

論文 コンクリートのひび割れ補修領域に関する遮塩性能の評価

松井 淳*1・両角浩典*2・小澤和弘*3

要旨: コンクリートに生じたひび割れを、エポキシ樹脂で補修した領域の遮塩性能を評価した。ひび割れ幅、エポキシ樹脂の種類および補修時におけるコンクリートの湿潤状態を影響因子とした室内実験を実施し、遮塩性能を、土木学会の規準試験方法「電気泳動によるコンクリート中の塩化物イオン実効拡散係数試験方法(案)(JSCE-G 571-2013)」およびNORDTEST NT BUILD492を準用して評価した。その結果、水中での補修を想定した場合には、塩化物イオンの定常状態における実効拡散係数がやや増大する傾向にあった。

キーワード: 補修, ひび割れ, エポキシ樹脂, 塩化物イオン拡散係数, コンクリート

1. はじめに

鉄筋コンクリート製(以後、RC)構造物においては、地震等によってひび割れが生じることがあり、その後の供用を確実なものとするためには、適切な補修/補強を実施することが重要となる。ここで、内部の鉄筋が健全な場合、ひび割れ内部へエポキシ樹脂等を充填するひび割れ注入工法が適用されることが多いが、補修後の耐久性性能の回復性状に関する知見は乏しいのが現状である。

本研究では、エポキシ樹脂を注入材として用い、コンクリート表面に生じたひび割れを補修された領域を対象に、その遮塩性能を実験的に評価した。ここでは、ひび割れ幅、エポキシ樹脂の種類および補修実施時におけるコンクリートの湿潤状態を影響因子とした室内試験体を製作した。遮塩性能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実効拡散係数試験方法(案)(JSCE-G 571-2013)」(以後、G571)¹⁾およびNT BUILD492²⁾を準用し、各種影響因子と塩化物イオン実効拡散係数との関連に関する考察を行った。

2. 実験の概要

2.1 RC試験体と補修の概要

(1) RC試験体の寸法および形状

実験に用いたRC試験体の寸法、鉄筋の配置位置およびひび割れの導入位置を図-1に示す。RC試験体は、幅200mm、高さ200mm、長さ600mmであり、D16鉄筋

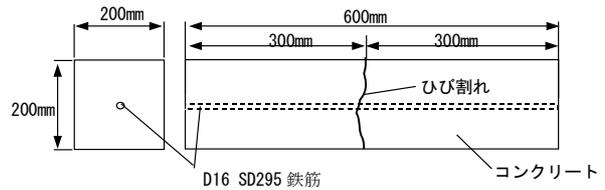


図-1 RC試験体の概要

(SD295, 長さ600mm)を、RC試験体の断面中心位置に1本配置した。

(2) 使用材料およびコンクリートの示方配合

RC試験体の製作に用いるコンクリートの製作にあたっては、セメントとして早強ポルトランドセメント(密度:3.16g/cm³, 比表面積:3330cm²/g)、細骨材として、千葉県君津市吉野産(陸砂, 表乾密度:2.56g/cm³, 吸水率:2.15%)および大分県津久見市産(砕砂, 表乾密度:2.64g/cm³, 吸水率:1.68%)を7:3の割合で混合したもの、粗骨材には、大分県津久見市産(砕石, 最大骨材粒径:20mm, 実積率:61.0, 表乾密度:2.70g/cm³, 吸水率:0.76%)をそれぞれ用いた。練り混ぜ水には工業用水を、混和剤として、AE減水剤をそれぞれ用いた。鉄筋は、異形棒鋼D16(SD295)を用いた。

コンクリートの示方配合を表-1に示す。水セメント比は60%とし、目標スランプ値は8±1cm、目標空気量は5±1%とした。コンクリートは打設後、4週間以上湿空養生を行った。

(3) 実験の要因および水準

表-1 コンクリートの示方配合

組骨材の最大寸法(mm)	スランプ(cm)	水セメント比(%)	空気量(%)	細骨材率(%)	単位量(kg/m ³)				
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 A
20	8±1	60	5±1	43.2	157	262	794	1088	2.62

*1 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(工学) (正会員)

*2 関西電力 土木建築室 技術グループマネージャー(非会員)

