

1 時間の耐火性能を有する木鋼梁の開発

遠藤 智紀 森田 武 奥山 孝之 水落 秀木 谷口 尚範 竹田 拓司
(技術研究所) (技術研究所) (技術研究所) (設計本部) (設計本部) (北陸支店)

Development of One-Hour Fire Resistant Steel Beam Protected with Wood Covering

Tomoki Endo, Takeshi Morita, Takayuki Okuyama, Hideki Mizuochi, Hisanori Taniguchi
and Takuji Takeda

鉄骨梁を木材(以下、木質被覆材)で耐火被覆した1時間の耐火性能を有する木鋼梁を開発することを目的として、木質被覆材の樹種と被覆厚さをパラメータとした加熱試験、木質被覆材にヒバ・カラマツを用いた載荷加熱試験および拡大断面検証試験を行った。その結果、ヒバでは被覆厚さを80mm、カラマツでは50mmとすることにより、1時間の耐火性能を達成することができた。本開発の成果として、耐火構造部材の大臣認定を取得した。

In order to develop one-hour fire resistant steel beams protected with wood covering, we conducted fire resistance tests on sample beams, taking the species of wood and the thickness of the wood covering as parameters. Additionally, loaded fire resistance tests and fire resistance tests to verify cross-sectional enlargement were carried out using both hiba cypress and larch coverings. The results confirm that one-hour fire resistance can be achieved with a hiba cypress covering 80 mm thick and a larch covering 50 mm thick. As a result of this development, we obtained ministerial certification for the required one-hour fire resistance of steel beams protected with wood.

1. はじめに

1.1 背景・目的

近年、環境への配慮や森林資源の適正な整備・保全等の観点から、建築物の木造化や木質化のニーズが高まっている。また、木材を活用した建築物の火災安全性に関する法整備や研究開発が進み、中高層建築や大空間建築への木材利用に関心が寄せられている。これらのニーズに応えるべく、当社では木鋼梁の開発を進めている。

木鋼梁は、鉄骨梁を木材(以下、木質被覆材)で耐火被覆した耐火構造部材である。火災中は木質被覆材が燃え進むが、火災後に燃え止まることで、鉄骨梁の温度上昇を抑制し、崩壊を防ぐ狙いがある。また、荷重支持部材に鉄骨梁を用いることで大スパンの架構を実現できる。さらに木を現しにでき、高い意匠性が期待できる。

既に、耐火性能を有する木鋼ハイブリッド部材が開発されてきているが(例えば1)-4)、木質被覆材の樹種や被覆厚さ等の仕様は限定される。また、鉄骨梁の梁成が1m程度の大断面となる木鋼梁の耐火性能に関する知見は少ない。

そこで、木質被覆材の樹種の多様化、被覆厚さの合理化・スリム化、木鋼梁の大断面・大スパンの観点から、1時間の耐火性能を有する木鋼梁

を開発することを目的とした。

本報では、開発における一連の試験結果を報告するとともに、これらの試験結果に基づく、木鋼梁の被覆仕様と鋼材温度に関する一考察を述べる。

1.2 木鋼梁の概要

本開発における木鋼梁の概要を図-1に示す。H形鋼の断面形状に沿って加工した木質被覆材をH形鋼に嵌め込み、梁の上・下部の被覆材の合わせ面を接着剤で貼り合わせた。さらに、H形鋼と木質被覆材をラグスクリューで留め付けて一体化させ、ラグスクリューを施工した孔に埋木を埋め込んだ。木質被覆材には構造用集成材を用い、フランジ面及びフランジ先端から被覆材表面までの寸法を被覆厚さとした。なお、吹き抜け等への利用を想定し、鉄骨梁断面の四周を被覆した仕様(四面被覆)と、梁上面に床が取付くことを想定し、鉄骨

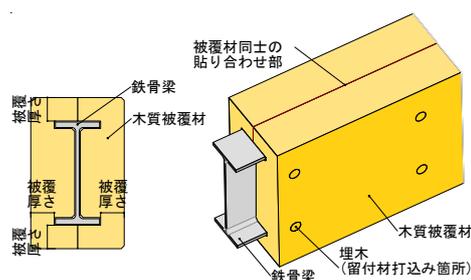


図-1 木鋼梁概要図

梁断面の上フランジを除く三周を被覆した仕様(三面被覆)の2仕様を検討した。

1.3 開発の流れ

まず、1時間の耐火性能を達成する木質被覆材の仕様を把握するために、木質被覆材の樹種、被覆厚さ等をパラメータとした小型試験体の加熱試験を行った。次に、1時間の耐火性能を達成しうる木質被覆材の仕様を選定して、木鋼梁の火災時における構造安定性を把握するために、載荷加熱試験を行った。さらに、梁断面の大きさが耐火性能に及ぼす影響を把握するために、鉄骨梁の梁成が最大1mとなる木鋼梁の加熱試験を行った。

1.4 木鋼梁における耐火性能の判定基準

耐火構造部材には、火災による加熱を受けても崩壊しない性能(非損傷性)が必要とされる。非損傷性は、載荷加熱試験において、梁の垂直変形を測定し、試験中(本開発では、1時間加熱と24時間放冷の計25時間)のたわみ量とたわみ速度に基づいて判定した⁵⁾。ただし、載荷を行わない加熱試験では、試験中の鋼材温度(平均350℃以下、最高450℃以下)に基づいて判定した⁵⁾。

また、木鋼梁では、木質被覆材の燃焼が火災後も継続すると鋼材温度が上昇して崩壊に至る可能性があるため、木質被覆材の燃焼が止まること(以下、燃え止まり)が必要とされる。そのため、木質被覆材が試験中に燃え止まるか否かも判定した。具体的には、発炎燃焼、無炎燃焼(以下、赤熱)、発煙のいずれもない状態を燃え止まりと判定した。

2. 樹種と被覆厚さをパラメータとした加熱試験

2.1 試験体

加熱試験体の仕様を表-1、試験体の断面図を

表-1 木質被覆材の樹種と被覆厚さをパラメータとした加熱試験体の仕様および試験結果

試験No.	試験体名	鋼材		木質被覆材		加熱時間 [h]	放冷時間 [h]	鋼材温度(最高温度測定値)			試験終了後の発煙・赤熱の有無(目視による確認)	判定 ^{※3}
		断面寸法・長さ・鋼種	樹種 ^{※1}	被覆厚さ [mm]	最高温度 [°C]			計測時間 [h]	計測位置			
I	K50	H-400×150×8×13 長さ:1000mm (有効加熱範囲:900mm) 鋼種:SS400	カラマツ	50	1	24	160.7	4.0	上フランジ隅角部	なし	○	
	K60		カラマツ	60			147.8	3.6	下フランジ隅角部	なし	○	
	K70		カラマツ	70			212.6	22.3	ウェブ部	あり	△	
II	H50		ヒバ	50	1	24	739.7	20.1	ウェブ埋木部	あり	×	
	H60		ヒバ	60			182.0	24.8	ウェブ埋木部	あり	△	
	H70		ヒバ	70			278.4	24.9	ウェブ埋木部	あり	△	
III	H80		ヒバ	80	1	24	123.9	9.3	上フランジ隅角部	なし	○	
	S60		スギ	60			713.0	10.7	ウェブ部	なし	×	
	NK60		カラマツ+不燃スギ ^{※2}	60+13.5			157.3	20.4	ウェブ埋木部	なし	○	

