

報告 新設時に流電陽極方式による電気防食を適用した栈橋上部工における長期追跡調査結果

田土 弘人*1・遊佐 公一*2・山路 徹*3・濱田 秀則*4

要旨：犠牲陽極に亜鉛を用いた流電陽極方式の電気防食工法を新設時から適用した鉄筋コンクリート製栈橋上部工の梁部材を 28 年間に亘って追跡調査した。電気防食の適用開始から 23 年目には、コア試料を採取して中性化深さと塩化物イオン濃度を測定し、はつり調査により鉄筋の腐食状態を観察した。それらの調査結果を当該栈橋上部工の無防食の梁部材と比較したところ、無防食の梁部材に比べて電気防食を適用した梁部材は、腐食の進行を抑制していた。また、亜鉛防食板を設置した梁部材のコンクリートは中性化の進行がなく、鉄筋近傍における塩化物イオンは無防食の梁部材に比べて低濃度であった。

キーワード：新設、電気防食、流電陽極、鉄筋腐食、塩化物イオン濃度

1. はじめに

港湾コンクリート構造物は常に厳しい塩害環境に曝されている。この塩害に対して、電気防食工法は極めて有効な対策手法であり、施工実績も年々増加している。コンクリート構造物への電気防食工法は、導入当初は直流電源装置を用いて鉄筋に防食電流を供給する外部電源方式が主流であった。しかしながら、施工後も定期的な直流電源装置の維持管理が欠かせないため、直流電源装置を必要としない流電陽極方式の電気防食工法（亜鉛シート工法）が開発された。亜鉛シート工法の実機における電気防食効果とシステムの耐久性を確認するため、新設された栈橋の上部工に施工し 28 年間に亘り追跡調査を行った。本報告は、追跡調査結果をまとめたものである。

2. 追跡調査の概要

2.1 調査概要

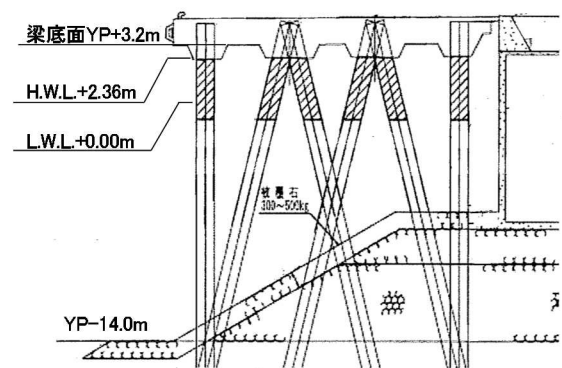
調査対象は、三重県四日市港（計画水深-14m）における鉄筋コンクリート製栈橋上部工であり、1988 年の新設時に亜鉛シート工法が試験施工された。なお、コンクリートの配合等は不明である。亜鉛シート工法の設置状況を写真-1、栈橋の断面図を図-1 に示す。追跡調査は表-1 および図-2 に示す 4 部材に対して行い A 梁と B 梁には亜鉛シート工法が施工されており、C 梁と D 梁は無防食である。梁部材の形状は、幅 800 mm、高さ 950 mm、延長 2600 mm であり、梁底面のレベルは+3.2m であった。

調査項目として、外観目視観察、電気化学測定（通電電流測定、鉄筋自然電位測定、鉄筋インスタントオフ電位測定、通電オフ 24 時間後の鉄筋オフ電位測定、鉄筋復極量測定、陽極インスタントオフ電位測定）、はつり調査、

採取されたコンクリートコア試料による調査（中性化深さ測定、塩分量測定、圧縮強度測定）、陽極消耗量調査とした。各梁の鉄筋の電位および陽極の電位は、かぶり部分に埋設された飽和水銀酸化水銀（HGO）照合電極で測定した。はつり調査、塩分量、中性化深さ測定および圧縮強度測定は供用開始から 23 年目（2008 年）に実施した。



