

## 塩害橋の再劣化を防止するための維持管理技術に関する研究②

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 26～平 29

担当チーム：材料資源研究グループ

研究担当者：西崎 到、佐々木 巖

### 【要旨】

電気防食工法はコンクリート構造物の塩害対策工法として広く適用されてきているが、近年、電気防食適用中の橋梁で、鋼材腐食に起因するひび割れやはく離などの再劣化が生じている事例も報告されている。

本研究は、電気防食工法の簡便かつ効率的な維持管理手法の確立を目的としている。平成 29 年度は、新たな通電方式として平成 27 年度から実験調査してきた間欠的な通電による電気防食の適用性評価を行った。また、これまでの成果をとりまとめ、電気防食工法の維持管理マニュアル（案）を策定した。

キーワード：塩害、再劣化、電気防食、維持管理、間欠通電

### 1. はじめに

電気防食工法は、コンクリート表面部に設置した陽極材から内部の鋼材に微弱な防食電流を流し、電気化学的に鋼材の腐食反応を制御する工法である。適切な防食が流れている限り、鋼材腐食による劣化の進行を抑制することができる工法として、コンクリート構造物の長寿命化や予防保全といった観点からその有効性が期待されている<sup>1) 2)</sup>。

一方、電気防食工法は比較的大規模な改修を必要とするほか、電流を流し続けるための商用電源の継続供給が課題となるが多かった。また、電気防食を適用している構造物において、鋼材腐食に起因すると考えられるコンクリートのひび割れ、はく離などの再劣化が生じている事例も報告されており、電気防食に適した維持管理手法の確立が必要とされていた。

本研究では、平成 27 年度から、新たな通電方式である間欠的な通電による電気防食の適用性調査を行った。また、電気防食の簡便かつ効率的な維持管理手法の確立を目的として、電気防食工法の維持管理における課題や留意点を抽出した。これらの成果をとりまとめて、電気防食工法の維持管理マニュアル（案）を策定している。

### 2. 新たな通電方式の開発

#### 2.1 間欠的な通電による電気防食の適用性

電気防食工法には、防食電流の供給方法の違いにより、外部電源方式および流電陽極方式がある。コンクリート橋の電気防食では、直流電源装置を用いた外部電源方式が主流である。直流電源装置には電力会社から 1 次側電力を引き込む必要があるが、構造物の立地条件により電源の確

保が困難な場合もある。近年では太陽光パネル等の自然エネルギーの利用が進んでいるが、蓄電池を備える必要があり、防食対象面積が大きくなると電池容量も大きくなるなどの課題がある。また、停電や電池劣化による通電不良に対する維持管理の負担も無視できない。

その一方策として、日照のある昼間のみ防食電流を供給し、夜間は停止する断続的な通電による電気防食工法が考えられる。日中のみの間欠的な通電による防食が可能になると、簡便で使用性が高く、維持管理上の負担も少ない持続的な防食工法になり得る。このため、間欠的な通電で防食が可能となる適用条件の実験検討を行ってきた。

#### 2.2 実験概要

間欠通電による電気防食の適用条件を明らかにするために、温度や湿度、通電における電流量や一日当たりの通電時間などを変化させて、のべ約 200 体の供試体により室内促進試験と屋外暴露試験を行った。実験の要因と水準を表-2.1に示す。

表-2.1 間欠通電の要因と水準

要因	水準
塩化物イオン量	2.4 , 12 kg/m <sup>2</sup> (コンクリート換算)
暴露環境	20℃, 60%RH (乾燥) 20℃, 90%RH 以上 (湿潤), 40℃, 90%RH 以上 (高温多湿) 暴露 (つくば[土研], 仙台[東北大])
通電時間	4, 8 時間/日
目標電位シフト量	100 mV, 50 mV

