

電氣的泳動する塩化物イオンの濃度分布における自由塩分量と固定化塩分量の割合

群馬大学大学院 学生会員 清水 俊吾
群馬大学工学部 正 会 員 杉山 隆文
群馬大学工学部 正員-会員 辻 幸和

1. はじめに

コンクリート中の塩化物イオンの浸透分布を、電氣的手法を用いた促進試験によって迅速に求めることができる。ここで、浸透分布の評価方法として、JCI-SC4 に記載された全塩分量、可溶性塩分量があるが、全塩分量における自由塩分量と固定化塩分量の割合を定量的に示した研究は少ない。本研究では、実験によって全塩分量を測定し、固定化塩分量の定式化を試みた。そして、数値解析を行うことで、自由塩分量と固定化塩分量の割合を示した。

2. 実験方法

実験装置の概略図を図 - 1 に示す。供試体は W/C が 45%、55% および 65% の 3 種類のもルタルを用いた。両極側の使用溶液は、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、腐食因子である NaCl(0.51mol/L) を混合した。試験期間は、非定常状態(2 日間、4 日間)および定常状態に達した後の 3 期間とした。試験終了後は、供試体を厚さ方向に 5 層にスライスして、各層に含まれる全塩分量を JCI-SC4 に準拠して測定した。また、自由塩分量と固定化塩分量の関係を求めるために、陰極側の塩化物イオン濃度を、0.17mol/L、0.051mol/L と変化させた実験も行った。

3. 実験結果による固定化塩分量の算定

図 - 2 は陰極側の NaCl 濃度を变化させた実験から得られた、自由塩分量と固定化塩分量の関係である。測定した全塩分量から式(1)を用いて、縦軸の固定化塩分量を求めた。

$$Cb = Ct - Cf \times \varepsilon \quad (1)$$

ここで、 Cb : 固定化塩分量、 Ct : 全塩分量、 Cf : 自由塩分量、 ε : 空隙率

Cf は使用溶液の濃度と等しい。つまり、定常状態に達したときもルタル細孔溶液中の自由塩分量は、いずれの位置においても使用溶液の濃度に等しくなると仮定してデータ解析を行った結果である。また、両者の関係が Freundlich 式に従うと仮定して式(2)により定式化を試みた。

$$Cb = \alpha Cf^b \quad (2)$$

ここで、 Cb : 固定化塩分量、 Cf : 自由塩分量、 α 、 β : 固定化塩分量のパラメータ

図 - 3 には、表層部の固定化塩分量の経時変化を示した。固定化塩分量の算定には、式(1)を用いた。ただし、表層部の NaCl 濃度は経過時間によらず 0.51mol/L で一定と考え、 $Cf = 18.0(\text{kg}/\text{m}^3\text{-solution})$ として計算した。このように固定化塩分量が経時的に変化していることを考慮し、次式に示すように(2)式の α を時間の関数とした。

$$Cb = \alpha(1 - e^{-kt}) \times Cf^b \quad (3)$$

ここで、 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着してからの経過時間(日)

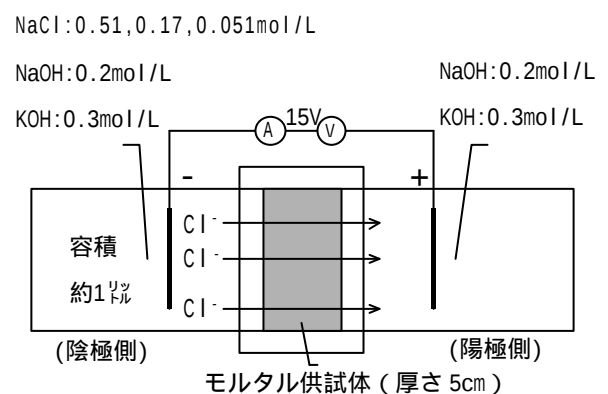


図 - 1 電氣的泳動試験の概略図

キーワード：電氣的泳動試験、固定化、ネルンスト-プランク式

連絡先：〒376-8515 群馬県桐生市天神町 1-5-1 TEL 0277-30-1613 FAX 0277-30-1601

4. 解析方法

塩化物イオンの電氣的泳動は、ネルンスト - ブランク式で近似できると仮定して、フラックスの収支式を差分表示で表した。これを式(4)に示す。また、全塩分量を自由塩分量と固定化塩分量の和で表したものを、式(5)に示す。プログラムは式(4)と式(5)が等しくなるときの濃度($C_{i,j}^f$)を、次々に求められるように作成した。

$$C_{i,j}^t - C_{i,j-1}^t = -aDA \frac{C_{i,j}^f - C_{i-1,j}^f}{\Delta x} \Delta t \quad (4)$$

$$C_{i,j}^t = C_{i,j}^f Ws + C_{i,j}^b \quad (5)$$

ここで、 $C_{i,j}^t$: 位置 i 、時間 j における全塩分量($\text{kg/m}^3\text{-mortar}$)、 $C_{i,j}^f$: 位置 i 、時間 j における自由塩分量($\text{kg/m}^3\text{-solution}$)、 D : 拡散係数 = 定常状態から得られた拡散係数/空隙率(cm^2/s)、 A : 単位面積当たりの有効移動パス (= Ws)、 a : 式(6)に示す、 Ws : 含水率 = 空隙率($\text{m}^3\text{-solution/m}^3\text{-mortar}$)、 $C_{i,j}^b$: 式(3)に示した固定化塩分量($\text{kg/m}^3\text{-mortar}$)

$$a = \frac{zFU}{RTL} \quad (6)$$

ここで、 z : 電荷、 F : ファラデー定数(C/mol)、 U : 測定電位(V)、 R : 気体定数(8.314J/mol/K)、 T : 絶対温度(K)、 L : 供試体厚さ(5cm)