写真-1 亜鉛シート工法の設置状況（1988 年 8 月）



YP 四日市港基準面＝T. P. +1.251m

図-1 栈橋の断面図

*1 ナカボーテック 事業開発本部（港湾空港技術研究所 依頼研修員）（正会員）

*2 ナカボーテック 名古屋支店

*3 港湾空港技術研究所 材料研究グループ長 博士(工)（正会員）

*4 九州大学大学院 工学研究院 教授 博士(工)（正会員）

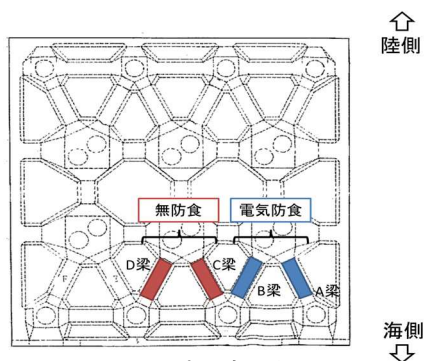


図-2 調査対象の位置

表-1 調査対象部位

梁部材	防食仕様	コア試料による調査	コア試料による調査
A 梁	亜鉛シート方式 電気防食	○	○
B 梁		○	—
C 梁	無防食	○	○
D 梁		○	—

2.2. 亜鉛シート工法の概要

A 梁および B 梁に適用した亜鉛シート工法の模式図を図-3 に示す。システムの主となる亜鉛防食板は FRP 保護カバー、亜鉛シート板、特殊バックフィル（電解質層）から構成される。亜鉛防食板をアンカーボルトでコンクリート表面に設置し、陽極となる亜鉛シート板と鉄筋をリード線で短絡して、鉄筋に防食電流を供給する。システム寿命は陽極寿命によって決まり、設計寿命は約 15 年である。亜鉛防食板を梁部材の底面と両側面（6m²）に 9 枚設置し、設置総数は A 梁と B 梁を合せて 18 枚である。

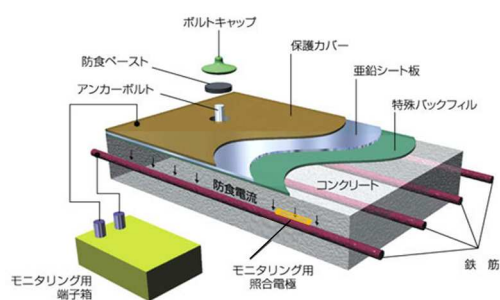


図-3 亜鉛シート工法の模式図³⁾

3. 調査結果

3.1 外観目視観察

各種調査に先立ち船上にて亜鉛防食板の設置状況について調査した。表-2 に示す点検項目を外観目視観察および打音検査によって確認した。調査結果を表-3 及び写真-2 に示す。28 年経過後も、FRP 保護カバーの破損は見られなかったが、端部の反りや変色などの経年劣化が確認された。ボルトキャップ自体は劣化していなかつ

たが、ボルトキャップ内部のアンカーボルトから錆汁が外部に漏出していた。なお、当時のアンカーボルトは炭素鋼材が使用されていたが、現在はステンレス材を使用している。また、特殊バックフィル材の流出に起因する白色の滲出物が梁底面付近に集中していることが確認された。なお、表-2 の点検項目のボルトキャップの錆汁は内部アンカーボルトの錆汁を表す。

3.2 埋設照合電極の性能確認

埋設されていた HGO 照合電極の性能確認を供用開始から 28 年目に実施した。確認方法として、HGO 照合電極で測定した鉄筋電位と、コンクリート表面に飽和カロメル電極（SCE）照合電極を押し当てて測定した鉄筋電位をそれぞれ飽和硫酸銅電極基準（CSE）に換算した値（換算値 HGO：-124mV vs.CSE，SCE：-75mV vs.CSE at25℃）で比較した。



(a) A 梁

(b) B 梁



(c) ボルトキャップからの錆び汁の拡大写真 (d) 特殊バックフィルの流出 拡大写真

写真-2 28 年経過後の亜鉛防食板の外観

表-2 点検項目

点検項目	FRP 保護カバーの破損の有無
	ボルトキャップの破損・脱落の有無
	ボルトキャップからの錆汁の有無
	特殊バックフィルの流出・にじみの有無
	亜鉛防食板の変形の有無

表-3 目視観察による劣化の割合 (%)

点検項目	A 梁	B 梁
FRP 保護カバーの破損の有無	0	0
ボルトキャップの破損・脱落の有無	0	0
ボルトキャップからの錆汁の有無	100	100
特殊バックフィルの流出・にじみの有無	100	56
亜鉛防食板の変形の有無	100	89

表-4 28 年経過時の埋設照合電極の電位確認結果

	A 梁	C 梁
HGO 照合電極で測定した鉄筋電位 (mV vs. CSE)	-278	-317
SCE 照合電極で測定した鉄筋電位 (mV vs. CSE)	-274	-317
電位差 (mV)	4	0

