

報告 道路橋の PC 桁に用いた新しい線状陽極方式電気防食工法の防食効果と維持管理の省力化

真田 修*1・池谷 公一*2・佐藤 正明*3・石井 浩司*4

要旨: 塩害を受けたコンクリート構造物の対策工法の一つに、外部電源による線状陽極方式の電気防食工法がある。中日本高速道路株式会社では、神奈川県西部の相模湾沿岸に位置し、供用後 38 年経過する西湘バイパス滄浪橋の上部構造で線状陽極方式による電気防食における新工法を採用している。一方、電気防食のモニタリングでは、従来から実施してきた現地測定に加え、2008 年度に発注した工事から維持管理の省力化を目的に遠隔監視装置を試験的に導入している。本報告は、短期間であるが新しい線状陽極方式による電気防食の防食効果と遠隔監視システムによる維持管理の省力化に関して論じたものである。

キーワード: PC 桁, 塩害, 電気防食, 線状陽極方式, モニタリング, 遠隔監視, 電位変化量

1. はじめに

一般有料道路西湘バイパスは、太平洋相模湾沿いに位置する 4 車線道路であり、神奈川県大磯町を東端とし同県小田原市風祭を西端とする路線である。そのうち、中日本高速道路株式会社（以下、「NEXCO 中日本」）では、西湘二宮 IC～箱根口 IC 間、総延長 14.5km を管理している。

この管理区間には、橋梁が 14 橋あり、滄浪橋（以下、「本橋」）は最長となる橋長 3.0km の長大橋で昭和 46 年 4 月に供用開始した。橋梁形式は写真-1 に示すように上部構造がポストテンション単純 PCT 桁、橋脚が多柱式 RC ラーメンである。

本橋では、供用後 38 年の間、コンクリート構造物の外観調査、塩化物イオン浸透量調査等を適宜実施し、必要に応じて補修事業を展開してきた。具体的な補修方法として、下部構造では部材表面に鋼材の腐食膨張に伴うひび割れや錆汁などが顕在化した場合には、塩化物イオンの浸透遮断を目的とした表面保護工法、劣化損傷部には鋼材の防錆雰囲気形成¹⁾を伴う表面除去工法および断面修復工法を用いており、PC 構造物である上部構造の桁には鋼材の腐食抑制を図った電気防食工法などの対策を行っている。

特に電気防食工法は、PC 構造物の塩害対策に有効な補修方法であることから、供用後 32 年にあたる 2003 年以降に事業化し、線状陽極方式を採り入れており、随時施工方法の改善・改良に取り組んできた。その一環として、2006 年度から 3 7 年度にわたって陽極材設置方法における溝修復部の更なる品質の向上と施工の省力化などを目的として、新たな線状陽極方式電気防食工法の開発

（以下、「新工法」²⁾）を行い、工事施工を行った³⁾。さらに、平成 2008 年度には、従来の電源装置に変えて、遠隔監視可能な装置へと改良したものを試験的に設置し、監視データの安定性と維持管理の省力化について検討を行っている。

本報告は、施工後 3 年以内という短期間でのモニタリング結果であるが、新工法による防食効果と遠隔監視システムによる維持管理の省力化を論じたものである。



写真-1 滄浪橋立地環境

2. 新工法による施工

2.1 開発の背景・経緯

図-1 に示す本橋の上部構造では、2006 年度以前から下フランジ、ウェブ、上フランジの一部および横桁の鋼材に対して線状陽極方式による電気防食工法を採用してきたが、特に陽極の設置に要する作業において、作業従事者の技量、経験、施工時期、養生方法などによって品

