

ハイブリッド架構による耐火木造建築の技術開発

河内 武

木造と鉄骨造・RC造を組み合わせたハイブリッド架構の柱梁接合部として、木質柱+RC・鉄骨梁架構、木質柱+木質梁架構の2種類を考案し、多様な空間ニーズに対応できる木質架構を開発した。これらの構造性能把握のため、十字形柱梁接合部試験体による構造実験を実施し、いずれも、層間変形角 $1/60 \sim 1/30 \text{ rad}$ まで大きな耐力低下のない靱性のある荷重-変形性能を示すことを確認した。また、加熱により発泡する薄い耐火材と強化石膏ボードの二重の燃え止まり層によるスリム型耐火木質柱・梁を開発し、いずれも指定性能評価機関にて1時間耐火認定を取得した。さらに、2種類の接合部に関する1時間耐火性能も加熱実験により確認した。

キーワード：木質ハイブリッド架構，GIR接合，1時間耐火，耐火シート

1. はじめに

近年、建築物の木質化を推進する動きが活発となり、木造建築の中高層大規模化への注目度が高まってきている。ここでは、このような動きに対応してこれまで実施してきた木質架構の構造・耐火に関する技術開発の概要について紹介する。

開発対象としたのは、4層までの学校・医療福祉施設・店舗などを想定した図-1に示すような1時間耐火木質架構で、木造と鉄骨造またはRC造を組み合わせることが可能なハイブリッド架構とすることで、用途・規模に応じてロングスパンや梁貫通対応、木材現しなど多様な空間ニーズに対応できる木質架構である。

今回は、架構の実現に当たって必要となる開発項目として、木造と鉄骨造またはRC造を組み合わせたハ

イブリッド架構における柱梁接合部、耐火木質部材（柱・梁・柱梁接合部）、の各項目について技術開発を行った。

2. 柱梁接合部の開発

開発した柱梁接合部は、図-2に示す木質柱+RC・鉄骨梁架構、木質柱+木質梁架構にそれぞれに対応した2種類の柱梁接合部で、十字形柱梁接合部試験体による構造実験を実施してその構造性能を確認した。いずれの接合部とも柱と梁の接続部分となる個所（パネル部分）をRC造とし、RC接合部と木質柱との接合をエポキシ樹脂充填によるGlued-in Rod接合（GIR接合）としており、パネル部分をRC造とすることで、構造性能・耐火性能をともに向上させることをねらっている。なお、GIR接合部の鋼棒には、柱に挿入される部分をネジ加工した切削鉄筋を用いており、十字形柱梁接合部実験に先立って実施したGIR

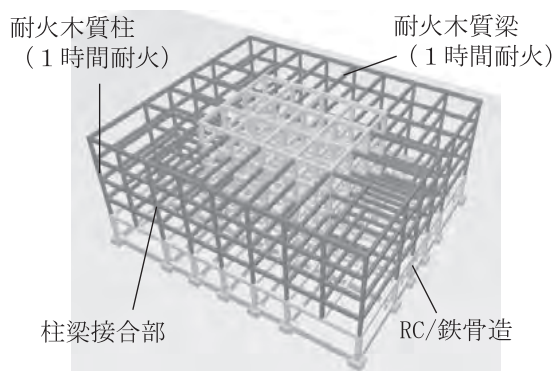


図-1 ハイブリッド架構の概念

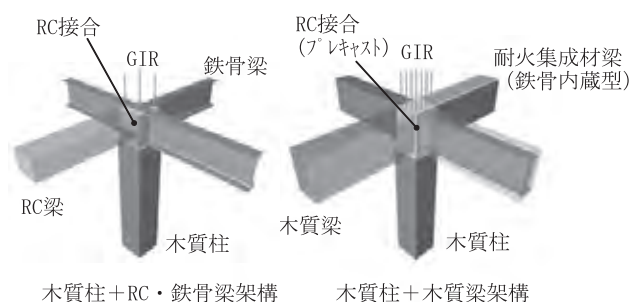


図-2 開発した柱梁接合部

接合部の引抜実験¹⁾、柱部分の曲げ実験²⁾により靱性のある接合部にすることが可能であることを確認済みである。

図-3には試験体の概要を示す。試験体は木質柱+RC・鉄骨梁架構に対応した接合部を有するType-Aと木質柱+木質梁架構に対応した接合部を有するType-Bの2タイプを1体ずつである。Type-Aでは、柱が600mm×600mmのカラマツ集成材(同一等級, E105-F345)、梁がH形鋼(H-600×200×11×17, SN490B)で、梁はRC接合部内を貫通し、RC接合部の周囲は厚さ9mmの鋼板(ふさぎ板, SS400)で囲われている。Type-Bでは、柱が600mm×600mmのカラマツ集成材(同一等級, E105-F345)、梁が250mm×680mmのカラマツ集成材(同一等級, E105-F345)で、梁端部はドリフトピン(直径27mmの丸鋼, SS400)と厚さ16mmのガセットプレート(SN490B)を介して、RC接合部内に埋め込まれた異形鉄筋(SD345)の両端を全ネジボルト形状に切削加工した切削鉄筋にボルト留めしている。Type-A、

