

# 電気泳動によるモルタル中の非定常状態での塩分浸透

群馬大学工学部 学生会員 前原 聡  
群馬大学工学部 正会員 杉山 隆文  
群馬大学大学院 学生会員 高見 満  
群馬大学工学部 フェロー 辻 幸和

## 1. はじめに

電気泳動試験では、コンクリート中の全塩化物イオン濃度が一定の値に収束し、流束が一定になる定常状態において塩化物イオン拡散係数を算定している。そこで本研究では、電気泳動試験の期間を2日および4日間に限定し、非定常状態での全塩化物イオン濃度の位置的な変化を測定し、シミュレーション結果と比較した。非定常状態では、セメント水和物による塩化物イオンの固定化現象を考慮する必要がある。そこで、固定化塩分量と固定化速度の影響を考慮した解析プログラムを作成し<sup>1)</sup>、非定常状態での全塩化物イオン濃度の分布との整合性を検討した。

## 2. 実験概要

### (1) 供試体

使用したモルタルの配合および諸性状を表-1に表す。配合についてはW/C=55%とし砂とセメントの質量比をS/C=2.5とした。養生は、飽和酸化カルシウム溶液中で3ヶ月以上十分に行った。電気泳動試験を行うにあたり、供試体をφ10cm、厚さ5cmにカットし、側面部をエポキシ系樹脂でコーティングした。そして、ASHOTO-T277に準拠して減圧吸水を行い、モルタル細孔を水で満たした。

表-1 配合および諸性状

W/C (%)	単体量(kg/m <sup>3</sup> )			フロー (mm)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )
	W	C	S		
55	303	551	1375	185	41.3

### (2) 電気泳動試験

実験装置の概略図を図-1に示す。両側の試験溶液は、コンクリートの細孔溶液を模擬したKOH(0.3mol/L)、NaOH(0.2mol/L)の混合溶液とし、陰極側には、NaCl(0.51mol/L)を混合した。直流電圧15Vを印加後、経時的に電流および電圧、陰極・陽極側の塩化物イオン濃度を測定した。試験期間は、非定常状態(2日、4日間)および、塩化物イオン拡散係数を求めるための定常状態に達した後の3期間とした。

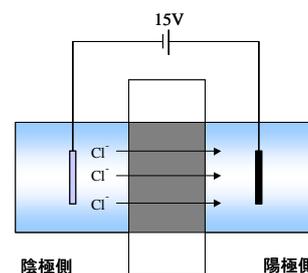


図-1 電気泳動試験装置

また、固定化速度の定式化を行うにあたり、陰極側で使用する溶液の塩化物イオン濃度を、0.17mol/L、0.051mol/Lと変えた場合の電気泳動試験も行った。この試験に関しては、定常状態に達するまで試験を続けた。以上のように、試験期間と陰極側の塩化物イオン濃度を変化させた実験を行った。各期間の試験が終了した後に、全塩化物イオン濃度の分布を調べるために、供試体を陰極側から8mm毎にカットし、各層に含まれる全塩分量をJCI-SC4に準拠して測定した。

## 3. 実験結果

### (1) 塩化物イオン拡散係数(定常状態)

陰極側および陽極側で測定した塩化物イオン濃度の変化量の積算値と、経過日数の関係を図-2に示す。図において陰極側は減少量を陽極側は増加量を示している。陽極側の塩化物イオンの変化割合が一定となっている部分が定常状態であり、その傾きを求め、式(1)からフラックスを求めた。次に、ネルンスト・プランク式を応用した式(2)に代入して、塩化物イオン拡散係数 $D_{Cl}$ を算出した。

$$J_{Cl} = \frac{V}{A} \times \frac{dC_{Cl}}{dt} \quad (1)$$

キーワード：電気泳動試験、定常状態、非定常状態、塩化物イオン拡散係数

連絡先：群馬県桐生市天神町1-5-1 TEL 0277-30-1613 FAX 0277-30-1601

$$D_{Cl} = \frac{R \times T}{Z_{Cl} \times F \times \left( \frac{\Delta E - \Delta E_c}{L} \right)} \times J_{Cl} \quad (2)$$

ここで、V：溶液体積(L)、A：供試体の断面積(cm<sup>2</sup>)、dC<sub>Cl</sub>/dt：陽極側の塩化物イオン分布の傾き、R：気体定数(8.314J/(mol・K))、T：絶対温度(K)、Z<sub>Cl</sub>：塩化物イオンの電荷数、F：ファラデー定数(96500C/mol)、L：供試体の厚さ(cm)、ΔE：設定電位(V)、ΔE<sub>c</sub>：測定電位(V)

