

土木学会規準に替わるモルタル供試体の Cl⁻の実効拡散係数の測定法

Method for measuring the effective diffusion coefficient of Cl⁻ in mortar specimens alternative to the JSCE standard

北海道大学工学部環境社会工学科 ○正 員 三浦知暉 (Tomoki Miura)
 北海道大学大学院工学研究院 正 員 橋本勝文 (Katsufumi Hashimoto)
 北海道大学大学院工学研究院 正 員 杉山隆文 (Takafumi Sugiyama)

1. はじめに

コンクリート構造物は様々な原因によって劣化することが知られており、劣化メカニズムに応じて耐久性の評価が行われる。塩害に代表されるように、塩化物イオンによるコンクリート構造物の劣化においては、塩化物イオンの浸入に伴う鉄筋腐食やひび割れの発生は大変重要である。このとき、塩化物イオンの拡散係数はコンクリートの耐久性を評価する際に非常に重要な指標となる。

実環境に暴露されたコンクリート中の塩化物イオンの拡散係数に最も近いのは、濃度勾配を利用してイオン移動を行う浸漬試験であるが、短時間で拡散係数を算出する方法として、電氣的にイオン移動を加速させる電気泳動試験を適用する場合がある。この方法は土木学会規準¹⁾として制定されており、浸漬に数か月間を要する浸漬試験に比べ、土木学会規準では印加開始から終了まで10日程度の短時間で拡散係数を測定できる。

本研究では、飛躍的に短時間で塩化物イオンの実効拡散係数を算出できる手法の提案について検討を行った。上記の土木学会規準（以下、土木学会方式）に替えて、薄片サンプルに対し高電圧を付与した条件の下、で塩化物イオンの実効拡散係数を算出する新たな試験方法（以下、促進電気泳動方式）を提案することを目的とした。

2. 実験概要

供試体として、普通ポルトランドセメントと標準砂を用いた水セメント比 0.6 あるいは 0.5 となるモルタルを作製した。表-1に配合表を示す。打設から24時間後に脱型し、28日間湿潤状態で養生した。土木学会方式には、直径100mm、厚さ約50mmの円柱供試体を所定の通りに用意し、促進電気泳動方式には、断面形状が一辺40mmの正方形、厚さ約5mmの薄片試料を用意した。

電気泳動試験（土木学会方式および促進電気泳動方式）の実験条件として、溶液濃度と電圧、その他の条件を表-2に示す。電気泳動試験においては、所定の電圧の印加を開始することで、電気エネルギーにより塩化物イオンが陰極側から陽極側へと移動する。このとき、陽極側溶液を一定時間ごとに0.2ml採取し、電量測定式塩分計にて塩化物イオン濃度を測定した。陽極側溶液の塩化物イオン濃度の変化を示す勾配が一定となった状態を定常状態とし、5点以上測定することで実効拡散係数を算出した。なお、土木学会方式および促進電気泳動方式ともに実効拡散係数の算出には土木学会規準式¹⁾（式(1)および式(2)）を用いた。電圧の印加中には、陽極側溶液はNaCl濃度が0.05mol/Lを超えないように、陰極側

表-1 配合表

水セメント比	単位質量(kg/m ³)		
	標準砂	セメント(OPC)	水
0.5	1536	512	256
0.6	1536	456	274

表-2 実験条件

	供試体厚さ (mm)	供試体 断面形状	電圧 (V)	陽極溶液	陰極溶液
土木学会 方式	50	円	15	NaOH (0.3mol/L) 1L	NaCl (0.5mol/L) 1L
		直径100mm			
促進電気 泳動方式	5	正方形	30.60	NaOH (0.3mol/L) 750ml	NaCl (0.5mol/L) 750ml
		一辺40mm			

溶液はNaCl濃度が0.45mol/Lを下回らないようにするため適宜各溶液を全量交換した。また実際の供試体厚さはそれぞれ約10%を許容差とした。式(1)および式(2)以下に示す。

$$J_{cl} = \frac{V}{A} * \frac{\Delta c}{\Delta t} \quad (1)$$

J_{cl} : Cl⁻の定常状態での流束 (mol/(cm²・year))

V : 陽極側の溶液体積 (L)

A : 供試体断面積 (cm²)

$\Delta c / \Delta t$: 陽極側 Cl⁻濃度の増加割合 ((mol/L)/year)

$$D_e = \frac{J_{cl} * R * T * L}{|Z_{cl}| * F * C_{cl} * (\Delta E - \Delta E_c)} * 100 \quad (2)$$

D_e : 実効拡散係数 (cm²/year)

R : 気体定数 (8.31J/(mol・K))

T : 絶対温度測定値 (K)

Z_{cl} : Cl⁻の電荷 (= -1)

F : ファラデー定数 (96,500C/mol)

C_{cl} : 陰極側の Cl⁻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)