Type-BともRC接合部と木質柱の接合はGIR接合を採用しており、鋼棒として異形鉄筋(SD345)の一端のみを全ネジボルト形状に切削加工した切削鉄筋を使用している。切削鉄筋の全ネジボルト部は木柱内に挿入してエポキシ樹脂を充填して接合、鉄筋部はRC接合部内に埋め込んで機械式継手により上下柱の鋼棒どうしをRC接合部内で接合することで、柱を通し柱とすることなく、層ごとの積層構法とすることを可能にしている。

加力は、図-3中に示すように、柱反曲点に相当する個所を反力ジャッキとテフロン支承で支持し、梁両端に正負交番繰返し荷重を载荷した。加力サイクルは、各層間変形角(1/400, 1/200, 1/150, 1/120, 1/100, 1/80, 1/60, 1/30, 1/20 rad)において正負2回ずつの繰返しとした。

図-4に荷重-層間変形角関係を示す。Type-Aでは、-1/60 radの2サイクル目加力時に上柱に微細な亀裂が発生したが耐力低下は微少で、その後、+1/120 radの1サイクル目加力時に柱の主筋が降伏し、+1/30

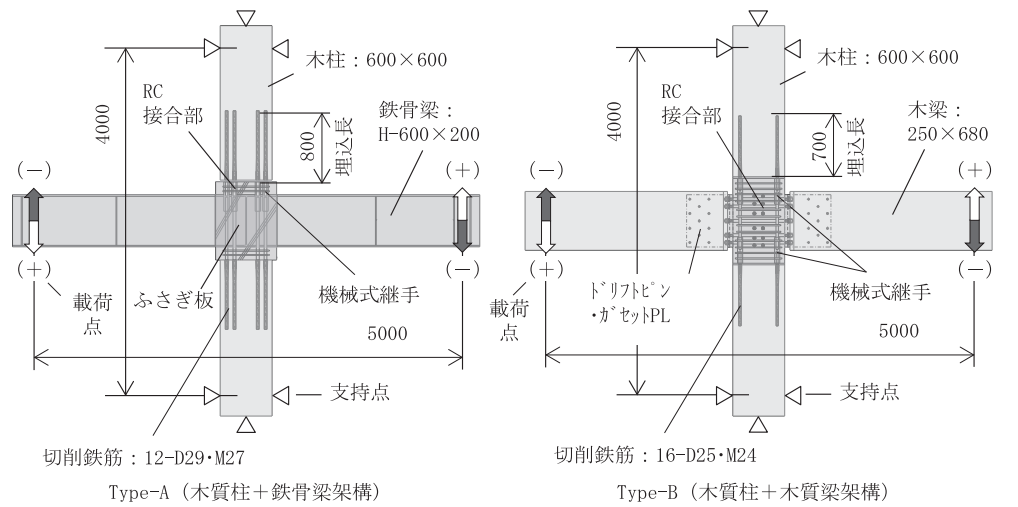


図-3 試験体概要

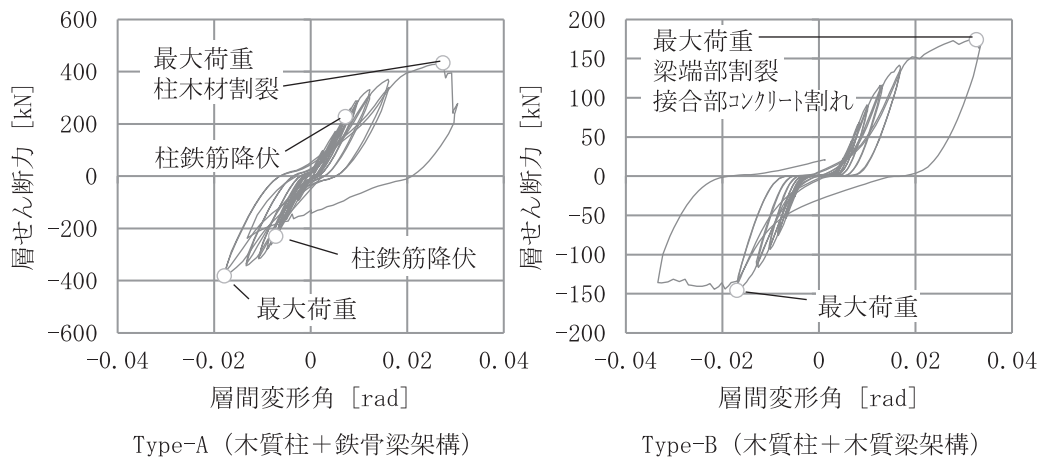
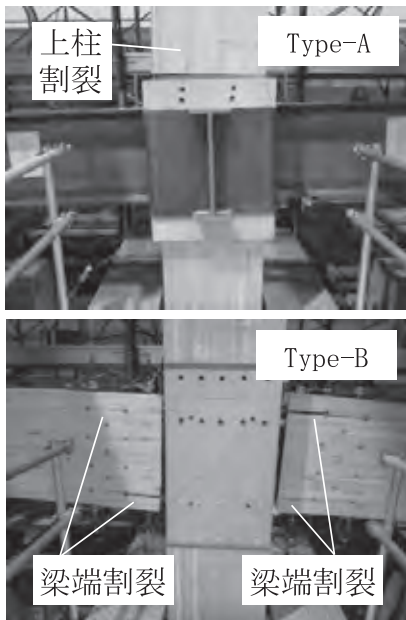


図-4 荷重-変形角関係

rad の1サイクル目加力時に上柱に割裂が発生して耐力が低下した。最大荷重は正側で433 kN, 負側で383 kNであった。鉄骨梁は最後まで弾性範囲であった。Type-Bでは, +1/30 rad 加力時に端部に大きな割裂が発生して耐力が低下したが, 柱主筋, 梁端のガセットプレートは最後まで弾性範囲内であった。