

有機断熱材と発泡性耐火材を用いた木質材の軽量耐火被覆に関する検討

Study on Lightweight Fireproof Coating for Wooden Materials Using Organic Thermal Insulation and Expandable Fireproof Materials

緒 方 誠二郎 抱 憲 誓 金 崎 俊 造¹⁾

要 約

木質材の耐火被覆には石膏ボードやケイ酸カルシウム板などの無機材料が使用されることが多い。しかし、無機材料の重量が要因で木質材本来の良さである軽量性を活かしきれていない現状がある。本報では、軽量の耐火被覆材の構築を目的に、有機断熱材と発泡性耐火材を積層した耐火被覆方法を検討した。材料の基本的な特性を把握するためのコーンカロリメータ試験、材料の積層構成や厚みをパラメータとして耐火性能を把握するための水平耐火炉による耐火試験を実施した。試験の結果、有機断熱材、発泡性耐火材、薄い無機質材を適切な積層構成、厚みとすることで、要求性能を満たすことが明らかとなり、軽量の耐火被覆が構築可能となった。

目 次

- I. はじめに
- II. 要素試験による材料の選定と基本特性の把握
- III. 積層構成の検討と耐火試験
- IV. おわりに

I. はじめに

近年、地球環境への配慮から持続可能材料に関心が集まっており、特に成長時に二酸化炭素を固定する樹木を原料とする木質材の活用が進んでいる。建築業界においても木質材の適用が中低層建物を中心に増加している。今後は、木質材と鋼材やコンクリートとのハイブリッド化が進み、中低層建物だけでなく、高層建物への適用も部分的に進むと予想される。

木質材は、自然界での循環が可能な持続可能材料であり、そのデザイン性、香りの良さ、軽量性などが良好な一方、鋼材等の構造材と比較して剛性や耐火性能が低い。よって、構造部材としては断面が大きくなる傾向にある上、火災時にも構造性能を維持するためには、十分な耐火被覆が必要となる。

木質材の耐火被覆として、現状は吸熱性能の高い無機質材を積層して使用する場合が多い^{1)~3)}。比較的重く厚みのある無機質材を積層することで、断面はさらに大きくなり、重量

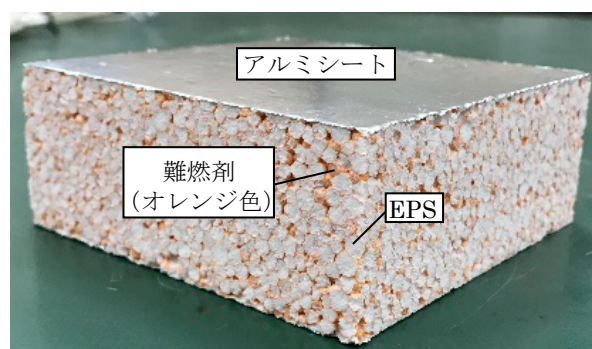


Photo 1 難燃処理された有機断熱材
(Flame Retardant Organic Insulation)

も増加するため、木質材の良さを十分に活かせていないとも考えられる。本報では、従来の無機質材ベースの耐火被覆よりも軽量で薄い耐火被覆の実現可能性について検討した結果を報告する。

II. 要素試験による材料の選定と基本特性の把握

軽量の耐火被覆材の実現のためには、その大部分を軽量な材料で構成する必要があるため、断熱性の高い市販の有機断

1) エンジニアリング事業本部 Engineering Division

キーワード : 木質材, 耐火被覆, 軽量, 有機断熱材, 発泡性耐火材

Keywords : wooden material, fireproof coating, lightweight, organic thermal insulation, expandable fireproof material

熱材⁴⁾(Photo 1)を構成材料の一つとして選択した。この有機断熱材は、難燃剤を添加して発泡させた EPS (Expanded Polystyrene) 材料であり、表面にアルミシートが貼付されている。難燃剤を添加した EPS 材による高い断熱効果とアルミシートによる高い遮熱効果により不燃材料の認定(不燃認定番号 NM-4785)を受けており、建築分野では断熱材として多く活用されている。

