

論文 耐候性を考慮したシラン系含浸材の吸水抑制性能に関する検証

植松 俊幸*1・酒井 正樹*2・神代 泰道*2

要旨: 耐候性を考慮したシラン系含浸材の吸水抑制性能について、促進試験によって実験的に検証を行った。その結果、耐候性試験と含浸深さ測定、撥水性試験および吸水試験との組合せにより、経年劣化に伴う性能の変化を考慮した評価ができる見通しを得た。含浸深さが小さく、紫外線劣化しやすい主成分のものは、比較的早期に吸水抑制性能が低下する可能性が示された。一方、含浸深さが 3mm 程度以上のものや、紫外線劣化しにくいものは、表層の撥水性能は比較的早期に低下するものの、長期にわたって高い吸水抑制性能を保持できることが確認できた。また、高い撥水性能を長期間保持できるものも存在することを確認した。

キーワード: シラン系含浸材, 耐候性, 促進試験, 吸水抑制, 撥水性, 含浸深さ

1. はじめに

シラン系含浸材は、コンクリート表面に塗布することで表層部に含浸層を形成し、撥水効果や吸水抑制効果を発揮する材料である。外部からコンクリート中への水分や塩分の侵入を抑制することができるため、鉄筋コンクリート構造物の埋設鉄筋の腐食抑制に対して、有効であることが知られている。しかし、長期間の屋外暴露により、太陽光の紫外線や降雨により含浸層が表面から劣化し、撥水性能や吸水抑制性能が低下する可能性が考えられる。一方で、シラン系含浸材の主成分や含浸深さなどの違いにより、それらの効果が低下する度合いには差があることが指摘されている。既往の文献^{1), 2), 3)}では、屋外での暴露試験により、シラン系含浸材の吸水抑制性能などの持続性を比較検証した研究なども行われているが、長期にわたる試験期間が必要となる。

シラン系含浸材の性能試験について、土木学会の表面保護工法 設計施工指針(案)⁴⁾や JSCE-K 571 : 2013 (表面含浸材の試験方法)には、含浸深さ試験や透水量試験、吸水率試験などの試験方法が掲載されている。しかし、経年によるシラン系含浸材の性能低下を考慮した評価方法として、促進試験などの規格はない。実暴露の条件をより正確に再現し、かつ促進できる試験方法の確立が課題である。

筆者らは既報⁵⁾にて、クリヤ塗料とシラン系含浸材を対象として、促進耐候性試験(以下、耐候性試験)と促進中性化試験または塩分浸透試験とを組み合わせ、コンクリート用の表面仕上げ材による保護効果の持続性について検証を行った。本報では、**図-1**に示すように、耐候性試験とシラン系含浸材の各種性能試験とを組み合わせ、耐候性を考慮した撥水性能および吸水抑制性能について、促進試験によって実験的に検証した結果について報告する。

2. 試験の概要

2.1 基材モルタル

試験体は、耐候性試験機に設置ができるように、厚さを 2cm とした。そのため、試験体の基材は、粗骨材のないモルタルとした。モルタルの使用材料と調合を**表-1**、**表-2**に示す。普通ポルトランドセメントを使用し、化学混和剤は AE 剤を使用して空気量を調整した。調合は W/C65%とし、セメントと表面乾燥飽水状態とした細骨材の質量比は、ブリーディングを考慮して 1:3.5 とした。

2.2 シラン系含浸材

試験に供したシラン系含浸材を**表-3**に示す。国内で市販されている銘柄の中から、アルキルアルコキシシロキサンやシラン・シロキサンを主成分としたものなどを選定した。塗布量は、メーカー指定の標準塗布量とした。

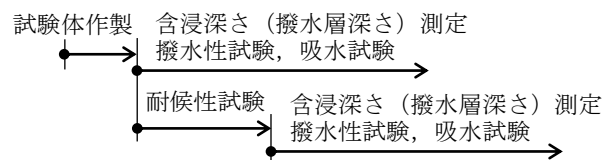


図-1 試験の概略工程

表-1 モルタルの使用材料

分類	概要	
セメント	C	普通ポルトランドセメント 密度 3.16g/cm ³
水	W	上水道水
細骨材	S	陸砂: 表乾密度 2.60g/cm ³ , 吸水率 1.86% 粗粒率 2.45
混和剤	AE	AE 剤

