

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

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】

PC 橋の維持管理において、塩害による劣化損傷は大きな割合を占めている。現在も塩害で損傷した橋梁について電気防食等による補修が進められてきているが、今後も補修の必要な橋梁が増加することが予想される。既設 PC 橋を塩害から守り、長く使用していくための効率的な維持管理を実施するための研究が重要となる。また、新たな電気防食工法の開発が進みつつあり、これらの適用性や耐久性を適切に評価し設計施工に結びつける必要がある。27 年度は、電気防食の維持管理技術の高度化や新技術の評価として、新たな防食システムの活用と適用可能範囲を明確化するために、電気防食工法に関する適用条件を整理するとともに、電源管理の課題を調査した。また、撤去 PC 橋を活用した再劣化機構の解明としての荒磯橋を用いた電気化学的評価、市振海岸で実施中の新たな陽極システムの促進耐久性試験の暴露評価を行った。

キーワード：コンクリート橋、塩害、電気防食、維持管理、新工法

1. はじめに

コンクリート橋の塩害は、進行するとその補修には多大な工数と費用を要する。補修対策技術にはいくつかの選択肢があるが、電気防食は塩分が浸透してしまったコンクリート部材にも有効な工法である。しかしながら、電気防食を適用したものの十分な効果が得られなかった事例もみられる。既設コンクリート橋を塩害から守り、長く使用していくための効率的な維持管理を実施するための研究が重要である。

コンクリート構造物中の鋼材の電気防食工法の技術資料としては、土木研究所が過去に共同研究等で実施した成果をとりまとめた資料^{1) 2)} や、土木学会「電気化学的防食設計施工指針(案)」³⁾ などの規準類がまとめられている。しかしながら、技術開発草創期のものであること、近年の維持管理時代をうけたものではないこと等から、システムの維持管理に関する事項が十分に示されているものとは言えない。さらに、需要の高まりとともに、新しい工法の開発が盛んに行われており、既存の技術資料には示されていない工法もこれまでに多く開発されてきている。太陽電池や充填材をはじめとした新しいデバイスや素材の普及も進んでおり、これらを活用した新たな用途開発も試みられている。

本研究では、まず電気防食の普及や維持管理の課題について文献やヒアリング等から現状分析を行い、昨年度に以下の項目として整理した。

- ・再劣化機構の解明とシステムの信頼性向上
- ・現場に応じた工法選定と新たな技術の活用
- ・維持管理の手法確立と負担の軽減

電気防食工法の普及や新技術の活用においては、既存工法や新たに提案されている工法を、様々な環境や劣化段階にある橋梁に対して適切に使わせてゆく必要がある。さらに、電気防食は運転状態の監視など維持管理の重要性が高いことからその高度化や汎用化が必要である。

電気防食は、防食電流が供給されている限り鉄筋の腐食を抑制できる。しかしながら、電気の状態を目視等で捉えられないこともあり、必要な防食状態を確保できずに再劣化することがあり、これを生じさせない設計と管理が求められる。

新たな陽極システムの耐久性および維持管理方法の検討として、市振海岸で実施中の暴露試験における新たな陽極システムの促進耐久性試験により、電流増大による異常発生時の状況とその影響について調査した。

2. 電気防食工法の類型化と選定資料の整備

電気防食は鋼材の腐食を原理的に抑止できる大変有力な工法であるものの、電位分布や防食電流密度といった電気化学的な設計や保守点検が必要となる。そして、作動状態を正確に把握するために専門的な知識を求められるなど、採用および運用に躊躇する現場の橋梁管理者もいるものとみられる。これは、普及における障壁となる

ばかりでなく、電気防食を採用したにもかかわらず十分な効果が得られないといった、不具合や早期再劣化を誘発する原因にもなりかねない。

橋梁の補修にあたって電気防食工法が検討されるのは、塩害劣化を受けておりその進行が懸念される、あるいはかなり進行しているが今後さらに供用を続けるといった事案も多いと考えられる。この場合、設置位置の塩害環境、構造物の形状や部位、塩分浸透鉄筋腐食等の劣化段階に応じて適用可能な工法から選択して設計を行う必要がある。

一方、電気防食工法には、既存あるいは開発中を含めて数多くの工法がある。電気防食を適用すべき箇所や性能確保が困難な条件を特定し、適用条件を明らかにすることが望まれる。

