

# 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—

平成30年7月

国立研究開発法人 土木研究所  
国立大学法人 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

Copyright © (2018) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、国立研究開発法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、国立研究開発法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

# 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－

Research on Maintenance Method of Road Bridges using Cathodic Protection  
- Investigations of the Problem Identification in Maintenance Technology  
of Cathodic Protection -.

国立研究開発法人 土木研究所

先端材料資源研究センター 材料資源研究グループ

上席研究員 西崎到、主任研究員 佐々木巖、交流研究員(元) 加藤智丈  
構造物メンテナンス研究センター 橋梁構造研究グループ

上席研究員 石田雅博、 研究員 山口岳思、 交流研究員 渡辺遼  
主任研究員(元) 本間英貴、宇佐美惣  
交流研究員(元) 關繭果、松尾健二

東北大学大学院 工学研究科 土木工学専攻

准教授 皆川浩

日本エルガード協会

内藤英晴、 峰松敏和、 若杉三紀夫、 山本誠、 大島高雄  
山崎大輔、石井歩、秋山哲治、岩崎和弘、阿部健、黒岩英一郎  
コンクリート構造物の電気化学的防食工法研究会

守分敦郎、葛目和宏、小笠原哲也、谷口修、宮口克一、末岡英二  
小林浩之、小城 守、山本 悟、青山敏幸、田村哲也、佐々木 亘  
藤原保久、槇島修、田中修、石原慎太郎、羽瀨貴士、田中亮一

要旨

橋梁を対象とし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、管理者及び専門家へのアンケート調査や、実橋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た。これをもとに、損傷事例の類型化や、点検において注目すべき箇所等を明らかにし、維持管理手法の信頼性の向上につながる点検項目を集約した。また、新たな工法として、間欠的な通電方式の適用性と耐久性の検証による新たな用途開発や、それを通じた通電停止時の状態評価について述べる。

キーワード：コンクリート橋、塩害、電気防食、維持管理、実態調査

# 電気防食工法を用いた道路橋の維持管理手法に関する研究

## 共同研究報告書

### 目 次

1 編	序論	1-1
2 編	電気防食工法の現状	2-1
3 編	電気防食工法の維持管理の実態調査	3-1
4 編	供用中の橋梁の調査	4-1
5 編	撤去橋梁の調査	5-1
6 編	維持管理マニュアル（案）の策定	6-1
7 編	新工法の開発（間欠通電方式の検証）	7-1
8 編	結論	8-1

# 1 編 序論

## 1. 本研究の背景と目的

老朽化してくる橋梁が増加しているなか、コンクリート橋では塩害による劣化損傷により鋼材の腐食破断といった最悪の場合、落橋に繋がりがかねない重篤な損傷事例が報告されてきている。

塩害を受けたコンクリート構造物の補修対策の一つである電気防食工法は、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。この工法は、直流電源装置や、陽極システム、配線・配管などの付帯設備などから構成される電気防食システムが適切に構築され、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、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、その適用実績も増加している。

一方、電気防食工法を適用している構造物において、防食効果を適切に維持するための「稼働状態」や「防食状態」の維持管理ができず、結果として鋼材腐食などに起因すると考えられるコンクリートのひび割れ、はく離などの構造物自体の不具合が生じている事例も報告されており、電気防食工法の維持管理についての問題も生じている。

電気防食工法のコンクリート構造物への適用後の維持管理にあたっては、これまで土木研究所から提案している「新設コンクリート橋の電気防食マニュアル（案）2000年」、土木学会で制定している「電気化学的防食工法設計施工指針（案）2001年」において、維持管理手法が示されている。しかしながら、これらの維持管理手法の提案後、約20年が経過しているなかで、その手法などの活用状況や効果などは検証されていない。また、その後開発された新しい技術や新たに発生している不具合などへの対応が必要となっている。

そこで、本共同研究では、電気防食適用橋梁における道路管理者への実態アンケートや維持管理データの整理、実橋調査やその解析検討などから、現行の維持管理手法の効率化・高度化を目指すための改善点を明確にし、電気防食工法の新たな維持管理マニュアル（案）を提案した。

また、新工法の開発として、新たな通電方式の適用性や耐久性を検証し、これらを活用した新たな用途開発についても紹介する。

コンクリート構造物に適用する電気防食工法は、塩化物イオンが侵入し損傷が進行した橋梁に対しては数少ない対策工法となっていることから、適切な維持管理を効率的かつ確実に実施できる維持管理手法の提案や新たな工法の開発により現場での積極的な活用を図っていくことを期待したい。

## 2. 本報告書の構成

本研究は、コンクリート構造物に適用する電気防食工法の維持管理における効率化・高度化を目指した維持管理手法の確立することを目的とするものであり、第1編から第8編で構成されている。本報告書の構成を図-2.1.1に示す。

第1編「序論」では、本研究の背景と目的を記述した。

第2編「電気防食工法の現状」では、現状の電気防食工法の技術について、工法概要およびその特徴として、構造部位や環境への適用性、耐用年数、施工実績、コストなどに着眼して整理した。

第3編「電気防食工法の維持管理の実態調査」では、道路管理者へのアンケート調査により、電気防食の維持管理実態を把握し、電気防食専門家へのアンケート調査により、専門家が理想とする管理水準を把握した。

電気防食適用後の不具合状況を把握するための調査として、第4編「供用中の橋梁の調査」および第5編「撤去橋梁の調査」に記述した。第4編「供用中の橋梁の調査」では、供用中の道路橋梁を対象に現地にて構造物や電気防食システムの不具合に関する調査結果を記述した。第5編「撤去橋梁の調査」では、撤去された電気防食適用橋梁に対して各種試験あるいは数値解析による評価に基づき、電気防食工法の信頼性の確保するための具体的な対策を示した。

第6編「維持管理マニュアル（案）の策定」では、第2編から第5編で明らかとなった電気防食工法の維持管理の効率化・高度化を目指した維持管理マニュアル（案）の策定方針を記述した。

第7編「新工法の開発」では、第3編で判明した維持管理リスクを軽減する新工法の開発として、間欠通電技術などに関する概要、実験結果について記述した。

第8編「結論」では、本研究を取り纏めたものであり、これを踏まえた電気防食工法の維持管理手法の確立へ向けた提言を記述した。

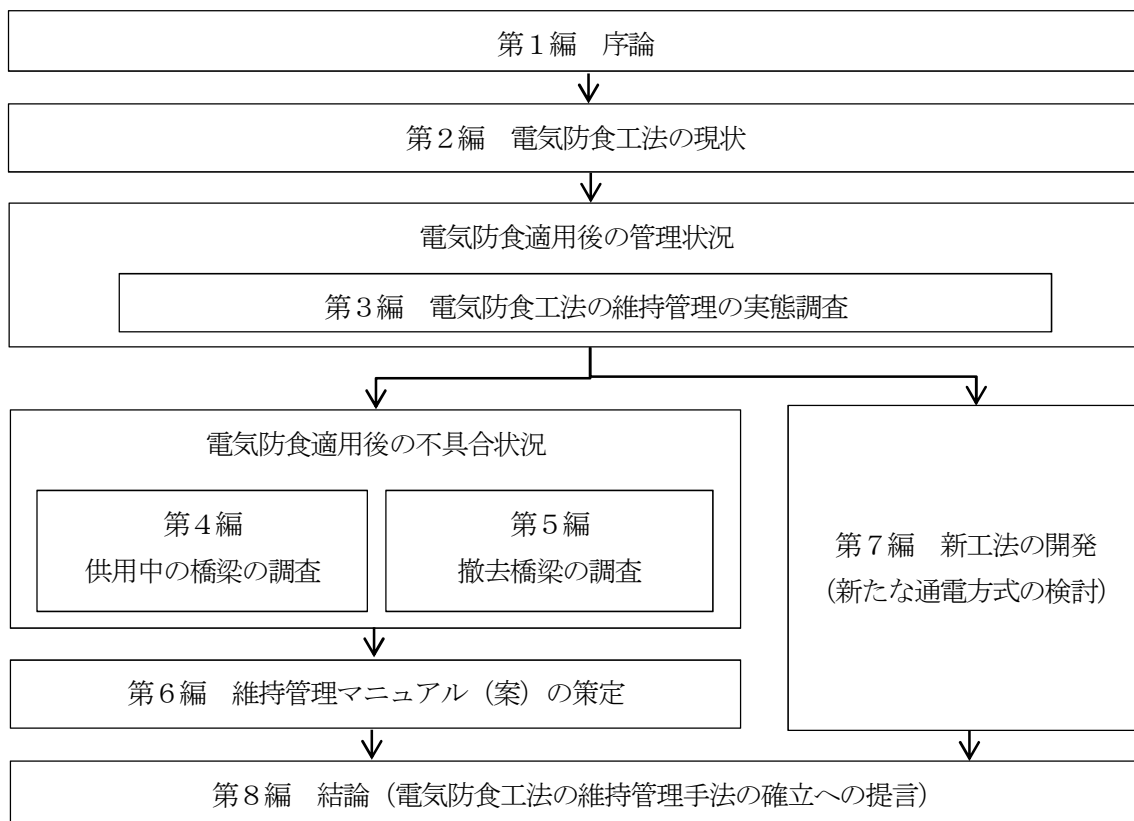


図-2.1.1 本報告書の構成

## 2 編 電気防食工法の現状

### 1. はじめに

電気防食工法の工法選定の一助となるように、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)」<sup>1)</sup>の発刊後に、開発された新工法や廃止された工法を含めて、現状の電気防食工法の技術を整理し、各工法を保有する会社へのアンケート結果と意見を基に、下記の内容についてとりまとめた。

#### ①各工法の概要

開発年，工法概要，施工手順

#### ②各工法の特徴 「適用できる部位」，「立地環境」，「鉄筋腐食度合いなどその他条件」，「耐用年数」，「コスト」，「国内の実績」

#### ③各工法のアンケート結果による特徴（長所，短所）とニーズの整理

#### ④各工法の年度実績

アンケート結果をなるべく検証したあとで掲載したが，陽極材の耐用年数，国内実績，およびその他の特徴に関しては，あくまでアンケートによる結果であることを明記しておく。

## 2. 電気防食工法の各技術に関する調査の方法

### 2.1 調査対象会社および工法

調査対象としては、基本的に「コンクリート構造物の電気化学的防食工法研究会（以下 CP 工法研究会）」と「日本エルガード協会」の会員会社としたが、会員会社以外で電気防食工法を公表している会社も対象とした。なお施工実績がなく開発中の工法も対象とした。

表-2.1.1 にアンケートの調査会社と工法名を示す。なお、表-2.1.1 以外の CP 工法研究会および日本エルガード協会に所属する会社は、独自の電気防食工法を保有していないという回答であった。そのため表には掲載しなかった。また、チタンリボンメッシュ方式については、住友大阪セメントとナカボーテックの両社から回答があったので、別々に掲載した。

表-2.1.1 アンケートの調査対象会社と工法

No.	工法番号	工法名	会社名
1	1	チタンメッシュ方式	住友大阪セメント (株)
2	2	<u>工法廃止：欠番</u> (パネル陽極方式)	
3	3	導電性塗料方式(エマコ CP30 アノード方式)	BASF ジャパン(株)
4	4	導電性塗料方式 (キャブロンコート方式)	日本防蝕工業 (株)
5	5	チタン溶射方式	(株) ナカボーテック
6	6	導電性モルタル方式	BASF ジャパン(株)
7	7	チタンリボンメッシュ方式	住友大阪セメント (株)
8	7-1	チタンリボンメッシュ方式	(株) ナカボーテック
9	7-2	チタンリボンメッシュ補修先付け方式	住友大阪セメント (株)
10	7-3	チタンリボンメッシュ新設先付け方式	
11	7-4	チタンリボンメッシュ e-lineV 方式	(株) ナカボーテック
12	7-5	チタンリボンメッシュモール方式	住友大阪セメント (株)
13	7-6	チタンリボンメッシュエルグリッド方式	
14	7-7	チタンリボンメッシュ RMV 方式	
15	7-8	チタンリボンメッシュ RMV-GECS 方式	
16	7-9	貼付け型モール陽極方式 e-Cover・C 工法	ショーボンド建設(株)
17	8	チタングリッド方式	(株) ピーエス三菱
18	9	PI-Slit 方式	
19	10	チタントレイ方式	日本防蝕工業 (株)
20	11	<u>工法廃止：欠番</u> (ニッケル被覆炭素繊維方式)	オリエンタル白石 (株)
21	12	チタンロッド方式	東興ジオテック(株)
22	13	亜鉛シート方式	(株) ナカボーテック
23	14	亜鉛・アルミ擬合金溶射方式	大日本塗料 (株)
24	15	ALAPANEL 方式	(株) ナカボーテック
25	16-1	外付け線状陽極ユニット方式 (TC ユニット工法)	オリエンタル白石 (株)
26	16-2	貼付け型シート陽極方式 e-Sheet・NP 工法	ショーボンド建設(株)
27	16-3	ECP パネル方式 桁端電気防食工法	三井住友建設 (株)

※工法番号 13～15 の水色ハッチングは、流電陽極方式の電気防食工法



## 2.2 調査内容

アンケートは2回行った。2回アンケートを行ったのは、1回目のアンケートで不明なことや、各工法の長所・短所をヒアリングし、また各工法間での回答の整合性をとるためである。

1回目のアンケートの調査内容は、表-2.2.1の項目について行った。

2回目のアンケートは、1回目アンケート結果について、以下の不明点を再確認するために行った。

- ①狭隘部および沓座に関して、質問の仕方が曖昧だったため質問事項を具体的に回答の整合性を図った。
- ②立地環境に関わる適用性について、「施工時」を想定した回答と「供用時」を想定した回答があったため、再ヒアリングした。

表-2.2.1 1回目アンケートの調査内容

No.	調査項目	調査内容
問1	回答者情報	
問2	工法概要	工法名、開発団体、開発年、通電方式、陽極形状、工法概要、概要図、施工フロー
問3	工法の特徴	新設/既設への適用性
		構造物の部位に関わる適用性
		立地環境に関わる適用性
		塩化物イオンの多寡による適用性
		適用できる鉄筋腐食の度合
		表面の仕上がり状況
		既設塗装面への適用性
		システムの耐用年数
		コスト（基本的には施工面積300m <sup>2</sup> を想定）
補強との併用の可否		
問4	工法の代表的な施工実績	工法の代表的な施工実績
		年度ごとの施工件数と施工面積
		合計した施工件数と施工面積
問5	自由意見	

③飛砂や防爆に関する回答について、対策を講じればOKという回答とNGという回答が混合しており、具体的な実現性のある対策が用意できるのであれば、OKとした。

④適用できる鉄筋腐食度合いについて、各工法で回答の整合性を図った。また腐食が著しい場合の適用条件についても回答を求めた。

⑤陽極材の耐用年数、副材・配管の耐用年数、直流電源装置の耐用年数について、回答が様々だったので、再アンケートによりなるべく整合性を図った。

⑥チタンリボンメッシュ方式の施工実績を確認（重複している可能性があったため）して整理した。

⑦工法廃止と回答のあった「パネル陽極方式」、「ニッケル被覆炭素繊維方式」について、今後施工しないとしても、電気防食工法の維持管理を行う上で、工法概要や実績などの情報を収集しておく方がよいと考えたため改めてアンケートを行った。（ただし、ニッケル被覆炭素繊維方式については、回答を得られなかった）

### 3. 電気防食工法の各技術に関する調査結果

#### 3.1 各工法の概要

表-3.1.1 および表-3.1.2 に各工法の概要を示し、図-3.1.1～図-3.1.24 に各工法の概要図を示す。

表-3.1.1 および表-3.1.2 では以下を示す。

- コンクリートライブラリー107に掲載された既報の工法か新工法か  
(コンクリートライブラリー107 (Lib107) は, 2001年 (平成13年発刊))
- 通電方式
- 陽極形状
- 開発年
- 工法概要
- 表面の仕上がり

現在, 工法廃止されている工法として, 工法番号2のパネル陽極方式, 工法番号11のニッケル被覆炭素繊維方式であった。コンクリートライブラリー107(2001年)以降で, 新規に開発された工法としては, 工法番号7-4～7-9, 9, 10, 16-1～16-3の12工法である(工法番号3の導電性塗料方式エマコCP30アノード方式について開発年1992年でありここでは除いた)。

表-3.1.1 各工法の概要 (その1)

No.	工法番号	工法名	Lib107	通電方式	陽極形状	開発年
1	1	チタンメッシュ方式	既報	外部電源	面状	1984年
2	2	<u>工法廃止：欠番</u> (パネル陽極方式)				1991年
3	3	導電性塗料方式(エマコ CP30 アノード方式)	新			1992年
4	4	導電性塗料方式 (キャブロンコート方式)	既報			1994年
5	5	チタン溶射方式				1997年
6	6	導電性モルタル方式				1991年
7	7	チタンリボンメッシュ方式			1986年	
8	7-1	チタンリボンメッシュ方式			1997年	
9	7-2	チタンリボンメッシュ補修先付け方式			1998年	
10	7-3	チタンリボンメッシュ新設先付け方式	1991年			
11	7-4	チタンリボンメッシュ e-lineV 方式	新		2001年	
12	7-5	チタンリボンメッシュモールド方式			2003年	
13	7-6	チタンリボンメッシュエルグリッド方式			2006年	
14	7-7	チタンリボンメッシュ RMV 方式			2009年	
15	7-8	チタンリボンメッシュ RMV-GECS 方式			2010年	
16	7-9	貼付け型モールド陽極方式 e-Cover・C 工法			2012年	
17	8	チタングリッド方式	既報		1992年	
18	9	PI-Slit 方式	新		2006年	
19	10	チタントレイ方式	既報		面状	2003年
20	11	<u>工法廃止：欠番</u> (ニッケル被覆炭素繊維方式)			不明	
21	12	チタンロッド方式	既報	点状	1984年	
22	13	亜鉛シート方式		流電陽極	面状	1988年
23	14	亜鉛・アルミ擬合金溶射方式			1994年	
24	15	ALAPANEL 方式	新	外部電源	2009年	
25	16-1	外付け線状陽極ユニット方式 (TC ユニット工法)			線状	2015年
26	16-2	貼付け型シート陽極方式 e-Sheet・NP 工法		面状	2014年	
27	16-3	ECP パネル方式 桁端電気防食工法		面状・線状	2013年	

※工法番号 13～15 の水色ハッチングは、流電陽極方式の電気防食工法

※工法番号 1 のチタンメッシュ方式は米国での開発が 1984 年であり国内適用年は 1988 年

収集された工法は、合計 27 工法であり、内訳は外部電源方式が 24 工法で流電陽極方式が 3 工法である。なお、チタンリボンメッシュ方式には、コストダウンやニーズ対応のために新規で開発された工法が多くあり、陽極の設置の仕方によって多数の方式に分類することができる。そこで工法番号として 7-1～7-9 として記載した。

チタンリボンメッシュ工法の各工法の特徴は、表中の右端の列に記載した。

表-3.1.2 各工法の概要 (その2)