※1. 木質被覆材には、対称異等級構成構造用集成材(E95-F270[ヒバ、カラマツ]、E65-F225[スギ])を用いた。

※2. 内装制限を想定して、カラマツ被覆厚さ60mmの表面に、不燃処理木材(樹種:スギ)13.5mm厚を張付けた。

※3. 各試験体の耐火性能に関する判定は以下のとおりである。

○:試験終了後、燃え止まりを確認 △:試験終了後、赤熱が残存(試験終了まで鋼材温度は上昇傾向、鋼材温度は450℃以下) ×:鋼材温度が450℃以上

図-2に示す。本試験では、鉄骨梁を木質被覆材で四面被覆した。木質被覆材の樹種はヒバ、カラマツ、スギとし、被覆厚さは50mm、60mm、70mm、80mmとした。また、内装制限に対応するため、木質被覆材の表面に不燃処理木材を張付けた仕様

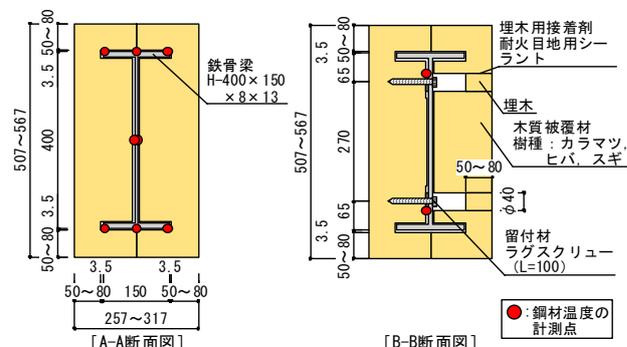


図-2 加熱試験体断面図

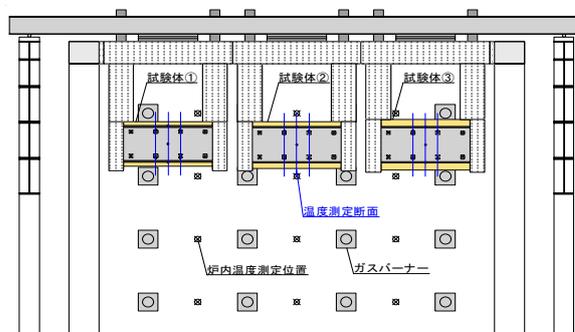


図-3 加熱試験方法図

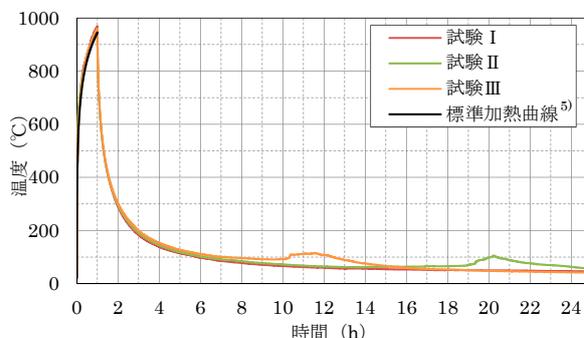


図-4 加熱試験における炉内温度

を加えた。埋木は、被覆厚さと同じ深さまで打ち込んだ。

鉄骨梁の断面は、H-400×150×8×13mmとした。また、図-2、図-3に示す位置にK型熱電対を設置し、鋼材温度を測定した。

2.2 試験方法

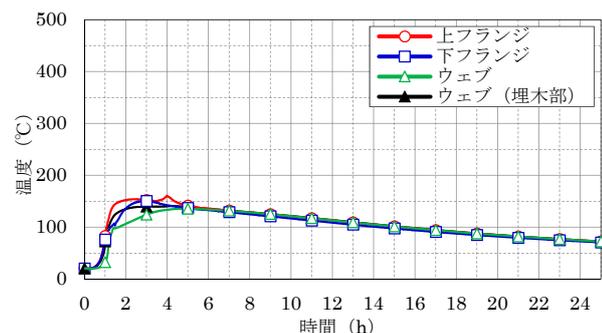
本試験では、3体の小型試験体を1回の試験で同時に加熱し(図-3)、梁四面が加熱を受けるよう

にした。また、荷重は行わずに加熱のみとした。

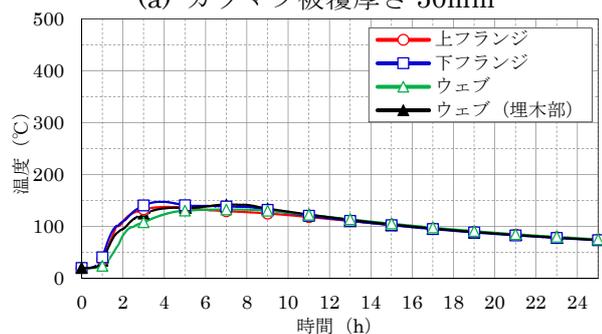
清水建設技術研究所の多目的炉にて、文献5)に規定される標準加熱曲線に則り1時間の加熱を行い、加熱終了後に炉内で24時間放冷した(図-4)。

2.3 加熱試験結果

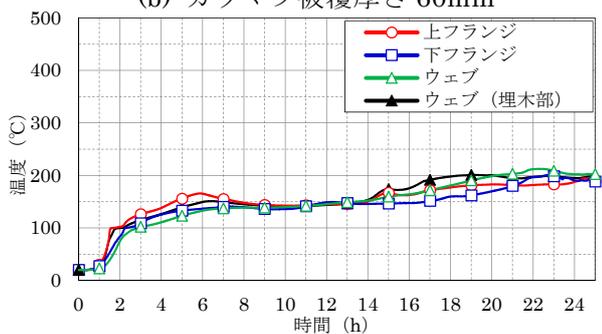
各被覆仕様における鋼材の最高温度と燃え止まりの有無を表-1、鋼材温度推移を図-5に示す。試験終了時まで鋼材温度が平均350℃以下、最



