

# 高力ボルトで一体化した鋼木複合断面部材の準耐火性能評価実験

## EXPERIMENTAL EVALUATION OF QUASI-FIRE-RESISTIVE PERFORMANCE OF STEEL-TIMBER COMPOSITE MEMBERS USING HIGH-STRENGTH BOLTS

遠藤俊貴 —— \* 1      高木次郎 —— \* 2  
鈴木淳一 —— \* 3      大宮喜文 —— \* 4  
野秋政希 —— \* 5      見波 進 —— \* 6  
荒木慶一 —— \* 7      下錦田聡志 —— \* 8

Toshiki ENDO —— \* 1      Jiro TAKAGI —— \* 2  
Jun-ichi SUZUKI —— \* 3      Yoshifumi OHMIYA —— \* 4  
Masaki NOAKI —— \* 5      Susumu MINAMI —— \* 6  
Yoshikazu ARAKI —— \* 7      Satoshi SHIMONISHIKIDA —— \* 8

キーワード：  
鋼木複合断面部材, スギ材, 準耐火構造, 耐火実験

Keywords:  
Steel-timber composite section member, Japanese cedar, Quasi-fire-resistant construction, Fire resistance test

Although timber is a combustible material, the char layers created on the surface during fires prevent further burning of the inner sections. Taking advantage of this feature, steel-timber composite (a steel plate sandwiched with timber using high strength bolts) section members were developed, expecting steel alone to take the load under fires. In this research, their 45-minute quasi-fire resistive performance was experimentally evaluated applying the standard time-temperature relationships. In the composite sections, the connecting bolts are exposed, which is not influential to the temperature elevation of the steel. The test parameters in the multiple test specimens were the section sizes as well as exposure of the side surface of the steel plates. The maximum steel temperatures in most specimens were below 350 Celsius.

### 1. 序

木質構造には住宅を含む構造形式として特筆すべき長所が幾つか挙げられる。他種構造と比較して、経済性において非常に優れていること、加工性と施工性が高いこと、自然素材として仕上げを兼用できること、近年関心の高い環境問題（二酸化炭素排出量削減など）の観点から好ましいことなどである。その一方で、他材料と比較し低強度であり流通部材寸法が限られることからスパンに関する制約が大きく計画上の自由度が制限されること、品質のばらつきが大きいこと、接合部の強度確保が困難なことなどの短所を持つ。

このような短所を補う目的で、木材と鋼材を組み合わせた複合断面部材について検討を行い、鋼材の高い強度と安定した品質を利用しようとする試みがなされている<sup>1-10)</sup>。楠ら<sup>1-3)</sup>は接着剤、スタッド、高力ボルトなどを用いた接合方法による鋼木複合断面軸力材について実験による性能評価を行った。坂田ら<sup>4-7)</sup>はシアリングや摩擦接合型コネクタを用いた接合方法による複合断面部材の軸圧縮時力学的挙動を明らかにし、接合部せん断試験から得られたせん断剛性を用いる耐力評価法を提案した。

これらの研究では、鋼材の立場からも木材を剛性向上あるいは座

屈補剛といった目的で活用しているが、鋼材の大きな弱点である耐火性能の低さを木材で補うという観点からの検討は行われていない。木材は可燃材料ではあるが外部からの加熱によって燃焼すると断熱性の高い炭化層を形成し、炭化層背面の温度上昇が抑制されるという特徴を持つ。この効果を利用して、準耐火建築物において燃え代設計が認められている<sup>11)</sup>。これを利用して、木材を鋼材の耐火被覆として活用し、同時に仕上げとしても利用する試みは、研究段階を経て<sup>12-14)</sup>一部で実用化もされている<sup>15)</sup>。また、遊佐らは様々な種類の集成材を用いてH形鋼や角形鋼管を被覆し、複合断面について耐火構造としての性能評価実験を行なっている<sup>12-14)</sup>。しかし、これらの構造システムの考え方はあくまで鋼構造であり、複合断面部材としての力学的観点からの剛性や耐力に関する性能評価はなされていない。また、木材の断面形状や部材同士の接合方法が複雑で、経済性に課題がある。

住宅を含めた中小建築物の構造形式として木質構造の長所を最大限維持しつつ、木材と鋼材の短所を相互に補完する鋼木複合断面構造を実現するために、筆者らはこれまでに、加工性と経済性を追求したトルシア形高力ボルトを用いた単純な接合方法と、この接合法