No.	工法番号	工法名	工法概要	表面の仕上り	特徴など
1	1	チタンメッシュ方式	コンクリートの表面にチタンメッシュ陽極を設置し、専用モルタルにより被覆する面状陽極工法	平坦	施工実績多い
2	2	<u>工法廃止：欠番</u> (パネル陽極方式)	陽極を備えたパネルを永久型枠として、パネルとコンクリート間に注入材を注入しコンクリート表面に設置する面状陽極工法	平坦	工法廃止
3	3	導電性塗料方式(エマコCP30 アノード方式)	コンクリートの表面に1次陽極(白金・ニオブ被覆銅線：径0.8mm)を固定し、導電性塗料を0.5mm厚さにて塗布し、面状陽極(2次陽極)を形成する工法	繊維含んだ微細な凹凸面	
4	4	導電性塗料方式(キャプロンコート方式)	コンクリート表面に設けた溝内に一次電極として白金チタン線を導電性パテとともに埋込み、この上に導電性塗料を塗布して二次電極とした面状陽極工法	平坦	
5	5	チタン溶射方式	高純度のチタンをコンクリート表面にアーク溶射して、耐久性の高い陽極皮膜を形成させた面状陽極工法	平坦	
6	6	導電性モルタル方式	コンクリートの表面に1次陽極(白金・ニオブ被覆銅線：径1.6mm)を固定し、導電性モルタルを8mm厚さに吹付け、面状陽極(2次陽極)を形成する工法	繊維含んだ微細な凹凸面	
7	7	チタンリボンメッシュ方式	貴金属酸化物をコーティングしたりリボン状のチタン製帯状陽極を、溝切したコンクリート中に設置して陽極とした線状陽極工法	縞状	一般的な工法 施工実績多い
8	7-1	チタンリボンメッシュ方式			
9	7-2	チタンリボンメッシュ補修先付け方式	大断面修復を必要とする既設構造物において、はつり出した鋼材に鉄筋クリップや陽極モールドを用いて陽極を鉄筋に固定した後、型枠を設置し、グラウト注入を行い、陽極を設置する工法	平坦	主に、チタンリボンメッシュ方式やチタンメッシュ方式の補助工法
10	7-3	チタンリボンメッシュ新設先付け方式	配筋完了後の構造物に専用の陽極取付け治具を用いて陽極を取り付けた後に、型枠を組立て、コンクリートを打設する工法	平坦	新設のみに適用
11	7-4	チタンリボンメッシュe-lineV方式	チタンリボンメッシュ陽極を切断溝に縦向きに設置する工法	縞状	線状陽極の設置向きを変更して溝切量の減少を図る
12	7-5	チタンリボンメッシュモールド方式	コンクリート表面に固定した治具(モールド)内に陽極を設置し、モルタルで被覆する工法。溝切りやはつりを行わないので粉塵発生を低減できる	凹凸	閉鎖空間での適用 かぶり小で適用可
13	7-6	チタンリボンメッシュエルグリッド方式	鋼材腐食が激しい構造物の補強と電気防食を併用することを目的として作製した格子状炭素繊維補強材にチタンリボンメッシュを取り付けたエルグリッド(商品名)を用いて、補強と電気防食を同時に施工する工法	平坦	補強と電気防食工法を同時に施工
14	7-7	チタンリボンメッシュRMV方式	V字型に加工したチタンリボンメッシュを陽極に用いる線状陽極方式。切削する溝幅を5mm程度として、溝にモルタルを充てんした後、V型の陽極を溝に押し込み、陽極のスプリングバック効果で固定する	縞状	陽極設置の省力化を目的として開発された工法。
15	7-8	チタンリボンメッシュRMV-GECS方式	チタンリボンメッシュRMVと特殊施工機械を用いることにより、橋梁桁端部の狭隘部において施工可能な工法	縞状	橋梁桁端部に特化した工法
16	7-9	貼付け型モールド陽極方式 e-Cover・C工法	あらかじめチタンリボンメッシュを取り付けてあるモールド材をコンクリート面に直接貼り付ける工法	凹凸	かぶり小で適用可 内部鋼材との短絡の危険性が少ない
17	8	チタングリッド方式	溝切りしたコンクリート中に、チタングリッド陽極を横方向に配置して陽極とした線状陽極工法	縞状	
18	9	PI-Slit方式	チタングリッド陽極を切断溝に縦方向に設置する工法	縞状	線状陽極の設置向きを変更して施工を簡略化
19	10	チタントレイ方式	チタントレイをコンクリート面にチタンねじを用いて固定し、特殊モルタルをチタントレイ内に充てんして陽極を設置する工法	凹凸	
20	11	<u>工法廃止：欠番</u> (ニッケル被覆炭素繊維方式)	—	—	工法廃止
21	12	チタンロッド方式	棒状に加工したチタン製の陽極(チタンロッド陽極)を、コンクリート表面から所定の間隔をもってコンクリート内部に挿入・設置するタイプの電気防食工法。	縞状 直線には ならない	点状陽極

22	13	亜鉛シート方式	亜鉛板、特殊バックフィル、保護カバーからなる防食板をコンクリート表面にアンカボルトで固定して設置する流電陽極方式の面状陽極工法	凸部 (ボルトキャップ)	
23	14	亜鉛・アルミ擬合金溶射方式	コンクリート表面に亜鉛およびアルミ線材を常温溶射し、面状に形成された擬合金皮膜を陽極システムとした流電陽極方式の面状陽極工法	平坦	
24	15	ALAPANEL 方式	アルミニウム合金とバックフィル材および FRP 保護材からなるアルミニウム防食板 (ALAPANEL) をコンクリート表面に貼り付けビスで固定して陽極システムとした流電陽極方式の面状陽極工法	凸部 (ボルトキャップ)	
25	16-1	外付け線状陽極ユニット方式 (TC ユニット工法)	白金系酸化物被覆を施したチタン製ラス材陽極をイオン伝導性に優れたバックフィル材で包み込んで保護カバーに納め、コンクリート表面に線状に配置した線状陽極工法	コンクリート表面に保護カバー設置	
26	16-2	貼付け型シート陽極方式 e-Sheet・NP 工法	粘着型陽極材と耐候性に優れたフッ素樹脂フィルムを積層してシート状にした陽極 (e-Sheet・NP) をコンクリート面に直接貼り付ける面状陽極工法。	平坦	
27	16-3	ECP パネル方式 桁端電気防食工法	コンクリート橋の桁端部の劣化部をはり取った後に、陽極材を取り付けた樹脂製パネル (ECP パネル) を永久型枠として設置し、高耐久モルタルを充填することにより、陽極材の被覆と断面修復が同時に行える工法	平坦	橋梁桁端に特化した工法

※工法番号 13～15 の水色ハッチングは、流電陽極方式の電気防食工法

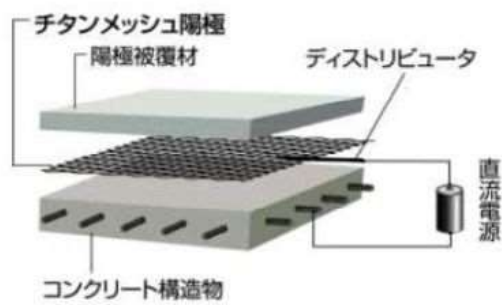


図-3.1.1 チタンメッシュ方式

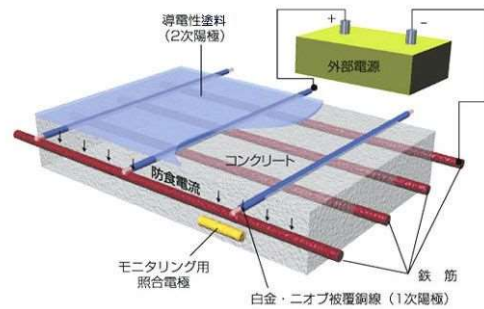


図-3.1.2 導電性塗料方式(エマコ CP30 アノード方式)

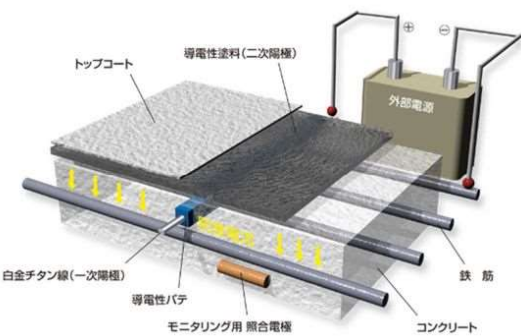


図-3.1.3 導電性塗料方式 (キャプロンコート方式)

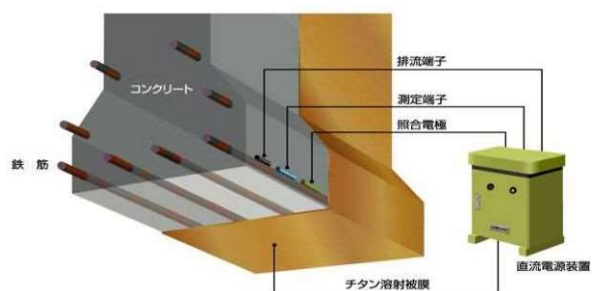


図-3.1.4 チタン溶射方式

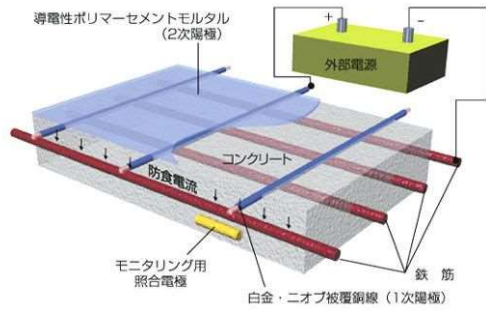


図-3.1.5 導電性モルタル方式

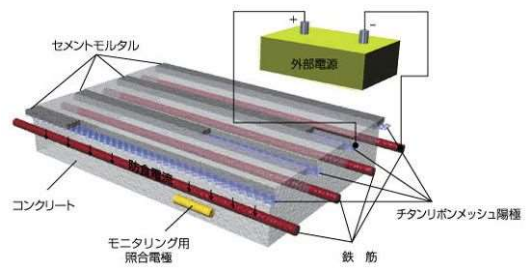


図-3.1.6 チタンリボンメッシュ方式

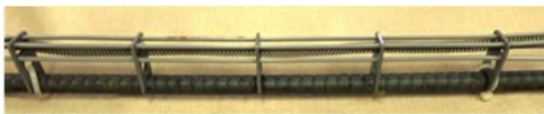
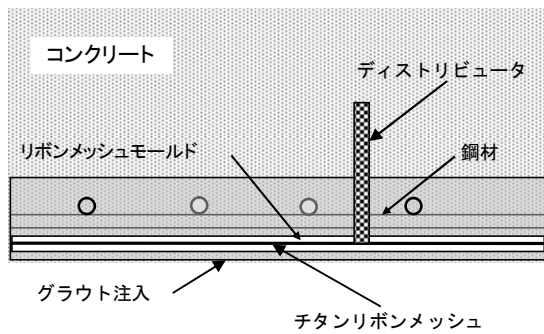


図-3.1.7 チタンリボンメッシュ補修先付け方式

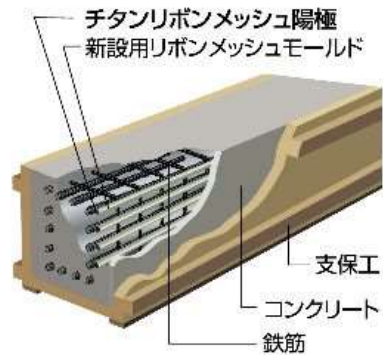


図-3.1.8 チタンリボンメッシュ新設先付け方式

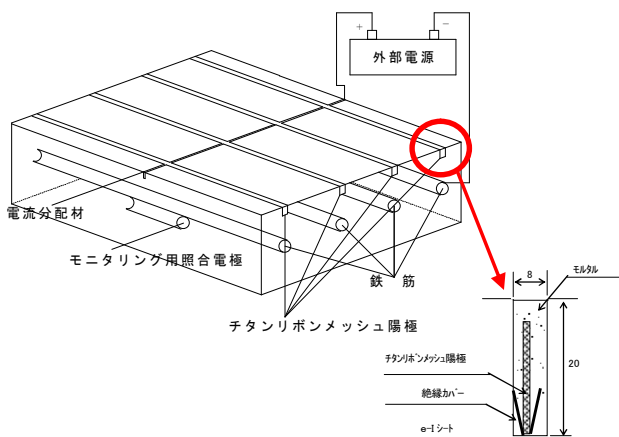


図-3.1.9 チタンリボンメッシュ e-lineV 方式

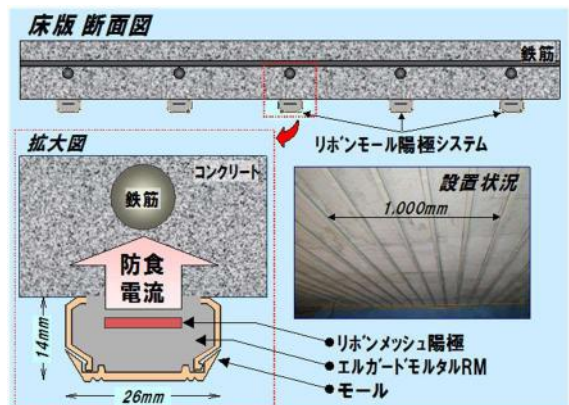


図-3.1.10 チタンリボンメッシュモールド方式

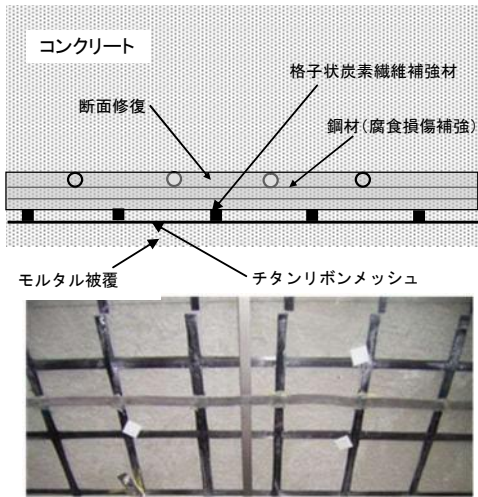


図-3.1.11 チタンリボンメッシュエルグリッド方式

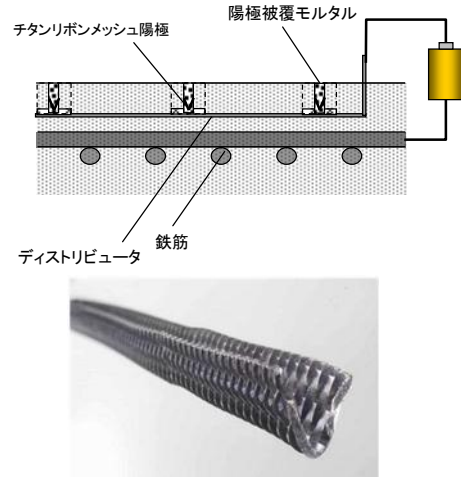


図-3.1.12 チタンリボンメッシュ RMV 方式

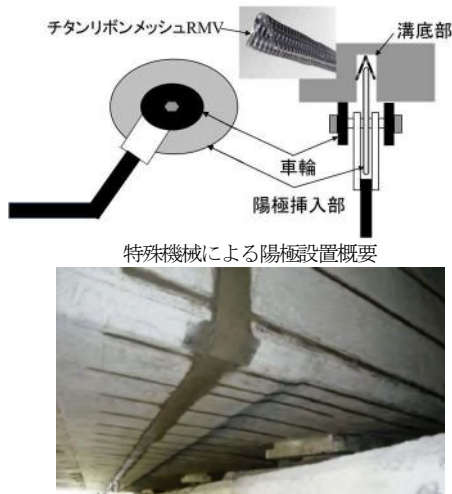


図-3.1.13 チタンリボンメッシュ RMV-GECS 方式

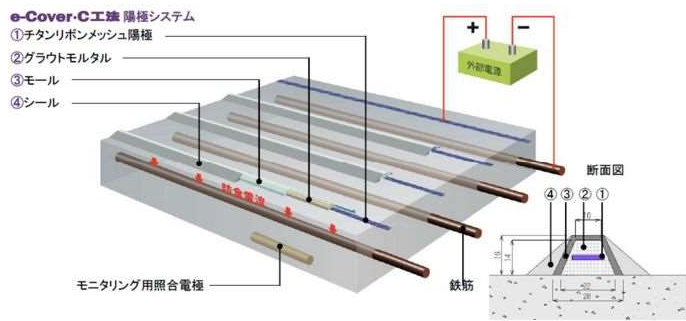


図-3.1.14 貼付け型モール陽極方式 e-Cover・C 工法

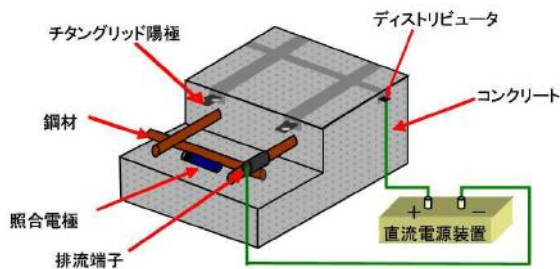


図-3.1.15 チタングリッド方式

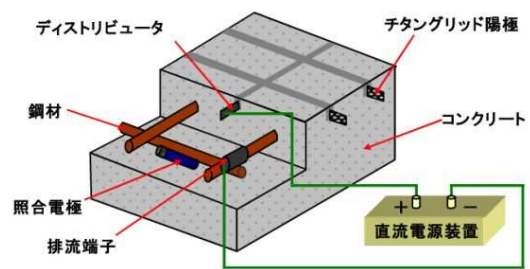


図-3.1.16 PI-Slit 方式

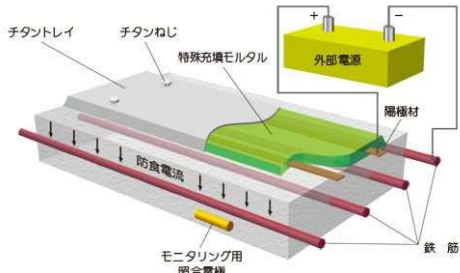


図-3.1.17 チタントレイ方式

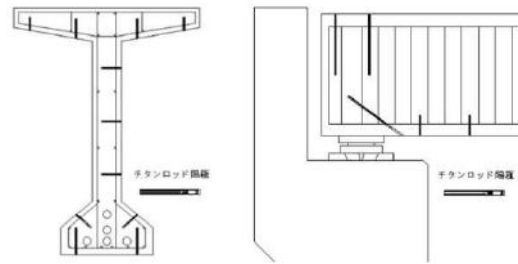


図-3.1.18 チタンロッド方式

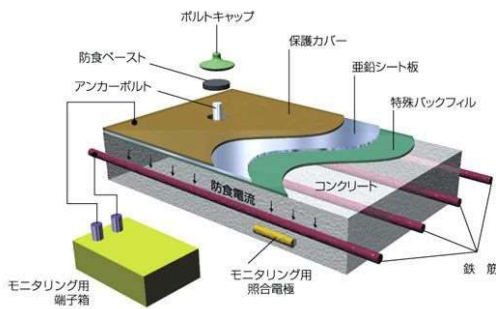
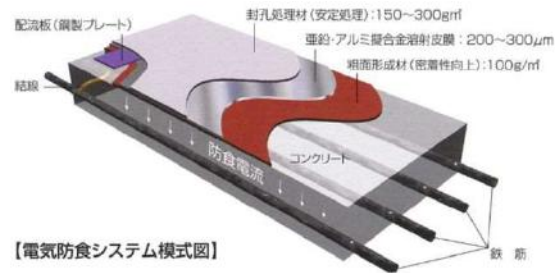


図-3.1.19 亜鉛シート方式



【電気防食システム模式図】

図-3.1.20 亜鉛・アルミ擬合金溶射方式

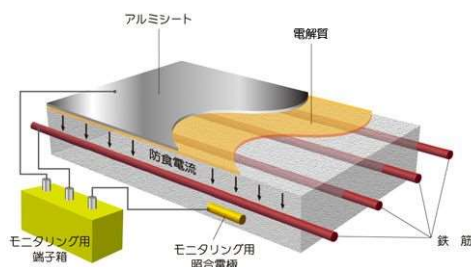


図-3.1.21 ALAPANEL 方式

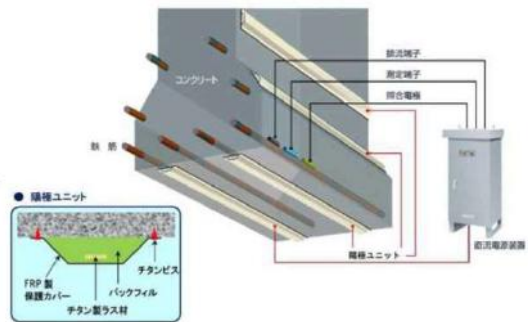


図-3.1.22 外付け線状陽極ユニット方式 (TCユニット工法)

