

報告 鉄筋防錆材の電気化学的注入工法の簡易給水方式による試験施工

齋藤 淳*1・並松 沙樹*2・松久保 博敬*3・久保 淳一郎*4

要旨: 電気化学的防食工の施工方法としては、ファイバー方式を用いるのが一般的である。しかし、粉塵の飛散や電解質溶液の液だれに伴う作業環境や周辺環境への影響や大がかりな施工となるため、民家が近接した箇所や狭隘な施工箇所への適用が困難である。一方、簡易給水方式は、省スペースかつ粉塵の発生や電解質溶液の飛散が少ない施工方法であるが、下向き面への適用性の検証が必要であった。そこで、実物大の模擬鉄道高架橋の下面を対象とし、鉄筋防錆材の電気化学的注入工法の簡易給水方式による試験施工を行った。その結果、簡易給水方式は、作業環境が良好な状態で鉄筋付近へ防錆材が注入できることを確認した。

キーワード: 電気化学的防食工, 有機系鉄筋防錆材, 鉄筋腐食, 鉄道高架橋, 長寿命化

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として、塩害や中性化による鉄筋腐食が挙げられる。これらの要因に対して、コンクリート標準示方書¹⁾では、劣化進行状態を踏まえた標準的な補修方法が例示されている。例えば、進展期では表面被覆工、加速期前期では電気化学的防食工(脱塩工法, 再アルカリ化工法)ならびに断面修復工、加速期後期以降は断面修復工などの補修方法が示されている。表面被覆工や断面修復工は、施工方法が単純であるため施工実績が多いものの、補修後も鉄筋周囲に劣化因子が残存し、マクロセル腐食などによる再劣化が生じる事例が散見されるなど、補修効果の確実性に懸念がある。

一方、電気化学的防食工は、コンクリート中の鉄筋を陰極とし、コンクリート表面に仮設する電解質溶液に浸した陽極との間にかぶりコンクリートを介し通電することで補修効果が得られるメカニズムである。そのため、鉄筋周囲における塩化物イオンのような劣化因子の残存リスクが表面被覆工や断面修復工よりも低く、電気分解に伴い陰極で発生するアルカリ成分の生成により補修効果の確実性が高い補修方法であり、今後の適用拡大が期待される工法である。特に鉄道のコンクリート橋では、JCI委員会報告書²⁾でも言及されているが、道路のように片側交互通行や迂回路の設定は困難であり、列車の運休を余儀なくされるコンクリート橋の取替工事を施工することは物理的に容易ではない。そのため、現状の耐荷力を適切に維持することによって長寿命化していく必要があり、列車を走らせながら施工できる電気化学的防食工は経年 40~50 年を超えるこれらの構造物の長寿命化手段として有効である。そこで、筆者らは、塩害や中性化

を受けた鉄筋コンクリート構造物に対し、有機系鉄筋防錆材を内部鉄筋付近へ電気化学的に注入することで、鉄筋の腐食進行を防止する電気化学的注入工法を新たな電気化学的防食工として考案し、現場適用に向けた効率化などの検討を経て、実構造物にも適用してきた^{3)~8)}。

この電気化学的注入工法のみならず、脱塩工法や再アルカリ化工法などの電気化学的防食工の施工においては、コンクリート表面へ仮設する陽極を浸漬する電解質溶液の保持が一つの課題である。従来の施工方法であるファイバー方式⁹⁾では、粉塵の発生や電解質溶液の飛散により周辺環境に悪影響を及ぼす可能性が大きく、定期的な給水を行わなければ電解質溶液の蒸発による施工のばらつきやコンクリート表面の乾燥・発熱に伴う通電の非効率化などの問題もあった。また、特に民家が近接した都市部の鉄道高架橋への電気化学的防食工の適用にあたっては、作業エリアが狭くても施工可能で、周辺環境に優しい施工方法が求められる。筆者らが、近年開発した施工方法である簡易給水方式¹⁰⁾は、軽量かつ取扱いが容易な資機材を用いており、補修面全体を気泡緩衝シートで覆い負圧をかけてシートをコンクリート面に貼りつけることで電解質溶液を供給する施工方法である。省スペースかつ粉塵の発生や電解質溶液の飛散が少ない施工方法である。しかし、これまでは主に鉛直面に適用してきたことから、鉄道高架橋上部工のような広がりのある下向き面への適用性の検証が必要であった。