*3 関西電力 土木建築室 技術グループリーダー(非会員)

図-2に示すように、ひび割れは、二つの鋼製エッジをRC試験体の上下に設置し、耐圧試験機で加力することによって導入した。目標ひび割れ幅は、0.5mm, 0.8mm, 1.1mmの3水準とし

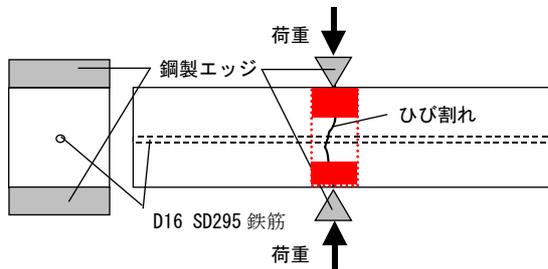


図-2 ひび割れの導入方法とコア採取位置

表-2 実験水準

	ひび割れ幅(mm)	含水率(%)	エポキシ樹脂の種類
#01	0.5	4~5	乾燥型
#02	0.5	5~6	乾燥型
#03	0.5	5~6	湿潤型
#04	0.5	6~7	湿潤型
#05	0.5	6~7	水中型
#06	0.8	4~5	乾燥型
#07	0.8	6~7	湿潤型
#08	0.8	6~7	水中型
#09	1.1	4~5	乾燥型
#10	1.1	5~6	乾燥型
#11	1.1	5~6	湿潤型
#12	1.1	6~7	湿潤型
#13	1.1	6~7	水中型

実験において考慮する要因は、①ひび割れ幅、②補修領域の湿潤状態、③エポキシ樹脂の種類とした。その水準を表-2に示す。ひび割れ幅は、上述の通り、0.5mm, 0.8mmおよび1.1mmの3水準に設定した。被補修領域の湿潤状態は、乾燥状態、水中に準じた状態およびその中間の3水準とし、1水準当たり3検体ずつ、2.2で述べる遮塩性能実験に供した。湿潤状態の具体的な設定手順については後述する。エポキシ樹脂は、被補修面が水中であっても注入可能なものとして販売されているもの(以後、水中型)、および当該メーカーの同系統の補修面が乾燥している場合に適用可能なものとして販売されているもの(以後、乾燥型)、補修面が湿潤している場合に適用可能なものとして販売されているもの(以後、湿潤型)の3種類を採用し、被補修面の湿潤状態との関連を調べた。

補修領域の湿潤状態は、以下の手順で調整した。乾燥

状態は、打設後の初期養生後、恒温室(室温:20℃, 相対湿度:60%)にて、6ヶ月以上気中養生を行った。この時のコンクリートの含水率は4~5%程度であった。水中に準じた状態(以後、準飽和状態)は、RC試験体を標準養生槽中へ1週間程度没した後に回収し、その直後に補修を実施した。含水率は6~7%程度であった。両者の中間と位置付けた状態(以後、湿潤状態)は、RC試験体を標準養生槽中へ1週間程度没した後に回収し、恒温室(室温:20℃, 相対湿度:60%)において60分程度静置させたものとした。含水率は5~6%程度であった。なお、ここでいう含水率は、高周波容量式の表面水分率計で計測したものであり、コンクリートの表面から数10mm程度の平均的な含水状態を意味する。

(4) 補修の実施概要

ひび割れの補修は、先ず専用の注入器具を設置するエポキシ樹脂注入位置以外のひび割れ表面を、シーリング材で閉じた。シーリング材が硬化した後、専用の注入器具(低圧注入型)でエポキシ樹脂をひび割れ内部へ充填した。エポキシ樹脂は、ひび割れが導入されている二つの面の両方から、交互に注入し、エポキシ樹脂の深さ方向への注入の良否が生じないようにした。樹脂の硬化後、図-2に示すように、コアドリルで、補修領域から直径100mm, 高さ200mmのコアを採取し、その後鉄筋を含まない両端50mm程度の領域を切断加工し、後述する遮塩性能試験に供した。したがって、ここでいう補修領域とは、ひび割れを挟んだ左右50mm程度の範囲を指す。

