

論文 各種表面含浸材の塩分浸透および中性化に対する抑制効果

坂元 貴之^{*1}・武若 耕司^{*2}・山口 明伸^{*3}・樫原 弘貴^{*4}

要旨：各種表面含浸材の性能の把握とその違いを確認するために、施工実績のあるけい酸塩系とシラン系を取り上げ、それぞれを塗布したコンクリートに対する吸水試験、透気試験、塩水浸漬試験および中性化促進試験を実施した。その結果、けい酸塩系とシラン系はもちろん、同じけい酸塩系表面含浸材であってもその主成分によって塩分浸透抑制効果や中性化抑制効果などに違いが生じることが分かった。さらに、けい酸塩系表面含浸材の場合、材齢 7 日の若材齢コンクリートに塗布した場合よりも十分に水和反応が進行した材齢 28 日のコンクリートに塗布した場合の方が、より高い効果が期待できることも確認された。

キーワード：けい酸塩系表面含浸材, シラン系表面含浸材, 塩分浸透抑制効果, 中性化抑制効果

1. はじめに

近年、社会資本の適切な維持管理の重要性に対する認識が高まっており、それに呼応してコンクリート構造物の耐久性向上、劣化抑制の観点から数多くの新しい補修材料や各種新工法が提案され始めている。その中で近年注目されている工法の一つに表面保護工法がある。土木学会による表面保護工法設計施工指針(案)¹⁾には「所定の効果を発揮する材料をコンクリート表面から含浸させ、コンクリート表層部の組織を改質して、コンクリート表層部への特殊機能の付与を実現させる工法」と定義されており、施工が容易で経済的、しかも施工後すぐにその効果が期待できることなどから、近年では実構造物への適用事例が増加している。

この工法に用いられる主な材料は、けい酸塩系表面含浸材とシラン系表面含浸材の 2 種類に大別される。シラン系の場合は、コンクリート表層部に含浸させることにより撥水層(吸水防止層)を形成することで、外部からの水や塩化物イオンの浸透を抑制するものとされ、すでに既往の研究や施工実績も多く、塩化物イオンの浸透抑制効果やアルカリ骨材反応抑制効果が得られることなどが報告されている²⁾⁻⁴⁾。

一方、けい酸塩系の場合は、コンクリート内部に浸透し、コンクリート中に存在する Ca^{2+} および水と反応して細孔空隙中に C-S-H 結晶を生成することでコンクリート表層部を緻密化することでコンクリートの品質を改善するものであり、その改質機構はシラン系と異なる。これまでの著者らの検討により、塗布するコンクリートの品質、すなわち含水率、水セメント比、あるいは中性化の進行程度などによって、その品質改善効果が大きく異なるものの、適切に施工を行えば塩分浸透抑制や中性化抑制、

さらにはひび割れ補修機能などの品質改善効果が得られることを確認している⁵⁾⁻⁶⁾。ただし、現在実用化されている表面含浸材は多種多様であり、特にけい酸塩系の場合、その主成分や配合割合、また標準とする塗布工法や塗布時期がそれぞれ異なることから、得られる効果やその程度にも相応のバラツキが生じると予想される。

そこで本研究では、施工実績のある表面含浸材のうち、けい酸塩系表面含浸材 6 種類と、シラン系表面含浸材 1 種類、さらに両者の複合材料 1 種類を取り上げ、それぞれを塗布したコンクリートを用いて塩水浸漬試験および促進中性化試験を実施し、各種表面含浸材の塩分浸透および中性化に対する抑制効果との違いについて実験的検討を行った。

2. 実験概要

2.1 表面含浸材の種類

本実験で用いた表面含浸材は、表 - 1 に示す 8 種類であり、けい酸塩系表面含浸材である、けい酸ナトリウムを主成分とした A, C, F, けい酸ナトリウム・カリウムを主成分とした B, D, けい酸リチウムを主成分とした L に加え、シラン系+けい酸塩の複合材料である E, および