電位確認結果を表-4 に示す。2 種類の照合電極で測定した鉄筋電位の差の絶対値は 0~4mV であり、差は認められなかった。照合電極を埋設した位置とコンクリート表面とでは液間電位差が異なり、測定される自然電位に誤差が生じるのが一般的であるが、コンクリート中に塩化物イオンを含む場合には、その誤差が小さくなるといった報告⁴⁾もあり、本栈橋の埋設照合電極は、追跡調査期間を通して正常に動作していたものと判断した。なお現在では、環境への影響に配慮して HGO 照合電極は使用していないことを追記する。

3.3 電気化学測定

(1) 通電電流密度

亜鉛シート工法を適用した A 梁および B 梁の通電電流密度の経時変化を図-4 に示す。ここでは、通電電流の測定値を防食対象面積で除すことにより通電電流密度とした。A 梁と B 梁の通電電流密度は、調査期間を通して概ね同様な挙動で変化した。初期には約 21mA/m²であった通電電流密度は、経時的に低下し 7~8 年目には約 1.5mA/m²となったが、11 年目には約 5mA/m²を示した。しかし、23 年目の調査にて測定ボックス内のケーブルが破断していることが確認された。11 年目から 23 年目のいつの時点で破断していたかについては明確ではないが、23 年目にケーブルを再接続することで約 2mA/m²の通電電流密度があり、その後 28 年目まで維持された。

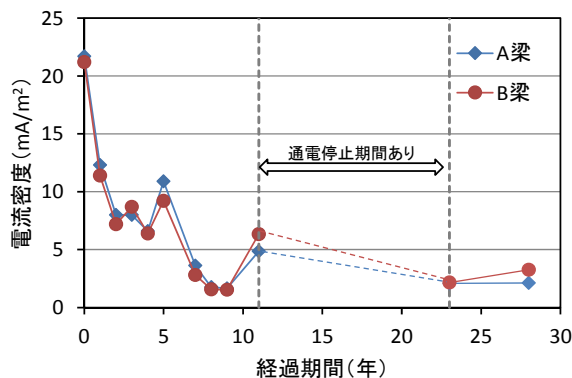


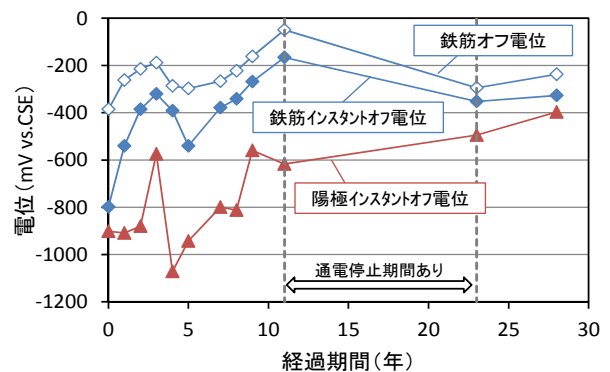
図-4 通電電流密度の経時変化

(2) 鉄筋の電位

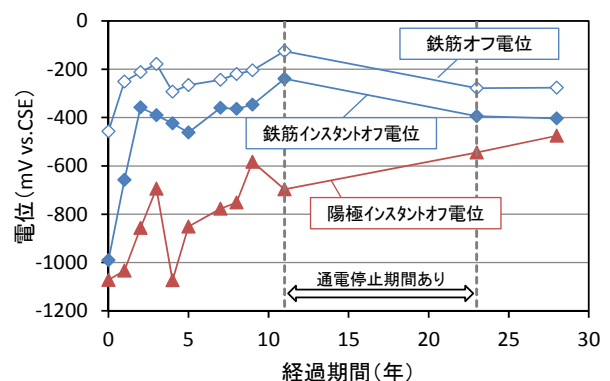
鉄筋および陽極電位の経時変化を図-5 に示す。ここでは、A 梁の側面中央部と側面下部の電位を例として示し

た。鉄筋および陽極のインスタントオフ電位は、通電停止直後の IR 降下を除去した電位であり、鉄筋のオフ電位は、通電を停止してから約 24 時間経過後の電位とした。

