論文　表面含浸材の耐久性向上効果に関する検討

澤田　巧[*1]・福手　勤[*2]・内藤　英晴[*3]・小笠原　哲也[*4]

要旨：本研究では，表面含浸材によるコンクリート構造物の耐久性向上効果に関する検討として，市販されているものを含め代表的な表面含浸材を取り上げ，劣化因子の侵入抵抗性に関する評価を行った。その結果，全ての含浸材において吸水抑制効果，塩化物イオン浸透抑制効果が確認できた。次に，電気泳動試験により遮塩性能の評価を行った。その結果，全ての含浸材において実効拡散係数の低減効果が認められ，塩水浸漬による試験では見られなかった含浸材間の性能差が確認できた。更にフィックの拡散式に基づいた塩化物イオン浸透予測式を用いて，表面含浸材の耐久性向上効果の試算を行った。

キーワード：表面含浸材，耐久性，塩化物イオン，電気泳動，拡散係数

1. はじめに

表面保護工法のうち表面含浸工法は塗布後も外観の変化がほとんどなく，コンクリート構造物表面の目視による診断も塗布前と変わらず行うことが出来る工法である。また，表層部のコンクリートに含浸することで効果を発揮する工法であるため，表層部自体の欠如やはく離，はく落がなければ，表面被覆のように材料のはがれがない。更に表面被覆工よりも比較的安価な工法であるため多くの構造物に適用しやすい工法であり，実際にその施工件数も増加してきている。表面含浸材の一般的性能については，土木学会「表面保護工法設計施工指針（案）」[1)]に示されているが，現在では，表面含浸材を施したコンクリートの耐久性や実環境下における研究も進んでおり，情報の蓄積が進んでいる状況にある[2)]。

本研究では特に港湾構造物や寒冷地の道路といった，塩害環境下におかれる構造物に着目し，表面含浸材を適用した場合の耐久性向上効果に関する検討を行った。

コンクリート構造物の塩害劣化因子は塩化物イオン，酸素，水であり，塩害劣化を抑制するには，それらのコンクリート中への侵入やコンクリート中での移動速度を抑制する必要がある。塩害対策として表面含浸材を適用する場合，主に塩化物イオンと水の供給や移動を抑制することが目的となる。そこで，本研究では，JSCE-K 571「表面含浸材の試験方法（案）」で規定される試験により，表面含浸材を塗布した時の吸水抑制効果，塩分浸透抑制効果について実験的検討を行うこととした。

また，塩害環境下におかれる構造物の耐久性を照査する場合，フィックの拡散に関する第 2 法則を用いて，コンクリート中の塩化物イオン浸透予測を行うことが一般的である。

本研究では，塩害劣化に対する耐久性向上効果を定量的に評価する方法として，JSCE-G 571「電気泳動によるコンクリート中の塩化物イオンの実効拡散係数試験方法（案）」で規定される電気泳動試験により実効拡散係数を測定し，その実効拡散係数を見掛けの拡散係数へ変換して塩化物イオン浸透予測を行うことを試みた。

2. 表面含浸材の試験方法

2.1 実験概要

含浸材の基本性能を把握するために JSCE-K 571「表面含浸材の試験方法（案）」に規定されている含浸深さ試験，吸水率試験および塩化物イオン浸透に対する抵抗性試験を実施した。本研究で使用した含浸材の種類を**表－1** に示す。なお，含浸材 A，B，C はシラン系であり，その含浸部に撥水性を付与する材料である。含浸材 E はけい酸ナトリウム系の材料であり，その含浸部を緻密化する材料である。また，含浸材 D は，けい酸ナトリウムを主成分とする 1 液目を塗布し，その翌日にアルコキシシロキサンを主成分とする 2 液目を塗布する，けい酸塩系とシラン系両方の効果を保有する 2 液型の含浸材である。

表－1　含浸材の種類

銘柄	主成分	有効成分濃度	塗布量	塗布回数
A	シラン・シロキサン	80%	200g/m^2	1
B	アルコキシシラン	98%	250g/m^2	2
C	アルコキシシロキサン	50%	200g/m^2	2
D	けい酸ナトリウム ＋ アルコキシシロキサン	23% ＋ 50%	150g/m^2 ＋ 100g/m^2	2 ＋ 1
E	けい酸ナトリウム	不明	200g/m^2	2

