論文 被災した吹付け軽量モルタルの残存耐火性能

菊地 弘悦*1·谷辺 徽*2

要旨:耐火被覆材として使用される吹付け軽量モルタルの被災後の残存耐火性能を検討するため,軽度の加 熱放水繰返し試験,小規模火災を想定した加熱および放水を加えた後に,RABT 曲線による加熱を行う試験 ならびに,RABT 曲線による加熱を2回行う試験を実施した。その結果,いずれの試験条件であっても,コ ンクリートの表面温度を300℃以下に抑制できることから,耐火性能の著しい低下は認められないことを明ら かにしている。また,この残存耐火性能に対して,耐火被覆材の熱的性質から一考察を述べている。 キーワード:耐火性能,吹付け軽量モルタル,耐火被覆材,RABT 曲線,コンクリート表面温度

1. はじめに

従来,セメントコンクリートは耐火性能が高い材料と して認識されていた。しかしながら,近年,高強度コン クリートが多く利用されるようになり,コンクリートの 構成材料,含水状態によっては加熱時に爆裂¹⁾や強度性 能の低下²⁾などを引き起こすことが明らかにされている。 このようなコンクリートの爆裂,強度性能の低下などが 大規模構造物において発生した場合には甚大な被害が 発生し,復旧に長い期間を要することが懸念される。こ れらのことから,コンクリート構造物に対して耐火対策 を講じる必要性が高まっている。例えば,日本建築学会 から刊行されている「高強度コンクリート施工指針

(案)・同解説」では,設計基準強度が80MPa以上の高 強度コンクリートにおいては,部材の耐火性能確保のた め信頼できる資料または実験などにより検討し,対策が 必要な場合は適切な措置をとることとされている³⁾。

コンクリート構造物の耐火対策の一つとして,コンク リート表面をモルタルで被覆し,温度上昇を抑制する方 法が挙げられる。特に軽量骨材を用いた場合,骨材自身 の吸熱効果などが耐火被覆材にとって有用である。その ため,鋼材用またはコンクリート用の耐火被覆材として, 軽量モルタルの耐火性能の検討は行われているが^{4),5),6)}, 被災後の耐火性能,健全性などの検討は少ないのが現状 である。耐火被覆用モルタルが被災した場合には,その 劣化状況を判断して適切な補修対策を講じる必要性が あることから,本来の耐火性能以外に,被災後の残存耐 火性能についても検討すべきであると考えられる。

そこで、本研究では、コンクリート用耐火被覆材とし て使用される吹付け軽量モルタル(以後、耐火被覆材と 称す)の被災後における残存耐火性能を検討することを 目的としている。そのため、耐火被覆材の熱的性質を検 討するため、耐火被覆材の加熱中の長さ変化および熱重 量分析を実施した。また、被災後の残存耐火性能を検討 するため,1) 比較的軽度の加熱放水を受けることを想 定した耐火試験(加熱放水繰返し試験),2) 小規模火災 後の残存耐火性能の検討として,最高温度を400℃とし た加熱を行い,放水冷却を実施した後,RABT曲線によ る加熱を行う耐火試験(小規模火災後の残存耐火性能試 験),3) 大規模火災後の残存耐火性能の検討として, RABT曲線による加熱試験を2回行う耐火試験を実施し た。これら3つの耐火試験結果から,耐火被覆材の被災 後の残存耐火性能について検討している。

2. 使用材料

2.1 耐火被覆材

耐火被覆材としては、セメントを結合材とし、細骨材 としてバーミキュライトを、混和材として炭酸カルシウ ムを配合したプレミックスタイプのものを使用した。表 -1には、耐火被覆材の性質を示す。

表-1 耐火被覆材の性質

単位容積 質量 (kg/m ³)	材齢 28d 圧縮強さ (MPa)	熱伝導率 [W/(m・K)]	比熱 [kJ/(kg・K)]
700~800	1.5 以上	0.19	0.97

2.2 補強材

補強材としては、その材質をステンレス製とした格子状(格子間隔:50mm、線径:1.6mm)のものを用いた。

3. 試験項目および試験方法

3.1 耐火被覆材の熱的性質に関する試験

(1) 熱間長さ変化試験

耐火被覆材をスプレーガンによって吹付け, 寸法 15×15×123mmに成型し, 28d 気中養生したものを供試体 とした。

*1 太平洋マテリアル(株) 開発研究所 耐火被覆材料グループ 修士(工学) (正会員) *2 太平洋マテリアル(株) 開発研究所 耐火被覆材料グループ グループリーダー 熱間長さ変化試験としては、供試 体を電気炉内に静置させ、電気炉外 からカセットメータで加熱および冷 却中の長さ変化を測定した。なお、 加熱条件は、JISA1304(建築構造部 分の耐火試験方法)より加熱時間を 2h、また、最高温度を1010℃とした。

