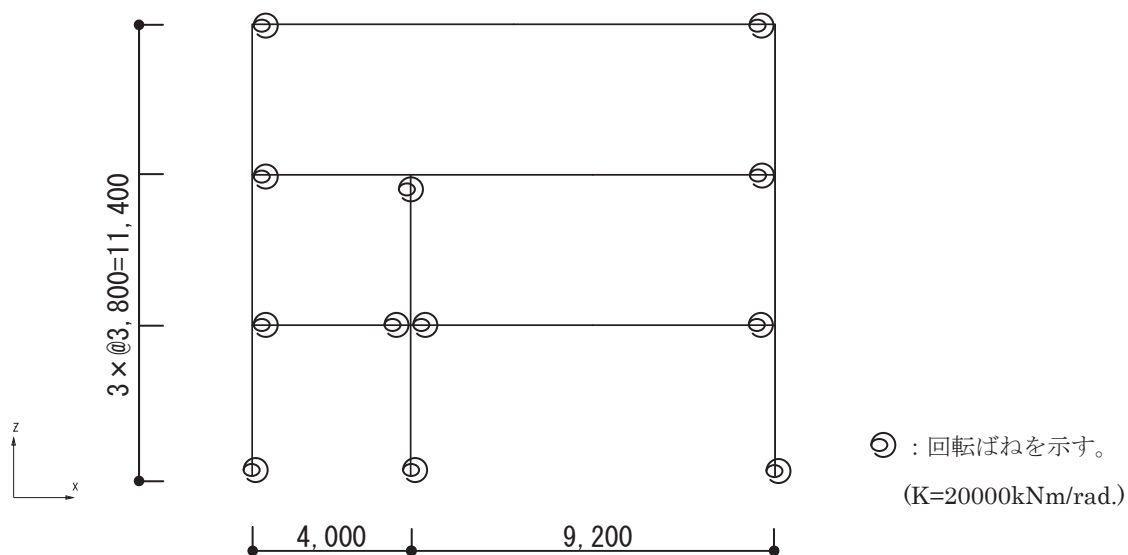


図7 梁間方向の解析モデル

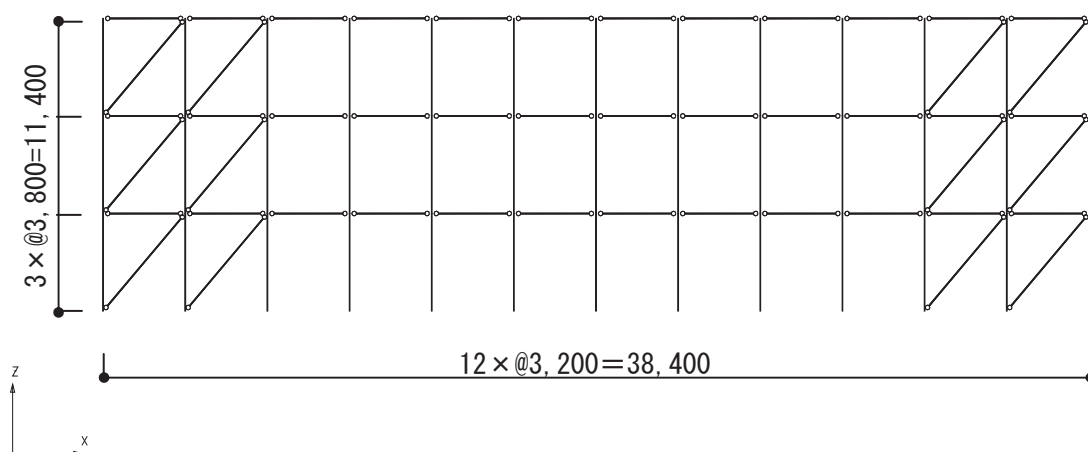


図8 桁行方向の解析モデル

- ・柱、梁、各部材を弾性の線材に置換し、長期荷重および地震荷重に対する検討を行う。
- ・梁間方向の柱梁接合部および柱脚は鋼板を挿入したドリフトピン接合による半剛接合とし、接合部の回転剛性はハンキンソン式を用いた回転ばねを考慮する。構造実験による検証も必要であるが、計算上 20000kNm/rad.を確保することが可能であり、柱と梁の接合部に二重節点を設定して、ここに接合部の回転ばねを配置する。
- ・桁行方向の接合部は、ピン接合と設定した。

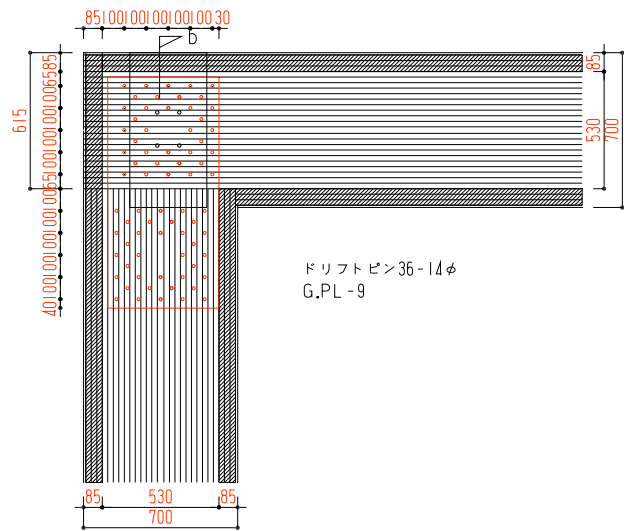


図 9 柱梁接合部の接合部（鋼板挿入ドリフトピン接合）

また、固定荷重及び積載荷重を表 1 の通り設定した。

表 1 固定荷重および積載荷重

室名	固定荷重内訳			床・小梁	架構	地震	備考	電算用
屋根(木屋根)	ガルバリウム鋼板	100						
	アスファルトルーフィング	20						
	DSP(6inch)	200						
	耐火仕様(胴縁+強化石膏ボード15+15m	310	D.L.	810	810	810	梁自重分	
	天井(岩綿吸音板+石膏ボード)・設備	180	L.L.	300	0	0	は含まず	
RF		810 → 810	T.L.	1110	810	810		
事務室 1	仕上げ(フローリング)+間仕切壁	400						
	強化石膏ボード(t=21)	200						
	合板(t=12mm)	80						
	根太(210@450)	140						
	強化石膏ボード(t=21+15)	350	D.L.	1270	1270	1270	梁自重分	
2F 3F 4F	天井・設備	100	L.L.	2900	1800	800	は含まず	
		1270 → 1270	T.L.	4170	3070	2070		
事務室 2	仕上げ(フローリング)+間仕切壁	400						
	スラブ(RC) t=150 γ=24.0	3600						
	設備	100	D.L.	4100	4100	4100		
			L.L.	2900	1800	800		
1F		4100 → 4100	T.L.	7000	5900	4900		
鉄骨階段	仕上げ t=20 γ=20.0	400						
	階段	2000						
			D.L.	2400	2400	2400		
2F 3F 4F			L.L.	3500	3200	2100		
		2400 → 2400	T.L.	5900	5600	4500		

(6)解析結果

表 2 に地震用建物重量と地震用設計せん断力を示す。Ai 分布の算定に当たっては、 $T=0.03H$ の略算周期を採用した。なお、事務室の単位床面積当たりの床荷重は約 3.8kN/m^2 となっている。

表 2 建物重量と設計せん断力

階	h (m)	H (m)	w _i (kN)	$\sum w_i$ (kN)	α_i	A _i	C _i	Q _i (kN)
3	3.80	11.4	943	943	0.19	1.70	0.341	322
2	3.80	7.6	1964	2907	0.59	1.24	0.248	720
1	3.80	3.8	1994	4902	1.00	1.00	0.200	980

図 10～図 15 に長期および地震時の梁間方向の応力図を示す。

図 16～図 18 に地震時の桁行方向の応力図を示す。

また以下に主要部材の断面算定結果を示す。

【梁間方向】

梁 E65-F225 B×D：210×530

$$A=1.11 \times 10^5 \text{mm}^2 \quad Z=9.83 \times 10^6 \text{mm}^3 \quad K_z=(300/530)^{(1/9)}=0.94$$

$$\text{許容応力度} \quad f_{fb}=8.25 \times 0.94=7.76 \text{N/mm}^2 \quad f_{fs}=0.99 \text{N/mm}^2$$

$$\text{設計応力} \quad \text{長期} \quad M=68.9 \text{kNm} \quad Q=48.1 \text{kN} \rightarrow \text{長期にて検討}$$

$$\text{短期} \quad M=98.7 \text{kNm} \quad Q=55.6 \text{kN}$$

$$\text{断面検定} \quad \text{曲げ} \quad \sigma / f_{fb}=68.9 \times 10^6 / (9.83 \times 10^6 \times 7.76)=0.90 < 1.0 \quad \text{OK}$$

$$\text{せん断} \quad \tau / f_{fs}=1.5 \times 48.1 \times 10^3 / (1.11 \times 10^5 \times 0.99)=0.66 < 1.0 \quad \text{OK}$$

柱 E65-F255 B×D：210×530

$$A=1.11 \times 10^5 \text{mm}^2 \quad Z=9.83 \times 10^6 \text{mm}^3 \quad K_z=(300/530)^{(1/9)}=0.94$$

$$\text{許容応力度} \quad f_{fb}=17.0 \times 0.94=16.0 \text{N/mm}^2 \quad f_{fs}=1.80 \text{N/mm}^2$$

$$l=3800 \text{mm} \quad i_y=153 \text{mm} \quad \lambda=l/i_y=25 < 30 \quad f_{fc}=13.7 \text{N/mm}^2$$

$$\text{設計応力} \quad \text{長期} \quad M=23.1 \text{kNm} \quad N=-176 \text{kN} \quad Q=7.5 \text{kN}$$

$$\text{短期} \quad M=68.6 \text{kNm} \quad N=-196 \text{kN} \quad Q=33.6 \text{kN} \rightarrow \text{短期にて検討}$$

$$\text{断面検定} \quad \text{曲げ} \quad \sigma / f_{fb} + \sigma / f_{fc}$$

$$=68.6 \times 10^6 / (9.83 \times 10^6 \times 16.0) + 196 \times 10^3 / (1.11 \times 10^5 \times 13.7)$$

$$=0.44+0.13=0.57 < 1.0 \quad \text{OK}$$

$$\text{せん断} \quad \tau / f_{fs}=1.5 \times 33.6 \times 10^3 / (1.11 \times 10^5 \times 1.80)=0.25 < 1.0 \quad \text{OK}$$

【桁行方向】

柱 E65-F255 B×D : 530×210

$$A = 1.11 \times 10^5 \text{mm}^2 \quad Z_y = 3.90 \times 10^6 \text{mm}^3$$

$$\text{許容応力度} \quad \text{sfb} = 17.0 \text{N/mm}^2 \quad \text{sfs} = 1.40 \text{N/mm}^2$$

$$l = 3800 \text{mm} \quad i_y = 153 \text{mm} \quad \lambda = l/i_y = 25 < 30 \quad \text{sfc} = 13.7 \text{N/mm}^2$$

設計応力 短期 M=17.5kNm N=-479kN Q=4.6kN →短期にて検討

断面検定 曲げ $\sigma / \text{sfb} + \sigma / \text{sfc}$

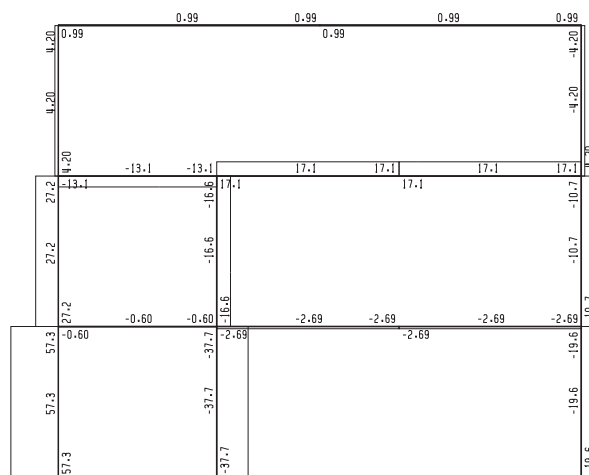
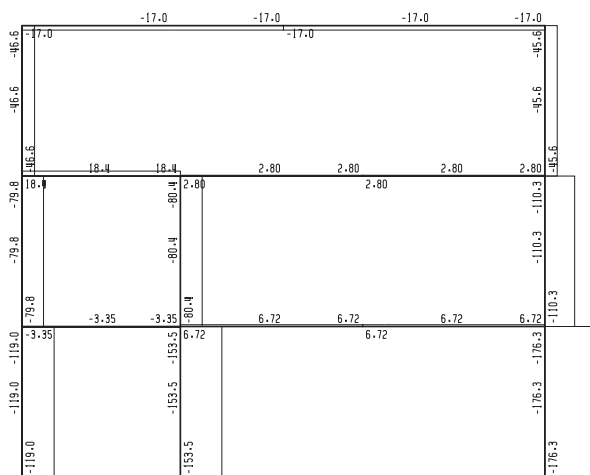
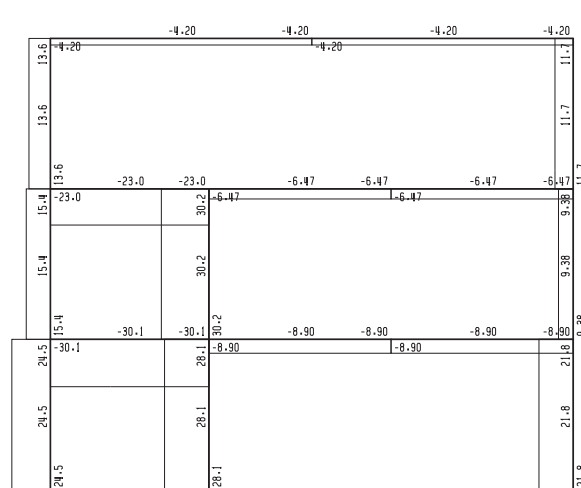
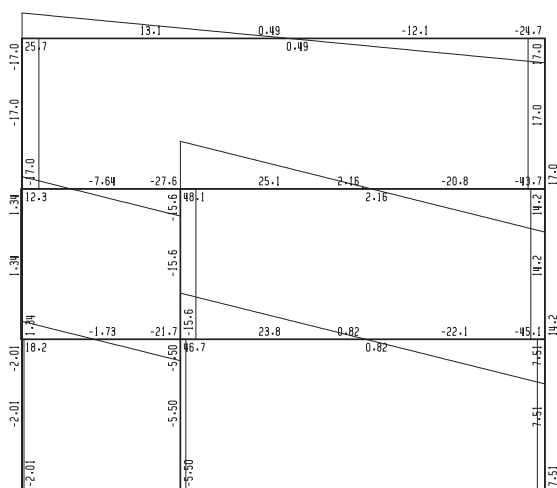
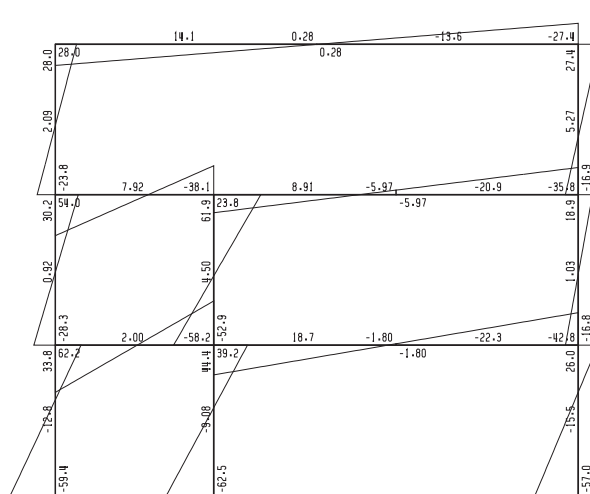
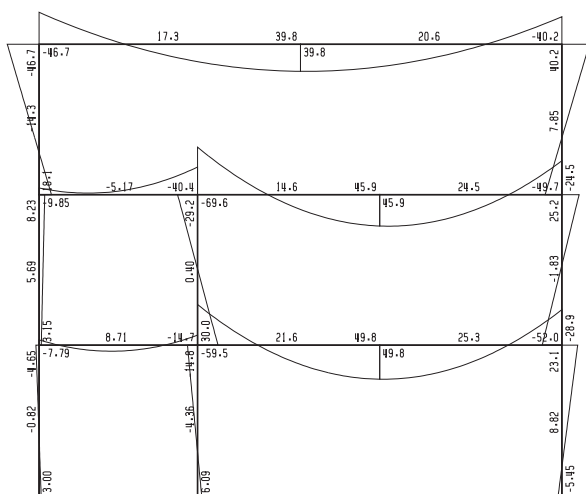
$$= 17.5 \times 10^6 / (3.90 \times 10^6 \times 17.0) + 479 \times 10^3 / (1.11 \times 10^5 \times 13.7)$$

$$= 0.26 + 0.31 = 0.57 < 1.0 \quad \text{OK}$$

$$\text{せん断} \quad \tau / \text{sfs} = 1.5 \times 4.6 \times 10^3 / (1.11 \times 10^5 \times 1.40) = 0.04 < 1.0 \quad \text{OK}$$

ブレース タイロッド 28φ (NTR4 相当)

設計応力 短期 N=183.7×1.5=276kN < 短期許容耐力 212.4×1.5=319kN OK



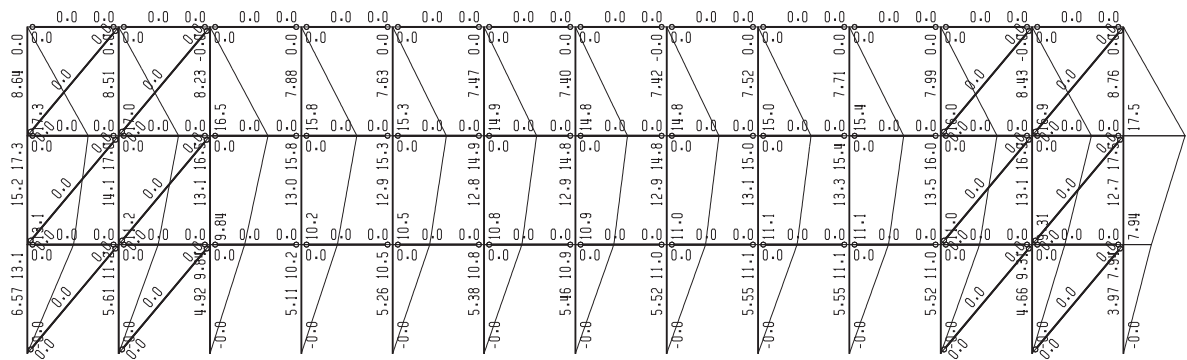


図 16 曲げモーメント図(kNm)【地震時】

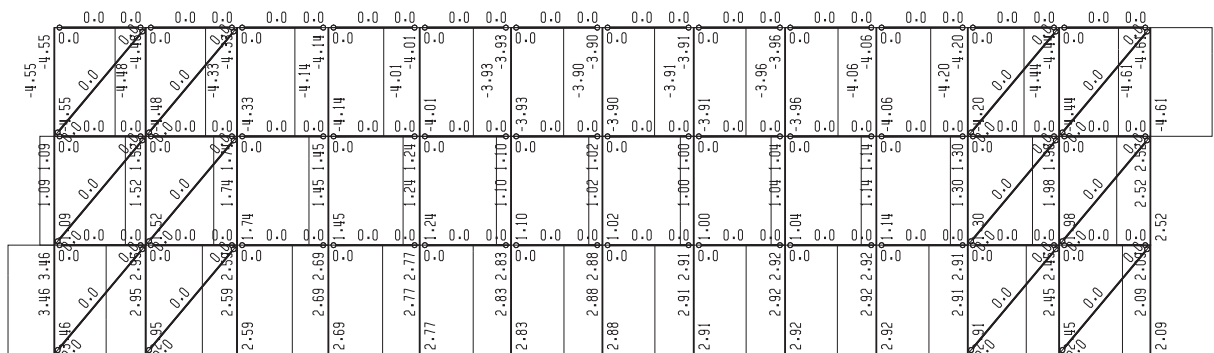


図 17 せん断力図(kN)【地震時】

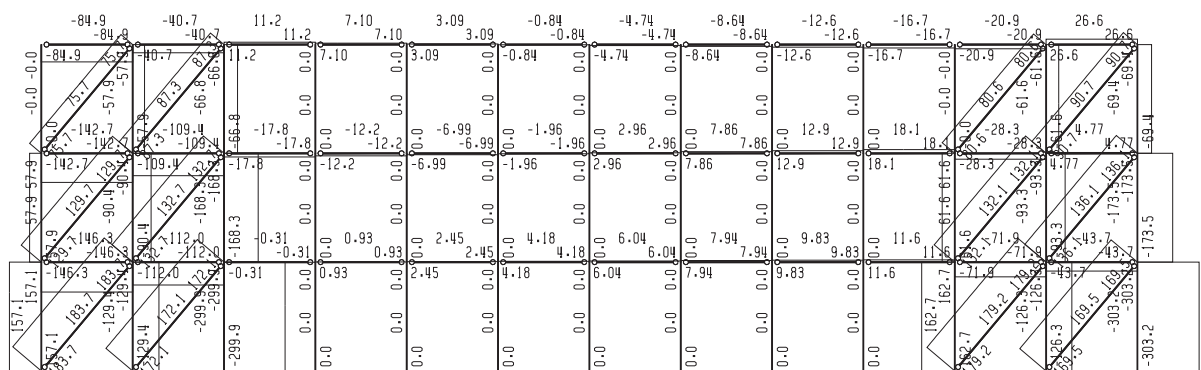


図 18 軸力図(kN)【地震時】

表 3 に梁間方向及び桁行方向の層間変形角を示す。柱梁部材断面として全断面（350mm×700mm）を考慮しており、各階の層間変形角はすべて 1/200rad.以下となっている。なお、荷重負担部分のみの断面（210mm×530mm）を考慮した場合の層間変形角は、最大で 1/142rad.となっている。

表 3 梁間方向及び桁行方向の層間変形角

	柱梁断面350×700		判定	柱梁断面210×530	
	梁間方向	桁行方向		梁間方向	桁行方向
3	1/299	1/613	$\leq 1/200$	1/154	1/576
2	1/268	1/409	$\leq 1/200$	1/142	1/355
1	1/270	1/319	$\leq 1/200$	1/158	1/273