表-2 モルタルの調合

セメントの種類	W/C (%)	単位量(kg/m ³)			AE
		W	C	S	
N	65.0	268	413	1445	1.5A

*1 株式会社大林組 技術研究所 生産技術研究部 (正会員)

*2 株式会社大林組 技術研究所 生産技術研究部 博士(工学) (正会員)

2.3 試験体の作製

シラン系含浸材を塗布した平板試験体の概要を図-2に示す。試験体は、耐候性試験機に設置可能な形状寸法とした。試験体の製作工程を図-3に示す。型枠脱型は材齢2日とし、その後、材齢28日まで標準養生を行った。材齢28日に試験体の暴露面にW/C65%のセメントペーストを擦り込み、表面の気泡埋め処理を行った。材齢42日に暴露面にシラン系含浸材を塗布し、材齢56日から耐候性試験およびシラン系含浸材の性能試験を開始した。

2.4 耐候性試験

耐候性試験は、JIS B 7754 : 1991 (キセノンアークランプ式耐光性及び耐候性試験機) の規格を満足するキセノンウェザーメーターを用いて行った。試験条件は表-4に示すように、JISA 1415 : 2013 (高分子系建築材料の実験室光源による暴露試験方法) の「6.1 キセノンアークランプによる暴露試験方法」に準拠し、暴露サイクルは同規格の「サイクル No.1」(102分照射後、18分照射および水噴霧) とした。

2.5 色差・光沢度の測定および拡大鏡観察

耐候性試験500時間ごとに、試験体暴露面の色差・光沢度の測定および拡大鏡観察を行った。JIS K 5600-4 : 1999 (塗料一般試験方法-第4部 塗膜の視覚特性) の第4節 測色(原理)、第5節 測色(測定)、第6節 測色(色差の計算) に準じて、明度 L^* 、色度 a^* 、色度 b^* を測定し、それぞれの初期値からの差 ΔL^* 、 Δa^* 、 Δb^* を求め、式(1)により色差 ΔE を算出した。光沢度は、JIS K 5600-4 の第7節 鏡面光沢度に準じて、 60° 鏡面光沢度を測定し、光沢保持率を算出した。

$$\Delta E = ((\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2)^{0.5} \quad (1)$$

2.6 シラン系含浸材の性能試験

シラン系含浸材の性能試験として、含浸深さ(耐候性試験後は撥水層深さと称す)の測定、撥水性試験、吸水試験を行った。無塗布の試験体(N)とシラン系含浸材を塗布した試験体(S1)~試験体(S5)は、それぞれ8体ずつ作製した。破壊試験である含浸深さ測定は、耐候性試験0時間で2体ずつ、500時間、1500時間、2500時間に1体ずつで行った。撥水性試験は残った試験体の全数で行った。吸水試験は2体ずつで行った。

(1) 含浸深さ測定

含浸深さの測定は、JSCE-K 571 : 2013 (表面含浸材の試験方法) の「6.2 含浸深さ試験」に準じて行った。試験体は、圧縮強度試験機を用いて、図-4に示すように割裂した。2分割した試験体を1分間、水道水に浸せきして取り出し、割裂面の撥水している部分を含浸材の含浸

表-3 シラン系含浸材

記号	主成分	備考
N	(無塗布)	—
S1	アルキルアルコキシシロキサン	溶剤タイプ
S2	シラン・シロキサン	無溶剤タイプ
S3	アルキルアルコキシシラン	無溶剤タイプ
S4	アルキルアルコキシシラン	無溶剤タイプ
S5	水系シラン	水性

