

2時間耐火木鋼梁の開発

山下 平祐 森田 武 奥山 孝之 遠藤 智紀 広瀬 景一
(技術研究所) (技術研究所) (技術研究所) (技術研究所) (設計本部)
貞広 修 水落 秀木 下錦田 聰志 内藤 純 池田 賢介
(設計本部) (設計本部) (設計本部) (設計本部) (設計本部)

Development of 2-hours Fire Resistant Steel Beam Protected by Wood

Heisuke Yamashita, Takeshi Morita, Takayuki Okuyama, Tomoki Endo, Keiichi Hirose, Osamu Sadahiro, Hideki Mizuochi, Satoshi Shimonishikida, Jun Naito and Kensuke Ikeda

鉄骨梁を木材で耐火被覆した耐火木鋼梁は、意匠性と耐火性能を兼ね備えた構造である。この耐火木鋼梁を使用して中高層木質建築の更なる普及・展開を図るべく、2時間の耐火性能を有する耐火木鋼梁の開発および案件適用を行った。開発においては、耐火実験と解析により、被覆材構成、せっこうボードの厚さおよび鉄骨梁寸法の影響を検討することで、木材を合理的に活用しながら耐火性能を満足する仕様を見出し、2時間耐火認定を取得した。また、開発した2時間耐火木鋼梁を高層木造ハイブリッド建築に適用した。

A fire resistant steel beam protected by wood is a structure that combines architectural aesthetics and fire resistance performance. To further promote the widespread use and deployment of mid-to-high-rise timber buildings, we developed and applied a 2-hours fire resistant steel beam protected by wood, and this paper details its implementation. In the development process, through fire tests and analysis, we identified specifications that satisfy fire resistance performance while rationally utilizing timber, and we successfully obtained 2-hour fire resistance certification. Furthermore, the beam was applied to a tall hybrid-structure wooden building.

1. はじめに

建設事業における環境負荷低減を目的とし、「脱炭素社会の実現に資する等のための建築物等における木材の利用の促進に関する法律」が施行されるなど、建築物への木材利用が推進されている。耐火性能が求められる建築物の柱・梁などの部材に木材を利用する場合、耐火被覆した木材を構造部材とする方法と、構造部材である鉄骨を木材で耐火被覆する方法がある。前者はせっこうボード等で耐火被覆した構造用集成材^{例えば¹⁾}

に適用していくためには、2時間耐火認定の取得が必要となる。

当社では、中高層木質建築の更なる普及・展開を図り、建築分野でのカーボンニュートラル実現に貢献するため、2時間耐火木鋼梁を開発するとともに、高層木造ハイブリッド建築に適用した。本報ではこれらの実施内容について報告する。



2. 開発の内容

2.1 開発の工程

2時間耐火木鋼梁の開発工程を図-2に示す。いずれの耐火実験も、耐火炉で2時間の加熱および放冷を行い、試験体が表-1の性能を満足することを目

標とした。本開発で目標とした許容値は、耐火性能評価における規定値³⁾等に倣った。本章では、一連の実験結果を以下の要因毎に整理し、次節以降に報告する。

- (1)被覆材構成の影響(2.2節)
- (2)せっこうボード(被覆材)の厚さの影響(2.3節)
- (3)鋼材寸法の影響(2.4節)

2.2 被覆材構成の影響

本開発では、最初に被覆材構成の選定を行った。被覆材構成の候補の一つは、カラマツ材のみでの被覆である。これは1時間耐火認定と同様の被覆構成であり、火災時にはカラマツ被覆材が燃焼し、断熱性能の高い炭化層を形成することで、鉄骨梁の温度上昇を抑制する。一方、2時間加熱を受ける場合、カラマツ被覆材が燃え止まらない可能性があるため、カラマツ被覆材に加え、不燃材による燃え止まり層を設ける被覆材構成も設定した。

燃え止まり層の有無で比較すると、施工性においては構成材料が少ない燃え止まり層なし仕様が優れるが、耐火性は試験体内部への燃焼進行を抑えられる燃え止まり層あり仕様が優れると考えられる。

2.2.1 試験体

試験体に使用する鉄骨梁の断面はH-400×150×12×16mm、試験体の長さは1mとした。試験体の上端には、床版を想定したALCパネル(厚さ100mm)を取り付けた。試験体仕様の一覧を表-2、被覆材料の仕様を表-3、試験体図を図-3に示す。

カラマツのみで被覆した仕様は被覆厚をパラメータとした。被覆厚は2時間加熱での試験体の受熱量を考慮し、1時間耐火認定の被覆厚(梁側面50mm、梁下面80mm)の2.3倍を基準とした(試験体L1)。また、被覆が厚いほど断熱性能は向上するが、可燃物量の増加により加熱後の燃焼継続が長期化する可能性があるため、梁下面の被覆厚を梁側面に合わせて縮小した仕様も設定した(試験体L2)。

燃え止まり層に使用する材料は、難燃処理木材(試験体R1、R2)、またはせっこうボード(試験体G1)とした。難燃処理木材の厚さは30mm、せっこうボードの厚さは21mmとした。燃え止まり層を用いる場合のカラマツ被覆材厚さは、加熱終了後の燃焼継続を抑制するため、2時間加熱で未燃焼部が残らない厚さを想定して70mmとした。

カラマツ被覆材と燃え止まり層は、鉄骨梁のフランジ間に充填した木材(以下、アンコ材)にねじで留め

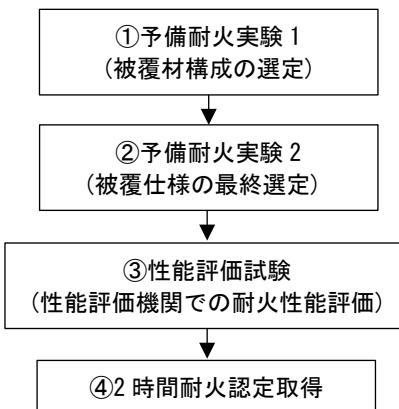


図-2 開発の工程

表-1 耐火実験における目標性能

鉄骨梁 鋼材温度	450°Cを超えないこと
鉄骨梁 たわみ量*	$L^2/400d$ mm以下 (L:試験体支点間距離[mm], d:鉄骨梁せい[mm])
燃え止まり性状	被覆材に使用した木材の燃焼が加熱終了後、一定時間以上継続せず燃え止まること

