

# 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防水層の劣化度の推定

豊田 啓生\*1・塚越 雅幸\*2・石川 真志\*3・上田 隆雄\*4

**要旨:** ポリマーセメント系塗膜防水層が耐候劣化した場合を想定した促進劣化環境として、強い紫外線強度、または高温・高湿環境に材料を暴露し、表面の光沢度や力学的性質の変化を測定した。さらに、アクティブサーモグラフィ法を用いて劣化度の推定法について検討を行った。試験体はポリマーセメント比をパラメータに作製し、コンクリート表面に施工したものを用いた。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、室温環境で冷却し、温度変化を赤外線カメラで観測した。耐候劣化した試験体におけるポリマー成分の分解による脆性化は、加熱時の温度上昇の低下割合と相関関係にあった。

**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、耐候劣化

## 1. はじめに

ポリマーセメント系塗膜防水層が、防水材料として利用される場合、高い止水性を有し、かつ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。そこでポリマーのセメントに対する混合量が重量比で1:1～2:1程度と、かなりポリマーリッチな割合で作製される<sup>1)</sup>。

一般的に有機系材料は供用期間中、光（主に紫外線）や水（降雨・結露）、酸素、熱などの影響を単独または複合して受けて耐候劣化し、無機材料であるコンクリートと比べると耐久性は低く、10年から20年程度のサイクルで改修される。防水材の劣化度の評価試験としては、表面観察や、現場から採取した試料を用いた伸び性能試験、成分分析などが行われる<sup>2)</sup>。どの方法も、一定の知識と高いコストが必要であり、特に大面積に塗布される防水材については現場で、かつ非破壊で簡便に確認できる方法が求められている。

ここで、アクティブサーモグラフィ法は建設の分野では、壁面のタイルの剥離やコンクリート中の空洞などの不具合検出に利用されている非破壊・非接触での検査手法である<sup>3)</sup>。またポリマーセメントは有機材料であるポリマーと無機材料であるセメントといった異なる性質のものを混ぜ合わせた複合材料であり、両者の熱的特性も大きく異なる。

そこで本研究では、ポリマーセメント系塗膜防水層の調合条件や塗膜厚さなど健全材料の基礎的な条件の違いと、耐候劣化の状態を、アクティブサーモグラフィ法<sup>4)</sup>を用いて、熱伝導率の変化として検出できないか、実験的に検討を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 ポリマーセメント系塗膜防水層の作製

セメントは密度 $3.16 \text{ g/cm}^3$ 、粒径 $100 \mu\text{m}$ 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。ポリマーは、密度が硬化時でおおよそ $1.0 \text{ g/cm}^3$ である粉体状の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号珪砂(粒径 $200 \mu\text{m}$ 以下)で密度は $2.57 \text{ g/cm}^3$ のものをを使用した。

試験体作製時には、あらかじめポリマーと水を混練したエマルジョン状のポリマー水溶液を準備し、ここにセメントと砂を混ぜ十分混練した。

ポリマーセメント系塗膜防水工事施工指針<sup>5)</sup>や仕様書<sup>6)</sup>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が、本研究では材料の層間の影響を排除するために全て1層で作製した。なお材料の均質性と塗膜厚さの均一性は別途確認しており、断面方向での材料分離は生じておらず、造膜後の塗膜厚さも $\pm 0.05 \text{ mm}$ 以下の精度で作製した。

#### (1) 力学試験用試験体

防水層の力学試験には、離型剤を塗布した水平なガラス面に、造膜後の塗膜厚さで $1.0 \text{ mm}$ となるようにポリマーセメント系塗膜防水層を塗布した。 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、 $60 \pm 6\% \text{ R.H.}$ の環境で7日間の養生後、ガラス面より剥がし取りシート状のポリマーセメント材を作製し、そこからダンベル状3号型に切り抜き、試験体として用いた。引張試験は、JIS K 6251に準拠し $20^\circ\text{C}$ 、 $60\% \text{ R.H.}$ の環境下で $500 \text{ mm/min}$ の速度で行った。試験体の調合は表-1に示す通りであり、 $W/B=70\%$ 、 $S/C=200\%$ を基準に、 $P/C$

