

実環境下のコンクリートに対する電気泳動法の適用性について

電力中央研究所 正会員 ○松井 淳

1. はじめに

RC 構造物の鋼材の腐食（塩害）に対する耐久性能の照査で用いられる塩化物イオンの見掛けの拡散係数を評価するための規準試験方法の一つとして、「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-G571-2018)」¹⁾（以後、電気泳動法）が制定されている。本試験方法は、主に設計での適用が想定されるが、①その電気的性質を利用し、電気抵抗率との関連性が大いこと、②浸せき法¹⁾等の他の規準試験方法よりも、相対的に試験期間が短いこと、等から維持管理での適用も期待できると考えられる。本研究では、実環境下にあるコンクリートに対する電気泳動法の適用を検討するために、有限要素法による数値解析の評価を実施した。

2. 数値解析の実施概要²⁾

有限要素解析のモデル化においては、電気泳動法を可能な限り模擬した。ここでは、Cl⁻に加え、初期の陽極セルおよび陰極セル内溶液に溶存する Na⁺および OH⁻の移動を同時並行に考慮することとし、これらの流束を次式で示す Nernst-Planck 式で定義した。

$$J_i = -\omega_i RT \frac{\partial c_i}{\partial x} - z_i F \omega_i c_i \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (1)$$

ここに、 J_i ：イオン種 i の流束(cm³/s)、 ω_i ：イオン種 i のモル移動度(cm²・mol/(s・J))、 z_i ：イオン種 i の価数、 c_i ：イオン種 i の濃度(mol/cm³)、 R ：気体定数(= 8.31 J/(K・mol))、 T ：絶対温度(K)、 ϕ ：電位(V)

境界条件として、電極反応である水の電気分解を適用し、OH⁻の生成／消費量を Faraday の法則から求めた。試験体内部の空隙は、単一の円管でモデル化した。円管の長さは試験体の厚さに等しいものとし、円管の半径で空隙特性を代表した。円管の半径は、次のような手順で定めた。先ず暫定的に半径を定めて解析を実行し、解析結果から試験体内部を流れる電流の値を求め、実測値と比較する。実測値と相違がある場合には、それを解消するように半径の値を適宜増減し、再度解析を実行し、その差異が解消されるまで繰り返した。解析は、陽極セル内溶液中の[Cl⁻]の経時変化が直線的に増加する定常過程を対象とし、解析開始時点での[Cl⁻]、陽極セルおよび陰極セル内溶液の pH（以後、それぞれ pH(+), pH(-)）の計測値を初期値とした。[Na⁺]は電気的中性条件から算出した。また、コンクリート内部の細孔溶液のイオン組成は、既往の研究例³⁾に基づき、陰極セル内溶液のイオン組成と同一とした。解析は、要素長さ 1mm の 1 次元要素とし、時間刻みは 60(秒)で実施した。

3. 数値解析結果とその考察

解析は、自然環境下に一定期間置かれていたコンクリート 7 水準（普通ポルトランドセメント：4 水準，フライアッシュセメント：3 水準）を対象に実施した。図 1 および図 2 に、pH、電流および陽極セル内溶液の[Cl⁻]の時刻歴に対して、実験と解析結果を比較したものの一例を示す。結合材としてフライアッシュセメントを用いたコンクリートの場合、沿岸部に置かれていたことから、試験体内部に海水由来の塩化物イオンが含まれていることから、定常過程以前の非定常過程（セメント系材料内部に塩化物イオンが、固定化と泳動を繰り返しながら進行する過程で、陽極セル内溶液中には塩化物イオンが探知されない過程）がみられることなく、初期段階から[Cl⁻]が増加している（図 1(b)）。また、電流に対する解析結果には、ごく初期の段階で不連続な推移を示す場合があった（図 1(b)）。これは初期段階では、陽極セル内溶液のイオン組成と試験体内部のイオン組成（細孔溶液のイオン組成）が大きく異なるためであるが、ごく短時間のうちに解消されている。pH およ

キーワード 塩化物イオン実効拡散係数、電気泳動法、塩害、耐久性、鉄筋コンクリート

連絡先 〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646 TEL 04-7182-1181（代）

び[Cl]に対する解析結果は、実験に概ね対応する結果となっており、**2.**で述べたモデル化が妥当であることが確認される。

図3に、これらの結果に基づいて算出した塩化物イオンの実効拡散係数の値を比較した結果を示す。セメントの種類（普通セメント/フライアッシュセメント）にかかわらず、解析結果は、概ね実験結果に対応している。

さらに、実効拡散係数の値は、 $0.5 \sim 2.3 \text{ cm}^2/\text{年}$ の範囲にあるが、解析精度とは関連がなく、概ね対応した結果となっている。

以上の結果から、本研究で検討した範囲内では、**2.**で述べたモデル化が概ね妥当であると考えられる。本モデル化は、室内試験体を対象としたものであることから、本研究で解析の対象とした試験体内部における塩化物イオンの移動機構は泳動であることが示唆される結果となった。

