

# 電気防食による PC 単純 T 桁橋の補修

## — 更なるコスト縮減に向けて —

青山 敏幸\*1・麻田 正弘\*2・団 俊英\*3・鳥居 和之\*4

塩害を受けたコンクリート構造物の補修方法のひとつに、チタン系の線状陽極を用いた電気防食工法がある。本工法は、陽極材の耐久性が高いこと、構造物の配筋、腐食状況に応じて陽極を任意の位置に配置できること、補強工法との併用が容易であることなどの特徴があり、施工実績も増加している。しかし本工法の採用にあたっての大きな課題は、他の塩害対策工法である表面保護工法や断面修復工法と比較して初期コストが高いことにある。そこで、チタン系の線状陽極を用いた電気防食工法の施工費用の内訳を分析し、コスト縮減に向けた課題となる溝切削費と陽極材料費の削減を図るため PI-Slit 工法を開発し、陽極の配置方法、溝 1 本あたりに設置する陽極枚数および陽極幅を変更した。その結果、防食効果を確保しつつ、陽極設置工費では 20% 程度、電気防食の全体施工費としては 15% 程度のコスト縮減につながった。

キーワード：塩害、電気防食、線状陽極、コスト縮減

### 1. はじめに

塩害を受けたコンクリート構造物の補修方法のひとつに電気防食工法がある。電気防食工法は、構造物表面近傍に設置した陽極からコンクリート中の鋼材へ直流電流を流し電気化学的に鋼材の腐食を抑制する方法であり、電流の供給方法、陽極の設置方法に応じた各種の工法が開発されている<sup>1)</sup>。そのうち、図 - 1 に示すようなチタン系の線状陽極を用いた電気防食工法は、陽極の耐久性が高いこと、構造物の配筋、腐食状況に応じて陽極を任意の位置に配置できること、陽極設置に伴う死荷重の増加がないこと、補強工法との併用が容易であること、既設の塗装を施した構造物でも塗装を除去する必要がないことなどの特徴

があり、施工実績も増加している。しかし本工法の採用にあたっての大きな課題は、他の塩害対策工法である表面保護工法や断面修復工法と比較して、初期コストが高いことにある。

そこで本稿では、チタン系の線状陽極材であるチタングリッド陽極を用いた電気防食工法の施工費用の内訳を分析し、その結果を踏まえ PI-Slit 工法によるコスト縮減に向けた提案と、実構造物への適用事例について報告する。

### 2. 従来工法のコスト分析

これまでに施工したチタングリッド陽極を、後述する図 - 3(a) に示すように配置した線状陽極方式による電気防食の施工費用について分析した結果を図 - 2 に示す。ここで、図 - 2(a) は電気防食工事全体費用の内訳を、図 - 2(b) は陽極設置工事費用の内訳をそれぞれ示す。また、図 - 2(a) の前処理工は、図 - 1 に示すような鋼材と配線を接続するための排流端子設置工、防食効果をモニタリングするための照合電極設置工および鋼材間の導通を確認するための導通確認工からなる。図の施工費用の内訳に示すように、施工費用のなかでもっとも多くを占める工種は陽極設置工であり、全体工費の 75% 近くを占めている。

