

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①

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：橋梁構造グループ

研究担当者：石田 雅博、山口岳思

【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、平成 29 年度は、平成 27 年度に詳細調査を行った 3 橋梁のうち 1 橋に対して追加調査を実施し、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

1. はじめに

電気防食工法は、コンクリート表面または表層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。適切な防食電流が流れている限り、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、電気防食工法は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^{1) 2)}。

一方、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、電気防食の維持管理における課題も懸念されている。

本研究では、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、橋梁を対象に調査を行っ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ていく。平成 29 年度は、平成 27 年度に詳細調査を行った 3 橋梁のうち 1 橋に対して追加調査を行った。また、これらの成果と電気防食工法を適用した道路橋の管理者へのアンケート結果をもとに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. 調査概要

2.1 調査橋梁の選定

平成 26 年度の研究で、電気防食工法を適用している直轄橋梁 58 橋に対してアンケート調査を実施し、回答の

表-2.1 調査対象橋梁の概要

項 目		A 橋	B 橋	C 橋
橋梁諸元	所在地	東北地方 日本海沿岸	北陸地方 日本海沿岸	九州地方 太平洋沿岸
	竣工年月	1976(昭和51)年10月	1974(昭和49)年4月	1963(昭和38)年4月
	構造形式	2径間単純PCT桁橋 (6主桁:海側G1→陸側G6)	17径間単純PCT桁橋 (11主桁:海側G1→陸側G11)	2径間単純RCT桁橋 (5主桁:海側G1→陸側G5)
	橋長L・全幅員W	L=39.2m・W=10.8m	L=340.02m・W=11.35m	L=30.0m・W=9.2m
	桁下状況	河川(約4.2m下)	砂浜(約5.2m下)	河川および砂浜(約2.8m)
	海岸からの距離	約800m	約20～40m	約20m
電気防食	適用年度	1999(平成11)年	1996(平成8)年	2006(平成18)年
	適用時の劣化過程*	加速期前期	加速期前期	加速期前期
	適用箇所	主桁下フランジ	主桁下フランジ(第8径間)	主桁, 床版, 橋脚
	電防方式	チタンロッド(点状)方式	a: チタンメッシュ(面状)方式 b: チタングリッド(線状)方式 c: 亜鉛シート(面状流電)方式	チタンリボンメッシュ (縦置き線状)方式

* 劣化過程＝電気防食適用時の推定劣化進行過程(コンクリート標準示方書【維持管理編】準拠)

表-2.2 追加調査項目

調査橋梁	B橋		
	(a)	(b)	(c)
電気防食方式	チタンメッシュ(面状)方式	チタングリッド(線状)方式	亜鉛シート(面状流電)方式
電源方式	外部電源方式(定電流)	外部電源方式(定電圧)	流電方式(定電圧)
(1) 通電状況・復極量調査	①電圧・電流の計測(電源装置表示値の確認, テスター等による直接計測) ②埋設照合電極による復極量計測(通電停止後24時間経過後) ③過年度調査結果との比較		
(2) 不具合調査	鉛照合電極不具合調査	被覆モルタル浮き部調査	亜鉛シート消耗量調査
調査範囲	第8径間 G3桁	第8径間 G5桁	第8径間 G9桁

