

紫外線劣化を受けるコンクリート表面含浸材の性能評価に関する研究

浅井 貴幸*1・野島 昭二*2

コンクリート表面含浸材は遮塩性を有しているため、塩害対策に有効であると期待できるが、経年劣化の一つである紫外線の影響を受けるため、短期間で表面の撥水効果が消失するケースも報告されている。そこで、各種コンクリート表面含浸材の耐久性を評価するために、紫外線による劣化を想定して行った促進試験後の供試体に対して、塩水浸漬試験を実施し、EPMA分析を用いて塩化物イオンの浸透分布、含浸領域内の見掛けの拡散係数の算出等を行った。その結果、含浸領域内において塩化物イオンの浸透が確認されたため、コンクリート表面含浸材の耐久性を確保するためには、耐候性試験により紫外線劣化の程度を評価することが重要であることを見出せた。

キーワード：コンクリート表面含浸材、塩化物イオン、耐候性試験、EPMA、紫外線、見掛けの拡散係数

1. はじめに

コンクリート表面含浸材（以下、含浸材という）は、コンクリート構造物の各種劣化（中性化、塩害、凍害、アルカリシリカ反応等）の進行速度を抑制する効果が期待され、施工性や経済性が有利であることから、近年、その使用実績が多くなっている¹⁾。NEXCOが管理するコンクリート構造物においても、飛来塩分や凍結防止剤の散布による塩害が顕著に見られるため、建設、および保全の現場において含浸材の試験施工が実施されている。このような塩害対策に含浸材を用いる場合、塩化物イオンの浸透を抑制する作用を有していることから、塩化物イオン拡散予測を用いた試算結果より、無塗布と比較して塩化物イオン濃度が鋼材腐発生限界濃度に至るまでの期間を延長する抑制効果が期待される²⁾。

しかし、含浸材の耐久性に関してはあまり明確でなく、経年劣化による含浸材の性能低下の程度については、現状では明確になっていない。また、シラン系の含浸材においては、その撥水機能を有するアルキル基の炭素原子が紫外線の影響を受け劣化することが懸念されている。著者らで実施した暴露試験の結果からも、早いものでは塗布後6ヵ月目に表面の撥水効果が消失しているケースもある。このため、含浸材の耐久性を考えた場合、必要な含浸深さや含浸層の厚さ、紫外線劣化に対する抵抗性について検証する必要がある。

本検討では、前述のようなコンクリート表面からの紫外線劣化を想定し、紫外線照射を3ケース（500、1500、3000時間）行う耐候性試験を実施した後、土木学会指針³⁾による含浸材の試験を行うことで、促進劣化試験の前後における含浸材の性能低下について検証を行った。

2. 試験概要

2.1 使用材料

試験に用いた含浸材は、シラン系4種類であり、その種類を表-1に示す。使用した材料は、著者らが以前に実施した土木学会指針に基づく試験（初期性能試験）において、含浸深さと塩化物イオンの浸透抑制率とに優れた材料であることを総合的に判断して選定した。

表-1 試験に使用した含浸材の種類

区分	記号	主成分 (製品資料より引用)	標準 塗布量
シラン系	S-1	シラン・シロキサン	0.20 kg/m ²
	S-2	アルキルアルコキシシラン	0.40 kg/m ²
	S-3	特殊シラン系化合物	0.225 kg/m ²
	S-4	シラン・シロキサン	0.20 kg/m ²
ケイ酸塩系	K-1	ポルトランドセメント・触媒化合物・シリカサンド	1.20 kg/m ²

なお、表-1のケイ酸塩系含浸材K-1については、紫外線による影響を受けない材料であるため、耐候性試験を実施せず、他のシラン系含浸材との比較のために初期性能試験のみを実施している。