載荷終了後に梁のドリフトピンを取り出したところ, く の字形に変形しており, 日本建築学会木質構造設計規準³⁾等 に示される, ドリフトピン中央部降伏型のモードIII の破壊性状であった。最大荷重は正側で174 kN, 負側で146 kNであった。また, Type-A, Type-Bとも加力中にRC 接合部に微細な亀裂が発生したが, これによる大きな耐力低下などはみられなかった。写真一1に最終破壊状況を示す。



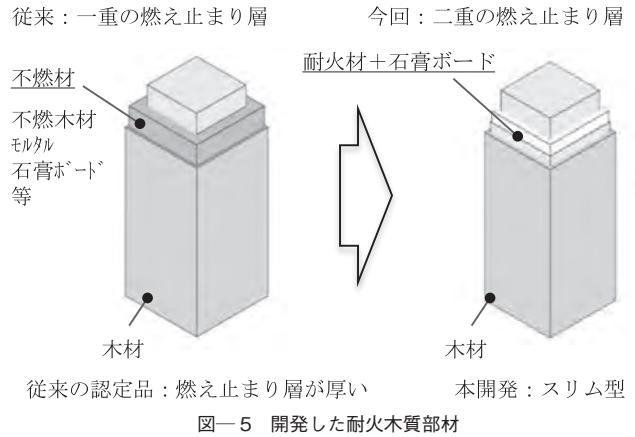
写真一1 接合部実験の最終破壊状況

3. 耐火木質柱の開発

従来の耐火木質部材は, 荷重支持部の芯材を火災から守るため, 燃え止まり層が厚くなり, 部材断面が大きくなる課題があった。本開発では, 図一5に示すように, 耐火シートと強化石膏ボードを組み合わせた二重の燃え止まり層を形成し, 耐火性能を高めることで, 燃え止まり層の厚さを従来よりも薄くできるスリムな耐火木質柱部材を開発した。

耐火木質柱部材の1時間耐火構造の大臣認定を取得するためには, 指定性能評価機関による耐火性能評価試験に合格する必要がある。木柱の耐火性能の判定基準は次の通りである。

- ・荷重支持部材である芯材に炭化がないこと

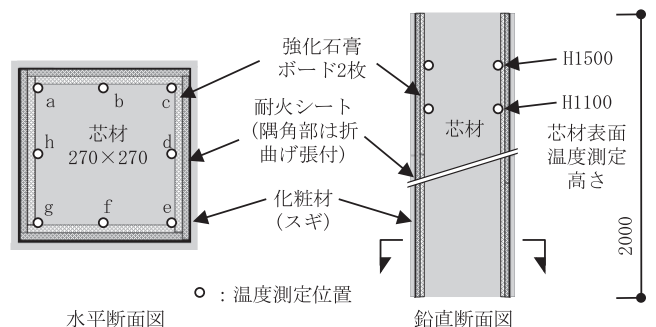


図一5 開発した耐火木質部材

- ・芯材の最大軸方向収縮量が規定値 $h/100$ [mm] を超えないこと
- ・芯材の最大軸方向収縮速度が規定値 $3h/1000$ [mm/分] を超えないこと
(hは試験体初期高さ [mm])