(*載荷実験のみ適用)

表-2 試験体仕様および実験結果(被覆材構成の影響)

試験 体	カラマツ被覆材 厚さ t_L [mm]	燃え止まり層 厚さ t_B [mm]	アンコ材 の仕様	実験結果	
				最高 鋼材温度	燃え止ま り性状
L1	側面 115 下面 180	—	—	731°C	×
L2	側面 115 下面 115	—	—	178°C	×
R1	70	難燃処理木材 30	全長充填	388°C	×
R2	70	難燃処理木材 30	分割充填	178°C	○
G1	70	せっこうボード 21	全長充填	772°C	×

表-3 被覆材料の仕様(試験体 L1, L2, R1, R2, G1)

材料	仕様
カラマツ被覆材	材料: カラマツ構造用集成材 気乾密度: 0.55g/cm ³
難燃処理木材	材料: リン酸系薬剤処理スギ板 (準不燃材料認定品) 気乾密度: 0.61g/cm ³
せっこうボード	材料: 強化せっこうボード(GB-F(V))
アンコ材	材料: 構造用集成材 気乾密度: 0.52g/cm ³

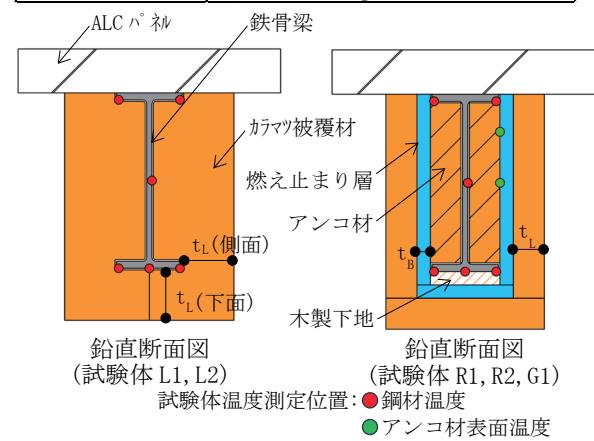


図-3 試験体図(試験体 L1, L2, R1, R2, G1)

付けた。アンコ材は、試験体全長に充填する仕様と、被覆材留付部のみに分割して充填する仕様の2種類を設定した(写真-1)。

2.2.2 実験方法

実験は当社技術研究所の耐火炉で実施した。試験体は、ISO834-1に規定される標準加熱曲線に従い2時間の加熱を行った後、炉内で放冷した。1回の加熱で3体の試験体を同時に加熱し、燃え止まり性状を把握するため、放冷は最長で実験開始後3000分まで行った。試験体の設置状況を図-4に示す。なお、実際には仕様の異なる12体の試験体に対して実験を実施したが、本報では表-2に示す5体の実験結果を抜粋して報告する。

2.2.3 実験結果

実験後の試験体を写真-2、実験時の試験体温度を図-5に示す。図-5中の破線は鋼材温度の許容温度(表-1)を表し、以降の図-11、図-15も同様である。

1) カラマツのみで被覆した仕様(試験体 L1、L2)

試験体L1とL2を同時に加熱した。いずれの試験体も、加熱終了後はカラマツ被覆材の燃焼が継続した。実験開始後1800分の時点で、試験体L1では燃焼が進行したカラマツ被覆材がほぼ脱落し、試験体L2はカラマツ被覆材の局所的な赤熱が継続していた。2910分に試験体L2の赤熱が見られなくなったため、3000分に実験を終了した。

実験後の試験体L1は、カラマツ被覆材がなくなり鉄骨梁が全て露出していた。試験体L2は、カラ



試験体全長に充填 分割して充填
写真-1 アンコ材の設置状況

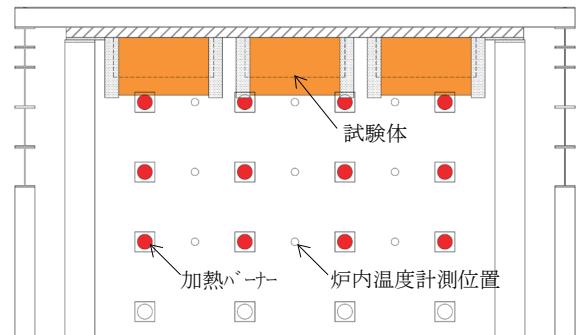


図-4 試験体設置状況(試験体 L1, L2, R1, R2, G1)

マツ被覆材が燃え込み、鉄骨梁の下フランジが一部露出していた。また、実験後の観察中に、残存した炭化層において局所的な赤熱が再出した。

試験体L1の鋼材温度は、720分頃までは被覆が薄い試験体L2よりも低く推移するが、その後、1800分に至る過程でカラマツ被覆材が燃焼・脱落し、許容値を超える730°Cまで上昇した。試験体L2の鋼材温度は許容値を超えたなかった。

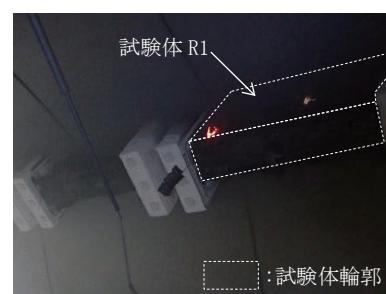
実験結果から、カラマツ材のみで被覆した仕様で2時間加熱を行った場合、カラマツ被覆材の燃焼が継続し、燃え止まりが困難になることが確認できた。カラマツ被覆材が加熱されて形成される炭化層は熱