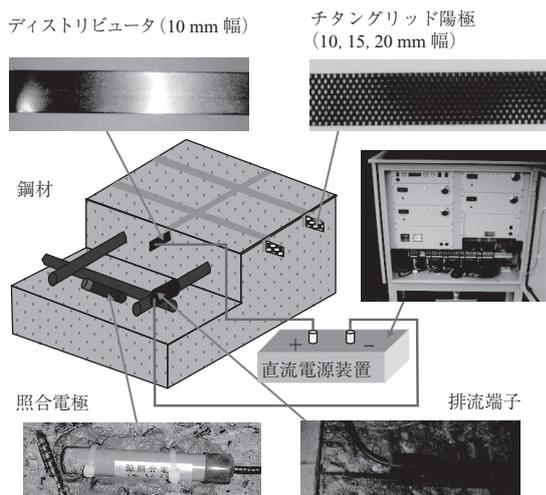


図 - 1 線状陽極方式による電気防食工法の概要図

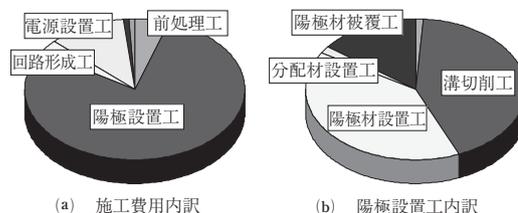


図 - 2 従来の電気防食工事費用の分析結果

\*1 Toshiyuki AOYAMA : (株) ピーエス三菱 技術本部 技術部 開発メンテナンスグループ

\*2 Masahiro ASADA : アルスコンサルタンツ (株) 構造・保全部 部長

\*3 Toshihide DAN : 石川県 奥能登土木総合事務所 維持管理課

\*4 Kazuyuki TORII : 金沢大学大学院 自然科学研究科 教授

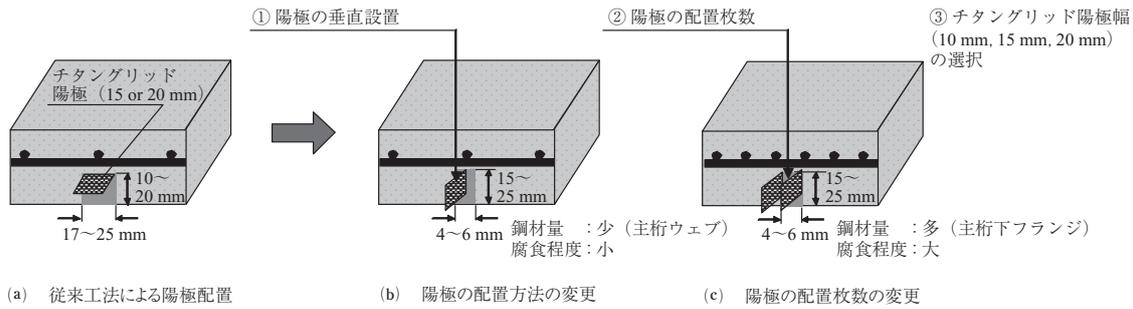


図 - 3 コスト縮減に向けた陽極配置方法の提案

さらに、陽極設置工のなかでの内訳に示すように、溝切削工と陽極材設置工が陽極設置工の費用の75%を占めている。陽極材設置工のうち、約60%が陽極の材料費である。コスト分析の結果、コスト縮減に向けた課題は溝切削量の削減、陽極材料の使用量削減と考えられた。

### 3. コスト縮減に向けた提案

#### 3.1 陽極の配置方法

陽極の配置は、従来の図-3(a)に示す水平設置から図-3(b)に示す垂直設置に変更する。配置方法の変更により溝切削にかかわる費用や、陽極設置にかかわる費用の低減が期待できる。本手法については、PC桁を模擬した供試体の通電試験<sup>2)</sup>により性能に問題がないことを確認している。

#### 3.2 陽極の配置枚数

線状陽極方式を用いた場合の陽極の設置間隔は、鋼材への均一な防食電流の供給を考慮して300mm以内で設置することが多く、コンクリート内部の鋼材量が多いほど、腐食の程度が大きいほど陽極材の大きさを大きくしたり、設置間隔を小さくしている。

鋼材量が多い部位、腐食の程度が大きい部位は、設置間隔は従来と同様に300mm以内としつつ、図-3(c)に示すように、切削溝1本につき2枚の陽極を設置することで、溝切削費を低減することが期待できる。本手法については、切削溝1本につき2枚の陽極を設置した場合も2枚の陽極が有効に機能することを小型供試体を用いた通電試験<sup>3)</sup>、PC桁およびRC栈橋を模擬した供試体の通電試験<sup>4)</sup>により確認している。

