

「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 Study on Realizing Mid- to High-Rise Wooden Construction Development of High Performance Seismic Wooden Frame System P&UA

竹内 章博*

Akihiro Takeuchi

金川 基**

Motoi Kanagawa

要 約

近年、脱炭素社会の実現に向けて重要な役割を期待されている、中大規模建築物への木材利用が注目を集めている。一方で日本は世界有数の地震大国であり、木造建築物を中大規模化する場合、いかにして耐震性を確保するかが重要な課題となる。また木造建築物の中高層化に伴い、耐震性の確保に加えて、耐火に対する安全性の確保も課題となる。

本開発では「中大規模木造建築物の実現」を目的とし、10階建て規模の木造建築物の実現を可能とするための、剛性、耐力および靱性を有する高性能な中大規模木造用耐震フレーム構法の共同開発を行った。さらに同構法に対する耐火性能の検証も行ったので報告する。

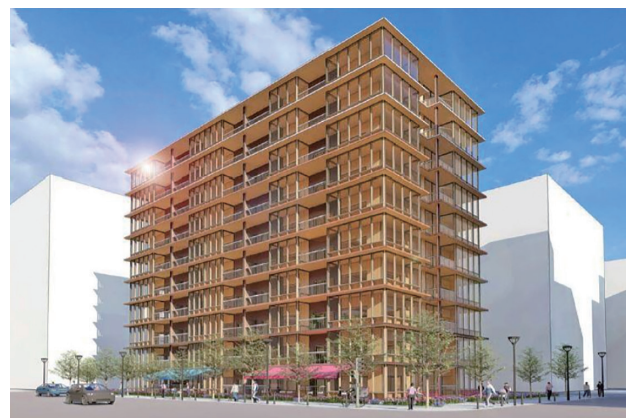
目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 開発構法の概要
- § 3. 実験概要及び実験結果
- § 4. 耐火性能の検証
- § 5. おわりに

§ 1. はじめに

日本は世界有数の地震大国であり、木造建築物を中大規模化する場合、いかにして耐震性を確保するかが重要な課題となる。さらに木造建築物の中高層化に際しては、耐火に対する安全性の検証も要求される。そこで本開発では、上記の課題を解決し「中大規模木造建築物の実現」を可能とするための新たな中大規模木造用高性能耐震フレーム構法 P&UA の共同開発を行った。

図一1 に 2022 年 10 月に一般財団法人日本建築センターで個別評定を取得した 10 階建ての中大規模木造共同住宅のイメージパースを示す。また、写真一1 に実現した開発構法の木造躯体の状況を示す。本報では、開発構法の概要と特長について述べるとともに、開発時に実施した構造実験および耐火実験の一部について報告する。



図一1 評定を取得した中大規模木造建築物



写真一1 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

§ 2. 開発構法の概要

本章では開発構法の概要について、本構法を実際に適用した木造5階建て実物件の構成事例を通して示す。

2-1 開発構法の架構イメージ

図-2 に本物件の架構イメージ図を示す。開発構法は、建物の桁行方向には、開放性のあるラーメン架構を採用し、梁間方向には、戸境壁を利用した耐力壁架構を採用した。床には振動、遮音および施工性を考慮し、RC 造（ハーフ PC 版）を採用した。なお、図中には建物各階で使用可能な木材の樹種および強度等級、鉄骨の鋼種の事例を併記した。本構法では、大梁、柱、耐力壁の全てに、今後の利用拡大が期待されている国産材である、スギ、ヒノキ、カラマツが使用可能な構法としている。

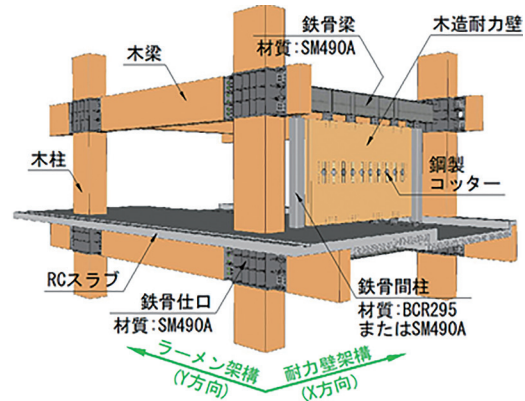
2-2 ラーメン架構の概要

本開発では、比較的接合効率が低い構法ではあるが、靱性確保に課題がある 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。

