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

UNIVERSAL SACRIFICIAL-LAYER THICKNESS INDEPENDENT OF
DESIGNED FIRE-RESISTANCE TIME FOR WOODEN FIREPROOF-STRUCTURAL-ELEMENTS

Bench-scale tests using fire-retardant Japanese cedar laminated-lumber in barrier

伯耆原 智世^{*1}, 長谷見 雄二^{*2}, 斉吉 大河^{*3}, 高瀬 棕^{*4},
上川 大輔^{*5}, 安井 昇^{*6}, 宮林 正幸^{*7}Tomoyo HOKIBARA, Yuji HASEMI, Taiga SAIYOSHI, Ryo TAKASE,
Daisuke KAMIKAWA, Noboru YASUI and Masayuki MIYABAYASHI

Universal design thickness of the sacrificial layer for wooden fireproof structural elements is studied to minimize necessary fire performance of the barrier to be inserted between the sacrificial layer and the load-bearing timber. It is necessary for the universal design thickness to prevent post-fire glowing combustion within the sacrificial layer against any fire exposure time shorter than the designed fire resistance time. Based on bench-scale tests on partial models of the sacrificial layer, the barrier and the near-sacrificial part of the load-bearing timber, the study recommends 25mm as the universal thickness of sacrificial layer for Japanese cedar.

Keywords : Japanese cedar, Fire-resistive construction, Flaming-die-out, glowing combustion, Bench-scale test, fire retardant impregnated wood

スギ, 耐火構造, 燃え止まり, 赤熱燃焼, 小型実験, 難燃薬剤処理木材

1. はじめに

1.1 背景と目的

著者らは、Fig.1 に示すような燃え止まり層に難燃薬剤処理された木材を用いた燃え止まり型木質耐火構造部材を対象として、木質耐火構造に必要とされる加熱終了後に赤熱燃焼を継続せず自消する条件を把握してきた^{1),2),3),4),5),6),7)}。

既報¹⁾では、無処理のスギ集成材で構成される燃えしろ層の厚さを加熱中に燃え止まり層の難燃薬剤の分解温度に達するように設計すれば、燃え止まり層の難燃性能を最低限とすることができ、効率的な部材設計が可能であることを示した。建築物の柱や梁に使用されるスギやカラマツ等の木材の炭化速度は 0.6~0.8mm/min⁸⁾と知られているから、これより、燃え止まり層の難燃薬剤の分解温度がわかれば、要求耐火時間に比例して、燃えしろ層の厚さを厚くすればよいことになる。スギを例にすると、難燃薬剤の分解温度が 195℃の場合、火災加熱が 1 時間なら 25mm、また 2 時間なら 50mm の燃えしろ層厚さで、燃え止まり層に必要な性能が最小化する¹⁾。

一方で、燃えしろ層が一定の厚さ以上ある場合、その内部で赤熱

燃焼を続けるため自消に支障をきたす可能性があることが知られている^{1),9)}。近年、中高層木造建築に関心が高まり、2 時間以上の長時間の耐火時間を有する燃え止まり型木質耐火構造部材の開発も活発化しているが、要求耐火時間に比例して燃えしろ層を厚くしていくと、火災加熱が要求耐火時間より短い場合、加熱中に燃え止まり層が薬剤分解温度に到達せず、火災後に却って燃えしろ層内での赤熱燃焼を誘発する可能性がある。本来耐火性能は、目標とする耐火時間より短い火災加熱を受けた場合でもその性能を発揮すべきであるから、ある目標耐火時間で設計された部材は、その目標耐火時間より短い火災加熱にも耐えうる仕様である必要がある。

そこで、本研究では要求耐火時間に依らない適正な燃えしろ層厚さを把握して、要求耐火時間よりも短い時間で加熱を受けた場合でも自消する耐火構造部材の設計法を検討する。

Fig.1 Wooden fireproof Structural-elements

^{*1} ㈱竹中工務店/早稲田大学大学院 博士課程・修士(工学)

^{*2} 早稲田大学理工学術院 教授・工博

^{*3} 早稲田大学大学院 修士課程

^{*4} (国研)森林総合研究所 修士(工学)

^{*5} (国研)森林総合研究所 博士(工学)

^{*6} 早稲田大学理工学術院 招聘研究員・博士(工学)

^{*7} ㈲ティー・イー・コンサルティング

Takenaka Corporation / Graduate School, Waseda University, M.Eng.
Prof., Dept. of Architecture, Waseda University, Dr.Eng.
Graduate School of Waseda University
Forestry & Forest Products Research Institute, M.Eng.
Forestry & Forest Products Research Institute, Dr.Eng.
Visiting Researcher, RISE, Waseda University, Dr.Eng.
T.E.Consulting Inc.