一般に有機断熱材は無機材に比べて耐熱性が低く、加熱面に有機断熱材が現しになる場合、早々に燃え尽きることが予想されるが、検討の第一歩として、有機断熱材自体の耐熱性について確認した。

1. 材料試験

コーンカロリメータ試験装置による材料試験を実施し、有機断熱材単体の熱性能を確認する。有機断熱材の比較対象として、同じ有機材である木板に難燃処理を施した材料(以後、難燃処理木板)、及び発泡性耐火材についても同様の試験を実施する。

(1) 試験体

両面にアルミシートが貼付された厚さ 40mm の有機断熱材(Photo 1)、厚さ 50mm の難燃処理木板及び厚さ 3mm の発泡性耐火材を 100mm 角の正形状にカットし、試験体ホルダに格納した。有機断熱材の密度は 40kg/m^3 であり、難燃処理木板の密度は 425kg/m^3 (薬剤注入量 150kg/m^3) である。

(2) 試験方法

コーンカロリメータ試験装置(東洋精機製作所製)を用い、Fig.1 中の「試験方法」に示すように下面に熱電対を貼付した鋼板に試験体を乗せ、上面に放射強度を 50kW/m^2 として与え、60 分加熱した⁵⁾。本報は、木質材に対する耐火被覆を対象とした検討ではあるが、参考文献 5 の方法でこれまでに多くの材料試験を実施しており、それらの材料との比較のため鋼板を用いた。

(3) 試験結果

Fig.1 に各試験体の試験結果を示す。縦軸に鋼板の表面温度、横軸に時間を示す。過去に試験体を載せずに鋼板のみで実施した試験では、10 分で 550°C に到達する結果であった。発泡性耐火材は、発泡して断熱層を形成するため、試験開始から 15 分程度までは温度が急上昇したが、断熱層が形成された後は緩やかな温度上昇となった。有機断熱材と難燃処理木板は試験開始から緩やかに温度が上昇し、60 分到達時の鋼板表面温度は、有機断熱材が 120°C 程度、難燃処理木板が 90°C 程度に留まった。この結果から本試験においては、両者は概ね同等の断熱性能を有することが確認された。

Photo 2 に試験後の有機断熱材の試験体を示す。EPS 材をコーティングする難燃剤部分のみが残存し、EPS 材は炭化消失している。また、上面から 3/4 程度までは難燃剤が炭化し、残り 1/4 は難燃剤が残存している。

試験後の平面形状は元の 100mm から変化がなかったが、厚みが 5mm 程度薄くなり、EPS の消失の影響で球形であった個々の EPS の外殻が潰れたものと考えられる。

2. 要素試験

熱放射加熱下における材料の熱性能を把握できたため、次に中型耐火炉を用いて 60 分の耐火試験を実施し、有機断熱材の耐熱性を検証する。

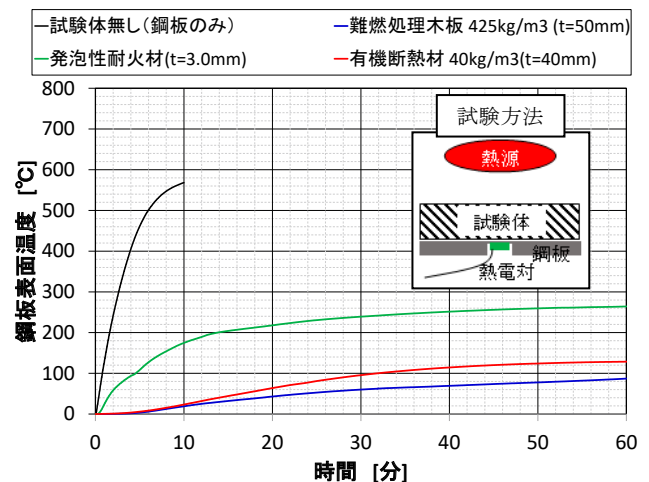


Fig.1 試験方法と鋼板表面温度の経時変化
(Experimental Method and Time History of Steel Plate Surface Temperature)