2.2 試験方法

(1) 供試体作製

試験用基盤は、粗骨材による試験値のばらつきを排除するため、W/C = 50%のモルタル基盤とし、JSCE-K571「表面含浸材の試験方法」³⁾に従い作製した。

また、耐候性試験用供試体については、図-1に示すとおり100×100×400mmの供試体より100×70×20mmに切り出したものを使用した。含浸材の塗布面は、切り出したカット面とし、それ以外の面については耐候性

*1 Takayuki ASAI：(株)高速道路総合技術研究所 道路研究部 橋梁研究室 研究員

*2 Shouji NOJIMA：(株)高速道路総合技術研究所 道路研究部 橋梁研究室 主任研究員

の高いコーティング材を用いてシールする処理を行った。

(2) 試験方法

耐候性試験は、JSCE-K511「表面被覆材の耐候性試験方法（案）」を準用し、キセノンアークランプ式耐候性試験機を用いて実施した。照射時間は、500時間、1500時間、3000時間の3ケースとした。

(3) 性能評価試験項目

耐候性試験が終了後、土木学会指針（JSCE-K571）³⁾に準拠し、以下の①～⑤に示す項目の試験を行うことで、各含浸材の促進劣化前後での性能低下について検証した。

- ① 外観観察 ② 含浸深さ ③ 吸水率試験
- ④ 塩化物イオン浸透に対する抵抗性試験
- ⑤ EPMA 画像解析

なお、耐候性試験3000時間後においては、上記の①～③の試験のみ実施している。

⑤のEPMA画像解析では、含浸領域の塩化物イオン浸透を確認し、濃度分布より含浸領域内の見掛けの拡散係数を算出している。図-2にその概要を示す。算出には、塩化物イオン濃度を0.1 kg/m³、5 kg/m³、8 kg/m³程度に調整したモルタル片を同一測定面内にセットし測定を行った。既知のモルタル片のEPMA画像解析より得られる特性X線強度を用いて濃度換算検量線を作成し、供試体の表層から0.1 mm間隔で特性X線強度の平均より濃度分布

を求めた。得られた濃度分布から塩化物イオンの見掛けの拡散係数を回帰計算により算出した。

また、含浸材の性能低下を把握するために、促進劣化の負荷を行わない供試体に対して、塩水浸漬試験（3%塩化ナトリウム水溶液）を実施し、EPMA画像解析を行った。なお、塩水浸漬期間は60日間とした。

3. 試験結果

3.1 外観観察

写真-1に外観観察の結果を示す。耐候性試験500時間終了後では、各種含浸材とも大きな変化は無く、外観上に目立った変化は認められないが、1500時間終了後では全ての含浸材で若干色褪せたような薄く黄色に変色し、3000時間後にはより濃く黄色に変色していた。なかでもS-2に関しては最も変色の度合いが大きく、試験前に若干黄色味があった色が1500時間ではより濃くなり、3000時間では全体に白色に変化した。

また、写真-1に示すように紫外線照射時間500時間と1500時間後の撥水性を比較した場合、ほとんどの含浸材で1500時間照射後の撥水能力が低下しており、濡れ色を示している。しかし、S-2は1500時間後でも良好な撥水性を示し、濡れ色を示すことがなかったが、3000時間では撥水性を示さず、濡れ色を示した。