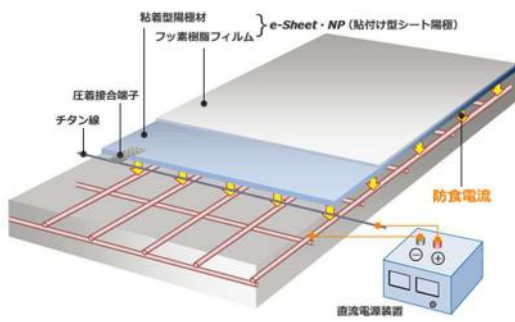
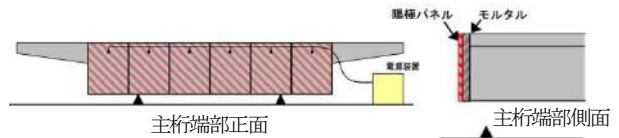


図-3.1.23 貼付け型シート陽極方式 e-Sheet・NP 工法



ECPパネル(面状陽極(チタンメッシュ)) ECPパネル(網状陽極(チタンリボンメッシュ))

図-3.1.24 ECP パネル方式 桁端電気防食工法



### 3.2 構造物の部位に関わる適用性

#### 3.2.1 橋梁の部位への適用性

表-3.2.1 に各工法の橋梁部位への適用性をまとめた。橋梁端部の狭隘部や沓座に関しては、次項で後述するため含めていない。

表-3.2.1 各工法の橋梁部位への適用性

No.	工法番号	工法名	Lib107	RC桁 a	PC桁 a	床版 b	地複 高欄 c	下部 工 e	橋梁 以外
1	1	チタンメッシュ方式	既報	①	①	①	①	②	①
2	2	<u>工法廃止：欠番</u> (パネル陽極方式)		②	②	②	②	②	①
3	3	導電性塗料方式(エマコ CP30 アノード方式)	新	①	①	③	②	②	①
4	4	導電性塗料方式 (キャブロンコート方式)	既報	①	①	①	①	④	①
5	5	チタン溶射方式		①	①	①	②	①	③
6	6	導電性モルタル方式		①	①	①	②	②	①
7	7	チタンリボンメッシュ方式		①	①	①	②	①	①
8	7-1	チタンリボンメッシュ方式		①	①	①	②	①	①
9	7-2	チタンリボンメッシュ補修先付け方式		①	②	②	①	②	①
10	7-3	チタンリボンメッシュ新設先付け方式		①	①	②	②	②	②
11	7-4	チタンリボンメッシュ e-lineV 方式	新	①	①	①	②	①	①
12	7-5	チタンリボンメッシュモール方式		②	②	①	②	②	②
13	7-6	チタンリボンメッシュエルグリッド方式		②	⑤	②	②	②	①
14	7-7	チタンリボンメッシュ RMV 方式		①	①	②	②	①	①
15	7-8	チタンリボンメッシュ RMV-GECS 方式		④	④	③	⑤	⑤	④
16	7-9	貼付け型モール陽極方式 e-Cover・C 工法	①	①	②	②	②	③	
17	8	チタングリッド方式	既報	①	①	②	②	①	①
18	9	PI-Slit 方式	新	①	①	②	②	①	①
19	10	チタントレイ方式		②	①	①	②	②	①
20	11	<u>工法廃止：欠番</u> (ニッケル被覆炭素繊維方式)		-	-	-	-	-	-
21	12	チタンロッド方式	既報	①	①	①	②	①	①
22	13	亜鉛シート方式		①	①	①	②	①	①
23	14	亜鉛・アルミ擬合金溶射方式		①	①	①	②	①	②
24	15	ALAPANEL 方式	新	①	①	①	②	①	①
25	16-1	外付け線状陽極ユニット方式 (TC ユニット工法)		②	①	②	②	③	④
26	16-2	貼付け型シート陽極方式 e-Sheet・NP 工法		①	①	②	②	②	③
27	16-3	ECP パネル方式 桁端電気防食工法		④	④	④	④	⑤	④

※工法番号 13～15 の水色ハッチングは、流電陽極方式の電気防食工法

※表中の数字①～⑤については、表-3.2.2 に示す番号に対応する

※表中の a～e の橋梁区分については、図-3.2.1 に示す番号に対応する

表-3.2.2 回答の凡例

番号	内容
①	施工可能であり、実構造物での施工実績がある
②	施工可能であるが、実構造物での施工実績はない
③	条件付きで施工可能であり、実構造物での施工実績がある (条件：回答欄に記入願います)
④	条件付きで施工可能であるが、実構造物での施工実績はない (条件：回答欄に記入願います)
⑤	施工不可

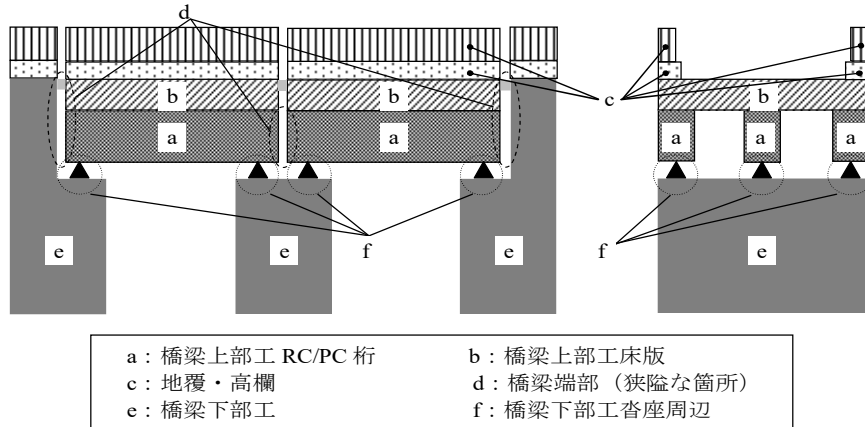


図-3.2.1 橋梁部位の区分

- 一般的な施工条件と考えられる RC 桁, PC 桁については, 概ねどの工法についても施工可能であり, 実績あるとの回答であった。
- 「7-8 チタンリボンメッシュ RMV-GECS 方式」と「16-3ECP パネル方式 桁端電気防食工法」については, 橋梁の桁端に特化した工法であり, 桁端ではない一般的な部位での適用を想定していない回答であった。
- 「7-6 チタンリボンメッシュエルグリッド方式」は, 補強と電気防食の併用工法であり, PC 桁では適用が難しいとの回答があった。
- コンクリートライブラリー107で既報である工法が, 開発年から長期間経ていることもあり, 比較的施工実績があるように見える。
- 地覆・高欄については, 電気防食工法の適用数が少ないことが原因と考えられるが, ②施工可能であるが実構造物での施工実績はない, という回答が多い。

### 3.2.2 狭隘部や沓座付近への適用性

#### (1) 狭隘部への適用性

橋梁の桁端は狭隘部となりやすく, 作業員が入れない箇所もあり電気防食工法を適用する上で作業スペースが制限される。そのため各工法について, 狭隘部への適用性と沓座への適用性について回答していただいた。回答時には, 狭隘部の寸法について定義したものを示さず, 施工可能な大きさを記載いただいた。

なお, 玉越りによる橋梁狭隘部の調査時には, 一般的な点検用マンホール寸法の最小値をもとに, 進入口の最小寸法値について 400mm 以下を狭隘部の定義としている。

表-3.2.3 に狭隘部への適用性に関する回答結果を示す。

なお, 狭隘部への適用の列の①~⑤の数字は, 表-3.2.2 の凡例に示す数字である。

表-3.2.3 狭隘部への適用性に関する回答結果

No.	工法番号	工法名	狭隘部への適用d	想定している狭隘部の大きさ	備考
1	1	チタンメッシュ方式	②	高さ 300～400mm 奥行き 2000mm	遊間では工法 16-3 を適用
2	2	<u>工法廃止：欠番</u> (パネル陽極方式)	②	不明	
3	3	導電性塗料方式(エマコ CP30 アノード方式)	④	幅 300mm 以上 奥行き 1000mm	ローラーによる塗布施工が可能 なこと
4	4	導電性塗料方式 (キャブロンコート方式)	④	高さ 400mm 以上 奥行き 2000mm	作業員が横になって作業できる 高さ
5	5	チタン溶射方式	⑤	—	
6	6	導電性モルタル方式	—	幅 500mm 以上 奥行き 1000mm	幅 500mm 以上は狭隘部の定義に 当てはまらない可能性がある
7	7	チタンリボンメッシュ方式	—	—	工法 7-8 を適用
8	7-1	チタンリボンメッシュ方式	⑤	—	—
9	7-2	チタンリボンメッシュ補修先付け方式	②	不明	
10	7-3	チタンリボンメッシュ新設先付け方式	①	不明	新設同時施工
11	7-4	チタンリボンメッシュ e-lineV 方式	④	不明	作業スペースの 確保が必要
12	7-5	チタンリボンメッシュモル方式	②	不明	
13	7-6	チタンリボンメッシュエルグリッド方式	②	不明	
14	7-7	チタンリボンメッシュ RMV 方式	②	不明	
15	7-8	チタンリボンメッシュ RMV-GECS 方式	④	高さ 120mm 以上 奥行き 2000mm	下面のみ適用可 遊間 (垂直部) は工法 16-13 適用
16	7-9	貼付け型モル陽極方式 e-Cover・C 工法	②	幅 300mm 奥行き 500mm	手が届く程度
17	8	チタングリッド方式	②	不明	人の手や機材が入るスペース必 要
18	9	PI-Slit 方式	②	不明	人の手や機材が入るスペース必 要
19	10	チタントレイ方式	③	高さ 400mm 以上 奥行き 2000mm	陽極設置スペースの確保必要
20	11	<u>工法廃止：欠番</u> (ニッケル被覆炭素繊維方式)	—	—	—
21	12	チタンロッド方式	—	500mm 程度	削孔できるスペースとして 500mm 程度必 要。狭隘部の定義に当てはまらない可能性 がある。ただし構造物の反対側から削孔す ることで施工できる可能性はある
22	13	亜鉛シート方式	④	100mm 程度以上	奥行き不明
23	14	亜鉛・アルミ擬合金溶射方式	⑤	—	—
24	15	ALAPANEL 方式	④	100mm 程度以上	奥行き不明
25	16-1	外付け線状陽極ユニット方式 (TC ユニット工法)	⑤	—	—
26	16-2	貼付け型シート陽極方式 e-Sheet・NP 工法	②	幅 300mm 奥行き 500mm	手が届く程度
27	16-3	ECP パネル方式 桁端電気防食工法	②	幅 0mm 以上 奥行き制限なし	遊間のような 鉛直面のみ

※工法番号 13～15 の水色ハッチングは、流電陽極方式の電気防食工法

※表中の数字①～⑤については、表-3.2.2 に示す番号に対応する

※表中の d の橋梁区分については、図-3.2.1 に示す番号に対応する

○一般部を対象とした工法を狭隘部に施工する場合、概ね陽極材を設置するための作業スペースが必要であるとの回答であった。作業員が横になって作業できる高さ（400mm程度）を確保する必要がある工法や、手が届く範囲（奥行き500mm程度）までの施工が可能である工法などがある。

○桁端の狭隘部を対象とした「7-8 チタンリボンメッシュ RMV-GECS 方式」、「16-3ECP パネル方式桁端電気防食工法」では、作業スペースがあまりない状態でも施工可能との回答であった。

## (2) 沓座付近への適用性

表-3.2.4 に沓座への適用性に関する回答結果を示す。狭隘部の結果と同様に、作業スペースを確保する必要がある（③または④の条件付き施工可能）との回答が多数を占めた。

表-3.2.4 沓座付近への適用性に関する回答

No.	工法番号	工法名	沓座付近への適用 f			備考	
			桁下面	下部工上面	両方		
1	1	チタンメッシュ方式	③	—	—	○	桁下面の施工実績 下部工上面の施工実績 はないが施工可能
2	2	<u>工法廃止：欠番</u> （パネル陽極方式）	②	不明	不明	不明	
3	3	導電性塗料方式(エマコ CP30 アノード方式)	④	—	—	○	ローラによる塗布施工 が可能なこと
4	4	導電性塗料方式（キャブロンコート方式）	④	—	—	○	作業員が横になって施 工できる高さ必要
5	5	チタン溶射方式	⑤	—	—	—	
6	6	導電性モルタル方式	④	—	—	○	モルタル吹付けが可能 な空間があること
7	7	チタンリボンメッシュ方式	—	—	—	—	工法 7-8 を適用
8	7-1	チタンリボンメッシュ方式	⑤	—	—	—	
9	7-2	チタンリボンメッシュ補修先付け方式	②	不明	不明	不明	型枠設置に考慮を有す る
10	7-3	チタンリボンメッシュ新設先付け方式	①	不明	不明	不明	
11	7-4	チタンリボンメッシュ e-lineV 方式	④	不明	不明	不明	作業スペースの確保が 必要
12	7-5	チタンリボンメッシュモール方式	②	不明	不明	不明	型枠設置に考慮を有す る
13	7-6	チタンリボンメッシュエルグリッド方式	②	不明	不明	不明	陽極設置補強材の設 置・固定に配慮を有す る
14	7-7	チタンリボンメッシュ RMV 方式	—	—	—	—	工法 7-8 を適用
15	7-8	チタンリボンメッシュ RMV-GECS 方式	③	—	—	○	下部工上面の施工実績 はないが施工可能
16	7-9	貼付け型モール陽極方式 e-Cover・C 工法	④	—	—	○	陽極設置作業スペース の確保が必要
17	8	チタングリッド方式	③	—	—	○	陽極設置作業スペース の確保が必要
18	9	PI-Slit 方式	③	—	—	○	陽極設置作業スペース の確保が必要
19	10	チタントレイ方式	③	—	—	○	陽極設置作業スペース の確保が必要
20	11	<u>工法廃止：欠番</u> （ニッケル被覆炭素繊維方式）	—	—	—	—	
21	12	チタンロッド方式	①	—	—	○	削孔できるスペースとして 500mm 程度必要。狭隘部の定 義に当てはまらない可能性が ある。ただし構造物の反対側か ら削孔することで施工できる 可能性はある

22	13	亜鉛シート方式	④	不明	不明	不明	100mm程度以上の隙間が必要
23	14	亜鉛・アルミ擬合金溶射方式	⑤	—	—	—	
24	15	ALAPANEL方式	④	不明	不明	不明	100mm程度以上の隙間が必要
25	16-1	外付け線状陽極ユニット方式 (TC ユニット工法)	④	—	—	○	陽極ユニットをビスで固定するための施工空間が必要
26	16-2	貼付け型シート陽極方式 e-Sheet・NP工法	④	—	—	○	陽極設置作業スペースが必要
27	16-3	ECP パネル方式 桁端電気防食工法	⑤	—	—	—	鉛直面のみ施工可能

※工法番号 13～15 の水色ハッチングは、流電陽極方式の電気防食工法

※表中の数字①～⑤については、表-3.2.2 に示す番号に対応する

※表中の f の橋梁区分については、図-3.2.1 に示す番号に対応する

### 3.3 立地環境に関わる適用性

#### 3.3.1 水が関係する立地環境に関わる適用性

水が関係する立地環境に関わる適用性の回答結果を表-3.3.1に示す。

気中部は、どの工法も条件なく適用できるが、飛沫帯から水中部、水がかり部、高湿度環境のように構造物表面に存在する水の多寡に応じて、各工法の適用にあたって条件が必要となるか、施工不可となる。

表-3.3.1 水が関係する立地環境に関わる適用性に関する回答

No.	工法番号	工法名	気中部	飛沫帯	干満帯	水中部	水がかり部	高湿度環境	備考(条件など)
1	1	チタンメッシュ方式	①	①	①	⑤	④	①	回路分け
2	2	<u>工法廃止：欠番</u> (パネル陽極方式)	①	②	①	④	④	②	回路分け
3	3	導電性塗料方式(エマコ CP30 アノード方式)	①	④	⑤	⑤	④	①	施工時乾燥 通電量制御可能な 回路設計
4	4	導電性塗料方式 (キャブロンコート方式)	①	⑤	⑤	⑤	④	①	回路分け
5	5	チタン溶射方式	①	③	⑤	⑤	⑤	①	
6	6	導電性モルタル方式	①	④	④	⑤	④	①	施工時乾燥
7	7	チタンリボンメッシュ方式	①	①	③	③	③	①	回路分け
8	7-1	チタンリボンメッシュ方式	①	①	③	③	③	①	回路分け
9	7-2	チタンリボンメッシュ補修先付け方式	①	①	①	②	①	①	
10	7-3	チタンリボンメッシュ新設先付け方式	①	①	②	②	①	①	
11	7-4	チタンリボンメッシュ e-lineV 方式	①	①	③	③	③	①	回路分け
12	7-5	チタンリボンメッシュモールド方式	①	②	②	②	②	②	
13	7-6	チタンリボンメッシュエルグリッド方式	①	①	②	②	①	①	
14	7-7	チタンリボンメッシュ RMV 方式	①	①	③	⑤	③	①	回路分け 水中部はかぶり確保困難で不可
15	7-8	チタンリボンメッシュ RMV-GECS 方式	①	②	④	⑤	③	②	回路分けか遮水措置
16	7-9	貼付け型モールド陽極方式 e-Cover・C 工法	①	①	①	⑤	④	②	施工時水がかり防止
17	8	チタングリッド方式	①	①	①	⑤	④	①	水がかり部の回路分けと陽極材のかぶり確保必要
18	9	PI-Slit 方式	①	①	①	⑤	④	①	水がかり部の回路分けと陽極材のかぶり確保必要
19	10	チタントレイ方式	①	①	①	⑤	④	①	回路分け
20	11	<u>工法廃止：欠番</u> (ニッケル被覆炭素繊維方式)	①	—	—	—	—	—	
21	12	チタンロッド方式	①	①	①	③	①	①	回路分け 施工時乾燥
22	13	垂鉛シート方式	①	①	②	⑤	④	①	導水工適用
23	14	垂鉛・アルミ擬合金溶射方式	①	①	⑤	⑤	④	②	
24	15	ALAPANEL 方式	①	①	②	⑤	④	①	導水工適用
25	16-1	外付け線状陽極ユニット方式 (TC ユニット工法)	①	②	⑤	⑤	⑤	②	
26	16-2	貼付け型シート陽極方式 e-Sheet・NP 工法	①	①	⑤	⑤	④	②	水がかり防止処置
27	16-3	ECP パネル方式 桁端電気防食工法	②	②	⑤	⑤	②	②	

※工法番号 13～15 の水色ハッチングは、流電陽極方式の電気防食工法

※表中の数字①～⑤については、表-3.2.2 に示す番号に対応する

アンケート結果によると以下のようなことに留意する必要がある。

a)設計面での条件（留意点）

- ・気中部から水中部などにわたって電気防食を行う場合、電流分布を考慮して気中部とその他の部位などを回路分けする必要がある。
- ・水の影響でアノードプロダクツが懸念される箇所では、陽極材のかぶりを確保することや過大な防食電流とならないように考慮する必要がある。

b)施工面での条件（留意点）

塗料を使用する工法のように、水がかり防止や導水工の適用により、施工時に気中環境が保持される必要がある工法がある。

ただし、水が関係する立地環境で適用条件の詳細は、電気防食工法の適用範囲、水の存在状況や構造物の配筋、かぶりなどによって異なると考えられるため、各工法のアンケート結果の詳細を参照することや、工法を保持する会社に確認する必要がある。