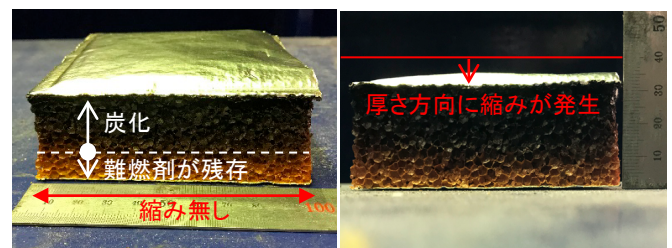


Photo 2 試験後の試験体の状況
(Status of the Specimen after the Test)

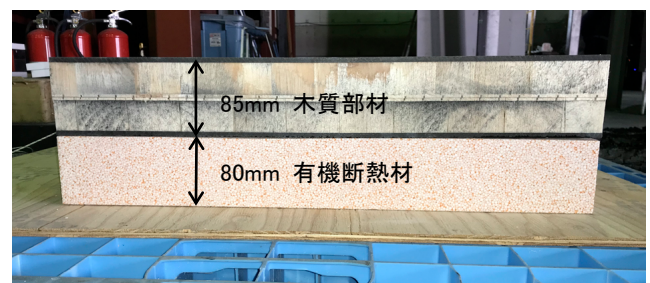


Photo 3 試験体側面 (平面寸法 600mm×600mm)
(Elevation of the Specimen)

(1) 試験体

試験体は厚さ 85mm の木質部材に厚さ 80mm の有機断熱材を貼付する 2 層構成とした (Photo 3)。木質部材と有機断熱材の境界温度を計測するため熱電対を中央 1 点に貼付した。有機断熱材は、表面に何も貼付しない試験体 A とアルミシートを貼付した試験体 B の 2 体とした。試験体の平面寸法は 600mm×600mm とした。

(2) 試験方法

水平用の中型耐火炉(平面寸法 1.5m×1.5m)に 4 窓のフレームを設置し、その内 2 か所に試験体を設置した後(Photo 4)、ISO 834 加熱曲線に従って 60 分の加熱を行った。加熱終了後に放冷し、試験体の状態を確認した。

(3) 試験結果

試験結果を Fig.2 に示す。炉内平均温度は概ね ISO834 曲線に沿って制御できている。国内では 260℃を燃焼危険温度として防火性能が評価されていることから⁹⁾、木質材と有機断熱材の境界の目標温度を、10℃の余裕度をもった 250℃に設定したが、両試験体共に目標温度を超える結果となった。試験体 A は 10 分を過ぎたところで試験体に割れが発生し (耐火炉の窓から目視で確認)、急激に温度の上昇が始まり、60 分まで温度が単調に上昇した。一方で、試験体 B は 100℃付近に停滞域が現れたが、これは EPS の燃焼により発生した水蒸気が両面のアルミシートによって放出されることなく内部に留まったため、温度上昇の抑制に寄与したものと考えられる。

放冷後の試験体を Photo 5 に示す。試験体 A は細かい割れが発生し、有機断熱材の落下が部分的に見られ、ほぼ全体が炭化していた。試験体 B は、アルミシートが残存せず、有機断熱材も大きな割れを生じたが、部分的に難燃剤の残存が見られた。両試験体とも大きな変形、伸縮は見られなかった。

Ⅲ. 積層構成の検討と耐火試験

Ⅱ章の要素試験において、選定した有機断熱材の基本的な耐熱性を把握できたものの、単体で耐火被覆材として使用することは難しいと判断された。そこで、有機断熱材の高い断熱性能を活かしつつ、軽さと薄さを実現するために他の耐火材料と積層することを検討した。

