

報告 ポリマーセメントモルタルで表面保護されたコンクリートの塩化物イオン浸透性

峠坂 直樹^{*1}・杉山 隆文^{*2}・松田 康紀^{*3}・半井 健一郎^{*4}

要旨：断面修復材や表面被覆材として使用されるポリマーセメントモルタルで表面保護したコンクリートの塩分浸透性を把握することを目的に、電気泳動試験により表面保護コンクリートの実効拡散係数を求め、等価かぶりに基づいた塩化物イオンの浸透予測を行った。表面保護コンクリートの実効拡散係数は、ポリマーセメントモルタルおよびコンクリートの実効拡散係数とその厚さによって異なり、基盤となるコンクリートにフライアッシュコンクリートを用いることで、塩化物イオン浸透に対する抵抗性は著しく増大することが示された。

キーワード：表面被覆，断面修復，ポリマーセメントモルタル，塩化物イオン

1. はじめに

コンクリート中への塩化物イオンの浸透を抑制し、コンクリート構造物の耐久性を確保する為、近年では表面保護工の採用が注目されている。表面保護工には、表面被覆工法と断面修復工法がある。無機系の表面被覆材にはポリマーセメントモルタルが多く使用され¹⁾、断面修復材においてもポリマーセメントモルタルが使用される場合がある。

本研究では、表面保護工で使用される各種のポリマーセメントモルタルで表面保護されたコンクリート（以下表面被覆コンクリートおよび断面修復コンクリートと称す）について、代表的な劣化因子である塩化物イオンの浸透性を評価した。実験は、配合および使用材料の異なる3種類のポリマーセメントモルタルと3種類のコンクリートに対してそれぞれ電気泳動試験を実施した。供試体は、ポリマーセメントモルタル単体、コンクリート単体、表面被覆コンクリート、断面修復コンクリートである。次に、電気泳動試験後の全塩化物イオン量分布を求め、そ

の結果が実効拡散係数に及ぼす影響を考察した。また、等価かぶりに基づく塩化物イオンの浸透予測を行い、表面保護コンクリートの塩化物イオン浸透性を検討した。

2. 実験概要

2.1 供試体の作製と概要

(1) コンクリート

表-1にコンクリートの配合および圧縮強度を示す。供試体は、幅 50mm、高さ 150mm、長さが 730mm の鋼製型枠にコンクリートを打ち込み、24 時間後に脱型した。そして、28 日間の湿布養生を行った後、幅方向に貫通するよう、厚さが 50mm で直径が 100mm のコアを採取して円盤型のコンクリート供試体を作製した。供試体は N55、N65、FA55 とし、それぞれ材齢 40～50 日で試験を開始した。

(2) 表面被覆コンクリート

表面被覆材はアクリル系ポリマーセメントモルタルであり、製造メーカーの分類によると標準形（PCM-N）と柔軟形（PCM-S）の2種類であ

*1 群馬大学 大学院工学研究科 建設工学専攻 (正会員)

*2 北海道大学 大学院工学研究科教授 Ph.D. (正会員)

*3 群馬大学 大学院工学研究科 建設工学専攻

*4 群馬大学 工学部建設工学科講師 博士(工学) (正会員)

表－１ コンクリートの配合および圧縮強度

供試体名	G _{max}	W/B (%)	FA/(C+FA) (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						空気量 (%)	スランプ (cm)	圧縮強度 (N/mm ²)
					水	セメント	混和材	細骨材	粗骨材	混和剤			
					W	C	FA	S	G	AE減水剤			
N55	20	55	－	49	172	313	－	878	1008	1.10	3.8	8.5	39.4
N65		65	－		172	265	－	897	1030	0.93	4.0	8.0	32.2
FA55		55	30		172	219	94	866	993	0.63	3.8	8.5	30.1

る³⁾。それぞれ、W/C が 43% と 68% であり、P/C (ポリマーセメント比) は 22% と 65% である。表面被覆材を施工する面は、実構造物と同様に型枠に接する面である。表面処理したコンクリートへ表面被覆材を 2 層で吹き付け、施工厚さを約 2mm とした。PCM-N の塗布後、22 日間温度 20±2℃、湿度 60±5% で気中養生し、その後、試験を開始するまで湿封養生した。PCM-S は、5 日間湿度 85% 以上で気中養生の後 11 日間 60±5% で気中養生し、その後試験開始まで湿封養生した。また、表面被覆コンクリートは N シリーズ (標準型被覆材を施工) と S シリーズ (柔軟型被覆材を施工) について試験を行った。供試体は、コンクリートの材齢が 140～150 日で試験開始した供試体 (N55-PCM-N-a) とコンクリートの材齢が 360～450 日で試験開始した供試体 (N55-PCM-N-b, FA55-PCM-N-b) である。S シリーズは、コンクリート材齢 100～120 日で試験を開始した。

