

◆特集：橋梁の耐久性を向上させる技術◆

新設コンクリート橋の電気防食による耐久性向上に関する研究

守屋 進*

1. はじめに

コンクリート中の鋼材（鉄筋）は、コンクリートが高いアルカリ性環境であるため鋼材表面に不働態皮膜を形成しており腐食することはない。しかしながら、海水飛沫や凍結防止剤などの塩化物イオンが外部からコンクリート中に侵入し、鋼材表面に到達すると、不働態皮膜は破壊され鋼材は腐食する。この現象は、塩害として1980年代頃から東北日本海沿岸のコンクリート橋で顕在化した。塩害を防止するため、コンクリートを密実にしたたり、鉄筋のかぶりを増やしたり、塗装した鉄筋を用いたり、コンクリート表面を塗装するなどの対策が行われてきた。しかしながら、いずれの対策も塩化物イオンの鋼材への到達を阻害するものであり、鋼材の腐食反応を原理的に制御するものではない。これらの対策は、経年で材料性能が低下するため塩化物イオンの鉄筋への到達を完全に阻止することができないので、補修や他の対策に変更することが必要となる。

コンクリート中の鋼材に外部から直流電流を流して電気化学的反応を利用して鋼材腐食に係わるコンクリート構造物の劣化を防止する電気化学的防食工法には、電気防食工法や脱塩工法などがある。電気防食工法は、微弱な電流を継続してコンクリート中の鋼材に流して電気化学的に鋼材を防食する電気防食の原理を利用した工法であり、塩害防止に対する有効性が高く認められコンクリート標準示方書〔維持管理編〕の標準的対策工法と

して取り上げられ、すでに塩害補修では多数の実績がある。一方、脱塩工法は、大電流を短期間流してコンクリート中に存在する塩化物イオンを電気泳動の原理によってコンクリートの表面に移動させ鋼材周辺の塩化物イオンを減少させる方法である。

電気防食工法は、①陽極システムの設置、②陽極システムと直流電源装置の配線配管、③防食電流の継続的な通電など従来工法と内容が大幅に異なる。また、長期的な電気防食効果の検証も十分に行われていない。電気防食工法の初期施工コストは、従来工法より高いが、塩害防止効果が長期間持続しコンクリート構造物の耐久性を維持できれば、その後のランニングコストは大幅に低減され最終的にトータルコストは従来工法に比べて低減されることが期待される。

本報告は、新設時に電気防食を適用した際のコンクリート中の鋼材の長期間にわたる電気防食効果の検証実験、および電気防食工法による新設コンクリート橋の防食ライフサイクルコストを従来工法と比較検討した結果をとりまとめたものである。なお、これらの研究成果に基づき「新設コンクリート橋の電気防食マニュアル（案）」を作成した。

2. 長期電気防食効果の検証

2.1 試験概要

1985年から87年に実施した建設省総合技術開発プロジェクト「コンクリートの耐久性向上技術

表-1 コンクリートの示方配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランブフロアの範囲 (cm)	空気量の範囲 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					NaCl (kg/m ³)
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 高性能減水剤	
20	8.0 ± 1.0	2.0 ± 1.0	37.1	39.4	156	420	712	1150	4.2	2.4

の開発」の一環として実施された「コンクリート構造物の電気防食に関する研究」において、大型プレストレストコンクリート桁に電気防食工法を適用した場合の施工性の検証と防食効果の確認のために製作され、その後12年間電気防食が施されていたコンクリート供試体を用いて電気防食の長期間の効果を検証した¹⁾。

(1) 供試体の種類と形状

①コンクリートの配合

供試体に用いたコンクリートの配合を表-1に示す。セメントは早強ポルトランドセメントを用いた。設計基準強度は 39.2N/mm^2 とした。

②供試体形状

供試体の形状は、 $W350 \times H900 \times L5000\text{mm}$ (供試体の種類；スラブ橋旧JIS A5313 I型ポストテンションPC桁)で、塩害環境を模擬するため製作時に総量規制値のほぼ5倍に相当する 2.4kg/m^3 の塩分(NaCl)を混入した。