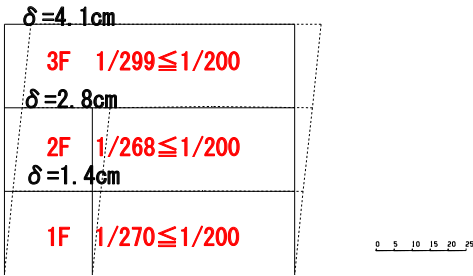


図 19 変位図(cm)【梁間方向】

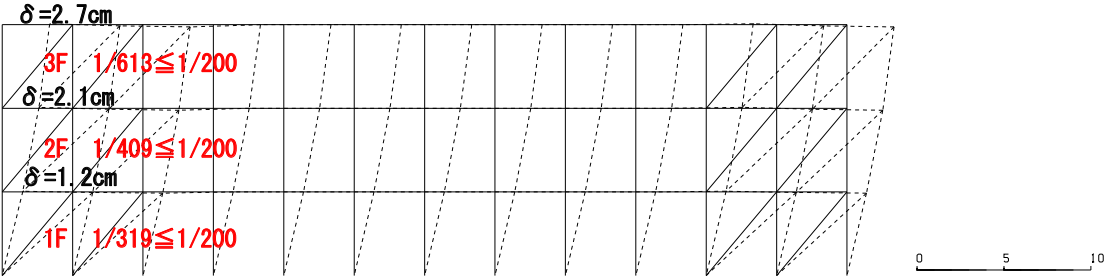


図 20 変位図(cm)【桁行方向】

表 4、表 5 に梁間方向及び桁行方向の偏心率及び剛性率を示す。各階ともに、偏心率は 0.15 以下、剛性率は 0.6 以上となっており、クライテリアを満足している。

表 4 梁間方向及び桁行方向の偏心率

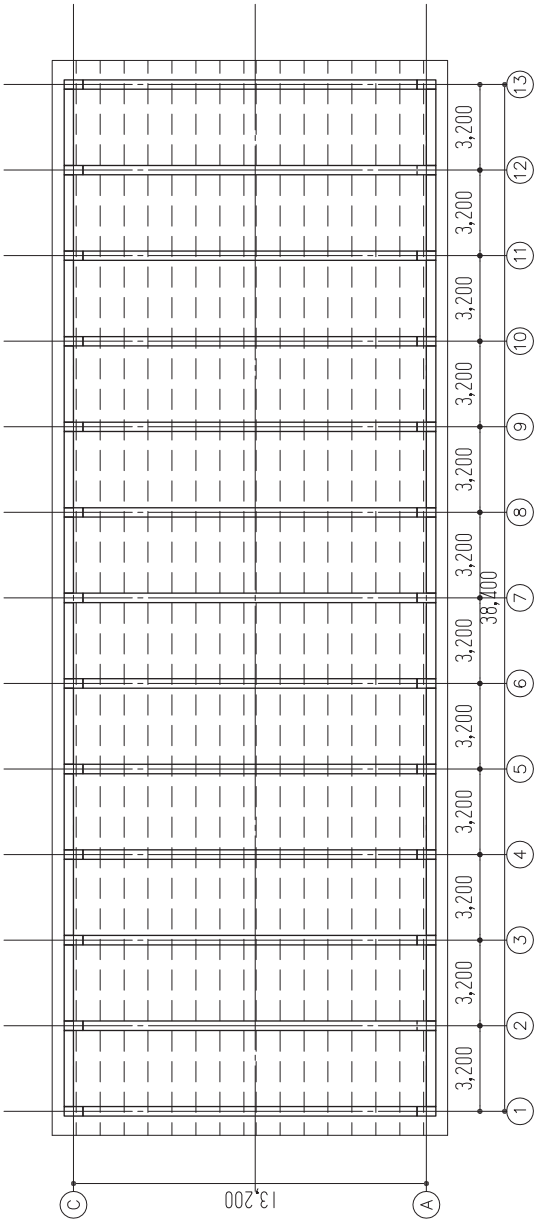
	梁間方向	桁行方向	判定
3	0.0	0.0	≤ 0.15
2	0.0	0.0	≤ 0.15
1	0.0	0.0	≤ 0.15

表 5 梁間方向及び桁行方向の剛性率

	梁間方向	桁行方向	判定
3	1.07	1.37	≥ 0.6
2	0.96	0.91	≥ 0.6
1	0.97	0.71	≥ 0.6

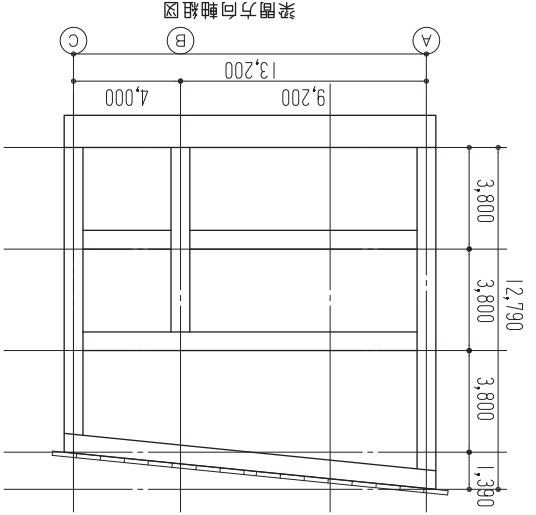
(7)まとめ

- ・防火地域でも、耐火集成材を使用した耐火建築物として、屋内に木材を現しで用いた3階建ての事務所建築物の実現が可能である。
- ・梁間方向の柱梁接合部に鋼板挿入型ドリフトピン接合を採用し、回転ばね(20000kNm/rad.)を設定しているが、その構造性能の確認が必要である。
- ・層間変形角の算出には、部材の断面性能として、燃え止まり層も含めた全断面を考慮しており、その構造特性の確認が必要である。
- ・床と梁、柱と壁の接合部分の取り合い部分の耐火性能の検証が必要である。
- ・現状の柱梁部材の断面は 350mm×700mm 以上という制約があり、今後、多くの建築物に適用するにあたっては、より小断面の部材の開発が必要である。

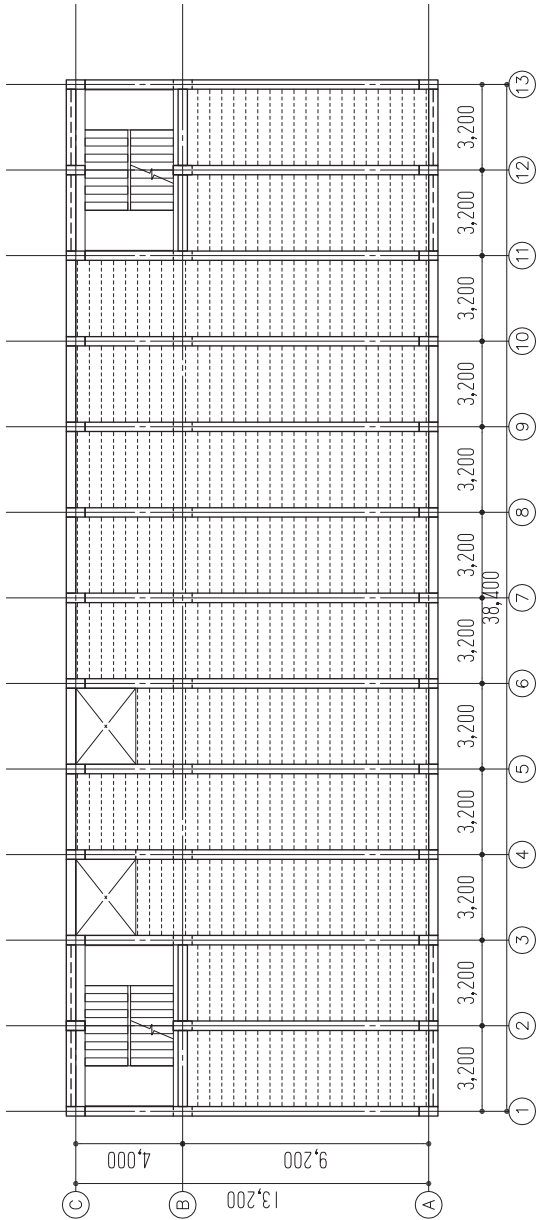


屋根伏図

共通事項
 1. 梁(耐火集成材E65-F225): 350×700
 2. 屋根: 木質断熱複合パネル (t=164)

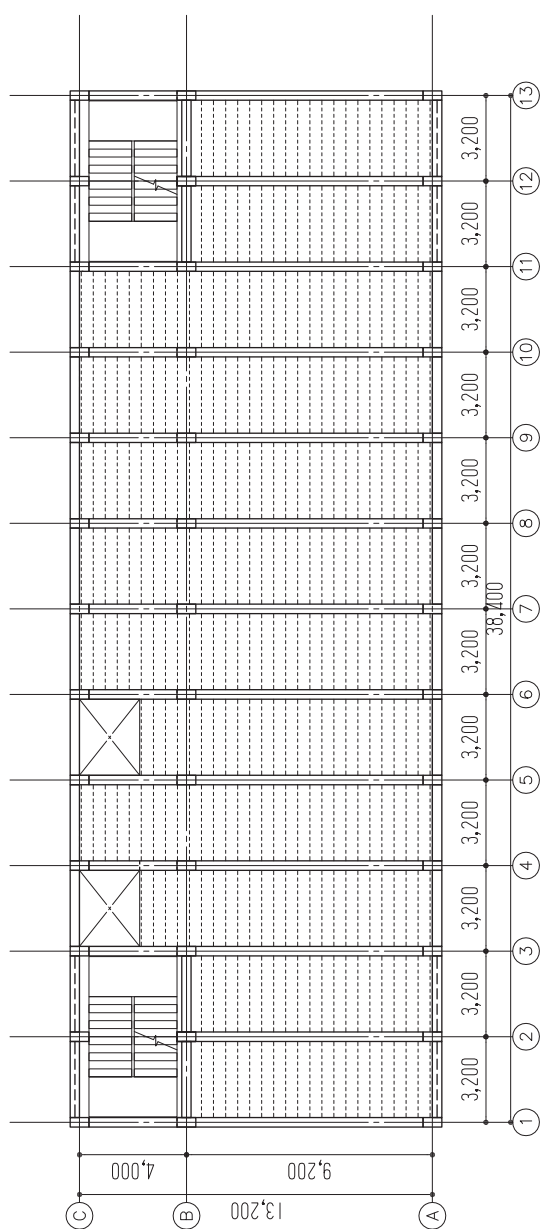


梁間方向軸組図



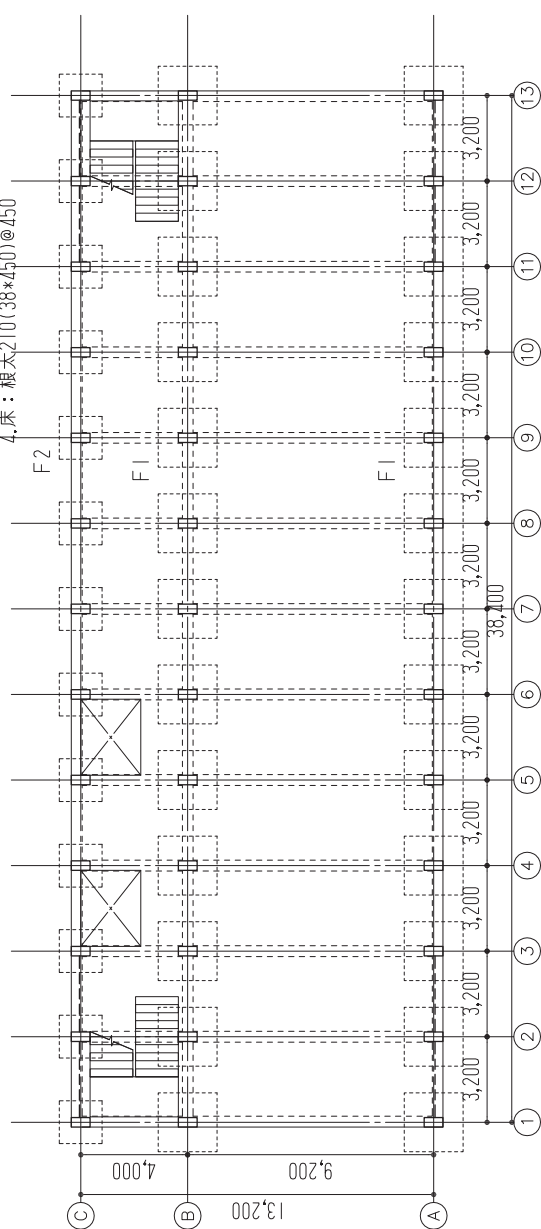
3階床伏図

共通事項
 1. 梁(耐火集成材E65-F225): 350×700
 2. 柱(耐火集成材E65-F255): 350×700
 3. ---: 鉛直ブレース 28φタイロッド (STR4)
 4. 床: 根太210(38×450)@450



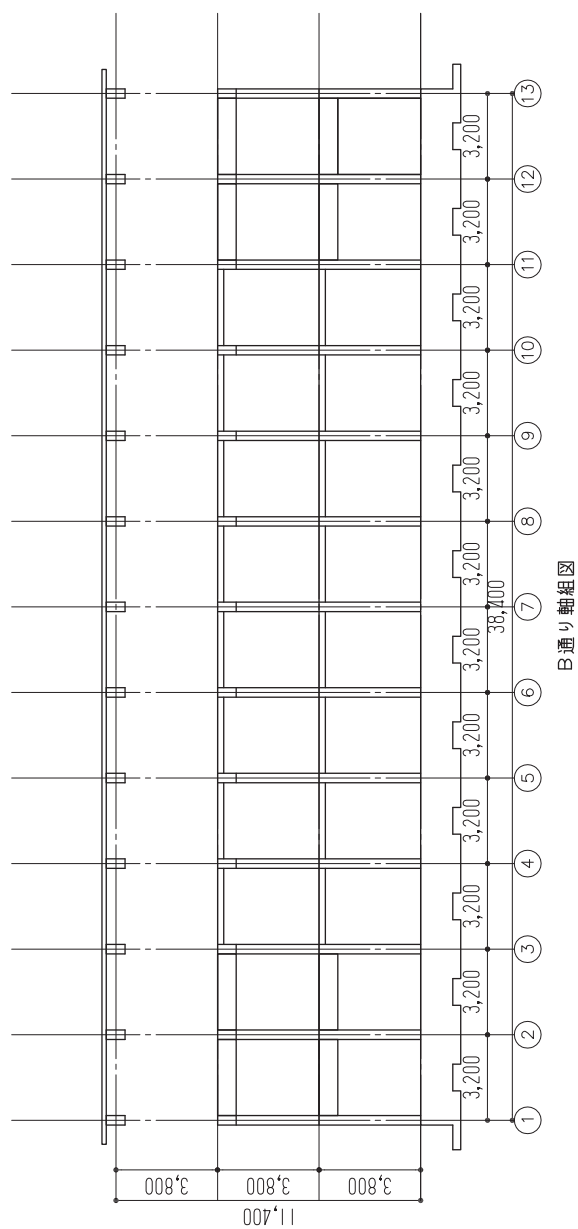
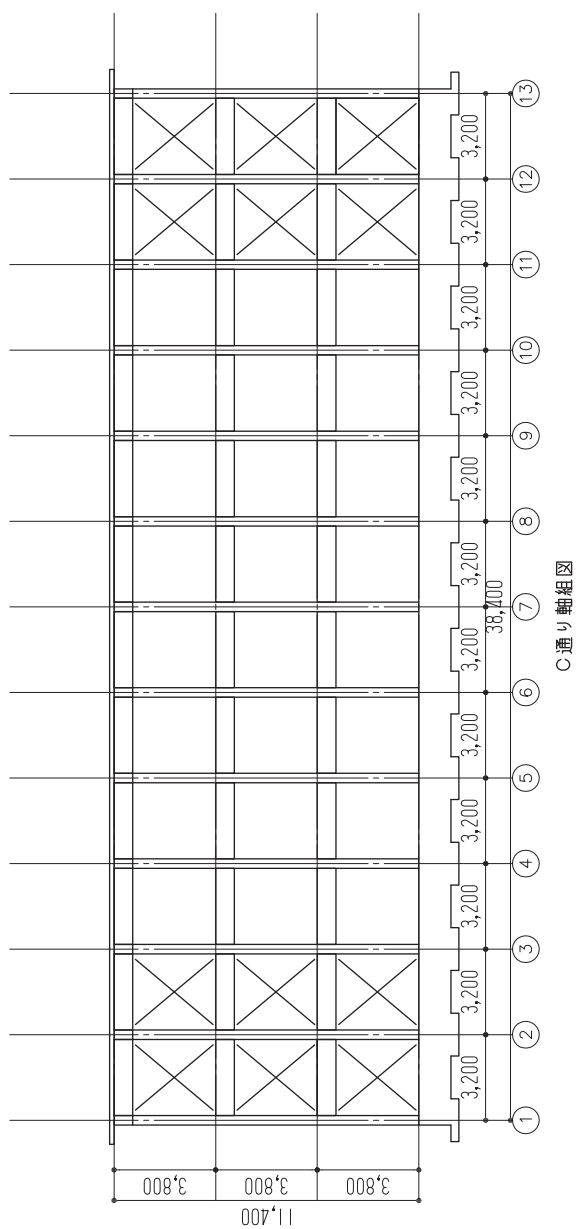
共通事項

1. 梁 (耐火集成材E65-F225) : 350×700
2. 柱 (耐火集成材E65-F255) : 350×700
3. --- : 鉛直ブレース 28φタイロッド (STR4)
4. 床 : 根太210(38×450)@450



共通事項

1. 基礎梁 (RC) : 400×1200
2. 柱 (耐火集成材E65-F255) : 350×700
3. --- : 鉛直ブレース 28φタイロッド (STR4)
4. 床スラブ (RC) : t=150
5. 基礎 (RC) : F1 2200×2200 F2 1600×1600



共通事項
 1. :鉛直ブレースを示す。

2. 4階建てオフィスの試設計

(1)目的

柱梁に用いた耐火集成材は1時間耐火認定を取得しており、耐火上、4階建てまでの建設が可能である。ここでは、3階建て試設計と同じ条件で、4階建てオフィスの構造検討を行い、実現の可能性を検討するとともに課題を抽出する。

(2)建物概要

平面形状は、梁間 13.2m、桁行 38.4mの長方形形状で、階高 3.8mの4階建ての事務所である。用途地域が防火地域で、延床面積が 100 m²以上となることから、耐火建築物（主要構造部 1 時間、屋根 30 分）とすることが要求される。

用途：事務所

用途地域：防火地域

延床面積：2028 m²

構造階数：木造、4階建て

軒高：15.2m



図 21 外観パースCG

(3)解析結果

各部の仕様、構造設計方針、耐火設計方針および解析条件は、「1. 3階建てオフィスの試設計」と同様である。ただし、変形制限の制約上、梁間方向の接合部回転ばねを2割向上させている(20000kNm/rad.→24000kNm/rad.)。

表6に、地震用建物重量と地震用設計せん断力を示す。Ai 分布の算定に当たっては、 $T=0.03H$ の略算周期を採用した。

表6 建物重量と設計せん断力

階	h (m)	H (m)	w _i (kN)	Σ w _i (kN)	α _i	A _i	C _i	Q _i (kN)
4	3.80	15.2	943.3	943	0.13	2.00	0.401	378
3	3.80	11.4	2023	2967	0.42	1.43	0.287	850
2	3.80	7.6	2054	5020	0.71	1.18	0.237	1189
1	3.80	3.8	2054	7074	1.00	1.00	0.200	1415

図22～図27に長期および地震時の梁間方向の応力図を示す。

図28～図30に地震時の桁行方向の応力図を示す。

また、以下に主要部材の断面算定結果を示す。

【梁間方向】

梁 E65-F225 B×D：210×530

$$A=1.11 \times 10^5 \text{mm}^2 \quad Z=9.83 \times 10^6 \text{mm}^3 \quad K_z=(300/530)^{(1/9)}=0.94$$

$$\text{許容応力度} \quad f_{fb}=8.25 \times 0.94=7.76 \text{N/mm}^2 \quad f_{fs}=0.99 \text{N/mm}^2$$

$$\text{設計応力} \quad \text{長期} \quad M=68.5 \text{kNm} \quad Q=48.7 \text{kN} \rightarrow \text{長期にて検討}$$

$$\text{短期} \quad M=117.9 \text{kNm} \quad Q=66.2 \text{kN}$$

$$\text{断面検定} \quad \text{曲げ} \quad \sigma / f_{fb}=68.5 \times 10^6 / (9.83 \times 10^6 \times 7.76)=0.90 < 1.0 \quad \text{OK}$$

$$\text{せん断} \quad \tau / f_{fs}=1.5 \times 48.7 \times 10^3 / (1.11 \times 10^5 \times 0.99)=0.66 < 1.0 \quad \text{OK}$$

柱 E65-F255 B×D：210×530

$$A=1.11 \times 10^5 \text{mm}^2 \quad Z=9.83 \times 10^6 \text{mm}^3 \quad K_z=(300/530)^{(1/9)}=0.94$$

$$\text{許容応力度} \quad f_{fb}=17.0 \times 0.94=16.0 \text{N/mm}^2 \quad f_{fs}=1.80 \text{N/mm}^2$$

$$l=3800 \text{mm} \quad i_y=153 \text{mm} \quad \lambda=l/i_y=25 < 30 \quad f_{fc}=13.7 \text{N/mm}^2$$

$$\text{設計応力} \quad \text{長期} \quad M=23.1 \text{kNm} \quad N=-176 \text{kN} \quad Q=7.5 \text{kN}$$

$$\text{短期} \quad M=98.4 \text{kNm} \quad N=-304 \text{kN} \quad Q=47.1 \text{kN} \rightarrow \text{短期にて検討}$$

$$\text{断面検定} \quad \text{曲げ} \quad \sigma / f_{fb} + \sigma / f_{fc}$$

$$=98.4 \times 10^6 / (9.83 \times 10^6 \times 16.0) + 304 \times 10^3 / (1.11 \times 10^5 \times 13.7)$$

$$=0.63+0.20=0.83 < 1.0 \quad \text{OK}$$

$$\text{せん断} \quad \tau / f_{fs}=1.5 \times 47.1 \times 10^3 / (1.11 \times 10^5 \times 1.80)=0.35 < 1.0 \quad \text{OK}$$