(3) 断面修復コンクリート

断面修復材は、ポリマーセメントモルタルにアクリル繊維を含有しており、W/C が 45% で P/C が 7% である。ポリマーの種類はベオバ系であり、材齢 28 日の圧縮強度は 45N/mm² である。断面修復工を施すコンクリートは N55 および FA55 のコンクリートである。供試体は、全体の厚さが 50mm となるように、15mm および 35 mm の厚さにカットしたコンクリートに 35mm および 15mm の断面修復材を施工し作製した。断面修復コンクリートの施工は、吹付け工法で施工した。吹付け方向は鉛直下向きである。施工後は湿布養生した。供試体は、断面修復材の厚さが 15mm の供試体を N55-PCM-B15, FA55-PCM-B15, 断面修復材の厚さが 35mm の供試体を N55-PCM-

B35, FA55-PCM-B35 と表示する。試験は、コンクリートの材齢が 360～370 日 (N55) または 440～450 日 (FA55) で修復材の施工後 100～110 日 (N55) または 180～190 日 (FA55) で開始した。

2.2 電気泳動試験

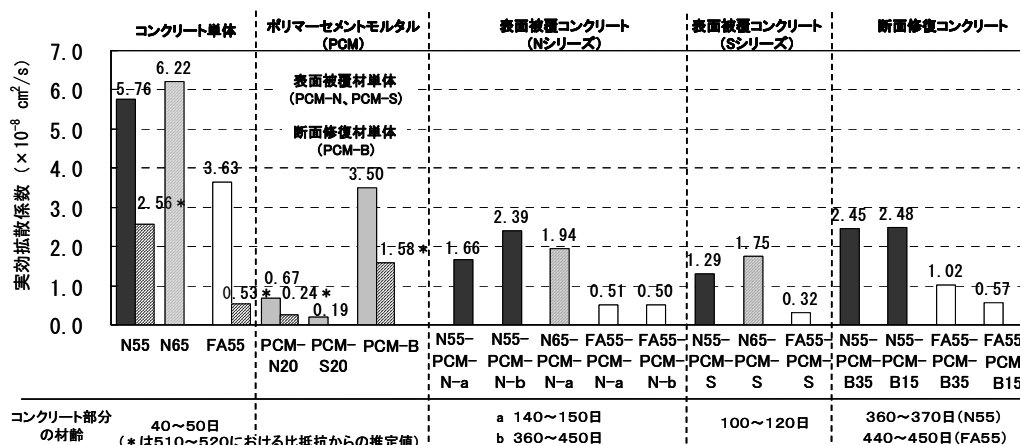
電気泳動試験は、JSCE-G571-2003 に準拠した。定常状態における流束 J_{Cl} (mol/ (cm²・s) より、塩化物イオンの実効拡散係数 D_{Cl} (cm²/s) を算出した。また、材齢が 510～520 日におけるコンクリート単体 (N55 および FA55)、表面被覆材単体 (PCM-N20)、断面修復材単体 (PCM-B) の実効拡散係数は、同一材齢における表面被覆コンクリートおよび断面修復コンクリートと比較する為、相当材齢における電気抵抗試験結果より式 (1) を用いて実効拡散係数を計算した²⁾。

$$D_{el} = \frac{RTt_{Cl}}{z_{Cl}^2 F^2 c_{Cl} \rho} \frac{1}{\rho} \quad (1)$$

ここで、 R : 気体定数 (8.314J/ (mol・K)), T : 絶対温度 (K), Z_{Cl} : 塩化物イオンの電荷数, F : ファラデー定数 (96500C/mol) t_{cl} : 塩化物イオンの輸率 (0.5)²⁾, ρ : 比抵抗 ($\Omega \cdot \text{cm}$), D_{el} : 拡散係数 (電気泳動) (cm²/s) である。