\*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 講師 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)

を 100, 150, 200%のものを準備した。なお、試験体数は 3 体ずつ用意し、試験結果はその平均を示した。試験の状況とあわせて、試験体の形状を写真-1 にまとめて示す。

### (2) サーモグラフィ用試験体

試験体の形状と寸法を写真-2 に示す。下地となる W/C=55%のコンクリート(100×100×100 mm)の型枠側面に防水層を塗布し 20±2°C, 60±6%R.H.の環境で 7 日間養生した。調査は力学試験と同様とし、防水層の塗膜厚さは 2.0 mm とした。なお、塗布面以外の 5 面からの劣化因子の浸入を防ぐためにエポキシ樹脂にてシールした。

### 2.2 促進耐候性試験

屋外での耐候劣化の主な原因である、紫外線・熱・水分の 3 要素を試験対象とした。紫外線劣化は UV ランプより 50 mm の距離に試験体の防水層面を暴露し、照射強度を 18.2 W/m<sup>2</sup> になるように調整した。熱劣化としては 70°C, 50%R.H.の雰囲気下に試験体を静置し、熱・水分劣化は 70°Cの温水中に試験体を浸漬した。促進耐候性試験の条件をまとめて表-2 に示す。促進劣化時間は 500, 1,000 時間とし、それぞれの促進劣化環境に暴露後、試験体を取り出し 48 時間以上実験室内に (20±2°C, 60±6%R.H.) 静置し、温度と含水率を調整した後に各種試験を行った。

### 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

表-1 ポリマーセメントの割合

W/B (%)	P/C (%)	S/C (%)	W* <sup>1</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	B* <sup>2</sup> (kg/m <sup>3</sup> )		S* <sup>5</sup> (kg/m <sup>3</sup> )
				P* <sup>3</sup>	C* <sup>4</sup>	
70	100	200	401	572		572
				286	286	
	150		403	575		460
				345	230	
	200		405	405		385
				365	193	

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

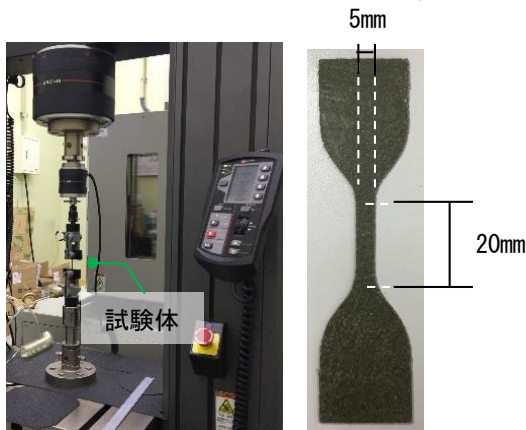


写真-1 引張試験状況とダンベル試験体の形状・寸法

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。本研究では、ポリマーセメントの劣化による物性を定量的に評価することを目的に、温度調整が可能なアクティブサーモグラフィ法を採用した。

アクティブサーモグラフィ法による試験状況を写真-3 に示す。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。試験体上部より 25 cm の位置にランプを設置した。加熱は 500 W で 20 秒間とし、その後 40 秒間そのまま実験室内

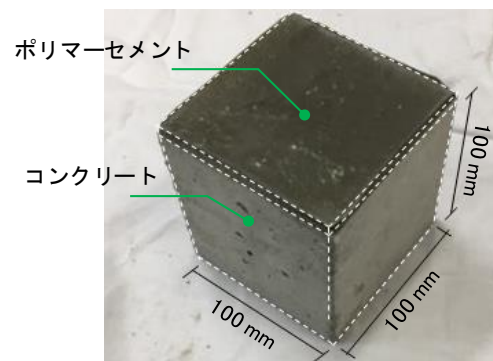


写真-2 サーモグラフィ用試験体の形状と寸法

表-2 促進耐候劣化の暴露環境条件

項目	促進劣化環境		
	紫外線	熱	熱・水分
期間	500時間, 1000時間		
条件	<ul style="list-style-type: none"> <li>環境条件: 20°C, 60%R. H.</li> <li>照射条件: 18.2 W/m<sup>2</sup> (340nm)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>環境条件: 70°C, 50%R. H.</li> <li>恒温恒湿槽</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>環境条件: 70°C温水浸漬</li> </ul>

