

鉄筋防錆材の電気化学的注入の施工試験による防錆材注入効果の検討

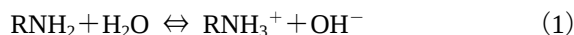
東海旅客鉄道（株） 正会員 ○田中 佑児
 正会員 久保淳一郎 因田 智博
 電気化学工業（株） 正会員 佐々木 崇 正会員 松久保博敬

1. 目的及び概要

コンクリートの中性化による内部鉄筋の腐食は、コンクリート片の剥離・剥落による第三者被害や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、構造物の長期耐久性を脅かす要因の一つである。そこで筆者らはコンクリートの鉄筋腐食抑制対策として、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、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、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^{1),2)}。本研究では、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を対象に、施工試験を実施し、鉄筋防錆材の注入効果の確認を行った。

2. 防錆材の電気化学的注入の原理

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。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って発生する水酸化物イオンによる腐食環境の改善（再アルカリ化）を図ることも期待できる。



本研究で使用するアミン系防錆材はエタノールアミンという有機物質であり、酸解離定数（Ka）は $10^{-9.5}$ であるため、次の平衡式（2）に従って、存在する溶液のpHに対する防錆材のイオン（ RNH_3^+ ）と分子（ RNH_2 ）の濃度比率は図-2のようになる。

$$\text{Ka} = [\text{H}^+][\text{RNH}_2]/[\text{RNH}_3^+] \quad (2)$$

なお、本工法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（2）による緩衝作用であると考えられており、0.1M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^{1),2)}。

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。なお、実験室レベルでの試験では、初期に防錆材溶液（1M）を硝酸によりpHが8.0程度になるよう調整し、中性化した硬化セメントペーストに $5\text{A}/\text{m}^2$ 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、1M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）^{1),2)}。

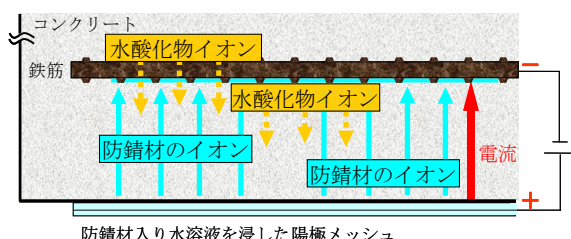


図-1 防錆材の電気化学的注入の概念図

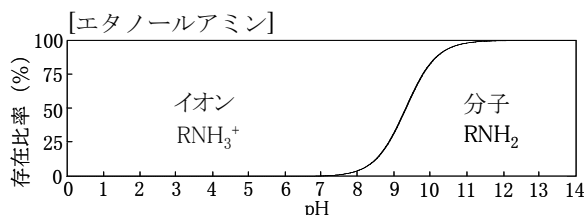


図-2 溶液のpHによるイオンと分子の比率

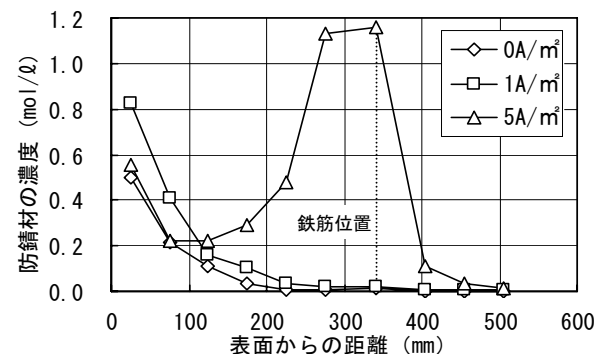


図-3 注入された防錆材の濃度（基礎実験）

キーワード 中性化、鉄筋腐食、電気化学的工法、有機系鉄筋防錆材

連絡先 〒222-0026 横浜市港北区篠原町 3219-1 東海旅客鉄道株式会社 TEL045-474-0167

3. 施工試験概要

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 $1850 \times 850 \text{ mm}$ 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、中性化の進行は鉄筋かぶり $25 \sim 30 \text{ mm}$ に対して平均 33 mm であった。コンクリート中の塩化物イオン量は最大でも 0.4 kg/m^3 程度であり、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。

