

報告 コンクリート鉄道橋に適用した各種電気防食工法における長期検証結果

布田 仁美*1・篠田 吉央*1・松田 芳範*2

要旨: コンクリート構造物における電気防食工法は、塩害劣化の補修対策として有効であるといわれている。また、電気防食工法は様々な方式があり、その効果を長期継続的に観察することは評価するにあたって重要な項目である。本文はある鉄道橋へ適用した各電気防食工法における効果の長期的な経時変化についてまとめたので報告するものである。

キーワード: 塩害, 鉄筋腐食, 電気防食, 劣化損傷, 維持管理

1. はじめに

これまでコンクリート構造物は維持管理が不要と言われていたが、コンクリート構造物においても適切な管理が行われないと破壊に至るような損傷を生じる場合があることから、コンクリート構造物の劣化損傷が注目されている。劣化損傷事例の中でも塩害はコンクリート内部にある鋼材が腐食し、かぶりコンクリートにひび割れが生じて剥離・剥落といった事象が発生するほか鋼材断面の減少によって構造物の耐力を低下させることがある。特に、日本海沿岸は冬季の厳しい季節風により海からの飛来塩分の影響が大きく、コンクリート中の含有塩分量が比較的多い傾向にある。これまでの補修方法として断面修復工法による補修が行われていたが大部分はマクロセル腐食といわれる劣化損傷を繰返していた。そこで、コンクリート中の含有塩分量に関わらず鋼材に対しての防食効果が得られる補修対策として電気防食工法が注目されている。1998年、本格的な施工を前にあるコンクリート鉄道橋において様々な方式の電気防食工法を径間（本報では連という）ごとに施工した。本文は、同橋に施工した様々な方式による電気防食効果を約10年間にわたり評価したものである。

2. コンクリート鉄道橋と各電気防食工法の概要

2.1 コンクリート鉄道橋

対象となるコンクリート鉄道橋は、1974年に建設された羽越線大川橋梁上り線で新潟県と山形県の県境に位置している鉄道PC橋梁である。日本海沿岸から150m程度に位置し、周囲には鉄道鋼橋と道路橋が架けられているのみであり、海岸からの飛来塩分をさえぎるような建物はなにもない。この橋梁の写真を図-1、構造を表-1に示す。また、鉄道橋の各径間は1連目、2連目と表記



図-1 調査対象としたコンクリート鉄道橋

表-1 コンクリート鉄道橋の構造概要

連番号	構造型	桁構造	主桁数	橋長 [m]
1	PC	I桁	3	19.0
2	PC	I桁	3	19.0
3	PC	I桁	3	19.0
4	PC	I桁	3	19.0
5	PC	I桁	3	19.0
6	PC	I桁	4	31.3
7	PC	ホロ一桁	2	12.9

している。

2.2 劣化損傷概要

図-2にPC桁の劣化損傷状況を示す。劣化損傷は主にPC桁下フランジ下面において最外縁の鉄筋が腐食し、かぶりコンクリートが剥離していた。また、劣化原因を確認するためPC桁各部位からコアボーリングによりコン

*1 (株)ナカボーテック 事業推進部 RC推進部 (正会員)

*2 東日本旅客鉄道(株) 建設工事事務部 構造技術センター コンクリート構造グループ (正会員)

クリートを採取、分析を行ったところコンクリート中に塩分が認められコンクリート表面ほど含有塩分の量が高いことから飛来塩分による外的塩害であることが確認された¹⁾。



図-2 塩害劣化損傷状況

2.3 各電気防食工法概要

塩害対策として 1998 年より適用された電気防食工法の各方式を表-2 に示す。電気防食工法は大きく分けると外部電源方式と流電陽極方式の 2 種類に分類される。外部電源方式は直流電源装置を用いて交流電流を直流電流に変換し、不溶性陽極から防食対象物（コンクリート中の鋼材）に対し強制的に防食電流を供給する方式である。一方、流電陽極方式は犠牲陽極とコンクリート中の鋼材を電氣的に接続し、両者の電位差を起電力として防食電流を供給する方式である。表-2 に記載している線状、面状、点状については陽極設置形状を示している。

(1) 亜鉛シート方式

本方式は亜鉛板を犠牲陽極とする流電陽極方式である。陽極は、亜鉛板・特殊バックフィル・保護カバーから構成されるパネル状の防食板である(図-3)。防食板は、対象構造物表面にアンカーボルトで設置し、ボルトを保護用のキャップを取り付ける。防食板は全ての板を電線により接続させ電氣的導通を確保する。重量は大き