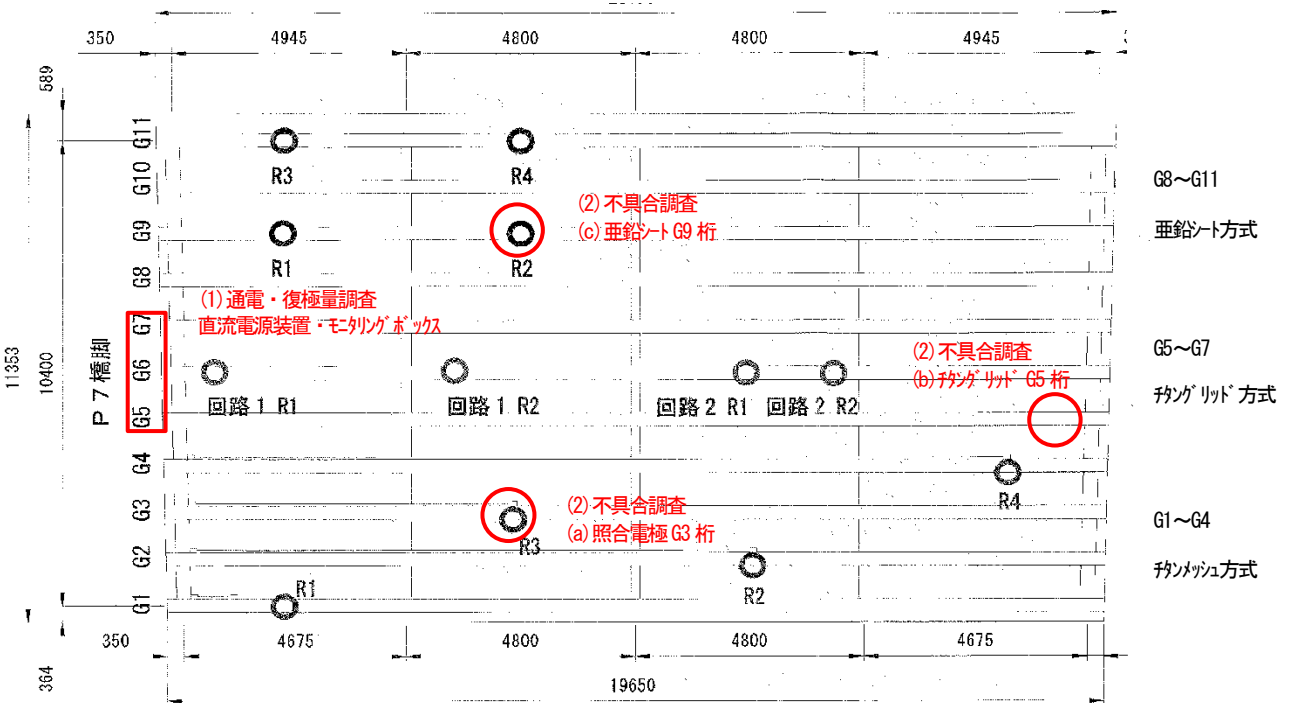


図-2.1 調査実施位置図

あった29橋の中から6橋の調査対象橋梁を選定した。

平成27年度は、6橋について現地で概略調査を行い、表-2.1に示すように、構造物の変状や電気防食システムにおける不具合状況などを考慮して3橋を選定し、詳細調査を行った。本年度はこの3橋のうちB橋で確認された不具合に関して追加調査を実施した。

2.2 追加調査項目

対象としたB橋は同一橋梁で3種の電気防食工法を採用していることが特徴であり、それぞれの電気防食工法において追加調査の実施項目を表-2.2に、実施位置を図-2.1に示す。

(1) 通電・復極量調査

各電気防食工法において、電圧・電流の調査と埋設照合電極による復極量計測を行った。また、これらの調査は過年度も実施しており、比較を行った。

(2) 不具合調査

過年度実施した調査において、各電気防食工法で確認された不具合に関して以下に示す調査を行った。

(a) 鉛照合電極不具合調査

チタンメッシュが採用されている4つの桁のうちG3桁に埋設されていた照合電極の不良が確認され、照合電極までの結線状況の調査を行った。

(b)被覆モルタル浮き部調査

桁下面部の打音検査により、チタングリッド施工部に浮きが確認されている。この浮き部をはつり調査を行った。

(c)亜鉛シート残量調査

過年度の調査により防食効果は持続されていることは確認されているが、亜鉛シートは耐用年数 15 年の製品に対して、追加調査時は約 21 年経過している状況であった。そこで、現状の確認のため、亜鉛シートの消耗量調査を行った。

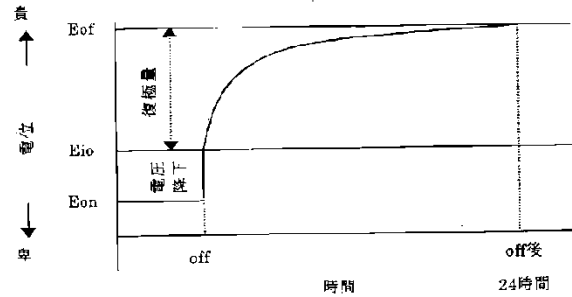


図-3.1 復極量試験概念図

表-3.1 復極量試験計測結果

a				b				c			
チタンメッシュ(面状)方式				チタングリッド(線状)方式				亜鉛シート(面状流電)方式			
照合電極	Ins. OFF	OFF 電位	復極量	照合電極	Ins. OFF	OFF 電位	復極量	照合電極	Ins. OFF	OFF 電位	復極量
R1	-605	-264	341	R1-1	-677	-290	387	R1	-549	-215	334
R2	-619	-158	461	R1-2	-684	-326	358	R2	-478	-207	271
R3	-590	-145	445	R2-1	-725	-497	228	R3	-648	-256	392
R4	-708	-234	474	R2-2	-770	-451	319	R4	-505	-254	251

※飽和硫酸銅(CSE)基準に換算

※チタンメッシュ R3 は材齢 28 日以降の調査時の Eio 電位を記載(照合電極健全性確認後の分極した値)

3. 通電・復極量調査

3.1 通電・復極量調査

図-3.1 に概念図を示す復極量試験を実施し、測定結果を表-3.1 に示す。各図-3.1 方式全ての照合電極において復極量は防食基準である 100mV 以上の電位変化量を得られていることが確認された。また、インスタントオフ電位は水素脆化の懸念される -1,000mV より貴であり、適正な範囲での通電が行われていることを確認した。

3.2 過年度との比較

B橋の電気防食方式は、外部電源方式(定電流、定電位)、流電陽極方式の 3 方式が適用されており。それぞれ方式において、測定時期(温暖時、寒冷時)の違いによる特性を確認した。

(a)チタンメッシュ(面状)方式

(1)寒暖による特性

測定結果の比較を表-3.1 に示す。チタンメッシュ方式は定電流方式であり通電電流は一定値を示していた。前回(温暖時)と比較して電圧の増加、インスタントオフ電位の卑化および復極量の増加していることが確認された。

(2)考察

- 1) 定電流のため、寒冷時に回路抵抗が増加したことによる電圧の増加、また、鋼材の分極抵抗が増大したことにより分極量が大きくなり、インスタントオフ電位の卑化や復極量の増加していることが確認された。
- 2) 気温の低下や乾燥によるコンクリート抵抗の増加、また、アノード反応に必要な水分の不足による陽極分極抵抗の増加等から、回路全体の抵抗が増加したものと考えられる。
- 3) 定電流通電の場合、温暖時は復極量が不足する傾向にあり、寒冷時は回路抵抗の増加により復極量が大きくなるため、特に通電初年度に各季節での測定を実施した上で、年間を通じて防食効果を満足できる適正な通電量を設定しなければならない

