

EPMA を用いたコンクリート表面含浸材の塩化物イオン拡散予測

(株) 高速道路総合技術研究所 正会員 浅井 貴幸
 (株) 高速道路総合技術研究所 正会員 竈本 武弘
 (株) 中研コンサルタント 落合 光雄
 (株) 中研コンサルタント 正会員 池富 修

1. はじめに

コンクリート表面含浸材(以下,表面含浸材という.)が塩化物イオンの浸透抑制に効果が高いことが知られているが,その遮塩性が鋼材の発錆に対してどの程度の抑制効果を示すか試算されたケースは少ない.効果の試算には含浸領域内の拡散係数を定める必要があるが,含浸領域が数 mm 程度と薄いため,通常用いられる湿式分析では含浸領域内の塩化物イオンの濃度変化を捉えることが出来ず,拡散係数の設定は困難であった.このため,本報では EPMA (電子プローブマイクロアナライザー)を用い,含浸領域内の塩化物イオンの濃度変化を捉えることで,含浸領域の拡散係数を設定し,表面含浸材の遮塩効果の評価を試みた.

2. 試験概要

試験に使用する供試体は表-1に示すシラン系表面含浸材4種とケイ酸塩系1種,および比較として無塗布の供試体とした.供試体の作製は JSCE-K571¹⁾に従い W/C50%の 1:3 モルタル基盤とし,同基準に従い養生を行った後,表面含浸材の塗布を行った.試験は塗布後 14 日静置した後,濃度 $3 \pm 0.3\%$ の塩化ナトリウム水溶液に 30,60,90 日の 3 材齢の塩水浸せきを実施した.

表-1 使用した表面含浸材の種類と特徴

区分け	種別	標準塗布量	主成分
シラン系	A	0.20kg/m ²	シラン・シリカ
	B	0.40kg/m ²	アルキルアルコキシシラン
	C	0.225kg/m ²	特殊シラン系化合物
	D	0.20kg/m ²	シラン・シリカ
ケイ酸塩系	E	1.20kg/m ²	ポルトランドセメント・触媒化合物・シリカド

3. EPMA による拡散係数の算出

EPMA 観察は各供試体をカットした試料片を樹脂で固定し,同時に測定を行った.また,EPMA の特性 X 線強度と塩化物イオン濃度との関係を求める検量線を作成するために,JIS A 1154 により全塩分量を求めた 1cm 角の濃度 0.09kg/m³ 4.83 kg/m³, 7.73kg/m³ の異なる 3 つの基準試料モルタルを配置した.

図-1 は 60 日間塩水浸せき後の塩化物イオンの浸透を示す EPMA 画像である.得られた検量線用基準試料内の特性 X 線値の平均値と塩化物イオン濃度から換算式(図-2)を作成し,各供試体の表面から 0.1mm 間隔で塩化物イオンの濃度分布を求めた.

図-3 はシラン系表面含浸材の表面から 2mm 付近の塩化物イオンの浸透状態を示したものである.塩水浸せき期間 30,60,90 日のいずれの期間でも含浸領域内を超える塩化物イオンの浸透は認められないが,僅かではあるが塩水浸せき 30 日から含浸領域内に塩化物イオンの浸透が確認された.また,種類によっては時間とともにその量も増加する傾向も認められた.

塩化物イオンの浸透分布から求めた含浸領域内の拡散係数を図-4 に示す.60 日間の塩水浸せき時でシラン系が $4.0 \times 10^{-3} \sim 5.7 \times 10^{-2}$ (cm²/年),ケイ酸塩系では 8.2×10^{-1} (cm²/年),無塗布で 1.7(cm²/年)の拡散係数であった.