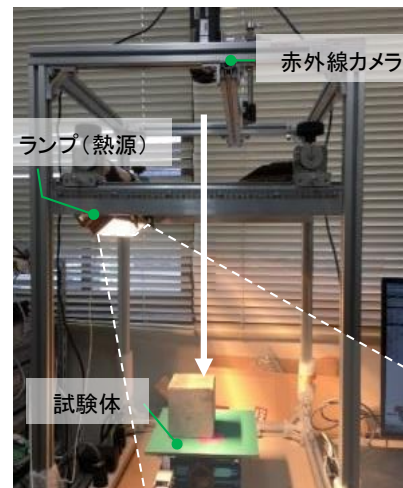


写真-3 アクティブサーモグラフィによる試験状況

の環境下で自然冷却を行い、この間の計 60 秒間の温度履歴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 3.75Hz 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 0.8 mm である。

#### 4. 試験結果と考察

##### 4.1 促進耐候劣化によるポリマーセメント系防水層の物性と外観変化

各種促進耐候劣化環境に 1000 時間暴露した、ポリマーセメント系防水層引張試験結果の一例として P/C=150% のものを図-1 に示す。耐候劣化により、伸び率は低下し引張強度が増加する傾向にあり、力学的性質としては徐々に脆性的になった。特に今回の試験条件下では熱・水分劣化の試験体の物性の変化が著しく、紫外線劣化の試験体の変化が少なかった。これは紫外線劣化については劣化が表面から徐々に進行しているが、熱劣化、熱・水分劣化した試験体はポリマーセメントの表面だけでなく、内部まで熱や水が浸透することで材料全体が同時に劣化しているためだと思われる。

ここで、劣化を与える前の健全な状態での引張強度と伸び率の関係を図-2 に、また劣化条件ごとに引張強度と伸び率を変化率としてまとめたものを図-3 に示す。今回用いたポリマーセメント系防水層を作製した調合の範囲では、健全な状態では、P/C が高いものほどより柔軟な伸び率と引張強度を有している材料であった。

また耐候劣化試験後のすべての試験体において、伸び率の低下割合と引張強度の増加割合は P/C が高いものほど大きくなる傾向にあった。1,000 時間の促進耐候劣化試験期間の間に、紫外線劣化の方が熱劣化よりも変化率は若干低いが、P/C=200% の試験体の伸び率は 25% 程度低下

し、引張強度は 25% 程度増加した。最も劣化による物性の変化率の大きかった熱・水分劣化試験では、P/C=200% の試験体で伸び率は 75% の低下し、引張強度は 180% 程度大幅に増加した。