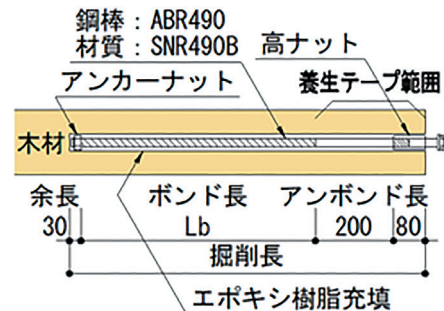
図-3に開発した鋼棒挿入式の接着接合構法の概要図を、表-1に各部寸法を示す。以下、本接合構法を GIUA (Glued in unbonded anchor) と定義する。GIUA は、従来の GIR に対して、アンカーとなる鋼棒と木材とを接着して定着耐力を確保する範囲（以下ボンド範囲）と、木材との接着を切って軸変形させる範囲（以下アンボンド範囲）に分ける改良を行った。なお、鋼棒には異形鉄筋ではなく、高い靱性を有する建築構造用転造ネジアンカーボルト SNR490B (以下 ABR490) を用いた。この改良により、アンボンド範囲で高い伸び能力を有する ABR490 を先行降伏させ、木材の割裂破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 200 mm 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ている。

図—4に開発したラーメン架構について、柱梁接合部の構成例を示す。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 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、鉄骨仕口には強度区分 10.9 以上のボルトにより緊結する構造とした。

1F・2F：柱	ヒノキ同一等級構成集成材 E95-F315	3F～5F：柱	スギ同一等級構成集成材 E65-F255
2F・3F：大梁		4F・RF：大梁	



図一2 開発構法の架構イメージと使用材料の事例



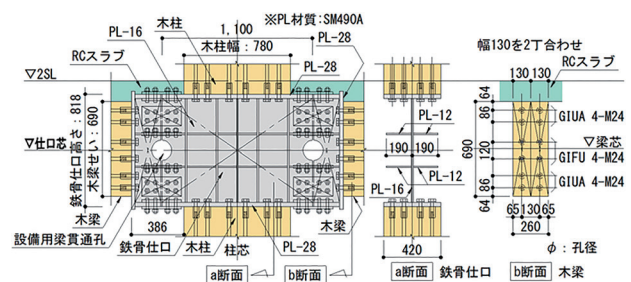
図一3 鋼棒挿入式接着接合（GIUA）の概要図

表一1 鋼棒挿入式接着接合（GIUA）の各部寸法

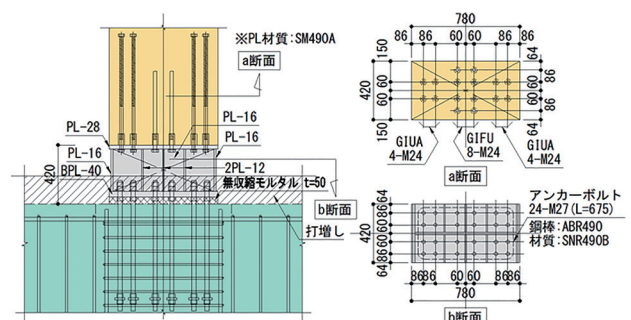
樹種：スギ、単位：mm

径(孔径)	Lb	径(孔径)	Lb
M18(34)	500	M24(43)	700<500>
M20(36)	600	M27(47)	<700>

〈 〉 はヒノキ、カラマツ



図一4 ラーメン架構の柱梁接合部の構成例



図一5 ラーメン架構の1階柱脚接合部の構成例

図-5 にラーメン架構 1 階柱脚接合部の構成例を示す。1 階柱脚はアンカーボルトにより基礎に緊結し、GIUA がアンカーボルトより先に曲げ降伏するよう設計した。

2-3 耐力壁架構の概要

図-6 に開発した耐力壁架構の構成例を示す。耐力壁は、上下方向に 2 枚並べた CLT を、後述する接合用鋼材（以下コッター）で連結する構造としている。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ている。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。

図-7 にコッターの詳細図を示す。コッターは L 形に曲げ加工した厚さ 4.5 mm の 4 枚のプレートを H 形に組み立てて構成する。コッターの中央部分には可撓部を設け、CLT を菱型に切削することで変形可能な仕組みとした。

