

報告 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

竹田 宣典^{*1}・安田 敏夫^{*2}・平田 隆祥^{*3}

要旨：表面保護材の塩化物イオン遮断性を評価する方法として、電気泳動試験の適用性について検討を行った。表面含浸材や表面被覆材を塗布したコンクリートの電気泳動試験と浸せき試験を比較することにより、表面保護材の塩化物イオン遮断性について検討した。その結果、電気泳動試験では、表面含浸材を適用した場合と適用しない場合で、塩化物イオンが検出されるまでの時間、試験初期の塩化物イオン濃度の増加割合や電流値に差異が確認され、これらの値により、塩化物イオンの遮断性を評価できる可能性があると思われる。

キーワード：電気泳動試験, 表面保護材, 表面含浸材, 表面被覆材, 塩化物イオン

1. はじめに

表面保護材をコンクリート表面に塗布あるいは含浸させることにより、撥水性、防水性、塩化物イオンの遮断性等、コンクリートに様々な機能を付加することが可能となっている。表面含浸材は、コンクリート表面の改質効果を期待できるものもあり、表面被覆材と比べて比較的安価であることから、塩化物イオンの遮断性を定量的に評価することが可能となれば、構造物のライフサイクルコストを考慮した設計・施工に適用することが可能と考えられる。しかし、一般にこれらの塩化物イオン遮断性は、塩水浸せき試験や暴露試験によって、塩化物イオン浸透深さや濃度分布から評価されることが多く、結果を得るまで長い時間を要する。

近年、塩化物イオンの浸透に対する抵抗性を短期に評価するために、電気的手法を用いた試験により、コンクリートあるいは表面保護材を塗布したコンクリートについての塩化物イオンの遮断性についての報告がなされている^{1),2),3)}。

本報告では、土木学会規準

「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)」(JSCE-G 571, 「電気泳動試験」と記述)と「浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見かけの拡散係数試験方法(案)」(JSCE-G 572, 「浸せき試験」と記述)を用いて、表面保護材の塩化物イオン遮断性の評価方法としての適用性について検討を行った結果について報告する。

2. 実験概要

2.1 試験方法

電気泳動試験の試験方法は、土木学会規準に準じ、図-1に示す電気泳動試験装置を用いた。

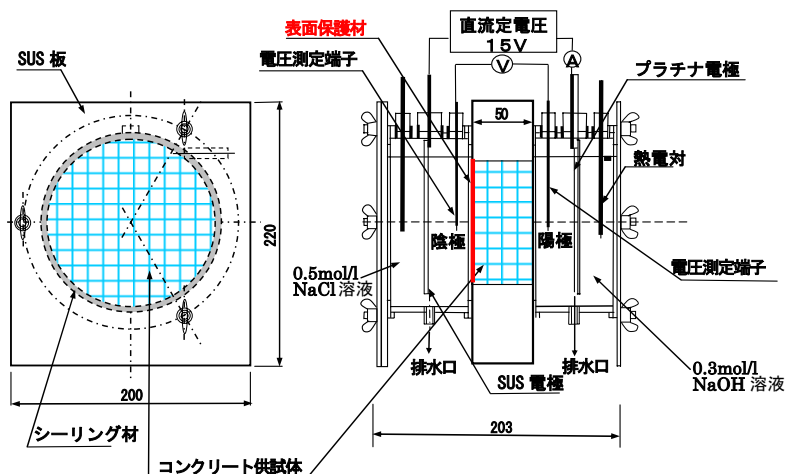


図-1 電気泳動試験装置

*1 (株)大林組 技術研究所 土木材料研究室 グループ長 博士(工学) (正会員)

*2 (株)大林組 技術研究所 土木材料研究室 副主査 工修 (正会員)

*3 (株)大林組 技術研究所 土木材料研究室 副主査 博士(工学) (正会員)

表-1 コンクリートの配合

配合の種類	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	水セメント比 (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				
						水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 A
N P	20	12	55.0	4.5	44.0	160	291	813	1042	C×0.25%
B B	20	12	50.0	4.5	43.0	160	320	780	1040	C×0.25%

