

論文 RC 栈橋におけるコンクリート中鋼材の電気防食基準の適用方法に関する検証

山本 悟^{*1}・小磯 千代子^{*2}・武田 均^{*3}

要旨：塩害環境において再劣化を生じた RC 栈橋上部工に電気防食による補修を実施した。当栈橋では同一部材においても環境条件が異なるために、コンクリート中鋼材の電位挙動が異なることが予想された。そこで、これまでに防食効果が認められている、A.分極量 100mV、B.復極量 100mV および C.電位-850mV の 3 種類の電気防食基準を組み合わせて 5 年間外部電源方式による電気防食を実施した結果、苛酷な塩害環境にあっても栈橋の再劣化を防ぐことができた。

キーワード：RC 栈橋, 塩害環境, コンクリート中鋼材, 電気防食, 防食基準, 分極量, 復極量, 防食電位

1. はじめに

塩害によって劣化したコンクリート構造物の補修対策として、電気防食工法が普及している。電気防食は、鋼材腐食の原理に基づいた、理論的で根本的な防食手段であり、鋼材表面に微弱な防食電流を供給することで、鋼材の電位を卑方向（マイナス方向）に変化（これを分極と呼ぶ）させ、腐食を抑制するものである。

電気防食基準としては、「分極量が 100mV 以上」¹⁾（以下、A.分極量 100mV と呼ぶ）、また、「復極量が 100mV 以上」²⁾（以下、B.復極量 100mV と呼ぶ）がある。さらに、湿潤な環境においては、コンクリート中への酸素の供給速度が遅いため所要の復極量が得られない場合がある³⁾ので、鋼材の「電位を-850mV vs.CSE（飽和硫酸銅電極基準）よりも卑」⁴⁾（以下、C.電位-850mV と呼ぶ）の 3 種類があり、いずれの基準によっても防食効果が認められている^{5),6)}。

各電気防食基準の根拠と特徴を表-1 に、それらの概念を、電位の経時変化として図-1 に表す。ここでは、

防食電流を供給する前の「自然電位」を E_{cor} 、電流を遮断した直後の「インスタントオフ電位」を E_{ins} 、電流を遮断してから約 24 時間後の「オフ電位」を E_{off} とした。

A.分極量 100mV は、主として通電開始時に適正な電流密度を決定するために測定する。この試験は、分極試験または E-logI 試験と呼ばれ、防食電流密度を一定時間、例えば 15 分間ごとに 1, 2, 5, 10, ..., mA/m² のように段階的に上げ、インスタントオフ電位 E_{ins} が自然電位 E_{cor} よりも 100mV 以上卑になる電流密度を「防食電流密度」として設定するものである。

B.復極量 100mV は、電気防食の点検時に防食効果を確認するために測定する。この試験は、インスタントオフ電位 E_{ins} を測定した後に、例えば 24 時間後のオフ電位 E_{off} を測定し、 E_{off} から E_{ins} を減じた値が 100mV 以上あれば、防食効果があると判定するものである。この分極量の過不足に応じて、電流密度を加減し、次回の点検までその値を維持して、分極量が基準を満足するように通電する。

表-1 電気防食基準の根拠と特徴

種類	内容	根拠	特徴	
			適用環境	主な適用時期
A.分極量 100mV	$\Delta E \geq E_{cor} - E_{ins}$	・鋼材の電位をアノード部の電位より卑にし、腐食を停止させる	・大気中 ・湿潤環境	・通電開始時
B.復極量 100mV	$\Delta E \geq E_{off} - E_{ins}$	・同上	・大気中	・点検時
C.電位-850mV	$E = -850\text{mV vs.CSE}$	・鋼材の電位を不活性態域に維持する	・湿潤環境	・通電開始時 ・点検時