【桁行方向】

柱 E65-F255 B×D : 530×210

$$A = 1.11 \times 10^5 \text{mm}^2 \quad Z_y = 3.90 \times 10^6 \text{mm}^3$$

$$\text{許容応力度} \quad sfb = 17.0 \text{N/mm}^2 \quad sfs = 1.40 \text{N/mm}^2$$

$$l = 3800 \text{mm} \quad i_y = 153 \text{mm} \quad \lambda = l/i_y = 25 < 30 \quad sfc = 13.7 \text{N/mm}^2$$

設計応力 短期 M=14.7kNm N=-815kN Q=3.9kN →短期にて検討

断面検定 曲げ $\sigma / sfb + \sigma / sfc$

$$= 14.7 \times 10^6 / (3.90 \times 10^6 \times 17.0) + 815 \times 10^3 / (1.11 \times 10^5 \times 13.7)$$

$$= 0.22 + 0.53 = 0.75 < 1.0 \quad \text{OK}$$

$$\text{せん断} \quad \tau / sfs = 1.5 \times 3.9 \times 10^3 / (1.11 \times 10^5 \times 1.40) = 0.04 < 1.0 \quad \text{OK}$$

ブレース タイロッド 36φ (NTR4 相当)

設計応力 短期 N=294.2×1.5=441kN < 短期許容耐力 351.2×1.5=527kN OK

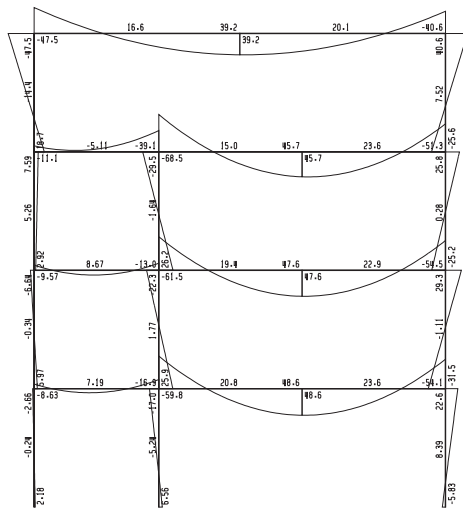


図 22 曲げモーメント図(kNm)【長期】

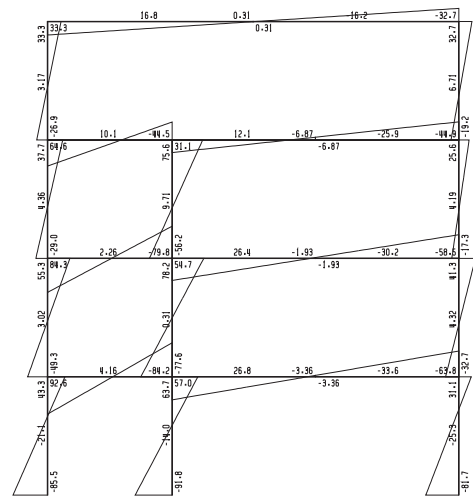


図 25 曲げモーメント図(kNm)【地震時】

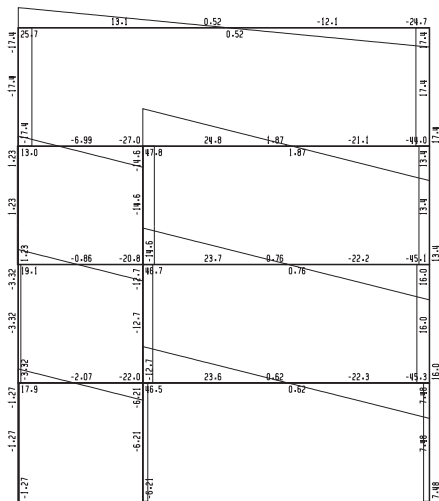


図 23 せん断力図(kN)【長期】

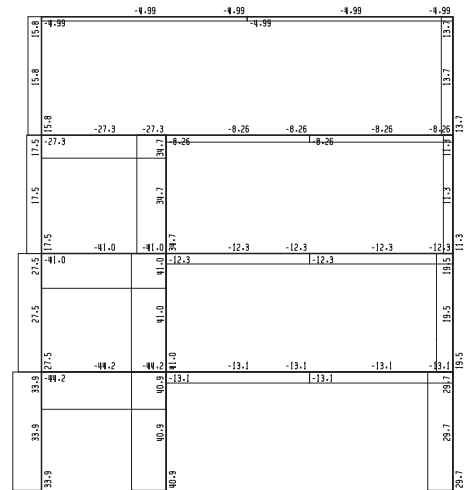


図 26 せん断力図(kN)【地震時】

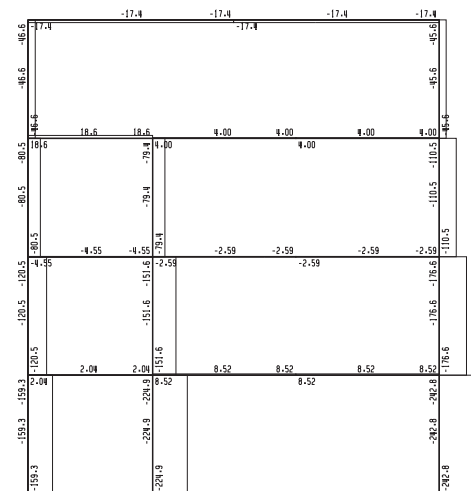


図 24 軸力図(kN)【長期】

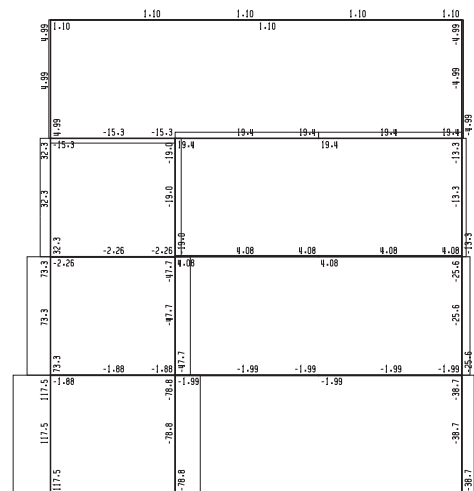


図 27 軸力図(kN)【地震時】

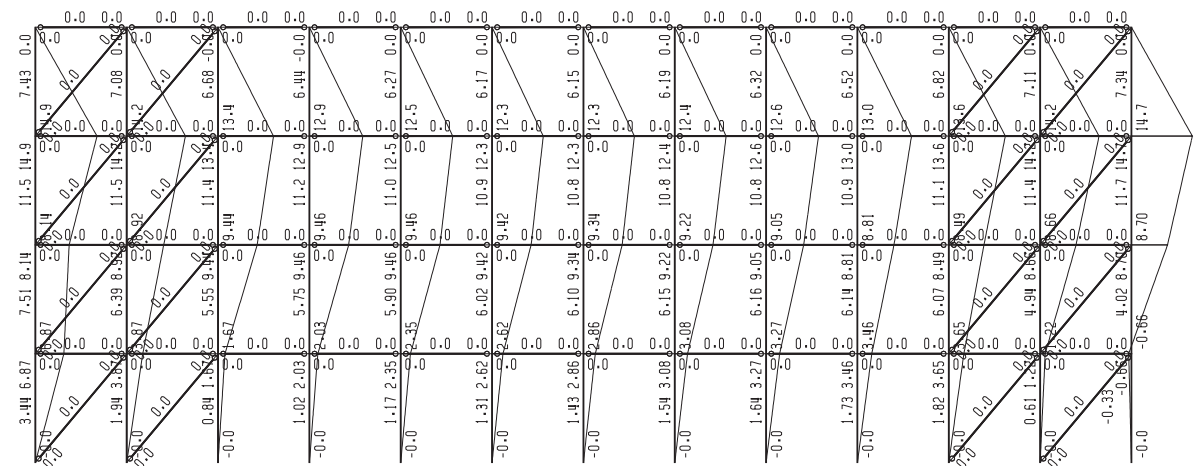


図 28 曲げモーメント図(kNm)【地震時】

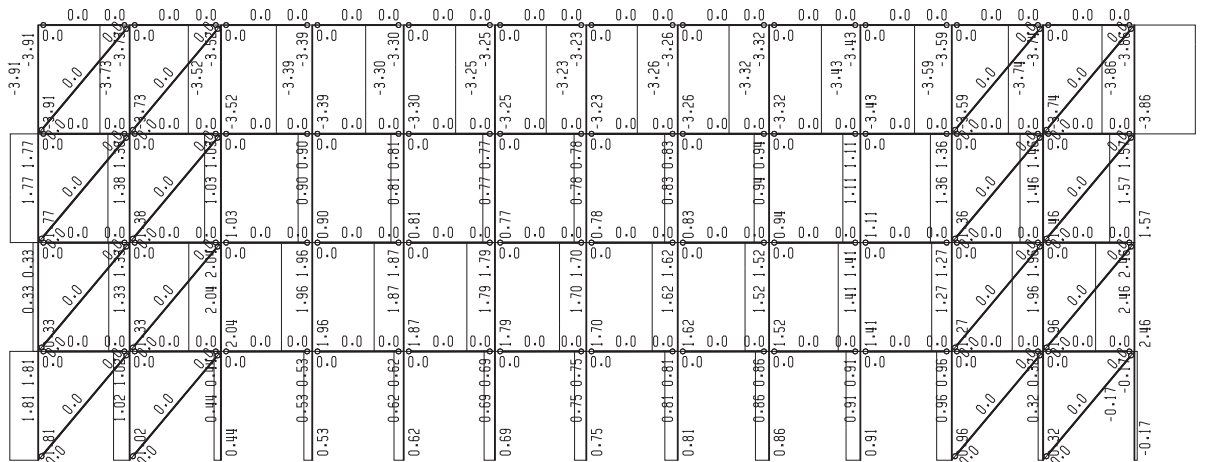


図 29 せん断力図(kN)【地震時】

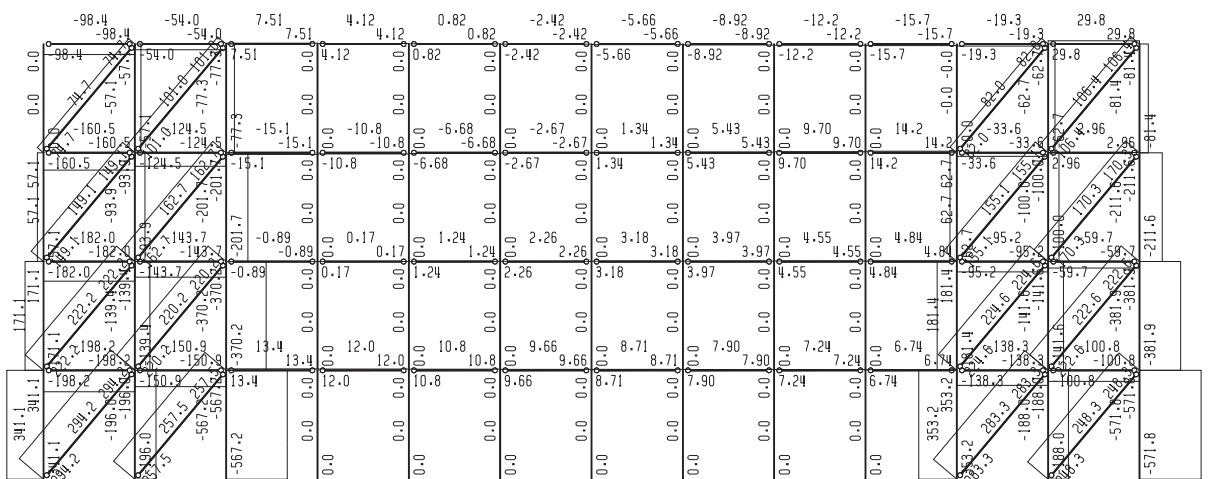


図 30 軸力図(kN)【地震時】

表 7 に梁間方向及び桁行方向の層間変形角を示す。柱梁部材断面として全断面（350mm×700mm）を考慮しており、各階の層間変形角はすべて 1/200rad.以下となっている。

表 7 梁間方向及び桁行方向の層間変形角

	柱梁断面350×700		判定	柱梁断面210×530	
	梁間方向	桁行方向		梁間方向	桁行方向
4	1/270	1/639	$\leq 1/200$	1/133	1/448
3	1/231	1/447	$\leq 1/200$	1/118	1/328
2	1/202	1/362	$\leq 1/200$	1/99	1/285
1	1/212	1/321	$\leq 1/200$	1/117	1/270

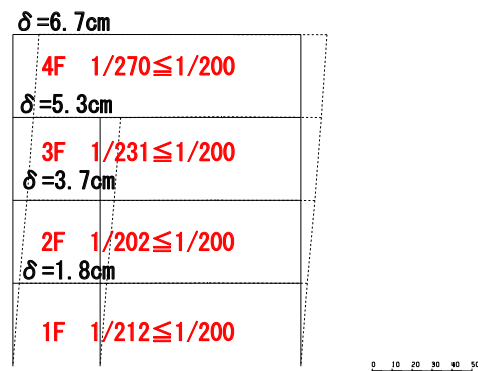


図 31 変位図(cm)【梁間方向】

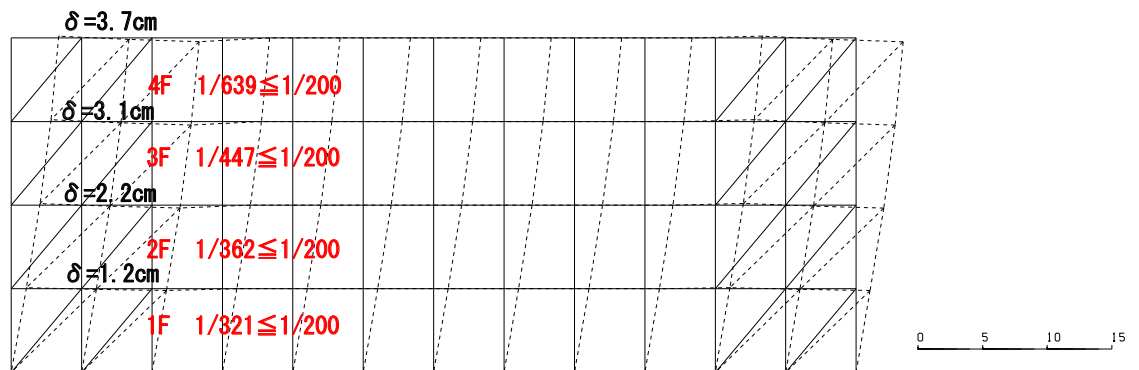


図 32 変位図(cm)【桁行方向】

表 8、表 9 に梁間方向及び桁行方向の偏心率及び剛性率を示す。各階ともに、偏心率は 0.15 以下、剛性率は 0.6 以上となっており、クライテリアを満足している。

表 8 梁間方向及び桁行方向の偏心率

	梁間方向	桁行方向	判定
4	0.0	0.0	≤ 0.15
3	0.0	0.0	≤ 0.15
2	0.0	0.0	≤ 0.15
1	0.0	0.0	≤ 0.15

表 9 梁間方向及び桁行方向の剛性率

	梁間方向	桁行方向	判定
4	1.14	1.36	≥ 0.6
3	0.97	0.95	≥ 0.6
2	0.85	0.77	≥ 0.6
1	0.89	0.68	≥ 0.6

(4)まとめ

- ・ 4階建てのオフィスの場合でも、3階建てオフィスと同様に、防火地域における耐火集成材を使用した耐火建築物として、実現が可能である。
- ・ ただし、梁間方向の柱梁接合部に設定している回転ばねの構造性能が 24000kNm/rad 以上となることを確認する必要がある。
- ・ 層間変形角の算出には、部材の断面性能として、燃え止まり層も含めた全断面を考慮しており、その構造特性の確認が必要である。
- ・ 4階建ての場合、柱部材を通し柱とすると、部材長さが $3.8\text{m} \times 4 = 15.2\text{m}$ となり、運搬上の制約が生じる可能性がある。本検討では継手を設けないこととしたが、柱に継手を設ける場合は、継手部分の応力伝達が可能なディテールを検討する必要がある。

Ⅱ 木質系ハイブリッド（EWECS）部材の開発と耐火性能評価

Ⅱ－１ EWECS 柱部材の構造安全性の解明

大阪大学：倉本洋 瀧野敦夫

<要約>

筆者らは集成材、鉄骨およびコンクリートで構成される新しい木質ハイブリッド構造である EWECS（Engineering Wood Encased Concrete-Steel）構造を提案している。本研究では、社会問題化している国産スギの間伐材の有効利用を目的として、これまで外殻集成材として用いてきたカラマツ集成材を低強度のスギ集成材に置き換えた EWECS 柱の静的載荷試験を実施し、樹種、せん断スパン比、軸力変動の有無が破壊性状、復元力特性、終局耐力に及ぼす影響を明らかにした。試験結果より、外殻集成材に国産スギを用いた場合においても、EWECS 柱はエネルギー吸収能力に優れた履歴特性を示した。

1. 研究の背景と目的

近年の長期耐用型建築物の需要の高まりや環境負荷の低い建設技術の開発、国産木材の安定供給・流通の促進という社会の趨勢を受け、筆者らは集成材、鉄骨およびコンクリートで構成される新しい木質ハイブリッド構造である EWECS（Engineering Wood Encased Concrete-Steel：以下、EWECS）構造を提案している^{1)~3)}（図 1）。本構造は、集成材の内側の鉄骨コンクリート（図 2）が燃え止まり材となるため、現行の建築基準法で禁止されている 4 階建て以上の中高層木質系建築物の建設が可能であるという特筆すべき利点のほか、以下のような特徴を有する。

- ① 骨組が集成材と鉄骨およびコンクリートで構成されるため、高耐震性を有する。
- ② 部材断面の大部分が集成材で構成され、建築物の軽量化が可能である。
- ③ 柱を構成する外殻集成材が型枠に兼用可能なため施工性・経済性の向上を図ることができる。
- ④ 構造部材の表面が集成材で構成されることで、景観性・触感性が良好である。
- ⑤ 集成材の使用により間伐材の有効利用が可能である。

本研究では、社会問題化している国産スギの間伐材の有効利用を目的として、これまで外殻材として用いてきたカラマツ集成材を低強度のスギ集成材に置き換えた EWECS 柱の静的載荷試験を実施し、樹種、せん断スパン比、軸力変動の有無が破壊性状、復元力特性、終局耐力に及ぼす影響を明らかにした。また、EWECS 柱の終局曲げ耐力の評価法に関しても検討を行った。



図 1 EWECS 構造のイメージ

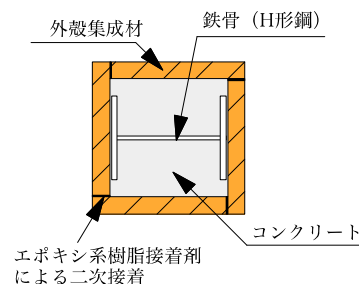


図 2 EWECS 柱の断面図

2. 樹種およびせん断スパン比が EWECS 柱の構造性能に及ぼす影響の検討

2. 1 実験計画

2. 1. 1 試験体概要と使用材料

試験体の概要を図3に、実験計画を表1にそれぞれ示す。試験体は6階程度の中低層建築物の下層部の柱を想定した縮尺約1/2のものであり、カラマツ集成材を用いたこれまでの試験体と樹種を除いては同様の仕様とした。実験変数にはせん断スパン比 a/D を選択し、 $a/D=1.0$ 、 1.5 および 2.0 の3種類とした。柱断面は $400\text{mm} \times 400\text{mm}$ とし、柱内法高さはせん断スパン比に応じて 800mm 、 $1,200\text{mm}$ および $1,600\text{mm}$ とした。

各柱の内蔵鉄骨には $H-300 \times 220 \times 10 \times 15(\text{mm})$ を使用し、外殻集成材の厚さは 45mm とした。本実験で使用した外殻集成材の力学的特性を表2に示す。各試験体には設計基準強度 24N/mm^2 の普通コンクリートを用いた。なお、実験時のコンクリート強度 σ_B は 36N/mm^2 であった。

試験体は、エポキシ系樹脂接着剤によって接合された外殻集成材を型枠に併用し、コンクリートを打設することによって製作した。なお、柱-スタブ接合部における外殻集成材とスタブに取り付けられた集成材は、既往の研究成果を踏襲して非接着としている^{1)~3)}。

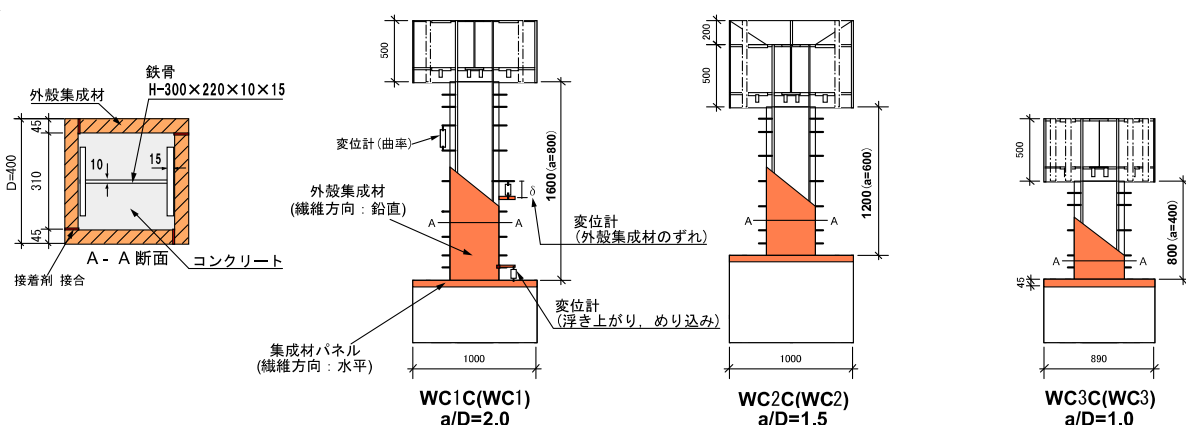


図3 試験体概要

表1 実験計画

試験体	WC1	WC2	WC3	WC1C	WC2C	WC3C
せん断スパン比: a/D	2.0	1.5	1.0	2.0	1.5	1.0
樹種	国産カラマツ集成材			国産スギ集成材		
外殻集成材厚 (mm)	45					
コンクリート	普通コンクリート ($\sigma_B=35\text{ N/mm}^2$)			普通コンクリート ($\sigma_B=36\text{ N/mm}^2$)		
内蔵鉄骨 (mm)	H-300 x 220 x 10 x 15					
柱高さ: h (mm)	1600	1200	800	1600	1200	800
断面: $b \times D$ (mm)	400 x 400					
軸力	N (kN)	1031			976	
	軸力比 N/N_{tot}	0.18			0.2	