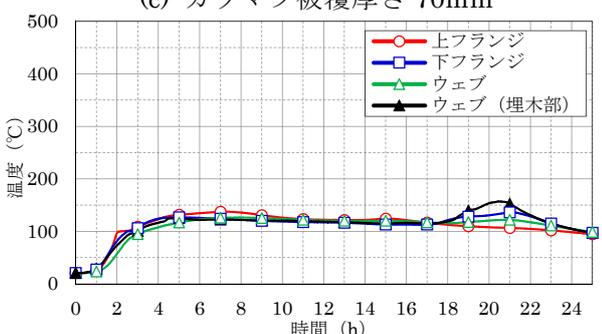
(a) カラマツ被覆厚さ 50mm



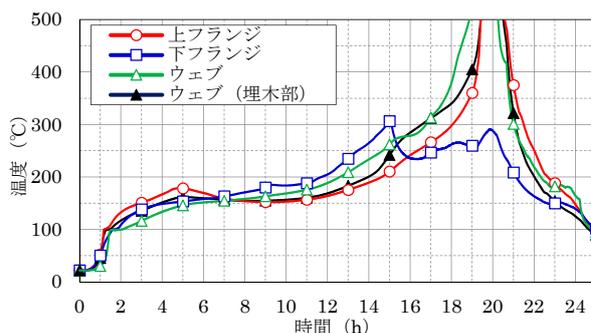
(b) カラマツ被覆厚さ 60mm



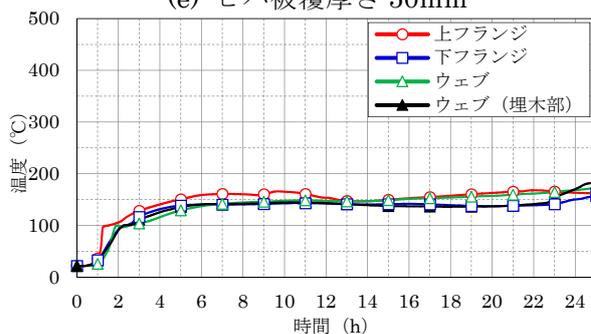
(c) カラマツ被覆厚さ 70mm



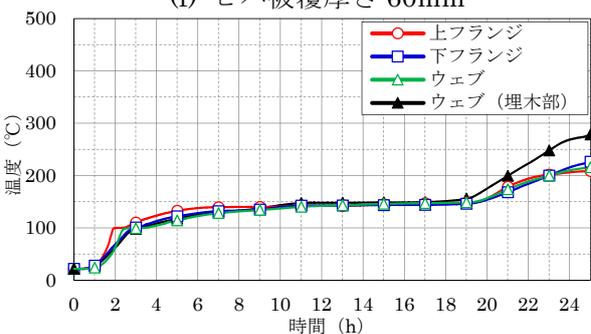
(d) カラマツ被覆厚さ 60mm+不燃処理木材



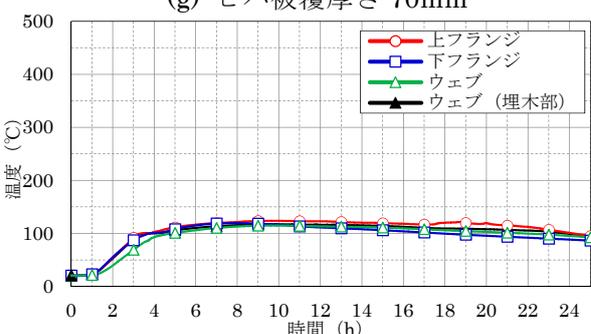
(e) ヒバ被覆厚さ 50mm



(f) ヒバ被覆厚さ 60mm



(g) ヒバ被覆厚さ 70mm



(h) ヒバ被覆厚さ 80mm

図-5 木質被覆材の樹種と被覆厚さをパラメータとした加熱試験の鋼材温度推移^{注)}

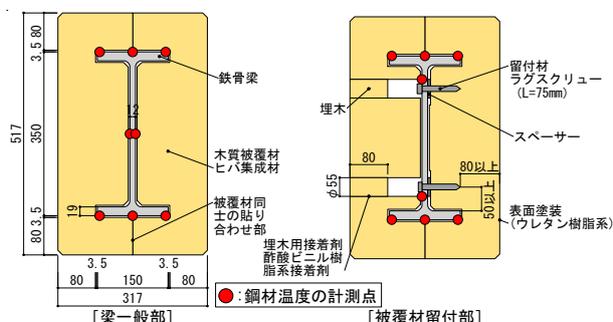
高 450°C以下となり、かつ燃え止まったのは、カラマツでは被覆厚さが 50mm、60mm、ヒバでは被覆厚さが 80mm であった。また、被覆厚さ 60mm のカラマツに不燃処理木材を張り付けた仕様も燃え止まった。

カラマツを用いた場合、被覆材を厚くすると燃え止まらず、一方、ヒバを用いた場合、被覆材を厚くすると燃え止まった。木質被覆材に求められる鋼材温度上昇の抑制及び燃え止まりの各性能は、樹種毎によって異なる結果となった。

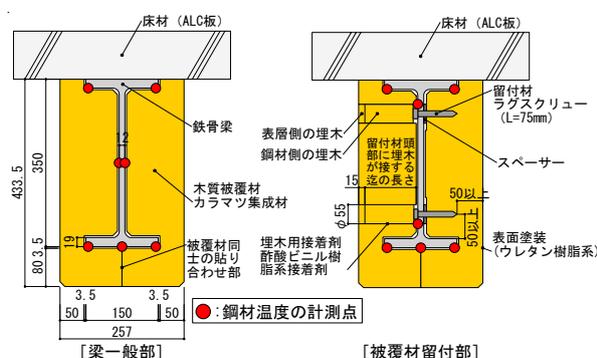
3. 荷重加熱試験

3.1 試験体

荷重加熱試験体の仕様を表-2、試験体の断面図



(a) ヒバ木鋼梁（四面被覆）



(b) カラマツ木鋼梁（三面被覆）

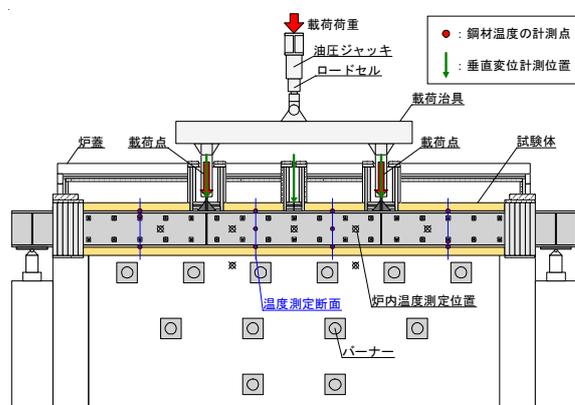
図-6 荷重加熱試験体断面図

を図-6 に示す。木質被覆材の樹種は、ヒバ(以下、ヒバ木鋼梁)とカラマツ(以下、カラマツ木鋼梁)とした。

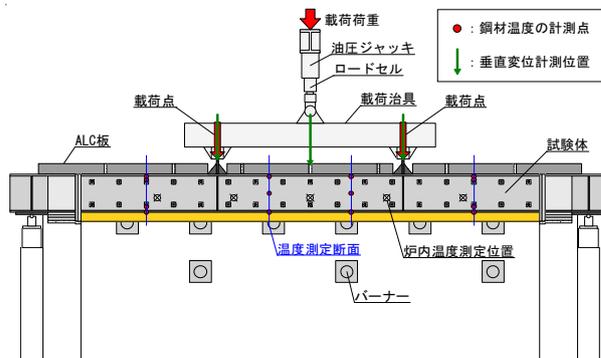
ヒバ木鋼梁は、吹き抜け等への利用を想定して四面被覆とし、被覆厚さは 80mm とした。

カラマツ木鋼梁は、梁上面に床が取付くことを想定して三面被覆とした。梁側面の被覆厚さは 50mm とし、梁下面の被覆厚さは、実際の架構における接合部を想定して、スプライスプレートやボルト等に対する被覆厚さを確保するため、80mm とした。また、梁上面には床を模擬した ALC 板を設けた。

ヒバ木鋼梁は被覆厚さと同じ 80mm まで埋木を



(a) ヒバ木鋼梁（四面被覆）



(b) カラマツ木鋼梁（三面被覆）

図-7 荷重加熱試験方法図

表-2 荷重加熱試験体の仕様および試験結果

試験体名	被覆形式	鋼材 断面寸法・長さ・鋼種	木質被覆材 樹種 ^{※1}	被覆厚さ [mm]			密度 [g/cm ³]	含水率 [%]	加熱時間 [h]	放冷時間 [h]	支点間距離 [mm]	荷重 [kN] ^{※2}	垂直変位量 ^{※3}		鋼材温度		試験終了後の 赤熱・発煙の有無 ^{※4}	
				梁側面	梁下面	梁上面							最大たわみ量 [mm]	最大たわみ速度 [mm/min]	最高温度 [°C]	計測時間 [h]		計測位置
				80	80	80							6.1	(0.3)	125.3	14.2		上フランジ 隅角部
H80S-1 最小断面	四面被覆 (有効加熱範囲: 4100mm) 鋼種: SN490B	H-350 × 150 × 12 × 19 長さ: 5500mm	ヒバ	80	80	80	0.49	10.2	1	24	5100	268.9	6.1	(0.3)	125.3	14.2	上フランジ 隅角部	なし
H80S-2 最小断面													5.9	(0.3)	114.1	9.8	上フランジ 隅角部	なし
K50S-1 最小断面	三面被覆 (有効加熱範囲: 4200mm) 鋼種: SN490B	H-350 × 150 × 12 × 19 長さ: 5500mm	カラマツ	50	80	-	0.43	12.5	1	24	5100	272.0	5.7	(0.6)	129.7	4.5	下フランジ 隅角部	なし
K50S-2 最小断面													6.7	(0.5)	122.2	4.9	下フランジ 隅角部	なし