4. まとめ

実環境下に一定期間おかれたコンクリートに対して、電気泳動法を適用して塩化物イオン実効拡散係数の算出過程に対して、有限要素解析による数値シミュレーションを実施し、実験に対して概ね対応する結果を得た。このことから、コンクリート内部の塩化物イオンの移動機構は、泳動であることが示唆された。

参考文献

- 1) 土木学会：2018年制定 コンクリート標準示方書[規準編]，丸善，2018.
- 2) 松井 淳：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，電力中央研究所報告，研究報告：N12018，2013.
- 3) 久田 真：通電によるコンクリート中のイオンの移動に関する研究，東京工業大学学位請求論文，1995.

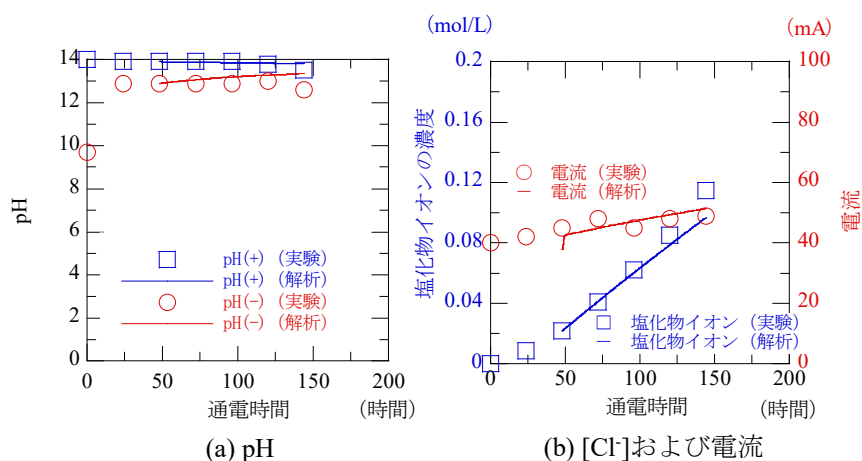


図1 数値解析結果の例（フライアッシュセメントの場合）

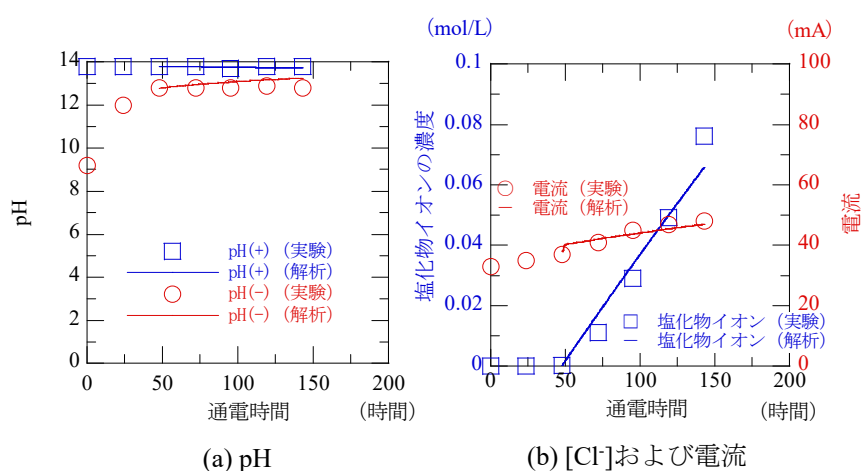


図2 数値解析結果の例（普通セメントの場合）

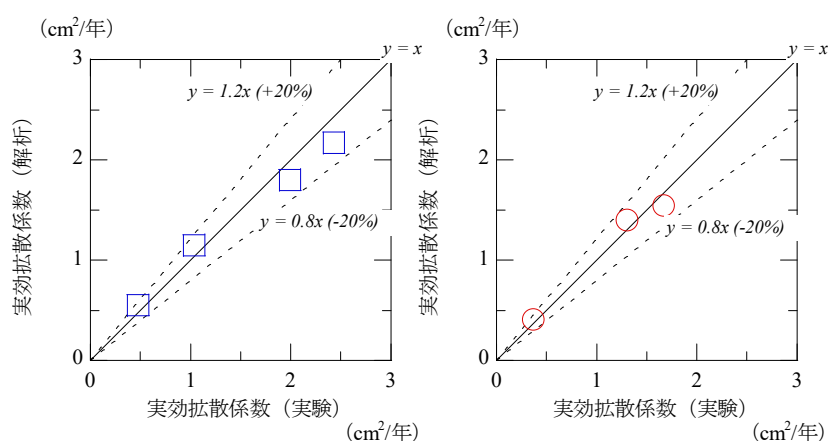


図3 塩化物イオン実効拡散係数の比較