(1) 電気防食工法の整理と適用範囲

最適な工法を橋梁管理者やコンサルタントが選定できるように、これを支援する情報を提供することが必要である。そのため、個別工法の概要（基本情報）に加えて、工法選定するために有益となる適用上の様々な特徴（どのような箇所に適用するとメリットがあるのか、適用できない箇所はどこであるか）や、施工実績としての耐用年数、コストなどを整理した（図-1）。

- ・工法基本情報：名称、開発者や時期、概要図、施工工程、耐用年数、コスト
- ・適用可能箇所：新設/既設、立地環境、橋梁部位（図-2）、塩化物の状況、鉄筋腐食の段階、既存の防食工
- ・適用事例：施工事例と適用上の特徴、施工実績

(2) 電気防食システムの維持管理と標準化

構造物の管理者には、稼働状態の確認をはじめとした維持管理の手順が明確でない、あるいは専門性が高いことも採用しにくい理由とみられるため、点検手法や機材等を標準化するなどして、維持管理の信頼性向上と負担軽減を進める必要がある。日常点検や定期点検における確認事項を単純化・簡略化・統一化することを目指し、まず、工法ごとに必要となる点検頻度や方法を整理した（表-1）。維持管理においては、状態監視や防食電流管理のための電源装置が要点となるが、その内容は開発業者により異なるのが現状である。一般の橋梁点検担当者が点検を担えるようにするためには、表示装置や確認項目を標準化することが有益である。今後、コンクリート電気防食の電源装置の標準化に向けて調査を行う。

表-1 電気防食の点検頻度と方法の例(工法毎)

目的	項目番号	点検項目	点検頻度			点検方法		
			※別表1参照 日常	※別表1参照 定期	※別表1参照 詳細	※別表3参照、複数箇所可 日常	※別表3参照、複数箇所可 定期	※別表3参照、複数箇所可 詳細
直流電源装置の状態確認	①	装置稼働状態の確認 (表示灯なし・遠隔確認)	1	3		4	4	
	②	筐体の損傷、発熱の確認			8			1
	③	装置内配線および端子の損傷、発熱の確認			8			1
	④	通電電流、電源電圧	3	3		4	4	
	⑤	通電警報の状態確認	1		8	4		1
防食効果確認	⑥	鉄筋電位値 (埋設照合電極)	1	3		4	4	
	⑦	鉄筋電位値 (外付け照合電極)			8			1
	⑧	炭化物		3			4	
制御システムの状態確認	⑨	制御システム変状の有無		6			1	
	⑩	接地電位値		-	-		-	-
防食対象の状態確認	⑪	防食対象部表面の変色やひび割れ、塗汁の有無		6			1	
配線配管材の劣化確認	⑫	配管、配管、ボックス等の損傷の確認		6			1	