[注] C : N P ; 普通ポルトランドセメント (密度 3.16g/cm³)

B B ; 高炉セメントB種 (密度 3.04g/cm³)

S : 陸砂 (表乾密度 2.63g/cm³), G : 砕石 (表乾密度 2.65g/cm³), A : A E 減水剤

直径 100mm, 厚さ 50mm の円盤状供試体の片面に表面保護材を塗布し, 塗布面を陰極側に設置し, 電極間に 15V の直流定電圧を印加し, 塩化物イオンの増加割合が一定となるまで実施した。電気泳動試験状況を写真-1 に示す。

浸せき試験は, 濃度 10% の塩化ナトリウム水溶液中に供試体を浸せきさせた。浸せき期間は, 3ヶ月とし, 開放面より, 10mm 間隔に切断し, 分析用試料を採取し, コンクリート重量に対する全塩化物イオンを JIS A 1154 に準拠し求めた。



写真-1 電気泳動試験状況

2.2 供試体

供試体に用いたコンクリートの配合を表-1 に, 品質試験結果を表-2 に示す。粗骨材の最大寸法は 20mm, スランプは 12cm とし, 水セメント比は普通ポルトランドセメントを用いた場合 55%, 高炉セメントを用いた場合 50% とした。

供試体の形状を図-2 に示す。直径φ100mm, 長さ 200mm の円柱供試体を 28 日間, 水中養生し, 電気泳動試験では, 長さ 50mm, 浸せき試験では, 長さ 150mm に切断した。その後, 14 日間, 室内 (60±5% RH, 20±2℃) で乾燥させ, 塩化物イオン浸透面 (開放面) に表面保護材を塗布した。表面保護材には表-3 に示す主成分の異なる 3 種類の表面含浸材とエポキシ樹脂系の表面被覆材を使用した。電気泳動試験の供試体は, 電気泳動セルの供試体ホルダー内に設置し, 間隙はシーリング材で充てんした。浸せき試験の供試体では円周と底面にエポキシ樹脂を塗布し, 塩化物イオンの侵入を一方向からとした。

供試体は表面保護材の塗布後 14 日間室内で乾燥させた。その後, 電気泳動試験供試体は真空

表-2 コンクリートの品質試験結果

配合	スランプ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度(N/mm ²)	
			7 日	28 日
N P	12.5	4.7	25.0	33.2
B B	12.0	4.2	23.9	44.8

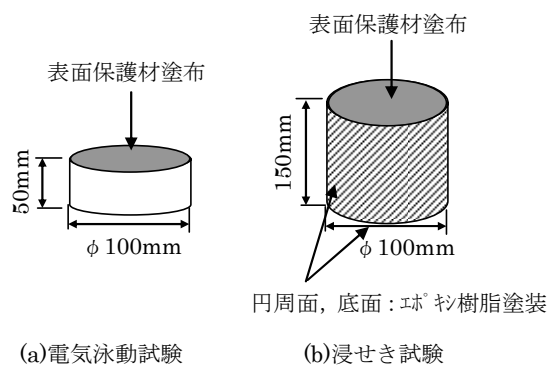


図-2 試験供試体

飽和処置を行い電気泳動試験を実施し, 浸せき試験供試体は 3ヶ月間の浸せき試験を実施した。

2.3 実験ケース

実験は 2つのシリーズに分けて行った。実験ケースを表-4 に示す。

表-3 表面保護材

種類	主成分	コンクリート表面での生成物	塗布量	
表面含浸材	A	ケイ酸塩系	ケイ酸化カルシウム	300 g/m ²
	B	アルキルアルコキシシラン	シリコンの疎水基 $\begin{matrix} R & R \\ & \end{matrix}$ (アルキル基) (-Si-O-Si-)	400 g/m ²
	C	オルガノシロキサン	シロキシサン (-Si-O-Si-)	200g/m ²
表面被覆材	D	エポキシ樹脂	-	膜厚 約1mm

表-4 実験ケース

実験シリーズ	コンクリート	表面保護材の種類	電気泳動試験	浸せき試験
I	NP	無塗布	○	○
		A	○	○
		B	○	○
II	BB	無塗布	○	-
		C	○	-
		D	○	-