実験に用いた供試体は、図- 2.1 に示すモルタル供試体であり、供試体寸法は100×100×150mmである。鋼材は、実験期間中に暴露環境温度と湿度の影響を受け易くするため、鋼材かぶりの2カ所が20mmとなるように配置した。モルタルの配合を表- 2.2 に示す。供試体には早強ポルトランドセメントを用い、発錆限界濃度程度である塩化物イオン量(以下、Cl<sup>-</sup>量と呼ぶ)2.4kg/m<sup>3</sup>、および激しい塩害環境を想定して12kg/m<sup>3</sup>となるように、Cl<sup>-</sup>量3.8kg/m<sup>3</sup>および19.2kg/m<sup>3</sup>相当のNaClを、練混ぜ水に混入した。供試体は、打設1日後に脱型し、暴露環境に119日間静置後、図- 2.2 に示すような通電を開始した。

間欠通電による通電中は、図- 2.3 に模式的に示すような鋼材電位の変化が生じ分極と復極を毎日繰り返すが、通電中に周辺の環境が改善されて鉄筋が不働態化することが期待される。

### 2.3 実験結果

腐食環境と通電条件ごとの鋼材腐食減量について、恒温恒湿室で256日間暴露した後の腐食減量率を、各環境条件2体の平均値として図- 2.4 に示す。

無通電供試体では、Cl<sup>-</sup>量が多いほど腐食減量率が大きく、Cl<sup>-</sup>量が同じであれば環境条件が高温多湿であるほど腐食が進行することが確認できる、たとえば、20℃-60%RHではCl<sup>-</sup>量を19.2kg/m<sup>3</sup>(コンクリート換算で12kg/m<sup>3</sup>程度)に設定したため90%RHの3.8kg/m<sup>3</sup>(同2.4kg/m<sup>3</sup>)よりは大きい、同条件の19.2よりは小さい。40℃-90%RHでもその序列は同じであるが、Cl<sup>-</sup>量が多いと激しい腐食が生じており、腐食減量率は非常に高い値となった。

間欠通電で256日間の電気防食を実施した後の腐食減量率は、Cl<sup>-</sup>量3.8kg/m<sup>3</sup>の条件では通電条件にかかわらず腐食減量率が1/2以下になることがわかる、その他の条

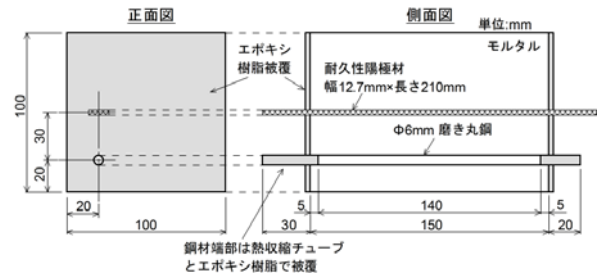


図- 2.1 供試体の概要

表- 2.2 モルタルの配合

W/C (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )			
	W	C	S	Cl <sup>-</sup> (外割)
40.0	264	660	1178	3.8, 19.2

