

# 論文 シラン系表面含浸材の紫外線劣化の吸水試験による評価

古谷 英彦\*1・細田 暁\*2・鈴木 雄大\*3・松田 芳範\*4

**要旨:** シラン系表面含浸材 2 種を対象に、水セメント比、塗布時の材齢、塗布後の養生条件を変化させて、吸水試験により紫外線促進劣化の影響を評価した。暴露相当期間 3 年程度では、概ね良好な吸水抑止効果を示すが、供試体によっては吸水率が初期値より高くなるという結果が得られた。含浸層の劣化は部分的であると考察しており、本試験の検討範囲では、含浸層を超える液状水の浸入は確認されなかった。

**キーワード:** 表面含浸材, シラン系, 紫外線促進劣化試験, 吸水抑止効果, 吸水率, 含浸深さ

## 1. はじめに

コンクリート構造物の表面からの水の浸入を抑止することで、コンクリート片の剥落やアルカリ骨材反応、塩害による損傷などの構造物に生じる種々の不具合は、かなり改善されることが明らかになっている<sup>1), 2)</sup>。

コンクリート構造物の表面からの水の浸入を抑止する手段の一つとして、表面含浸材を用いた表面含浸工法がある。表面含浸材は古くからある材料であるが、近年材料の性能が大幅に改善されてきており<sup>3)</sup>、今後大きな役割を果たすことが期待されている。特にシラン系表面含浸材の中で、実構造物の暴露試験で 5 年が経過しても効果が継続しているものがある<sup>4)</sup>。本研究で使用するシラン系表面含浸材は、暴露試験で効果を発揮しているものである。

表面含浸材は表面被覆工法に比べて経済的で施工も容易であり、塗布後もコンクリート表面を直接見ることができるなど多くの利点を持っている。また、表面含浸材は、コンクリート表層部に浸透して、疎水層を形成するため、表面被覆材に生じやすい膨れや剥がれなどが無く、より長期的な効果の持続が期待される<sup>2)</sup>。

しかし、表面含浸材の耐久性に関するデータはいくつか報告されている<sup>5), 11)</sup>ものの十分とは言えず、表面含浸材の劣化を定量的に評価しているものは少ない。

このような現状を踏まえて、本研究では表面含浸材を塗布したコンクリートに紫外線を照射し、表面含浸材の促進劣化を吸水試験により評価するものである。

シラン系表面含浸材は有機物であり、太陽光からの紫外線により劣化が進む。しかし、表面含浸材はコンクリート内部に含浸するため、ごく表層については劣化するが、それより深い箇所では吸水抑止効果が発揮されるのではないかと考えられる。

本研究では、耐候性試験機による紫外線の照射で表面

含浸材の劣化を促進させ、劣化の程度を吸水抑止効果の観点から評価する。劣化の促進度合いを、紫外線量と試験体の温度を考慮して算出する。吸水試験結果の経時的な分析により、表面含浸材の劣化形態について考察する。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用した供試体および表面含浸材

本研究では、シラン系表面含浸材の適切な使用方法を検討するための既往の研究<sup>6), 7)</sup>で作製した供試体を用いて、紫外線劣化の促進試験を行う。ここでは、まず、既往の研究での供試体の作製方法を説明する。

供試体一覧を表-1 に示す。シラン系表面含浸材の種類や W/C、含浸材を塗布する時の材齢、塗布後のコンクリートの養生条件をパラメータとした全 87 体である。

実験に用いたコンクリートの材料および配合を表-2 および表-3 に示す。

実験に用いた表面含浸材を表-4 に示す。これらは、既往の研究で使用したものと同種類のものである。著者らが実施している実構造物での暴露試験において、良好な効果を発揮すると判断したシラン系の表面含浸材 2 種類を用いた<sup>4)</sup>。実験における塗布量は表-4 に従うものとし、含浸材 AS の塗布量は 0.40kg/m<sup>2</sup>としている。

表-1 において、「シリーズ」とは、含浸材を塗布する前後のコンクリートの養生条件の略称である。大文字が塗布前の、小文字が塗布後の養生条件を表す。D は含浸材塗布時に表面が乾燥状態にあることを表し、-d は塗布後に気中に静置したことを表す。-d.a は材齢 7 日で塗布した後、12 時間程度気中に静置し、表面が乾燥した状態になるのを確認して 6 時間水中に浸漬したものである。-dw.a は材齢 7 日で塗布した後、乾湿繰返しを行ったものである。なお、W/C=35%、42%のものは材齢約 6 ヶ月、W/C=50%、65%のものは材齢約 18 ヶ月で紫外線の照射

