

論文 流電陽極材を用いた腐食緩和工法の海上 RC 栈橋への社会実装

亀田 浩昭*1・石井 浩司*2・市瀬 誠*3・鳥居 和之*4

要旨: 海水飛沫により塩害劣化した海上 RC 栈橋では、従来から断面修復工法や外部電源方式の電気防食工法による補修が行われている。RC 栈橋は、海水面との距離が近く、栈橋下面の作業空間が狭い特徴がある。著者らは、経済性に優れ施工や維持管理が容易な新しい補修工法として、流電陽極材を用いた鋼材腐食緩和工法を開発した。本研究では、実際に供用している海上 RC 栈橋に本工法を適用し、その効果を検証した。その結果、既往の研究成果との整合が確認され、厳しい塩害環境においても腐食緩和効果の有効性を検証することができた。

キーワード: 流電陽極材, 腐食緩和, 塩害, RC 栈橋

1. はじめに

海水飛沫により塩害を受ける構造物の中に漁港や港湾施設等に建設された RC 栈橋構造がある。RC 栈橋では、上部工と海水面との距離が近い場合が多く、施工や管理するスペースが狭小な特徴がある。RC 栈橋の塩害劣化の補修対策として、従来から断面修復工法や電気防食工法が適用されているが、厳しい施工環境の観点から建設コストや維持管理コストが割高となる場合がある。著者らは、従来の電気防食工法より経済性に優れ、施工が容易な鋼材腐食緩和工法¹⁾²⁾を開発し、既に試験体レベルの基礎実験や塩害劣化道路橋 RC 床版および PC 桁における実装試験を行い、本工法の有効性を報告している³⁾⁴⁾。本研究では、開発した鋼材腐食緩和工法の内部挿入型を、RC 栈橋のはり側面に設置することで、施工スペースが狭小であるはり下面に位置する鋼材についても腐食緩和効果が得られるか検証するものである。本稿では、実際に供用している塩害劣化 RC 栈橋のはり側面に開発した流電陽極材を設置し、鋼材腐食緩和効果の有効性および持続性の確認のために行った社会実装の成果を報告するものである。

2. 流電陽極材を用いた腐食緩和工法

本社会実装では、図-1 に示す内部挿入型の流電陽極材をはり側面に対して垂直方向に配置した。流電陽極材は、 $\phi 30 \times L125\text{mm}$ の防食亜鉛であり、バックフィル材には施工性に優れるベントナイトに亜硝酸リチウム水溶液を添加したタイプを使用した。流電陽極材は、図-1、図-2 に示すように、はり下面に位置する主鉄筋より上部に、かつ、スターラップより内部に設置した。

これにより、はり下面に配置された主鉄筋に対しても

効果的に防食電流を供給することが期待される。また、既報²⁾の内部挿入型の流電陽極材では、コンクリート表面を抑えプレートで覆い陽極材自体を保護していたが、本社会実装においては、抑えプレートが波浪により損傷を受ける可能性が高く、流電陽極材自体にも海水がかかる可能性があるため、表面から深さ 20mm をセメント系の断面修復材で被覆した。

なお、本工法による腐食緩和の目安は、既報と同様に鋼材の復極量を 25~50mV 程度とした²⁾³⁾⁴⁾。

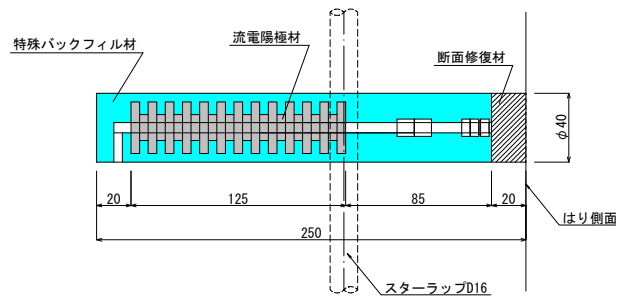


図-1 内部挿入型の流電陽極材の概要図

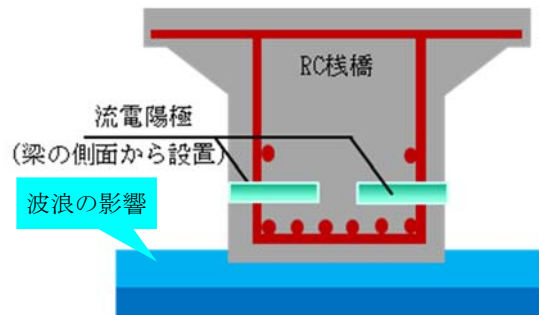


図-2 RC 栈橋への適用イメージ

*1 金沢大学自然科学研究科環境デザイン学専攻 (正会員)