1. 目標値と積層材料の選定

文献 1~3 によれば木質材に対して無機材を使用した 1 時間耐火仕様では、重量 32.8~35.9kg/m² が必要であることから、軽量化を図るため、積層後の重量が 20kg/m² 以内に収まることを目標とした。また、要素試験においては有機断熱材の厚さを 80mm としたが、意匠性及び施工性を考慮して有機断熱材の厚さを 30mm とし、全体では被覆厚を 50mm 以内に収めることを目標とした。

有機断熱材に加えて積層する耐火材料としては、発泡性耐

火材 (厚さ 3mm)、無機材である繊維強化石膏板 (以下、グラスロック) (厚さ 5mm)、強化石膏ボード (厚さ 12.5mm) を選定した。発泡性耐火材を選定した理由は、可燃性の材料である有機断熱材が直接火炎に曝された場合、早期に割れが発生する恐れがあり、有機断熱材よりも加熱側に軽量かつ薄い断熱材が必要なためである。無機材であるグラスロック、強化石膏ボードを選定した理由は、断熱層を形成する発泡性耐火材、有機断熱材の余裕度を担保するため吸熱層を加える必要があると判断したためである。また、無機材は重い材料、極力薄い材料を選定した。

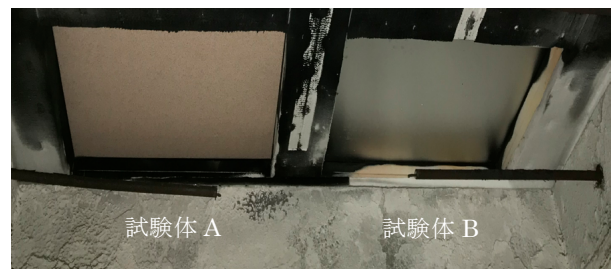


Photo 4 試験体設置状況
(Installation Status of the Specimen)

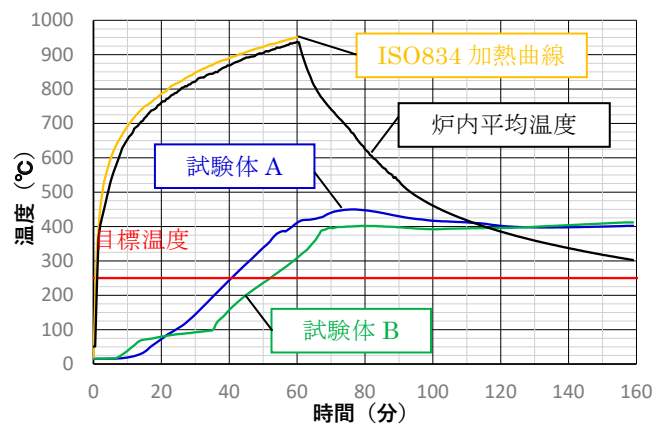


Fig.2 耐火試験結果
(Results of Heating Test)



Photo 5 試験後の状況
(Specimen after Heating Test)

2. 小型耐火炉による1時間耐火試験

選定した積層材料を用いて木質構造の床を想定した耐火試験を実施する。床部材に要求される耐火性能は、建物最上階から4層が1時間耐火、5層から9層は1.5時間耐火、10層以上が2時間耐火となる。高層以上の建物においては、大部分が1.5時間以上の耐火性能が必要なため、耐火被覆材の軽量化による建物重量の低減効果が大きい。しかし、現状では、木質構造は中低層が大部分を占めており、1時間の耐火性能でも軽量化の効果がある程度見込まれる。また、今回の有機断熱材は建築材料の防火材料区分においては、不燃材料であるが、可燃性の有機材であること、II章の要素試験の結果から1.5時間以上の耐火性能を実現するのは困難であると考え、1時間の耐火性能を有する積層構成を検討した。

