論文 アクティブサーモグラフィによるポリマーセメント系塗膜防水層の 初期不具合の検出方法の検討

豊田 啓生*1・塚越 雅幸*2・石川 真志*3・上田 隆雄*4

要旨:アクティブサーモグラフィによるポリマーセメント系塗膜防水材の,初期不具合である塗膜厚不足, 材料分離・ムラと剥離の推定方法について検討を行った。試験体はポリマーセメント材の構成材料の混合割 合を調整することで,部分的に初期不具合を有するように下地コンクリート表面に施工したものを作製した。 養生後,ハロゲンランプにより試験体表面を 20~40 秒程度加熱後,室温環境で冷却した際の温度変化をサー モカメラで観測した。模擬的に生じさせた塗膜厚不足や,材料分離・ムラ,剥離部は健全部との温度履歴の違 いとして検出された。

キーワード:アクティブサーモグラフィ,非破壊試験,ポリマーセメント,材料分離,初期不具合

1. はじめに

ポリマーセメント系塗膜防水層¹⁾を,防水材料として 利用される場合,一般に下地となるコンクリートへのク ラックの発生時に追従し破断しないようにある程度の伸 び率が要求されるために,ポリマーセメントの混合量が 重量比で1:1 ~ 2:1 程度となり,体積で見るとかなりポ リマーリッチな調合となる。

ポリマーセメントの施工時,攪拌不足の状態で塗布さ れた場合には面的な材料の不均一性(材料ムラ)が,加 水された場合には材料の比重差により厚さ方向での材料 分離が生じる危険性があり,このような材料分離が生じ た場合,所定の伸び物性を確保できずに下地コンクリー トのひび割れ抵抗性や付着性状の低下による剥離等の不 具合の発生が懸念される^{2,3)}。また適切な防水性と物性を 確保するために,塗膜厚さ管理がなされているが,下地 コンクリートの不陸などがあった場合,施工面全面で必 要厚さを満足しているかは定かでない。

本防水材は壁面や床スラブ面全体に施工されることか ら、大面積を迅速で手軽な測定方法が望まれている。そ こで本研究では、構成材料であるポリマーとセメント、 砂の熱伝導率や比熱の違いに着目し、比較的大面積での 測定が可能であるアクティブサーモグラフィ法⁴による 不具合箇所の特定方法について検討を行った。

2. 試験体の作製

2.1 ポリマーセメント系塗膜防水層の作製

あらかじめポリマーと水を混錬したエマルション状 にしたポリマーにセメントと砂を混ぜ十分混錬した。ポ リマーセメント系塗膜防水工事施工指針 ⁵や仕様書 ⁶に よると、ポリマーセメント系塗膜防水層は造膜時の全固 形分および塗膜比重を考慮して、造膜後の塗膜厚さを確 保するように2層に分けて施工される場合もある。本研 究では試験体への模擬的な不具合の作製の都合上、すべ て1層で作製した。

2.2 使用材料

セメントは密度 3.16g/cm³, 粒径 100µm 以下に分級し た市販の普通ポルトランドセメントを使用した。ポリマ ーの密度は硬化時でおよそ 1.0g/cm³で, アクリル酸エス テル系共重合体を使用した。細骨材には 7 号硅砂(粒径 200µm 以下)で密度は 2.57g/cm³ のものを使用した。防水 層の調合は**表-1**に示す通りである。

防水層の力学試験には、1.0mm厚さのシート状のポリ マーセメント系塗膜防水層を作製し、そこからダンベル 状3号型に切り抜いたものを用いてJISA6251に準拠し、 写真-1のように引張試験を行った。引張試験結果を調 合との関係を図-1に示す。P/C=50~200%の範囲では、 P/Cの値が大きいほど、低弾性となるが伸び率と引張り 強度を大きくなる傾向にあった。写真-2は、SEMによ るポリマーセメント系塗膜防水層の微細構造観察結果で ある。本画像は、反射電子像であり、白い箇所はセメン トもしくは砂、黒い箇所はポリマー成分が多い事を示す。 P/Cが高い方が、ポリマーの造膜が滑らかになっており、 空隙部分にポリマーが浸透していることがうかがえる。

写真-3は、工学顕微鏡で防水層を断面方向に観察した結果である。W/B=100%の場合、水分量が多く材料分離が生じており、上部にポリマー単体の層が形成され、下部に砂が多く体積しており、所定の伸びと強度が発揮されなかったものと推測される。