本稿の一部は日本建築学会大会学術講演梗概集, 防火 (A-2), pp.115-116, 2010.9で発表したものである。

<sup>1)</sup> 日本学術振興会特別研究員 DC (京都大学大学院工学研究科建築学専攻) 大学院生・工修 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)  
<sup>2)</sup> 首都大学東京都市環境学部建築都市コース 准教授・Ph. D.  
<sup>3)</sup> 御建築研究所 研究員・博士 (工学)  
<sup>4)</sup> 東京理科大学理工学部建築学科 准教授・博士 (工学)  
<sup>5)</sup> 東京理科大学総合研究機構火災科学研究所 グローバル COE 技術者  
<sup>6)</sup> 首都大学東京都市環境学部建築都市コース 助教・博士 (工学)  
<sup>7)</sup> 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 准教授・博士 (工学)  
<sup>8)</sup> 首都大学東京都市環境学部建築都市コース 大学院生

<sup>1)</sup> Graduate Student, Research Fellow of the Japan Society for the Promotion of Science (Dept. of Architecture and Architectural Eng., Kyoto Univ.), M. Eng.  
<sup>2)</sup> Assoc. Prof., Div. of Architecture and Urban Studies, Tokyo Metropolitan Univ., Ph.D.  
<sup>3)</sup> Researcher, Building Research Institute, Dr. Eng.  
<sup>4)</sup> Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Tokyo Univ. of Science, Dr. Eng.  
<sup>5)</sup> Global COE Engineer, Center for Fire Science and Technology, Research Institute for Science and Technology, Tokyo Univ. of Science  
<sup>6)</sup> Assistant Prof., Div. of Architecture and Urban Studies, Tokyo Metropolitan Univ., Dr. Eng.  
<sup>7)</sup> Assoc. Prof., Dept. of Architecture and Architectural Eng., Kyoto Univ., Dr. Eng.  
<sup>8)</sup> Graduate Student, Div. of Architecture and Urban Studies, Tokyo Metropolitan Univ.

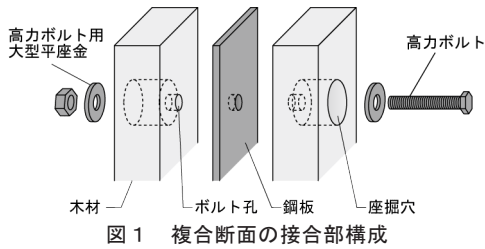


図1 複合断面の接合部構成

により鋼板通し材を2本の木材通し材で挟み込み接合する鋼木複合断面軸力材を提案した<sup>8)</sup>。また実験より得られた提案接合部のせん断特性を用いて、実用的な寸法に即した複合断面部材の常温時弾性座屈耐力を解析的に評価した<sup>9,10)</sup>。

提案複合断面軸力材の常温時における設計としては、必要耐力の大半を鉄骨部材に負担させ、木材は剛性向上および鋼材の座屈補剛として機能させる。一方、高温時には原則として鉄骨部分だけで鉛直荷重を支持する方針とする。このことで、一般の準耐火建築物における燃え代設計は、燃え代を確保するために必然的に大断面にし適用できないが、提案複合断面部材では流通性の高い小断面にも適用できる。また耐火及びその他の性能上必要な部材のみ複合断面部材とし、それ以外の部材は通常の木断面とすることも可能である。

本研究では、提案鋼木複合断面軸力材の部分試験体を作成し、IS0834の標準加熱温度曲線を用いた加熱実験により、部材断面内の時刻歴温度分布および炭化性状を測定することで耐火性能を評価する。