*1 中日本高速道路（株） 小田原保全・サービスセンター 保全担当課長 工修（正会員）

*2 中日本高速道路（株） 東京支社保全・サービス事業部保全チーム サブリーダー（非会員）

*3（株）ニューテック康和 技術部長（正会員）

*4（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 グループリーダー 工博（正会員）

質にバラツキが生じること、かつ溝の切削および修復に要する直接工事費のうち、人的要素が40~45%占めることなどから、更なる品質の向上、恒常的な良好品質の確保、施工の省力化が求められていた。そこで、この陽極設置に注目し図-2のように溝の形状寸法、陽極設置および溝修復材料に関して改良を行った。改良前は図-2(a)

に示すように、切削する溝が大きく陽極材はコンクリート表面に対して鉛直または水平に設置したのに対して、新工法では図-2(b)に示すように切削する溝幅を小さくし、陽極材をコンクリート表面に対して鉛直または一定の角度で設置した。これにより、溝切削に要する時間が短縮され、同時に陽極被覆材の施工が一層確実にいった。

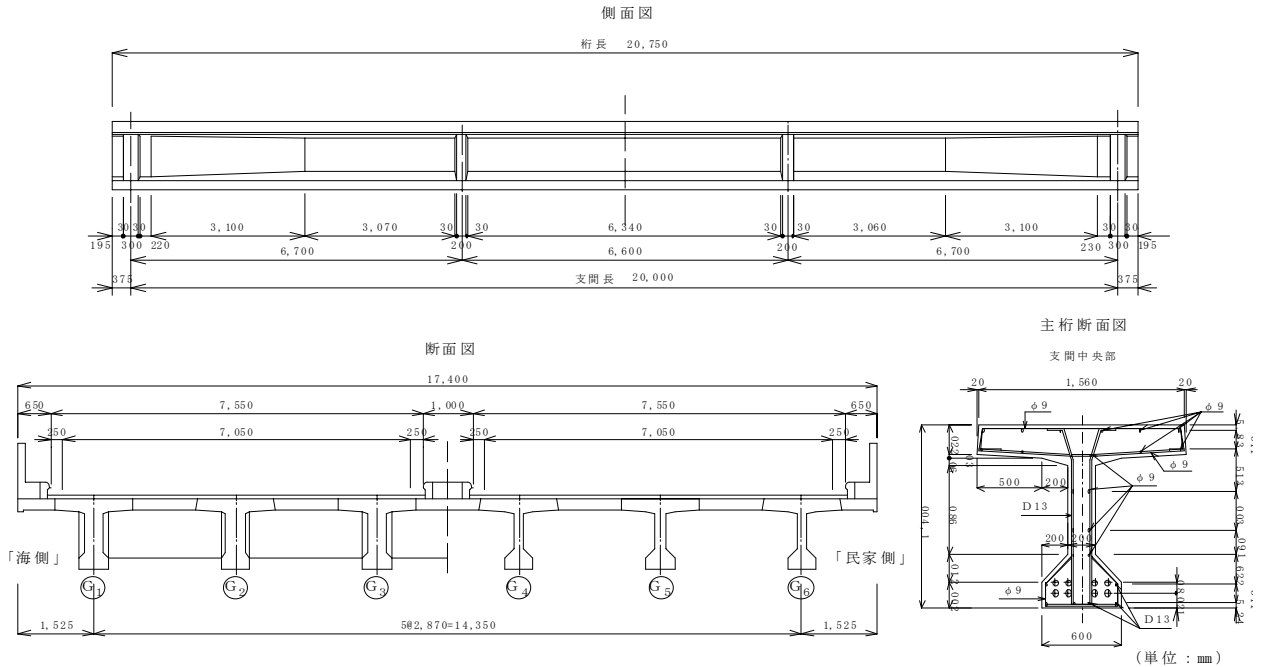


図-1 構造一般図

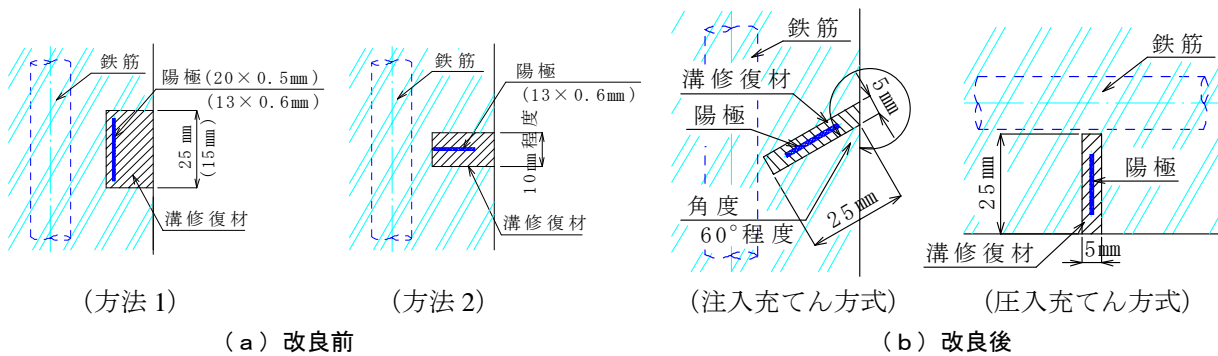


図-2 陽極設置方法の改良

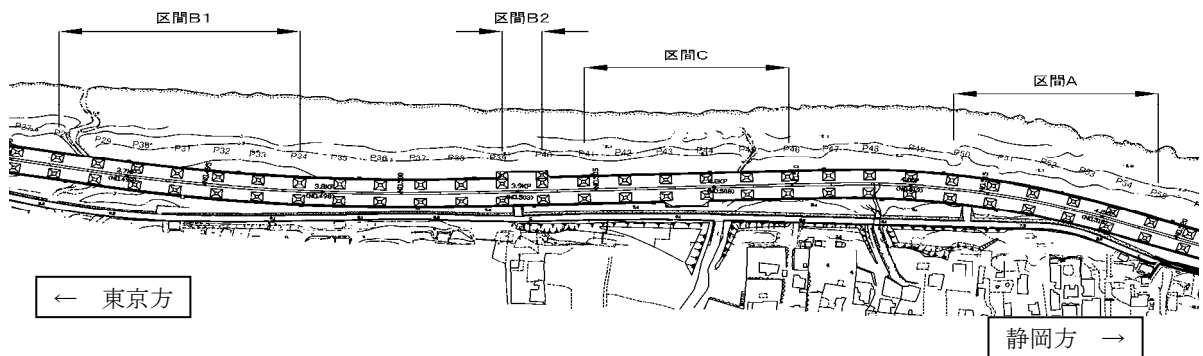


図-3 施工箇所