*1 徳島大学大学院 知的力学システム工学専攻建設創造システムコース (学生会員) *2 徳島大学大学院 理工学部研究部 理工学部門 社会基盤デザイン系 助教 博士(工学) (正会員) *3 徳島大学大学院 理工学部研究部 理工学部門機械科学系 助教 博士(工学) *4 徳島大学大学院 理工学部研究部 理工学部門 社会基盤デザイン系 教授 博士(工学) (正会員)

W/B(%)		70								8) 100		
P/C(%)		50		100		150		200		150			
S/C(%)	200												
$W^{\times 1}(kg/m^3)$		397		401		403		404		435		491	
$B^{\&2}(kg/m^3)$	₽ ^{₩3}	567	189	572	286	575	345	578	385	544	326	491	294
	C ^{₩4}		378		286		230		193		218		196
$S^{\times 5}(kg/m^3)$		756		572		460		385		435		392	

表-1 ポリマーセメントの調合

※1:水 ※2:結合剤(ポリマー+セメント) ※3:ポリマー ※4:セメント ※5:砂

2.3 初期不具合を想定した大型試験体の作製

写真-4 に初期不具合として、ポリマーセメント系塗 膜防水層の剥離(ふくれ)、塗膜厚さ不足、P/C のムラを 想定した試験体の形状と寸法を示す。いずれの試験体も W/C=55%の下地コンクリート(300×300×50mm)の型枠底 面部分となる 300×300 上に防水層を塗布し 20±2℃、 60±6%R.H.の環境で7日間養生した。

(1) 剥離部分検出用試験体

下地コンクリート表面の品質が悪かった場合,または 高含水な状態で防水層が施工された場合には,ポリマー セメント系塗膜防水層の剥離やふくれが生じるおそれが ある。本研究では,防水層の剥離を再現するため,下地 コンクリートに直径 5.0 cm の円形のテフロンシート(厚 さ 0.1 mm 程度)を張り付け,その上にポリマーセメント 系塗膜防水層を施工している。

調合は、一般的な防水工事に用いられる調合として、 水粉体比(セメントとポリマーの合計質量に対する水の 質量比;以下 W/B)を70%、砂セメント比(重量比;以下 S/C)を200%、ポリマーセメント比(重量比;以下 P/C)を 150%とし、硬化時に2.0 mm となるように下地コンクリ ートに塗布し養生した。

(2) 塗膜厚さ検査用試験体

下地コンクリート表面の不陸や,雨水の排水のための 水勾配などがあった場合,まだ固まらないポリマーセメ ント系塗膜防水層はある程度の粘性を持つが勾配の底部 方向に流れ,膜厚さが不均一となるおそれがある。そこ で,施工面に 1/300 の勾配がつくように下地コンクリー トを設置し,ポリマーセメント系塗膜防水層を施した。 防水層の調合は,W/B=70%,S/C=200%,P/C=150%とし, 塗膜厚さは塗膜厚さが均一に硬化した時の厚さが 2.0 mm になる量を下地コンクリートに塗布し養生した。出 来あがった防水層を断面方向から観察した結果,勾配の 底部にあたる部分で最大塗膜厚さ 2.5 mm 程度,勾配の 高部にあたる部分で 0.5 mm 程度となった。





図-1 防水層の力学的性質と調合の関係



 P/C= 50%
 P/C= 100%
 P/C= 200%

 写真-2
 ポリマーセメント系塗膜防水層の SEMによる微細構造観察結果





写真-5 大型試験体の試験状況

写真-3 ポリマーセメントの 断面方向での観察結果

(3) 材料ムラ(P/C の差)検査用試験体

施工時に攪拌不足等の状態で防水層が塗布され,面的 なポリマーとセメントの混合割合の不均一(材料ムラ)が 生じた場合,局所的に所要の強度や伸び率が得られない 危険性がある。そこで,P/Cの違いをパラメータに試験 体を作製した。調合は,W/B=70%,S/C=200%とそれぞ れ一定とし,P/Cを100,200%のものを使用した。施工面 300mm×300mm上にP/C=100%,200%のポリマーセメン トをそれぞれ左右半分の面に硬化時の塗膜厚さが2.0 mmとなるように塗布した。

3.サーモグラフィ法

サーモグラフィ法により対象物に温度差を生じさせ る方法には、太陽光等の気象条件を利用する方法(パッシ ブサーモグラフィ法)と対象物表面を人工的に加熱する 方法(アクティブサーモグラフィ法)がある。アクティブ サーモグラフィ法は照射設備を必要とするが、気象条件 に影響されず、加熱強度を調節できる利点がある。