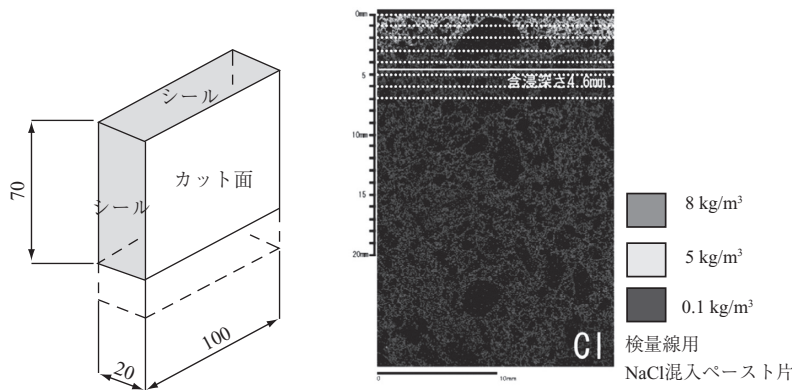


図 - 1 耐候性試験用供試体

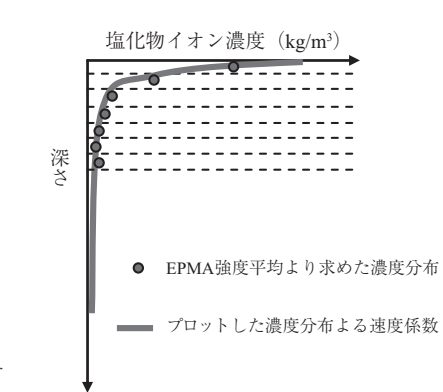


図 - 2 EPMA 画像解析の概要

記号	耐候性試験時間		
	左 500 時間	中 1 500 時間	右 3 000 時間
S-1			
S-2			

記号	耐候性試験時間		
	左 500 時間	中 1 500 時間	右 3 000 時間
S-3			
S-4			

写真 - 1 外観観察結果（撥水性確認）

○ 研究報告 ○

3.2 含浸深さ

耐候性試験後の供試体の含浸深さについて、写真 - 2 に含浸状況を、図 - 3 に測定結果を示す。耐候性試験 500 時間終了後において、S-2 以外の含浸材では初期性能試験時と同じ程度の含浸深さを示しているが、S-2 は初期性能試験時において含浸深さが 1.9 mm 低い値であった。

前述の外観観察において、耐候性試験 1 500 時間後に表面の撥水性が低下した S-1 では、写真 - 2 のように割裂面の上層で含浸材の劣化は認められず、含浸深さが変化するほどの影響は認められなかった。また、S-3、S-4 に関しても、同様な性状であった。表面の撥水性の消失は、含浸材の種類による違いが認められたが、紫外線を受けることで表面の撥水性が消失しても、図 - 3 に示すとおり内部の含浸深さが大幅に変化することは認められなかった。

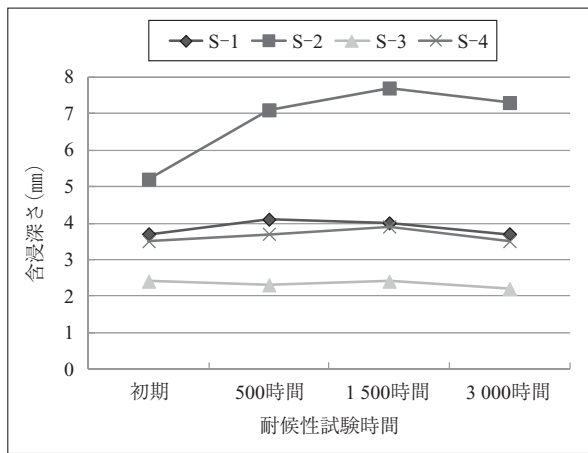


図 - 3 含浸深さ試験結果

このことから、耐候性試験が含浸深さに与える影響は小さく、紫外線によって表面の撥水性が消失しても、コンクリート内部には撥水性を有する含浸層が存在し、含浸深さが目に見えて表面から消失する現象は確認されなかった。