*1 日本防蝕工業（株） 技術研究所 所長（正会員）

*2 日本防蝕工業（株） 東京支店第1技術部 係長

*3 大成建設（株） 技術センター 土木技術研究所 土木構工法研究室 工博（正会員）

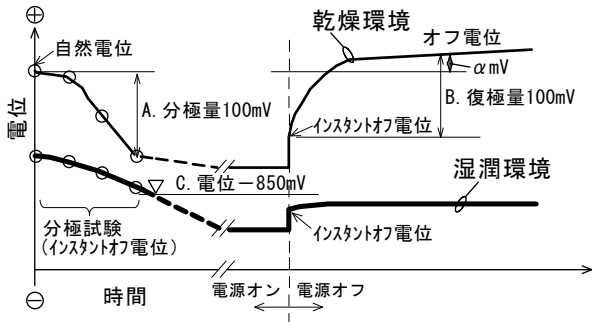


図-1 各電気防食基準の概念図

これらの防食基準の内、大気中にある部材の電気防食では、B.復極量100mVが最も広く適用されている。この基準は、相対的な電位変化量で管理するので、通电によって鉄筋表面の環境が改善された場合は、所要の電流密度を下げる事ができる特長がある。一方、A.分極量100mVでは、通电前の自然電位 E_{cor} を基準にすることから、オフ電位が自然電位 E_{cor} よりも α mV ほど貴になった場合でも $100 + \alpha$ mV ほど分極するように余分な電流を流す欠点がある。しかし、湿润環境のように復極量が不十分な場合でも A.分極量 100mV を基準にすることで防食状態を確認できる利点がある。

本論文は、RC 栈橋上部工の電気防食において、様々な環境に置かれた部材に対して上記3種類の電気防食基準を組み合わせて適用した5年間の結果から、防食基準の適用方法について検証するものである。

2. 方法

2.1 栈橋の概要

(1) 構造

電気防食対象は上部工が RC 構造の栈橋である。合計6スパンから成り、1スパン当たりの法線方向長さは35m、梁下面のレベルは、高潮位 HWL+2.0m と同程度の+2.2m であり、梁の下側は満潮時に波浪によって海水と接する。1スパンの概要を図-2に示す。

(2) 塩害環境

当栈橋の環境は、荒天時は激しい波浪によって海水が梁や床版に当たり、このためコンクリート中の塩化物イオン濃度が高く、大半のかぶり 50mm で、梁では 5~8kg/m³、床版下面では 3~6kg/m³ であった。また、岩塩も荷役するための栈橋であり、床版上面からも塩分が浸透し、コンクリート表面から 50mm の深さにおける塩化物イオン濃度は 5kg/m³ であり、苛酷な塩害環境である⁷⁾。

(3) 栈橋の補修履歴

対象栈橋は1968年に建造され、1991~1993年に第1回目の補修が全スパンに対して行われた。補修工法は「モルタルによる断面修復および表面被覆」であった。その

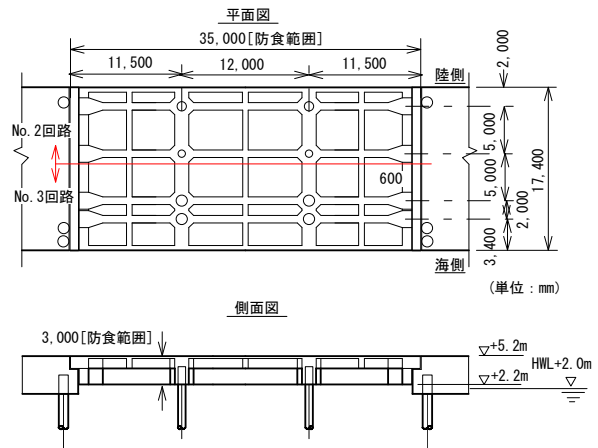


図-2 対象構造物の概要



・塗膜剥離およびさび汁が認められた、2006年

写真-1 電気防食施工前の栈橋下面



・断面修復部でひび割れ、および、さび汁が認められた、

2006年

写真-2 梁下面の再劣化状況

4~5年後に再劣化が顕在化したため、複数回の部分補修が行われた。しかし、再劣化が続くため、2006年に「モルタルによる断面修復および外部電源方式による電気防食」が行われた。2006年以前に行われた断面修復の範囲は、床版下面は約80%、梁側面は約30%であり、梁下面