§ 3. 実験概要及び実験結果

3-1 GIUA の実大引張実験

写真-2 に、GIUA の引張性能を確認するため実施した、静的加力実験状況を示す。実験は、樹種および GIUA の径を M18～M27 とした場合について行った。試験体の樹種および強度等級は、GIUA の径が M20 以下の場合、スギ集成材とし、M24 以上の場合、カラマツ集成材とした。各試験体で GIUA の本数は 4 本とした。加力は単調引張加力とし、載荷荷重が最大荷重の 80% に低下するまで行った。計測は引張軸力と試験体木口と治具の相対変位について行った。

図-8 に GIUA の荷重-変位関係を示す。荷重-変位関係は径の大小に拘わらず、ABR490 特有の靱性に富んだ塑性変形性状を示す。GIUA の加力終了時の伸び量は、アンボンド長 200 mm に対して最小径の M18 の場合、約 42 mm (21%)、最大径の M27 の場合でも、約 46 mm (23%) と GIUA の径や樹種によらず、高い塑性変形能力を有することを確認した。なお、全ての試験体で、ABR490 の鋼棒破断となり木材の損傷は見られなかった。

3-2 大梁端接合部および柱脚接合部の実大実験

ラーメン架構においてヒンジ形成部位としている大梁端接合部および 1 階柱脚について、曲げ性能を確認するための静的繰り返し加力実験を行った。

図-9 に実験概要を示す。大梁端部の試験体は使用材料の中で強度が低いスギ集成材とした。1 階柱脚の試験体の木部材は、ヒノキと同強度のカラマツ集成材とし、

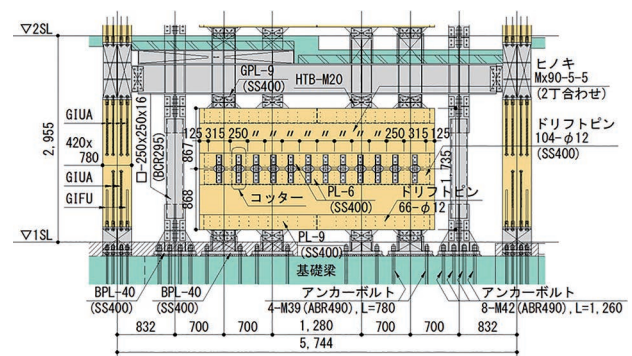


図-6 耐力壁架構の構成例

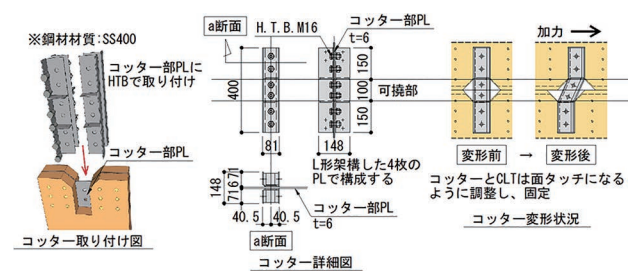


図-7 コッター詳細図



写真-2 GIUA 引張実験

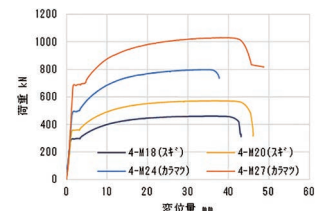


図-8 荷重-変位関係

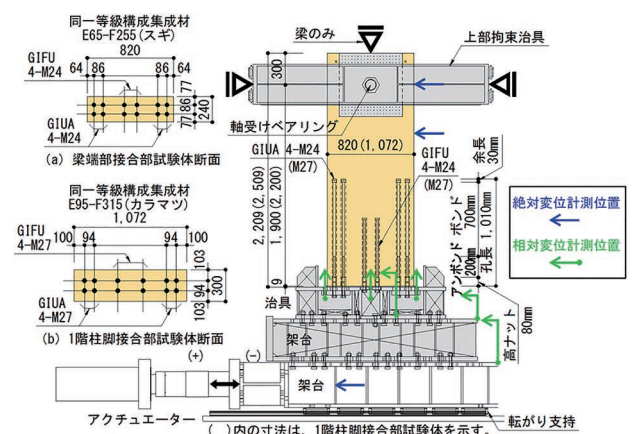


図-9 ラーメン架構の端部接合部実大実験概要

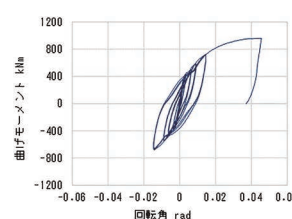


図-10 大梁端部 M-θ

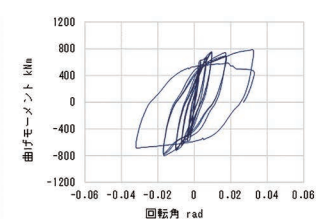


図-11 1階柱脚 M-θ

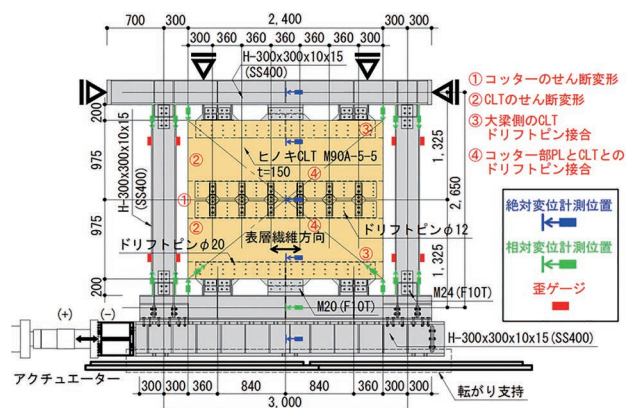
