# 論文　実構造物を対象とした鉄筋防錆材の電気化学的注入試験

山口　竜大[*1]・生田　周史[*2]・田中　佑児[*3]・久保　淳一郎[*4]

**要旨**：東海道新幹線の鉄筋コンクリート構造物の維持管理のため，予防保全の観点から中性化対策として表面保護工の施工を実施してきている。同時に，中性化が相当進行した場合等，表面保護工による内部鉄筋の腐食抑制効果が高く期待できない場合の特異な場合の対応として，有機系防錆材を直流電場により外部から電気化学的に内部鉄筋付近に注入する手法を新たに考案し，基礎的検討や廃用実橋りょう部材の一部を対象に試験的検討を行ってきた。本稿では筆者らの既往の研究成果を基に実構造物を対象とした試験施工を行い，本手法の施工性を確認すると共に効果を確認した。

**キーワード**：耐久性，中性化，鉄筋腐食，電気化学的工法，有機系鉄筋防錆材，伝導性，再アルカリ化

## 1. はじめに

コンクリートの中性化による内部鉄筋の腐食は，その進行によりコンクリート片が落下し第三者被害，美観低下に繋がるほか，内部鉄筋の断面欠損による耐荷力の低下等，構造物あるいは部材の性能低下に繋がる重大な問題[1)]である。また，さらに塩分を含むコンクリートの場合には，内部の鉄筋にとって一層劣悪な腐食環境となり，いわゆる「複合劣化」を引き起こすこともある[2)~4)]。

東海道新幹線の鉄筋コンクリート構造物の維持管理としては，予防保全の観点から中性化の進行の抑止を目的として表面保護工の施工を実施してきている[5)]。同時に，構造物の耐力低下につながる内部鉄筋の腐食断面欠損，また中性化の過度な進行や塩分の侵入による鉄筋腐食環境の場合のように，表面保護工に高い効果を期待できないような特異な構造物への対策として，それぞれ，耐力補強工法や電気化学的工法の選定に至るフロー案を検討し提案してきている[6)]。後者に関しては，例えば電気化学的再アルカリ化工法[7)]のように，必要な通電に関する諸元（例えば通電量や通電期間）が明確でなく長期耐久性が保証されたものがこれまでになかったため[8)]，筆者らは新しい手法[9)]を考案した。鉄筋防錆材による鉄筋腐食抑制効果に着目したものであり，有機系の鉄筋防錆材を外部溶液としてコンクリート表面に接触させ，再アルカリ化工法と同様にコンクリート中に直流電場を与え，陽イオンの鉄筋防錆材を陰極である内部鉄筋付近へ電気化学的に注入することによって，中性化による鉄筋の腐食進行を防止する手法である。これまでに長期耐久性の観点を含めた実験室レベルの検討[9)~11)]を終え，さらに廃用実橋りょう部材の一部に対する試験注入を実施し，本手法の効果や効率的に注入を行うための通電諸元，鉄筋防錆材溶液の改良の必要性などについて検討[12)]を行ってきた。

本手法が実用的なものであることを検証するためには，供用中の実構造物に対して施工が確実に行えることを確認し，鉄筋防錆材の注入効果や施工性を確認する必要がある。そこで，本稿では実高架橋を対象とした本手法の試験施工を行った。本工法の長期耐久性を保証するための必要な通電に関する諸元について，本試験施工では，これまでに得られた知見をもとに改良を加えたうえで実施することにより，通電の有効性の検討を実施した。