2.2 遮塩性能実験の概要

補修領域に対する遮塩性能は、G571¹⁾を準用した実効拡散係数(以後、定常実効拡散係数)、および塩化物イオンの固定化の影響が含まれた実効拡散係数(以後、非定常実効拡散係数)で評価した。非定常実効拡散係数は、電位勾配を塩化物イオンの主たる駆動力とすることにより、試験期間の短縮化を図った急速促進劣化試験方法の一つであるNORDTESTのNT BUILD 492²⁾を参考にした。ここでは、通電後に試験体の割裂面に対して、硝酸銀噴霧呈色法を適用し、塩化物イオンの浸透深さの時間変化から、その浸透速度を求め、非定常実効拡散係数を算出するが、本研究では、G571を実施中に、以下の二つの手順で非定常実効拡散係数を求めた。

(1) NT BUILD492²⁾の算出式を参照する場合

G571において、電圧印加時に、塩化物イオンが固定化を伴いながら、コンクリート内部を浸透し、電気泳動セルにおいて試験片の陰極側セル側の端部から陽極側セル内溶液の端部に到達するまでの通電時間を、塩化物イオンが試験体の厚さ分の長さまで浸透するまでの試験期間と考えた。ここで試験期間は、陽極側セル内溶液中の塩

化物イオン濃度の経時変化に対する直線回帰式と横軸との交点 (x 切片) と定義し、式(1)~(3)へ代入して非定常実効拡散係数を算出した。なお、実効電圧 U は、NORDTEST では、 $U = E - 2$ と定めているが、ここでは、実測値を用いた。

$$D_{nssm} = \frac{RT}{zFE} \cdot \frac{x_d - \alpha \sqrt{x_d}}{t} \quad (1)$$

$$E = \frac{U}{L} \quad (2)$$

$$\alpha = 2 \sqrt{\frac{RT}{zFE}} \cdot \operatorname{erf}^{-1} \left(1 - \frac{2c_d}{c_0} \right) \quad (3)$$

ここに、 D_{nssm} ：非定常実効拡散係数($\text{cm}^2/\text{年}$)、 R ：気体定数 ($= 8.31 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$)、 T ：溶液の絶対温度(K)、 z ：塩化物イオンの価数($= -1$)、 F ：ファラデー定数($= 96500 \text{ C}/\text{mol}$)、 U ：試験体に作用する印加電圧(V)、 E ：試験体に作用する実効電圧(V)、 L ：試験体の厚さ(cm)、 erf^{-1} ：誤差関数の逆関数、 C_d ：呈色領域での塩化物イオン濃度、 C_0 ：陰極側溶液の塩化物イオン濃度、 t ：試験期間(年)、 x_d ：塩分浸透深さ(cm)

(2) 参考文献3)の算出式を参照する場合

参考文献3)では、塩化物イオンがコンクリート内部を浸透する時のその濃度分布がほぼ線形とみなせることに着目し、塩分浸透深さをその時の通電時間(試験期間)で除して、塩分浸透速度を求めている。本研究でも、この考え方を準用し、塩分浸透深さ x_d を試験片の厚さ L とし、(1)と同じ手順で試験期間 t を算定し、 x_d を t で除して浸透速度 k を求めた後、式(4)へ代入して非定常実効拡散係数を算出した。

$$D_{nssm} = k \cdot \frac{RTL}{zFE} \quad (4)$$

ここに、 k ：浸透速度($\text{cm}/\text{年}$)

3. 実験結果とその考察

3.1 定常実効拡散係数

(1) G571 の適用性の検証

G571 の適用対象は、鋼繊維を含まないセメント系材料であり、必ずしもここで考えているようなひび割れ補修領域へ適用可能とは限らない。したがって、まず G571 の適用性について考察する。参考文献4)では、通電中における陽極側セル内溶液の塩化物イオンの濃度変化を直線で回帰したときの決定係数 R^2 は、実験の精度の良否を表す指標であるとしており、 R^2 が 1 に近づくほど、精度良く電気泳動実験が行われているとしている。一方、齊藤ら⁵⁾は、様々なひび割れ性状を有するモルタルに対して G571 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、下に凸な曲線となることを指摘している。これは貫通ひび割れ内部においては、塩化物イオンが泳動ではなく、移流によって移動することによるものと考えられる。ひび割れ補修領域においても、コンクリート-エポキシ樹脂間の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。このことから、塩化物イオンの経時変化を、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、直線で回帰したときの決定係数(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が卓越するかを検討した(図-3)。図-4に、補修領域の湿潤状態毎に、比較したものを示す⁶⁾。 $R2(L)$ 、 $R2(N)$ は左縦軸で、両者の差異($R2(L) - R2(N)$)は右縦軸でそれぞれ定義した。すなわち、実線で結んだ折れ線グラフおよびコンクリート単体の値は左縦軸で、点線で結んで折れ線グラフは右縦軸で、それぞれ定義される。