(2) 暴露条件

通電開始約2年間は、1週間に5回、3%塩化ナトリウム水溶液を散水し、その後は大気中に自然暴露した。

(3) 電気防食工法

電気防食工法の陽極には、網状陽極(エキスパンドメタル状のチタン基材に貴金属の酸化物を被覆したもので、高耐久性の陽極材料)および導電塗料方式(水系のカーボン塗料を吹き付け、これを陽極とする方式)の2種類を適用した。

2.2 測定項目および方法

(1) 電位測定

①電気防食供試体

電気防食供試体について計測孔内(コンクリート表面の電位分布を計測するために設けた照合電極を挿入するための孔)にコンクリート中の鋼材の電位を測定するための照合電極として飽和甘こう基準電極(SCE)を押し当て通電時の鉄筋の電位(オン電位 E_{on})、通電一時停止直後電位(インスタントオフ電位 E_{io})および通電一時停止4時間後の電位(オフ電位 E_{off4})と、通電一時停止24時間後の電位(オフ電位 E_{off24})を測定した。

②無防食供試体

比較のために電気防食工法を施していない無防食供試体は、計測孔の位置にSCEを押し当て鉄筋の自然電位を測定した。

(2) 分極試験

電気防食供試体について、オフ電位 E_{off24} 測定後に0, 1, 2, 5, 10mA/m^2 の電流密度において、インスタントオフ電位 E_{io} を測定した。電位測定は、照合電極の配置に最も近い計測孔(合計6点/体)にSCEを押し当て測定した。

測定結果は、縦軸にインスタントオフ電位 E_{io} 、横軸に電流密度の対数目盛のグラフで表し、実験開始時と比較検討した。

(3) 表面観察

各供試体の表面を観察し、たたき試験を行ってコンクリートの浮き、はく離等を調べ、写真撮影を行うとともに、展開図に劣化状況を記入した。

(4) 塩分濃度測定

①コア採取

コア($\phi 50\text{mm}$)を供試体の下フランジ下面中央および、ウェブ中央から採取した。

②塩分分析

塩分分析は「硬化コンクリート中に含まれる全塩分の簡易分析方法(JCI-SC5)〈塩化物イオン選択性電極を用いた電位差滴定法〉」に従って全塩分量を測定した。分析結果は単位コンクリート体積当たりの塩化物イオン質量(Clkg/m^3)とした。

(5) 鋼材表面観察

寸法が $0.5 \times 0.5\text{m}$ の範囲で供試体の鉄筋、シースをはつりだし、その腐食状態を観察記録した。

2.3 試験結果

(1) 通電状況

防食電流密度は、 2.8mA/m^2 であった。

(2) 電気防食供試体の復極量(ΔE_{24})

電気防食で通電をすると鉄筋の電位は下がるが、通電を止めると鉄筋の電位は自然電位に戻る。この差を復極量という。ここでは、電気防食供試体におけるインスタントオフ電位 E_{io} とオフ電位 E_{off24} との差を復極量(ΔE_{24})とした。 ΔE_{24} は、両供試体とも全ての測定箇所において防食基準である 100mV 以上の復極量であった。

(3) 無防食供試体

無防食供試体の鉄筋の自然電位は、下フランジの側面および下面で -200mVvs.SCE よりも卑な値を示した。

(4) 供試体表面観察

①電気防食供試体(網状陽極方式)

仕上げ被覆工のモルタル層の浮き箇所が10ヶ

所、クラック箇所が3ヶ所確認された。

②電気防食供試体（導電塗料方式）

電気防食範囲内では導電性塗膜の浮きが4箇所および一次電極を中心に黒褐色の汚れ、丸鋼プロブ設置後の注入モルタルの浮きが3ヶ所確認された。また、電気防食範囲外において、コンクリートの浮きが確認された。