## 2. 鉄筋防錆材の電気化学的注入工法の概要

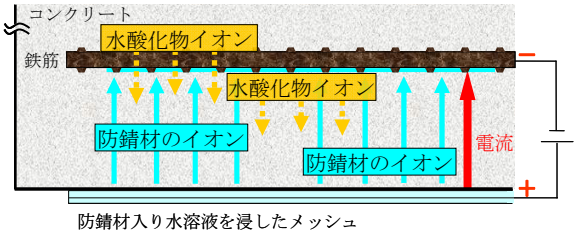
浸透や拡散に依存する含浸タイプの鉄筋防錆材塗布工では鉄筋付近での腐食抑制に必要な防錆材濃度の確保や長期耐久性の面について明確にされていない[13)]。それらとは異なり，本工法は，式（1）のように正のイオンに電離するアミン系またはアルカノールアミン系防錆材を外部溶液としてコンクリート表面に接触させ，再アルカリ化工法と同様の電気回路（コンクリートを介して，陽極（＋極）をコンクリート表面に接触させた外部溶液に，陰極（－極）をコンクリート中の鉄筋とした直流電気回路）を構築したうえで通電を行い，**図－1** に示すように，鉄筋防錆材イオンを電気泳動によりコンクリート表面から鉄筋へと集積させるものである。

$$RNH_2 + H_2O \Leftrightarrow RNH_3^{+} + OH^{-} \qquad (1)$$

併せて，再アルカリ化工法と同様に，鉄筋（陰極）付近での水の電気分解により以下の式(2)に従って発生する水酸化物イオンの電気泳動および拡散による腐食環境の改善（再アルカリ化）にも期待するものである。

$$2H_2O + 2e^{-} \rightarrow H_2 + 2OH^{-} \qquad (2)$$

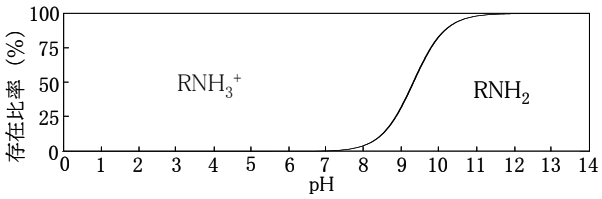
*1 東海旅客鉄道（株）　新幹線鉄道事業本部　東京新幹線構造物検査センター　(正会員)
*2 東海旅客鉄道（株）　総合技術本部　技術開発部　(正会員)
*3 東海旅客鉄道（株）　新幹線鉄道事業本部　管理部　(正会員)
*4 東海旅客鉄道（株）　総合企画本部　ワシントン事務所　Ph.D.　(正会員)




**図－1　防錆材の電気化学的注入の概念図**

本研究で使用しているアミン系の防錆材はエタノールアミン（Ethanolamine : $OH\text{-}CH_2\text{-}CH_2\text{-}NH_2$）という有機物質であり，酸解離定数（Ka）と呼ばれる定数をもち，次の平衡式（3）に従って，存在する溶液の pH（すなわち水素イオン $H^+$の濃度）によってイオンと分子の存在濃度比率を変える性質をもつ。エタノールアミンの Ka は $10^{-9.5}$（pKa = -log Ka = 9.5）程度であるため，防錆材のイオンと分子の濃度比率は**図－2** のようになる。

$$Ka = [H^+][RNH_2]/[RNH_3^+] \quad (3)$$




**図－2　溶液の pH に対する防錆材イオン（$RNH_3^+$）と防錆材分子（$RNH_2$）の比率** [8)]

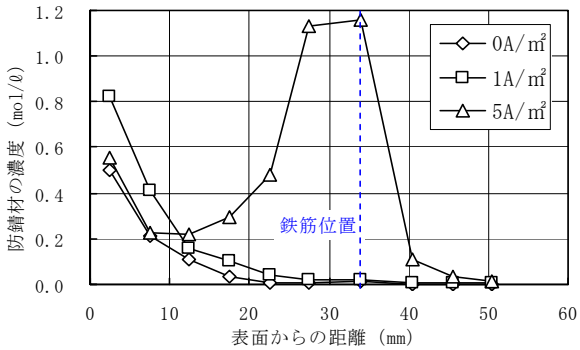
なお，亜硝酸塩系防錆材の腐食抑制機構が腐食鉄筋の不動態皮膜の再構築である [14)]のと異なり，本研究の防錆材の腐食抑制機構は不動態皮膜の破壊に必要な水素イオン（$H^+$）に対する平衡式（3）による緩衝作用であると考えられており，0.1mol/l の濃度以上のエタノールアミン溶液中では，中性・アルカリ性環境下（pH>7）であれば鉄筋の腐食が抑制されることがわかっている [9)]。