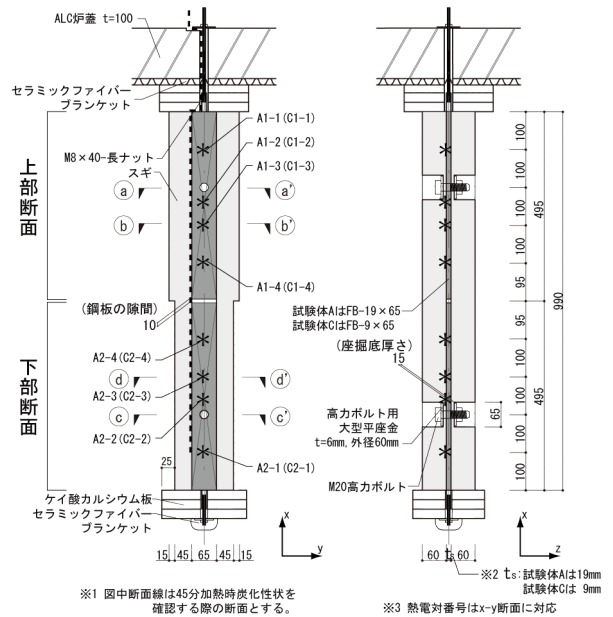
## 2. 耐火実験

### 2.1. 実験概要

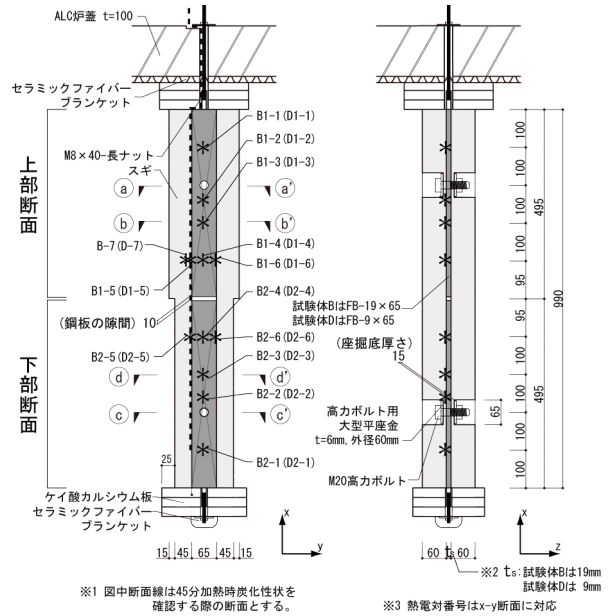
鋼木複合断面部材の耐火性能を確認すること、および加熱実験下における試験体の時刻歴温度分布、炭化性状を測定することの2点を目的として、45分間の耐火実験<sup>11)</sup>を行なった。本耐火実験では、一体化接合部の力学的な性状は問題とならず、実験終了後に炭化性状を測定する必要もあることから、本実験では試験体の一体化接合部にトルシア形高力ボルトを用いずに、高力ボルトの手締めにより鋼材を木材で挟んで接合した(図1)。

実験は図2の試験体A~Dの4体に対して行った。試験体A, CおよびB, Dの軸断面図(x-y断面およびx-z断面)をそれぞれ図2(a)~(d)に示す。また試験体A, Cの断面図を図3(a)に、試験体B, Dの断面図を図3(b)に示す。試験体A, Cは木材に鋼材幅の溝を設けることで鋼材小口(長方形断面の短辺)を覆った(図3(a))のに対し、試験体B, Dでは溝を設けずに鋼材小口を露出させた(図3(b))。試験体A, Bは鋼板厚さ19mmとし、試験体C, Dは鋼板厚さ9mmとした。各試験体は長さ990mmで、試験体の上下495mmずつ異なる断面形状として、合計8(4×2)断面の耐火性能を調べた。以下において試験体Aの上部はA1、下部はA2のように振り番号を用いて試験体を表記する。

実験は東京理科大学火災科学研究センター実験棟の中型複合炉で行った。試験体上下端にケイ酸カルシウム板を用いて断熱した。炉内の試験体の配置を図4に示す。加熱中に試験体の燃焼が他の試験体の炭化性状に影響を及ぼすことを防止するために、試験体同士の間隔は適切に設定した。また、熱電対に直接バーナーの火炎が当た

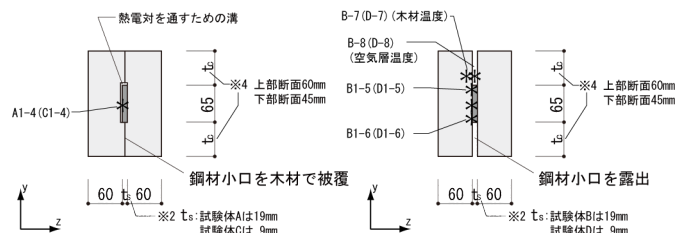


(a) 試験体 A, C (x-y 断面) (b) 試験体 A, C (x-z 断面)