#### 3.3 陽極の材料費削減

これまでに使用していた15mm、20mm幅のチタングリッド陽極に加え、10mm幅の陽極も新たに追加した。腐食が軽微な構造物やコンクリート内部の鋼材量が少ない構造物に対しての陽極の材料費削減が可能となり、既設構造物への溝の切削を最小限に抑えることができる。さらに陽極設置位置の鋼材量や腐食程度等に応じて、3.2で述べた陽極の配置枚数と陽極幅を適切に選定することで、陽極材料費と溝切削費の削減によるコスト縮減が期待できる。

## 4. 実構造物への適用

### 4.1 橋梁の概要

橋梁の諸元を表-1に示す。本橋は、石川県の能登半

島の外浦に面した国道249号線に架かる橋長36mのポストテンション方式PC単純T桁橋である(写真-1)。1980年に架設され、これまでに塩害補修として上部工の主桁や横桁にはコンクリート塗装が施されてきた。しかし写真-2(a)に示すように、鋼材腐食に伴うコンクリートのはく離やさび汁の発生等の再劣化が生じていた。また、ASRによる劣化を併発しており、主桁では写真-2(b)に示すように、PC鋼材に沿って0.1mm程度のひび割れが生じていた。再劣化の生じた上部工の対策として、施工性、維持管理および周辺への影響などの観点から比較検討を行い、線状陽極方式による電気防食による補修が最適な補修工法であると判断された。本橋梁の劣化調査、対策工法の選定の詳細、ASRが生じた構造物への電気防食の適用に関する考え方については別途の報告<sup>5)</sup>を参照されたい。

### 4.2 電気防食の設計

表 - 1 橋梁の諸元

路線名	一般国道249号
架橋箇所	石川県輪島市深見町地内
上部工形式	ポストテンション方式PC単純T桁橋(5主桁)
橋長、幅員	橋長36.0m、幅員8.9m
斜角	右60°00'00"
塩害対策区分	対策区分I(海岸線から160m)



写真 - 1 橋梁の概要

#### (1) 防食対象範囲

上部工の長期的な耐荷性能の確保を目的として、曲上げ部を含む主桁PC鋼材の配置範囲を電気防食による防食対象範囲に設定した。上フランジおよび支間中央部のウェブ部のスターラップおよび軸方向鉄筋は、腐食が生じてもすぐに耐荷力の低下は引き起こさないため表面保護工法により補修し、再劣化が生じた段階で対策を行うことで初期コ



(a) かぶりコンクリートの浮き (b) ASRが原因と考えられるひび割れ

写真 - 2 コンクリートの劣化状況

ストの縮減を図った。防食回路は1回路、防食対象面積は496 m<sup>2</sup>である。

(2) 陽極配置方法

陽極の設置間隔は、コンクリート中の鋼材量や腐食程度をもとに必要防食電流量を算出し、陽極から鋼材への電流の広がりを満足してかつ、陽極から発生する電流が限界電流量以内に収まるように決定する。本橋では、鋼材の腐食が比較的軽微であることから、陽極の設置間隔はウェブ面は300 mm、下フランジは250 mm程度とし、陽極幅はこ

れまでに使用していた15 mmから10 mm幅のものに変えた。また、鋼材量が多い下フランジ底面では、図-4(c)に示すように切削溝1本につき2枚の陽極を設置することで陽極量を大きくし、防食の最適化とともに、材料費、溝切削費の低減によるコスト縮減を図った。通電点は、図-5に示すように各主桁の横桁間に1箇所ずつの計20箇所設けるものとした。

