論文　アクティブサーモグラフィを用いた調合の異なるポリマーセメント系塗膜防水層のウェザリングによる伸び性能の低下割合の推定

塚越　雅幸[*1]・豊田　啓生[*2]・上田　隆雄[*3]・石川　真志[*4]

要旨：ポリマーセメント系塗膜防水層を構成する有機材料であるポリマーと無機材料であるセメント，骨材の熱的特性は大きく異なる。また，防水層の表面を加熱した際の表面温度の上昇速度および最高温度には防水材料自体の熱伝導率が支配的な要因となるが，冷却時の温度の低下速度は防水層の塗膜厚さは 2 ㎜ 程度と薄いために下地のコンクリートに伝達した熱の影響も強く受ける事になる。これらの熱的特性をアクティブサーモグラフィ法を用いて測定する事で，ポリマーセメント系塗膜防水層の P/C，塗膜厚さや，劣化による伸び性能の低下割合を推定するための実験式を提案した。

キーワード：アクティブサーモグラフィ，ポリマーセメント，ウェザリング，伸び性能

1. はじめに

ポリマーセメント系塗膜防水層はポリマーのセメントに対する混合量は重量比で 1:1 ～ 2:1 程度と，かなりポリマーリッチな調合で作製されるため，高い止水性と，柔軟な伸び率を有する材料である。

しかし，有機系材料を多く含むポリマーセメントは，供用期間中，熱や紫外線，水分などウェザリングの影響を受けて劣化する。ポリマーセメント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ている [1)]。どの方法も高いコストが必要である。また大面積に塗布される防水層については簡便に現場で，かつ非破壊で確認できる方法が求められている。

著者等は前報 [2,3)]までに，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熱的特性が大きく異なる材料の複合材料であることに着目し，アクティブサーモグラフィ法 [4)]により，ポリマーの劣化に起因するポリマー成分の消失や痩せを検出する方法について検討した。しかし，ポリマーセメントは現場で練り混ぜが行われる材料であるために P/C の不均一性の問題や，塗膜系防水層を一定の膜厚さで均一に塗布する事は熟練の技術者であっても難しいという事が指摘されている [5)]。前報で報告した，表面を加熱した後の最大温度の変化量のみに着目した手法では，P/C と塗膜厚さの違いの影響を詳細に検討する事が難しく，劣化度推定誤差も大きかった。

本研究では，ポリマーセメント系塗膜防水層の P/C や塗膜厚さの違いと，さらにウェザリングによる劣化度を，アクティブサーモグラフィ法を用いて推定できないか，熱伝導解析結果などを基に新たな推定式の提案を行った。

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 g/cm^3 で，材料分離を抑制し材質を均質にするために粒径を 100 μm 以下に分級した普通ポルトランドセメントを使用した。ポリマーは，密度がおよそ 1.0 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 号硅砂(粒径 200 μm 以下)で密度は 2.57 g/cm^3 のものを使用した。

試験体作製時には，あらかじめポリマーと水を混錬したエマルシ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錬した。ポリマーセメント系塗膜防水工事施工指針や仕様書によると，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については，SEM による断面方向観察で材料分離は生じていない事を，造膜後の塗膜厚さも実測にて±0.05 mm 以下の精度で作製されていることを確認した。

ポリマーセメント系塗膜防水層の調合は**表－1** に示す通りであり，W/B=70%，S/C=200%を基準に，P/C を 50，100，150，200 %のものを用意した。

(1) 引張試験用試験体と試験方法

防水層の力学試験用試験体として，離型剤を塗布した水平なガラスに，造膜後の塗膜厚さで 1.0 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。防水層の施工と養生は 20±2℃, 60±6%R.H.の環境下で行い，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

*1 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)
*2 本州四国連絡高速道路株式会社 修士(工学)
*3 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)
*4 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)

ーセメント材を作製した。このシートよりダンベル状 3 号型に切り抜いたものを試験体として用いた。引張試験は，JIS K 6251 に準拠し 20℃，60%R.H.の環境下で 500 mm/min の速度で行った。なお，試験体数は各 3 体ずつ用意した。