いが、異種金属間の電位差を利用するため、直流電源装置が不要となる。

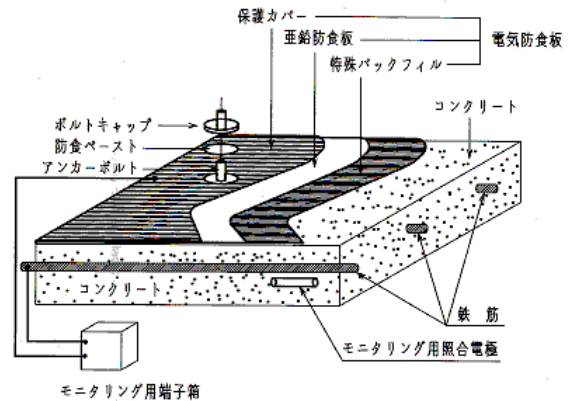


図-3 亜鉛シート方式概要図

(2) チタングリッド方式

本方式は、対象構造物に一定間隔(約 300mm 以下)に平行した複数の w20×d20mm 程度の溝を形成し、貴金属酸化物をコーティングした線状(带状)のチタン電極を設置し、専用モルタルで埋め戻す方式である(図-4)。重量が少ない方式であり、線状陽極は国内でもっとも実績が多い外部電源方式電気防食である。チタンリボンメッシュと呼ばれる方式もある。

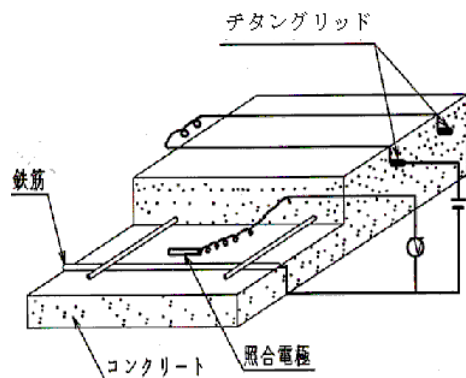


図-4 チタングリッド方式概要図

表-2 各径間における電気防食工法と適用範囲

連番号	電気防食工法種類	適用年	適用範囲	防食面積	電流供給方式	陽極形状
1	亜鉛シート方式	1998 年	下フランジ	85.5 m ²	流電陽極方式	面状
2	チタングリッド方式	1998 年	下フランジ	85.5 m ²	外部電源方式	線状
3	チタン溶射方式	1998 年	下フランジ	85.5 m ²	外部電源方式	面状
4	チタンメッシュ方式	1998 年	下フランジ	85.5 m ²	外部電源方式	面状
5	チタンロッド方式	1998 年	下フランジ	85.5 m ²	外部電源方式	点状
6, 7	チタン亜鉛溶射方式	1999 年	下フランジ	286.4 m ²	外部電源方式	面状

(3) チタン溶射方式

本方式は、対象構造物表面にチタン線材をアーク溶射により吹付けた金属被膜を陽極とする方式である(図-5)。複雑な構造にも対応可能で重量が小さく、面状陽極のため電流分布が良好な外部電源方式である。

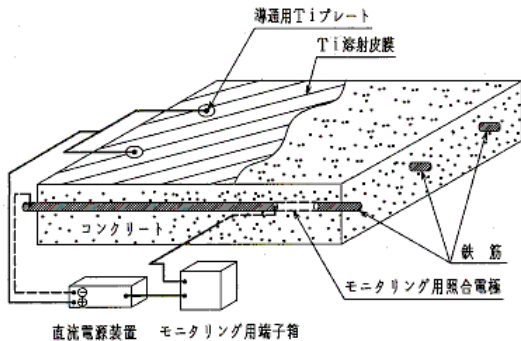


図-5 チタン溶射方式概要図

(4) チタンメッシュ方式

本方式は、対象構造物表面をブラスト等で素地調整し、貴金属酸化物をコーティングした面状(ラス網状)のチタン電極を設置して専用モルタルでオーバーレイする方式である(図-6)。重量は大きいですが、面状陽極のため電流分布が良好で美観に優れた外部電源方式である。