このような背景から、実物大の模擬鉄道高架橋の梁や床板の下面を対象とし、鉄筋防錆材の電気化学的注入工法の簡易給水方式による試験施工を行った。本稿では、試験施工結果に基づき、適用性や補修効果について報告する。

*1 (株) 安藤・間 技術研究所 土木研究部 博(工) (正会員)

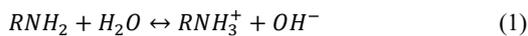
*2 東海旅客鉄道(株) 総合技術本部 技術開発部 技術経営修士 (正会員)

*3 デンカ(株) 大阪支店 特殊混和材課

*4 東海旅客鉄道(株) 中央新幹線推進本部 Ph.D

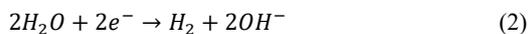
2. 鉄筋防錆材の電気化学的注入工法の概要

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電解質溶液としてコンクリート表面に接触させ、電気化学的防食工に分類される脱塩工法や再アルカリ化工法と同様の電気回路（コンクリート中の鉄筋を陰極（-極）とし、コンクリート表面に仮設した陽極（+極）との間に、電解質溶液を介して構築する直流電流回路）で通電を行い、図-1のように、電解質溶液中の防錆材イオンが、かぶりコンクリート中を電気泳動し鉄筋周囲に集積することで防錆効果を得るものである。



ここに、R：アルキル基（ C_nH_{2n+1} ）である。

なお、鉄筋（陰極）付近では、式(2)に示すように、水の電気分解によって水酸化物イオンが発生する。



本試験施工では、エタノールアミン（Ethanalamine: $OH-CH_2-CH_2-NH_2$ ）を防錆材として用いる。エタノールアミンは、溶液中での酸の強さを酸解離定数（Ka）で表すことができ、式(3)に示す平衡式に従って、溶液のpH（すなわち水素イオン H^+ の濃度）に応じてイオンと分子の存在濃度比率を変える性質を有している。エタノールアミンのKaは $10^{-9.5}$ （すなわち $pKa[-\log Ka]=9.5$ ）程度であるため、防錆材のイオンと分子のモル濃度比率は図-2のようになる。

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

本工法の防錆材の腐食抑制機構は、鉄筋の不動態皮膜の破壊に必要な水素イオンに対する式(3)による緩衝作用が主であり、0.1 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（ $pH>7$ ）であれば鉄筋の腐食が抑制されることがわかっている³⁾。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。なお、この観点で見ると、中性化したコンクリートは、細孔溶液のpHが9.0~10.0程度であり、図-2に示すように防錆材のイオンが占める割合が大きくなることから、防錆材をより注入しやすい状態である。

また、鉄筋付近では式(2)により水酸化物イオンが発生しpHが上昇するため、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るため、通電終了後も鉄筋の防錆効果が持続するという基本メカニズムを有している。

