# 9. コンクリート耐火被覆材の建築構造物への適用性

## Application to Fireproofing Material using Lightweight Mortar for Reinforced Concrete Structures

山﨑	順二*	駒居	秀一* <sup>2</sup>
松井	亮夫*	尾石	勝明*3

# 要 旨

消防訓練施設内の実火災訓練室では、実際の火災を想定した加熱・放水訓練が繰り返し行われているため、室内の コンクリート躯体の品質低下を防止するため、コンクリート面への耐火被覆材の設置が不可欠である。しかし、この ような過酷な条件に適合しかつ現場で施工できる湿式の耐火被覆材についての報告はほとんどない。そのため、耐火 被覆材を建築構造物に適用するためには、性能試験を行い、その適用性を評価して選定する必要がある。そこで、主 としてトンネル工事に使用される吹付けタイプの耐火被覆材を選定し、実火災訓練室の耐火被覆材として適用すべく、 加熱・放水を繰り返すことによる耐久性の評価と熱伝導解析を併せて行った。

その結果、設計仕様に要求された20回の加熱・放水繰り返し試験による耐火性能の低下はないことを確認した。 本報では、耐火被覆材の性能評価試験結果および熱伝導解析の有用性について述べる。

キーワード:耐火被覆材/軽量モルタル/火災訓練室/加熱放水繰り返し/耐火性能/熱伝導解析

#### 1. はじめに

コンクリートは建築基準法では不燃材料とされている が、300℃以上の温度上昇によって、静弾性係数や圧縮強 度などの力学的性質は低下することが一般に知られてい る。このため、消防訓練施設の鉄筋コンクリート造建築 物の内部に実火災訓練室を設置するような場合、コンク リート構造体の安全性を確保するためには、構造体コン クリートの温度上昇を抑制することが必要となる。

構造体コンクリートの耐火対策としては、耐火レンガ や耐火パネルによる被覆(乾式工法)と、表面をモルタ ルで被覆(湿式工法)する方法が考えられ、これにより コンクリート表面の温度上昇を抑制し、構造体の安全性 を確保することとなる。

また、鉄筋コンクリート造建築物の内部に実火災訓練 室を設置する際には、その形状が複雑となる場合があり、 耐火レンガや耐火パネルを用いた乾式工法による施工よ りも、吹付け施工が可能となる湿式工法の方が有利と考 えられる。しかし、従来から耐火被覆材の耐火性能に関 する研究は数多く報告されているが、実火災訓練室のよ うに短時間に急激な温度上昇および放水による急激な冷 却の繰り返しを受けることを想定した耐火被覆材はなく、 実験の報告もほとんどない。

そこで本報では、鉄筋コンクリート造建築物内の実火 災訓練室に適用することを想定した耐火被覆材(湿式タ イプの吹付け軽量モルタル)に対して、短期間で加熱お よび放水を繰り返す、加熱放水繰り返し試験を実施する こととした。試験の結果から耐火被覆材の耐火性能およ び加熱放水を 20 回繰り返した後の健全性の評価を行い、 鉄筋コンクリート造内部の実火災訓練室に適用する耐火 被覆材としての有用性を検討した。加えて、耐火被覆材 の熱伝導解析を行い、材料温度の解析値と実測値とを比 較することで、耐火被覆材の厚さの設計に対する熱伝導 解析の有用性についても検討を加えた。

## 2. 実験に供した耐火被覆材の概要

実験に供した耐火被覆材(湿式タイプの吹付け軽量モ ルタル)は、ポルトランドセメントと軽量細骨材である バーミキュライト(アスベスト含有量は0.1wt%以下)を 基材とした、プレミックスタイプのトンネル用湿式耐火 被覆材である。表-1に耐火被覆材と一般的な普通強度 のコンクリートの物性を併せて示す。

表-1 耐火被覆材およびコンクリートの一般的性質

品質·性能	(単位)	耐火被覆材	コンクリート
単位容積質量	kg/m <sup>3</sup>	700	2400
圧縮強さ	N/mm <sup>2</sup>	1.5以上	30以上
熱伝導率	$W/(m \cdot K)$	0.19	0.89
比熱	$kJ/(kg \cdot K)$	0.97	0.93