電気防食を適用した A 梁側面の中央部と下部の鉄筋および陽極の電位は、概ね同様な経時変化挙動を示した。鉄筋のインスタントオフ電位およびオフ電位ともに初期は卑な電位であったが、時間の経過とともに 11 年目まで貴化する傾向を示した。鉄筋のオフ電位の貴化は、電気防食を適用することで、カソード反応に伴う pH が上昇する効果により、鉄筋が不動態化⁵⁾したものと考えられた。しかし、一時通電電流を供給できない期間があったことで不動態化により貴化傾向にあった鉄筋電位が卑化転じたことから、不動態化傾向が弱まったと考えられる。また、陽極のインスタントオフ電位は、測定時期により変動が大きかったが、経時的には貴化する傾向を示した。これは、陽極性能自体の低下、または特殊バックフィルの乾燥や亜鉛の腐食生成物の堆積などにより陽極の分極抵抗が増大したためと推測している。なお、B 梁においても A 梁と同様な鉄筋および陽極の電位変化挙動を示したことを確認している。



(a) A 梁側面中央部



(b) A 梁側面下部

図-5 鉄筋および陽極の電位経時変化

(3) 鉄筋の復極量

A 梁および B 梁の鉄筋の復極量の経時変化を図-6 に示す。鉄筋の復極量は、鉄筋のインスタントオフ電位とオフ電位の差として計算した。

正常に通電ができていた 11 年目までの鉄筋の復極量は、調査期間を通して概ね 100mV の電気防食基準を満足した。また、再通電開始直後は復極量 100mV を満たさない箇所もあったが、28 年目には概ね 100mV 以上となった。

(4)各梁の鉄筋の自然電位の比較

各梁の側面下部に埋設した照合電極をもとに測定した鉄筋の自然電位の経時変化を図-7 に示す。ここで、A 梁および B 梁の値は鉄筋のオフ電位を用いた。また、図中には参考として ASTM C876 の腐食判定基準を示した。

図-7 の電気防食 (A 梁, B 梁) と無防食 (C 梁, D 梁) を比較すると、5 年目までは概ね同様な自然電位の変化挙動を示していたが、その後は電気防食の梁の自然電位が腐食なしの領域にまで貴化したために両者に違いが生じた。試験開始当時、鉄筋自然電位は -400mV (vs.CSE) 前後であり、腐食状態にあったと推測される。その後、高い pH 環境とコンクリートの緻密化により、不動態化した鉄筋電位は貴化するが、電気防食を適用した A, B 梁の鉄筋自然電位は 5 年経過付近から無防食の C, D 梁に比べ貴化傾向が維持できたといえる。

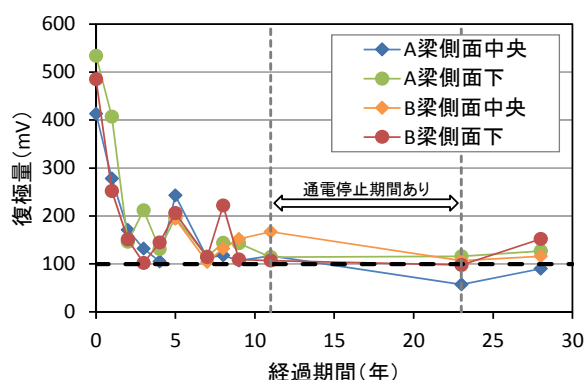


図-6 鉄筋の復極量の経時変化

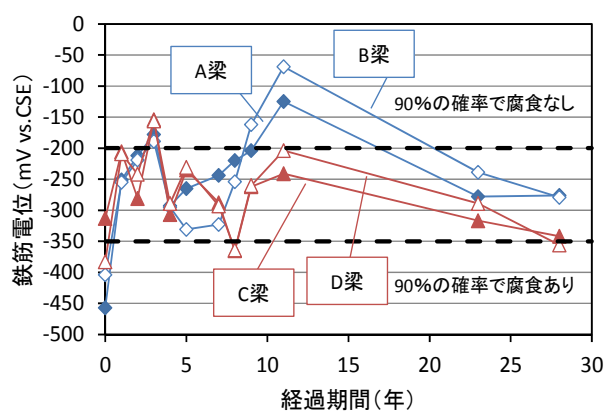


図-7 電気防食および無防食の梁底面部鉄筋の自然電位の経時変化の比較

なお本栈橋は、新設の段階から電気防食を行っている

ため、適用初期から鉄筋の腐食は生じていない状態にあったと推測されるが、電気防食を適用することにより、鉄筋自然電位の貴化傾向は無防食に比べて、維持できたといえる。また、通電が停止状態にあった 23 年目も電気防食の適用の梁は無防食の梁に比べて自然電位は貴な状態にあった。

