

電気防食工法の維持管理の現状と改善に向けて

— 維持管理マニュアルの発刊 —

西崎 到^{*1}・佐々木 巖^{*2}・山口 岳思^{*3}・石田 雅博^{*4}

電気防食工法とその維持管理の現状や課題について、電気防食工法を保有する会社および構造物管理者に対してそれぞれアンケート調査を実施し、主に維持管理における留意点を抽出した。また、電気防食工法を適用した実橋および適用後の変状により撤去された部材の調査を実施し、変状が認められたケースにおける原因を検討するとともに、変状を適切に発見するための維持管理、点検診断の適切な頻度や項目などを検討した。さらに得られた情報を現場の維持管理に活かすための維持管理マニュアルを策定した。ここではこれらの取組みの概要をまとめて解説する。

キーワード：電気防食工法、維持管理、マニュアル

1. はじめに

電気化学的防食工法には、電気防食工法、脱塩工法などが知られているが、なかでも電気防食工法は、コンクリートの鉄筋位置の塩化物イオン濃度が発生限界を超えてしまっている状態であっても、防食電流を流すことによってそれ以上の腐食の進行と停止させる効果を有することから、塩害による損傷が進行してしまったコンクリート構造物の対処方法の切り札的な位置付けであった。

しかし近年、電気防食工法を適用して補修したにもかかわらず、腐食が進行してしまう事例が報告されることがあった¹⁾。このため筆者らは電気防食工法によって補修されたコンクリート構造物の維持管理の実態や、典型的な状況にあるコンクリート構造物の実橋の現地調査を行い、電気防食工法を適用したコンクリート構造物の維持管理の課題を抽出・整理した。そして、これらの調査結果を維持管理の現場に活かすことを目的とした維持管理マニュアルをとりまとめた。本稿では、これらの主たる成果をとりまとめて報告する。なお、この研究は土木研究所と東北大学、日本エルガード協会、コンクリート構造物の電気化学的防食工法研究会の4者による共同研究の成果の一部であり、成果の詳細は共同研究報告書¹⁾により入手できるので、参照されたい。

2. 電気防食工法の現状に関する実態調査

2.1 調査方法

電気防食工法は国内では1980年代の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の開発」において、実橋に試験適用され始めた²⁾。図-1³⁾にコンクリート橋への電気防食工法の施工実績を示すが、現在までの普及の状況がわかる。これまでにさまざまな工法が開発されてきているが、これらの実態を把握するために、電気防食工法を保有する会社にアンケート調査を実施した。

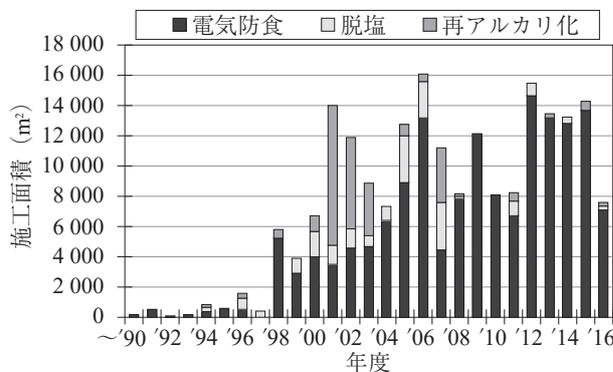


図-1 コンクリート橋への電気化学的防食工法の施工実績³⁾



*1 Itaru NISHIZAKI

(国研)土木研究所
先端材料資源
研究センター



*2 Iwao SASAKI

(国研)土木研究所
先端材料資源
研究センター



*3 Takeshi YAMAGUCHI

元(国研)土木研究所
構造物メンテナンス
研究センター



*4 Masahiro ISHIDA

(国研)土木研究所
構造物メンテナンス
研究センター

また、すでに電気防食工法を適用したコンクリート構造物の維持管理の問題点を見出すために、維持管理を実施している管理者にアンケート調査を実施した。アンケートの対象は、電気防食工法の工事履歴が分かった二百数十件から、国が直轄管理している58件とした。アンケートの設問は電気防食の適用工法諸元、維持管理方法や状況、適用後の不具合状況などである。58件のうち29件（すべてコンクリート橋）について回答を得た。