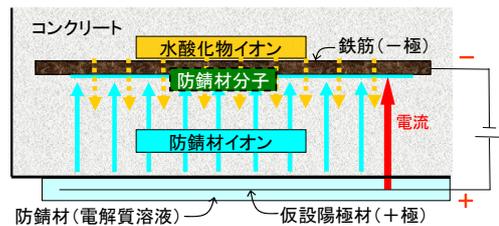


図-1 鉄筋防錆材の電気化学的注入工法の概念図

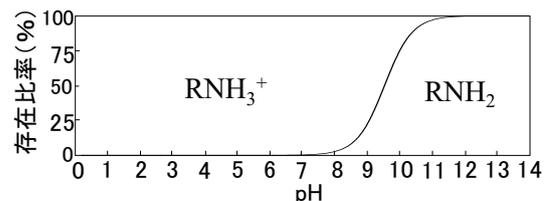


図-2 溶液のpHに対する防錆材イオン（ RNH_3^+ ）と防錆材分子（ RNH_2 ）の比率

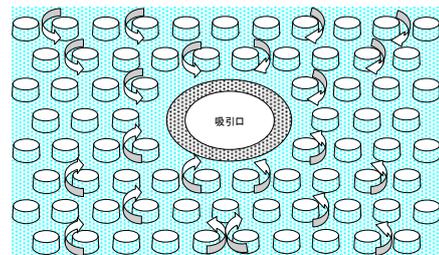


図-5 負圧部の凹凸形状による空気流路の概念図¹⁾

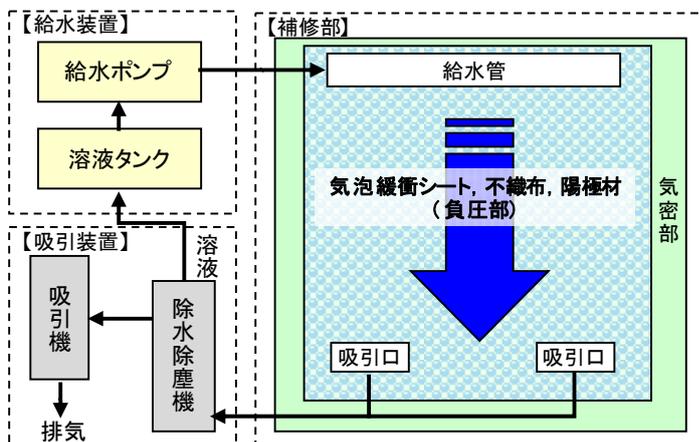


図-3 簡易給水方式の仕組み

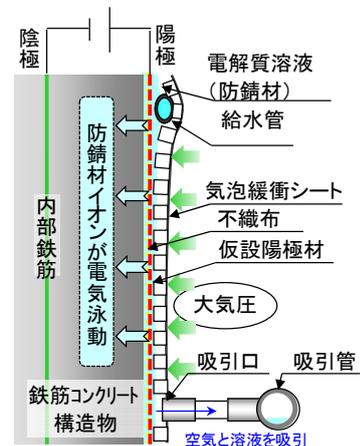


図-4 負圧部の断面

3. 簡易給水方式の概要

簡易給水方式の仕組みを図-3に、負圧部の断面図を図-4に示す。まず、コンクリート面に仮設した陽極材を気泡緩衝シートで覆い(負圧部)、周囲を粘着テープなどで密閉する(気密部)。この際、保水力を高めたい場合には、コンクリート面と陽極材の間に親水性の不織布などを設置する。次に、気泡緩衝シートとコンクリートとの間に給水管から電解質溶液を供給するとともに、吸引口から空気と電解質溶液を吸い出す。これにより、負圧で気泡緩衝シートがコンクリート面に張り付き、負圧部全体に水膜を形成できる。なお、気泡緩衝シートを用いる理由は、図-5に示すような凹凸形状を有しており、凹部が空気の流路となり負圧領域を広げることができるからである。電解質溶液は、主として、コンクリートならびに、コンクリート面と陽極材の間に設置した不織布を浸透拡散していくが、一部は気泡緩衝シートの凹部を流路として広がる。

さらに、吸引機の手前に除水除塵機を設けて空気と電解質溶液を分離し、空気は吸引機に、電解質溶液は溶液タンクに、それぞれ独立した管路で送ることで、負圧を安定保持と電解質溶液の循環利用を両立している。

以上の仕組みにより、直流電源装置に接続した補修部の仮設陽極材と内部鉄筋(陰極)間に直流電流回路を形成することができる。

4. 試験施工

4.1 対象構造物

試験施工の対象は、写真-1に示す実物大模擬高架橋の上部工下面とした。図-6に示すように、中央床板 26.4 m²、張出し部 5.5 m²、縦梁 10.6 m²および横梁 7.5 m²の合計 50.0 m²を試験施工の範囲とした。