表 - 1 使用した表面含浸材の種類

主な成分	含浸材種類
けい酸ナトリウム	A, C, F
けい酸ナトリウム けい酸カリウム	B, D
けい酸リチウム	L
シラン系 + けい酸塩	E
シラン系	S

*1 鹿児島大学大学院理工学研究科海洋土木工学専攻 (正会員)

*2 鹿児島大学大学院理工学研究科海洋土木工学専攻 教授 工博 (正会員)

*3 鹿児島大学大学院理工学研究科海洋土木工学専攻 准教授 博士(工学) (正会員)

*4 福岡大学工学部社会デザイン工学科 助教 博士(工学) (正会員)

表 - 2 各種表面含浸材の塗布量および塗布方法

含浸材	塗布工程								
A	水噴霧	乾燥 (30分)	含浸材 (150g/m ²)	乾燥 (30分)	水噴霧	乾燥 (30分)	含浸材 (50g/m ²)	乾燥 (30分)	水噴霧
B	下地処理	水噴霧	乾燥 (30分)	含浸材 (120g/m ²)	水噴霧	乾燥 (6時間)	含浸材 (120g/m ²)	水噴霧	
C	水噴霧	乾燥 (60分)	含浸材 (250g/m ²)	乾燥 (30~60分)	水噴霧 (1日目)	乾燥 (60分)	水噴霧 (2日目)	乾燥 (60分)	水噴霧 (3日目)
D	下地処理	水噴霧	乾燥 (30分)	含浸材 (100g/m ²)	乾燥 (30分)	水噴霧	乾燥 (30分)	含浸材 (50g/m ²)	乾燥 (30分)
E	下地処理	含浸材 (200g/m ²)	乾燥 (24時間)						
F	下地処理	水噴霧	乾燥 (15分)	含浸材 (0.2L/m ²)	乾燥 (10分)	含浸材 (0.1L/m ²)	乾燥 (15分)	水噴霧	
L	下地処理	含浸材 (200g/m ²)	乾燥 (50分)	含浸材 (200g/m ²)	乾燥				
S	下地処理	含浸材 (200g/m ²)	乾燥 (6時間)						

表 - 3 実験に用いたコンクリート配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					
		W	C	S		G	AE
				海砂	山砂		
50	45	166	332	592	155	1052	3.32

シラン系表面含浸材であるSとした。なお、複合系であるEは、シラン系の撥水効果とけい酸系の表層の緻密化の両方の効果を狙ったものである。各材料の塗布量および塗布方法は、表 - 2 に示すように、各材料で標準と規定されている方法に従った。

2.2 供試体概要

本実験で使用した供試体には、セメントに普通ポルトランドセメント（密度 3.15g/cm³）、細骨材に鹿児島県肝属郡南大隈町原沖合産の海砂（表乾密度 2.52g/cm³）と鹿児島県熊毛郡中種子町納官産の山砂（表乾密度 2.62g/cm³）の混合砂、粗骨材には、大分県津久見市上青江産（表乾密度 2.71g/cm³、骨材最大寸法 20mm）を使用して作製し、スランプ 8±1cm、目標空気量 4±0.5%のコンクリートを用いた。配合を表 - 3 に示す。

試験項目ごとの供試体寸法および表面含浸材の塗布面を表 - 4 に、各試験に用いた供試体概要を図 - 1 にそれぞれ示す。試験項目としては、吸水試験、透気試験、塩水浸漬試験、中性化促進試験を実施した。吸水試験、塩水浸漬試験、中性化促進試験には、ベースとなる 10×10×40cm の角柱供試体の打設側面（2面）に表面含浸材を塗布し、その後 10cm 間隔でカットして 10×10×10cm の立方体とし、含浸材塗布面以外をエポキシ樹脂で被覆したものをを用いた。また透気性試験には、φ15×30cm の

表 - 4 試験項目ごとの供試体寸法および塗布面

試験項目	供試体寸法(cm)	含浸面	概要図
塩水浸漬試験 中性化促進試験 吸水試験	10×10×10	打設側面 (2面)	TYPE-
透気試験	15×5	打設底面	TYPE-

