

# 論文 セメント系材料—断面修復材間の境界面の遮塩性能とその耐候性

松井 淳\*1・大塚 拓\*2・両角 浩典\*3

**要旨:** セメント系材料—断面修復材間の境界面の遮塩性能に対して、太陽光が与える影響を評価した。太陽光と概ね同一の波長分布を有する照射光を発生する急速促進耐候性試験装置を用いて、放射露光量に換算して概ね20年間に相当する光劣化実験を実施し、セメント系材料、断面修復材および両者の境界面の遮塩性能に与える影響を調べた。その結果、境界面を含んだ領域における塩化物イオンの移動機構は、一般的なセメント系材料のそれと同一であることが示唆されると共に、太陽光が20年間照射されても、遮塩性能はほぼ維持されることを確認した。

**キーワード:** 光劣化, 耐候性, 断面修復材, 塩化物イオン拡散係数, 耐久性能

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート（以後、RC）構造物に対する補修工法の一つに断面修復工法がある。既に多くの実績を有しているが、性能の観点からは、再供用後の修復領域の耐震性能に加え、耐久性能の回復性状とその持続性（耐候性）が重要となる。修復領域の各種性能に影響を与える因子は複数挙げられるが、ポリマーセメントモルタルのように高分子有機化合物が含まれる場合、太陽光に含まれる紫外線による変状の可能性がある。しかしながら、特にコンクリート—断面修復材間の境界面（以後、界面）の接着性能に関する知見は乏しいのが現状である。

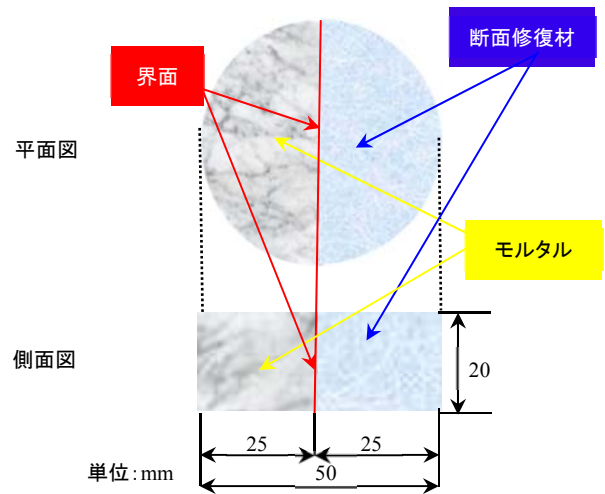
本研究は、臨海 RC 構造物における断面修復領域の耐久性能に関する基礎的な検討として、ポリマーセメント系軽量モルタルによる修復領域に対する太陽光の影響を評価した。ここでは、セメント系材料、断面修復材および両者の界面を有する試験体に対して、太陽光と概ね同一の波長分布を照射する急速促進耐候性試験装置を用いて、放射露光量に換算して20年間に相当する光劣化実験を実施した。

次に、臨海 RC 構造物に関する代表的な劣化事象である塩害に関する耐久性能に与える影響の把握を目的に、主たる供用期間となる潜伏期を評価するコンクリート中の塩化物イオンの実効拡散係数との関連を調べた。塩化物イオンの拡散係数の評価にあたっては、土木学会の規準試験方法の一つである「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)」<sup>1)</sup>（以後、電気泳動法）の適用性を、有限要素法による数値シミュレーション等によって検証した後、太陽光が界面等の遮塩性能に与える影響について考察した。

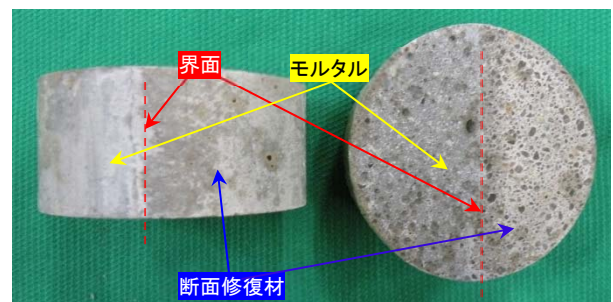
## 2. 実験概要

### 2.1 試験体の概要

（社）セメント協会が頒布する研究用セメントおよびセメント強さ試験用標準砂を使用し、標準配合（W/C=50%, S/C=3.0）で、直径50mm、高さ100mmのモルタルシリンダー試験体を作製した。91日間標準養生後、試験体を軸方向（高さ方向）に割裂破断し、割裂面にブ



