

「中大規模木造建築物」実プロジェクト第1号の実現 国内初となる高性能耐震フレーム構法 P&UA の適用 Realization of the first medium to large scale wooden construction project First application of high performance seismic wooden frame system P&UA

竹内 章博*
Akihiro Takeuchi

金川 基**
Motoi Kanagawa

要 約

著者らはこれまで「中大規模木造建築物の実現」を目的とし、高耐力、高剛性および高靱性を有する中大規模木造用高性能耐震フレーム構法 P&UA の共同研究開発を行ってきた。

本報では、国内で初めて同構法を実プロジェクトに適用し、構造計算ルート3を用いて設計した木造5階建て耐火建築物の構造設計および構法開発時に行った耐火性能検証の内容について述べる。

本構法は2022年10月に一般財団法人日本建築センターにて評定を取得した構法である。また、本プロジェクトは、住宅・建築物の木造化に係る先導的な技術の普及啓発に寄与するものとして評価され、「令和5年度サステナブル建築物等先導事業（木造先導型）」に採択された。

目 次

- §1. はじめに
- §2. 実プロジェクトの概要
- §3. 構造計算ルート3の適用
- §4. 耐火性能の検証
- §5. おわりに

§1. はじめに

著者らはこれまで「中大規模木造建築物の実現」に向け、10階建て規模の木造建築物の建設を可能とする、新たな中大規模木造用高性能耐震フレーム構法 P&UA の共同研究開発を行ってきた。前報¹⁾では、構法開発時に実施した構造実験および耐火実験の一部を報告した。本報では、国内で初めて同構法を実プロジェクトに適用し、構造計算ルート3を用いて設計した木造5階建て耐火建築物（図-1 および写真-1）の構造設計および構法開発時に行った耐火性能検証の内容を述べる。

§2. 実プロジェクトの概要

2-1 構造計画概要

図-2 に実プロジェクトの外観パースと建物諸元および代表的な床伏図および軸組図を示す。対象建物は、用



図-1 実プロジェクトの架構イメージパース



写真-1 実現した開発構法の木造躯体

* 技術研究所建築技術グループ

** 技術研究所

用途が寄宿舎である5階建ての耐火木造建築物である。用途が居住施設であることから、以下に示す要求事項を満足するように架構の構造計画を行った。

- ① 桁行Y方向は開放性の高いラーメン架構
- ② 梁間X方向は寮室間の戸境壁を利用し耐力壁架構
- ③ 床振動や遮音性、施工性を考慮し、床はRC造（ハーフPC版）

図-3に建物の架構イメージ図を示す。図中には建物各階で使用した木材の樹種および強度等級、鉄骨の鋼種を併記した。写真-2に建て方時の木造躯体の状況を示す。使用する木材には、大梁、柱、耐力壁の全てに国産材のスギ、ヒノキを活用した。

2-2 ラーメン架構の概要

本プロジェクトでは、従来構法であるGIR（Glued in rod）を改良した、新たな接合構法を開発しラーメン架構に適用した。

図-4に開発した鋼棒挿入式の接着接合構法の概要図および各部寸法を示す。以下、本接合構法をGIUA（Glued in unbonded anchor）と定義する。GIUAは従来のGIRに対して、アンカーとなる鋼棒と木材とを接着して定着耐力を確保する範囲（以下、ボンド範囲）と、木材との接着を切って軸変形させる範囲（以下、アンボンド範囲）に分ける改良を行った。なお、鋼棒には異形鉄筋ではなく、高い靱性を有する建築構造用転造ネジアンカーボルトSNR490B（以下、ABR490）を用いた。この改良により、アンボンド範囲で高い伸び能力を有するARB490を先行降伏させ、木材の割裂破壊を抑えた高靱性型の接合が可能となる。アンボンド長は樹種や鋼棒径に拘わらず200mmとし、ボンド長は、アンボンド部を降伏させるために十分な付着長さを樹種および鋼棒径に応じて確保した。本構法では、従来のGIRの施工時に品質管理上課題となっていたエポキシ樹脂の充填施工を、工場で行う改良も行った。