### 3.3.2 その他の立地環境に関わる適用性

その他の立地環境に関わる適用性として、以下についてアンケートを行った。

a)構造物に飛砂があたり磨耗作用がある立地環境への適用性

b)電気を使用するため、可燃性ガスのような可燃物の着火源にならないようにする防爆対策が必要な立地環境への適用性

表-3.3.2 にアンケート結果を示す。

a)飛砂による磨耗作用がある立地環境

- ・陽極システムが影響を受ける工法では、条件として飛砂対策を実施した場合に適用できる。
- ・陽極材をモルタル被覆する工法では、無条件で適用できる。
- ・飛砂対策⑤施工不可と回答した工法であっても、構造物表面に飛砂が及ばないように対策を行えば適用できる可能性はある。

b)防爆対策が必要な立地環境

- ・流電陽極方式の工法番号 13 亜鉛シート方式、15 ALAPANEL 方式では、無条件で適用可能
- ・外部電源方式は配線、電源装置の防爆対策を行う条件付きで適用可能
- ・工法番号 5 チタン溶射では、陽極設置時に防爆解除が必要である。同様に工法番号 14 亜鉛・アルミ擬合金溶射方式では 5 施工不可との回答であるが、陽極設置時に防爆解除が可能であれば適用できる可能性がある。

表-3.3.2 その他の立地環境に関わる適用性に関する回答（飛砂，防爆）

No.	工法番号	工法名	飛砂	条件	防爆	条件
1	1	チタンメッシュ方式	①		③	配線および電源装置の防爆対策が必要
2	2	<u>工法廃止：欠番</u> （パネル陽極方式）	②		②	
3	3	導電性塗料方式(エマコ CP30 アノード方式)	⑤		④	配線および電源装置の防爆対策が必要
4	4	導電性塗料方式（キャブロンコート方式）	⑤		④	
5	5	チタン溶射方式	③	表面被覆の併用や飛砂対策必要	④	陽極設置作業時に防爆解除が必要
6	6	導電性モルタル方式	④	飛砂による磨耗で陽極材が欠損する場合は不可	④	配線および電源装置の防爆対策が必要
7	7	チタンリボンメッシュ方式	①		③	
8	7-1	チタンリボンメッシュ方式	①		③	
9	7-2	チタンリボンメッシュ補修先付け方式	①		③	
10	7-3	チタンリボンメッシュ新設先付け方式	①		②	
11	7-4	チタンリボンメッシュ e-lineV 方式	①		④	配線および電源装置の防爆対策が必要
12	7-5	チタンリボンメッシュモール方式	②		⑤	モールが樹脂製のため不可
13	7-6	チタンリボンメッシュエルグリッド方式	①		③	配線および電源装置の防爆対策が必要
14	7-7	チタンリボンメッシュ RMV 方式	①		③	
15	7-8	チタンリボンメッシュ RMV-GECS 方式	②		④	
16	7-9	貼付け型モール陽極方式 e-Cover・C 工法	④	磨耗防止材の取付け必要	④	
17	8	チタングリッド方式	①		④	
18	9	PI-Slit 方式	①		④	
19	10	チタントレイ方式	①		⑤	
20	11	<u>工法廃止：欠番</u> （ニッケル被覆炭素繊維方式）	—		—	
21	12	チタンロッド方式	④	飛砂による剥離防止必要	③	
22	13	亜鉛シート方式	①		①	
23	14	亜鉛・アルミ擬合金溶射方式	⑤		⑤	
24	15	ALAPANEL 方式	②		①	
25	16-1	外付け線状陽極ユニット方式（TC ユニット工法）	②		⑤	
26	16-2	貼付け型シート陽極方式 e-Sheet・NP 工法	④	磨耗防止材の取付け必要	④	配線および電源装置の防爆対策が必要
27	16-3	ECP パネル方式 桁端電気防食工法	②		④	

※工法番号 13～15 の水色ハッチングは、流電陽極方式の電気防食工法

※表中の数字①～⑤については、表-3.2.2 に示す番号に対応する



### 3.4 その他に関わる適用性

その他に関わる適用性に関する回答を表-3.4.1 および表-3.4.2 に示す。

表-3.4.1 その他に関わる適用性に関する回答（その1：塩化物イオン、既設塗装、補強と併用）

No.	工法番号	工法名	塩化物イオンの多寡	既設塗装面	補強と併用	併用できる補強工法		
						外ケーブル	炭素繊維シート	FRPグリッド
1	1	チタンメッシュ方式	○	除去すれば可	条件付き可。全面接着する工法との併用は困難	△ 外ケーブル緊張後に陽極設置	×	○
2	2	<u>工法廃止：欠番</u> （パネル陽極方式）	○		○	不明	○	
3	3	導電性塗料方式(エマコ CP30 アノード方式)	○		条件付き可。導通性のある補強材と陽極材の絶縁必要	○	△ 絶縁	不明
4	4	導電性塗料方式（キャブロンコート方式）	○		条件付き可。外ケーブルとの併用は可	△ 外ケーブル緊張後に陽極設置	×	不明
5	5	チタン溶射方式	○		条件付き可。導通性のある補強材と陽極材の絶縁必要	○	△ 絶縁	不明
6	6	導電性モルタル方式	○		可	条件付き可	△ 外ケーブル緊張後に陽極設置	△ 陽極部への非施工
7	7	チタンリボンメッシュ方式	○	可	可	不明	不明	不明
8	7-1	チタンリボンメッシュ方式	○	可	新設専用対象外	—	—	—
9	7-2	チタンリボンメッシュ補修先付け方式	○	可	可	不明	不明	不明
10	7-3	チタンリボンメッシュ新設先付け方式	○	新設専用対象外	新設専用のため対象外	—	—	—
11	7-4	チタンリボンメッシュ e-lineV 方式	○	可	可	不明	不明	不明
12	7-5	チタンリボンメッシュモールド方式	○	陽極設置部除去で可	不可	×	×	×
13	7-6	チタンリボンメッシュエルグリッド方式	○	可補強時に全面はつる	可。本工法自体が補強併用法	—	—	—
14	7-7	チタンリボンメッシュ RMV 方式	○	可	条件付き可	△ 外ケーブル緊張後に陽極設置	△ 陽極部への非施工	○
15	7-8	チタンリボンメッシュ RMV-GECS 方式	○	可				
16	7-9	貼付け型モールド陽極方式 e-Cover・C 工法	○	陽極設置部除去で可	条件付き可	△ 絶縁	△ 絶縁	不明
17	8	チタングリッド方式	○	可	可	○	△ 陽極部への非施工	不明
18	9	PI-Slit 方式	○	可				
19	10	チタントレイ方式	○	陽極設置部除去で可	条件付き可	△ 外ケーブルとの非接触	×	不明
20	11	<u>工法廃止：欠番</u> （ニッケル被覆炭素繊維方式）	—	—	—	—	—	—
21	12	チタンロッド方式	○	可	条件付き可	△ 絶縁	△ 絶縁。ロット頭部の非閉塞	不明
22	13	亜鉛シート方式	○	除去すれば可	不可	×	×	×
23	14	亜鉛・アルミ擬合金溶射方式	○		条件付き可 外付け PC 補強	○	×	不明
24	15	ALAPANEL 方式	○		不可	×	×	×
25	16-1	外付け線状陽極ユニット方式（TC ユニット工法）	○	電解質部の除去で可	条件付き可 陽極を避けて補強材設置が必要	不明	不明	不明
26	16-2	貼付け型シート陽極方式 e-Sheet・NP 工法	○	貼付部の除去で可	条件付き可。全面接着する工法との併用は困難	△ 絶縁	△ 絶縁	不明
27	16-3	ECP パネル方式 桁端電気防食工法	○	除去すれば可	条件付き可。桁端面部の補強不可だが主桁橋軸方向の補強は可	○	△ 陽極部への非施工	不明

※工法番号 13～15 の水色ハッチングは、流電陽極方式の電気防食工法

※○：適用可，△：条件付き適用可，×：不可

#### a)塩化物イオンの多寡による適用性

- ・コンクリート中に塩化物イオンが多く存在するときに適用しやすいか、少ないときに適用しやすいか、アンケートを行った。全工法において塩化物イオン量の多寡とは関係なく適用できるとの回答であった。

#### b)既設塗装面への適用性

- ・各工法の標準的な施工手順以外で、コンクリート表面の既設塗装材を改めて除去する場合は、「除去すれば可」、「陽極設置部除去で可」などの条件付き可での回答としている。
- ・コンクリート表面に陽極材を設置する工法のように、陽極材から鉄筋への通電に対して既設塗装材が支障物となるのであれば、塗装材の除去が必要となっている。
- ・チタンリボンメッシュ方式やチタングリッド方式などでは、コンクリート表面を溝切りして溝内に陽極材を設置するため、既設塗装材の除去は必要なく「可」となっている。ただし、溝切りすることで溝部の既設塗装材は結果的に除去されている。

#### c)併用できる補強工法

- ・電気防食工法と併用できる補強工法として、外ケーブル工法、炭素繊維シート接着工法、FRP グリッド工法を例として挙げ、併用できる補強工法のアンケートを行った。
- ・炭素繊維シート接着工法では、炭素繊維シートが電気を導通する材料であるため、陽極材との絶縁または陽極部での非施工が必要との回答である。
- ・外ケーブル工法では、外ケーブルを施工し緊張後に、陽極を設置するように施工の留意点を記載する工法があった。また当然ではあるが、外ケーブルと陽極材を短絡させないように、両者の非接触が必要である。

#### d)鉄筋腐食への適用性

- ・鉄筋腐食度については、塩害橋梁維持管理マニュアル<sup>3)</sup>の判定区分により設定した。
- ・鉄筋腐食なし、ごく表面的な腐食、浅い孔食など断面欠損の軽微な腐食の場合は、すべての工法で適用可であった。ただし、鉄筋腐食していない新設時のみに適用する7-3 チタンリボンメッシュ新設先付け方式は対象外である。
- ・断面欠損が著しい腐食、および鉄筋が破断している場合については、全工法が条件付き可であったため適用条件を回答いただいた。各工法の回答をそのまま記載している。適用条件として挙げた条件や質問の意図が不明瞭であったためか、類似工法において回答が異なるなど、回答者の解釈が異なったようで各工法の明瞭な適用条件を示すことができていない。
- ・鉄筋が破断している場合は、導通確保を適用条件としている回答が非常に多い。

#### 第2回アンケートで記載されていたコメント

- ・鉄筋増設を行う場合や導通を確保するときには、断面修復工を伴う
- ・耐荷力を満足しない場合は、補強工法の併用が必要

表-3.4.2 その他に関する適用性に関する回答（その2：鉄筋腐食）

No	工法番号	工法名	・腐食なし ・ごく表面的な腐食 ・軽微な腐食				断面欠損が著しい腐食				鉄筋が破断している場合				鉄筋が破断している場合の適用条件			
			断面欠損が著しい腐食	通電量の確保	鋼材表面の除錆	鉄筋の増設	断面欠損が著しい腐食	通電量の確保	鋼材表面の除錆	鉄筋の増設	鉄筋が破断している場合	通電量の確保	鋼材表面の除錆	鉄筋の増設	鉄筋が破断している場合の適用条件	通電量の確保	鋼材表面の除錆	鉄筋の増設
1	1	チタンメッシュ方式	○	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
2	2	工法廃止：欠番（パネル陽極方式）	○	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
3	3	導電性塗料方式(エマコ CP30アノード方式)	○	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4	4	導電性塗料方式（キヤプロンコート方式）	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
5	5	チタン溶射方式	○	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
6	6	導電性モルタル方式	○	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
7	7	チタンリボンメッシュ方式	○	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
8	7-1	チタンリボンメッシュ方式	○	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
9	7-2	チタンリボンメッシュ補修先付け方式	○	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
10	7-3	チタンリボンメッシュ新設先付け方式	○	対象外	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
11	7-4	チタンリボンメッシュ e-lineV方式	○	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
12	7-5	チタンリボンメッシュモジュール方式	○	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
13	7-6	チタンリボンメッシュエエルグリッド方式	○	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
14	7-7	チタンリボンメッシュ RMV方式	○	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
15	7-8	チタンリボンメッシュ RMV-GECS方式	○	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
16	7-9	貼付け型モジュール陽極方式 e-Cover・C工法	○	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
17	8	チタングリッド方式	○	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
18	9	PI-Slit方式	○	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
19	10	チタントレイ方式	○	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
20	11	工法廃止：欠番（ニッケル被覆炭素繊維方式）	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	12	チタンロッド方式	○	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
22	13	亜鉛シート方式	○	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
23	14	亜鉛・アルミ擬合金溶射方式	○	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
24	15	ALAPANEL方式	○	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
25	16-1	外付け線状陽極ユニット方式（TCユニット工法）	○	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
26	16-2	貼付け型シート陽極方式 e-Sheet・NP工法	○	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
27	16-3	ECPパネル方式 桁端電気防食工法	○	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

※工法番号 13～15 の水色ハッチングは、流電陽極方式の電気防食工法 ※○：適用可，△：条件付き適用可，×：不可

### 3.5 耐用年数

#### 3.5.1 陽極システムの耐用年数

表-3.5.1 に各工法の陽極システムの耐用年数を示す。

なお、ここに示す耐用年数は、アンケートでの自己申告によるものであり、試験結果や実験によって本共同研究にて性能を確認したわけではない。

○チタン系の陽極材を使用している場合、耐用年数 40 年以上と回答している傾向にある。

○流電陽極方式では、10～20 年の耐用年数である。

なお、陽極システムの回答を求めたが、表-3.5.1 の回答はどちらかと言えば陽極材の耐用年数を回答している傾向があるように見える。特記すべきコメントとして、以下を記載する。

「工法番号 1 チタンメッシュ方式における陽極システムの耐久性に対するコメント」

40 年以上は陽極材と固定冶具の耐用年数です。被覆モルタルは部分的損傷があるため、適用した被覆モルタル全てを定量的に評価することができません。(部分的補修が必要となる場合があります)

このコメントのようにチタンメッシュ方式のような被覆モルタルを使用する工法に関して補修が必要になる場合があることがわかる。他の工法でも同様と考えられ、また他にバックフィル材やその他に関して補修を行うことにより陽極材の耐用年数まで性能を発揮できると考えられる。

表-3.5.1 各工法の陽極システムの耐用年数

No.	工法番号	工法名	通電方式	陽極材	10~20年	20~30年	30~40年	40年以上
1	1	チタンメッシュ方式	外部電源					○
2	2	<u>工法廃止：欠番</u> (パネル陽極方式)						○
3	3	導電性塗料方式(エマコ CP30 アノード方式)			○			
4	4	導電性塗料方式 (キャプロンコート方式)			○			
5	5	チタン溶射方式						○
6	6	導電性モルタル方式				○		
7	7	チタンリボンメッシュ方式						○
8	7-1	チタンリボンメッシュ方式						○
9	7-2	チタンリボンメッシュ補修先付け方式						○
10	7-3	チタンリボンメッシュ新設先付け方式						○
11	7-4	チタンリボンメッシュ e-lineV 方式						○
12	7-5	チタンリボンメッシュモールド方式						○
13	7-6	チタンリボンメッシュエルグリッド方式						○
14	7-7	チタンリボンメッシュ RMV 方式						○
15	7-8	チタンリボンメッシュ RMV-GECS 方式						○
16	7-9	貼付け型モールド陽極方式 e-Cover・C 工法					○	
17	8	チタングリッド方式						○
18	9	PI-Slit 方式						○
19	10	チタントレイ方式						○
20	11	<u>工法廃止：欠番</u> (ニッケル被覆炭素繊維方式)						
21	12	チタンロッド方式						○
22	13	亜鉛シート方式	流電陽極		○			
23	14	亜鉛・アルミ擬合金溶射方式			○			
24	15	ALAPANEL 方式		20年				
25	16-1	外付け線状陽極ユニット方式 (TC ユニット工法)	外部電源	40年				
26	16-2	貼付け型シート陽極方式 e-Sheet・NP 工法				○		
27	16-3	ECP パネル方式 拵端電気防食工法						○

※工法番号 13~15 の水色ハッチングは、流電陽極方式の電気防食工法

※陽極材の耐用年数を回答している傾向が強いと考えられる

### 3.5.2 副材・配線の耐用年数

副材・配線の耐用年数について、第1回目のアンケートでは回答にバラツキが見られた。

回答としては、10年以上、15年、10~20年、20年という回答であった。副材・配管システムについて各工法で大きく異なる材料を使用するわけではないため、「10~20年に集約」しても問題ないかを第2回アンケートで異論ないかを確認した。

特に異論はなかったため、本アンケートでは副材・配線システムの耐用年数を「10~20年」とする。ただし、使用する副材・配線システムの材料仕様などによっては、当然耐用年数は異なることが考えられ、以下のコメントを記載しておく。

#### 第2回アンケートでのコメント

「10～20年に集約することに全く異存はありませんが、適用する材料の品質や環境によって耐用年数が大きく異なります。電線は電気設備技術基準に準拠した対応となりますので、さほど問題はありますが、配管材は大きく異なります。例えば、1重フレキ管は曲がり部等での割れが多数発生していることが調査WGで確認されています。一方、マシンフレキ管や塩ビ管等は、台風等の物理的損傷を除けば、20年以上の耐用年数が確認されています。本問は材質等を限定して記載すべきではないでしょうか。」

#### 3.5.3 直流電源装置の耐用年数

直流電源装置の耐用年数について、第1回目のアンケートでは回答にバラツキが見られた。

回答としては、10年、10年以上、10～20年、20年、20年以上という回答であった。回答年数が一部重複しており、区分けが難しいため、10～20年、20～30年の2種類の回答に集約することとして第2回アンケートで確認して、まとめたものが表-3.5.2である。陽極システムの耐用年数と比較して、直流電源装置の耐用年数は短くなっている。

ただし、使用する直流電源装置の仕様などによっては、当然耐用年数は異なることが考えられ、以下のコメントを記載しておく。

#### 第2回アンケートでのコメント

○副材・配線システムと同様で、適用する機器によって異なります。市販の電源装置の場合、概ね10年程度であり、環境および機器の当たり外れがあり、10年より長い場合も、短い場合もあるように思います。専用の電源装置（日本防蝕工業、ナカボーテック）の場合、20年程度の実績があり、交換した事例の確認はありません。

○屋外仕様の直流電源装置には、定電流制御方式、定電圧制御方式、その両方を兼ね備えたもの、タップ制御方式等がある。コンクリート構造物ではなく、地中配管の電気防食で使用されている直流電源装置では、30年程度稼働しているものもあり、装置仕様、使用環境やメンテナンスによっては、20年以上使用できる可能性はある。

○ユニット基盤、アレスター等の経年劣化（15年前後）による交換が必要となる。

表-3.5.2 各工法の直流電源装置の耐用年数

No.	工法番号	工法名	通電方式	直流電源装置	10～20年	20～30年
1	1	チタンメッシュ方式	外部電源	20年		
2	2	<u>工法廃止：欠番</u> (パネル陽極方式)		20年		
3	3	導電性塗料方式(エマコ CP30 アノード方式)			○	
4	4	導電性塗料方式 (キャブロンコート方式)				○
5	5	チタン溶射方式				○
6	6	導電性モルタル方式			○	
7	7	チタンリボンメッシュ方式		20年		
8	7-1	チタンリボンメッシュ方式				○
9	7-2	チタンリボンメッシュ補修先付け方式		20年		
10	7-3	チタンリボンメッシュ新設先付け方式		20年		
11	7-4	チタンリボンメッシュ e-lineV 方式			○	
12	7-5	チタンリボンメッシュモールド方式		20年		
13	7-6	チタンリボンメッシュエルグリッド方式		20年		
14	7-7	チタンリボンメッシュ RMV 方式		20年		
15	7-8	チタンリボンメッシュ RMV-GECS 方式		10年(ソーラー発電の場合)		
16	7-9	貼付け型モールド陽極方式 e-Cover・C 工法			○	
17	8	チタングリッド方式			○	
18	9	PI-Slit 方式			○	
19	10	チタントレイ方式		20年以上		○
20	11	<u>工法廃止：欠番</u> (ニッケル被覆炭素繊維方式)		—	—	—
21	12	チタンロッド方式		20年		
22	13	亜鉛シート方式	流電陽極	電源装置なし		
23	14	亜鉛・アルミ擬合金溶射方式				
24	15	ALAPANEL 方式				
25	16-1	外付け線状陽極ユニット方式 (TC ユニット工法)	外部電源	20年		
26	16-2	貼付け型シート陽極方式 e-Sheet・NP 工法			○	
27	16-3	ECP パネル方式 桁端電気防食工法			○	