1.2 研究対象

本研究の対象とする燃え止まり型木質耐火構造部材は、Fig.1 に示すように、無処理の木材（以下、無処理木材）で構成し仕上げを兼ねる燃えしろ層と、その内側に難燃薬剤処理された木材（以下、薬剤処理木材）で構成する燃え止まり層、さらに内側に無処理木材で構成する荷重支持部の3層からなる。

すべての部材が木質部材であることから、従来の集成材製造ラインで製造でき¹⁰⁾、自重がほかのRC造、鉄骨造と比べても軽く、軟弱地盤でも建て方が容易なことから、潜在的に高い生産性が見込まれる。

樹種は、国内で最も需要が見込まれるスギ、難燃薬剤は最も汎用性のある窒素リン酸系（丸菱油化製ノンネン W2-50）を使用する。既報⁹⁾より、薬剤固定量が少なく燃え止まり層への入熱に対する吸熱が不十分となり、赤熱燃焼を誘発し得ることがわかっている。スギ材では目標注入量を 180kg/m^3 以上確保すれば、燃え止まり層への入熱に対して十分な性能を持つことが示されている⁹⁾ことから、以降の検討では、燃え止まり層の目標薬剤注入量を 180kg/m^3 とする。これは、一般的に流通する防火材料では準不燃材料に相当する。

薬剤注入量のばらつきを抑制するため、穿孔処理（ $\phi 1.5\text{mm}$ ドリルインサイジング 800個/m^2 、ピッチ 25mm 、スパン 50mm ）を行ったのち薬剤処理を施した。

1.3 研究の基本計画

燃えしろ層が厚いと、任意の加熱時間終了までに燃え止まり層が薬剤分解温度に達せず、燃え止まり層の吸熱を燃えしろ層の温度上昇抑制に活用できないこと、表面の炭化層が断熱材の働きをして内部の温度が降下し難いことから、赤熱燃焼が加熱終了後も継続し自消しない可能性がある。一方で、燃えしろ層が薄すぎると、加熱中に燃え止まり層が負担する入熱が多くなる⁹⁾ことから、燃え止まり層の難燃性能を上げるか、燃え止まり層を厚く設計して耐火性能を担保する必要がある。燃え止まり型木質耐火構造部材のコストと性能の信頼性に影響する基本的な要因は燃え止まり層の設計内容であり、薬剤処理木材の使用は最小限に抑えたい。

そこで本研究では、要求耐火時間に依らない適正な燃えしろ層の厚さを以下のように検討した。

① 実験Ⅰ-要求耐火時間に対応した燃えしろ層厚さと自消性状の把握

要求耐火時間より短い時間で加熱した場合に自消するかを把握するために、燃え止まり型木質耐火構造部材の断面の一部を再現した小型試験体を用いて小型加熱実験を行った。試験体は、耐火加熱2時間で燃え止まり層に必要な性能を最小化するように燃えしろ層厚さを設計し、実験の加熱時間を2時間と1時間の2通りとした。また、無処理木材による燃えしろの効果を確認するため、燃えしろ層の無処理木材を燃え止まり層と同じ薬剤処理木材に置換した仕様でも実施した。実験では、炭化性状や内部温度推移を測定し、要求耐火時間に依らない適正な燃えしろ層厚さおよび燃え止まり層の自消する条件の目安を把握した。

② 実験Ⅱ-要求耐火時間に依らない適正な燃えしろ層厚さの把握

実験Ⅰから加熱時間が要求耐火時間より短いと、燃えしろ層が自消せず赤熱燃焼が継続する場合があると確認できた。一方、

実験Ⅰで検討した自消条件から、要求耐火時間に依らない適正な燃えしろ層厚さは、1時間耐火性能に対応する 25mm と予測し、加熱時間を30分、45分、1時間、2時間の4通りとして、自消するかを検証した。

2. 実験Ⅰ-要求耐火時間に対応した燃えしろ層厚さと自消性状の把握

要求耐火時間を目標に設計した燃えしろ層厚さを用いた燃え止まり型木質耐火構造部材が要求耐火時間よりも短い時間加熱に曝された場合、自消するか把握するために、小型加熱実験を行った。既報⁹⁾をもとに2時間耐火性能を目標として燃えしろ層および燃え止まり層を設計した燃え止まり型木質耐火構造の断面を再現した小試験体を1時間、2時間の2通りの加熱時間で加熱し、脱炉時の赤熱燃焼の継続有無を確認した。

また燃えしろ層は無処理木材で可燃物のため、薄いほうが自消性には有利だが、加熱中に燃え止まり層への入熱から保護する役割を考えると厚いほうが有利と考えられる。そこで、燃えしろ層の有無による耐火性能への影響を把握するために、前述の2時間耐火性能を目標とした仕様の燃えしろ層の無処理木材を薬剤処理木材に置き換えた仕様を用意し、2時間標準耐火加熱実験を実施した。特に加熱終了時と脱炉時の炭化深さから、燃えしろ層による燃え止まり層の被覆効果の関係を定量的に把握した。