GIUA および GIFU には M27 を用いた。また、高い塑性率が要求される引張側の隅柱を想定し、軸力無しで実験を行った。実験方法は試験体脚部を転がり支持とし、大梁端部接合部の実験では、試験体上部の鉛直方向を拘束するためロードセルを設置し、軸力の計測も行った。加力はアクチュエーターによる変位制御の正負交番の3回繰り返し载荷とした。目標変形角は、見かけのせん断変形角で制御し、1/450、1/300、1/200、1/150、1/100、1/75、1/50 rad とし、荷重が最大荷重の80%に低下するか、せん断変形角が1/10 rad に達するまで加力を行った。計測は、せん断力、変位、端部接合部の回転角について行った。

図一10に、大梁端部接合部の曲げモーメント M - 接合部回転角 θ 関係を示す。図一11には、同様にして1階柱脚の場合を示す。 M - θ 関係は両試験体とも、繰り返し加力に伴う荷重低下がほとんど無い安定した履歴特性を示しており、木造特有のスリップを伴う履歴性状が改善されていることが分かった。特に高い塑性変形能力が要求される大梁端部の試験体については、回転角が1/19 rad まで急激な荷重低下を生ずることが無く、大変形まで追従可能な靱性を有していることが確認された。

3-3 耐力壁架構の構造実験

図一12に、耐力壁架構の静的加力実験の実験概要を、写真一3に試験体設置状況を示す。耐力壁の諸元は、§2で示した5階建て実物件における断面と同様の設定とした。なお試験体のコッターは、横方向に6個設置し、実物件と同様に中央付近の可撓部を除いて埋め木をした。耐力壁の周辺架構は鉄骨造とし、鉄骨柱は柱頭、柱脚ともピン接合とした。実験方法は試験体柱脚を転がり支持とし、加力はアクチュエーターによる変位制御の正負交番の3回繰り返し载荷とした。目標層間変形角は、1/450、1/300、1/200、1/150、1/100、1/75、1/50 rad とした。その後、荷重が最大荷重の80%に低下するか、層間変形角が1/1 rad に達するまで行った。計測は層せん断力、層間変位等について行った。

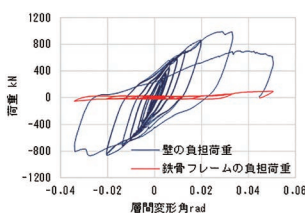
図一13に耐力壁架構全体から、周辺架構の鉄骨部材の負担荷重を取り除いた、耐力壁の荷重 - 層間変形角の関係を示す。図中には鉄骨部材の荷重 - 層間変形角の関係も併記した。鉄骨部材の負担荷重は全体の5%程度以下と小さい。耐力壁の荷重 - 変位関係は、安定した履歴特性を示しており、木造特有のスリップを伴う履歴性状が改善されていることが分かる。層間変形角が1/200 rad 付近で、コッター可撓部のウェブに該当する部分がせん断降伏したが、降伏後も繰り返し加力に伴う荷重低下がほとんど無く、エネルギー吸収能力に富んだ性状を示した。なお、層間変形角1/30 rad の負加力時まで、急激な耐力低下もなく加力でき、大きな変形角まで追従可能な靱性を有していることが確認された。また、相当壁倍率は106倍になる結果となった。