(b)チタングリッド(線状)方式

(1)寒暖による特性

測定結果の比較を表-3.3 に示す。チタングリッド方式は定電位方式であるため、鋼材電位は一定値を示していることが確認された。また、前回(温暖時)と比較して電圧は一定であるが、電流が大幅に低下していることが確認された。なお、H27/11 と H29/02 の復極量の比較は、測定

表-3.1 通電結果の比較(a)チタンメッシュ(面状)方式

		H27/06 (概略調査)			H27/11 (詳細調査)			H29/02 (追加調査)		
気温		21℃			17℃			4℃		
電流		100mA			107mA			110mA		
電圧		1.76V			1.89V			2.61V		
測定時間		----			23時間測定			48時間測定		
照合電極		Ins.OFF 電位	OFF 電位	復極量	Ins.OFF 電位	OFF 電位	復極量	Ins.OFF 電位	OFF 電位	復極量
R1		-458	-259	199	-481	-245	236	-605	-264	341
R2		-427	-130	297	-489	-125	364	-619	-158	461
R3		----	----	----	----	----	----	-590	-145	445
R4		-487	-262	225	-595	-263	332	-708	-234	474

※飽和硫酸銅 (CSE) 基準に換算

※インスタントオフ測定時の気温は気象庁データ新潟県能生より

※H27/06, H27/11 測定データは土研測定データより

※H29/02 における R3 は材齢 28 日以降調査時の IO 電位を記載

表-3.3 通電結果の比較(b)チタングリッド(線状)方式

		H27/06 (概略調査)			H27/11 (詳細調査)			H29/02 (追加調査)			H29/03 (再追加調査)		
気温		21℃			17℃			4℃			8℃		
電流		----mA/----mA			73mA/39mA			33mA/15mA			33mA/15mA		
電圧		----V/----V			2.68V/1.99V			2.42V/1.65V			2.69V/1.82V		
測定時間		----			23時間測定			48時間測定			2時間測定		
照合電極		Ins. OFF	OFF	復極量	Ins. OFF	OFF	復極量	Ins. OFF	OFF	復極量			
№1	R1	-726	-308	418	-691	-314	377	-677	-290	387			
	R2	-668	-333	335	-664	-345	319	-684	-326	358			
№2	R1	-754	-518	236	-731	-522	209	-725	-497	228			
	R2	----	----	----	-676	-479	197	-770	-451	319			

陽極被覆モルタル浮き部調査のため測定していない

※飽和硫酸銅 (CSE) 基準に換算

※インスタントオフ測定時の気温は気象庁データ新潟県能生より

※H27/06, H27/11 測定データは土研測定データより

時間に違いはあるが同様な値が得られており、測定時期(気温)の影響は少ないことが確認された。

(2) 考察

- 1) H29/02, H29/03 (寒冷時) には通電電流の低下はあるものの、H27/11 と同程度の復極量が得られていることが確認された。
- 2) チタングリッド方式は定電位方式で通電されており、寒冷時は回路抵抗の増加により発生電流が低下したものと考えられる。
- 3) 復極量については分極抵抗の増加により、寒冷時の

低下した電流でも所定の電位変化量が得られたものと考えられる。

(c) 亜鉛シート(面状流電)方式

(1) 寒暖による特性

測定結果の比較を表-3.4に示す。前回(温暖時)と比較して電流の大幅な低下が確認された。なお、電流が低下したものの全ての照合電極において100mV以上の復極量が得られていることが確認された。

(2) 考察

- 1) H29/02, H29/03 (寒冷時) には通電電流の低下はあ

表-3.4 通電結果の比較(c)亜鉛シート(面状流電)方式

	H27/06 (概略調査)			H27/11 (詳細調査)			H29/02 (追加調査)			H29/03 (再追加調査)		
気温	21℃			17℃			4℃			8℃		
電流	---mA			4.68/4.44/5.54/6.16mA			2.35/2.64/3.00/2.30mA			2.26/2.66/2.54/2.95mA		
測定時間	----			23 時間測定			48 時間測定			2 時間測定		
照合電極	Eio	Eof	復極量	Eio	Eof	復極量	Eio	Eof	復極量	-	-	-
R1	-505	-162	343	-519	-170	349	-549	-215	334	-	-	-
R2	-450	-199	251	-477	-213	264	-478	-207	271	-	-	-
R3	-469	-209	260	-640	-186	454	-648	-256	392	-	-	-
R4	-469	-200	269	-506	-237	269	-505	-254	251	-	-	-

※飽和硫酸銅 (CSE) 基準に換算

※インスタントオフ測定時の気温は気象庁データ新潟県能生より

※H27/06, H27/11 測定データは土研測定データより

※電流値はR1/R2/R3/R4 順番で記載

表-3.5 陽極(アノード)と鋼材(カソード)電位差(起電力)

測定日/気温	H27/11/17℃			H29/02/4℃		
電位	陽極	鉄筋	電位差	陽極	鉄筋	電位差
平均(CSE)	-829	-209	620	-866	-233	633