本工法は電気泳動による防錆材の電気化学的注入に期待しているため，効率的な防錆材の電気化学的注入を行う場合には，防錆材ができるだけ多くイオンの状態であることが望ましい。一般的に中性化したコンクリートの細孔溶液の pH は 9.0～10.0 程度であるため，**図－2** によれば中性化したコンクリート中では防錆材のイオンが占める割合が大きくなり，通電を行う際に有利である。また，再アルカリ化工法を行う場合と同様に水の電気分解に伴って発生する水酸化物イオンによって鉄筋付近がアルカリ性に回復するため，電場の助けによって鉄筋に近づいたイオンの防錆材（$RNH_3^+$）はほとんどが分子（$RNH_2$）に変換され，電場の影響から開放され鉄筋付近に留まり蓄積され，通電終了後の鉄筋の防錆について有利に働く，という基本メカニズムを有している。

その他の長所として，防錆材が鉄筋付近のアルカリ領域で分子に変換して固定化する際，鉄筋付近で発生した水酸化物イオンが式（1）の右辺から左辺への反応により消費されるため，脱塩工法や再アルカリ化工法のような通電処理中の鉄筋付近の pH の上昇を抑えることができ，通電に伴うアルカリ骨材反応などの発生のリスクを軽減する可能性があることを同様に把握 [9)~11)]している。

## 3. 既往の研究成果

実験室レベルでの試験では，中性化した硬化セメントペーストに対し 1mol/l の濃度のエタノールアミン水溶液を外部溶液として用い，5A/m$^2$ 程度（鉄筋全周の表面積に対して）の電流密度の電場を 1 週間与えた電気化学的注入により，1mol/l を超える濃度の防錆材を鉄筋付近（かぶり 35mm）に集積させることが可能であることが判明している（**図－3**）[9)~11)]。また，コンクリート試験体に通電処理によって注入された防錆材は，半年程度実施した乾湿繰り返し試験によっても鉄筋付近からほとんど拡散せずに鉄筋付近に留まり，鉄筋腐食速度の抑制効果を発揮する（乾湿繰り返し試験中，防錆材を注入していない中性化コンクリート中の鉄筋の腐食電流量約 1.0 μA/cm$^2$に対して 0.1～0.2 μA/cm$^2$程度の腐食電流量）[9)~11)]。




**図－3　通電処理後の試験体中の防錆材濃度** [9)~11)]

また，廃用となり切り出され鉄筋位置まで中性化の進行した高架橋スラブ材の一部を対象とした施工実験 [12)]においては，2.5A/m$^2$ 程度（鉄筋全周の表面積に対して）の電流密度の電場を 1 週間与えた電気化学的注入により，鉄筋付近において鉄筋の腐食抑制効果を確実に発揮する防錆材濃度（0.1mol/l）以上の注入効果を確認しており，長期耐久性について通電終了 5 ヶ月が経過した時点において鉄筋防錆材は，通電終了後と同等の濃度で鉄筋付近に分子の状態で蓄積されていることを確認している。

## 4. 試験施工概要

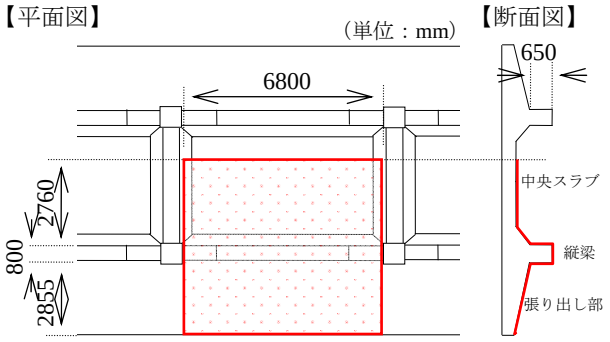
本研究では，既往の研究成果を基に実構造物を対象として鉄筋防錆材の電気化学的注入を行い，鉄筋腐食抑制

に効果のあると判明した濃度（0.1mol/l）以上の鉄筋防錆材が鉄筋付近に注入されるか検討するとともに，本手法の施工性の確認を行った。

### 4.1 試験施工の対象

実際のコンクリート構造物の中性化深さには，コンクリート材料や施工の良否，あるいは環境等の要因によってかなりばらつきが見られる。今回の試験施工の対象構造物は供用後 40 年近く経過したものを選定し，その上部工下面（**写真－1**）の一部の合計 56.3（張り出し部 19.3＋縦梁 15.0＋中央スラブ 22.0）㎡の領域について試験施工を実施した（**図－4**）。