(2) サーモグラフィ用試験体

試験体の形状と寸法を**写真－1** に示す。下地となる W/C=55%のコンクリート(100×100×100 mm)の打設時に型枠側面となる面に防水層を塗布し 20±2℃，60±6%R.H.の環境で 7 日間養生した。防水層の塗膜厚さは造膜後 1.0, 1.5，2.0，2.5 mm となるように調整し塗布した。塗布面以外の 5 面はエポキシ樹脂にてシールして外気との接触を遮断した。なお，試験体数は各 2 体ずつ用意した。

2.2 促進劣化試験

屋外で供用されるポリマーセメント系塗膜防水層のウェザリングによる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^2 なるように調整した。熱劣化としては 70℃，50%R.H.の雰囲気下に試験体を静置し，熱・水分劣化は 70℃の温水中に試験体を浸漬した。促進劣化環境に力学試験用およびサーモグラフィ用試験体をそれぞれの促進劣化環境下に 500，1,000 時間暴露後，試験体を取り出し 48 時間以上実験室内に（20±2℃，60±6%R.H.）静置することで温度と含水率を調整し，各種試験を行った。なお，本促進劣化試験中，サーモグラフィ用試験体には剥離やふくれなどの不具合は生じてはいない。

3 サーモグラフィ法

ポリマーセメントの P/C や塗膜厚さ，劣化による伸び物性の低下割合を定量的に評価することを目的に，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－2** 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の 20±2℃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 3.7 Hz とし，本試験体のサイズの解像度と設置位置の関係から，測定した画像の分解能はおよそ 0.8 mm 角であり，試験体の中央部分 5 点を測定し，その平均値を測定結果として記録した。

4 試験結果と考察

4.1 ポリマーセメント系防水層の伸び性能

本研究では特に，下地コンクリートに生じるひび割れ

表-1 ポリマーセメント系防水層の調合

W/B(%)		70							
P/C(%)		50		100		150		200	
S/C(%)		200							
W※1(kg/m^3)		397		401		403		405	
B※2 (kg/m^3)	P※3	567	189	572	286	575	345	558	365
	C※4		378		286		230		193
S※5(kg/m^3)		756		572		460		385	