アクティブサーモグラフィ法は**写真-5** に示すように, 熱源としてハロゲンランプ,赤外線カメラ,および画像 表示・データ処理用の PC で構成される。本実験では試 験体全面におよそ 10 m の位置にランプを設置した。加 熱は 500W で 240 秒間とし,加熱中および加熱終了後の 温度低下過程を赤外線カメラ(A315 FLIR)により観察し た。赤外線カメラのサンプリング周波数は 30Hz とし, 本試験体のサイズとカメラの設置位置の関係から,分解 能はおよそ 3.0 mm 程度となった。

4. 試験結果と考察

初期不具合を模擬した試験体は図-2(a)に示すよう に,表面からの目視観察では剥離や塗膜厚さの違い, P/C の違いなどを確認することが困難である。

この試験体に対しアクティブサーモグラフィ法を行い, 240 秒間の加熱終了直後の表面の温度分布画像と,

試験体横方向の温度分布(試験開始前,加熱終了直後, 冷却中),模擬的に生じさせた不具合部分と健全部分の温 度履歴を観察した結果を図-2(b),(c),(d)にそれぞれ 示す。表面温度の画像は,白色が高温を黒色が低温であ ることを示している。

(1) 剥離の影響

剥離部が健全部と比べ温度が高くなっており,写真か らも剥離の形状まで良く観察できる。これは入熱時に剥 離部が断熱層として働きそこに熱がたまり温度が高くな ったと考えられる。その後の冷却 60 秒で剥離部の温度 は低下しほぼ健全部と同等の温度となっており,両者間 の差の確認は難しくなった。

(2) 塗膜厚さの違い

塗膜厚さの違いを見てみると、塗膜厚さが厚い部分ほ ど加熱終了時の温度が高い傾向にある。塗膜厚さが厚い ほど、照射された熱をより蓄熱し高温になったためだと 推測される。また、冷却 60 秒では全体的に温度は低下し ているものの、温度分布の傾向は加熱時と同様に、塗膜 厚さが厚いものほど高温となっていた。

(3) P/C の違い

P/C の差を見てみると, P/C が高いほうが加熱終了時の温度が高くなる傾向を示した。有機材料のポリマーと 無機材料のセメント,砂で構成される防水層がコンクリ ート表面に塗布された場合,熱伝導率の小さいポリマー が多いほど照射された熱をより蓄熱したと推測される。

5. 初期不具合を模擬した詳細検査

5.1 小型試験体の作製

写真-6 に初期不具合として、ポリマーセメント系塗 膜防水層の塗膜厚さ不足と材料分離、P/C のムラを想定 した試験体の形状と寸法を示す。いずれの試験体も W/C=55%の下地コンクリート(100×100×100mm)の型枠 側面部分となる 100×100 上に防水層を塗布し 20±2℃, 60±6%R.H.の環境で7日間養生した。







(1) 塗膜厚さ検査用試験体

調合は、W/B=70%、S/C=200%を一定とし、P/C=100% と 150%のものとした。防水層が硬化時の塗膜厚さでそ れぞれ、1.0、1.5、2.0、2.5 mm となるように下地コンク リートに塗布し養生した。

(2) 材料分離検査用試験体

調合は、W/B=70%の他に 80、100%と水分割合を多く したものを、S/C=200%、P/C=150%一定とした。防水層を、 下地コンクリート上に、硬化時の塗膜厚さ 2.0mm となる ように塗布し養生した。

(3) 材料ムラ(P/C の差)検査用試験体

調合は、W/B=70%、S/C=200%を一定とし P/C=50,100, 150,200 と変化させ硬化時の塗膜厚さを 2.0mm となる ように下地コンクリートに塗布し養生した。

5.2 実験の概要

アクティブサーモグラフィ法は写真-7 に示すように、 小型試験体は、試験体上部より 25 cm の位置にランプを 設置した。加熱は 500W で 20 秒間とし、計 60 秒間の加 熱中および加熱終了後の温度低下過程を赤外線カメラに より観察した。赤外線カメラのサンプリング周波数は 30Hz とし、本試験体のサイズとカメラの設置位置の関係 から、分解能はおよそ 1.0 mm 程度となった。

5.3 解析の概要

解析では小型試験体で行った試験を再現し,試験体は 同じ形状・寸法をモデル化し,加熱条件も同様としてい る。解析に用いた材料の物性値を表-2 に示す。なお, ポリマーセメントは,3つの材料が一定量で混在し,1つ の材料として形成している。そこで本研究では,式(1)に 示すように調合表から各調合のポリマー,セメント,砂 の体積割合に,それぞれの熱伝導率を乗じ,その和をポ リマーセメントの熱伝導率として一定値を与えた。

 $\lambda_{PCM} = \lambda_p \cdot v_p + \lambda_c \cdot v_c + \lambda_s \cdot v_s \tag{1}$