指定性能評価機関による耐火性能評価試験に先立ち予備実験を実施し, その結果をふまえて詳細な耐火仕様を決定した後, 性能評価試験を指定性能評価機関である(一財)建材試験センターにおいて1時間耐火の性能評価試験を実施した。試験体の概要を図一6に, 試験体の構成を表一1に示す。被覆層は, 強化石膏ボード2枚, 耐火シート, 化粧材で構成される。試験体は, 小断面2体, 大断面2体の計4体である。試験体高さは3300 mmである。試験はISO0834の標準加熱曲線に基づき, 芯材に長期許容応力度に相当する載荷荷重(小断面:483 kN, 大断面:2940 kN)をかけた状態で1時間加熱し, 芯材表面の測定温度が低下するまで継続した。

実験結果の例として, 写真一2に小断面Aの試験体加熱後の状況を示す。表一2には芯材の炭化の有無, 最大軸方向収縮量, 最大軸方向収縮速度を示す。また, 試験体の芯材表面の平均温度の時間変化を図一7に示す。写真一2の例のように, 小断面, 大断面とも芯材に炭化は見られなかった。最大軸方向収縮量,



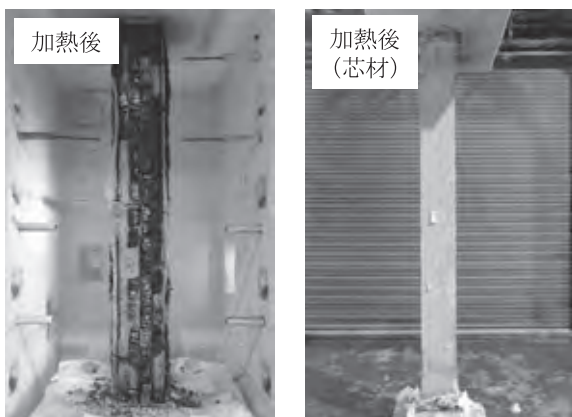
図一6 柱試験体の概要 (小断面)

表一 試験体の構成

	芯材	芯材断面寸法	被覆層	試験体名
小断面	スギ集成材 同一等級構成	270 mm × 270 mm	強化石膏ボード 耐火シート (厚さ約 2 mm) 化粧材 (スギ)	A
				B
大断面	E65-F255	624 mm × 624 mm		A
				B

表二 芯材の炭化の有無, 最大軸方向収縮量および速度の結果

	規定値	測定結果			
		小断面 A	小断面 B	大断面 A	大断面 B
芯材の炭化	-	なし	なし	なし	なし
最大軸方向収縮量 [mm]	33	1.5	1.7	0.9	1.0
最大軸方向収縮速度 [mm/分]	9.9	0.1	0.1	0.1	0.1



写真一 加熱後の状況の例 (小断面 A)

4. 耐火木質梁の開発

耐火木質柱と同様に, 耐火シートと強化石膏ボードを組み合わせた二重の燃え止まり層による, 従来よりも耐火層の薄いスリムな耐火木質梁部材を開発した。

耐火木質梁部材の 1 時間耐火構造の大臣認定の取得においても, 指定性能評価機関による耐火性能評価試験に合格する必要がある。木柱の耐火性能の判定基準は次の通りである。

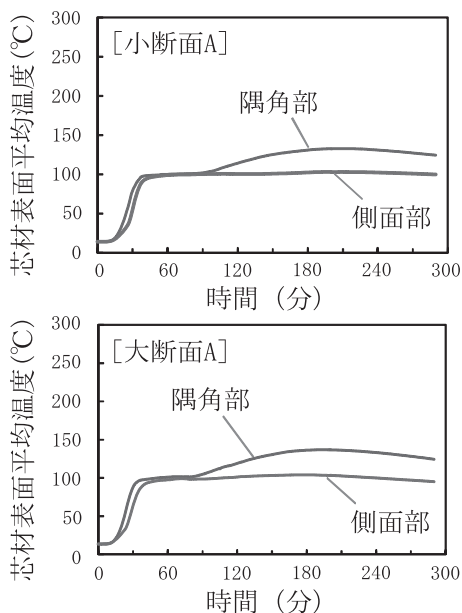
- ・荷重支持部材である芯材に炭化がないこと
- ・芯材の最大たわみ量が規定値 $L^2/400 d$ [mm] を超えないこと
- ・芯材の最大たわみ速度が規定値 $L^2/9000 d$ [mm/分] を超えないこと