(a) 寸法および形状



(b) 作製した試験体の一例

図-1 ハイブリッド試験体の概要

\*1 (一財) 電力中央研究所 地球工学研究所 構造工学領域 上席研究員 博士(工) (正会員)

\*2 (一財) 電力中央研究所 地球工学研究所 構造工学領域 主任研究員

\*3 関西電力(株) 土木建築室 地震津波評価グループマネージャー

ライマー（当該断面修復材の開発メーカーが推奨するエポキシ樹脂系接着剤）を塗布した。次に、二分されたシリンダー試験体のうちの一片のみを、直径 50mm、高さ 100mm のシリンダー試験体用の型枠内へ再度格納した。そして、所定の配合で練り混ぜた断面修復材（エマルジョン型のポリマーセメント系軽量モルタル）を型枠の残りの空間内へ注入し、モルタル、断面修復材および両者の界面から成る直径 50mm、高さ 100mm のシリンダー試験体を作製し、9日間標準養生した。

本研究は、基礎的な検討であり、当該試験体は、実構造物における打継ぎの方向との対応を考慮していない。このため、モルタル、断面修復材および両者の界面の物性が平均的と考えられる領域、すなわち、電気泳動法<sup>1)</sup>の規定に基づき、両端面から 25mm の部分を除き、残った 50mm の部分から、円盤型試験体を切り出し、光劣化実験および電気泳動法による遮塩性能実験を実施した。

なお、電気泳動法では、試験体の厚さは 50mm と定められているが、本研究では、①太陽光の照射による変状を出来る限り短期間に把握すること、②骨材の最大粒径が、円盤型試験体の厚さの 1/2 以下であることを満たすために厚さを 20mm とした（図-1）。以後、モルタルおよび断面修復材間の界面を有する試験体をハイブリッド試験体、モルタル試験体単体を母材と、それぞれ称する。

## 2.2 光劣化実験の概要

光劣化実験の実施にあたっては、太陽光の波長分布と概ね同一の照射光（以後、模擬太陽光）を発するメタルハライド型急速促進耐候性試験装置<sup>例えぼ 2)</sup>を使用した。

図-2 に、その波長分布を示す。メタルハライドは、参考文献 2)における波長分布の図から、デジタルスキャナーで読み取って数値化した。太陽光は、公的機関が公開している波長分布のデジタルデータ<sup>3)</sup>を用いて、図化した。

模擬太陽光の照射条件は、DIN 75 220 1992「Aging Automobile Components in Solar Simulation Units」D-OUT-F に準拠し、槽内温度  $42 \pm 3$  °C、槽内相対湿度  $80 \pm 5$  % の雰囲気の下で、一定の放射照度  $1000 \pm 100$  W/m<sup>2</sup> で、2000 時間照射した。当該装置では、太陽光による 1 年間の放射露光量に、概ね 100 時間で到達する。サンシャインカーボン型、キセノン型等のような他の促進耐候性試験装置では  $10^3$  時間オーダーの照射期間を要することから、本照射条件は、現実性と促進性を出来る限り両立させた条件となっている。

試験体は、側面および底面をビニールテープで被覆し、上面のみから模擬太陽光を受けるようにした。図-3 に光劣化実験に用いた急速促進耐候性試験装置内における試験体の設置状況を示す。模擬太陽光は、天井から鉛直下方へ照射され、側面および底面が被覆された試験体は、