※使用する直流電源装置の仕様などによっては、当然耐用年数は異なるので注意が必要

※工法番号 13～15 の水色ハッチングは、流電陽極方式の電気防食工法

### 3.5.4 実構造物での耐用年数

実構造物における各工法の耐用年数の回答結果を表-3.5.3 に示す。

表-3.5.3 各工法の実構造物での耐用年数

No.	工法番号	工法名	通電方式	開発年	実構造物での耐用年数	陽極材の交換回数	配線の交換回数	電源の交換回数
1	1	チタンメッシュ方式	外部電源	1984年	28年	なし	なし	1回 (機種で相違)
2	2	<u>工法廃止：欠番</u> (パネル陽極方式)		1991年	25年	なし	なし	なし
3	3	導電性塗料方式(エマコ CP30 アノード方式)		1992年	10年(国内)	なし	なし	なし
4	4	導電性塗料方式 (キャブロンコート方式)		1994年	22年	22年目で部分補修	22年目で部分交換	22年目で機器交換
5	5	チタン溶射方式		1997年	17年	なし	17年目	1回
6	6	導電性モルタル方式		1991年	14年(国内)	なし	なし	なし
7	7	チタンリボンメッシュ方式		1986年	25年：平板形状で新設棧橋。現状形状の溝切りでは19年	なし	なし	なし
8	7-1	チタンリボンメッシュ方式		1997年	16年	なし	あり	13年目
9	7-2	チタンリボンメッシュ補修先付け方式		1998年	18年	なし	なし	なし
10	7-3	チタンリボンメッシュ新設先付け方式		1991年	25年	なし	なし	なし
11	7-4	チタンリボンメッシュ e-lineV 方式		2001年	14年	なし	なし	なし
12	7-5	チタンリボンメッシュモールド方式		2003年	13年	なし	なし	なし
13	7-6	チタンリボンメッシュエルグリッド方式		2006年	10年	なし	1回 竣工後に台風による破損の復旧	なし
14	7-7	チタンリボンメッシュ RMV 方式		2009年	5年	なし	なし	なし
15	7-8	チタンリボンメッシュ RMV-GECS 方式		2010年	5年	なし	なし	なし
16	7-9	貼付け型モールド陽極方式 e-Cover・C 工法		2012年	4年	なし	なし	なし
17	8	チタングリッド方式		1992年	21年	なし	なし	なし
18	9	PI-Slit 方式		2006年	10年	なし	なし	なし
19	10	チタントレイ方式		2003年	13年	なし	なし	なし
20	11	<u>工法廃止：欠番</u> (ニッケル被覆炭素繊維方式)		不明	—	—	—	—
21	12	チタンロッド方式		1984年	18年	なし	あり	あり
22	13	亜鉛シート方式	流電陽極	1988年	28年	あり 防食板の取替	あり	—
23	14	亜鉛・アルミ擬合金溶射方式		1994年	6年	なし	なし	—
24	15	ALAPANEL 方式		2009年	7年	あり 防食板の取替	あり	—
25	16-1	外付け線状陽極ユニット方式 (TC ユニット工法)	外部電源	2015年	1年未満	なし	なし	なし
26	16-2	貼付け型シート陽極方式 e-Sheet・NP 工法		2014年	3年	なし	なし	なし
27	16-3	ECP パネル方式 桁端電気防食工法		2013年	0年	—	—	—

※工法番号 13～15 の水色ハッチングは、流電陽極方式の電気防食工法

※実構造物の耐用年数は、国内のものであり、また 2015 年度現在である。

※工法番号 1 のチタンメッシュ方式は、米国での開発が 1984 年であり国内適用年は 1988 年



### 3.6 各工法の施工実績

各工法の施工実績を表-3.6.1に示し、図-3.6.1に各工法の施工面積を棒グラフで示す。

国内の施工実績として、最も多いのはチタンリボンメッシュ方式である。10,000㎡以上の施工実績があるのは、1 チタンメッシュ方式、5 チタン溶射方式、7 チタンリボンメッシュ方式、7-4 チタンリボンメッシュ e-lineV 方式、8 チタングリッド方式、9 PI-Slit 方式、12 チタンロッド方式、13 亜鉛シート方式である。

表-3.6.1 各工法の施工実績一覧表

No.	工法番号	工法名	開発年	国内の施工実績	
				件数	面積(㎡)
1	1	チタンメッシュ方式	1984年	82	42,760
2	2	<u>工法廃止：欠番</u> (パネル陽極方式)	1991年	9	1,838
3	3	導電性塗料方式(エマコ CP30 アノード方式)	1992年	3	1,318
4	4	導電性塗料方式 (キャブロンコート方式)	1994年	4	711
5	5	チタン溶射方式	1997年	45	14,936
6	6	導電性モルタル方式	1991年	3	474
7	7	チタンリボンメッシュ方式	1986年	201	146,122
8	7-1	チタンリボンメッシュ方式	1997年	139	106,439
9	7-2	チタンリボンメッシュ補修先付け方式	1998年	2	190
10	7-3	チタンリボンメッシュ新設先付け方式	1991年	3	672
11	7-4	チタンリボンメッシュ e-lineV 方式	2001年	46	29,853
12	7-5	チタンリボンメッシュモールド方式	2003年	1	33
13	7-6	チタンリボンメッシュエルグリッド方式	2006年	1	66
14	7-7	チタンリボンメッシュ RMV 方式	2009年	8	4,681
15	7-8	チタンリボンメッシュ RMV-GECS 方式	2010年	1	18
16	7-9	貼付け型モールド陽極方式 e-Cover・C 工法	2012年	3	814
17	8	チタングリッド方式	1992年	47	27,560
18	9	PI-Slit 方式	2006年	27	24,665
19	10	チタントレイ方式	2003年	8	8,931
20	11	<u>工法廃止：欠番</u> (ニッケル被覆炭素繊維方式)	不明	不明	不明
21	12	チタンロッド方式	1984年	35	18,064
22	13	亜鉛シート方式	1988年	51	20,816
23	14	亜鉛・アルミ擬合金溶射方式	1994年	4	240
24	15	ALAPANEL 方式	2009年	37	5,577
25	16-1	外付け線状陽極ユニット方式 (TC ユニット工法)	2015年	1	1,130
26	16-2	貼付け型シート陽極方式 e-Sheet・NP 工法	2014年	3	249
27	16-3	ECP パネル方式 桁端電気防食工法	2013年	0	0

※施工実績は、2015年度までの実績である。

※工法番号1のチタンメッシュ方式は、米国での開発が1984年であり国内適用年は1988年

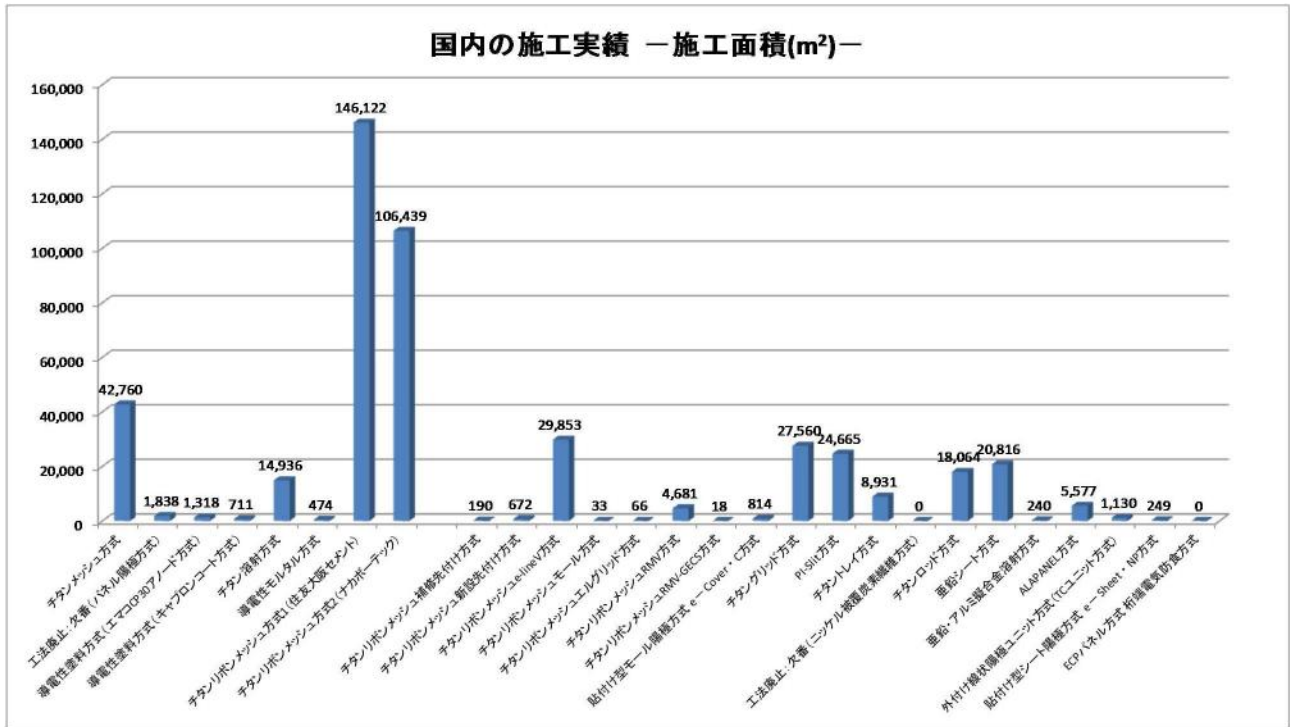


図-3.6.1 各工法の国内の施工実績グラフ (2015年度まで)

図-3.6.2 に年度ごとの施工面積の実績を示す。

全施工件数および全施工面積について、2000年前後以降にて、堅調に増加傾向を示している。

各工法の年度毎の施工件数および施工面積ともに、下記の傾向がある。

- ・件数(面積)が多いのは、チタンリボンメッシュ方式(住友大阪セメント, ナカボーテック)である。
- ・チタンメッシュ方式とチタングリッド方式は、近年の件数(面積)が少ない。
- ・ここ数年間において、件数(面積)が増加している方式は、チタン溶射方式、リボンメッシュ e-lineV 方式、PI-Slit 方式、および ALAPANEL 方式である。

■各工法の年度毎の施工面積 [m<sup>2</sup>]

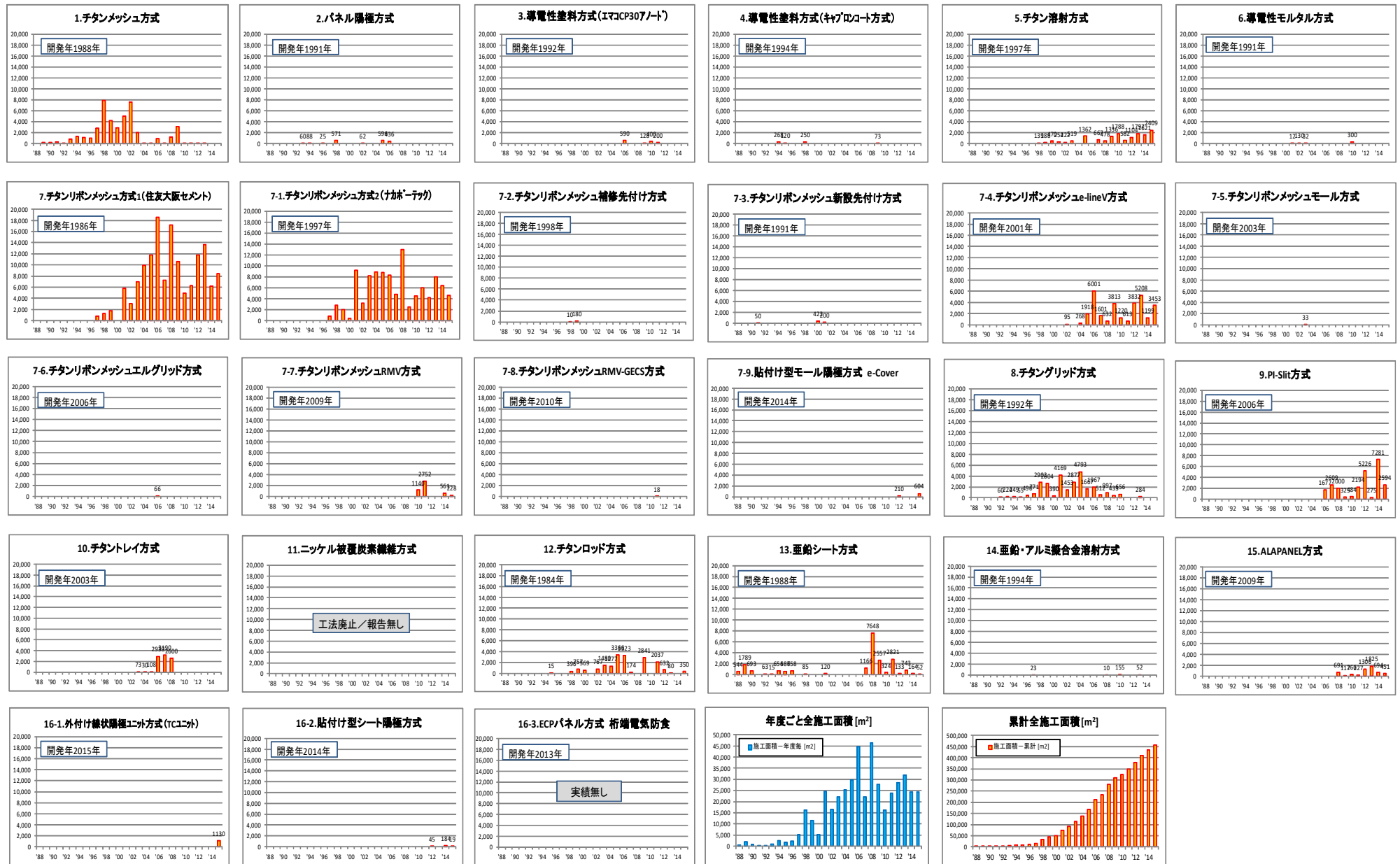


図-3.6.2 各工法の国内の施工面積の実績グラフ (年度ごと2015年度まで)

### 3.7 各工法のコスト

各工法のアンケートによる 1m<sup>2</sup>あたりのコスト（直接工事費）の一覧表を表-3.7.1 に示す。イニシャルコストのみで維持管理費やランニングコスト（電気代など）は含んでいない。なお、7-3 チタンリボンメッシュの新設先付け方式については、新設構造物のみを対象としており、陽極設置に伴う構造物の切削などのコストがなく他の工法と異なるため、表外に掲載した。

表-3.7.1 各工法の 1m<sup>2</sup>あたりのコスト（直接工事費）の一覧表

コスト	工法名称
50,000 円/m <sup>2</sup> 以上～70,000 円/m <sup>2</sup> 未満	3 導電性塗料方式(エマコ CP30 アノード方式) 4 導電性塗料方式 (キャブロンコート方式) 7-9 貼付け型モール陽極方式 e-Cover・C 方式 9 PI-Slit 方式 12 チタンロッド方式 14 垂鉛・アルミ擬合金溶射方式 16-2 貼付け型シート陽極方式 e-Sheet・NP 方式
70,000 円/m <sup>2</sup> 以上～90,000 円/m <sup>2</sup> 未満	1 チタンメッシュ方式 5 チタン溶射方式 6 導電性モルタル方式 7 チタンリボンメッシュ方式 7-4 チタンリボンメッシュ e-lineV 方式 7-5 チタンリボンメッシュモール方式 7-7 チタンリボンメッシュ RMV 方式 8 チタングリッド方式 10 チタントレイ方式 16-1 外付け線状陽極ユニット方式 (TC ユニット方式)
90,000 円/m <sup>2</sup> 以上～110,000 円/m <sup>2</sup> 未満	7-2 チタンリボンメッシュ補修先付け方式
110,000 円/m <sup>2</sup> 以上～130,000 円/m <sup>2</sup> 未満	7-6 チタンリボンメッシュエルグリッド方式 13 垂鉛シート方式 15 ALAPANEL 方式
130,000 円/m <sup>2</sup> 以上	7-8 チタンリボンメッシュ RMV-GECS 方式 } 施工面積 300m <sup>2</sup> ではない 16-3 ECP パネル方式 桁端電気防食方式 }

※施工面積 300m<sup>2</sup>を想定したコストを掲載しているが、7-8 チタンリボンメッシュ RMV-GECS 方式および 16-3ECP パネル方式桁端電気防食方式については、桁端の一部に適用する工法のため施工面積が小さくなる。そのため 1m<sup>2</sup>あたりのコストとしては高くなる。

※7-3 チタンリボンメッシュの新設先付け方式：30,000 円/m<sup>2</sup>未満。新設のみに適用され、既設構造物の切削手間の必要ない工法であり、表外に掲載した。

電気防食工法の選定にあたっては、施工に関わるイニシャルコストのみではなく、本来はイニシャルコスト、電気防食工法の維持管理費用（点検・補修含む）、残存供用期間、電気防食工法の耐用年数を考慮したライフサイクルコスト（LCC）により選定していく必要がある。

電気防食工法とその他の工法を含めたライフサイクルコストの算定においては、日本エルガード協会による参考文献<sup>4)5)</sup>等を参照するのが望ましい。

### 3.8 自由記入欄のまとめ

表-3.8.1 に各工法において自由記入欄に記載された項目を示す。内容については、アンケート回答に記載されたものをそのまま記載している。

表-3.8.1 各工法の自由記入項目一覧表

No.	工法番号	工法名	自由記入項目
1	1	チタンメッシュ方式	チタン系エキスパンドモデル表面に貴金属酸化物を焼き付けたチタンメッシュ陽極を用いた外部電源方式の電気防食工法である。面状に埋め込まれたチタンメッシュ陽極材からモルタル、コンクリートを介して防食対象鋼材へ、均質な防食電流が流れる。アメリカで面状陽極の実績を多数有する
2	2	工法廃止：欠番（パネル陽極方式）	—
3	3	導電性塗料方式(エマコ CP30 アノード方式)	導電性塗料方式は、ニッケル被覆したカーボン繊維を含む塗料を面状に設置するため、陽極材全体から流れる防食電流の均一性に優れ、通電量を小さく抑えることができる
4	4	導電性塗料方式（キャブロンコート方式）	面状陽極であるため、防食電流の均一性が良い。トップコートの施工により美観がよい
5	5	チタン溶解方式	面状陽極であるため、防食電流の均一性が良い。複雑な形状構造物にも適用可能である。電極設置に伴う荷重の増加が無い
6	6	導電性モルタル方式	ニッケル被覆したカーボン繊維を含むモルタルを面状に設置するため、陽極材全体から流れる防食電流の均一性に優れ、通電量を小さく抑えることができる
7	7	チタンリボンメッシュ方式	—
8	7-1	チタンリボンメッシュ方式	複雑な形状構造物にも適用可能である。電極設置に伴う荷重の増加が無い 橋梁、栈橋等の土木構造物への施工実績が多数で19年間で95000㎡弱
9	7-2	チタンリボンメッシュ補修先付け方式	—
10	7-3	チタンリボンメッシュ新設先付け方式	[陽極はチタンリボン]；当初開発されたリボン状陽極は、エキスパンド加工なしの平板状であった。その後、陽極の表面積の増加を目的としてエキスパンド加工が施され、現在の形状となっている
11	7-4	チタンリボンメッシュ e-lineV 方式	—
12	7-5	チタンリボンメッシュモールド方式	—
13	7-6	チタンリボンメッシュエルグリップ方式	—
14	7-7	チタンリボンメッシュ RMV 方式	—
15	7-8	チタンリボンメッシュ RMV-GECS 方式	—
16	7-9	貼付け型モールド陽極方式 e-Cover・C工法	従来の電気防食の課題であった、陽極材設置時の研り作業やオーバーレイモルタルのひび割れ、剥離を解決した工法。陽極材は工場製品を使用し、貼付けるだけでよいため、作業が容易で品質が安定している。また、陽極材がコンクリート躯体に直接触れないため、短絡の危険性が少ない
17	8	チタングリッド方式	—