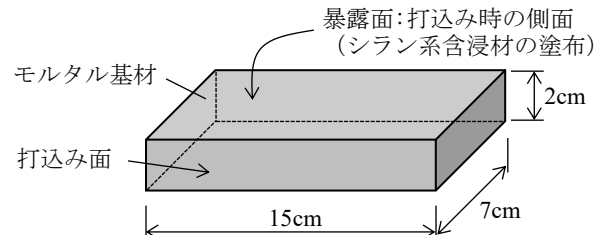


図-2 平板試験体の概要

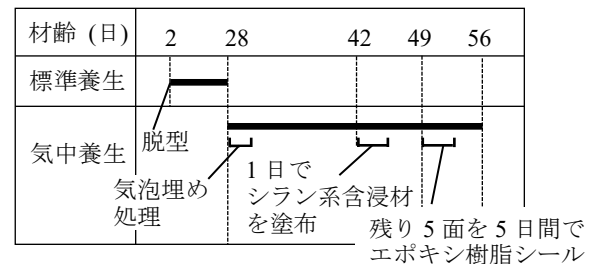


図-3 試験体の製作工程

表-4 耐候性試験の試験条件

項目	試験条件
ブラックパネル温度(°C)	63±3
槽内温度(°C)	38±3
相対湿度(%)	50±10
暴露サイクル	102分照射後、 18分照射および水噴霧

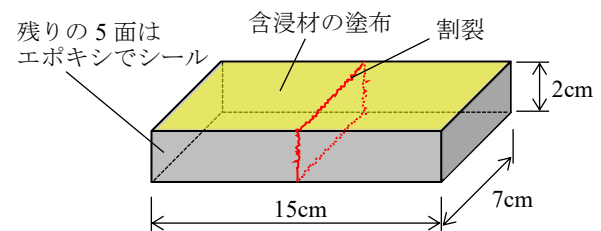
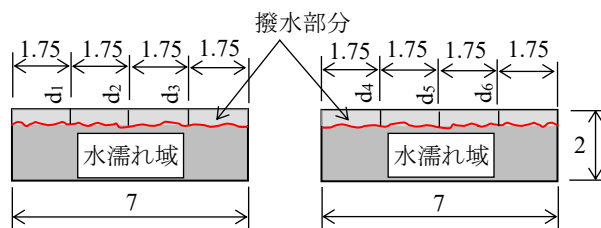


図-4 平板試験体の割裂位置



含浸深さ(撥水層深さ) = $(d_1 + d_2 + d_3 + d_4 + d_5 + d_6) \div 6$
図-5 含浸深さ(撥水層深さ)の測定位置(単位: cm)

深さとして測定した。深さの測定位置は図-5 に示すように6点とし、それらの平均値を求めた。

(2) 撥水性試験

ポータブルタイプの接触角計(写真-1)により、水滴接触角を測定した。測定原理は、スポイトを用いて、水道水の液滴 2.0 μL を試験体の暴露面に接触させ、着滴した際の暴露面とのなす角度を画像解析し、図-6 に示すように水滴接触角を算出するものである。測定箇所は、試験体1体につき5点とし、それらの平均値を求めた。

(3) 吸水試験

吸水試験は、20℃の室内にて、試験前日より汲み置きしておいた水道水へ試験体を浸せきして行った。吸水試験の概要図を図-7 に示す。試験体は暴露面を上にして設置し、天端までの水深は 5cm とした。JSCE-K 571 では、浸せき期間を7日間としているが、今回の試験では試験期間の短縮のため、浸せき時間を 60 分間とした。なお、比較的短時間であっても無塗布の試験体とシラン系含浸材を塗布した試験体の吸水量には、明確な差が生じることを事前試験で確認している。試験体の質量測定は、浸せき直前と、浸せき後は 30 分間経過時と 60 分間経過時の2回とした。質量測定は、水槽から試験体を取り出した直後に、速やかに湿布を用いて試験体表面の水分を除去して行った。試験体質量は 0.01g 単位で測定し、吸水量は式(2)により算出した。なお、吸水試験後の耐候性試験の再開は、試験翌日に、試験体質量が浸せき前の質量に戻ったことを確認してから行った。

$$(\text{吸水量}(\text{g}/\text{m}^2)) = (W - W_0) \div A \quad (2)$$

W : 浸せき後の試験体質量(g)

