

コンクリート中の塩化物イオン実効拡散係数の材齢依存性とその簡易評価方法の提案

キーワード：塩化物イオン，拡散係数，体積抵抗率，混合セメント
コンクリート

報告書番号：N13002

背景

原子力発電所屋外重要土木構造物のように、沿岸部に立地する鉄筋コンクリート構造物の長期供用を確実なものとするためには、塩害に対する耐久性を精度良く評価することが重要となる。ここでは、塩化物イオンのコンクリート内部への侵入過程を、拡散係数を用いて評価するが、既往の評価式（土木学会コンクリート標準示方書等）では、供用中のコンクリートの状態や経年変化等を考慮できないため、推定結果のばらつきが、極めて大きいことが知られている。

目的

コンクリート中の塩化物イオン実効拡散係数の材齢依存性を明らかにすると共に、簡易な評価方法を提案する。

主な成果

結合材の種類（普通セメント，フライアッシュセメント B 種），水結合材比（40%，50%，60%），養生条件（標準，湿潤，気中）および材齢（28 日～657 日）を因子とするコンクリート試験体（計 156 体）を作製し、コンクリート中の塩化物イオンの実効拡散係数^{注1}を評価した（図 1）。また、他の結合材に関する既往のデータについても、文献調査を行った。

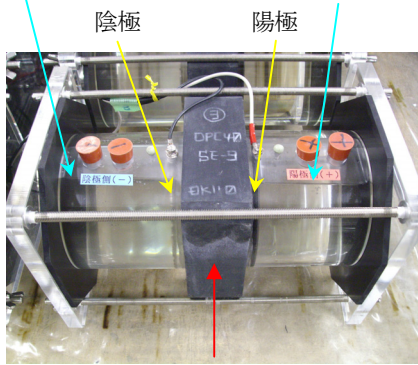
1. コンクリート中の塩化物イオン実効拡散係数の材齢依存性

混和材を使用した混合セメントでは、材齢の推移に伴って塩化物イオン実効拡散係数が低減する傾向が認められ、ポゾラン反応等に起因した組織の緻密化に拠るものと推察された。次に、塩化物イオン実効拡散係数を材齢 91 日時点の値で除して無次元化した後、べき乗関数で回帰した評価式を作成した。同式は、水結合材や養生条件に拠らず、材齢 91 日時点の塩化物イオン実効拡散係数を計測するだけで、数年程度までの低減傾向を良好に評価できる（図 2）。一方、混和材が用いられない場合、塩化物イオン実効拡散係数には、明確な材齢依存性は見出されなかった。

2. コンクリート中の塩化物イオン実効拡散係数の簡易評価方法の提案

塩化物イオン実効拡散係数を、計測が容易な体積抵抗率から推定する簡易評価方法を、Bootstrap 法^{注2}も援用した上で作成した。ここでは、コンクリートの含水状態の補正も考慮しており、変動係数が 50%～70%の範囲で、実測値を比較的簡易に評価でき、既往の研究例と比較して推定精度の改善が図られる傾向にある（図 3，4）。

塩化ナトリウム水溶液 (濃度: 0.5mol/L) 水酸化ナトリウム水溶液 (濃度: 0.3mol/L)



コンクリート試験体 (直径:100mm, 厚さ: 50mm)

図1 電気泳動実験の概要

直流電圧の印加によって誘因される電気泳動現象を利用した、土木学会の規準試験である。

$$D_e = \varepsilon \cdot \left(\frac{\zeta}{w_1} \right)^{\gamma\beta} \cdot \left(\frac{W}{B} \right)^{\kappa\gamma} \cdot \rho_1^\gamma$$

- D_e : 塩化物イオン実効拡散係数
- ζ, κ : 飽和時の含水率と水結合材比間の関係式に関する実験定数
- β : 含水比と体積抵抗率間の関係式に関する実験定数
- ε, γ : 体積抵抗率とコンクリートの塩化物イオン実効拡散係数間に関する実験定数
- W/B : 水結合比(%) (結合材が普通セメント系の場合には水セメント比)
- w_1 : 含水率(%) (計測値)
- ρ_1 : 体積抵抗率($\Omega \cdot m$) (計測値)

結合材の種類	塩分の有無	実験定数				
		ζ	κ	β	ε	γ
普通セメント系	無	0.556	0.585	-2.84	1274	-1.56
	有	0.689	0.585	-2.48	389	-1.35
混合系	無	1.98	0.288	-3.54	33.8	-0.965
	有	2.45	0.288	-3.41	196	-1.37

図3 体積抵抗率からの塩化物イオン実効拡散係数の評価式

コンクリートの含水状態に関する補正も考慮された式となっている。実験定数の設定には、Bootstrap法を援用した。

データ数
 ・既往の研究: 109個
 ・本研究: 33個

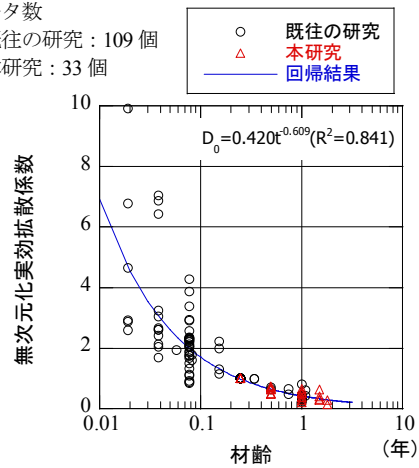


図2 混合セメントを使用した場合におけるコンクリートの塩化物イオン実効拡散係数の材齢依存性
 材齢91日時点での実効拡散係数で除して無次元化した後、べき乗関数で回帰した評価式は、材齢の推移に伴う低減傾向を良好に評価している。

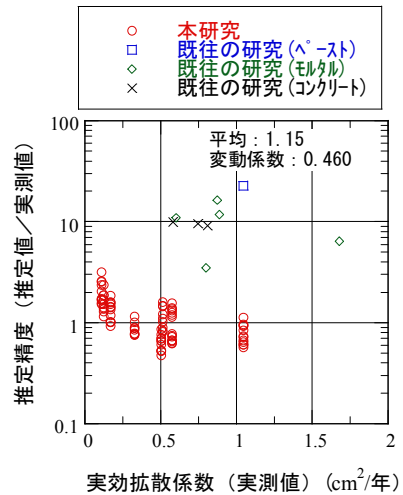


図4 体積抵抗率からの塩化物イオン実効拡散係数を推定する式の適用結果例

塩分を含まない混合セメントコンクリートの場合の例を示す。既往の研究例^{注3)}に比べて、大幅に推定精度が改善される結果となった。

- 注1) 土木学会「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-G571-2010)」に準拠して評価した。
- 注2) リサンプリング法に分類される統計解析理論の一つ。ノンパラメトリック分布かつ少数の標本集団から母集団の性質を推定することが可能とされる。
- 注3) 皆川ら: コンクリートの電気抵抗率と塩化物イオンの見掛けの拡散係数との関係に関する基礎的研究, 土木学会論文集 E, Vol.66, No.1, pp.119-131, 2010.

関連研究報告書	N12018「鉄筋コンクリート構造物の塩害劣化予測に用いる塩化物イオン実効拡散係数の評価方法の合理化」(2013.4)
研究担当者	松井 淳 (地球工学研究所 構造工学領域)
問い合わせ先	電力中央研究所 地球工学研究所 研究管理担当スタッフ Tel. 04-7182-1181(代) E-mail: cerl-rr-ml@criepi.denken.or.jp