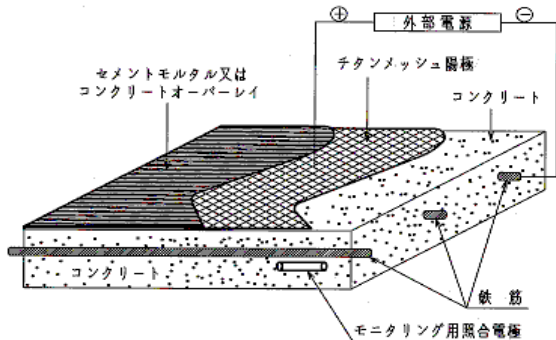


図-6 チタンメッシュ方式概要図

(5) チタンロッド方式

本方式は、対象構造物表面に一定間隔で孔を開け、貴金属酸化物をコーティングした点状(棒状)のチタン電極を挿入し、専用バックフィルを充填する方式である(図-7)。重量が小さい外部電源方式である。

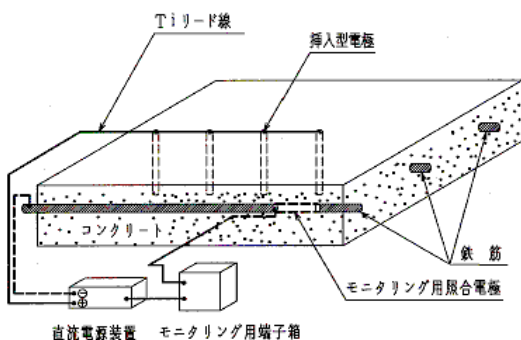


図-7 チタンロッド方式概要図

(6) チタン亜鉛溶射方式

本方式は、対象構造物表面にチタン線材をアーク溶射により前述(3)方式より薄く吹付け、その上から電気伝導度の高い亜鉛を溶射したチタン溶射方式の改良方式である(図-8)。重量が小さく、面状陽極のため電流分布が良好な外部電源方式である。

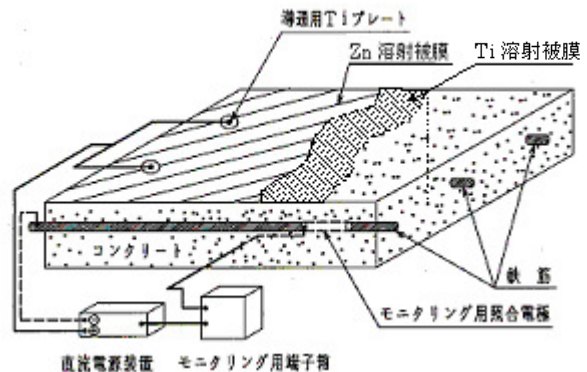


図-8 チタン亜鉛溶射方式概要図

3. 電気防食点検結果

本橋梁の電気防食は、2.3 項でも述べたように各連ごとに異なる電気防食工法を適用している。コンクリート構造物の電気防食は、復極量(電位変化量)100mV以上²⁾を満足することが防食基準として定められている。復極量(ΔE)は、鉄筋オン電位(E_{on})から IR ドロップを補正したインスタントオフ電位(E_{io})と電気防食を一定期間停止させた後の鉄筋オフ電位(E_{of})との差であり、式(1)で表される。

$$\Delta E = E_{of} - E_{io} \quad (1)$$

今回オフ時間は、オフ電位の安定する 24 時間を目安とした。図-9 は E_{on} と E_{io} , E_{of} , ΔE の概念図を示し、コンクリートの電気防食の管理要領も表している。

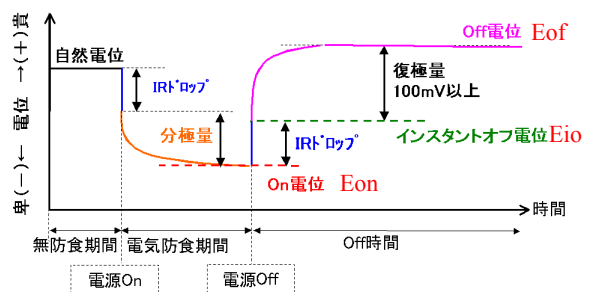


図-9 コンクリートの電気防食管理概念図

3.1 亜鉛シート方式 (1 連)

図-10 に亜鉛シート方式における E_{io} , E_{of} , コンクリート面積あたりの電流密度 (i_c) および ΔE の経時変化を示す。照合電極は 3 箇所に設置してある。 i_c は、経時