W₀ : 浸せき前の試験体質量(g)

A : 暴露面の面積(m²)

3. 試験結果

3.1 基材モルタルのフレッシュ性状と圧縮強度

モルタルのフレッシュ性状と圧縮強度の試験結果の一部を表-5 および表-6 に示す。試験結果について、大きなバラツキはなかった。

3.2 拡大鏡観察

試験体暴露面の拡大鏡写真の一例を表-7 に示す。試験サイクル中の水噴霧によって、試験体(N)は耐候性試験 1500 時間くらいから、モルタルの細骨材が露出していく状態が観察された。試験体(S3)と試験体(S4)でも 1500~2000 時間くらいから、同様の状態が確認された。耐候性試験の経過とともに、表層の撥水性能が低下したためと考える。試験体(S1)と試験体(S2)は耐候性試験 2500 時間から細骨材が露出し始めたが、3000 時間までに顕著な露出には至っていない。試験体(S5)で

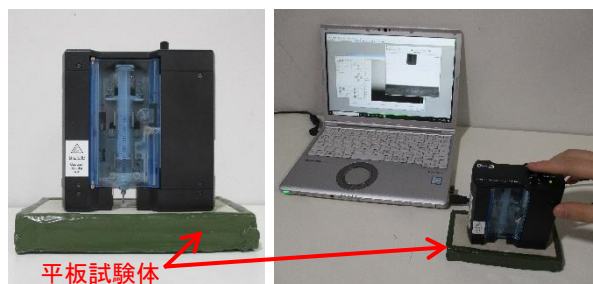


写真-1 ポータブル接触角計

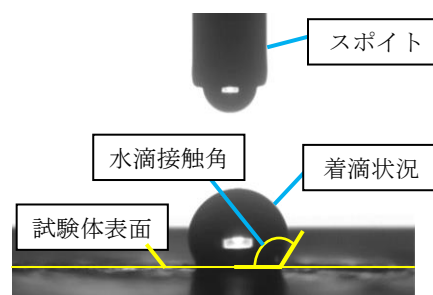


図-6 接触角の測定画像の一例

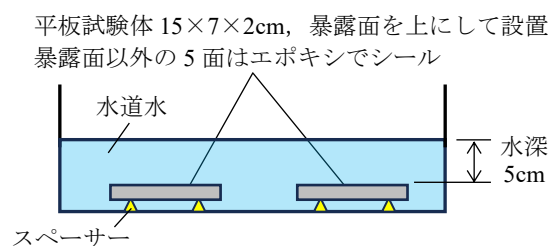


図-7 吸水試験の概要図

表-5 モルタルのフレッシュ性状

0 打フロ- (mm)	15 打フロ- (mm)	空気量 (%)	単位容積質量 (kg/m ³)	モルタル温度 (℃)	室温 (℃)
110	199	5.4	2,123	21	20

表-6 モルタルの圧縮強度

養生条件	試験材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm ²)	単位容積質量 (kg/m ³)
標準養生	28	28.9	2,163

は、耐候性試験 3000 時間まで細骨材が露出してくるような状態は観察されなかった。

3.3 色差、光沢度の推移

暴露面の明度 L*, 色度 a*, b*, 色差 ΔE, 光沢保持率の推移を図-8 に示す。明度 L* について、試験体(N)では、耐候性試験により低下傾向が認められた。試験サイクル中の水噴霧により、モルタル試験体が吸水したためと考える。試験体(S1)~試験体(S4)でも、明度の低下傾向がみられた。少なくとも、ごく表層での撥水性能が低下し、表層部が吸水したものと推察する。試験体(S5)では、大きな変化は認められなかった。

また、試験体(S5)以外では、色度 a* はやや+側(赤色みが強い状態)、色度 b* は+側(黄色みが強い状態)

3.5 撥水性試験

水滴接触角の測定結果を図-10 に示す。試験体 (S1) は、耐候性試験 0 時間では、水滴が暴露面に完全にはじかれてしまい着滴せず、測定不能であった。500 時間では 38.3° 、それ以降は緩やかな漸増傾向であった。