※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

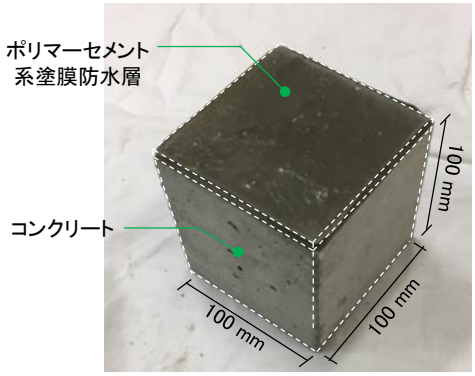


写真-1　試験体の形状と寸法

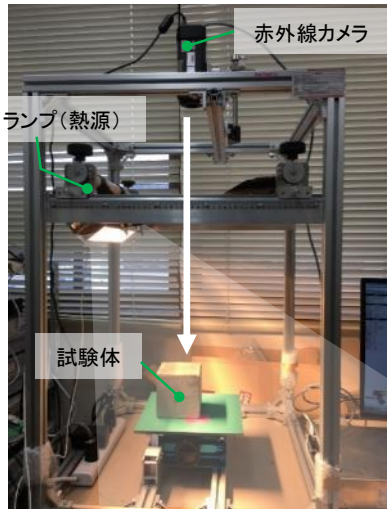
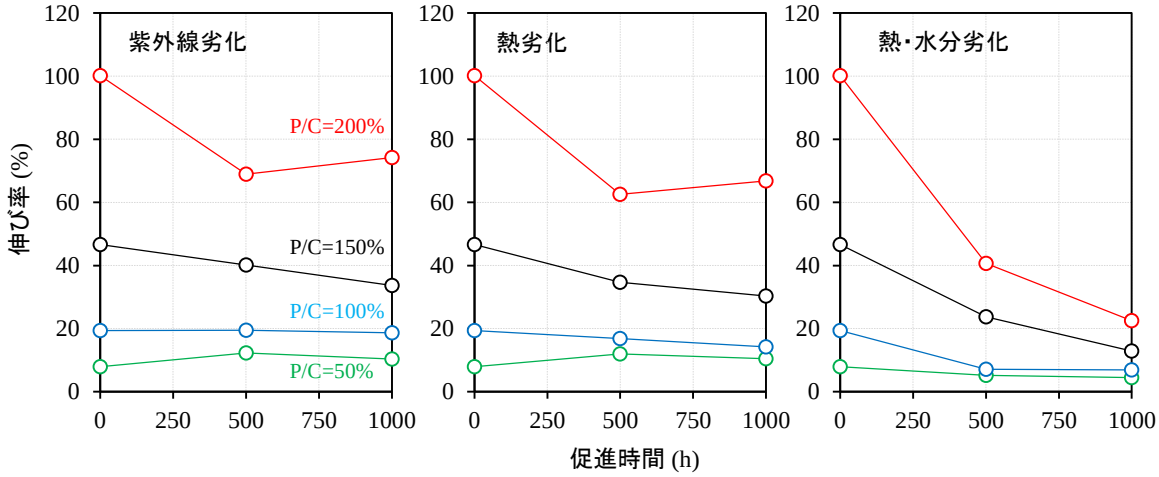


写真-2　アクティブサーモグラフィ試験状況

への追従性に影響を及ぼすポリマーセメント系塗膜防水層の伸長率に着目することとし，劣化条件ごとに伸び率をまとめたものを**図－1** に示す。今回用いたポリマーセメント系塗膜防水層の調合の範囲では, 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材料であった。

各種ウェザリングの影響を受けて劣化した試験体は，劣化期間が長くなるほど伸び率は低下する傾向にあった。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表面より徐々に進行する劣化であるのに対し，熱や水分はポリマーセメントの



図－1 促進劣化による防水層の力学的性能の経時変化

内部まで影響するために，材料の断面方向に全体で劣化しているためだと思われる。また，促進劣化試験後の全ての試験体において，無機材料であるセメントに対し耐候性が一般には低いとされているポリマー割合の高い試験体ほど，伸び率の低下割合が大きくなる傾向にあった。

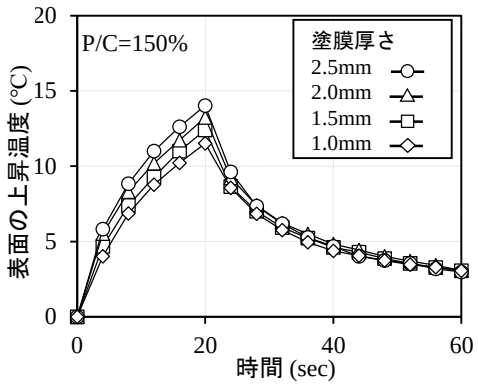
4.2 アクティブサーモグラフィの測定結果

(1) P/C と塗膜厚さの影響

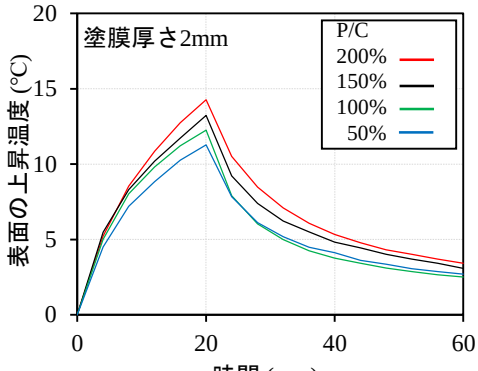
ポリマーセメント系塗膜防水層の P/C を 150%一定とし塗膜厚さを 1.0 から 2.5 mm と 0.5 mm ずつ変化させた試験体と，塗膜厚さを 2.0 mm と一定とし P/C を 50 から 200%と 50%ずつ変化させた試験体を，それぞれ加熱-冷却した時の表面温度の測定結果を**図－2** に示す。