的に減少し、Eio と Eof は経時的に貴化傾向にあった。 ΔE は安定して 100mV 以上を維持しており防食効果ありと判定される。

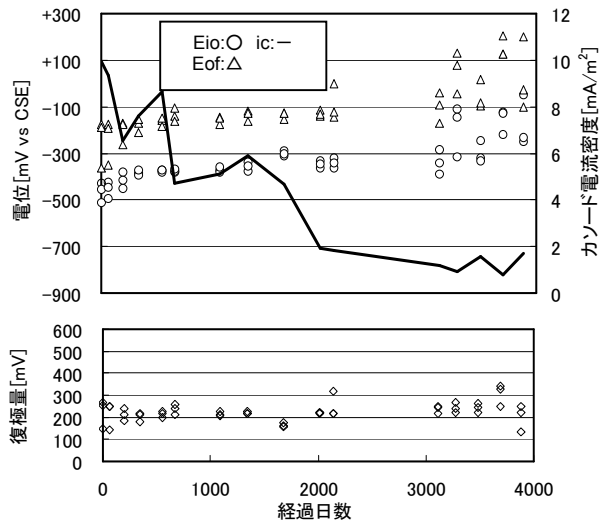


図-10 各種パラメータの経時変化 (1 連)

3.2 チタングリッド方式 (2 連)

図-11 にチタングリッド方式における Eio, Eof, ic, ΔE 経時変化を示す。直流電源装置は定電流制御を用いており、初期は電流密度を大きく設定しているが、約 1 年経過後、 ΔE が十分に得られていると判断されたことから ic を小さく調整した。照合電極は 3 箇所を設置してある。Eio や Eof は経時的に貴化した後、卑化する傾向にあった。 ΔE は常時 100mV を満足しており、防食効果ありと判定される。

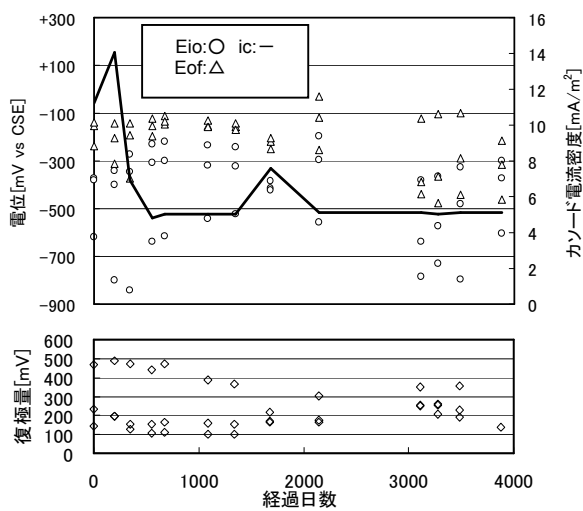


図-11 各種パラメータの経時変化 (2 連)

3.3 チタン溶射方式 (3 連)

図-12 にチタン溶射方式における Eio, Eof, ic, ΔE

経時変化を示す。直流電源装置は定電流制御を用いており、2 連目と同様、初期は電流密度を大きく設定しているが、約 1 年経過後 ΔE が十分なため、電流密度を小さく調整した。照合電極は 3 箇所を設置してある。Eio や Eof は経時的に貴化した後、卑化する傾向にあり 2 連と同様である。 ΔE は常時 100mV 以上を維持しており防食効果ありと判定できる。

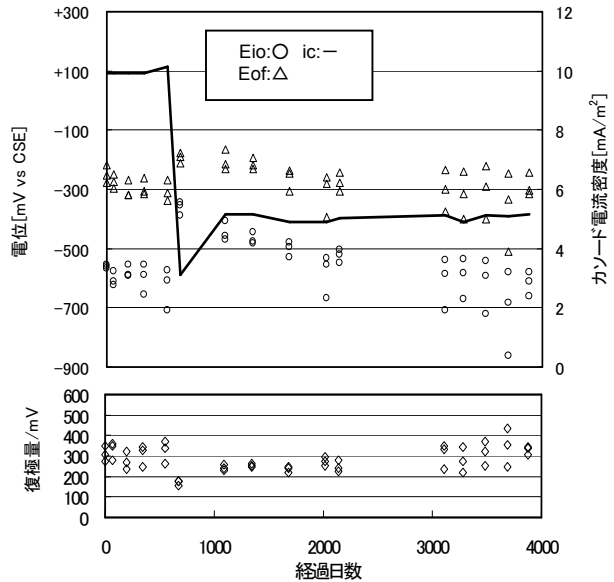


図-12 各種パラメータの経時変化 (3 連)