試験体 (S2) は、耐候性試験 0 時間での水滴接触角は大きく、 114.4° であった。耐候性試験 500 時間以降の水滴接触角は、単調な低下や上昇の傾向はなく、 $30\sim 80^\circ$ の範囲で推移した。

試験体 (S3) と試験体 (S4) は、耐候性試験 0 時間での水滴接触角はそれぞれ 84.7° と 116.4° と大きかったが、500 時間では顕著に低下して一桁の接触角となり、1000 時間からは 0° となった。

試験体 (S5) では、耐候性試験 0 時間から 3000 時間まで概ね 120° 前後であり、高い撥水性能を保持した。

3.6 吸水試験

耐候性試験に伴う吸水量の推移を図-11 に示す。試験体 (N) の吸水量は、耐候性試験 0 時間では 60 分間の浸せきで 350.5g/m^2 であったが、耐候性試験の進行に伴い減少傾向となった。耐候性試験中の水噴霧により、モルタル試験体のごく表層の組織はポーラスとなり、その深さまではより吸水しやすい状態となるが、それ以深では水和反応が進行して組織が緻密になったこと、さらに、試験体の含水状態が高くなったことにより、全体として吸水しにくくなったものと推察する。

試験体 (S1) は、耐候性試験 0 時間では 60 分間の浸せきで 11.4g/m^2 であったが、500 時間以降で急増した。試験体 (N) と異なり、吸水量が急増したのは、耐候性試験 500 時間よりも前の初期段階から撥水性能や吸水抑制性能が徐々に低下していったものの、試験サイクル中の水

噴霧程度の水圧や水量では、基板モルタルがほとんど吸水しておらず、低含水状態であったためと推察する。

試験体 (S2)、試験体 (S3)、試験体 (S4) の吸水量は、耐候性試験 0 時間での 60 分間の浸せきで、それぞれ 13.3g/m^2 、 29.5g/m^2 、 27.6g/m^2 と少なかった。耐候性試験により、ごく表層の撥水層の劣化が徐々に深さ方向に進行したため、緩やかな漸増傾向にあるものの、3000 時間まで増加量は少なかった。また、試験体 (S2) ~ 試験体 (S4) では、浸せき時間 30 分間と 60 分間の吸水量には、ほとんど差がなかった。ごく表層の撥水層が劣化し、劣化した深さまでは吸水しやすい状態となったが、それ以

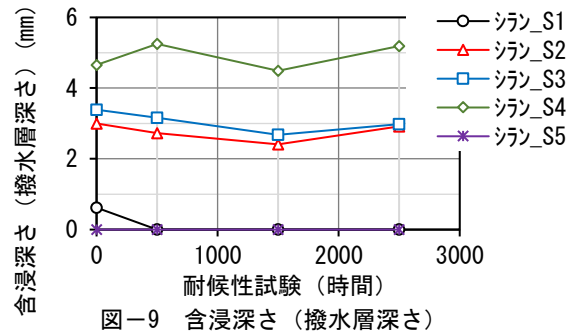


図-9 含浸深さ (撥水層深さ)