※1. 木質被覆材には、同一等級構成構造用集成材(ラナ強度L80で統一)を用いた。

※2. 鉄骨梁断面H-350 × 150 × 12 × 19(SN490B)に対して、長期許容応力度に相当する応力が生じるように試験体の自重を差し引いた荷重を載荷した。載荷方法は試験体の支点間距離に対して3等分2線載荷とした。

※3. 梁の非損傷性を判定する基準として、最大たわみ量と最大たわみ速度が次の値以下であることと規定されている。ただし、最大たわみ速度は、たわみ量がL/30を超えるまで適用しない。

最大たわみ量 [mm]: L2/400d 最大たわみ速度 [mm/min]: L2/9000d (L: 試験体の支点間距離 [mm], d: 試験体の構造断面の圧縮縁から引張縁までの距離 [mm])

本試験における非損傷性の規定値は、最大たわみ量185.7mm、最大たわみ速度8.3mm/min である。

※4. 赤熱・発熱の有無は耐火炉内に入り、目視にて確認した。また、試験体を脱炉後に再度目視にて確認した。

打ち込み、カラマツ木鋼梁はラグスクリー头部に接するまで埋木を打ち込んだ。

鉄骨梁の断面は、試験装置の载荷能力を考慮して H-350×150×12×19mm とした。また、図-6、図-7 に示す位置に K 型熱電対を設置し、鋼材温度を測定した。

3.2 試験方法

ヒバ木鋼梁は一般財団法人建材試験センター西日本試験所、カラマツ木鋼梁は同センター中央試験所の水平炉を使用し、「防耐火性能試験・評価

業務方法書」⁵⁾に準じて载荷加熱試験を実施した(図-7)。試験体数は、ヒバ及びカラマツ木鋼梁の各々において2体とした。

文献5)に規定される標準加熱曲線に則り1時間の加熱を行い、加熱終了後に炉内で3時間以上、最大24時間放冷した(図-8)。なお、ヒバ木鋼梁は四面から加熱を受け、カラマツ木鋼梁は梁上面を除く三面から加熱を受けるようにした。

鉄骨梁の断面に対して、長期許容応力度に相当する応力が生じるよう荷重を設定し、支点間距離5100mm に対して3等分2線载荷を行った。

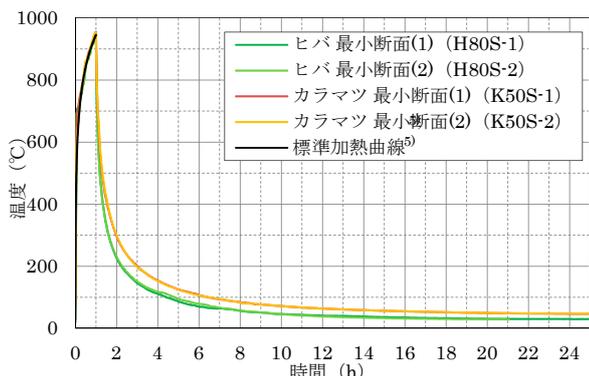
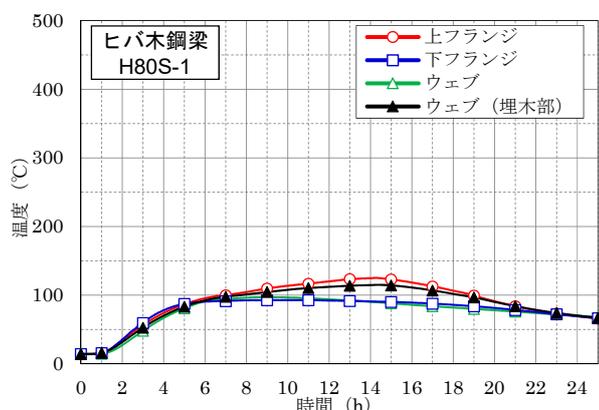


図-8 载荷加熱試験における炉内温度

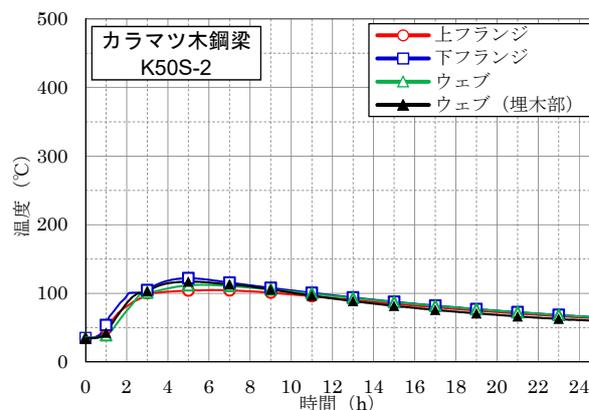
3.3 载荷加熱試験結果

木鋼梁の载荷加熱試験結果を表-2 に示し、ヒバ及びカラマツ木鋼梁の鋼材温度とたわみ量・たわみ速度の推移を図-9、図-10 に示す。なお、図には、各2回の試験のうち、最大たわみ量が大い試験体の結果を示した。

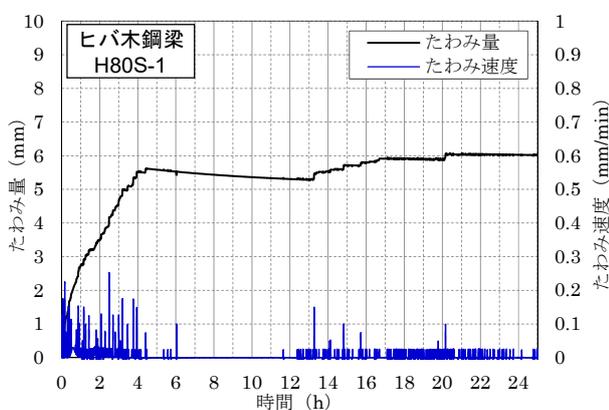
ヒバ木鋼梁の鋼材温度は、最高125.3°Cで、試験終了時点には全ての温度計測位置で下降傾向を示した。また、たわみ量は最大6.1mmであり、



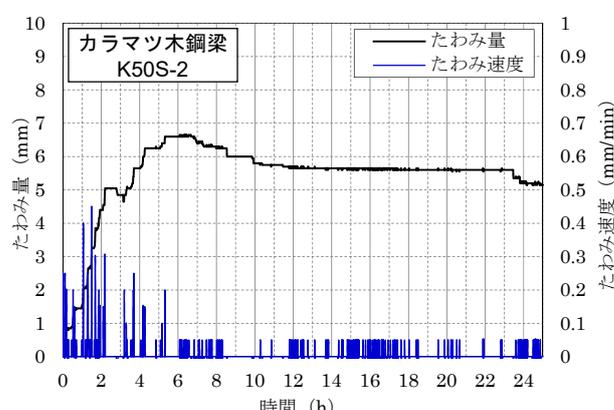
(a) 材軸方向中央付近 鋼材温度推移^{注)}



(a) 材軸方向中央付近 鋼材温度推移^{注)}



(b) 材軸方向中央部 たわみ量・たわみ速度推移
図-9 ヒバ木鋼梁(H80S-1) 载荷加熱試験結果



(b) 材軸方向中央部 たわみ量・たわみ速度推移
図-10 カラマツ木鋼梁(K50S-2) 载荷加熱試験結果

非損傷性の規定値以下であった。さらに、試験終了時点までに木質被覆材の燃え止まりを確認した。

カラマツ木鋼梁の鋼材温度は、最高 129.7℃で、試験終了時点には全ての温度計測位置で下降傾向を示した。また、たわみ量は最大 6.7mm であり、非損傷性の規定値以下であった。さらに、試験終了時点までに木質被覆材の燃え止まりを確認した。