(L は試験体の支点間距離 [mm], d は試験体の構造断面の圧縮縁から引張縁までの距離 [mm])

指定性能評価機関による耐火性能評価試験に先立ち予備実験を実施し, その結果をふまえて詳細な耐火仕様を決定した後, 性能評価試験を指定性能評価機関である (一財) 建材試験センターにおいて 1 時間耐火の性能評価試験を実施した。試験体の概要を図一 8 に, 試験体の構成を表一 3 に示す。被覆層は, 強化石膏ボード 2 枚, 耐火シート, 化粧材で構成される。試験体は, 小断面 2 体, 大断面 2 体の計 4 体である。

試験は, 試験は ISO0834 の標準加熱曲線に基づき, 梁芯材に長期許容曲げモーメントが作用する荷重をかけた状態で 1 時間加熱し, 芯材表面の測定温度が低下するまで継続した。

実験結果の例として, 写真一 3 に小断面 A の試験体加熱後の状況を示す。表一 4 には芯材の炭化の有無, 最大たわみ量, 最大たわみ速度を示す。また, 試験体の芯材表面の平均温度の時間変化を図一 9 に示



図一 7 芯材表面の平均温度

最大軸方向収縮速度は規定値以下であった。これらの結果より, 性能評価試験に合格し, 1 時間の耐火認定を取得した。

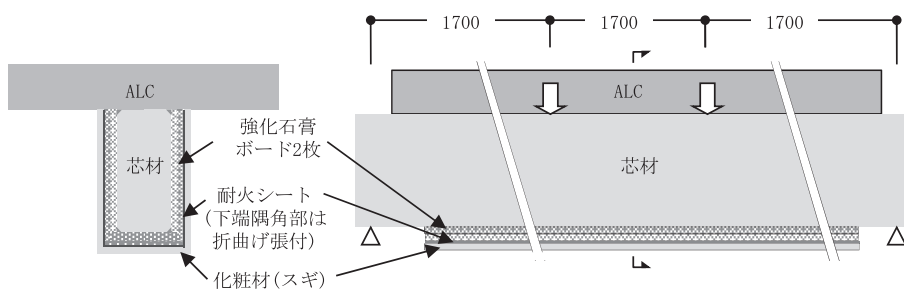


図-8 梁試験体の概要

表-3 試験体の構成

	芯材	芯材断面寸法 [mm]		被覆層	試験体
		梁成	梁幅		
小断面	スギ集成材 対称異等級構成 E65-F225	120	240	強化石膏ボード 耐火シート 化粧材 (スギ)	A
大断面		683	300		B

表-4 芯材の炭化の有無および最大たわみ量，たわみ速度の測定結果

		小断面 A	小断面 B	大断面 A	大断面 B
芯材の炭化	-	なし	なし	なし	なし
最大たわみ量 [mm]	規定値	271		95	
	測定値	31.6	30.0	4.4	4.3
最大たわみ速度 [mm/分]	規定値	12.0		4.2	
	測定値	0.6	0.6	0.3	0.3

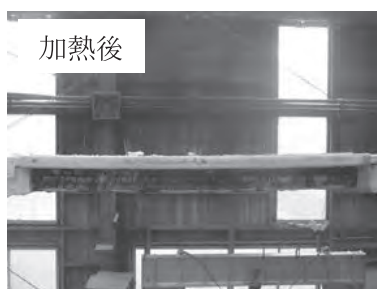


写真-3 加熱後状況の例 (小断面 A)

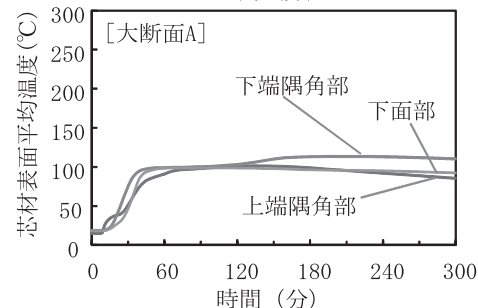
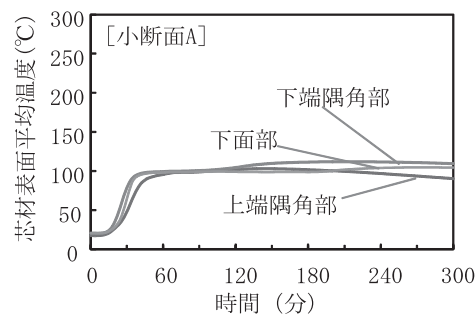