※気温は気象庁データ新潟県能生より引用

るものの、H27/06、H27/11 と同程度の復極量が得られていることが確認された。

2) 亜鉛シート方式は陽極鋼材間の電位差を利用して電流を供給する方式である。表に示す陽極鋼材間の電位差測定結果のとおり、僅かな差はあるが気温の違いによる影響は小さい。定電圧方式と同様に電圧を一定と考えると、回路抵抗の増加により所定の電位変化量を得るための電流が低下したものと考えられる。

3) 表-3.5 に示すアノード電位の平均値は-866mV (CSE) であり、亜鉛の初期電位-1,080mV (CSE) に対し 214mV の貴化が確認された。陽極電位の貴化により鉄筋との電位差となる起電力が小さくなる。起電力の低下は陽極発生電流の低下ともなるため、定期点検において陽極電位の測定や消耗量調査を行うことが重要であると考えられる。

4. 不具合調査

4.1 鉛照合電極不具合調査

過年度報告書より測定不能との報告があるチタンメッシュ方式 G3 桁の照合電極について、不具合の原因を確認するための配線調査を行った。

(1) 配線確認

照合電極と直流電源装置の間を図-4.1 に示す手順にて確認を行った。①直流電源装置測定端子台の測定において、電位差計の表示値が安定せず測定不可であった。②プルボックス内照合

電極リード線の結線部を解き、埋設照合電極本体リード線と測定端子(対極)を接続し測定したところ、電位差計の表示値が安定した。③プルボックスと直流電源装置間のリード線に問題があると判断し、リード線端部と測定端子間の導通調査を行った結果、電位値が不安定であった。ハーモニカ端子部を調査したところ、照合電極リード線を固定しているビスに緩みがあることが確認された。④ハーモニカ端子の固定ビスを締め直し、プルボックス内結線部の復旧を行った結果、安定した電位表示値が得られたため、照合電極の本体は健全であることが確認された。

(2) 考察

今回のような照合電極の電位表示値が不安定であることが確認された場合、照合電極本体の不良と断定する前に、ケーブル類および結線部等の電流経路の確認により復旧する場合もある。

今後は、あらゆる不具合事項を想定し、適切な調査手順により確認していくことが望ましい。

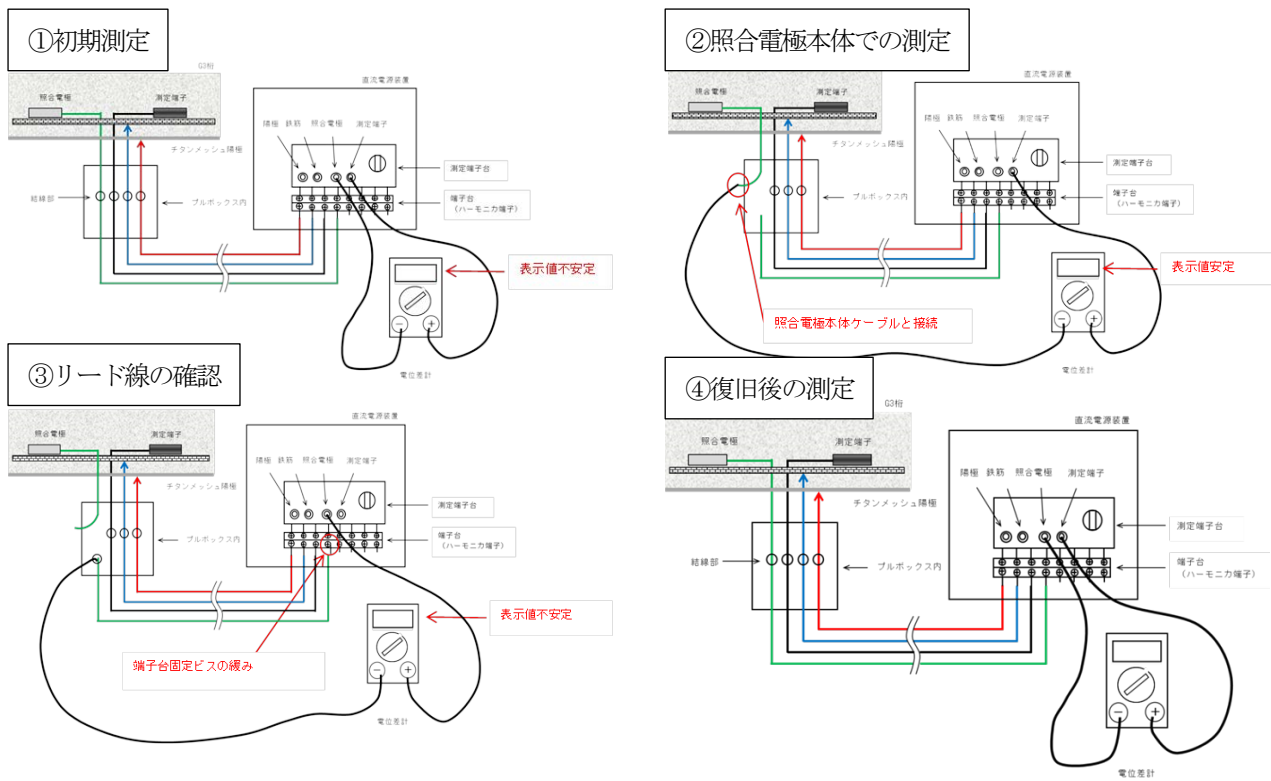


図-4.1 配線の測定手順



写真-4.1 被覆モルタル浮き部



写真-4.2 P1 陽極材確認(2枚重ね)



