論文　シラン系表面含浸材の性能評価に関する研究

森井　直治[*1]・久保田　憲[*2]・林　承燦[*3]・宮里　心一[*4]

要旨：本研究では，シラン系表面含浸材の性能として，(1) 中性化の劣化進行に対する抑制効果，(2) 水セメント比および表面水分率が含浸深さに及ぼす影響の評価，(3) 塩分を内在するコンクリートを用いた含浸深さの定量的な評価方法についての検討を行った。その結果，①中性化が進行していてもその進行を抑制できること，②水セメント比が高く表面水分率が低いほど含浸深さは深くなる傾向にあること，③目視によって撥水および吸水防止効果が確認されない深さにおいても含浸層の形成による塩分溶出の抑制が認められ，その評価を定量的に行えることが結果として得られた。

キーワード：シラン系表面含浸材，劣化抑制効果，含浸深さ

1. はじめに

シラン系表面含浸材は，コンクリートおよびモルタルなどの表面に塗布することにより，その含浸部分において撥水および吸水防止効果を持つ含浸層を形成する。これによって，水分や劣化要因物質の浸透に対して抵抗し，コンクリートの劣化進行を抑制する効果が認められている[1)]。そのため，コンクリート構造物の耐久性を向上させる維持管理技術の一つとして実用され始めている。

ここで，既存コンクリート構造物の保全・補修を目的として表面含浸材を用いる場合，既存コンクリート構造物はすでに劣化要因物質が浸透している状態であると推測される。そのため，劣化要因物質が浸透した状態にあるコンクリートにおいて，表面含浸材による劣化の進行を抑制する効果について検討を行うことが必要であると考えられる。また，表面含浸材の性能は含浸深さに依存し，含浸深さが深くなるほど外部環境からの水分や劣化要因物質の浸透に対する抑制効果が高くなると考えられる。ここで，含浸深さはコンクリートの緻密性や含水状態に大きく影響を受ける事が知られている。しかしながら，実環境下に供用中である既存コンクリート構造物においてこれらの条件を制御することは困難である。よって，表面含浸材に要求される性能を満足するためには，コンクリートの緻密性および含水状態が含浸深さに与える影響を定量的に評価する必要性がある。

以上のことから本研究では，シラン系表面含浸材を用い，劣化の進行に対する表面含浸材の劣化抑制効果，水セメント比および表面水分率が含浸深さに及ぼす影響について評価を行った。また，含浸深さの定量的な評価方法についても検討を行った。

2. 使用した表面含浸材の性質および性能

2.1 表面含浸材の性質

本研究において使用したシラン系表面含浸材の成分および塗布量を**表－1** に示す。シラン系表面含浸材はアルキルアルコキシシランを成分とし，シラン濃度が 98.5%の含浸材 A，シラン濃度が 20%の含浸材 B の 2 種類を用いた。なお含浸材 A においては，塗布量が 450g/m^2（A-1）のケースと 350g/m^2（A-2）のケースの 2 水準を設けて評価を行った。

2.2 表面含浸座の基本的性能

(1) 評価方法概要

各表面含浸材において，JSCE-K571 に準拠する方法で吸水性，透水性，透湿度，および塩化物イオン浸透に対する抵抗性の 4 項目の評価を行った。

供試体の基盤は，**表－2** の配合条件と**表－3** の使用材料のコンクリートとモルタルを作製し，材齢 28 日目まで気中にて養生したものを用いた。なお供試体は，40℃の恒温室にて 2 日間乾燥させたのち気中に数日間静置して表面水分率（高周波容量式の水分計で測定）を 4.5±0.5%に調整した。その後，所定の含浸面に表面含浸材を塗布し，再び 28 日間気中にて静置したものを用いた。

表－1 シラン系表面含浸材の性質

表面含浸材	成分	成分濃度 (%)	塗布量 (g/m^2)
A-1	アルキルアルコキシシラン	98.5	450
A-2			350
B		20	450

*1（株）デーロス・ジャパン　(正会員)
*2（株）デーロス・ジャパン　修士（工学）　(正会員)
*3（株）デーロス・ジャパン　博士（工学）　(正会員)
*4 金沢工業大学　環境・建築学部環境土木工学科　准教授　博士（工学）　(正会員)