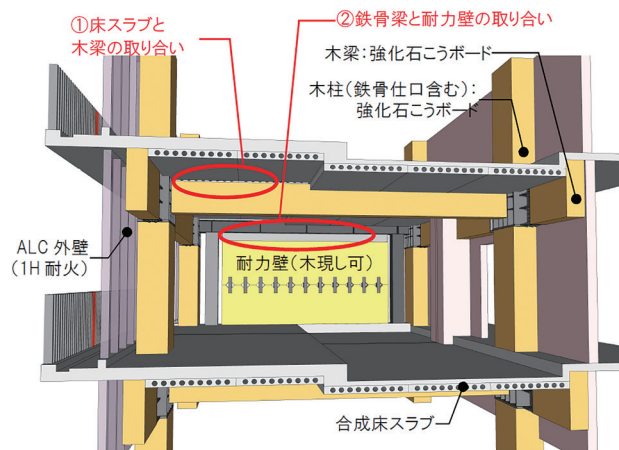
図一12 耐力壁架構の実大実験概要



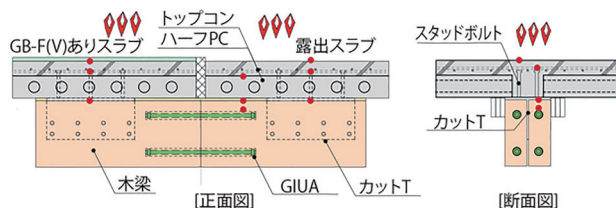
写真一3 試験体状況



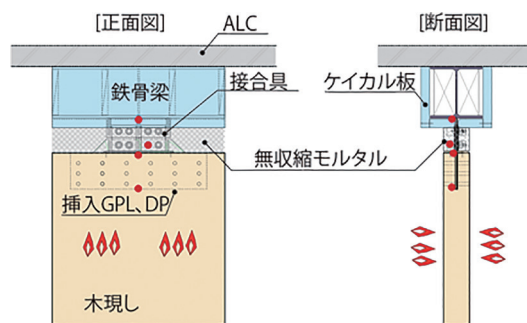
図一13 荷重 - 層間変形角



図一14 耐火性能についての検証部位



図一15 試験体1の概要図



図一16 試験体2の概要図



写真-4 耐火炉の全景

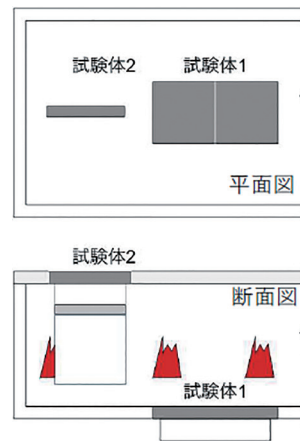
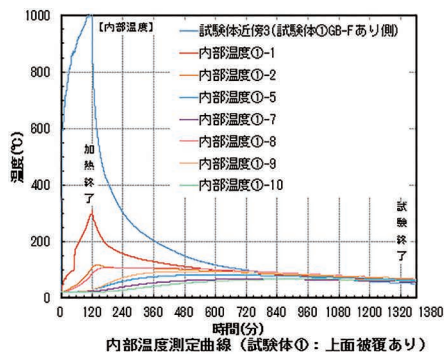


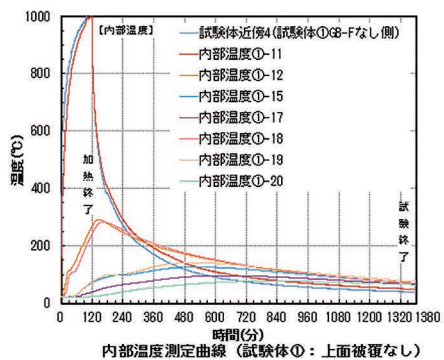
図-17 試験体配置図



写真-5 試験体設置状況



内部温度測定曲線 (試験体①: 上部被覆あり)



内部温度測定曲線 (試験体①: 上部被覆なし)