3.4 チタンメッシュ方式 (4 連)

図-13 にチタンメッシュ方式における Eio, Eof, ic, ΔE 経時変化を示す。直流電源装置は定電流制御を用いており、照合電極は 3 箇所を設置した。Eio は経時的に若干の貴化傾向から卑化傾向にあり 2 連と同様傾向である。 ΔE は常時 100mV を満足しており、防食効果ありと判定される。

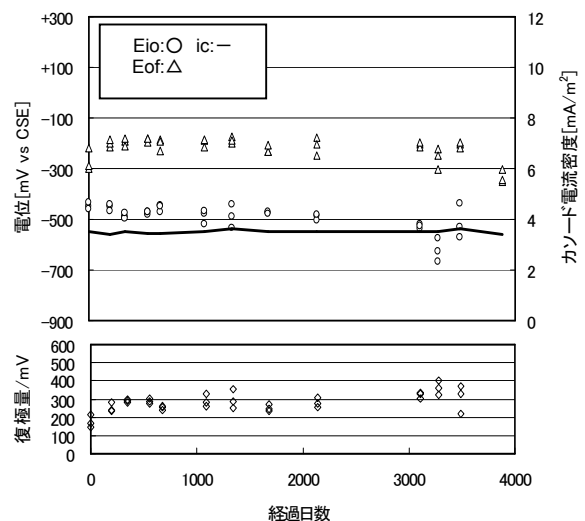


図-13 各種パラメータの経時変化 (4 連)

3.5 チタンロッド方式 (5連)

図-14 にチタンロッド方式における E_{io} , E_{of} , i_c , ΔE 経時変化を示す。直流電源装置は定電流制御を用いており、照合電極は6箇所に設置した。 E_{io} や E_{on} は経時的に貴化傾向にあり1連と同様の傾向である。 ΔE は常時100mVを満足しており、防食効果ありと判定できる。

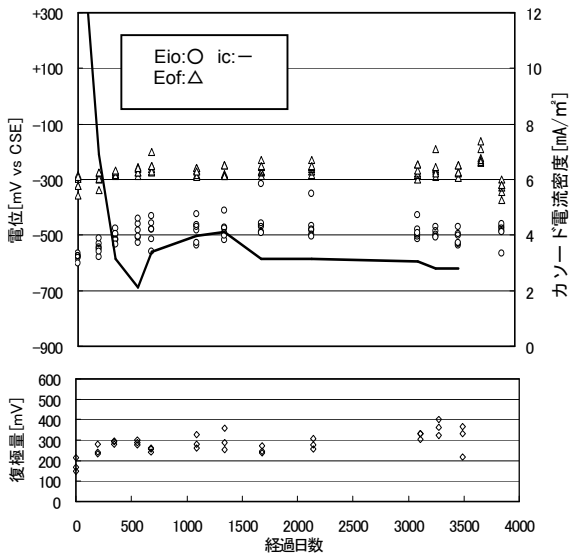


図-14 各種パラメータの経時変化 (5連)

3.6 チタン垂鉛溶射方式 (6, 7連)

図-15 にチタン垂鉛溶射方式における E_{io} , E_{of} , i_c , ΔE 経時変化を示す。直流電源装置は定電流制御を用いており、照合電極は6連に3箇所、7連に2箇所設置した。 E_{io} と E_{of} は経時的に若干貴化傾向から卑化傾向にあり2連と同様である。 ΔE は常時100mVを満足しており、防食効果ありと判定できる。