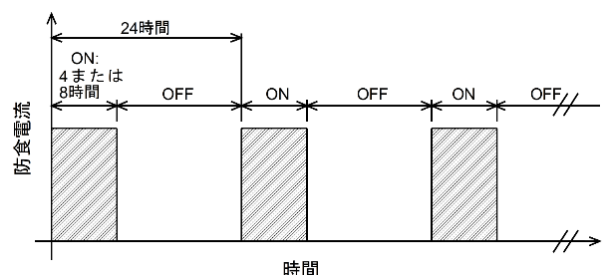


図- 2.2 間欠通電の時間サイクルの概要

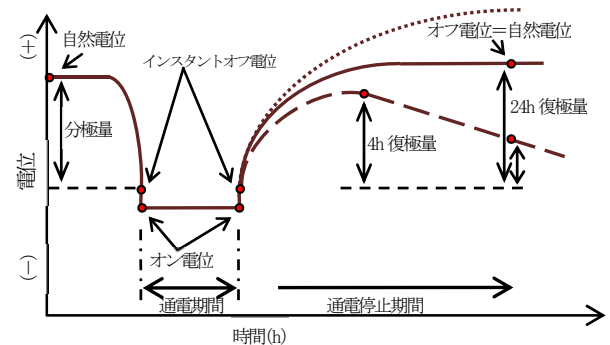


図- 2.3 通電期間と通電停止期間中の鋼材電位の変動

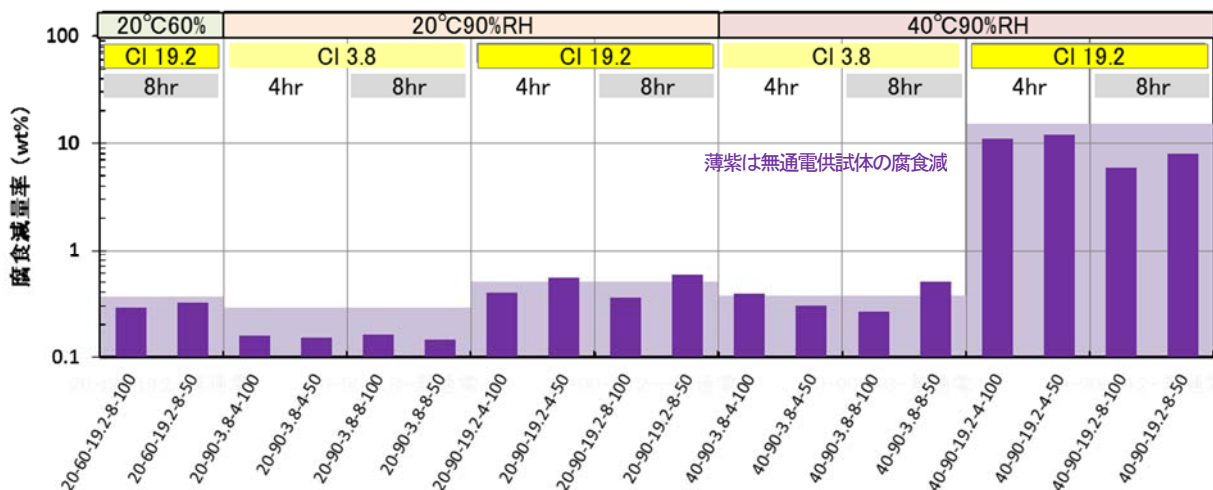


図- 2.4 間欠通電供試体の鋼材腐食減量

件では大きな腐食抑制効果があるとはいえないものの、100mV シフト目標で8時間/日の通電を行った場合には、腐食減量がある程度抑制できる傾向が認められる。なお、40°C-90%-Cl<sup>-</sup>19.2は腐食量の絶対値は大きいものの、無通電の15wt%減に対し8時間通電では7wt%程度に抑制できており、電気防食の効果は認められる。

腐食減量より算出した平均腐食速度について、腐食環境が厳しい40°C-90%RHでの測定結果を例に、平均復極量の関係として図-2.5に示す。不動態状態を得るためには、間欠通電条件では通常の防食基準100mVではなく、数百mV以上の復極量を確保するために大きな電流を流す必要があるものと推察される。前述した腐食減量率の実測値とあわせて、腐食性が非常に厳しい環境では実用的な防食効果は低いとみられる。

間欠通電で大きな復極量が必要となる理由の検討として、通電停止後の電位変化に着目した。間欠通電では停止直後に分極状態から復極が開始するため、データログと照合電極を用いて鋼材電位をモニタリングすることで復極状態を毎日管理する事ができる。