図-5に開発したラーメン架構について、2階の柱梁接合部の詳細図を示す。本開発では、柱梁接合部に鉄骨仕口を挿入することにより、木部材同士のめり込み変形を防止するとともに、木部材に比して十分剛に設計した鉄骨仕口部を利用して、設備用の梁貫通孔を設ける工夫をした。木部断面に対するGIUAの縁あきは 1.5ϕ （ ϕ は孔径）以上、GIUA同士のピッチは 2.0ϕ 以上とし、集成材のラミナ寸法に応じて調整した。せん断力に対しては、シアキーの役割のみを持たせるため、GIUAの全長をアンボンド範囲としたせん断用鋼棒GIFU（Glued in full unbonded anchor）を用いた。なお、木柱および木梁の小口面側のGIUAの元端には高ナットを取り付け、鉄骨仕口とは強度区分10.9以上のボルトで緊結する構造とした。

2-3 耐力壁架構の概要

図-6に開発した耐力壁架構の1階の詳細図を示す。耐力壁は、上下方向に2枚並べたCLT相互を、前報¹⁾で

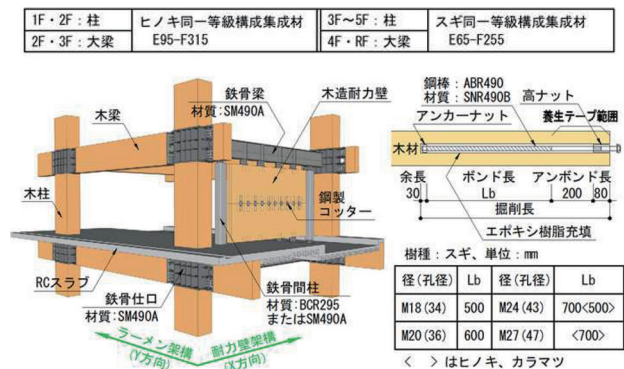
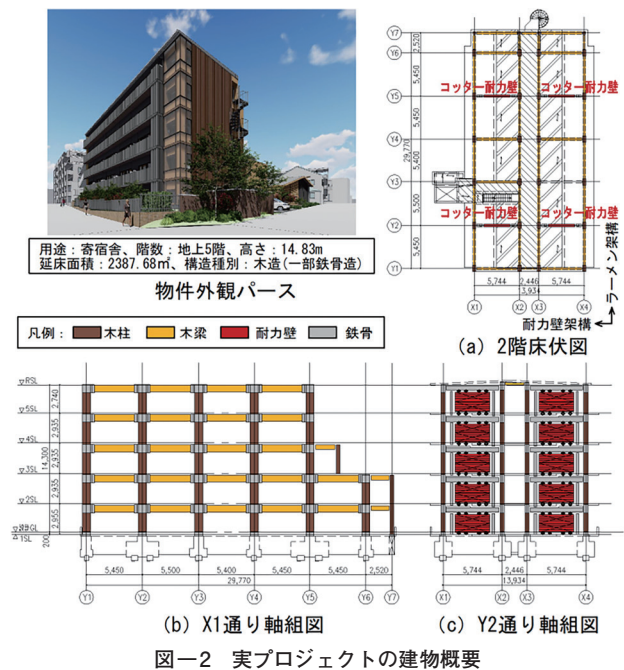


図-3 架構イメージ

図-4 GIUAの概要

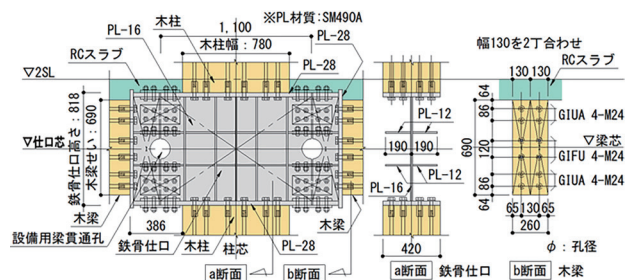
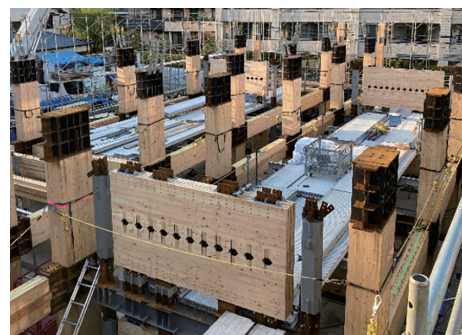