2.1 実験方法

本実験は、(国研)森林総合研究所の小型炉を用いて、側面加熱にてISO834標準加熱曲線に沿って1時間または2時間加熱後、炉内で6時間自然放冷した。炉の概略図をFig.2に示す。

Fig.2 Specimens layout

Fig.3 Specimens of test I (ex. S50-60, S50-120)

2.2 試験体

試験体は、厚さ 50mm のスギ集成材(厚さ 25mm のラミナ 2 層)の上に、燃え止まり層として厚さ 50mm のスギ薬剤処理木材(厚さ 25mm のラミナ 2 層)を接着し、さらにその上に燃えしろ層として厚さ 50mm のスギ集成材、または 50mm のスギ薬剤処理木材を接着した。加熱面の大きさは縦 300×横 400mm とした。各試験体の断面構成を Table 1 に示す。スギ薬剤処理木材は、窒素リン酸系難燃薬剤(丸菱油化製ノンネン W2-50)を目標注入量 180kg/m³ 注入した。各ラミナの接着はレゾルシノール樹脂系接着剤を用いた。

試験体名は Sa-b と表記し、a は無処理木材の燃えしろ層の厚さ [mm]、b は加熱時間[分]とする。本章の試験体は、S50-60、S50-120、S0-120 とする。

2.3 測定項目

試験体内部温度、裏面温度、炉内温度を測定した。内部温度の測定間隔は深さ方向に 10mm 間隔を基本とし、測定には K 型シース熱電対(φ 1.0mm)を用い、裏面から垂直に挿入し、裏面で固定した。裏面温度の測定にはディスク型熱電対を用いた。測定点は Fig.3 に示す。炉内温度をインコネル熱電対(φ 2.5mm)により計測した。

また、脱炉時に目視にて赤熱燃焼の継続の有無を確認した。

2.4 実験結果と考察

Table 1 に脱炉時の試験体断面(炭化性状)と加熱終了時および脱炉時の炭化深さ、脱炉時の赤熱燃焼の有無の観察結果を示す。加熱終了時の炭化深さは、無処理木材の炭化温度を 260℃、薬剤処理木材の炭化温度を 195℃^{3),4)}として、内部温度の測定深さを線形補完して算出した。脱炉時の炭化深さは、脱炉後に Fig.2 に示す位置で試験体を切断し、炭化深さを計測した。脱炉時に赤熱燃焼が継続していた場合“×”、自消した場合“○”と示す。Fig.4～6 に各試験体の内部温度推移を示す。

2.4.1 加熱時間による炭化性状の違いと自消の関係

S50-120(2 時間加熱)は、脱炉時に赤熱燃焼は見られず Fig.5 の試験体内部温度からも加熱終了時から炉内温度の低下に沿って内部温度は低下していることから、自消に至ったことがわかる。既往研究の結果⁹⁾から 2 時間耐火性能を想定して製作した断面構成の試験体は、2 時間の火災加熱に曝された場合、自消すると言える。

Fig. 4 Temperature (S50-60)

Fig. 5 Temperature (S50-120)

Fig. 6 Temperature (S0-120)

Table 1 Results of test I

Specimen	Sacrificial layer thickness [mm]	Heating time [min]	Section (Temperature measuring positions)	Carbonization	Char layer depth [mm]	Results*2
					Heating end*1 Test end	
S50-60	50	60			41 75 ← +34mm	×
S50-120		120			72 89 ← +17mm	
S0-120	0	120			60 80 ← +20mm	○

*1: Char layer depth is calculated by linear interpolation of internal temperature. Carbonization temperature is 260 °C for untreated wood, 195°C for fire-retardant wood.

*2: ○ : Glowing combustion stopped after end of the test, × : Glowing combustion continued after end of the test

一方で、同じ断面構成の仕様を1時間加熱した S50-60 は、脱炉時に赤熱燃焼が確認でき、自消しなかった。また Fig.4 より、加熱終了後、緩慢に温度低下したが、390 分以降に燃えしろ層内部が 400～600℃程度まで温度上昇していることから、燃えしろ層内で赤熱燃焼が継続したことがわかる。これより、想定した耐火時間よりも短い加熱に曝された場合、自消しない場合があることが示された。

Table 1 の炭化深さから、自消した S50-120 の加熱終了から脱炉までの炭化の進行（以降、燃え進み）は 17mm であるのに対して、S50-60 では 34mm と 2 倍燃え進んでいること、炭化図(Table 1)から、S50-120 は炭化層が概ね均一に燃え進んでいるのに対して S50-60 では燃え進みにばらつきがあることから、加熱終了後に赤熱燃焼が局部的に起こることによって激しく燃え込んだと推定される。