**写真－1　注入試験の対象**



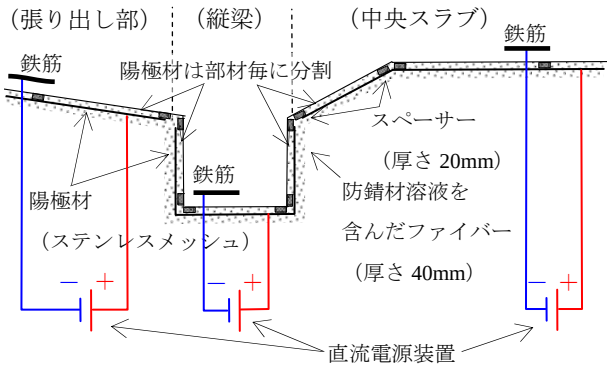

**図－4　注入試験の対象範囲**

今回の対象について，過去に表面処理剤の使用や補修履歴はなく，事前調査として各部位毎に外観調査，中性化深さ測定，コンクリート中における塩化物イオン濃度測定，鉄筋目視調査および鉄筋かぶり厚測定，自然電位・分極抵抗測定，空隙量測定，鋼材間の電気的導通確認を行なった。

事前調査の結果，外観調査により縦梁の一部に当所設計で見込まれた列車活荷重による曲げひび割れが見られたが，コンクリートの浮きや錆汁の発生はなく，はつりによる鉄筋目視調査と自然電位・分極抵抗測定より内部鉄筋に錆びの発生の可能性は低いことを確認した。また，鉄筋目視調査と同時に鉄筋かぶり厚測定を行った結果，各部位の鉄筋かぶり厚は実測値が設計値と同等であることを確認した。中性化深さ測定はコア採取後，フェノールフタレイン法により行い，コンクリート中の塩分含有量についてはコア採取後，深さ方向に 10mm ずつコンクリートカッターによってスライスし，JCI-SC4 「硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法」により測定した結果，各部位とも表面に 0.5～0.8kg/m$^3$ 程度の濃度が見られ，20mm 程度の深さでは無視できる濃度に減少し，塩分量は鉄筋腐食の観点から全く問題となるレベルではなかった。なお，コンクリート中の空隙量は，同じく採取したコアを用いて水銀ポロシメータによって測定した結果，体積比で中性化した箇所は平均 13.0%であり，中性化のない箇所は平均 13.3%であった。鋼材間の電気的導通状態は内部電極間の導通抵抗値測定より行い，良好（鋼材間の抵抗値は全箇所 0Ω）であることを確認した。

### 4.2 施工方法

施工は，コンクリート表面の前処理としてひび割れ箇所にシリコンシーラントによる絶縁処理を行い，内部電極として陰極リード線をコンクリート中の鉄筋（φ13mm）に接続後，コンクリート表面に陽極材（ステンレスメッシュ 2.6φ100mm 角）をコンクリート表面から 20mm 離れた位置にスペーサーによって固定し，陽極リード線を接続後，その陽極材を中央に挟むようにファイバーと外部溶液をコンクリート表面に吹き付け機にて吹き付けた。その後，陰極リード線と陽極リード線をそれぞれ直流電源（Max 容量: 150V, 100A）に接続し，通電を実施した。なお，通電回路は，既往の研究におけるコンクリートの抵抗の違いが通電の効率に与える影響[9), 15)]を考慮し，鉄筋のかぶり厚の異なる部位毎（張り出し部，縦梁，中央スラブ）に分割して通電を行った（**図－5**）。




**図－5　通電方法**

前回の廃用スラブを用いた検討[12)]においては，通電開始時に外部溶液として用いる防錆材溶液の pH を低下調整せずに用いたため，初期の通電が外部溶液の防錆材（pH11.8 程度の溶液であるため分子が主）のイオン化に費やされ非効率となったことから，今回の検討では基礎研究で実施したとおり[9)~11)]，初期にできるだけ多くの防錆材がイオンとして存在するように，防錆材溶液（5%の