はほぼ全面であった。2006年に補修を行う前の栈橋下面の状況を写真-1および写真-2に示す。

また、床版における鉄筋の腐食状況を写真-3に示す。補修時に設置した異形鉄筋が著しく断面欠損していた。この原因は、床版下面から吹き付けた補修モルタルが、異形鉄筋を十分に包み込まない部分があり、この箇所がアノードとなるマクロセル腐食を生じたものと推定された。

2.2 電気防食の概要

(1) 電気防食の施工

電気防食は、断面修復後に陽極材（帯状陽極方式と同様なチタントレイ）をコンクリート面に施工した。梁および床版の鉄筋は激しく腐食していたので、さび層を有すること、およびコンクリートの湿潤条件を考慮して、1スパン（本論文では第5スパンのみについて述べる、面積はコンクリート表面積）をNo.1回路（梁下面）226m²、No.2回路（陸側梁側面）339m²、No.3回路（海側梁側面）480m²およびNo.4回路（床版面）333m²の4回路に分けた。回路分けの概要を図-3に示す。

また、電位測定のための埋設式鉛照合電極を図-3に示す位置で各回路に4個（RE1～RE4）ずつ設置した。なお、床版には下面からの電気防食効果が上筋にも及ぶことを確認するために、床版の上筋に照合電極RE1を取り付けた。

なお、床版上面の鉄筋は、荷揚げした岩塩の浸透によると思われる激しい腐食（断面欠損を含む）が認められた。工事用の開口部を設けるために、床版を切り出したコンクリートブロックの断面を写真-4に示す。上筋の位置に、さびの膨張圧によって発生したと思われるひび割れが認められた。また、鉄筋間の電気的な導通が不十分な箇所があったので導通用の補足鉄筋を点付け溶接して、鉄筋間の導通を確保した。

(2) 電気防食基準

当栈橋は再劣化が顕在化したことから鋼材表面にさび層があると予想し、乾湿や湿潤などの条件を考慮して、電気防食基準は、表-1に示す3種類の基準、A.分極量100mV、B.復極量100mVおよびC.電位-850mVを組み合わせて適用することとした。

(3) 通電方法

通電は、初期にA.分極量100mVで通電量を決定し、その後の点検時に、いずれかの基準を満足するように電流量を適宜調整した。

(4) 測定項目

測定項目は、自然電位 E_{cor} 、通電電流、インスタントオフ電位 E_{ms} およびオフ電位（24時間後） E_{off} とし、表-1に示した式によって分極量および復極量を計算した。