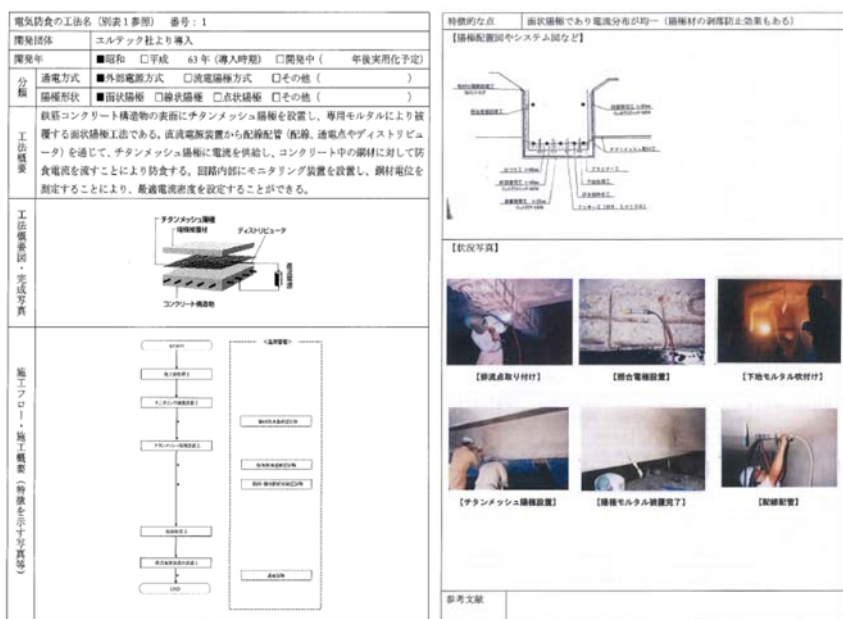


図-1 電気防食工法選定のための技術資料の記載例

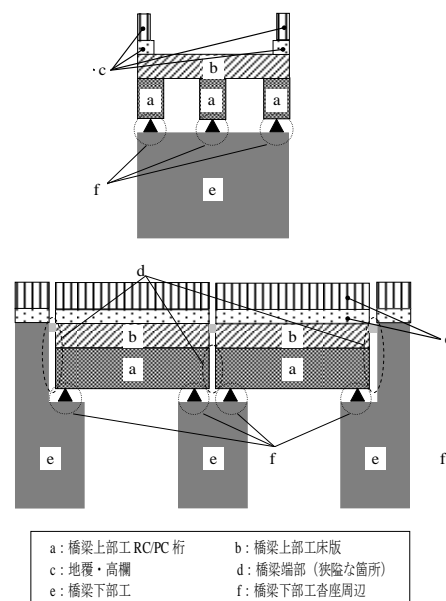


図-2 適用可能な橋梁部位の区分

3. 新しい陽極システムの耐久性評価

コンクリート構造物中の鋼材に対する電気防食工法は、需要の高まりとともに、新しい工法の開発が盛んに行われており、既存の技術資料³⁾などに示されていない工法も多く開発されてきている。このため、塩害環境下にある市振海岸の暴露試験場にこれらの供試体を設置して定期的に追跡調査することにより、陽極システムの耐久性とコンクリート中鋼材の防食効果を検証している。

陽極システムの耐久性は、通電による陽極材の消耗、ならびに関連資材の劣化を評価することにより判断できる。実環境における暴露に、促進通電をあわせて評価予測することが有意義である。本年度は、10年経過後の詳細調査を行うとともに、一部工法について昨年度から行っている促進通電による耐久性評価と維持管理における対策方法の検討を行った。

3.1 試験概要

コンクリート供試体は、高さ600mmのI型断面ポストテンション方式PC供試体ならびに300mm角のRC供試体であり、長さはいずれも5mである。コンクリート中には、塩化ナトリウムを3kg/m³混入した。1992年に製作し、同暴露場に約14年間暴露していたものを用いて、2005年度に電気防食を施工し暴露試験(写真-1)を継続している。

3.2 新しい陽極システム

暴露供試体に用いた陽極システムは、表-2に示す4通りの方式である。

(1) 導電性塗料方式

一次陽極であるプラチナ・ニオブ被覆銅線をウェブ側面および底面の供試体表面に添わせ、その上から二次陽極となる導電性繊維を含んだアクリル樹脂系の導電性塗料をコンクリート表面に塗布することで陽極を形成する



写真-1 新しい陽極システムの暴露試験(市振海岸)

ものである。照合電極には、鉛照合電極を下フランジのハンチ部に2カ所配置した。

(2) チタントレイ方式

トレイ形状のチタン容器内面に陽極材を取り付けた陽極板をチタンねじでウェブ側面および底面に固定し、これに充てん性および導電性を改良した特殊モルタルを注入して陽極を形成するものである。防食効果を確認するための照合電極は、鉛照合電極をウェブに配置した。

(3) 導電性モルタル方式

一次陽極であるプラチナ・ニオブ被覆銅線を供試体表面に添わせ、その上から二次陽極であるニッケル炭素繊維を含むポリマーセメントモルタルを吹き付けることで陽極が形成される。本試験では、PC供試体の両側面と底面に陽極を施工し、直流電源装置を用いてPC供試体の鋼材に防食電流を供給している。施工面積は6m²である。中央部には、二酸化マンガ照合電極を埋設し、施工面はサンドブラストにより前処理を行った。

(4) アルミパネル方式

流電陽極方式であるアルミパネル方式は、アルミニウム系のパネルをバックフィルとアンカーボルトによりコンクリート表面に設置し、犠牲陽極作用により鋼材に防食電流を供給する。供試体中央部に二酸化マンガ照合電極を埋設し、施工面はサンドブラストにより前処理を行った。RC供試体の側面と底面に施工した。