2.3 全塩化物イオン量試験

全塩化物イオン量試験は、硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法 (JCI-SC4) に準拠した。電気泳動試験が終了した供試体について、N55-PCM-N-a および FA55-PCM-N-a はコンクリート部を 7 層と表面被覆材部 1 層に分割し、N55-PCM-N-b および FA55-PCM-N-b はコンクリート部を 10 層と表面被覆材部 1 層の 11 層に分割し、各層について分析した。



図ー 1 電気泳動試験結果（実効拡散係数）

3. 実験結果

3.1 電気泳動試験結果

(1) 表面被覆コンクリート

表面被覆コンクリートの実効拡散係数の算出結果を図ー 1 に示す。コンクリート単体（N55, N65, FA55）は各 3 体、表面被覆材単体（厚さが 20mm で試験：PCM-N20, PCM-S20）は各 2 体、表面被覆コンクリートの N シリーズおよび S シリーズは各 3 体についての平均値である。

表面被覆材単体（PCM-N20, PCM-S20）の実効拡散係数は、コンクリート単体と比較して小さい。これは、表面被覆材単体はポリマーセメントモルタルであり、ポリマーフィルムの形成により緻密化し、実効拡散係数が大きく低下したと考えられる³⁾。表面被覆コンクリート（N, S シリーズ）の実効拡散係数は、コンクリート単体と比較して小さく、ポリマーセメントモルタルを表面被覆材として施工することによる遮塩効果が認められた。コンクリート単体では N65 が最も大きく、N55, FA55 の順に小さくなった。表面被覆コンクリート（N, S シリーズ）でも同様の傾向が見られ、N65, N55, FA55 の順に実効拡散係数は小さく、表面被覆材を施工したコンクリートであっても、実効拡散係数はコンクリートの配合に支配される結果になった。これは、表面被覆コンクリートの被覆材の厚さが約 2mm と薄い為と考えられる³⁾。

コンクリート単体における材齢 510～520 日に

おける実効拡散係数の推定値は、材齢 40～50 日と比べて低下した。N55, N65 は 1/2 程度、PCM-N は 1/3 程度、FA55 は 1/7 程度となり、特に FA55 で大きな低下となった。FA55 はセメントに対してフライアッシュを 3 割置換したものであり、材齢進行により組織が緻密化し、その影響により実効拡散係数が著しく低下したと考えられる。

(2) 断面修復コンクリート

図ー 1 に断面修復コンクリートの実効拡散係数の算出結果を示す。断面修復材単体は 3 体の試験結果の平均値である。材齢が 510～520 日における断面修復材単体（PCM-B）の実効拡散係数は、同一材齢における断面修復コンクリートの実効拡散係数と比較する為に式 (1) を用いた。断面修復材単体（PCM-B）の実効拡散係数は、表面被覆材単体と同様に、コンクリート単体と比較して小さい。断面修復コンクリートの実効拡散係数もコンクリート単体と比べて小さくなり、断面修復材を施すことによる遮塩効果が認められた。また、断面修復材単体（PCM-B）の実効拡散係数は、表面被覆材単体(PCM-N20)より大きくなっている。これは、断面修復材と表面被覆材ではポリマー主成分や、ポリマー結合材比が異なり、両者の使用材料の相違によるものである。断面修復コンクリート N55 シリーズにおいて、実効拡散係数はコンクリートの厚さに関らず同程度を示した。これはコンクリート単体（N55）と断面修復材単体（PCM-B）との実効

拡散係数が同程度である為だと考えられる。断面修復コンクリート FA シリーズは、コンクリート単体 (FA55) の実効拡散係数が、断面修復材単体 (PCM-B) よりも小さい為に、コンクリートの厚さが大きいほど実効拡散係数は小さい値を示したと考えられる。以上より、2 層で構成された材料 (表面被覆コンクリートや断面修復コンクリート) の実効拡散係数は、ポリマーセメントモルタル (表面被覆材単体、断面修復材単体) 層および基盤となるコンクリート (N55, FA55) 層の実効拡散係数とその厚さにより異なり、構成する 1 層の実効拡散係数が小さくその厚さが大きい程、2 層系での実効拡散係数は小さくなると考えられる。

3.2 全塩化物イオン濃度分布

図-2 に表面被覆コンクリートの全塩化物イオン濃度分布を示す。材齢が 140~150 日の供試体 (N55-PCM-N-a, FA55-PCM-N-a) に比べ、材齢が 360~450 日と長い供試体 (N55-PCM-N-b, FA55-PCM-N-b) 中の全塩化物イオン量が大きくなった。材齢 140~150 日において FA55-PCM-a の値は、N55-PCM-a よりもやや小さい傾向を示していたが、材齢 360~450 日では FA55-PCM-b は N55-PCM-b を上回っており、濃度増加の程度は、FA55-PCM で特に大きくなった。