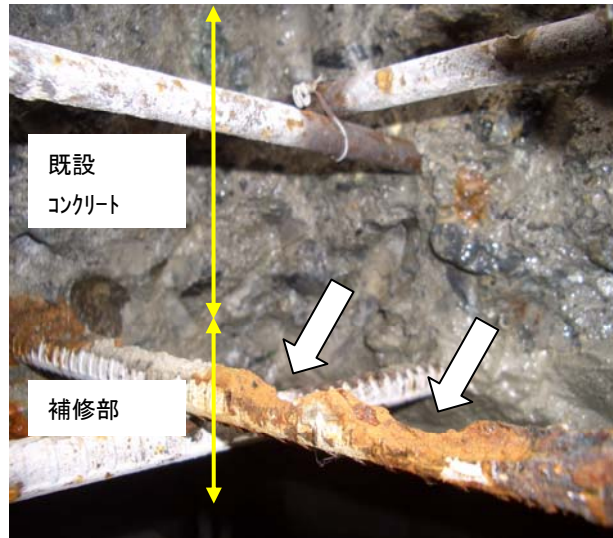


写真-3 床版における鉄筋の腐食状況

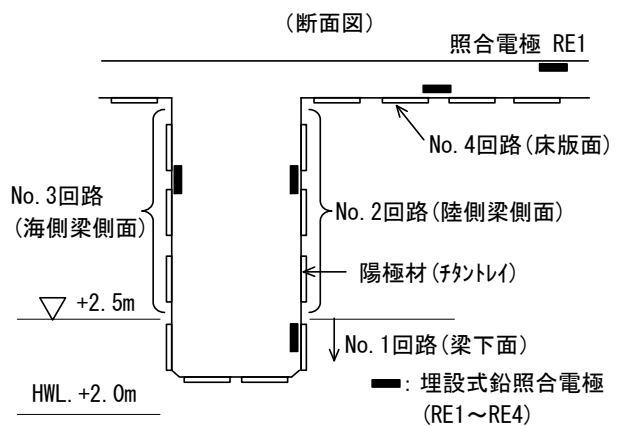


図-3 電気防食の回路分け

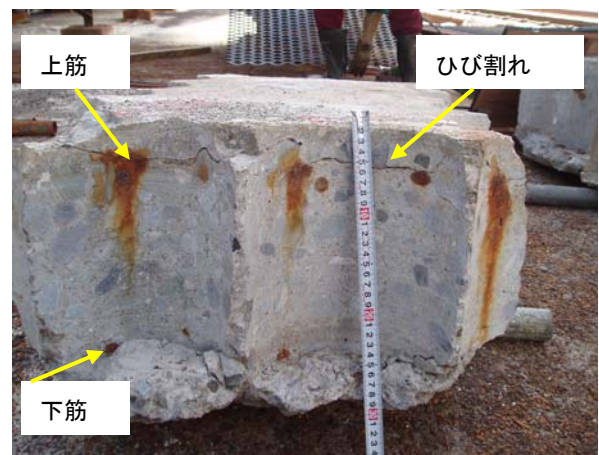


写真-4 床版のひび割れ状況（断面）

(5) 外観観察

毎年、ボートに乗って栈橋下面の外観観察および、たたき検査などで躯体の点検を行った。

3. 結果および考察

3.1 No. 1 回路（梁下面）の結果

(1) 電流密度の経時変化

梁下面における電流密度の経時変化を図-4に示す。梁下面は、満潮時に海水と接して湿潤になるために復極量が得られないことから防食基準C.電位 -850mV を適用し、インスタントオフ電位が -850mV vs.CSE より卑になるように電流を調整した。その結果、電流密度は通電初期に $40\sim 58\text{mA/m}^2$ と高かったが、通電372日後には 20mA/m^2 まで低減できた。この結果は、山本らの結果⁶⁾と同様であり、通電を継続することで防食基準を満たすための電流密度を低減できた。

なお、電流密度が通電372日後に安定するまでの積算電気量(=電流密度 \times 通電時間h)は 393Ah/m^2 であった。

(2) 電位の経時変化

梁下面におけるインスタントオフ電位の経時変化を図-5に、分極量の経時変化を図-6に、および、復極量の経時変化を図-7に示す。

梁下面のインスタントオフ電位は、図-5に示すように、通電初期から $-880\sim -600\text{mV vs.CSE}$ の卑な電位を示し、通電100日後から $-1,000\text{mV vs.CSE}$ の卑な値でほぼ安定した。このように、通電を継続することによって、pHの上昇やさび層の還元による鋼材表面の環境改善⁶⁾が生じ、低い電流密度で防食基準を満足するようになることが分かった。照合電極RE3における電位は、通電1,845日後では -850mV よりも貴になり、防食基準C.電位 -850mV を満足しなかったが、図-7に示すように防食基準B.復極量 100mV を満足した。このように、鋼材表面の環境改善が進行することによって鋼材の電位が貴方向に変化⁶⁾することから、環境改善の進行に応じた防食基準を適用することが必要であると考えられる。