ヒバ木鋼梁について、荷重加熱試験体の鋼材温度と、2章の加熱試験体の鋼材温度を比較すると、最高温度は同程度であったが、初期温度からの温度上昇の値は、荷重加熱試験体の方が約 10℃低い値を示した。この差は、荷重加熱試験体の鉄骨梁の方が熱容量が大きいために生じたと考えられる。

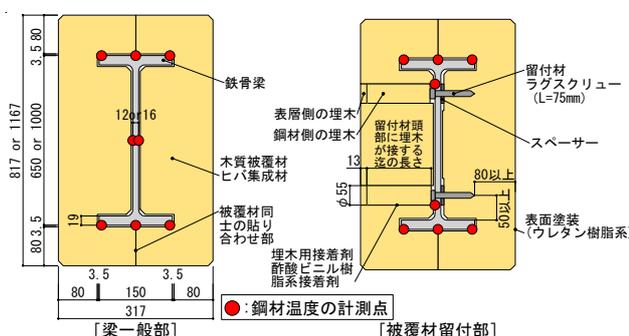
4. 拡大断面検証試験

木鋼梁の断面が大きくなると木材量が増えるため、燃え止まりにくくなる可能性が考えられた。そこで、3.1 の荷重加熱試験体よりも断面寸法が大きい鉄骨梁をヒバ及びカラマツで被覆した木鋼梁の加熱試験(以下、拡大断面検証試験)を実施し、鋼材温度と燃え止まりの確認を行った。

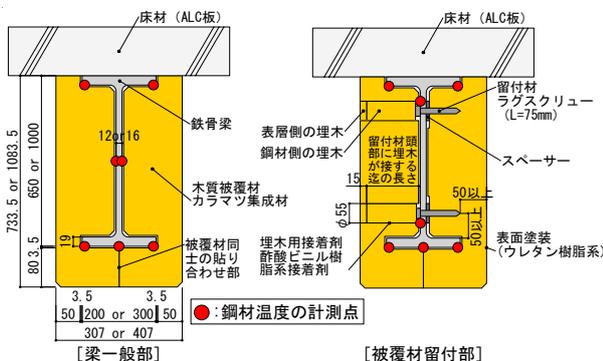
4.1 試験体

拡大断面検証試験体の仕様を表-3、試験体の断面図を図-11に示す。

ヒバ及びカラマツ木鋼梁の被覆厚さは、3.1の

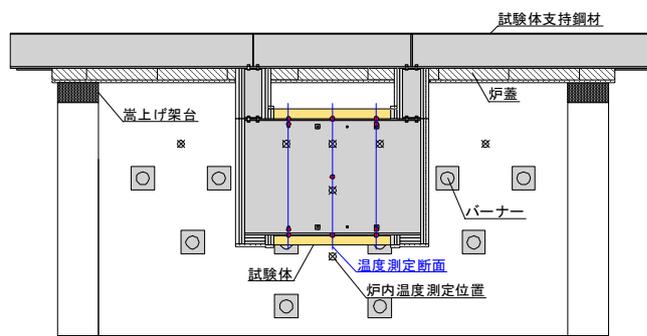


(a) ヒバ木鋼梁 (四面被覆)

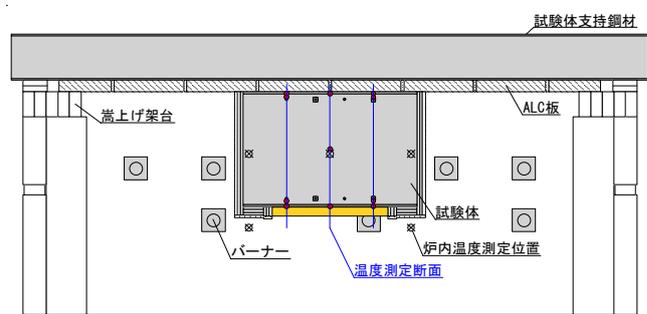


(b) カラマツ木鋼梁 (三面被覆)

図-11 拡大断面検証試験体断面図



(a) ヒバ木鋼梁 (四面被覆)



(b) カラマツ木鋼梁 (三面被覆)

図-12 拡大断面検証試験(最大断面) 試験方法図

表-3 拡大断面検証試験体の仕様および試験結果

試験体名	被覆形式	鋼材		木質被覆材			有効加熱長さ [mm]	密度 [g/cm ³]	含水率 [%]	加熱時間 [h]	放冷時間 [h]	鋼材温度			試験終了後の赤熱・発煙の有無 ^{※2}
		断面寸法・長さ・鋼種	樹種 ^{※1}	被覆厚さ [mm]	梁側面	梁下面						梁上面	最高温度 [°C]	計測時間 [h]	
H80M 中間断面	四面被覆	BH-650×150×12×19 長さ: 5500mm 鋼種: SN490B	ヒバ	80	80	80	4100	0.48	8.9	1	23	107.7	11.9	上フランジ隅角部	なし
H80B-1 最大断面		BH-1000×300×16×19 長さ: 1500mm 鋼種: SN490B					1000	0.48	11.5			127.1	9.9	上フランジ隅角部	あり 梁側面上部埋木部付近
H80B-2 最大断面		BH-1000×150×16×19 長さ: 1500mm 鋼種: SN490B					1000	0.49	9.1			104.0	10.1	上フランジ隅角部	なし
K50M 中間断面	三面被覆	BH-650×200×12×19 長さ: 5500mm 鋼種: SN490B	カラマツ	50	80	-	4200	0.43	10.6	1	24	157.6	7.3	下フランジ隅角部	なし
K50B 最大断面		BH-1000×300×16×19 長さ: 1500mm 鋼種: SN490B					1000	0.43	12.2			101.2	3.8	下フランジ隅角部	なし

※1. 木質被覆材には、同一等級構成構造用集成材(ラミナ強度L80で統一)を用いた。

※2. 赤熱・発熱の有無は耐火炉内に入り、目視にて確認した。また、試験体を脱炉後に再度目視にて確認した。

載荷加熱試験体と同様とした。

埋木は、基本的にラグスクリュー頭部に接するまで打ち込んだ。ただし、ヒバ木鋼梁の最大断面においては、80mmまで埋木を打ち込んだ場合(H80B-1)と、ラグスクリュー頭部に接するまで埋木を打ち込んだ場合(H80B-2)の2体に対して試験を行った。

拡大断面検証試験では、梁成 1000mm の鉄骨梁(以下、最大断面)、および 3.1 の載荷加熱試験体の断面と最大断面の間となる梁成 650mm の鉄骨梁(以下、中間断面)を選定した。

中間断面は材軸方向の加熱範囲が約 4m となるように、また最大断面は耐火炉の寸法に制約があるため材軸方向の加熱範囲が 1m となるように、試験体の梁長さを選定した。

断面に対して図-11 に示す位置に K 型熱電対を設置し、鋼材温度を測定した。なお、中間断面は材軸方向に対して図-7 と同じ位置、最大断面は図-12 の位置に熱電対を配置した。

4.2 試験方法

3.2 の載荷加熱試験と同じ水平炉を使用し、「防耐火性能試験・評価業務方法書」⁵⁾ に準じて試験を実施した(図-12)。

文献 5) に規定される標準加熱曲線に則り 1 時間の加熱を行い、加熱終了後に炉内で 3 時間以上、最大 24 時間放冷した(図-13)。また、ヒバ木鋼梁は四面から加熱を受け、カラマツ木鋼梁は梁上面を除く三面から加熱を受けるようにし、載荷は行わずに加熱のみとした。