図-5 ラーメン架構の2階柱梁接合部詳細図

述べた接合用鋼材（以下、コッター）で連結する構造とした。大地震時には上下の CLT が水平方向にスライドし、コッターの可撓部が木部より先行降伏して変形することで木材は損傷せず、コッターが地震エネルギーを吸収する機構とした。耐力壁周辺架構は、剛性および耐力を確保するため、大梁を両端ピン接合の鉄骨梁とし、耐力壁降伏時にも周辺架構が弾性範囲内にあるように設計した。耐力壁と鉄骨梁との接合は、CLT 側を鋼板挿入ドリフトピン接合とし、鉄骨梁から持ち出したリブ補強付きのガセットプレートと、挿入鋼板とを高力ボルトで接合した。

§3. 構造計算ルート3の適用

3-1 崩壊メカニズム

図-7 に、後述する保有水平耐力計算における、各方向代表フレームの全体崩壊形 (Ds 算定時) を示す。図中にはヒンジ発生部の塑性率を併記した。なお、この崩壊形を満足するため、構法開発の際には塑性ヒンジ形成部位に対する実大加力実験を行い、あらかじめ性能確認を行っている¹⁾。

3-2 構造解析モデル

図-8 に各方向の応力解析モデル図を示す。架構のモデル化は、柱・梁を線材置換し、部材端に回転バネを考慮した立体フレームモデルとした。柱梁接合部の鉄骨仕口は剛域としてモデル化し、耐力壁はせん断剛性および耐力が等価なブレースに置換した。なお、X 方向の耐力壁架構は、鉄骨大梁および耐力壁両脇の鉄骨柱は全てピン接合とし、耐力壁のみではほぼ全ての水平力を負担するようにモデル化した。

図-9 には、解析時にモデル化したラーメン架構の大梁端接合部の骨格曲線を、実験結果¹⁾と比較して示す。図中には、解析モデルにおける初期剛性、降伏耐力および塑性率の値を併記した。また図-10 には、同様にして1階柱脚接合部の場合を示す。GIUA を用いた部材端接合部の回転バネの初期剛性および降伏耐力は、文献²⁾に記載の方法で算出した。解析モデルの骨格曲線はバイリニア型でモデル化した。両実験結果とも、解析モデルの初期剛性は実験結果とよく対応しており、降伏耐力も実験結果に対して安全側の評価になっていることが分かった。

図-11 には、解析時にモデル化した耐力壁の骨格曲線を、実験結果¹⁾と比較して示す。耐力壁の初期せん断剛性および降伏耐力は、文献^{2),3)}に記載の方法で算出した。耐力壁の骨格曲線はバイリニア型でモデル化した。解析モデルの初期剛性は実験結果とよく対応しており、降伏耐力も実験結果に対して安全側の評価になることを確認した。

3-3 荷重増分解析と構造特性係数 Ds 値

以下では、構造計算ルート3で必要となる Ds 値の検討について示す。本物件では限界耐力計算に準拠した方法を参考として、建物を等価1自由度系に縮約することで建物の塑性率 μ を求め Ds 値を算定した。Ds 値は塑性

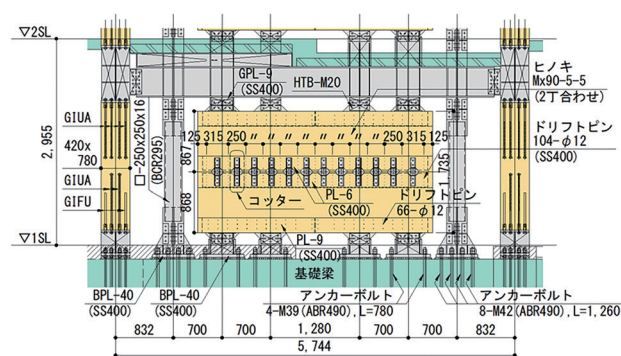
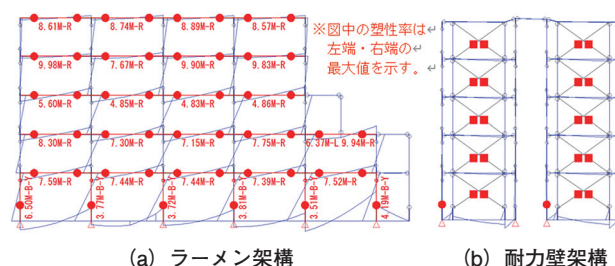
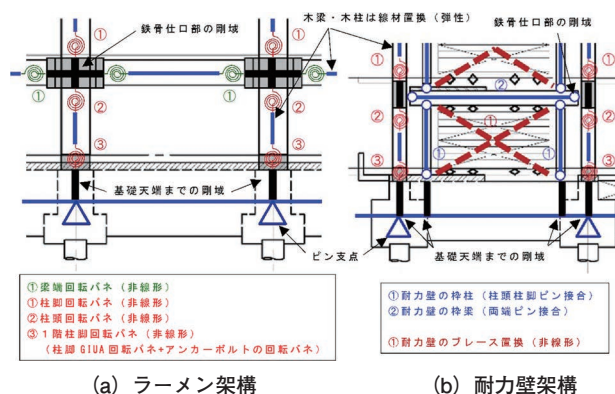