これら、防食効果合否の経過を表-2にまとめて示す。

全ての照合電極における鋼材の電位は、いずれかの防食基準を満足したことが分かる。なお、電気防食期間中に、鋼材表面の環境改善による電位の変化が生じるため、いずれの防食基準をも満足しない時期が発生する場合も考えられる。このような場合は、鋼材電位の傾向を調べ、電気防食システム全体の状況を勘案して通電調整をすることが重要である。

3.2 No. 2 回路（陸側梁側面）の結果

(1) 電流密度の経時変化

陸側梁側面における電流密度の経時変化を図-8に示す。

梁側面の電流密度は、梁下面に比較して防食基準を満たすための電流密度は低かった。これは、梁側面の配筋量が比較的少ないことと、新たに断面修復をしたこと

によって鋼材表面のさびの量が低減し、また補修モルタルによってpHが高くなったためと考えられる。また、梁側面の電流密度は、初期に 20mA/m^2 と高かったが、通

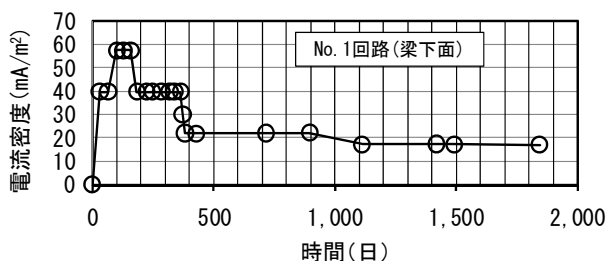


図-4 電流密度の経時変化 (No. 1 回路(梁下面))

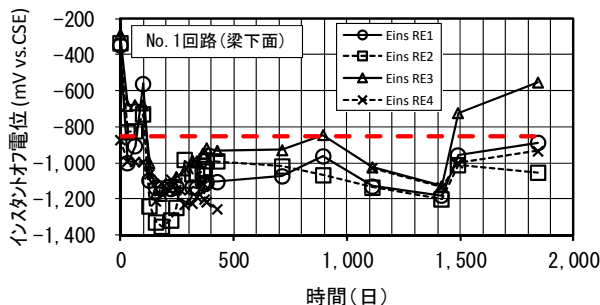


図-5 インスタントオフ電位の経時変化 (No. 1 回路(梁下面))

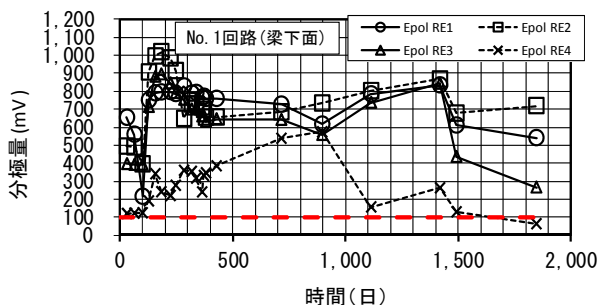


図-6 分極量の経時変化 (No. 1 回路(梁下面))

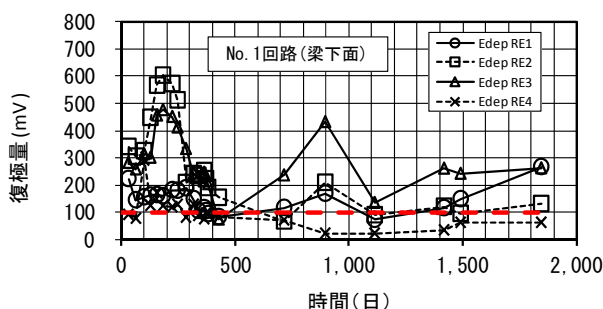


図-7 復極量の経時変化 (No. 1 回路(梁下面))

表-2 No. 1 回路の防食効果合否の経過

経過日数	31日			428日			1,418日			1,845日		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
RE1	○	○	○	○	×	○	○	○	○	○	○	○
RE2	○	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○
RE3	○	○	×	○	×	○	○	○	○	○	○	×
RE4	○	×	○	○	×	○	○	×	○	×	×	○

