

## セメント系材料－断面修復材間の境界面の処理状態が遮塩性能に与える影響について

電力中央研究所 正会員 ○松井 淳

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の劣化・損傷領域に対する補修工法の一つに、断面修復工法がある。既に多数の実績を有するが、再供用された時点で、修復領域における耐震性能に加え、耐久性能がどの程度回復しているかが重要となる。このことから、著者はセメント系材料－断面修復材間の境界面の処理状態（目荒らしの程度）に着目し、遮塩性能の回復性状に与える影響について、実験的および数値解析的な検討を行った。

## 2. 実験の概要

材齢 28 日の圧縮強度が  $28\text{N/mm}^2$  のコンクリートで作製されたシリンダー試験体（直径 100mm、高さ 200mm）を、縦断方向にカッターで切断し、切断面に対して目荒らしを行った。目荒らしの程度としては、土木研究所のマニュアル（案）<sup>1)</sup>に基づき、①洗い出し（粗骨材が露出）、②平滑（カッターで切断しただけ）、および③①と②の中間段階の 3 水準とした。次に、目荒らしを実施した試験体のうちの一つをシリンダー試験体用の型枠に再度格納した後、所定の配合で練り混ぜた断面修復材（ポリマーセメント系軽量モルタル）を注入して、養生した。以上により、両者の境界面を有し、かつ底面の断面積比および体積比がほぼ 1:1 となるシリンダー試験体が作成される。次にこの試験体を厚さ 50mm に切断し、土木学会規準「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-G571-2012）」<sup>2)</sup>を適用し、その遮塩性能を評価した。

## 3. 塩化物イオンの実効拡散係数

定常状態における電気泳動装置の陽極側セル内溶液の  $[\text{Cl}^-]$  の経時変化を調べた。コンクリート単体（以後、母材）－断面修復材間の境界面の未接着領域等のような比較的粗大な連続空隙が存在する場合、イオン種は、電気泳動場に加えて移流場によって、セメント系材料内部を移動し、 $[\text{Cl}^-]$  の経時変化が、わずかに下に凸な曲線に変化することが指摘されている<sup>3)</sup>。このことから、代表的な下に凸な曲線である累乗関数および指数関数、さらに直線で回帰した時の決定係数  $R^2$  を比較した（図 1）。全水準において、直線で回帰した場合の決定係数は、1 に極めて近いことから、 $[\text{Cl}^-]$  の経時変化は、直線で近似してよいと考えられる。

次に、 $[\text{Cl}^-]$  の経時変化を直線で回帰して求めた実効拡散係数を比較したものを図 2 に示す。断面修復材単体の実効拡散係数は、母材のそれに比べて極めて小さいことから、どの水準も、母材の実効拡散係数の 50% 前後の値となっている。目荒らしの程度と実効拡散係数との関係については、洗い出し、および洗い出しと平滑の中間の場合は小さく、母材単体のその半分以下となっており、境界面の接着性能が極めて良好であることが示唆される。一方、目荒らしを行っていない平滑処理の場合の実効拡散係数は、母材のその 60% 程度であった。

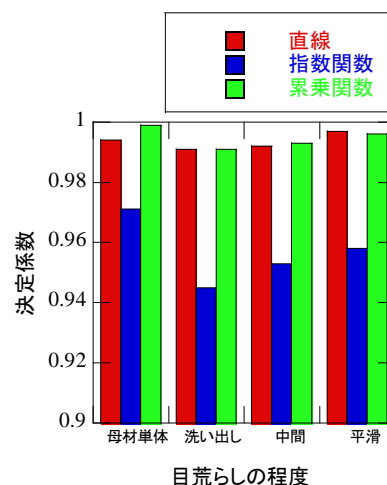


図 1 陽極側セル内溶液における  $[\text{Cl}^-]$  の経時変化の回帰結果

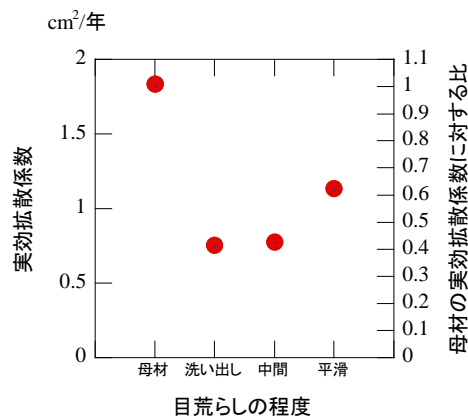


図 2 塩化物イオン実効拡散係数の比較

キーワード 塩化物イオン拡散係数, 電気泳動法, 断面修復材, 表面処理, 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