写真-4.3 表面電位測定状況



写真-4.4 モルタル被覆完了

4.2 被覆モルタル浮き部調査

写真-4.1 に示す被覆モルタル浮き部周囲において、表

面電位による防食効果への影響を確認するため、高所作業車により近接してたたき点検を行い浮き部の範囲を特定した。コンクリートカッターで浮き部の溝外周を5mm程

度の深さで切断し、陽極の損傷のないように周囲のモルタルを撤去した。

モルタル撤去後を写真-4.2 に示す。チタングリッド陽極は二枚重ねで設置されており、コンクリート側の陽極メッシュ内にモルタル充填不足と思われる範囲が確認された。

表面電位の測定は写真-4.3 に示す通り行った。

チタングリッド陽極の復旧は、陽極同士をスポット溶接によりつなぎ合わせ、樹脂ピンで陽極を固定後、被覆モル

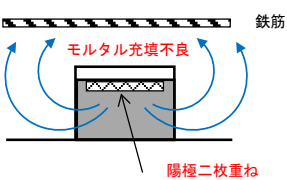
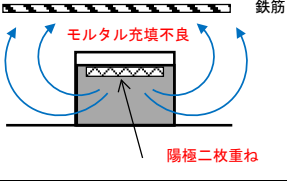
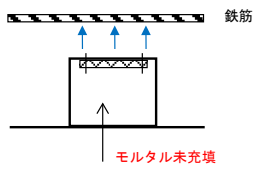
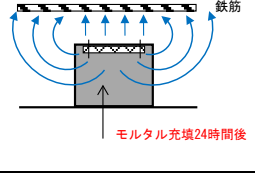
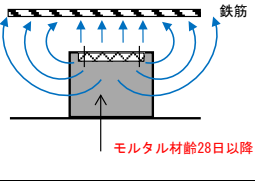
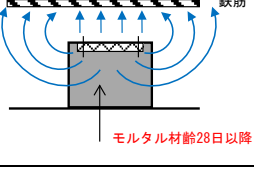
タル材を1層10mm程度で充填した(写真-4.4)。材齢28日後以降の調査においてモルタル材に浮き等はなく健全であることを確認した。

(1) 表面電位測定

表面電位の測定を表-4.1 に示す通り実施した。

①②100mV以上(平均147mV)の電位変化量が確認されており、モルタルが浮いた状態でもある程度は防食電流が流れており分極していたものと考えられる。

表-4.1 各状態における表面電位測定結果

測定番号	測定日時	陽極状態	測定項目(状態)	電位変化量(平均)	
①	2/14 9:10	モルタルが浮いている状態 (既設モルタル除去前)	 鉄筋 モルタル充填不良 陽極二枚重ね	当初のオン電位 インスタント オフ電位	—
②	2/14 10:15	モルタルが浮いている状態 (既設モルタル除去前)	 鉄筋 モルタル充填不良 陽極二枚重ね	測定①から オフ1時間後 のオフ電位	復極量 147mV
③	2/14 13:57	モルタルの剥落の状態 (新規陽極ピン固定) (モルタル充填前)	 鉄筋 モルタル未充填	測定②から 通電1時間後 のインスタント オフ電位	分極量 225mV
④	2/15 14:57	モルタル充填初期の状態 (モルタル充填24時間後)	 鉄筋 モルタル充填24時間後	測定②から 通電24時間後 のインスタント オフ電位	分極量 419mV
⑤	3/17 14:20	モルタルが安定した状態 (モルタル材齢28日以降)	 鉄筋 モルタル材齢28日以降	インスタント オフ電位	—
⑥	3/17 15:20	モルタルが安定した状態 (モルタル材齢28日以降)	 鉄筋 モルタル材齢28日以降	測定⑤から 通電1時間後 のオン電位	復極量 175mV

③モルタルが剥落した状態はモルタル浮き状態より分極量の増加が確認された。(平均 78mV の増加) ピン固定により陽極と溝内コンクリートの付着面積が増えたためと考えられる。

④陽極周囲を電気防食用モルタル充填後の分極量は、ピン固定のみの状態より分極が進んだ。(平均 194mV の増加) 陽極周囲に水分を多く含んだモルタルが充填されたため、陽極からの防食電流が既設部より流れやすくなり分極が進んだものと考えられる。モルタル浮き状態と比較して大幅な分極量の増加がみられた。(平均 272mV の増加)

⑤⑥モルタル材齢 28 日後以降の安定した状態での通電停止 1 時間による復極量を確認した。浮きの状態 (①) に比べ 28mV の増加が確認されており、モルタルが充填され電流分布が向上したものと考えられる。

なお、モルタル充填後の材齢 1 日 (④) と比較して電位変化量が低下したことは、水和反応が進行してモルタルの抵抗が増加したためと思われる。

(2) 考察

線状方式において被覆モルタルの浮きが確認された周囲において、表面電位の測定により防食効果への影響を確認することができた。調査結果からの考察を以下に示す。

1) ②③の比較

当初のモルタルが浮いた状態からモルタルを除去し、モルタル材の剥落を想定して陽極をピンのみで固定した場合で平均 78mV の増加が確認された。周囲のモルタルの付着面積が増したことで、チタングリッド陽極からの電流が増加したものと考えられる。