<凡例> RE: 照合電極番号, ○: 合格, ×: 不合格

電 300 日後から $5\text{mA}/\text{m}^2$ の低い値に調整できた。

なお、電流密度が通電 300 日後に安定するまでの積算電気量は $101\text{Ah}/\text{m}^2$ であった。

(2) 電位の経時変化

陸側梁側面におけるインスタントオフ電位の経時変化を図-9 に、分極量の経時変化を図-10 に、および、復極量の経時変化を図-11 に示す。

インスタントオフ電位は、照合電極 RE3 の位置を除いて、 $-800\sim-600\text{mV vs.CSE}$ と梁下面よりも貴であった。これは、梁側面が梁下面に比較して湿潤な時間が短いためと考えられる。しかし、照合電極 RE3 における電位が卑であったことから、この箇所のコンクリートがより湿潤であったと考えられる。このように、同一の部材であっても環境条件が異なることがあるので、環境条件に応じて 3 種類の電気防食基準を適用することが好ましい。

なお、図-11 の結果から、梁側面では、いずれの照合電極においても、防食基準 B.復極量 -100mV を満足したことが分かる。

なお、No.3 回路（海側梁側面）では No.2 回路と同様な傾向が認められた。

3.3 No. 4 回路（床版面）の結果

(1) 電流密度の経時変化

床版面における電流密度の経時変化を図-12 に示す。

床版面では、後述するように照合電極 RE3 を除いた位置において分極量が少なかったため $45\text{mA}/\text{m}^2$ の高い電流密度で通電する必要があった。

また、床版面では分極量が不均一なために $1,987\text{Ah}/\text{m}^2$ を通電したにも拘わらず電流密度は低減できなかつた。一方、梁下面では $393\text{Ah}/\text{m}^2$ 、梁側面では $101\text{Ah}/\text{m}^2$ のように、他の部材では床版面よりも少ない積算電気量で電流密度を低減できた。このように、部材の環境条件や配筋量などによって防食電流密度を低減できるまでの積算電気量が異なることが分かった。

(2) 電位の経時変化

床版面におけるインスタントオフ電位の経時変化を図-13 に、分極量の経時変化を図-14 に、および、復極量の経時変化を図-15 に示す。

インスタントオフ電位は、照合電極 RE3 における値を除いて、 $-800\sim-400\text{mV vs.CSE}$ と梁下面よりも貴であった。これは、床版面が梁下面に比較して、より湿潤になる時間が短いためと考えられる。

しかし、床版上面は水洗いのために、頻繁に湿潤になり、特に照合電極 RE3 付近の床版上面には滞留水が認められたことから、湿潤な時間が比較的に長かったものと考えられる。このように、同一部材に複数の環境条件が予想される場合は、通電による電位の経時変化に応じた

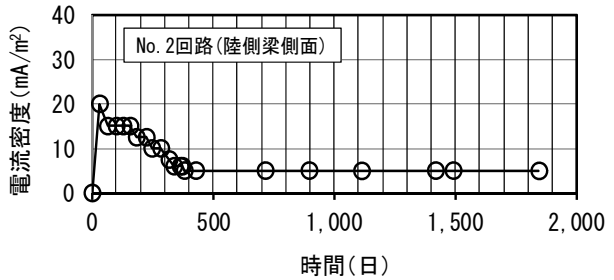


図-8 電流密度の経時変化 (No. 2 回路(陸側梁側面))