*1 五洋建設（株）　技術研究所耐震構造グループ研究員　(正会員)
*2 東洋大学　理工学部都市環境デザイン学科教授　工博　(正会員)
*3 五洋建設（株）　技術研究所耐震構造グループ部長　工博　(正会員)
*4 五洋建設（株）　技術研究所耐震構造グループ課長　(正会員)

2.2 供試体の作製

試験用基板の材料は水セメント比 50%，砂セメント比 3 のモルタルとし，それを所定の寸法に切り出すことで供試体を作製した。使用した材料を**表－2** に示す。

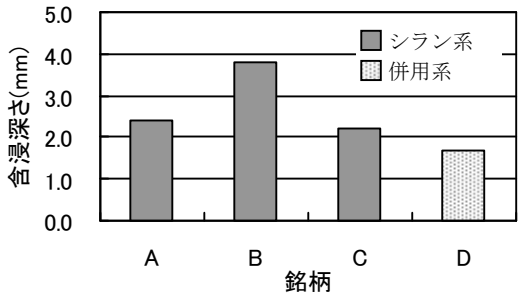
供試体の寸法，養生，含浸材の塗布等の供試体の作製方法に関しては，JSCE-K 571 で規定される各試験方法に基づいて行った。含浸材の塗布は各メーカー推奨の方法で刷毛を用いて行った。塗布方向は塗布面を水平にし，鉛直下向きとした。ここで含浸材 D に限っては，塗布作業に 2 日間要する材料であるため，塗布後から試験までの養生期間は，他の材料よりも 1 日短縮されている。

表－2　使用材料

材料	摘要
水	上水道水，密度:1.0g/cm^3
セメント	普通ポルトランドセメント，密度:3.16g/cm^3
砂	標準砂 JIS R 5201 10.2

2.3 含浸深さ試験

撥水層が形成されない，けい酸塩系の含浸材 E を除く 4 銘柄に対し JSCE-K571　6.2 に規定されている含浸深さ試験を実施した。供試体の割裂面における撥水層の厚さを測定することで得られた試験結果を**図－1** に示す。

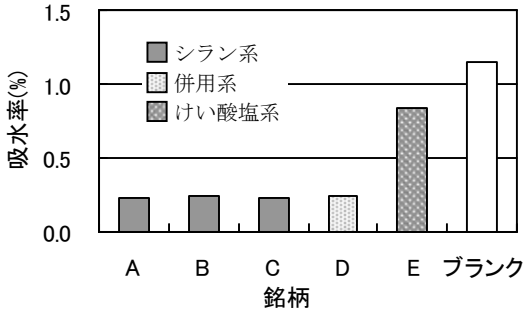


図－1　含浸深さ試験結果

含浸深さは含浸材 B で最も大きく，含浸材 D で最も小さかった。その理由としては，含浸材 B のみ主成分が分子量の小さいシランモノマーであったこと，塗布量が A から C の中で最も多いことが挙げられる。含浸材 D で含浸深さが最も小さくなった理由としては，含浸材 D の 1 液目であるけい酸塩系含浸材により表層部の組織が緻密化されたため 2 液目のシラン系含浸材が浸透しにくかったこと，2 液目のシラン系含浸材の塗布量が 100g/m^2 と他の含浸材に比べ少なかったことが挙げられる。含浸材 A と C はほぼ同等の含浸深さであった。

2.4 吸水率試験

表－1 に示す 5 銘柄を塗布した供試体，および含浸材を塗布していないブランク供試体に対し JSCE-K571 6.4 に規定されている吸水率試験を実施した。7 日間の上水浸漬前後に重量を測定することで得られた吸水率試験結果を**図－2** に示す。