\*1 横浜国立大学 工学部 建設学科 (正会員)

\*2 横浜国立大学 大学院環境情報研究院 准教授 博(工) (正会員)

\*3 東日本旅客鉄道(株) 研究開発センター フロンティアサービス研究所 工修 (正会員)

\*4 東日本旅客鉄道(株) 建設工事事務部 構造技術センター (正会員)

表-1 耐候性試験で用いた供試体

試験体諸元					試験体数		
製作年度	W/C(%)	シリーズ	塗布時の材齢	養生状態	含浸材の種類		
					MR	AS	無塗布
2006年度	50	D-d	7日	気中養生	3	3	3
			35日		3	3	—
	65		7日		3	3	3
			35日		3	3	—
	50	D-d.a	7日	*文中に記載	3	3	—
		D-dw.a	7日	*文中に記載	3	3	—
PC 橋梁現場(42%)	D-d	7日	気中養生	3	3	3	
2007年度	42	D-d	7日	気中養生	3	3	3
			14日		3	3	—
	35		7日		3	3	3
			14日		3	3	—
			35日		3	3	—

表-2 使用したコンクリート材料

材料	W/C (%)	摘要
セメント	35, 42	早強ポルトランドセメント (密度: 3.14g/cm <sup>3</sup> )
	50, 65	普通ポルトランドセメント(密度: 3.16g/cm <sup>3</sup> )
細骨材	35, 42	千葉産山砂, 表乾密度: 2.62g/cm <sup>3</sup> 粗粒率: 2.61 吸水率: 1.49%
	50, 65	千葉県産山砂, 表乾密度: 2.63g/cm <sup>3</sup> 粗粒率: 2.18 吸水率: 1.82%
粗骨材	35, 42	埼玉県産砕石 (石灰砕石), 最大寸法: 20mm 表乾密度: 2.69g/cm <sup>3</sup> , 吸水率: 0.59%
	50, 65	埼玉県産砕石 (硬質砂岩), 最大寸法: 20mm 表乾密度: 2.66g/cm <sup>3</sup> , 吸水率: 0.94%
混和材	35	高性能AE減水剤 (レオビルドSP8SBS) 使用量: 0.5% (セメント質量比)
	42	高性能AE減水剤 (レオビルドSP8SBS) 使用量: 0.4% (セメント質量比)
	50, 65	AE剤, 使用量: 0.07% (セメント質量比) AE減水剤, 使用量: 1% (セメント質量比)

表-3 使用したコンクリートの配合

W/C (%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				混和剤 (g/m <sup>3</sup> )
				W	C	S	G	
35	15.0	5.0	45.0	168	480	742	931	2400
42	15.0	4.5	46.5	165	393	806	937	1572
50	8.0	5.0	41.7	160	319	755	1070	3413
65	15.0	3.5	46.2	208	320	802	947	3424

表-4 使用したシラン系表面含浸材

含浸材	外観性状	主成分	主成分率	系	標準塗布量 (kg/m <sup>2</sup> )	塗布回数
MR	白色・ペー スト状	アルキルアルコ キシシラン・シロ キサン	80%	水系	0.20	1
AS	淡灰色・ジ ェル状	アルキルアルコ キシシラン	90%以上	無溶剤	0.30~0.50	1

を開始した。

既往の研究における吸水試験は、試験開始前の供試体内部の水分と試験中の水和進行の影響が出にくいよう、材齢8日以降の供試体の質量変化を測定し、質量変化が緩慢になってから開始することとし、材齢42~50日程度<sup>6), 7)</sup>で行った。つまり、本研究で耐候性試験に供する試験体はすべて、吸水試験の履歴を受けたものである。

既往の研究での吸水試験の後、W/C=35%, 42% (一部PC橋梁施工現場で採取してきたものを除く)の供試体は3ヶ月程度、温度20°C±2°Cの恒温室に静置してから、材齢6ヶ月程度で耐候性試験の準備を開始した。W/C=50%, 65%, および42%のうちPC橋梁施工現場で採取したものは、既往の研究での吸水試験を行った後、1年程度容器に入れ、紫外線から遮断された状態で屋外に暴露されていた。なお、屋外に暴露されていたものは水に浸かっていたものがある。