18	9	PI-Slit 方式	—
19	10	チタントレイ方式	陽極材とコンクリートが直接に接触しない構造なので鋼材とのショートを防ぐための処理が不要
20	11	工法廃止：欠番（ニッケル被覆炭素繊維方式）	—
21	12	チタンロード方式	内部挿入工法の特徴の一つに[一方向性施工]が可能なのがあります。したがって、横桁が多い、ウェブの高さが高いなど、厚みの薄い施工箇所が多い場合、コストはかなり下がることになります
22	13	亜鉛シート方式	流電陽極方式なので防食電流は自動的に流れ、防食電流の調整が不要
23	14	亜鉛・アルミ擬合金溶射方式	仕上げ塗装工が適用可能であり、美観に優れる
24	15	ALAPANEL 方式	流電陽極方式なので防食電流は自動的に流れ、防食電流の調整が不要
25	16-1	外付け線状陽極ユニット方式 (TCユニット工法)	鋼材かぶりの少ない部材、はつりたくない部材への適用が容易 (PC 部材(プレテンション方式)など)
26	16-2	貼付け型シート陽極方式 e-Sheet・NP 工法	従来の電気防食の課題であった、陽極材設置時の研り作業やオパールモルタルのひび割れ、剥離を解決した工法。陽極材は工場製品を使用し、貼付けるだけでよいため、作業が容易で品質が安定している
27	16-3	ECP パネル方式 桁端電気防食工法	ECP パネルは軽量であり、また分割することで一人でも用意に運搬・設置が行える。通電後は、パネルに設置した照合電極により内部鉄筋の腐食傾向を継続的に計測することによって、適切な通電量が設定できる

## 参考文献

- 1) 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.
- 2) 玉越隆史，星隈順一，白戸真大，宮原史，中邨亮太：道路橋における狭隘部の類型化と調査機器の狭隘部進入試験法の提案，土木技術資料，58-12，pp.36-39,2016.
- 3) 橋梁塩害対策検討委員会：塩害橋梁維持管理マニュアル（案），p.18，2008.
- 4) 山本誠，佐野清史：電気防食に用いる陽極材の長寿命化とLCC，平成27年度近畿地方整備局研究発表会論文集，施工・安全管理対策部門，2015.
- 5) 日本エルガード協会：コンクリート構造物の塩害劣化対策と電気防食技術の動向～電気ので塩害を防ぐ～（実践編），2015.

## 3 編 電気防食工法の維持管理の実態調査

### 1. はじめに

電気防食の効果的な維持管理手法の確立を目指すにあたり、まず、電気防食適用後の再劣化について実態を把握するとともに、電気防食工法の維持管理状況の実態についても把握すべく、アンケート調査を行った。

アンケート調査は、下記機関にご協力を頂き、実施した。

- ① 管理者：管内に電気防食工法を適用した直轄橋梁を有する地方整備局
- ② 電気防食メーカー：電気防食工法を有する団体

### 2. 管理者へのアンケート調査

#### 2.1 調査概要

電気防食工法を適用した国の直轄橋梁を対象に、点検頻度や不具合の有無等、電気防食工法の維持管理状況の実態に関するアンケート調査を行った。

国の直轄橋梁のうち、既往の文献やNETIS（新技術情報提供システム）等を参照し、電気防食工法を適用した58橋（電気防食の施工件数は82件）を抽出し、それぞれの橋梁を管理する地方整備局等にアンケート調査を実施した。

#### 2.2 アンケートの設問

アンケートの設問は下記の項目とした。

- 1) 橋梁に関する基本情報（橋梁緒元、構造形式、竣工年度、適用示方書、交通量、交通制限の状況等）
- 2) 環境条件（海岸からの距離、凍結防止剤の散布量等）
- 3) 電気防食適用前の補修状況（補修工法、時期、補修記録の有無）
- 4) 電気防食工法について（施工年度、工法種類、適用部位、面積・回路数、工事費、電気防食工法を採用した理由、設計・竣工資料の有無等）
- 5) 電気防食の維持管理（点検項目、点検頻度、点検方法、点検者、点検記録の有無、費用等）
- 6) 電気防食適用後の不具合（不具合発生箇所）
- 7) 定期点検結果（直近の定期点検の対策区分、点検年月等）
- 8) 現況写真
- 9) 電気防食についての意見、要望、疑問など自由記入

アンケートに回答しやすいよう、調査票記入要領も合わせて作成した。

巻末資料にアンケート様式を示す。



## 2.3 アンケート結果概要

### 2.3.1 回答数

アンケートは、構造物や電気防食設備の劣化や不具合のある橋梁について回答してもらうこととし、58 橋中 29 橋について回答が得られた。

### 2.3.2 電気防食を適用した橋種および形式

電気防食を適用した橋種および形式の集計結果を表-2.3.1 に示す。回答のあった橋梁のうち、電気防食を適用した橋種の約90%がコンクリート橋であり、中でもPC 桁橋は約50%と多く適用されていた。

表-2.3.1 電気防食を適用した橋種および形式

橋種	形式	橋数	備考
RC	床版橋	1	
	桁橋	7	
	その他	1	ボックスカルバート
PC	床版橋	2.5	
	桁橋	13.5	
	箱桁橋	1	
鋼橋	桁橋	1	
その他	桁橋	2	混合橋（橋脚） プレビーム合成桁
計		29	

\*1 橋で2つの形式がある場合は0.5 橋としてカウント

### 2.3.3 建設年

橋梁の建設年の集計結果を表-2.3.2 に示す。1960 年代から1980 年代にかけて建設された橋梁が多い結果となった。

表-2.3.2 橋梁の建設年

建設年	橋数	回答橋梁に対する割合 (%)
～1950	1	3.4
～1960	4	13.8
～1970	7	24.1
～1980	10	34.5
～1990	5	17.2
～2000	1	3.4
～2010	1	3.4
～現在	0	0
計	29	

### 2.3.4 海岸線からの距離

橋梁の海岸線からの距離を集計した結果を表-2.3.3に示す。塩害の影響が激しいと考えられる海岸線から100mまでの範囲に架設された橋梁が約70%を占めていた。

表-2.3.3 海岸からの距離

海岸線からの距離		橋数	回答橋梁に対する割合 (%)
0	m	11	37.9
~20	m	3	10.3
~50	m	3	10.3
~100	m	4	13.8
~300	m	3	10.3
~500	m	1	3.4
~1,000	m	1	3.4
1,000	m超	3	10.3
計		29	

### 2.3.5 適用した電気防食種類

適用した電気防食種類の集計結果を表-2.3.4に示す。電気防食として橋梁に採用された方式は全部で10種類あり、そのうちチタンリボンメッシュ方式が約30%で最も多く、次いでチタンメッシュ陽極方式が約20%、チタングリッド方式およびチタンロッド方式がそれぞれ約10%の割合で採用されていた。

表-2.3.4 適用した電気防食種類

電気防食方式	橋数	採用方式の割合 (%)
チタンリボンメッシュ方式	14	32.6
チタンメッシュ陽極方式	8	18.6
チタングリッド方式	5	11.6
チタンロッド方式	5	11.6
チタン溶射方式	4	9.3
ニッケル被覆炭素繊維方式	3	7
その他 (パネル陽極方式・ALAPANEL方式 流電陽極方式, ガルバシールド方式)	4	9.3
(複数回答) 計	43	

### 2.3.6 電気防食施工後の経過年数

電気防食施工後の経過年数の集計結果を表-2.3.5に示す。ただし、複数回にわたって電気防食が施工された橋梁については、最初の施工年からの経過年数として集計した。電気防食の橋梁への適用は15年ほど前(2000年以降)から増えている結果となった。

表-2.3.5 電気防食施工後の経過年数

電気防食施工後の経過年数	橋数	回答橋梁に対する割合 (%)
～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年超	2	6.9
計	29	

### 2.3.7 電気防食の点検状況

電気防食の点検項目および点検頻度の集計結果を表-2.3.6に示す。電気防食を適用している29橋のうち、約1/3にあたる10橋で電気防食についての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。雷雨時等の臨時点検については7橋が実施しているものの、実施していない橋梁も12橋あり、これらの橋梁では落雷で停電した場合には復旧までに時間がかかる可能性があるといえる。

表-2.3.6 電気防食の点検状況

点検項目	点検頻度							点検を行っていない
	なし	～1ヶ月毎	～1年毎	～2年毎	～5年毎	臨時点検	小計	
電源ランプの点灯確認	2	9	3	2	2	1	19	10
電源装置の目視確認	3	8	3	0.5	3.5	1	19	
配線・配管・プルボックスの目視確認	5	5	3	0.5	4.5	1	19	
陽極材の設置状況の目視確認	5		2	5.5	5.5	1	19	
電流量の確認	8		3	6	1	1	19	
電圧量の確認	8		3	6	1	1	19	
鉄筋電位の確認	9		3	5	1	1	19	
インスタントオフ電位の確認	9		3	5	1	1	19	
雷雨時等の臨時点検	12					7	19	

### 2.3.8 電気防食の維持管理・点検費用

電気防食設備の維持管理・点検費用についての集計結果を表-2.3.7に示す。年間の維持管理・点検費用は50万円以下が全体の40%近い12橋と多く、50～100万円と回答した橋梁も3橋あった。

表-2.3.7 電気防食の維持管理・点検費用

維持管理・点検費用（万円/年）	橋数	回答橋梁に対する割合（%）
点検なし または不明	10	34.5
0～50	12	41.4
50～100	3	10.3
100以上	0	0
費用不明・記載なし	4	13.8
計	29	

### 2.3.9 電気防食適用後の不具合について

電気防食適用後に発生した不具合の状況について集計結果を表-2.3.8に示す。回答のあった29橋のうち、何らかの不具合があると回答したのは11橋で、電気防食を適用した箇所のコンクリートの不具合が8橋と最も多く、次いで電源装置の経年劣化による損傷が5橋であった。

表-2.3.8 電気防食の維持管理・点検費用

不具合発生箇所・状況	橋数	回答橋梁に対する割合（%）
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	44.4
上記以外のコンクリートの変状	0	0
電源装置の劣化による故障	5	27.8
外部要因による電源装置の故障 （落雷・車両衝突など）	1	5.6
モニタリング装置の異常	1	5.6
陽極システムの露出	1	5.6
配線・配管の損傷	2	11.1
その他	0	0
（複数回答） 計	18	

### 2.3.10 橋梁定期点検の判定結果

直近に行われた橋梁定期点検の対策区分判定の集計結果を表-2.3.9に示す。緊急対応を必要とする橋梁はないものの、判定区分BおよびCの補修を必要とする橋梁が多く見られた。

表-2.3.9 橋梁定期点検の判定結果

定期点検の対策区分		橋数	回答橋梁に対する割合 (%)
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ない	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	維持工事に対応する必要がある	0	0
S	詳細調査の必要がある	1	3.4
	その他	1	3.4
	不明	5	17.2
計		29	

### 2.3.11 電気防食に関する意見、要望、疑問等

電気防食に関する意見、要望、疑問など、自由記入欄に記載されていた内容を示す。

- ・ 電源ユニット、配線の耐用年数が迫っており、設備の更新が気がかりである。
- ・ 遠隔操作ができないので、特に落雷による停電に注意して現地で通電確認をしている。
- ・ 電気防食効果が定期的な観測か変状でしか把握できないが、架設環境が厳しいため変状が出てからの対応では遅いと考えられる。
- ・ 定期的な電流測定のほか、電気防食設備の補修などランニングコストがかかる。
- ・ 落雷による停電などを考えると、電気防食の稼働状況を遠隔管理することを標準とするべきである。
- ・ 電気防食の効果を確認するための定期点検時に鉄筋の腐食状況など詳細な調査を行うべきである。
- ・ 電気防食は定期的な点検が重要である。電源装置等の腐食・劣化がある場合は早急に対応すべきである。
- ・ 維持管理についてのルール化されていない。点検項目などの管理マニュアルを示してほしい。

## 2.4 アンケート結果の分析

### 2.4.1 概要

回答があった29橋梁のうち、電気防食の維持管理を実施していない橋梁は、実施の有無が不明な場合も含めて、10橋梁（34.5%）であった。また、電気防食適用後に不具合が発生した橋梁は、11橋梁（37.9%）であった。電気防食の維持管理を行っていない場合、電気防食や構造物の不具合の有無そのものが確認できていない状況であるため、不具合の進行を見落とし、重大な損傷に進展する可能性がある。電気防食や構造物の健全性を保つためには、定期的な点検を行い、不具合に対して対策を行っていくという、適切な維持管理を行うことが必要であると考えられる。

今回、2.3において示した各アンケート項目の相関性について分析することで、不具合の発生状況に、および適切な点検頻度について考察することを試みた。

### 2.4.2 既存のマニュアル等における点検頻度

これまで、いくつかの研究成果、マニュアル等において、電気防食の点検頻度について言及されている。

#### (1) 新設コンクリート橋の電気防食マニュアル（案）<sup>2)</sup>

本マニュアル案は、平成12年に土木研究所とプレストレスト・コンクリート建設業協会との共同研究「海洋構造物の耐久性向上技術に関する共同研究」の成果として作成されたものであり、マニュアル案中で、「点検頻度の決定に際しては、各施設の特性を考慮し、事前に維持管理計画を策定しておくことが大切である」とした上で、標準的な点検頻度が示されている。

マニュアルでの標準的な点検頻度を表-2.4.1に示す。また、各点検での点検項目表を、表-2.4.2に示す。

表-2.4.1 新設コンクリート橋の電気防食マニュアル（案）における点検頻度

通常点検	定期点検	詳細点検
1回/6ヶ月	1回/2年	異状発生時

※ここに、

通常点検：構造物の維持管理者が、定期的に見視可能な箇所について行い、劣化の発生時期、異状箇所およびその状況を記録するもの。

定期点検：電気防食に関して専門知識を有する調査員が定期的に見視可能な箇所の有無を点検し、劣化の発生時期、異状箇所およびその状況を記録するもの。

詳細点検：電気防食に関して専門知識を有する調査員が、通常点検、定期点検の際に見視可能な箇所が発見された場合や、地震や台風などの天災、火災などが構造物に作用した場合に実施し、その状況を記録するもの。

表-2.4.2 新設コンクリート橋の電気防食マニュアル（案）における点検項目表

装置名	点検項目	点検内容	点検の種類			点検方法	点検の判断基準
			通常	定期	臨時		
直流電源装置	外観	塗装、損傷、発錆を確認する。	○	○	○	目視	損傷、腐食が進行していないこと。
		扉の開閉、施錠を確認する。		○	○	目視	スムーズな開閉が行え、施錠されていること。
		配線・端子の損傷、腐食を調べる。			○	目視	損傷、腐食が進行していないこと。
	稼働状態	表示灯の点灯を確認する。	○	○	○	目視	表示灯が点灯していること。
	計測	通電電流量、電源電圧を確認する。		○	○	測定	異常なふらつきがないこと。 異常値を示していないこと。
モニタリング装置	外観	塗装、損傷、発錆を確認する。	○	○	○	目視	損傷、腐食が進行していないこと。
		配線・端子の損傷、腐食を調べる。			○	目視	損傷、腐食が進行していないこと。
	稼働状態	表示灯の点灯を確認する。	○	○	○	目視	表示灯が点灯していること。
	計測	電位値を確認する。		○	○	測定	異常なふらつき、大きな変動がないこと。 水素発生電位まで卑下していないこと。
		復極量を確認する		○	○	測定	所定の復極量が得られていること。
陽極材	外観	電気防食対象部のコンクリート表面のひびわれ、錆汁を確認する。		○	○	目視	腐食を伴うひびわれ、錆汁がないこと。
		陽極材、陽極の被覆材のひびわれ、浮きを確認する。			○	目視 打診	陽極材・被覆材に大きなひびわれや浮きがないこと。
	計測	陽極と鉄筋間の短絡を調べる。			○	測定	短絡していないこと。
		陽極電位を調べる。			○	測定	大きな変動がないこと。
配線・配管	外観	配線・配管の汚れ、損傷を確認する。		○	○	目視	汚れ、損傷がないこと。

(2) 電気化学的防食工法 設計施工指針（案）<sup>3)</sup>

本設計施工指針案は、平成13年に土木学会より発行されたもので、電気防食工法を含む電気化学的防食工法について、調査・診断から設計、施工および維持管理までを合理的かつ適正に行うための標準を示したものである。指針案中で、「点検の頻度については、電気防食装置の設計条件や設置される環境によって異なるため、維持管理者が定めた維持管理計画に基づき決定する」とした上で、定期点検の頻度の目安を示している。

指針での点検頻度の目安を表-2.4.3に示す。また、各点検での点検項目表を表-2.4.4に示す。

表-2.4.3 電気化学的防食工法 設計施工指針（案）における点検頻度

構造物の立地条件	適用対象構造物	点検頻度の目安
陸上部・内陸部	RC	定期点検の頻度を初年度は年1回、以降、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
	PC	定期点検の頻度を初年度は年2回、以降、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
海洋環境	RC	定期点検の頻度を初年度は年2回、以降、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
	PC	定期点検の頻度を初年度は年2回、以降、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

表-2.4.4 電気化学的防食工法 設計施工指針（案）における点検項目表

装置名	点検項目	点検内容	点検の種類			点検方法	点検の判断基準
			日常	定期	詳細		基準
直流電源装置	外観	塗装, 損傷, 発錆を確認する	○	○	○	目視	損傷, 腐食が進行していないこと
		扉の開閉, 施錠を確認する		○	○	目視	スムーズな開閉が行え, 施錠されていること
		端子の損傷, 腐食を調べる			○	目視	損傷, 腐食が進行していないこと
	稼働状態	表示灯の点灯を確認する	○	○	○	目視	表示灯が点灯し, 稼働していること
	計測	通電電流量, 電源電圧を確認する		○	○	測定	安定していること 異常値を示していないこと
モニタリング装置	外観	塗装, 損傷, 発錆を確認する	○	○	○	目視	損傷, 腐食が進行していないこと
		端子の損傷, 腐食を調べる			○	目視	損傷, 腐食が進行していないこと
	稼働状態	表示灯の点灯を確認する	○	○	○	目視	表示灯が点灯し, 稼働していること
	計測	電位値を確認する		○	○	測定	安定していること PC鋼材の電位が水素発生電位までマイナス方向に変化していないこと
		復極量を確認する		○	○	測定	所定の電位変化量が得られていること
陽極システム	外観	電気防食対象部のコンクリート表面のひび割れ, 錆汁の有無を確認する		○	○	目視	腐食を伴うひび割れ, 錆汁がないこと
		陽極システムの変状の有無を確認する			○	目視	陽極材・被覆材に大きなひび割れや浮きなどの変状がないこと
	計測	陽極と鉄筋間の短絡を調べる			○	測定	短絡していないこと
		陽極電位を調べる			○	測定	安定していること
配管	外観	配管の損傷の有無を確認する		○	○	目視	損傷や劣化がないこと