ポリマーセメントの耐候劣化については、ポリマー成

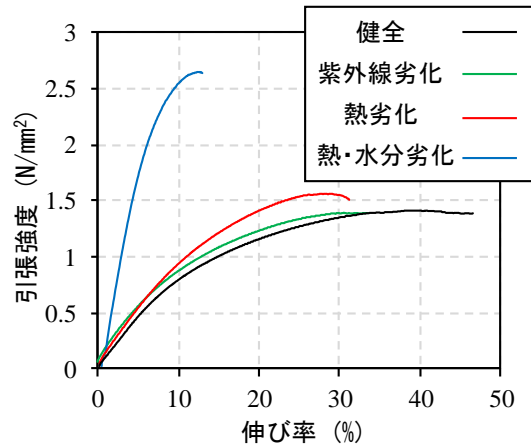


図-1 各種耐候劣化環境に暴露したポリマーセメントの力学的性質

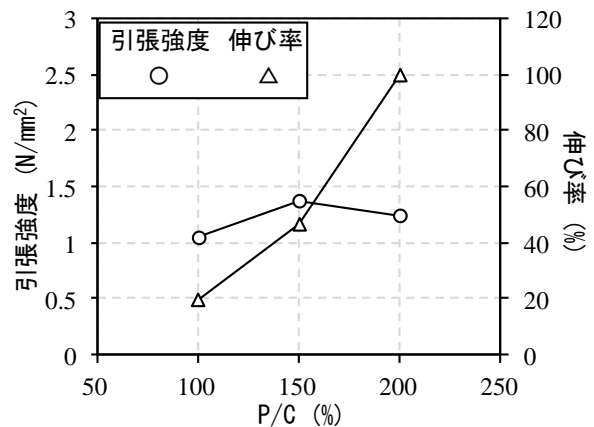


図-2 健全なポリマーセメントの力学的性質と P/C の関係

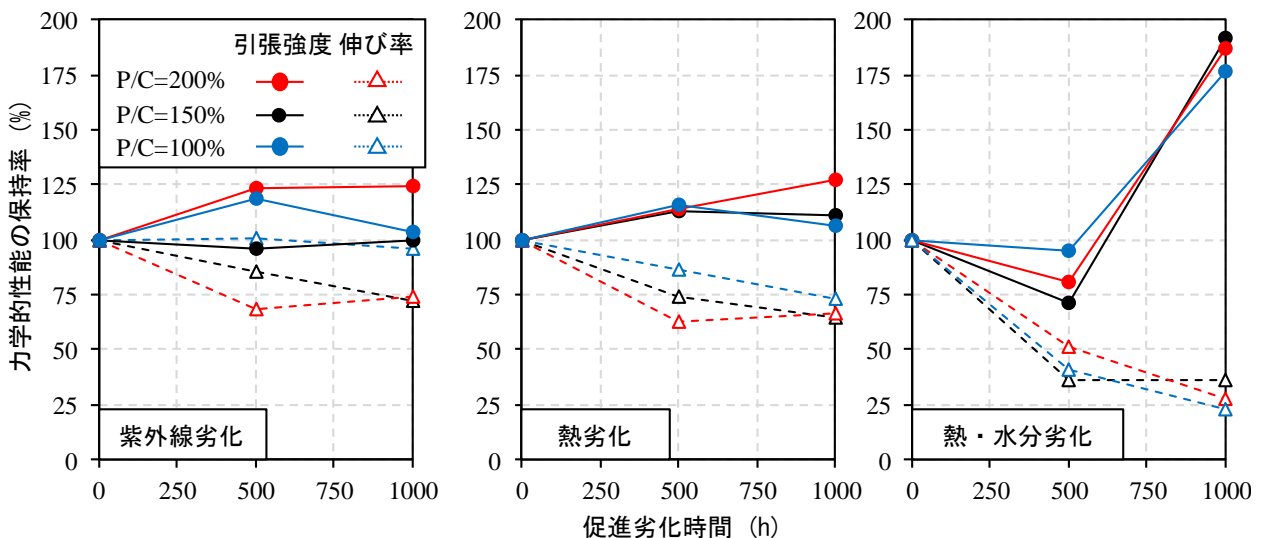


図-3 促進劣化による防水層の力学的性能の経時変化

分の分解や酸化反応による化学的変質の他、種々の添加剤、増量剤等の散逸等の影響も考えられる。また、熱・水分劣化環境については、セメント成分が水和反応するため適した温度・水分環境であるため、セメントの強度が発現し、よりセメント材料に近い脆性的な物性になったものと思われる。ここで、促進耐候劣化試験後の防水層試験体の表面状況について写真-4 に示す。防水層の表面には目視でも確認できる程度の変色が生じていた。また劣化した試験体の表面には凹凸がみられるが、これはポリマー成分の分解と散逸により、残留したセメントと砂が露出したものと思われる。

SEM による観察結果として各種耐候劣化試験を 1000 時間行った試験体の観察結果を健全な状態の試験体とあわせて写真-5 に示す。健全なポリマーセメントの表面は滑らかな状態であるが、耐候劣化した試験体表面では、砂やセメントを覆うポリマー成分へのクラックや表面の凸凹が観察され、これが伸び率の低下の原因の 1 つになったものと考えられる。