2.2 調査結果

(1) 電気防食工法の現状

アンケート調査の結果、27の異なる電気防食工法の情報が収集できた。このうち24種類は外部電源方式であり、3種類は流電陽極方式であった。電気防食工法については、「電気化学的防食工法設計施工指針（案）（2001）」⁴⁾において、当時の電気防食工法の情報が収集されているが、今回収集された27工法のうち、上記指針に掲載されているのは14工法であり、13工法の情報が新たに収集された。

27種類の電気防食工法の特徴としては、陽極形状が面状のものと線状のものがおよそ半々であること、メーカーが自己申告している耐用年数としては、陽極システムは外部電源方式で40年、流電陽極方式で10～20年、副材・配線システムについては10～20年、電源装置については10～30年の範囲のものが主であった。また、各工法の1㎡あたりの初期コストは、50,000～70,000円/㎡が7工法、70,000～90,000円/㎡が10工法、90,000～130,000円/㎡が4工法、130,000円/㎡以上が2工法（一部、特別な条件があるため集計に含めてないものあり）であった。

(2) 電気防食工法の維持管理の実態

回答のあった29橋のうち、PC橋はもっとも多く17橋、RC橋は9橋、その他（複合橋など）が3橋であった。また、多くは、1990年までに建設されたものが、27橋とほとんどであった。海岸からの距離が100m以内のものが21橋、うち0mのものが11橋であった。電気防食施工後の経過年数は、表-1に示すように、最近施工されたものから20年以上経過したものまで幅広く分布している。

表 - 1 電気防食施工後の経過年数

経過年数	橋数	割合 (%)
～ 3 年	6	20.7
～ 5 年	6	20.7
～ 10 年	8	27.6
～ 15 年	5	17.2
～ 20 年	2	6.9
20 年以上	2	6.9
計	29	

表-2に、電気防食についての点検状況の回答の結果を示す。回答のあった29橋のうち、約1/3の10橋で、電気防食に関する点検が実施されていなかった。点検を行っている橋梁では、電源ランプの点灯確認と電源装置の目視確認については、大半の橋梁で実施されていたが、点検の頻度が設定されていない橋梁もあった。また、雷雨時の臨時点検については、実施されていない橋梁が12橋あった。

表 - 2 点検状況に関するアンケート調査結果

点検項目	点検実施有り			点検実施無し
	頻度設定無し	頻度設定有り	臨時点検のみ	
電源ランプの点灯確認	2	16	1	10
電源装置の目視確認	3	15	1	
陽極材・配線・配管・プルボックスの目視確認	5	13	1	
電流・電圧量等の確認	8	10	1	
雷雨時等の臨時点検	12		7	

表 - 3 電気防食適用後の不具合に関する調査結果

不具合発生箇所・状況	橋数 (複数回答)
電気防食適用箇所のコンクリートのひび割れ・はく離・はく落	8
電源装置の劣化等による故障	6
モニタリング装置、陽極システム、配線・配管等の異常・損傷	4

これは、これまでの技術資料では雷雨時の対応について言及されていないことが影響していると考えられる。

表-3に電気防食適用後に生じた不具合の内容および件数に関する結果を示す。29橋のうち何らかの不具合があったと回答のあったのは11橋であり、表-3に示すように、適用箇所のコンクリートにひび割れやはく離等の不具合が認められた例がもっとも多かった。その他、電源装置の故障や、モニタリング装置、陽極システム、配線等の異常の事例があった。

表-4に、直近に行われた橋梁定期点検での対策区分判定の結果を示す。緊急対応を必要とする橋梁は無かったものの、判定区分B～Cの、補修を必要とする橋梁が多く見られた。

表 - 4 橋梁定期点検の判定結果

定期点検の対策区分	橋数	割合 (%)
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無い	4	13.8
B 状況に応じて補修を行う必要がある	10	34.5
C 速やかに補修等を行う必要がある	8	27.6
E1 橋梁構造の安全性の観点から、緊急対応の必要がある	0	0
E2 その他、緊急対応の必要がある	0	0
M 維持工事で対応する必要がある	0	0
S 詳細調査が必要である	1	3.4
その他	1	3.4
不明	5	17.2
計	29	