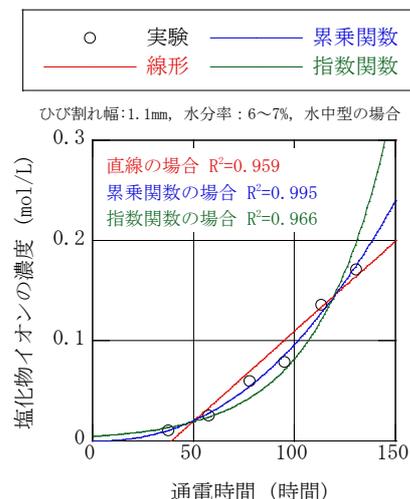


図-3 陽極側セル内溶液における塩化物イオン濃度の経時変化に対する回帰結果の例

また、ひび割れのない通常のコンクリート(以後、コンクリート単体)は、便宜上ひび割れ幅 0 とした。全ての水準において、 $R2(L)$ および $R2(N)$ は、0.9 以上であり、直線および下に凸な曲線のいずれでも良好に回帰される結果となっている。乾燥状態では $R2(L)$ が、準飽和状態では、 $R2(N)$ がわずかに卓越する傾向にある。一方、湿潤状態では、 $R2(N)$ と $R2(L)$ の大小関係がひび割れ幅によって異なっている。このことから、補修実施時のコンクリートの湿潤状態によっては、コンクリート-エポキシ樹脂間の界面に未接着領域(空隙)が生成し⁷⁾、その結果移流場が生成していることを示唆している。

(2) G571 に対する数値シミュレーション

ここでは、参考文献8)で示すモデル化を用いて、G571 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