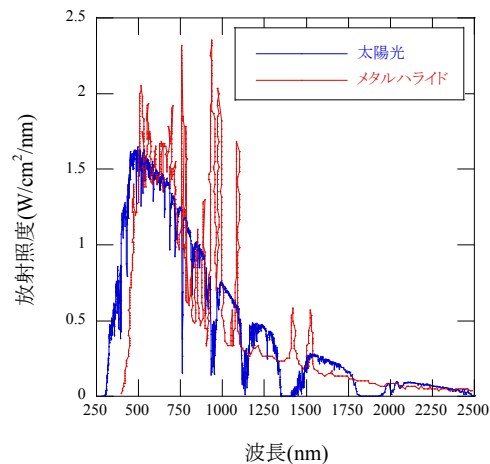


図-2 メタルハライド型耐候性試験装置の波長分布（参考文献 2) および 3) に基づき作成）



(a) 槽内全景 (b) 試験体の近景

図-3 試験装置内での照射状況

上面のみにその影響を受ける。

## 2.3 遮塩性能の評価方法

電位勾配を主たる塩化物イオンの駆動力とすることにより、試験期間の短縮化を図った促進試験方法として、「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)」<sup>1)</sup>（以後、電気泳動法）を適用し、その遮塩性能を評価した。

## 3. 実験結果とその考察

### 3.1 遮塩性能の評価方法の検証

#### (1) 陽極側セル内溶液の塩化物イオンの経時変化

電気泳動法の適用対象は、鋼繊維を含まないセメント系材料であり、本研究で検討の対象としている界面を有するハイブリッド試験体には必ずしも適用できるとは限らないことから、先ず電気泳動法の適用性を検討する必要がある。

参考文献 4)では、通電中において、電気泳動装置の陽極側セル内溶液における塩化物イオンの濃度の経時変化を直線で回帰したときの決定係数  $R^2$  は、電気泳動実験の精度の良否を表す指標であり、 $R^2$  が 1 に近づくほど、

精度良く実施されているとしている。一方、齊藤ら<sup>5)</sup>は、様々なひび割れ性状を有するモルタルに対して、電気泳動法を適用し、特に貫通ひび割れを有する場合、塩化物イオンの濃度の経時変化は、線形から下に凸な曲線に変化することを指摘している。これは、貫通ひび割れ内部では、塩化物イオンは泳動に加えて移流によっても移動すると考えられているからである。ハイブリッド試験体においても、界面の状態によっては、移流場が生成・卓越する可能性が考えられる。

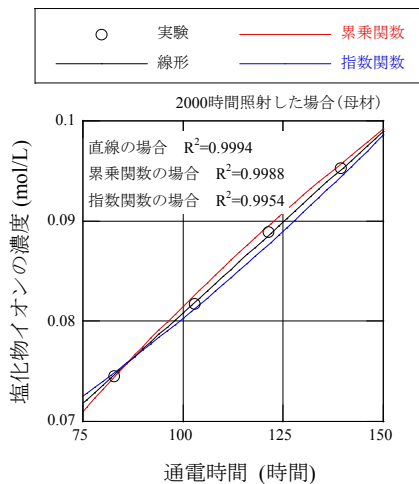


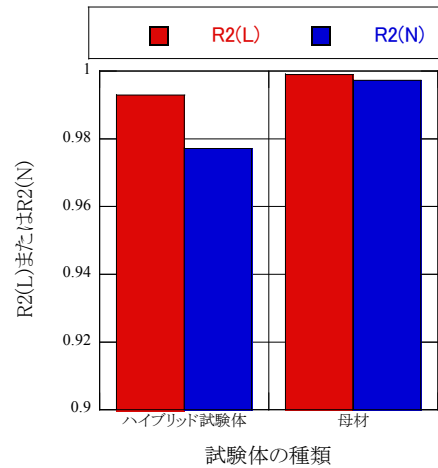
図-4 陽極側セル内溶液における塩化物イオン濃度の経時変化に対する回帰結果の例

以上のことから、塩化物イオンの濃度の経時変化を、代表的な下に凸な曲線である累乗関数および指数関数のうち、決定係数が大きい方の値（以後、R2(N)）で回帰すると共に、直線で回帰した時の決定係数（以後、R2(L)）も求め、両者を比較することにより、電気泳動と移流のいずれかが卓越するかを検討した(図-4、図-5)。