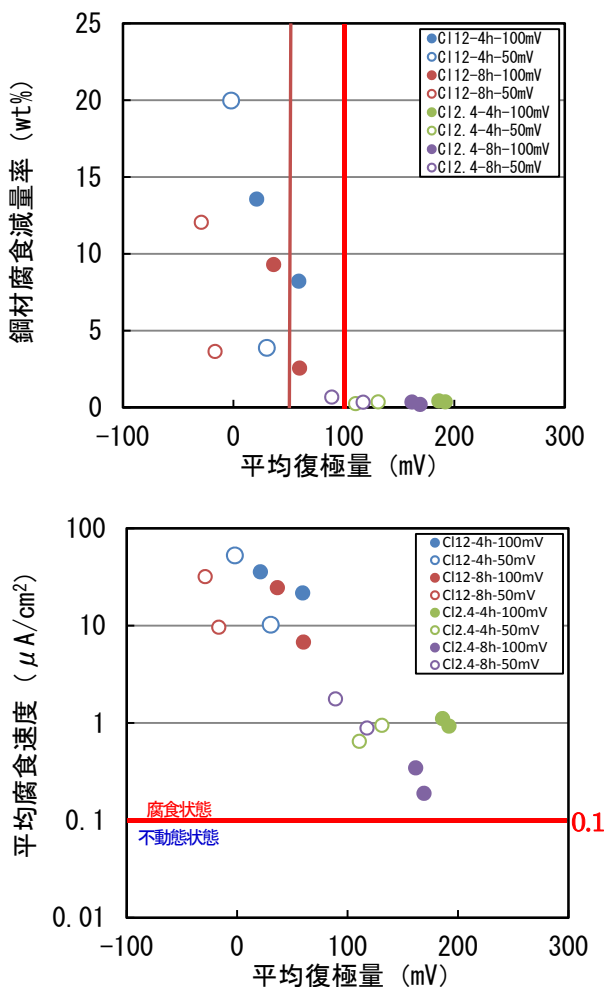


図- 2.5 平均復極量と鋼材腐食の関係(40°C90%RH)

図- 2.2 に、特徴的な復極挙動の例を試験条件ごとに示す、間欠通電では図- 2.2 の実線あるいは点線で模式的に示したような復極挙動をとらないことがあり、特に強腐食条件下では同図に破線で示したように通電停止の直後あるいは数時間で腐食状態に移行している。詳細点検等で復極状態を調べることで、運用時の防食性を確認できることがわかった。