4.3 拡大断面検証試験結果

拡大断面検証試験結果の一覧を表-3 に示す。

4.3.1 ヒバ木鋼梁の拡大断面検証試験結果

ヒバ木鋼梁の中間断面、最大断面の鋼材温度の推移を図-14 に示す。鋼材温度はいずれも平均 350℃以下、最高 450℃以下となった。また、中間断面 H80M と最大断面 H80B-2 はともに、加熱開始から 25 時間以内に木質被覆材が燃え止まった。以上の結果から、ヒバ木鋼梁において、埋木長さを十分確保すれば、鉄骨梁の梁成が最大 1000mm まで 1 時間の耐火性能を達成することができた。

一方、最大断面 H80B-1 は梁側面の埋木部周辺で赤熱が残存した。埋木長さが 80mm であったため、埋木が燃え抜けて、木内部に火種が入り込み赤熱が継続したと考えられる。H80B-1、H80B-2

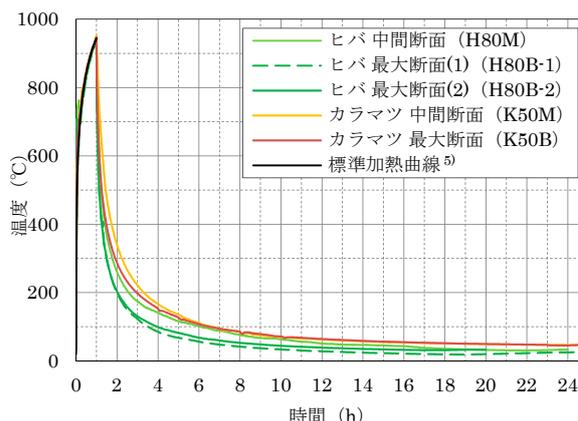
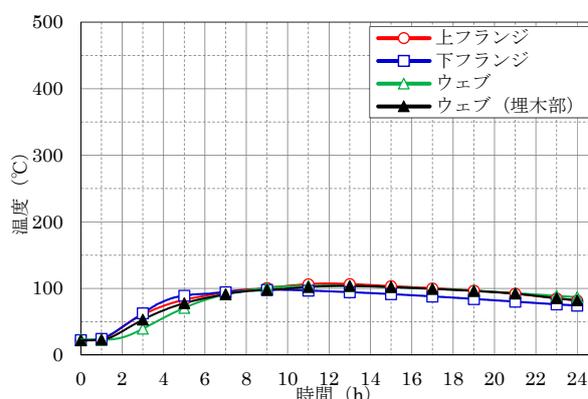
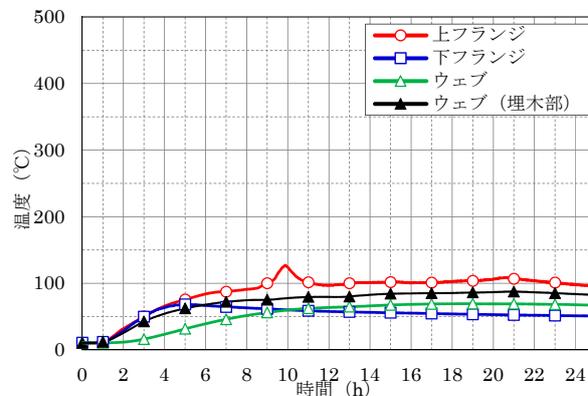


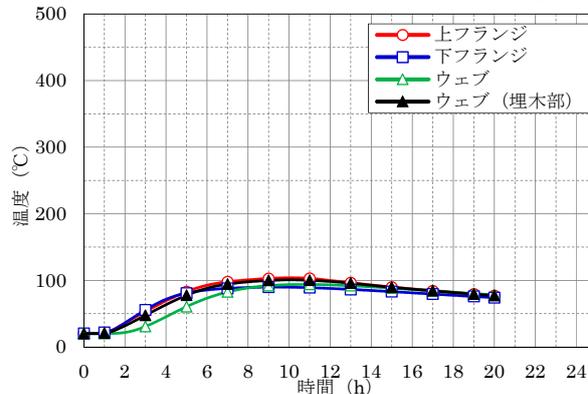
図-13 拡大断面検証試験における炉内温度



(a) 中間断面 (H80M) 鋼材温度推移



(b) 最大断面 (H80B-1) 鋼材温度推移



(c) 最大断面 (H80B-2) 鋼材温度推移

図-14 ヒバ木鋼梁 拡大断面検証試験結果^{注)}

の結果から、埋木を長くし、ラグスクリー头部と埋木との間の空隙を小さくすることが燃え止まりに有効であったといえる。

4.3.2 カラマツ木鋼梁の拡大断面検証試験結果

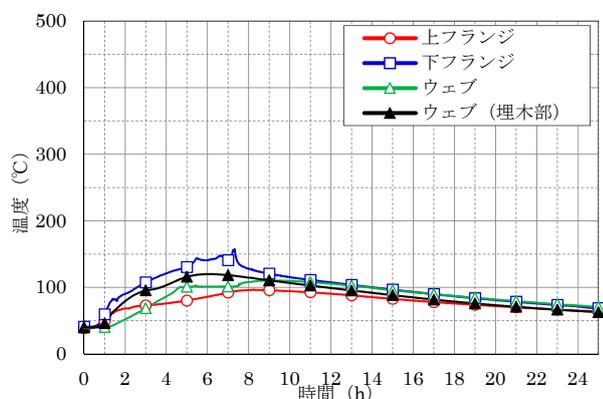
カラマツ木鋼梁の中間断面、最大断面の鋼材温度推移を図-15に示す。鋼材温度はいずれも平均350℃以下、最高450℃以下となった。また、いずれの試験も、加熱開始から25時間以内に木質被覆材が燃え止まった。以上の結果から、カラマツ木鋼梁において、鉄骨梁の梁成が最大1000mmまで1時間の耐火性能を達成することができた。

5. 木鋼梁の仕様と耐火性能に関する一考察

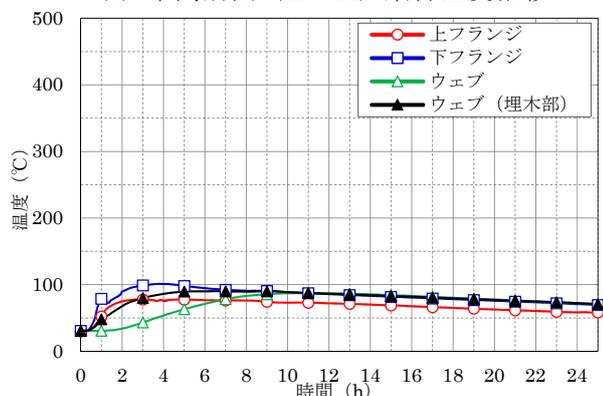
耐火性能検証法⁶⁾で使用される鉄骨梁の部材温度上昇係数を指標として、木鋼梁の試験結果から、木質被覆材の仕様ならびに鉄骨梁の断面寸法が木鋼梁の鋼材温度と燃え止まりに及ぼす影響を考察した。

5.1 部材温度上昇係数の算出

無機系耐火被覆材(吹付けロックウール25mm



(a) 中間断面 (K80M) 鋼材温度推移



(b) 最大断面 (K80B) 鋼材温度推移

図-15 カラマツ木鋼梁 拡大断面検証試験結果^{注)}

厚以上、又はケイ酸カルシウム板 20mm 厚以上)で被覆された鋼材の温度の上がりやすさを示す指標として、部材温度上昇係数 h が用いられる⁶⁾。部材温度上昇係数 h は鋼材と被覆材の断面形状、被覆材の物性によって次式により算定され、部材温度上昇係数 h が高いほど鋼材温度が上昇しやすいとされている。

$$h = \frac{\phi K_0 (H_s / A_s)}{\left\{ 1 + \frac{\phi R}{H_i / A_i} \right\} \times \left\{ 1 + \frac{\phi C (H_s / A_s)}{2 (H_i / A_i)} \right\}} \quad [\text{min}^{-1}]$$

