

# 論文 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

田中 佑児<sup>\*1</sup>・久保 淳一郎<sup>\*2</sup>・関 雅樹<sup>\*3</sup>・佐々木 崇<sup>\*4</sup>

**要旨**：中性化した鉄筋コンクリート中の鉄筋腐食を抑制する新しい工法として、有機系の防錆材を外部溶液としてコンクリート表面に接触させ直流電場により電気化学的に内部鉄筋付近に注入する手法を考案し、これまで基礎的検討を行ってきた。本稿では本手法の実構造物への適用を視野に入れ、廃用となり解体された鉄道構造物の一部を用いて試験注入を行い、防錆材の注入効果のばらつきなどについて検討を行った結果、実構造物を対象として意義のある注入を行うための通電の諸元、管理方法などについて有用な知見を得た。

**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

鉄筋コンクリート構造物の長期耐久性を脅かす要因の一つとしてコンクリートの中性化による内部鉄筋の腐食があげられる。中性化によるコンクリート内部の鉄筋腐食は、進行によりコンクリート片が落下<sup>1)</sup>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である。また、塩分を含むコンクリートの場合には、中性化は、中性化の影響を受ける前にコンクリート中で固定化されていた塩化物を細孔溶液中に自由にする働きをするため、内部の鉄筋にとって劣悪な腐食環境となり、中性化と塩分による「複合劣化」を引き起こすこともある<sup>2)~4)</sup>。

中性化の進行あるいは中性化に起因する鉄筋腐食を抑制する工法としては種々なものがあり、その中で最も一般的なものとして断面修復工があるが、高価であるとともに、騒音・粉塵の問題を伴い、別の箇所の鉄筋のマクロセル腐食を誘発する可能性があることも指摘されている<sup>5)</sup>。他の手法として、劣化因子の遮断を目的とした表面被覆工法も用いられるが、予防保全手段としては有効であるものの中性化によって鉄筋の腐食が既に開始した場合に、被覆材がどの程度の鉄筋腐食抑制効果を示すかは必ずしも明らかにはなっていない。また、電気化学的手法を用いた再アルカリ化工法<sup>6)</sup>は、中性化したコンクリートの再アルカリ化を図り鉄筋の腐食環境を改善するとされ、実験室および実施工での効果を示す報告も多い<sup>7), 8)</sup>が、その長期耐久性を保証するために必要な通電に関する諸元（たとえば通電量や通電期間）については明確にされていないのが現状である<sup>9)</sup>。

他には、鉄筋コンクリート表面に防錆材の溶液あるい

はペースト等を塗布し、防錆材を鉄筋方向へ比較的短期間で含浸させようとする手法があり、簡易で低コストであると考えられる。しかし、鉄筋付近における鉄筋防錆に必要な確保すべき防錆材の濃度、あるいは長期的な防錆効果の維持などについては明確になっていない<sup>10)</sup>。

そこで、筆者らは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新しい手法を考案し、これまでに電場に応じた防錆材の注入量の違いや、注入された防錆材による長期的な鉄筋の腐食抑制効果などに関する様々な基礎的検討を行ってきた<sup>11)~13)</sup>。

一方、本工法が実用的なものであるためには、実構造物のような材料や建設時の施工性にばらつきの要素を含むようなコンクリートに対しての注入効果を把握しておく必要がある。そこで、本稿では、廃用となり一部分を切り出して保存していた新幹線高架橋スラブの一つを利用して、考案された鉄筋防錆材の電気化学的注入の試験施工を実施し、注入効果を確認することによって実構造物を対象とした通電施工の際の通電諸元に関する提言を行うとともに、外部溶液として使用する鉄筋防錆材溶液の改良の必要性などについて検討を行った。

## 2. 鉄筋防錆材の電気化学的注入工法の概要

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）

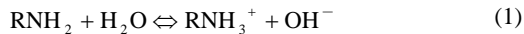
\*1 東海旅客鉄道（株） 新幹線鉄道事業本部 東京新幹線構造物検査センター（正会員）