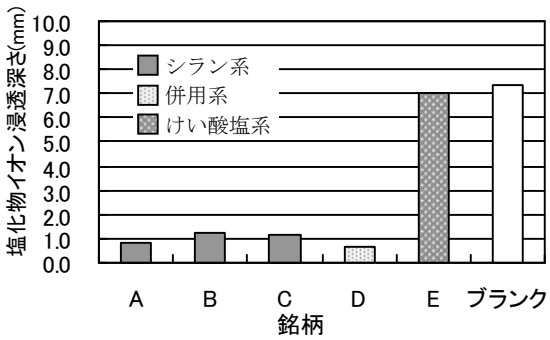


図－2　吸水率試験結果

吸水率試験結果はシラン系含浸材 A から C，および併用系含浸材 D でほぼ同等の高い吸水抑制効果が確認できた。含浸材の共通試験結果 [1)]で示されるように，一般的にけい酸塩系含浸材は，本試験方法で測定される吸水抑制効果は小さいため，併用系含浸材 D の吸水抑制効果の殆どは 2 液目のシラン系含浸材で発揮されていると考えられる。けい酸塩系含浸材 E においても A から D に比べて劣るものの吸水抑制効果が確認できた。

2.5 塩化物イオン浸透に対する抵抗性試験

表－1 に示す 5 銘柄を塗布した供試体，および含浸材を塗布していないブランク供試体に対し JSCE-K 571 6.7 に規定されている塩化物イオン浸透に対する抵抗性試験を実施した。3%塩化ナトリウム水溶液中に 63 日間浸漬した場合の塩化物イオン浸透深さを**図－3** に示す。



図－3　塩化物イオン浸透試験結果

塩化物イオン浸透に対する抵抗性試験の結果はシラン系を含む含浸材 A から D で高い抵抗性が確認できた。A から D の浸透深さは全て 1mm 前後であり，含浸材間で有意な差は確認できず，本試験で確認できる塩化物イオン浸透抑制効果は同程度と言える。一方けい酸塩系の含浸材 E ではブランクより若干浸透深さは小さかったものの，ブランクとほぼ同等であり，明確な塩化物イオン浸透抑制効果は確認できなかった。ここで，含浸材 A から D の浸透深さ 1mm 前後とは浸透部が撥水層中に位置するため，測定が困難であった。A から D における塩化

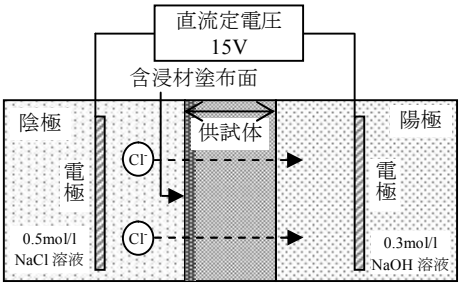
物イオン浸透抑制効果の差を判断するには，撥水層を超えて塩化物イオン浸透深さが測定できるよう，さらに長期間浸漬することが必要と考えられる。

3. 電気泳動試験

3.1 実験概要

竹田らの研究 [3]を参考に，含浸材無塗布のブランク供試体，および**表－1** に示す 5 銘柄の表面含浸材を塗布した供試体を作製し，JSCE-G 571「電気泳動によるコンクリート中の塩化物イオンの実効拡散係数試験方法」に基づき塩化物イオンの実効拡散係数を測定した。

電気泳動試験は，直径 100mm，厚さ 50mm の円盤型コンクリート供試体を挟んで左右に塩化ナトリウム水溶液を満たした陰極セルと水酸化ナトリウム水溶液を満たした陽極セルを配置し，15V の直流定電圧を印加することで塩化物イオンを電気泳動し，定常状態における塩化物イオンの移動流束から実効拡散係数を算定する試験方法である [4]。ここでは円盤型コンクリート供試体の片面に含浸材を塗布し，陰極側に塗布面が位置するように電気泳動試験装置に供試体を組込み，試験を行った。その後，陽極側の塩化物イオン濃度の増加割合が一定になるまで測定を継続した。電気泳動試験装置を**図－4** に，試験状況写真を**図－5** に示す。