事前調査として中性化深さ測定と鉄筋かぶり調査を実施した。中性化深さ測定は、採取したコアを割裂し、フェノールフタレイン法により実施した。中性化深さの測定結果を表-1に示す。中性化深さの最大値、最小値および平均値は、横梁で 20.0 mm、15.5 mm および 17.6 mm、中央床板で 15.0 mm、12.0 mm および 13.4 mm であった。鉄筋探査器(電磁誘導法)により実施した鉄筋かぶりの調査結果を表-2に示す。鉄筋かぶりは、梁部で 60~70 mm、中央床板で 25~33 mm および張出し部で 30~32 mm であった。したがって、中性化深さはいずれの部位も鉄筋位置までは到達していなかった。また、コンクリート中の空隙量を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、中性化した箇所において体積比で平均 20.0%であった。鉄筋間の電氣的導通状態は、内部鉄筋間の導通抵抗値測定より行い、良好(鉄筋間の抵抗値は全箇所 0 Ω)であることを確認した。

4.2 施工手順

施工手順を図-7に示す。まず、コンクリート表面の前処理としてひび割れ部の絶縁処理や、コンクリート剥落部の断面修復を行った。鉄筋探査器で鉄筋交差点を確認し、約 150 mm 角の範囲のコンクリートを鉄筋裏まで研り、鉄筋に陰極リード線を接続した後、断面修復を施し内部電極(陰極)とした。

次に、コンクリート表面に不織布を仮留めし、陽極材



写真-1 実物大模擬高架橋の外観 (試験施工の対象)

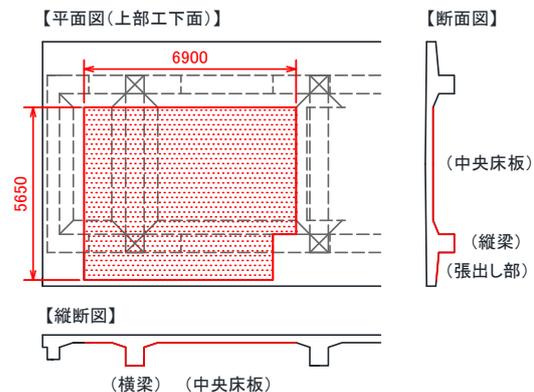


図-6 試験施工の範囲

表-1 中性化深さの測定結果 (事前調査)

測定部位		横梁	中央床板
測定結果 (mm)	平均値	17.6	13.4
	最大値	20.0	15.0
	最小値	15.5	12.0

表-2 鉄筋かぶりの調査結果

測定項目	橋軸直角方向 (梁直角方向)		橋軸方向 (梁延長方向)		
	鉄筋径	かぶり(mm)	鉄筋径	かぶり(mm)	
中央床板	①	D16	30	D16	45
	②	D16	25	D16	42
	③	D16	33	D16	48
張出し部	①	D10	30	D10	42
	②	D10	32	D10	44
縦梁	D13	70	D13	83	
横梁	D13	60	D13	76	