5. 解析結果および実験値との比較

紙面の都合上、 $W/C=55\%$ の結果のみ図 - 4 に示す。実験から得られた定常状態(17日後)および非定常状態(2日後、4日後)における全塩分量も併せて示した。解析結果の全塩分量は実験値によく一致している。そこで、解析における全塩分量を自由塩分量と固定化塩分量に分けて示した。このような数値解析を行うことで、固定化塩分量の経時的な変化がよく表されている。特に表層部においては、自由塩分量は一定であるが固定化塩分量が経時的に大きくなる様子が反映されている。また、自由塩分量と固定化塩分量の割合は、定常状態においてほぼ1対1である。 $W/C=45\%$ 、 65% においても同様の解析を行ったが、固定化塩分量は全塩分量の約半分を占める結果となった。ただし、両者の割合がこのような結果となったのは、定常状態において細孔中の自由塩分量が溶液濃度と等しくなると仮定したためであり、今後このことを検証し、数値解析の精度を上げていく必要がある。

6. まとめ

実験によって全塩分量を求め、固定化塩分量を適切に定式化することで、全塩分量の濃度分布において、実験値と解析値がよく一致した。そこで、解析における全塩分量を自由塩分量と固定化塩分量に分けて表すと、両者の割合および経時変化をうまく把握することができた。

なお、本研究は日本学術振興会科学研究費補助金(基盤研究(B)(1)代表: 長岡技術科学大学助教 下村匠)の交付を受けて行った。

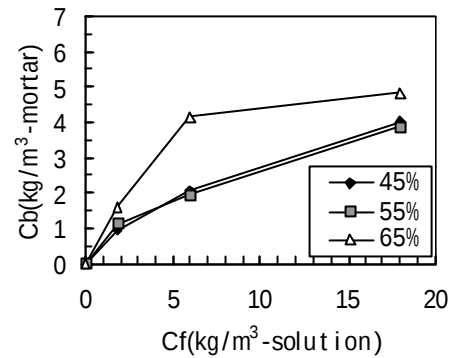


図 - 2 自由塩分量と固定化塩分量の関係

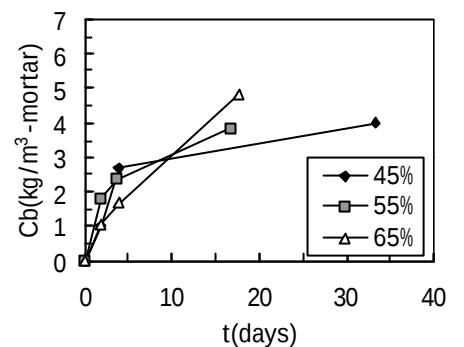


図 - 3 表層部の固定化塩分量の経時変化

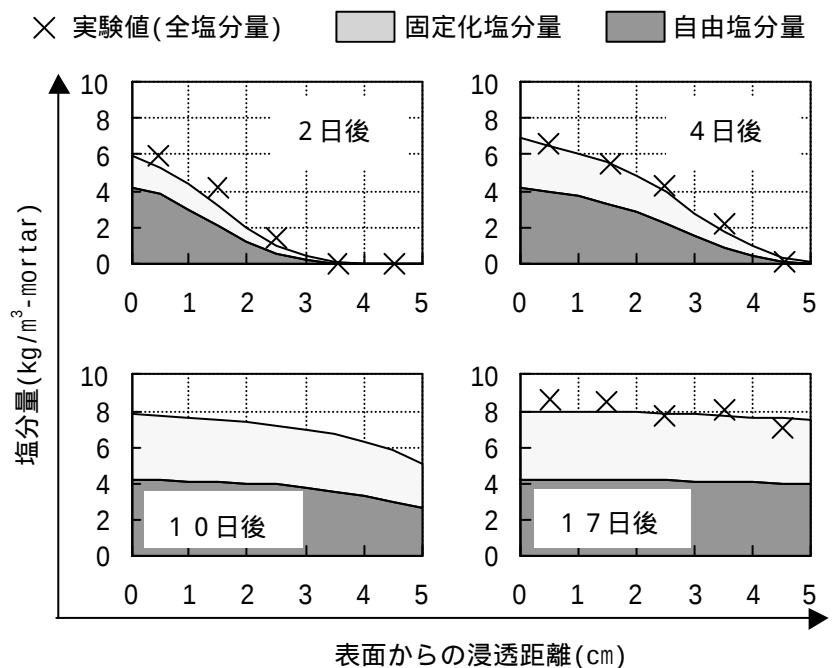


図 - 4 自由塩分量と固定化塩分量の割合