試験体 L1



試験体 L2



試験体 R1
(炉内で燃焼が継続する状況)



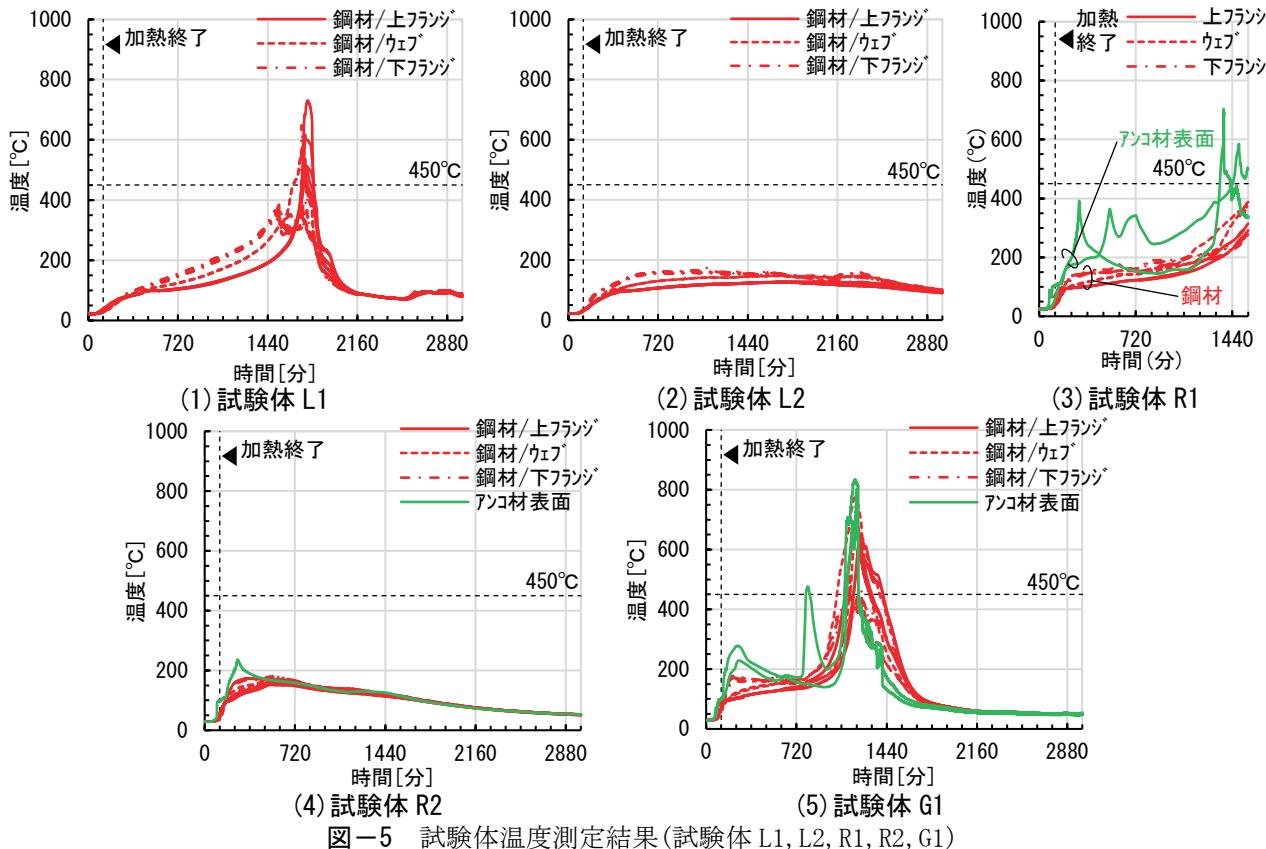
試験体 R2



試験体 R2(アンコ材の状況)
写真-2 実験後の試験体(L1, L2, R1, R2, G1)



試験体 G1



伝導率が $0.1\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 以下⁴⁾ と断熱性能が高く、加熱終了後における試験体内部から外部への熱の放出を抑制するため、内部の未炭化部分の燃焼が継続することが指摘されている⁵⁾。2時間加熱の場合、1時間加熱時よりも形成される炭化層が厚くなるため、外部への熱の放出はより抑制される。このため、カラマツ被覆材が特に厚い鉄骨梁フランジ間部で燃焼が継続し、燃え止まりに至らなかつたと考えられる。

2) 燃え止まり層を用いた仕様(試験体 R1、R2、G1)

試験体 R2 と G1 を同時に加熱し、試験体 R1 は別の試験体と加熱した。いずれの試験体も、実験開始後 100 分頃からカラマツ被覆材の部分的な脱落が始まった。試験体 R1 と R2 は、加熱終了後も木材部分の赤熱と発炎が継続した。試験体 R1 は 1410 分に赤熱を観認できなくなったが、1465 分に再度発炎した。その後も試験体 R1 は発炎が継続したため、1560 分に実験を終了した。試験体 R2 は 1470 分に赤熱を観認できなくなり、3000 分に実験を終了した。試験体 G1 は、加熱を終了した 120 分の時点で、カラマツ被覆材が概ね脱落していた。160 分にアンコ材の燃焼によると考えられるせっこうボード目地部からの発炎が確認できた。試験体温度の推移から 1140 分頃にアンコ材が激しく燃焼したと考えられ、1470 分

にはせっこうボードがほぼ脱落し、アンコ材の燃焼が継続していることが確認できた。3000 分での実験終了時には、アンコ材は概ね焼失していた。

実験終了後、試験体 R1 は残存した難燃処理木材の内側でアンコ材の燃焼が継続していた。試験体 R2 は、難燃処理木材の一部が燃え抜け、鉄骨梁の下フランジが一部露出していた。アンコ材は、表面のみが炭化した状態で燃え止まっていた。試験体 G1 は、せっこうボードは脱落して試験体端部に引っ掛かっており、鉄骨梁は露出していた。