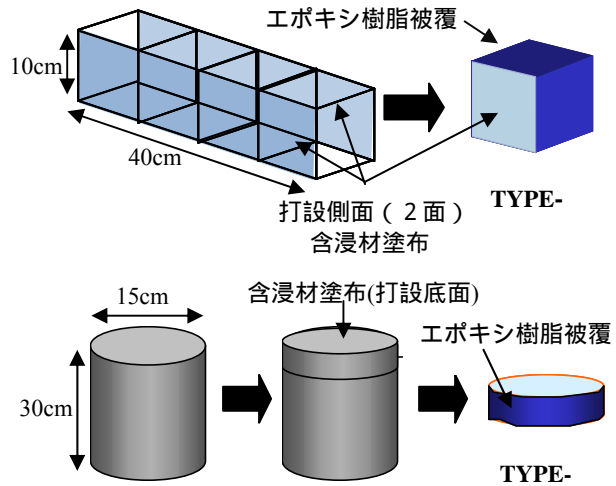


図 - 1 供試体概要

円柱供試体を打設底面から 5cm 位置で切断した φ15×5cm の円盤の打設底面側に表面含浸材を塗布し、その後側面をエポキシ樹脂で被覆したものをを用いた。含浸材の塗布時期は、表面含浸材種類によって異なっているため、本実験では、塗布開始時を材齢 7 日と 28 日で統一した。試験開始までの具体的な養生方法や塗布期間等を図 - 2 に示す。

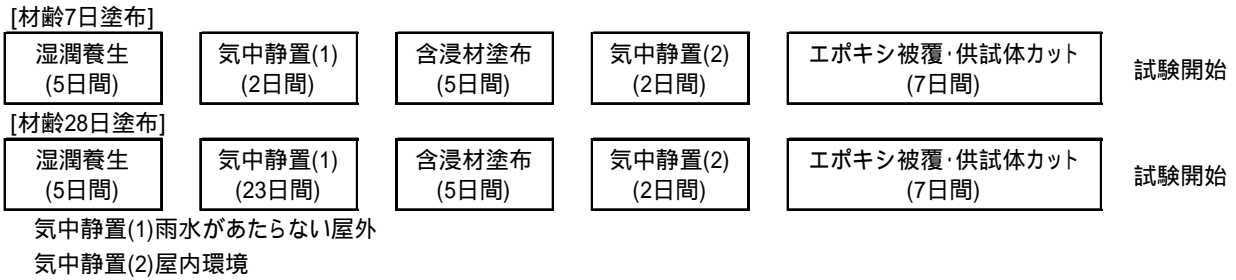


図 - 2 試験開始までの塗布時期及び試験開始までの工程

2.3 試験方法

各試験方法の概要と測定項目および評価方法を以下に示す。

(1) 吸水試験

図 - 3 に示すように、供試体の下面が試験用容器底面から 10mm になるようにスペイサーを配置し、隣接供試体との間隔を十分に確保して試験を実施した。試験開始時から 1, 2, 3, 5, 7, 14, 21, 28, 63 日後に、試験用容器から供試体を取り出し、表面の水分を除去した後、質量 (W_{ai}) を測定し、式 (1) を用いて吸水率 (W_a) を算出した。さらに、無塗布供試体に対する塗布供試体の吸水率の比を吸水比として算出した。なお、吸水比は各 3 体の平均値で示している。

(2) 塩水浸漬試験

3%の塩化ナトリウム水溶液を用いて、図 - 3 に示す吸水試験と同様な方法で浸漬試験を実施した。なお、試験期間中は溶液濃度が変化しないように試験容器を密封すると共に、30 日に 1 度、溶液交換を行い、それぞれの見かけの塩化物イオン拡散係数を算出した。

(3) 透気性試験

透気係数測定方法は、図 - 4 に示す内径 15cm のメタル管に供試体を乗せ、両者の隙間をシリコンでシールし、試験器に設置した。その後、圧縮空気をコンプレッサーから注入してメスシリンダーを利用した水中置換法により透気量を測定し、式 (2) により透気係数を求め、算出し、無塗布供試体に対する塗布供試体の透気係数比を求めた。