図－4　電気泳動試験装置

図－5　電気泳動試験状況

3.2 供試体の作製

供試体の作製に用いたコンクリートは水セメント比 55%とし，セメントには Case N では普通ポルトランドセメント，Case BB では高炉セメント B 種を用いて作製した。使用材料を**表－3** に，コンクリートの配合を**表－4** に示す。供試体の個数は各銘柄，各ケースにつき 3 体とした。直径 100mm，高さが 200mm の円柱供試体を作製した後に 1 本につき，2 体ずつとなるよう厚さが 50mm の円盤型コンクリート供試体を中央部から切り出した。供試体の作製工程は，打設後材齢 3 日の脱型まで封緘養生とし，その後材齢 28 日まで水中養生を行った。材齢 28 日で所定の寸法に切り出した後，2 週間の気中養生を行い各メーカー推奨の方法で刷毛を用いて下向きに含浸材の塗布を行った。その後真空飽和処理を行うまで気中養生を行い，電気泳動試験装置に供試体を組込み電気泳動試験を開始した。なお，含浸材塗布後の気中養生期間は試験装置の個数の関係上，各銘柄，各ケースにつき 3 体用意し，供試体 1 体毎に 2 週，4 週，6 週と設定した。

表－3　使用材料

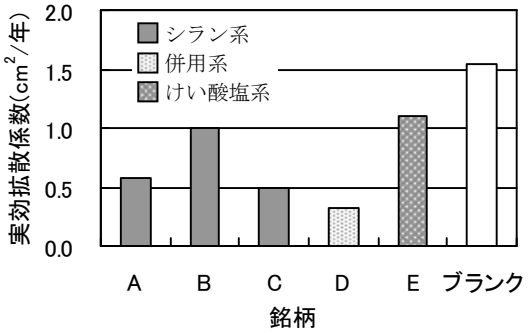
項目	記号	摘要
水	W	上水道水，密度：1.0mg/cm^3
セメント	C	Case N　普通ポルトランドセメント，密度：3.16mg/cm^3 Case BB　高炉セメント B 種，密度：3.04mg/cm^3
細骨材 1	S1	川越市増形産砂，表乾密度 2.60g/cm^3，粗粒率 2.80，吸水率 1.35%
細骨材 2	S2	香取市西和田産砂，表乾密度 2.58g/cm^3，粗粒率 1.80，吸水率 1.88%
粗骨材	G	飯能市坂石産砕石，表乾密度 2.60g/cm^3，実績率 59.0，吸水率 0.99%
混和剤	Ad	AE 減水剤標準型 I 種(変性リグニンスルホン酸系)

表－4　配合表

Case	Gmax (mm)	スランプ (cm)	W/C (%)	空気量 (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m^3)					
						W	C	S1	S2	G	Ad
N	20	12	55	4.5	45.8	167	304	575	248	990	3.040
BB	20	12	55	4.5	45.7	165	300	575	245	990	3.000

3.3 電気泳動試験結果（Case N）

Case N の試験結果を**図－6** に示す。各銘柄の値は供試体 3 体の平均である。

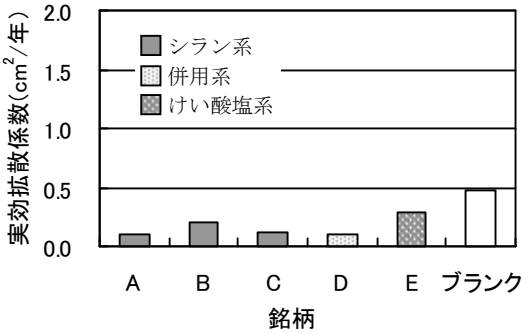


図－6　電気泳動試験結果　（Case N）

電気泳動試験により測定された実効拡散係数は全ての銘柄でブランク供試体よりも小さくなった。塩化物イオン浸透に対する抵抗性試験では含浸材 E は浸透抑制効果が確認できなかったが，ここでは吸水率試験結果と同等の実効拡散係数の低減効果が確認できた。吸水率試験や塩化物イオン浸透に対する抵抗性試験では確認できなかった含浸材 A から D においても含浸材間で実効拡散係数の明確な差が確認できた。含浸材 B より，A，C，D でその低減効果に優れていることが確認できた。塩化物イオンの移動が定常状態になるまでの期間も同様の傾向であり，実効拡散係数が小さい程，定常状態になるまでに期間を要した。なお，定常状態になるまでに要した期間は，最短のブランクで約 5 日間，最長の D で約 9 日間であった。含浸材塗布後の気中養生期間の差が原因と考えられるような供試体 1 体毎の試験結果の差は確認できなかった。