2.4.2 燃え止まり層内部の温度と自消の関係

S50-60 および S50-120 の燃え止まり層内部の温度(Fig.4 および Fig.5 の③)を比較すると、自消した S50-120 では加熱開始後 97 分で薬剤の分解温度(195℃^{3),4})を超えたが、自消しなかった S50-60 では、加熱中には 100℃にも達しなかった。このことから、自消せずに赤熱燃焼が継続した理由は以下の 3 点が考えられる。

- ① 加熱中に薬剤分解温度に達せず、燃えしろ層内部の温度上昇の抑制に寄与できなかった。
- ② 試験体表面に形成された炭化層が、加熱終了後も残存して燃えしろ層の深部から外部への熱損失を抑制し、試験体内部の燃えしろ層の未炭化部分の燃焼が持続した。
- ③ 燃え止まり層内の温度(Fig.4 の 50～70mm)が、加熱終了後から脱炉まで連続的に 200℃前後を維持していることから、試験体内部で持続する赤熱燃焼による加熱によって、薬剤が分解・消費し続け、赤熱燃焼が継続した。

2.4.3 燃えしろ層の薬剤処理の有無と自消の関係

Table 1 から、S50-120 と燃えしろ層部分を薬剤処理した S0-120 の炭化深さを比較すると、加熱終了時までではそれぞれ 72mm、60mm と 10mm 以上の差があったが、その後加熱終了後から実験終了時までの燃え進みはそれぞれ 17mm、20mm で概ね一致した。これより、燃えしろ層部分に薬剤処理木材を用いれば、加熱中の炭化の進行が緩慢になるが、加熱中に燃え止まり層温度が薬剤分解温度に達するように燃えしろ層の厚さを設計すれば、加熱終了後の燃え進みは、燃えしろ層が薬剤処理されているか否かに関わらないと考えられる。よって、加熱中に燃え止まり層表面が難燃薬剤の分解温度に達することが保証されていれば、燃えしろ層を薬剤処理せずとも耐火構造部材としての耐火性能には大きな影響はないと考えられる。

以上より、要求耐火時間によって、燃えしろ層と燃え止まり層の合計厚さを設計し、その中で燃えしろ層の厚さを調整すればよい。ここで、燃え止まり層の性能および厚さを最低限にして、燃え止まり型木質耐火構造部材の目標耐火性能を達成するには、燃えしろ層厚さを自消が担保される最大厚さとする必要がある。

2.5 加熱時間に依らずに自消する燃えしろ層厚さの推察

実験 I から、要求耐火時間内に燃え尽きるように燃えしろ層の厚さを設計した場合、その設計時間よりも加熱時間が短いと、燃え止まり層温度が加熱終了時までに薬剤分解温度に達せず、自消しない場合があることが示された。

そこで、加熱時間に依らず自消させるために、燃えしろ層を薄く

すれば、加熱終了後の赤熱燃焼の可能性は小さくなるが、加熱時の燃え止まり層への入熱は大きくなり、結果的に燃え止まり層の性能および厚さの増強が必要になる。燃えしろ層を薬剤処理木材とした仕様 S0-120 の結果から、加熱中に炭化が完了する範囲では燃えしろ層を薬剤処理木材とせずとも耐火性能に大きな影響がないことから、最低限の燃え止まり層の性能および厚さで、目標耐火性能を発揮させるには、燃えしろ層厚さを、加熱終了後にその内部で赤熱燃焼しない上限値とすることが、最適な設計法といえる。

スギを対象とした既往実験¹⁾では、燃えしろ層は厚すぎると赤熱燃焼を誘発するが、加熱面から炭化深さ 10mm～20mm では表面からの熱損失で自消すると報告されている。また、スギやカラマツ等の木材の炭化速度は 0.6～0.8mm/分⁸⁾と知られていることから、火災加熱を 12.5～33 分程度受けた場合では表面からの熱損失で自消すると推測できる。

これより、30 分以上加熱を受けても自消するにはその時点で燃え止まり層の温度が薬剤分解温度に達している必要がある。Fig.4 から、加熱開始 27 分後に深さ 20mm、41 分後に深さ 30mm が薬剤分解温度(195℃^{3),4})に達することがわかる。これらより、燃えしろ層厚さを 20～30mm で設計すれば、短時間の加熱であれば表面から熱損失で自消し、それ以上の加熱に対しては燃え止まり層の自消効果によって自消すると推測される。