エタノールアミン溶液，濃度約 0.8M，pH11.8 程度）の入った容量 1m$^3$（1m×1m×1m）のタンクに炭酸ガス（99%）をバブリング（吐出量 44ℓ/ min）させ，pH を 9.0 程度にまで低下させたものを初期外部溶液として用いた。

電流密度について，通電初期の電流密度が高い領域は鉄筋で発生する水酸化物イオンの影響を受けにくいため，鉄筋付近に防錆材をより多く注入できることがわかっており[9)~12)]，今回の通電試験の対象となる各部位における鉄筋かぶり厚がこれまでの実績と同様な張り出し部と中央スラブについて 5.0A/m$^2$（鉄筋全周の表面積に対して）とした。縦梁については，これまでの実績より鉄筋かぶりが 20mm 程度厚く，回路（コンクリート）の抵抗の増大により通電時の電圧が高くなることが予想されたため，積算電流量は他の部位と同一としたうえで，安全管理の面から電流密度を 3.0A/m$^2$（鉄筋全周の表面積に対して）とした。通電は各部位における積算電流量（電流値を時間で積算）が連続通電 5.0A/m$^2$ で 4 日間および 7 日間に相当する 480A･h/m$^2$ および 840A･h/m$^2$ に達するまでの 2 種類を設定した。通電管理においては直流電源装置からの出力電流が常に一定となっていることを確認するとともに，回路の異常な抵抗値の上昇の発生の有無について出力電圧の確認も併せて行った。外部溶液は pH の推移（低下）を把握するため，6 時間ごとに pH 試験紙を用いて pH の測定を行った。

### 4.3 注入された防錆材の濃度の検討

今回の試験施工による電場の影響を評価するため，比較対象のブランク試験体として，通電開始前に同一高架橋スラブ材よりコアを 3 本採取（コア長 50mm）し，これらのコアの下端面のみを試験施工で使用する同一防錆材溶液に電場無しの状態で 1 週間浸漬させ，コンクリート表面からコンクリート中へ防錆材の浸透（拡散）量を確認した。この際，コアの下端面以外の面は通気性のないエポキシ樹脂により表面処理を施すことによって，浸透した鉄筋防錆材の散逸や，揮発した防錆材のコアの下端面以外の面からの侵入を防止した。

通電終了後，通電によって注入された防錆材の濃度を測定するため，それぞれコアを鉄筋位置のコンクリート表面より鉄筋に到達するまで採取した（**表－1**）。

また，コンクリート中の他の陽イオンの電気泳動についても確認するため，ナトリウム量とカリウム量の測定も同時に行った。各コアは深さ 10mm ごとにコンクリートカッターでスライスして 1 つの試料とし，各試料について粒の大きさが 150μm 以下となるまで粉砕機により粉砕し，注入された防錆材を蒸留水で十分抽出した後，イオンクロマトグラフィーによってコンクリート中の防錆材量を分析した[9)]。

**表－1　採取したコア**

| コア | 部位 | 積算電流量（A･h/㎡） | かぶり厚（mm） |
|---|---|---|---|
| No.1 | 張り出し部 | 480 | 40 |
| No.2 | 縦梁（側面） | | 60 |
| No.3 | 縦梁（底面） | | 50 |
| No.4 | 中央スラブ | | 40 |
| No.5 | 張り出し部 | 840 | 40 |
| No.6 | 縦梁（底面） | | 50 |
| No.7 | 縦梁（側面） | | 60 |
| No.8 | 中央スラブ | | 40 |