\*2 東海旅客鉄道（株） 新幹線鉄道事業本部 施設部 Ph.D.（正会員）

\*3 東海旅客鉄道（株） 総合技術本部 技術開発部長 工博（正会員）

\*4 電気化学工業（株） セメント・特混事業部 技術室（正会員）

を外部溶液に、陰極（一極）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。



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。

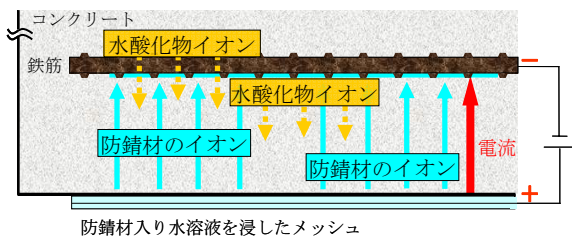


図-1 防錆材の電気化学的注入の概念図

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:  $\text{OH-CH}_2\text{-CH}_2\text{-NH}_2$ ) という有機物質であり、酸解離定数 ( $K_a$ ) と呼ばれる定数を持ち、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  $\text{H}^+$  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  $K_a$  は  $10^{-9.5}$  ( $\text{p}K_a = -\log K_a = 9.5$ ) 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。

$$K_a = [\text{H}^+][\text{RNH}_2]/[\text{RNH}_3^+] \quad (3)$$

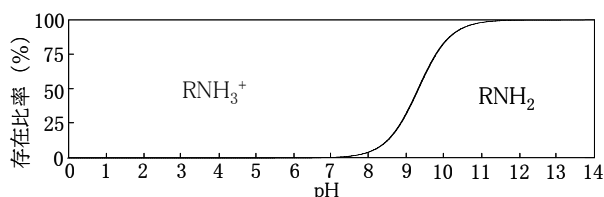


図-2 溶液の pH に対する防錆材イオン ( $\text{RNH}_3^+$ ) と防錆材分子 ( $\text{RNH}_2$ ) の比率 <sup>11)~13)</sup>

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 <sup>14)</sup> 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 ( $\text{H}^+$ ) 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、 $0.1\text{mol/l}$  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 ( $\text{pH} > 7$ ) であれば鉄筋の腐食が抑制されることがわかっている <sup>11)~13)</sup>。

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  $9.0 \sim 10.0$  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 ( $\text{RNH}_3^+$ ) はほとんどが分子 ( $\text{RNH}_2$ ) 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。

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  $5\text{A/m}^2$  程度 (鉄筋全周の表面積に対して) の電流密度の電場を 1 週間程度与えた電気化学的注入により、 $1\text{mol/l}$  を超える濃度の防錆材を鉄筋付近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) <sup>11)~13)</sup>。

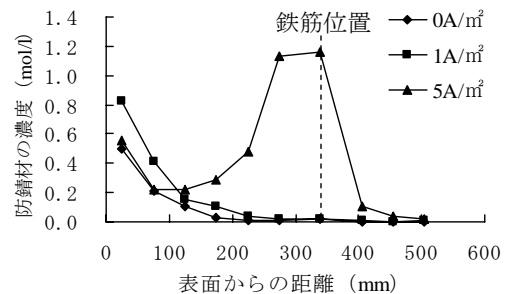


図-3 通電処理後の試験体中の防錆材濃度 <sup>11)~13)</sup>

また、コンクリートを用いた試験では、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 (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  $1.0 \mu\text{A/cm}^2$  に対して:  $0.1 \sim 0.2 \mu\text{A/cm}^2$  程度の腐食電流量) こともわかっている <sup>11)~13)</sup>。

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 <sup>11)~13)</sup> している。

### 3. 施工実験概要

本研究では、筆者らによる既往の実験室レベルでの研究成果を基に、実構造物として使用された高架橋スラブを切り出して発生した部材の一部を対象として鉄筋防錆材の電気化学的注入を行った。本試験では、実験室レ

ベルと同様の期間（1週間）で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、実構造物のような材料や建設時の施工性に不均一性が見られるコンクリートに対して通電を行うにあたり、注入効果の違いやばらつきなどについても把握・検討を行った。

### 3.1 注入試験の対象

通電による鉄筋防錆材の注入試験の対象は、新幹線高架橋スラブ材の張り出し部の下面の1850×850mmの部分を対象とした（写真-1）。この高架橋スラブは、建設後約38年間飛来塩分の影響を受けない場所で供用されたのちに廃用となり切り出され、その後近隣の同様な自然環境に約7年間さらされていたものである。この実高架橋スラブ材は過去に表面処理剤の使用や補修履歴はなく、コア採取後、フェノールフタレイン法により鉄筋かぶり25～30mmに対して平均33mmの中性化の進行を確認した。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「硬化コンクリートに含まれる塩分の分析方法」により測定した結果、最大でも0.4kg/m<sup>3</sup>程度の塩化物イオン量であった。はつりによる鉄筋目視調査の結果、内部鉄筋の一部にごくわずかな錆が見られた。また、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13.1%であった。