施工方式はファイバー方式(図-4)により行い、陽極材にはステンレスメッシュを使用した。通電は 2.5 A/m^2 (鉄筋全周の表面積に対して)の電流密度で 7 日間通電を行った。また、本研究では通電中に陽極で発生する水素イオンによる外部溶液の pH の低下に期待し、5%のエタノールアミン溶液(濃度約 0.8 M : 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。通電中は外部溶液の pH の推移を把握するため、およそ 3 時間ごとに pH 試験紙を用いて pH の測定を行った。また、通電によって注入された防錆材の濃度をイオンクロマトグラフィーにより測定するため、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。

4. 施工試験結果

防錆材を電気化学的に注入した結果を図-5に示す。この結果から、1 週間の連続通電を行った高架橋スラブの鉄筋位置すべてのコア採取箇所(8 箇所)において鉄筋腐食抑制が確実となる防錆材濃度(0.1 M 以上)が注入されたことを確認した。通電後の中性化深さは、採取したコアをフェノールフタレイン法により確認したところ平均 0 mm であり、コンクリートのアルカリ性が回復していた。また、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(図-6)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. まとめ

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^2 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。また、本研究において電気化学的に注入された防錆材濃度プロファイルは基礎実験と異なっており、鉄筋位置における鉄筋防錆材の絶対量が少なかった。この理由として、本研究における電場の強さが基礎実験で与えた電場(5 A/m^2)の半分(2.5 A/m^2)であったことと、初期の通電が pH を低下調整しなかった防錆材のイオン化に費やされ、その期間において鉄筋付近で発生する水酸化物イオンの影響により鉄筋付近に近寄りがなくなったと考えられる。

謝辞 本研究における施工試験にあたり、名工建設株式会社永田様の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) 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
- 2) 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



写真-1 施工試験の対象

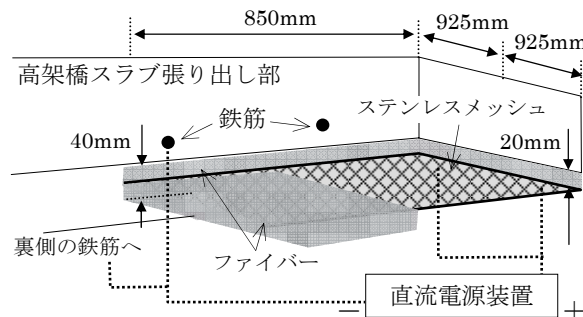


図-4 通電方法(ファイバー方式)

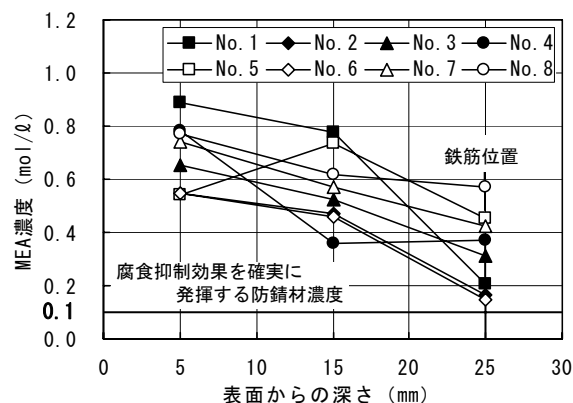


図-5 注入された防錆材の濃度

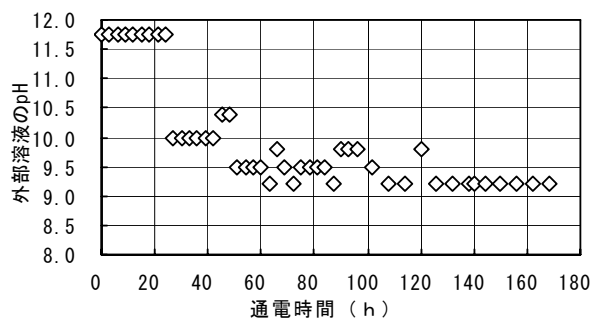


図-6 通電時間による外部溶液の pH 推移