### 2.4.3 分析結果

#### (1) 電気防食の不具合と施工からの経過年数の相関

電気防食工法では、構造物に電流を共有することで防食を行うため、電気防食装置は、配線や配管材といった多数の部品から構成されており、それらは経年的に劣化していくことが想像できる。2.3.9 で示した各不具合と、電気防食施工後の年数の相関を図-2.4.1 に示す。



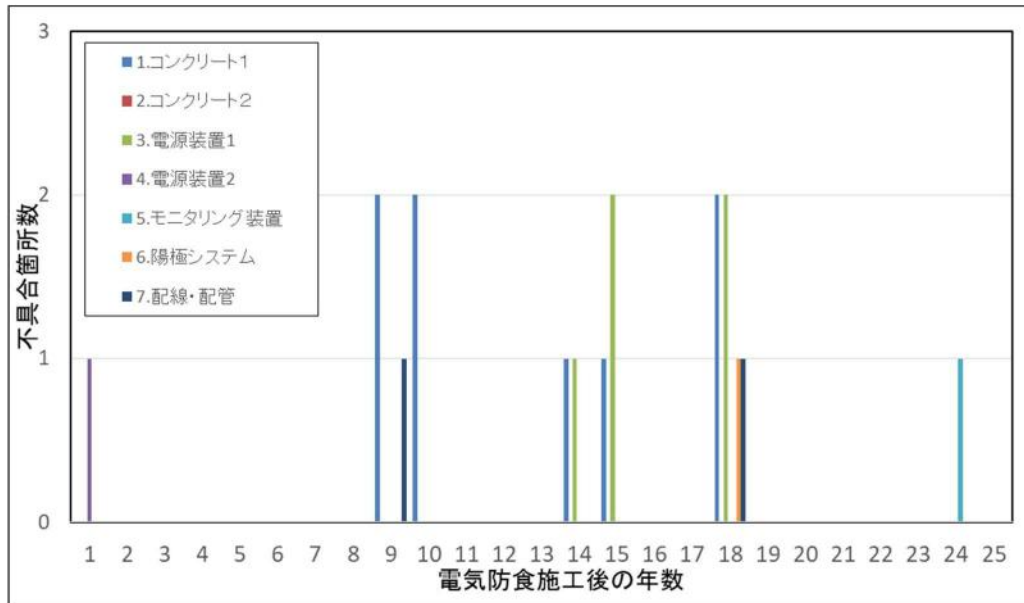


図-2.4.1 電気防食の不具合と施工からの経過年数の相関

ここで、図中の系列名は図中スペースの関係で略称を用いている。対応を表-2.4.5 に示す。

表-2.4.5 略称と不具合発生箇所・状況の対応

略称	不具合発生箇所・状況
コンクリート 1	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
コンクリート 2	上記以外のコンクリートの変状
電源装置 1	電源装置の劣化による故障
電源装置 2	外部要因による電源装置の故障（落雷・車両衝突など）
モニタリング装置	モニタリング装置の異常
陽極システム	陽極システムの露出
配線・配管	配線・配管の損傷

図より、施工後概ね9年～10年が経過した電気防食適用構造物、および電気防食装置において、何らかの不具合が確認されている。

コンクリートの不具合に関しては、防食効果が十分でないために発生している可能性がある。橋梁周辺の環境や、施工時の内在塩分量等も関係するため、不具合の発生までの時間について一概に述べることはできないが、数年に一度程度の間隔で防食効果について確認する必要があるといえることができる。

電気防食装置各部の不具合に関しては、系列4に示す、外部要因による故障を除けば、概ね電気防食施工後10年目以降の橋梁において見られている。装置各部の部品の耐久性にもよるため、不具合の発生までの時間について一概に述べることはできないが、定期的な点検により、装置の稼働上支障となるような変状が発生していないことを確かめることが必要であると言える。

## 2.4.4 橋梁定期点検の判定結果との相関

道路橋においては、5年に一度の頻度で定期点検を行い、損傷の状況、対策区分を判定している。橋梁定期点検要領<sup>1)</sup>における、対策区分の判定を表-2.4.6に示す。電気防食を適切に維持管理しながら運用することで、橋梁の健全性を保つことができているかを確かめるため、点検頻度と橋梁定期点検の判定結果の相関について分析した。

分析に際して、実施の容易さに着目し、アンケートを行った点検項目を表-2.4.7の通り、「主に装置等の目視点検」「主に防食効果の計測点検」の2つに分類し、それぞれについて、点検の実施頻度と電気防食設置後の経過年数の相関をプロットした。プロットした図上で、A・B判定の橋梁群、C判定の橋梁群、S判定の橋梁群がどこに位置するかを確認した(図-2.4.2)。

図より、目視点検の頻度が1回/年より少なく、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、S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、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。このことから、前述程度の頻度での点検を継続することにより、構造物の健全性を維持することができるものと考えられる。

表-2.4.6 橋梁定期点検要領における対策区分の判定

判定区分	判定の内容
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。
C1	予防保全の観点から、速やかに補修等を行う必要がある。
C2	橋梁構造の安全性の観点から、速やかに補修等を行う必要がある。
E1	橋梁構造の安全性の観点から、緊急対応の必要がある。
E2	その他、緊急対応の必要がある。
M	維持工事に対応する必要がある。
S1	詳細調査の必要がある。
S2	追跡調査の必要がある

表-2.4.7 点検項目の分類

点検項目	分析上の分類
電源ランプの点灯確認	主に装置等の目視点検
電源装置の目視確認	
配線・配管・プルボックスの目視確認	
陽極材の設置状況の目視確認	
電流量の確認	主に防食効果の計測点検
電圧量の確認	
鉄筋電位の確認	
インスタントオフ電位の確認	

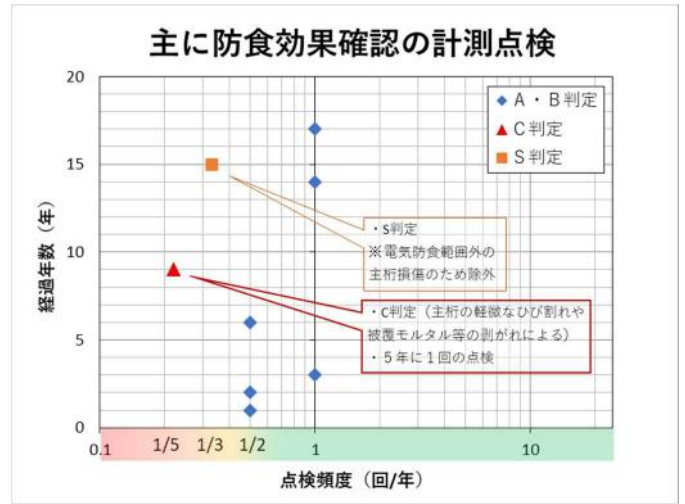
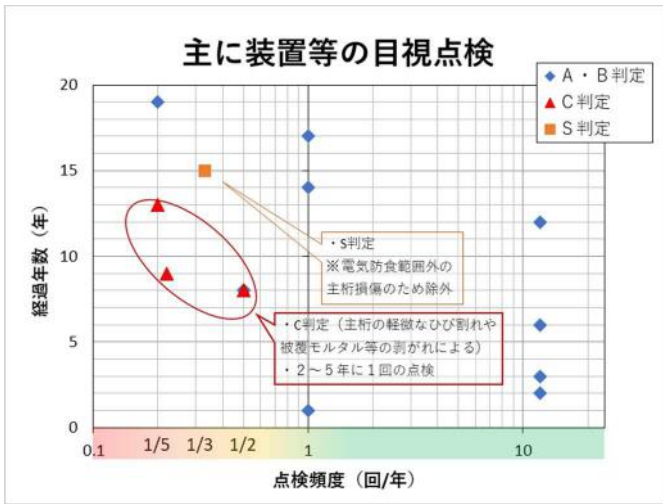


図-2.4.2 橋梁定期点検の判定結果との相関

参考文献

- 1) 国土交通省 道路局 国道・防災課：橋梁定期点検要領，2014.
- 2) 土木研究所，プレストレスト・コンクリート建設業協会：海洋構造物の耐久性向上技術に関する共同研究報告書 一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），共同研究報告書，第256号，2000.
- 3) 土木学会 コンクリート委員会 電気化学的補修工法研究小委員会：電気化学的防食工法 設計施工指針（案），2001.

### 3. 電気防食メーカーへのアンケート調査

#### 3.1 はじめに

電気防食工法における維持管理を行う上で、工法の専門性や維持管理方法の不統一等が点検を困難にしているため、電気防食工法の維持管理方法やシステムの標準化が必要とされる。そこで、専門家（電気防食メーカー）が望ましいと考える「電気防食工法の維持管理に関する調査」を実施し、その結果や実状を踏まえて、電気防食工法の維持管理方法の標準化のための整理や提案を行った。なお、本章では、下記のように定義した。

管理者：電気防食工法を適用した構造物を管理する団体。

専門家：電気防食工法を有する団体。

コンサルタント：電気防食工法の維持管理に関する専門知識を有する団体。

元請け：対象構造物の電気防食工法による補修工事を受注した団体。

日常点検：日常の巡回時に目視にて実施するもの

定期点検：維持管理計画に基づき定期的実施するもの

詳細点検：日常・定期点検の結果から異常が発見された場合に実施するもの

## 3.2 電気防食工法の維持管理に関する調査の方法

### 3.2.1 調査対象会社および工法

調査は、電気防食工法を保有・施工する専門者を対象に行った。回答会社と工法名を表-3.2.1に示す。

表-3.2.1 回答会社と工法名

No.	会社名	工法名	条件
1-1	オリエンタル白石(株)	ニッケル被覆炭素繊維方式	A
1-2		TCユニット方式	B
2-1	ショーボンド建設(株)	貼付け型シート陽極方式e-sheet・NP工法	A
2-2		貼付け型モール陽極方式e-cover・C工法	A
3-1	住友大阪セメント(株)	チタンメッシュ方式	A
3-2		チタンリボンメッシュ方式	
3-3		チタングリッド方式	
4	東興ジオテック(株)	チタンロッド方式	A
5	飛島建設(株)	亜鉛・アルミ擬合金溶射方式	A
6-1	(株)ナカポーテック	チタン溶射方式	C
6-2		チタンリボンメッシュ方式	D
6-3		ALAPANEL方式	E
6-4		亜鉛シート方式	E
7-1	日本防蝕工業(株)	導電性塗料方式(キャプロンコート方式)	A
7-2		チタントレイ方式	A
8-1	(株)ピーエス三菱	チタングリッド方式	F
8-2		PI-Slit方式	G
9-1	BASFジャパン(株)	導電性塗料方式(エマコCP30アノード方式)	A
9-2		導電性モルタル方式	A
10-1	三井住友建設(株)	ECPパネル方式 桁端電気防食工法	A
10-2		ECPパネル方式 桁端電気防食工法	H

※ 水色ハッチングは、流電陽極方式の電気防食工法である。

※ No.3-3は住友大阪セメント(株)が保有している工法ではないが、維持管理を前提とした調査のためご回答をいただいた。

### 3.2.2 調査内容

アンケートは、専門者が望ましいと考える電気防食工法の維持管理に関するものであり、下記内容について調査した。調査票を巻末に示す。

#### ① 回答者情報

#### ② 電気防食工法の維持管理に関する事項

- ・点検実施者：現地での維持管理者についての質問。日常、定期、詳細点検に分けて御回答頂いた。
- ・点検頻度：点検頻度について、日常、定期、詳細点検に分けて御回答頂いた。
- ・点検方法：点検方法について、点検項目ごとに御回答頂いた。
- ・点検項目の評価基準：各点検項目の点検内容と判定基準について御回答頂いた。
- ・新しい点検手法・技術：新しい点検手法や技術についてご紹介頂いた。

#### ③ 直流電源装置に関する事項

- ・制御方法：直流電源装置の制御方法について御回答頂いた。
- ・箱体取付けランプ：一般的に直流電源装置の箱体外側に取り付けられた作動状況を示すランプの役割について御回答頂いた。
- ・計測項目および方法：直流電源装置内の計器盤での計測項目と方法を御回答頂いた。
- ・外観：直流電源装置に関する写真等をお示し頂いた。

なお、これらの調査は、下記条件の下での電気防食工法の適用を想定して御回答いただいた。適用条件を表-3.2.2に示す。標準的な条件をAとし、異なる場合は、条件を設定して（B～H）御回答頂いた。

表-3.2.2 電気防食工法の適用条件

	対象	構造方式	適用部位	供用状況	水がかり	劣化状態	補修履歴	補修工法	遠隔監視 制御装置の有無
A	橋梁	RC橋	桁	供用中	なし	進展期/加速期(前期)	なし		なし
B	橋梁	RC橋	床板/桁	供用中	なし	進展期/加速期(前期)	あり/なし	表面被覆	なし
C	橋梁	RC橋	桁	供用中	なし	加速期(前期)	なし		なし
D	橋梁	RC橋	床板/桁	供用中	なし	加速期(前期)	あり	断面修復 表面被覆	なし
E	橋梁	RC橋	桁	供用中	あり(雨水)	加速期(前期)	なし		なし
F	橋梁	RC橋/PC橋	桁	供用中	なし	進展期/加速期(前期)	なし		なし
G	橋梁	RC橋/PC橋	桁	供用中	なし	進展期/加速期(前期)	なし		監視のみ
H	橋梁	RC橋	桁	供用中	あり(雨水)	進展期/加速期(前期)	なし		なし

### 3.3 電気防食工法の維持管理に関する調査結果

#### 3.3.1 点検実施者

点検実施者についてのアンケート結果を表-3.3.1、図-3.3.1に示す。電気防食工法を保有する専門者が望ましいと考える日常点検の実施者は、現行指針（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）に示されている内容と同じで管理者であった。一方、定期点検については管理者以外の専門者もしくはコンサルタント、詳細点検は専門者との回答であった。

表-3.3.1 点検実施者についてのアンケート結果

工 法 名	点検実施者		
	日常	定期	詳細
ニッケル被覆炭素繊維方式	管理者	管理者以外(コンサルタント)	管理者以外(元請け)
TCユニット方式	管理者	管理者以外(専門)	管理者以外(専門)
貼付け型シート陽極方式 e-sheet・NP工法	管理者	管理者以外(コンサルタント)	管理者以外(専門)
貼付け型モール陽極方式 e-cover・C工法	管理者	管理者以外(コンサルタント)	管理者以外(専門)
チタンメッシュ方式	その他 (ユーザーの不具合報告)	管理者以外 (専門/コンサルタント)	管理者以外 (専門/コンサルタント)
チタンリボンメッシュ方式	その他 (ユーザーの不具合報告)	管理者以外 (専門/コンサルタント)	管理者以外 (専門/コンサルタント)
チタングリッド方式	その他 (ユーザーの不具合報告)	管理者以外 (専門/コンサルタント)	管理者以外 (専門/コンサルタント)
チタンロッド方式	管理者	管理者以外(専門)	管理者以外(専門)
亜鉛・アルミ擬合金溶射方式	管理者	管理者	管理者以外(元請け)
チタン溶射方式	管理者	管理者以外(専門)	管理者以外(専門)
チタンリボンメッシュ方式	管理者	管理者以外(専門)	管理者以外(専門)
ALAPANEL方式	管理者	管理者以外(専門)	管理者以外(専門)
亜鉛シート方式	管理者	管理者以外(専門)	管理者以外(専門)
導電性塗料方式 (キャブロンコート方式)	管理者	管理者以外(専門)	管理者以外(専門)
チタントレイ方式	管理者	管理者以外(専門)	管理者以外(専門)
チタングリッド方式	管理者	管理者以外(コンサルタント)	管理者以外 (専門/コンサルタント)
PI-Slit方式			
導電性塗料方式 (エマコCP30アノード方式)	管理者	管理者以外	管理者以外
導電性モルタル方式	管理者	管理者以外	管理者以外
ECPパネル方式 桁端電気防食工法	管理者	管理者以外(コンサルタント)	管理者以外(専門)
ECPパネル方式 桁端電気防食工法			

※水色ハッチングは、流電陽極方式の電気防食工法

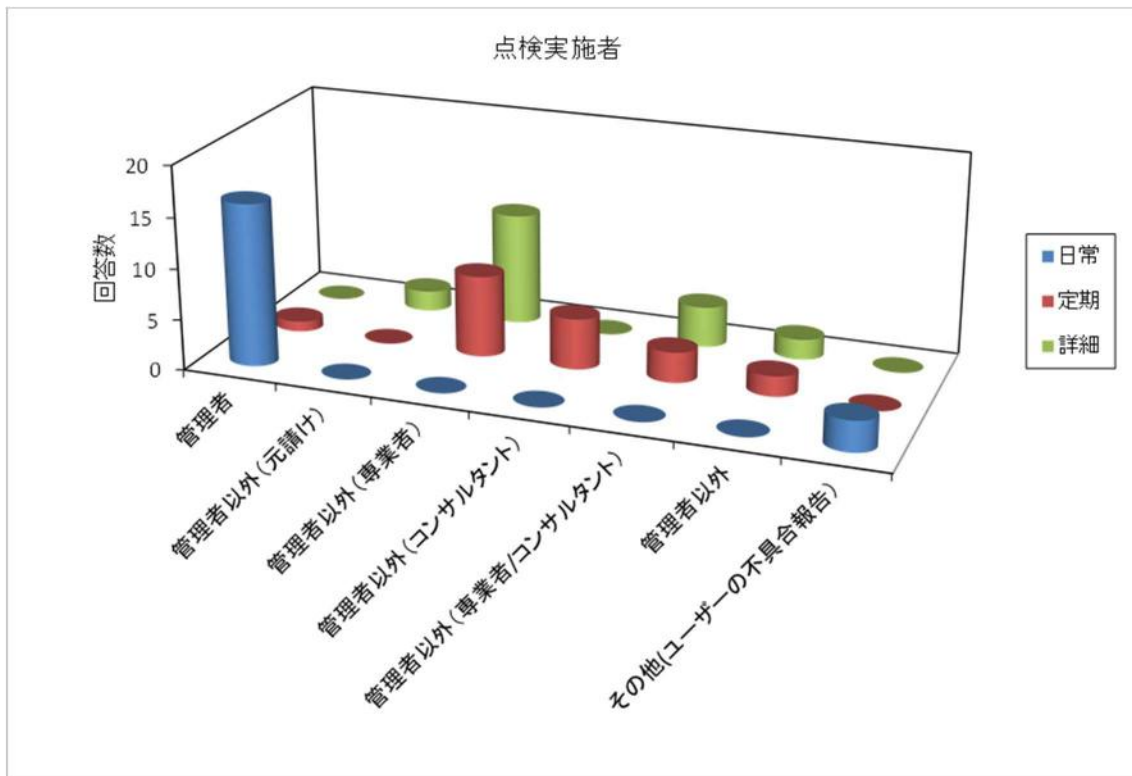


図-3.3.1 点検実施者についてのアンケート結果



### 3.3.2 点検頻度

点検頻度に関するアンケート結果を表-3.3.2~3.3.3に示す。また、アンケートによって、追加したい点検項目についての回答があり、その項目の点検頻度に関するアンケート結果を表-3.3.4に示す。なお、各表中の番号は、表-3.3.5に示す点検の頻度に対応する。