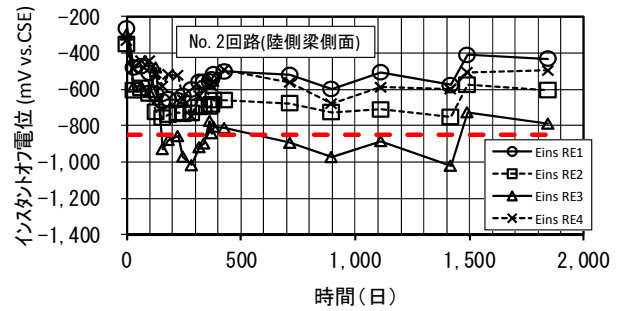


図-9 インスタントオフ電位の経時変化 (No. 2 回路(陸側梁側面))

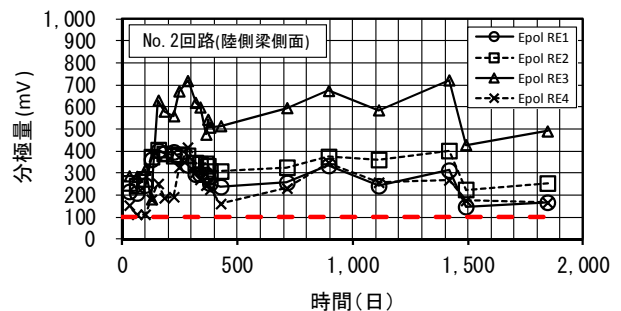


図-10 分極量の経時変化 (No. 2 回路(陸側梁側面))

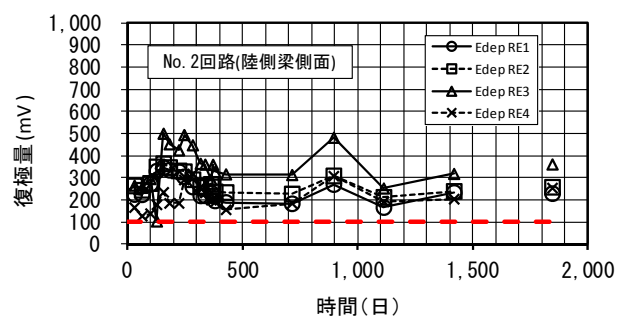


図-11 復極量の経時変化 (No. 2 回路(陸側梁側面))

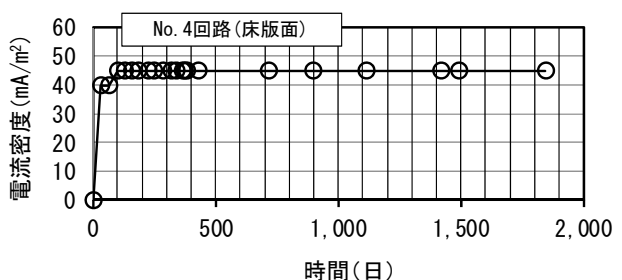


図-12 電流密度の経時変化 (No. 4 回路(床版面))

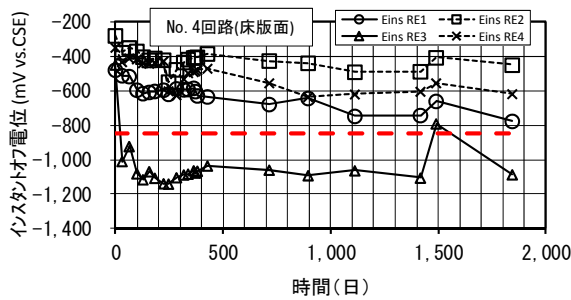


図-13 インスタント電位の経時変化
(No. 4 回路(床版面))

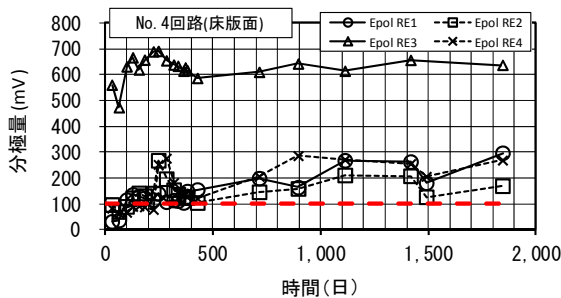


図-14 分極量の経時変化 (No. 4 回路(床版面))