*2 (株)ピーエス三菱 技術本部技術部 工博

*3 北陸電力(株)

*4 中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋(株) 顧問 工博 (フェロー会員)

3. 社会実装の概要

3.1 対象構造物の概要

対象構造物は、石川県七尾市に位置する七尾湾海上に建設された RC 栈橋である。竣工は平成 5 年であり、約 26 年経過している。試験対象とする RC はりの状況を写真-1 に示す。RC はりの幅は 800mm である。主鉄筋は、はりの下面に D32 が 7 本、スターラップは D16 が 200mm 間隔で配置されている。過去には断面修復工法による補修や、近傍のはりでは外部電源方式の電気防食工法による補修も実施されている。



写真-1 対象構造物の状況(施工前)

3.2 RC 栈橋の劣化状況

試験対象の RC はりには顕著なひび割れは認められなかったが、写真-2 に示すような錆汁が発生しており、前述した断面修復跡が点在していた。流電陽極材設置位置にて採取したコアを用いて、塩化物イオン濃度の分析試験を実施した。その結果、図-3 に示すように、コンクリート表面から 30mm の位置で最大 9.3kg/m³ の高い塩化物イオン濃度が確認され、鋼材かぶり 100mm 付近においても約 4.8kg/m³ の塩化物イオン濃度を示しており、腐食発生限界である 1.2kg/m³ を大きく上回っていたことから、鋼材腐食が発生している可能性が考えられた。



写真-2 RC はりの劣化状況

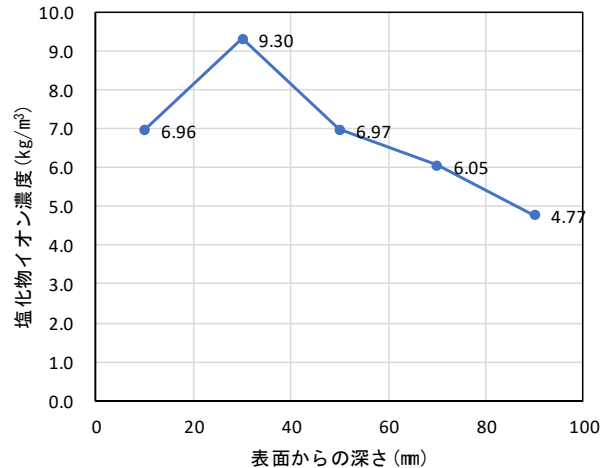


図-3 塩化物イオン濃度の分析結果

図-4 には、RC はり側面および下面において可搬式の飽和銀塩化銀照合電極（以後、SSE と称す）を用いて計測した通電前の鋼材電位の分布を示す。計測位置は、スターラップ直上とし、はり側面ははり軸方向に 200mm 間隔、はり下面ははり軸と直角方向に 100mm 間隔とした。計測した鋼材電位は、ASTM C 876 の鉄筋腐食判定基準⁵⁾を準拠し、-80mV(vs SSE)より貴（90%以上の確率で腐食なし）、-230~-80mV(vs SSE)（不確定）、-230mV(vs SSE)より卑（90%以上の確率で腐食あり）の領域に分類し、それぞれ青色、黄色、赤色で区別し整理した。図中には流電陽極材の設置位置を赤色で、チタンワイヤーセンサー^{6,7,8)}（以後、TiWS と称す）の設置位置を青丸で併記した。測定結果より、はり側面および下面の全体において 90%以上の確率で腐食ありの領域となり、一部で不確定の領域が存在するもののその電位は-200mV(vs SSE)よりも卑であり前者の領域に近い値であった。塩化物イオン濃度、鋼材電位の結果から鋼材腐食が全面的に広がっていることが推定された。また、断面修復部の周辺は、その鋼材電位がそれ以外の範囲よりも卑側であることから、マクロセル腐食の可能性が考えられた。