3.3 吸水率試験

図 - 4 に耐候性試験後の吸水比を示す。なお、吸水比は値が 100 % の場合で含浸材を塗布していない状態（無塗

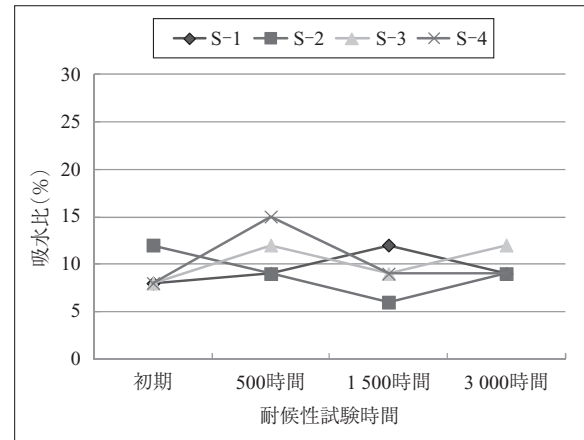


図 - 4 吸水率試験結果

布)と同じ性状であることを示している。

耐候性試験の供試体サイズは初期性能試験の 100 × 100 × 100 mm に比べ、100 × 70 × 20 mm と薄いため、吸水量自体は通常の土木学会指針 (JSCE-K 571) の吸水率試験と比較して少なくなっている。このため吸水比が耐候性試験後に減少することを想定していたが、初期性能試験とほぼ同じ値であり、含浸材の高い遮水性が確保された状態であった。また、耐候性試験の時間経過による吸水比の変動は小さく、紫外線照射による吸水性能の低下は生じていないと想定できる。

3.4 塩化物イオン浸透に対する抵抗性試験

耐候性試験後の試験結果を図 - 5 に示す。なお、塩化物イオン浸透深さ比は、値が 100 % の場合で含浸材を塗布していない状態（無塗布）と同じ性状であることを示している。

試験結果より、耐候性試験後においても塩化物イオン浸透に対する抵抗性に大きな変化はなく、いずれの紫外線照射時間においても含浸領域を超える塩化物イオンの浸透は認められなかった。なお、本試験では、含浸領域内における塩化物イオン浸透状況を確認しがたいため、後述する EPMA 画像解析で含浸材の遮塩性の性能低下を検証した。

記号	S-1
500 時間後	
1 500 時間後	
3 000 時間後	

記号	S-2
500 時間後	
1 500 時間後	
3 000 時間後	

写真 - 2 含浸深さ状況 (左: S-1, 右: S-2)

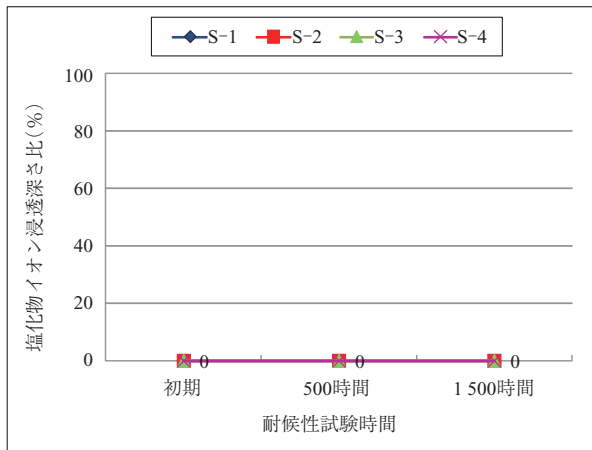


図 - 5 塩化物イオン浸透に対する抵抗性試験

3.5 EPMA 画像解析

(1) EPMA 分析画像

耐候性試験を行う前の初期状態の供試体と、耐候性試験後の供試体とに対して、塩化物イオン浸透に対する抵抗性試験（塩水浸漬期間 60 日）を実施し、EPMA を用いて分析した画像を図 - 6, 7 に示す。EPMA 観察は、各製品の供試体をカットした試料片を樹脂で固定し、測定を実施した。