シリーズ I では、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリート (NP) にケイ酸塩系含浸材 (A) およびアルキルアルコキシシランの含浸材 (B) を塗布したものについて電気泳動試験および浸せき試験を行った。シリーズ II では、高炉セメント B 種を用いたコンクリート (BB) にオルガノシロキサンの含浸材 (C)、エポキシ樹脂被覆材 (D) を塗布したものについて電気泳動試験を行った。

3. 実験結果

3.1 浸せき試験結果

シリーズ I の無塗布、表面含浸材 A、B を用いたコンクリートの浸せき試験 (3ヶ月) におけるコンクリート重量に対する全塩分イオン量の分布結果を図-3 に示す。この結果より求めた Fick の拡散方程式の解の式における表面塩化物イオン量と塩化物イオンの見かけの拡散係数を表-5 に示す。

3 月間の浸せき試験では、表面含浸材 A の見かけの拡散係数は無塗布とほぼ同等であり、塩化物イオンの遮断効果は認められなかった。表面含浸材 B では、表面塩化物イオン量は無塗布の約 1/10、見かけの拡散係数は約 1/5 の値となり、塩化物イオンの遮断効果が認められた。この様に、浸せき試験では、表面含浸材の種類によって、塩化物イオンの見かけの拡散係数に差があり、塩化物イオンの遮断効果に差が認められた。

3.2 電気泳動試験結果

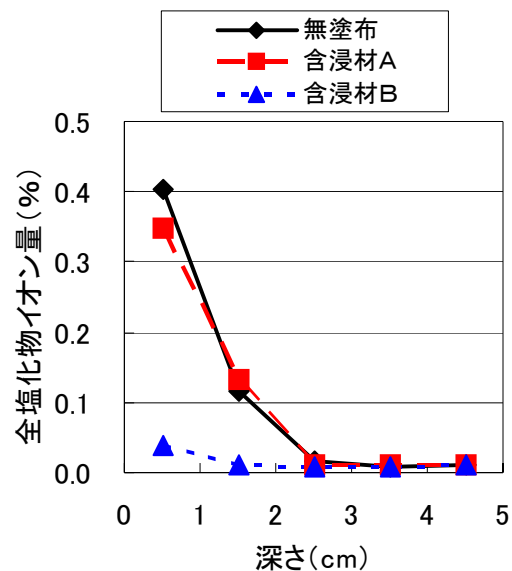


図-3 浸せき試験結果 (3ヶ月)

表-5 浸せき試験での見かけの拡散係数

表面含浸材の種類	表面塩化物イオン量 (%)	見かけの拡散係数 (cm ² /年)
無塗布	0.58	2.8
A	0.50	2.5
B	0.05	0.5

(1) 陽極側塩化物イオン濃度の経時変化

a) シリーズ I

電気泳動試験での陽極側溶液中の塩化物イオン濃度の経時変化を図-4 に示す。

土木学会規準の電気泳動試験では、陽極側溶液の塩化物イオン濃度の増加割合が定常となった時点での増加割合により、式 (1) の塩化物イ

オン流速 (J_{Cl}) を求め、式(2)により実効拡散係数 (D_e) を求める方法が示されている。

$$J_{Cl} = \frac{V^{\text{II}} \Delta c_{Cl}^{\text{II}}}{A \Delta t} \quad (1)$$

ここに J_{Cl} : 塩化物イオンの定常状態における
流束 (mol/ (cm²・年))

V^{II} : 陽極側の溶液体積 (l)

A : 供試体断面積 (cm²)

$\Delta c_{Cl}^{\text{II}} / \Delta t$: 陽極側塩化物イオン濃度の増加
割合 ((mol/l) /年)

$$D_e = \frac{J_{Cl}RTL}{|Z_{Cl}|FC_{Cl}(\Delta E - \Delta E_c)} \times 100 \quad (2)$$

ここに D_e : 実効拡散係数 (cm²/年)

R : 気体定数 (8.31J/ (mol・K))

T : 絶対温度測定値 (K)

Z_{Cl} : 塩化物イオンの電荷 (= -1)

F : ファラデー定数 (96,500 C/mol)