③無防食供試体

コンクリートの浮き、クラック、錆汁が多数確認された。

(5) 鉄筋表面観察

①電気防食供試体（網状陽極方式）

はつり出した鉄筋、シースは写真-1に示すように全て施工時の状況が保たれており腐食は認められなかった。

②電気防食供試体（導電塗料方式）

はつり出した鉄筋、シースは全て施工時の状況が保たれており腐食は認められなかった。

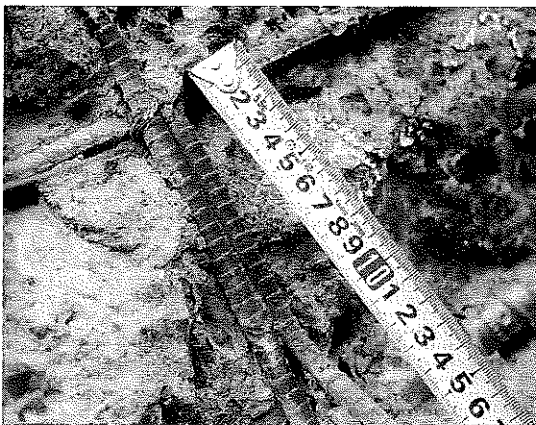


写真-1 電気防食供試体



写真-2 無防食供試体

③無防食供試体

鉄筋に多数の腐食箇所が確認された。シースにも1ヶ所腐食箇所が確認された。鉄筋の腐食は写真-2に示すようにスターラップ筋に多く発生しており、特にかぶり厚が少ない箇所では激しい腐食が確認された。

(6) 考察

①分極量と防食効果について

電気防食供試体では、24時間後の復極量が全て100mV以上であった。鉄筋、シースは、まったく腐食が発生していなかった。このことから、共同研究報告書第14号²⁾で設定した電気防食の防食基準として復極量100mV以上は適切であることが確認できた。

②防食電流密度について

供試体の電流密度は、2.8mA/m²であった。これらの値は、一般に塩害を受けたコンクリート構造物に対する防食電流密度が10～40mA/m²であるのに比較して非常に低かった。このことからコンクリートに塩分が浸透する環境でも電気防食を初期から適用することによって、わずかな電流密度で防食ができることが確認できた。

3. 防食ライフサイクルコストに関する検討

(1) 防食ライフサイクルコスト

コンクリート構造物の性能レベルを供用可能な範囲に保持するために必要な防食費用をあわせたものを防食ライフサイクルコストと定義した。新たに構造物を建造する費用は本検討には含まない。防食ライフサイクルコストは、構造物の耐食性を向上させるために必要な初期投資費用（イニシャルコスト）と、これにより付加された機能を保守・点検・補修するために必要な維持管理費用（ランニングコスト）の和とした。

$$LCC = \Sigma IC + \Sigma RC \quad (\text{式-1})$$

ここで、 LCC ：防食ライフサイクルコスト

IC ：初期投資費用 RC ：維持管理費用

なお、これら費用は、電気防食を100とした概略の指標として、以下の図中の（ ）に数字で示している。

本検討においては、新設コンクリート構造物に予防保全として電気防食を適用した場合のライフサイクルコストを、劣化が進行した段階で事後保全として従来工法（断面修復と表面被覆の組合せ）

を適用した場合と電気防食を適用した場合、および新設コンクリート構造物に予防保全として表面被覆を施した場合とを比較した¹⁾。

(2) 劣化コンクリート構造物に電気防食を適用した場合の検討

劣化が進行した段階に事後保全として従来工法(大断面修復+表面被覆)を施す場合を図-1に示す。

このケースでは、劣化が進行し大断面修復レベルまで性能レベルが低下しているため、大断面修復を施した後に表面被覆を行う。

しかし、このような大断面修復レベルまで性能レベルが低下するような塩害環境では、コンクリート内部に多量の塩化物イオンが蓄積され、これを完全に除去することは不可能である。したがって、このケースでは、補修後に再び大断面修復レベルまで性能レベルが低下し、再度、大断面修復と表面被覆を施すこととしてライフサイクルコストを算出した。