なお、実物大試験体を用いた実験および防食性能確認試験を行ったうえで施工を行った。⁴⁾

2.2 施工実績

(1) 施工箇所および数量

本橋の上部構造では、これまでに既存の外観調査、塩分浸透量調査、自然電位測定に基づき、径間ごとに塩害劣化の進展状況を把握したうえで補修事業計画の優先順位を設け、多年度計画をたて、随時工事発注してきた。2006年度以降に施工した新工法を用いた箇所を図-3に、各工事単位ごとの施工規模を表-1に示す。なお、防食のための通電は施工終了時から開始している。

表-1 施工数量

区間	施工対象 橋脚番号	施工時期*	防食面積 (m ²)	陽極延長 (m)
A	P50~P55	2006年10月~ 2007年7月	1,515	5,321
B	P28~P34 P39~P40	2007年10月~ 2008年7月	2,613	9,736
C	P41~P43	2008年11月~ 2009年8月	1,990	7,419

*通電開始は施工終了時から開始

3. 点検の目的・計画と実施

3.1 目的および計画

電気化学的防食工法設計施工指針(案)⁵⁾では、「電気防食工法の装置設置後における防食効果を判定するためのモニタリングは、鋼材の防食電位を常時モニターするためコンクリート中に照合電極を埋設することが有効であり、現在最も多く用いられている防食モニタリング方法である。」とし、表-2に示すように一般的な点検頻度の目安を示している。本橋の上部構造で使用している照合電極は、「二酸化マンガ電極」であり、設置箇所は1箇所/桁とし各径間の主桁に配置しており、設置状況を写真-2に示す。