図-6 1階耐力壁架構詳細図



(a) ラーメン架構 (b) 耐力壁架構

図-7 Ds 算定時における全体崩壊形



(a) ラーメン架構 (b) 耐力壁架構

図-8 構造解析モデル図

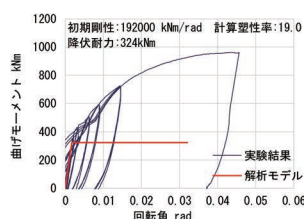


図-9 大梁端接合部

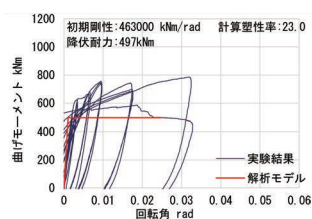


図-10 1階柱脚接合部

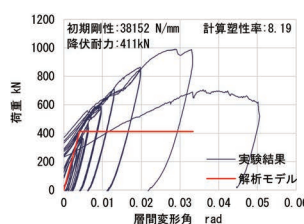


図-11 耐力壁

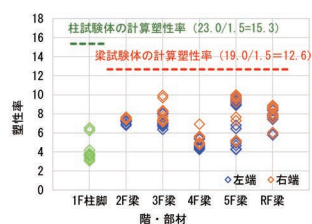


図-12 各階塑性率分布

率 μ の値から下式で算定した。

$$Ds = 1/\sqrt{(2\mu - 1)} \quad (1)$$

なお、Ds 算定時の最大層間変形角については、実験で得られた部材の最大変形角¹⁾に対して、1.5 倍の安全率を考慮して設定した。すなわち、ラーメン架構は、Ds 算定時の最大層間変形角を 1/30 rad として設定し、耐力壁架構は、Ds 算定時の最大層間変形角を 1/45 rad として設定した。なお、これらの変形角は、一般的な木造の安全限界変形角である 1/30 rad 以内となる。

図-12 にラーメン架構の Ds 算定時の各階部材端の塑性率を示す。図中には GIUA の設計伸び 10% 時の塑性率の計算値を併記した。塑性率の値は実験で確認した塑性率以下になっていることを確認した。なお、Ds 算定時においては、図-7 で示した全体崩壊形を満足するように保証設計を行った。

図-13 にラーメン架構各階の荷重増分解析結果および建物全体の変形を等価 1 自由度系に縮約した結果を示す。等価 1 自由度系に縮約した結果より、塑性率 μ は 4.583 となり、Ds 値の値は (1) 式より $Ds=0.350$ となった。塑性率の算定は初期剛性と Ds 算定時の 1 階層せん断力との交点を塑性率の起点とした。なお、1 次設計時の層間変形角は 1/200 rad 以下の値を示していることから、本開発構法は木質ラーメン架構でありながら、高い剛性を有していることが分かった。

図-14 には同様に、耐力壁架構の場合について示す。耐力壁架構も同様の計算により、塑性率 $\mu=3.728$ 、 $Ds=0.394$ となった。耐力壁架構もラーメン架構と同様に、1 次設計時の層間変形角が 1/200 rad 以下となり、高い剛性を有することを確認した。

以上の計算結果より、本物件ではラーメン架構の Ds 値は 0.35、耐力壁架構の Ds 値は 0.4 を採用した。

§ 4. 耐火性能の検証

4-1 開発構法における防耐火上の課題の整理

図-15 に、本構法における耐火性能の検証部位について示す。本構法の防耐火上留意すべき点は、構造上主要な木質部材に接する鉄やコンクリート等が木の着火温度である 260℃ を超えないようにすることにある。前報¹⁾では、図中に示した試験 1 および試験 2 の結果を示した。本報では、防耐火上の配慮が必要と考えられる鉄骨仕口内を貫通する設備配管用スリーブについて、2 時間耐火実験を実施した試験 3 および試験 4 の結果について述べる。

