

論文 コンクリート用表面含浸材の撥水効果の温度依存性に関する基礎的研究

勝又 洸達*1・今本 啓一*2・清原 千鶴*3

要旨: シラン系表面含浸材(以下, 含浸材)について, 5°C, 20°C, 35°C, 日向曝露, 日陰曝露の5つの環境でどのような挙動を示すかを調査した。結果, 色差・光沢度において含浸材塗布の有無の差異は非常に小さく, 本研究で用いた含浸材の視覚的变化は環境温度の影響を受けなかった。また, 透気, 表面含水率, 吸水率については, 5°C以外の4つの環境において, 含浸材がその撥水性によって, 内部への水分浸入を抑制する一方で, 水分より粒子の細かい水分蒸発を許容したことにより, コンクリート内部の乾燥が進んだことが推測された。加えて, 含浸深さは各環境で10~15mm程度を示した。

キーワード: シラン系表面含浸材, 色差, 光沢度, 透気係数, 表面含水率, 吸水率

1. はじめに

近年, コンクリート構造物の維持保全, 長寿命化の必要性の高まりを受け, 劣化の進行を抑制する対策が広く行われている。コンクリート用表面含浸材は, コンクリート表面に塗布することで, コンクリート内部に含浸し, 水分や塩化物などの劣化因子をコンクリート表面から内部への浸透を抑制することにより, コンクリート構造物の劣化進行を抑制することが期待されている材料の1つである。筆者らはこれまで, 国立西洋美術館本館躯体(以下, 西美本館)の劣化予防保全のための塗布材としてシラン系表面含浸材(以下, 含浸材)の効果とその効果の評価手法について検証してきた¹⁾。西美本館外壁部などに実際に含浸材を塗布し, 非破壊試験にてその効果を検証した結果²⁾, 含浸材の水分浸透抑制効果は, 塗布前の躯体性状および日射の有無によって異なることが分った。

そこで, 本研究では表-1に示す性質の含浸材を劣化が進行している既存構造物に適用した場合, コンクリートに塗布された含浸材の水分浸透抑制効果やその効果の検証手法に及ぼす温度や日射の有無の影響について明らかにすることを目的とし, 冬期, 標準期, 夏期を想定した5, 20, 35°Cの室内環境下と, 雨掛かりなしの日向・日陰による屋外曝露の合計5環境において色差, 光沢度, 透気係数, 表面含水率, 吸水率の測定を行い, 水分浸透抑制効果の評価に適切な期間について検討を行った。

2. 試験概要

2.1 試験体概要

試験体に用いたコンクリートの使用材料および調査を表-2, 表-3に示す。作製したコンクリート試験体は, 100×100×200mmの角柱供試体であり, 圧縮強度は22.75kN/mm²であった。試験要因および試験項目を表-3

表-1 使用含浸材性質

シラン系含浸材
有効成分濃度 95%以上
外観: 淡黄色透明液体
密度: 0.88g/cm ³

表-2 使用材料

水(W)	上水道水
セメント(C)	普通ポルトランドセメント, 密度 3.16g/cm ³
粗骨材(G)	砕石 表乾密度 2.66g/cm ³
細骨材(S)	陸砂 表乾密度 2.59g/cm ³
化学混和剤	AE減水剤 空気量調整剤

表-3 調査およびフレッシュコンクリートの性状

W/C (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)						スランプ (cm)	空気量 (%)
		W	C	G	S	AE減水剤	空気量調整剤		
61.0	48.4	173	284	938	655	1.42	0.017	18.0	5.3



写真-1 日向曝露環境



写真-2 日陰曝露環境

に示す。試験体を枠で囲った雨掛かり無しの日向および日陰環境下での屋外曝露状況を写真-1, 2に示す。また, 測定期間中の温湿度の経時変化を図-1に示す。日向環境下では平均気温 22.4°C, 平均湿度 61.4%, 日陰環境下では平均気温 12.6°C, 平均湿度 63.6%であった。

打設後, 材齢1日で脱型し, 水中養生6日(温度20°C), 気中養生14日(温度20°C, 相対湿度60%)した後, 築年

*1 東京理科大学大学院 工学研究科建築学専攻 (学生会員)