H_s : 鋼材の加熱周長 [mm]、 A_s : 鋼材の断面積 [mm²]、 H_i : 被覆材の加熱周長 [mm]、 A_i : 被覆材の断面積 [mm²]、 H_s/A_s : 鋼材の断面形状係数 [m⁻¹]、 $\phi = H_i/H_s$: 被覆材と鋼材のうち加熱を受ける部分の周長比 [-]、 K_0 、 R 、 C : 被覆材の物性と鋼材の種類から決まる定数 ($K_0 = h_t / \rho_s c_s$: 鋼材表面の熱伝達率を鋼材の熱容量で割った基本温度上昇係数 [m/min]、 $R = h_t/k_i$: 鋼材表面の熱伝達率を被覆材の熱伝導率で割った熱抵抗係数 [m⁻¹]、 $C = \rho_i c_i / \rho_s c_s$: 被覆材料と鋼材の熱容量比 [-])

ここで、部材温度上昇係数 h は、鋼材と被覆材の断面寸法・形状が分かれば、 H_s 、 A_s 、 H_i 、 A_i 、 ϕ の数値は決まる。一方、被覆材の物性と鋼材の種類により決まる定数 K_0 、 R 、 C は、試験結果から同定する必要があるが、基本温度上昇係数 K_0 は鋼材の形状と加熱面数により一義的に定まるとされる⁷⁾。そこで、本検討において、耐火性能検証法⁶⁾で使用される数値を用いて、四面から加熱を受ける場合は $K_0 = 0.00089$ 、上面を除く三面から加熱を受ける場合は $K_0 = 0.00067$ を用いた。

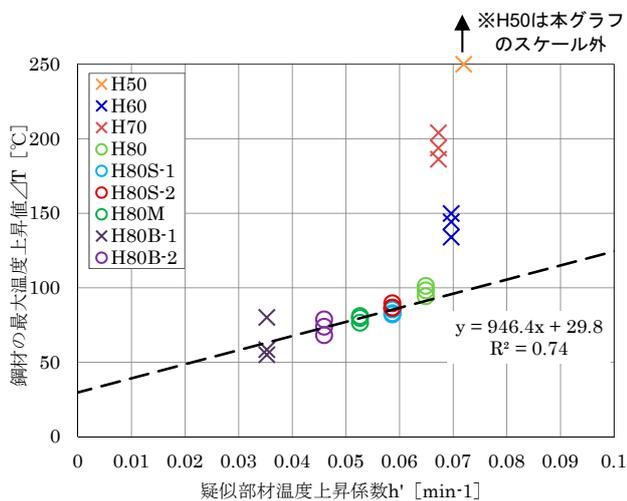
また、熱容量比 C は、鋼材と被覆材の密度と比熱により決まる。そこで、本検討では温度上昇による物性値の変化は考慮せず、常温下での物性値をもとに熱容量比 C を算出した。

熱抵抗係数 R は、鋼材表面の熱伝達率と被覆材の熱伝導率を基に算出するが、被覆材に木材を用いる場合の数値は定まっていない⁶⁾。ただし、熱抵抗係数 R は形状や寸法に依らない定数であるので、本検討では便宜上、 $R = 1$ とした。

以上より、ヒバ及びカラマツ木鋼梁それぞれに対して、疑似的な部材温度上昇係数 h' (以下、疑似部材温度上昇係数) を算出した。各試験における疑似部材温度上昇係数を表-4 に示す。

5.2 木鋼梁における鋼材の最大温度上昇値

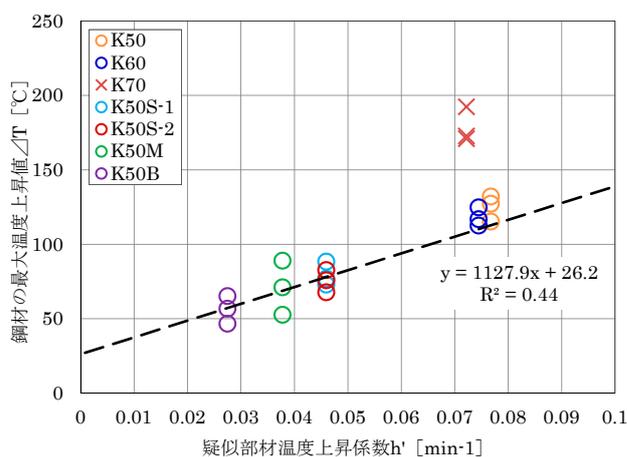
2、3、4章に示したヒバ及びカラマツ木鋼梁の鋼材温度を用いて、鉄骨梁の上フランジ、下フランジ、ウェブの3か所について、各々の鋼材温度の平均値を算出し、初期温度からの温度上昇の最大値(以下、最大温度上昇値)を算出した。各試験における鋼材の最大温度上昇値を表-4に示す。



(a) ヒバ木鋼梁(四面被覆)

5.3 考察

表-4に示した疑似部材温度上昇係数 h' と鋼材の最大温度上昇値 ΔT を用いて両者の関係をグラフ化したものを図-16に示す。なお、図中の○印は燃え止まった試験体、×印は燃え止まらなかった試験体を示す。また、回帰直線は3、4章の試験において燃え止まった試験体の結果を回帰分析し



(b) カラマツ木鋼梁(三面被覆)

図-16 疑似部材温度上昇係数と鋼材の最大温度上昇値の関係
(○：燃え止まった試験体、×：燃え止まらなかった試験体)

表-4 疑似部材温度上昇係数と鋼材の最大温度上昇値

試験名	試験体名	被覆形式	鋼材			木質被覆材				鋼材と被覆材の周長比 $\phi = H_i / H_s$ [-]	基本温度上昇係数 K_0 [m/min] ^{※2}	熱容量比 C [-]	疑似部材温度上昇係数 h' [min ⁻¹] ^{※3}	初期温度からの温度上昇の最大値 ΔT [°C] ^{※4}			燃え止まりの判定 ^{※5}		
			断面寸法 [mm]	密度 ρ_s [kg/m ³]	比熱 c_s [J/kg·K]	断面形状係数 H_s / A_s [m ⁻¹] ^{※1}	樹種	被覆厚さ [mm]	密度 ρ_c [kg/m ³]					比熱 c_c [J/kg·K]	断面形状係数 H_c / A_c [m ⁻¹] ^{※1}	上フランジ		下フランジ	ウェブ
2章 加熱試験	H50	四面被覆	H-400×150×8×13	7860	442	200.8	ヒバ	480	1250	12.7	1.08	0.00089	0.173	0.072	595.1	287.0	692.7	×	
	H60									60	11.8	1.14		0.00089	0.070	144.3 ^{※5}	134.0 ^{※5}	149.9 ^{※5}	×
	H70									70	11.1	1.20		0.00089	0.067	186.2 ^{※5}	204.0 ^{※5}	193.8 ^{※5}	×
	H80									80	10.4	1.26		0.00089	0.065	101.2	98.2	94.2	○
3章 載荷加熱試験	H80S-1 最小断面	四面被覆	H-350×150×12×19	7860	442	135.1	ヒバ	80	1250	11.0	1.29	0.00089	0.173	0.059	85.3	82.1	82.9	○	
	H80S-2 最小断面									8.7	1.14	0.00089		0.046	89.6	86.6	86.4	○	
4章 拡大検証試験	H80M 中間断面	四面被覆	H-650×150×12×19	7860	442	143.8	ヒバ	80	480	9.4	1.19	0.00089	0.173	0.053	79.7	76.4	81.0	○	
	H80B-1 最大断面									6.4	1.02	0.00089		0.035	80.1 ^{※5}	55.0 ^{※5}	58.5 ^{※5}	×	
	H80B-2 最大断面									8.7	1.14	0.00089		0.046	78.7	68.1	73.8	○	
2章 加熱試験	K50	四面被覆	H-400×150×8×13	7860	442	200.8	カラマツ	430	1250	12.7	1.08	0.00089	0.155	0.077	132.1	127.3	115.3	○	
	K60									60	11.8	1.14		0.00089	0.074	116.9	124.9	112.6	○
	K70									70	11.1	1.20		0.00089	0.072	170.9 ^{※5}	172.8 ^{※5}	192.4 ^{※5}	×
3章 載荷加熱試験	K50S-1 最小断面	三面被覆	H-350×150×12×19	7860	442	119.2	カラマツ	50 (梁側面) 80 (梁下面)	430	1250	13.0	1.13	0.00067	0.155	0.046	72.9	88.4	76.9	○
	K50S-2 最小断面										6.7	0.95	0.00067		0.027	67.8	82.7	75.9	○
4章 拡大検証試験	K50M 中間断面	三面被覆	H-650×200×12×19	7860	442	125.5	カラマツ	50 (梁側面) 80 (梁下面)	430	1250	9.4	1.02	0.00067	0.155	0.038	52.7	89.0	71.1	○
	K50B 最大断面										6.7	0.95	0.00067		0.027	46.7	65.2	56.7	○