表－2 供試体 配合条件 （基本性能評価）

基盤	W/C (%)	s/a (%)	Gmax (mm)	単位量（kg/m^3）				Ad (g/m^3)	28 日圧縮強度 (N/mm^2)
				W	C	S	G		
コンクリート	55	46	15	168	305	836	982	1400	45.1
モルタル	50	-	-	246	491	1474	-	-	56.0

各表面含浸材の性能は，ブランク供試体（表面含浸材無塗布の供試体）の測定値に対する表面含浸材を塗布した供試体の測定値の比率により評価をした。

(2)各表面含浸材の基本的性能

図－1 および**図－2** に，各表面含浸材の吸水比，透水比，透湿比，および塩化物イオン浸透深さ比を示す。

含浸材 A および B を塗布することにより，吸水性，透水性，および塩化物イオン浸透に対する抵抗性は，ブランクに比べ約 9 割程度低下する結果が得られた。

塩化物イオン浸透深さ比においては，含浸材 A および B ともに 2～3%程度で，基盤や塗布量の違いによる顕著な差は現れなかった。

吸水比，透水比および透湿比においては，表面含浸材の種類，塗布量および基盤によって差が生じる結果となった。その差は，吸水比が最も小さく，透水比，透湿比の順に大きくなる結果となった。

吸水比は，含浸材 A においては塗布量の違いによる差は生じず，シラン成分が少ない含浸材 B に比べて吸水性が若干低くなった。また含浸材 A および B ともに，コンクリートを基盤に用いた場合，モルタルに比べ若干低くなる結果となった。

透水比は，吸水比と同様の傾向を示したが全体的に比率が 1～3%程度高くなり，吸水比よりも表面含浸材の違いによる性能の差が生じる結果となった。

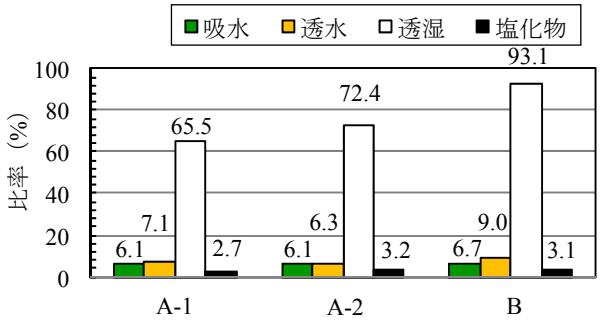
透湿比は，シラン成分が多い含浸材 A においては，含浸材 B に比べ透湿度が低くなった。なお塗布量の違いによる差が生じ，塗布量が多い A-1 が塗布量の少ない A-2 に比べ透湿度が低くなった。また含浸材 A および B ともに，モルタルに比べコンクリートを基盤に用いた場合，透湿度が小さくなる結果となった。

以上より本研究においては，表面含浸材の性能の差は，塩化物イオン浸透に対する抵抗性などに比べ，透湿度において大きく生じる傾向が認められた。このことから透湿度は，表面含浸材の性能の評価に有効であると思われる。

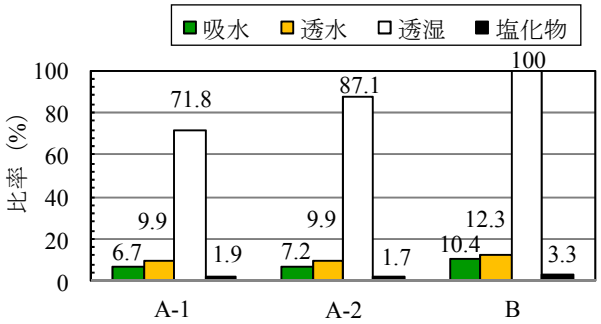
また基盤では，コンクリートに比べモルタルが表面含浸材の性能の差が現れやすく，表面含浸材の評価を行う上で有効であると思われる。なおその原因は，粗骨材の有無による影響であると推測される。

表－3 供試体作製に使用した材料

使用材料		記号
水	上水道水	W
セメント	普通ポルトランドセメント	C
細骨材	手取川産川砂	S
粗骨材	手取川産川砂利	G
AE 減水剤	リグニンスルホン酸化合物，ポリオール複合体	Ad



図－1 JSCE-K571 による性能の比率（コンクリート）



図－2 JSCE-K571 による性能の比率（モルタル）

3.中性化の進行抑制効果の評価

3.1 試験概要

表面含浸材の中性化の進行抑制効果は，中性化が認められない状態と，既存コンクリート構造物の状態を模擬した表層部分が中性化した状態の 2 ケースにて評価を行った。なお試験は JSCE-K571 に準拠し，温度 20±2℃，相対湿度 60±5%，CO_2 濃度 5±0.2%の条件にて促進中性化暴露を行った。