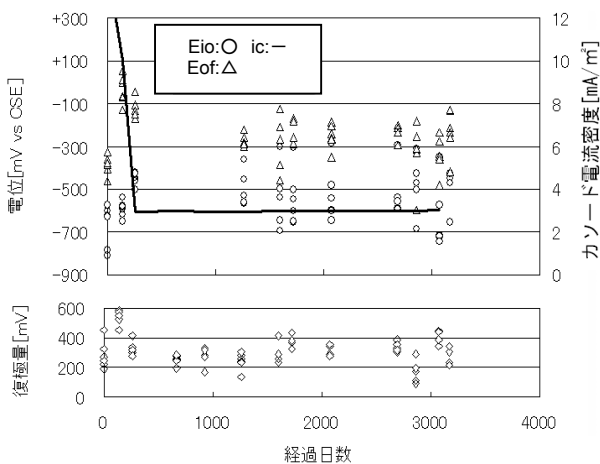


図-15 各種パラメータの経時変化 (6, 7連)

4. 電気防食効果の検証

本橋に適用された6種類の電気防食工法は、大きく分類すると2つの傾向に分けることができた。すなわち、1・5連で見られた E_{io} と E_{of} 貴化傾向、2・3・4・6・7連

で見られた E_{io} と E_{of} の貴化傾向から卑化傾向である。電気防食は中性環境である海中で最も多く適用されているが、この場合 E_{io} や E_{of} は卑化傾向を示す。これは、電気防食効果により海中の電解質が鋼材表面に析出し、酸素拡散の障壁となって鋼材表面が酸欠となり卑化するためである。コンクリートの電気防食では、どのようなことが考えられるのか、代表2例すなわち1連と3連について考察した。

4.1 亜鉛シート方式 (1連)

図-10 の経時変化データを電流密度/電位軸上にプロットすると図-16 に示すように、 E_{io} と E_{of} はともに右下がりの傾向を示している。

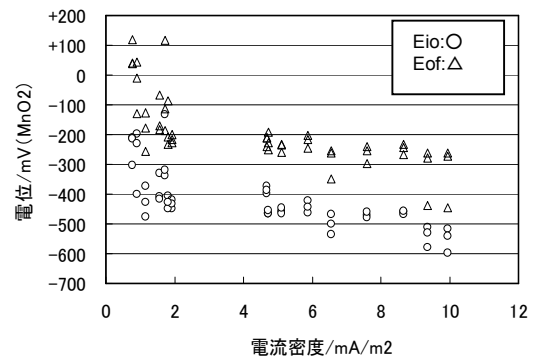


図-16 電位・電流密度特性 (1連)

これは鉄筋のカソード分極抵抗に経時的な増大は認められないことを示している³⁾。防食電流を低減させて、かつ $\Delta E (= E_{of} - E_{io})$ を100mV以上維持しようとした場合、すなわち効率的な電気防食方法を実施するには、 E_{of} の貴化が必要であることを示している。本防食においては、 E_{of} の経時的貴化が電気防食効果の向上に重要な働きをしている典型的な例といえる。 E_{of} の貴化は、電気防食の適用により鉄筋表面のpHが上昇し、図-17のように鉄筋のアノード分極抵抗を増大させたためと考えられる。これはアノード支配型の防食効果といえる。

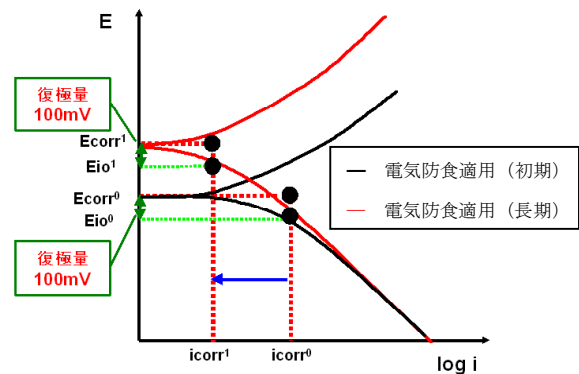


図-17 アノード支配型

4.2 チタン溶射方式 (3連)

図-12 の経時データを電流密度/電位軸上にプロットすると図-18 に示すように、防食を開始して約2000日

までは1連(アノード支配型)と同様に Eio, Eofとも右下がりの傾向を示しているが、それ以降 Eio は徐々に右上がりの傾向に変化していったことから、この時期以降鉄筋のカソード分極抵抗が経時的に増大していったと考えることができる。効率的な電気防食方法をしようとした場合、少なくとも前半(2000日以前)は、Eofの貴化が必要条件となっていたと思われるが、後半はEioの卑化が効率的な電気防食方法の主役として機能していることが分かる。Eioの卑化は鋼材表面に溶存酸素の拡散障壁層が経時的に形成されたためと推測している。