3. 実験結果

3.1 土木学会方式

陽極側溶液の塩化物イオン濃度と経過時間を図-1に示す。なお、5日目に陰極側溶液を7日目に陽極側溶液

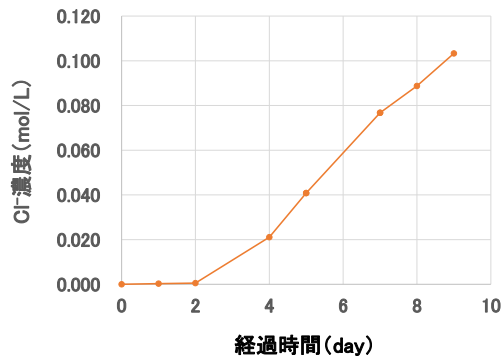


図-1 陽極側 Cl-濃度 (土木学会方式: W/C=0.6)

を全量交換した。図-1より、印加開始から2日程度は目立った変化が見られないが、4日目で降塩化物イオン濃度は増加している。9日目までの5日間で濃度勾配が一定となり、イオン移動が定常状態となっている。電圧印加直後の2日間で濃度上昇が起きなかったのは、印加開始直後のため塩化物イオンが材料内部を移動し、陽極側溶液まで到達できなかったためであると考えられる。4日目で降塩化物イオンが陽極側溶液へと到達し、一定のフラックスが得られた。以上より、算出した実効拡散係数の値を表-3に示す。

3.2 促進電気泳動方式

陽極側溶液の塩化物イオン濃度と経過時間を図-2および図-3に示す。水セメント比が0.6の場合、電圧を60Vで印加開始直後から塩化物イオン濃度が急激に上昇し、開始20分以降勾配が一定となったため定常状態となっている。一方、30Vでは勾配が緩やかな上昇となり開始30分以降が定常状態となっている。図-2より、電圧が大きいほど塩化物イオン濃度の勾配が大きく、電圧が30Vから60Vに2倍になることで、濃度勾配は2倍以上になっている。以上より、算出した実効拡散係数の値を表-4に示す。水セメント比0.5と0.6を比較すると、水セメント比が大きいほど実効拡散係数は大きくなった。

3.3 実効拡散係数および補正係数

表-3および表-4に示した結果では、土木学会方式から促進電気泳動方式へ供試体厚さが10分の1になり、電圧が2倍になると、実効拡散係数は約4倍に増加している。電圧が4倍になると、実効拡散係数は約11倍に増加している。これは、供試体厚さが薄いほど移動経路の長さが短くなり、材料内部に留まる塩化物イオンが減少することに加え、電圧が高いほど電場の影響を強く受けるためイオン移動が加速されるためである。

なお、土木学会方式から算出された実効拡散係数を D 、促進電気泳動方式から算出された実効拡散係数を D' とすると、同じ水セメント比において2変数の関係は補正係数 K を用いて式(3)に表すことが出来る(表-5参照)。

$$D=K \cdot D' \quad (3)$$

4. まとめ

本研究では土木学会方式に替わる新たな塩化物イオン

表-3 実効拡散係数結果 (土木学会方式)

	W/C	電圧(V)	厚さ(mm)	実効拡散係数 (cm ² /year)
土木学会方式	0.6	15	51.4	1.2

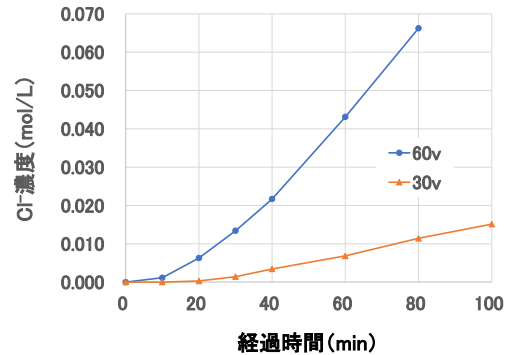


図-2 陽極側 Cl-濃度 (促進電気泳動方式: W/C=0.6)

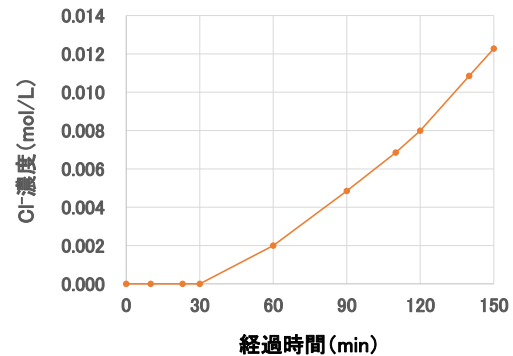


図-3 陽極側 Cl-濃度 (促進電気泳動方式: W/C=0.5)

表-4 実効拡散係数算出結果 (促進電気泳動方式)

	W/C	電圧(V)	厚さ(mm)	実効拡散係数 (cm ² /year)
促進電気泳動方式	0.6	30	5.5	4.5
		60	5.8	12.7
	0.5	30	5.5	2.9

表-5 実効拡散算出の補正係数 K

	W/C	電圧(V)	補正係数 K
土木学会	0.6	15	0.27
		30	
北大方式	0.6	60	0.094

の実効拡散係数算出方法として、促進電気泳動方式を提案した。これにより実効拡散係数を飛躍的に短時間で算出できることが分かった。なお、印加電圧が高く供試体厚さが薄いほど実効拡散係数は大きくなった。

参考文献

- 1) 土木学会: 土木学会標準「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 571-2003)」の制定, 2004