C_{Cl} : 陰極側の塩化物イオン濃度測定値(mol/l)

$\Delta E - \Delta E_c$: 供試体表面間の測定電位 (V)

L : 供試体厚さ (mm)

本実験では、陽極側溶液の塩化物イオン濃度の増加割合が変化する時点が見られたため、試験開始から 25~32 日までを塩化物イオン濃度の増加割合が一定となる「定常時」、試験開始から 7~14 日までを「試験初期」とし、それぞれの期間における塩化物イオン濃度の増加割合から実効拡散係数を求めた。また、実効拡散係数より土木学会基準 JSCE G507 (付属書) に基づき、セメントの種類、水セメント比から見かけの拡散係数を求めた。

定常時における実効拡散係数および見かけの拡散係数を表-6 に示す。塩化物イオン濃度の増加割合は、表面含浸材の有無や種類によって差は少なく、見かけの拡散係数は大差ない結果となった。これは、電気泳動試験に用いたコンクリート供試体の厚さは 50mm であるのに対して、表面含浸材の浸透深さは数 mm 程度である

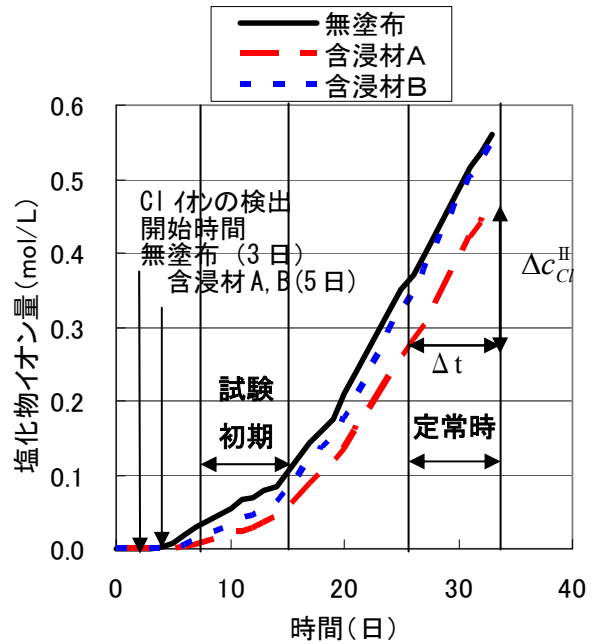


図-4 電気泳動試験結果 (シリーズ I)
(陽極側塩化物イオン濃度の経時変化)

表-6 電気泳動試験での実効拡散係数と
見かけの拡散係数 (シリーズ I・定常時)

表面含浸材の種類	塩化物イオン濃度の増加割合 ((mol/l)/年)	実効拡散係数 (cm ² /年)	見かけの拡散係数 (cm ² /年)
無塗布	9.51	2.80	1.90
A	9.40	2.77	1.88
B	10.39	3.06	2.08

ため、表面含浸材が含浸している部分を塩化物イオンがある程度通過し始めると、塩化物イオンの浸透は、コンクリート自体の塩化物イオン透過性に依存するためではないかと考える。

次に、試験初期の塩化物イオン濃度の増加割合より求めた実効拡散係数、見かけの拡散係数表-7 に示す。試験初期における塩化物イオンの拡散係数には差が生じ、無塗布に比べ表面含浸材を塗布した場合の拡散係数は小さくなった。したがって、試験初期の塩化物イオンの増加割合より表面含浸材の塩化物イオンの遮断性を評価できる可能性がある。また、試験開始から陽極側の塩化物イオン濃度が検出されるまでの日

数は、無塗布の場合約 3 日であるが、表面含浸材を用いた場合は、いずれも約 5 日であった。これは、試験初期には、表面含浸材の塩化物イオンの遮断性の高い部分を塩化物イオンが透過するため、塩化物イオンが検出されるまでの時間に差異が生じたのではないかと考える。

以上より、電気泳動試験では、表面含浸材を塗布したコンクリートでは試験初期の塩化物イオン量の増加割合や塩化物イオンが検出されるまでの時間に差異が生じることが確認できた。