写真-1 注入試験の対象

### 3.2 施工方法

施工は、通電期間を連続通電1週間とし、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）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し、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よって吹き付けた後、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：110V, 5A）に接続し、通電を実施した（図-4）。

実構造物の材料のばらつきがスラブ中の通電の効率に与える影響を把握するため、対象領域を925×850mmの2つに分割し並列の回路（「領域A、B」と呼ぶ）とし、電流密度の推移、通電の効率を把握することとした。

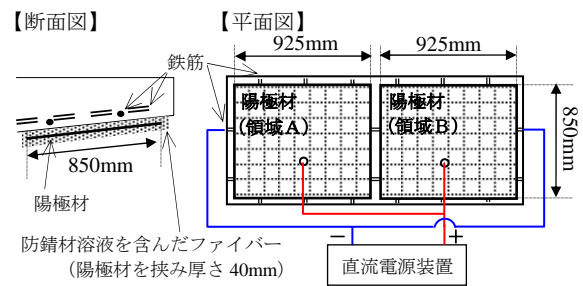
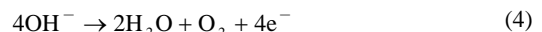


図-4 高架橋スラブ張り出し部の通電方法

これまで筆者らが行ってきた基礎的研究において、鉄筋付近に集積した防錆材の濃度は鉄筋腐食抑制に必要な防錆材濃度（0.1mol/l）を大きく上回る結果（1mol/l以上）となっていることから、今回は電流密度を実験室レベル検討時の半分の2.5A/m<sup>2</sup>（鉄筋全周の表面積に対して）とし、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か確認するとともに、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。

基礎的研究においては、外部溶液として、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（1mol/l：アルカリ性）に硝酸を混合しpHを8程度にまで低下させたものを用いていたが、通電中には外部溶液中の水酸化物イオンが以下の式（4）に従って消費されるため、今回はこの効果によるpHの低下に期待し、5%のエタノールアミン溶液（濃度約0.8M：pH11.8程度）をそのまま外部溶液として使用することとした。また、通電中は外部溶液のpHの推移を把握するため、約3時間ごとにpH試験紙を用いてpHの測定を行った。



### 3.3 注入された防錆材の濃度、鉄筋付近のpHの測定

通電によって注入された防錆材の濃度を測定するため、図-5に示す箇所より8本のコアを鉄筋部分の下部より鉄筋に到達するまで採取した。コンクリート中の他の陽イオンの電気泳動についても調査するため、ナトリウム量の測定も同時に行った。図中のA、Bはそれぞれ図-4中の領域A、Bを示し、No.8のコアは2本の鉄筋が直角に交差する部分から採取した。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、注入された防錆材および試料中のナトリウム分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細孔溶液中の防錆材の濃度およびコンクリート中のアルカリ量を分析した。

また、通電による鉄筋付近のpHの上昇について調査するため、領域A、Bの各1箇所ずつ（No.1, 5）より採取したコアのごく鉄筋付近の微小な量のコンクリートを粉砕し抽出した試料0.1gに純水0.5mlを加えpH電極

により鉄筋付近の pH を測定した。

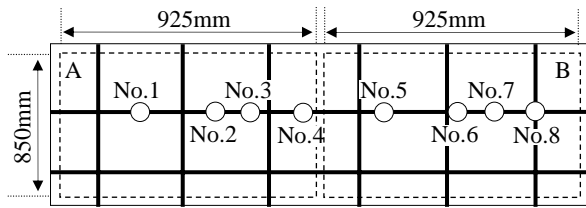


図-5 コア採取箇所 (太線は鉄筋を示す)

#### 4. 実験結果と考察

##### 4.1 電流に関する諸元の変化

通電を開始したときの電圧は約 18V (すなわち回路の抵抗は約 20Ω) を示し、徐々に下降し最初の 2 日間で約 14V まで低下し、通電終了時には約 13V となった。通電に伴いコンクリート中の細孔溶液において、外部溶液からの防錆材イオンの浸透や鉄筋付近での水酸化物イオンの発生などによってイオン濃度が増加したため、コンクリートの抵抗値が徐々に低下したと考えられる。