3. 実験Ⅱ-要求耐火時間に依らない適正な燃えしろ層厚さの把握

3.1 目的および試験体設計内容

本章では、加熱時間に依らず、要求耐火時間より加熱時間が短くても確実に自消する燃えしろ層厚さを検討するために、小型加熱試験を行った。前章の検討から、表面からの熱損失または燃え止まり層の自消効果により、自消可能な燃えしろ層の厚さは 20～30mm と推測されること、既報で燃えしろ層 25mm の仕様が 1 時間耐火性能を有する¹⁾ことを確認していることから、この仕様で加熱時間をパラメータとして加熱し自消の有無を検証する。加熱時間は前章から、加熱終了時の炭化が燃えしろ層のみに留まると考えられる 30 分、燃え止まり層の表面が薬剤分解温度に達すると考えられる 45 分、1 時間および 2 時間とした。

Fig.7 Specimen of test II

3.2 試験体

Fig.7 に本章で用いる試験体仕様を示す。試験体は既往研究¹⁾の1時間耐火仕様と同仕様とし、厚さ50mmのスギ集成材(厚さ25mmのラミナ2層)の上に、燃え止まり層として厚さ50mmのスギ薬剤処理木材(厚さ25mmのラミナ2層)を接着し、さらにその上に燃え止る層として厚さ25mmのスギラミナを接着した。スギ薬剤処理木材は前章と同様、室素リン酸系難燃薬剤(丸菱油化製ノンネン W2-50)を目標注入量180kg/m³注入した。加熱面の大きさは縦300×横400mmとし、各ラミナの接着はレゾルシノール樹脂系接着剤を用いた。試験体名は前章と同様にSa-bと表記し、aは燃え止る層厚さ[mm]、bは加熱時間[分]とする。

3.3 実験方法

ISO834 標準加熱曲線に準拠して30分、45分、1時間、2時間加熱後、各々加熱時間の3倍以上(2時間加熱の場合6時間、その他3～4時間)炉内で自然放冷した。炉は前章と同様、(国研)森林総合研究所の小型炉を用いた。概略図をFig.2に示す。

3.4 測定項目

測定項目は前章と同様、試験体内部温度、裏面温度および炉内温度とした。内部温度は、裏面から垂直に挿入したK型シース熱電対(φ1mm)を用い、深さ方向に10mm間隔で測定した。裏面温度はディスク型熱電対により測定した。測定点をFig.7に示す。炉内温度はインコネル熱電対(φ2.5mm)により計測した。また、脱炉時に目視にて赤熱燃焼の継続の有無を確認した。

3.5 実験結果と考察

Table 2 に脱炉時の試験体断面(炭化性状)と加熱終了時および脱炉時の炭化深さ、脱炉時の赤熱燃焼の有無の観察結果を、また、Fig. 8～11 に内部温度推移を示す。

Table 2 Results of test II

Specimen	Sacrificial layer thickness [mm]	Heating time [min]	Carbonization	Char layer depth [mm]	Results ^{*2}
				Heating end ^{*1}	
				Test end	
S25-30	25	30		22	○
27					
S25-45		45		31	○
				35	
S25-60		60		33	○
				48	
S25-120		120		58	○ ^{*3}
				78	

:Untreated wood

: Fire-retardant wood

: Char layer

*1: Char layer depth is calculated by linear interpolation of internal temperature.
Carbonization temperature is 260 °C for untreated wood, 195 °C for fire-retardant wood.

*2: ○ : Glowing combustion stopped after end of the test

× : Glowing combustion continued after end of the test

*3: Burning of the end of the specimen is due to insufficient coverage at the end of the specimen.

炭化深さの算出方法および脱炉時の自消の判断は前章と同様とする。以降、木質耐火構造の性能評価¹¹⁾に倣い、脱炉時に赤熱燃焼が継続しておらず自消し、かつ荷重支持部まで炭化していない場合を「燃え止まった」と判断する。

Fig.8～11 よりすべての加熱時間で、加熱終了後、炉内温度の低下に伴い試験体内部温度も低下し自消した。

Fig. 8 Temperature (S25-30)

Fig. 9 Temperature (S25-45)

Fig. 10 Temperature (S25-60)

Fig. 11 Temperature (S25-120)

Table 2 より 2 時間加熱以外は燃え止まったが、2 時間加熱の場合は、脱炉時に炭化深さ 78mm となり、荷重支持部(加熱表面から深さ 75mm 以遠)まで炭化が進行した。脱炉時に赤熱燃焼は見られなかったこと、荷重支持部の内部温度(Fig.11 の④)が最高 225℃(加熱開始から 210 分後)に達したあと、炉内温度の低下に伴い低下しことから、炉内での自然放冷中の燃え進みは、燃えしろ層の赤熱燃焼に依るものではなく、燃え止まり層の厚さ、または薬剤の含侵が不均一であったりするなど、燃え止まり層の性能が不足したためと考えられる。また端部が燃え込んでいるのは、端部の被覆不良によるものである。