本研究では、全塩分の固定化塩素と自由塩化物量の内訳の計測は行っていないが、コンクリート中の自由塩化物イオン量は、定常状態で移動する自由塩化物イオン量と相関があると考えられる。すなわち、実効拡散係数が小さいほど、コンクリート中の自由塩化物イオン量も小さくなると考えることが自然である。既往の研究により、材齢 91 日の塩分平衡実験からはフライアッシュ置換による塩分平衡関係の変化は小さいことが報告されている⁴⁾。よって、本実験において材齢 140~150 日の FA55-PCM-N-a の全塩分量が N55-PCM-N-a よりも若干小さくなったのは、実効拡散係数の低下からも示唆されるように、自由塩化物イオン量が減少した為と推測される。

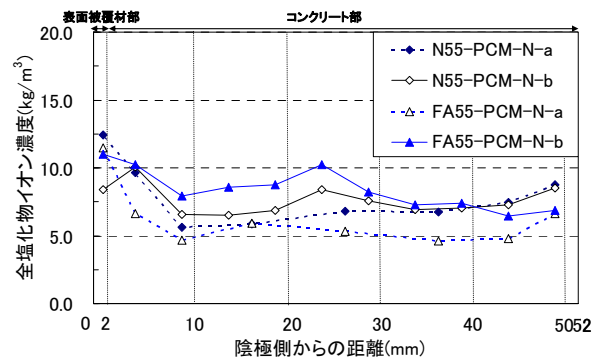


図-2 全塩化物イオン濃度分布
(表面被覆コンクリート)

3.3 塩化物イオン浸透予測

(1) 等価かぶり

ここでは、実構造物において表面被覆したコンクリートは、どの程度塩化物イオン浸透を抑制できるのかを検討する為に、浸透予測を行う。

表面被覆による劣化因子の侵入遮断効果を、コンクリートのかぶり厚さの増加とみなす考え (等価かぶり) に基づいて表面保護工の効果を検討し、式 (2) を用いて塩化物イオンの浸透予測を行った¹⁾。また、見掛けの拡散係数の算出は JSCE-G571-2003 を参照し、式 (3) により求めた。表面塩化物イオン濃度 C_0 は 11.0 kg/m^3 とした。

$$C(x,t) = C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{0.1}{2\sqrt{t}} \left(\frac{x}{\sqrt{D_{a,c}}} + \frac{C_s}{\sqrt{D_{a,s}}} \right) \right) \right) + C(x,0) \quad (2)$$

ここで、 C_0 : コンクリート表面における想定塩化物イオン濃度 (kg/m^3)、 x : コンクリート表面からの距離 (mm)、 C_s : 表面被覆材の塗膜の厚さ (mm)、 $D_{a,s}$: 表面被覆材の塗膜内での塩化物イオンに対する見掛けの拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$)、 t : 経過年数 (年)、 $D_{a,c}$: 塩化物イオンに対するコンクリートの見掛けの拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$)、 $c(x, 0)$: 初期塩化物イオン含有量 (kg/m^3)、 erf : 誤差関数

$$D_{ae} = k_1 \cdot k_2 \cdot D_e \quad (3)$$

ここで、 D_{ae} : 電気泳動試験による実効拡散係数から換算した見掛けの拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$)、

D_e : 電気泳動試験による実効拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$),
 k_1 : コンクリート表面におけるコンクリート側,
 陰極側溶液側それぞれの塩化物イオン濃度の釣り合いにかかわる係数, k_2 : セメント水和物中への塩化物イオンの固定化現象にかかわる係数

N55-PCM-N, FA55-PCM-N の浸透予測において, コンクリート単体 (N55, FA55) および表面被覆材単体 (PCM-N) の実効拡散係数は, それぞれ材齢が 40~50 日での電気泳動試験で得た値とした。材齢増加によるコンクリート単体および表面被覆材単体の実効拡散係数の減少の影響を調べるために, 材齢が 510~520 日における式 (1) による比抵抗から算出した実効拡散係数を用いた場合も計算して比較した。コンクリート単体 (N55, FA55) における $k_1 \cdot k_2$ 値は, JSCE-G571-2003 の附属書を参照し, それぞれ 0.66, 0.84 とした。表面被覆材単体 (PCM-N) および断面修復材単体 (PCM-B) の $k_1 \cdot k_2$ 値は現時点では不明の為, コンクリートにおける上下限値を参考に 0.1, 0.5, 1.0 と仮定した。なお, これにより計算される PCM の見掛けの拡散係数は, 既往の研究⁵⁾で報告された値 ($0.58 \sim 6.4 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$) と比較してこの下限値が約 1/20, この上限値が約 1/2 小さい値であった。