耐候性試験を開始する前に、すべての供試体を2週間程度20°C±2°C, 50%±5%の環境下で管理し、管理前からの質量変化量がわずかになったことを確認した。そして、促進劣化開始前の吸水抵抗性を計測するための吸水試験を行い、紫外線照射を開始した。

## 2.2 耐候性試験

### (1) 耐候性試験機の概要

本研究では、太陽からの紫外線による含浸材の劣化を確認するため、耐候性試験機による促進劣化を行った。

試験条件は、照射照度 (300-400nm・60W/m<sup>2</sup>), 温度38°C±3°C (JIS K5600-7-7 参考), 相対湿度50%±5% (JIS A1415 参考) とした。

表-5 吸水試験と暴露相当期間

吸水試験の回数	照射時間 (日)	積算 CI 値	暴露相当期間 (年)
照射開始前	0	0	0
1回目	6	1.6	0.2
2回目	20	6.9	0.7
3回目	21	12.5	1.3
4回目	18	17.3	1.9
5回目	33	26.1	2.8

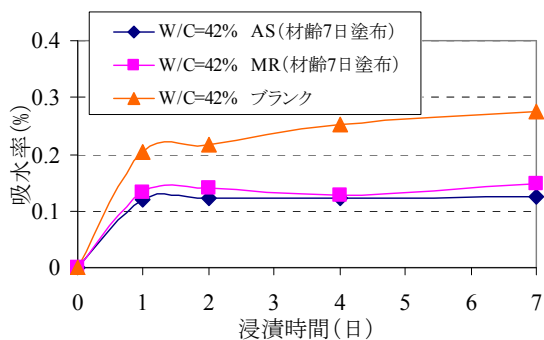


図-1 浸漬時間による吸水率の推移

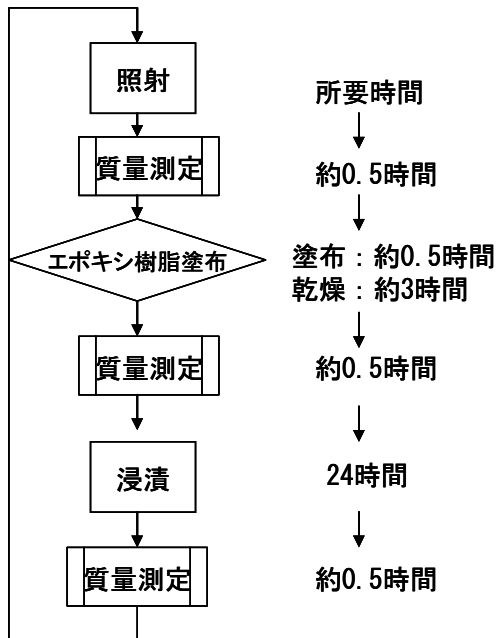


図-2 吸水試験作業工程

(2) 実環境での暴露相当期間

耐候性試験機での紫外線照射時間が、実環境でどれだけの暴露期間に相当するかを、吸光度比（カルボニルインデックス値：以下、CI 値とする。）を用いて計算することとした。

紫外線による酸化反応速度は、紫外線と温度が相乗的に影響するため、紫外線量だけでは劣化速度を正しく表せない場合が多い。そこで、紫外線量と気温の相乗的な作用を表す値としてCI値を用いることにした。CI値は、紫外線量の吸収によって開始される酸化反応の温度による促進効果として表されることが分かっている。そのため CI 値は、暴露した場所の紫外線量と気温の相乗的な作用を表す指標とすることができる<sup>8)</sup>。

キセノンアークランプでの CI 値 1 は 90 時間の照射に相当する<sup>9)</sup>。銚子（東京とほぼ緯度が等しい）の 1 年間の積算 CI 値は 9.3 である<sup>10)</sup>から、キセノンアークランプ照射時間に換算すると 90 時間×9.3=837 時間となる。この考え方にもとづいて、耐候性試験機で 35 日間照射することが、銚子（および東京）で 1 年間暴露することに相当する、と考えることとした。