3.5.1 加熱時間の違いが自消効果に与える影響

30 分加熱の試験体(S25-30)では、Table 2 より加熱終了時および脱炉時の炭化深さがそれぞれ 22mm、27mm であることから、燃えしろ層は 30 分の加熱で概ね全体が炭化し、炉内での自然放冷中はほぼ燃え止まり層は炭化せずに自消したと言える。一方で燃え止まり層の内部温度(Fig.8 の③)は、加熱終了時に 100℃にも達していない。これより、燃えしろ層厚さが 25mm の場合、加熱中に全て炭化しても炭化層は十分薄く、燃え止まり層の自消効果によらず、表面からの熱損失で自消する見通しを得た。以上から、加熱時間が 30 分より短い場合についても、炭化層はさらに薄くなるため、表面からの熱損失により自消すると考えられる。

45 分加熱の試験体(S25-45)の加熱終了時の炭化深さは、Table 2 より 31mm であることから、加熱時間が45 分を超えると加熱終了までに厚さ 25mm の燃えしろ層は完全に炭化したことがわかる。また加熱終了時に難燃薬剤の分解温度(195℃^{3),4})に達する深さを燃え止まり層温度(Fig.9 の②,③)から線形補完して求めると、加熱表面から 29mm であることから、燃え止まり層の自消効果が加熱終了時に発揮されていると推定される。

これらより、45 分以上の火災加熱に曝される場合、自消の可否は燃えしろ層以遠の、燃え止まり層の性能次第と言える。

3.5.2 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

本実験では、2 章で示した燃えしろ層と自消効果の検討に基づいて断面を設計した燃え止まり型木質耐火部材の自消性を加熱時間に依らず担保できることを検証した。

これにより、薬剤処理木材(薬剤分解温度 195℃^{3),4})を燃え止まり層とする燃え止まり型木質耐火構造部材の燃えしろ層厚さを 25mm 以下とすれば、加熱時間に関わらず自消する見通しが得られた。

4. 総括

2 時間以上の長時間の耐火性能をもつ木質耐火構造部材の開発が進められている中で、要求耐火時間ごとに燃えしろ層の厚さを設計すると、要求耐火時間よりも短い火災加熱に曝された場合、却って燃えしろ層内での赤熱燃焼を誘発し、自消しない可能性がある。

そこで本研究では、スギ、薬剤処理スギで構成した燃え止まり型木質耐火構造部材において、一方向からの断面を模した小型試験を行い、加熱時間と加熱終了後の自消性状に関して以下の 3 点を明らかにした。

- ① 加熱終了時に燃え止まり層が難燃薬剤の分解温度に達するように、スギを例にして、燃えしろ層厚さを耐火 1 時間なら 25mm、2 時間なら 50mm と、要求耐火時間に合わせて設計すると、要求耐火時間よりも加熱時間が短い場合、燃え止まり層で自消を確保できなくなる場合がある。これは燃えしろ層が実際の加熱時間に対して厚いために、加熱中に薬剤分解温度に達せず、加熱終了後には燃えしろ層深部で赤熱燃焼が持続しながら、その表面側では厚い炭化層が残存して熱損失を抑制するため、燃え止まり層に対して、却って薬剤の分解温度を超える加熱が長時間にわたり続くことが原因である。
- ② スギにおいては、加熱時間および燃え止まり層の種類や性能に関わらず、自消する燃えしろ層の厚さは、25mm 以下である。25mm までは木材表面からの熱損失により自消し、それ以遠は燃え止まり層の性能により自消する。燃え止まり層の種類によって性能発揮する温度帯が異なるため、その温度が低いほど加熱時間に依らず自消する燃えしろ層の厚さは厚くなる可能性がある。
- ③ 燃えしろ層は、加熱中に炭化が完了する範囲では薬剤処理木材とせずとも耐火性能に大きな影響がないことから、薬剤処理木材の使用を最小限に抑えるには、燃えしろ層の無処理木材の厚さを加熱終了後に赤熱燃焼しない上限値とすることが、燃え止まり型耐火構造部材として最適な設計法を言える。