(c) 試験体 B, D (x-y 断面) (d) 試験体 B, D (x-z 断面)

図2 試験体軸断面



(a) 試験体 A, C (b) 試験体 B, D

図3 試験体断面 (y-z 断面)

らないように試験体配置に配慮した。

試験体の諸パラメータを表1に示す。すべての試験体の樹種は国産スギ材とし、表1中の含水率は各試験体について数点計測した値

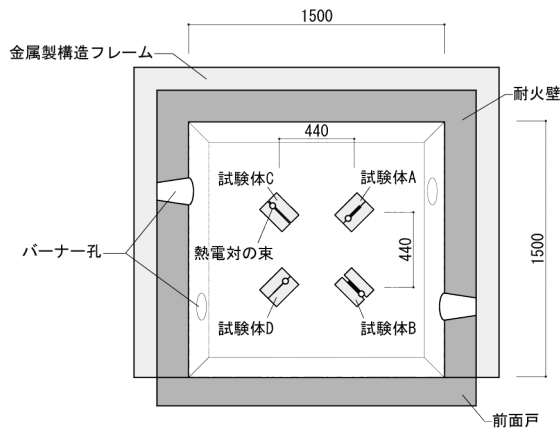


図4 試験体配置図

の平均値を掲載する。試験体Bのみ耐火実験用の試験体の標準値15%よりも2.5%程度大きい値となった。予備的に実施した実験結果より、国産スギ材の炭化速度は0.6~1.2mm/minであることが予想されていたことから、45分準耐火性能のために、27mm~54mmの木材厚が必要と判断した。なお燃え代設計における45分準耐火構造の燃え代は構造用製材の場合45mmである<sup>11)</sup>。そこで、鋼材小口を被覆する木材厚さ(図3(a)における厚さ $t_c$ )を、試験体上部断面では60mm、下部断面では45mmとした。すべての試験体について上部断面と下部断面間で鋼材を分割することで絶縁し、試験体上部下部間の熱伝導を防止した。木材の短辺厚さは、常温時に複合断面として機能するために必要な大きさとして、すべての試験体について60mmとした。また、予備実験により、ボルトを露出させることによる鋼材の温度上昇への影響は限定的と考えられたので、ボルトを露出させる計画とした。

実験中の試験体各点の温度計測を目的として熱電対を設置した。なお、複合断面内に熱電対を通す必要があるため、それによる鋼材と木材間に隙間ができないように、断面中に溝を設けた(図3(a))。試験体A, Cについては上部, 下部鋼板にそれぞれ4個ずつ、木材に1個の計9個の熱電対を定着させ、試験体B, Dについては上部, 下部鋼板にそれぞれ6個ずつ、木材に1個、木材同士の隙間に1個の計14個の熱電対を定着させた。図2, 3中\*印の箇所を熱電対の位置とする。なお熱電対を示す記号は試験体番号の末尾に番号を付して表す。1~4番の熱電対は鋼板の材軸方向の温度分布を計測することを目的とし、5, 6番の熱電対は鋼板の材軸と直交方向の温度分布を計測することを目的とする。なお試験体A, Cは5, 6番の箇所の温度を計測していないが、これは試験体A, Cについては鋼材小口を木材で被覆しているため、小口側からの熱流入は軽微であると判断

表1 試験体一覧および実験結果

試験体番号	樹種	$\rho^{*1)}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$u^{*1)}$ [%]	鋼材小口	$t_c$ [mm]	断面位置	$t_c$ [mm]	$T_{ave}$ [°C]	$T_{max}$ [°C]
A1	スギ	0.441	13.8	被覆	19	上部	60	109	140
						下部	45	95	111
B1	スギ	0.429	17.6	露出	19	上部	60	682	809
						下部	45	809	840
C1	スギ	0.409	13.0	被覆	9	上部	60	143	199
						下部	45	137	203
D1	スギ	0.449	10.6	露出	9	上部	60	251	331
						下部	45	266	346

$\rho$ : 木材密度,  $u$ : 木材含水率,  $t_c$ : 鋼板厚さ,  
 $t_c$ : 複合断面長辺方向の被覆木材厚さ,  $T_{ave}$ : 鋼材平均温度,  $T_{max}$ : 鋼材最高温度  
 \*1) 木材の諸値は全て2本の平均とした。