今回は浮きの範囲が 40cm 程度であり防食効果への影響は小さいものの、浮きにより電流の供給が損われていたものと考えられる。

2) ④⑥の比較

モルタル充填 24 時間後の分極量は平均 419mV であり、材齢 28 日後の 175mV に比べ非常に大きな分極量となった。若材齢時にはモルタル水分量も多く抵抗が低くなるため電流が流れやすくなり、分極量が増大したのと考えられる。モルタルの充填直後および水濡れ時等には正しい評価が得られない場合もあるため、注意しなければならない。

3) ②⑥の比較

復極量は 147mV から 175mV と微増ではあるが、補修効果を確認することができた。

4) 点検の留意点

モルタルの浮きはコンクリートと陽極界面に隙間が

生じている可能性が高く、これを放置した場合、陽極反応によるガスが滞留して範囲が拡大することが懸念されるため、定期点検時に陽極被覆モルタルの目視確認と同時にたたき点検を行うことが望ましい。

4. 3 亜鉛シート消耗量調査

写真- 4.5~4.8 に示す耐用年数が経過して使用されている流電陽極 (以下、防食板とする) について、表面電位による防食効果の確認を実施した。また、陽極の消耗量を確認するため、写真- 4.6 に示すように 3 枚の防食板 (桁底面 1 枚、桁側面両側各 1 枚) を採取し、別途、消耗量調査を行った。

固定アンカーボルト表面からと思われる錆びの付着がみられたが、内部鉄筋の腐食によるひび割れや浮き等は確認されておらず、電気防食の効果が得られていたものと考えられる。

その後、写真- 4.8 に示す通り、用意した代替防食板を設置し、隣接する既設防食板とリード線を結線して陽極を一体化して通電を開始した。防食板の周囲はエポキシパテ材にて端部処理を行い防護網の復旧を実施した。

各調査段階において、表面電位による防食効果の確認を行った。

(1) 表面電位測定

①既設防食板設置状態の復極量確認 (通電停止 1 時間後)

電源オン状態で防食板周囲のオン電位を測定後、通電を停止して 1 時間後のオフ電位での復極量を求めた (図- 4.1)。

オン電位との比較ではあるが、海側平均 138mV、桁底面平均 317mV、山側平均 227mV の復極量となり、いずれの測定点においても 100mV 以上の電位変化量が得られていることが確認された。

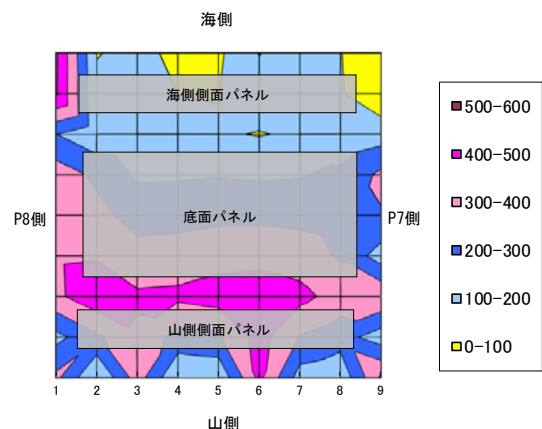


図- 4.2 オフ 1 時間後復極量分布図



写真-4.5 既設防食版(亜鉛シート)



写真-4.6 亜鉛防食版撤去完了



写真-4.7 コンクリート表面確認



写真-4.8 代替防食版設置完了

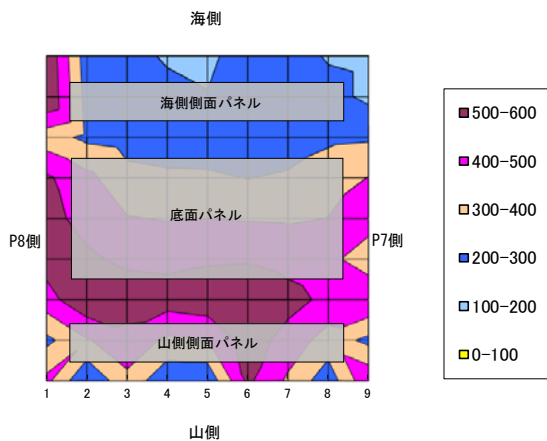


図-4.3 オフ20時間後復極量分布図

表-4.2 既設防食板と代替防食板でのオン電位の比較

	海側側面	桁底面	山側側面	平均
既設防食板	-573 mV	-835 mV	-698 mV	-702 mV
代替防食板	-941 mV	-881 mV	-769 mV	-864 mV
差 (増分)	368 mV	46 mV	71 mV	162mV

ン電位の比較を表-4.2に示す。代替防食板の設置により、鋼材電位が卑化(分極)していることが確認された。

この理由として、既設防食板の陽極消耗により防食電流が不足していたこと、バックフィル(陽極とコンクリートの間)に介在する電解質)の劣化等によりコンクリート面との密着性が低下しており亜鉛からの防食電流が十分に供給されていなかったこと、また、代替防食板のバックフィル材は水分が多く柔軟性がありコンクリートとの密着性が向上したため多くの電流が供給されたことなどが考えられる。

(2) 消耗量調査

採取した防食板(桁底面部1枚+側面部2枚=計3枚)の消耗量調査を行った。表-4.3に消耗量分析結果、図-4.4に消耗状況写真を示す。

②既設防食板設置状態の復極量確認(通電停止20時間後)