鋼材温度は、試験体 R2 では許容値を超えていたが、試験体 G1 では許容値を超える 772°C まで上昇した。試験体 R1 では脱炉時に 388°C であったが、アンコ材の燃焼が継続していたため、実験を継続した場合、許容値を超えていた可能性がある。

試験体 R1、R2 の実験結果から、アンコ材を試験体全長に充填するよりも、分割して充填する方が耐火性能は向上した。アンコ材を分割した場合、アンコ材の側面は鉄骨梁と難燃処理木材の間に生じる中空部に接することとなる。2.3.3 節で示すように、中空部の温度はアンコ材表面温度よりも低く推移するため、アンコ材の側面から中空部への放熱が生じていたと考えられる。これにより、アンコ材の温度上昇が抑制され耐火性能が向上したと考えられる。

2.2.4 被覆材構成の決定

実験結果を前掲の表-2に示す。アンコ材を分割し、被覆材を厚さ70mmのカラマツ被覆材と厚さ30mmの難燃処理木材の組合せにすることで2時間耐火性能が確認できた。一方、難燃処理木材はせっこうボードに比べると高価であり、コスト縮減の観点からは、せっこうボードを燃え止まり層にすることが望ましい。そのため、厚さ30mmの難燃処理木材と同等の断熱性能を得られるせっこうボードの厚さを熱伝導解析により推定した。

厚さが21mmのせっこうボードを燃え止まり層とした試験体G1と、難燃処理木材を燃え止まり層として耐火性能が確認できた試験体R2について、木材の熱分解が開始する前のアンコ材表面温度を比較すると、実験開始後210分の時点で前者の方が約35°C高い(図-6)。そのため、表面にせっこうボードを張ったアンコ材をモデル化し(図-7)、厚さが21mmの時よりもアンコ材表面温度が35°C以上低くなるせっこうボードの厚さを、一次元差分法熱伝導解析により検討した。せっこうボードは文献6)、木材は文献7)の熱物性値を用いた。図-8に解析結果を示す。せっこうボードの厚さを30mmにすることで、アンコ材表面温度は35°C以上低下し、厚さ30mmの難燃処理木材と同等の断熱性能が得られる可能性があることが確認された。

また、本開発における耐火木鋼梁の耐火被覆の施工に関しては、現場作業の軽減のため、工場での被覆施工を想定しているが、工場施工した耐火木鋼梁を建築現場で取り付ける際に表面が汚れてしまうことが懸念される。そのため、主たる被覆を工場施工した耐火木鋼梁を建築現場で取り付けた後に、耐火木鋼梁表面を化粧木材で仕上げることとした。その

表-5 被覆材料の仕様
(試験体3030, 3025, 2525, 650, 1000, 1200)

材料	仕様
カラマツ被覆材	材料: カラマツ構造用集成材 気乾密度: 0.45g/cm ³
せっこうボード	材料: 強化せっこうボード(GB-F(V))
化粧木材	材料: スギ製材 気乾密度: 0.35g/cm ³
アンコ材	材料: カラマツ構造用集成材 気乾密度: 0.45g/cm ³

表-4 試験体仕様および実験結果(せっこうボードの厚さの影響)

試験 体*	せっこうボード厚さt _G [mm]		木栓仕様		鉄骨梁仕様		実験結果		
	側面	下面	側面	下面	断面寸法[mm]	断面形状係数	最高鋼材温度	最大たわみ量	燃え止まり性状
3030	30(=15+15)	30(=15+15)	あり	あり	H-350×150×12×19	163.1	177°C	5.4mm	○
3025	30(=15+15)	25	なし	あり			233°C	9.4mm	○
2525	25	25	あり	あり			306°C	7.3mm	○

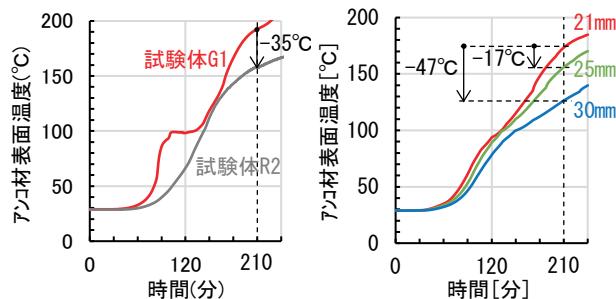


図-6 アンコ材表面温度の比較(試験体G1, R2)

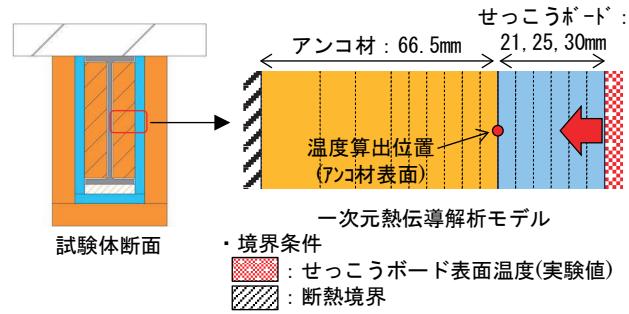


図-7 热伝導解析モデルの概要

際の化粧木材とカラマツ被覆材の総厚は、実験で検討した70mmとするが、化粧木材については、比較的安価であり、案件適用時に入手しやすいスギ材などの多様な樹種から選択できるようとする。

以上より、2時間耐火木鋼梁の被覆構成は、化粧木材(厚さ15mm)、カラマツ被覆材(厚さ55mm)、およびせっこうボード(強化せっこうボードGB-F(V)、厚さ30mm)を基準とした。また、以降に報告する耐火実験では、試験体の化粧木材として、加熱時に脱落しやすく、耐火性能が低下する可能性があるスギ材を用いることで、安全側の耐火性能評価を行うこととした。

2.3 せっこうボード(被覆材)の厚さの影響

2.2節で決定したせっこうボードを燃え止まり層とした被覆仕様について、より施工性に配慮した仕様にすることを目指し、せっこうボードの厚さや張り方を実大耐火実験により検討した。