塗膜厚さを変化させた試験体では塗膜厚さが厚い試験体ほど，また P/C を変化させた試験体では P/C が高い試験体ほど加熱終了直後の最大温度が高くなった。これは塗膜が厚いほど，またセメントに比べて熱伝導の小さいポリマーが多いほど照射された熱が内部に伝導する速度が遅くなることで，照射した熱エネルギーがより表面に溜まり高温になったものと思われる。しかし，防水層表面の最大温度だけを見た場合，それが塗膜厚さの影響であるのか，P/C の影響であるのか判断することは不可能である。そこで，**図－3** に示す様に，加熱終了時に示す最大温度 T_{max} の他に，加熱終了の 10 秒前の温度が上昇する速度 d_H と，加熱終了後 10 秒間の，温度が低下する速度 d_C を求め，それぞれの値ごとに塗膜厚さと P/C との関係をまとめて**図－4** に示す。

先に述べた通り，加熱終了時の防水層表面の最大温度 T_{max} は，塗膜厚さが厚くなるほど，また P/C が高くなるなるほど高くなく傾向にあった。温度の上昇速度 d_H を見ると，塗膜厚さを 1.0～2.5 mm の範囲ではあまり差がないのに対し，P/C が高くなると，上昇速度も速くなる傾向にあった。一方で，温度の低下速度 d_C を見ると，塗膜厚さが厚いものほど低下速度が速くなる傾向にあるが，



(a) 塗膜厚さの影響



(b) P/Cの影響

図-2 アクティブサーモグラフィによる測定結果

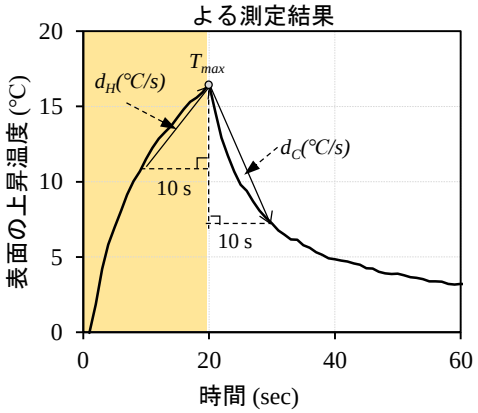
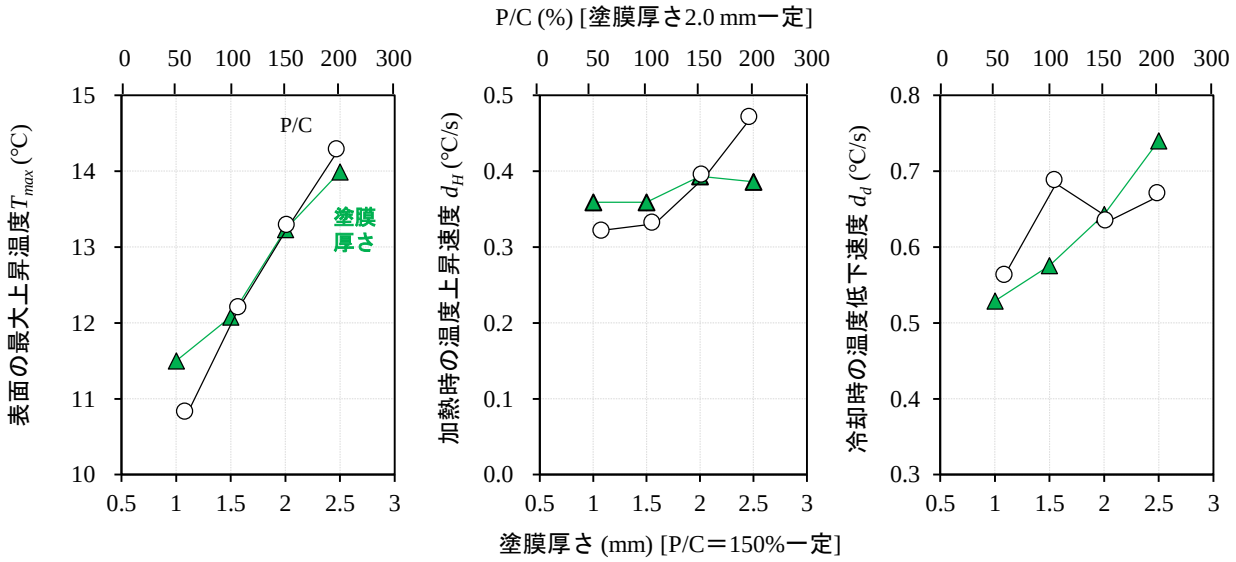
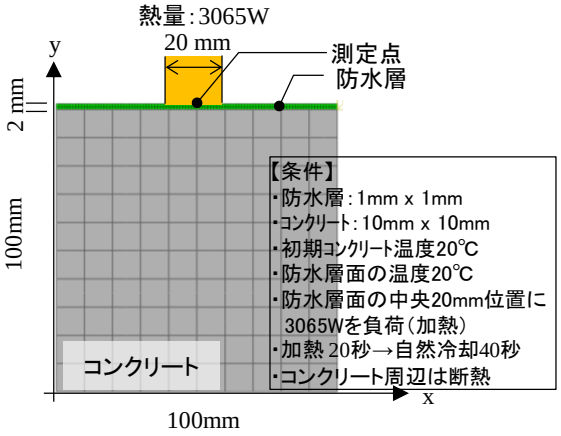