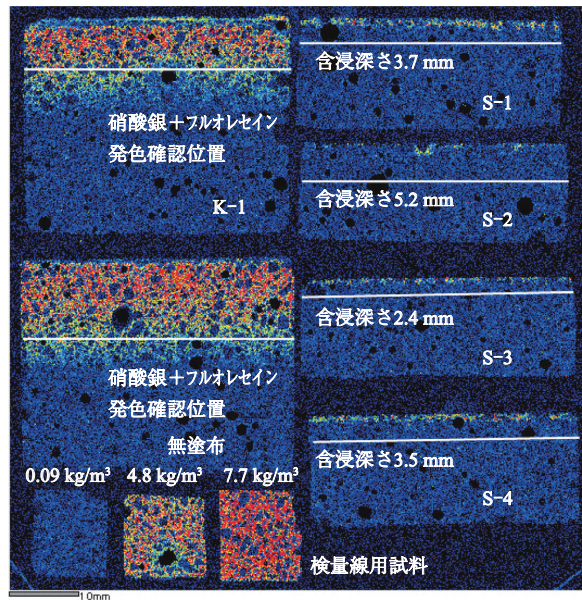


図 - 6 EPMA 分析画像（初期状態）

図 - 6 の初期状態の画像より、ケイ酸塩系含浸材 K-1 と無塗布との塩分浸透の様子は同じ程度であり、塩化物イオン浸透に対する抵抗性試験で用いた硝酸銀 + フルオレセインナトリウムの発色を確認した位置より、塩化物イオンが内部に浸透していることが確認できる。一方シラン系含浸材の S-1 ~ S-4 では、塩化物イオンの浸透がほとんど認められず、含浸材の撥水効果が水分の浸透と同時に塩化物イオンの浸透も抑制していることが分かる。

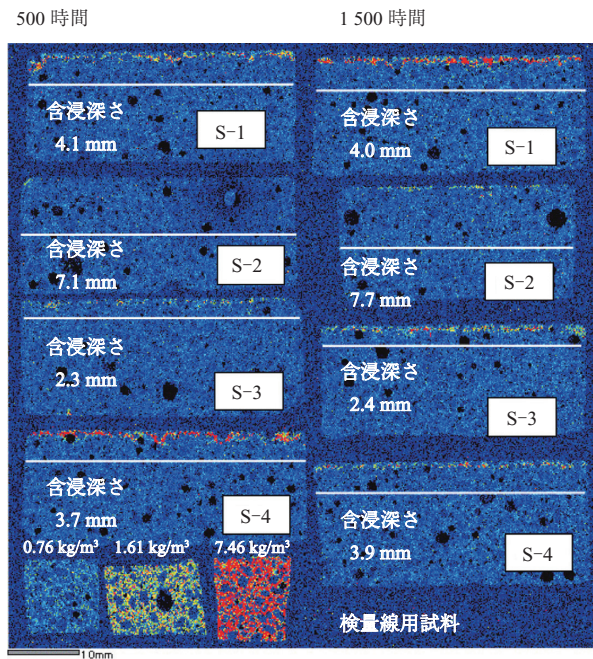


図 - 7 EPMA 分析画像（耐候性試験後）

図 - 7 の耐候性試験後の画像より、紫外線照射による遮塩性能に関しては、500 時間に比べて 1500 時間では表面付近の塩化物イオン濃度が上昇しており、その性能が若干低下していると考えられる。とくに S-1 が顕著に傾向を示しており、含浸材の種類によって紫外線に対する抵抗性が異なる結果となった。なお、S-4 に関しては、耐候性試験 500 時間に大幅な塩化物イオンの浸透が認められたが、1500 時間ではほとんど浸透が確認できない状態であった。

(2) 塩化物イオンの濃度分布

EPMA 分析では、特性 X 線強度と塩化物イオン濃度との関係を求める検量線を作成するために、JIS A 1154 により全塩分量を求めた 1 cm 角の濃度の異なる 3 つの基準試料モルタルを配置している。得られた検量線用の基準試料内の特性 X 線値の平均値と塩化物イオン濃度から換算式を作成し、各供試体の表面から 0.1 mm 間隔で塩化物イオンの濃度分布を求めた（図 - 8）⁴⁾。