2.3.1 試験体

試験体仕様を表-4、被覆材料の仕様を表-5、試

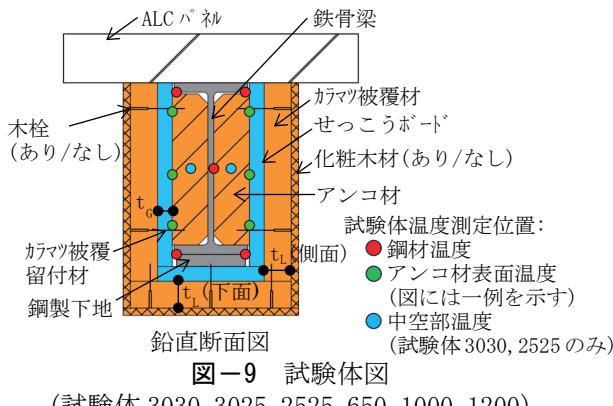


図-9 試験体図
(試験体 3030, 3025, 2525, 650, 1000, 1200)

験体図を図-9に示す。表-4中の試験体名は、梁の側面および下面のせっこうボード厚さの値を組み合わせたものとした。また、表-5、図-9は、後述する実験の試験体(650、1000、1200)を含む。鉄骨梁の断面は、1時間耐火認定仕様の最小寸法であるH-350×150×12×19mmとした。被覆材は化粧木材(厚さ15mm)、カラマツ被覆材(厚さ55mm)、およびせっこうボードの組合せとした。せっこうボードとカラマツ被覆材は、アンコ材および鉄骨梁下面に溶接した鋼製下地にねじで留め付けた。アンコ材は被覆材留付位置のみに分割充填した。せっこうボードの厚さは、梁の側面、下面共に15mm二枚張り(総厚30mm)を基準とした(試験体3030)。また、より施工性に配慮した仕様として、梁の下面のみ25mm一枚張りの仕様(試験体3025)と、梁の側面、下面共に25mm一枚張りの仕様(試験体2525)を設定した。せっこうボードを二枚張りとする場合は、上張りと下張りの目地位置をずらした。さらに、カラマツ被覆留付材を熱橋としたアンコ材への入熱を抑制するため、試験体3030と試験体2525は全てのねじ頭部、試験体3025は梁下面のねじ頭部を木栓で被覆した。試験体の全長は5.5mとして、加熱される4mの範囲を耐火被覆した。試験体の上端には、床版を想定したALCパネル(厚さ100mm)を取り付けた。

2.3.2 実験方法

実験は、(一財)建材試験センターの耐火炉で実施した。加熱温度条件は2.2.2節と同様とし、試験体の加熱

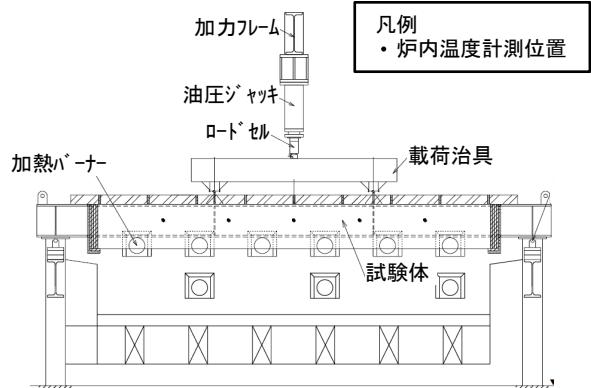


図-10 試験体設置状況(試験体 3030, 3025, 2525)

は一体毎に行った。また、長期荷重を想定した載荷を行い、試験体の非損傷性を確認した。載荷は単純支持での3等分2線載荷とし、加熱に先立って所定の荷重を載荷して実験終了まで一定に保持した。載荷荷重は等曲げ区間に長期許容曲げモーメントが生じるよう定めた。試験体の設置状況を図-10に示す。加熱開始から実験終了までの時間は、木質部材の耐火性能評価試験で慣例的に採用されている24時間を目安とした。

2.3.3 実験結果

試験体2525と試験体3030は実験開始後115分頃、試験体3025は実験開始後90分頃にカラマツ被覆材の脱落が始まった。加熱終了後も、残存したカラマツ被覆材の燃焼や赤熱が継続するが、300分から420分にかけてカラマツ被覆材はほぼ全体が脱落した。試験体2525では、試験体温度の推移から420分～1020分頃にせっこうボード縦目地部のアンコ材の燃焼が進行したと考えられ、570分にアンコ材の燃焼によると考えられる試験体内部からの煙が確認された。全ての試験体において、1440分を目安に炉内を確認し、試験体の赤熱や発煙が確認されなかつたため実験を終了した。

実験後の試験体を写真-3に示す。実験後の試験体3030は、一部のアンコ材の表面のみが炭化した状態で燃え止まっており、炭化深さの平均は7mmだった。試験体3025は、ほぼ全てのアンコ材の表面が炭化した状態で燃え止まっており、炭化深さの



試験体 3030



試験体 3030
(アンコ材の状況)



試験体 3025
(アンコ材の状況)



試験体 2525
(アンコ材の状況)

写真-3 実験後の試験体(3030, 3025, 2525)