これら照合電極を用いた鋼材電位の計測は従来から現地に出向き行ってきたが、2008年度からは点検頻度の改善や定期点検作業の効率化を図ることを目的に、試験的に遠隔監視システムを採用した。本システムは、現地に設置した装置で自動的に電位等を測定し測定データを電子メールの本文に変換した後に室内のパソコンに配信・グラフ化するもので、その仕様を表-3に、本システムを搭載した直流電源装置を写真-3に示す。これら現地計測および遠隔監視システムによる計測びよるモニタリング内容を表-4に示す。特に測定項目中のインスタントオフ電位および電位変化量(以下、「復極量」)が一般的な防食基準を満足することを確認することとした。

3.2 防食基準及び実施状況

本橋の上部構造でのモニタリング結果を評価判定するために用いる防食基準は、電気化学的防食工法設計施工指針(案)⁵⁾に準拠し、100mV以上の復極量(ΔE)で判定することとし、以下の式(1)にて求め判定した。さらにPC鋼材の水素脆化を避けるために水素発生電位にまで分極していないことを確認した。

$$\Delta E = E_{of24} - E_{io} > 100\text{mV} \quad (1)$$

ΔE : 復極量

E_{of24} : 通電遮断後24時間経過時の電位

E_{io} : インスタントオフ電位

$E_{io} > -1086\text{mV}$ (二酸化マンガ電極基準)

現地計測ならびに遠隔監視システムの作動状況を写真-4および写真-5に示す。

表-2 定期点検実施頻度の目安³⁾

(陸上部・内陸部にあるPC構造物)

構造物の立地環境	点検頻度の目安
陸上部・内陸部	定期点検の頻度を初年度は年2回、以後、初年度の点検結果に基づき1~5年に1回程度を目安に決定することが望ましい。



写真-2 照合電極の設置位置 (一例)

表-3 遠隔監視システムの仕様

項目	内容	
通信方法	方法	電子メール
	頻度	1回、7回/週
監視	防食回路	最大22回路/遠隔監視装置
	モニタリング回路	最大6回路/防食回路
機能	計測内容	電源電圧・電流値の計測 鋼材電位の計測
	計測頻度	1回、2回、4回/日 (通電中、設定) 1回、2回/月 (復極試験、設定)
	設定変更	電子メールによる



写真-3 遠隔監視システム内蔵直流電源装置

表-4 本橋のモニタリング内容

項目	モニタリングの内容と頻度	
	現地計測	遠隔監視システム
現地点検	構造物の状況, 電源装置・配管・配線 巡回目視 2回/年	
測定	方法	直流電圧計を用いた測定 / 自動計測
	項目	電源電圧・電流, インスタントオフ電位, 復極量
	頻度	1回/年 / 毎日, 復極量:1回/月
特記	— / 停電(落雷)等自動検知	



写真-4 現地計測状況 (直流電圧計使用)



写真-5 遠隔監視システム作動状況

4. 電気防食の効果

4.1 モニタリング結果

表-5 に電気防食のモニタリング結果の概要を示し、現地測定結果を図-4～図-6 に、遠隔監視システムによるモニタリング結果を、図-7～図-9 に示しており、各図中のG1～G6 は図-1 に示す位置にある主桁を示している。なお、本橋の上部構造のうち、本結果は、図-3 および表-1 に示す施工終了時から通電を開始した P29～P31 間、P41～P43 間で実施したものを示している。防食効果の判定となるインスタントオフ電位量は図-5, 図-8 に、復極量は図-6, 9 に示すとおりとなった。なお、現地計測した P29～P31 間の G1, G6 桁の結果が記載されていないが、この部分は過去に旧工法により防食されているため本報告の対象外として扱うこととし、記載していない。