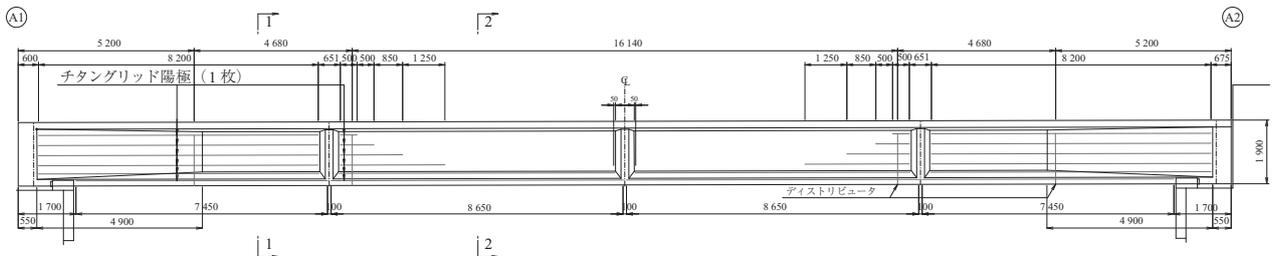
(3) モニタリング回路

適切な防食電流の供給と防食効果の確認ができるように、モニタリング回路として埋め込み照合電極を図-5に示すように3箇所設ける。また本橋では、電気防食を適用後にASRによるひび割れ幅の変化を亀裂変位計により測定し、ASRによる膨張の推移を監視する。

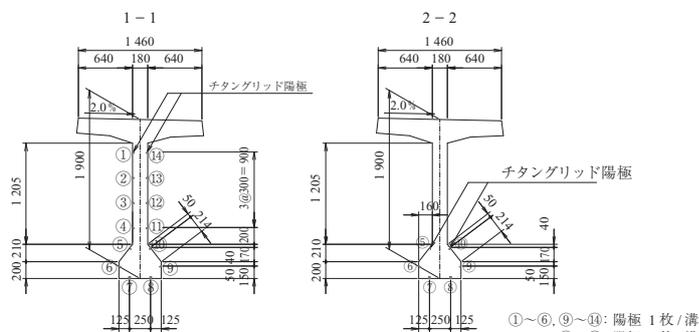
4.3 電気防食の施工

(1) 施工フロー

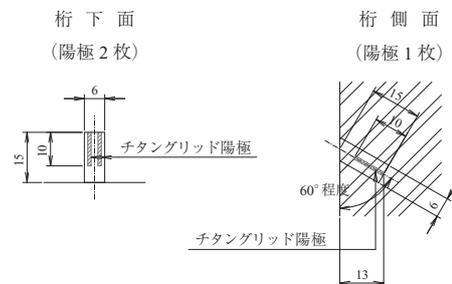
本橋の補修工事の施工フローを図-6に示す。ここでは、橋梁補修工事全体のうち、電気防食の施工について述べる。