図-9 芯材表面の平均温度

す。写真-3の例のように，小断面，大断面ともに芯材に炭化は見られなかった。最大たわみ量，最大たわみ速度は，規定値以下であった。これらの結果より，1時間耐火認定の性能評価試験に合格し，1時間の耐火認定を取得した。

5. 柱梁接合部の耐火性能の確認

図-2に示した2種類の接合部について，1時間の耐火性能を満たす被覆仕様を検討し加熱実験を実施し

た。接合部は図-3と同様の仕様とし、柱部材・梁部材には、図-6, 8に示した耐火木質部材を用いた。

耐火木質柱の単体は1時間耐火の認定を取得しており、耐火性能は確認されている。鉄骨梁の単体については、1時間耐火の認定を取得している耐火被覆を使用することで耐火性能を確保できる。RC接合部は、RC柱の範疇で考えれば、耐火性能が認められている。RC接合部の周囲を鋼板で囲った接合部では、接合部の周囲を鉄骨梁と同等の耐火被覆を施している。このように、接合部の各構成要素については1時間の耐火性能がある。そのため実験では、鋼材から芯材への熱伝導、RC接合部のコンクリートから芯材への熱伝導、RC接合部と耐火木質柱境界からの熱侵入に着目し、1時間の加熱実験を実施し、芯材が炭化しないかどうかを確認した。

図-2のうち木質柱-鉄骨梁架構（耐火木質柱-RC接合部-鉄骨梁で構成）の接合部試験体の概要を図-10に示す。鉄骨梁とRC接合部は耐熱ロックウールで被覆した。RC接合部の被覆は、耐火木質柱との境界からの熱侵入防止のため、コンクリートと耐火木質柱の境界面から20mm下まで被覆した。加熱は、ISO834の標準加熱温度時間曲線に準じて1時間実施した。その後、試験体温度が低下するまで炉内で放冷した。

写真-4に加熱後の試験体の状況を、図-11にコンクリート境界部の芯材表面、図-12に鋼材の平均温度の時間変化をそれぞれ示す。コンクリート境界部の芯材表面の平均温度は、最大で160℃程度であった。図-12に示すように鉄骨梁下フランジの温度は400℃以上に達するが、鉄骨梁と芯材を接合する台座の温度は、100℃程度に抑えられた。これは、コンクリートの吸熱効果により鋼材から芯材への熱伝導が抑制されたためであると考えられる。芯材に炭化は見られなかった。以上の結果より、耐火木質柱-RC接合