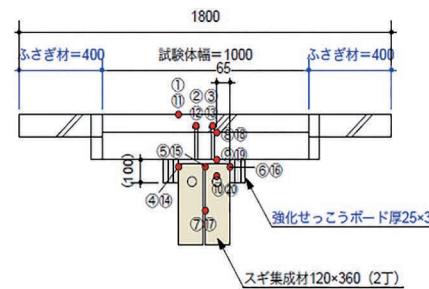
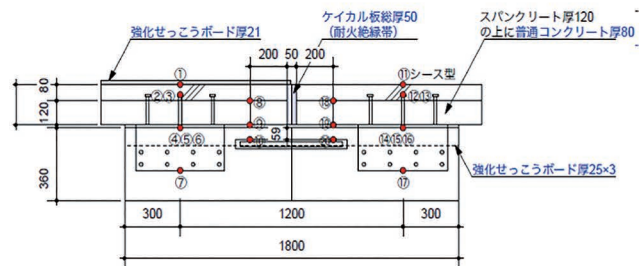
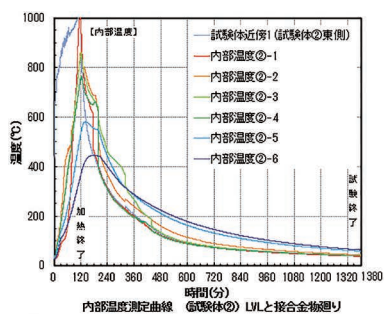
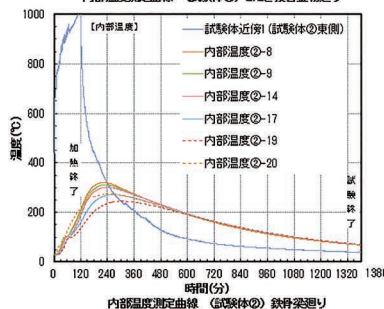


図-18 試験体1の各部温度推移と温度計測位置



内部温度測定曲線 (試験体②) LVLと接合金物周り



内部温度測定曲線 (試験体②) 鉄骨梁周り

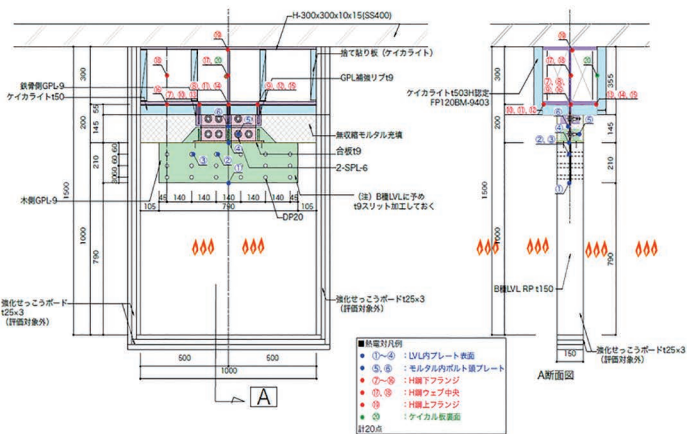


図-19 試験体2の各部温度推移と温度計測位置

§ 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

図一14 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。また、長期荷重を負担しない耐力壁は、法的に防火性能等が求められる部位においては木現しにすることも可能であるが、木部燃焼で接合具から伝わる熱によって荷重支持部材に構造上支障のある損傷が生じないように留意する必要がある。本構法における木の柱梁（鉄骨仕口部含む）の耐火被覆は、平成 12 年建設省告示第 1399 号（主要構造部の耐火構造の構造方法）による強化せっこうボード張りを基本としている。合成スラブは、二丁合わせした木梁に挟み込まれたカット T 型鋼に溶接されたスタッドボルト等により固定される。コッター耐力壁は、木質面材上部の挿入鋼板と鋼製梁下面から持ち出したガセットプレート同士を高力ボルトで接合する。これらの部位は、鋼製接合具を通して荷重支持部材の内部に熱が伝わり許容温度を超える可能性があるため、取り合い部の耐火性能を検証した。

4-2 実験概要

(1) 試験体 1：床スラブと木梁の接合部実験概要

図一15 に試験体 1 の概要図を示す。試験体 1 では、強化せっこうボードで表面を被覆した場合と、露出した場合の合成スラブの床下からの入熱に対して、固定金物を介して、スラブ直下の木梁および梁内部の GIR に熱的な悪影響を与えないかを確認した。本実験の判定条件は、主要構造部の木製梁の表面温度が木材の着火温度とされる約 260℃まで上昇しないこと、主要構造部の木製梁の表面に炭化痕がないこととした。