図-16 および写真-3 に設備配管用スリーブの検証部位と試験体を示す。加熱実験は、建物内部の接合部および設備配管が両面加熱を受ける場合（試験体 3）と、建物外壁に面する接合部及び設備配管が室内から片面加熱を受ける場合（試験体 4）について行った。

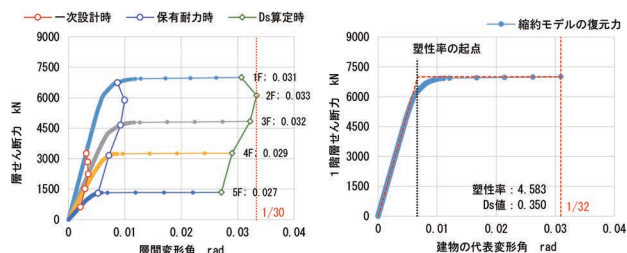


図-13 ラーメン架構の Ds 値の算定

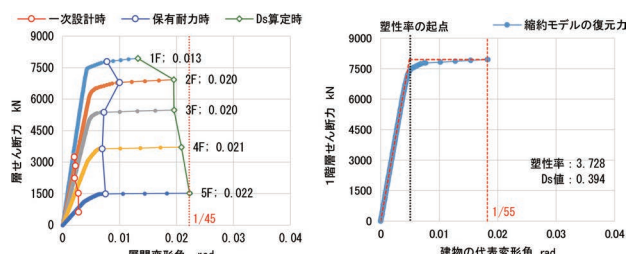


図-14 耐力壁架構の Ds 値の算定

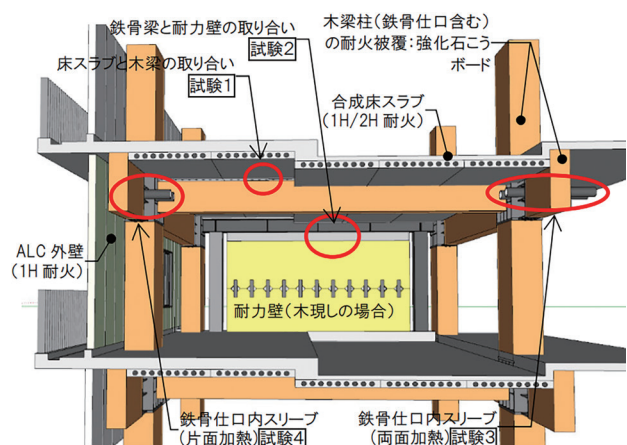


図-15 耐火性能についての検証部位

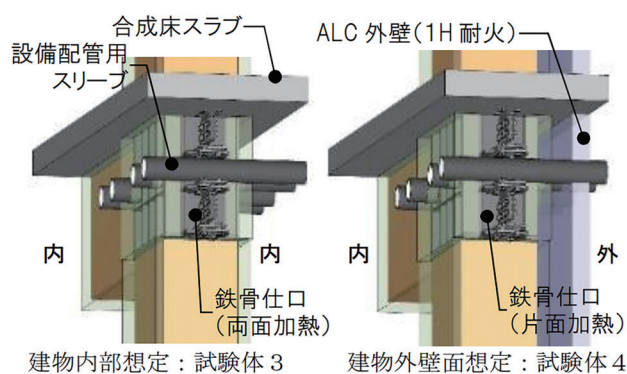


図-16 設備配管用スリーブ検証部位

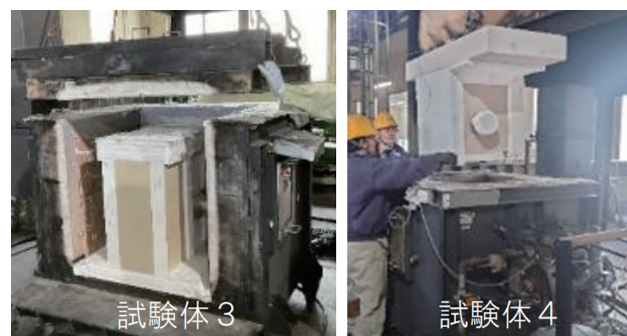
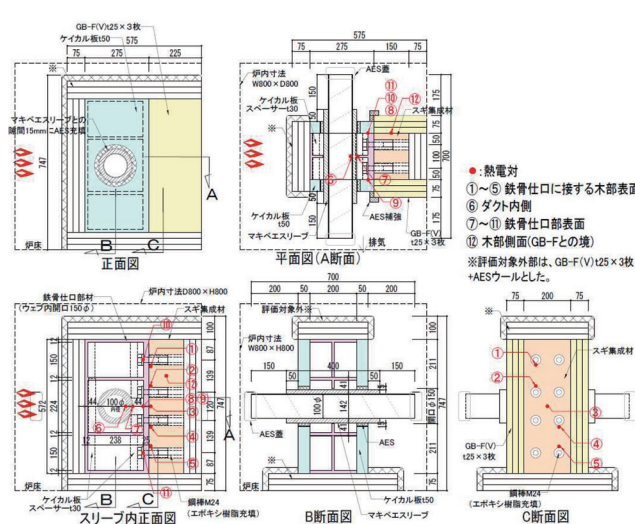
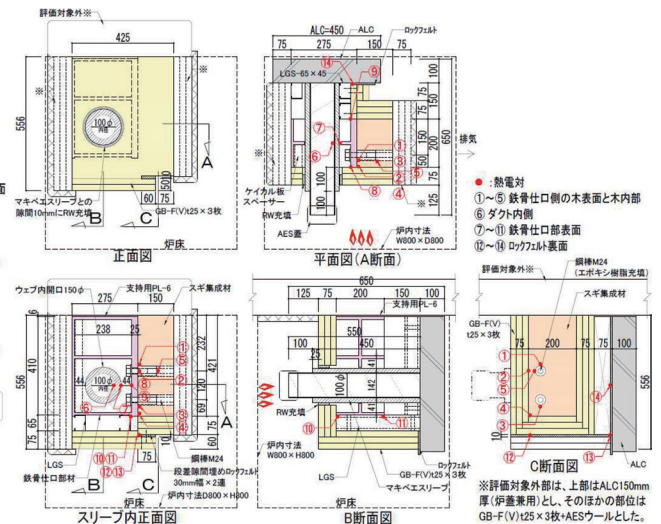