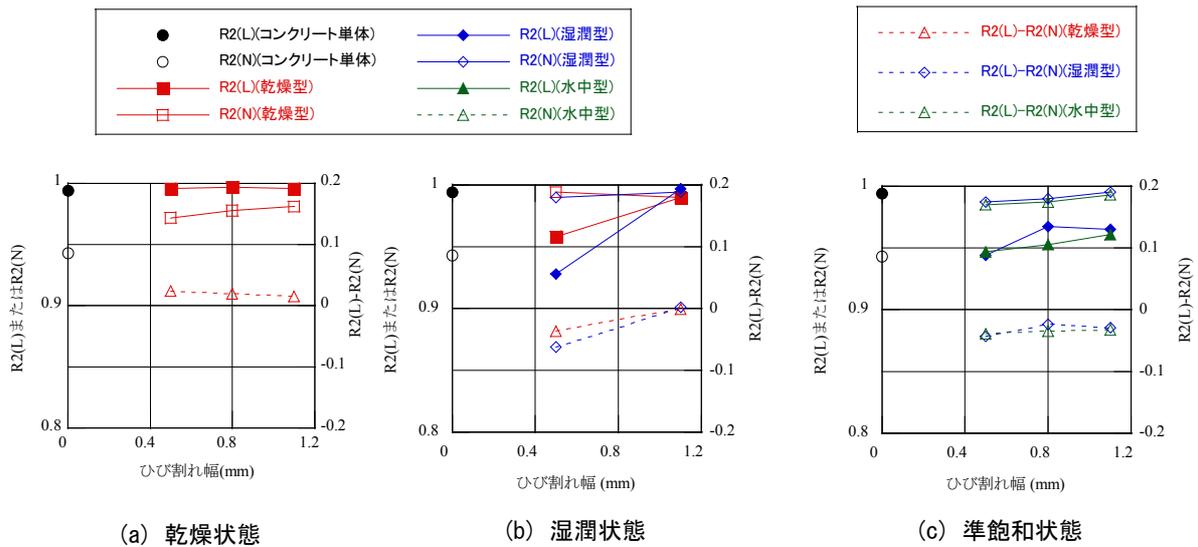


図-4 各水準における塩化物イオン濃度の経時変化に対する回帰結果⁶⁾

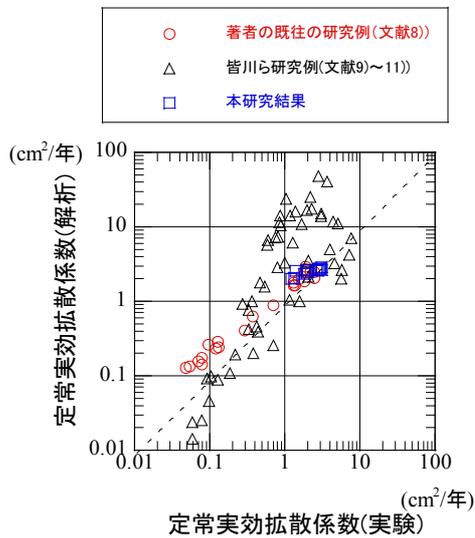
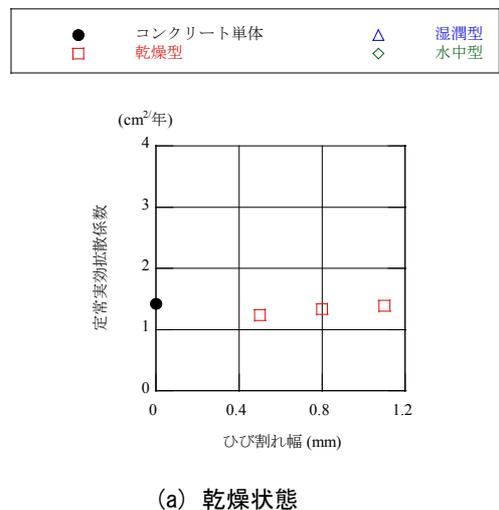


図-5 数値解析の結果

等の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、Nernst-Planck式で定義し、境界条件として水の電気分解を考慮している。空隙特性は等価空隙半径として考慮し、解析結果から算出される電流が、計測値に対応するように適宜増減させた。図-5にその結果を示す。ここでは既往の研究例^{8)~11)}も併記した。既往の研究例^{8)~11)}は、定常実効拡散係数の大小によって、その推定精度の良否が異なっている。本研究の実験で用いたコンクリート単体の定常実効拡散係数は、比較的良好な精度で推定できる範囲にある一方で、エポキシ樹脂によってひび割れが補修された領域を含んでいるが、概ね実験結果を良好に推定される結果となっている。以上の結果から、(1)において、補修領域の湿潤状態等によっては、コンクリート-エポキシ樹脂間の界面で未接着領域の生成に伴う移流場の生成が示唆されるものの、塩化物イオンの移動機構には大きく影響しないことを示し、GS71を準用してもよいといえる。

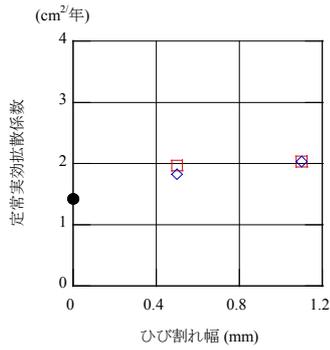
(3) 各種影響因子との関連⁷⁾

(1), (2)の結果を踏まえ、各種影響因子と定常実効拡散係数との関連を考察する(図-6)。乾燥状態では、ひび割れ幅によらず、補修領域の定常実効拡散係数は、コンクリート単体のそれとほぼ同一となっている。補修が良好に実施され、遮塩性能が良好に回復していることが示されている。湿潤状態では、定常実効拡散係数がやや増大し、補修時の湿潤状態の影響がやや見受けられる。準飽和状態では、ひび割れ幅およびエポキシ樹脂の種類にかかわらず、定常実効拡散係数が、 $1.5\text{cm}^2/\text{年}$ 程度増大する結果となっている。以上の結果から、水中またはそれに準じた状況下で補修を行う場合、水中型のエポキシ樹脂を用いても、補修領域の定常実効拡散係数は、コンクリート単体よりも増大する傾向にあるといえる。