測定時間を延長し、通電停止20時間後のオフ電位での復極量を求めた(図-4.1)。オフ時間を延長したことで100mV以上の復極量の増加が確認された。また、電位分布は1時間後の測定分布と同様に山側の復極量が大きい傾向を示した。

③代替防食版設置状態での分極量確認(通電後2時間後)

既設防食板撤去前のオン電位と代替防食板設置時のオ

表-4.3 消耗率分析結果のまとめ

試料 No.	寸法(mm)	初期質量 W_i (g)	残質量 W_r (g)	消耗質量 W_c (g)	消耗率 C (%)	推定残寿命 T_r (年)	推定総寿命 T (年)
①(山側)	100×700	482.0	239.2	242.7	50.4	20.7	41.7
②(海側)	100×700	482.0	188.2	293.8	61.0	13.5	34.5
③(底面)	250×700	1227.5	59.5	1167.9	95.2	1.1	22.1

(注) 経過年数 t (年): 21、厚み 2mm、密度 7.1g/cm^3

[算出式]

$$\text{消耗率 } C (\%) = W_c / W_i$$

$$\text{推定残寿命 } T_r (\text{年}) = W_r / (W_c/t)$$

$$\text{推定総寿命 } T (\text{年}) = t + T_r$$



図-4.4 消耗量調査状況(不純物除去後)

(3) 考察

1) 表面電位測定

オン電位を比較した場合、桁底面は最も卑な電位であることが確認されたが、これは側面側陽極からの電流流入の影響が大きいものと考えられる。また、表-4.4に示す通り、通電遮断オフ 20 時間後のオフ電位の比較では、各部位において -350mV 程度の同様な値であり復極量

も満足されているため、各鋼材に均一な防食効果が得られていたものと考えられる。

流電陽極の場合、陽極を面状に設置するため隣接する陽極からも防食電流が流れ込み、各部位における明確な評価をすることはできない。目安ではあるが、オフ電位によりある程度の鋼材の状態は確認できるものと考えられる。

表-4.4 既設防食板での表面電位測定結果

	海側側面	桁底面	山側側面	平均	備考
オン電位	-573 mV	-835 mV	-698 mV	-702 mV	—
オフ電位	-326 mV	-371 mV	-364 mV	-354 mV	約 20 時間後
復極量	247 mV	464mV	333 mV	348 mV	—

mV vs CSE

2) 防食効果確認試験

復極量試験の測定時間を1時間から20時間に延長した結果、山側側面 106mV、底面 147mV、海側側面 109mV とそれぞれ復極量の増加が確認された。なお、桁底面の防食板は消耗量調査において激しい消耗が確認されているものの、側面からの防食電流の供給により防食効果が得られたものと推察され、耐用年数が近づいた場合は、各部位における消耗量を把握して評価することが必要であると考えられる。また、流電陽極方式での復極量試験の注意として、防食板によりコンクリート表面の大部分が覆われるため、復極反応に必要な酸素の拡散速度が小さくなる傾向にある。一般的に復極量の測定時間は24時間とされているが、陽極の配置形状や乾湿環境の違いなどにより復極の遅れがあることを考慮して測定時間を見極める必要がある。

3) 耐用年数を経過した防食板

底面部は95.2%の消耗率が確認されており、消耗形態においても亜鉛が分離していることから実質的には寿命を迎えていたものと考えられる。新規に代替防食板を設置したことで電位変化量が増加したことで、少なからず既設防食板の防食効果は失われていたものと考えられる。実際、既設防食板は変形やたわみが多数確認されており、撤去の際においてもバックフィルが乾燥しており、形状が保持されていないことが確認された。このため、陽極の消耗に加えてバックフィルの密着性が損なわれたことにより、防食効果が少なからず損なわれていたものと考えられ、特に耐用年数が近づいた防食板は定期的に消耗量調査等により確認する必要があると考えられる。