劣化が進行した段階で電気防食を適用した場合を図-2に示す。

このケースでは、電気防食の適用段階で性能レベルが大断面修復レベルまで低下しているため、大断面修復を行った後に電気防食を適用することになる。したがって、補修コストは、大断面修復と電気防食の和となり、大断面修復のコストより増加する。しかし、性能レベルは大断面修復より

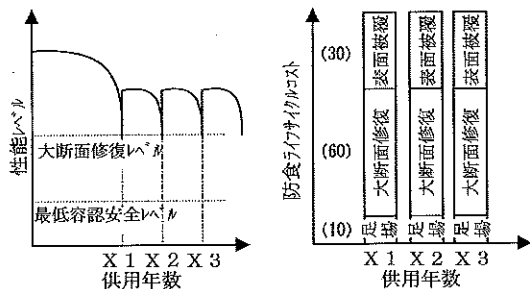


図-1 劣化が進行した段階から従来工法で補修する場合

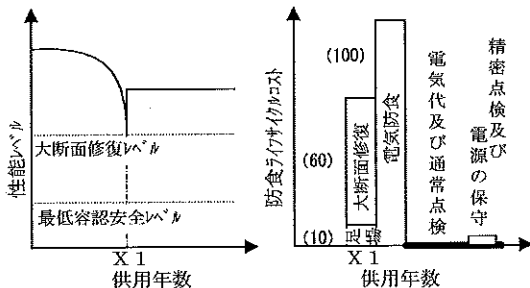


図-2 劣化が進行した段階に電気防食を適用する場合

上昇させることができ、そのレベルを保持することが可能である。劣化が進行した段階で電気防食工法を適用することは、劣化が進行した段階に従来工法で補修する場合に比べ塩害防止方法としては信頼性が高くなる。また、防食のメンテナンスコストは、電源の保守と電気代だけの電気防食の方が従来工法より構造物の残存供用年数が長期化するほど小さくなる。

(3) 構造物建設時に電気防食を適用した場合の検討

新設コンクリート構造物に新設時の段階から表面被覆を施した場合を図-3に示す。このケースでは、構造物の性能レベルの低下を塗膜の遮塩性能の低下とし、塗膜の定期的な塗り替えが必要であるとした。したがって、この場合には10年周期で定期的な塗り替えにより構造物の性能レベルを健全なレベルに保持できるが、塗膜の除去と再塗装のコストが発生する。

新設のコンクリート構造物の建設時に電気防食を適用する場合を図-4に示す。

このケースでは、コストのほとんどが電気防食のイニシャルコストである。ただし、ランニングコストとして、若干の電気代と通常点検、精密点検、電源保守費用等が必要である。

(4) 防食ライフサイクルコストの試算例

厳しい塩害環境に建設されるポストテンション方式のプレストレストコンクリート橋について、

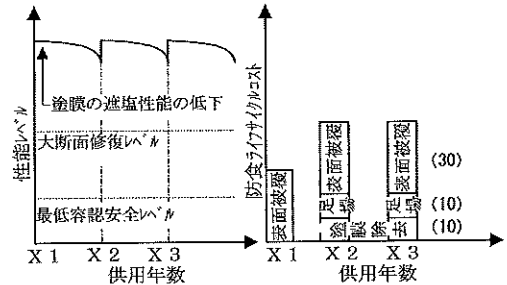


図-3 新設コンクリート構造物に表面被覆を塗す場合

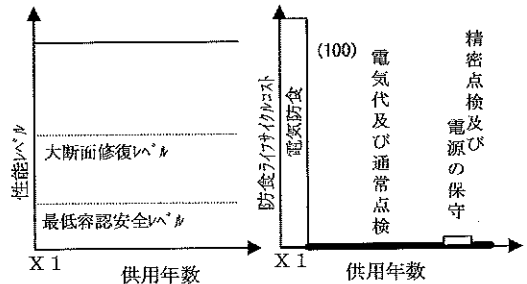


図-4 新設コンクリート構造物に電気防食を適用する場合

防食ライフサイクルコストを算定した。対象としたPC橋梁は、2径間の橋長75.3m、幅員21.9mである。防食対象は、桁下面および下フランジ側面の1635m²とし、予防保全工法として電気防食工法および表面被覆工法、事後保全工法として劣化部補修と塗装による従来工法の3工法に関して試算した。