3.3 流電陽極材とモニタリングセンサーの設置と計測

図-5 に流電陽極材、TiWS の設置位置を示す。TiWS は鋼材電位をモニタリングするために設置した。流電陽極材の設置間隔は、既報で 500mm 程度を目安としていたが、鉄筋量と塩化物イオン濃度の影響因子に関する実験結果⁹⁾を基に、既設鉄筋の間隔を考慮し、400mm とした。流電陽極材は、図中に示すとおり片側のはり側面に 4 箇所ずつを設置し、それぞれを配線で接続した。また、センサー部の長さが 75mm の TiWS を図中に示す No.TiWS1 ~ No.TiWS5 の位置に 5 箇所設置した。No.TiWS1 ははり下面、No.TiWS2 ~ No.TiWS5 ははり側面

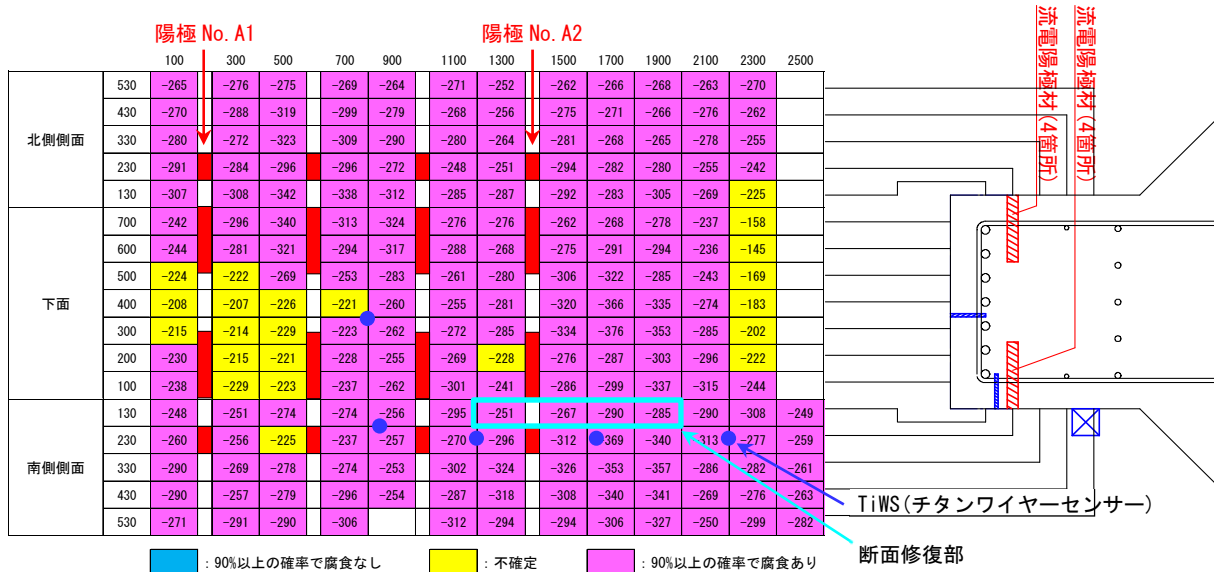


図-4 RCはり側面および下面の通電前の鋼材電位 (mV, vs SSE) の分布

の鋼材電位を測定するものであり、No.TiWS4, No.TiWS5は、影響を受けにくいよう陽極材から離れた位置とした。

本工法の腐食緩和効果を確認するため、通電期間中、鋼材の通電時電位、鋼材のインスタントオフ電位 (Eio)、通電遮断 24 時間後の鋼材電位 (E24) および流電陽極材からの発生電流量を測定した。No.TiWS1~No.TiWS5 の

鋼材電位、図中に示す陽極 No.A1, A2 からの発生電流量に関しては、データロガーを用いて 1 時間に 1 回の頻度で測定を行った。また、各 TiWS を用いて、定期的に Eio, E24 を計測し、復極量を算出した。また、可搬式の SSE を用いて通電前の鋼材電位分布と同じ位置で通電直後の復極量を算出した。