*2 東京理科大学 工学部建築学科教授 博士(工学) (正会員)

*3 東京理科大学 工学部建築学科嘱託補手 博士(工学) (正会員)

数 56 年が経過した西美本館躯体コンクリートを模擬するために、乾燥炉(温度 50℃)で 7 日間乾燥させた。その後、各環境条件下で調湿させるため試験体を 4 体ずつ、各環境下に 7 日間静置した後、環境毎に 2 体のみに含浸材の塗布を行った。含浸材は、100×200mm の 1 面に含浸材を 600g/m² 塗布し、他の面はエポキシ樹脂・アルミテープにてシーリングを行い、塗布後材齢 1, 2, 3, 7, 21, 28 および 56 日において表-4 に示す項目の測定を行った。

2.2 測定項目

(1) 色差測定

含浸材塗布試験体の塗布後の表面色差変化状況、及び無塗布の試験体との表面比較のため、色差計を用いて、各試験体の表面を無作為に 4 か所選定し、L*a*b*表色系(JIS Z 8729)に準じた値を測定した後に式(1)から色差の値を算出した。

$$\Delta E = (\Delta a^2 + \Delta b^2 + \Delta L^2)^{1/2}$$

(1)

ここに、 ΔE : 色差

L : 色の明度を示し、黒(0) < ΔL < 白(100)

a : 緑(-) < a < 赤(+)

b : 青(-) < b < 黄(+)

(2) 光沢度測定

含浸材塗布試験体の塗布後の表面光沢度変化状況および無塗布の試験体との表面比較のため、ハンディ光沢計を用いて、各試験体の表面を無作為に 5 箇所選定し光沢度を測定した。

(3) 透気係数測定

透気試験はトレント試験機(ダブルチャンバー法)を用いて、透気係数を算出し評価を行った。この方法は、チャンバー内を負圧にし、圧力が大気圧に回復するまでの圧力の経時的変化を測定することで透気係数を算出し、コンクリート表層の緻密性を非破壊で定量的に評価するものである。

(4) 水分逸散率測定

試験日ごとに重量を測り、試験開始時からの重量変化率を水分逸散率として算出した。

(5) 静電容量測定

含浸材塗布の有無による静電容量の経時変化を確認するため、コンクリート・モルタル水分計(測定可能範囲 1~12%)の静電容量表示を用いて各試験体の表面から無作為に 5 箇所選定して静電容量を測定した。

(6) 表面含水率試験

含浸材の効果の 1 つとして期待される、コンクリート内部への水分の浸透を抑制する水分浸透抑効果を見るため、表面含水率試験を実施した。1×1m の区画に試験体を置き、1 分間噴霧器にて区画内に水を噴霧し、その後

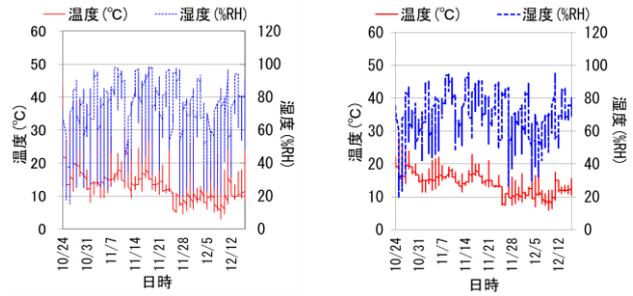


図-1 屋外曝露温湿度の経時変化(左日向, 右日陰)

表-4 試験要因および試験項目

環境条件		試験体数		測定項目 (各条件 共通)	測定材齢
温度	相対湿度	含浸材 無	含浸材 有		
5℃	32%	2 体	2 体	色差・光沢度	含浸材塗布前 および 含浸材塗布後 材齢 1, 2, 3, 7, 21, 28, 56 日
20℃	60%			透気係数	
35℃	60%			水分逸散率	
日向曝露 雨係り無し				静電容量	
日陰曝露 雨係り無し				表面含水率	
				吸水率 含浸深さ	