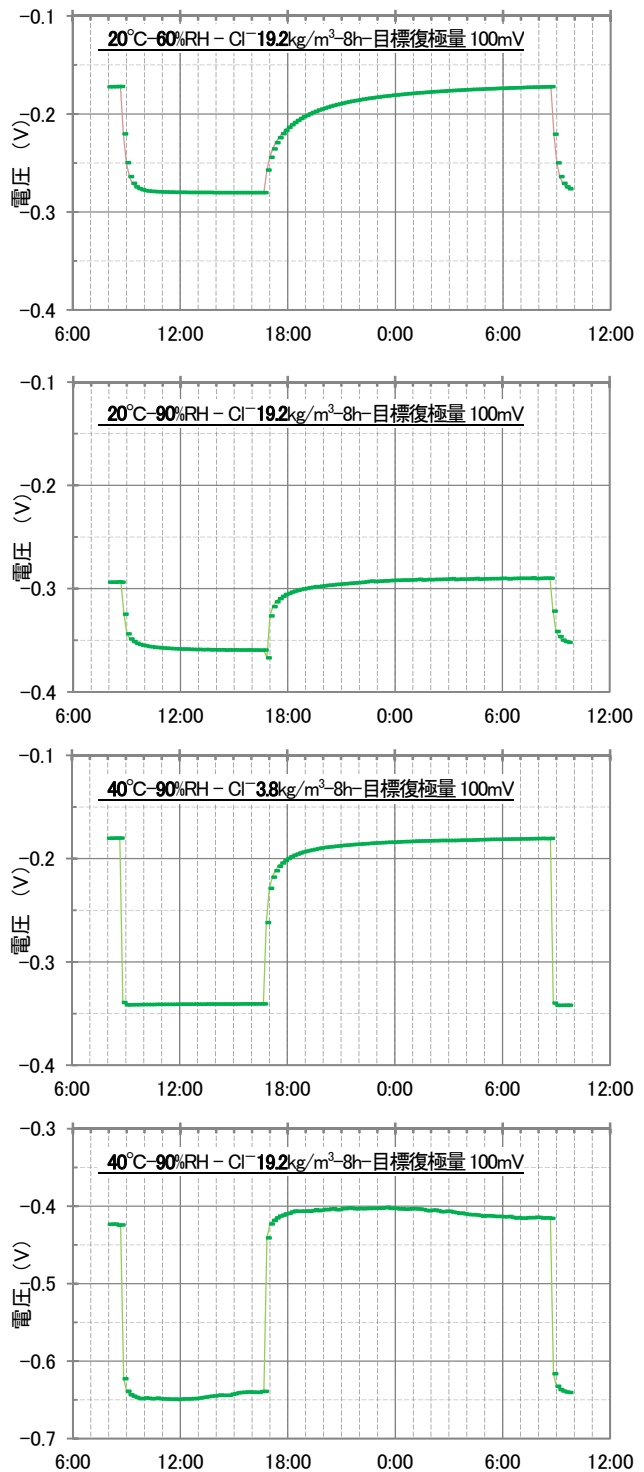


図- 2.6 間欠防食中の電位変動の一例(2017/10/11-12)

### 3. 電気防食工法の維持管理マニュアル（案）の策定

#### 3.1 目次構成

電気防食工法を適用した道路橋を適切に維持管理してゆくための技術資料として維持管理マニュアルを作成した。図-3.1にその目次構成を示す。電気防食工法を適用した道路橋を適用範囲として、1～3章で電気防食工法の概要や維持管理の基本をまとめた。また、4章～7章では各点検の詳細を記述し、8章の遠隔モニタリングシステムや9章の記録に関して記述している。また、付属資料として、本研究で実施した実橋詳細調査の事例を記載している。

#### 3.2 維持管理のポイント

電気防食工法では、防食電流の供給方法が外部電源方式と流電陽極方式によって維持管理上の特徴が異なる。また、陽極システムの設置方法で点検のポイントが異なることから維持管理のポイントをまとめている。

#### 3.3 各種点検

##### (1) 点検種別

電気防食工法を適用した道路橋の電気防食効果を維持するためには、電気防食工法の「稼働状態」と「防食状態」の管理が重要である。主に稼働状態を確認する「通常点検」と、主に防食状態を確認する「初期点検」、「中間点検」、「定期点検」に区分した。また、大規模地震、台風などの偶発的な外力が構造物に作用した場合には、稼働状態を確認する「臨時点検」を設定した。

点検種別の決定にあたっては、道路管理者の馴染みのある点検体系とすることを目的として、道路橋定期点検要領



図-3.1 電気防食システムの点検種別の関係図

表-3.1 点検頻度のまとめ

点検種別	点検方法	マニュアルの変遷	
		H12.12 土木研究所共研	H13.11 土木学会指針
日常点検 (通常点検)	遠望目視 通電確認	1回/6ヶ月	頻度不明
初期点検	計測	—	1年目に2回
定期点検	近接目視、計測	1回/2年	1回/1～5年
中間点検	遠望目視、計測	—	—
詳細点検	近接目視、計測	—	頻度不明