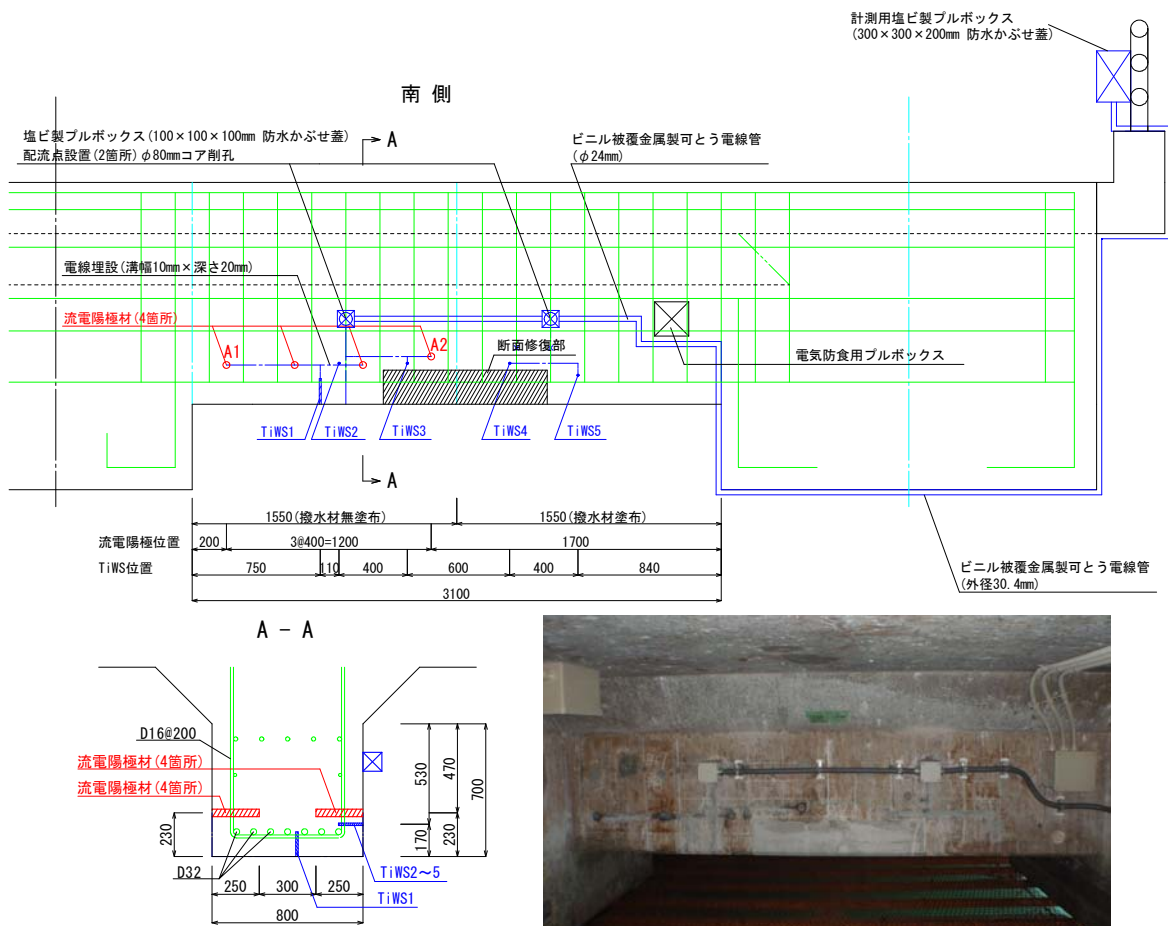


図-5 流電陽極材と TiWS の設置位置図, 設置状況

3.4 施工方法

図-6には、流電陽極材、TiWSの設置手順を示す。

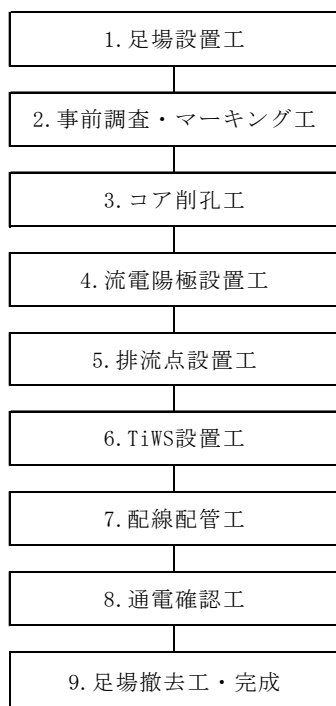


図-6 RC 栈橋における設置手順

1) 足場設置工

作業用の吊足場を設置する。

2) 事前調査・マーキング工

RC レーダー等を用いて鉄筋位置を非破壊調査し、鉄筋位置、流電陽極材設置位置、TiWS 設置位置のマーキングを行う。

3) コア削孔工

流電陽極材を挿入するφ40mmのコアを削孔する。

4) 流電陽極材設置工

図-1で示した流電陽極材をコア内部に挿入し、バックフィル材を充填後、セメント系断面修復材で被覆する。

5) 排流点設置工

既設鉄筋に防食電流を供給するため、φ80mmのコアを削孔し、排流端子を既設鉄筋と接続する。

6) TiWS 設置工

鋼材電位をモニタリングするため、TiWS 設置位置にφ12mmの削孔を行い、TiWSを設置後、セメント系断面修復材を充填する。

7) 配線配管工

モニタリング用の配線は、コンクリートに設けた溝幅10mm、深さ20mmの内部に埋設し、セメント系断面修復材を充填する。配管はコンクリート表面に設置する。計測ボックスは図-5に示す栈橋上の防護柵に固定する。

8) 通電確認工

通電確認をした後、足場を撤去し、設置完了となる。

3.5 電流、電位、および腐食緩和の傾向