2.3 調査結果の分析

維持管理の実態に関するアンケート調査結果からは、約1/3で電気防食に関する維持管理が行われていないことが明らかとなった。これは、電気防食が機能していることが確認できない状況であることから、不具合の進行を見落としてしまい、重大な損傷に進展してしまう可能性があることとなる。このため、適切な点検項目・方法と点検頻度の

設定が重要であると考えられた。そこで、適切な点検頻度についてさらに検討を行った。前節で示した電気防食に関する不具合事例について、図 - 2 に電気防食を適用してから不具合発生までの期間と件数をまとめて示す。施工後おおむね9～10年が経過したところに、何らかの不具合が発生し始める事例の多いことが分かる。

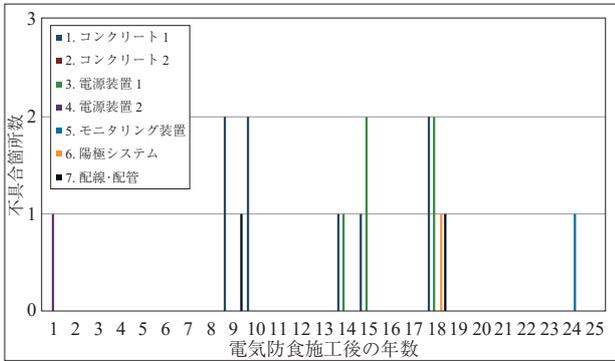


図 - 2 電気防食適用から不具合発生までの経過年数

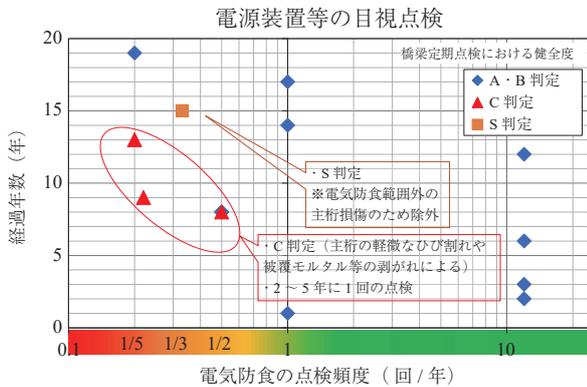


図 - 3 電気防食の点検頻度と判定区分の関係 (主に装置等の目視点検)

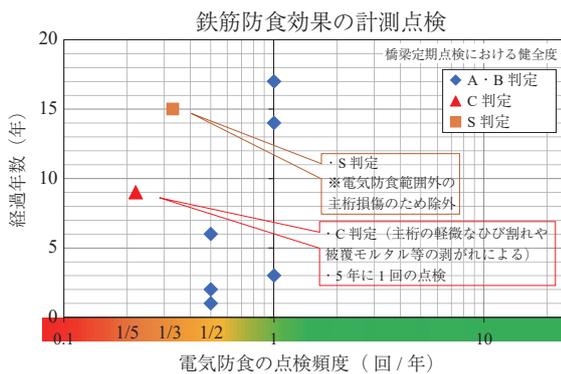


図 - 4 電気防食の点検頻度と判定区分の関係 (主に防食効果確認の計測点検)

道路橋において実施される5年に一度の定期点検での対策区分(表 - 4)と、29橋の電気防食に関する点検の頻度との関連を調査した。点検項目には、その容易さの度合いから、電源ランプの点灯確認、装置等の目視確認など、比較的容易に可能な「主に装置等の目視確認」と、防食電

流量や電圧、鉄筋電位、インスタントオフ電位の確認などの「主に防食効果の計測点検」の二つに分類できる。この二つの点検項目のそれぞれについて、電気防食の点検実施頻度と電気防食設置後の経過年数の相関を、定期点検における判定区分とあわせて整理した結果を図 - 3 と 4 に示す。

図 - 3 より目視点検については、1回/1年より少ない頻度の場合で、経過年数が7年を超える場合に、橋梁定期点検でC判定およびS判定のものが認められていることがわかる。また、図 - 4 より、計測点検については点検頻度が1/2回/1年以上の頻度ではいずれもA判定あるいはB判定となっていた。このことから、目視点検では1年に1回以上、計測点検では2年に1回以上の点検が望ましいとの結果となった。この結果は、これまでに土木研究所が発刊した電気防食に関する技術資料⁵⁾において提案している電気防食に関する標準的な点検頻度(通常点検: 1回/6ヵ月, 定期点検: 1回/2年)とほぼ整合しており、その妥当性が確かめられたといえる。