(2) 熱重量分析

耐火被覆材をスプレーガンによっ て吹付け,その後硬化したものを微 粉砕して試料とした。なお,試料の 養生条件としては,28d 気中養生と した。

熱重量分析としては,昇温速度 20℃/min,最高温度1010℃の条件で 行った。

3.2 被災後の残存耐火性能試験

被災後の残存耐火性能試験は,図-1 に示すフローに 従って行った。

(1) 加熱放水繰返し試験(水準1)

a) 試験体の作製

基材コンクリートは設計強度 30MPa, 寸法 100×1200 ×1200mm のものとした。基材コンクリートに対して補 強材をアンカーピンによって固定したものに, 施工面積 900×900mm, 被覆厚さ 30mm で耐火被覆材を吹付け施 工後, 20d 気中養生を行って試験体を作製した。なお, **写真-1**には, 基材コンクリートへの補強材の取付け状 況を示す。

b) 加熱放水繰返し試験

図-2に示す加熱条件1および2のように,最高温度 400℃ならびに600℃を15min保持する加熱条件で試験体 を加熱した。その際,最高温度に達するまでの時間は 5minとした。加熱が終了した試験体については,加熱直 後に1min放水を行い,これらの加熱放水サイクルを20 回繰返した。加熱試験中には,基材コンクリート表面に ガラス被覆熱電対を設置し,加熱中のコンクリート表面 温度を測定した。また,加熱放水サイクルが1サイクル 終了した後の試験体の再加熱については,放水終了後4h 以上気中に静置させた後に行った。なお,加熱試験1回



図-1 被災後の残存耐火性能試験のフロー



写真-1 基材コンクリートへの補強材取付け状況

目の時点での耐火被覆材の含水率は13.4%であった。

c) 耐火被覆材の推定圧縮強さ

加熱試験前の耐火被覆材の貫入抵抗値を測定し,貫入 抵抗値と圧縮強さの相関関係^のから耐火被覆材の推定圧 縮強さを算出した。

d) 耐火被覆材の表面観察

加熱放水後における試験体の外観観察を行い,耐火被 覆材の表面の状態およびひび割れの有無を確認した。そ の際,ひび割れ幅の測定を行った。

(2) 小規模火災後の残存耐火性能試験(水準2)

a) 試験体の作製

基材コンクリートは設計強度 30MPa, 寸法 200×1300 ×1300mm のものとした。基材コンクリートに対して補



図-2 加熱条件

強材をアンカーピンによって固定したものに,施工面積 900×900mm,被覆厚さ 30mm で耐火被覆材を吹付け施 工後,14d 気中養生を行って試験体を作製した。

b) 耐火試験

試験体に対して,図-2の加熱条件3のように,5min で昇温,400℃を55min保持した後3minの放水を行った。 その後,図-2の加熱条件4(RABT曲線)による加熱 を行った後,再度3minの放水を行った。その際,基材 コンクリート表面にガラス被覆熱電対を設置し,それぞ れの加熱試験時のコンクリート表面温度を測定した。な お,写真-2には,放水試験の様子を示す。

c) 耐火被覆材の推定圧縮強さ

400℃加熱前,400℃加熱放水乾燥後および RABT 加熱 放水乾燥後における耐火被覆材の貫入抵抗値を測定し, 貫入抵抗値と圧縮強さの相関関係から耐火被覆材の推 定圧縮強さを算出した。また,耐火被覆材表面のひび割 れの幅を測定した。

(3) 大規模火災後の残存耐火性能試験(水準3)

a) 試験体の作製

基材コンクリートは設計強度 30MPa, 寸法 200×1300 ×1300mm のものとした。基材コンクリートに対して補 強材をアンカーピンによって固定したものに, 施工面積 900×900mm, 被覆厚さ 30mm で耐火被覆材を吹付け施 工後, 28d 気中養生を行って試験体を作製した。

b) 耐火試験

試験体に対して,図-2の加熱条件4(RABT曲線) による加熱を行い,加熱終了12h後に,再度RABT曲線 による加熱を行った。その際,基材コンクリート表面に ガラス被覆熱電対を設置し,それぞれの加熱試験時のコ ンクリート表面温度を測定した。