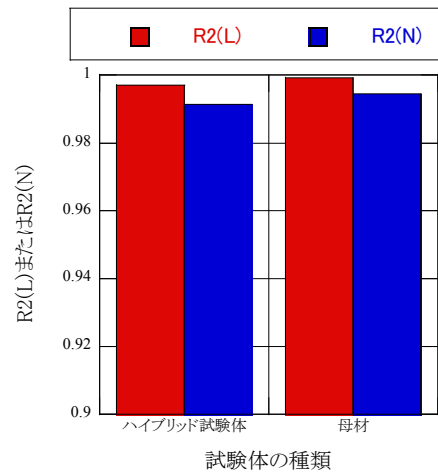
全ての水準において、R2(L)および R2(N)は 0.97 以上であり、直線および下に凸な曲線のいずれの場合においても、良好に回帰される結果となっている。両者を比較すると、R2(L)の方が上回っている。このことから、異なる二つの材料がプライマーによって接着されたハイブリッド試験体においても、その内部で塩化物イオンは移流ではなく、電気泳動が卓越して移動していることが示唆される結果となった。

#### (2) 電気泳動法に対する数値シミュレーション

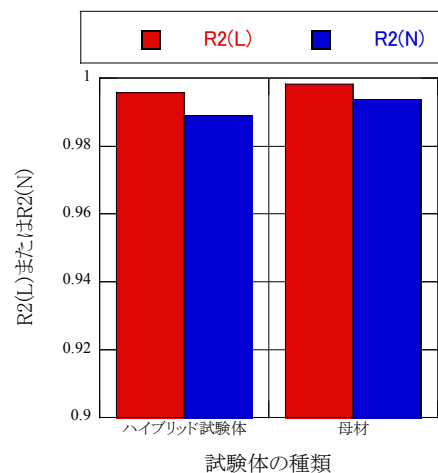
ここでは、参考文献 6)に示すモデル化を用いて、電気泳動法に対して、有限要素法による数値シミュレーションを実施した。これは塩化物イオンの移動を、水酸化物イオンやナトリウムイオンといった共存イオンの影響も含めて検討したものである。イオンの移動は、式(1)で示す Nernst-Planck 式で定義した。



(a) 初期（照射前の段階）の場合



(b) 照射時間 1000 時間の場合



(b) 照射時間 2000 時間の場合

図-5 塩化物イオン濃度の経時変化の回帰結果

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

ここに、 $J_i$ ：イオン種  $i$  の流束( $\text{cm}^3/\text{s}$ )、 $\omega_i$ ：イオン種  $i$  のモル移動度( $\text{cm}^2 \cdot \text{mol}/(\text{s} \cdot \text{J})$ )、 $z_i$ ：イオン種  $i$  の価数、 $c_i$ ：イオン種  $i$  の濃度( $\text{mol}/\text{cm}^3$ )、 $R$ ：気体定数(=  $8.31 \text{ J}/(\text{K} \cdot \text{mol})$ )、 $T$ ：絶対温度(K)、 $\phi$ ：電位(V)

考慮するイオン種としては、電気泳動装置の陰極側および陽極側セル内溶液中に溶存する塩化物イオン、ナトリウムイオンおよび水酸化物イオンの3種とし、これらの拡散係数は、Nernst-Einsteinの式を適用して算出した。

境界条件として、電極反応である水の電気分解を考慮した。すなわち、陰極側セル溶液内では、水酸化物イオンが生成し、陽極側セル溶液内では、水酸化物イオンが消費されることから、電流の値に応じた水酸化物イオンの生成/消費量を、Faradayの法則を適用して求めた。

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(以後、等価空隙半径)で、空隙特性を代表した。等価空隙半径は、次のような手順で定めた。まず暫定的に等価空隙半径を定めて電気泳動法に対する数値シミュレーションを実行し、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(飽水状態における試験体の体積抵抗率の計測結果から推定される値)と比較する。実測値と相違がある場合、それを解消するように等価空隙半径を適宜増減して、再度数値シミュレーションを実行し、その差異が解消されるまで繰り返した。