3.4 鉄筋の自然電位と腐食状態の観察

供用開始から 23 年目に梁底面をはつり取り鉄筋の腐食状態を観察した。鉄筋腐食の状態とはつり前に測定した鉄筋の自然電位のマッピングを図-8 に示す。鉄筋の自然電位の測定は、湿潤にしたコンクリート表面に SCE 照合電極を押し当てて測定し、CSE 基準に換算した。

A 梁 (電気防食) の鉄筋の腐食状態は、腐食グレード⁶⁾の I に相当し黒皮の状態が維持されていた。また、自然電位は他の梁に比べて貴であった。C 梁 (無防食) の鉄筋の腐食状態は、腐食グレードの II に相当し、部分的ではあるが浮き錆が生じていた。また、自然電位は A 梁に比べて卑であった。

3.5 中性化深さ

供用開始から 23 年目に梁底面からコア試料を採取して中性化深さを測定した。得られた結果を表-5 に示す。無防食の C, D 梁では、中性化深さが 7.9~11.9mm であったのに対して、電気防食を適用した A 梁と B 梁では中性化の進行はなかった。これは、シート状の陽極をコンクリート表面に設けたことにより炭酸ガスの侵入を抑制した影響であると考えられる。なお、C 梁と D 梁においても中性化残りが大きいため、中性化が図-8 に示した鉄筋腐食の原因ではないものと考えられた。

表-5 中性化深さ測定値

梁部材	仕様	平均値 (mm)	中性化残り (mm)
A 梁	電気防食	0.0	82
B 梁		0.0	92
C 梁	無防食	7.9	81
D 梁		11.9	78

3.6 塩化物イオン濃度

供用開始から 23 年目に梁底面からコア試料を採取してコンクリート中の塩化物イオン濃度を測定した。得られた結果を図-9 に示す。また図中には、各梁の鉄筋表面位置と腐食発生限界塩化物イオン濃度を 2kg/m³⁷⁾ として示した。電気防食を適用した A 梁と B 梁の塩化物イオン濃度は、他の梁に比べて低く、鉄筋位置においては腐食発生限界濃度を大きく下回った。