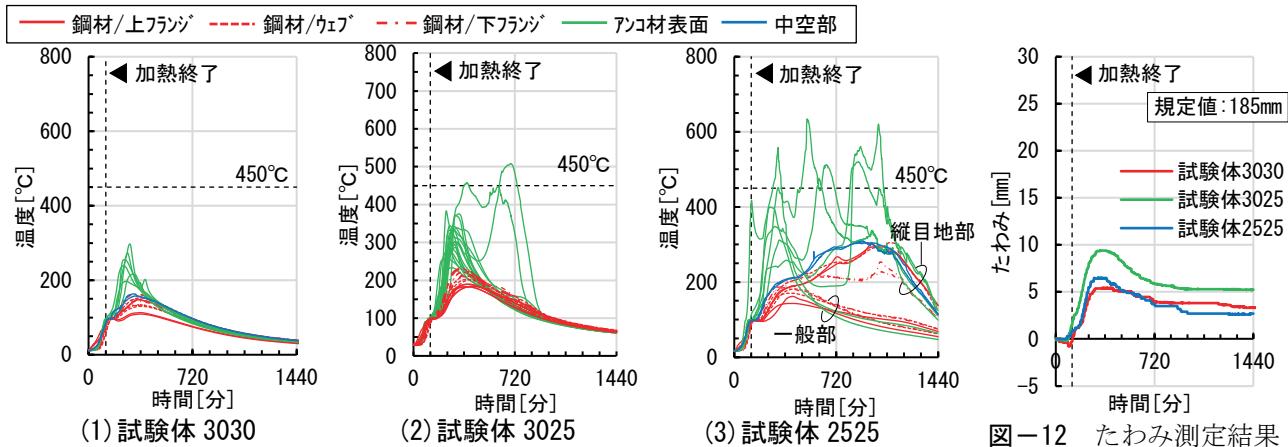


図-11 試験体温度測定結果(試験体 3030, 3025, 2525)

平均は 17mm だった。試験体 3025 は、試験体 3030 よりも梁下面のせっこうボードが薄く試験体内部の温度が上がりやすいことと、梁側面のカラマツ被覆留付材を熱橋としたアンコ材への入熱が生じることで、アンコ材の炭化がより進行したと考えられる。また、試験体 3030 よりもカラマツ被覆材の脱落開始時間が 20 分程度早かったことも影響している可能性がある。試験体 2525 は、ほぼ全てのアンコ材が炭化しているのに加え、せっこうボードの縦目地部に位置するアンコ材が焼失していた。試験体 2525 は、他の試験体よりもアンコ材表面のせっこうボードが薄い。また、せっこうボードが 1 枚張りのため、せっこうボードを 2 枚張りとして上張りと下張りの目地位置をずらした他の試験体に比べ、目地を介したアンコ材への入熱が大きくなる。これらの要因により、試験体 2525 ではアンコ材が焼失に至ったと考えられる。

実験時の試験体温度を図-11、鉄骨梁のたわみ量を図-12 に示す。全ての試験体が、目標とした鋼材温度およびたわみ量の許容値を満足した。試験体 2525 の鋼材温度は、アンコ材の燃焼進行により、せっこうボード目地部において 306°C に達したが、せっこうボード目地部以外では 190°C 以下に収まった。また、被覆材の中空部温度は鉄骨梁温度と同程度で、アンコ材表面温度よりも低く推移した。

2.3.4 せっこうボードの厚さの決定

実験結果を前掲の表-4 に示す。せっこうボード

図-12 たわみ測定結果
(試験体 3030, 3025, 2525)

の被覆厚を検討した試験体は全て非損傷性の許容値を満足し、耐火性能が確認できたが、より火災安全性に配慮した仕様を目指し、アンコ材が焼失に至らない仕様を選定することとした。そのため、梁側面のせっこうボードは厚さ 15mm 二枚張りで、上張りボードと下張りボードの目地をずらす仕様とした。また、梁下面のせっこうボードは施工性に配慮し、厚さ 25mm の一枚張りとした。

2.4 鋼材寸法の影響

一般的な鉄骨梁の耐火実験では、梁の断面寸法が大きいほど、鋼材温度が上がりにくく耐火性能は向上する。一方、耐火木鋼梁の場合、梁の断面寸法が大きくなることで、可燃物である木材の使用量も増加するため、木材の燃焼継続時間の長期化とそれに伴う試験体温度の上昇が懸念される。また、鉄骨梁の耐火試験では、鉄骨梁の断面図形状係数(Hs/As、図-13)が大きいほど、温度が上がりやすいうことが知られている⁸⁾。これらの知見に基づき、木質部材の耐火性能評価では、最小断面を含む複数の断面仕様について耐火性能を確認する必要がある。本開発においても、2.3 節で報告した最小断面に加え、表-6

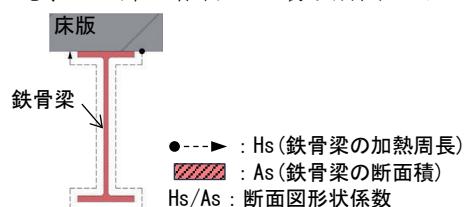


図-13 加熱される鉄骨梁の断面形状係数

試験 体	鉄骨梁仕様		カラマツ被覆材 厚さ t_c [mm]	化粧木材 の有無 (厚さ [mm])	木栓仕様		実験結果	
	断面寸法 [mm]	断面形状 係数			側面	下面	最高 鋼材温度	燃え止 まり性状
650	H-650×200×12×19	163.8	側面・下面 55	あり(15)	なし	あり	802°C	×
1000	H-1000×300×16×19	133.6	側面・下面 55	あり(15)	なし	あり	126°C	○
1200	H-1200×400×16×19	134.3	側面 70 下面 85	なし	あり	あり	123°C	○

に示す3種類の試験体断面で耐火実験を行った。表-6中の試験体名は、試験体に使用した鉄骨梁の梁寸法の値とした。

2.4.1 試験体

試験体断面は図-9、被覆材料の仕様は表-5と同じである。試験体1000と試験体1200の鉄骨梁の寸法は、2時間耐火認定が必要となる建物部分(最上階からの階数が10~14の階)で想定される最小寸法および最大寸法とした。また、試験体650の鉄骨梁の寸法は、2.3節の試験体の鉄骨梁(H-350×150×12×19mm)と試験体1200の鉄骨梁(H-1200×400×16×19mm)の中間程度の寸法とした。全ての試験体のせっこうボード被覆は、2.3.4節で決定した仕様とした。木被覆材の仕様は、試験体650と試験体1000は、2.2.4節で決定した厚さ15mmの化粧木材と厚さ55mmのカラマツ被覆材の組合せであるのに対し、最大断面となる試験体1200は、カラマツ被覆材が厚くなる場合を想定し、梁側面は厚さ70mm、梁下面は厚さ85mmのカラマツ被覆材とした。試験体650の全長は5.5mとして、加熱される4mの範囲に耐火被覆を行った。試験体1000と試験体1200の全長は、耐火炉における試験体寸法の制約から全長を約1.7mとして、全範囲に耐火被覆を行った。試験体の上端には、床版を想定したALCパネル(厚さ100mm)を取り付けた。