試験体を 1 分間静置して水を浸透させた上で表面を拭き取り、電気式モルタル水分計(測定可能範囲 1~15%)を用いて、各試験体から 5 箇所選定し、0, 30, 60, 90 秒、2~5 分で 1 分ごとに 5 箇所ずつ測定を行った。

(7) 含浸深さ測定

各測定材齢において切り出した試験体を 1 分間水に浸せきして取り出し、割裂面の撥水している部分の含浸面からの深さを含浸材の含浸深さとして測定した。含浸深さの測定位置は、試験体の割裂面の中心、およびその中心から 25mm の辺りの位置片面 3 箇所とし、対面する割裂面で合計 6 箇所の含浸深さを、ノギスを用いて 0.1mm の単位で測定し、その平均値を含浸深さとした³⁾。

(8) 吸水率測定

塗布面以外の 5 面にはアルミテープを貼り、塗布面と側面の境には水分の浸入を防ぐためエポキシ樹脂でシーリングを施した後、質量を測定した。その後、1 週間、容器水中に浸漬し、取り出した後、質量を測定し、以下式(2)で算出した値を吸水率とした。

$$\text{吸水率}(\%) = \frac{\text{吸水後質量} - \text{吸水前質量}}{\text{吸水前質量}} \times 100 \quad (2)$$

3. 試験結果および考察

3.1 色差, 光沢度

文化財建造物では、維持保全にあたって極力外観を変化させないことが求められる。そのため、塗布前後における色差, 光沢度の差異を検証した。図-2 に色差比を、図-3 に光沢度比を示す。色差比および光沢度比とは各塗布後材齢の値を塗布後 1 日も含め、塗布後材齢 1 日の値で除したものである。また、変化の微細なグラフでは、

1.0%の位置に塗布後基準線を設けている。光沢度において若干ばつきは見られるが、いずれの環境においても変化率の変動は小さく、また含浸材塗布の有無の差異は非常に小さい。このことから本研究で用いた含浸材の視覚的变化は環境温度の影響を受けないことが確認できた。

3.2 透気係数

図-4に透気係数の測定結果を示す、図-4は、各環境下において含浸材塗布前の透気係数に対する各材齢の比を示したものである。5℃、20℃、両外部環境下の透気係数比がほぼ横ばいであるのに対し、35℃環境下においては材齢7日から透気係数比が大きくなっており、試験体表面が粗になっていることが予測された。

3.3 水分逸散率および静電容量

図-5に塗布後からの各環境下における水分逸散率を示す。この図より35℃の環境下において材齢7日以降水分逸散率が大きくなってきている。このことから、35℃の環

境下においては、塗布の有無によらず試験体内部の水分逸散により、試験体表面の乾燥が進んだことで表面が粗となったことが、透気係数が大きくなった要因の1つであると考えられる。

3.2 静電容量

静電容量の測定結果を図-6に示す。静電容量はコンクリート表面に流した電流の抵抗値から得られ、コンクリート表層の含水率が大きくなると静電容量も大きくなる。いずれの環境条件下においても含浸材塗布ありのほうが塗布なしに比べて静電容量が小さい。また、湿度変化の大きい曝露環境下のほうが、含浸材塗布ありと塗布なしの差が大きい傾向が見られる。このことから、含浸材を塗布することにより、表層からの水分浸透抑制効果が得られていることが考えられる。