(a) 主桁側面図



(b) 主桁断面図



(c) 陽極設置図

図 - 4 陽極配置図

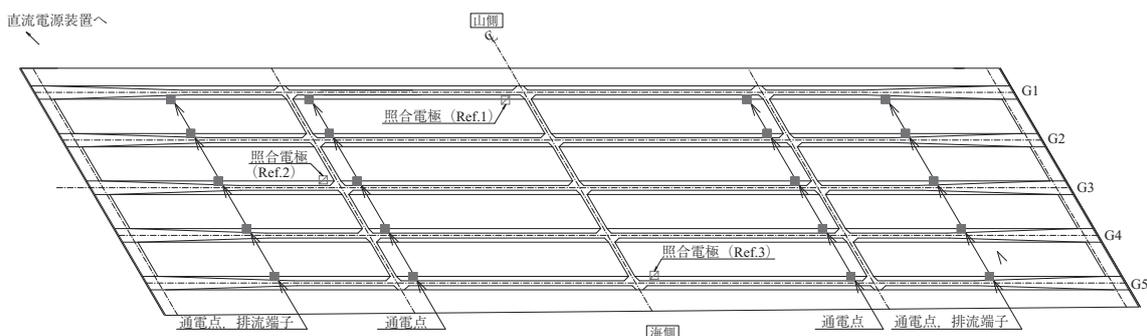


図 - 5 照合電極, 排流端子, 通電点の位置図

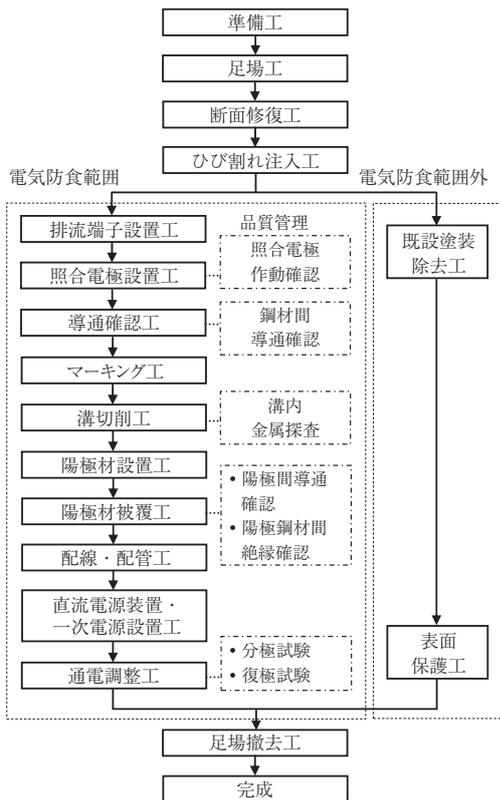


図 - 6 施工フロー

(2) 排流端子，照合電極設置工

排流端子および照合電極は，図 - 5 に示す箇所に設置した。排流端子は，コンクリート中の鋼材に溶接し，照合電極は写真 - 3 に示すように，埋込み式の照合電極を設置した。



写真 - 3 照合電極の設置状況

(3) 導通確認工

断面修復部の全断面を対象として，写真 - 4 に示すようにコンクリートをはつりだした際に排流端子と鋼材を直流電圧計により接続し，鋼材間が導通状態にあることを示す規格値<sup>1)</sup>の1.0 mV 以下にあることを確認した。

(4) マーキング工

陽極設置位置はマーキングを行い，その後写真 - 5 に示すように電磁誘導法により溝切削位置のかぶり深さを測定し，溝切削に伴う鋼材の切断がないように留意した。また，かぶり深さが設計の溝切削深さである15 mmを確保できない場合は溝を拡幅し，線状陽極を従来システムと同

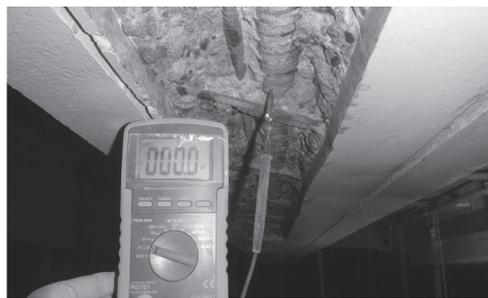


写真 - 4 鋼材間の導通確認状況



写真 - 5 鋼材かぶりの確認状況

様に水平設置するようにマーキングした。

(5) 溝切削工

溝切削は，図 - 4 に示すように幅6 mm程度，深さ15 mm程度となるように，写真 - 6 に示すようにコンクリートカッターを用いた。今回は通常のエアーカッターを用いたが，施工条件や施工規模などの条件に応じて騒音・粉塵対策型的人力カッター<sup>6)</sup>や，専用機器による切削を選択することができる。溝切削，溝内部の清掃を行った後には，鋼材と陽極の短絡を防止することを目的として，写真 - 7 に示すように溝内金属探査を行った。本方法は，露出した金属とコンクリート中に取り付けられた排流端子とが電氣的導通があることを利用して，直流電圧計と接続した金属製のブラシを溝内部に移動させることで，コンクリート中の鋼材の電氣的導通がある箇所を検出するものである。