## 5. 実験結果と考察

### 5.1 通電期間中の管理

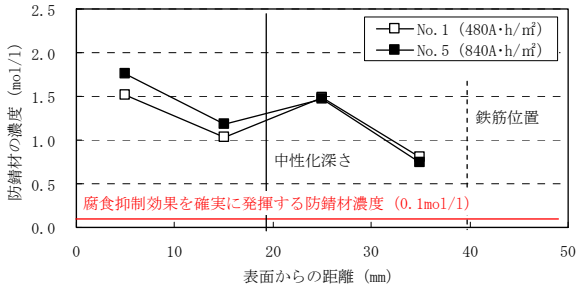
通電期間中の各部位における電流密度の管理はそれぞれ設定した電流密度に各部位対象範囲の鉄筋全周の表面積（張り出し部 5.2 ㎡，縦梁 6.0 ㎡，中央スラブ 2.2 ㎡）を乗じた電流値により行い，通電期間中一定であった。また，通電中は電解質溶液によりコンクリート表面が湿潤状態となるように，9.0 程度に pH を低下調整した防錆材溶液の散布を 1 日 3 回（約 50L /回）継続して行った。今回は対象が供用中の実高架橋であり，通電期間中における作業規制（例えば多客輸送時）により連続通電を一時中断（通電開始より 117 時間の連続通電を行い，1 週間程度通電を停止した後に連続通電を再開）する必要があった。作業規制中の電解質溶液の散布は 1 日 1～2 回行い，本試験施工の通電終了時までに使用した電解質溶液の合計散布量は約 30L/㎡であった。

### 5.2 鉄筋付近における防錆材濃度

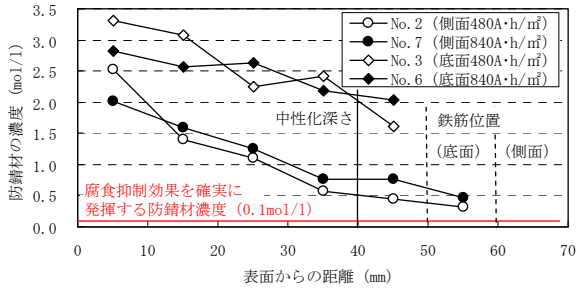
**表－1** に示すコアとエタノールアミン溶液を電場なしで 1 週間浸漬させたコアについて，4.3 に記述した手法によって得られた防錆材の深さ方向の濃度プロファイル，中性化深さおよび鉄筋位置の関係を**図－8** に示す。なお防錆材の濃度とは，イオンクロマトグラフィーによって得られた各スライス試料中の防錆材の量（mol）を，各試料の体積から空隙率（中性化部 13.0%，未中性化部 13.2%）を用いて推定算出されたポアの体積で除したものである。

**図－8（a），（b），（c）**に示す防錆材の濃度プロファイルの結果から，通電により 480A･h/m$^2$ と 840 A･h/m$^2$ の積算電流量を与えた実高架橋スラブの鉄筋位置すべてのコア採取箇所（No.1～No.8）において，鉄筋腐食抑制が確実となる濃度（0.1mol/l 以上）の防錆材が鉄筋付近に注入されたことを確認した。また，電場無しで 1 週間エタノールアミン溶液に浸漬させたコア（**図－8（d）**）と

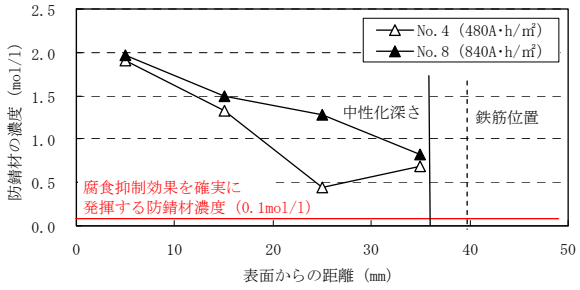
の比較により，通電によってかなりの濃度の鉄筋防錆材が有効に鉄筋付近に集積されていくことを確認した。