N_{tot} : 柱の圧縮強度 ($b_c \cdot D_c \cdot \sigma_B + b_w \cdot D_w \cdot \sigma_w$), $b_c \cdot D_c \cdot \sigma_B$: コンクリートコアの幅せい圧縮強度, $b_w \cdot D_w \cdot \sigma_w$: 外殻集成材の面積圧縮強度

表2 外郭集成材の力学特性

樹種	載荷方向	試験体数	密度(g/cm^3)	含水率(%)	ヤング係数(kN/mm^2)	標準偏差	最大(降伏)応力度(N/mm^2)	標準偏差
国産スギ集成材	繊維方向加力	3	0.38	8.9	3.5	0.4	24.7	1.6
	繊維直交加力	3	0.43	8.3	0.5	0.1	3.7	0.3
国産カラマツ集成材	繊維方向加力	3	-	-	11.5	0.5	45.0	3.4
	繊維直交加力	-	-	-	-	-	-	-

* 国産スギ集成材の密度、含水率および国産カラマツ集成材の繊維直交方向は未試験

2. 1. 2 載荷方法

実験は図4に示す載荷装置を用いて行った。各試験体には2台の鉛直油圧ジャッキを用いて、外殻集成材に内蔵されたコア部分の終局圧縮耐力の16%に相当する一定軸力(976kN)を作用させた状態で、水平油圧ジャッキにより静的漸増繰返し水平力載荷を行った。なお、試験体は全て内蔵鉄骨が強軸曲げとなるように配置した。また、水平力を載荷すると同時に2台の鉛直

ジャッキによって柱頭部に曲げ戻しモーメントを作用させることにより、柱に正負逆対称曲げモーメントを作用させた。その際、水平ジャッキと鉛直ジャッキはマニュアルで個別に制御した。

水平力荷重は、柱上下端の相対水平変位 δ と柱内法高さ h で与えられる相対部材角 $R(=\delta/h)$ での変位制御とした。各試験体とも相対部材角 $R=0.005, 0.01, 0.015, 0.02, 0.03$ および 0.04rad 。

を2サイクルずつ荷重し、最後に $R=0.05\text{rad}$ を半サイクル荷重して実験終了とした。

2. 2 実験結果

2. 2. 1 履歴特性・破壊性状

図5に荷重-変位関係を示す。なお、これ以降の全ての結果において、比較のためにカラマツ集成材を用いた既往の実験結果³⁾も併せて示す。図中の破線は一般化累加強度理論により求めた終局曲げ耐力の計算値を表している。

せん断スパン比が2.0の試験体 WC1C では、 $R=0.007\text{rad}$ で鉄骨フランジに最初の降伏が確認され、その後、最終サイクルとなる $R=0.05\text{rad}$ まで荷重は増加し続けた。一方、せん断スパン比が1.5および1.0の試験体 WC2C および WC3C では、最大耐力が確認された後に緩やかに耐力低下が生じた。しかし、各試験体とも急激な耐力低下は認められず、樹種に関係なく安定した紡錘型でエネルギー吸収能力に優れた履歴性状を示している。また、カラマツを用いた試験体と比較しても、荷重-変位関係に大きな差異は確認されなかった。

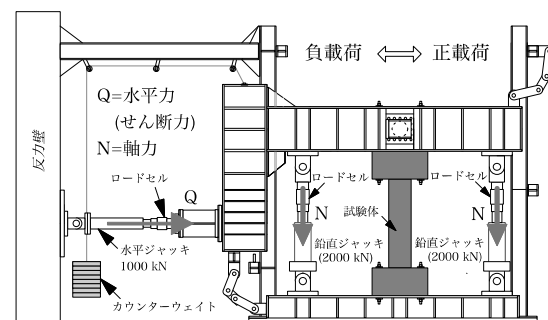


図4 荷重装置

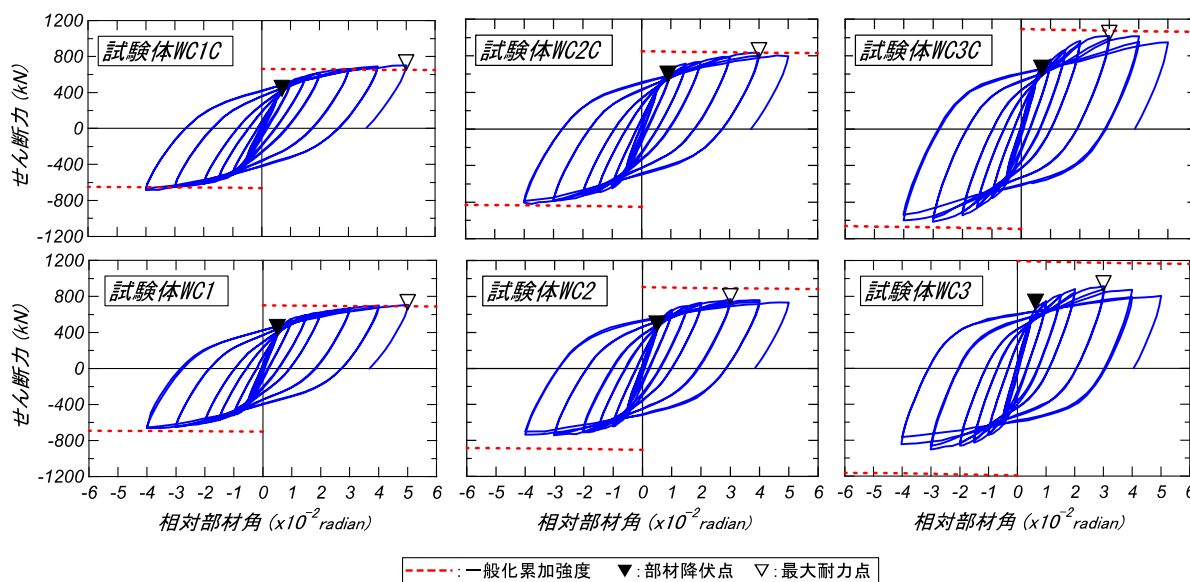


図5 荷重-変位関係（上段：スギ、下段：カラマツ）

写真1に各試験体の最終破壊状況を示す。試験体 WC1C では、 $R=0.01\text{rad}$ のサイクルで外殻集成材のめり込みと浮き上がりが始まり、最初の割れは $R=0.03\text{rad}$ のサイクルで確認された。また、試験体 WC2C および WC3C は、それぞれ $R=0.04$ および 0.02rad のサイクルで最初の割れが確認され、各試験体とも変位の増加に伴い割れは高さ方向に伸展した。

外殻集成材にカラマツを用いた試験体と比較し、概ね同時期に割れが発生している。しかし、スギを用いた試験体の方が若干発生時期は遅れる傾向が見られ、特に試験体 WC2C でその傾向

が強く見られた。また、スギを用いた試験体の方が割れの発生箇所は多くなったが、カラマツを用いた試験体の場合と同様にせん断スパン比の低下に伴い、外殻集成材の損傷の程度は増大する傾向が認められた。

2. 2. 2 一般化累加強度理論による終局耐力評価

(1)概要と実験結果との比較

一般化累加強度理論の計算に際しては、理論の基本仮定に従って、鉄骨、コンクリートおよび集成材ともに剛塑性材料と仮定した。さらに、柱-スタブ接合部においては、外殻集成材とスタブ側の集成材パネルとが非接着であるため、計算では外殻集成材の引張強度を 0 としている。計算結果と実験結果の比較を図 6 に示す。ここで、せん断スパン比を 1.5、1.0 とした試験体の鉄骨の耐力は、ウェブの降伏によるせん断耐力で頭打ちにしている。なお、材料特性はそれぞれ材料試験結果に基づいて設定した。同図よりスギを用いた試験体では、せん断スパン比によらず計算値は実験値に近い値となったが、カラマツを用いた試験体は試験体 WC1 のみ実験値と近い値となり、試験体 WC2 および WC3 は実験値と合わず、その差はせん断スパン比の低下に伴い増大する傾向が見られた。

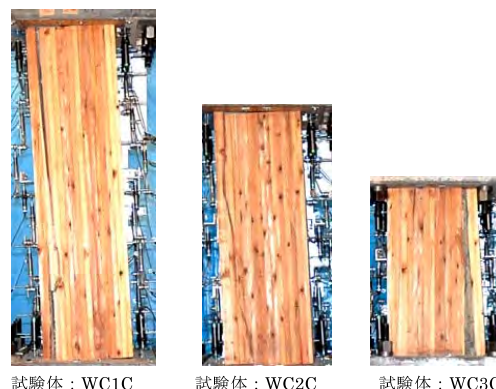


写真 1 最終破壊状況

(2)集成材のめり込み考慮時の結果

図 6 の計算では外殻集成材の材料特性として繊維方向の圧縮試験結果の値を用いたが、実際には柱-スタブ接合部においてスタブ側の集成材パネルにめり込みが生じていることから、繊維方向の圧縮強度に達する前にめり込み強度で最大値を迎えることが予想され、繊維方向の圧縮強度が十分に発揮されることは考えにくい。そこで、ここではめり込み強度を考慮した一般化累加強度理論について検討する。

集成材のめり込み強度は、素材試験として行ったスギ集成材パネルのめり込み試験を参照し、木質構造で一般に用いられる稲山のめり込み式^{4)・5)}により実験結果を近似した値を採用した。終局耐力時に対応するめり込み変位として、実験時に測定しためり込み量より相対部材角 $R=0.03\text{rad}$ 時の値を用い、この変位量に対応する荷重を稲山のめり込み式より算出した。最後に、得られためり込み荷重をめり込み試験時の載荷面積で除すことにより、外殻集成材の降伏応力度を算出した。

めり込み強度を考慮した一般化累加強度理論の計算結果と実験値の比較を図 7 に示す。なお、カラマツ集成材についてはめり込み試験を行っていないが、スギ集成材と同様にして外殻集成材の降伏応力度を算出した。同図より、一般化累加強度理論による終局耐力の計算値は、樹種ならびにせん断スパン比に関係なく実験値との誤差が 10%程度と精度良く評価できているが、全体的に実験値を過小評価する傾向が見られる。通常、木材のめり込み試験においては、木材に特別な拘束を施さずに载荷を行うのに対し、スタブ部分の集成材パネルは周囲を鋼板ならびにコンクリートに囲まれ、さらにスタブのコンクリートにボルトを介して連結されており、集成材パネルの面外方向の反り返りや水平方向の変形が拘束されている。これによって、実際の集成材パネルのめり込み強度は計算値よりも高くなることが予想され、このことが過小評価の一因であると考えられる。

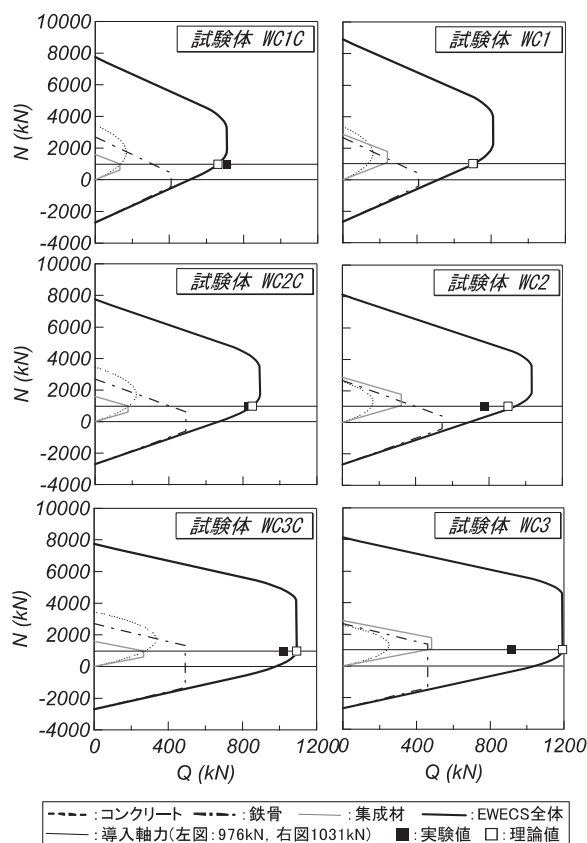


図 6 N-Q 相関曲線

(左図：スギ、右図：カラマツ)

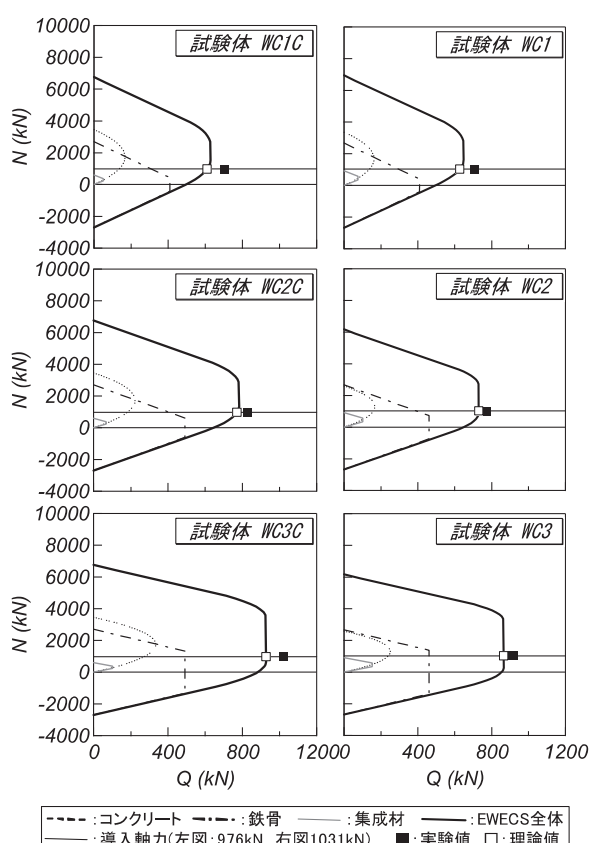


図 7 めり込みを考慮した N-Q 相関曲線

(左図：スギ、右図：カラマツ)

3. 変動軸力および高軸力を受ける EWECS 柱の構造性能の検討

3. 1 実験計画

3. 1. 1 試験体概要と使用材料

試験体の概要を図 8 に、試験体一覧を表 3 にそれぞれ示す。試験体の構成ならびに製作方法は 2. 1. 1 と同様である。柱内法高さは 1600mm とし、せん断スパン比は 2.0 である。

本実験では、普通コンクリートの設計基準強度は 24N/mm^2 とし、H 形鋼には H-300×220×10×15 を、外殻集成材には厚み 45mm の国産スギ集成材をそれぞれ用いた。

実験変数は軸力比および軸力変動の有無とし、軸力比 0.30 および 0.40 の一定軸力を受ける柱（試験体 WNC1 および WNC3）、軸力比 0.04～0.29 の変動軸力を受ける柱（試験体 WNV2）、軸力比 -0.07～0.40 の変動軸力を受ける柱（試験体 WNV4）の計 4 体の実験を実施する。

3. 1. 2 荷荷方法

荷荷装置は 2. 1. 2 に示した装置と同様のものを使用した。水平力を荷荷すると同時に 2 台の鉛直油圧ジャッキによって柱頭部に曲げ戻しモーメントを作用させ、柱に軸力および正負逆対称曲げモーメントを作用させた。なお、試験体は全て内蔵鉄骨が強軸曲げとなるように配置した。水平力荷荷は変位制御とし、柱上下端の相対水平変位 δ と柱内法高さ h で与えられる相対部材角 $R(=\delta/h)$ で、0.005、0.01、0.015、0.02、0.03 および 0.04rad. を 2 サイクルずつ荷荷し、最後に 0.05rad. を半サイクル荷荷して実験終了とした。

作用軸力は、試験体 WNC1 および WNC3 ではそれぞれ 1559kN および 2100kN の一定値とした。試験体 WNV2 および WNV4 では、それぞれ 10 階ならびに 20 階程度の中高層建築物の最下階の側柱を想定し、せん断力に依存する変動軸力としてそれぞれ式 (1)、式 (2) により 190.5

～1498.5kN、-358.5～2098.5kN とした。

$$N = 0.16 N_0 \pm Q \quad \cdots (1)$$

$$N = 0.16 N_0 \pm 2Q \quad \cdots (2)$$

ここで、N は作用軸力、 N_0 はコア部分の終局圧縮耐力、Q はせん断力である。

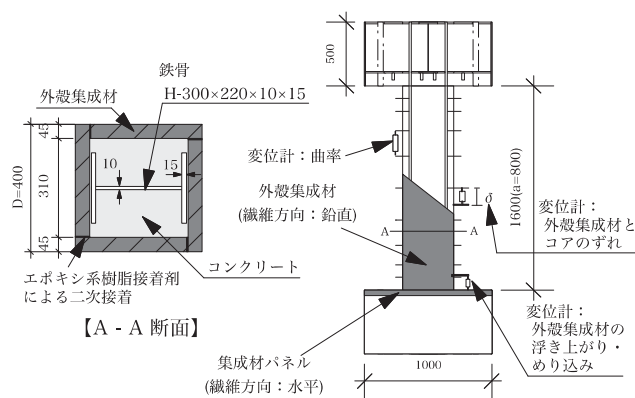


図 8 試験体概要

3. 2 実験結果

3. 2. 1 履歴性状および破壊性状

せん断力-相対部材角関係を図 9 に、軸方向変形-相対部材角関係を図 10 に、終局時の破壊状況を写真 2 に示す。なお、比較のために 2. 2. 1 のせん断スパン比を 2.0、軸力比を 0.16 とした試験体 WC1C のせん断力-相対部材角関係を図 9 中に併記した。図 9 中の破線は一般化累加強度理論により算出した終局曲げ耐力の計算値を表しており、計算値には荷重装置の特性による P- δ 効果の影響を考慮している。また、部材降伏点とは柱の鉄骨フランジおよびウェブにおいて最初に降伏が確認されたときとした。

一定軸力とした試験体 WNC1 および WNC3 は、それぞれ相対部材角 $R=0.03\text{rad.}$ および 0.02rad. のサイクルで集成材が高さ方向に完全に割裂破壊し、同サイクルで最大耐力に達した。最大耐力以降、急激な軸方向変形の増加とともに耐力劣化が生じた。なお、両試験体とも軸方向変形の増加とともに集成材が大きくはらみ出し、実験の続行が不可能となったため、試験体 WNC1 では $R=0.04\text{rad.}$ で、試験体 WNC3 では $R=0.03\text{rad.}$ でそれぞれ実験終了としている。

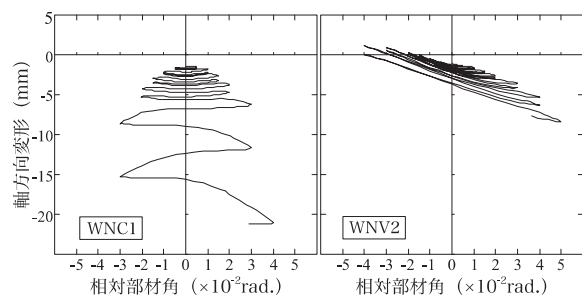


図 10 軸方向変形-相対部材角関係

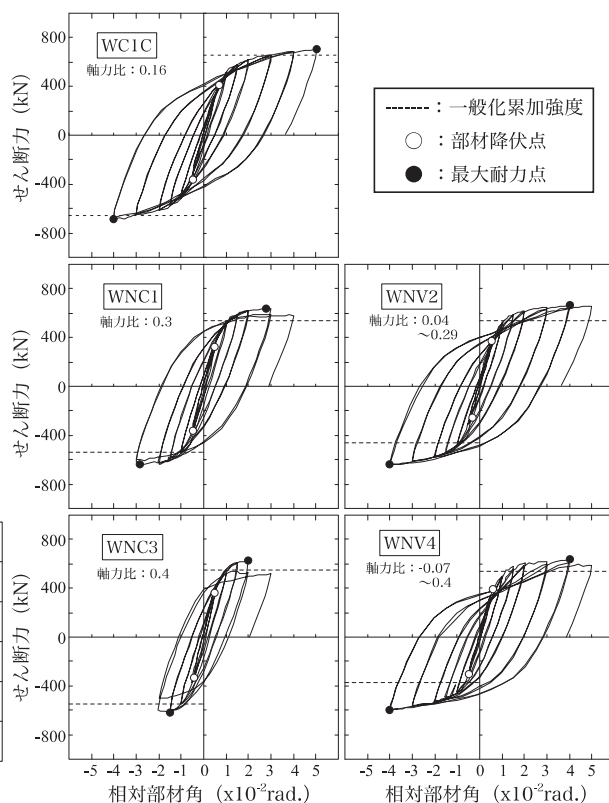


図 9 せん断力-相対部材角関係

変動軸力とした試験体 WNV2 および WNV4 は、相対部材角 $R=0.04\text{rad}$ のサイクルで最大耐力に達し、集成材が高さ方向に完全に割裂破壊した。しかし、最大耐力以降に急激な耐力劣化は見られず、安定した履歴性状を示した。

外殻集成材を取り除いた載荷後の試験体を写真 3 に示す。一定軸力の試験体 WNC1 では柱頭および柱脚部が広範囲にかけて損傷しているが、変動軸力の試験体 WNV2 では高軸力時に圧縮側となる材端部（図中の破線部分）だけが大きく損傷しており、一定軸力下の試験体よりも損傷の程度が小さいことがわかる。



写真 2 終局時の破壊状況

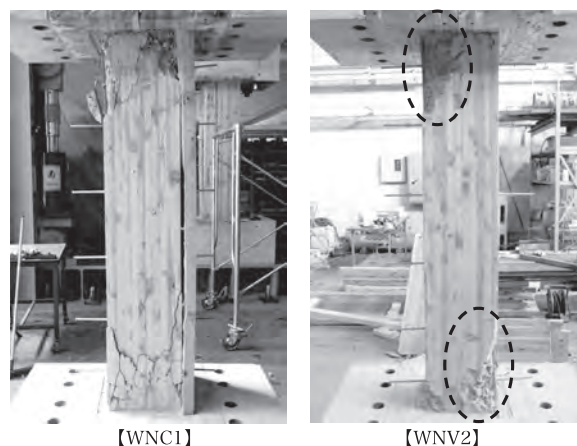


写真 3 破壊後の試験体

3. 3 終局曲げ耐力の評価

一般化累加強度理論に基づく計算値と実験値の比較を図 11 に示す。同図より、一定軸力とした試験体および変動軸力とした試験体の正載荷側(高軸力側)はともに、実験値との誤差が 1~2 割程度と安全側に概ね精度良く評価できていることがわかる。しかし、低圧縮力あるいは引張軸力となる変動軸力の負載荷側は、安全側ではあるものの実験値との差が大きくなる傾向にある。