(4) 中性化促進試験

CO₂ 濃度 5%、温度 30 度、湿度 80% 以上の中性化促進環境下において、供試体の含浸材塗布面が側面になるようにして静置し、中性化促進試験を行った。促進試験開始 30, 90, 180 日後に供試体を解体し、フェノールフタレイン法にて中性化深さを測定した。試験体および比較用供試体の中性化深さから、中性化深さ比を算出した。

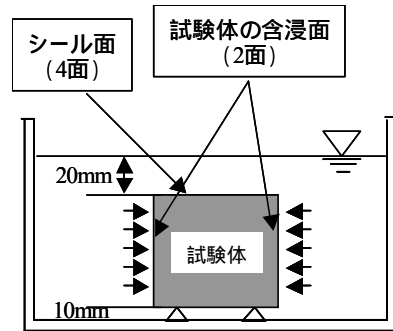


図 - 3 吸水・塩水浸漬試験概要

$$W_a = \frac{W_{ai} - W_{ao}}{W_{ao}} \times 100 \quad \text{式(1)}$$

W_a : 吸水率 (%)

W_{ao} : 試験開始時の試験体質量 (g)

W_{ai} : 試験開始時から測定時における試験体質量 (g)

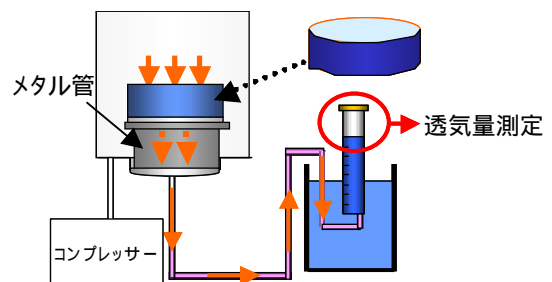


図 - 4 透気係数測定方法

$$K = \frac{2P_2hr}{P_1^2 - P_2^2} \cdot \frac{Q}{A} \quad \text{式(2)}$$

K : 透気係数(cm/sec), P_1 : 載荷圧力(N/cm²)

P_2 : 大気圧(N/cm²), h : 試験体の厚さ(cm)

Q : 透気量(cm³/sec), A : 透気面積(cm²)

r : 気体の単位容積量(N/cm³)

3. 結果および考察

3.1 吸水試験

図-5および6に、材齢7日あるいは28日にそれぞれ含浸材を塗布した場合について、吸水試験開始後63日を経過した時点での各種含浸材塗布供試体の吸水率及び無塗布供試体に対する吸水比を示す。けい酸塩系含浸材は、材齢7日で塗布した場合には、無塗布供試体との間に明確な差が認められなかったが、材齢28日に塗布した場合には、程度に多少の差はあるもののいずれの場合も吸水抑制効果が認められた。これは、けい酸塩系含浸材の主たる改質機構が、含浸材中の SiO_2 分がコンクリート中の Ca^{2+} イオンと水の存在下で反応し、空隙内にC-S-H結晶を生成してコンクリート表層を緻密化することにあることから、セメントの水和反応が十分に進行していない材齢7日のコンクリートでは、材齢28日のコンクリートと比べ水和反応過程で生成される $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の絶対量が未だ少なく、表面含浸材の反応に必要な Ca^{2+} イオンが十分にはコンクリート内に存在していなかったことが一因であると考えられた。