写真-3 試験体 3 および試験体 4



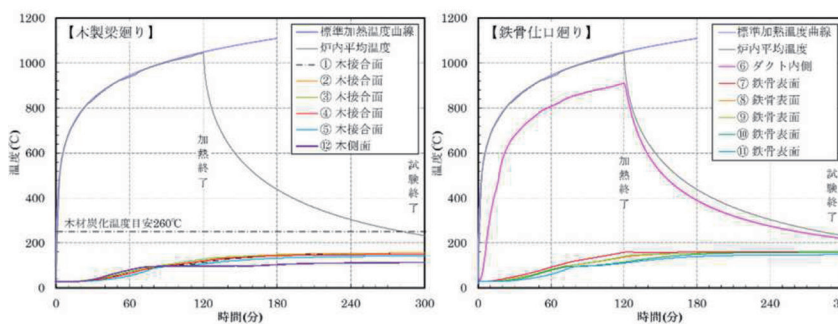
図一17 試験3の試験体図および温度測定位置



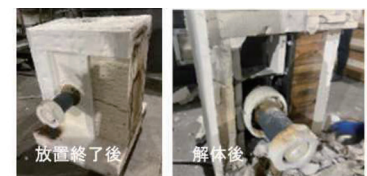
図一18 試験4の試験体図および温度測定位置

表一1 使用材料

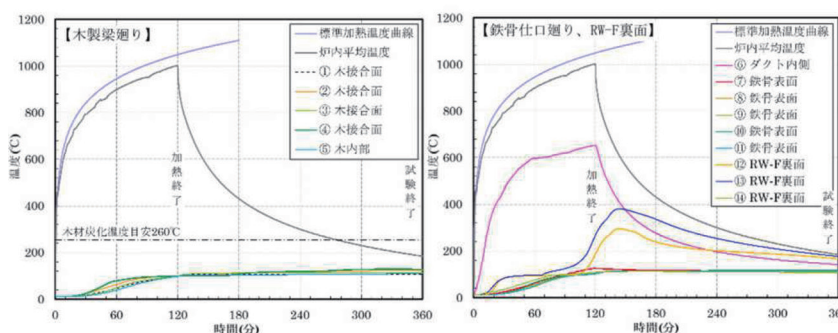
項目	仕様・規格	試験体3	試験体4
木製梁	スギ 構造用集成材同一等級 E65-F255	○	○
鉄骨仕口	SS400、木部側フランジ25mm厚、その他12mm厚	○	○
鋼棒	SNR490B M24、木孔内にエポキシ樹脂系2液型接着剤充填	○	○
設備用スリーブの耐火被覆	RW t20mm 付スパイラルダクト (ニチアス(株)製マキベエスリーブ)、溶融亜鉛めっき鋼板、内径100φ、外径104φ、厚0.5mm	○	○
木部の耐火被覆	強化セッコウボード[GB-F(V)]、厚25mm×3枚張り=総厚75mm	○	○
鉄骨仕口部の耐火被覆	けい酸カルシウム板t50mm(3時間相当)、スペーサーは30mm、日本インシュレーション(株)製タイカライト1号	○	○
外壁	軽量気泡コンクリート[ALC]t100mm	—	○
軽鉄下地	LGS-65×45 (一般普及品)	—	○
マキベエスリーブ廻りの隙間	隙間15mm程度、AES ウール 幅15mm×奥行50mm 充填	○	—
スリーブ内正面図	隙間10mm程度、RW 密度40kg/m3 充填、奥行45mm 充填	—	○
GB-F(V)間の隙間	高密度ロックウールフェルト t10mm, 150kg/m3, 吉野石膏(株)製ロックフェルト	—	○



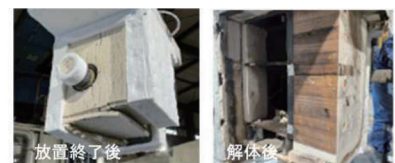
図一19 試験体3の各部温度推移と最高温度



部位	最高温度°C
鉄骨仕口と木製梁の接合面温度①～⑤	157 (①,299分)
スパイラルダクト内側表面温度⑥	910 (⑥,120分)
鉄骨仕口部表面温度⑦～⑪	161 (⑦,196分)