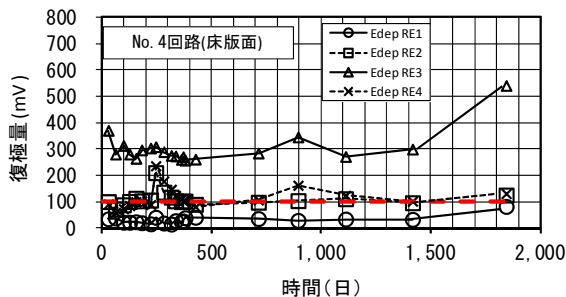


図-15 復極量の経時変化 (No. 4 回路(床版面))

電気防食基準を適用することが重要であると考えられる。また、このような防食基準の適用方法は、他の帯状陽極方式にも適用できると考えられる。

3.4 外観観察結果

栈橋下面の外観観察および梁の打音検査を実施した結果、部材面にはひび割れやさび汁のような変状が認められず、厳しい塩害環境においても電気防食によって再劣化を防止できることが明らかになった。

なお、梁下面に設置した陽極材の一部が、激しい波浪によって損傷を受けたので、波浪の影響を受けにくい構造に改良した新型陽極材（新型チタントレイ）に取り換えた結果、設置3年後においても健在であり、陽極材の耐久性が大幅に向上したことが分かった。その外観を写真-5に示す。

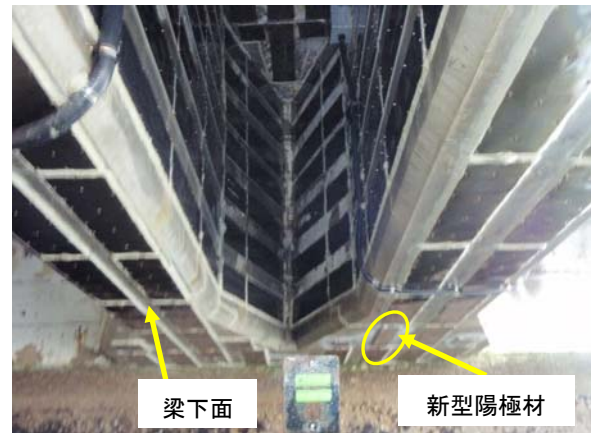


写真-5 栈橋下面の状況
(第5スパン、5年後)

4. まとめ

RC 栈橋上部工の電気防食において、様々な環境に置かれた部材に対して A.分極量 100mV, B.復極量 100mV および C.電位 -850mV の3種類の電気防食基準を組み合わせ適用した結果、苛酷な塩害環境においても栈橋の再劣化を防ぐことができた。

参考文献

- 1) 土木学会：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, pp.67-69, 2001.11
- 2) NACE Standard Practice : Impressed Current Cathodic Protection of Reinforcing Steel in Atmospherically Exposed Concrete Structures, NACE SP0290-2007, 2007
- 3) 川俣孝治, 福手勤, 阿部正美, 峰松敏和：コンクリート構造物干満帯部への電気防食法の適用に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.1, pp.831-836, 1996
- 4) JCI-R1 海洋コンクリート構造物の防食指針(案)-改訂版-, 日本コンクリート工学協会 pp.29-30, 1990.3
- 5) 山本悟, 井川一弘, 松島洋, 坂本浩行, 片脇清士: 実橋のコンクリート桁における電気防食試験, 防錆管理, pp.14-19, 1990. 1
- 6) 山本悟, 田代賢吉, 立林喜子, 石井浩司, 関博: 湿潤環境にあるコンクリート中鋼材の電気防食基準に関する検討, コンクリート工学論文集, pp.1-11, 2011.9
- 7) 武田均, 山本悟, 平田隆, 丸屋剛: 陽極板を用いた外部電源方式電気防食の既設栈橋への適用, コンクリート構造物の補修・補強・アップグレード論文集, 第7巻, pp.247-252, 2007.11