部-鉄骨梁の接合部について1時間の耐火性能を有することを確認した。

木質柱-木質梁架構の接合部試験体については、耐火性能に影響する要因として次の項目が考えられる。

- ・RC接合部と耐火木質梁との間のクリアランス部か

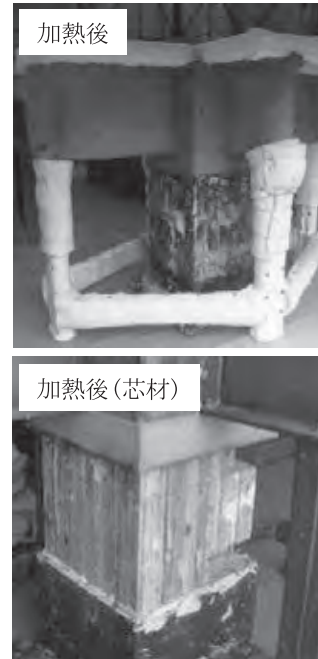


写真-4 加熱後の状況

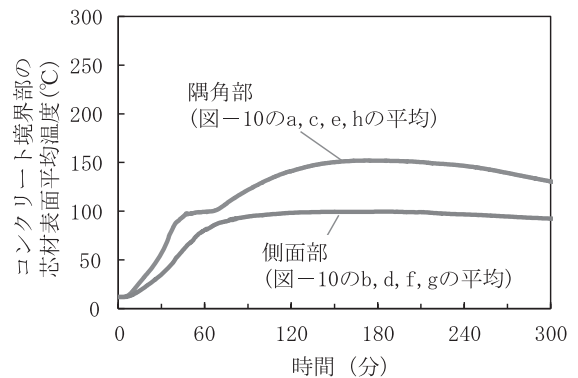


図-11 コンクリート境界部の柱芯材表面の平均温度

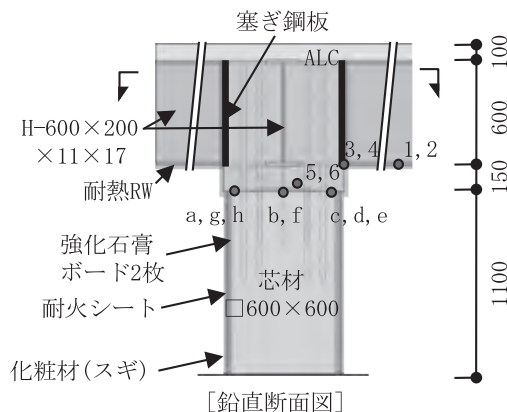
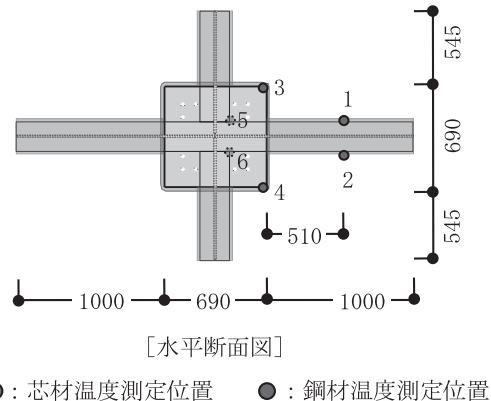


図-10 試験体概要 (木質柱-鉄骨梁架構接合部)



● : 芯材温度測定位置 ● : 鋼材温度測定位置

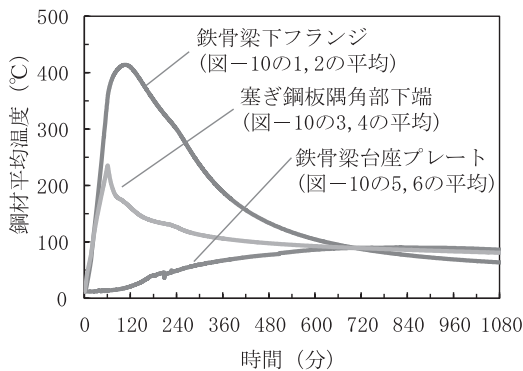


図-12 鋼材の平均温度

らの熱侵入

- ・ RC 接合部と耐火木質梁を接合する鋼材を介した熱侵入
- ・ RC 接合部から耐火木質柱の芯材への熱伝導による熱侵入
- ・ RC 接合部と耐火木質柱との境界部からの熱侵入

耐火木質梁と RC 接合部の間のクリアランス部からの熱侵入は、荷重することによりクリアランスが大きくなる可能性があるため、本実験は荷重加熱実験とした。

図-2 のうち木質柱-木質梁架構（耐火木質柱-RC 接合部-耐火木質梁で構成）の接合部試験体の概要を図-13 に示す。RC 接合部周りは、強化石膏ボード、合板、および化粧材で被覆した。ただし、コンクリートと耐火木質柱の境界から耐火木質梁下面までは、境界部からの熱侵入を防ぐため、耐火木質柱と同じ被覆仕様とした。RC 接合部と梁の間のクリアランス部は耐熱ロックウールを詰めた。

加熱は ISO834 の加熱曲線に準じて 1 時間実施した。その後、試験体温度が低下するまで炉内で放冷した。柱の荷重荷重は、柱芯材の長期許容応力度に相当する値とした。梁はドリフトピン接合部が最も降伏しやすいため、梁の荷重荷重はドリフトピン接合部に長期許容曲げモーメント相当の荷重がかかる値とした。荷重は加熱開始後 270 分頃まで続けた。

加熱後の試験体の状況を写真-5 に、コンクリー

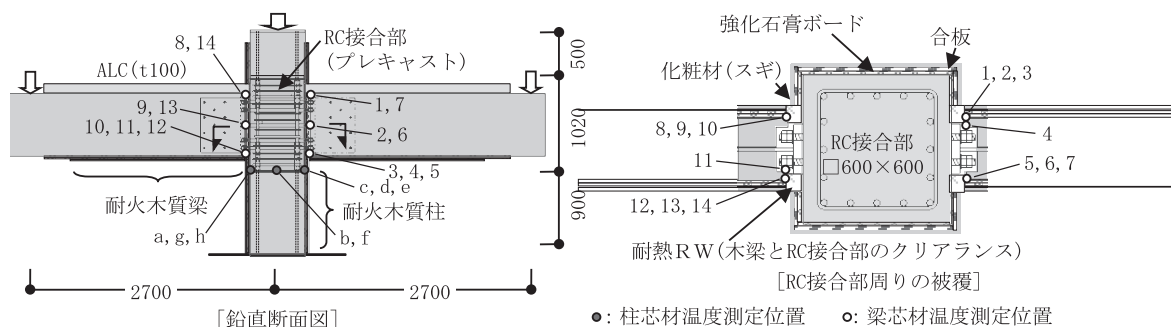


図-13 試験体概要 (木質柱-木質梁架構接合部)