電気防食の施工費は、配線配管工事費と直流電源設置費を含み、これら設備は老朽化を考慮して20年経過毎に更新することとした。また、陽極や照合電極などの設備の寿命は半永久的であるので60年間更新しないこととした。表面被覆工法は10年経過毎に塗膜を除去し再塗装することとした。劣化部補修は小断面修復と再塗装を10年経過毎に行うこととした。

設計耐用年数を60年間として、防食ライフサイクルコストを試算した結果を表-2および図-5に示す。これより、新設時からの防食工法として電気防食と表面被覆工法を比較した場合、60年間の防食ライフサイクルコストが電気防食の適用により40%程度低減できることが明らかとなった。

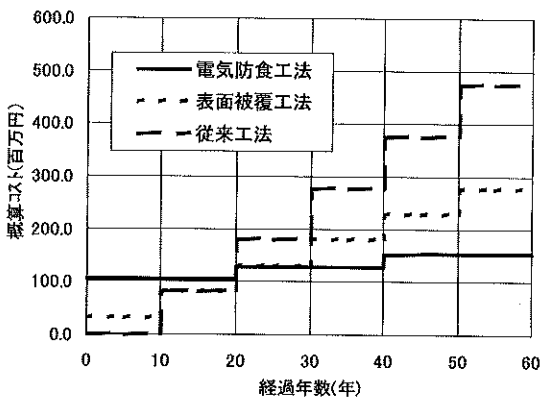


図-5 60年間の防食ライフサイクルコストの試算結果

4. 新設コンクリート橋の電気防食マニュアル

新設コンクリート橋に適用する電気防食工法の特徴を以下に記す。

(1) 設計上の特徴

①かぶりを軽減できる可能性がある。

道路橋示方書では、塩害の影響の度合いが激しいS対策区分は最小かぶり70mmに塗装鉄筋かコンクリート塗装の併用することとしている。このような地域でも、電気防食工法を適用すれば塩害の影響を受けない地域での通常のかぶりに対応できる可能性がある。

②ひび割れを許容できる可能性がある。

塩害地域でコンクリートにひび割れが生じると、そこから塩化物イオンが侵入して鉄筋は腐食しやすくなる。電気防食工法を施せばはく落等第3者傷害の恐れがない程度のひび割れは許容できる可能性がある。

③狭隘部の防食対策が軽減される。

電気防食工法を施すことによって、橋台近くの桁端部など表面被覆等が施工しにくい部位の防食対策が不要となる。

(2) 施工上の特徴

補修時に電気防食工法を適用するより、①コンクリートのはつりや断面修復が不要となる。②鋼材の電気的導通の確保が容易である。③照合電極や排流点の設置が容易である。④陽極の設置が容易である。⑤鉄筋にさびが発生していないので、微弱な防食電流で防食効果が維持できる。⑥鉄筋表面が均一な不動態皮膜となっているため、分極し易く、防食電流の分布がよいため均一な防食効果が得られる。⑦微弱な防食電流で防食効果を維持できるため電力費は少ない。等の特徴を有している。

これまでの新設コンクリート橋への電気防食工法の適用に関する検討結果の成果をとりまとめ、

表-2 60年間の防食ライフサイクルコストの概算

(単位: 百万円)

電気防食工法		表面被覆工法(初期から塗装)		従来工法(劣化部補修+塗装)				
費用区分	コスト	費用区分	コスト	費用区分	コスト	費用区分	コスト	
初期工事	施工費(直工)	104.7	初期工事費	施工費(直工)	34.6	初期工事費	施工費(直工)	0.0
維持費	電気料金(60年分)	2.6	維持費		-	維持費		-
補修費	電源装置取替費	22.0	補修費	表面塗装費	216.5	補修費	劣化部補修	259.8
	配線配管取替費	28.8		足場費	43.3		表面塗装費	199.2
	足場費	1.9					足場費	43.3
総計	160.0	総計	294.4	総計	502.3			