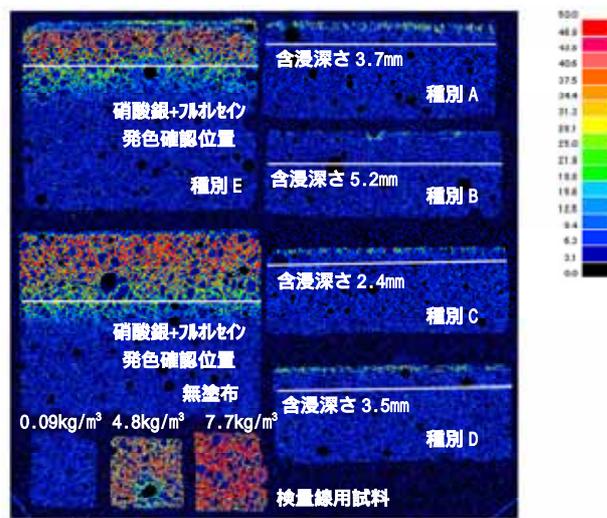


図-1 60日塩水浸せき後の EPMA 画像

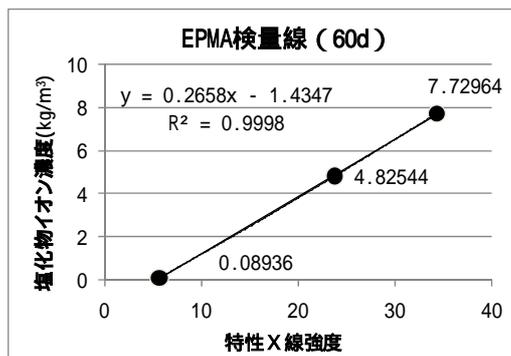


図-2 検量線作成例

キーワード 表面含浸材, 塩化物イオン, 拡散係数, EPMA,

連絡先 〒194-8508 東京都町田市忠生1丁目4-1 (株) 高速道路総合技術研究所 TEL 042-791-1625

4. 予測モデル

表面含浸材の効果の算定には、フィックの拡散方程式を基にして、含浸領域内の塩化物イオンの浸透が拡散に従うものとし、含浸領域の拡散係数 D_s と無塗布領域の拡散係数 D_c をもつ2つ領域として予測を行った。²⁾

$$C(x,t) = C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{0.1 \left(\frac{x}{\sqrt{D_c}} + \frac{C_s}{\sqrt{D_s}} \right)}{2\sqrt{t}} \right) \right) + C(x,0) \quad (\text{式-1})$$

ここに、 C_s ：表面含浸材の含浸深さ(mm)、 D_s ：含浸部の見掛けの拡散係数($\text{cm}^2/\text{年}$)、 t ：経過年数(年)、 D_c ：無含浸部の見掛けの拡散係数($\text{cm}^2/\text{年}$)

また、拡散予測には60日間の塩水浸せき時の含浸領域内の拡散係数 D_s を用い、以下の条件で試算を行った。

- 初期塩化物イオン濃度： $C(x,0) = 0.0\text{kg}/\text{m}^3$
- 表面塩化物イオン濃度： $C_0 = \text{汀線付近の}9.0\text{kg}/\text{m}^3$ ³⁾
- 鋼材位置100mm、腐食発生濃度 $1.2\text{kg}/\text{m}^3$
- 含浸深さは測定値を使用
- 無含浸部での塩化物イオンの見掛けの拡散係数 D_c は、コンクリートのW/Cを基にして参考文献³⁾により定めた。
- 含浸材の性能は経年劣化などによって変化しない。

5. 試算結果

試算の結果を表-2に示す。無塗布の13.3年を1.0とした場合、表面含浸材の遮塩効果により鋼材腐食発生濃度に到達する年数は、シラン系で1.6~2.9倍となり延命効果が認められる。ただしEPMAの分析結果より塩化物イオンの浸透がほとんど認められず、含浸深さも最も深い表面含浸材Bが比較的延命比率が低い試算結果となった。これは、一律に表面塩化物イオン濃度を $9.0\text{kg}/\text{m}^3$ と設定したため、拡散係数の差による影響が支配的であったと考える。表面含浸材Bの拡散係数は60日塩水浸せき時で高い値を示しており、塩化物イオンの浸透分布が極端に少ない変動であったことが、EPMA分析値からの拡散係数の回帰結果に影響を与えたと考える。