表-5 に、この計算による吸水試験時の暴露相当期間を示す。

2.3 吸水試験

吸水試験においては、試験体を 1 日 20℃±2℃の水中に浸漬させ、試験開始直前の質量に対する吸水量の割合を吸水率として算出した。

紫外線を照射できる面が 1 面であるため、含浸材を塗布した 2 面のうち 1 面を残し、残りの 5 面をエポキシ樹脂でシールした。

なお、吸水試験時の試験機への出し入れの際や運搬時に、10 体程度物理的な要因でエポキシ樹脂に劣化が生じた。全供試体数は 87 体であり、全体の 1 割強である。このような劣化を、目視で確認し、浸漬前に再度エポキシ樹脂でシールし、樹脂が乾いてから改めて質量を測定し、試験を行った。以降に示す吸水試験の結果は、エポキシ補修による質量変動の影響を除いたものである。

吸水試験時には、隣接する試験体の影響を無くすために 30mm 以上の間隔を置き、底面に 10mm 程度のスペーサーを設置した。水圧の影響を考慮し、含浸材塗布面を上向きにし、試験体上面から水面までの距離を 30mm 程度の一定に保ち、1 つの容器には同じ含浸材を塗布したものだけを入れて吸水試験を行った。

既往の研究では、吸水試験を 7 日間実施していた。しかし、吸水試験中は紫外線照射ができない。なるべく紫外線照射の時間を長く取りたいと考え、浸漬期間を 1 日とした。図-1 に吸水試験の結果の 1 例を示すが、吸水率の傾向は 1 日で決定し、その後は大きく変わらないと判断したためである。

吸水試験の工程を図-2 に示す。

促進劣化を開始してから、劣化の発生時期や進展を把握するために、経時的に吸水試験を行った。紫外線照射開始から 6 日後（0.17 年）に 1 回目、26 日後（0.74 年）

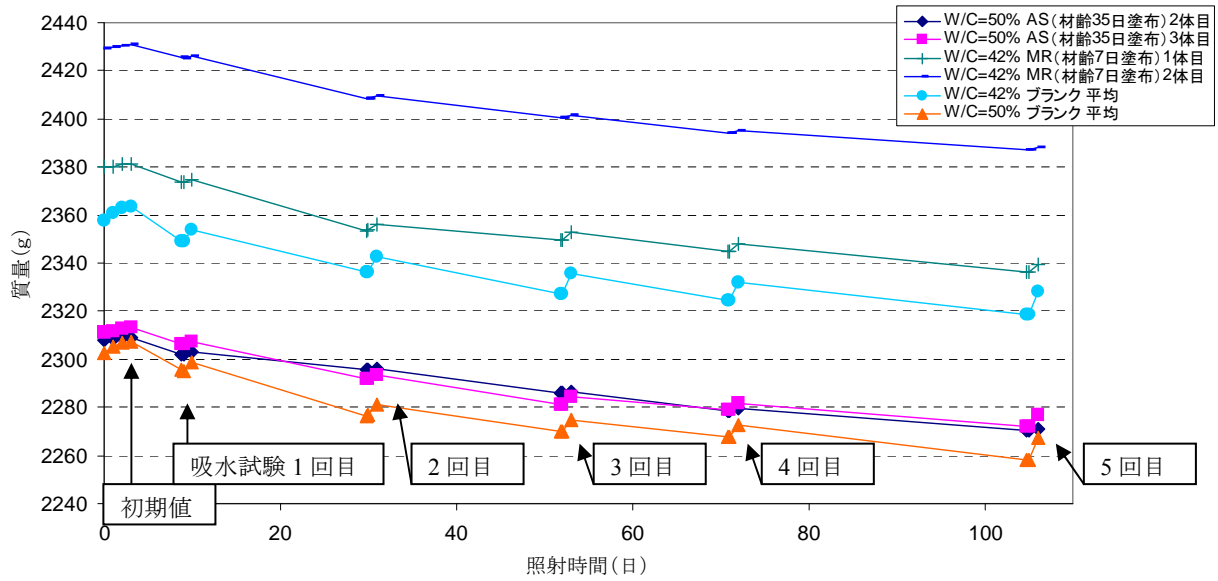


図-3 質量の経時変化

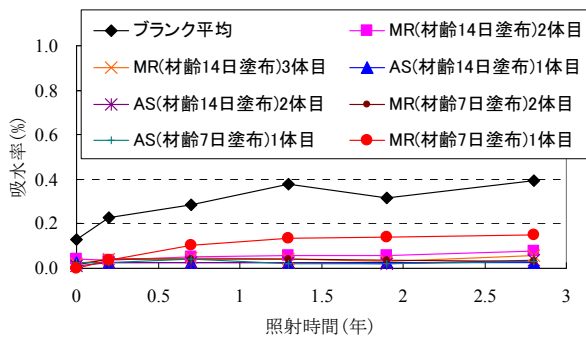


図-4 吸水率の推移 (W/C=42%)