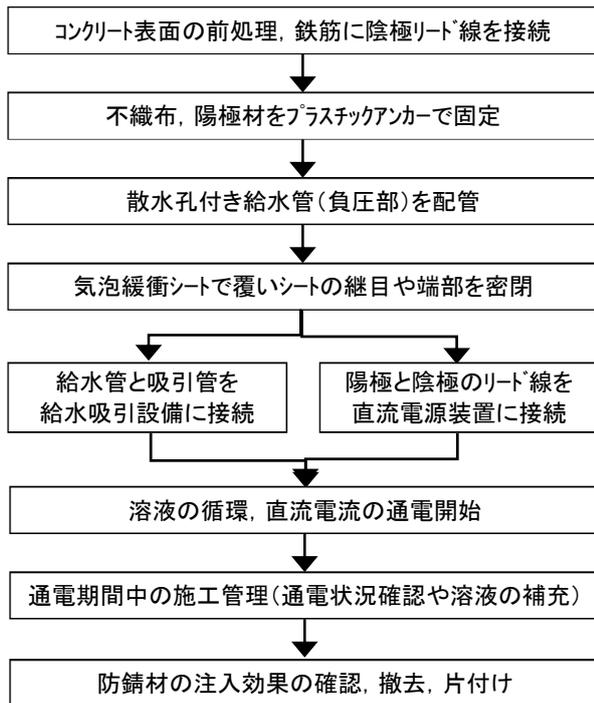


図-7 施工手順

(ステンレスメッシュ φ2.6 mm, 100 mm 角) をかぶせて、プラスチックアンカーで固定した (写真-2 参照)。負圧部に配管する散水孔付き給水管は、写真-3 に示すプラスチック製取付具を用いて、張出し部では橋軸方向に1本、中央床板では橋軸直角方向に1300 mm 程度の間隔で8本を配管した。これらを気泡緩衝シートで覆い、シートの継目や端部を粘着テープやシーリング材で密閉した。その後、吸引口を気泡緩衝シートに、最大1800 mm 間隔で27箇所取り付け、吸引管を配管した。吸引管は除水除塵機を介して吸引機に、給水管は給水タンク内の給水ポンプに接続し、電解質溶液の供給および循環利用を実施した。なお、吸引設備ならびに給水設備は、2セットを使用した。また、下向きの面に関しては、吸引停止中のシートの脱落防止対策として、写真-4 に示すように、気泡緩衝シートの上に配置したワッシャーや穴あき平板をビスでプラスチックアンカーの軸に固定した。

一方、通電は、陰極リード線と陽極リード線を直流電源装置 (最大容量: 40 V, 100 A) に接続して実施した。鉄筋のかぶり厚に応じて抵抗が異なるため、以下の部位ごとに直流電源装置を1台ずつ設置し、張出し部は1回路、梁部は縦梁と横梁の並列2回路、中央床板は並列3回路を設け、1回路の受け持つ面積を狭くして通電状況をより詳細に確認できるようにした。各部位の通電面積は4.9 m²、13.6 m²および27.2 m²である。また、既往の研究^{3)~7)}に従い、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0.8 mol/l, pH 11.8程度) の入ったタンクに炭酸ガス (99%) をパブリングさせ、pHを8.0程



写真-2 陽極材の固定

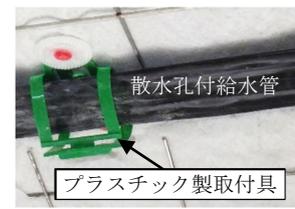


写真-3 給水管の固定

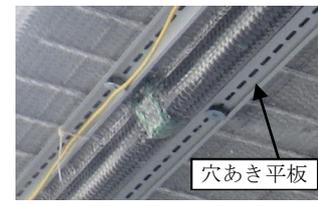
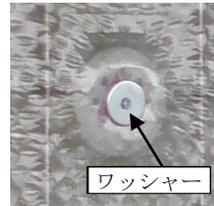


写真-4 下向き面におけるシートの脱落防止対策

度にまで低下させたものを初期電解質溶液として用いた。電流密度は、鉄筋で発生する水酸化物イオンの影響を受けにくい通電初期に鉄筋付近に防錆材をより多く注入できるように高い電流密度とし、5.0 A/m² (鉄筋全周の表面積に対して) 以上を目標とした。一方、通電期間は、本試験施工では通電時間の制約があったことから、積算通電時間で43時間の通電を実施した。なお、通常は、積算電流量が既往の研究⁷⁾に示す480 Ah/m²以上となるまで通電を行うこととしている。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、回路の抵抗値の異常な上昇の有無を確認するために、出力電圧の測定も行った。電解質溶液のpHの推移 (上昇) を把握するため、定期的にpH試験紙を用いてpHの測定を行い、通電期間中を通してpHが9.0以上とならないように管理した。通電完了後に各部位からコアを採取し、深さ方向に10 mmごとにスライスしてモノエタノールアミン濃度の分析を実施した。分析方法は既往の研究⁵⁾と同様である。