#### 4. 数値解析の概要<sup>4)</sup>

3. の結果に対して、有限要素法による数値シミュレーションを実施した。ここでは、電気泳動法を可能な限り模擬するために、Cl<sup>-</sup>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<sup>+</sup>および OH<sup>-</sup>の移動を同時並行に考慮することとし、これらの流束を式(1)で示す Nernst-Planck 式で定義し、質量保存則および Poisson 式によって定式化した。

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

ここに、 $J_i$ : イオン種  $i$  の流束 (cm<sup>3</sup>/s),  $\omega_i$ : イオン種  $i$  のモル移動度 (cm<sup>2</sup>・mol/(s・J)),  $z_i$ : イオン種  $i$  の価数,  $c_i$ : イオン種  $i$  の濃度 (mol/cm<sup>3</sup>),  $R$ : 気体定数 (= 8.31 J/(K・mol)),  $T$ : 絶対温度 (K),  $\phi$ : 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<sup>-</sup>の生成/消費量を Faraday の法則から求めた。母材-断面修復材の境界面の状態を含め、イオン種等の物質移動特性に影響する試験体内部を貫通する空隙は、

単一の空隙に集約し、円管でモデル化した。ここで円管の長さは試験体の厚さに等しいものとし、円管の半径で試験体全体の貫通空隙の特性を代表した。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<sup>-</sup>] の経時変化が直線的に増加する定常状態を対象とし、解析開始時点での [Cl<sup>-</sup>]、陽極セルおよび陰極セル内溶液の pH の計測値を初期値とした。[Na<sup>+</sup>] は、これらのイオン種との電気的中性条件から算出した。また、試験体内部の細孔溶液のイオン組成は、既往の研究例<sup>5)</sup>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。図 3 に、実験と比較した結果を示す。目荒らしの程度にかかわ

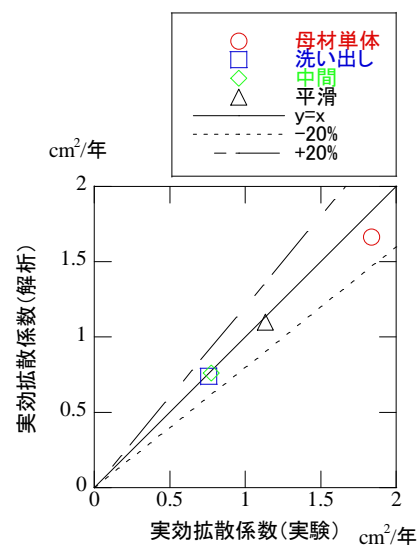


図 3 数値解析結果

らず、解析結果は、ほぼ実験結果に対応した結果となっており、ここで述べたモデル化が妥当であることがわかる。以上の結果から、本研究で検討した範囲内では、目荒らしの程度にかかわらず、試験体内部の塩化物イオンの主たる移動機構は泳動であることが示唆された。

#### 5. まとめ

セメント系材料-断面修復材間の境界面の処理状態 (目荒らしの程度) が、その遮塩性能に与える影響について検討した。その結果、試験体内部の移動機構は泳動が卓越すること、遮塩性能の評価にあたっては、土木学会規準「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-G571-2012)」<sup>1)</sup>を適用してよいことが示唆された。

#### 参考文献

- 1) 土木研究所：コンクリート構造物の補修対策施工マニュアル (案), 土木研究所資料, 第 4343 号, 2016.
- 2) 土木学会：2013 年制定 コンクリート標準示方書[規準編], 丸善, 2013.
- 3) 齊藤準平, 柳沼善明：コンクリートの塩分浸透特性におよぼすひび割れ深さの影響に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.815-820, 2011.
- 4) 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.
- 5) 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, 東京工業大学学位申請論文, 1997.