これらのことから、いずれの環境条件においても含浸材塗布の有無による静電容量の差が明確に現れる塗布後

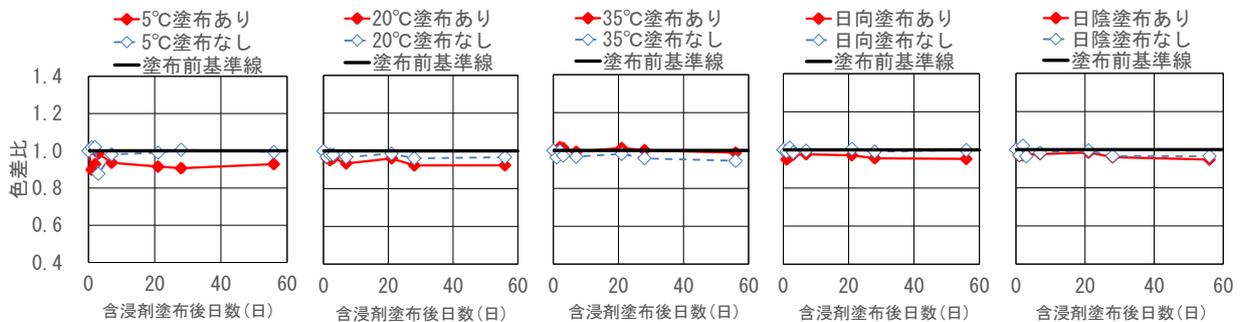


図-2 各環境条件における色差比

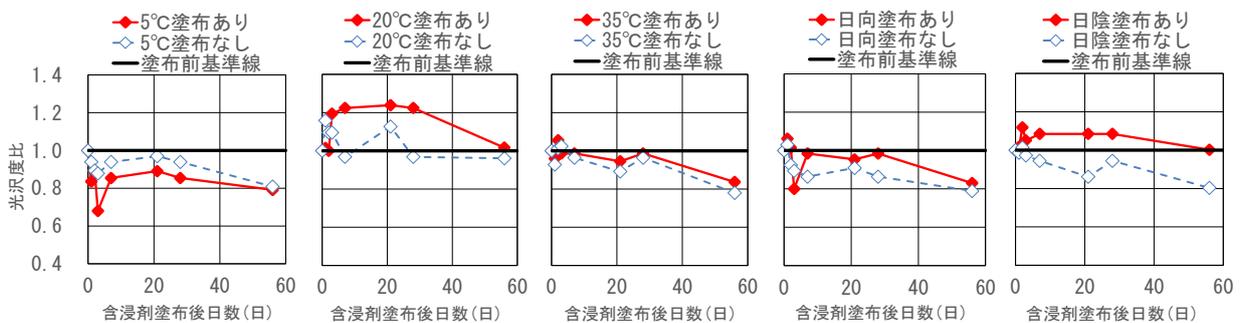


図-3 各環境条件における光沢度比

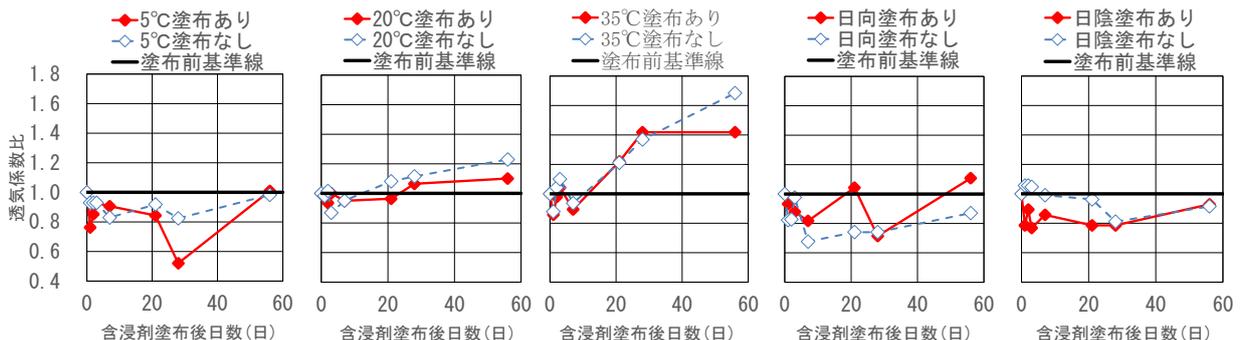


図-4 各環境条件における透気係数比

材齢 7 日以降であれば水分浸透抑制効果が確認できる可能性が考えられる。

3.4 表面含水率試験

図-7 に各環境条件下における塗布後材齢 2 日と 56 日

の測定結果を示す。ここでは、各測定時間の表面含水率を測定開始時の表面含水率で除した値（表面含水率比）で示している。なお、電気式モルタル水分計の測定可能範囲から、1%以下の含水率は 0 として扱われているた