※1. H_s : 鋼材の加熱を受ける周長 [mm]、 A_s : 鋼材の断面積 [mm²]、 H_c : 被覆材の加熱を受ける周長 [mm]、 A_c : 被覆材の断面積 [mm²] とする。なお、四面被覆の場合には木鋼梁の四周、三面被覆の場合には梁上面を除く木鋼梁の三面を周長とした。

※2. 基本温度上昇係数 K_0 は、鋼材表面の熱伝達率を鋼材の熱容量で割った値 ($K_0 = h_s / \rho_s c_s$) である。耐火性能検証法⁶⁾に則り、梁の四面加熱の場合には0.00089 [min⁻¹]、梁上面を除く三面加熱の場合には0.00067 [min⁻¹]を用いた。

※3. 部材温度上昇係数の算出には、被覆材の物性と鋼材の種類により決まる定数 K_0 、 R 、 C を用いる。ここで、 $R = h_c / K_c$ 、鋼材表面の熱伝達率を被覆材の熱伝達率で割った熱抵抗係数 [m⁻¹] であるが、便宜上 $R=1.0$ とし、疑似部材温度上昇係数を算出した。

※4. 試験で得られた鋼材温度を用いて、上フランジ、下フランジ、ウェブの3か所について、各々の鋼材温度の平均値を時間ごとに算出し、初期温度を引くことで、初期温度からの温度上昇の値を算出した。

表-4には初期温度からの温度上昇の最大値(最大温度上昇値)を示す。

※5. H60、H70、H80B-1、K70は、試験終了後(1時間加熱と24時間放冷の計25時間経過後)も木質被覆材が燃え止まらず、鋼材温度が上昇していた。そこで、試験終了後に安全のため、試験体に注水して消火・冷却を行った。

※6. ○印は燃え止まった試験体、×印は燃え止まらなかった、又は燃え尽きた(鋼材の最高温度が450°C以上となった)試験体を示す。

たものであり、2章の加熱試験の結果は回帰分析に含めていない。

ヒバ及びカラマツ木鋼梁ともに、3、4章の試験において燃え止まった試験体は、疑似部材温度上昇係数が大きくなるほど、鋼材の最大温度上昇値が大きくなる傾向を示した。また、2章の試験において燃え止まったH80、K50、K60の値は回帰直線に近接した。したがって、燃え止まる仕様であれば、木質被覆材の仕様ならびに鉄骨梁の断面寸法から疑似部材温度上昇係数を算出することで、鋼材の最大温度上昇値を推定できる可能性がある。

また、ヒバ木鋼梁は、H80B-1が埋木の長さが短かったために燃え止まらなかったことを考慮すると、疑似部材温度上昇係数が0.065以下であれば燃え止まるものと推定される。ただし、H50、H60、H70についても、ラグスクリュー頭部に接するまで埋木を打ち込んでいなかったことが原因で燃え止まらなかった可能性も考えられる。そのため、ラグスクリュー頭部に接するまで埋木を打ち込んだ木鋼梁であれば、疑似部材温度上昇係数が0.065より大きくなっても燃え止まる可能性が考えられる。

一方、カラマツ木鋼梁については、試験後の試験体の観察から、K70が燃え止まらなかった原因として、埋木の施工不良の可能性が考えられた。埋木の施工不良がないことを前提とすれば、カラマツ木鋼梁は疑似部材温度上昇係数が0.077以下であれば燃え止まるものと推定される。

以上より、今後さらなるデータの蓄積と検討が必要ではあるが、疑似部材温度上昇係数を用いれば、木鋼梁における鋼材の最大温度上昇値および燃え止まりの有無を推定できる可能性がある。

6. まとめ

1時間の耐火性能を有する木鋼梁の開発において、木質被覆材の樹種と被覆厚さをパラメータとした加熱試験、載荷加熱試験、拡大断面検証試験を行い、以下の知見を得た。

- 1) 木鋼梁の木質被覆材に、既往^{1)~4)}では検討されていないヒバを用いた場合、被覆厚さを80mmとすれば、1時間の耐火性能を満たした。
- 2) 木鋼梁の木質被覆材にカラマツを用いた場合、被覆厚さを既往^{3)~4)}よりも薄い50mmとしても、1時間の耐火性能を満たした。

- 3) 梁成が最大1000mmの鉄骨梁をヒバまたはカラマツで被覆した木鋼梁においても、1時間の耐火性能を満たした。
- 4) 木質被覆材の仕様ならびに鉄骨梁の断面寸法から疑似的な部材温度上昇係数を算出することで、木鋼梁の鋼材温度の最大値や燃え止まりを推定できる可能性がある。

なお、本開発により、ヒバ及びカラマツ木鋼梁の1時間耐火構造の性能評価試験に合格し、ヒバ木鋼梁は1時間の耐火構造の大臣認定を取得した。

謝辞

本開発を行うにあたり、株式会社中東、株式会社東亜理科、一般財団法人建材試験センターをはじめ、試験および試験体製作に関わった皆様には多大なるご協力を頂きました。心より感謝申し上げます。

注) 2、3、4章の鋼材温度推移のグラフは、上フランジ、下フランジ、ウェブ、ウェブ(埋木部)について、各々の最高温度を測定した箇所を抜粋したものである。

<参考文献>

- 1) 遊佐秀逸 他：木質系構造の耐火市恵能に関する研究 その1 耐火構造の実験的確認方法，日本建築学会大会学術講演梗概集，防火，pp.325-328, 2003
- 2) 増田秀昭 他：木質系構造の耐火性能に関する研究その9 大断面梁部材の載荷加熱試験，日本建築学会大会学術講演梗概集，防火，pp.139-140, 2004
- 3) 岡村義徳 他：木質系構造の耐火性能に関する研究その10 小断面燃え止まり梁部材の載荷加熱試験，日本建築学会大会学術講演梗概集，防火，pp.141-142, 2004
- 4) 白岩昌幸 他：木質系構造の耐火性能に関する研究その19：集成材被覆H形鋼梁の耐火性能，日本建築学会大会学術講演梗概集，防火，pp.129-130, 2005
- 5) 例えば、一般財団法人 建材試験センター：防耐火性能試験・評価業務方法書，2020
- 6) 一般財団法人 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，pp.85-109, pp.173-188, 2001
- 7) 鈴木淳一 他：火災時における無被覆鋼材の温度上昇簡易予測式，日本建築学会構造系論文集，第553号，pp.143-148, 2002