ト境界部の柱芯材表面の平均温度の時間変化を図-14 に、接合部近傍の梁芯材表面の平均温度の時間変化を図-15 に示す。柱芯材に炭化は見られなかった。接合部近傍の梁芯材の下端隅角部に局所的に変色が見られたが、荷重支持性能に影響はなかった。以上の結果より、耐火木質柱-RC 接合部-耐火木質梁の接合部について、柱および梁に荷重をした状態で加熱実験を実施し、荷重支持性能が確認された。

6. おわりに

ハイブリッド架構の構築に必要な柱梁接合部については、RC 系の接合部パネルを開発し、その構造性能、耐火性能を実験により確認できたことで、耐火木質柱-鉄骨梁・RC 梁、耐火木質柱-耐火木質梁のいずれのタイプのハイブリッド架構についても架構実現の目途が立った。

耐火木質部材については、柱部材、梁部材、柱梁接

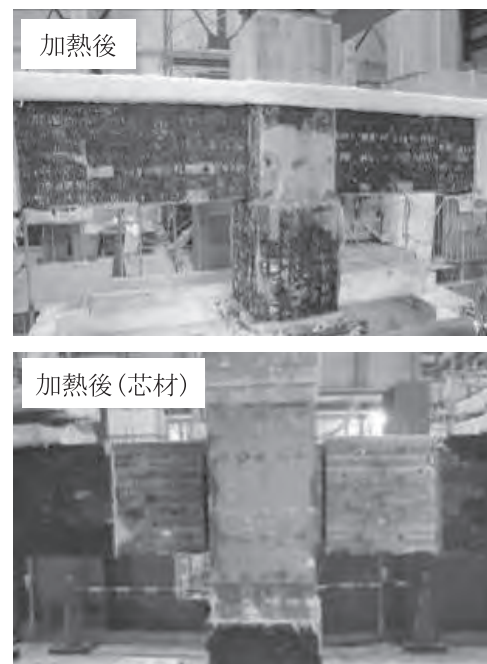


写真-5 加熱後の状況

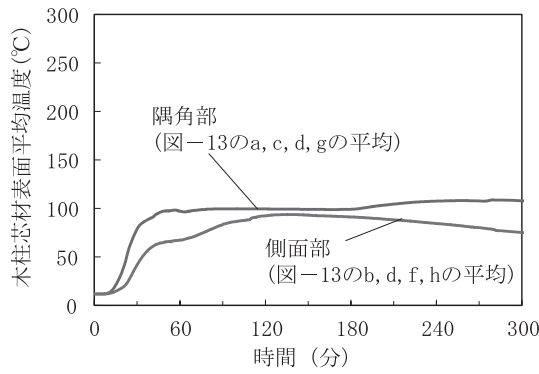


図-14 コンクリート境界との柱芯材表面の平均温度

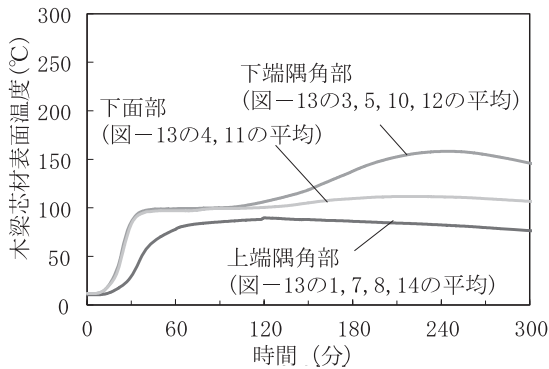


図-15 RC 接合部側の梁端部芯材表面の平均温度

合部とも1時間耐火性能を満足することを確認し、耐火木質柱-RC梁・鉄骨梁、耐火木質柱-耐火木質梁など各種のハイブリッド架構の実用化が可能となった。

本開発による耐火木質柱・梁は、燃え止まり層の厚さを従来よりも2~4割程度薄くでき、よりスリムな部材として市場提供が可能である。

謝 辞

本研究の一部は国土交通省平成27年度住宅・建築関連先導技術開発助成事業による補助を受けて、清水建設(株)と菊水化学工業(株)が共同で実施した。ここに記し、心より感謝いたします。

JCMA

《参考文献》

- 1) 貞広ほか：木質ハイブリッド接合部の開発 その3 Glued-in Rod 接合部の追加引抜実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2016年8月, pp.115~116
- 2) 津畑ほか：木質ハイブリッド接合部の開発 その4 Glued-in Rod 接合部の追加曲げせん断実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2016年8月, pp.117~118
- 3) 日本建築学会：木質構造規準・同解説 (2006年), p.225

【筆者紹介】

河内 武 (かわち たけし)
清水建設(株)
技術研究所 建設基盤技術センター
主任研究員