図 12 に試験体 WNC3 と WNV4 の一般化累加強度理論で求めた中立軸位置と各構成要素の応力分布を示す。また、試験体が最大耐力を記録した際の中立軸位置を鉄骨のひずみ分布から求め、図中に併記した。

一定軸力である試験体 WNC3 では、最大耐力近傍で鉄骨全断面に圧縮ひずみが生じているため、実験から求めた中立軸位置と計算による中立軸位置は大きくずれている。しかし、鉄骨の引張側フランジは繰り返し加力によって圧縮ひずみ領域にあるにもかかわらず引張降伏していることから、計算と実験とで応力分布に大差がなかったものと考えられる。

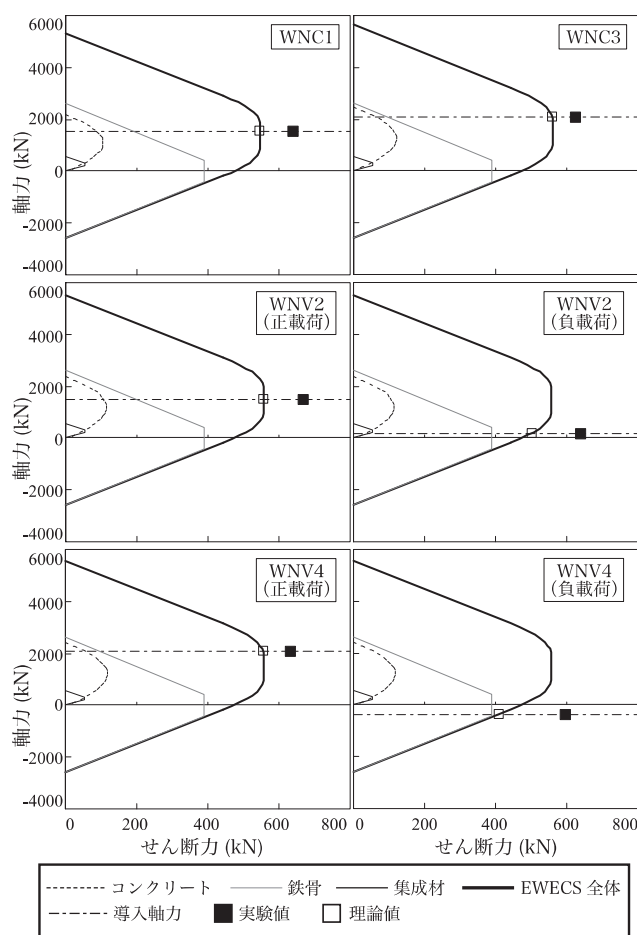


図 11 N-Q 相関曲線と実験値の比較

一方、変動軸力である試験体 WNV4 では、実験時において正載荷側と負載荷側で中立軸位置がほとんど変化していないうえに負載荷側では鉄骨に大きな引張ひずみが生じていることから、コンクリートも引張側断面では引張ひずみが発生していると推測される。一般化累加強度理論を適用する際に外殻集成材とコンクリートは引張応力を負担しないと仮定したが、スタブと柱の間で完全に分離している外殻集成材とは異なり、両者が一体となっているコンクリートでは、少なからず引張応力が発生するものと考えられる。コンクリートに引張応力が生じることで、コンクリートの負担せん断力が上昇するとともに、軸方向の力の釣り合いから鉄骨の中立軸が計算で求めた位置よりも強軸側に移動することとなり、鉄骨においても負担せん断力が上昇することとなる。以上の理由により、変動軸力の試験体において負載荷側で計算値に比べ実験値が非常に大きくなったものと考えられる。ただし、コンクリートの引張応力を計算上で考慮するためには、コンクリートの引張応力状態や影響範囲等について詳細に把握する必要があり、今後の課題である。

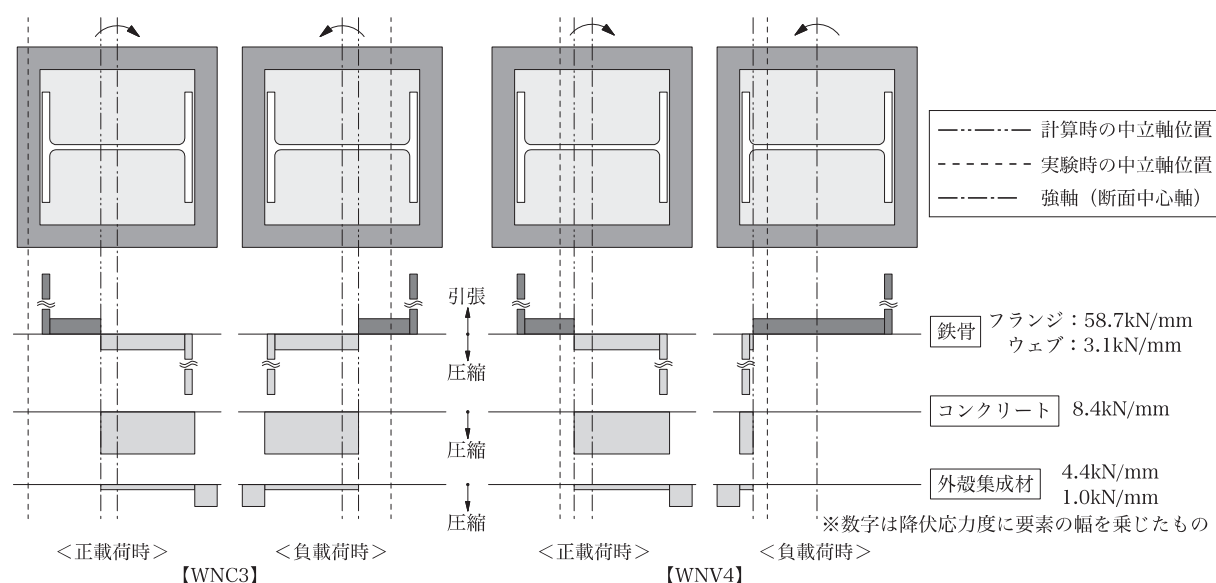


図 12 一般化累加強度理論における中立軸位置と断面の応力度分布

4. まとめ

本研究では、外殻集成材に国産スギを用いた EWECS 柱において、樹種、せん断スパン比、軸力比および軸力変動の有無を変数とした静的載荷試験を実施し、破壊性状、復元力特性、終局耐力に及ぼす影響、ならびに終局耐力評価について以下の知見を得た。

- (1) EWECS 柱の履歴性状は、樹種に関係なく安定した紡錘型でエネルギー吸収能力に優れた性状を示した。
- (2) EWECS 柱の破壊性状は、外殻集成材にスギを用いた場合にひび割れが多くなる点を除いて、樹種に関係なく概ね同様の傾向を示す。
- (3) 外殻集成材の耐力はめり込み強度で頭打ちになるため、外殻集成材に用いる樹種の方法強度およびヤング係数は EWECS 柱の耐力に大きく影響を与えない。
- (4) EWECS 柱の終局耐力は、外殻集成材のめり込み強度および鉄骨のせん断耐力を考慮することで、一般化累加強度理論により精度よく評価できるが、全体的に過小評価する傾向が見られる。
- (5) 一定高軸力下の試験体は集成材の割裂後に軸圧縮変形が急激に進行し、顕著な耐力劣化を生じた。

(6) 中高層建築物の最下階の側柱において地震時の転倒モーメントによる軸力変動を想定した場合には、EWECS 柱は耐力劣化の少ない安定した履歴性状を示した。これは、低軸力側の載荷で鉄骨に大きな引張ひずみが生じることにより高圧縮軸力側の載荷の際にコンクリートにかかる負荷が減少することに起因する。

(7) 一定軸力ならびに変動軸力の高圧縮軸力側の終局耐力評価において、実験値は一般化累加強度理論に基づく計算値より 1~2 割程度大きい結果となり、概ね精度良く安全側に評価することができた。

(8) 変動軸力の低軸力側の終局耐力評価においては、コンクリートの引張応力が生じたことによって実験値と計算値との誤差が大きくなる傾向が見られた。ただし、現段階ではコンクリートの引張応力状態について詳細に把握することはできず、コンクリートの引張応力を計算上で考慮する手法については今後の課題である。

5. 参考文献

- 1) Fauzan, Kuramoto, H., Shibayama, Y. and Yamamoto, T.: Structural Behavior of Engineering Wood Encased Concrete-Steel Composite Columns, Proceedings of the Japan Concrete Institute, Vol.26, No.2, pp. 295-300, 2004.7
- 2) Fauzan, Kuramoto, H. and KIM, Ki-Hyung.: Seismic Performance of Composite EWECS Columns using Single H-steel, Proceedings of the Japan Concrete Institute, Vol.27, No.2, pp. 307-312, 2005.6
- 3) Fauzan, Kuramoto, H. Matsui, T and KIM, Ki-Hyung.: Seismic Performance of Composite EWECS Columns with varying Shear-Span Ratios, Proceedings of JCI, Vol.27, No.2, pp. 307-312, 2006.7
- 4) 稲山正弘：木材のめり込み理論とその応用，東京大学学位論文，1991.12
- 5) 稲山正弘：木材のめり込みに関する研究，その4 等変位めり込みの弾性剛性の計算式の提案，日本建築学会大会学術講演梗概集，C，構造Ⅱ，pp.907-908, 1993.9

Ⅱ－２ EWECS 柱－梁接合部のせん断抵抗機構の解明

森林総合研究所：新藤健太、宮武 敦、平松 靖、原田真樹、軽部正彦

<要約>

集成材と鉄骨・コンクリートを複合した新しい木質系ハイブリッド部材である EWECS (Engineering Wood Encased Concrete-Steel) 部材の柱－はり接合部のせん断性状を調べるため、十字型試験体による正負交番繰返し载荷を実験的に行った。その結果、集成材に低強度の国産スギ集成材 (L30-40 クラス) を用いても、国産カラマツ集成材 (L110 クラス) を用いた結果と同等の構造性能を有することが確認された。またより実施設計に近い RC 床スラブとの取り扱いについても検討を行ったところ、集成材に国産の低強度のスギを用いても耐力、剛性とも上昇することが確認された。またはり曲げ降伏型の試験体はもとより、接合部せん断破壊型試験体でも設計上十分な耐力および靱性能を示した。

1. 研究の目的

国産材の有効利用が進められる中、新たな需要を掘り起こすことはきわめて重要である。戸建住宅については現在も木造が主流であるが、マンションやオフィスビルといった中層・中高層建物については、自動的に鉄筋コンクリート (以下、RC と略す) 造や鉄骨 (以下、S と略す) 造となる。これは我が国の防耐火規制が厳しいことと、中高層木造建物の場合にはめり込みやクリーブ、地震時の変形性能などに課題があるからである。このことから、木材 (集成材) と鉄骨・コンクリートと組み合わせること (ハイブリッド化) は、これらの課題をクリアーし、実施設計を行う上できわめて有効であるものと考えられる。

EWECS 部材を実用化するには、構造設計上重要な位置づけとなる、柱－はり接合部の構造性能を把握しておく必要がある。一方、国産材の有効利用を前提とすれば、スギの利用が前提となる。そこで国産材の中では比較的強度の高い国産カラマツ (L110 クラス) と、国産スギの中でも木材 (集成材) として利用しにくいとりわけ低強度のスギ (L30-40 クラス) による集成材を用いた EWECS 部材を作製し、構造性能を比較することにした。

また実施設計 (構造設計) を行う場合、床とはりとの取り扱いも重要な要素となる。EWECS 部材による建物を想定した時、遮音性に優れる RC 造床スラブを用いることが前提となることから、RC 造床スラブ付きのはり－柱接合部の構造性能についても比較・検討することにした。

表 1 試験体概要

2. 樹種の違いによる構造性能の検討

2. 1 研究の概要

EWECS 部材は、集成材と鉄骨、コンクリートを複合した新しい木質系ハイブリッド構造¹⁾である。ここでは、外殻に配置された集成材に、集成材としては利用しにくい低強度のスギ

試験体名		WCSJ-CA	WCSJ-CB	WCSJ-LA	WCSJ-LB
破壊モード		はり曲げ降伏	接合部せん断	はり曲げ降伏	接合部せん断
樹種		スギ		カラマツ	
コンクリート設計基準強度 Fc (N/mm ²)		24			
軸力比 N/(Bc・Dc・Fc) * 1		0.3			
鋼材	柱	断面 B×D (mm)	400×400		
		支点間高さH (mm)	1,300		
		鋼材 (mm)	RH-300×220×10×15 (SS400)		
	はり	断面 B×D (mm)	300×400		
		支点間長さL (mm)	2,250		
		鋼材 (mm)	H-300×150*2	H-300×200*3	H-300×150*2
P*4	鋼材 (mm)	PL-10	PL-4.5	PL-10	PL-4.5

^{*1} $Bc \cdot Dc$: コア鉄骨コンクリート部断面積, ^{*2} RH-300 × 150 × 6.5 × 9 (SS400),

^{*3} BH-300 × 200 × 9 × 19 (SS400),

^{*4} P: パネル部・ウェブ

(L30-40 クラス)を用いた時の柱はり接合部の強度性能を調べるため、樹種(スギ、カラマツ)および破壊モード(鋼材の厚さ)を変動要因として、十字型試験体による静的破壊試験を行い、強度性能を検証した。

2. 2 試験体形状

表 1 に試験体一覧を、図 1 に試験体概要をそれぞれ示す。試験体は計 4 体とし、実大に対し約 1/2.7 のスケールダウンとした。はり左右端部のピン支承間距離は 2,250mm とした。

柱部分は 400×400(mm)で、集成材厚は 45(mm)、鋼材は H-300-220-10-15 (SS400)とし、コアにコンクリート ($F_c=24(N/mm^2)$) を使用した。

はり部分は 300×400(mm)で、鋼材は H-300-150-6.5-9(はり曲げ降伏型)、H-300-200-9-19(接合部破壊型)の 2 種類とし、コンクリートは使用していない。また接合部パネルゾーンの鋼材については、接合部せん断破壊先行型の試験体(WCSJ-CB、LB)のみ、ウェブ厚を PL-4.5mm に変更した。

集成材については、国産スギは L30-40 を、比較のための国産カラマツ²⁾は L=110 をそれぞれ用い、レゾルシノール系樹脂接着剤を用いて積層接着(1 次接着)した。これを所定の寸法(パーツ)に切削加工し、エポキシ樹脂接着剤を用いて 2 次接着し組み上げた。集成材の積層方向は、柱部分では幅および奥行方向、はり部分では強軸(はり成)方向とした。³⁻⁴⁾

2. 3 加力方法

荷重装置を写真 1 に示す。試験体の左右に鉛直に設置したオイルジャッキ 2 本で定軸力を荷重しながら、反力壁に水平に設置

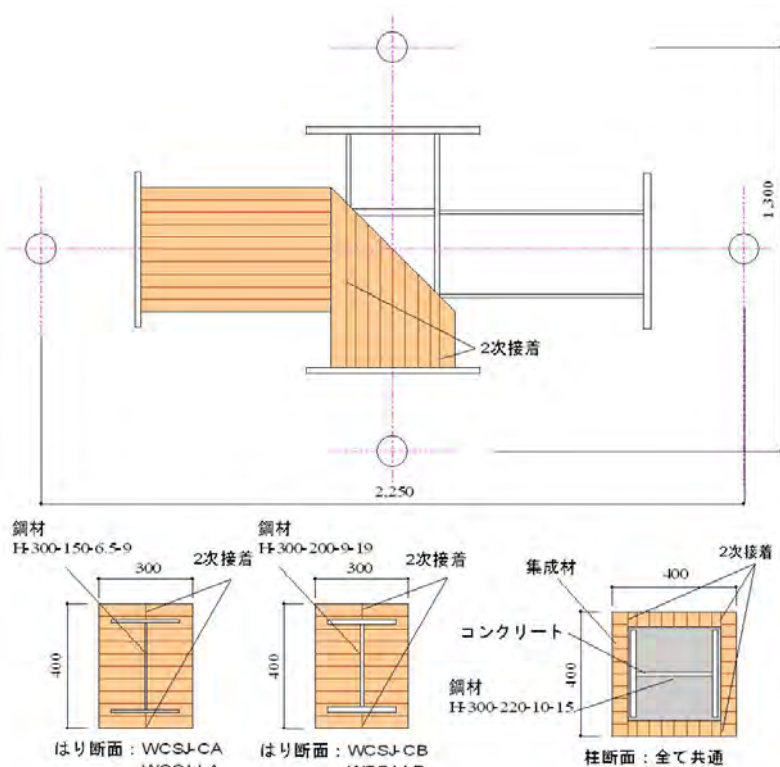


図 1 試験体形状



写真 1 荷重装置

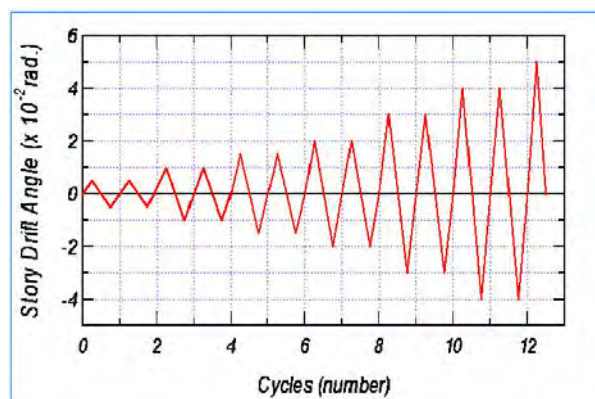


図 2 加力プログラム

したオイルジャッキで地震力に相当する水平力を同時に加力した。

また加力プログラムを図 2 に示す。相対部材角 $R=0.005, 0.01, 0.015, 0.02, 0.03, 0.04\text{rad}$ を 2 サイクルずつ正負交番繰り返し載荷したのち、 $R=0.05\text{rad}$ 正側のみ載荷して終了とした。

2. 4 材料試験結果

表 2 に集成材の材料試験結果を⁵⁾、表 3 に鋼材の結果を、表 4 にコンクリートの結果をそれぞれ示す。

2. 5 試験結果

各試験体の最大耐力時における破壊状況を写真 2(a)～(d)に、最終破壊状況を写真 3(a)～(d)にそれぞれ示す。

はり曲げ破壊先行型の試験体においては、WCSJ-CA(スギ)は $R=0.02\text{rad}$ で、WCSJ-LA(カラマツ)は $R=0.005\text{rad}$ でそれぞれ柱正面部に微少な割れが発生し、

表 2 集成材材料性状

樹種	使用試験体	ラミナ等級	含水率 (%)	縦圧縮強さ (N/mm^2)	横圧縮強さ (N/mm^2)	ヤング係数 (GPa)
スギ	WCSJ-CA WCSJ-CB	L30-40	11.8	24.7	5.0	3.97
カラマツ	WCSJ-LA WCSJ-LB	L110	12.0	45.0	3.7	11.5

表 3 鋼材材料性状

鋼材種類	強度等級	使用試験体	使用部位	降伏強さ (N/mm^2)	引張強さ (N/mm^2)
BH-300×220 ×10×15	SS400	WCSJ-CA	柱フランジ	280	474
		WCSJ-CB	柱ウェブ	315	488
		WCSJ-LA	柱フランジ	284	451
		WCSJ-LB	柱ウェブ	296	455
RH-300×150 ×6.5×9	SS400	WCSJ-CA	梁フランジ	295	463
			梁ウェブ	349	487
		WCSJ-LA	梁フランジ	321	458
			梁ウェブ	408	510
RH-300×200 ×9×19	SS400	WCSJ-CB	梁フランジ	300	446
			梁ウェブ	297	460
		WCSJ-LB	梁フランジ	252	441
			梁ウェブ	293	407
PL-4.5	SS400	WCSJ-CB	パネル	364	454
		WCSJ-LB	ウェブ	257	338

表 4 コンクリート材料性状

試験体	設計基準強度 (N/mm^2)	水セメント比 (%)	スランブ (cm)	圧縮強さ σ_B (N/mm^2)	ヤング係数 E_c (GPa)
WCSJ-CA	24	57	18	36.1	28.1
WCSJ-CB				38.0	
WCSJ-LA	24	57	17	22.8	20.3
WCSJ-LB				24.3	



写真 2(c) 最大荷重時の状況 (WCSJ-LA)

写真 2(d) 最大荷重時の状況 (WCSJ-LB)



写真 3 (a) 最終破壊状況 (WCSJ-CA)



写真 3 (b) 最終破壊状況 (WCSJ-CB)



写真 3 (c) 最終破壊状況 (WCSJ-LA)



写真 3 (d) 最終破壊状況 (WCSJ-LB)

変形角の増大とともに割れも進行したが、大きな破壊には至らなかった。

接合部せん断破壊先行型の試験体においては、WCSJ- CB(スギ)は $R=0.015\text{rad.}$ で、WCSJ-LB(カラマツ)は $R=0.005\text{rad.}$ でそれぞれ柱正面部に微少な割れが発生し、変形角の増大

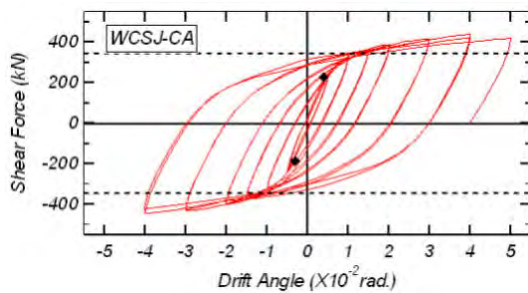


図 3 (a) 荷重変形履歴曲線 (WCSJ-CA)

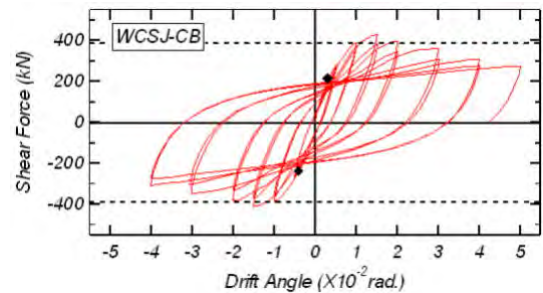


図 3 (b) 荷重変形履歴曲線 (WCSJ-CB)