4.2 電気防食の作動状況

電源電圧量に関して、表-5 および図-4 に示すように、現地計測による測定では P29～P30 間および P30～P31 間の平均値がそれぞれ 2.80 (V), 2.10 (V) であるのに対して、遠隔監視システムによる測定では表-5 および図-7 に示すように、P41～P42 間および P42～P43 間の平均値がそれぞれ 1.317 (V), 1.801 (V) となり、電気防食供用後 3 ヶ月という短期ではあるが、遠隔監視システムの測定値は現地測定のそれと比較して低く安定した傾向を示していた。

次に、電源電流量に関して、同様に、現地計測による測定では P29～P30 間および P30～P31 間の平均値がそれぞれ 1.95 (A), 1.31 (A) であるのに対して、遠隔監視システムによる測定では、P41～P42 間および P42～P43 間の平均値が 1.761 (A), 1.771 (A) となり、電源電圧と同様な傾向を示していた。

また、一般に PC 構造物ではインスタントオフ電位が卑になるほど PC 鋼材の水素脆化が懸念され、その電位は -1086mV (二酸化マンガン電極基準) が目安⁵⁾とされている。なお水素脆化については、比較的乾燥状態にある条件ではシース外面の防食電位が水素発生電位近傍となった場合でも、シース管内に存在する PC 鋼線は、これよりも貴となり、水素脆化の危険が小さくなることが明らかにされている⁶⁾。表-5, 図-5, 図-8 から、本橋の上部構造では現地計測仕様の電源装置、遠隔監視システム仕様の電源装置共、鋼材のインスタントオフ電位 (E_{io}) は、水素発生電位より貴であることを確認でき、水素脆化の危険性は認められなかった。

本橋の上部構造では、シース管内部の状態を経過観察していなく、定着部の外観調査上も問題なく PC 鋼材の腐食など変状は生じていないものと判断されるが、今後はシース管内部のモニタリングを計画たてることも電気防食性能を判断する上では有効であると考えられる。

さらに、復極量試験に関しては表-5、図-6、図-9 により、現地計測した径間 (P29-P31 間) および遠隔監視した径間 (P41-P43 間) の全ての施工箇所において、 ΔE が 100mV 以上の復極量を確保しており、この結果から電気防食開始後 3 年以内という短期間ではあるが、良好な防食状態にあるものと推定される。

表-5 モニタリング結果の概要

	計測項目	区間	単位	最大	最小	平均
現地計測	電圧量	P29-P30	V	3.5	2.1	2.80
		P30-P31		2.6	1.6	2.10
	電流量	P29-P30	A	1.99	1.91	1.95
		P30-P31		1.36	1.26	1.31
	インスタントオフ電位	P29-P30	V, MgO ₂	-0.374	-0.493	-0.446
P30-P31		-0.359		-0.465	-0.426	
	復極量	P29-P30	V	0.273	0.171	0.232
		P30-P31		0.245	0.151	0.212
遠隔監視システム	電圧量	P41-P42	V	1.474	1.227	1.317
		P42-P43		2.272	1.549	1.801
	電流量	P41-P42	A	1.83	1.75	1.761
		P42-P43		1.79	1.75	1.771
	インスタントオフ電位	P41-P42	V, MgO ₂	-0.36	-0.479	-0.425
P42-P43		-0.404		-0.545	-0.456	
	復極量	P41-P42	V	0.26	0.167	0.226
		P42-P43		0.302	0.196	0.236