4. 試験結果および考察

4.1 耐火被覆材の熱的性質

(1) 耐火被覆材の熱間長さ変化

図-3には、耐火被覆材の熱間長さ変化を示す。耐火 被覆材の熱間長さ変化は、約800℃までの温度上昇過程 において若干の膨張を示し、それ以上に温度が上昇する と収縮する挙動を示す。一般的にセメント系複合材料は、 温度の上昇に伴って空隙内の自由水の蒸発、結合水の分 解、構成材料の膨張の相違などにより、温度変化による 膨張収縮が複雑な挙動を示すといわれている⁸⁾。本研究 における熱間長さ変化試験では、このような複雑な長さ 変化挙動を明確に解明できないが、耐火被覆材の800℃ までの長さ変化は、構成材料内の水分逸散などによる熱 収縮と材料の熱膨張が合わさった結果、若干膨張側の挙 動を示していると推察される。また、800℃から1010℃ では一気に-0.4%まで収縮側の値を示し、急激な収縮反



写真-2 水準2における放水試験の様子



応が生じていることが示唆される。この原因については 明確ではないが、CaCO₃の脱炭酸反応などが影響してい ると推察される。

一方,温度下降過程では,耐火被覆材は,温度の下降 に伴って収縮し,最大で約1.2%収縮する。これは,温度 上昇過程において発生していた熱収縮に加えて,温度上 昇過程で生じていた熱膨張が,温度低下に伴って小さく なるためであると推察される。

(2) 耐火被覆材の熱重量分析結果

図-4 には、耐火被覆材の熱重量分析結果を示す。耐 火被覆材の質量は温度の上昇に伴って減少する傾向を 示す。約100℃までの質量減少は、耐火被覆材が含有し ている水分の蒸発に起因するものと推察される。100℃ を超える温度域においては、C-S-H 系水和物の脱水によ る質量減少が発生しているものと考えられる。また、約 440℃で質量変化率の勾配に若干変化が認められる。こ れは、耐火被覆材に含まれる Ca(OH)。の脱水によるもの と考えられる。さらに、質量の著しい減少は約 600℃以 降にも発生し、それ以前の質量減少よりも著しい質量減 少であることが認められる。600℃以降の質量減少は, 耐火被覆材内部の CaCO₃の脱炭酸に起因するものと推 察される。前述した耐火被覆材の熱間長さ変化試験結果 では、CaCO₃の脱炭酸反応と思われる影響は約 800℃付 近で発生しており,熱重量分析での反応温度に差異が見 られる。一般的に CaCO₃ は 600~900℃で脱炭酸反応が 起こるといわれている⁹⁾。このような比較的広範囲な温 度領域となっているのは、CaCO3の含有状態が反応温度 に影響するためと推察される。本研究で実施した熱重量

分析では試料を粉末状に、また、熱間長さ変化試験では モルタル硬化体としてそれぞれの試験に供している。さ らに、2 つの試験では試験体の昇温速度が異なる。それ らの理由から、CaCO₃の脱炭酸と思われる影響が発生す る温度に差異が生じているものと考えられる。

熱によって分解された各種水和物はその後,空気中な どから水分を供給されることにより再水和が起こる¹⁰。 この再水和が起こった場合,耐火被覆材の体積膨張が発 生するものと考えられる。耐火被覆材の熱重量分析結果 より,仮に上述の分解された各種水和物の再水和に起因 する体積膨張が耐火被覆材に発生した場合には,特に質 量減少が大きかった CaCO₃の脱炭酸によって発生した CaOの再水和による影響が大きくなることが考えられる。 4.2 被災後の残存耐火性能

(1) 加熱放水繰返しに対する耐久性(水準1)

a) コンクリート表面温度

図-5には、水準1における加熱終了直後のコンクリ ート表面温度と加熱放水サイクル数の関係を示す。加熱 終了直後におけるコンクリート表面温度は,加熱温度 600℃のものが加熱放水サイクル数 5 回目まで、他の試 験時に比べ若干大きい値を示す。これは、これらの試験 体の試験開始温度が最大で 10℃程度他と比べて高かっ たことが原因の1つとして挙げられる。コンクリート表 面温度は、どちらの加熱温度であっても加熱放水サイク ル数の増加に伴って増大する傾向は認められない。加熱 放水繰返し試験における耐火被覆材の主な劣化要因に は、1)加熱直後の急冷による熱収縮での劣化、2)加熱 によって分解された各種水和物の再水和による膨張劣 化などが挙げられる。1)の熱収縮による劣化について は、最高温度が 600℃であり、加熱中の耐火被覆材の熱 膨張が比較的小さかったため、冷却時の熱収縮の影響に よるひび割れなどの劣化が軽度であったと推察される。 また,2)の再水和による劣化についても,加熱温度400℃ のものはCa(OH),の脱水が発生する前の温度であり、ま た,加熱温度 600℃のものは, Ca(OH)₂ の脱水は発生す るが、CaCO₃の脱炭酸が発生する前であったため、発生 する CaO の量が少なく,再水和による膨張劣化が軽度で あったものと考えられる。これらの理由から,耐火被覆 材に 20 回の加熱放水繰返しを行っても、著しい劣化に 至らず耐火性能は低下しなかったためコンクリート表 面温度の増大傾向は見られなかったものと推察される。