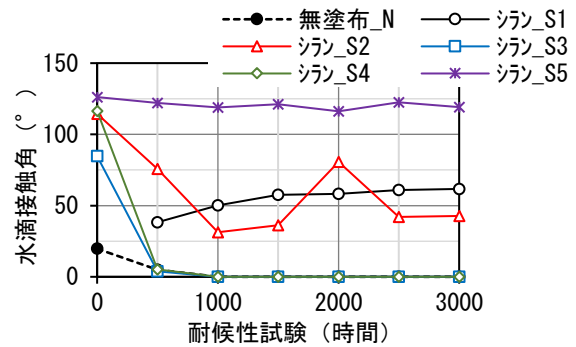


図-10 水滴接触角の推移

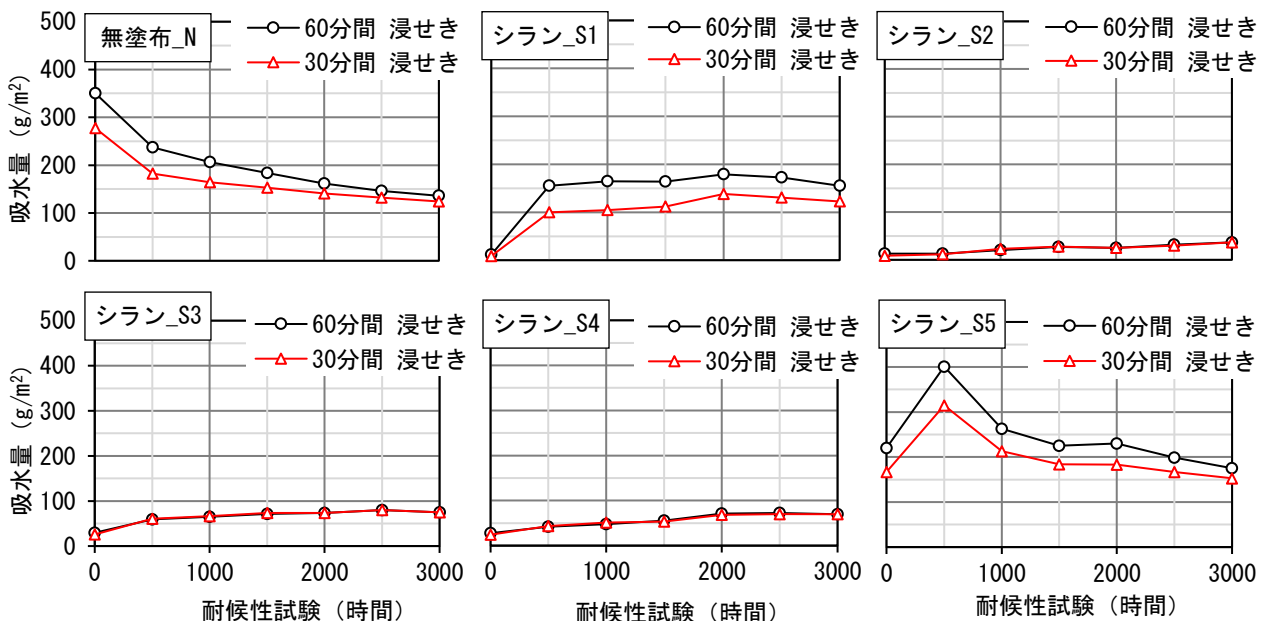


図-11 吸水量の推移

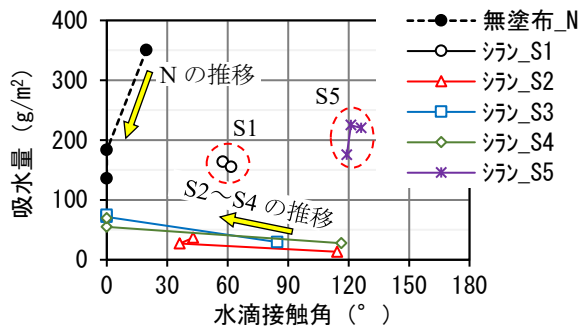


図-12 耐候性試験に伴う水滴接触角と吸水量の関係の推移 (耐候性試験 0, 1500, 3000 時間)

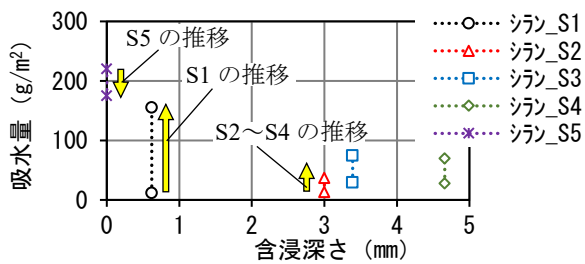


図-13 含浸深さと吸水量の関係 (含浸深さは耐候性試験 0 時間, 吸水量は 0~3000 時間)

深の撥水層が高い吸水抑制効果を維持しているためと推察する。これらのことから、試験体 (S2) ~ 試験体 (S4) の高い吸水抑制性能とその持続性が確認されたと考える。