3.2 供試体概要

供試体の基盤は，**表－2** の配合条件と**表－3** の使用材料のコンクリートとモルタルを作製し，材齢 28 日目まで

気中にて養生したものを用いた。

なお，中性化が認められない状態の供試体は，養生が終了した基盤に表面含浸材を塗布したものを用いた。一方，表層部分が中性化した状態の供試体は，養生が終了した基盤を 14 日間促進中性化暴露し，コンクリートで 6mm 程度，モルタルで 4mm 程度を中性化させたのち，中性化部の表面に表面含浸材を塗布したものを用いた。

また供試体は，上記の 2 章と同様の方法で表面水分率の調整を行い，所定の含浸面に表面含浸材を塗布し 28 日間気中に静置したものを試験に用いた。

3.3 測定概要

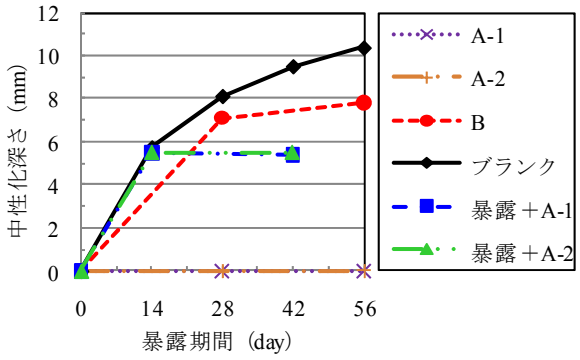
JSCE-K571 に準拠する方法で供試体の中性化深さを求め，ケースごとに平均化した値を用いて評価を行った。

3.4 試験結果および考察

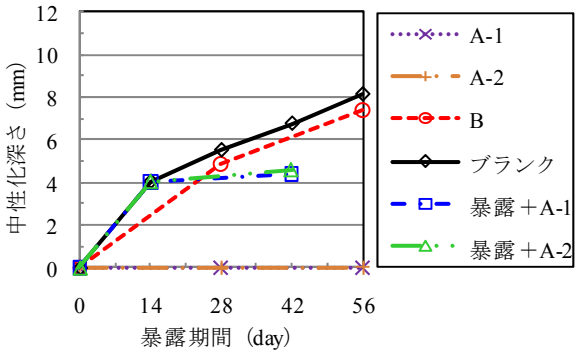
図－3 および**図－4** にコンクリートおよびモルタルの促進中性化暴露期間と中性化深さの関係を示す。

中性化が認められない状態のケースにおいては，コンクリートおよびモルタルともに，中性化の進行が抑制される結果が得られた。含浸材 B は中性化深さがブランク供試体の 80～90%程度となり，含浸材 A-1 および A-2 においては暴露 56 日目においても中性化の進行が確認されなかった（**写真－1**）。ここで，加藤ら [2] は，「水分の遮断性が向上することで，透湿度が低下するとともに，中性化抑制性能が向上したものと判断される。」と述べている。**図－1** および**図－2** を参照すると，含浸材 A および B は，透水比等の液体の水分の浸透に対する抑制効果はほぼ同等である。しかしながら透湿比においては，含浸材 B は 90%以上であるが，含浸材 A は B に比べ約 20～30%程度低い。このことから，中性化の進行抑制には，水分の浸透抵抗性だけでなく，透湿比が低めであり気体の移動に対しても抑制する表面含浸材が効果的であると考えられる。