4.3 試験施工の結果

(1) 簡易給水方式の上部工下面への適用性

本試験施工期間を通じて、電解質溶液の循環利用が実施でき、シートの脱落などの不具合もなかったことから、上部工下面などの広がりのある下向き面にも簡易給水方式が適用可能であることが実証できた。また、作業に伴う産業廃棄物の発生がファイバー方式より少なかった。

その一方で、以下のような課題も見つかった。一つ目は、縦梁と横梁の交差部付近への電解質溶液の供給が不足し、陽極材に腐食が生じたことである。これは、給水管の配置を見直すことで解消可能であるため、適切な設計方法や給水管の容易な増設方法などの検討を進めていく。二つ目は、電解質溶液の消費量が1日当たり4.3 l/m²であり、再アルカリ化工法を簡易給水方式で施工した事

例¹⁰⁾における消費量の1日当たり0.8 l/m²と比べて非常に多かったことである。この原因として、エタノールアミンが揮発性を有するため蒸発量が多かったことや、コンクリートの含水率が低く浸透量が多かったことなどが推察されるものの、原因の特定には至っていない。

(2) 電流, 電圧

中央床板, 張出し部および梁の電流密度と積算時間の関係を図-8, 図-9に, 各部位の電圧と積算時間の関係を図-10に示す。

中央床板は, 図-8, 図-10に示すように, 通電開始直後は電流密度5.0 A/m²を満足していたが, 電圧が直流電源装置の最大値である40 Vに到達した後, 低下傾向を示し, 3~4 A/m²の電流密度となった。張出し部は, 図-9, 図-10に示すように, 電流密度は6.0 A/m²を常時維持していた。電圧は24 Vから33 V程度に上昇したが, 抵抗の大きな上昇は生じなかった。これに対し梁は, 図-9, 図-10に示すように, 中央床板と同じ傾向を示し, 電圧が40 Vに達した後, 電流密度が徐々に低下し積算時間が30時間を越えた後は最小で4.0 A/m²まで低下した。

また, かぶりが大きい梁部が最も抵抗が高いと予想されたが, 中央床板の抵抗が最も高い値を示した。これは張出し部の下面は勾配がついていること, 梁部は鉛直な側面があり梁底の水平面積が小さいことから, 簡易給水方式による電解質溶液の循環が容易であり, 十分な量の溶液を供給できたためだと考えられた。一方, 中央床板は, 外観目視観察では通電面全体に水膜が形成されていたが, ほぼ水平面であり施工面積も広いことから, 溶液供給量が張出し部や梁部と比べて不十分であった可能性が考えられた。さらに, 本試験施工では, 通電1日目のみ24時間連続運転しその後は1日当たり2~8時間の通電および給水を行う間欠的な運転をしたことも, 抵抗増大の要因の一つと考えられた。

(3) モノエタノールアミン濃度の分析結果

図-11~図-13に各部位における深さ方向のモノエタノールアミン濃度の分析結果を示す。なお, 通電前のコンクリートにモノエタノールアミンは存在していない。

図-11より張出し部の濃度は, 表面で0.6~0.8 mol/lを示し深くなるに従って低下していた。鉄筋位置(深さ30 mm程度)では, 鉄筋直上ならびに鉄筋間のいずれの位置でも0.15 mol/l以上を示しており, 防錆効果を発揮する0.1 mol/l以上を満足していた。図-12の中央床板①の鉄筋直上の深さ25 mm位置では0.4 mol/lを示し, 電気化学的注入工法特有の鉄筋位置でのモノエタノールアミンの集積現象が確認できた。中央床板でも鉄筋位置(深さ25~33 mm)の濃度は0.1~0.4 mol/lを示しており, 防錆効果が得られたと評価した。図-13の梁は表面で0.75~1.1 mol/lを示し, 他の部位と同様に深さ方向に濃度は低