(2) 試験体 2：鉄骨梁と木質面材の接合部実験概要

図一16 に、試験体 2 の概要図を示す。試験体 2 では、ケイ酸カルシウム板で耐火被覆された鉄骨梁に、150 mm 厚の B 種 LVL の耐力壁を木現しで接合した場合を想定し、鋼製接合具廻りに無収縮モルタルを充填し、木部燃焼により鉄骨梁に損傷を与えないかを確認した。本実験の判定条件は、鉄骨梁の健全性を維持することから放冷終了までに主要構造部の鉄骨梁の表面温度が鋼材の許容温度（概ね 450℃）まで上昇しないこととした。

写真一4 に耐火炉の全景、図一17 に試験体配置図、写真一5 に試験体設置状況を示す。実験は水平炉を用いて ISO834 標準加熱曲線に準じた 2 時間加熱を実施した。

4-3 実験結果

(1) 試験体 1：床スラブと木梁の接合部実験結果

図一18 に試験体 1 の各部温度推移と温度計測位置を示す。また、表一2 に試験体の各部最高温度と時間を示す。

表一2 試験体 1 の各部最高温度と時間

温度計測箇所	最高温度(℃)	
	上面被覆あり	上面被覆なし
普通コンクリート表面温度(①,⑪)	309(①,121分)	1011(⑪,120分)
スタッドボルト表面温度(②,③,⑫,⑬)	117(②,141分)	291(⑫,144分)
普通コンクリート裏面温度(⑧,⑬)	109(⑧,189分)	283(⑬,164分)
スパンクリート裏面温度(⑨,⑯)	94(⑨,492分)	141(⑯,510分)
木梁表面温度(④~⑥,⑭~⑯)	82(⑤,564分)	127(⑯,518分)
カット下部表面温度(⑦,⑰)	67(⑦,736分)	97(⑰,596分)
GIR接着剤表面温度(⑩,⑳)	67(⑩,897分)	78(⑳,818分)

※()内の番号は熱電対番号、時間は加熱開始からの時間

表一3 試験体 2 の各部最高温度と時間

温度計測箇所	最高温度(℃)
ドリフトン表面温度(①~④)	1013(①,120分)
GPL表面温度(②~③)	870(②,121分)
耐力壁との接合金物表面温度(⑤~⑥)	581(⑤,140分)
鉄骨梁表面温度(⑦~⑯)	321(⑧,222分)
ケイカル板表面温度(⑳)	275(⑳,250分)

※()内の番号は熱電対番号、時間は加熱開始からの時間

す。床上面耐火被覆のない仕様では、スタッドボルト表面温度は 291℃と木材の着火温度を超えたが、木梁表面の最高温度は 127℃であり、スタッドボルトの熱橋が木梁に与える影響は小さく、炭化痕も確認できなかった。また、GIR 部の鉄筋はいずれの仕様も 80℃以下であった。

(2) 試験体 2：鉄骨梁と木質面材の接合部実験結果

図一19 に試験体 2 の各部温度推移と温度計測位置を示す。また、表一3 に試験体の各部最高温度と時間を示す。2 時間の加熱により、GPL 表面の最高温度（870℃）は鉄骨の許容温度 450～500℃を超えている。一方、GPL が取り付く鉄骨梁の下面最高温度は 321℃に抑えられており、構造躯体である梁への熱的な悪影響は小さく、鋼材の許容温度以下になることを確認した。

§ 5. おわりに

本開発では「中大規模木造建築物の実現」を目的とし、新たな中大規模木造用高性能耐震フレーム構法 P&UA の共同開発を行い、以下の事項を明らかにした。

- ・新たに中大規模木造用に開発した GIUA 接合は、全ての試験体で木部が破壊することなく、径や樹種によらず、高い塑性変形能力を有することを確認した。
- ・開発したラーメン架構の実大加力実験により、本研究で開発した GIUA 接合を用いた大梁端部接合部は、回転角が 1/19 rad まで急激に耐力低下すること無く、高い塑性変形能力を有することを確認した。
- ・開発した耐力壁架構の実大加力実験により、本耐力壁は最大層間変形角が 1/30 rad まで急激な荷重低下も無く加力でき、ラーメン架構と同様に高い塑性変形能力を有することを確認した。
- ・2 時間耐火実験の結果、本開発構法で課題として挙げられた、床スラブと木梁の接合部および鉄骨梁と木質面材の接合部ともに、耐火性能上問題ないことを確認した。

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。