図-3 加熱-冷却中の温度履歴から抽出したパラメーターとその定義



図−4　塗膜厚さとP/Cが温度履歴に及ぼす影響

P/C については 50%のものを除いて，ほぼ横這いであり差は見られなかった。今回検討しているポリマーセメント系塗膜防水層など，建築物への防水用途で用いられている塗膜系の防水層は 1.0～2.0 mm 程度と比較的薄塗りで使用される材料である。加熱-冷却過程で下地コンクリートへの熱の伝達も大きく，コンクリートの蓄熱の影響が表れているものと思われる。しかし，サーモグラフィカメラでは表面温度の測定はできるが，断面方向での温度の測定は難しい。そこで，**図−5** に示す様に本試験状況を再現した 2 次元断面での加熱-冷却時の温度変化シミュレーションを行った。下地コンクリートは縦横 100 mm 角とし，それを 10×10 mm 角に，また防水層を 1×1 mm 角メッシュに分割した。境界条件として，コンクリート周辺は断熱とし，防水層面のみ熱の伝達を与えた。加熱は，実験時と同等の加熱負荷となるように 3065W を中央 20 mm 位置に 20 秒間与え，それ以外の防水層面と加熱後の 40 秒間の冷却中は外部空間の温度として 20℃を与えた。また，試験体全体の初期温度は 20℃とした。



図−5　加熱・冷却シミュレーションモデルの概要

下地コンクリートの熱伝導率は一般的なコンクリートの値として 1.1 W/m・K を，ポリマーセメント系塗膜防水層の熱伝導率は Bruggeman の提案する 2 成分混合系の熱伝導率の推定式(1)[6]を用いて，P/C=150%で 0.469 W/m・K，P/C=100%で 0.504 W/m・K を与えた。

$$1-\varphi=\frac{\lambda_o-\lambda_i}{\lambda_m-\lambda_i}\left(\frac{\lambda_m}{\lambda_o}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

ここで，

φ：セメント・砂の体積割合 (%)

λ：材料の熱伝導率 (W/m・K)，o：有機材料(ポリマー)，i：無機材料(セメントペースト)，m：防水層全体

シミュレーションによる測結果として，P/C150%一定で膜厚さが 1.0，2.0 mm のケース，また塗膜厚さが 2.0 mm 一定で，P/C を 100，150%のケースについて，それぞれ防水層とコンクリート表面の温度履歴それぞれの計算結果を**図−6** に，合わせて温度の上昇速度 d_H と低下速度 d_C を**図−7** にまとめて示す。