3. 実橋調査

3.1 供用中の橋梁調査

(1) 調査方法

前節のアンケート調査を実施した橋梁のなかから、維持管理状況が異なる6橋について、現地における概略調査を実施した⁶⁾。このうち、変状の種類や規模、過去の維持管理結果から、変状や不具合の原因を特定できた3橋について、詳細な現地調査を実施した。調査項目は外観調査、通電状況、鉄筋防食状態、コンクリート表面電位分布、電気防食装置の目視確認である。

(2) 調査結果

図 - 5 に調査した3橋の外観調査の状況を示す。

A橋(電気防食適用から15年経過)は電気防食適用部で鉄筋腐食を伴う剥落が生じている。電気防食方式はチタンロッド方式であり、陽極が桁ハンチ部から内部に挿入されているが、陽極配置が設計通りに設置されていないことがわかり、防食電流の供給が適切であるかどうか疑われた。分極量の調査ではおおむね防食基準を満たす100mV以上を示しているが、外観変状を示した桁では分極量が50mV未満と小さい値を示していることから、防食電流の偏りが生じ、部分的な劣化に至っているものと判断できる。

B橋(電気防食適用から18年経過)では試験的に3種類の電気防食工法(チタンメッシュ、チタングリッド、流電陽極)が用いられている。図 - 5 では流電陽極の被覆モルタルの剥落の例を示したが、流電陽極板が耐用年数を超過しており、反りや波打ちなどの変形、パテ材などの剥落が確認された。耐用年数に近づいた場合には、目視点検を強化することが必要であると考えられた。また、チタンメッシュ、チタングリッド方式の部分では被覆モルタルの浮き・剥落などの変状が認められた。チタンメッシュ方式の部分での表面電位による復極量は健全部と同様に高い値を示し、被覆モルタルのはく落の規模が小さいこともあり電気防食効果への影響は小さいと考えられた。

C橋（電気防食適用から9年経過）では主桁や床版でのひび割れが認められている。電気防食方法はチタンリボンメッシュ方式である。干潮部を有する橋脚にも電気防食が適用されているが、この部分に陽極の露出・モルタルの劣化・変色が確認された。通電試験の結果、電気抵抗が低くなる水面付近以下の部位で、電流量が大きくなることが確認されたほか、橋脚部の配管材が脱落したとの履歴が分かっていたことから、防食電流量が不通の部分と、過剰に流れた部分があり、モルタルの劣化の一因となった可能性が考えられた。この結果から、湿潤条件の異なる部位への電気防食における、通電回路の設定や、維持管理における通電確認が重要であると考えられた。

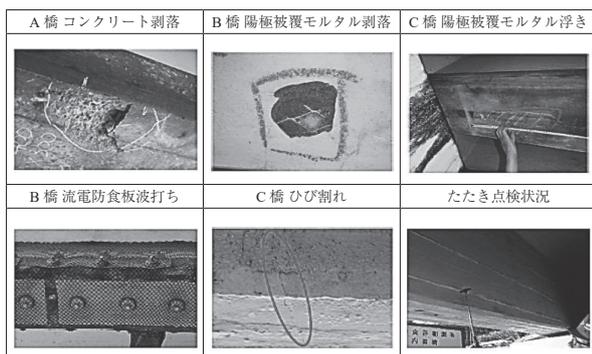


図 - 5 実橋調査で確認された主な外観変状

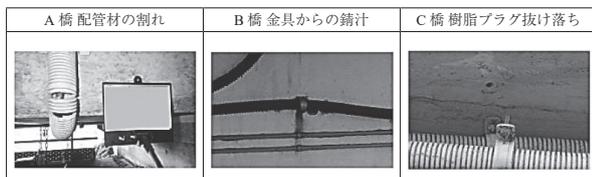


図 - 6 実橋調査で確認された配管材の主な変状

図 - 6 に実橋調査で確認された主な配管材の変状を示す。A 橋およびC 橋では下フランジ曲げ部において配管材の割れが多く確認された。使用されている可とう性を有する波付合成樹脂管（一重管）の経年劣化によると考えられる。また、B 橋では固定金具からの錆汁、C 橋では樹脂プラグの抜け落ちが確認された。配管材の脱落は、断線により防食電流の供給停止を招くおそれがあるため、適切に状況を確認するとともに、変状を確認した場合には早急な対応が必要であると考えられた。