これは、シート状の陽極をコンクリート表面に設置した影響のほか、塩化物イオンが陽極側に電気泳動する脱塩効果が機能したものと考えられる⁸⁾。

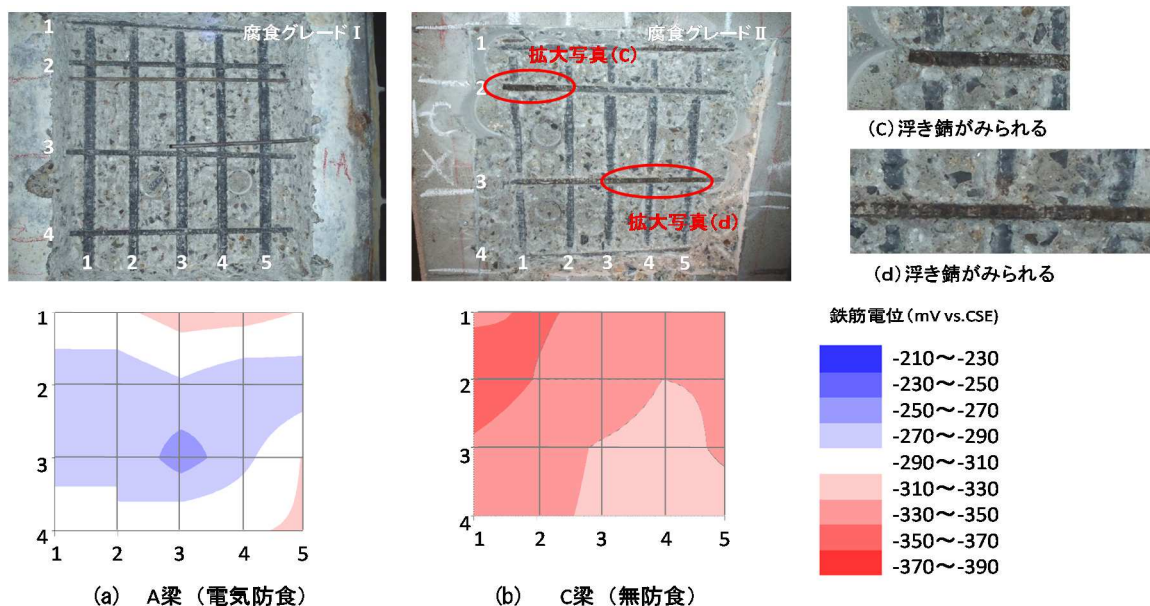


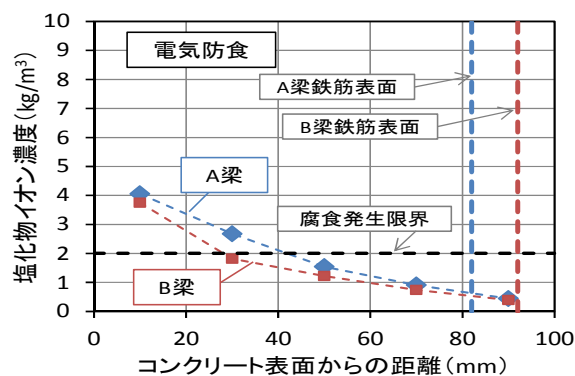
図-8 鉄筋の腐食状況と自然電位マッピング

コンクリート表面付近に確認された塩化物イオン濃度は亜鉛シートの接地抵抗を下げるために特殊バックフィルに含まれる塩化物イオンが拡散したと海水飛沫が亜鉛防食板の隙間から侵入し、塩化物イオンが拡散したことが主な要因であると考えられます。

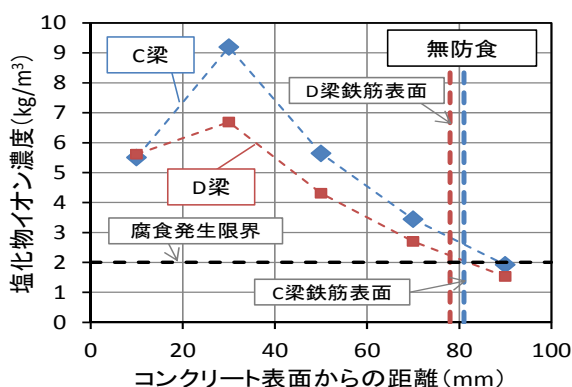
無防食であったC梁およびD梁は、コンクリート表面から20-40mmの位置において塩化物イオン濃度の最大値を示した。これは、中性化および硫酸イオンの侵入によってコンクリート表面の塩化物イオンが深さ方向に濃縮した影響と考えられる⁹⁾。また、C、D梁では鉄筋位置において腐食発生限界濃度を超える結果であった。つまり、図-8に示したようにC梁の鉄筋の部分的な浮き錆は、塩化物イオンの影響であることが推測された。

3.7 圧縮強度

供用開始から23年目に採取したコア試料をもとに測定した圧縮強度は、33.5～40.8N/mm²であり、設計基準強度25N/mm²を上回っていた。



(a) A梁およびB梁 (電気防食)



(b) C梁およびD梁 (無防食)

図-9 塩化物イオン濃度の分布

3.8 陽極消耗量

28年目に取り外した亜鉛防食板の陽極消耗状態を写真-3に示す。写真-3の亜鉛防食板は、B梁側面に設置されていたものであり、全18枚の亜鉛防食板の中で平均的な消耗状態であることを外観観察から確認している。

亜鉛シートはコンクリート表面に打ち込んだアンカーボルトをナットで締めつけて取り付けするため、アンカーボルト付近の密着性が高まり、アンカーボルト付近に溶解が集中していた。残存量は設計値以上(耐用年数経過後の使用率: 50%)であり、耐用年数を満足したことが確認された。