塗膜厚さが 2.0 mm の場合，P/C の違いによらずコンクリートの表面温度はどちらも加熱終了後 5 秒程度で最大温度を迎えており，また最大温度も同程度であった。一方で，塗膜厚さが 1.0 mm と薄い場合，コンクリート表面の最大温度が塗膜厚さ 2.0 mm のものと比べ高くなり，また加熱終了とほぼ同時に最大温度を迎えた。これは，塗膜が薄いためコンクリートまで容易に熱が伝達しコンクリートに蓄熱されている事を意味し，この熱が冷却時には徐々に防水層に伝達，表面まで伝導されているため，冷却時の温度の低下速度 d_C は，塗膜厚さが薄いものほど低くなる傾向にあるものと思われる。

P/C の違いについて着目すると，実験結果と同様に P/C が大きい方が温度の上昇速度 d_H が大きくなった。これ

は，熱伝導率の小さいポリマーが多いため防水材内部を熱が伝導しにくくなっているためであり，ポリマーの熱伝導率の影響が支配的になっていると思われる。なお，一般にアクティブサーモグラフィ法では，加熱時の温度上昇速度については，熱源で与えるエネルギー量にもよ

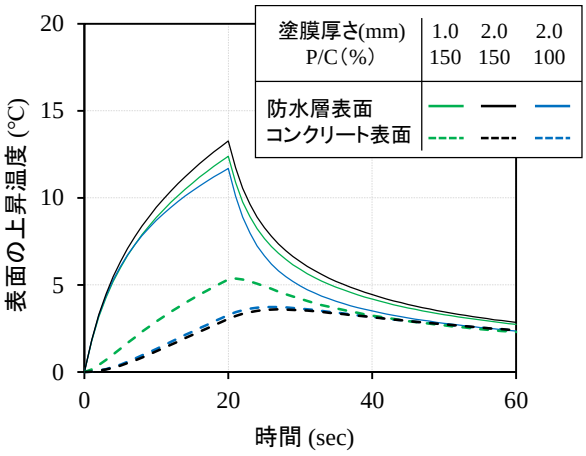


図-6　シミュレーションによる加熱・冷却時の防水層およびコンクリート表面の温度変化予測

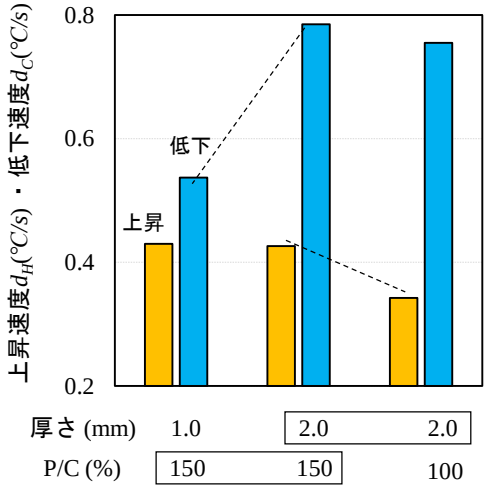


図-7　シミュレーションによる加熱・冷却時の防水層表面の温度上昇速度d_Hと低下速度d_C

るが環境温度の影響は小さいとされている。しかし，冷却時は，環境温度が低下速度に直接影響を及ぼす。また下地コンクリートの熱的特性はコンクリートの含水率にも大きく作用されるために，これらの影響は無視できないが，今後の検討課題としたい。

(2) ウェザリングの影響

促進劣化試験前後でのアクティブサーモグラフィ法で測定した温度パラメータをまとめて**図－8** に示す。ここで，健全な防水層の最大温度と劣化後の最大温度との差をΔT_{max} とした場合，劣化期間が長くなるほど大きくなる傾向にあった。さらに，上昇速度 d_H，低下速度 d_C 共に劣化期間な長くなるほど低下する傾向にあった。ここで，促進劣化試験を 1000 時間行った P/C=150%の試験体の EDX による元素分析結果を**図－9** に示す。セメント成分である Ca にはピークの値に変化はないが，ポリマーの成分である C の値は定性的ではあるが低下していることが読み取れることから，紫外線や熱，水分などの外部環境の影響により防水層中のポリマーが分解してその一部が消失しポリマー量が減少しており，劣化後では見かけ上の P/C は低下しているものと推測される。先の健全