図 - 7 実橋調査で確認された直流電源装置の主な変状

C 橋では直流電源装置が海岸線道路沿いに設置されている。箱体塗装の変色、内部金属部位の腐食、扉ゴムパッキンの劣化などが確認された。図 - 7 に主な変状を示す。

また、管理者による日常点検では、パイロットランプの点灯状況の確認が行われるが、経年劣化によって色褪せ、日中での視認が困難であった。これらは必要に応じて交換することが望ましい。

3.2 撤去橋梁の調査

(1) 調査方法

電気防食を適用して補修したにもかかわらず、防食対象部位の一部においてコンクリート中の鋼材腐食に伴う変状が顕在化した橋梁について、供用期間終了後に撤去された橋のPC主桁を切断、土木研究所に移設し、変状が再び顕在化した原因を解明することを目的に詳細調査を実施した。

元の橋梁は、橋長45.8m、幅員13.8mの2径間単純PCポストテンションT桁橋（6主桁）である。河川上に架設されており、日本海の海岸からの距離は300mであった。冬季の季節風に乗って飛来する海塩の影響を受け、塩害による鋼材腐食が進行し、ひび割れや浮きなどの変状も認められた（とくに山側の桁（G6桁側）で著しい、図 - 8）ことから、供用後39年目に上部工に電気防食（チタンロッド方式）が適用された。しかしその後の変状が再度顕在化したため、49年目に供用期間終了となり、撤去されるとともに、切り出した主桁の一部を本研究の調査に使用した。

調査方法としては、調査対象橋梁のこれまでの腐食状況に関する報告書・図書類や定期点検結果の収集・分析、撤去桁の導通確認や通電試験等による現状把握調査、FEMによる防食効果の評価などを実施した。

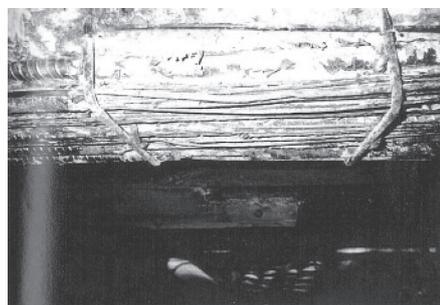


図 - 8 電気防食による補修前の状況（G5桁）

(2) 調査結果

調査対象とした撤去桁は、とくに劣化の著しいG5桁からの切り出した3体と、比較的劣化度合いの少ないG3桁からの1体である（図 - 9）。G3桁では著しい変状は認められなかったが、G5桁（図 - 10）では鋼材腐食に伴うコンクリートの浮きが、下フランジに発生していた。自然電位の測定結果は、G3桁で-350mV程度、G5桁では-450~-550mV程度（vs CSE）であり、ウェブや下フランジ側面よりも、下フランジ底面に腐食傾向が強い結果が得られた。既設の陽極を用いて防食電流を通電する試験を実施した結果、陽極周辺の鉄筋の分極量と比較して、下フランジ側面・底面の分極量が小さい傾向が確認された。重篤な変状が認められたG5桁についてさらなる詳細調査を実施したところ、一部のチタンワイヤーの結線不良が認められた。この部分の特段の導通処理を実施せずに通電を実施し

た結果、防食電流が供給されにくくなる部位が一部に生じた。このような部位で下フランジ底面の損傷が大きいこと、陽極のバックフィル材の消耗が小さいことから、供用期間中も防食電流の供給が少なかったことが推察された。