(1) 試験体

試験体は Table1 に示す3体とし、平面寸法を 600mm×450mm とする。それぞれの積層構成を Fig.3 に示すが、木質材の耐火被覆を想定するため、構造用合板を荷重支持躯体に見立てた上で、選定した材料を積層する。積層材料はそれぞれ木ビスで合板に留め付ける (Fig.4)。有機断熱材は 400mm 間隔、強化石膏ボード及びグラスロックは 300mm 間隔、発泡性断熱材は 200mm 間隔とし、それぞれ合板へのかかりが 15mm 程度となるように木ビスの長さを調節する。

各材料の境界の中央位置には熱電対を設置する (点 A～C)。試験体①の点 B1 の熱電対は、強化石膏ボードの両面に溝を掘って熱電対のコードを這わすため、位置を中央から 100mm 程度ずらして設置する。試験体は SC ボードで側面及び上面を養生した上で、耐火炉に設置する。

試験体①のみ、厚みが目標の 50mm を若干超えたが、重量は 20kg/m² 以内に収まっていること、最も耐火性能に余裕があると想定されることから比較対象として採用した。試験体③は最も薄く、軽量の積層構成であり、重量は 10kg/m² を下回っており非常に軽量である。

(2) 試験方法

有効加熱範囲 H : 1000mm×W : 2000mm の小型耐火炉に軽量鉄骨とケイ酸カルシウム板で構築した断熱アタッチメントを取り付け、平板材を下側から加熱できる装置を使用した。試験体を加熱装置に平置きして設置した状況を Photo 6 に示す。

試験は、ISO834 加熱曲線に従い 60 分の加熱を実施した。加熱終了後は、合板と有機断熱材の境界の温度に最大値が見られるまで炉内に放置した。試験後は、脱炉して加熱面、断面、合板の表面の観察を実施し、合板の炭化状況を確認した。

(3) 試験結果

使用した小型耐火炉は、4 基のバーナーを手動で制御する装置であり、耐火炉内に 7 点の温度センサーを設置している。Fig.5(a)に 7 点の温度センサーの平均値と ISO834 加熱曲線を

示すが、若干のブレは生じているものの、概ね ISO834 加熱曲線に従って加熱できていることが分かる。

Fig.5(b)に点 A の温度の経時変化を示す。150℃程度で発泡による断熱層の構築が始まるため、温度上昇が緩やかになっているのが分かる。試験開始から 30 分までの温度上昇については各試験体で大きな差異はないものの、30 分を過ぎると試験体①、試験体②の 2 体と試験体③で傾向が変わっているのが分かる。これは、試験体①、試験体②については発泡性耐火材の上側に積層する 12.5mm 厚の強化石膏ボードの吸熱効果が大きいためと考えられる。試験体③については、発泡性耐火材の上側には吸熱層として 5mm 厚のグラスロックのみのため、あまり吸熱効果を得られず温度が上昇したものと考えられる。

Table1 試験体仕様
(Specifications of Specimen)

	試験体①	試験体②	試験体③
平面寸法 (mm)	600×450		
厚み (mm)	50.6	45.6	38.1
重量 (kg/m ²)	19.6	15.6	9.6
積層材 1 (躯体側)	有機断熱材 (両面アルミシート 0.03mm)		
積層材 2	強化石膏ボード		グラスロック
積層材 3	グラスロック	発泡性耐火材	
積層材 4 (加熱側)	発泡性耐火材	—	—

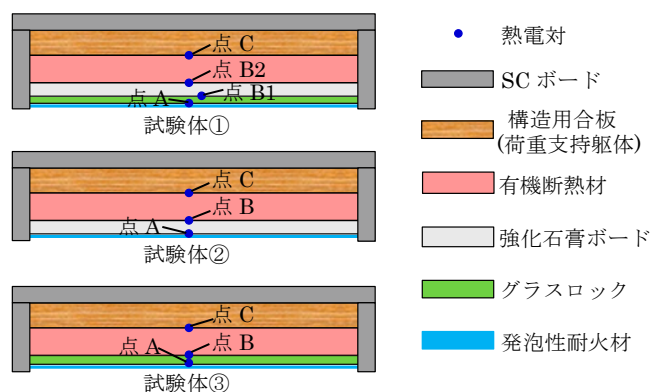


Fig.3 試験体の構成
(Composition of the Specimen)