電流密度の変化については、電源から各領域に至る電流値を測定・記録し、各領域における鉄筋全周の表面積で除したところ図-6 に示すとおりとなった。

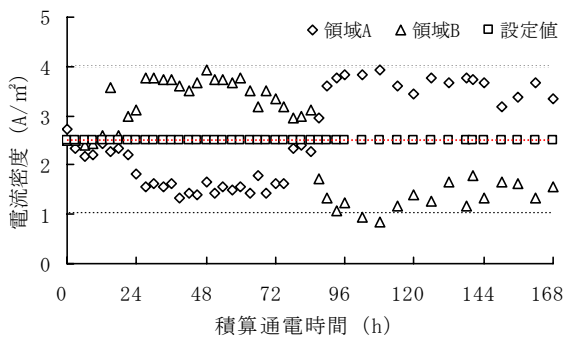


図-6 各領域における電流密度の変化

コンクリートの抵抗は回路に使用されている導線の抵抗よりもはるかに高いと考えられるため、この 2 領域における電流密度の違いは主に両者のコンクリートの抵抗の違いによるものであると考えられる。通電開始から約 12 時間を過ぎて、材料の違いなどの何らかの理由により、領域 A の方が領域 B の方と比較してコンクリート抵抗が高くなり、通電開始約 84 時間まで領域 B の方に電流が流れやすくなっている。従って領域 B にはこの間領域 A より多くの防錆材が注入されたと考えられる。しかし、領域 B の鉄筋付近へ防錆材の分子が集積されるにつれて、領域 B の抵抗値は徐々に増大し、今度はそれに伴い領域 B に流れる電流が減少し、逆に領域 A に流れる電流が増加し始めることになる。84 時間を過ぎたあた

りから電流密度の大きさが逆転し、領域 A の鉄筋への防錆材の注入が励起されたことがわかる。

##### 4.2 鉄筋付近における防錆材濃度

図-5 に示す各箇所について 3.3 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を図-7 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、各試料の体積と空隙率 (13.1%) の積により推定算出された各試料における空隙量の体積で除したものである。

また、通電前に中性化の進行を確認したフェノールフタレインの色の変化から pH が 10.0 未満であったと考えられる鉄筋位置における pH は、通電後に 12.6 (領域 A) と 12.2 (領域 B) であり、通電による両領域の鉄筋付近における pH の上昇を確認した。これにより、鉄筋付近に近づいたイオンの防錆材はほとんどが分子に変換され鉄筋付近に蓄積されたと考えられる。また、前述のとおり、通電による鉄筋付近の pH の上昇は再アルカリ化や脱塩処理時<sup>8)</sup> (pH>13) ほど高くならないことが改めて確認され、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できる可能性があることがわかった。

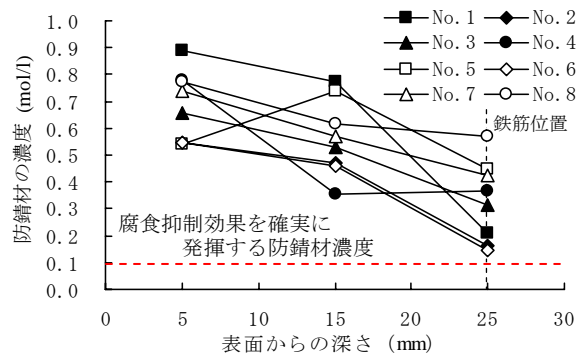


図-7 注入された防錆材の濃度

防錆材の濃度プロファイルの結果から、すべてのコア採取箇所において鉄筋腐食抑制が確実になる防錆材濃度 (0.1mol/l 以上) が通電によって鉄筋付近に集積したことを確認した。鉄筋付近まで到達した防錆材の濃度の比較では全体的に領域 B (No.5~No.8) のほうが領域 A (No.1~No.4) よりも高い濃度を示していた。領域 A, B での防錆材の注入効率の比較では、前節で見られたように初期の段階で領域 B により多くの電流が流れたため、領域 B では鉄筋付近の pH が高くなる前に防錆材のイオンが鉄筋に到達できたが、領域 A ではより多くの電流が流れるのが遅かった (通電開始から 84 時間後以降) ため、防錆材が到達してくる前に鉄筋の付近の pH が高められてしまっており、領域 A の防錆材の鉄筋付近への到