最後に近赤外分光機を用いた耐候劣化試験を 1000 時間行った試験体表面の反射率の測定結果を図-4 に示す。なお測定に先立ち、白色板で反射率が 1.0 程度となるように校正し試験を行っている。健全な試験体と比べ促進耐候劣化した試験体は、いずれも反射率が低下する傾向にあり、劣化期間が長いほど反射率が低下した。これは耐候劣化試験による試験体表面の変色と粗度の上昇による影響であると思われる。反射率についても、熱・水分劣化の試験体が最も低下しており、目視観察による変色と凹凸度の割合と同様の傾向にある。

#### 4.2 アクティブサーモグラフィ法による促進耐候劣化を行ったポリマーセメント系防水層の劣化度推定

劣化前の健全な状態での試験結果を図-5 に示す。P/C

の高い試験体ほど、加熱時の表面の最大上昇温度は高くなる傾向にあった。これはセメントや砂に比べて熱伝導率の小さいポリマー成分を多く含む調合で作製された試験体ほど試験体全体の熱伝導率が小さくなり、防水層の表面部分により多く蓄熱されるため上昇温度が高くなっ

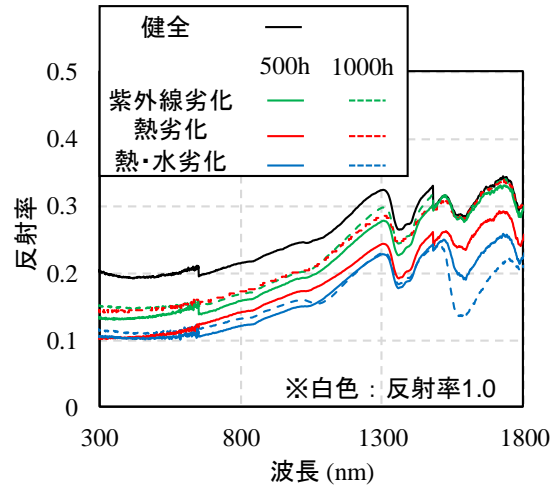


図-4 ポリマーセメント表面の反射率

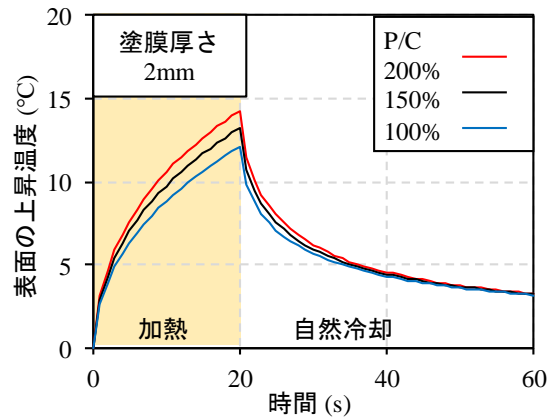


図-5 加熱時の表面の温度の経時変化 (健全な試験体)