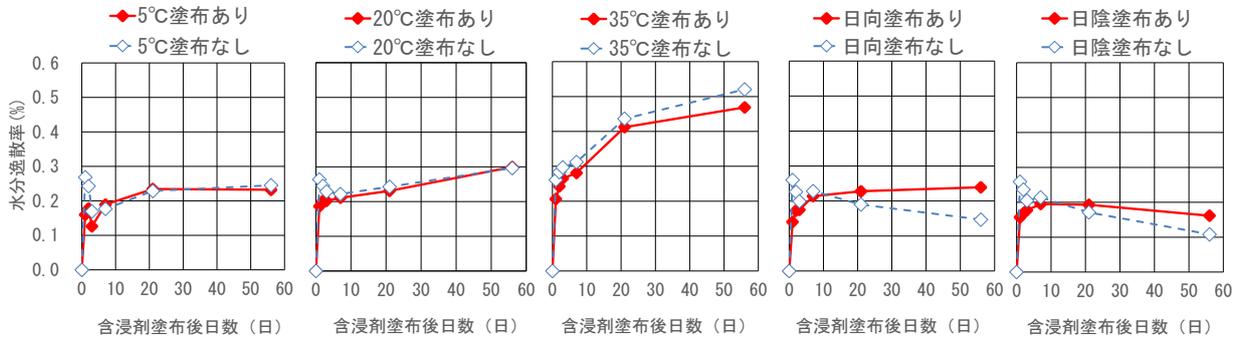


図-5 各環境条件下における水分逸散率

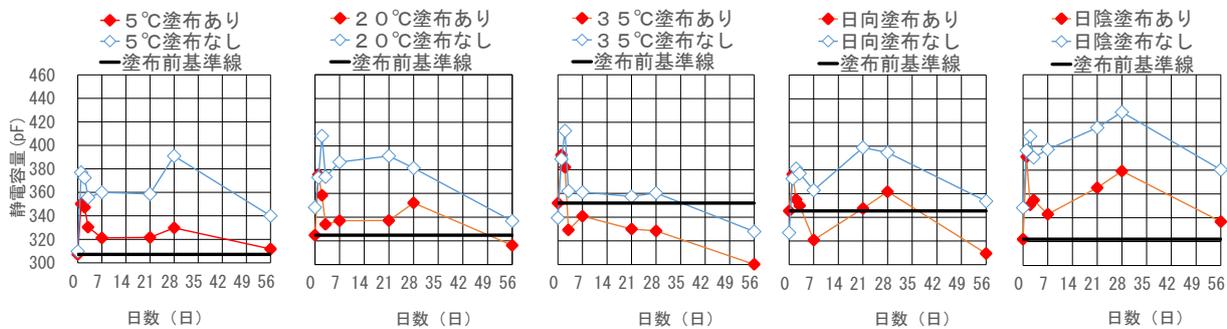
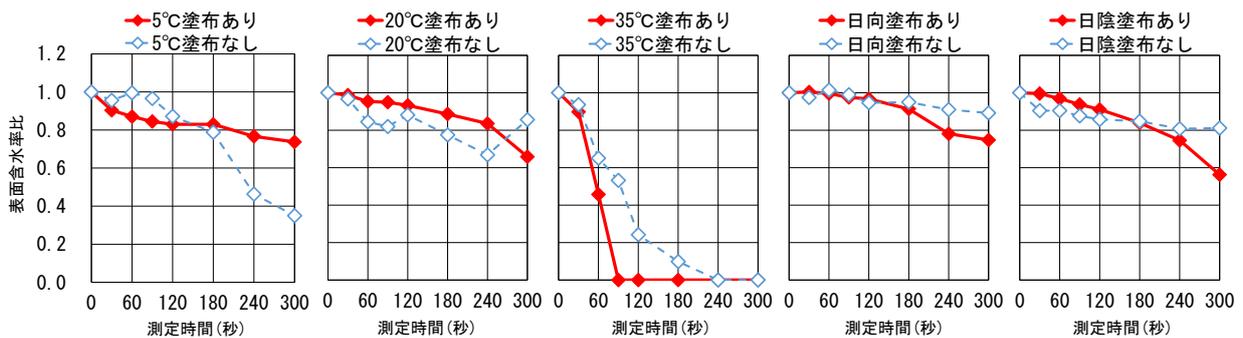