写真 - 6 溝切削状況

(6) 陽極材設置工

桁底面の陽極設置状況を写真 - 8 に示す。切削溝1本につき2枚の陽極を設置する場合には，陽極同士の接触を



写真 - 7 露出金属探査状況

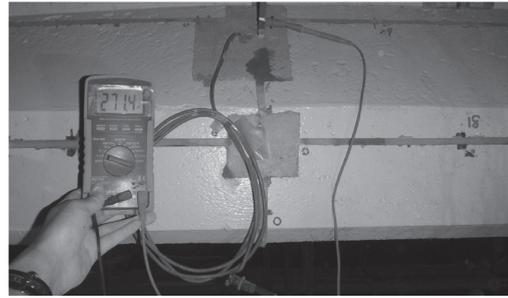


写真 - 10 陽極鋼材間絶縁確認状況

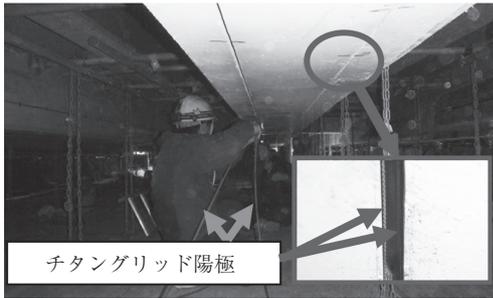


写真 - 8 桁底面の陽極設置状況



写真 - 11 陽極間導通確認状況

避けるため約 300 mm ピッチの間隔にてゴム状のスペーサーを陽極間に埋設した。また溝内の露出金属が検出された箇所は、陽極材に絶縁材料であるブチルゴム系テープを被覆することで陽極材と露出した金属とが接触しないような対策を施した。陽極材の設置後は、陽極とディストリビュータをスポット溶接にて堅固に接続し、陽極間が接続されていることを確認した。

(7) 陽極材被覆工

桁側面の陽極被覆状況を写真 - 9(a)に、桁底面の陽極被覆状況を写真 - 9(b)にそれぞれ示す。陽極被覆材料は、無機系の流動性の高いセメント系のものを使用した。桁側面の充填は、溝の下面に簡易な型枠を設置した後に溝の内部に材料を流し込む方法を用いた。また桁底面は、簡易型枠をセットした後に、写真に示すような圧入ガンを用いた。陽極被覆の完了後には、陽極と鋼材の絶縁を写真 - 10 に示すように通電点と排流端子を接続し、鋼材と陽極が絶縁状態にあることを示す規格値<sup>1)</sup>の 10 mV 以上にあることを確認した。また陽極間の導通は、写真 - 11 に示すように各陽極の先端部と通電点を直流電圧計により接続し、陽極間が導通状態にあることを示す規格値<sup>1)</sup>の 1.0 mV 以下に

あることを確認した。

(8) 配線・配管工

通電点、排流端子、照合電極等の設置位置には、配線とそれぞれを接続するためのプルボックスを設置し、直流電源装置とプルボックス間の配線、配管を実施した。

(9) 直流電源設置工

使用した直流電源装置の設置状況を写真 - 12 に示す。直流電源装置内のユニットは、電気防食による各種の計測を行うための計測ユニット、直流電源装置、測定データを電子メールにて送付するための遠隔監視ユニット、ASR によるひび割れ幅の変化量を測定するための計測用端子から構成される。



(a) 桁側面 (b) 桁底面

写真 - 9 陽極被覆状況



写真 - 12 直流電源装置設置状況

(10) 通電調整工

配線・配管および直流電源装置の設置が完了した後に、防食基準<sup>1)</sup>である 100 mV 以上の電位変化量が得られる電流量の設定を行うために分極試験を実施した。その結果を図 - 7 に示す。ここで分極量は、防食電流を流す前の鋼材の電位と、所定電流を流した際の鋼材のインスタントオフ電位の差である。鋼材のインスタントオフ電位は、電圧

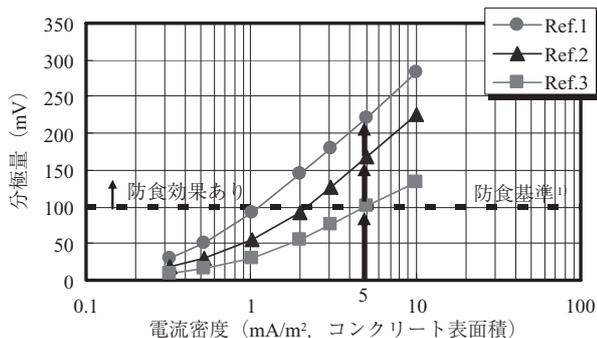


図 - 7 分極試験の結果

降下の誤差を取り除くため、通電を停止した直後に測定する値である。本橋では、防食基準を満足するようにコンクリート表面積に対して 5 mA/m<sup>2</sup> の電流量を設定した。また分極試験から約 1 週間経過後には、通電を一時的に停止し、停止直後の鋼材のインスタントオフ電位と、通電停止から 24 時間後の電位の差（復極量）を測定し、防食基準を確保していることを確認するための復極試験を実施して、工事は完了した。工事完成の状況を写真 - 13 に示す。