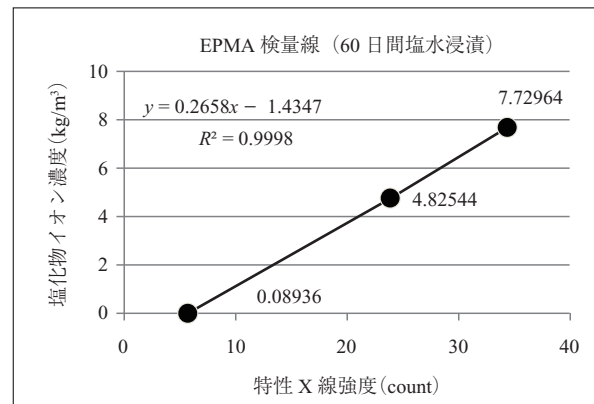


図 - 8 検量線作成例

○ 研究報告 ○

各含浸材の深さ方向における塩化物イオンの濃度分布を図 - 9 ~ 11 に示す。また、表面の塩化物イオン濃度に着目し、耐候性試験時間に対する濃度の変化を図 - 12 に示す。なお、図 - 12 に示す表面塩化物イオン濃度とは、試験より得られた塩化物イオンの濃度分布から見掛けの拡散係数を求めるために行った回帰分析の計算値である。

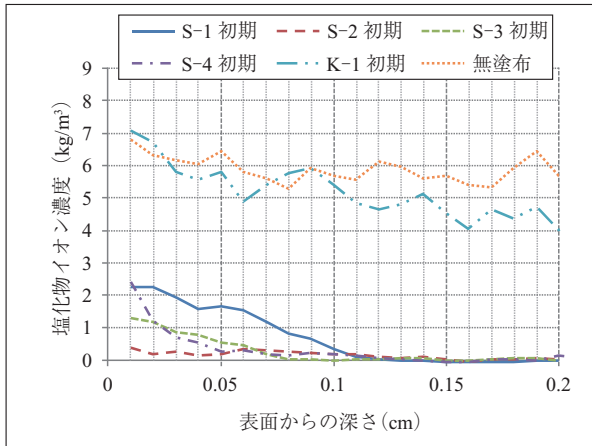


図 - 9 塩化物イオン浸透分布 (初期状態)

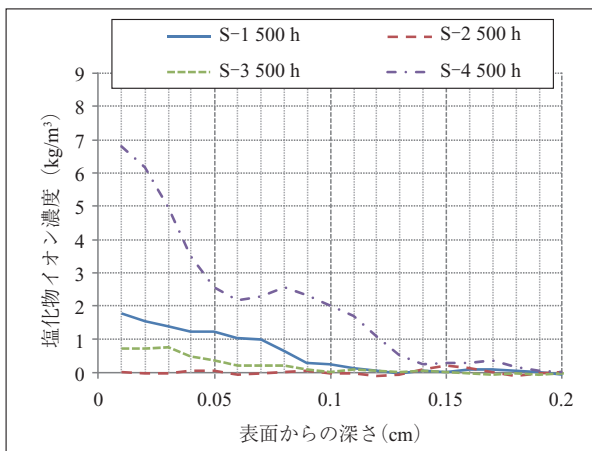


図 - 10 塩化物イオン浸透分布 (耐候性試験 500 時間)

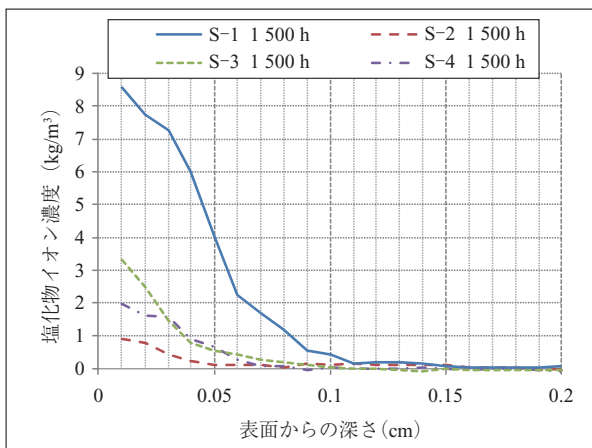


図 - 11 塩化物イオン浸透分布 (耐候性試験 1 500 時間)