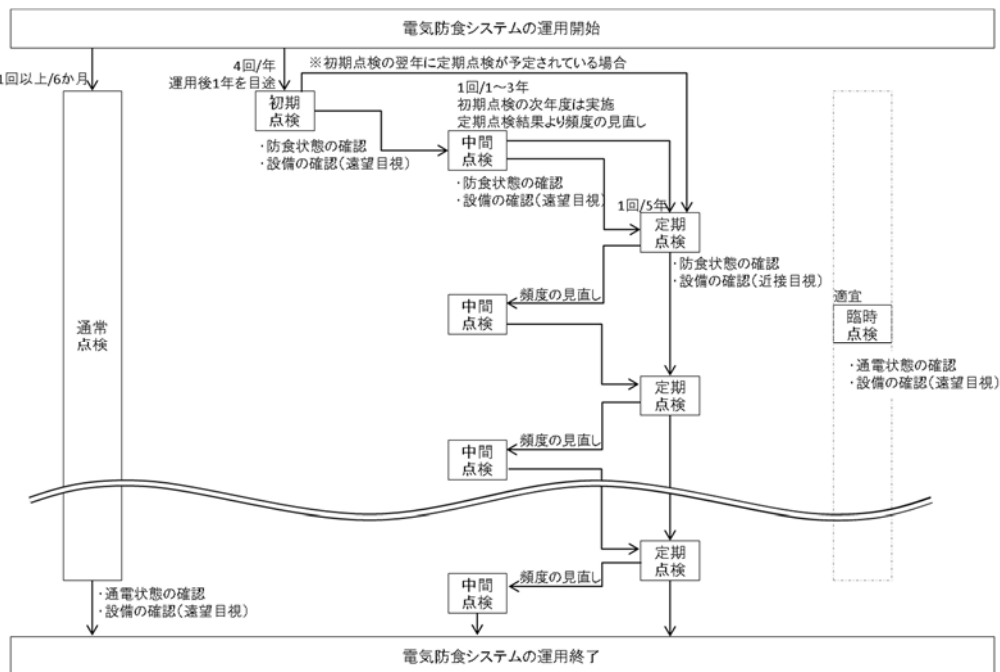


図-3.2 電気防食システムの点検種別の関係図

表- 3.2 点検種別の概要

点検種別	点検目的	実施者	実施頻度	実施内容
通常点検	不適切な稼働状態を早期発見すること	管理者	6か月に1回以上 ※前回「1か月に1回以上」	・稼働状態の確認 ・電気防食システム全体の変状の有無を遠望目視により確認
初期点検	運用開始時の通電条件が適切であるかを確認すること	電気防食工法に関する専門的知識を有する者	運用開始後の1年以内に年4回を標準(最低夏季1回)	・防食状態の確認 ・電気防食システム全体の変状の有無を遠望目視により確認
中間点検	適切な防食状態を維持すること	電気防食工法に関する専門的知識を有する者	1年～3年に1回を標準(夏季実施が望ましい)	・防食状態の確認 ・電気防食システム全体の変状の有無を遠望目視により確認
定期点検	適切な防食状態を維持すること	電気防食工法に関する専門的知識を有する者	5年に1回以上(法定定期点検に合わせた実施が望ましい)	・防食状態の確認 ・直流電源装置および配管等の通電設備、陽極システムの変状の状態を近接目視により確認
臨時点検	災害や事故時に、不適切な稼働状態を早期発見すること	管理者	偶発的な外力が構造物に作用した場合に実施	・稼働状態の確認 ・電気防食システム全体の変状の有無を遠望目視により確認