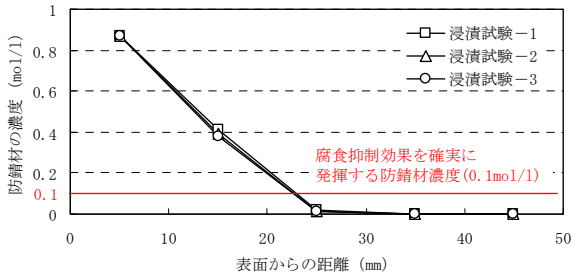

（a）張り出しスラブ




（b）縦梁




（c）中央スラブ




（d）浸漬試験

**図－8　注入された鉄筋防錆材の注入量**

また，**図－8**（b）に示す縦梁の結果より，相対的に鉄筋かぶり厚の大きい縦梁の側面より注入される防錆材濃度は，相対的に鉄筋かぶり厚の小さい縦梁の底面より注入される防錆材濃度に比べ大きく下回ることを確認した。これは，鉄筋かぶり厚の違いによる回路（コンクリート）の抵抗の違いに起因していると考えられ，コンクリートを対象とした電気化学的工法の適用時においてかぶり厚が電流密度に影響するとしている既往の研究の知見[9), 15)]と一致している。

通電により積算電流量を 480A・h/m$^2$ 与えた全ての部位における防錆材の濃度プロファイルにおいて，注入された防錆材のピークが，通電開始前に測定した中性化深さ付近にあることを確認した。これは電場の助けによって内部の鉄筋の方向へ泳動した防錆材のイオンがコンクリートの非中性化部に到達し，その際にほとんどの防錆材のイオンが分子に変換され，電場の影響から開放され停滞して蓄積したことに起因すると考えられる。

通電による積算電流量の違いによる防錆材の濃度の比較では，積算電流量 840A・h/m$^2$ を与えた防錆材の濃度プロファイルは全体濃度としては増大しているものの，積算電流量 480A・h/m$^2$ 時の防錆材ピークのあった位置よりも手前（コンクリート表面側）において防錆材の濃度の上昇が大きいことを確認した。これは通電に伴い鉄筋において発生する水酸化物イオンのコンクリート表面への電気泳動により細孔溶液中の pH が上昇し，防錆材の鉄筋への電気泳動を著しく低下させ始めることに起因すると考えられる。すなわち，基礎実験[9)~11)]の試験体とは異なり，本試験施工のように中性化深さが鉄筋まで完全には到達していないコンクリートの場合では，ある程度（本検討では 480A・h/m$^2$）以上の積算電流量の通電では，コンクリート中にはさらに多くの防錆材を送り込むものの，鉄筋付近にさらにより著しい注入量をもたらすには至らない，という興味深い知見が得られた。

### 5.3 通電終了時のその他の所見

施工後は陽極材（ステンレスメッシュ）に若干の錆の発生が見られたが，コンクリート表面への錆の付着等の影響はなかった。また，通電中のコンクリート表面における外部溶液の pH は 9.0 程度と一定であったためコンクリートの溶出は全く見られず，通電に伴う新たなひび割れ等の発生も見られなかった。なお，通電により水素イオンの発生のある陽極付近においてコンクリート表面での外部溶液の pH が 9.0 程度と一定であったのは，バブリングした炭酸ガスによる溶液の 2 段階の緩衝効果（式(4)，(5)）によるものと考えられる[9)]。

$$CO_3^{2-} + H^+ \Leftrightarrow HCO_3^- \quad (4)$$

$$HCO_3^- + H^+ \Leftrightarrow CO_2 + H_2O \quad (5)$$

## 6. 結論および今後の検討

本検討により以下の知見が得られた。

・実高架橋の上部工下面の一部（張り出し部，縦梁，中央スラブ）に 5A/m$^2$ の電流密度の電場を 4 日間与えた時と同等の積算電流量 480 A・h/m$^2$ あるいは電場を 7 日間与えた時と同等の積算電流量 840 A・h/m$^2$ を与える

ことにより，有機系防錆材（エタノールアミン）を内部鉄筋の腐食抑制に必要な濃度を十分上回る濃度で鉄筋付近へ注入できた。また，施工性の面からも本工法の有効性を確認できた。

・中性化しているものの中性化が鉄筋まで到達していないコンクリートに本工法を適用する場合には，ある積算電流量よりも大きな積算電流量を与えても注入効果がそれ以上飛躍的に高められないような積算電流量の閾値が存在する可能性のあることが判明した。

・実高架橋において鉄筋のかぶり厚の異なるコンクリート表面を同じ電気回路の各要素として本注入工法を適用する場合，面ごとのコンクリートの抵抗の違いがコンクリート内部での電流密度の大きさに影響し，その結果として鉄筋防錆材の注入量に差が現れることを確認した。