木製梁の側面温度 (GB-F裏) ⑫	114 (⑫,299分)



図一20 試験体4の各部温度推移と最高温度



部位	最高温度°C
鉄骨仕口と木製梁の接合面温度①～④	130 (④,324分)
木製梁内部温度⑤	110 (⑤,356分)
スパイラルダクト内側表面温度⑥	654 (⑥,120分)
鉄骨仕口部表面温度⑦～⑪	126 (⑦,120分)
RW-F裏面温度⑫～⑭	380 (⑬,144分)

丸数字：熱電対番号、時間：加熱開始から（放置時間含む）

4-2 実験概要

図-17 および図-18 に試験体図および温度測定位置を、また表-1 に使用材料を示す。設備配管用スリーブには、鉄骨仕口の耐火被覆から突出する部分が受熱した際に、木部への熱伝達を抑制するため、内径φ 100 mm のスパイラルダクトにロックウール（以下、RW）系断熱材厚 20 mm を巻き付けたもの（以下、ニチアス社製マキベエスリーブ）を鉄骨仕口のウェブに設けた開口φ 150 mm に貫通させた。マキベエスリーブの RW 部分は、鉄骨仕口の耐火被覆表面より試験体 3 は 50 mm、試験体 4 は 25 mm 突き出し、フランジまでの距離を実際の設計値よりも小さい 44 mm とした。木製梁の耐火被覆は 2 時間耐火構造の告示案として検討されている強化せっこうボード（以下、GB-F(V)）総厚 75 mm（厚 25 mm×3 枚張り）とした。鉄骨仕口部の耐火被覆は、試験体 3 では 3 時間耐火構造相当のケイカル板厚 50 mm を使用し、試験体 4 では木製梁と同じ GB-F(V) 総厚 75 mm とした。試験体 4 は GB-F(V) 同士の段差における隙間処理や ALC との取り合い部の耐火性能を確認するため、高密度ロックウールフェルト（以下、RW-F）を充填した。実験は（一財）日本建築総合試験所の小型炉を用いて、ISO834 標準加熱曲線に準じた 2 時間加熱を実施し、その後、試験体 3 は 3 時間、試験体 4 は 4 時間放置した。試験体には、CA 熱電対（K タイプ）を配置して各部の温度を計測するとともに、各部の燃焼性状を目視にて確認した。