なお、陽極消耗量は鋼材量の多い桁底面での消耗率が大きいことが確認され、消耗量の調査対象は鋼材量の多い部位において評価することも重要である。

5. 電気防食工法の維持管理マニュアル(案)の策定

5.1 目次構成

図-5.1に目次構成を示す。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



図-5.1 電気防食工法の維持管理マニュアル(案)の目次構成

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、本稿でも紹介した詳細調査の事例を記載している。

5.2 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。

5.3 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。

表-5.1 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

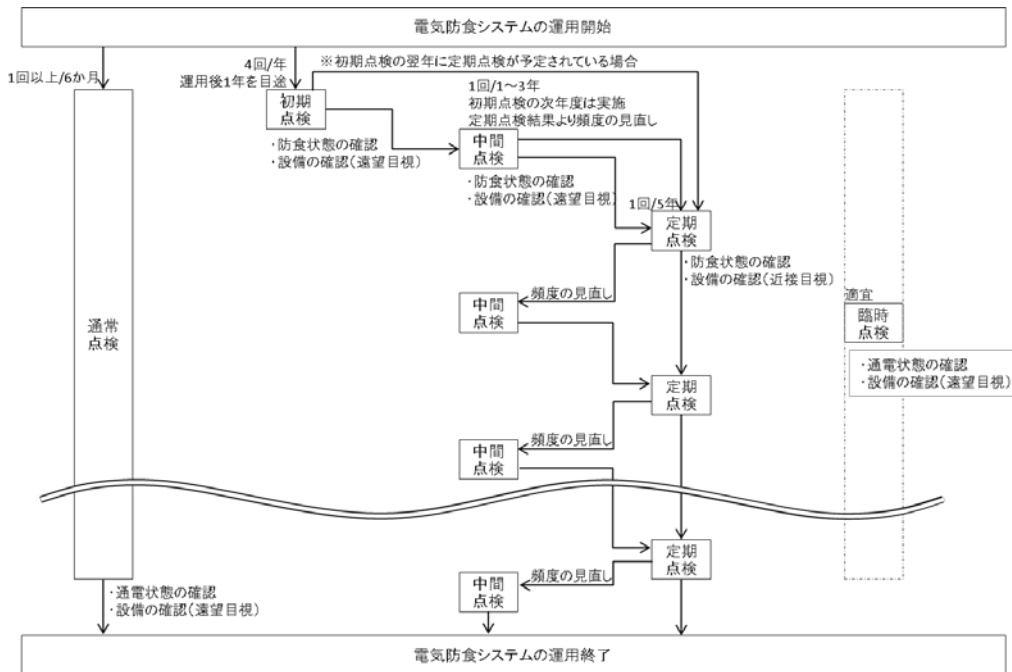


図-5.2 電気防食システムの点検種別の関係図

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)⁴⁾を参考とした。表-5.1 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-5.2 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

表-5.1 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

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に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

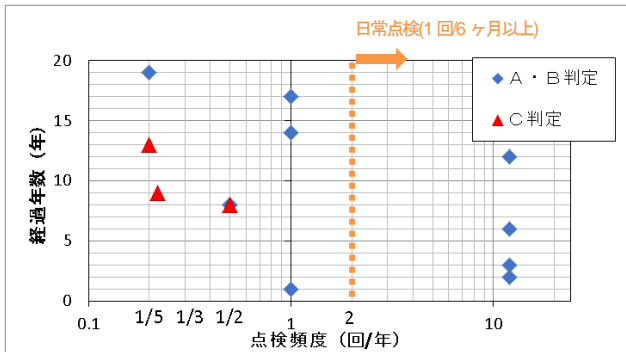


図-5.2 装置の目視点検頻度と経過年数における点検結果まとめ

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⁵⁾、H13 土木学会指針⁶⁾で設定されている頻度を参考(表-5.1)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-5.2 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-5.1 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

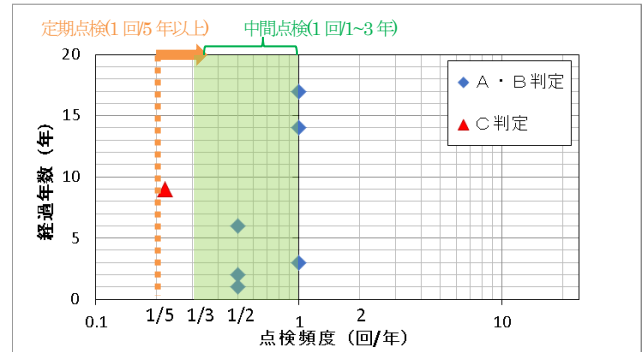


図-5.1 防食効果の確認頻度と経過年数における点検結果まとめ

うになる。

以上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現状の点検頻度の検証からも妥当である。

6. まとめ

本研究では、過年度より調査を行ってきた橋梁の中から B 橋を選定し、その中で追加調査を実施した。以下にまとめる。

① 過年度調査との比較

過年度に実施した、表面電位・復極量試験の結果と本年度実施した結果を比較した。夏や秋に実施した過年度調査に対して、本年度は冬場での計測となった。

1、2 年の差はあるものの桁の劣化はそれほど進行していないことを踏まえると、気温の変化による影響が大きいことが確認できた。

② 照合電極不具合調査

照合電極の計測不良に対して、配線調査を行った。結果としては、直流電源装置側のビスの緩みによる接触不良が原因であることが分かった。

そこで、今後の照合電極の不具合発生指示の調査手順を示した。

③ 被覆モルタル浮き調査

チタングリッド方式の施工部の浮きに対して、復極量に関しては十分であったが、はつり調査を実施した。

浮きの原因として、チタングリッドのリボンが 2 重になり、モルタルの施工において、隙間が発生したことが考えられた。その後、埋戻しながらの調査の結果、リボンとコンクリート躯体をビス止めするなどの接着性を向上させることで改善が可能であり、埋戻し後の計測でも十分な復極量を示した。

④ 亜鉛シート残量調査

十分な復極量を発揮していた亜鉛シートではあったが、

供用年数の 15 年を 5 年以上過ぎていた。

亜鉛シートは底面のシートが 95%消費し、推定残寿命にも 1.1 年程度となっていた。今回は、防食効果が持続している結果であるが、15 年の供用期間を厳守することが望ましいことが確認された。

また、これらの調査を含む実橋調査結果および管理者や専門家へのアンケート結果も踏まえ、本研究の成果は電気防食工法の維持管理マニュアル（案）へ反映している。

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。

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/、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/、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 : ISHIDA Masahiro、 YAMAGUCHI Takeshi

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. In the FY 2015、 we selected 3 target bridges based on the questionnaire survey implemented in the previous fiscal year and carried out detailed investigations of those.

Key words : salt damage、 re-degradation、 cathodic protection、 maintenance