浸せき試験と電気泳動試験により求めた見かけの拡散係数を図-5に示す。既往の報告にも示されているが⁴⁾、試験方法によって見かけの拡散係数に差異があることが確認された。また現時点では理由は明確ではないが、表面含浸材の種類によっては、見かけの拡散係数による塩化物イオンの遮断性の評価は、浸せき試験と電気泳動試験で異なる場合があることが確認された。

b) シリーズ II

シリーズ II での無塗布、表面含浸材 C、有機系塗膜材 D を用いたコンクリートの陽極側溶液中の塩化物イオン濃度の経時変化を図-6に示す。シリーズ II では、シリーズ I のような塩化物イオン量の増加割合が変化する点が明確には見られなかった。

試験開始から 42~58 日の期間の定常時における塩化物イオン量の増加割合より求めた実効拡散係数と見かけの拡散係数を表-8に示す。見かけの拡散係数は、表面含浸材 C は無塗布の場合とほぼ同程度であったが、陽極側溶液の塩化物イオンが検出されるまでの時間は無塗布では 7 日であるが、表面含浸材 C では 14 日となり、差異が見られた。表面被覆材 D では、試験開始より 2 ヶ月間、塩化物イオンは検出されず、塩化物イオンは全く浸透しない結果となった。

これらのことより、電気泳動試験において、陽極側溶液の塩化物イオンの検出が開始されるまでの時間を表面保護材の塩化物イオン遮断性の評価指標にできる可能性があると思われる。

表-7 電気泳動試験での実効拡散係数と見かけの拡散係数 (シリーズ I・試験初期)

表面含浸材の種類	塩化物イオン濃度増加割合 ((mol/l)/年)	実効拡散係数 (cm ² /年)	見かけの拡散係数 (cm ² /年)
無塗布	3.14	0.92	0.63
A	1.69	0.50	0.34
B	2.62	0.77	0.52

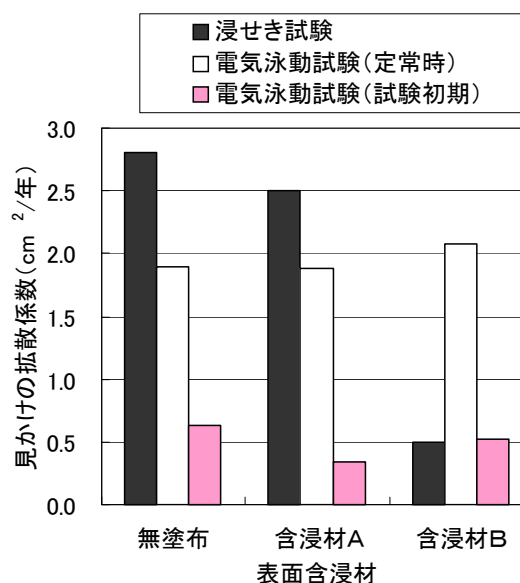


図-5 見かけの拡散係数の比較

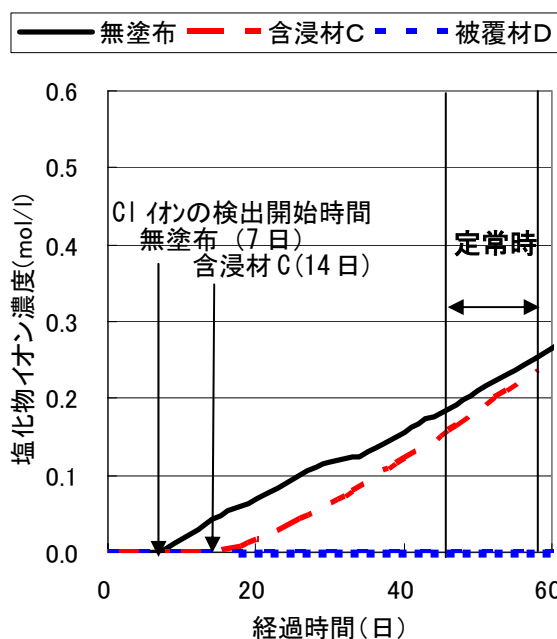


図-6 電気泳動試験結果 (シリーズ II)
(陽極側塩化物イオン濃度の経時変化)