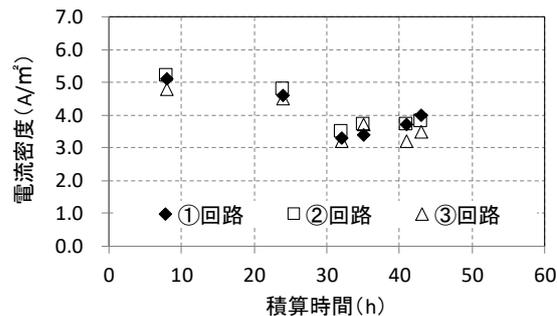


図-8 電流密度 (中央床板)

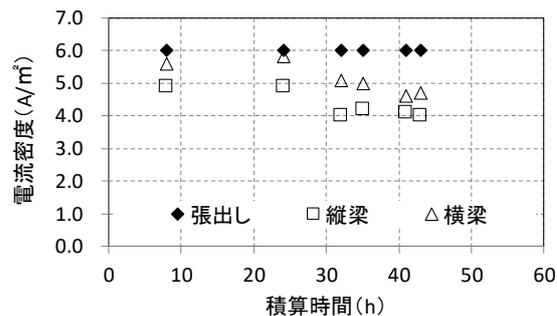


図-9 電流密度 (張出し部および梁)

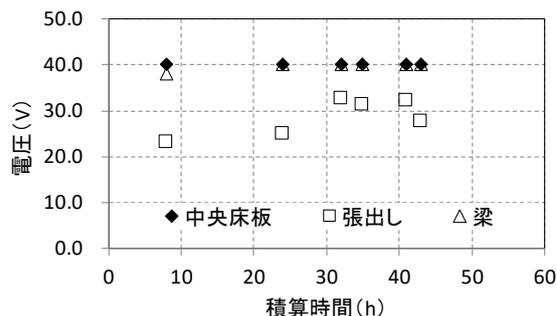


図-10 電圧 (中央床板, 張出し部, 梁)

下していた。梁においては, 鉄筋位置(深さ60~70 mm)で0.1 mol/l以上の濃度を満足することはできなかった。既往の研究⁸⁾で, 一度注入された防錆材は6年経過後も同一箇所にも留まることを確認しており, 0.1 mol/l以上注入できた箇所では, 防錆効果が持続すると考えられた。

各部位の積算電流量は梁, 張出し部および中央床板で212.6 Ah/m², 258.0 Ah/m², 180.6 Ah/m²であり, 通常目標値である480 Ah/m²より少なかった。モノエタノールアミンの濃度は積算電流量に依存するため, 通電期間を延ばせば, かぶりが厚い梁部も0.1 mol/l以上を確保できると考えられた。なお, これらの結果は, 部位に特有のものではなく, コンクリート状態やかぶり厚さなどに依りて構造物ごとに傾向が異なるものと考えられた。

5. まとめ

電気化学的防食工の施工方法として近年開発された簡易給水方式について, 実物大の模擬鉄道高架橋に対する

電気化学的注入工法の試験施工を行い、その適用性や補修効果を検討した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 簡易給水方式はこれまで主として鉛直面に適用してきたが、下向き面においても電解質溶液や陽極材を常に保持できるように陽極材の設置方法や給水吸引設備を工夫した結果、中央床板のような広がりのある下向き面にも適用可能となった。
- (2) 簡易給水方式による施工は、従来のファイバー方式に比べて液だれや粉塵の発生防止などの作業環境改善に大きな効果があった。また、作業に伴う産業廃棄物の発生が少なくなるメリットも得られた。
- (3) 簡易給水方式により、従来のファイバー方式と同等の電気化学的注入工法の適用が可能と判断できた。

6. おわりに

今後は、試験施工の結果の節で述べた課題の解決ならびに、簡易給水方式による鉄筋防錆材の電気化学的注入工法の実構造物への適用にむけた取組みの深度化を進めていく予定である。