一方、シラン系含浸材であるSの場合は、いずれの材齢で塗布した場合においても、顕著な抑制効果が得られていることが分かる。

3.2 塩水浸漬試験

図-7および8には、それぞれ材齢7日あるいは28日に含浸材を塗布した供試体を塩水に12ヵ月間浸漬した時の各供試体中の全塩化物イオン量分布を示す。これらの結果から、程度の差はあるものの、含浸材塗布材齢あるいは含浸材の種類に関わらず、含浸材塗布供試体中への塩化物イオン浸透量は無塗布の場合よりも少ないことが確認された。ただし、図-7,8のみでは、シラン系表面含浸材Sにおいて顕著な塩化物イオン浸透に対する抑制効果が認められる他は、含浸材の種類や塗布材齢が浸透抑制効果に及ぼす影響を明確には捉える事が出来なかった。そのため、これらの塩化物イオン浸透状況をもとに含浸材塗布コンクリートの見かけの拡散係数を求めた。なお、拡散係数はフィックの拡散方程式へのフィッティングにより算出したが、浸漬試験であることを考慮して、すべての供試体の表面塩化物イオン濃度は同一と仮定し、無塗布供試体の塩分分布から得られた表面塩化物イオン濃度を他のすべての供試体の表面塩化物イオン濃度として取り扱った。その結果を図-9に示す。これによると、けい酸ナトリウム系含浸材A, C, F, B, Dにおいては、塗布材齢が含浸材の浸透抑制効果に顕著に影響を及ぼし、コンクリート打設後から含浸材塗布までの期間がある程度長いほど、より顕著な含浸材の効果が現れることが明確となった。一方、含浸材E, L, Sは、塗布材齢の塩化物イオン浸透抑制効果に