\*大阪本店建築部技術グループ \*2大阪本店建築部購買グループ \*3大阪本店建築部工事課

通常、耐火被覆材は乾燥環境下においてコンクリート 躯体の保護性能を十分に発揮するが、湿潤状態からの急 激な加熱を受けた場合は、耐火被覆材内部の水分が急激 に気化膨張するため、被覆材表層部で水蒸気爆裂が生じ る危険性がある。本工事における実火災訓練室のように、 加熱放水を繰り返し受ける環境下に適用する耐火被覆材 は、水蒸気爆裂の危険性がなく、加熱放水の繰り返しに 対する耐久性が確保できる材料を選定することが必要と なる。図-1に耐火被覆材の水蒸気爆裂に関するイメー ジを示す。

そこで、以下に示す考え方に基づき、吹付けタイプの 耐火被覆材である軽量モルタルの実火災訓練室への適用 の可能性について、以下に示すような内容について検討 した。

(1) 比重が小さい(コンクリートの約1/3) 材料であり、 マトリックス内部に存在する水分の加熱による急激な気 化膨張を吸収・拡散できる材料であるため、水蒸気爆裂 の危険性が少なく火災訓練時の安全性を確保できると考 えられる。

(2)熱伝導率が低い(コンクリートの約1/5)ことから断 熱性が高く、被覆材の厚さを30mm程度と薄くしても高 い耐火性能が確保できると考えられる。

- (3) 速硬性ではない湿式の材料であるために被覆材表面 のコテ均しが可能となり、吹付け施工でありながら平坦 な表面仕上げが可能となり、表面硬度も向上する。
- (4) 吹付け厚さを計測・確認しながら施工することが可 能となるために確実な厚さ管理が行え、所要の耐火性能 を確保できる。



図-1 耐火被覆材の水蒸気爆裂に関するイメージ

#### 3. 実験概要

#### 3.1 加熱放水繰り返し試験の概要

耐火被覆材を施工したコンクリート平板(以下「試験 体」と記す)を加熱した直後に放水冷却する工程を20回 繰り返し、加熱時の試験体温度と加熱面の劣化状況を確 認した。加熱温度は400℃および600℃とした。

## 3.2 試験体および温度計測位置

実験に供した試験体は、1,200mm×1,200mm×厚さ 100mmのコンクリート平板とした。平板には設計基準強 度 30N/mm<sup>2</sup>に相当するコンクリートを用い、耐火被覆材 を被覆厚さ 30mm 吹付けて、2 体作製した。試験体の概要 を図-2に示す。図中には温度計測位置を併せて示した。 両試験体とも、試験体の中心(端部から 600mm×600mm の位置)において、コンクリート表面(被覆材とコンク リート平板の界面)から断面内方向に0、30、80、100mm の位置および耐火被覆材内部のステンレスメッシュの位 置(コンクリート表面から被覆材内部に約 12mm)の計5 カ所に、ガラス被覆 K 型熱電対を設置して加熱時の各部 の温度を計測した。



#### 3.3 加熱および放水冷却方法

試験条件を設定する上で、実火災訓練室での想定され る使用条件を表-2の上段に示すように設定した。1回当 たりの火災訓練時間を 15min、放水時間を 1min、年間の 訓練室の使用回数を20回、火災訓練室の躯体コンクリー トの要求耐熱温度を200~600℃と設定した。

以上の想定条件から、表-2の下段に示すような試験 条件を設定した。これに基づき、図-3および図-4に 示すように、最高温度を400℃もしくは600℃とした温度 履歴による加熱を15分間行い、その直後に1分間放水冷 却するサイクルを20回繰り返す加熱放水試験を行った。

試験体への加熱は、耐火炉の上開口に耐火被覆材が下 向きとなるように試験体を設置し、試験体中央部の900 ×900mmの部分について行った。また、試験体への放水 は、15分間加熱した試験体を吊り上げ、水圧 0.23MPa、 放水ホースから試験体までの距離を2.5mとし、写真-1 に示すように放水冷却した。試験は1日に2サイクルと し、試験体冷却のために4時間以上の間隔を開けた。