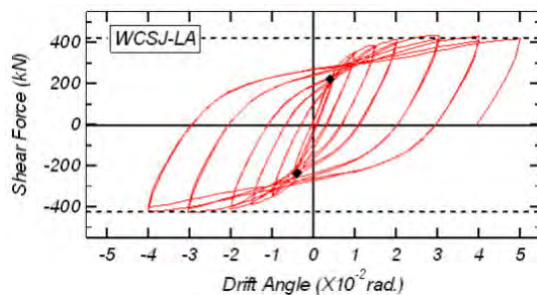


図 3 (c) 荷重変形履歴曲線 (WCSJ-LA)

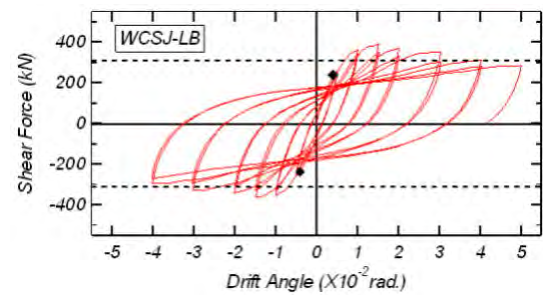


図 3 (d) 荷重変形履歴曲線 (WCSJ-LB)

にともなって割れも進行した。変形角 $R=0.04\text{rad}$.以降では、接合部パネルゾーンの破壊にともなって、柱正面に位置する集成材の2次接着部に貫通割れが発生し、集成材が面外に押し出される状況も確認された。また全ての試験体で、はり部集成材の損傷は軽微だった。

また得られた荷重－変形履歴関係を図3(a)～(d)にそれぞれ示す。なお、はりフランジに貼付したひずみゲージが降伏ひずみに達した時を部材降伏時として、図3中に◆印で表記した。

はり曲げ破壊先行型の試験体は、いずれも高い靱性能を示し、紡錘型の履歴性状となった。WCSJ-CA(スギ)、WCSJ-LA(カラマツ)とも $R=0.004\text{rad}$.ではりの引張側フランジで降伏が確認された。その後どちらの試験体も $R=0.01\text{rad}$.で接合部ウェブがせん断降伏し、剛性が低下した。WCSJ-CAは、正側では $R=0.04\text{rad}$.で最大耐力 439.5kN 、負側では $R=-0.04\text{rad}$.で -442.5kN をそれぞれ示した。最終変形角 $R=0.05\text{rad}$.時の耐力は 419.3kN で、最大耐力の約95%だった。一方WCSJ-LAは、正側では $R=0.03\text{rad}$.で最大耐力 435.0kN 、負側では $R=-0.027\text{rad}$.で -425.5kN をそれぞれ示した。最終変形角における耐力は 419.5kN で、最大耐力の約96%だった。また大変形時において、集成材にスギを用いた試験体(WCSJ-CA)の方が、カラマツ試験体(WCSJ-LA)より履歴面積が大きい傾向が認められた。これは鋼材およびコンクリートの材料性状の違いによるほか、樹種の特性³⁾が発現している可能性も示唆される。

接合部せん断破壊先行型の試験体は、いずれもやや逆S字型の履歴ループを描き、はり曲げ破壊先行型の試験体と比較して耐力低下が大きくなる結果になった。WCSJ-CB(スギ)、WCSJ-LB(カラマツ)とも、 $R=0.005\text{rad}$.サイクル時にはりフランジの引張降伏およびパネルゾーンのせん断降伏が確認された。WCSJ-CBは、正側では $R=0.015\text{rad}$.で最大耐力 430.5kN 、負側では $R=-0.015\text{rad}$.で -410.3kN をそれぞれ示した。最終変形角 $R=0.05\text{rad}$.時の耐力は 273.0kN で、最大耐力の約63%だった。一方WCSJ-LBは、正側では $R=0.015\text{rad}$.で最大耐力 393.5kN 、負側では $R=-0.015\text{rad}$.で -362.0kN をそれぞれ示した。最終変形角における耐力は 287.0kN で、最大耐力の約73%だった。⁶⁻⁷⁾

2. 6 まとめ

EWECs を構成する集成材に、低強度の国産スギの適用性について検討した結果、以下のことがわかった。

1. はり曲げ破壊先行型の試験体は、集成材の樹種(強度)によらず高い靱性能を示し、紡錘型の履歴性状となった。またスギ試験体の方が、カラマツ試験体より履歴面積が大きい傾向が認められた。
2. 接合部せん断破壊先行型の試験体は、いずれもやや逆S字型の履歴ループを描き、はり曲げ破壊先行型の試験体と比較すると耐力低下は大きかった。
3. 集成材に低強度の国産スギを用いても、国産カラマツと同程度の構造性能を示し、EWECs 部材に適用可能であることがわかった。
4. はり曲げ破壊先行型試験体はもとより、接合部せん断破壊先行型試験体でも高い耐力および靱性能を示し、柱－はり接合部において高い構造性能を有していることがわかった。EWECs 構造部材は、主要構造部材としての高い性能を持つことが確認された。

3. RC 床スラブが構造性能に与える影響の検討

3. 1 研究の概要

実施設計(構造設計)を行う場合、床とはりとの取り合いも重要な要素となる。EWECs 部材による建物を想定した時、遮音性に優れるRC造床スラブを用いることが前提となることから、RC造床スラブ付きのはり－柱接合部の構造性能についても、比較・検討することにした。

前節において、低強度の国産スギと EWECS 構造部材との相性がよいことが確認されたこと、国産カラマツは比較的強度が高いことから、ここでは国産スギ材のみを用いて検討を行った。

3. 2 試験体形状

表 5 に試験体一覧を、図 4 に試験体概要をそれぞれ示す。試験体は計 2 体とし、実大に対し約 1/2.7 のスケールダウンとした。比較のため、RC 床スラブを設けた以外、前節の試験体と全て同様とした。

RC 床スラブ厚は 70 mm (1/2.7 スケールのため、190mm に相当) とし、水平構面の防火区画を確保するため、スラブ勝ちとした。スラブの鉄筋は D13 (SD 295A) とした。

また鋼材との定着を取るため、頭付きスタッド (d13) を鋼材上面に配置したほか、使用する鋼材やコンクリートは、全て前節の試験体とそろえた。

3. 3 加力方法

載荷装置および加力プログラムとも、前節と同様とした。載荷装置は写真 1 を、加力プログラムは図 2 を参照されたい。

3. 4 材料試験結果

表 6 にコンクリートの結果を示す。

3. 5 試験結果

各試験体の最終破壊状況を写真 4(a)～(b)に示す。防火区画を設けるため RC 造床スラブがちの取り合いになっている影響で、最終破壊性状はどちらの試験体でも柱部分の 2 次接着部近

表 5 試験体概要

試験体名		WCSJ-CC	WCSJ-CD
破壊モード		はり曲げ降伏	接合部せん断
樹種		スギ	
コンクリート設計基準強度 $F_c(N/mm^2)$		24	
軸力比 $N/(Bc \cdot Dc \cdot F_c)^{*1}$		0.3	
鋼材	柱断面 $B \times D(mm)$	400×400	
	支点間高さ $H(mm)$	1,300	
	鋼材 (mm)	RH-300×220×10×15 (SS400)	
	RCスラブ $B \times D(mm)$	900×70	
	RCスラブ配筋	D13 (SD295A) @ 75 (mm)	
	頭付きスタッド	d13@75, L=35 (切断) (mm)	
	断面 $B \times D(mm)$	300×400 (RCスラブ厚を含む)	
	支点間長さ $L(mm)$	2,250	
	鋼材 (mm)	H-300×150×6.5×9 (SS400)	H-300×200×9×19 (SS400)
P^{*2}	鋼材 (mm)	PL-10	PL-4.5

*1 $Bc \cdot Dc$: コア鉄骨コンクリート部断面積, *2 P: パネル部・ウェブ

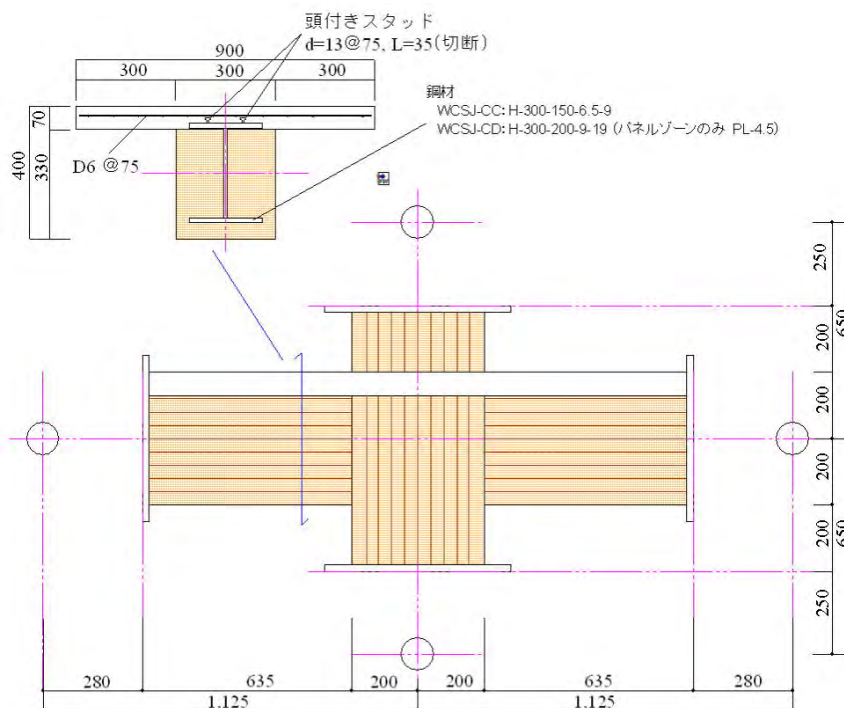


図 4 試験体形状

表 6 コンクリート材料性状

試験体	設計基準強度 (N/mm^2)	水セメント比 (%)	スランパ (cm)	圧縮強さ $\sigma_B(N/mm^2)$	ヤング係数 $E_c(GPa)$
WCSJ-CC	24	57	18	24.6	20.5
WCSJ-CD				24.8	



写真 4 (a) 最終破壊状況 (WCSJ-CC)



写真 4 (b) 最終破壊状況 (WCSJ-CD)

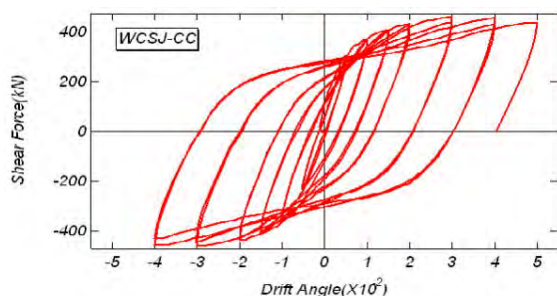


図 5 (a) 荷重変形履歴曲線 (WCSJ-CC)

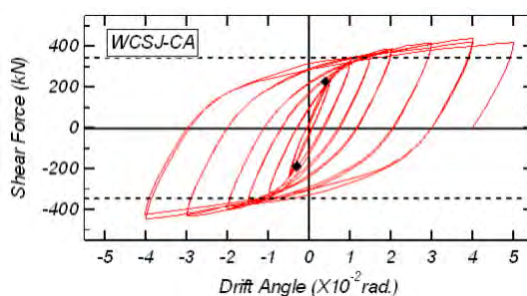


図 5 (b) 荷重変形履歴曲線 (WCSJ-CA)

傍で縦方向の割裂破壊が発生した。また接合部せん断破壊先行型試験体 (WCSJ-CD) においては、スラブなし試験体 (WCSJ-CA) と同様に、接合部パネルゾーンの破壊にともなって、柱正面に位置する集成材が面外に押し出される状況も確認された。また全ての試験体で、はり部集成材の損傷は軽微だった。

また荷重－変形履歴関係のうち、RC スラブ付きはり曲げ降伏型試験体 (WCSJ-CC) を図 5(a) に、比較のため RC スラブなしのはり曲げ降伏型試験体 (WCSJ-CA) を図 5(b) にそれぞれ示す。RC スラブ付き試験体では、剛性の高い床スラブがはり上端に取り付いたことから、強度、剛性とも上昇し、最大耐力はスラブなし試験体と比べ約 10% の上昇が認められた。またいずれの試験体でも、紡錘型の高い靱性能を示す履歴性状となった。

集成材に低強度の国産スギを用いた影響は認められず、むしろ実施設計を考慮した RC スラブが取り付くことで見かけの耐力や剛性が上昇することから、EWECS 部材における低強度スギ集成材との相性がよいことが示唆された。

3. 6 まとめ

EWECS を構成する集成材に、RC 床スラブが構造性能に与える影響について検討した結果、以下のことがわかった。

1. より実施設計に近い RC 床スラブ付き柱－はり接合部試験体による正負交番繰り返し载荷の結果、はりの変形が拘束されることから、見かけの耐力および剛性が上昇した。
2. 集成材に低強度のスギを用いても、耐力や靱性能に影響を与えることはなく、荷重変形履歴関係も紡錘型を示した。よって国産低強度スギは、EWECS 部材に適用可能であることがわかった。

4. まとめ

新しい木質系ハイブリッド部材である EWECS (Engineering Wood Encased Concrete-Steel) 部材の柱はり接合部のせん断性状を調べるため、十字型試験体による正負交番繰り返し载荷を実験的に行った。その結果、集成材に低強度の国産スギ集成材(L30-40 クラス)を用いても、国産カラマツ集成材(L110 クラス)を用いた結果同等の構造性能を有することが確認された。またより実施設計に近い RC 床スラブとの取り扱いについても検討を行ったところ、集成材に国産の低強度のスギを用いても耐力、剛性とも上昇することが確認された。またはり曲げ降伏型の試験体はもとより、接合部せん断破壊型試験体でも設計上十分な耐力および靱性を示した。

このことから、EWECS 構造部材に低強度の国産スギを用いることは、耐震性能上も十分可能であり、14 階建てまでの中高層建物に国産スギ材を用いることが技術的に可能であることが示され、新たな用途・需要になり得ることがわかった。

5. 参考文献

- 1). FAUZAN、倉本洋ほか: Study on Engineering Wood Encased Concrete- Steel Composite Structural Systems, Part 3 Seismic Behavior of Beam-Column Joints for Composite EWECS Structural Systems, 日本建築学会学術講演梗概集、C-1 構造Ⅲ、pp.1185-1186 (2006)
- 2). FAUZAN、倉本洋ほか: Seismic Behavior of Interior Beam- Column Joints for Composite EWECS Structural Systems、構造工学論文集、Vol.53B、pp.389-396 (2007)
- 3). 田名部智、新藤健太、松井智哉、倉本 洋: 国産スギ集成材を用いた EWECS 柱梁接合部の静的加力実験、日本コンクリート工学協会年次論文集、32 (3)、CD-ROM、(2010)
- 4). 新藤健太、平松 靖、宮武 敦、原田真樹、軽部正彦、田名部智、松井智哉、瀧野敦夫、倉本洋: 新しい木質系ハイブリッド部材柱はり接合部の強度性能、日本木材学会大会研究発表要旨集 (CD-ROM 版)、60 : PH005 (2010)
- 5). 瀧野敦夫、倉本 洋、新藤健太: 低強度の国産スギ材を用いた集成材パネルの圧縮・曲げ・めり込み試験、日本木材学会大会研究発表要旨集 (CD-ROM 版)、60 : D19-0930 (2010)
- 6). 軽部正彦、新藤健太、原田真樹、平松 靖、宮武 敦、田名部智、松井智哉、熊谷将吾、瀧野敦夫、倉本 洋: 国産スギ集成材を用いた EWECS 部材の強度性能 その 3. EWECS 柱はり接合部の静的载荷試験概要、日本建築学会 2010 年度大会学術講演梗概集 C-1、北陸、pp.1379-1380 (2010)
- 7). 新藤健太、軽部正彦、原田真樹、平松 靖、宮武 敦、田名部智、松井智哉、熊谷将吾、瀧野敦夫、倉本 洋: 国産スギ集成材を用いた EWECS 部材の強度性能 その 4. EWECS 柱はり接合部の静的载荷試験結果、日本建築学会 2010 年度大会学術講演梗概集 C-1、北陸、pp.1381-1382 (2010)

Ⅱ－3 EWECS部材の耐火性能評価

森林総合研究所：新藤健太、宮武 敦、平松 靖、原田真樹、軽部正彦、
原田寿郎、上川大輔

〈要約〉

5階建て以上の中層建築物にあっては、柱、はりなどの主要構造部には2時間の耐火性能が求められる。ここでは、EWECS部材の耐火性能を明らかにするため、実物大の試験体を用いて載荷耐火加熱試験を実施し、その性能を検証した。集成材に国産スギ材を用いたEWECS柱部材の実物大の試験体を用いて、長期軸力に相当する載荷状態で耐火加熱試験を実施したところ、2時間の載荷耐火試験後3倍時間放置しても破損することなく、十分な耐火性能を有することが明らかになった。また、はり材については、鉄骨とスギ集成材との間にモルタルを配置することで、2時間耐火性能を付与できることを確認した。

1. 研究の目的

新しい木質系ハイブリッド部材であるEWECS（Engineering Wood Encased Concrete-Steel）部材は、集成材と鉄骨、コンクリートを複合した合成構造部材である。前の2節ではEWECS構造部材の構造性能について検証し、耐力、靱性能とも設計上十分に余裕があることがわかり、14階建て程度の中高層建物については、実施設計が可能であることがわかった。

しかしながら5階建て以上の中層建築物にあっては、柱、はりなどの主要構造部には2時間の耐火性能が求められる。そこで本節では、EWECS部材の耐火性能を明らかにするため、実物大の試験体を用いて載荷耐火加熱試験を実施し、その性能を検証した。

2. EWECS柱部材の耐火性能の検討

2. 1 研究の概要および試験体形状

EWECS部材の耐火性能を検証するため、まずは実大の柱材を用いて載荷耐火試験を行った。試験体の形状および仕様を図1に示す^{1)～2)}。高さ（長さ）は上下の加圧板(t=20(mm))を含めて3,300(mm)とした。断面はいずれも想定しうる最小断面とした。鋼材はH-250-175-7-11(SS400)

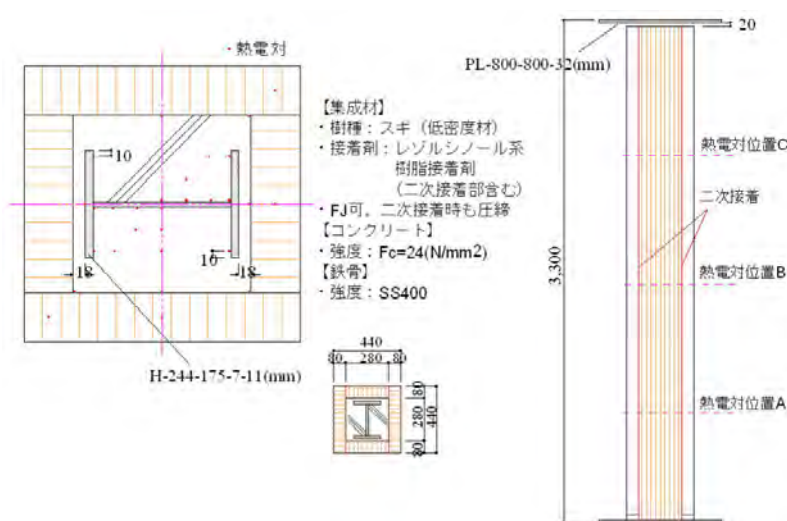


図1 試験体形状



写真1 試験体設置状況

としコンクリートの設計基準強度は $F_c=24$ (N/mm²)とした。集成材は低密度の国産スギ(L=70クラス)とし、接着剤は積層接着(1次接着)、2次接着ともレゾルシノール系樹脂接着剤を用いた。

2. 2 載荷耐火試験方法

試験には実大の柱炉を用いた。試験体設置状況を写真1に示す。加熱はISO834の標準加熱曲線に従い120分間行った。加熱終了後は3倍時間(360分)炉内に放置した。

また軸力は、長期許容応力度相当の1,141 (kN)を載荷しながら試験を行い、軸力の維持が継続できることを確認した。

2. 3 試験結果

柱試験体の15分ごとの状況を写真2(a)～(h)に、炉内温度とISO834の標準加熱曲線の関係を図2にそれぞれ示す。試験体が可燃性である影響もあり、試験開始後70分頃までは標準加熱温度



写真 2 (a) 15分経過



写真 2 (b) 30分経過



写真 2 (c) 45分経過

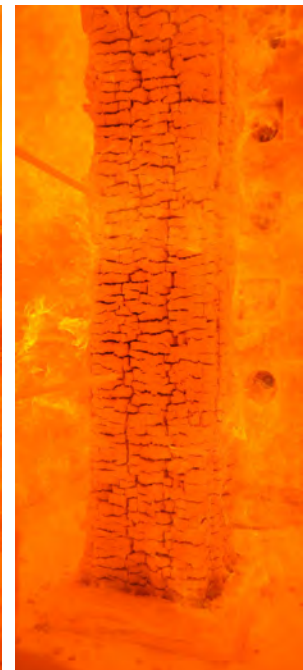


写真 2 (d) 60分経過



写真 2 (e) 75分経過



写真 2 (f) 90分経過



写真 2 (g) 105分経過

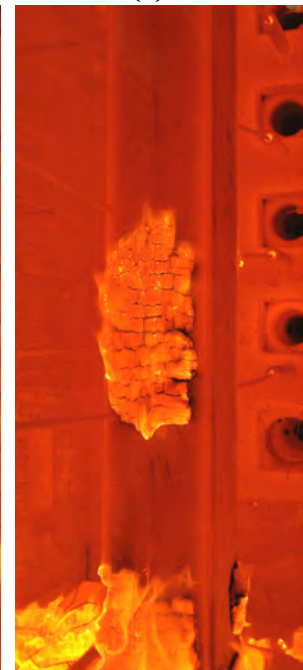


写真 2 (h) 120分経過

より高めに推移した。写真から、開始後90分頃、外殻のスギ集成材の脱落が始まり、105分頃には正面の一部を除き脱落して燃え尽きた状況が確認できる。試験終了の120分経過時点で、EWECS柱部材は鉄骨+コンクリートがむき出しの状況となったため、試験終了後は順調に炉内温度が低下した。120分の載荷耐火試験後、3倍時間である360分炉内放置したが、この間順調に炉内温度が低下し、軸力も維持できたことから、試験開始後480分をもって試験を終了した。