(2) 浸透予測による考察

図-3 に表面被覆コンクリート (N55-PCM-N, FA55-PCM-N) の等価かぶりに基づいた 50 年の浸透予測結果を示す。ここでの表面被覆材単体 (PCM-N) の $k_1 \cdot k_2$ 値は 0.5 とした。計算において, 基盤となるコンクリート単体 (N55, FA55) および表面被覆材単体 (PCM-N) の実効拡散係数は, 実際には経時的に変化しているが, 今回の検討では 50 年間一定とした。材齢が 40~50 日においては, FA55-PCM-N と N55-PCM-N の両者の浸透予測結果に大きな差はみられないが, 材齢が 510~520 日の実効拡散係数を用いた予測結果では両者の差が大きく, FA55-PCM-N の方が N55-PCM-N と比べて, 塩化物イオンの浸透抵抗性が大きくなった。また, 浸透予測は数十年の予測である為, 材齢 510~520 日の実効拡散係

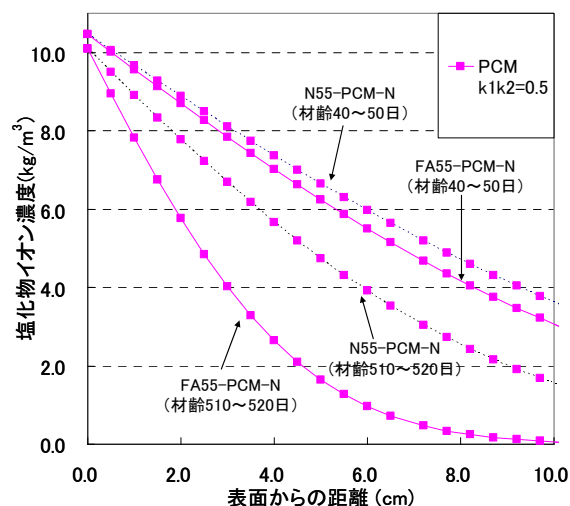


図-3 50 年浸透予測
 (N55-PCM-N, FA55-PCM-N)

数を用いることが妥当であると考えられる。これらより, 基盤となるコンクリートに対しフライアッシュを用いることで, 塩化物イオン浸透に対する抵抗性は増大した。

(3) 鉄筋腐食限界 (耐用年数) による考察

ここでは, コンクリート部のかぶり厚 70mm, 塩化物イオンの鉄筋腐食発生限界濃度 1.2 kg/m^3 とし, 各コンクリートが鉄筋腐食発生限界濃度に達する時間 (耐用年数) を求める。なお, 断面修復コンクリートは表面から 70mm の位置における浸透予測である。図-4 に耐用年数の算出結果を示す。表面被覆コンクリート (N シリーズ) において電気泳動試験による実効拡散係数を用いて耐用年数を求めると, PCM-N の $k_1 \cdot k_2$ 値の不確定性を考慮しても, コンクリート単体からの改善効果はわずかにとどまった。一方, FA55-PCM-N において 510~520 日の比抵抗による材齢を考慮した実効拡散係数を用いて算出した耐用年数は, N55-PCM-N と比べて著しく大きくなった。3.3 (2) の浸透予測結果と同様に, FA55-PCM-N は N55-PCM-N よりも耐用年数が長く, その差はコンクリート単体の実効拡散係数を求める材齢が長いほど顕著になった。今回の浸透予測では, コンクリートを表面保護することによる浸透抵抗性の向上効果よりも, 基盤となるコンクリートの性状が重要であると考えら