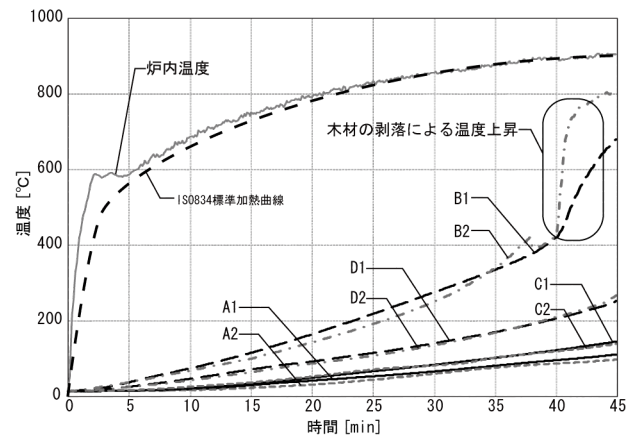


図5 鋼材平均温度

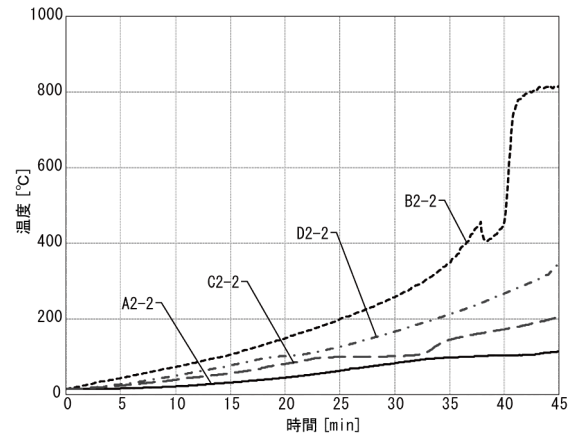


図6 鋼材最高温度

したためである。7, 8番の熱電対はそれぞれ木材同士の隙間内の木材温度変化と空気層温度変化を計測することを目的とする。

加熱条件は、ISO834の標準加熱曲線に基づく45分間加熱<sup>16)</sup>とし、加熱終了後には試験体を速やかに取り出し注水し、燃焼を停止させた。

## 2. 2. 実験結果及び考察

加熱炉内と各試験体の鋼材平均温度時刻歴変化を図5に、各試験体の鋼材最高温度時刻歴変化を図6に示す。炉内温度は6ヶ所の測定値の平均値である。45分加熱時における鋼材温度の平均値および最高値を表1に示す。試験体A, C, Dにおいて鋼材平均温度は270°C以下、鋼材最高温度は350°C以下であった。このため45分加熱時において、これらの断面の場合、鋼材の降伏強度や弾性係数の劣化は比較的小さい<sup>17)</sup>と考えられる。図5より加熱開始40分時、試験体Bの鋼材温度が急激に上昇している。これは鋼材片側の木材が剥離して落下したことが原因である。上部断面と下部断面の鋼材は分かれていたもので、下部断面を吊っていた木材の炭化による断面欠損で支持能力を失ったと考えられる。

図5, 6より、各試験体の上部断面と下部断面では鋼材平均温度および最高温度の差はほとんど確認されない。このため小口側の木材厚さを45mm程度確保すれば、鋼材の温度上昇は限定的と考えられる。また表1より45分時の試験体Aにおける鋼材平均温度は95°Cで、試験体Cにおける鋼材平均温度は137°Cである。この差は試験