3.4 電気泳動試験結果（Case BB）

Case BB の試験結果を**図－7** に示す。各銘柄の値は供試体 3 体の平均である。



図－7　電気泳動試験結果　（Case BB）

セメントに高炉セメント B 種を用いた場合，ブランクを含む全ての供試体で普通ポルトランドセメントを用いた場合に比べ実効拡散係数が大幅に低下した。また，Case N と同様に，ここでも含浸材 E で実効拡散係数低減効果が確認でき，含浸材 A から D の間で実効拡散係数の明確な差が確認できた。含浸材 B に比べ A，C，D で高い実効拡散係数の低減効果が確認できた。塩化物イオンの移動が定常状態になるまでに要した期間は，凡そではあるが，測定された実効拡散係数が小さい程，長いという傾向が確認できた。なお，定常状態になるまでに要した期間は，最短のブランクで約 7 日間，最長の含浸材 C で約 14 日間であった。含浸材塗布後の気中養生期間の差が原因と考えられるような供試体 1 体毎の試験結果の差は確認できなかった。

4. 耐久性向上効果の試算

4.1 試算方法

塩害環境下におかれる構造物に含浸材を塗布した場合の耐久性を照査する方法の一例として，ここでは電気泳動試験で得られた実効拡散係数から推定した見掛けの拡散係数を用いて，コンクリート中の塩化物イオン浸透予測を行うことを試みた。耐久性向上効果は塩害環境下におかれる鉄筋コンクリート構造物に塗布した場合を想定し，鉄筋位置における塩化物イオン量が発錆限界値に達するまでの期間を算定することで評価を行った。発錆限界値は一般に用いられる 1.2kg/m^3 と設定した。その他，試算条件一覧を**表－5** に示す。

表－5　試算条件一覧

項目	設定値
水セメント比	55%
セメントの種類	高炉セメント B 種
鉄筋かぶり	70mm
表面塩化物イオン濃度	13.0kg/m^3
発錆限界塩化物イオン濃度	1.2kg/m^3

一般的に表面含浸材を適用していないような一様なコンクリート中の，t 年後における表面から深さ x(cm) における塩化物イオン量 C(kg/m^3)は，フィックの拡散に関する第 2 法則の解である式(1)で表わすことができる。

表面含浸材を適用した場合は，遠藤らの研究 [5)]では EPMA 画像から求めた塩化物イオンの浸透深さと塩化物イオン浸透試験により測定された塩化物イオン量から吸水抑制層における見掛けの拡散係数を算出することで，塩化物イオン量の浸透予測を行っている。しかし，本研究では鉄筋位置における塩化物イオン量のみを予測することを目的としたため，より簡易に塩化物イオンの浸透予測を行うために，表面から，電気泳動試験で使用した供試体の厚さである 50mm の範囲と，それ以深の範囲で見掛けの拡散係数を区分して浸透予測を行った。

表面含浸材を適用した場合，含浸材の影響がある表面から 50mm までの塩化物イオンの見掛けの拡散係数を D_s(cm^2/年)，含浸材の影響がない 50mm 以深の見掛けの拡散係数を D_c(cm^2/年)としたとき，表面から 50mm 以深のコンクリート中の，t 年後における表面から深さ x(cm)における塩化物イオン量 C(kg/m^3)は，式(2)で表わすことができる [5]。また，その時の塩化物イオン浸透予測モデルを**図－8** に示す。

・含浸材の影響がない場合

$$C(x,t) = C_0\left(1 - erf\left(\frac{x}{2\sqrt{D_c \cdot t}}\right)\right) \quad (1)$$

・含浸材を適用した場合（50mm≦x）

$$C(x,t) = C_0\left(1 - erf\left(\frac{1}{2\sqrt{t}}\left(\frac{5}{\sqrt{D_s}} + \frac{(x-5)}{\sqrt{D_c}}\right)\right)\right) \quad (2)$$