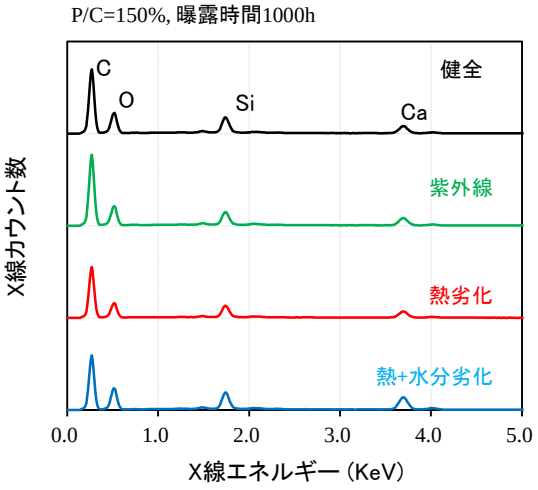


図-9　EDXによる成分分析結果

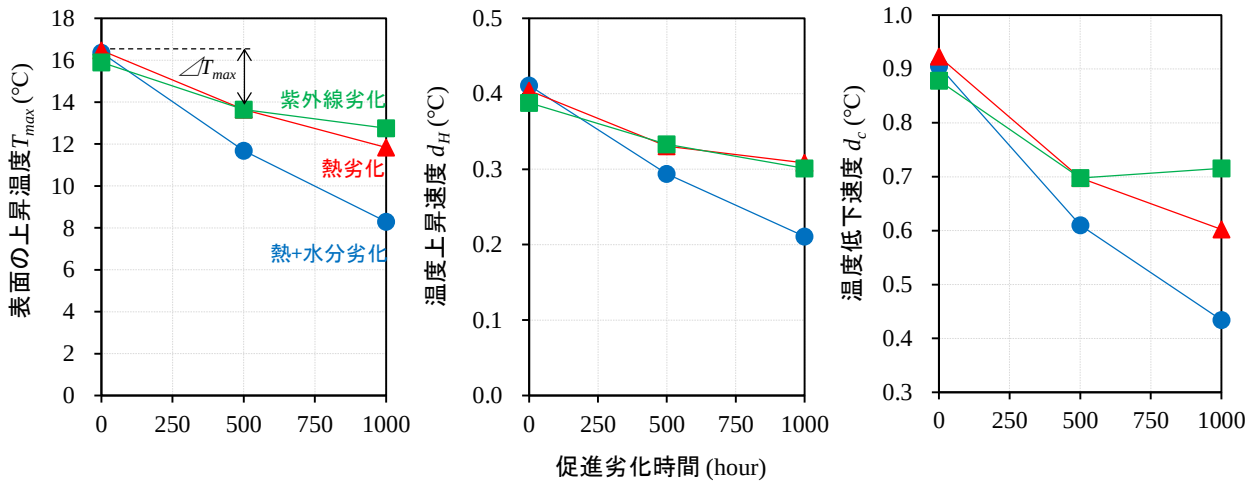
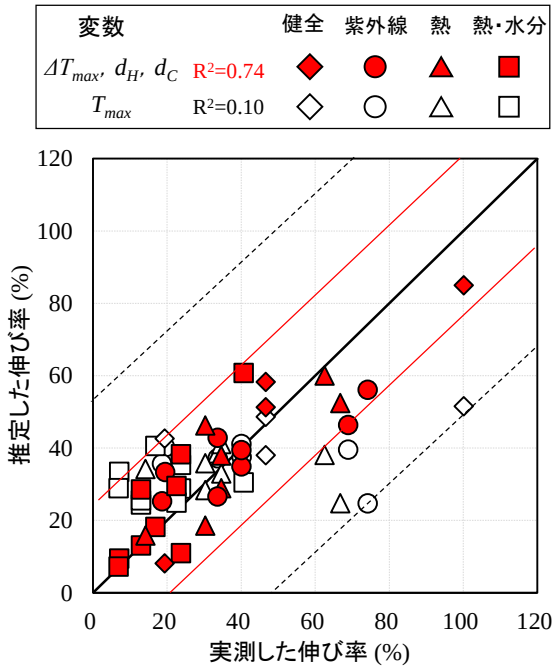