図-6に数値シミュレーションの結果を示す。ここでは、 $y=x$  および  $\pm 20\%$ の変動範囲を示す補助線 ( $y=1.2x$  および  $y=0.8x$ ) も併せて記載している。試験体の種類(母材/ハイブリッド試験体)および照射時間(0時間/1000時間/2000時間)にかかわらず、解析結果は、実験結果に良く対応している。ここで実施した数値シミュレーションにおけるモデル化は、通常のセメント系材料に対するものであることから、最長2000時間模擬太陽光が照射されたハイブリッド試験体内部における塩化物イオンの移動機構は、通常のセメント系材料のそれと同一であり、電気泳動が卓越していると考えられる。また、この結果は、(1)の決定係数  $R^2$  に関する結果とも対応している。以上の結果から、本研究において模擬太陽光が照射されたハイブリッド試験体およびセメント系材料に対して、電気泳動法を適用してもよいと考えられる。よって、次節では、実効拡散係数と模擬太陽光の照射時間との関係について考察する。

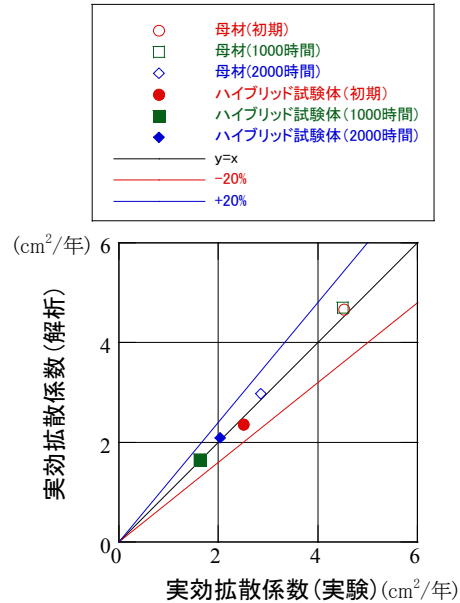


図-6 数値シミュレーションの結果

### 3.2 照射時間と塩化物イオン実効拡散係数との関係

図-7に、母材、断面修復材単体およびハイブリッド試験体の体積抵抗率と模擬太陽光の照射時間との関係を示す。図-8に、それらの実効拡散係数(グラフの左側の縦軸を参照)、およびハイブリッド試験体の実効拡散係数を、母材のそれと除して求めた比(グラフの右側の縦軸を参照)と照射時間との関係を示す。断面修復材単体は、極めて緻密な材料であり、電気泳動法によって、実効拡散係数を取得できなかったことから、セメント系材料の体積抵抗率から実効拡散係数を推定する評価式<sup>7)</sup>を準用して推定した値をプロットした。