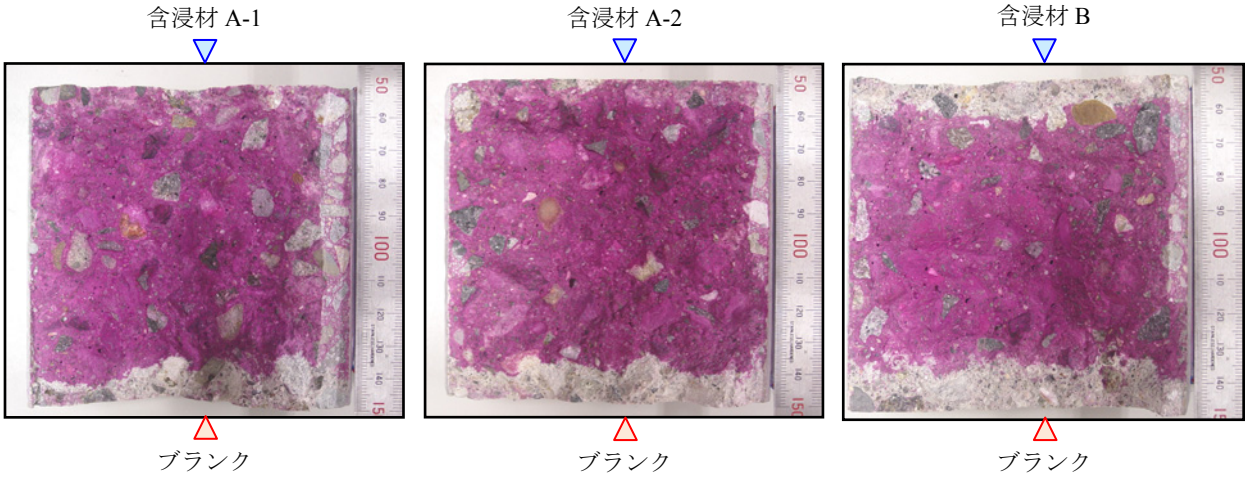
表層部分が中性化した状態のケースにおいては，含浸材 A のみにおいて評価を行った。表面含浸材塗布後に再暴露してから 28 日後（暴露 42 日目）においても，表面含浸材塗布前の 14 日目に測定した中性化深さとほぼ同等程度となり，中性化の進行が抑制される結果が得られた。これは，表面含浸材塗布前の中性化深さがコンクリートで 6mm 程度，モルタル 4 で mm 程度と表面含浸材の含浸深さ（含浸材 A の含浸深さは約 10mm 程度）より浅いことが原因であると考えられる。今後，中性化深さと表面含浸材の含浸深さとの関係については検討が必要であると考えられる。



図－3 中性化暴露期間と中性化深さ（コンクリート）



図－4 中性化暴露期間と中性化深さ（モルタル）



写真－1 中性化の暴露後の供試体の一例（コンクリート，中性化が認められない状態で暴露，暴露 56 日目）

表－4 供試体 配合条件（水セメント比および表面水分率の影響評価）

基盤	W/C (%)	s/a (%)	Gmax (mm)	単位量（kg/m^3）				Ad (g/m^3)	28 日圧縮強度 (N/mm^2)
				W	C	S	G		
コンクリート	35	46	15	135	385	820	980	1400	73.6
	45	46	15	152	337	820	980	1400	66.3
	50	46	15	158	316	820	980	1400	55.8
	55	46	15	165	300	820	980	1400	41.8
	60	46	15	175	291	820	980	1400	40.3
モルタル	50	-	-	246	491	1474	-	1400	38.2

表－5 表面水分率の調整のための水中浸漬時間

表面水分率（%）	水中浸漬時間
2.0±0.5	水中浸漬なし
3.5±0.5	20 分程度
4.5±0.5	1 時間程度
6.0±0.5	5 時間程度
8.0±0.5	24 時間程度

4.水セメント比・表面水分率と含浸深さの評価

4.1 試験概要

水セメント比および表面水分率を調整したコンクリートおよび 1 : 3 モルタルを用い，基盤の性状の変化と表面含浸材の含浸深さの関係について評価を行った。

水セメント比は，35%，45%，50%，55%，および 60%の 5 水準（ただし 1 : 3 モルタルにおいては 50%のみ）にて試験を行った。また表面水分率（直流電気抵抗式の水分計で測定）は，2.0±0.5%，3.5±0.5%，4.5±0.5%，6.0±0.5%，および 8.0±0.5%の 5 水準（ただし，水セメント比 35%および 45%のコンクリートにおいては表面水分率 8.0±0.5%を除く）にて試験を行った。