6. まとめ

EPMAを用いることで、表面含浸材が浸透している極表面層の塩化物イオン浸透状態を把握することが出来た。また、検量線を作成しEPMAの特性X線強度から塩化物イオンの濃度への換算を行うことで、含浸領域内の拡散係数の算出が可能となった。これにより、塩化物イオン拡散予測を用いて表面含浸材を施工した部材の鋼材腐食抑制効果をより詳細に評価する可能性を見出せた。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書[規準編]，2007.5
- 2) 土木学会：コンクリートの表面被覆および表面改質に関する技術の現状，pp120，2004.2
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書[設計編]，pp111，2007.12

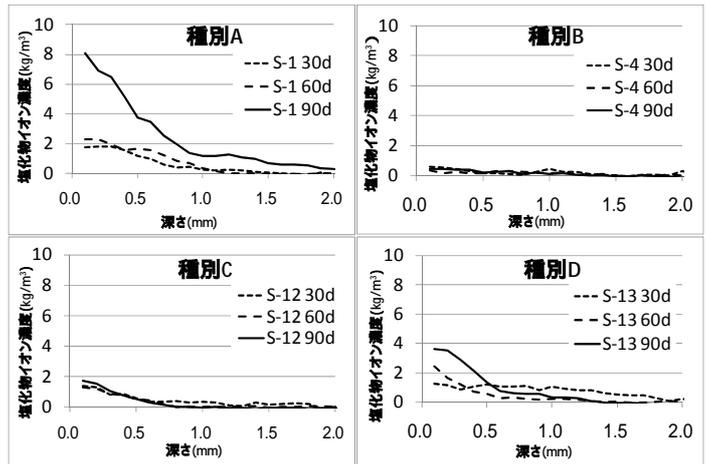


図-3 シラン系における塩化物イオン浸透状態

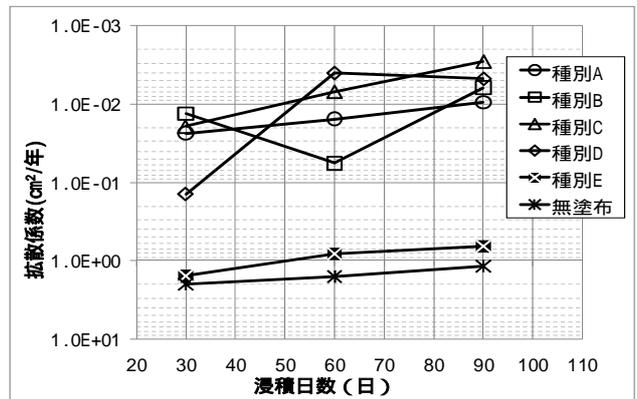


図-4 塩化物イオンの拡散係数

表-2 塩化物イオンの拡散予測試算結果

種別	拡散係数 $\text{cm}^2/\text{年}$	含浸深さ (mm)	鋼材腐食開始年(年)	抑制効果 (延命比率)
A	0.015	3.7	25.4	1.92
B	0.057	5.2	21.8	1.64
C	0.007	2.4	25.0	1.88
D	0.004	3.5	39.0	2.94
無塗布	1.672		13.3	1.00

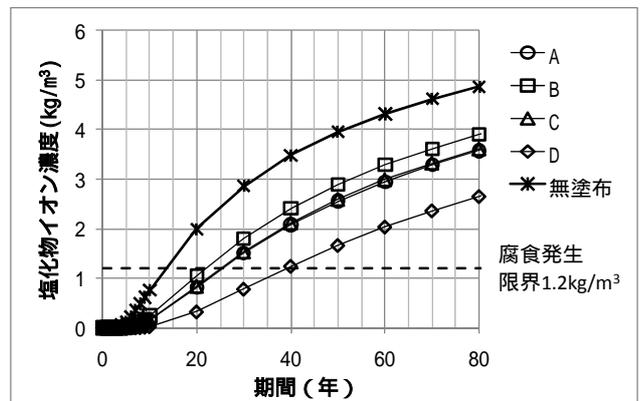


図-5 鋼材位置における塩化物イオン濃度の変化