# 3.4 評価項目

加熱時の試験体温度の計測

試験体に設置したガラス被覆 K 型熱電対により、加熱 時の試験体温度を測定した。

(2) 耐火被覆材表面のひび割れ幅の測定

加熱放水後に、加熱面において目視で確認できるひび 割れをトレースするとともに、各サイクルにおける最大 ひび割れ幅を計測、評価した。

#### (3) 耐火被覆材の厚さ変化の測定

加熱放水による耐火被覆材の厚さ変化の有無を確認す るために、被覆材表面の4カ所で各サイクルにおける厚 さを測定し、厚さ変化値として評価した。

(4) 貫入抵抗値の測定

加熱部の外周から内側 50~150mm の範囲において、 φ 3mm 針による貫入抵抗値を測定し、2 サイクルごとに耐 火被覆材の圧縮強度を推定した。

### (5) 耐火被覆材の圧縮強度試験

耐火被覆材の圧縮試験を JISA 1108 に準じ、 φ5×10cm 円柱供試体を用いて行った。試験材齢は加熱放水繰り返 し試験の1回目である材齢20日および材齢28日とした。 (6) 耐火被覆材の施工性確認

施工性およびコンクリート躯体への付着充填状況を確 認するため、加熱試験に供する試験体とは別に耐火被覆 材を吹付け施工し、硬化後にコアを採取し目視観察した。

## 3.5 熱伝導解析

表-1に示した耐火被覆材およびコンクリートの物性

#### 表-2 火災訓練室での想定される使用条件

想定条	訓練時間 (min/回)	放水時間 (min/回)	使用回数 (回/年)	コンクリ ート要求 耐熱温度 (℃)
件	15	1 ↓	20 ↓	200~600 ↓
試験冬	加熱試験 時間 (min/回)	放水試験 時間 (min/回)	加熱放水 繰返し数 (回)	最高加熱 温度 (℃)
未件	15	1	20	(1)400 (2)600



1サイクル×20回繰返し



4h以上気中に静置後 図-4 加熱放水試験サイクルの概要



写真-1 放水試験の状況

を用いて熱伝導解析を行った。なお、加熱面の熱伝達係 数は、別の実験から求めた 150(W/m<sup>2</sup>・K)を適用し、加 熱面以外の境界条件は断熱条件とした。加熱条件として は、図-3に示す加熱曲線(5分で目標温度に昇温後15 分間保持)の条件とした。

#### 4. 実験結果および考察

#### 4.1 加熱時のコンクリート表面の温度上昇

加熱終了時のコンクリート平板の各部の温度を加熱温 度ごとに図-5に示す。コンクリート表面の温度は、い ずれの加熱放水サイクルにおいても 600℃加熱で最大 80℃程度、400℃加熱の場合で最大 50℃程度であった。 600℃で加熱した場合、サイクル回数が増えるに伴い加熱 終了時のコンクリート表面温度が低くなる傾向が見られ、 サイクル回数の増加に伴う試験体の温度上昇は認められ なかった。

一方、サイクル奇数回(午前中加熱)とサイクル偶数 回(奇数回の加熱と同日の午後に加熱)での加熱終了時 の試験体の内部温度を比較すると、偶数回の方がやや高 い温度を示す傾向にあった。これは、午前中の奇数回実 施時の余熱によるものと推察される。

図-6に、1,10,20 サイクル時の加熱終了時の温度を、 加熱温度ごとに示す。凡例の0mmが図-2に示すコンク リート表面での測定結果である。加熱温度にかかわらず



かぶり厚さ付近(コンクリート表面から 30mm の位置) での温度は、いずれのサイクルでも 40℃以下であり、ま たコンクリート表面から 80mm の位置ではコンクリート の温度上昇は見られなかった。

これより、耐火被覆材を厚さ 30mm で吹付け施工する ことによって、構造体コンクリートの温度上昇を抑える ことができ、実火災訓練による温度上昇に起因するコン クリートの力学的性質の低下を防止できることが確認で きた。

## 4.2 加熱放水による耐火被覆材の表面ひび割れ状況

400℃加熱および 600℃加熱において、各サイクル終了 時における耐火被覆材表面のひび割れ発生状況およびひ び割れ幅の計測結果を表-3に、加熱放水繰り返し10サ イクル終了時および20サイクル終了後の試験体の状況を 写真-2に示す。