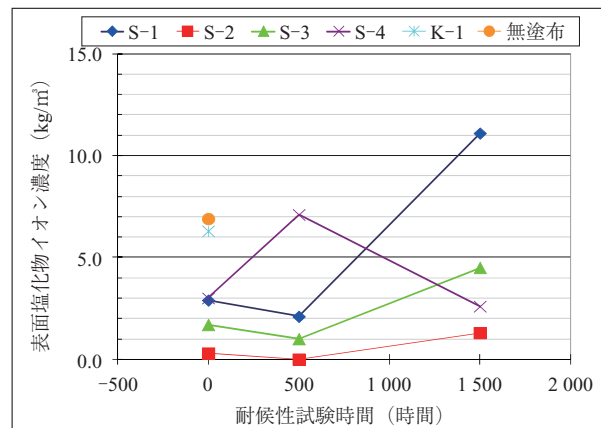


図 - 12 表面塩化物イオン濃度の変化

図 - 9 の初期状態の塩化物イオン浸透分布より、ケイ酸塩系含浸材 K-1 と無塗布とでは、塩化物イオンが内部へ拡散しており、その速度も同程度である。このため K-1 の遮塩性は、他の含浸材と比較して低い結果であった。一方、シラン系含浸材では、表面付近の 0.1 mm に若干の塩化物イオンの浸透が見られるも、それ以上内部への浸透は認められず、含浸材の遮塩効果が機能していると考えられる。しかしながら、若干ではあるが表面から濃度勾配を生じて内部に拡散する分布であることから、時間の経過により内部に塩化物イオンが拡散することが予想される。

シラン系含浸材の S-4 に関しては、耐候性試験 500 時間後の表面塩化物イオンの濃度が非常に高い値を示したのに対して、1500 時間後では大きな劣化が認められなかった。耐候性試験後の塩水浸漬は 60 日間であり、初期状態と同様の期間で浸漬している。図 - 9 に初期状態の 60 日浸漬の S-4 と、耐候性試験後の塩化物イオンの濃度分布を比較した場合、初期状態と耐候性試験 1500 時間後が同様の分布を示しているのに対して、500 時間後では非常に大きな値を示している。紫外線照射時間の短い 500 時間が 1500 時間よりも劣化の進行が早いことは想定しがたいが、詳細な原因は不明であるため、今回の照査から S-4 は除外することとした。

S-1, S-2, および S-3 のシラン系含浸材では、耐候性試験 500 時間後において初期状態と同じ程度の濃度分布を示しており、500 時間の紫外線照射では含浸材の遮塩性の低下は認められなかった。しかし、耐候性試験 1500 時間後では、500 時間照射時よりも塩化物イオンの浸透が進行しており、図 - 12 に示す表面塩化物イオン濃度の変化にも現れている。しかしながら、含浸層を超えて塩化物イオンが浸透するケースはなく、紫外線照射後も含浸材の遮塩性は著しく低下していないことが分かる。

(3) 含浸領域の見掛けの拡散係数

塩化物イオンの浸透分布よりフィックの拡散方程式を用いて回帰計算を行い、含浸領域内の見掛けの拡散係数を算出した。図 - 13 に耐候性試験における見掛けの拡散係数の変化を示す。なお、耐候性試験 500 時間における S-2 の見掛けの拡散係数については、図 - 10 に示した塩化物イ