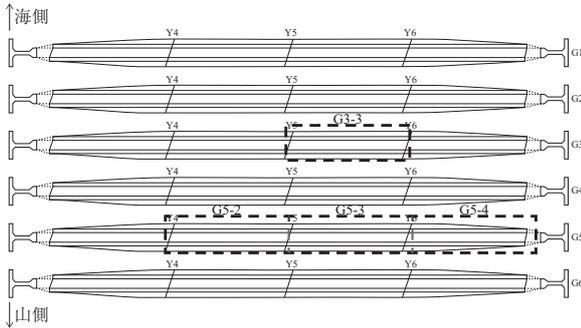


図 - 9 撤去桁の位置



図 - 10 撤去桁の状況 (G5-4 桁)
(天地を逆に静置している)

FEM による防食効果の評価は、撤去桁に対して各種物性値を測定して取得した値を入力値として、有限要素法によって鋼材の分極量分布を算出した。結果の事例を図 - 11 に示す。FEM によりコンクリート中の鋼材の分極量分布を概ね評価できることが確認できた。解析の精度を高めるためには、入力情報となるコンクリートの電気抵抗率や鋼材のカソード分極抵抗に及ぼすコンクリートの含水率分布や温度変化の影響を適切に考慮することが必要であることが示唆された。なお、調査対象橋梁の設計時には、現在の様に高性能な計算機や FEM ソフトウェアを廉価に入手することは困難であったと考えられる。

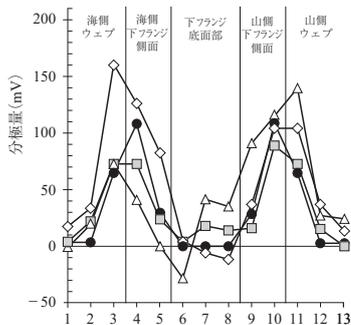


図 - 11 FEM による分極量分布の解析例と実測の比較
(太い実線が解析値、他は異なる時期の実測値)

この調査の結果、対象橋梁の変状の主な原因は、① 陽極からコンクリート中への防食電流供給量の偏在 (下フランジ部への防食電流が少ない傾向)、② 電源装置から陽極への防食電流分配機能の低下 (チタンワイヤーの結線不良) であった。このほかにも種々の可能性が考えられるが、これらの結果を電気防食工法の設計・施工・維持管理の信頼性向上のための留意点として、とりまとめることが重要であると考えられた。

4. 電気防食工法の維持管理マニュアル

4.1 維持管理マニュアルの概要

本研究から、電気防食工法を適用した橋梁には、維持管理において望ましい点検頻度や、電気防食工法に特有の点検項目・留意点などがあることがわかった。このため、これらの知見を、電気防食工法の維持管理マニュアル⁷⁾にとりまとめて発刊した。このマニュアルは土木研究所のウェブサイトより入手可能である。ここではその概要を紹介する。

このマニュアルの章構成を図 - 12 に示す。1 章から 3 章では、道路橋を適用範囲として、電気防食工法の概要や維持管理の基本をまとめた。4 章から 7 章では各点検の詳細を記述し、8 章では遠隔モニタリングシステム、9 章では記録について章を設けて解説している。また付属資料として、詳細調査の事例を記載している。



図 - 12 維持管理マニュアルの章構成

4.2 維持管理マニュアルのポイント

電気防食工法においては防食電流の供給方式が外部電源方式の場合と流電陽極方式の場合で、維持管理上の特徴が異なる。外部電源方式では、日常的に電源装置の稼働状況確認が重要であることや、配線・配管の損傷や陽極材周辺の浮き・剥離・ひび割れ等の変状の目視確認が重要である。

一方、流電陽極方式では直流電源装置の点検は不要であるが、定期的な防食電流のモニタリングは必要であり、陽極の消耗量にも留意する必要がある。なお、陽極材周囲の目視確認が重要なのは、共通の留意事項である。本マニュアルでは、これらの維持管理上の特徴を踏まえた点検のポイントを、さらに詳細に提示している。

また、電気防食に関する点検においては、電気防食工法の稼働状態と防食状態の確認が重要である。これらを適切に確認するための点検種別として、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し、防食電流量の調整も行う「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作用した場合に稼働状態を確認する「臨時点検」も設定した。

これらの点検種別は、道路管理者になじみのある点検体系である道路橋定期点検要領⁸⁾と橋梁の維持管理の体系と橋梁管理カルテ作成要領⁹⁾を参考とした。表 - 5 に各点検種別ごとの目的、実施者、実施頻度、実施内容を示す。