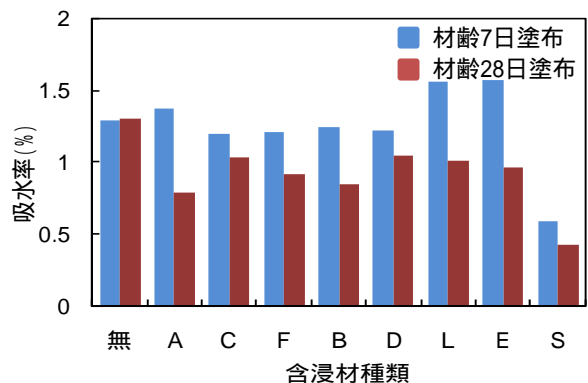


図-5 塗布供試体及び無塗布供試体の吸水率

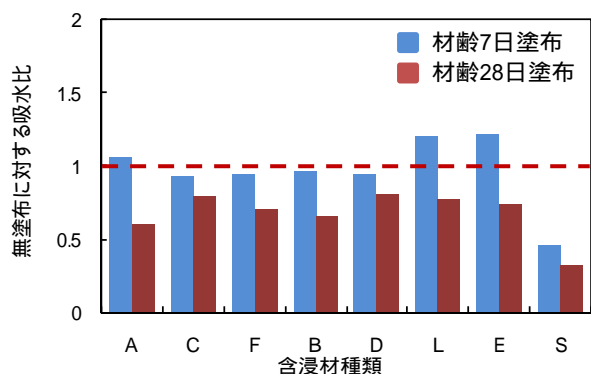


図-6 塗布供試体の無塗布供試体に対する吸水比

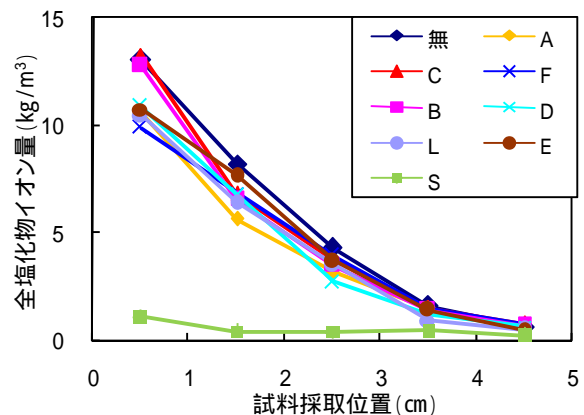


図-7 材齢7日に塗布した場合の全塩化物イオン量

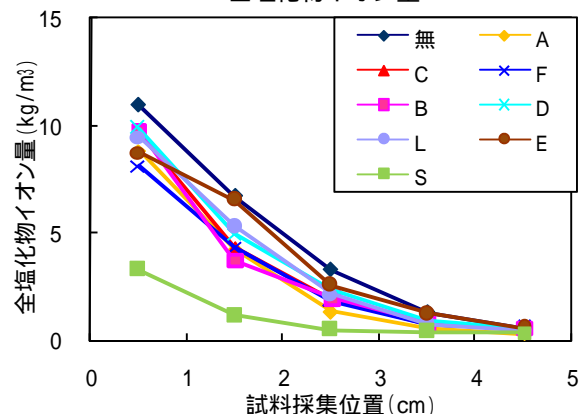


図-8 材齢28日に塗布した場合の全塩化物イオン量

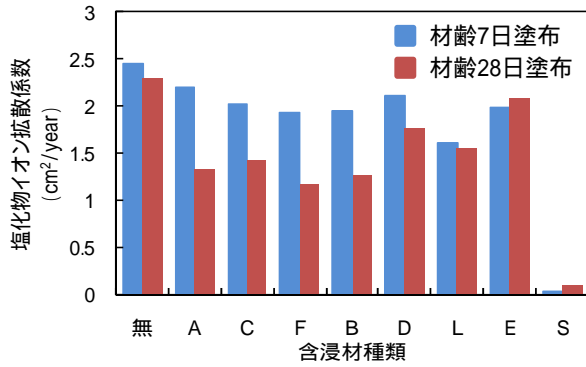


図 - 9 材齢 7, 28 日に塗布した場合の見かけの塩化物イオン拡散係数

及ばず影響が顕著には表れていない。これは、これらの含浸材の抑制効果が上記のようなコンクリート組織との反応に直接起因するものではないことと関連があると考えられる。

これらの傾向は、前述の吸水試験の結果と概ね対応しており、含浸材塗布後の吸水特性によって有る程度、長期的な塩分浸透抑制効果を予測出来ることを示唆している。ただし、撥水作用を持つ E や S の場合は、吸水抑制効果と塩分浸透抑制効果が必ずしも一致していない。つまり、E のように吸水抑制効果は得られているものの塩分浸透抑制効果は認められないケースや、S のように吸水抑制効果以上の塩分抑制効果を示すケースが生じている。これらの評価については撥水作用を持つ表面含浸材の改質機構を踏まえてさらに検討する必要がある。

3.3 透気性試験

図 - 10 および 11 に、材齢 7 日あるいは材齢 28 日にそれぞれ含浸材を塗布した場合について、各種表面含浸材塗布供試体の透気係数及び無塗布供試体に対する透気係数比を示す。吸水試験や塩水浸漬試験の結果と同様に、けい酸塩系含浸材の場合、材齢 7 日より材齢 28 日に塗布した方がより明確な効果が認められた。一方、シラン系含浸材 S あるいは撥水作用を持つ E の場合は、S の材齢 7 日塗布の場合を除いて、無塗布供試体よりも透気係数が高くなる傾向を示した。シラン系はコンクリート表層に形成する撥水層を形成する特徴をもち、その撥水層はコンクリート内部からの水蒸気透過性に優れている。それにより、コンクリートの含水率が無塗布供試体よりも低くなったことによるものと考えられ、材齢 28 日塗布供試体のものは、この含水率の影響が顕著に表れたことによるものと考えられる。

3.4 中性化促進試験

図 - 12 および 13 にはそれぞれ材齢 7 日、28 日に含浸材を塗布した供試体を中性化促進試験装置により 12 ヶ月間中性化促進した時の各供試体の中性化深さ及び無塗布供試体に対する中性化深さ比で示したものである。これらの結果から材齢 7 日塗布の含浸材 F を除く、けい