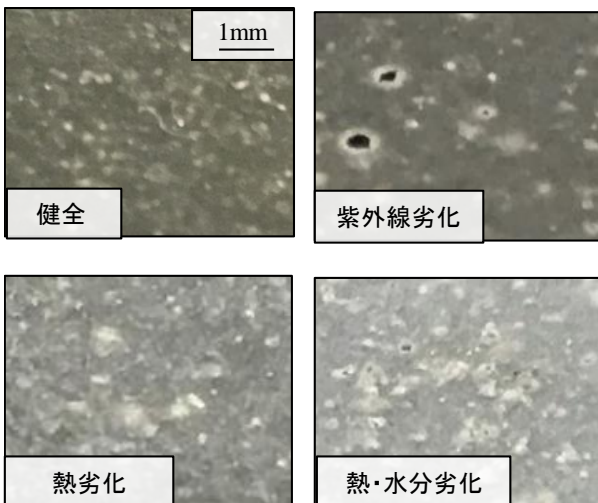


写真-4 促進耐候性劣化試験1000時間後のポリマーセメント (P/C=150%) 表面の状況

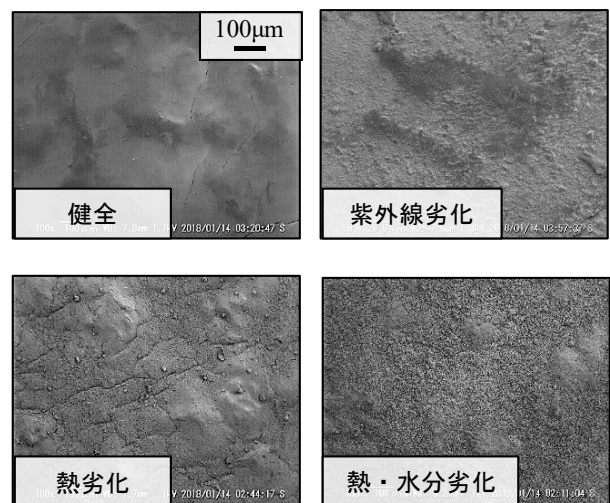


写真-5 SEMによる促進耐候性劣化試験1000時間後のポリマーセメント (P/C=150%) 表面の観察

たとえられる。P/C=150%の試験体を、各種促進耐候劣化環境に暴露した試験体の試験結果を図-6に示す。いずれの促進劣化においても、促進劣化期間が長くなるにつれ加熱時の表面上昇温度が低下した。一般的に反射率の低い物質の方が表面から熱が吸収されやすいため加熱時に高温になる。しかし、促進耐候劣化した試験体は先の図-4で示すように劣化期間が長くなるほど反射率が低下していたにも関わらず、加熱時の最大上昇温度は低下する傾向にあった。

以上のことから、劣化によるポリマー成分の変化や逸散が、ポリマーセメントの熱特性に与える影響の割合の方が、表面の反射率に比べて大きい影響があると言える。これは、サーモグラフィによる熱特性を調べることで、ポリマーセメントの表面の単なる変色の影響を無視し、ポリマーセメントを構成する成分の変質を測定していることを意味しており、成分の変質による温度の変化が力学的性質や防水性などの評価につながる可能性が示唆された。図-7に健全な状態の試験体の表面温度と耐候劣

化後の試験体表面の上昇温度の差 $\Delta T$ をまとめて示す。若干のバラつきはあるものの、劣化の進行に伴い加熱時の表面上昇温度が低下しており、P/Cの高いものほど加熱時の上昇温度が低く、表面の上昇温度の差 $\Delta T$ の値が小さくなる傾向にあった。また、熱・水分劣化環境に暴露した試験体が最も上昇温度の差 $\Delta T$ の値の低下が大きく見られた。以上の結果は、先の力学試験の測定結果と同様の傾向を示した。そこで、伸び率、引張強度および、表面の反射率の保持率に対する、サーモグラフィ法により得られた健全な状態の試験体と耐候劣化後の試験体表面温度の差 $\Delta T$ との関係をそれぞれ図-8(a), (b), (c)に示す。伸び率と上昇量の差 $\Delta T$ は全体的に比較的良好な相関があるが引張強度は大きくばらばらしている。特に最も劣化が進行している熱・水分劣化の試験体の値が大きくなってしまった。熱・水分劣化の試験体については、劣化に加えて、セメント成分の水和進行が考えられるが、このセメントの水和はポリマーセメントの熱的性質にはそれほど影響を与えていないためだと思われる。また $\Delta$