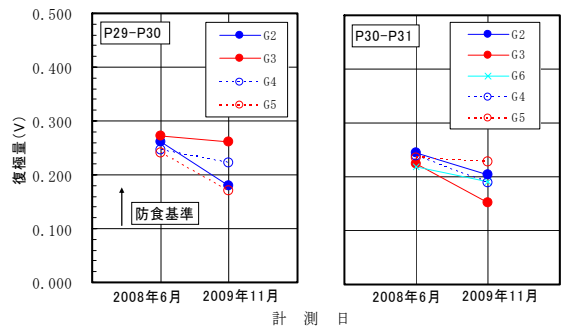


図-6 復極量の現地計測結果

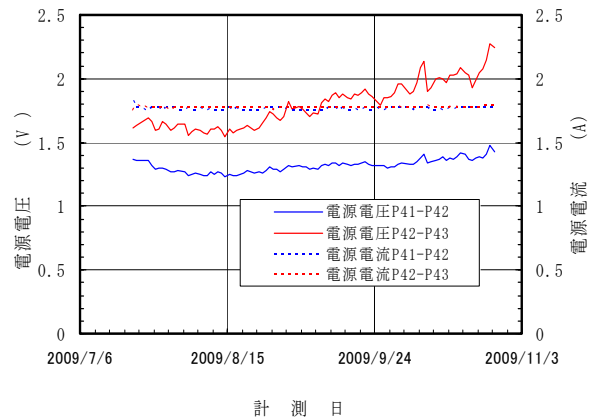


図-7 電源電圧・電流の遠隔監視データ

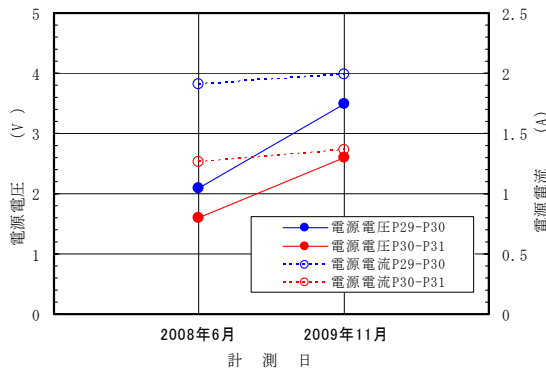


図-4 電源電圧・電流の現地計測結果

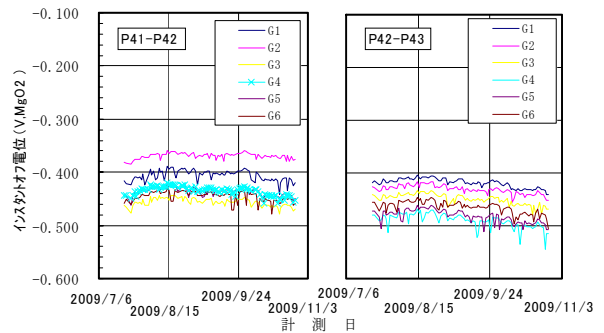


図-8 インスタントオフ電位の遠隔監視データ

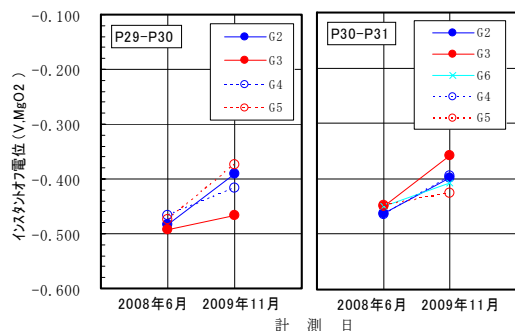


図-5 インスタントオフ電位の現地計測結果

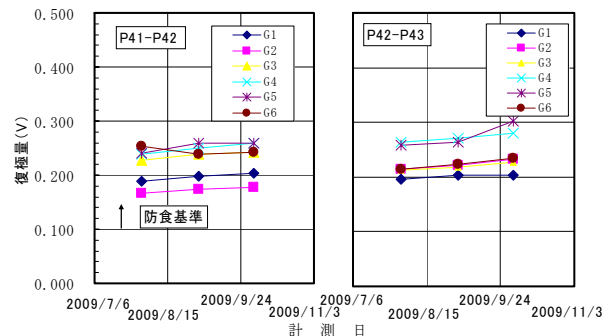


図-9 復極量の遠隔監視データ

5. 維持管理の省力化

写真-1 に示すように本橋は、周辺住民が利用する海岸沿いに建設されていることや夏季から秋季にかけて発生する台風による高波が1年に数十回押し寄せることから、直流電源装置は橋脚上に設置している。さらに、維持管理を簡略化するために1橋脚毎にそれを設置している。すなわち、橋脚に設置した1台の直流電源装置は、橋脚両側の径間の主桁の電気防食を受け持っている。また、本橋は全延長で124径間にも及ぶために、全ての径間に電気防食を適用したと仮定すると直流電源装置は約62台と試算される。

このように数十年間も費やして大規模に電気防食を施工すること、また、その後数十年もの期間にわたり、これらを維持管理することは、我が国において経験が無いことであり、容易ではないと推定出来る。特に62もの橋脚の上部まで登り現地計測を行うことに多くの人的要素が必要であること、電気防食の作動に関する異常、不都合を発見することにも労力を費やすことは容易に推定できる。

これらの課題を早期に解決するために遠隔監視システムを試験的に採用した。本格的な採用にあたり①安定したシステム作動、②容易なシステムの操作性と拡張性、③費用対効果に優れる、などを検討しておく必要がある。

試験的に採用したシステムは電子メールを利用したもので定期的に鋼材電位の測定や復極試験を実施し、その結果を自動配信するもので電流値の調整等を行わない。比較的短い期間であるが図-7、図-8、図-9に示す結果から、システムの安定性には問題はないと考えられる。また、データ取得の頻度などその設定のプログラミングによりきめ細かい管理が可能であるとともに、比較的電氣的知識を持たないインハウス技術者でもデータ管理を携わることができ省力化が図れることが確認できた。