謝辞

本論文は文献 5),6),7)で報告済みの実験内容に対して、加筆・修正を加えたものである。実験は、科学研究費「大断面木質部材の耐火性能設計の工学モデル」(研究代表者：長谷見雄二)および「大規模居室における内装の燃焼拡大性状の予測と火災規模の局限化に関する研究」(研究代表者：長谷見雄二)の一環として実施した。本研究を行うにあたり、(国研)森林総合研究所をはじめ、実験および試験体の製作に関わった皆様には多大なるご助言、ご協力を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Yamaguchi, T., Kamikawa, D., Hasemi, Y., Yasui, N., Takase, R., Miyabayashi, M., Suzuki, J., : Engineering approach to design of wooden fireproof structural elements based on the sacrifice-layer concept, Journal of Environmental Engineering (Transaction of AIJ), Vol. 81, No. 730, pp. 1065-1074, 2016. 12 [in Japanese]
山口智世ほか 6 名：燃え止まり型木質耐火部材の工学的設計法に関する研究 小型試験に基づく燃えしろ・燃え止まり層の設計法の検討, 日本建築学会環境系論文集, 第 81 巻, 第 730 号, pp.1065-1074, 2016. 12
- 2) Takase, R., Kamikawa, D., Hasemi, Y., Yasui, N., Miyabayashi, M., :Practical Verification of Flaming-Die-Out in Wooden Fireproof Structural Elements; Bench-Scale Fire Tests in tandem with Fire-Retardant Distribution Analysis, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Fire Safety, pp. 291-292, 2017. 7 [in Japanese]
高瀬稜ほか 4 名：木質耐火構造部材の燃え止まり性能担保に関する研究 難燃薬剤の実態的分布の把握と小型加熱実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 防火, pp. 291-292, 2017. 7
- 3) Yamaguchi, T., Hasemi, Y., Yasui, N., Komiya, M., Kamikawa, D., Miyabayashi, M., :Measurement of Pyrolysis and Burning of Wood for the Modeling of Glowing Combustion of Timber Structure, Summaries

- of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Fire Safety, pp.469-472, 2013. 7 [in Japanese]
山口智世ほか 5 名：火災加熱される木質部材の熱分解・燃焼性状のモデル化に向けた基礎研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 防火, pp. 469-472, 2013. 7
- 4) Yamaguchi, T., Komiya, M., Kamikawa, D., Hasemi, Y., Yasui, N., Miyabayashi, M., :Measurement of Pyrolysis and Burning of Wood for the Modeling of Glowing Combustion of Timber Structure, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Fire Safety, pp. 245-246, 2014. 7 [in Japanese]
山口智世ほか 5 名：木材の燃焼過程のモデル化に向けた熱物性値の把握, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 防火, pp. 245-246, 2014. 7
- 5) Takase, R., Kamikawa, D., Hasemi, Y., Yasui, N., Miyabayashi, M., :Engineering Design Method of Wooden Fireproof Construction by Sacrifice-Layer Concept : Part-3: Feasibility of 2-hour Fireproof Construction, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Fire Safety, pp. 3-4, 2016. 7 [in Japanese]
高瀬稔ほか 4 名：燃え止まり型木質耐火構造部材の工学的設計法に関する研究 その 3 自消性に対する加熱時間の影響の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 防火, pp. 3-4, 2016. 7
- 6) Yamaguchi, T., Saiyoshi, T., Hasemi, Y., Kamikawa, D., Takase, R., Yasui, N., Endo, T., Watanabe, S., :Development of Total Timber 2-hour Fireproof Structural Element by Reinforced Sacrifice Layer Concept (Part1) Determination of the Maximum Sacrifice layer Thickness, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Fire Safety, pp. 269-270, 2018. 7 [in Japanese]
山口智世ほか 7 名：2 時間耐火性能を有する燃え止まり型木質耐火構造部材に関する研究(その 1)適正な燃えしろ層厚さの把握, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 防火, pp. 269-270, 2018. 7
- 7) Saiyoshi, T., Yamaguchi, T., Hasemi, Y., Kamikawa, D., Takase, R., Yasui, N., Endo, T., Watanabe, S., :Development of Total Timber 2-hour Fireproof Structural Element by Reinforced Sacrifice Layer Concept (Part2)Design of the Fire-Resistant Layer, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Fire Safety, pp. 271-272, 2018. 7 [in Japanese]
斉吉大河ほか 7 名：2 時間耐火性能を有する燃え止まり型木質耐火構造部材に関する研究(その 2)適正な燃えしろ層厚さに対応した燃え止まり層の必要性能の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 防火, pp. 271-272, 2018. 7
- 8) Naruse, T., Nakamura, K., Yusa, S., Masuda, H., Harada, T., Yamada, M., Sato, A., : Fire Resistance of Structural Timber Part1: Charring Rate Cedar and Larch, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Fire Safety, pp. 11-12, 2004. 7 [in Japanese]
成瀬友宏ほか 6 名：構造用製材の耐火性能 その 1：スギとカラマツの炭化速度, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 防火, pp.11-12, 2004. 7
- 9) Kamikawa, D., Harada, T., Miyabayashi, M., Kakae, N., Nishimura, K., Miyamoto, K., Ouchi, T., Ando, K., Hattori, N., : Development of Fireproof glued laminated lumbers with Fire-retardant lamina : One and two hour loaded fire resistance tests on Japanese cedar laminated lumber columns, Journal of Environmental Engineering (Transaction of AIJ), Vol. 75, No.657, pp. 929-935, 2010. 11 [in Japanese]
上川大輔ほか 8 名：難燃処理ラミナを用いた耐火集成材の開発：スギ集成材柱の 1 時間および 2 時間耐火性能, 日本建築学会環境系論文集, 第 75 巻, 第 657 号, pp. 929-935, 2010. 11
- 10) Harada T., : Progress toward the Development of Fire-resistant Wooden Structures in Japan, Journal of the Japan Wood Research Society, Vol.55, No.1, pp1-9, 2009 [in Japanese]
原田寿郎：日本における木質耐火構造開発のあゆみ, 木材学会誌, Vol.55, No.1, pp. 1-9, 2009
- 11) Japan Housing and Wood Technology Center: The Method Book of Fire-Proof Performance Test and Evaluation, 2013. 4 [in Japanese]
(公財)日本住宅・木材技術センター：防耐火性能試験・評価業務方法書, 2013. 4