4. 新設構造物への電気防食の適用について

本栈橋に適用した電気防食工法は、直流電源装置を必要としない流電陽極方式であるが、設置から約28年経過したが、無通電期間もあり通電が確認されたのは約16

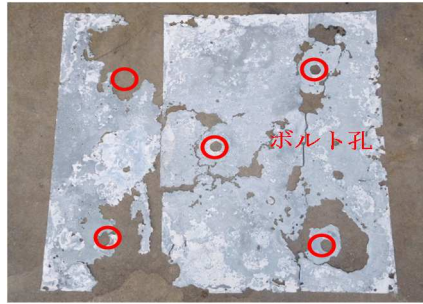


写真-3 28年目の陽極消耗状況

年間であった。一時的に無通电の時期があったものの約 28 年間鉄筋の腐食を抑制することができた。

本施設の陽極寿命が設計寿命を上回った原因は、通电電流密度および有効電気量（1 kg 溶解時に発生する電気量）が設計値を下回ったことが挙げられる。ここで、通电電流密度が減少する理由を図-10 の分極曲線を用いて説明する。鉄筋のカソード分極曲線を 2 本記しているが、赤色の線は鉄筋が腐食していない場合（新設時）を表しており、橙色の線は鉄筋が腐食している場合（既設）に比べ自然電位が貴側にあり、分極抵抗（分極曲線の傾き）が大きいものに対して、鍍の還元も加わるので自然電位が低く、分極抵抗は小さい。便宜的に IR 降下を考慮せず、アノード・カソード分極曲線の交点を発生電流（通电電流密度）とした場合、鉄筋が腐食していない場合の通电電流密度は i_1 となる。一方、腐食している場合は鍍の還元反応がカソード反応に上乗せされるため、通电電流密度は i_2 となって i_1 よりも大きくなる。陽極材は腐食している鉄筋に対して設計されているため、腐食していない鉄筋の通电電流密度は小さい。よって、陽極の消耗量は電流量に比例することから、新設時に設置することで陽極質量を少なくすることが可能となる。なお、本施設では初期に腐食が生じていたが、腐食している期間が短かったために短期間で赤色の線の状態に戻ったと推測される。

5. まとめ

亜鉛シートによる電気防食を新設時から適用した栈橋上部工の 28 年間の追跡調査結果を以下にまとめる。

- (1) 亜鉛シート工法は、11 年目～23 年目の間に通电が停止している期間があったが、正常に通电している期間においては電気防食効果を示していた。
- (2) はつり調査で鉄筋の腐食状態を観察したところ、無防食の梁では鉄筋に腐食が生じていたが、電気防食を適用した梁では鉄筋の腐食は認められなかった。
- (3) 28 年後の亜鉛防食板は、FRP 保護カバーの端部に若干の反りと特殊バックフィルの一部流出が生じていた

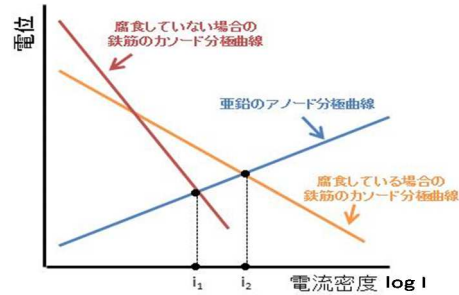


図-10 鉄筋および亜鉛の分極曲線の模式図

が、ボルトの脱落や FRP 保護カバーの剥がれもなく、ケーブルの破断により一時的な不通電はあったものの再接続後正常に通电が確認された。防食システム機能が長期的に維持されていたことが確認された。

- (4) 電気防食工法を適用した梁は、中性化の進行、塩化物イオン濃度の浸透も無防食の梁と比べ小さい値であった。

謝辞

本報告文を作成するにあたり国土交通省中部地方整備局四日市港湾事務所には多大なるご協力を頂いた。ここに深く感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：海洋コンクリート構造物の防食指針（案），p.10, 1983.2
- 2) 沿岸技術研究センター：港湾コンクリート構造物維持管理実務ハンドブック，p.41, 2009.9
- 3) コンクリート構造物の電気化学的防食工法研究会ホームページ：http://www.cp-ken.jp/koho12.html
- 4) 染谷望，加藤佳孝，星芳直，板垣昌幸：かぶりコンクリートの状況に応じた自然電位による鋼材腐食の評価手法の提案，コンクリート工学年次論文集，Vol.38, No.1, pp.2157-2162, 2016
- 5) 望月紀保：コンクリート中鉄筋のカソード防食について，材料と環境，59, pp.121-128, 2010
- 6) 土木学会：コンクリート標準示方書 維持管理編，p.147, 2013.10
- 7) 沿岸技術研究センター：港湾の施設の維持管理技術マニュアル，p.118, 2007.10
- 8) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の電気防食研究委員会実験報告書，pp.20-21, 1995
- 9) 例えば，山路徹ほか：海洋環境におけるコンクリートの劣化性状および劣化指標に関する検討，土木学会論文集 E，V-66, No.1, pp.21-37, 2010