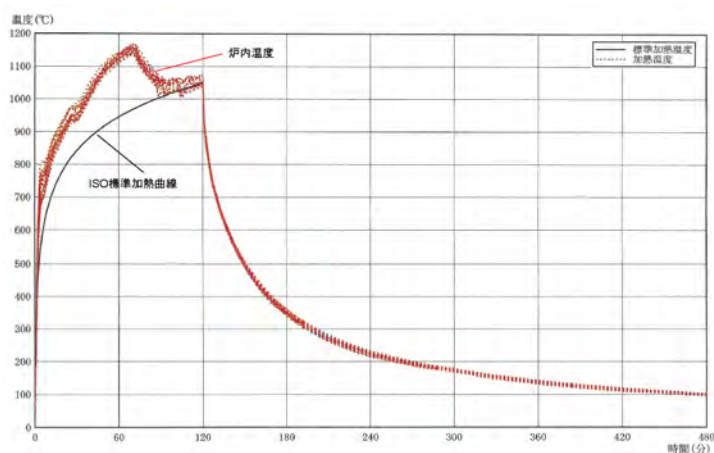


図2 炉内温度履歴と標準加熱曲線

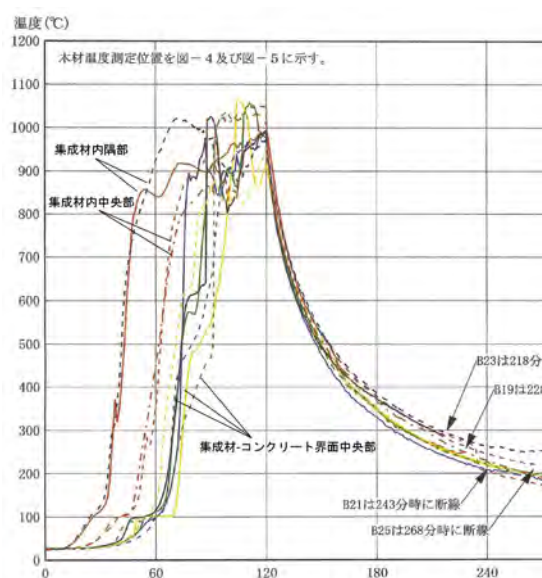


図3 集成材の温度履歴

柱中央位置（図1における熱電対位置B）における、スギ集成材温度履歴を図3に、鋼材の温度履歴を図4に、コンクリートの温度履歴を図5にそれぞれ示す。

集成材は開始後30分頃から温度が急激に上昇しはじめた。コンクリートに接する最深部も開始後70分頃から温度が上昇し、90分頃までにはほぼ脱落ないし燃え尽きたものと推測される。

鋼材は開始90分頃から温度の上昇が認められるが、これは外殻を覆っていた集成材が脱落または燃え尽きたことから、コアの鉄骨+コンクリートが直接炎にさらされた時期と重

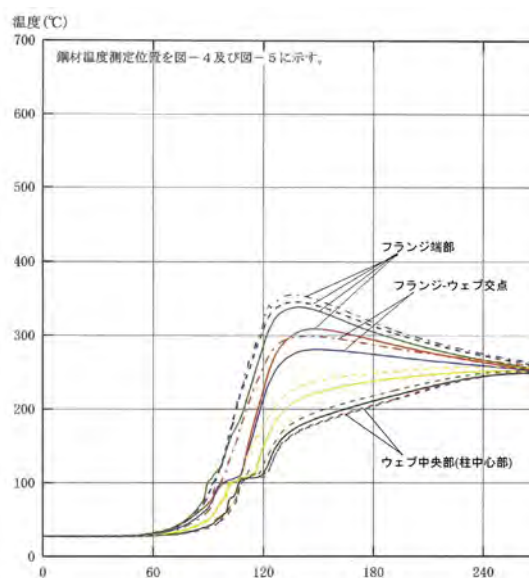


図4 鋼材の温度履歴

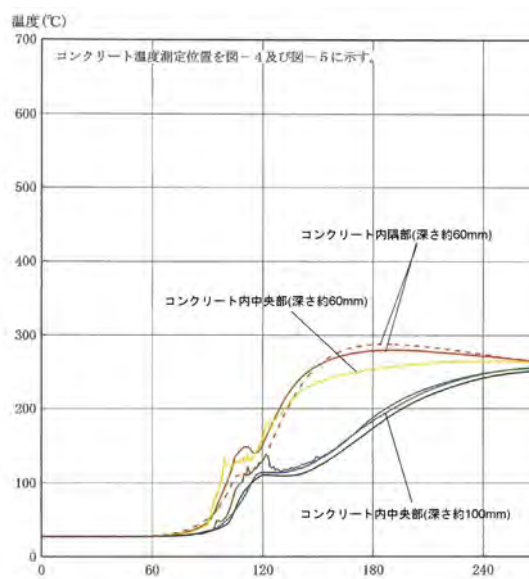


図5 コンクリートの温度履歴

なる。外側の鋼材では、試験開始135分頃に温度のピーク（約350℃）を迎え、その後は温度が低下し始めた。

コンクリートも同様に、開始90分頃に外殻の集成材が脱落ないし燃え尽きた時期から温度の上昇が認められた。また温度のピークは試験開始180分頃にピーク（約290℃）を迎え、その後は温度が低下し始めた。

結果として、EWECS柱部材は、2時間の耐火性能を有していることが、本実験から確認された。

3. EWECSはり部材の耐火性能の検討

3. 1 研究の概要および試験体形状

EWECS部材の耐火性能を検証するため、実大の柱材に続き、実大はり材を用いて載荷耐火試験を行った。試験体の形状および仕様を図6に示す^{3)・4)}。長さは5,500、支点間距離は5,100(mm)とした。断面はいずれも想定しうる最小断面とした。鋼材はH-250-175-7-11(SS400)とし、鋼材の周囲に厚さ20(mm)の既調合モルタルを被覆した。集成材は低密度の国産スギ(L=70クラス)とし、接着剤は積層接着(1次接着)、2次接着ともレゾルシノール系樹脂接着剤を用いた。

3. 2 載荷耐火試験方法

試験には実大の水平炉を用いた。試験体設置状況を写真3～4に示す。加熱はISO834の標準加熱曲線に従い120分間行った。加熱終了後は5.5倍時間(660分)炉内に放置後、蓋を開けた状態でさらに5.5倍時間(660分)炉内に放置した。

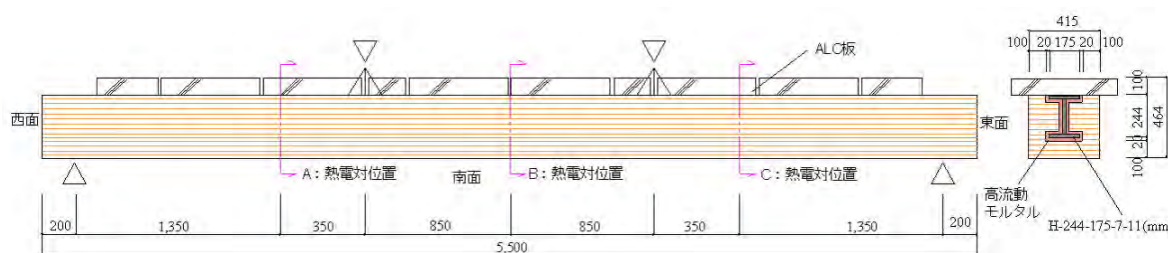


図6 試験体形状



写真3 試験体設置状況－水平炉外観



写真4 試験体設置状況－水平炉内部

またはりの積載荷重は、3等分点2線荷重方式とし、長期許容応力度相当の84.7(kN)（1点につき42.35(kN)ずつ）を載荷しながら試験を行い、荷重の維持が継続できることを確認した。

3. 3 試験結果

載荷耐火試験開始10分後の試験体状況を写真5(a)に、60分後の状況を写真5(b)にそれぞれ示す。またISO834の標準加熱曲線と炉内温度の関係を図7に示す。試験開始から終了まで、炉内温度はISOの標準加熱曲線に沿って推移した。はり部材については、H型鋼の内部、すなわちウェブ部分にもスギ集成材を配置したこと、加熱終了時の120分時点でも集成材が燃え尽きることはなかった。なお試験開始後75分あたりから炉内の観察窓にくもりが生じたことから、以後の写真撮影を断念した。なお、載荷耐火試験中および試験後660分経過時までの最大たわみは12 mmで、規定値266mm以下を大きく下回り、荷重維持ができた。



写真 5 (a) 10分経過



写真 5 (b) 60分経過

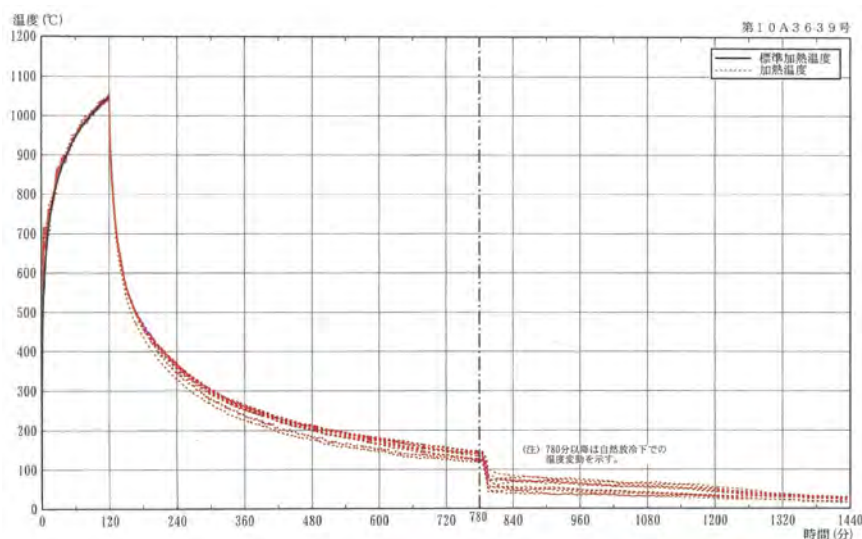


図 7 炉内温度履歴と標準加熱曲線

はり中央部における鋼材の温度履歴を図8に、同じく中央部のモルタルの温度履歴を図9にそれぞれ示す。鋼材温度は、約110℃付近で安定して推移し、ピークは約150℃（試験開始1,260分後）で、柱部材の約360℃を大きく下回った。またモルタルの温度履歴については、集成材との境界部（表面）においてピーク時に約250℃で、柱部材の約290℃を下回った。また鋼材との境界部（深部）においては約110℃で安定して推移した。

なお本試験体においては、柱部材と異なり加熱終了時点（120分経過時）でスギ集成材が燃え尽きなかったことからその後も残存した集成材が炉内でくすぶった状態で推移した。鋼材温度のピークが試験直後ではなく、1,260分経過時に発現しているのは、熱電対を設置したはり中央部付近の集成材がその前後で燃え進んだためである。

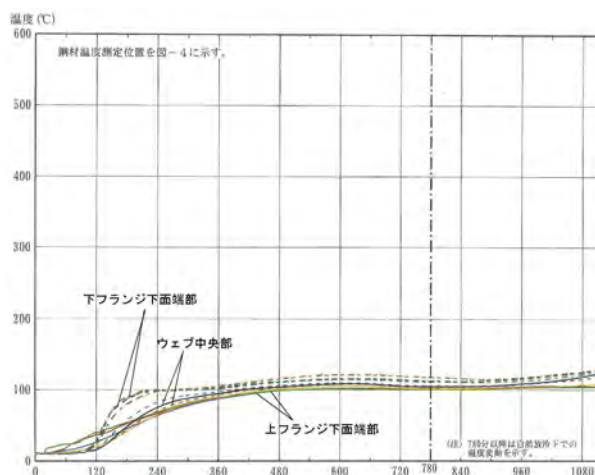


図8 鋼材の温度履歴

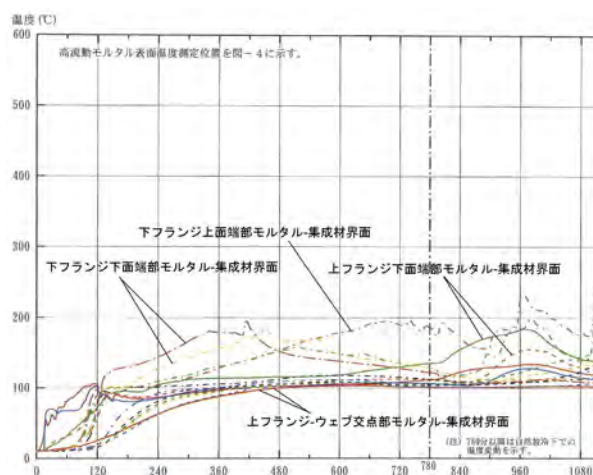


図9 モルタルの温度履歴

最終的に、蓋を解放した試験開始後780分時、および試験終了時の1,440分時においても集成材は燃え尽きておらず、「残存火気あり」の状態だった。しかしながらスギ集成材は長期荷重を負担する設計とはなっておらず、スギ集成材が燃え尽きるまで鋼材およびモルタルが荷重を維持できない温度に達することはあり得ないことが、本実験から検証されたため、EWECSはり部材についても2時間の耐火性能を有していることが確認された。

4. まとめ

EWECS柱およびはりについて、実大材による載荷耐火試験を行った結果、いずれも2時間の耐火性能を有することが確認された。このことから、EWECS構造部材によって14層までの中高層耐火建築物に使用することが可能な部材として、国土交通大臣の認定取得の道が開けた。

5. 参考文献

- 1). 瀧野敦夫、熊谷将吾、新藤健太、軽部正彦、原田真樹、平松 靖、宮武 敦、田名部智、松井智哉、倉本 洋：国産スギ集成材を用いたEWECS部材の強度性能 その1. EWECS柱の実験計画、日本建築学会2010年度大会学術講演梗概集C-1、北陸、pp.1375-1376(2010)
- 2). 熊谷将吾、瀧野敦夫、新藤健太、軽部正彦、原田真樹、平松 靖、宮武 敦、田名部智、松井智哉、倉本 洋：国産スギ集成材を用いたEWECS部材の強度性能 その2. EWECS柱の実験結果、日本建築学会2010年度大会学術講演梗概集C-1、北陸、pp.1377-1378(2010)
- 3). 軽部正彦、新藤健太、原田真樹、平松 靖、宮武 敦、田名部智、松井智哉、熊谷将吾、瀧野敦夫、倉本 洋：国産スギ集成材を用いたEWECS部材の強度性能 その3. EWECS柱はり接合部の静的載荷試験概要、日本建築学会2010年度大会学術講演梗概集C-1、北陸、pp.1379-1380(2010)
- 4). 新藤健太、軽部正彦、原田真樹、平松 靖、宮武 敦、田名部智、松井智哉、熊谷将吾、瀧野敦夫、倉本 洋：国産スギ集成材を用いたEWECS部材の強度性能 その4. EWECS柱はり接合部の静的載荷試験結果、日本建築学会2010年度大会学術講演梗概集C-1、北陸、pp.1381-1382(2010)

Ⅲ 耐火性木質構造材料の LCA 評価

国立大学法人 東京農工大学：服部順昭、安藤恵介

＜要約＞

中課題の「難燃処理耐火集成材の開発」と、「木質系ハイブリッド(EWECS)部材の開発と耐火性能評価」で開発された耐火木質構造材料のインベントリ調査を行い、構造材製造までの原単位を作成し、それらの LCA 評価を行った。さらに、難燃処理耐火集成材については、仕様を揃えたモデル建築物を試設計し、構造部と基礎に用いられる材料製造までのインベントリ調査を行い、鉄骨(S)造、鉄筋コンクリート(RC)造との比較を行った結果、難燃処理耐火集成材を用いた建築物モデルは、他のモデルに比べて環境影響が低いことが分かった。

1. 研究の目的

本課題では木材を現して使うことの出来る「難燃処理耐火集成材」(以下、「耐火集成材」という。)および「木質系ハイブリッド(EWECS)部材」(以下、「EWECS」という。)の開発を行ってきたが、これらの材料が環境に優しいか否かについての検討は行っていない。そこで、当該材料が他材料と比べて環境に優しいかを、各構造材製造までのプロセスを調べることにより、ライフサイクルアセスメント(LCA)手法を用いて評価した。さらに、耐火集成材については同仕様の耐火建築物モデルを試設計し、現在用いられている S 造、RC 造と環境負荷の比較を行い、その環境性能を明らかにした。

2. 耐火集成材製造までの評価

評価対象製品は耐火集成材 1 m^3 とした。本耐火集成材は、開発中であり、製造法や仕様の細部については検討中の段階であるので、図 1 のように製造のシナリオを設定し、システム境界を定めた。

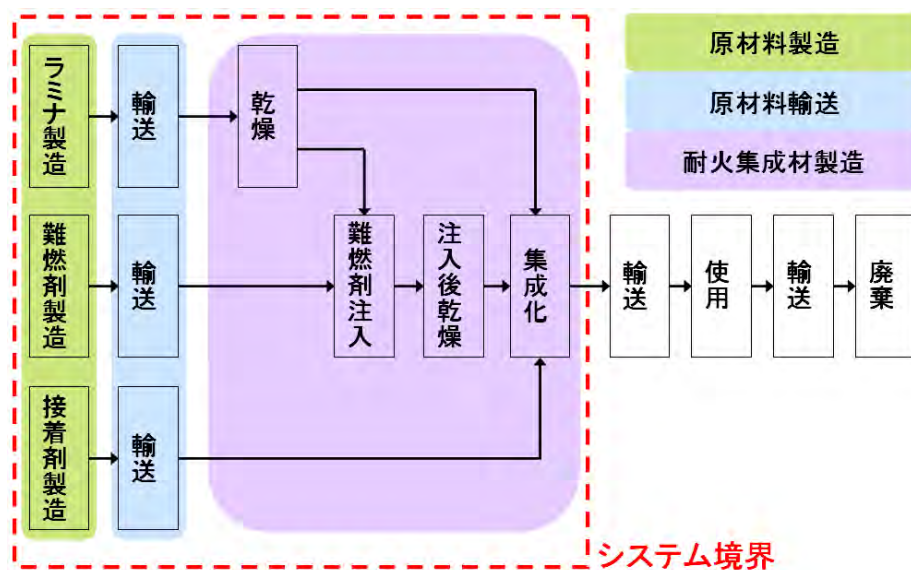


図 1 耐火集成材製造シナリオ

耐火集成材 1 m³ 製造までの環境影響は、LIME2¹⁾を用いて社会コストを求めたところ、1,480 円となった。その内訳を工程別に見ると、図 2 の通りで、棒グラフの青色部分が耐火集成材特有の難燃剤に関する工程による環境影響である。

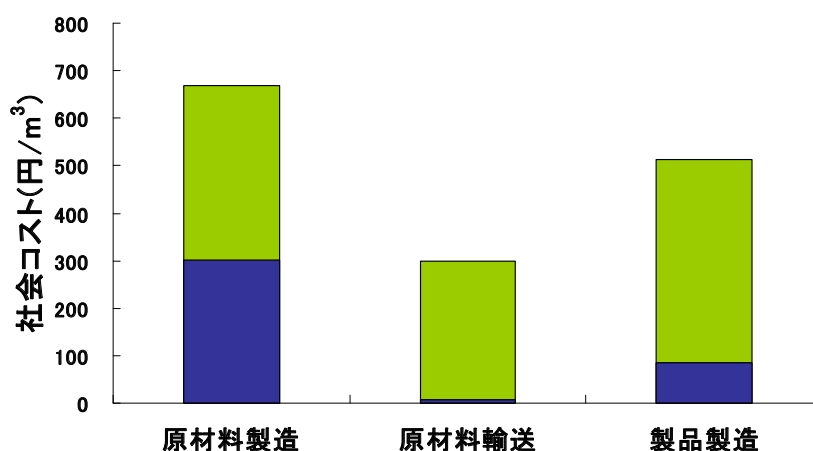


図 2 耐火集成材 1 m³ 製造までの工程別社会コスト

LIME2 とは、日本版被害算定型影響評価手法 (Life Cycle Impact Assessment Method based on Endpoint Modeling) の改訂版で、製品の工程で発生する環境負荷物質を運命分析、暴露分析、影響分析、被害分析を経て、人間健康・社会資産・生物多様性・一次生産という 4 つの保護対象を統合化 (単一指標化) する計算手法で、得られた結果は、統計学と環境経済学などを駆使して環境負荷物質の社会への潜在影響を評価し、日本円でも表示できることから、社会コストあるいは潜在被害額と呼ばれる。具体的な計算は、それぞれの段階間に係数リストが用意されているので、環境負荷量に係数を乗じることで求められるが、途中経過を省いて一気に統合化結果を求めるには、統合化係数リストを用いればよい。結果が日本円で表示できると、内部コストと外部コスト (社会コストを用いる) の和で評価するフルコストアセスメントにも使えるので、LCA の用途が一気に広がった。