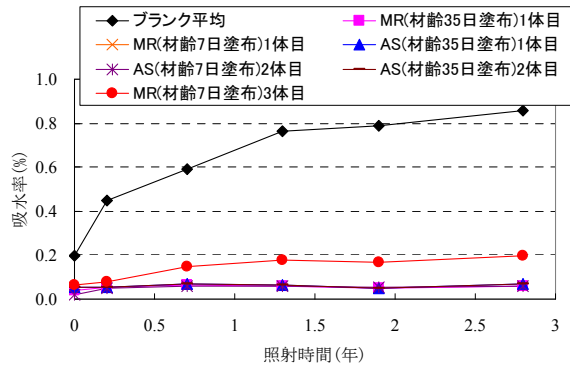


図-6 吸水率の推移 (W/C=65%)

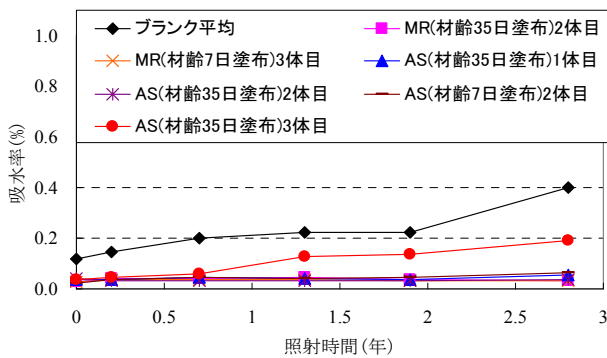


図-5 吸水率の推移 (W/C=50%)

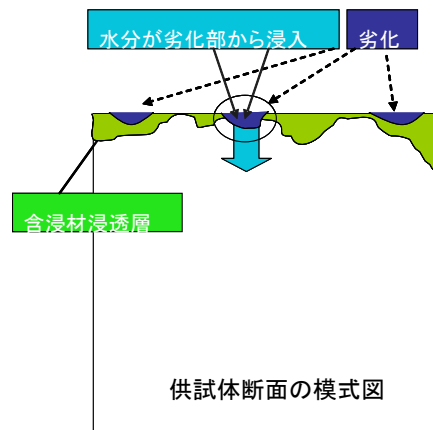


図-7 劣化形態を仮定した概念図

に 2 回目, 47 日後 (1.34 年) に 3 回目, 65 日後 (1.86 年) に 4 回目, 98 日後 (2.80 年) に 5 回目の吸水率試験を行った。カッコ内は暴露での紫外線相当年数である。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 実験結果概要

図-3 に供試体の質量経時変化を示す。質量が増加している部分が, 吸水試験の過程である。ランプ照射中は,

試験体内の水分が乾燥で逸散し, 吸水試験開始時の質量は, 直前の吸水試験開始時よりも小さくなっている。直前の吸水試験で浸入した水の大部分と, それ以前から供試体に存在した水が逸散していると考えている。

図-4 に W/C=42%, 図-5 に W/C=50%, 図-6 に W/C=65%の供試体の吸水率の推移を示す。含浸材を塗布したものと比べ, ブランクの吸水率が大きくなっている。

図-4 から図-6 に示すように, 含浸材を塗布した供

試体は、ブランクと比較して吸水率の増加が鈍い傾向にある。含浸材を塗布したものは、吸水抑止機能によって吸水試験時の吸水量が小さいため、ブランクに比較してより内部が乾燥した状態にある。したがって、含浸材による吸水抑止効果が十分でなければ、吸水試験時の吸水量はブランクよりも大きくなる可能性もある。ブランクと比較して、含浸材を塗布したものは、良好な吸水抑止機能を維持していると言える。これらの結果から、実環境で3年程度の暴露に相当する紫外線照射では、吸水率が増加傾向にあるものが見られるが、ブランク供試体の吸水量の増加に比べると小さく、吸水抑止効果は概ね良好に保持されていると言える。