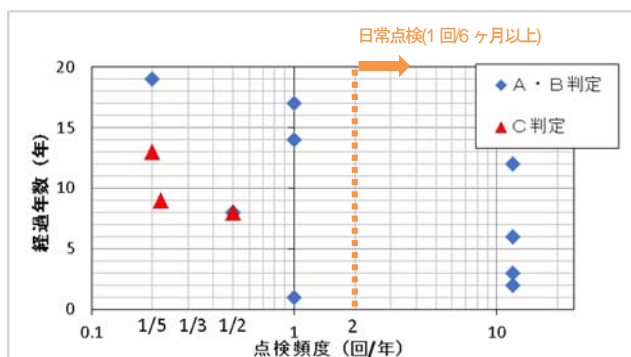


図- 3.3 装置の目視点検頻度と経過年数における点検結果まとめ

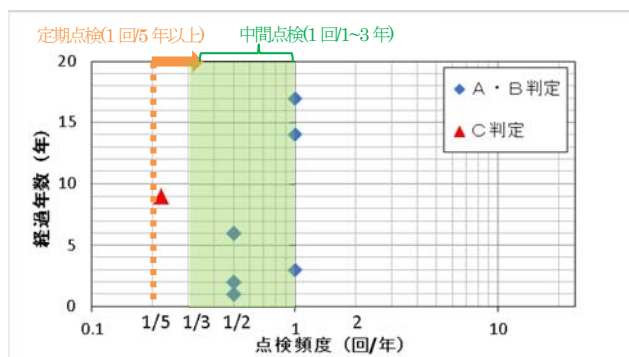


図- 3.4 防食効果の確認頻度と経過年数における点検結果まとめ

③と橋梁の維持管理の体系と橋梁管理カルテ作成要領(案)<sup>4)</sup>を参考とした。表- 3.2 に点検種別ごとに目的、実施者、頻度、実施内容の概要を示す。また、図- 3.2 に電気防食システムの運用開始から終了までの各点検種別の関係図を示す。

(2) 実施者

実施者については、橋梁の管理者が直接点検を行う点検と、電気防食工法に関する専門知識を有する技術者に委託して行う点検として区分けした。そのため、点検種別ごとに日常的・緊急的な簡易点検は「管理者」、計測等の専門的な点検は「電気防食工法に関する専門的知識を有する技術者」が実施することとした。

(3) 点検頻度

1) 点検頻度の設定

点検頻度については、管理者の維持管理負担が過度とならない範囲で効果的な頻度の設定が必要である。点検頻度の決定にあたっては、現状の管理者の多くが採用しているH12 土研マニュアル<sup>5)</sup>、H13 土木学会指針<sup>6)</sup>で設定されている頻度を参考(表- 3.1)とし、後述する検証により効果的な点検頻度と判断されたものとした。

2) 現状の点検頻度の検証

管理者を対象とした管理状況のアンケートと橋梁定期点検の結果をもとに検証した。橋梁定期点検から判定がA(損傷が認められないか、損傷が軽微で補修を行う必要がない)、B(状況に応じて補修を行う必要がある)、C(予防保全の観点から、速やかに補修等を行う必要がある)の橋梁を抽出し、AまたはBとCの判定結果となっている橋梁の点検頻度と電気防食工法の適用からの経過年数の分布をまとめた。

装置等の目視点検に関するものを図- 3.3 に示す。目視点検の頻度が1/2回/年以下、かつ、電気防食設置後の経過年数が7年以上の橋梁で、C判定となっている橋梁が見られる。一方、目視点検を1回/年以上行っている橋梁については、電気防食適用後の経過年数に関わらず、全橋でAまたはB判定となっている。

この装置等の目視点検は、日常点検に該当し、1回/6ヶ月の点検頻度であれば十分にAまたはB判定の範囲に入っている。

防食効果確認の計測点検に関するものを図- 3.4 に示す。計測点検の頻度が1/5回/年かつ、電気防食設置後の経過年数が9年の橋梁でC判定となっている。一方、計測点検を1/2回/年以上行っている橋梁については、電気防食



適用後の経過年数に関わらず、全橋で A または B 判定となっている。

この防食効果の確認は、定期点検と中間点検に該当する。定期点検は、近接目視を伴うため、足場設置などの手間を考慮すると 5 年に一度の橋梁の定期点検に合わせて実施することが現実的であり、頻度を上げることは難しい。そこで、中間点検を 1 回/1~3 年に設定し、防食効果の確認の頻度を増やすことで A または B 判定の範囲に収まるようになる。

現状の点検頻度と健全度判定の検証から、電気防食工法を適用した構造物の健全性を維持するための各種点検の頻度は妥当である。

## 4. まとめ

### 4. 1 間欠通電による電気防食の適用性

間欠的な通電による電気防食は、日照のある昼間のみの通電で防食電流を供給し、夜間は防食電流を供給しない断続的な通電による電気防食工法である。防食機能が確保できる条件において適用すれば、簡便で使用性が高く、維持管理上の負担も少ない持続的な防食工法になり得る。本研究では、平成 27 年度から、間欠的な通電で防食が可能となる適用条件に関する実験検討を行ってきた。

塩化物イオンを含むモルタル中の鋼材に対し間欠通電による電気防食を適用した結果、無防食に対して鋼材腐食を抑制できることを確認した。このことから、間欠通電による電気防食は、供用環境や Cl<sup>-</sup>量に応じて適用すれば、予防保全的な腐食対策として有効であることが示唆された。