新設コンクリート橋の電気防食マニュアル(案)を作成した。マニュアル(案)の目次を以下に示す。このマニュアル(案)は、塩害による鋼材の腐食が懸念される新設コンクリート橋への適用を基本としたものである。適用する電気防食方式は、外部電源方式を基本とし、防食性能、耐久性、施工性などを十分検討することとした。また、コンクリート橋のほとんどがプレストレストコンクリート橋であることから、PC鋼材の過防食による水素脆化に対する安全性確保を目的に、PC鋼材の電位は、飽和銅硫酸銅電極(CSE)基準で-1000mVより卑な電位にしないこととした。さらに、電気防食は適用後の電位の確認と通電調整などの維持管理が必要であることから、4章に「維持管理」を設け、具体的な維持管理の項目とそれらの方法、判断基準を示し、防食期間中の電気防食による腐食抑制を効果的かつ合理的に実施できるようマニュアル化した。

新設コンクリート橋の電気防食マニュアル(案)目次

1. 総則
 - 1.1 適用の範囲
 - 1.2 用語の定義
2. 電気防食工法の概要
 - 2.1 電気防食の原理
 - 2.2 電気防食工法の選定
3. 電気防食の設計と施工
 - 3.1 電気防食工法の設計
 - 3.1.1 防食電位
 - 3.1.2 防食電流密度
 - 3.1.3 防食方法の選択
 - 3.1.4 防食回路の設計
 - 3.1.5 モニタリング回路の設計
 - 3.1.6 使用材料の品質
 - 3.2 電気防食の施工
 - 3.2.1 施工一般
 - 3.2.2 鉄筋およびPC鋼材の導通試験等
 - 3.2.3 排流端子および測定端子の設置
 - 3.2.4 照合電極の設置
 - 3.2.5 陽極の設置
 - 3.2.6 直流電源等設備の設置
 - 3.2.7 配線・配管
 - 3.2.8 モニタリング装置の設置
 - 3.2.9 初期通電調整
4. 維持管理
 - 4.1 維持管理の基本
 - 4.2 維持管理の方法

このマニュアル(案)に基づき、北陸地方整備局高田河川国道事務所管内の名立大橋と沖縄総合事務局南部国道事務所管内の南浜1号橋の新設PCコンクリート橋に電気防食工法を適用した。適用した電気防食工法は、チタンリボンメッシュ工法、チタンロッド工法、チタングリッド工法、チタン溶射工法の4工法である。3年が経過した時点では良好な防食状態が保持されている。なお、これら二橋は適用後の維持管理の合理化を目的に、公衆電話回線を利用した遠隔監視制御システムを導入して、防食電流、防食電位の経時的なモニタリングを行っている。

5. おわりに

本研究は、建設省土木研究所材料施工部化学研究室と社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会が実施した「海洋構造物の耐久性向上技術に関する共同研究」のうち、新設コンクリート橋への電気防食適用に関する研究成果をとりまとめたものである。本研究の実施にあたりご協力をいただいた、新設電気防食工法検討ワーキングの穴沢雅明氏(ピーエス三菱(株))、井川一弘氏((株)ナカボーテック)、川俣孝治氏(住友大阪セメント(株))、山本悟氏(日本防蝕工業(株))、古賀創一郎氏((株)東京興業貿易商会)に謝意を表します。

参考文献

- 1) 建設省土木研究所、(社)プレストレスト・コンクリート建設業協会：海洋構造物の耐久性向上技術に関する共同研究報告書—新設コンクリート橋への電気防食適用に関する研究成果と新設コンクリート橋の電気防食マニュアル(案)一、共同研究報告書整理番号第256号、平成12年12月
- 2) 建設省土木研究所、(財)土木研究センター：コンクリート構造物の電気防食に関する共同研究報告書、共同研究報告書整理番号第14号、昭和63年8月

守屋 進*



独立行政法人土木研究所材料地盤研究グループ(新材料)主任
研究員
Susumu MORIYA