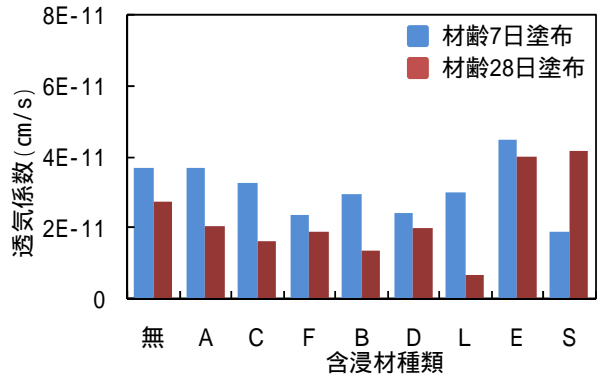


図 - 10 塗布供試体及び無塗布供試体の透気係数

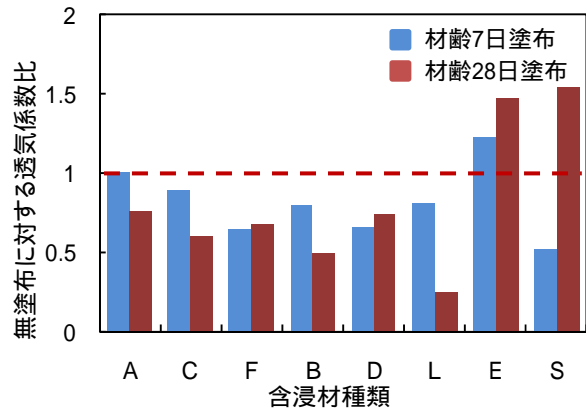


図 - 11 塗布供試体の無塗布供試体に対する透気係数比

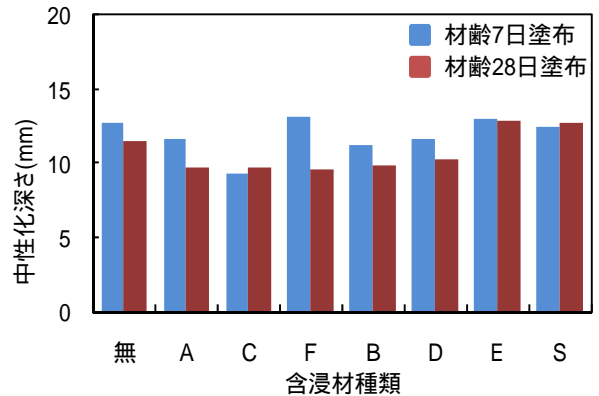


図 - 12 塗布供試体及び無塗布供試体の中性化深さ

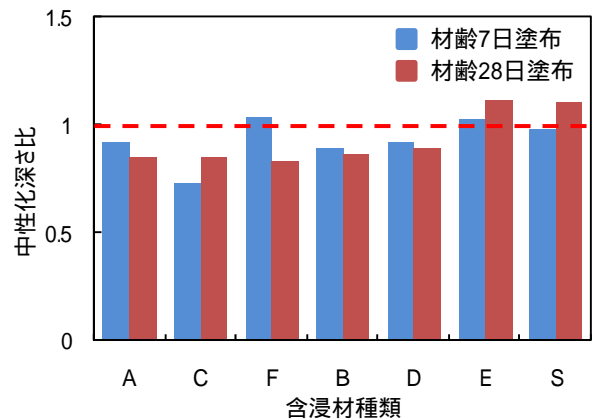


図 - 13 塗布供試体の無塗布供試体に対する中性化深さ比

酸塩系表面含浸材塗布供試体は無塗布より中性化を抑制することが確認できた。ただし、材齢 7 日塗布供試体について見ると含浸材 C のように中性化の抑制効果が高いものもあれば F のように無塗布供試体と同程度となるものが認められた。それに対し、材齢 28 日塗布供試体は、全てにおいて中性化を顕著に抑制しており、またどの供試体も抑制効果の割合がほぼ同程度となり、けい酸塩系表面含浸材の中性化抑制に対する効果のバラツキが少ないことが確認できる。中性化促進試験においても、コンクリートの水和反応過程で生成される $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の絶対量がけい酸塩系表面含浸材の反応には重要であることが認められた。なお、データ数が十分とは言えないが、効果のバラツキ程度を比較するために、けい酸塩系表面含浸材の中性化深さ比の変動係数を求めたところ、材齢 7 日塗布では変動係数が 0.24 (標準偏差 2.11) であったのに対し、材齢 28 日塗布では 0.20 (標準偏差 1.73) と減少する結果となった。また、吸水試験、塩水浸漬試験、透気試験でも同様の傾向が得られた。