UNIVERSAL SACRIFICIAL-LAYER THICKNESS INDEPENDENT OF DESIGNED FIRE-RESISTANCE TIME FOR WOODEN FIREPROOF-STRUCTURAL-ELEMENTS

Bench-scale tests using fire-retardant Japanese cedar laminated-lumber in barrier

Tomoyo HOKIBARA^{*1}, *Yuji HASEMI*^{*2}, *Taiga SAIYOSHI*^{*3}, *Ryo TAKASE*^{*4},
Daisuke KAMIKAWA^{*5}, *Noboru YASUI*^{*6} and *Masayuki MIYABAYASHI*^{*7}

^{*1} Takenaka Corporation / Graduate School, Waseda University, M.Eng.

^{*2} Prof., Dept. of Architecture, Waseda University, Dr.Eng.

^{*3} Graduate School of Waseda University

^{*4} Forestry & Forest Products Research Institute, M.Eng.

^{*5} Forestry & Forest Products Research Institute, Dr.Eng.

^{*6} Visiting Researcher, RISE, Waseda University, Dr.Eng.

^{*7} T.E.Consulting Inc.

The concept of fireproof construction in Japanese building regulation was redefined in 2000 to enable large wood based buildings to sustain permanent load bearing capability even after enduring the effects of a fire. The target of this study is the fireproof layered structure composed of:

- a) a load bearing part at the core
- b) a barrier (fire-retardant impregnated wood)
- c) a sacrificial layer

This type of layered structure is the furthest behind in terms of development in respect to other types of wood-based fireproof construction.

The authors clarified the condition of ability to self-extinguish, to the point of no further glowing combustion, after the fire heating of this test target. In the previous report, by designing the thickness of the sacrificial layer so as to reach the pyrolysis temperature of the fire retardant agent during heating, the fire retardant performance of the barrier can be minimized. From the pyrolysis temperature of the fire retardant agent, the sacrificial layer thickness may be increased in proportion to the fire resistance time.

However, if there is an optimum thickness of the sacrificial layer at each fire resistance time then the sacrificial layer, which is exposed to fire heating shorter than the designed fire resistance time, cannot self-extinguish. Therefore, the following 2 tests were conducted in order to clarify that the sacrificial layer thickness does not depend on the designed fire resistance time.

- (1) Bench-scale tests were conducted using small specimens modeling the wooden fireproof structural elements in order to confirm whether they self-extinguished when they were heated for a time shorter than the designed fire resistance time.
- (2) From series (1), it was estimated that 25mm is the optimum sacrificial-layer-thickness independent of the designed fire resistance time (the specification had fire resistance for 1 hour). Therefore, the specification was confirmed through further testing that it self-extinguished even when exposed to heating for less than 1 hour.

From these tests, the following conclusions can be drawn.

- 1. The sacrificial layer, with a thickness designed according to the fire resistance time, may not be self-extinguishing in some cases if the heating time is shorter than the designed fire resistance time. The reason are as follows.
First, since the sacrificial layer is too thick to allow the heat to penetrate into the barrier layer by the end of heating, meaning the barrier layer will not reach pyrolysis temperature. Second, the sacrificial layer is kept hot by the carbonized layer on the surface, meaning heat loss on the surface does not cause it to self-extinguish.
- 2. Regardless of the heating time and type of the fireproof performance, the optimum thickness range of surface layer is 25 mm or less. In the range where carbonization is completed during heating, fire proof performance is not greatly affected without using fire retardant wood as the sacrificial layer. Therefore, an optimum design method for wooden fireproof structural elements is to set the sacrificial layer thickness to the upper limit value so that it does not burn by glowing combustion after the end of heating.

(2019 年 1 月 9 日原稿受理, 2019 年 3 月 29 日採用決定)