ここに，

C(x,t)：t 年後，深さ x の塩化物イオン量（kg/m^3）

C_0：表面塩化物イオン量（kg/m^3）

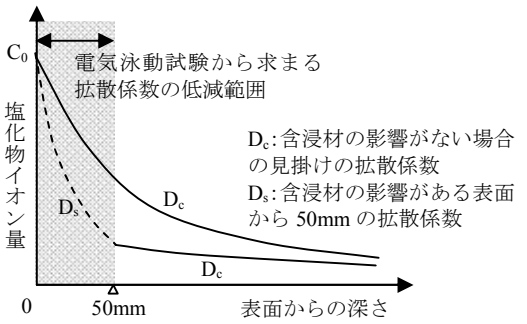
x：コンクリート表面からの距離（cm）

t：経過年数

erf：誤差関数

D_c：含浸材の影響がない場合の見掛けの拡散係数（cm^2/年）

D_s：含浸材を適用した場合の表面から 50mm の範囲における見掛けの拡散係数（cm^2/年）



図－8　塩化物イオン浸透予測モデル

4.2 拡散係数の設定

電気泳動試験により測定した実効拡散係数を塩化物イオン浸透予測で使用するには見掛けの拡散係数へ変換する必要がある。拡散係数の変換には JSCE-G 571　付属書（参考）「電気泳動試験による実効拡散係数を用いた見掛けの拡散係数計算方法」で示される方法もあるが，本方法により求められた見掛けの拡散係数と実構造物における見掛けの拡散係数とは必ずしも一致しないとある [6]。そのため本研究では，まずブランク供試体の値として，含浸材の影響がない場合の見掛けの拡散係数を広く用いられている式(3)により求めた。次に，電気泳動で得られた各含浸材の結果よりブランク供試体に対する実効拡散係数の低減率を計算した。更に，式(3)により求めた値に，含浸材それぞれの低減率を用いて換算することで，含浸材を適用した場合の，表面から 50mm の範囲における見掛けの拡散係数として設定した。見掛けの拡散係数算定結果を**表－6** に示す。

$$Log_{10}D = -3.0\left(\frac{W}{C}\right)^2 + 5.4\left(\frac{W}{C}\right) - 2.2 \quad (3)$$

ここに，

D：塩化物イオンの見掛けの拡散係数(cm^2/年)

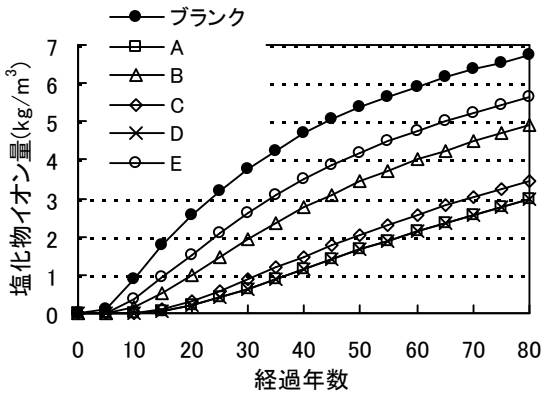
W/C：水セメント比

表－6　拡散係数算定結果

銘柄	実効拡散係数 (cm^2/年)	低減率	見掛けの拡散係数 (cm^2/年)
ブランク	0.48	1.00	0.73
A	0.10	0.79	0.15
B	0.21	0.56	0.32
C	0.12	0.75	0.18
D	0.10	0.79	0.15
E	0.29	0.40	0.44

4.3 試算結果

以上の仮定より求められた，含浸材を適用しない場合，および各種含浸材を適用した場合の，表面から 70mm の鉄筋位置における塩化物イオン量の試算結果を**図－9** に示す。



図－9　鉄筋位置における塩化物イオン量

含浸材無塗布の場合では鉄筋位置における塩化物イオン量が発錆限界である 1.2kg/m^3 に達する時期が 12 年目であるのに対し，各種含浸材を塗布することで，含浸材 A で 42 年目，B で 23 年目，C で 36 年目，D で 42 年目，E で 18 年目となり，大幅に耐久性を向上できるという試算結果となった。