b) 推定圧縮強さ

図-6には、水準1における耐火被覆材の推定圧縮強 さと加熱放水サイクル数の関係を示す。どちらの加熱温 度であっても耐火被覆材の推定圧縮強さは、加熱放水サ イクル数の増加に伴う明確な減少傾向は認められず、 1.5MPa以上の圧縮強さを有している。これは、上述した



図-5 水準 1 における加熱終了直後の基材コンクリー トの表面温度と加熱放水サイクル数の関係



図-6 水準 1 における耐火被覆材の推定圧縮強さと加 熱放水サイクル数の関係

ように,加熱温度が耐火被覆材に致命的な欠陥を生じさ せるほどの温度ではなかったためであると推察される。

c) 試験体の外観変化

写真-2には、水準1における試験体の外観を示す。 どちらの加熱温度でも、加熱放水サイクル数が増加する ことで、耐火被覆材に発生するひび割れ数が増加し、ま た、加熱温度 600℃のものの方が 400℃のものよりもひ び割れ数が多いことが認められる。ひび割れ幅について は、20回の加熱放水サイクルが終了したものでも最大で 0.2mm であり、小さなひび割れが分散して発生する傾向 にある。ひび割れの発生については、上述したように、 加熱温度が低く、CaOの再水和に伴う体積膨張の発生は 考えにくいことから、主に熱収縮に起因するものと推察 される。また、ひび割れの影響については、耐火性能の 低下が認められないことから、0.2mm 程度では耐火被覆 材の性能には大きく影響しないものと推察される。なお、 放水試験時に耐火被覆材のはく落、部分的な削れなどが ないことから、推定圧縮強さの結果と共に耐火被覆材の



硬化体としての健全性は損なわれておらず,そのはく落 防止には,耐火被覆材の基材コンクリートに対する接着 力および耐火被覆材内部の補強材が大きく寄与してい ると考えられる。

以上のことから,加熱放水を繰返しても,耐火被覆材 の耐火性能は低下しないため,本研究のような加熱放水 条件であれば,特に補修などを行わずに,健全性を判断 した上で,再使用することが可能であると考えられる。

(2) 小規模火災後の残存耐火性能(水準2)

a) コンクリート表面温度

図-7には、水準2におけるコンクリート表面温度と 経過時間の関係を示す。一度目の加熱試験である400℃ 加熱試験時では、コンクリート表面温度が最大で80℃程 度であり、温度上昇がコンクリートの性能に影響を及ぼ すことはないと推察される。また、400℃加熱後放水を 行った試験体であっても、RABT加熱試験時のコンクリ ート表面の最高温度は、加熱放水を行っていない試験体 のそれに対して約50℃大きいものとなる。

コンクリートの圧縮強度は加熱を受けることで減少し, Eurocode によれば 300℃の高温時で常温の 80%, 300℃の 加熱履歴があり,その後冷却したものについては 85%に 減少するとされている¹¹⁾。このことから,コンクリート の使用限界温度を 300℃とした場合,本研究で想定した 規模の火災を受けた耐火被覆材であっても,RABT 曲線 による加熱試験時のコンクリート表面温度が最大で 200℃程度であるため,コンクリートの耐火被覆材とし ての耐火性能は保持しているものと考えられる。

b) 推定圧縮強さおよびひび割れ幅

図-8には、水準2における400℃加熱前、400℃加熱 放水乾燥後およびRABT加熱放水乾燥後における耐火被 覆材の推定圧縮強さならびに最大ひび割れ幅を示す。 400℃加熱放水乾燥後においては400℃加熱前に比べて、