図-7に陽極No.A1, A2から発生する電流量および残り6個の陽極材から発生する電流量の平均値の経時変化を示す。通電は平成30年11月から開始している。陽極No.A1, No.A2による発生電流量はほぼ同じ傾向を示し、通電から50日程度までは徐々に低下し、50~150日程度は1.5~2.0mA程度で推移し、それ以降は再び緩やかな増加傾向を示した。この増加傾向は、外気温の上昇とともに鋼材の腐食反応が進行したためと考えられる。また、陽極材6個の平均電流量もほぼ同様な傾向を示した。本結果は、既報³⁾⁴⁾の道路橋RC床版やプレテンション方式PC桁での社会実装と比べて、流電陽極材からの発生電流量が大きい傾向を示すものであった。これは、本RC栈橋ではRCはりとは海面との距離が近く、波飛沫の影響を受けてコンクリートが常に湿潤状態となり、コンクリートの電気抵抗が低いことに加え、鉄筋が腐食している

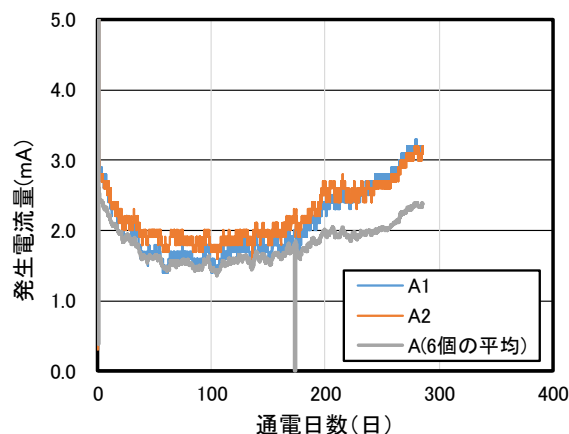


図-7 流電陽極材の発生電流量の経時変化

ことや鉄筋量が多いことが原因と考えられる。

図-8に各TiWSを用いて計測した通電時電位の測定結果を示す。左図は、流電陽極材を設置した補修部近傍の通電時電位を示し、No.TiWS1は下面の電位、No.TiWS2およびNo.TiWS3は側面の電位を示す。通電時電位は、コンクリート抵抗、鉄筋量および鉄筋の腐食程度等の様々な影響を受けることから、各TiWSの計測結果においてばらつきが見られたものの、概ね一定な電位で推移していることから、防食電流が継続して供給されていると考えられる。

一方、右図は、流電陽極材から離れた位置に設置したTiWSで計測した鋼材電位を示している。No.TiWS4は、No.TiWS5と比べて流電陽極材との距離に近い位置にあ