表-2 新しい陽極システムと比較工法

工法の種類	方式	供試体	促進通電
導電性塗料	外部電源方式 電気防食	PC 供試体	○
チタントレイ	外部電源方式 電気防食	PC 供試体 RC 供試体	—
導電性モルタル	外部電源方式 電気防食	PC 供試体	○
(アルミ溶射) アルミパネル	流電陽極方式 電気防食	RC 供試体	—
埋込型亜鉛合金	犠牲陽極方式	PC 供試体 RC 供試体	—
含浸系表面塗装材 浸透性吸水防止材	表面保護	RC 供試体	—

3.3 調査項目および試験結果

新たな陽極システムの耐久性試験は、外観・性能を定期的に調査し、5年経過時に陽極性能に関する詳細な試験を実施し、その耐久性について評価を行っている^{4) 5)}。主な試験調査項目は、鉄筋の電位や復極量、通電電流密度、アノード分極試験、付着強度である。

供試体の暴露試験では、陽極システムの長期間の耐久性評価あるいは異常動作を模擬した促進通電による応答を塩害環境において実証的に評価できる。このため、促進耐久性評価とともに、不適切な運転管理等により過防食となった場合に生じる現象を調べるため、2014年12月から、電気防食システムの促進通電評価を開始した。導電性塗料、導電性モルタルの防食電流密度を2014年8月から大幅に上昇させ、経過を観察している。ここでは、導電性モルタルを用いた電気防食 PC 桁供試体の調査結果を示す。

(1) 10年間の防食状態

今年度に行った10年目までの調査結果から、鉄筋電位および復極量の変化について導電性モルタルの例を図-3, 4に示す。インスタントオフ電位は、試験開始（電流密度 $3.4\text{mA}/\text{m}^2$ ）から2,000日までは-300~400mV、その後、復極量100mVを確保できる範囲で電流密度 $1\text{mA}/\text{m}^2$ 以下に低減させるとやや上昇した。インスタントオフ電位や復極量等から、鋼材の防食状態が保たれていることがわかる。外部電源方式電気防食工法は、防食基準（100mV以上の鉄筋電位の変化量）を満足するように電流を調整すれば、防食状態が確保できることが確認できる。

測定値には、調査を実施した季節により変動がみられるが、これは主に温度の影響であると考えられ、流電陽極式でもその傾向は同様である。電気防食の維持管理における状態監視では、鉄筋コンクリートの温度を考慮して稼働状態を判断する必要がある。

(2) 促進通電による変状

電気防食システムの耐久性を促進的に評価するため、暴露3,255日以降は電流密度を大幅に増大させた。促進通電により鋼材は過防食状態になり、鉄筋のインスタントオフ電位は-700mV以下の低い値を示し経時的な低下傾向を示した。鉄筋のオフ電位は、試験開始から過防食

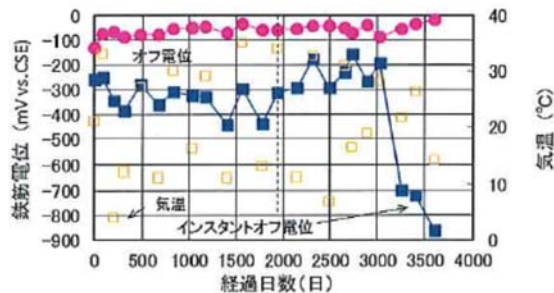


図-3 鉄筋電位の経時変化

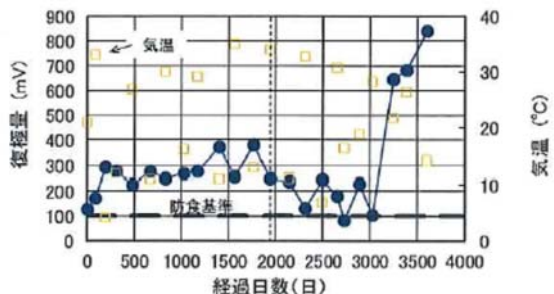


図-4 鉄筋復極量の経時変化

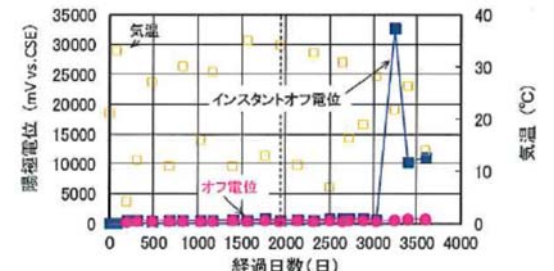


図-5 陽極電位の経時変化

期間を含めて漸増を続け直近で-18mVとなり、電気防食の継続的な適用により鉄筋の腐食環境が改善されていることがわかる。

陽極システムについては、電流密度を大幅に増大させると、その直後の調査において、防食範囲全体に電流を



(a) 9.3年目 (2015年7月)