一方、撥水作用を持つ含浸材 E, S では、材齢 7 日塗布の場合は無塗布と同程度、材齢 28 日塗布の場合は無塗布より中性化深さがむしろ大きくなる結果となり、けい酸塩系表面含浸材を塗布した場合とは異なる傾向となった。

なお、これらの傾向は透気試験の結果と同様であることから、中性化抑制効果は透気係数によって有る程度予測できると考えられる。

4. まとめ

現状の表面含浸材の効果を把握するために施工実績のあるけい酸塩系表面含浸材 6 種類、シラン系表面含浸材 1 種類、さらに両者の複合材料 1 種類を加えた計 8 種類を用いて、吸水試験、塩水浸漬試験、透気性試験、促進中性化乾燥収縮試験を実施し、各種表面含浸材の性能把握と効果の違いについて検討を行った結果、以下の知見が得られた。

- (1) けい酸塩系表面含浸材によるコンクリート中への水分浸透抑制効果は、材齢 7 日で塗布した場合よりも材齢 28 日で塗布した場合の方が顕著となることが認められ、製品ごとの効果のバラツキも小さくなることが確認された。一方、シラン系+けい酸塩の複合材料、およびシラン系表面含浸材では、塗布材齢に拘わらず、コンクリートの表面に撥水層を作るために、塗布材齢の影響は必ずしも小さくなく、若材齢時に塗布した場合でも高い効果が得られることが確認された。
- (2) けい酸塩系表面含浸材によるコンクリート中への塩分浸透抑制効果は、塗布材齢の影響が明確に認められ、

その効果は吸水試験の結果と良く対応していることが確認された、なお、シラン系では塗布材齢に拘わらず効果が得られるが、シラン系+けい酸塩系の複合材料は、水分浸透性と塩分浸透性の傾向が必ずしも対応しないことがあり、今後、改質機構を踏まえた検討が必要と考えられる。

(3) 透気性試験によって、コンクリート中の空気の透過性について検討を行った結果、けい酸塩系表面含浸材の場合には、製品ごとのバラツキは大きいものの、材齢 7 日に比べて材齢 28 日に塗布した場合の方が無塗布に対する透気係数の低下割合は大きくなる結果を示した。一方、撥水作用のある表面含浸材の場合では、コンクリート表層部に撥水層が形成されることにより内部の含水率が低下し、無塗布よりも透気係数は無塗布よりも大きくなる傾向にあった。

(4) 中性化抑制効果については、けい酸塩系表面含浸材の場合には、塗布までの期間が長くなるほど、抑制効果が大きくなり、製品間のバラツキも小さくなる傾向が認められた。一方、シラン系の場合には、透気試験結果から予想されるように含浸材塗布により中性化の進行が早まる傾向があることが分かった。

謝辞：本研究は、けい酸塩系浸透性コンクリート保護材研究会との研究成果の一部について報告したものである。関係者各位に謝意を表す。

参考文献

- 1) 土木学会：表面保護工法 設計施工指針 (案)
- 2) 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
- 3) 久保善司, 服部篤史, 栗原慎介, 宮川豊章：ASR より劣化したコンクリート構造物のシラン系表面処理による補修効果の検討, 土木学会論文集, No.690/V-53, pp.95-107, 2001. 11
- 4) 櫛原 弘貴, 武若 耕司, 山口 明伸, 白澤 直：けい酸塩系表面含浸材の浸透特性および保護性能に関する基礎的研究, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第 8 巻, pp.77 - 84, 2008
- 5) 櫛原 弘貴, 武若 耕司, 山口 明伸, 白澤 直：けい酸塩系表面含浸材を用いたひび割れ補修による止水効果に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.1933 - 1938, 2009
- 6) 櫛原 弘貴, 武若 耕司, 山口 明伸, 白澤 直：各種表面含浸材の性能把握と効果の違いに関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.1619 - 1624, 2010