図-8　ウェザリングが防水層の各温度パラメータに及ぼす影響



図−10　加熱・冷却時の温度変化パラメータより推定したウェザリングによる防水層の伸び率の変化率と実測値の関係

な防水層のアクティブサーモグラフィによる測定結果では，P/C が低いものほど，最大温度 T_{max}，上昇速度 d_H，低下速度 d_C が小さくなっており，劣化後の防水層の測定結果においてもこれらの値は同様の傾向を示していることから，劣化による見かけ上の P/C の低下をアクティブサーモグラフィ法により検出しているものと思われる。以上より，健全な状態のポリマー成分の量の違いや塗膜厚さ，さらに劣化によるポリマーの消失によるポリマー量の減少が，劣化前後の最大温度と劣化後の最大温度との差ΔT_{max}，上昇速度 d_H，低下速度 d_C と一定の相関関係にあることが認められた。ここでは，これら 3 つのパラメータと実験によって得られた防水層の伸長率 ε(%)より，式(2)に示す回帰式を作成した。

$$\varepsilon = 592.9\Delta T_{max} - 38.1 d_H - 9.4 d_c - 154.3 \qquad (2)$$

本提案式と実験値との関係と，あわせて前報までの最大温度 T_{max}のみを用いて推定した値をまとめて**図−10**に示す。前報に比べて，今回提案する式で求めた推定値の方が高い相関関係にあることが分かる。また，劣化前の健全なポリマーセメント系塗膜防水層の伸び率も含めて，±20%程度の誤差範囲の精度で推定が出来ており，防水層の施工時の材料の不均一性や塗膜厚さの不足など初期不具合の推定[2)]にも利用が可能である。

5. まとめ

P/C や塗膜厚さなど施工時の条件の異なるアクリル酸エステル系共重合体を使用したポリマーセメント系塗膜防水層が，ウェザリング（紫外線，熱，水分）の影響による劣化度を伸び率と捉え，アクティブサーモグラフィ法により測定される熱特性により，劣化度の推定を試みた結果を以下のようにまとめる。

1) ウェザリングにより劣化したポリマーセメント系塗膜防水層の伸び率は劣化期間が長いものほど低下し，かつ P/C の低いものほど低下割合が大きかった。

2) 加熱終了時の防水層表面の最大温度は，塗膜厚さが厚くなるほど，また P/C が高くなるなるほど高くなる傾向にあった。加熱終了前の 10 秒間の温度上昇速度 d_H は，塗膜厚さを変化させてもあまり差がないのに対し，P/C が高くなると速くなる傾向にあった。一方で，加熱後 10 秒間の温度低下速度 d_C は，塗膜厚さが厚いものほど速くなる傾向にあるが，P/C については 50%のものを除くと，あまり差は見られなかった。

3) 健全な防水層の最大温度とウェザリングにより劣化した後の最大温度との差をΔT_{max} とした場合，劣化期間が長くなるほど大きくなる傾向にあった。さらに，上昇速度 d_H，低下速度 d_C 共に劣化期間が長くなるほど低下する傾向にあった。

4) 最大温度との差をΔT_{max}，上昇速度 d_H，低下速度 d_C を用いたポリマーセメント系塗膜防水層の伸長率の推定式を提案した。本提案式は，施工時の P/C の違いによらず，健全な状態と劣化状態にある防水層の伸長率を±20%程度の誤差範囲の精度で推定が可能であった。

参考文献

1) 大濱嘉彦，出村克宣：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，2002
2) 豊田啓生，塚越雅幸，石川真志，上田隆雄，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，コンクリート工学会年次論文集 Vol.39, No.2，pp.1279-1284，2017
3) 豊田啓生，塚越雅幸，石川真志，上田隆雄，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，コンクリート工学会年次論文集 Vol.40, No.2，pp.1351-1356，2018
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
5) 梅本康裕，石原沙織，ウレタン塗膜防水層の立上り部における施工工程数と施工時間が膜厚に及ぼす影響，日本建築学会関東支部研究報告集 Vol.86, pp.81-84, 2016
6) D. A. G Bruggeman，Ann Phys，Vol.24，pp.636-679，1935