4.2 供試体概要

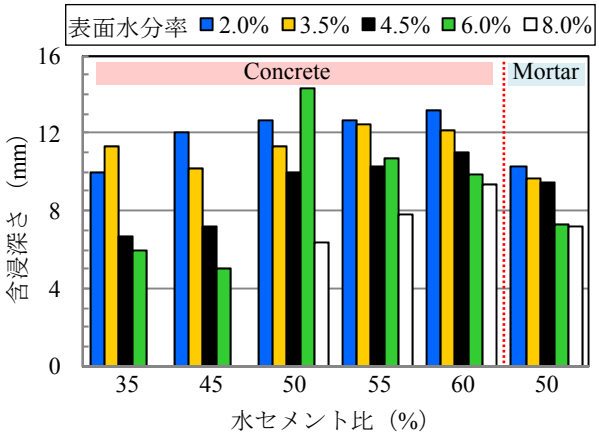
供試体の基盤は，**表－3** と同一の材料および**表－4** に示す配合条件にて，40×50×100mm の寸法で各ケース 3 体ずつ作製し，材齢 28 日目まで気中にて養生したものを用いた。

また供試体の表面水分率の調整は，50℃の恒温室にて 3 日間乾燥させたのち気中に 10 時間程度静置し，その後に**表－5** に示す時間水中に浸漬する方法で行った。

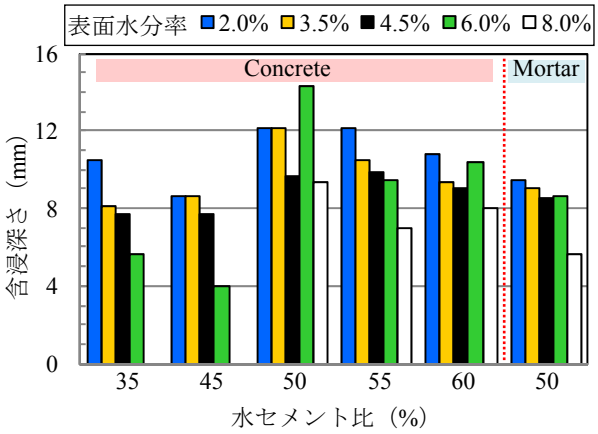
なお供試体は，表面水分率の調整後打設面（50×100mm）に表面含浸材を塗布し，28 日間気中にて静置したものを試験に用いた。

4.3 測定概要

表面含浸材の含浸深さは，供試体の含浸面を割裂にて 2 分割したのち，約 1 分間上水道水に浸漬し割裂面の撥水および吸水防止層の深さを求め，これを含浸深さとした。含浸深さは，供試体の中央と中央から両側へ 10mm ずらした位置の計 3 か所を 0.5mm 単位でノギスにて測定し，ケースごとに平均化した値を採用した。



図－5 水セメント比・表面水分率と含浸深さ（A-1）



図－6 水セメント比・表面水分率と含浸深さ（A-2）

4.4 試験結果および考察

図－5 および**図－6** に水セメント比および表面水分率と含浸材 A-1 および A-2 の含浸深さを示す。

全般的にばらつきが見られるが，表面水分率は低いほど，水セメント比は高いほど含浸深さが深くなる傾向となった。含浸材 A-1 および A-2 ともに，水セメント比 50～60%の範囲では，表面水分率 6%以下の場合，含浸深さ

が約 10mm 程度，表面水分率 8%の場合は，含浸深さが約 8mm 程度であった。しかしながら，水セメント比 35～45%の範囲では，表面水分率 3.5%以下において含浸深さが約 8mm 程度となり，表面水分率 4.5%以上の場合においては，含浸深さが約 5mm 前後となった。また，水セメント比ごとに表面水分率と含浸深さとの関係を比較すると，水セメント比が 50%以上になると表面水分率の違いによる含浸深さの差は小さくなった。水セメント比 60 %ではその差が最も小さくなり，表面水分率が 2～8%の範囲においては 2mm 程度しか差が生じないという結果が得られた。

表面含浸材の塗布量の違いにおいて比較すると，水セメント比 35～45%の範囲において，表面水分率が 3.5%以下の乾燥状態ならば，含浸材 A-2 に比べて A-1 において含浸深さが若干深くなる傾向が認められた。しかしながら，それ以外においては表面含浸材の塗布量の差（含浸材 A-1 の 450g/m^2 と A-2 の 350g/m^2 の 100g/m^2 の違い）による含浸深さへの影響が認められない結果となった。

水セメント比 50%のコンクリートとモルタルとの基盤の違いにおいては，全体的にコンクリートに比べモルタルにおける含浸深さが若干浅くなる結果となった。

なお含浸材 A-1 および A-2 ともに，水セメント比 50%，表面水分率 6.0%のコンクリート供試体の含浸深さが，14mm 以上と他のケースに比べ深い値が示されたが，明確な理由は不明であり他の実験結果などを踏まえて評価する必要があると考えられる。