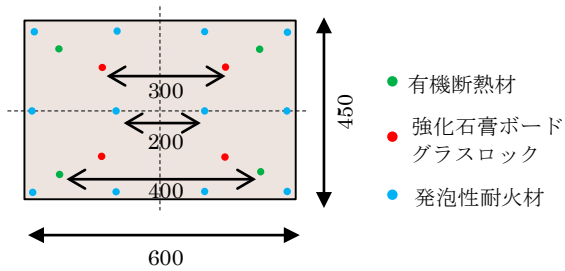


Fig.4 木ビス設置箇所
(Screw Installation Location)

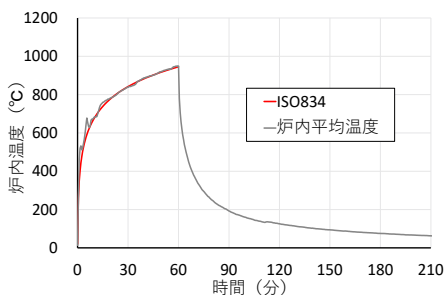


Photo 6 試験体設置状況
(Test Situation of Heating Test)

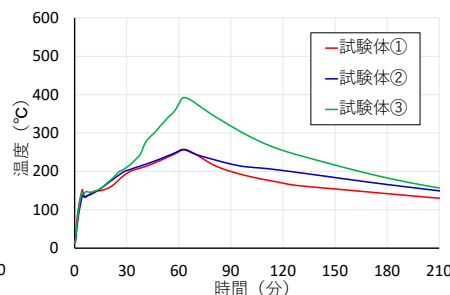
Fig.5(c)に点 B の温度の経時変化を示す。無機材に含まれる結晶水が気化するため、各試験体の 100℃付近には温度の停滞域が見られる。特に試験体①においては、強化石膏ボードとガラスロックが 2 重に積層されているため、その影響が大きい。試験体③はガラスロックのみのため、停滞域が短く早い段階で温度が上昇し始める。

Fig.5(d)に点 A と点 B の温度差の経時変化を示す。各試験体の温度の履歴線と時間軸で囲まれた面積は、大まかには無機材の吸熱エネルギー量と捉えることができる。吸熱層が最も厚い試験体①の吸熱エネルギー量が最も大きく、吸熱層が最も薄い試験体③の吸熱エネルギー量が最も小さい。試験体①の吸熱エネルギー量を 100%とすると、試験体②は 63%であり、試験体③は 27%となる。試験体①と試験体②の違いはガラスロックの積層の有無のみであるので、試験体①から試験体②の吸熱エネルギー量を差し引くと 37%となり、試験体③の吸熱エネルギー量に近くなる。よって、今回の試験では、厚さ 12.5mm の強化石膏ボードは、厚さ 5mm のガラスロックの 1.7~2.3 倍程度の吸熱性能を有しているものと考えられる。

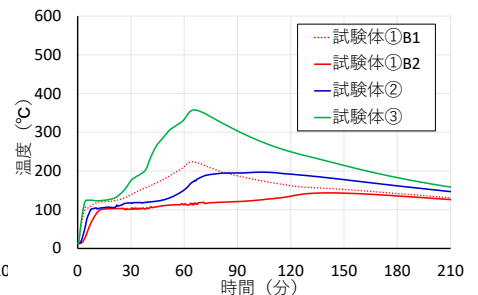
Fig.5(e)に点 C の温度の経時変化を示す。今回の試験の目標値は 250℃としたが、全ての試験体で目標値以内に収まっている。吸熱層が一番厚い試験体①の最大温度は 100℃に達



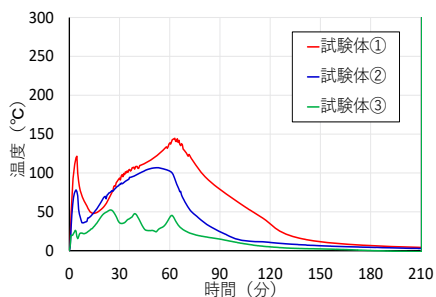
(a) 炉内温度
(Time History of Heating Temperature)