2.4.2 実験方法

実験は、(一財)建材試験センターの耐火炉で実施した。試験体650は2.3.2節と同じ耐火炉、試験体1000と試験体1200は炉内深さがより大きい耐火炉(図-14)を用いた。加熱温度条件は2.2.2節と同様とし、試験体の加熱は一体毎に行った。耐火炉の載荷能力の制約から、試験体への載荷は行わなかった。加熱開始から実験終了までの時間は、木質部材の耐火性能評価試験で慣例的に採用されている24時間を目安とした。



試験体 650



試験体 1000
(アンコ材の状況)



試験体 1200
(アンコ材の状況)

写真-4 実験後の試験体(650, 1000, 1200)

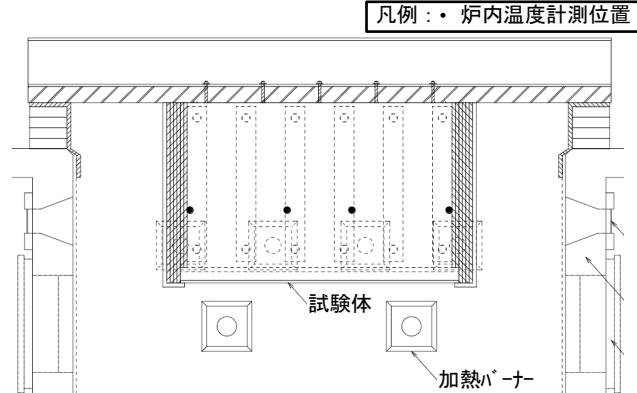


図-14 試験体設置状況(試験体 1000, 1200)

2.4.3 実験結果

カラマツ被覆材の脱落は、試験体650と試験体1000では実験開始後100分頃に始まり、カラマツ被覆材が厚い試験体1200では120分に始まった。また、カラマツ被覆材の脱落は、試験体1000が180分、試験体650が420分、試験体1200が510分に概ね完了しており、カラマツ被覆材が厚い試験体ほど脱落の開始および完了に時間を要した。試験体1000と試験体1200は、1440分に炉内を確認し、試験体の赤熱や発煙が確認されなかつたため実験を終了した。試験体650は、450分にアンコ材の燃焼の進行によると考えられる試験体内部からの発煙が確認された。試験体温度の推移から、450分以降もアンコ材の燃焼が継続、拡大したと考えられ、1440分の実験終了時にも試験体端部のアンコ材の燃焼が継続していた。

実験後の試験体を写真-4に示す。実験後の試験体1000はアンコ材の一部分に変色、試験体1200は一部のアンコ材の表面のみが炭化した状態で燃え止まっていた。試験体650のせっこうボードは、実験終了時には残存していたが、脱炉時に脱落した。実験終了後も試験体端部のアンコ材の燃焼は継続しており、その他のアンコ材は焼失していた。

実験時の試験体温度を図-15に示す。鋼材温度は、

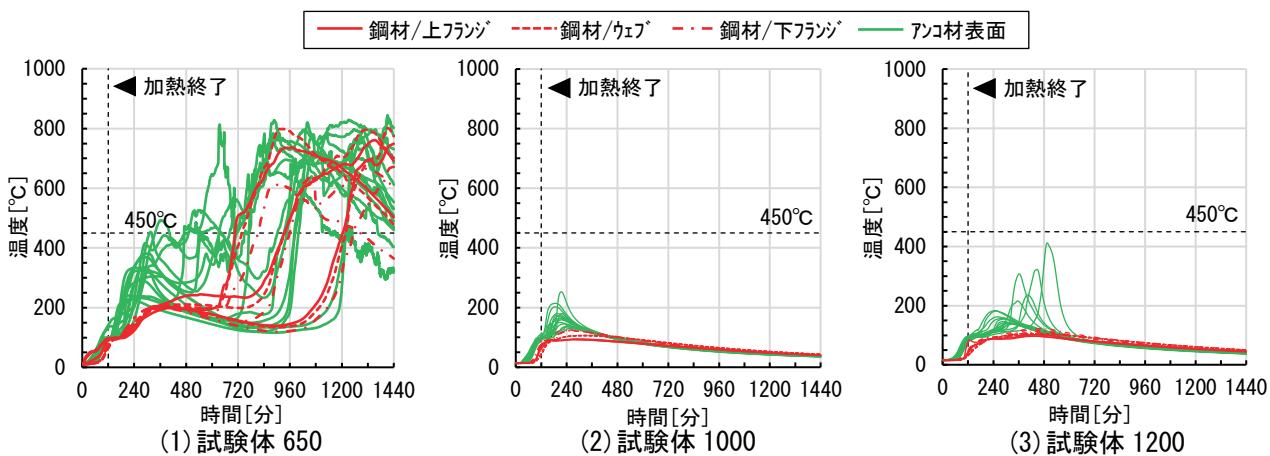


図-15 試験体温度測定結果(試験体 650, 1000, 1200)

試験体 1000、1200 が許容値を超えたのに対し、アンコ材の燃焼に伴い温度上昇した試験体 650 は許容値を超える 802°C となった。試験体 650 は、鉄骨梁の断面形状係数が最も大きく、温度が上がりやすいため、アンコ材から鉄骨梁への熱損失が生じにくく、アンコ材温度も上がりやすい可能性がある。これにより、試験体 650 はアンコ材の焼失に至ったと考えられる。アンコ材焼失を防止するためには、カラマツ被覆留付材の熱橋対策や、せっこうボードの被覆厚増加により、アンコ材への入熱を減少させる必要がある。