400℃加熱の場合は5サイクル終了後まで微細ひび割れ が生じなかったが、600℃の場合は2サイクル終了時点で 微細ひび割れが発生している。さらに、400℃加熱では13 サイクル終了時に0.1mmのひび割れが発生し、600℃加熱 では3サイクル終了時に0.1mm、13サイクル終了時に 0.2mmのひび割れが発生した。加熱放水サイクルが増加 するのに伴い表面ひび割れの本数(ひび割れ密度)は増

加熱放水	最大ひび割れ幅および目視所見		
(回)	400℃加熱	600°C加熱	
1	ひび割れなし	ひび割れなし	
2	ひび割れなし	わずかな微細ひび割れ	
3	ひび割れなし	0.1mm	
4	ひび割れなし	0.1mm	
5	ひび割れなし	0.1mm	
6	わずかな微細ひび割れ	0.1mm	
7	わずかな微細ひび割れ	0.1mm	
8	わずかな微細ひび割れ	0.1mm	
9	わずかな微細ひび割れ	0.1mm	
10	0.1mm未満	0.1mm	
11	0.1mm未満	0.1mm	
12	0.1mm未満	0.1mm	
13	0.1mm	0.2mm	
14	0.1mm	0.2mm	
15	0.1mm	0.2mm	
16	0.1mm	0.2mm	
17	0.1mm	0.2mm	
18	0.1mm	0.2mm	
19	0.1mm	0.2mm	
20	0.1mm	0.2mm	

表-3 各サイクル終了時の表面ひび割れの発生状況



写真-2 耐火被覆材の表面ひび割れ発生状況(400℃および 600℃:10 サイクルおよび 20 サイクル終了時)

加する傾向にあったが、20回の加熱放水繰り返しを受け ても耐火被覆材のはく落などの不具合は全く認められな かった。耐火被覆材のはく落防止には被覆材内部に設置 したステンレスメッシュの効果もあると考えられるが、 スケーリングなどの表層はく離も認められていないこと から、20回の加熱放水繰り返しを受けても、耐火被覆材 としての健全性は維持されていると考えられる。このこ とは、サイクル数の増加に伴いひび割れ密度が増大して も、前述のように試験体の温度上昇が認められないこと からも分かる。

## 4.3 耐火被覆材の加熱放水繰り返しによる厚さ変化

20回の加熱放水繰り返しによる耐火被覆材厚さの変化 量を図-7に示す。厚さ変化は、加熱放水繰り返し試験 の直前に耐火被覆材の厚さを4点で測定し、各サイクル 終了直後に測定した厚さを減じて求めた。図には、4点の 測定点の平均値をそれぞれプロットした。

600℃加熱において 15 サイクル以降に被覆材厚さが若 干減少する傾向がみられるが、その量は 0.5mm 程度と極 めて小さい値であった。また、20 サイクル間の耐火被覆 材の厚さ変化は±1.0mm 以下の範囲であり、骨材の影響 などによる測定誤差や温度変化による熱膨張や収縮が生 じていることを考慮すると、本実験における加熱放水繰 り返しによる耐火被覆材の厚みの減少は、耐火被覆材の 耐火性能に影響を及ぼすものではないと考えられる。

## 4.4 貫入抵抗試験による耐火被覆材の推定圧縮強度

耐火被覆材の貫入抵抗値を測定した結果から圧縮強度 を推定した。推定方法は、貫入抵抗値と圧縮強さとの相 関関係<sup>1)</sup>を用いて算出した。2 サイクルごとの耐火被覆 材の圧縮強度の推定結果を図-8に示す。図中には、試 験体への耐火被覆材吹付け施工時に同時に採取した  $\phi$  5 × 10cm の供試体における材齢 28 日での圧縮強度 (2.27N/mm<sup>2</sup>)を一点鎖線で示した。

貫入抵抗値から推定した耐火被覆材の推定圧縮強度は、 1.80~2.49N/mm<sup>2</sup>であり、加熱放水繰り返しによって初期 サイクルの段階で推定圧縮強度が若干低下するが、その 後は20サイクルに達するまで大きな強度変化はなく、い