## (2)固定化速度の定式化

陰極側の NaCl 濃度を変化させた実験結果<sup>1)</sup>から、2日後、4日後および定常状態に達した後における表層部の固定化塩分量の経時変化を求めた。自由塩化物イオン濃度と固定化塩化物イオン濃度の関係を定量的に求めるために、Freundlich 式(式(3))によって関連づけた。式中の α および β は固定化塩分量のパラメータであり、実験値と最もよく適合するように最小二乗法によって求めた。また、式(3)の α は時間の関数として定めたものであり、式(4)に示す。

$$C_b = \alpha(t) \times C_f^\beta \quad (3) \quad \alpha(t) = \alpha(1 - e^{-kt}) \quad (4)$$

ここで、C<sub>b</sub>：固定化塩化物イオン濃度、C<sub>f</sub>：自由塩化物イオン濃度、α、β：固定化塩化物イオン濃度のパラメータ、k：固定化速度のパラメータ、t：各層において塩化物イオンが到達してからの経過時間(日)

図-3は、式(3)(4)より求めた固定化塩化物イオン濃度の経時変化である。

## 4. 解析方法および実験結果との比較

塩化物イオンの電気泳動を模擬するにあたり、式(5)に示す次元方向のネルンストープランク式を用いた。

$$J_{Cl} = D_{Cl} \frac{\partial C_{Cl}(x)}{\partial x} - \frac{Z_{Cl} F}{RT} D_{Cl} C_{fCl} \frac{\partial E(x)}{\partial x} \quad (5)$$

計算は差分法で行い、右辺第一項の拡散項は無視し、式(3)の固定化塩分量を用いて、全塩化物イオン濃度を計算した。図-4は、試験期間を変化させた実験結果と解析結果をあわせて示す。実験結果より、表層部分の全塩分量は、経時的に増加しており、塩化物イオンの固定化は時間に依存していると考えられる。つまり、自然拡散における局所的な化学平衡では、固定化は拡散と比較して十分に早いと仮定しているが、電気泳動では、本研究のように時間の概念を導入する必要性を示唆している。また、実験結果と解析結果を比較すると、非定常状態(2日、4日間)および定常状態ともに、表層部と供試体内部でよく一致している。つまり、定常状態で求めた塩化物イオン拡散係数は、細孔構造の物理的性質を反映しており、この塩化物イオン拡散係数と非定常状態における固定化現象を組み合わせることによって非定常状態の塩化物イオンの電気泳動を比較的良好的にシミュレートできると考えられる。

## 5. まとめ

非定常状態における塩化物イオンの電気泳動をシミュレートするには、固定化現象の定量化が必要である。本研究では、自由塩化物イオン濃度と固定化塩化物イオン濃度を、Freundlich 式で定め、表層部および供試体内部の固定化塩化物イオン濃度を経時的に増加させ、定常状態での塩化物イオン拡散係数を用いることによって、非定常状態における電気泳動をシミュレートできた。

参考文献 1)清水 俊吾・杉山 隆文・辻 幸和・Supratic Gupta：モルタル中を電氣的泳動する塩化物イオンの濃度分布,コンクリート工学年次論文集,Vol.22, No.1, 2000

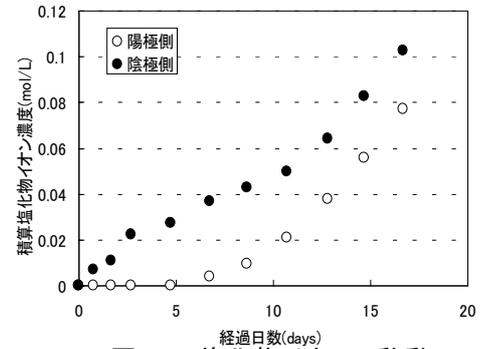


図-2 塩化物イオンの移動

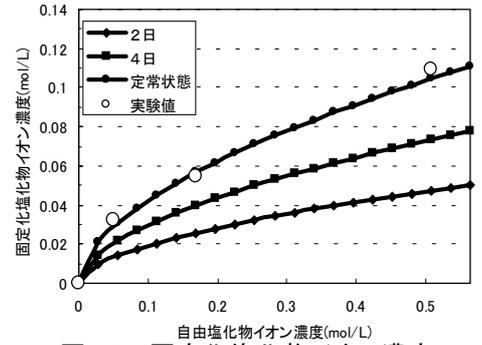


図-3 固定化塩化物イオン濃度の経時変化

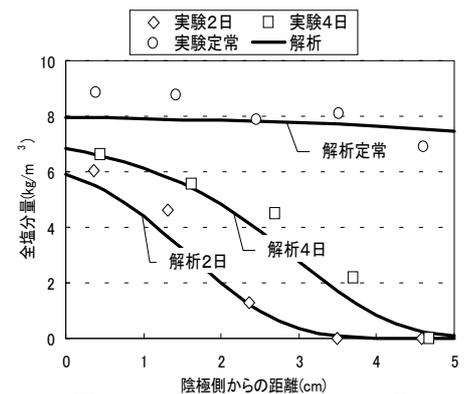


図-4 全塩化物イオン濃度分布の実験値と解析値