(2) 電圧値、電流値の測定結果

シリーズ I における陽極と陰極間の電圧値を 図-7 に、電流値を 図-8 に示す。電圧値は、無塗布、表面含浸材 A、B ともに差異は見られなかったが、電流値は無塗布と表面含浸材 A、B と比較すると、試験初期の電流値に差が生じた。試験初期の電流量は、無塗布の場合は 0.02~0.04A であったが、表面含浸材 A、B では 0~0.01A であった。その後、いずれの供試体ともに徐々に電流値は大きくなるが、試験開始後 15 日程度までは、表面被覆材の有無により 0.01~0.02 A の差が生じた。したがって、試験初期の電流値の差異によっても、表面含浸材の塩化物イオン遮断性を評価できる可能性もあると思われる。

4. まとめ

電気泳動試験を用いて表面保護材の塩化物イオン遮断性の評価を試みた結果、表面保護材を塗布したコンクリートの拡散係数による塩化物イオンの遮断性の評価は難しい場合があるが、試験初期の塩化物イオン濃度の増加割合、塩化物イオンの検出開始時間、電流値などに差異が認められ、これらの値により塩化物イオンの遮断性を評価できる可能性があると思われる。電気泳動試験による表面保護材の塩化物イオンの遮断性評価の適用に関しては、今後さらに曝露実験との比較を行うなどの検討が必要である。

参考文献

- 1) N.R.Buenfeld and J.-Z.Zhang: Chloride Diffusion Through Surface-treated Mortar Specimens, Cement and Concrete Research, Vol.28, No.5, pp.665-674, 1998
- 2) 坂本 淳, 新藤竹文, 丸屋 剛, 杉山隆文: 高緻密性材料の塩分浸透性評価に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.27, No.1, pp.325-330, 2005.6
- 3) 池津和弘, 下村 匠: コンクリート用被覆材および改質材による塩分遮蔽メカニズム, コ

表-8 電気泳動試験での実効拡散係数と見かけの拡散係数 (シリーズ II・定常時)

表面保護材の種類	塩化物イオン濃度増加割合 ((mol/l)/年)	実効拡散係数 (cm ² /年)	見かけの拡散係数 (cm ² /年)
無塗布	1.80	0.52	0.13
C	2.24	0.66	0.16
D	0.00	*	*

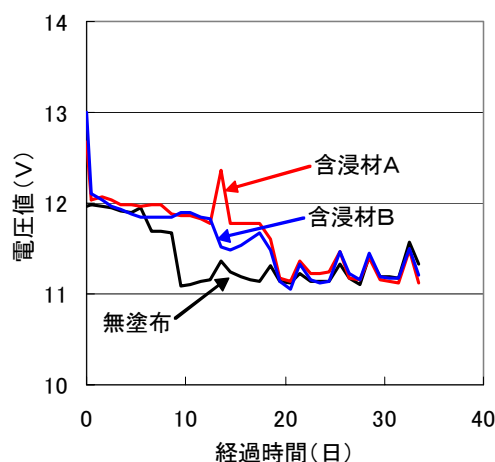


図-7 電気泳動試験における電圧値の変化

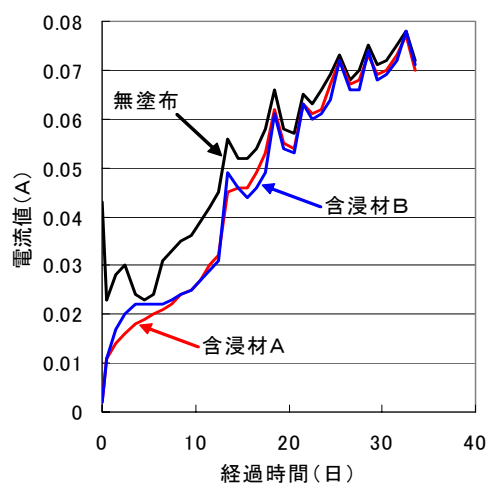


図-8 電気泳動試験における電流値の変化

ンクリート工学年次論文報告集, Vol.27, No.1, pp.895-900, 2005.6

- 4) 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