図-6 静電容量結果

a) 塗布後材齢 2 日



b) 塗布後材齢 56 日

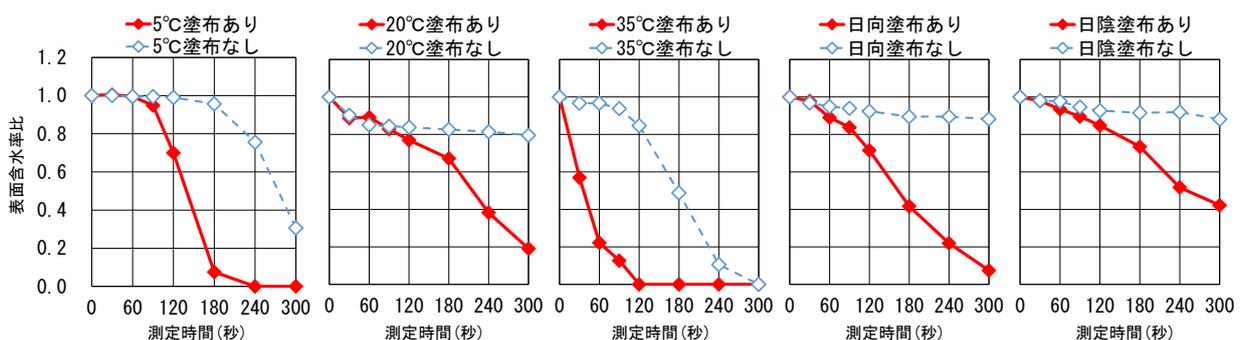


図-7 表面含水率試験結果 (塗布後材齢 2 日および 56 日目)

めここでも0%として測定を行っている。

含浸材塗布後材齢2日では、35℃環境下を除けば含浸材塗布の有無によらず、表面含水率比の変化はほぼ同等なのに対して、含浸材塗布後材齢56日ではいずれの環境下においても含浸材塗布無しに対して、含浸材塗布有りの試験体は、測定時間の経過とともに表面含水率比の低下が認められ、含浸材の高い水分浸透抑制効果により試験体内部への水分浸透を抑制できていることが確認できる。

35℃環境下の測定結果によると、材齢2日で急激な低減を示しており、水分逸散率比の結果からも早期に撥水層の形成が促進されたためと推測されるが、一方で、含浸材塗布無しの試験体においても他の環境下の試験体と比較して大きく低下していることから、表面が粗であるため水分を吸水しやすい構造となっていることも考えられる。

各測定時間において、含浸材塗布の有無による表面含水率の差を求め、その最大値を最大表面含水率差と定義し、塗布後材齢と最大表面含水率の関係を図-8に示す。温度20℃と日向および日陰の曝露環境下においては、最大表面含水率差は、材齢の経過とともに大きくなっており、塗布後材齢2日後以降において、表面含水率測定を行うことで、水分浸透抑制効果が確認できる。一方、環境温度5℃においては、含浸材塗布後材齢21日までは値が安定しておらず、塗布後材齢7、21日では全く水分浸透抑制効果が得られていない結果となっている。また、環境温度35℃においては、前述のように、塗布無しの試験体も急激に表面含水率が低下してしまうため、含浸材塗布後材齢21日までは水分浸透抑制効果が顕著に現れていない。

このことから、夏期および冬期に含浸材を塗布した場合、表面含水率測定方法では、塗布後材齢28日以降でないと水分浸透抑制効果が確認できないことが考えられる。

3.5 吸水率

図-9に各環境での吸水率の経時変化を示す。測定結果を示す。ばらつきはあるが、いずれの環境下においても含浸材塗布無しの試験体は材齢によらずほぼ一定値を示しているのに対し、含浸材塗布有りの試験体は、初日