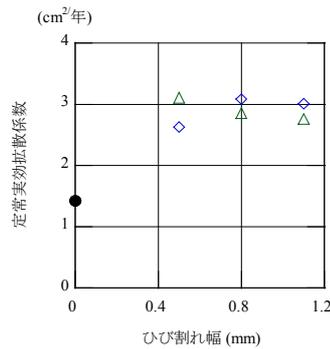


(a) 乾燥状態

図-6 各影響因子と定常実効拡散係数との関連⁷⁾

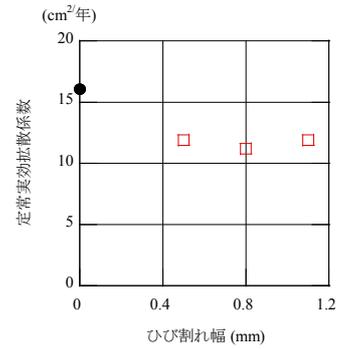


(b) 湿润状態

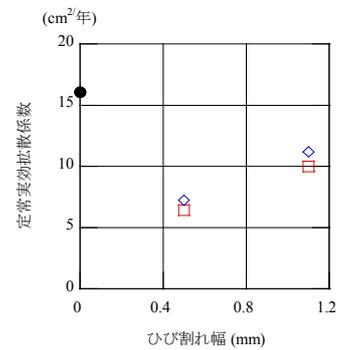


(c) 準飽和状態

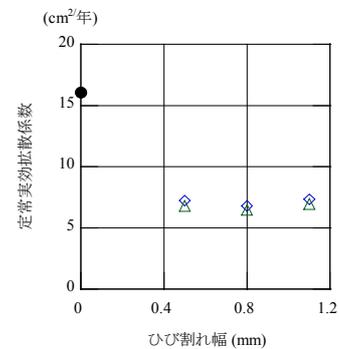
図-6 各影響因子と定常実効拡散係数との関連⁷⁾ (続き)



(a) 乾燥状態



(b) 湿润状態



(c) 準飽和状態

図-8 各影響因子との非常実効拡散係数の関連

3.2 非定常実効拡散係数

(1) 算定式の比較

一般に、定常実効拡散係数には、塩化物イオンの固定化の影響が含まれていないため、見掛けの拡散係数とは異なった性質の拡散係数である。このため、ここではこれとほぼ等価とされる非定常実効拡散係数で評価を行う。まず、2.2 で述べた非定常実効拡散係数に関する二つの算定式の結果を比較する。図-7に、それを比較したものを示す。相関係数は、ほぼ1であることから、両者間には互換性があることが確認された。これはコンクリート単体の場合と同様な結果¹³⁾である。

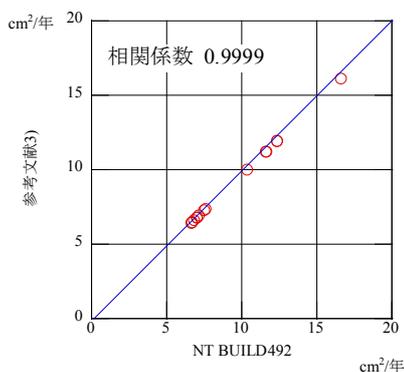


図-7 NT BUILD492 と参考文献3)の算定式の比較

(2) 各種影響因子との関連

各種影響因子と非定常実効拡散係数との関連について考察する(図-8)。一般に、非定常実効拡散係数は、見掛けの拡散係数よりも大きい値をとるが、これは、浸せき期間(ここでは試験期間)が短いためであるとされている¹³⁾。一方、全水準において試験期間(通電期間)は、24時間以上であったことから、塩化物イオンの固定化は完了しているものと考えられる¹⁴⁾。コンクリート単体に対する非定常実効拡散係数と比較すると、全ての水準において、補修領域の方が小さい。ひび割れを充填したエポキシ樹脂が試験体全体の断面積に占める割合は、ひび割れ幅が1.1mmの場合でも1.5%程度であることから、