(b) 9.9年目 (2016年3月)

写真-2 過大な電流密度通電による陽極被覆変状の例(赤褐色変色部を局部補修→再劣化)

配るための一次陽極付近に変色がみられた。これは、一次陽極である白金ニオブ被覆銅線の近傍に大きな電流が流れたためと考えられ、これは2015/7の局部補修後(写真-2(a))の2016/3調査でも再発(写真-2(b))がみられた。陽極のインスタントオフ電位は、図-5に示すように電流増加後30V以上まで上昇したため、変色部を新たな導電性モルタルで補修し、電流密度を10mA/m²に下げたものの、陽極電位の低下はなかった。複数の陽極線でシステムを構成する面状陽極工法の場合、劣化部を部分的に補修しても陽極機能全体の回復には至らない場合があることがわかった。維持管理における維持補修範囲の設定の留意事項といえる。

3.4 今後の試験計画

今後も経過を観察し劣化メカニズムを解明するとともに、28年度に予定している供試体の解体調査において、鉄筋の腐食状態や照合電極の健全性等を詳細に確認する予定としている。

4. まとめと今後の課題

電気防食工法の適用範囲、維持管理基準に関する技術資料の見直し、新工法の探索と実用化、維持管理の負荷軽減につながるような点検基準の提案に向けて、構造物部位や腐食環境、維持管理要件を類型化し、工法の適切な使い分けの資料を整理した。これまでの不具合事例をみると、工法システムの耐久性として、陽極ばかりでなく副資材を含めたシステムの健全性が信頼性の向上に不可欠であることから、その耐久性について検討を加えることも不可欠である。

表面設置型陽極等の新たな電気防食システムの暴露試験において10年間の耐久性評価を行うとともに、暴露後の供試体を利用して過防食や通電中断等の維持管理データを取得した。これらから、電気防食システムの耐久性および劣化メカニズムを明らかにすることにより、維持管理方法等の提案を行う予定である。

参考文献

- 1) 建設省土木研究所ほか：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，共同研究報告第14号，1988.8.
- 2) 建設省土木研究所ほか：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)，共同研究報告第256号，2000.12.
- 3) 土木学会：コンクリートライブラリー107 電気化学的防食工法設計施工指針(案)，2001.
- 4) 井川，佐々木：塩害環境下のコンクリートに対する各種電気防食工法の暴露試験—導電性モルタル方式およびアルミ溶射方式—，土木学会年次学術講演会概要集，2012.9.
- 5) 青山，田代，佐々木：塩害環境下のコンクリートに対する各種電気防食工法の暴露試験—チタントレイ方式および導電性塗料方式—，土木学会年次学術講演会概要集，2012.9.

MAINTENANCE TECHNOLOGY TO AVOID RE-DETERIORATION OF SALT DAMEGED BRIDGES

Budged : Grants for operating expenses General account

Research Period : FY2014-2017

Team : Materials and Resources Research Group

Author : Itaru NISHIZAKI, Iwao SASAKI

Abstract :

Salt damage takes up a larger share in the maintenance of PC bridges. Although cathodic protection works have been applied to salt damage bridges, bridge repair works may increase further in the future. Efficient and reliable maintenance techniques of cathodic protection have to be developed to keep the bridge stocks long time. New materials and devices are developed and applied to cathodic protection systems, and these should be utilized especially for maintenance load reduction, because cathodic protection is based on a bit complicated electrochemical phenomenon. In the FY2015, scope of application, as well as to investigate the problem of the selection of existing technologies, seeds and needs for new technologies were summarized. Moreover, accelerated durability testing on new anode systems was started in the exposure test at Ichiburi coast.

Key words : Concrete bridge, Salt damage, Cathodic protection, Maintenance, New method