ここで,

λ:材料の熱伝導率 (W/m/K), v:材料の体積比 (-) PCM, p, c, s: それぞれ, ポリマーセメント材 ポリマー, セメント, 砂

その他,比熱と密度に関しても同様の考えで計算した。 なお,計算は既存の差分法による熱伝導解析ソフトを用 いており,防水層,コンクリート部共にx,y,zの3次元方 向に1.0mm間隔で分割し,時間間隔は0.1秒で計算して いる。側面や裏面等の境界条件は,室温20°C一定とした。 5.4 試験結果と考察

(1) 塗膜厚さ検査試験結果

図-3(a)に実験で得られた赤外線カメラで観察した 各試験体の中心部分での表面温度変化と、数値解析結果





写真-7 小型試験体の試験状況

表-2 各種材料の熱的特性と シミュレーションに用いた係数

材料	熱伝導率 (W/m・K)	比熱 (J/g・K)	密度 (kg/m ³)
ポリマー	0. 2	1400	1000
セメント	1.2	836	3160
砂	1.6	1000	2570
下地コンクリート	1.1	880	2300

をあわせて示す。P/C が 100%と 150%ともに, 塗膜厚さ が厚いほど加熱終了時において最大上昇温度が高くなっ ている。これは厚さが厚いほど防水層内部に熱が滞留し 温度が高くなったと考えられる。数値解析結果も,加熱 時に関してはこの傾向をよく再現しているが,冷却時で は若干の差が生じた。

(2) 材料ムラ(P/C の差)の検出試験結果

図-3(b)に試験結果を,解析結果とあわせて示す。熱 伝導率の小さいポリマーを多く含む調合での試験体ほど 加熱終了後の上昇温度は高くなっていることがわかる。 また解析結果は,実験値をよく再現できている。

(3) 材料分離検査用試験体

図-3(c)に試験結果を,解析結果とあわせて示す。写 真-3で示した通り,ポリマー層とポリマーセメント層 への材料分離が生じている。解析では,ポリマー単体の 層を1.0 mm,ポリマーセメントを1.0 mmの2層として



与えており、この下に下地コンクリート層を設けた。 材料分離している試験体は健全な防水層と比べ加熱 終了時の最大温度が高くなっていることがわかる。こ れは熱伝導率の低いポリマー層が試験体表面にあるこ とで、ポリマー部分に熱がたまり材料分離している試 験体の方が上昇温度が高くなったものと推測される。 解析結果に関しては、概ね傾向は再現できているもの の、加熱・冷却時の温度履歴に差が生じており、今後 モデルの再検討が必要だと思われる。

6. 結論

ポリマーセメント系塗膜防水層の塗膜厚さ不足,剥離, P/C ムラといった初期不具合を模擬した試験体を 使用しアクティブサーモグラフィ法により,これら不 具合箇所の特定を試みた結果を以下のようにまとめる。 1) ポリマーセメント系塗膜防水層と下地コンクリー トの界面に生じた剥離部は,加熱時に健全部と比べて 最高温度が部分的に高くなった。

 材料分離したものまたは塗膜厚さ厚いほど、健全な ものと比べて加熱終了時の最高温度が高くなった。
 ポリマーセメント系塗膜防水層の各素材の物性値 をその体積比率ごとに合算し、1つのマトリックスと

して扱って計算した結果は概ね実験結果を再現できた。

謝辞

本研究は一般財団法人先端建設技術センターACTEC, 平成27年度研究開発助成を受けたものです。

参考文献

- 大濱嘉彦,出村克宣(2002)『ポリマーセメントコン クリート/ポリマーコンクリート』シーエムシー出 版 pp.9-20
- 2) 中森正貴,塚越雅幸,野並優二,上田隆雄:ポリマ ーセメント系塗膜防水層の耐候劣化が耐疲労性能 に与える影響,2013年度日本建築学会関東支部研 究報告集 I, pp.225-228,2014.2
- 野並優二,塚越雅幸,中森正貴,上田隆雄:近赤外 分光法によるポリマーセメント系仕上材料の均質 性評価,2013年度目本建築学会関東支部研究報告 集1, pp.193-196,2014.2
- 石川真志,椎谷有紀,向後保雄,八田博志,羽深 嘉,福井涼,宇都宮真:位相解析を利用した誘導 加熱起サーモグラフィ法による CFRP 積層板の非 破壊調査,日本機械学会論文集, Vol.81, No.829, pp.1-11, 2015.3
- 5) 日本建築学会:ポリマーセメント系塗膜防水工事 施工指針(案)・同解説, pp.6-7, 2006.11
- 6) 日本建築学会:建築工事標準仕様書・同解説 JASS 18 塗装工事, 2013.3