4-3 実験結果

(1) 試験体 3：室内で両面加熱を受ける場合

図-19 に試験体 3 各部の温度推移を示す。図中には、最高温度と加熱開始からの計測時間も併記した。スパイラルダクトの露出部分からの入熱により、ダクト内側温度⑥は加熱曲線と同じように上昇したが、鉄骨仕口内⑦～⑩の最高温度は 161℃に留まった。鉄骨仕口と木製梁との接合面①～⑤の最高温度は 157℃に留まり、木製梁の変色・炭化痕も見られなかった。なお、木製梁側面⑫の最高温度は GB-F(V) 総厚 75 mm の耐火被覆により 114℃に留まった。以上より、鉄骨仕口部にプラス 1 時間のケイカル板厚 50 mm で耐火被覆し、仕口を貫通するスパイラルダクトに RW 断熱材厚 20 mm を巻き付けた場合は（ただし木製梁側の鉄骨フランジとの距離を 44 mm 以上確保）、木部の燃焼を抑制できると考えられる。

(2) 試験体 4：室内側から片面加熱を受ける場合

図-20 に試験体 4 各部の温度推移を示す。図中には、最高温度と加熱開始からの計測時間も併記した。各部の最高温度は試験体 3 に比べてやや低く、鉄骨仕口部表面⑦～⑩は 126℃、鉄骨仕口と木製梁の接合面①～④は 130℃に留まった。また、木製梁表面から約 28 mm 内側の木内部⑤（エポキシ接着剤表面）の最高温度は 110℃となった。GB-F(V) 段差部の 8～10 mm の隙間には、

RW-F を奥行 60～75 mm 充填したが、加熱中に上張り GB-F(V) 厚 25 mm が脱落し隙間が広がったものの、RW-F 裏面温度⑫⑬は 380℃以下に抑制され、鋼材の許容温度 450℃以下になることがわかった。さらに、GB-F(V) が ALC 外壁に突き当たる隙間には RW-F を充填したが、その隙間が開いたり、RW-F 裏面温度⑭が急上昇することとはなかった。マキベエスリーブと GB-F(V) との隙間には RW を充填したが、鉄骨仕口廻り温度の急上昇等は見られず、スリーブ廻りの隙間埋め材としての性能を確認できた。

§5. おわりに

本報では、国内で初めて中大規模木造用高性能耐震フレーム構法 P&UA を実プロジェクトに適用し、構造計算ルート 3 を用いて木造 5 階建て耐火建築物を実現した事例を報告した。以下に得られた知見を述べる。

建物の桁行方向に新技術 GIUA を適用したラーメン架構を用い、梁間方向に新技術コッター耐力壁架構を用いることで、高耐力、高剛性および高靱性型の中大規模木造建築物を実現することができた。

構造計算ルート 3 を適用した構造設計を行い、ラーメン方向は $D_s=0.35$ 、耐力壁方向は $D_s=0.4$ となる経済合理性に優れた高靱性型の本質構造を実現することができた。

構法開発時に実施した 2 時間耐火実験の結果、建物の建築計画上重要な部位である設備配管スリーブ部分においても、十分な耐火性能を有していることを確認した。

本プロジェクトは、住宅・建築物の木造化に係る先導的な技術の普及啓発に寄与するものとして評価され、「令和 5 年度サステナブル建築物等先導事業（木造先導型）」に採択された。

謝辞. 本開発は(株)市浦ハウジング & プランニングを代表とする「P&UA 構法共同技術開発グループ」との共同研究開発の一環として実施しました。関係各位に感謝致します。

参考文献

- 1) 竹内章博, 金川基:「中大規模木造建築物の実現」への取り組み 中大規模木造用高性能耐震フレーム構法 P&UA の開発, 西松建設技報 Vol. 47, 2024
- 2) 竹内章博ほか: 高耐力・高靱性型中層木造建築物の開発と実物件への適用, 日本建築学会技術報告集 第 30 巻 第 76 号, pp. 1235-1240, 2024. 10
- 3) 竹内章博ほか: 汎用型中高層木造建築物の構法開発と中層 5 階建て建築物への適用事例 (その 1~4) 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), pp. 201-208, 2024. 8