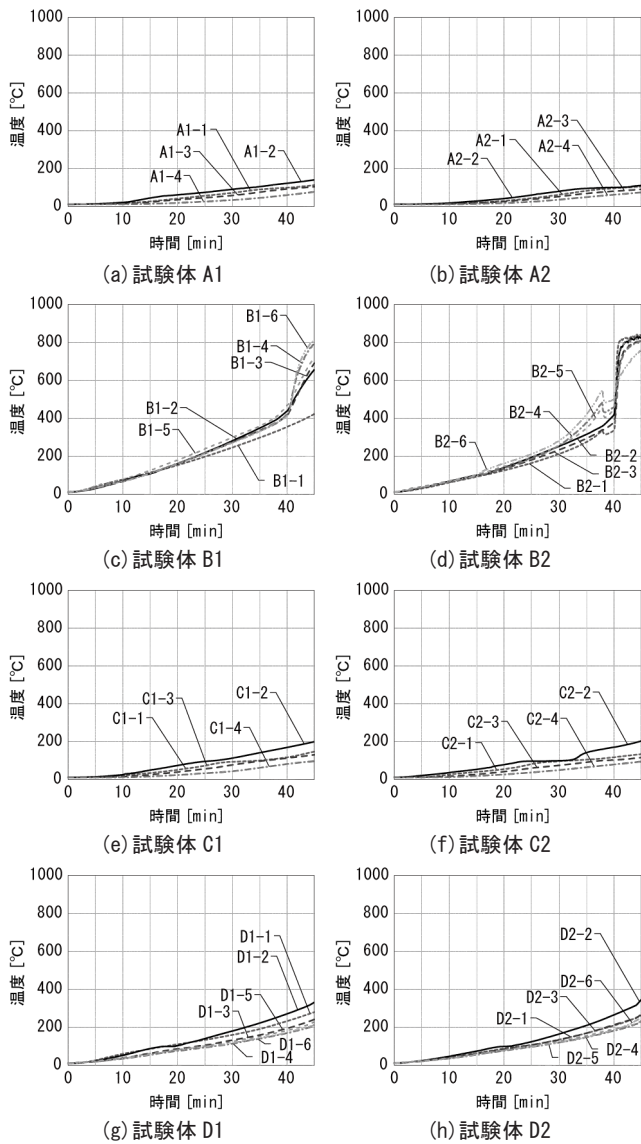


図7 各試験体鋼材各箇所温度

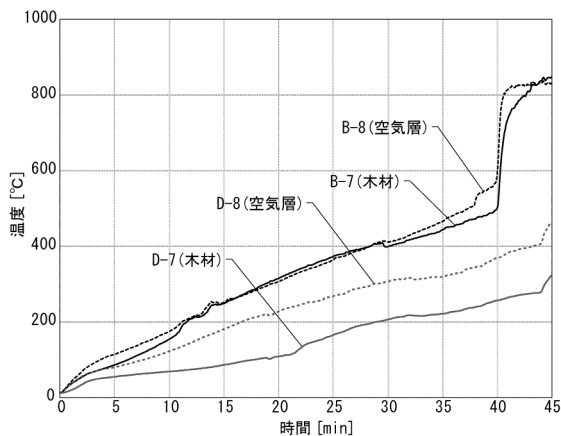


図8 木材および空気層温度

体Cの鋼材厚さの方が薄いため、熱容量が小さいことが原因であると考えられる。

各試験体の熱電対着位置における鋼材温度時刻歴変化を図7に示す。すべての試験体において鋼材の温度は熱電対2~4の順に高くなっていることから、ボルトからの熱流入による鋼材材軸方向の熱

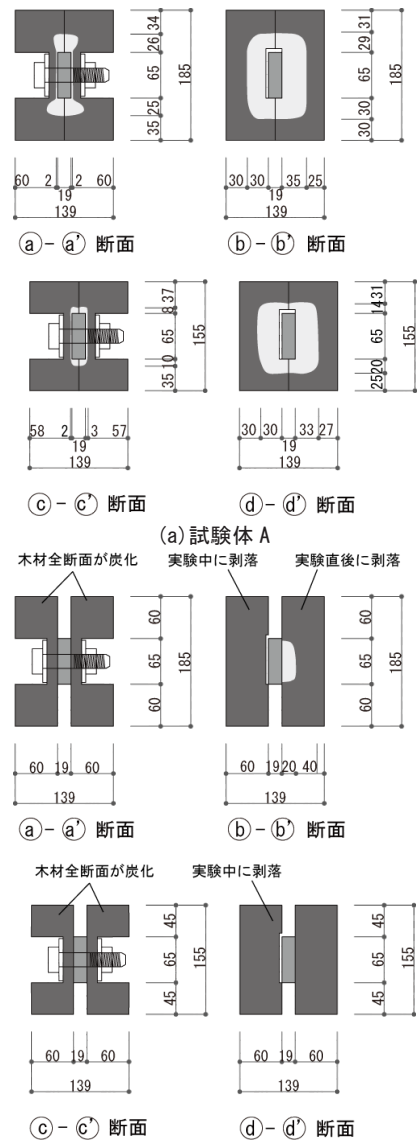


図9 45分加熱後炭化性状(試験体A, B)