参考文献

- 1) 土木学会編：2018年制定コンクリート標準示方書 [維持管理編]，土木学会，2018.10
- 2) 日本コンクリート工学会編：電気化学的手法を活用した実効的維持管理手法の確立に関する研究委員会報告書，日本コンクリート工学会，2018.9
- 3) Kubo, J.: Methods of Remedial Treatment for Carbonation-induced Corrosion of Reinforced Concrete, PhD Thesis, Leeds University, 2007.3
- 4) 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，Vol.45，No.12，pp.23-28，2007.12
- 5) 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, 2008.2
- 6) 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.1115-1120，2010.6
- 7) 山口竜大，生田周史，田中佑児，久保淳一郎：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.1097-1101，2011.6
- 8) 並松沙樹，吉田幸司，久保淳一郎，門田祐一朗：鉄道高架橋を対象とした鉄筋防錆材の電気化学的注入工法について，電気化学的手法を活用した実効的

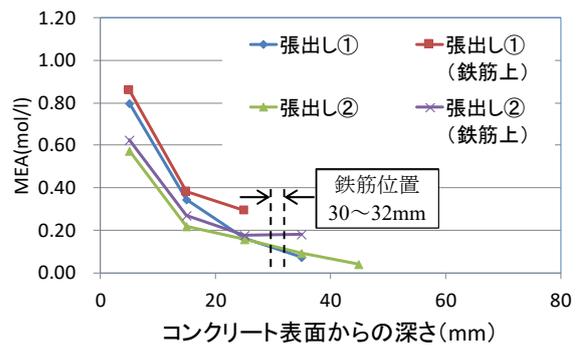


図-11 モノエタノールアミン濃度（張出し部）

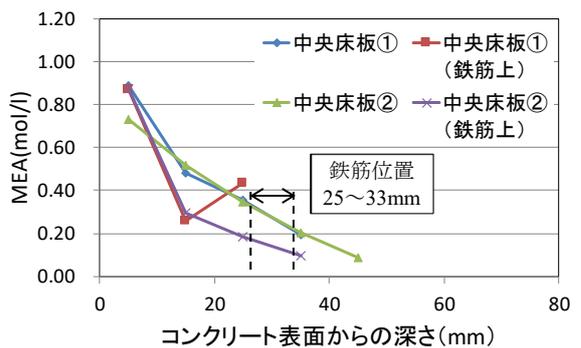


図-12 モノエタノールアミン濃度（中央床板）

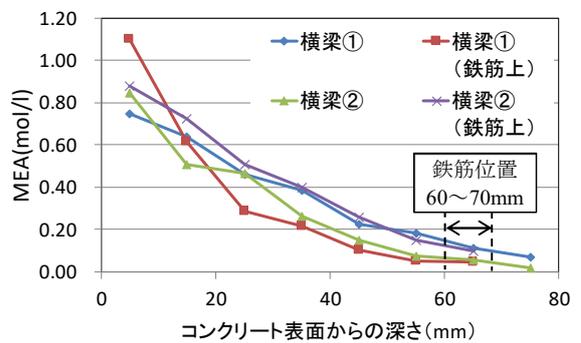


図-13 モノエタノールアミン濃度（梁）

- 維持管理手法の確立に関する研究委員会シンポジウム論文集，日本コンクリート工学会，pp.282-285，2018.9
- 9) 土木学会編：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107，土木学会，2001.11
 - 10) 齋藤淳，山本周，西田孝弘，大即信明：脱塩，再アルカリ化および電着工法における電解質溶液の簡易給水方法の提案，電気化学的手法を活用した実効的維持管理手法の確立に関する研究委員会シンポジウム論文集，日本コンクリート工学会，pp.276-281，2018.9
 - 11) 古川幸則，白井孝昌：アクアカーテンを用いた覆工コンクリート養生について，2011 トンネル技術研究発表会論文集，pp.83-92，2011.2