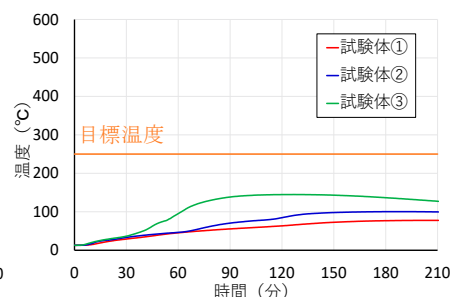
(b) 点 A の温度
(Time History of Temperature: Point A)



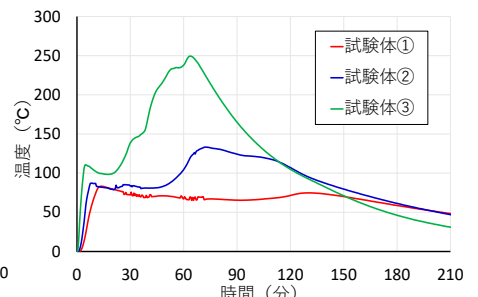
(c) 点 B の温度
(Time History of Temperature: Point B)



(d) 点 A と点 B の温度差
(Time History of Temperature: Point A-Point B)



(e) 点 C の温度
(Time History of Temperature: Point C)



(f) 点 B と点 C の温度差
(Time History of Temperature: Point B-Point C)

Fig.5 各境界点の温度の経時変化
(Time History of Boundary Point Temperature)

していない。最も温度が高くなった試験体③においても最大で 150℃程度に収まる結果となった。

Fig.5(f)に点 B と点 C の温度差の経時変化を示す。断熱材は表面（点 B）と裏面（点 C）の温度差が大きいほど断熱性能を十分に発揮していると言える。最も温度差が大きいのは

試験体③であり、最大で 250℃程度となっており、有機断熱材の効果が十分に表れている。これに対して、試験体①が最も温度差が小さく、最大でも 80℃程度となっており、有機断熱材の効果があまり発揮されていない。これは、試験体①の有機断熱材の厚みを更に薄くできる可能性があることを



Photo 7 試験後の試験体の状況
(Specimen after Heating Test)

示している。

(4) 試験後の試験体状況

Photo 7 に各試験体の試験後の状態を示す。加熱面を見ると、いずれの試験体も発泡性耐火材の脱落は見られず、試験終了まで断熱層を保持していたことが分かる。また、発泡性耐火材の表面から合板に打った木ビスの位置に孔が見られる。ビス留め部は発泡性耐火材が木ビスで固定されているため発泡しないが、周りの発泡性耐火材が発泡してビス留め部を覆う想定であったものの、鉛直下向きの発泡力が大きく孔を閉じるまでには至らなかった。

発泡性耐火材の発泡最大厚は試験体①が 77mm、試験体②が 68mm、試験体③が 84mm であった。試験体③は発泡性耐火材の裏面にグラスロックしかいないため吸熱性能に乏しく、熱エネルギーの発泡への寄与が大きく最も厚くなったと考えられる。これに対して、試験体②は裏面に吸熱性能の高い強化石膏ボードがあったため、発泡厚が最も薄かったと考えられる。

有機断熱材の断面を見ると、試験体①は EPS 材が残存しているのが分かるが、試験体②及び試験体③は EPS 材が消失して難燃剤のみが残存し空洞となっている。試験体②と試験体③を比較すると、試験体②は EPS を覆う難燃剤が全体的に健全であるが、試験体③は炭化が進んでおり、最も温度が上昇したことが分かる。