上記の 3 項目の知見については，今後本工法が長期的に鉄筋腐食抑制に有効であるために必要な最小積算通電量を適切に見極めることが，補修の効率化やコストの面で非常に重要なポイントであると考えられる。例えば，脱塩工法 [7]においても，コンクリートの抵抗や塩化物イオンの輸率などを考慮したシミュレーションによる最適な通電期間の見極めなどの試み [15]が行なわれているが，現時点では精度良く予測するのは困難な現状である。今後は本手法を適用した場合の高い防錆材の注入効率の確保のために，通電諸元と防錆材注入量の関係について，今回の知見である積算電流量 480 A･h/$m^2$ のさらなる見極めを行なっていく。

## 7. おわりに

今後は上記の検討課題を解決しつつ，今回鉄筋防錆材の電気化学的注入を行ったコンクリート中の長期間にわたる鉄筋付近の防錆材の濃度を追跡調査し，本工法を適用した構造物の長期耐久性について検討を進めていく。

**謝　辞**　本研究におけるスラブ材への通電，およびその管理にあたり，電気化学工業株式会社松久保様にご協力を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

## 参考文献

1) 石橋忠良，古谷時春，浜崎直行，鈴木博人：高架橋からのコンクリート片剥落に関する調査研究，土木学会論文集，711，V-56，pp.125～134，2002
2) 小林一輔：コンクリート構造物の耐久性シリーズ 1，コンクリート構造物の早期劣化と耐久性診断，森北出版，1991
3) 在田浩之・鳥取誠一・北後征雄：中性化と初期塩化物イオンの影響を受ける場合の鉄筋腐食性状，土木学会第 53 回年次学術講演会，Vol.53，pp.244～245，1998
4) 荒巻智・泉並良二・武並秩男・堀井義浩：鉄筋コンクリート構造物における鉄筋腐食要因の推定，土木学会第 55 回年次学術講演会，Vol.55，pp.666～667，2000
5) 長谷川昌明・久保淳一郎・関雅樹・荒鹿忠義：東海道新幹線鉄筋コンクリート構造物維持管理標準，社団法人日本鉄道施設協会，1999.8
6) 長谷川昌明・久保淳一郎・関雅樹・荒鹿忠義：東海道新幹線の鉄筋コンクリート構造物の健全度評価および補修フローの研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.3，pp.1669～1674，2008
7) 宮川豊章編：電気化学的防食工法　設計施工指針（案），コンクリートライブラリー，土木学会，2001
8) Cigna R., Andrade C., Nurnberger U., Polder R., Weydert R., Seitz E. (Eds.), in COST Action 521, Corrosion of Steel in Reinforced Concrete Structures, Final report, European Communities EUR 20599, Luxembourg, pp.115-148, 2003
9) Kubo J.: Methods of Remedial Treatment for Carbonation-induced Corrosion of Reinforced Concrete, PhD Thesis，Leeds University，2007
10) 久保淳一郎，澤田祥平：中性化した鉄筋コンクリートへの鉄筋防錆材の電気化学的注入工法，コンクリート工学テクニカルレポート，Vol.45，No.12，pp.23～28，2007
11) Kubo J., Sawada S., Page C.L., and Page M.M.: Electrochemical inhibitor injection for control of reinforcement corrosion in carbonated concrete, Materials and Corrosion, Vol.59, No.2, pp.107-114, 2008
12) 田中佑児・久保淳一郎・関雅樹・佐々木崇：廃用となった新幹線実高架橋スラブ材への鉄筋防錆材の電気化学的注入試験，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp.1115～1120，2010
13) Page C.L., Ngala V.T., and Page M.M.: Corrosion inhibitors in concrete repair systems, Magazine of Concrete Research, 52, No.1, pp.25-37, 2000
14) Gaidis J.M. and Rosenberg A.M.: The mechanism of nitrite inhibition of chloride attack on reinforcing steel in alkaline aqueous environments, Materials Performance, 18(11), pp.45-48, 1979
15) 土木研究所：塩害を受けたコンクリート構造物の脱塩工法に関する共同研究報告書，2008