表 - 5 各点検種別の内容

点検種別	目的	実施者	実施頻度	実施内容
通常点検	不適切な河道状態を早期に発見する	管理者	6 か月に 1 回以上	・稼働状態確認 ・電防システム全体の変状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	専門知識を有する者	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 ・電防システム全体の変状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	専門知識を有する者	1 ~ 3 年に 1 回を標準(夏季実施が望ましい)	・防食状態の確認 ・電防システム全体の変状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	専門知識を有する者	5 年に 1 回以上(法定定期点検時が望ましい)	・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を近接目視により確認
臨時点検	災害時や事故時に不適切な稼働状態を早期発見する	管理者	偶発的な外力が構造物に作用した場合	・稼働状態確認 ・電防システム全体の変状有無を遠望目視により確認

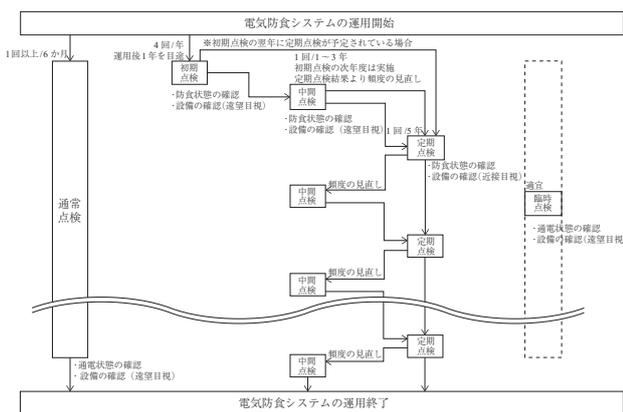


図 - 13 各点検の関連と流れ

電気防食工法に関する点検には、橋梁の管理者が直接実施できる項目と、専門知識を必要とする項目がある。このため点検の実態に適合しやすい様に、日常的・緊急的な比較的簡易な点検は管理者、計測等専門的な点検は、専門的知識を有する技術者に分けている。図 - 13 には各点検の係わりや流れを示す。

5. おわりに

電気防食工法に関する技術資料は、とりまとめられてから時間が経過したものが多くが現状であった。また国内で適用され始めてから 30 年近くが経過しようとしており、適用後の構造物からさまざまな知見が得られつつあった。今回は、これらの知見を電気防食工法の維持管理の向上のための留意点としてまとめる機会が得られた。本成果が電気防食工法の維持管理の効率化・信頼性向上に寄与できれば幸いである。なお、本研究では、電気防食のより効率的適用方法として、間欠通電方式などについての検討も実施している。これらについても報告書¹⁾とりまとめているので、詳細については参照されたい。

最後に、本研究に多大な協力を頂いた電気防食技術保有会社および橋梁管理者、および共同で研究に取り組んで頂いた、東北大学、日本エルガード協会、コンクリート構造物の電気化学的防食工法研究会の各位に謝意を表する。

参考文献

- 1) 共同研究報告書第 502 号, 「電気防食工法を用いた道路橋の維持管理手法に関する共同研究報告書 - 電気防食工法の維持管理の課題に関する研究成果 -」, 2018.7
- 2) 建設省: 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の開発報告書<第一編>, 1988.11
- 3) コンクリート構造物の電気化学的防食工法研究会: 施工実績資料, 2017.
- 4) 土木学会: コンクリートライブラリ 107 電気化学的防食工法設計施工指針(案) 2001.11
- 5) 新設コンクリート橋の電気防食マニュアル(案), 土研共同研究報告書 256 号, 2000.
- 6) 山口岳思, 石田雅博: 電気防食の維持管理における課題抽出を目的とした橋梁調査, 第 32 回日本道路会議論文集, 2017
- 7) 共同研究報告書第 501 号, 「電気防食工法を用いた道路橋の維持管理手法に関する共同研究報告書 - 電気防食工法の維持管理マニュアル(案) -」, 2018.7
- 8) 橋梁定期点検要領; 国土交通省, www.mlit.go.jp/, 平成 26 年 6 月
- 9) 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/, 平成 30 年 3 月現在

【2018 年 9 月 11 日受付】