2.5 2 時間耐火認定の取得

一連の耐火実験の結果に基づき、アンコ材が燃え止まることで耐火性能が確認できた表-7 および図-16 の仕様で 2 時間耐火認定を取得した。近年、同

業他社においても木材を耐火被覆として使用した 2 時間耐火鉄骨梁の開発が報告されている^{9),10)}。開発に関する論文等を参考にすると、鉄骨梁のフランジ間に木材を充填しているのは当社仕様のみと推定される。このことから、当社仕様の特徴は、フランジ間に充填した木材（アンコ材）を被覆材の留付下地として利用することで、より多くの木材を合理的に使用し、CO₂の固定化に貢献することにある。

3. 2 時間耐火木鋼梁の案件適用

耐火認定を取得した 2 時間耐火木鋼梁を、高層木造ハイブリッド建築の「第一生命京橋キノテラス」（建築主：第一生命保険株式会社、竣工：2025年7月、写真-5）に適用した¹¹⁾。適用箇所は当該建物の5~8階における 17m のロングスパン梁であり、高い開放性を有する木質無柱空間を実現した（写真-6）。

表-7 2 時間耐火木鋼梁の仕様

鉄骨梁の断面寸法	H-1000×300×16×19～H-1200×400×16×19mm
耐火被覆の厚さ	化粧木材：厚さ15mm以下 カラマツ被覆材：厚さ55～70mm（梁側面） 厚さ55～85mm（梁下面） 強化せっこうボード：厚さ15mm以上二枚張り（梁側面） 厚さ25mm以上（梁下面）



写真-5 第一生命京橋キノテラスの外観



図-16 2時間耐火木鋼梁の構成

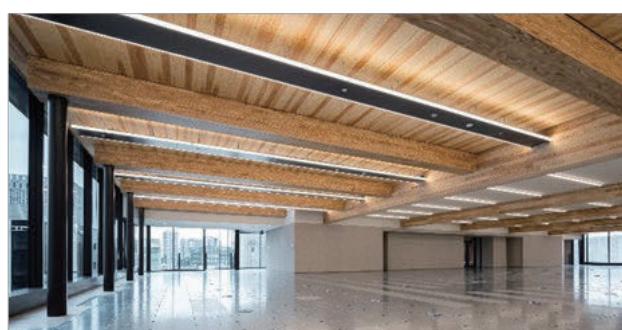


写真-6 2時間耐火木鋼梁を採用した木質無柱空間

4. まとめ

本報では、2時間耐火木鋼梁の開発および案件適用の内容について報告した。開発の過程で得られた知見は下記のとおりである。

- ・カラマツ材のみで被覆した仕様で2時間加熱を行った場合、カラマツ被覆材の燃焼が継続し、燃え止まりが困難となった。
- ・アンコ材を分割充填した場合、試験体全長に渡り充填した場合よりもアンコ材の燃焼が抑制され、耐火性能が向上した。
- ・断面形状係数が163.1以下の鉄骨梁においては、カラマツ材(厚さ70mm)と、せっこうボードまたは難燃処理木材(厚さ30mm、燃え止まり層)で被覆することで2時間耐火性能が確認できた。
- ・同じ被覆仕様でも、鉄骨梁の断面形状係数が大きいと、アンコ材の燃焼が促進される可能性がある。
今後は、断面形状係数が大きい鉄骨梁における耐火性能の確認、および被覆仕様の変更による施工性の改善に取り組む予定である。

＜参考文献＞

- 1) 広田正之, 森田武, 井戸和彦, 遠藤智紀, 水落秀木, 貞広修 : 加熱発泡材を組み込んだ耐火木質部材・接合部の性能確認と適用, 日本建築学会技術報告集, 第27巻, 第65号, pp.265-270, 2021
- 2) 遠藤智紀, 森田武, 奥山孝之, 水落秀木, 谷口尚範, 竹田拓司 : 1時間の耐火性能を有する木鋼梁の開発, 清水建設研究報告, 第98号, pp.57-66, 2020
- 3) (一財)建材試験センター : 防耐火性能試験・評価業務方法書, 2024
- 4) 大内富夫 : 木材の高温時の熱伝導率, 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿), pp.785-786, 1987
- 5) 伯耆原智世, 長谷見雄二, 斎吉大河, 高瀬椋, 上川大輔, 安井昇, 宮林正幸 : 燃え止まり型木質耐火構造部材における要求耐火時間に依らない適正な燃えしろ層厚さ 燃え止まり層に難燃薬剤処理スギ集成材を用いた小型試験による検討, 日本建築学会環境系論文集, 第84巻, 第761号, pp.607-614, 2019
- 6) 日本建築学会 : 鋼構造耐火設計指針, 2017
- 7) Eurocode5 : Design of timber structures – Part 1-2: General -Structural fire design, 2005
- 8) (一財)日本建築センター 他 : 2001年版耐火性能検証法の解説及び計算例とその解説, 2001
- 9) 青木慧, 蛇石貴宏, 西村俊彦, 大橋宏和, 花井厚周, 飯田智裕, 林賢一 : 2時間耐火性能を有する木被覆鉄骨梁に関する研究 その2 : 実大実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), pp.257-258, 2024
- 10) 田村純太朗, 安藤秀平, 榎本浩之, 丹羽博則 : 木質系耐火被覆を施した鋼梁の耐火性能 その1 : 無開孔梁の2時間載荷加熱実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), pp.105-106, 2025
- 11) 下錦田聰志, 山下平祐, 遠藤智紀, 鈴木圭一 : 高層木造ハイブリッド構造の開発と適用 第一生命京橋キノテラス, 建築防災, pp.13-18, 2025.9