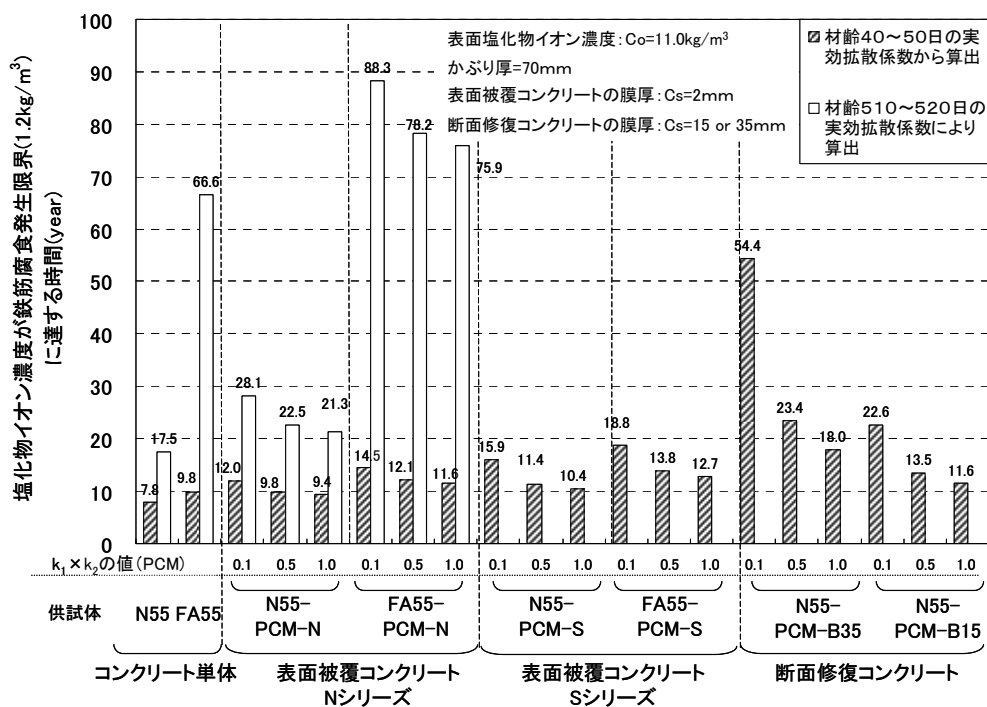


図-4 等価かぶりに基づいた耐用年数の算出

れる。今後は材齢と共に大きく低下するフライアッシュコンクリートの実効拡散係数を適切に評価することが重要であると言える。

断面修復コンクリートは、表面被覆コンクリート (Nシリーズ, Sシリーズ) と比べて $k_1 \cdot k_2$ 値の変化が浸透予測結果に与える影響がより大きくなった。これは、断面修復材部の厚さが15mmまたは35mmと表面被覆材の2mmよりも厚い為と考えられる。断面修復コンクリートにおける浸透予測は、 $k_1 \cdot k_2$ 値の変化による影響を受けやすい為、断面修復材単体の見掛けの拡散係数を直接に把握することが今後重要である。

4. まとめ

本研究の範囲内で以下の所見を得た。

(1) 2層で構成された表面保護コンクリートの実効拡散係数は、ポリマーセメントモルタル層およびコンクリート層の実効拡散係数とその厚さによって異なり、構成する1層の実効拡散係数が小さくその厚さが大きい程、2層系での実効拡散係数は小さくなると考えられる。

(2) ポリマーセメントモルタルの実効拡散係数は、明らかにコンクリート単体よりも小さく、

浸透予測結果は耐用年数の増加を示したが、顕著な増加には至らなかった。

(3) フライアッシュコンクリートを用いることで、塩化物イオン浸透性に対する効果は著しく増大する。今回は表面被覆効果よりも、コンクリートそのものが重要であると言える。

参考文献

- 1) コンクリートライブラリ 119, 表面保護工法設計施工指針 (案), 土木学会
- 2) 杉山隆文ほか: フライアッシュコンクリートの塩分浸透性の迅速評価に関する電気泳動法の適用, 土木学会論文集, No.711, pp.191-203, 2002.8
- 3) 室伏瞳ほか: ポリマーセメントモルタルで表面被覆したコンクリートを用いた塩化物イオンの電気泳動試験, 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6巻, 43-48, 日本材料学会, 2006.
- 4) 石田哲也ほか: 高炉スラグ微粉末とボゾランを使用したセメント硬化体の塩分平衡特性, コンクリート工学年次論文集, vol.27, No.1, 2005
- 5) 大濱嘉彦ほか: ポリマーセメントモルタル及びコンクリートにおける塩化物イオン拡散性状, セメント技術年報, No.40, pp.87-90, 1986.