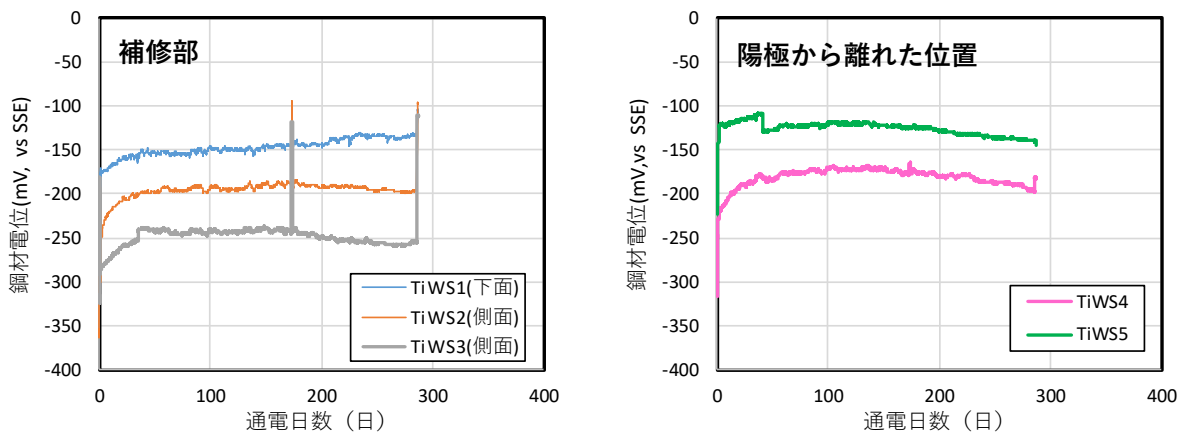


図-8 各TiWSを用いて計測した鋼材電位の経時変化



図-9 可搬式SSEを用いて計測した復極量(mV)の分布(通電直後)

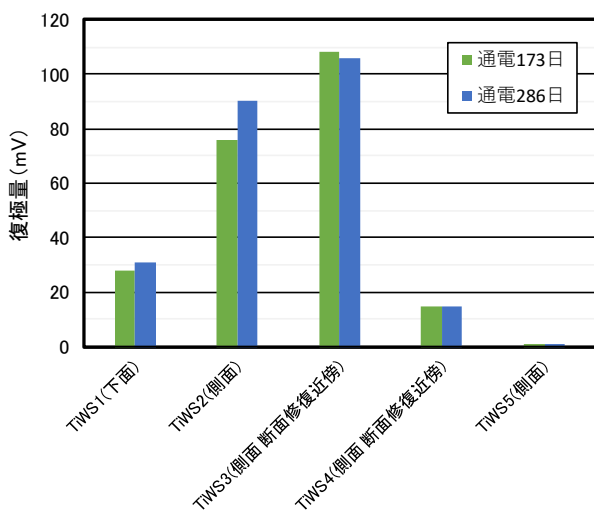


図-10 各TiWSを用いて算出した復極量の経時変化

るため、No.TiWS5よりも鋼材電位が卑化していると考えられる。また、左図の補修部と比べて、徐々に卑側に変化していることから、断面修復部境界でのマクロセル腐食の可能性が推測される。今後継続して電位を計測し、長期的な影響を把握する必要がある。

図-9には、図-4と同じ位置で可搬式SSEを用いて算出した通電直後のはり側面および下面の復極量の分布を示す。はり側面においては、流電陽極材の設置位置やその近傍の復極量が概ね50mV以上確保されている。また、はり下面においては、流電陽極材の近傍における復極量が側面よりも低い傾向にあるものの、鋼材腐食緩和の目安である25~50mV程度確保されていることから、腐食緩和効果が認められた。なお、下面の復極量が小さくなった原因は、図-8の左図に示す下面の鋼材電位が貴側であることに加え、既報⁹⁾で報告しているように鉄

筋量の多い場合防食電流の供給が小さくなるためである。

図-10には、各 TiWS を用いて通電 173 日後と 286 日後に算出した復極量を示す。通電 173 日後と 286 日後における復極量はいずれの TiWS でも概ね同じ値を示した。これより、No.TiWS1~No.TiWS3 においては、復極量 25mV 以上確保でき腐食緩和効果が認められた。断面修復部近傍でマクロセル腐食の可能性が懸念された No.TiWS3 においては、約 100mV の復極量が確保されたため、マクロセル腐食に対しても効果的な補修方法であることが推測された。一方、No.TiWS4 および No.TiWS5 においては流電陽極材から約 450mm 以上離れていることから、その補修効果が十分に認められなかった。