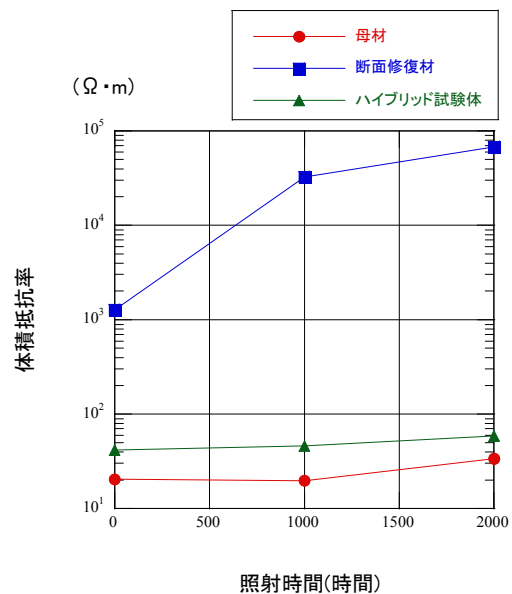


図-7 各種材料の体積抵抗率と照射時間との関係

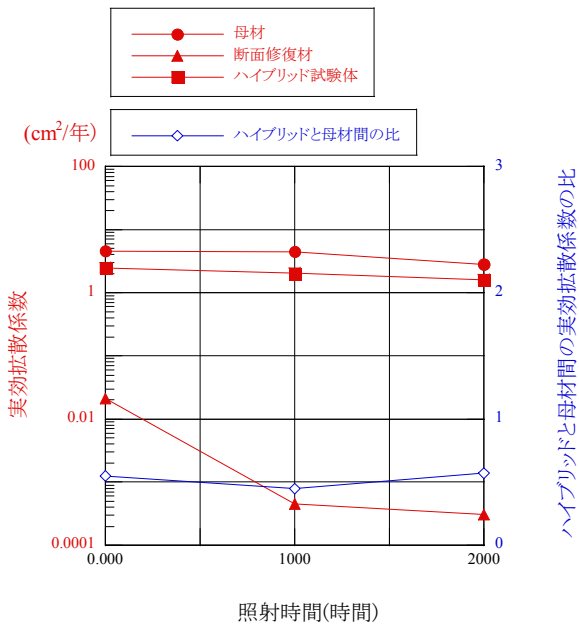


図-8 実効拡散係数と照射時間との関係

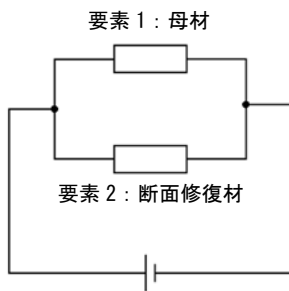


図-9 ハイブリッド試験体の等価回路

ハイブリッド試験体の実効拡散係数は、母材単体のそのほぼ 1/2 で推移している。これについて、図-9 で示す界面が完全に固着されているハイブリッド試験体に対する等価回路を仮定して考察する。ここでは、母材および断面修復材内部を塩化物イオンが移動する現象を、両者が並列に接続された回路を仮定している。

電気泳動法では、実効拡散係数を、式(2)で定義していることから、流束は式(3)で表される。

$$D_e = \frac{J \cdot R T L}{Z \left| F c \left( \Delta E - \Delta E_c \right) \right|} \times 100 \quad (2)$$

$$J = \frac{Z \left| F c \left( \Delta E - \Delta E_c \right) \right|}{100 R T} D_e \frac{\Delta E - \Delta E_c}{L} \quad (3)$$

ここに、

- $D_e$  : 実効拡散係数( $\text{cm}^2/\text{年}$ )
- $R$  : 気体定数( $= 8.31\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ )
- $T$  : 絶対温度測定値(K)

- $Z$  : 塩化物イオンの電荷( $= -1$ )
- $F$  : Faraday 定数( $96500 \text{ (C/mol)}$ )
- $c$  : 陰極側の塩化物イオンの濃度測定値( $\text{mol/L}$ )
- $\Delta E - \Delta E_c$  : 供試体表面間の測定電位(V)
- $L$  : 供試体厚さ(mm)
- $J$  : 塩化物イオンの流束( $\text{mol}/(\text{cm}^2 \cdot \text{年})$ )

図-9 の等価回路では、以下のような保存則が成り立つ。

$$J_{\text{repair}} (S_1 + S_2) = J_1 S_1 + J_2 S_2 \quad (4)$$

- $J_1$  : 母材中の塩化物イオンの流束( $\text{mol}/(\text{cm}^2 \cdot \text{年})$ )
- $J_2$  : 断面修復材中の塩化物イオンの流束( $\text{mol}/(\text{cm}^2 \cdot \text{年})$ )
- $J_{\text{repair}}$  : ハイブリッド試験体中の塩化物イオンの流束( $\text{mol}/(\text{cm}^2 \cdot \text{年})$ )
- $S_1$  : ハイブリッド試験体における母材の断面積( $\text{cm}^2$ )
- $S_2$  : ハイブリッド試験体における断面修復材の断面積( $\text{cm}^2$ )

断面修復材単体の実効拡散係数は、母材のそれに比べて、極めて小さいため、 $J_2$  も  $J_1$  に比べて極め小さくなることから、式(4)の右辺は第1項のみとみなし得る。さらに、 $S_1 = S_2$  であることから、 $J_{\text{repair}} = 1/2 \cdot J_1$  となる。さらに式(2)を参照すると、実効拡散係数以外の数値は同一であることから、界面が完全に固着している場合、ハイブリッド試験体の実効拡散係数は、母材のその 1/2 となる。