伝導が確認できた。一方、熱電対4~6についてはほとんど温度変化に差がなく、鋼材材軸と直交方向の熱分布はほぼ等分布であると仮定できることが確認された。

また図6より試験体BとDを比較すると、木材が剥落する前でも、試験体Bの方が鋼板は厚く熱容量が大きいにも関わらず、鋼材温度が高い。これは鋼材小口部の木材の隙間が大きいほど鋼材温度が高いことを示しており、木材の隙間における空気対流などに起因していると考えられる。図8に熱電対B-7, B-8, D-7, D-8の時刻歴温度変化を示す。同図より試験体Dにおける木材間の空気層温度(D-8)は炉内温度に比べて大幅に低く、木材間の隙間が狭い(9mm)試験体の方が空気層の温度上昇を抑えられていることが分かる。また、B-7, B-8の温度差に比べて、D-7, D-8の温度差が大きいことから、隙間間隔が狭いと対流による影響が小さいために対流熱伝達率が小さいと考えられる。

実験後の炭化状況を図9, 図10に示す。試験体Bは前述のとおり木材部分が実験中に剥落し、ほとんどすべての断面が炭化した。試験体A, C, Dにおいてボルト部周辺を除いた部分の45分加熱時炭化

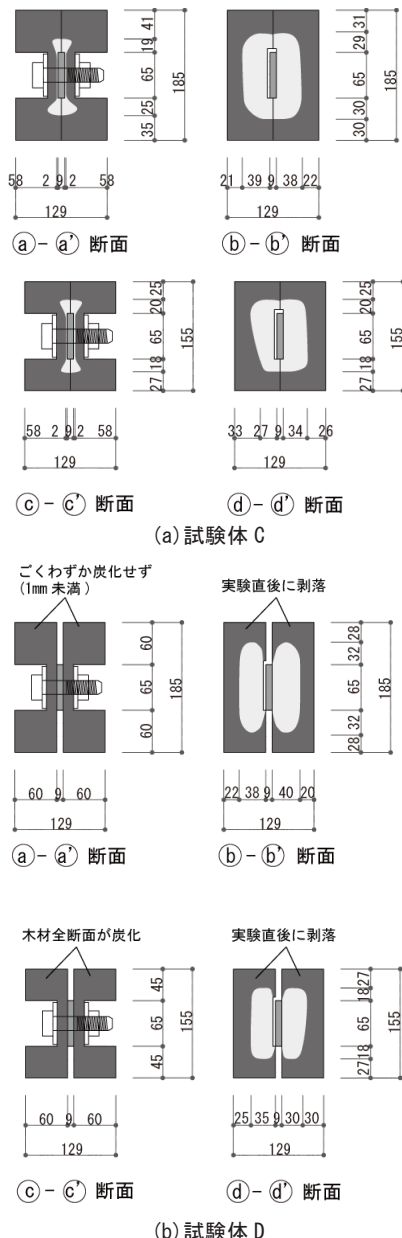


図 10 45 分加熱後炭化性状 (試験体 C, D)

深さはそれぞれ 25~31mm, 21~33mm, 20~30mm であった。この結果より本実験における国産スギ材の炭化速度は 0.44~0.73 mm/min であることが分かる。なお試験体 D については実験直後に試験体を加熱炉から取り出す際に木材部分が剥落した。また全ての試験体のボルト部周辺はほぼすべて炭化したことが分かる。炭化の抑制に鋼板が寄与しているような現象は観察されなかった。

### 3. 結論

鋼板を木材で挟んでボルトにより接合した鋼木複合断面部材について 8 断面の試験体 4 体を作成し、45 分間の耐火実験を行なった。その結果、2 断面では木材の隙間が大きいため鋼材の温度上昇が大きかったが、他の 6 断面については 45 分加熱時の鋼材平均温度は 270℃以下、鋼材最高温度は 350℃以下であった。準耐火構造として性能評価するためには載荷加熱実験が必要<sup>16)</sup>であるため、本研究ではその性能を確認することはできない。しかし、上記の範囲内の温