しかし、供試体の15%程度は他のものと比べ吸水率が高い。これらに着目し、その吸水の詳細を考察する。

### 3.2 吸水抵抗性の劣化傾向の分類

6回の吸水試験結果より、それぞれの供試体を吸水率の推移に着眼し、以下の3種類に分類した。①初期値と5回目の値の吸水率がほとんど変化せず、既往の研究と比較しても特に良好な吸水抑止性能を維持しているもの、②ブランクと比較すると吸水率が低いが、同シリーズの他の供試体と比較して継続的に吸水率が高いもの、③ある吸水試験では吸水率が高いが継続的に高くはないもの。

上記②に分類された場合は、含浸材の要求性能である、吸水抑止効果が低下している可能性がある。②をさらに、(1)吸水率が継続的に高いが増加しない供試体、(2)吸水率が増加している供試体に分類できる。特に(2)に分類された供試体は、紫外線照射により含浸材が部分的に劣化している恐れがある。塗布条件などが等しい供試体でも吸水率の傾向が異なるのは、含浸材の含浸深さにはばらつきがあり、局所的に含浸材の劣化が生じているためではないかと考えた。

既往の研究より、含浸の仕方は供試体の位置によって異なることがわかっている。同じ供試体でも含浸深さが

1mm以下の箇所から3mm程度ある箇所もある。図-7に、吸水試験結果から劣化形態を考察した概念図を示す。

上記②に分類された供試体の吸水試験結果について、さらに考察する。②に分類された供試体は、W/C=42% MR (材齢7日塗布) 1体目、W/C=50% AS (材齢35日塗布) 3体目、W/C=65% MR (材齢7日塗布) 3体目の合計3つであった。

図-4に示すように、W/C=42% MR (材齢7日塗布) 1体目は2回目から継続して吸水率が高い。しかし、3回目以降は吸水率が0.15%程度で変化が無い。そのため、含浸層が全て破壊されるような劣化ではなく、含浸層に部分的な劣化が生じていると考えている。

図-5に示すように、W/C=50% AS (材齢35日塗布) 3体目は、3回目の吸水試験から吸水率が高くなり、吸水試験を行う度に吸水抵抗性が低下している。

図-6に示すように、W/C=65% MR (材齢7日塗布) 3体目は、2回目から吸水率が継続的に高く、4回目からも吸水率が増加している。

吸水率の増加は、紫外線により含浸材の劣化が進行していることを示していると考えている。ただし、含浸層の全面的な劣化は生じていないと考えている。なぜなら、図-3を見ても含浸材を塗布した供試体はブランクに比べてより乾燥状態にあり、含浸層が全面的に劣化したとすれば、内部の強烈な乾燥により、ブランクを超える吸水率を示すと考えるからである。

### 3.3 亜硝酸銀の噴霧による吸水抑止効果の検証

シラン系表面含浸材に期待される性能は、含浸したコンクリート表層部を疎水性に改質し、疎水層により、水が移動媒体となる劣化因子の浸入を防ぐことである。ごく表層の疎水層が、紫外線により劣化しても、疎水層が健全に保持されていれば、劣化因子の浸入を防げる。

つまり、多少吸水率が増加しても、含浸層を超えた吸水でなければ、含浸材の効果は発揮されていると考えるのが著者らの見解である。促進劣化試験の後、3.2で取

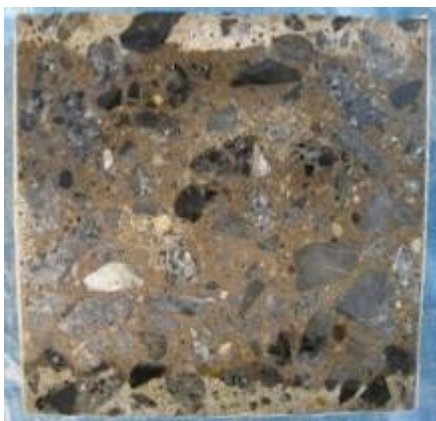


写真-1 亜硝酸銀噴霧時の様子 (含浸材塗布)



写真-2 亜硝酸銀噴霧時の様子 (含浸材なし)

り上げた継続して吸水率が高い供試体のうち、吸水試験を行う度に吸水率が増加している、W/C=50% AS(材齢35日塗布)3体目を、塩水に浸漬させ、含浸材塗布面と垂直に切断し、切断面に亜硝酸銀を噴霧した。