以上の考察から、ハイブリッド試験体の実効拡散係数が、母材のその 1/2 を上回った場合、界面に何らかの変状が生じている可能性がある。打継面が完全に固着されないと、その領域の透気係数は、両側の新旧コンクリートの透気係数の平均よりも大きくなるという報告<sup>8)</sup>もあり、上述の考察の妥当性を裏付ける傍証と考えられる。

模擬太陽光の照射時間との関連を見ると、母材、断面修復材、およびハイブリッド試験体の体積抵抗率は、いずれも照射時間と共に増加し、実効拡散係数は減少している。模擬太陽光を照射している時の試験体の雰囲気は、温度  $42 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ 、相対湿度  $80 \pm 5\%$  であり、セメント系材料の養生環境としては良好といえることから、照射中も、セメントの水和に起因した母材および断面修復材の緻密化が進行したのと考えられる。

一方、両者の比は、ほぼ 0.5 で推移していることから、界面の変状は認められず、遮塩性能に関する健全性が維持されていることが確認された。

以上から、セメント系材料-断面修復材間の境界面に

対して、放射露光量に換算して、20年に相当する模擬太陽光を照射した室内実験を実施し、その遮塩性能に関する健全性を検討した。その結果、境界面は健全であることが確認された。

#### 4. まとめ

セメント系材料および断面修復材間の境界面の遮塩性能に対する太陽光の照射の影響を調べるため、両者の境界面を有する試験体（ハイブリッド試験体）を製作し、太陽光と概ね同一の波長分布を発する急速促進耐候性試験装置を用い、その遮塩性能に与える影響を評価した。その結果、以下のような結論を得た。

- (1) ハイブリッド試験体に対して電気泳動法を適用した結果、陽極側セル内溶液の塩化物イオン濃度の経時変化は、良好に直線で回帰されることが確認された。これは既往の研究例から、内部に貫通した空隙等が生成せず、塩化物イオンの移動機構が、電気泳動であることに対応すると考えられた。
- (2) 塩化物イオンおよびその他の共存イオンの流束をNernst-Planck式で定義した有限要素モデルで、電気泳動法に対する数値シミュレーションを実施し、実効拡散係数を評価した。その結果、全ての水準において、解析結果は、実験結果と良好に対応しており、ハイブリッド試験体内部の塩化物イオンの移動機構は、セメント系材料のそれとほぼ同一と考えられた。
- (3) 模擬太陽光を2000時間まで照射した結果、ハイブリッド試験体の実効拡散係数の母材のそれに対する比に変化はみられず、両者の境界面が健全であることが確認された。これは、放射露光量に換算して、20年程度の太陽光に対して境界面が健全であることが示唆される結果といえる。

#### 謝辞

本研究は、電力9社、日本原子力発電(株)、電源開発

(株)ならびに日本原燃(株)による、原子力リスク研究センター共通研究「屋外重要土木構造物の耐震性能照査手法の高度化に関する研究」(研究期間:2015年~2017年)の一部として実施したものである。関係各位に深甚なる謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 土木学会 コンクリート委員会 コンクリート標準示方書改訂小委員会:2018年制定 コンクリート標準示方書[規準編],丸善,2018.10
- 2) 相川次男:最新の促進耐候性試験機及び試験法,日本ウエザリングテストセンター,平成15年度ウエザリング技術成果報告会講演概要集,pp.7-16,2003.11
- 3) <https://www.nrel.gov/grid/solar-resource/spectra.html>
- 4) 土木学会 コンクリート委員会 腐食防食委員会:腐食防食委員会(305委員会)成果報告書(その2)鉄筋腐食・防食および補修に関する研究の現状と今後の動向,コンクリート技術シリーズNo.40,土木学会,2001.10
- 5) 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.815-820,2011.7
- 6) 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 研究報告:N12018,2013.4
- 7) 土木学会 原子力土木委員会:原子力発電所屋外重要土木構造物の構造健全性評価に関するガイドライン2012,2012.10
- 8) 氏家 勲,佐藤富一,佐藤良一,長瀧重義:新旧コンクリートの打継面の透気性状に関する検討,土木学会第49回年次学術講演会講演概要集,V-530,pp.1060-1061,1994.9