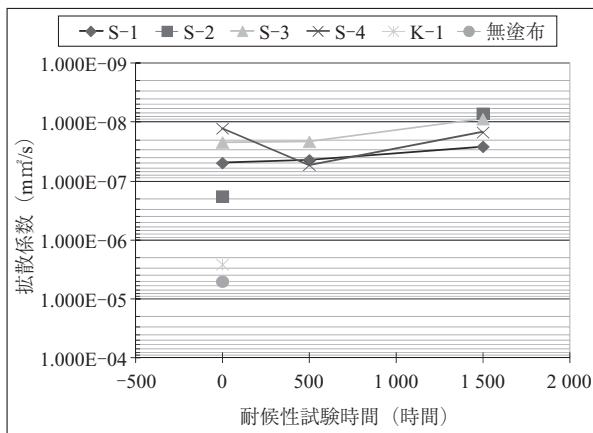


図 - 13 含浸領域の見掛けの拡散係数

オン浸透分布より、コンクリート内部への拡散がほとんど生じていないため、回帰計算で算出することができず、無記入とした。

図中の耐候性試験時間が0時間の値は、耐候性試験を行っていない含浸材の見掛けの拡散係数を示している。紫外線の照射時間により若干の変動はあるものの、シラン系含浸材 S-1 ~ S-3 の拡散係数は $1.0 \times 10^{-8} \text{ mm}^2/\text{s}$ のオーダー内の一定数値であった。また、ケイ酸塩系含浸材 K-1 は、無塗布と同程度で $1.0 \times 10^{-6} \text{ mm}^2/\text{s}$ のオーダー内の数値であった。

4. まとめ

今回得られた試験結果では、紫外線照射の負荷を与えた場合においても、図 - 3 に示したとおり含浸深さに変化が認められなかった。しかし、耐候性試験 1500 時間後の供試体では、図 - 11 の塩化物イオン浸透分布より、極表面部の含浸材が紫外線により劣化し、塩化物イオンの濃縮が確認された。しかし、図 - 13 より耐候性試験 1500 時間後における含浸材の見掛けの拡散係数は、初期性能に対

して大きな変動がなく $1.0 \times 10^{-8} \text{ mm}^2/\text{s}$ のオーダー内であった。よって、本検討に用いた含浸材の塩化物イオン浸透阻止性能は、極表面部の劣化では著しく低下せず、残りの含浸深さの層で性能が確保されていると考えられる。

以上のことから、含浸材の見掛けの拡散係数は、材料の種類によらずほぼ一定の値であり、含浸材の塩化物イオン浸透阻止性能の低下は、表面の劣化に伴う表面塩化物イオンの増加によるものと考えられる。今回の試験に用いた含浸材の種類では、紫外線による劣化はごく表面層にかぎられていた。しかし、図 - 12 に示したとおり、耐候性試験 1500 時間後において表面塩化物イオンが急激に上昇する含浸材の種類があることと、既往の見知より暴露後しばらくして含浸領域が消失した事例もある。したがって、耐候性試験により紫外線劣化の程度を評価することで、より耐久性の高い含浸材を選定する必要があると考える。

5. おわりに

本検討では、シラン系含浸材 4 種類に対して、紫外線による促進劣化の負荷を与えることで、含浸材の性能低下の検証を行った。今後、本試験で得られた知見をもとに、含浸材の NEXCO 基準導入へ向けて、暴露供試体や既設構造物に対する塩化物イオン浸透抑制効果の検証を早急に進める予定である。本文が含浸材の耐久性評価に関して参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) 土木学会：表面保護工法設計施工指針（案），2005.4
- 2) 竈本武弘，浅井貴幸，堀口浩司，池富 修：コンクリート表面含浸材による鋼材腐食発生時期延伸効果の試算，土木学会第 65 回年次学術講演会，pp.653-654，2010.9
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書【基準編】，p-365，2007.5
- 4) 竈本武弘，浅井貴幸，落合光雄，池富 修：EPMA を用いたコンクリート表面含浸材の塩化物イオン拡散予測，土木学会第 66 回年次学術講演会，pp.653-654，2011.9

【2012 年 4 月 9 日受付】



刊行物案内

東日本大震災 PC 構造物災害調査報告書

平成 23 年 12 月

定 価 9,000 円／送料 500 円
 会員特価 7,000 円／送料 500 円

社団法人 プレストレストコンクリート技術協会