から材齢の経過に伴い吸水率が低下しているが、試験経過での値の上下が激しく、本試験においては今後長期での試験が望ましいといえる。しかし、全体的には値の収束傾向が見られ、56日時点では20℃における吸水率が最も大きく、20℃>35℃>日向>日陰>5℃となった。35℃、日向環境、日陰環境下においては緩やかな低下はしつつも、変化率0.4%以下のほぼ横ばいとなった。

3.6 含浸深さ

図-10に含浸深さの測定結果を示す。含浸深さについては、環境温度による差異は認められず、どの環境下でも10~15mm程度の撥水層が形成されており、また、含浸材塗布後材齢によらず、ほぼ一定の値を示している。写真-3に示した塗布後試験体撥水層から、骨材に誘導されて含浸深さが変化している箇所を確認することができ、現行の変化率から今後も5mm以上の変化はないものと考えられる。

図-11に各環境における全日の平均静電容量と含浸深さの相関を示した。静電容量と含浸深さの間には相関性があることが報告⁴⁾されている。本実験においては、塗布前の静電容量を下回る値を出している20℃、35℃、日向環境では表面含水率試験から撥水性が確認されており図-6中の20℃、35℃、日向環境で、1~21日時点においては静電容量が塗布前よりも高い値を示した。この時点では塗布の有無による明確な相関は認められないが、今後試験体の乾燥状態が安定化する材齢以降の測定を継続して行い、静電容量による含浸深さの評価と適正な材齢の可能性について検討を進めたい。