3. EWECS 製造までの評価

評価対象製品は EWECS 1 m³ とした。本部材についても開発中であるため、図 3 のように製造のシナリオを設定し、システム境界を定めた。

EWECS 1 m³ 製造までの環境影響は社会コストに換算して 2,857 円であった。その内訳を図 4 に示した。

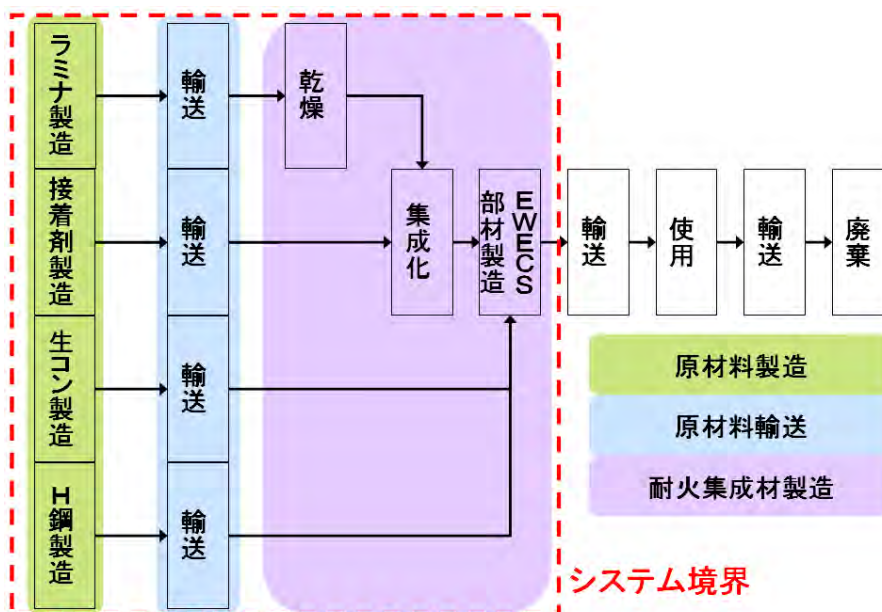


図 3 EWECS 製造シナリオ

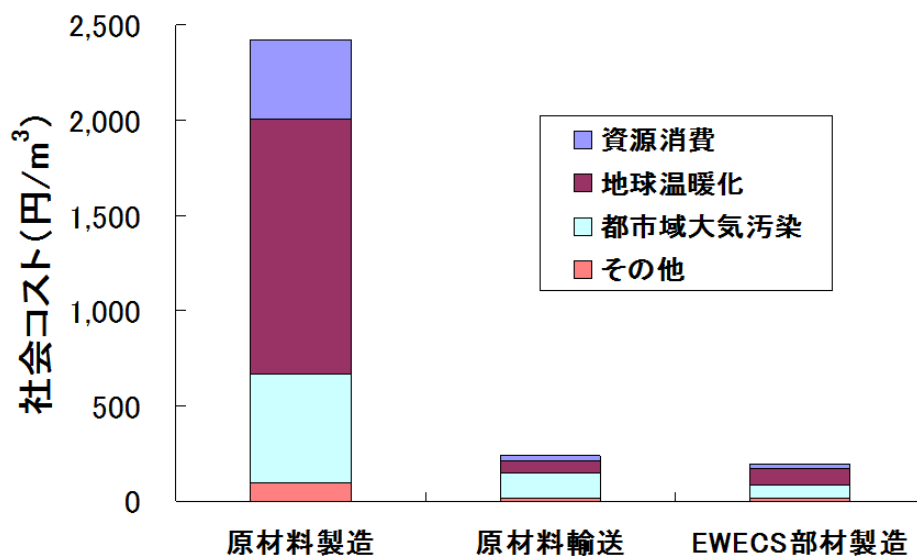


図4 EWECS 1m³製造までの工程別社会コスト

4. 耐火建築物モデルの比較

耐火集成材について、仕様を揃えたモデル建築（地上3階建、延床面積：約1,500 m²、建築面積：507 m²、階高：3.8 m、耐火建築物）を設定し、構造部と基礎に用いられる材料製造までのインベントリ調査を行い、S造、RC造との比較を行った。図5に各構造の側面図を、図6に耐火集成材造モデルの外観（CG作成：鹿島建設）を示した。

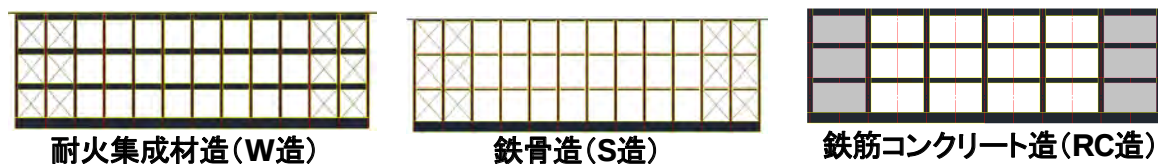


図5 耐火建築モデルの側面図



図6 耐火集成材造モデルの外観

モデル1棟の環境影響は、社会コストに換算して、W造が172万円、S造が270万円、RC造が322万円となり、W造が最も小さくなった（図7）。

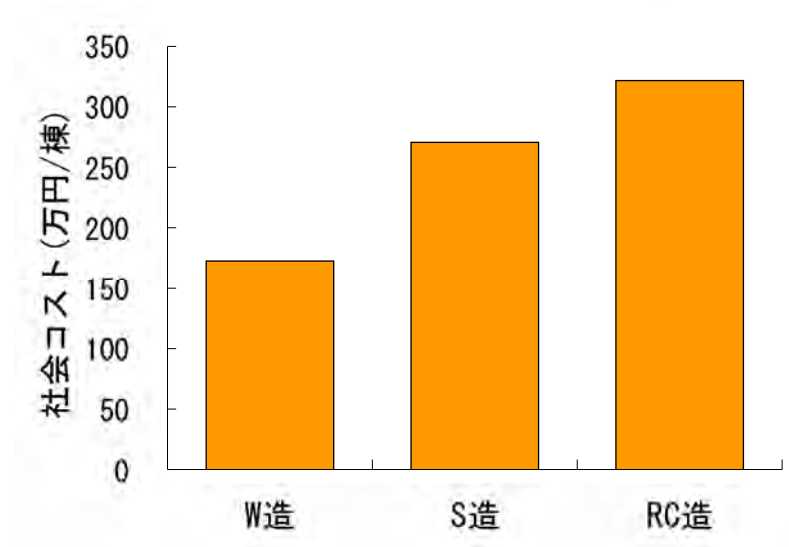


図7 モデル1棟あたりの環境影響

5. まとめ

「耐火集成材」と「EWECS」の製造までの環境負荷原単位を作成し、社会コストを求めた。また、耐火集成材について、仕様を揃えたモデル建築を設定し、構造部と基礎に用いられる材料製造までのインベントリ調査を行い、S造、RC造との比較を行ったところ、耐火集成材造<S造<RC造の順に社会コストが大きくなることが明らかになった。この結果より、フルコスト法で言う内部コストはさておき、外部コストの点からは、耐火集成材造のモデル建築が最も環境に優しいことになる。

文献

- 1) 伊坪徳宏、稲葉敦：LIME2 意志決定を支援する環境影響評価手法、(社)産業環境管理協会、東京、pp.666 (2010)

発表業績一覧

< 学術論文 >

大課題 1 関連

- ・「難燃処理層のシェル型配置によるカラマツ集成材柱の燃え止まり技術の開発」、原田寿郎、安藤恵介、宮林正幸、大内富夫、宮本圭一、上川大輔、服部順昭、木材学会誌、54(3)、pp.139-146 (2008. 6)
- ・「日本における木質耐火構造開発のあゆみ」、原田寿郎、木材学会誌、55(1)、pp.1-9 (2009. 1)
- ・「難燃処理ラミナを用いた耐火集成材の開発」、上川大輔、原田寿郎、宮林正幸、抱憲誓、西村光太、宮本圭一、大内富夫、安藤恵介、服部順昭、日本建築学会環境系論文集、75(657)、929-935 (2011. 11)
- ・「Development of fireproof glued-laminated timber for use in medium-rise buildings in Japan」、T. Harada, D. Kamikawa, K. Miyamoto, T. Ohuchi, M. Miyabayashi, K. Ando, N. Hattori, Structures and Architecture (CD-ROM 版)、1、pp.365-371 (2010. 7)
- ・「Fire-resistance of Glued Laminated Lumber Contained within a Fire-retardant Shell-layer」、Daisuke Kamikawa, Toshiro Harada, Masayuki Miyabayashi, Tomio Ohuchui, Keiichi Miyamoto, Keisuke Ando, Nobuaki Hattori, Proceedings of World Conference on Timber Engineering (CD-ROM 版)、10 : 4-249p (2008. 6)

大課題 II 関連

- ・「Load-Displacement Response Analysis for Composite EWECS Columns」、FAUZAN、瀧野敦夫、新藤健太、倉本 洋、コンクリート工学年次論文集、31 (2)、pp.1237-1242 (2009. 7)
- ・「EWECS 柱の構造性能に及ぼす外殻集成材の樹種の影響」、熊谷将吾、瀧野敦夫、松井智哉、岸本一蔵、倉本洋、日本建築学会構造系論文集、76(659)、pp.195-203 (2011. 1)
- ・「国産スギ集成材を用いた EWECS 柱梁接合部の静的加力実験」、田名部智、新藤健太、松井智哉、倉本洋、日本コンクリート工学協会年次論文集、32 (3)、pp.1177-1182 (2010. 7)
- ・「変動軸力および高軸力を受ける EWECS 柱の構造性能」、瀧野敦夫、熊谷将吾、新藤健太、倉本 洋、日本建築学会構造系論文集、(受理・印刷中)

< 学会年次大会等での研究発表 >

大課題 1 関連

- ・「耐火集成材の開発（その 4）ラミナの部分的薬剤処理により作製した耐火集成材の燃え止まり」、上川大輔、原田寿郎、嶋根純一、安藤恵介、石垣弘之、服部順昭、宮林正幸、大内富夫、宮本圭一、日本建築学会大会学術講演梗概集、A-2、中国、pp.287-288 (2008. 9)
- ・「難燃薬剤を注入した燃え止まり層を持つカラマツ耐火集成材の耐火試験」、上川大輔、原田寿郎、石垣弘之、嶋根純一、安藤恵介、服部順昭、宮林正幸、大内富夫、宮本圭一、第 59 回日本木材学会大会研究発表要旨集 CD-ROM 版、松本、N15-1130 (2009. 3)
- ・「耐火集成材の開発（その 5）ラミナの部分的薬剤処理により作製した耐火集成材の載荷加熱実験」、西村光太、大内富夫、宮本圭一、服部順昭、安藤恵介、嶋根純一、石垣弘之、原田寿郎、上川大輔、宮林正幸、日本建築学会関東支部研究発表会梗概集、3007 (2009. 3)
- ・「耐火集成材の開発（その 6）ラミナの部分的薬剤処理により作製したスギ耐火集成材柱の載

- 荷加熱実験」、抱 憲誓、宮本圭一、西村光太、服部順昭、安藤恵介、石垣弘之、原田寿郎、上川大輔、宮林正幸、大内富夫、日本建築学会大会学術講演梗概集、A-2、東北、pp.321-322 (2009. 9)
- ・「耐火集成材の開発（その 7）ラミナの部分的薬剤処理により作製したスギ耐火集成材梁の荷加熱実験」、宮本圭一、抱 憲誓、西村光太、服部順昭、安藤恵介、石垣弘之、原田寿郎、上川大輔、宮林正幸、大内富夫、日本建築学会大会学術講演梗概集、A-2、東北、pp.323-324 (2009. 9)
 - ・「耐火集成材の開発（その 8）ラミナの部分的薬剤処理により作製したスギ耐火集成材柱・梁接合部の加熱実験」、西村光太、宮本圭一、抱 憲誓、服部順昭、安藤恵介、石垣弘之、原田寿郎、上川大輔、宮林正幸、大内富夫、日本建築学会大会学術講演梗概集、A-2、東北、pp.325-326 (2009. 9)
 - ・「耐火集成材の開発（その 9）2 時間耐火集成材柱の荷加熱試験」、上川大輔、原田寿郎、服部順昭、安藤恵介、石垣弘之、宮本圭一、抱 憲誓、西村光太、宮林正幸、大内富夫、日本建築学会大会学術講演梗概集、A-2、東北、pp.327-328 (2009. 9)
 - ・「難燃薬剤処理層を持つスギ集成材柱の 2 時間耐火試験ー内部温度推移と炭化の進行ー」、上川大輔、原田寿郎、石垣弘之、安藤恵介、服部順昭、宮林正幸、抱 憲誓、西村光太、宮本圭一、大内富夫、第 27 回日本木材加工技術協会講演要旨集、熊本、pp.71-72 (2009. 10)
 - ・「構造用耐火集成材の開発ーレーザインサイジングパターンと薬剤濃度の耐火性能への影響ー」、石垣弘之、安藤恵介、服部順昭、上川大輔、原田寿郎、宮林正幸、抱 憲誓、西村光太、宮本圭一、第 60 回日本木材学会大会研究発表要旨集 CD-ROM 版、宮崎、PN001 (2010. 3)
 - ・「耐火集成材の開発（その 1 0）ラミナの部分的薬剤処理により作製したスギ耐火集成材柱、梁の 2 時間荷加熱実験」抱 憲誓、宮本圭一、西村光太、服部順昭、安藤恵介、原田寿郎、上川大輔、宮林正幸、日本建築学会大会学術講演梗概集、A-2、北陸、pp.109-110 (2010. 9)
 - ・「耐火集成材の開発（その 1 1）ラミナの部分的薬剤処理により作製したスギ耐火集成材柱・梁接合部の 2 時間加熱実験」西村光太、抱 憲誓、宮本圭一、服部順昭、安藤恵介、原田寿郎、上川大輔、宮林正幸、日本建築学会大会学術講演梗概集、A-2、北陸、pp.111-112 (2010. 9)
 - ・「耐火集成材の開発（その 1 2）難燃薬剤処理木材の熱分析」、上川大輔、原田寿郎、宮林正幸、抱 憲誓、西村光太、宮本圭一、安藤恵介、服部順昭、日本建築学会大会学術講演梗概集、A-2、北陸、pp.113-114 (2010. 9)
 - ・「構造用耐火集成材の開発ースギ耐火集成材の内部温度推移と炭化ー」、上川大輔、原田寿郎、安藤恵介、服部順昭、宮林正幸、抱 憲誓、西村光太、宮本圭一、第 61 回日本木材学会大会研究発表要旨集 CD-ROM 版、京都、N19-P-AM26 (2011. 3)
 - ・「耐火集成材の開発（その 1 3）ラミナの部分的薬剤処理により作製したスギ耐火集成材柱と壁接合部の 1 時間加熱実験」、抱憲誓、宮本圭一、西村光太、服部順昭、安藤恵介、原田寿郎、上川大輔、宮林正幸、日本建築学会大会学術講演梗概集、A-2、関東、pp.109-110 (2011. 8)
 - ・「耐火集成材の開発（その 1 4）ラミナの部分的薬剤処理により作製したスギ耐火集成材梁と天井床接合部の 1 時間加熱実験」、西村光太、宮本圭一、抱憲誓、服部順昭、安藤恵介、原田寿郎、上川大輔、宮林正幸、日本建築学会大会学術講演梗概集、A-2、関東、pp.111-112 (2011. 8)

大課題Ⅱ 関連

- ・「Hysteresis Model for Composite EWECS Columns Part. 1 Preliminary Analytical Method and Results」、FAUZAN、倉本 洋、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-1 構造Ⅲ、中国、pp.1179-1180 (2008. 9)
- ・「国産スギ集成材を用いた EWECS 柱梁接合部の構造性能」、田名部智、熊谷将吾、新藤健太、平松 靖、宮武 敦、松井智哉、瀧野敦夫、倉本 洋、日本建築学会・土木学会、第 8 回複合・合成構造シンポジウム CD-ROM 版 (2009. 11)
- ・「新しい木質系ハイブリッド部材柱はり接合部の強度性能」、新藤健太、平松 靖、宮武 敦、原田真樹、軽部正彦、田名部智、松井智哉、瀧野敦夫、倉本 洋、第 60 回日本木材学会大会研究発表要旨集 CD-ROM 版、宮崎、PH005 (2010. 3)
- ・「低強度の国産スギ材を用いた集成材パネルの圧縮・曲げ・めり込み試験」、瀧野敦夫、倉本 洋、新藤健太、第 60 回日本木材学会大会 CD-ROM 版、D19-0930 (2010. 3)
- ・「EWECS 柱の構造性能に関する研究（その 1）」、熊谷将吾、瀧野敦夫、新藤健太、松井智哉、倉本 洋、日本建築学会近畿支部、(2010. 6)
- ・「国産スギ集成材を用いた EWECS 部材の強度性能（その 1）EWECS 柱の実験計画」、瀧野敦夫、熊谷将吾、新藤健太、軽部正彦、原田真樹、平松 靖、宮武 敦、田名部智、松井智哉、倉本 洋、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-1 構造Ⅲ、北陸、pp.1375-1376 (2010. 9)
- ・「国産スギ集成材を用いた EWECS 部材の強度性能（その 2）EWECS 柱の実験結果」、熊谷将吾、瀧野敦夫、新藤健太、軽部正彦、原田真樹、平松 靖、宮武 敦、田名部智、松井智哉、倉本 洋、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-1 構造Ⅲ、北陸、pp.1377-1378 (2010. 9)
- ・「国産スギ集成材を用いた EWECS 部材の強度性能（その 3）EWECS 柱はり接合部の静的載荷試験概要」、軽部正彦、新藤健太、原田真樹、平松 靖、宮武 敦、田名部智、松井智哉、熊谷将吾、瀧野敦夫、倉本 洋、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-1 構造Ⅲ、北陸、pp.1379-1380 (2010. 9)
- ・「国産スギ集成材を用いた EWECS 部材の強度性能（その 4）EWECS 柱はり接合部の静的載荷試験結果」、新藤健太、軽部正彦、原田真樹、平松 靖、宮武 敦、田名部智、松井智哉、熊谷将吾、瀧野敦夫、倉本 洋、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-1 構造Ⅲ、北陸、pp.1381-1382 (2010. 9)

大課題Ⅲ 関連

- ・「構造用耐火集成材の環境影響評価」、大林秀稔、森田雅、安藤恵介、服部順昭、上川大輔、原田寿郎、宮林正幸、抱憲誓、西村光太、宮本圭一、第 61 回日本木材学会大会研究発表要旨集 CD-ROM 版、京都、N19-P-AM26 (2011. 3)

独立行政法人森林総合研究所では、第2期中期計画の成果として下記の重点分野ごとに成果集を刊行しております。

地球温暖化対策に向けた研究（温暖化対策）

森林と木材による安全・安心・快適な生活環境の創出に向けた研究（安全・安心）

社会情勢変化に対応した新たな林業・木材利用に関する研究（林業・木材利用）

新素材開発に向けた森林生物資源の機能解明（生物機能）

森林生態系の構造と機能の解明（生態系解明）

新たな農林水産政策を推進する実用技術開発事業

「国産材の新需要創造のための耐火性木質構造材料の開発」成果資料集

平成23年12月28日 発行

編集 独立行政法人 森林総合研究所

発行 〒305-8687 茨城県つくば市松の里1

電話 029-873-3211 Fax 029-874-3720

印刷所 大成印刷株式会社

ISBN 978-4-905304-02-9



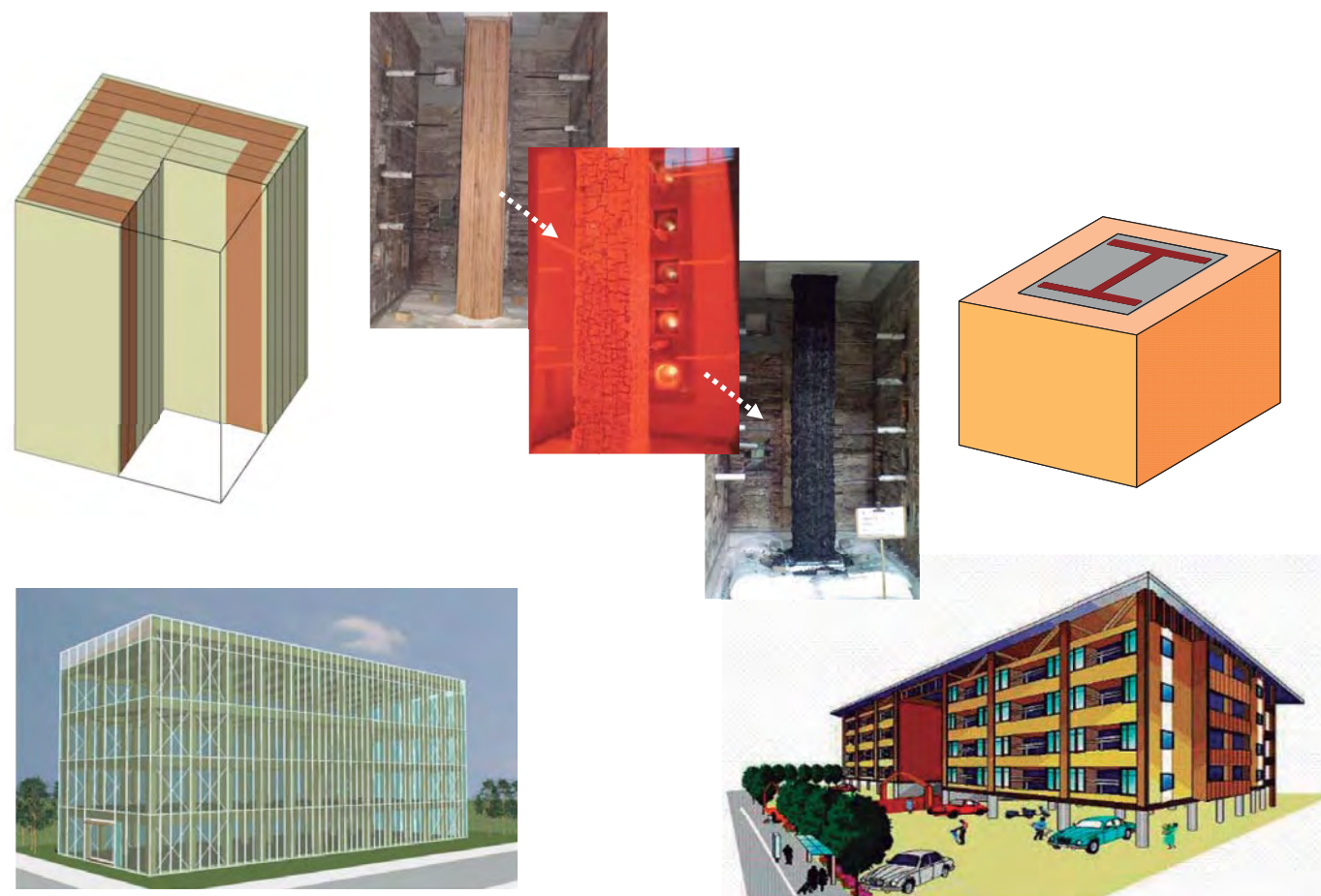
独立行政法人 森林総合研究所

独立行政法人 森林総合研究所

URL <http://www.ffpri.affrc.go.jp>

リサイクル適正の表示: 紙へリサイクル可

新たな農林水産政策を推進する実用技術開発事業
「国産材の新需要創造のための耐火性木質構造材料の開発」
成果資料集



国産材の新需要創造のための耐火性木質構造材料の開発

成果資料集