達量が領域Bと比較して抑えられてしまったものと考えられる。また特にNo.8（領域B）のような鉄筋の交差部において高い濃度が見られることがわかった。これは、鉄筋交差部のような鉄筋の密集した箇所へは電流密度が高まることに起因していると考えられる。

今回の実験によって得られた防錆材の濃度分布は、筆者らが行ってきた基礎的実験によって得られた、鉄筋付近で防錆材濃度がピークを有するような防錆材プロファイル（図-3の5A/m<sup>2</sup>のケース）とは異なっている。これは一つの理由として、今回の通電試験では与えた電場の強さが基礎的実験で与えた電場（5A/m<sup>2</sup>）の半分（2.5A/m<sup>2</sup>）であったということが挙げられる。

一方、今回の実験で外部溶液の電気分解によるpHの低下（式（4）参照）によって防錆材のイオン化を期待したため、初期の外部溶液のpHを事前調整しない場合のpH変動とそれが防錆材の注入に与える影響について検討する。通電中における外部溶液のpHの時間的推移は、pH試験紙を用いて測定したため精度が粗いが、領域A、Bでほぼ同じであり、図-8のとおりであった。このpHの推移から、今回の試験においての外部溶液はpHが10以上であった期間がおおよそ20時間以上もあり、外部溶液の図-2に示す特性からこの期間には防錆材のイオンの電気泳動があまり期待できないことが伺える。また、この時間中にも鉄筋付近においては水酸化物イオンが発生しているため、防錆材イオンが電気泳動されてきても既に鉄筋付近の細孔溶液中のpHが上昇しており、防錆材が鉄筋付近に近寄り難くなったと考えられる。

なお、外部溶液のpHが時間の経過とともに9.0~9.5に収束していくのは、防錆材の平衡式（式（1）、pKa=9.5）による溶液の緩衝効果（pHを低下させようとすると、防錆材の分子がイオン化して水酸化物イオンを放出し、逆にpHを低下させまいとする効果）によるものである<sup>15)</sup>。

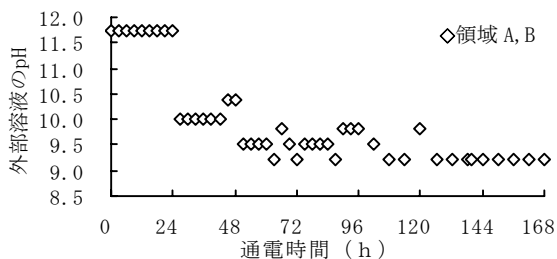


図-8 通電時間による外部溶液のpH推移

#### 4.3 鉄筋付近におけるナトリウム量

通電終了時のコンクリート中におけるナトリウム量の分布を図-9に示す。中性化したコンクリート中では、ナトリウムの大部分は例えば式（5）に示すようにC-S-Hのような水和物に取り込まれアルカリシリカゲルの状

態となり<sup>16)</sup>イオン化していないが、水和物に取り込まれずに正のイオンとして細孔溶液中に存在するナトリウムは、通電に伴い陰極である鉄筋付近に集積している。ナトリウムの集積は領域Aの方が領域Bよりも多く電場の影響を受けていることがわかる。これは、前節で述べたとおり、領域Bでは領域Aと比較してより多くの防錆材が陽イオンとして電子を運ぶ役割を担っていたため、その結果として領域Bではナトリウムイオンの電気泳動が抑えられていた可能性のあることを意味する。

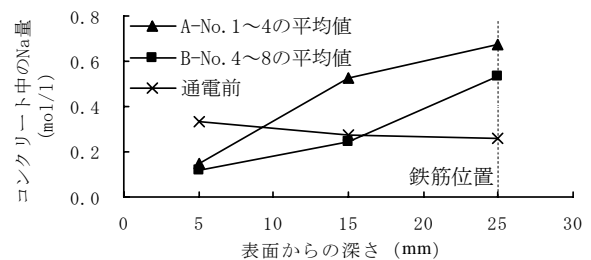


図-9 通電によるナトリウム量の分布

#### 4.4 通電終了時のその他の所見

中性化深さについては、通電処理したコンクリートよりコアを8本採取後フェノールフタレイン法により確認したところ平均0mmであり、コンクリートのアルカリ性が回復していた。施工後のコンクリートの外見として、外部溶液のpHの低下が酸性領域まで全く達しなかった（pH: 9程度）ためコンクリートの溶出や陽極メッシュの錆の発生や付着等は見られず、良好な状態であった。