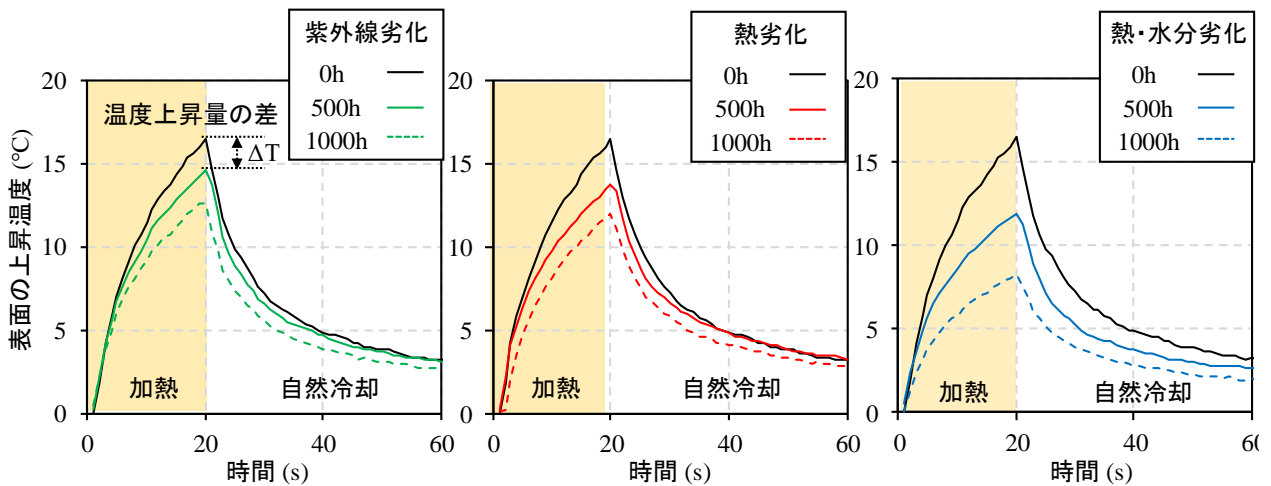


図-6 促進耐候劣化した試験体の加熱時の表面温度の経時変化

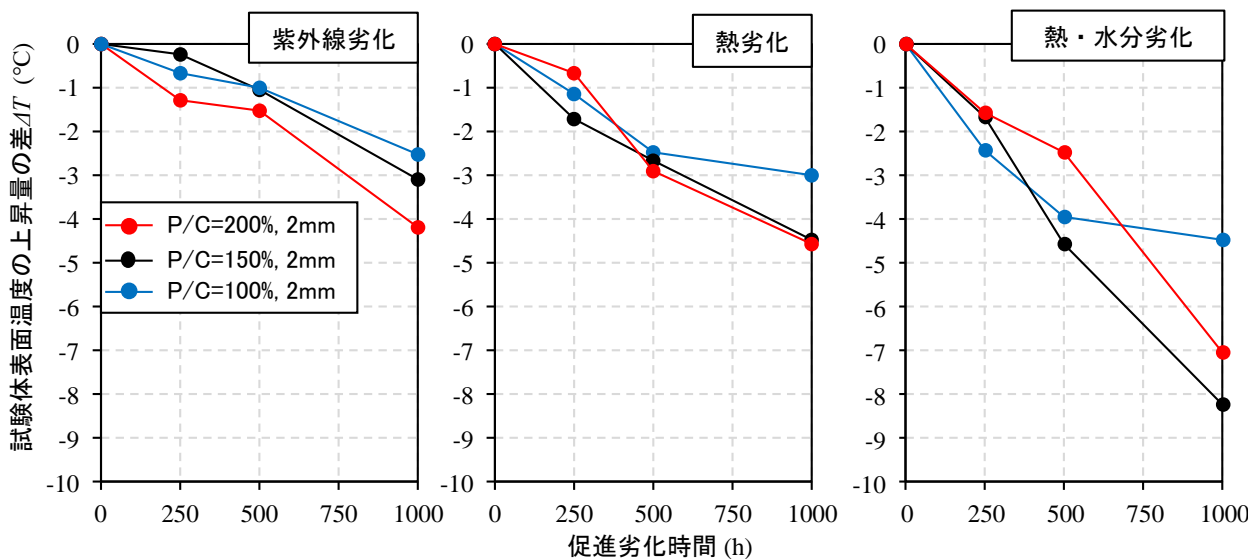


図-7 健全な状態の試験体と耐候劣化後の試験体表面温度の上昇量の差 $\Delta T$ の経時変化

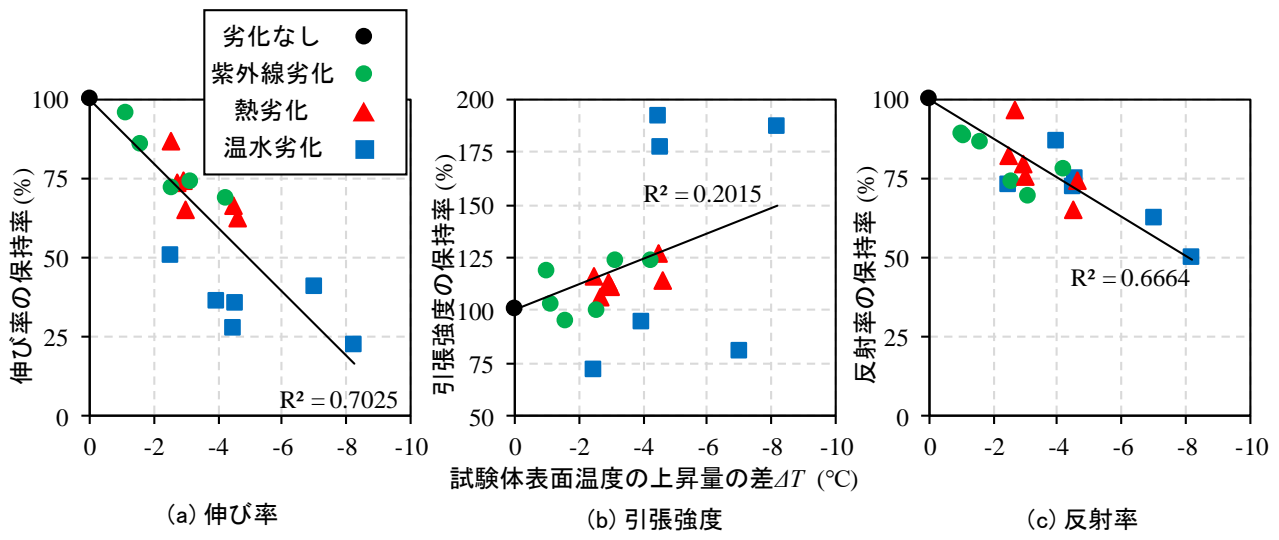


図-8 ポリマーセメント各種物性値の保持率と表面温度の上昇量の差 $\Delta T$

$\Delta T$  は反射率の保持率とも非常に高い相関があるが、先にも述べた通り反射率の低いものほど温度は上昇しやすい状態にあり、単に反射率と熱特性だけで見れば正の相関があるべきである。今回の実験条件下では、ポリマー成分の変質による熱特性の変化の方が、反射率の変化よりも強くポリマーセメントの熱特性に影響を与えているため、見かけ上は反射率が負の相関にあるように示されているものと思われる。

5. 結論

ポリマーセメント系塗膜防水層を、促進耐候劣化環境（紫外線、熱、水分）に暴露した試験体の物理的性質と、アクティブサーモグラフィ法により熱特性をそれぞれ測定し、耐候劣化度の推定を試みた結果を以下のようにまとめる。

- 1) いずれの耐候劣化環境に暴露されたポリマーセメント試験体においても、劣化期間が長くなるにつれ徐々に伸び率は低下し、引張強度は増加する傾向にあり、P/Cの低いものほどその割合が顕著であった。
- 2) ポリマーセメント中のポリマー成分の分解と散逸により変色し、セメントが露出され表面が凹凸になっていたため表面の反射率は低下していた。
- 3) ポリマーセメント試験体を加熱した時の表面温度は、P/Cが高いものほど高くなった。また、耐候劣化した試験体の表面温度の上昇量は小さくなる傾向にあった。
- 4) 今回の試験条件下において、ポリマーセメント表面の加熱時の上昇温度の変化割合と伸び率にはよい相関関係があり、アクティブサーモグラフィ法によりポリマーセメント系塗膜防水層の劣化度の推定の可能性が示唆された。

謝辞 本研究は、JCI 四国支部、次世代のコンクリート構造物の劣化診断に関する特別研究委員会での成果の一部である。

参考文献

- 1) 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
- 3) 濱崎仁, 伊野仁士, 三浦雅仁, 佐藤大輔: 非破壊試験によるひびわれおよび浮き等の補修効果の確認方法に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1847-1852, 2006
- 4) 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
- 7) 矢部政美, 田桐澤根, 岡本好広: 各種耐候試験による塗膜の劣化メカニズムの解析, 塗膜の研究, No.146, pp.8-15, 2006.8