塩水の浸漬条件は、塩化ナトリウム10%濃度の蒸留水に1日浸漬、気温40℃相対湿度30%の乾燥炉に3日乾燥を行う乾湿繰返しを3サイクル与えた。

亜硝酸銀の噴霧により、塩水が浸入した箇所は白色を呈する。写真-1に試験時の様子を示す。

比較のために、W/C=50%のブランクの供試体を、含浸材を塗布したものと同条件で塩水に浸漬させた、亜硝酸銀噴霧の様子を写真-2に示す。線を施した部分より上側に塩水が浸入している。

なお、上側が吸水面であり、含浸材塗布面である。他の5面はエポキシ樹脂を用いてシールを施した。

ブランクの供試体は、最大50mm以上塩水の浸入が見られたが(写真-2)、AS(材齢35日塗布)3体目は、塩水の浸入が見られず(写真-1)、上下に含浸層の撥水が明確に見られた。下面は、既往の研究で上面と同条件で含浸材を塗布したものである。

なお、吸水試験において、エポキシ樹脂の剥離により吸水率が増加した可能性も考えられたが、エポキシ樹脂界面に塩水が浸入した形跡も見られなかった。

含浸面には部分的に劣化が生じていると考えているが、今回の観察断面においては、含浸層の劣化を捉えることはできなかった。

#### 4. 結論

実構造物の暴露試験で良好な効果を継続している2種類のシラン系表面含浸材に対して、紫外線の促進劣化試験を行い、以下の知見を得た。

- (1) 全87体(含浸材を塗布した試験体は全部で72体である。)の供試体のうち、9割弱は紫外線照射前の吸水試験の初期値と、暴露相当期間2.8年の紫外線照射後の値に大きな差はなく、良好な吸水抑止機能を保持した。
- (2) 8体程度の供試体はブランクの供試体ほどではないが、初期値と比較して促進劣化後の吸水率が高くなった。その中でも、紫外線を照射する度に吸水率が増加しているものが3体あり、含浸層の部分的な劣化に起因すると考えた。
- (3) 本研究で扱った供試体の中で含浸層の劣化の可能性が最も高かった供試体に対して、塩水を吸水させた後の亜硝酸銀を噴霧したが、含浸層を越えた液状水の浸入は認められなかった。

謝辞：本研究の実施にあたり、小林 薫氏(JR 東日本 研 (JR 東日本 研究開発センター)との議論が大変参考になりました。また、林 和彦氏(横浜国立大学大学院 工学研究院 特別研究教員)下田 智也氏(横浜国立大学大学院 環境情報学府 1年)に多大な協力をいただきました。ここに深謝いたします。

#### 参考文献

- 1) 石橋忠良, 古谷時春, 浜崎直行, 鈴木博人: 高架橋等からのコンクリート剥落に関する調査研究, 土木学会論文集, NO.711/V-56, pp.125-134, 2002.8
- 2) 土木学会: 表面保護工法 設計施工指針(案), コンクリートライブラリー119, 2005
- 3) 土木学会: コンクリート技術シリーズ68「コンクリートの表面被覆および表面改質技術研究小委員会報告」, 2006.4
- 4) 芦澤良一, 松田芳範, 林大介, 坂田昇: 実構造物に塗布した浸透性吸水防止材の長期耐久性および現位置吸水試験方法, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, pp.655-660, 2008
- 5) 迫田恵三, 竹田宣典, 外岡政則, 山根千学: 海洋環境下における撥水材を含浸させたコンクリートの性質, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.1407-1412, 2002
- 6) 細田暁, 今野拓也, 小林薫, 松田芳範: シラン系表面含浸材を用いた最適な表面保護システムのための基礎的研究, 土木学会論文集 E, Vol.64, No.2, pp.323-334, 2008.5
- 7) 兼子弘, 細田暁, 小林薫, 松田芳範: 低水セメント比のコンクリートにおけるシラン系表面含浸材の含浸深さと吸水抑止効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, pp.643-648, 2008
- 8) 大気暴露試験ハンドブック P高-7, 日本ウエザリングテストセンター
- 9) JIS K-7200-1986 P-13 解説図4
- 10) JWTCS4002 付属書3 表3.1, 2003.6
- 11) 網嶋和彦, 松田芳範, 津吉毅, 石橋忠良: 撥水・浸透系防水塗膜材の暴露試験3年目の評価について, コンクリート技術シリーズ68「コンクリートの表面被覆および表面改質技術研究小委員会報告」, 土木学会, pp.225-236, 2006.4