#### 5. 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。

- ・実構造物として供用された中性化した高架橋スラブ張り出し部に数A/m<sup>2</sup>程度の電流密度の電場を1週間与えることによって、有機系防錆材（エタノールアミン）を、腐食抑制に必要な濃度を十分上回る濃度で鉄筋付近に注入することが可能であることがわかった。
- ・コンクリートの抵抗に違いのある2領域を並列の電気回路とした場合、初期の段階では抵抗の低い領域の電流密度が高くなり、より多くの防錆材が鉄筋付近へ注入されるが、鉄筋付近で防錆材の分子が集積するにつれコンクリートの抵抗値が増加するため、次第に初期に抵抗の高かった領域の電流密度が増加し、注入が励起されていくことがわかった。
- ・鉄筋付近の防錆材濃度の結果より、上記の2領域では通電初期の電流密度が高い領域の方が鉄筋で発生する水酸化物イオンの影響を受けにくいいため、鉄筋付近に防錆材をより多く注入できることがわかった。逆に、

通電初期に電流密度の低い領域では、電流が回復する時に水酸化物イオンによる影響を大きく受けてしまうため、同じ電流量（電流密度を時間で積分した量と定義する）でも注入の効率が低下する結果となる。

- ・通電開始時に外部溶液として用いる防錆材溶液の pH を低下調整しない場合、初期の通電が防錆材のイオン化に費やされ非効率であるばかりでなく、イオン化に要する期間においても通電による鉄筋付近における水酸化物イオンの発生が起るため、防錆材が鉄筋付近により近寄りがたくなってしまふことがわかった。

上記より、施工範囲を可能な限り多くの領域に分割し、それぞれの領域を別々の回路として通電管理を行うことで、通電中、各領域における電流密度のばらつきを少なくでき、この結果、防錆材をより均一に注入できることがわかった。また、より高い通電の効率性を実現するために、通電開始時の外部溶液の pH の調整についてさらに検討を行っていく必要がある。本検討の結果を踏まえると、鉄筋腐食に効果を発揮する濃度の防錆材を鉄筋付近に注入する通電期間についてさらに短縮できる可能性があるためと期待されるため、今後の検討課題とする。

## 6. おわりに

今後は上記の検討課題を解決したうえで、供用中の中性化した実構造物を対象とした注入試験、および注入を行ったコンクリート中の鉄筋の長期間にわたる腐食速度モニタリングなどを実施し、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、名工建設株式会社永田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.55, 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) 長滝重義・大即信明・守分敦朗・鎌田敏郎・宮里心一: 断面修復部における打継目の物性通過性が鉄筋のマクロセル腐食に及ぼす影響, 土木学会論文集, 578, V-37, pp.31~42, 1997
- 6) 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
- 7) 鳥取誠一, 北後征雄, 原与人, 宮川豊章: 中性化と初期塩化物イオンによる鉄筋腐食に対する脱塩・再アルカリ化補修の適用性, コンクリート工学年次論文集報告集, Vol.19, No.1, pp.823~828, 1997
- 8) 北後征雄, 芦田公伸, 菊田憲弘, 宮川豊章: 電気化学的手法によるコンクリートの改質と補修効果に関する実証的研究, 土木学会論文集, 641, V-46, pp.101~115, 2000
- 9) 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
- 10) 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
- 11) Kubo J.: Methods of Remedial Treatment for Carbonation-induced Corrosion of Reinforced Concrete, PhD Thesis, Leeds University, 2007
- 12) 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
- 13) 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
- 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) Kubo J., Sawada S., Page C.L., and Page M.M.: Electrochemical injection of organic corrosion inhibitors into carbonated cementitious materials : Part II - Mathematical modelling, Corrosion Science, 49, pp.1205-1227, 2007
- 16) Garrabrants A.C., Sanchez F., and Kosson D.S., Changes in constituent equilibrium leaching and pore water characteristics of a Portland cement mortar as a result of carbonation, Waste Management, 24, pp.19-36, 2004