4. まとめ

本稿では、海上に施工され海水飛沫の影響を受ける RC 栈橋において、塩害劣化した RC はり側面に対し垂直方向に内部挿入型の流電陽極材を設置し、はり側面および下面での腐食緩和効果を検証した。ここに本研究で得られた成果をまとめる。

- (1) 対象の RC 栈橋は海水飛沫が直接かかる場合があることから、流電陽極材や配線をコンクリート内部に埋設し、セメント系の断面修復材で被覆した構造を採用した。施工においては問題なく終了することが可能であった。
- (2) 流電陽極材からの発生電流量は、道路橋 RC 床版や PC 桁での社会実装と比べて大きい傾向を示した。これは、本 RC 栈橋では RC はりと海水面との距離が近く、波飛沫の影響を受けてコンクリートが常に湿潤状態となり、コンクリートの電気抵抗が低いことに加え、鉄筋が腐食していることや鉄筋量が多いことが原因と考えられた。
- (3) TiWS を用いて算出した復極量においても、はり側面の復極量は 80mV 程度以上確保されたが、下面のそれは 30mV 程度と低い傾向を示した。可搬式 SSE を用いて算出した復極量においても、下面のそれは側面よりも小さい傾向を示したものの腐食緩和の目安である 25mV 以上の復極量は確保され、腐食緩和効果が認められた。

この工法が塩害で鋼材腐食したコンクリート構造物の長寿命化、コスト縮減の一助となることを期待する。

謝辞

本工法は、戦略的イノベーション創造プログラム、インフラ維持管理・更新・マネジメント技術、「コンクリート橋の早期劣化機構の解明と材料・構造性能評価に基

づくトータルマネジメントシステムの開発」の一環として開発したものである。試験施工にあたっては、構造物の管理者をはじめ多くの方々にご協力をいただいた。ここに関係各位に深く感謝申し上げる。

参考文献

- 1) 浦修造, 鴨谷知繁, 石井浩司, 鳥居和之: 塩害劣化 RC 床版に対応した取替えが容易な流電陽極工法の開発と通電性状に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.673-678, 2017.7.
- 2) 亀田浩昭, 青山敏幸, 石井浩司, 鳥居和之: 積雪寒冷地に建設された塩害劣化 RC 床版の電気化学的補修工法の適用性, 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, 第18巻, No.1, pp.453-458, 2018.10.
- 3) 亀田浩昭, 青山敏幸, 石井浩司, 鳥居和之: 積雪寒冷地に建設された塩害 RC 床版に対する流電陽極材を用いた鋼材腐食緩和の試み, 第10回道路橋床版シンポジウム論文報告集, pp.189-194, 2018.11.
- 4) 亀田浩昭, 青山敏幸, 石井浩司, 鳥居和之: 流電陽極材を用いた腐食緩和工法の PC 橋への適用, プレストレストコンクリート工学会 第28回シンポジウム論文集, pp.593-598, 2019.11.
- 5) ASTM C876-91, Standard Test Method for Half-Cell Potential of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, Annual Book of ASTM Standards, Vol.03.02, pp.457-462, Jan.1999
- 6) Rahmita Sari Rafdinal, Toshiyuki Aoyama, Kouji Ishii, Kazuyuki Torii: THE FEASIBILITY STUDY OF EMBEDDED WIRE SENSOR FOR CORROSION MONITORING OF CONCRETE, プレストレストコンクリート工学会 第26回シンポジウム論文集, pp.663-666, 2017.10.
- 7) 杉浦尚樹, 青山敏幸, 石井浩司, 鳥居和之: チタンワイヤーセンサーを用いたコンクリート中の鉄筋簡易腐食診断への適用性, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.1233-1238, 2016.
- 8) 亀田浩昭, 青山敏幸, 石井浩司, 鳥居和之: チタン製のワイヤーセンサーを用いた鉄筋電位計測に関する実験的検討, プレストレストコンクリート工学会 第27回シンポジウム論文集, pp.271-276, 2018.11.
- 9) 亀田浩昭, 青山敏幸, 石井浩司, 鳥居和之: 流電陽極材による腐食抑制効果に及ぼす影響因子に関する実験的検討, 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, 第19巻, pp.567-572, 2019.10.