5.含浸深さ評価方法に関する検討

5.1 試験概要

表面含浸材の含浸深さと含浸層の撥水および吸水防止効果の定量的評価を行うため，塩分を混入した基盤に表面含浸材を塗布し，含浸深さごとに採取した試料の塩分溶出量から評価を行った。

なおこの試験においては，比較のためケイ酸塩系の含浸材 C（**表－6**）も評価を行った。

5.2 供試体概要

供試体の基盤は，内在塩分として塩化物イオン量換算で 10kg/m^3 の NaCl を外割にて混入したコンクリートおよびモルタルを，**表－3** と同一の材料および**表－7** に示す配合条件にて作製した。基盤の寸法は，300×150×100mm とし，材齢 28 日目まで気中にて養生した。

また供試体は，上記の 2 章と同様の方法で表面水分率の調整を行い，表面含浸材を打設面（300×150mm）に塗布し 28 日間気中に静置したものを試験に用いた。

表面含浸材塗布後 28 日以降に，含浸面において直径が 43mm，深さが 100mm の円柱状のコアを削孔した（**図－7**）。削孔した円柱供試体は，含浸深さ方向に 7，17，27，37，47，57，67 および 77mm の位置で湿式カッターにて切断し，直径が 43mm，厚さが 7mm の測定用試料片とした。

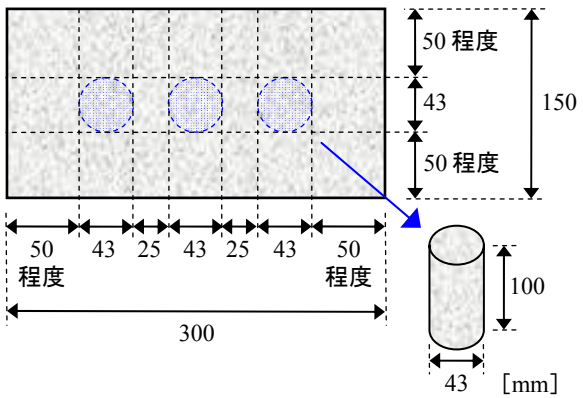
5.3 測定概要

塩分溶出の測定は，採取した試料を 20ml の蒸留水（20℃）に 72 時間浸漬し，水中に溶出した塩化物イオン量を電位差滴定法により測定し，塩分溶出量を求めた。さらに，ブランク供試体（表面含浸材無塗布の供試体）の塩分溶出量に対する表面含浸材を塗布した供試体の塩分溶出量の比率（これを塩分溶出率とする）を求め，評価した。

5.4 試験結果および考察

図－8 および**図－9** に，各表面含浸材を塗布した供試体の含浸深さ方向における塩分溶出率を示す。

含浸材 A-1 および A-2 における塩分溶出率は，深さ 0～7mm では 15%程度，深さ 10～17mm では 50%程度，



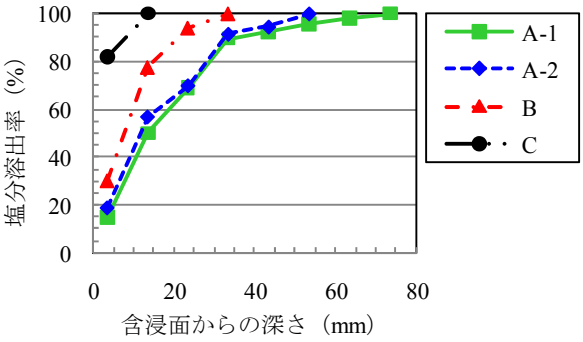
図－7　円柱供試体と削孔の位置の概略図

表－6 ケイ酸系表面含浸材の性質

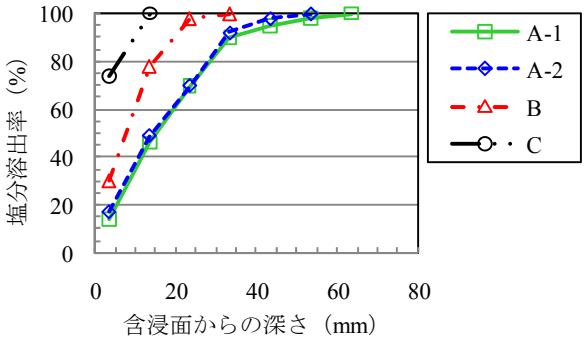
表面含浸材	成分	成分濃度 (%)	塗布量 (g/m^2)
C	ケイ酸塩	80	200