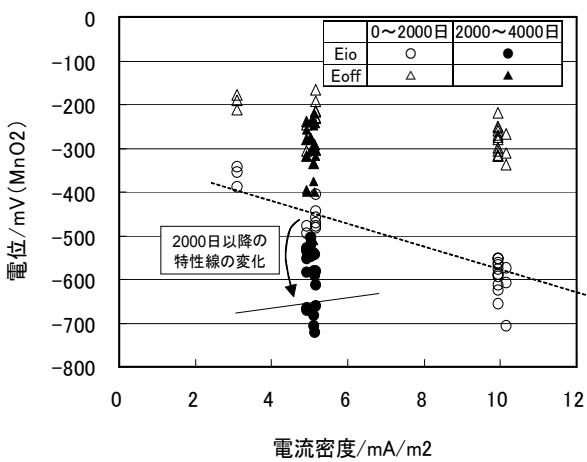
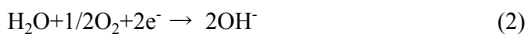


図-18 電位・電流密度特性(3連)

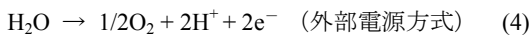
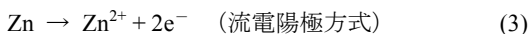
このような挙動は、前述したように主として海水環境下の電気防食(カソード表面に溶存酸素の拡散障壁が形成される場合)に見られる挙動で、電気防食適用環境としては非常に望ましい条件が形成されている稀な例であるといえる。

電気防食では、式(2)から(4)に示すように、鋼材表面でのpH上昇の他、酸素消費反応も同時に進行している。

カソード反応



アノード反応



pHの上昇は、鋼材電位貴化につながるが、酸素消費により鋼材表面が酸欠状態になり、それが維持されると鋼材の電位卑化につながるといわれている。

すなわち、図-19に示すようにカソード分極抵抗を増大させたためだと考えられる。

5. まとめ

本橋において施工後約10年を経過した電気防食工法がコンクリート構造物の鋼材に対して有効に機能していることがわかった。また、コンクリートにおける電気

防食の効果には2つの傾向があることがわかった。

- (1) Eio や Eof が徐々に貴化する場合は、電気防食効果により鋼材表面のpHが上昇して鋼材アノード分極抵抗が増大して、防食効果が持続する。
- (2) Eio や Eof が徐々に卑化する場合は、電気防食効果と何らかの拡散障壁の形成により、鋼材表面が酸欠状態を維持して鋼材カソード分極抵抗が増大して、防食効果が持続する。

電気防食工法は、コンクリート中の塩分量の多少にかかわらず、直接鋼材の腐食を防止できる機能を有することを検証することができた。また、通電停止状態の鉄筋自然電位の貴化および卑化について議論することは、(1)の結果のように鋼材表面のコンクリートの環境改善に関わる重要な要点であり、今後も継続してその効果を追跡し検証していきたいと考えている。

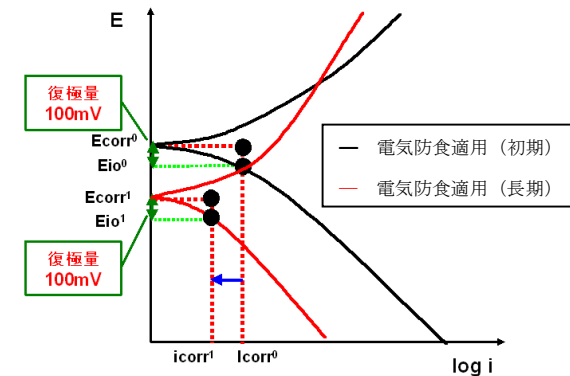


図-19 カソード支配型

6. 謝辞

本工事および点検に際しては、東日本旅客鉄道(株)のご協力を得ました。また、(株)ピーエス三菱、住友大阪セメント(株)、(株)東京興業貿易商会のご協力を得ました。ここに関係各社に深く感謝致します。

参考文献

- 1) 狩野周, 伊藤大輔, 堀川高好, 松田芳範: 鉄道コンクリート橋梁における電気防食工法の耐久性耐久性評価について, 土木学会第64回年次学術講演会 V-078, pp153~154, 2009.9
- 2) 宮川豊章ほか: 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
- 3) 望月紀保: 第43回技術セミナーテキスト, 腐食防食協会, 2007