度上昇であれば、鋼材の耐力と剛性の劣化は限定的と考えられ、準耐火構造としての適用可能性は十分高い。また本実験より、(1) 被覆厚さ 45mm で鋼材の温度上昇は限定的であること、(2) 高力ボルトによる一体化接合部を露出させたままでも温度上昇が限定されること、(3) 鋼材小口を露出する際の鋼材温度は鋼材寸法よりも木材間の隙間幅に大きく影響されることの知見が得られた。

今後の課題として、準耐火構造としての適合性を判断するために軸力加力下における加熱実験や、梁部材としての耐火性能評価実験、柱・梁接合方法の提案および耐火性能評価実験などが挙げられる。

### 参考文献

- 楠寿博, 津村千香子, 金子洋文, 杉内章浩, 奥野智久: 木材と鋼板を組み合わせた合成部材の圧縮強度実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 III (C-1), pp. 61-62, 2001. 9
- 楠寿博, 津村千香子, 杉内章浩, 奥野智久: 木材と鋼板を組み合わせた合成部材の圧縮強度実験 (その 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 III (C-1), pp. 163-164, 2002. 8
- 杉内章浩, 津村千香子, 楠寿博, 奥野智久: 木材と鋼板を組み合わせた合成部材の圧縮強度実験 (その 3: 理論的検討), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 III (C-1), pp. 165-166, 2002. 8
- 堀井健史, 坂田弘安, 竹内徹, 鈴木達人, 中村博志: シアリング接合を用いた杉集成材と鋼板によるハイブリッド部材の力学的挙動に関する実験研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 584 号, pp. 125-132, 2004. 10
- 坂田弘安, 堀井健史, 竹内徹, 中村博志, 松田和浩: シアリング接合部の木材繊維方向せん断性能に関する実験研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 627 号, pp. 773-779, 2008. 5
- 坂田弘安, 上角充広, 富本淳, 中村泰教: 摩擦接合型コネクタを用いたスギ鋼板ハイブリッド部材の軸方向特性, 日本建築学会構造系論文集, 第 627 号, pp. 811-817, 2008. 5
- 坂田弘安, 上角充広, 富本淳, 中村泰教: 摩擦接合型コネクタを用いたスギ集成材と鋼板接合部のせん断性能に関する実験研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 643 号, pp. 1659-1664, 2009. 9
- 高木次郎, 荒木慶一, 見波進, 遠藤俊貴, 十時哲: トルシア形高力ボルトで一体化した鋼木複合断面部材の開発 その 1 開発計画と一体化接合法の概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 III (C-1), pp. 47-48, 2010. 9
- 十時哲, 高木次郎, 見波進, 荒木慶一, 遠藤俊貴: トルシア形高力ボルトで一体化した鋼木複合断面部材の開発 その 2 一体化接部の実験的性能評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 III (C-1), pp. 49-50, 2010. 9
- 遠藤俊貴, 荒木慶一, 高木次郎, 吉田亘利, 見波進: トルシア形高力ボルトで一体化した鋼木複合断面部材の開発 その 3 複合断面柱のモデル化と性能評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 III (C-1), pp. 51-52, 2010. 9
- 日本建築センター, 準耐火建築物の防火設計指針, 1994. 6
- 遊佐秀逸, 増田秀明, 川合孝明, 大貫寿文, 上杉三郎, 並木勝義: 木質系構造の耐火性能に関する研究 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 (A-2), pp. 325-328, 2003. 7
- 田坂茂樹, 遊佐秀逸, 並木勝義: 木質系構造の耐火性能に関する研究 その 23: H 形鋼柱構造のスギ材被覆による 1 時間耐火性能試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 防火 (A-2), pp. 63-64, 2006. 7
- 並木勝義, 遊佐秀逸, 吉川利文, 金城仁: 木質系構造の耐火性能に関する研究 その 27: 角形鋼管柱構造のスギ材被覆による 2 時間耐火性能試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 防火 (A-2), pp. 101-102, 2007. 8
- 木の耐火被覆で耐火構造 5 階建て, 日経アーキテクチャ, pp. 30-34, 2005. 6
- 日本建築総合試験所, 防火耐火性能試験・評価業務方法書, 2005
- 日本建築学会, 鋼構造耐火設計指針, 2008

[2010 年 10 月 20 日原稿受理 2011 年 1 月 28 日採用決定]