写真 - 13 完 成

## 5. 防食効果およびコスト縮減効果

### 5.1 防食効果

電気防食工法は、継続的に通電を行うことで防食効果を発揮する工法であるため、通電開始後のモニタリングが重要である。

本橋では、電源装置内の計測ユニットおよび遠隔監視ユニットにより電流量等の測定を 1 日に 1 回、復極試験も 1 ヶ月に 1 回の頻度で自動計測している。復極量の測定結果を図 - 8 に示す。通電開始後から 3 回の復極量の計測を実施しているが、すべての測定において防食基準である 100 mV 以上の復極量を有しており、十分な防食状態にあるものと考えられる。

### 5.2 コスト縮減効果

本工事の条件にて、従来工法にて 15 mm のチタングリッド陽極を使用した場合に対して、今回提案した新しい陽極設置方法を採用した場合のコスト縮減効果を表 - 2 に

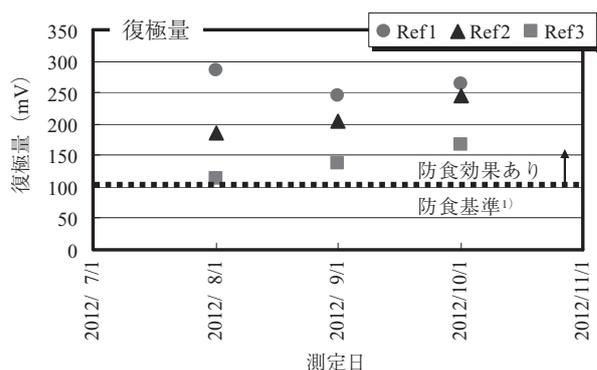


図 - 8 復極量の測定結果

表 - 2 提案内容によるコスト縮減効果

	従来の陽極設置方法	今回の陽極設置方法
陽極設置工費	1	0.82
電気防食全体工費	1	0.86

示す。陽極設置工費では 20 % 程度、電気防食の全体施工費としては 15 % 程度のコスト縮減につながった。

## 6. おわりに

チタン系の線状陽極であるチタングリッド陽極を用いた電気防食工法のコスト縮減を目的として PI-Slit 工法を開発し、陽極の配置方法、溝 1 本あたりに設置する陽極枚数および陽極幅を変更することで、防食効果を確保しつつ電気防食の全体施工費として約 15 % のコスト縮減を可能にした。今後も引き続き品質を確保しつつ、施工技術の向上によるコストの縮減を図っていきたい。

最後に、本工事の発注者である石川県ならびに関係各位の皆様へ多くのご指導とご協力をいただきました。ここに深く感謝の意を表します。

## 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）2001 年 11 月
- 2) 池谷公一，石井浩司，関 博：電気防食における線状陽極の設置方法の開発，土木学会論文集 F，Vol.65，No.1，1-10，2009.1
- 3) 青山敏幸，鴨谷知繁，石井浩司：電気防食に用いる線状陽極の効率的な設置方法に関する検討，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 11 巻，pp.59-64，2011.10
- 4) 青山敏幸，鴨谷知繁，石井浩司：線状陽極を用いた電気防食の陽極設置の合理化に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，pp.1078-1083，2012
- 5) 麻田正弘，青山敏幸，川除達也，団 俊英，中村秀樹，鳥居和之：塩害と ASR の複合劣化した深見新橋の補修 - 電気防食の適用 -，橋梁と基礎（2013 年 4 月号掲載予定）
- 6) 池田政司，鴨谷知繁，青山敏幸，越島広次：線状陽極方式電気防食の溝切削工における騒音・粉塵低減対策について，プレストレストコンクリート工学会第 21 回シンポジウム報告集，pp.405-408，2012 年 10 月

【2012 年 11 月 1 日受付】