計測頻度に関し、遠隔監視システムは試験的に採用していることから、監視開始後毎日連続的にデータを取得しているが、今後はデータの安定性を確認しながら、表-2に示す定期点検実施頻度の目安程度に見直していくことを視野に入れている。従って、今後は長期間にわたるシステムの安定性の検証やコストを考慮した維持管理計画立案の必要性が課題として考えられる。

6. まとめ

本検討により以下が明らかになった。

- (1) 比較的短期なモニタリングではあるが、新工法施工箇所でも適切な防食性能を保持していることが確かめられた。
- (2) 現地計測によるモニタリングに比べ、遠隔監視システムによるモニタリングは、実施期間が比較的短い、システムの安定した作動が確認できたと共に、その防食性能を評価する上では遜色ないことが確かめられた。
- (3) 今後、長期的なモニタリングの実施継続にあたり、遠隔監視システムを導入していくことが将来的な省力化に繋がるものと推定された。

本報告が、今後、塩害環境下にある電気防食工のモニタリング技術の普及および発展の一助となれば、幸いである。

謝辞

本論文作成にあたり、早稲田大学理工学術院社会環境工学科の関博教授、大成エンジニアリング株式会社の波多野幹氏にはご助言をいただきました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 中日本高速道路株式会社：設計要領第二集橋梁保全編，pp. 3-44-3-51，2008. 8
- 2) 国土交通省：新技術情報提供システム，登録No. KT-090033-A
- 3) 池谷 公一，佐藤 正明，石井 浩司，関 博：新工法による線状陽極方式電気防食の施工—西湘バイパス滄浪橋塩害補修工事—，コンクリート工学，Vol. 46，No.11，2008. 11
- 4) 池谷 公一，石井 浩司，関 博：電気防食工法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，pp. 1-10，2009. 1
- 5) 土木学会：電気化学的防食工法 設計施工指針（案），2001. 11
- 6) 峰松敏和，堺孝司，池田勝日輝，石川光男：水素発生領域におけるプレストレストコンクリートの電気防食，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 16，No.1，1994