試験体 (S5) は、耐候性試験 0 時間では 60 分間の浸せきで 220.5g/m^2 であり、他の含浸材と比べて吸水量が著しく多かった。500 時間で一時的に急増したが、その後はほぼ横ばいか、緩やかな漸減傾向であった。500 時間以降は、試験体 (N) よりも吸水量は多かった。また、浸せき時間 30 分間と 60 分間の吸水量の差は、試験体 (S1) の耐候性試験 500 時間以降のものと同程度であった。今回の試験では、試験体 (S5) には、耐候性試験の有無にかかわらず、高い吸水抑制性能は認められなかった。

3.7 水滴接触角と吸水量の関係

耐候性試験の進行に伴う水滴接触角と吸水量の関係の推移を図-12 に示す。耐候性試験 0 時間、1500 時間、3000 時間について表示した。耐候性試験により、試験体 (N) の水滴接触角と吸水量はともに低下した。試験体 (S1) は、耐候性試験 0 時間で水滴接触角の測定値がないため、明確な傾向は確認できなかった。

試験体 (S2) ~ 試験体 (S4) は、水滴接触角は大きく低下するが、耐候性試験 1500 時間、3000 時間での吸水量は試験体 (S1) よりも少なかった。

また、試験体 (S5) は、他の含浸材とは全く異なり、耐候性試験に伴う水滴接触角と吸水量の変化は、ほとんどなかった。主成分の違いによる特徴と考える。

3.8 含浸深さと吸水量の関係

含浸深さと吸水量の関係を図-13 に示す。含浸深さは耐候性試験 0 時間、吸水量は 0 時間から 3000 時間の推

移を表示した。含浸深さが小さい試験体 (S1) では吸水量が顕著に増加したが、含浸深さ 3mm 程度以上の試験体 (S2) ~ 試験体 (S4) では増加幅は小さかった。試験体 (S5) は他の試験体とは異なる傾向であった。

4. まとめ

モルタル平板を基材とした試験体を用いて、耐候性試験とシラン系含浸材の性能試験とを組み合わせた促進試験により、撥水性能と吸水抑制性能およびそれらの持続性について実験的に検証した結果、以下の結論を得た。

- (1) 含浸深さが小さく、紫外線劣化しやすい主成分のシラン系含浸材は、耐候性試験により、比較的早期に撥水性能および吸水抑制性能が顕著に低下した。
- (2) 含浸深さが 3mm 程度以上のシラン系含浸材は、耐候性試験により、撥水性能は低下するが、吸水抑制性能には高い持続性が認められた。ごく表層の撥水層は劣化したが、それ以深の撥水層は残っているためと考える。
- (3) 今回選定した主成分がシラン・シロキサン系のシラン系含浸材は、拡大鏡観察の結果からも、表層からの劣化深さは小さかった。紫外線劣化しにくい材料であると考える。
- (4) 耐候性試験に伴う性能の変化が非常に小さいシラン系含浸材があった。撥水性能は非常に高いが、吸水抑制性能は低いという試験結果であった。
- (5) 耐候性試験と各種性能試験とを組み合わせることにより、耐候性を考慮したシラン系含浸材の性能について、詳細に把握することができた。

参考文献

- 1) 佐々木崇人, 松田芳範: 長期暴露試験による含浸材の耐久性評価, コンクリート工学, Vol.54, No.9, pp.942-947, 2016.9
- 2) 鈴木世二, 浅野康寛, 戸高英二: シラン系表面含浸材塗布後の長期経過観察による吸水抑制評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, pp.1709-1714, 2019
- 3) 岡田明也, 齋藤俊克, 出村克宣: シラン系及び無機系表面含浸材を含ませたモルタル及びコンクリート供試体の屋外暴露 12.5 年後の性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.1663-1668, 2017
- 4) 土木学会: コンクリートライブラリー119 表面保護工法 設計施工指針 (案), 2005.4
- 5) 植松俊幸, 酒井正樹, 神代泰道: 表面仕上げ材のコンクリート保護効果の持続性に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.46, No.1, pp.541-546, 2024