ずれのサイクルでも1.5N/mm<sup>2</sup>以上が確保されていた。

本実験に用いている耐火被覆材は、結合材としてセメ ントを使用している。セメント硬化体の加熱による化学 的性質の変化はその温度によって変化が生じる物質が異 なり、影響の大きさにも違いがある。使用材料の種類に よっても異なるが、温度上昇に伴う化学結合水の放出や 各種水和物の分解が生じ、1100~1200℃ではコンクリー トが融解するといわれている<sup>2)</sup>。本実験における加熱試 験中の耐火被覆材の表面温度は目標加熱温度の400℃も しくは600℃に達していると考えられるが、耐火被覆材の 推定圧縮強度の大きな低下が認められないことから、上 記の加熱温度の範囲内では、耐火被覆材の硬化体として の性質を大きく低下させるような化学変化は生じなかっ たと考えられる。さらに、前述のように、20回の加熱放



写真-3 コンクリート平板からのコア採取状況



図-9 熱伝導解析による解析値と実測値の比較

水サイクルを繰り返しても耐火被覆材厚さの変化がほと んどないことと、推定圧縮強度の低下も見られないこと から、本実験に使用した耐火被覆材は、実火災訓練時の 放水圧に対する耐久性を十分に有していると考えられる。

以上のことから、**表-2**に示した想定される使用条件 に応じた短期間での加熱放水を繰り返し受けても、耐火 被覆材の顕著な性能低下はないと考えられる。

## 4.5 耐火被覆材の充填性の確認

垂直面に吹き付けた耐火被覆材とコンクリート平板と の付着および充填状況を、平板から採取したコア供試体 の側面観察により行った。写真-3に示す1200×1200× 100mmの上中下の3カ所から採取した結果、耐火被覆材 はコンクリート表面に十分に付着し充填されていること が確認できた。

#### 4.6 熱伝導解析結果

図-9に、1サイクル終了時の試験体の断面深さと温度 の関係を解析値と実測値を併せて表記した。加熱温度 400℃および 600℃のどちらの加熱条件であっても、解析 値と実測値は良く整合していることが分かる。

これより、熱伝導解析を行うことによって、目標とす る断熱性能を得るための耐火被覆材の厚みが精度良く計 算できると考えられる。

#### 5. まとめ

実火災訓練室の構造体コンクリートの耐火被覆材とし て、吹付け施工が可能な軽量モルタルの適用性について、 20 サイクルの加熱放水繰り返し試験を行い評価した。実 験から得られた結果を以下に示す。

- (1)耐火被覆材を厚さ30mmでコンクリート面に吹付け施工することによって、火災訓練室の構造体コンクリートの温度上昇を抑えることができ、構造体コンクリートの力学的性質の低下を防止できる。
- (2)加熱放水の繰り返しによって耐火被覆材の表面にひび割れが発生するが、スケーリングなど表層はく離やはく落はなく、耐火被覆材としての健全性が維持されている。
- (3) 20回の加熱放水繰り返しを受けることによる耐火被 覆材の厚さの変化は小さく、圧縮強度の低下も認 められない。
- (4) 熱伝導解析の結果と実測値の整合性は高く、要求される耐火性能に応じた被覆材の厚さを解析により 合理的に求めることができる。

以上のことから、本実験に用いた耐火被覆材は、実火 災訓練室の構造体コンクリートの耐火被覆材として適用 が可能であり、20回の加熱放水繰り返しを受けても、耐 火被覆材の性能が低下しないことが確認できた。

なお、当社では本材料を実火災訓練室に使用し、訓練 に供用されているが、表面被覆材としての性能低下や表 面はく離などの不具合は現時点では発生していない。

## [謝辞]

本実験を行うに当たり、太平洋マテリアル(株)谷辺徹 氏、並びに(株)太平洋コンサルタント研究センターの関 係者には多大なご協力およびご指導をいただきました。 ここに記して関係各位に感謝の意を表します。

[参考文献]

- 谷辺徹:軽量モルタルの強度推定方法に関する検討、
  日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1(材料施工)、
  pp.741-742, 2003.9.
- 2) 日本コンクリート工学協会偏:コンクリート構造物 の火災安全性研究委員会報告書、p.9, 2002.6.