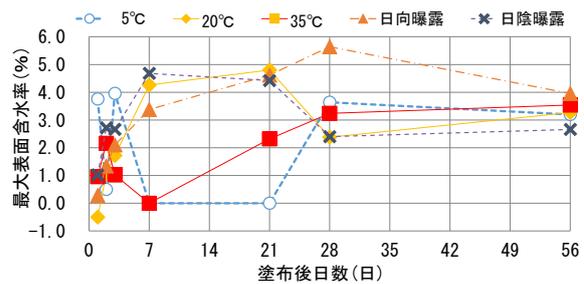


図-8 塗布後材齢と最大表面含水率

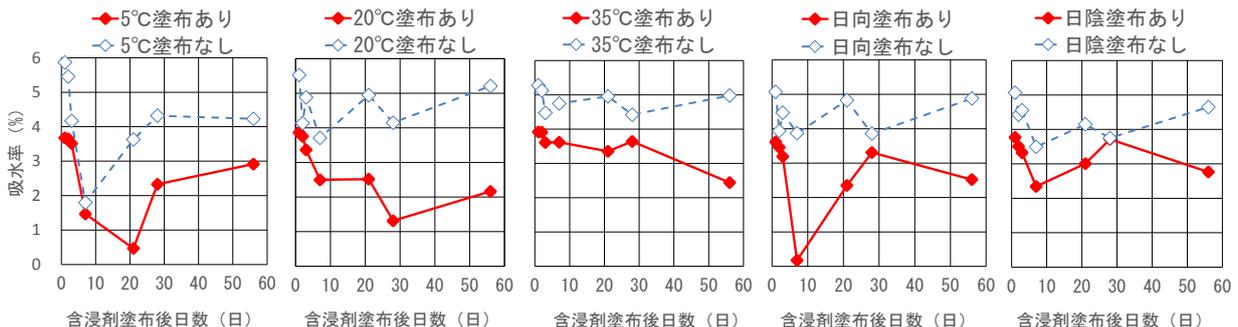


図-9 吸水率

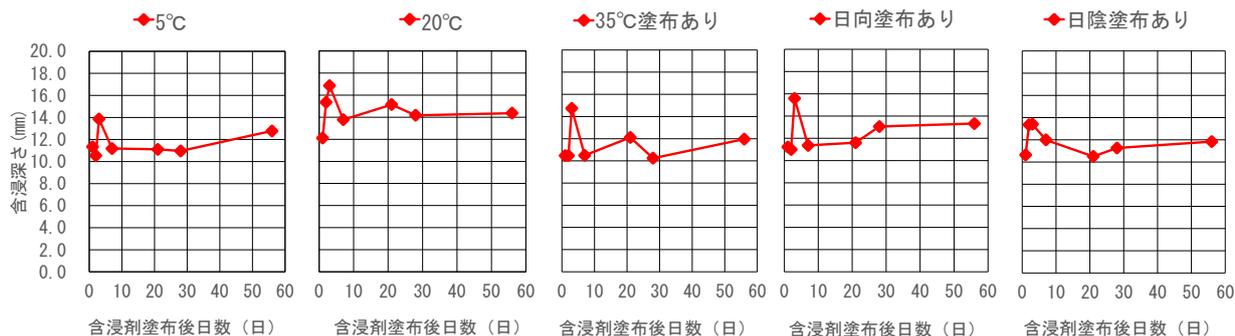


図-10 含浸深さの変化率

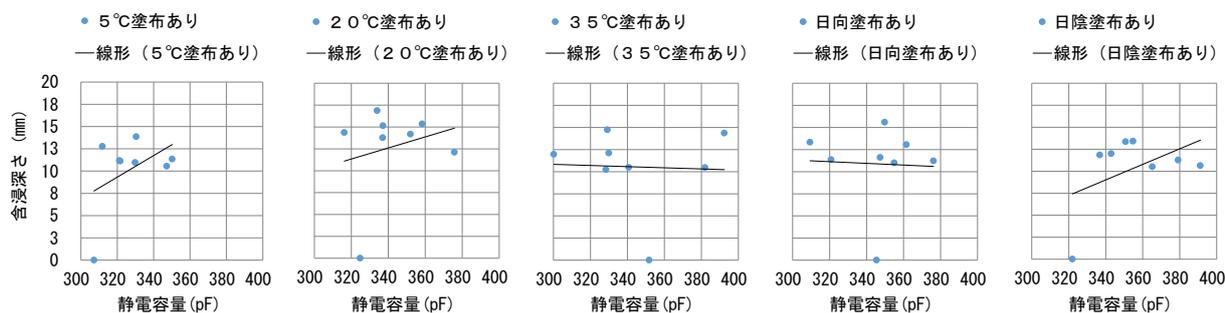


図-11 静電容量と含浸深さの相関



写真-3 塗布後試験体撥水層

認できる。また、夏期および冬期に含浸材を塗布した場合、表面含水率測定方法では、塗布後材齢 28 日以降でないと水分浸透抑制効果が確認できないことが考えられる。

今後も引き続き検討を行い、データを蓄積していく予定である。

謝辞

本実験の遂行にあたり、東京理科大学卒論生齋藤正明氏の協力を得た。ここに付して万謝の念を表します。

参考文献

- 1) 御園麻衣子, 今本啓一, 永井香織, 清原千鶴: 国立西洋美術館本館躯体の保全に向けた表面保護材の特性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.1942-1947, 2014.7
- 2) 御園麻衣子, 今本啓一, 清原千鶴, 福田京: 表面含浸材を用いた国立西洋美術館本館コンクリート躯体の保存・改修と非破壊試験による評価, 日本建築学会大会講演梗概集(建築歴史・意匠), pp.823-824, 2015.9
- 3) 公益社団法人 土木学会: JSCE-K571-2005 表面含浸材の試験方法(案), p.3, 2005.3
- 4) 齋充, 伊木純一, 沓掛文夫: 静電容量型水分計によるフレッシュコンクリートの単位水量測定, コンクリート工学年次論文集, p.310, Vol.20, No.2, 1998.2

まとめ

本研究ではシラン系含浸材を劣化が進行している既存構造物に適用した場合、コンクリートに塗布された含浸材の水分浸透抑制効果やその効果の検証手法に及ぼす温度や日射の有無の影響について検討を行った。その結果、以下のような知見が得られた。

- 1) 環境条件によらず、含浸材塗布による視覚的变化は認められなかった。
- 2) 環境条件によらず、静電容量は含浸材塗布した試験体の方が小さく、含浸材塗布後材齢 7 日以降において、塗布の有無による静電容量差を求めることで含浸材の水分浸透抑制効果が確認できる可能性を示した。
- 3) 表面含水率は含浸材を塗布した試験体方が表面含水率の低下が早く、含浸材の高い撥水効果により試験体内部への水分浸透を抑制できていることが確