表－7 供試体 配合条件 （塩分溶出量からの含浸深さの定量的評価）

基盤	W/C (%)	s/a (%)	Gmax (mm)	単位量（kg/m^3）				Ad (g/m^3)	Cl$^-$ (kg/m^3)	28 日圧縮強度 (N/mm^2)
				W	C	S	G			
コンクリート	55	46	15	168	305	836	982	1400	10	38.5
モルタル	50	-	-	246	491	1474	-	-	10	45.4



図－8 含浸深さ方向への塩分溶出率（コンクリート）



図－9 含浸深さ方向への塩分溶出率（モルタル）

深さ 20～27mm では 70%程度，深さ 30～37mm では 90%程度であった。

含浸材 B においては，深さ 0～7mm では 30%程度，深さ 10～17mm では 80%程度，深さ 20～27mm では 90%程度であった。

含浸材 C では，深さ 0～7mm では塩分溶出が 20%程度抑制されたが，深さ 10mm 以上では塩分溶出量がブランクと同等となった。

塩分溶出の抑制が確認された最大の深さは，含浸材 A-1 は 70mm 程度，含浸材 A-2 は 55mm 程度，含浸材 B は 30mm 程度，含浸材 C は 10mm 以下となった。また含浸材 A の塗布量による差は，深さ 40mm 以上で見られる結果となり，塗布量が多い含浸材 A-1 の含浸深さが含浸材 A-2 に比べ若干深くなる傾向が認められた。

なお，第 4 章の**図－5** および**図－6** における含浸深さは，撥水および吸水防止が確認される深さを目視により評価を行った結果であり，含浸深さは 10mm 程度であった。このことから，目視で観察できない深さ位置においても表面含浸材の成分が浸透しており，含浸層が形成されている可能性が認められた。

以上の方法より，目視で評価することができない含浸深さおよび含浸層の深さごとにおける水系物質の進入（浸透）抑制効果についても定量的に評価することが可能であると考えられる。

なお，含浸性や含浸層の水系物質の進入（浸透）抑制効果に優れている表面含浸材を塗布した場合，外部からの塩化物イオンの進入抑制に加え，含浸深さ内での内在塩分の移動も抑制することが可能であると考えられる。また，対象構造物の劣化状況と表面含浸材の含浸層内への劣化要因物質の進入（移動）抑制性能との関係を明確化すことで，より効果的な既存コンクリート構造物の保全・補修設計が可能であると考えられる。

6.まとめ

シラン系表面含浸材の性能評価として，本研究にて行った結果を以下にまとめる。

(1) 表面含浸材の性能の差は，塩化物イオン浸透に対する抵抗性などに比べて，透湿度において大きくなる傾向が認められた。基盤の種類は，コンクリートに比べモルタルを用いた場合において表面含浸材の性能の差が表れやすい傾向が認められた。

(2) 吸水性および透水性等の水分の浸透の抵抗性に加え，透湿度が低い表面含浸材ほど中性化抑制効果が高くなった。また，表層部分が中性化した状態において表面含浸材を塗布した場合は，中性化の進行が抑制される結果が得られた。

(3) 表面水分率が低いほど，また水セメント比が高いほど，含浸深さが深くなる傾向が認められた。なお表面水分率の影響は，水セメント比が 50%以上になると表面水分率の違いによる含浸深さへの影響が小さくなり，水セメント比 60%では，表面水分率が 2～8%に増加しても 2mm 程度の差しか生じない結果となった。

(4) 塩分を混入したコンクリート及びモルタルを用い，含浸深さ方向に一定の深さ間隔で採取した試料片の塩分溶出率を評価することで，目視で評価出来ない領域での含浸深さならびに含浸層の深さごとの水系物質の進入（浸透）抑制効果についても定量的な評価を行うことができた。

(5) 含浸性能および含浸層の水系物質の進入（浸透）抑制効果に優れている表面含浸材を塗布した場合，外部からの塩化物イオンの進入抑制に加え，含浸深さ内での内在塩分の移動も抑制可能であることが分かった。

参考文献

1) 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

2) 加藤 淳司，田中 斉，沖野 善佳：中性化抑制機能を付与したシラン系表面含浸材の性能評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.1，pp.799-804,2007