図-7 水準 2 におけるコンクリート表面温度と経過時 間の関係



図-8 水準 2 における耐火被覆材の推定圧縮強さなら びに最大ひび割れ幅

推定圧縮強さの減少は認められない。一方, RABT 加熱 放水乾燥後における耐火被覆材の推定圧縮強さは, 400℃加熱前の 75%程度に減少し,最大ひび割れ幅も 1.25mmに達する。

これらのことから、最高温度が 400℃程度の小規模な 火災を受けた場合であっても、耐火被覆材の著しい性能 低下はなく、再使用できるものと考えられる。また、耐 火被覆材に対して部分的な劣化が発生したとしても、簡 易な補修を行えば再使用することが可能であると考え られる。

(3) 大規模火災後の残存耐火性能(水準3)

図-9には、水準3におけるコンクリート表面温度と

経過時間の関係を示す。加熱2回目のコンクリート表面 温度の最大値は、加熱1回目のそれに比べて約50℃大き い値を示す。これは、1回目の加熱によって、2回目の 加熱初期温度が高かったこと、耐火被覆材の含水率が低 下したこと(1回目:13.3%、2回目:ほぼ絶乾状態)な どの試験条件の相違による影響が考えられる。また、写 真-3に示すように、RABT 曲線加熱後には耐火被覆材 に対してひび割れが発生するが、加熱2回目においても コンクリート表面温度が最大で200℃程度である。

通常,このような大規模火災を受けた後には,再施工 することが前提であると考えられる。しかしながら, RABT 曲線級の大規模火災を1度受けた耐火被覆材であ っても,前述した Eurocode¹¹⁾ から考えられるコンクリー ト使用限界温度の 300℃よりもコンクリート表面温度を 小さくできるため,再施工前の一時的な期間においては 耐火被覆材としての機能を保持できると考えられる。

5. 結論

本研究で得られた試験結果を総括すれば以下の通り である。

- (1) 水準1で実施した加熱放水繰返し条件では、耐火 被覆材にひび割れは発生するが、耐火性能および 推定圧縮強さの低下は認められないことから、軽 度な火災条件ならば、耐火被覆材に著しい劣化は 発生しない。
- (2) 最高温度が400℃で1h程度の小規模な火災を受けた(放水過程も含む)耐火被覆材は、表面にひび割れが発生するが、推定圧縮強さの低下は認められず、その後の耐火性能についてもRABT曲線加熱下においてコンクリート表面最高温度を200℃程度に抑制できる。
- (3) RABT 曲線加熱を一度受けた耐火被覆材は、表面 にひび割れが発生するが、2回目の RABT 曲線に よる加熱においてもコンクリート表面最高温度 を 200℃程度に抑制することができる。

参考文献

- 長尾覚博,中根 淳:高強度コンクリートの爆裂に 関する一考察,コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.1, pp.657-662, 1996.7
- 日本コンクリート工学協会編:コンクリート構造物の火災安全性研究委員会報告書,日本コンクリート工学協会, pp.98-103, 2002.6
- 日本建築学会編:高強度コンクリート施工指針 (案)・同解説,日本建築学会, p.72, 2005.2
- 4) 前畑国光,白井信行,遊佐秀逸,茂木 武:軽量モ ルタルの耐火被覆性能に関する研究(その1),日本



図-9 水準 3 におけるコンクリート表面温度と経過時 間の関係



写真-3 水準3における RABT 曲線加熱2回後の試験 体の外観(耐火被覆材表面)

建築仕上学会大会学術講演会研究発表論文集, pp.95-98, 1995.9

- 5) 白井信行,前畑国光,遊佐秀逸,茂木 武:軽量モ ルタルの耐火被覆性能に関する研究(その2),日本 建築仕上学会大会学術講演会研究発表論文集, pp.99-102, 1995.9
- 6) 篠崎征夫,藤中英生:超軽量モルタルを用いた外断 熱工法の耐火性能,日本建築学会大会学術講演梗概 集 構造系,A-1,pp.419-420,2002.9
- 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
- 8) U. シュナイダー:コンクリートの熱的性質,技報 堂出版, pp.42-49, 1983.12
- 9) 日本コンクリート工学協会編:コンクリート構造物の火災安全性研究委員会報告書,日本コンクリート工学協会, p.94, 2002.6
- 日本建築学会編:構造材料の耐火性ガイドブック, 日本建築学会, pp.22-23, 2004.11
- CEN : Eurocode 4 Design of Composite Steel and Concrete Structures – Part 1-2 Structural Fire Design, Oct. 1994

謝辞

本研究における耐火被覆材の加熱放水繰返し試験に おいては,(株) 淺沼組にご協力をいただきました。こ こに記して謝意を申し上げます。