しかしながら、十分な防食効果が得られない条件もみられた。今回の室内試験結果では、①復極量が適切にとれ腐食抑制されたもの、②復極量は確保できたが腐食抑制効果は認められなかったもの、③復極が得られず腐食抑制もできなかったものがあった。得られる防食効果には復極の持続性が関わっていると推察される。腐食性が高い環境の場合、通電停止期間に腐食が進行するため、間欠通電による電気防食の適用には持続的な復極挙動が得られることを確認する必要がある。

本研究から、復極挙動から間欠通電の適用条件を見出せることがわかるとともに、運用中の防食性能の確認も可能であることがわかった。屋外暴露供試体は継続中であり、これらの試験結果から、日中のみの間欠的な通電による防食の適用性の検証が可能と考えられる。

### 4. 2 電気防食工法の維持管理マニュアル

強腐食環境条件下でも腐食を停止させることができる

電気防食は、内部に塩分を多く含むコンクリート部材に適用された事例も多い。電気防食工法が適用されたコンクリート橋を、予定された耐用年数まで不具合なく運用するためには、防食電流を必要な箇所安定して流すことが不可欠である。

本研究では、分極測定等の詳細な調査を含む実橋調査結果、管理者や専門家へのアンケート結果も踏まえ、点検の種別や頻度を提案し、電気防食工法の維持管理マニュアルへ反映している。地方整備局や自治体をはじめとした道路管理者の橋梁管理に、本マニュアルを展開し現場での維持管理に役立てることが肝要である。点検管理の着実な実施を達成するためには、照明、情報板、換気設備等の、路線の電気設備の点検管理との一体化による、効率化や省力化も期待される。また、維持管理マニュアルの運用とともに、設計や施工へのフィードバック事項を含めて、橋梁以外の分野や今後予定される学会等での技術資料への反映も期待される。

## 謝辞

本研究は、東北大学、日本エルガード協会、CP工法研究会、土木研究所による共同研究の一環で行われたもので、調査にご協力いただいた関係各位に謝意を表する。

## 参考文献

- 1) ASTM : ASTM C876-91 Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Reinforcing Steel in Concrete、1999
- 2) NACE International Standard Practice : Control of External Corrosion on Underground or Submerged Metallic Piping Systems (SP0169)、2007
- 3) 橋梁定期点検要領 ; 国土交通省、[www.mlit.go.jp/](http://www.mlit.go.jp/)、平成 26 年 6 月
- 4) 橋梁の維持管理の体系と橋梁管理カルテ作成要領 (案) ; 国土交通省、[www.mlit.go.jp/](http://www.mlit.go.jp/)、平成 30 年 3 月現在
- 5) 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的今日に関する研究成果と新設コンクリート今日の電気防食マニュアル (案) - ; 建設省土木研究所材料施工部科学研究室、(社)プレストレスト・コンクリート建設業協会、共同研究報告書静番号第 256 号、平成 12 年 12 月
- 6) 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、2001

## A STUDY ON MAINTENANCE TECHNIQUE TO PREVENT RE-DEGRADATION OF SALT DAMAGED BRIDGES

**Budgeted** : Grants for operating expenses、 General  
account

**Research Period** : FY2014-2017

**Research Team** : Bridge and Structural Engineering  
Research Group

**Author** : NISHIZAKI Itaru、 SASAKI Iwao

**Abstract** : The cathodic protection is one of the effective repair methods of salt damaged structures, which controls steel corrosion electrochemically. However some structures re-degraded by steel corrosion during the application of cathodic protections. The purpose of this study is to establish effective maintenance technique on the cathodic protection by clarifying mechanism of the re-degradation of structures applying cathodic protections. As a new operation for current control of cathodic protection, the applicability of intermittent current operation has been studied since the FY 2015.

**Key words** : salt damage, re-degradation, cathodic protection, maintenance, intermittent current