これ以外の理由，すなわちエポキシ樹脂-セメント系材料間の相互作用（吸着性状やエポキシ樹脂のコンクリート内部への含浸現象）等によるものと考えられる。また，この大小関係は，定常実効拡散係数の場合とは逆であり，ひび割れ補修領域における塩化物イオンの固定化性状は，定常過程と非定常過程では異なることによるものと考えられる。

4. まとめ

コンクリートに生じたひび割れをエポキシ樹脂で補修した領域の遮塩性能について，ひび割れ幅，エポキシ樹脂の種類，および補修領域の湿潤状態を影響因子とした試験体を製作し，定常/非定常実効拡散係数を評価をした。その結果，以下のような結果を得た。

- (1) 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，G571 に対する数値シミュレーションを実施し，定常実効拡散係数を評価した。その結果，解析結果は，概ね実験値に対応しており，ひび割れ補修領域全体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であると考えられた。
- (2) 補修領域の湿潤状態等の影響によって，エポキシ樹脂-コンクリート間の界面に未接着領域が生成した結果，塩化物イオンは電気泳動のみならず，移流によって移動することが示唆された。その結果，陽極側セル内溶液の塩化物イオン濃度の経時変化が僅かに下に凸な曲線に変化することがわかった。
- (3) 定常実効拡散係数は，補修領域の湿潤の程度が大きくなるにつれて，(2)の理由でひび割れ幅やエポキシ樹脂の種類によらず，増大する傾向にあった。
- (4) NORDTEST492 および参考文献 3)の方法を準用し，塩化物イオンの固定化の影響を含んだ実効拡散係数（非定常実効拡散係数）を評価した。その結果，両者の値は一致し，互換性を有することがわかった。
- (5) 非定常実効拡散係数は，ひび割れ幅や補修の実施時におけるコンクリートの湿潤の程度，およびエポキシ樹脂の種類に拠らず，コンクリート単体の値よりも小さくなった。これは，エポキシ樹脂-セメント系材料間の相互作用等によるものと考えられた。

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の一部として実施した。関係各位に深甚なる謝意を表す。

参考文献

- 1) 土木学会：2013年制定 コンクリート標準示方書[規

準編]，丸善出版，2013.11

- 2) <http://210.42.35.80/G2S/eWebEditor/uploadfile/20110819235419966.pdf> (閲覧日：2018年1月6日)
- 3) 中村英佑ら：通電後の塩化物イオン浸透深さをを用いたコンクリートの遮塩性能の評価，土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造)，Vol.72, No.3, pp.304-322, 2016.11
- 4) 土木学会：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, 2001.3
- 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, No.40, 2011.7
- 6) 松井 淳，安藤明宏：ひび割れ補修領域に対する遮塩性能の評価方法について，土木学会第 71 回年次学術講演会講演概要集，VII-074, 2016.9
- 7) 松井 淳ら：表面の湿潤状態とエポキシ樹脂によるひびわれ補修の遮塩効果との関連について，土木学会第 66 回年次学術講演会講演概要集，V-001, 2011.9
- 8) 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
- 9) 皆川 浩ら：コンクリートの電気抵抗率と塩化物イオンの見掛けの拡散係数との関係に関する基礎的研究，土木学会論文集，Vol.66, No.1, pp119-131, 2013.4
- 10) 齊藤佑貴ら：海洋干満帯に曝露したコンクリート大型試験体の電気抵抗率と塩化物イオン拡散係数の関係，コンクリート工学年次論文集，Vol.33, No.1, pp.876-880, 2011.7
- 11) 西 博貴ら：電気抵抗率から推計される塩化物イオン拡散係数と実効拡散係数の関係，土木学会第 67 回年次学術講演会講演概要集，V-093, pp.185-186, 2012.9
- 12) 土木学会：コンクリート中の鋼材の腐食性評価と防食技術研究小委員会(338委員会)報告書，コンクリート技術シリーズ No.84, 土木学会，2009.10
- 13) 伊与田岳史ら：非定常状態電気泳動試験を用いた高炉コンクリートの養生影響評価，セメント・コンクリート論文集，Vol.68, No.1, pp.275-282, 2014.3.
- 14) 原沢蓉子ら：通電時間およびセメント種類が非定常状態電気泳動試験の拡散係数に与える影響：第 13 回コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，日本材料学会，pp27-32, 2009