合板表面を見ると試験体①と試験体②については、炭化は見られないものの、試験体③についてはビス留め部に炭化ともとれる黒い煤が見える。

ビス留め部の熱橋状況を見ると、ビスの上部は炭化しているものの、下部は炭化しておらず合板も概ね健全であることがわかる。試験体③のビスは炭で黒ずんでいる部分が長く、熱橋により有機断熱材周りの炭化が深部まで進んでいたことが分かる。

IV. おわりに

本報では、1 時間耐火性能を有する軽量耐火被覆材の構築を目指し、有機断熱材の基本特性を把握した上で、有機断熱材と発泡性耐火材を主とした積層構成について検討した。水平耐火炉による 1 時間耐火試験を実施し、3 つの試験体の積層構成について検証した結果、下記の知見が得られた。

- ・ 試験体①の重量は 19.6kg/m²、厚みは 50.6mm であるが、

有機断熱材の性能に余裕があり 10～15mm 程度の薄肉化が図れる可能性がある

- ・ 試験体②の重量は 15.6kg/m²、厚みは 45.6mm であり、試験体①と試験体③の中間の性能となったが、目標温度に対して若干余裕があるため有機断熱材の 5mm 程度の薄層化は図れる可能性がある
- ・ 試験体③の重量は 9.6kg/m²、厚みは 38.1mm であり、非常に軽量であるが、目標温度に対する余裕度が小さく、無機材の厚みを増やすなどにより吸熱性能を上げる必要がある

今回の検証結果から選定した有機断熱材と、発泡性耐火材及び無機材を積層することで木質材に対する軽量な 1 時間耐火被覆材を構築することが可能となった。今後は実適用を目指し、耐火認定の取得を視野に入れた更なる検証を実施する予定である。

参考文献

- 1) 大橋宏和, 長岡勉; 耐火木造部材の耐火性能に関する研究 その 13 梁部材と CLT 床部材間の 1 時間耐火性能の検証, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2019.9, pp.219-220.
- 2) 上川大輔, 松永浩史, 原田寿郎, 高瀬棕, 服部順昭, 安藤恵介; 耐火集成材(難燃処理木材被覆型)と無機被覆型 CLT 床との取り合い部の火災安全性の検証, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2019.9, pp.215-216.
- 3) 服部順昭; “木質耐火部材”を知る, 建材マンスリー, 住友林業株式会社 木材建材事業本部, No.657, 2020.7, pp.2-4.
- 4) 糸毛治, 入江雄司, 鈴木大隆, 小浦孝次, 安藤達夫, 堤拓哉, 南真一; 発泡プラスチック断熱材の燃焼性状に関する基礎的研究 コーンカロリメータ試験による燃焼性状と材料組成に関する考察, 日本建築学会環境系論文集, 第 75 巻, 647 号, 2010.1, pp.1-8.
- 5) 抱憲誓, 宮本圭一; 補強型耐火材の耐火試験, 日本火災学会研究発表会梗概集, 2018, pp.242-243.
- 6) 日本建築学会防火本委員会; 構造材料の耐火性ガイドブック 2009 3.3 木質系材料, 日本建築学会, 2009, pp.173-199.

Study on Lightweight Fireproof Coating for Wooden Materials Using Organic Thermal Insulation and Expandable Fireproof Materials

Seihiro Ogata, Norichika Kakae and Toshinari Kanasaki¹⁾

Inorganic materials such as plaster board and calcium silicate board are often used for fireproof coating of wooden materials, and due to the weight of inorganic materials, the lightness that is the inherent advantage of wooden materials cannot be fully utilized. In this report, we investigated a fireproof coating by laminating an organic heat insulating material and an expandable fireproof material together to construct a lightweight fireproof coating material. A cone calorimeter test was carried out to determine the basic properties of the material, and a fire resistance test using a horizontal refractory furnace was carried out to determine the fire resistance performance using the layer structure and thickness of the material as parameters. As a result of the test, it was clarified that the required performance can be satisfied by arranging the organic heat insulating material, foamed fireproof material, and thin inorganic material in an appropriate layered structure and thickness, making it possible to construct a lightweight fireproof coating.