5. まとめ

本研究で行った JSCE-K 571 に規定される含浸深さ試験，吸水率試験，塩化物イオン浸透に対する抵抗性試験，JSCE-G 571 に規定される電気泳動試験により測定された実効拡散係数，また電気泳動試験結果から得られた低減率により換算した見掛けの拡散係数を用いた塩化物イオン浸透の試算結果を以下にまとめる。

(1) 含浸深さ試験では主成分がシランモノマーの含浸材 B で高い浸透深さが確認できた。

(2) 吸水率試験ではシラン系を含む含浸材で高い抑制率が確認でき，けい酸塩系含浸材であっても明確な抑制率が確認できた。一方，含浸深さとの関連性は確認できなかった。

(3) 塩化物イオン浸透に対する抵抗性試験では，シラン系を含む含浸材で高い浸透抑制効果が確認できたが，塩化物イオンの浸透部が撥水層中に位置していたため測定が困難であった。シラン系を含む含浸材間の塩化物イオン浸透抑制効果の差を確認するには，塩化物イオンが撥水層より深く浸透するまで，さらに長期間浸漬することが望ましい。一方，けい酸塩系の含浸材では塩化物イオン浸透抑制効果が確認できなかった。

(4) 電気泳動試験では，セメントに高炉セメント B 種を用いたケースで拡散係数が小さく測定された。含浸材間の差は普通ポルトランドセメント，高炉 B 種の場合いずれにおいても同様の傾向であった。塩化物イオン浸透に対する抵抗性試験では確認できなかったシラン系を含む含浸材間においても拡散係数低減効果の差が確認でき，含浸材 B に対し，A，C，D の優位性が確認できた。

(5) 含浸材浸透部を含む表面から 50mm の範囲とそれ以深の非浸透部に見掛けの拡散係数をそれぞれ設定することで，簡易的に鉄筋位置における塩化物イオン量の試算を行った。材料自体の劣化がないという仮定であり，試算結果の妥当性の検証は行っていないものの，電気泳動試験結果を表面含浸材の塩害に対する耐久性向上効果として評価できる可能性を示すことができた。

今後は，曝露試験や長期間の塩水浸漬による塩化物イオン浸透試験から，本研究で行った塩化物イオン量の試算結果の妥当性を検証することが求められる。芦澤らの研究 [7]でシラン系含浸材では数年経過しても塩化物イオンの侵入が抑制されているという報告があるものの，今回の試算では材料自体の劣化を考慮しなかったため，材料自体の劣化を考慮した試算を行うことも必要である。そこでは，けい酸塩系含浸材は長期的に反応が進行し緻密化することが考えられるため，今回確認できなかったけい酸塩系含浸材の優位性が確認できる可能性がある。また，同じシラン系含浸材でも A，C と B で実効拡散係数に明確な差が確認できたため，塩害抑制を目的にシラン系含浸材を選定する際には，注意が必要である。以上を踏まえた上で，表面含浸材を適用した場合の耐久性の照査を定量的に行う方法を確立することが望まれる。

参考文献

1) 土木学会：表面含浸工法　設計施工指針（案）コンクリートライブラリー119，2005.4

2) 例えば，土木学会：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，コンクリート技術シリーズ 68，2006.4

3) 竹田　宣典，安田　敏夫，平田　隆祥：電気泳動試験による表面保護材の塩化物イオン遮断性の評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，2006

4) 土木学会：2007 年制定コンクリート標準示方書【規準編】土木学会規準および関連規準，pp277-284，2007.5

5) 遠藤　裕丈，田口　史雄，小野　俊博，登　靖博：シラン系表面含浸材で保護されたコンクリートの塩化物イオン浸透予測－曝露試験 2 年目の評価－，寒地土木研究所月報，No.662，2008.7

6) 土木学会：コンクリートの塩化物イオン拡散係数試験方法の制定と規準化が望まれる試験方法の動向，コンクリート技術シリーズ 55，2003.9

7) 芦澤　良一ほか：浸透性吸水防止材の長期的な耐久性に関する研究，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 10 巻，pp.393-398，2010.10