表-3.3.2 点検頻度に関するアンケート結果（直流電源装置）

工 法 名	点検頻度														
	直流電源装置														
	装置の稼働状態			箱体の損傷、発錆			装置内配線および端子			通電電流、電源電圧			避雷器の状態確認		
	日常	定期	詳細	日常	定期	詳細	日常	定期	詳細	日常	定期	詳細	日常	定期	詳細
ニッケル被覆炭素繊維方式	3	—	—	—	6	—	—	6	—	—	6	—	—	6	—
TCユニット方式	3	6,7	—	3	7	—	—	6,7	—	—	6,7	—	—	—	—
貼付け型シート陽極方式 e-sheet・NP工法	2	6	8	2	6	8	—	6	8	—	6	8	—	6	8
貼付け型モール陽極方式e-cover・C工法	2	6	8	2	6	8	—	6	8	—	6	8	—	6	8
チタンメッシュ方式	1	3	—	—	—	8	—	—	8	3	3	—	1	—	8
チタンリボンメッシュ方式															
チタングリッド方式															
チタンロッド方式	3	7	8	3	7	8	—	7	8	—	7	8	—	3	8
亜鉛・アルミ擬合金溶射方式	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
チタン溶射方式	2	7	8	3	7	8	—	7	8	—	7	8	—	7	8
チタンリボンメッシュ方式	2	7	8	3	7	8	—	7	8	—	7	8	—	7	8
ALAPANEL方式	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
亜鉛シート方式	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
導電性塗料方式 (キャブロンコート方式)	2	—	—	—	6	—	—	6	—	3	—	—	—	6	—
チタントレイ方式	2	—	—	—	6	—	—	6	—	3	—	—	—	6	—
チタングリッド方式	2	6	8	—	6	8	—	6	8	—	6	8	—	6	8
PI-Slit方式	1	7	8	—	7	8	—	7	8	—	7	8	—	7	8
導電性塗料方式 (イマコP30アノード方式)	2	6	8	2	6	8	—	—	8	—	6	8	—	6	8
導電性モルタル方式	2	6	8	2	6	8	—	—	8	—	6	8	—	6	8
ECPパネル方式 桁端電気防食工法	3	6	8	3	6	8	—	—	8	—	6	8	—	6	8
ECPパネル方式 桁端電気防食工法	3	6	8	3	6	8	—	—	8	—	6	8	—	6	8

※水色ハッチングは、流電陽極方式の電気防食工法

※表中の数字は、表-3.3.5に示す点検の頻度に対応する

表-3.3.3 点検頻度に関するアンケート結果

(防食効果確認/陽極システムの状態確認/防食対象の状態確認/配管, 配管材)

工 法 名	点検頻度												点検頻度								
	防食効果確認						陽極システムの状態確認						防食対象の状態確認			配線、配管材					
	鉄筋電位 (照合電極)			鉄筋電位(外付け 照合電極)			復極量			陽極システム 変位の有無			陽極電位値			防食対象部 表面			配線、配管、ボック スの損傷		
	日常	定期	詳細	日常	定期	詳細	日常	定期	詳細	日常	定期	詳細	日常	定期	詳細	日常	定期	詳細	日常	定期	詳細
ニッケル被覆炭素繊維方式	—	—	8	—	—	9	—	—	8	—	—	8	—	—	9	—	—	8	—	—	8
TCユニット方式	—	6,7	—	—	—	—	—	6,7	—	3	—	6,7	—	6,7	—	—	6,7	—	3	6,7	—
貼付け型シート陽極方式 e-sheet・NP工法	—	6	8	—	—	8	—	6	8	2	6	8	—	6	8	—	6	8	2	6	8
貼付け型モール陽極方式e- cover・C工法	—	6	8	—	—	8	—	6	8	2	6	8	—	6	8	—	6	8	2	6	8
チタンメッシュ方式	1	3	—	—	—	8	—	3	—	—	6	—	—	—	—	6	—	—	6	—	
チタンリボンメッシュ方式																					
チタングリッド方式																					
チタンロード方式	—	8	8	—	—	—	—	8	8	3	8	8	—	—	—	—	8	8	3	8	8
亜鉛・アルミ合金溶射方式	—	—	8	—	—	—	—	—	—	3	7	8	—	—	—	—	7	8	—	7	8
チタン溶射方式	—	7	8	—	—	8	—	7	8	3	7	8	—	7	8	—	7	8	3	7	8
チタンリボンメッシュ方式	—	7	8	—	—	8	—	7	8	3	7	8	—	7	8	—	7	8	3	7	8
ALAPANEL方式	—	7	8	—	—	8	—	7	8	3	7	8	—	7	8	—	7	8	3	7	8
亜鉛シート方式	—	7	8	—	—	8	—	7	8	3	7	8	—	7	8	—	7	8	3	7	8
導電性塗料方式 (キャブロンコート方式)	—	6	—	—	6	—	—	6	—	—	6	—	—	—	8	—	6	—	—	6	—
チタントレイ方式	—	6	—	—	6	—	—	6	—	—	6	—	—	—	8	—	6	—	—	6	—
チタングリッド方式	2	6	8	—	—	8	—	6	8	—	6	8	—	—	8	—	6	8	—	6	8
PI-Slit方式	—	7	8	—	—	8	3	7	8	—	7	8	—	—	8	—	7	8	—	7	8
導電性塗料方式 (エマCP30アノード方式)	—	6	8	—	6	8	—	6	8	—	6	8	—	—	8	—	6	8	2	6	8
導電性モルタル方式	—	6	8	—	6	8	—	6	8	—	6	8	—	—	8	—	6	8	2	6	8
ECPパネル方式 桁端電気防食工法	—	6	8	—	—	—	—	6	8	—	—	8	—	—	8	—	6	8	3	6	8
ECPパネル方式 桁端電気防食工法	—	6	8	—	—	—	—	6	8	—	—	8	—	—	8	—	6	8	3	6	8

※水色ハッチングは、流電陽極方式の電気防食工法

※表中の数字は、表-3.3.5 に示す点検の頻度に対応する

表-3.3.4 点検頻度に関するアンケート結果（追加したい点検項目）

工 法 名	点検頻度																	
	追加点検項目																	
	バトランプ			分配電流測定			陽極システム			モニタリングボックス			発生電流			電源バッテリーの状況		
	日常	定期	詳細	日常	定期	詳細	日常	定期	詳細	日常	定期	詳細	日常	定期	詳細	日常	定期	詳細
チタン溶射方式	—	7	8	—	—	8												
チタンリボンメッシュ方式	—	7	8	—	—	8												
ALAPANEL方式										—	7	8	—	7	8			
亜鉛シート方式										—	7	8	—	7	8			
導電性塗料方式 (EM30P30アノード方式)							—	—	8									
導電性モルタル方式							—	—	8									
ECPパネル方式 析出電気防食工法																—	6	8
ECPパネル方式 析出電気防食工法																—	6	8

※水色ハッチングは、流電陽極方式の電気防食工法

※表中の数字は、表-3.3.5 に示す点検の頻度に対応する

表-3.3.5 アンケートにおける点検の頻度

番号	点検の頻度
1	毎日
2	1回／週程度
3	1回／月程度
4	1回／3ヶ月程度
5	1回／半年程度
6	1回／年程度
7	1回／2年程度
8	1回／5年程度
9	その他(頻度を記載願います)

(1) 日常点検について

日常点検の頻度に関する集計結果を図-3.3.2に示す。電気防食工法を保有する専門者が望ましいと考える日常点検の頻度は、おおむね1週～1ヶ月に1回であった。日常点検項目については、「装置の稼働状態」、「箱体の損傷、発錆」、「陽極システムの変状の有無」、「配線、配管、ボックスの損傷」との回答が多かった。なお、流電陽極方式については、「陽極システムの変状の有無」と「配線、配管、ボックスの損傷」との回答であった。このうち、「陽極システムの変状の有無」は、現行指針では日常点検項目に含まれないものである。また、現行指針にはない「通電電流や電源電圧」、「鉄筋電位値(埋設照合電極)」、「復極量」に関して少数の回答があった。

ここで、土木研究所が管理者に対して実施したアンケートにおいて、点検を1ヶ月に1回程度の頻度で実施している事例は、回答があった29橋のうちおよそ8橋と少なかった。また、回答のあった8橋での点検項目は、「電源装置のパイロットランプ点灯の有無」、「電源装置の目視確認」であり、次いで「配線・配管・プルボックスの目視確認」の実施橋梁が多く、専門業者から回答が多かった日常点検項目の中に含まれる回答であった。

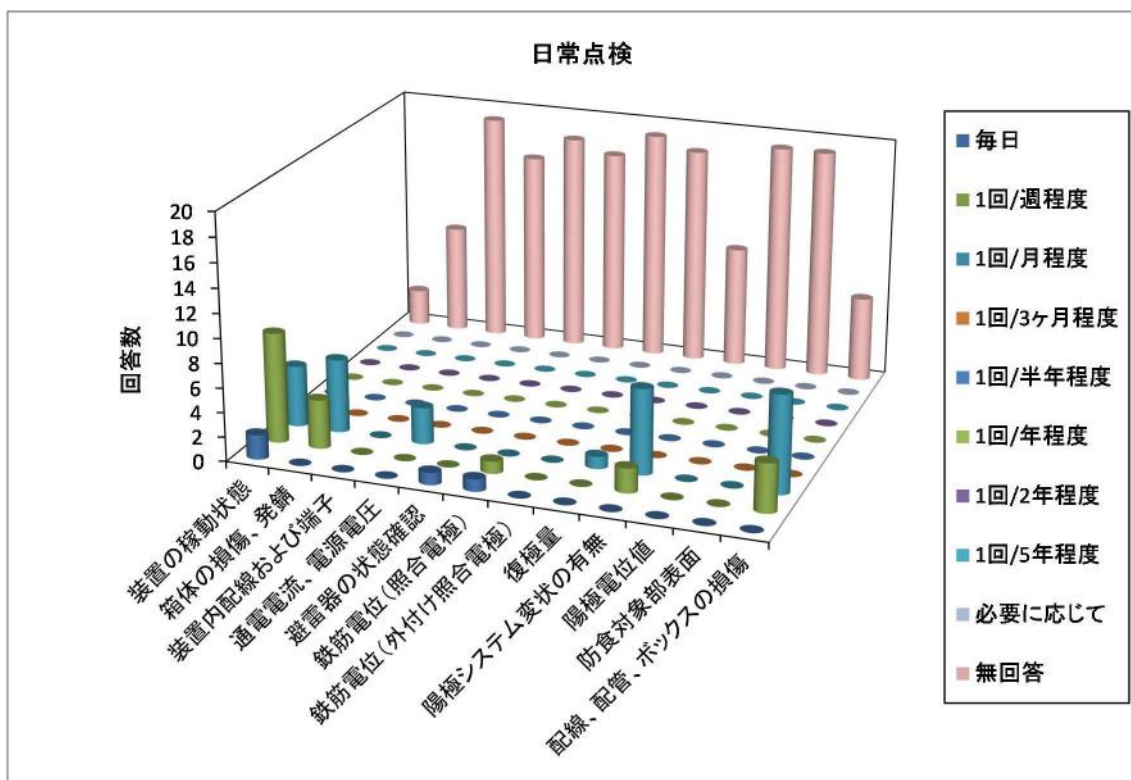


図-3.3.2 日常点検の頻度に関する集計結果

(2) 定期点検について

定期点検の頻度に関する集計結果を図-3.3.3に示す。電気防食工法を保有する専門家が望ましいと考える定期点検の頻度は、1年～2年に1回との回答が多く、現行指針に示されている点検頻度の目安\*より短かった。定期点検項目としては、現行指針にはない「装置内配線および端子」、「陽極システムの変状の有無」、「陽極電位値」との回答も多数あった。

※：定期点検は、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（現行指針より抜粋）。

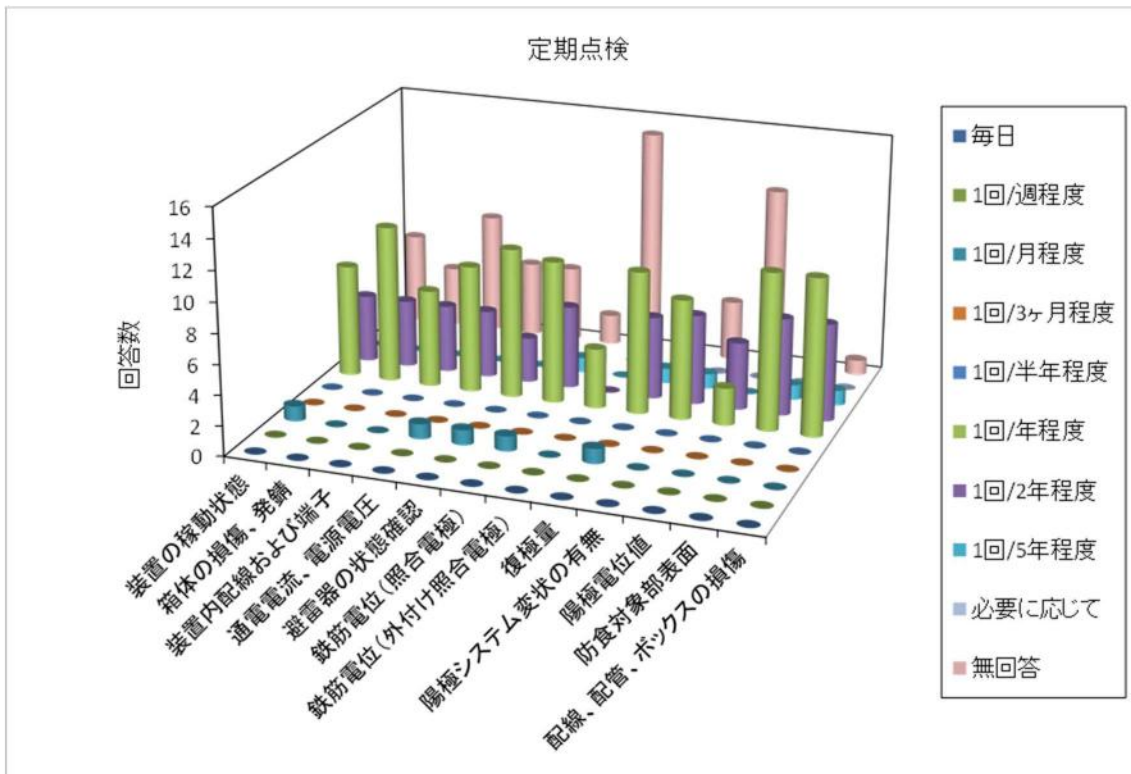


図-3.3.3 定期点検の頻度に関する集計結果

(3) 詳細点検について

詳細点検の頻度に関する集計結果を図-3.3.4に示す。電気防食工法を保有する専門者が望ましいと考える詳細点検の頻度は、おおむね5年に1回であった。

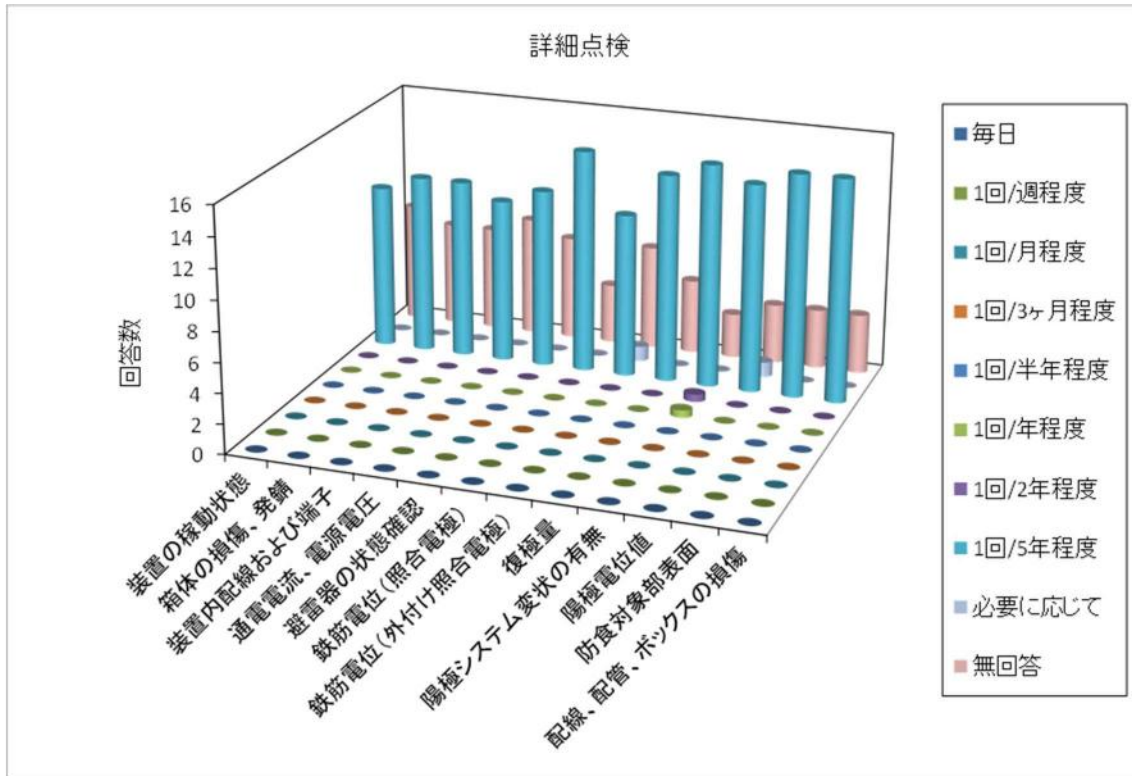


図-3.3.4 詳細点検の頻度に関する集計結果

### 3.3.3 点検方法

点検方法のアンケート結果を表-3.3.6～3.3.9に示す。

表-3.3.6 点検方法一覧（直流電源装置）

No.	工 法 名	点検方法														
		直流電源装置														
		装置の稼働状態			箱体の損傷、発錆			装置内配線および端子			通電電流、電源電圧			避雷器の状態確認		
		日常	定期	詳細	日常	定期	詳細	日常	定期	詳細	日常	定期	詳細	日常	定期	詳細
1-1	ニッケル被覆炭素繊維方式	1	—	—	—	1	—	—	1	—	—	2	—	—	1	—
1-2	TCユニット方式	1	1	—	1	1	—	—	1	—	—	2,3	—	—	—	—
2-1	貼付け型シート陽極方式 e-sheet・NP工法	1	1	1	1	1	1	—	1	1	—	1	1	—	1	1
2-2	貼付け型モール陽極方式 e-cover・C工法	1	1	1	1	1	1	—	1	1	—	1	1	—	1	1
3-1	チタンメッシュ方式	4	4	—	—	—	1	—	—	1	4	4	—	4	—	1
3-2	チタンリボンメッシュ方式															
3-3	チタングリッド方式															
4	チタンロッド方式	1	2	2	1	1	1	—	1	1	—	2	2	—	1	1
6-1	チタン溶射方式	1	1	1	1	1	1	—	1	1	—	2,3	2,3	—	1	1
6-2	チタンリボンメッシュ方式	1	1	1	1	1	1	—	1	1	—	2,3	2,3	—	1	1
7-1	導電性塗料方式 (キャブロンコート方式)	1	—	—	—	1	—	—	1	—	2	—	—	—	1	—
7-2	チタントレイ方式	1	—	—	—	1	—	—	1	—	2	—	—	—	1	—
8-1	チタングリッド方式	1	1	1	—	1	1	—	1	1	—	2	2,3	—	1	1
8-2	PI-Slit方式	4	1	1	—	1	1	—	1	1	—	2	2,3,4	—	1	1
9-1	導電性塗料方式 (IマコCP30アノード方式)	1	1	1	1	1	1	—	—	1	—	2	3	—	3	3
9-2	導電性モルタル方式	1	1	1	1	1	1	—	—	1	—	2	3	—	3	3
10-1	ECPパネル方式 桁端電気防食工法	1	1	1	1	1	1	—	1	1	—	2,3	2,3	—	1,2	1,2
10-2	ECPパネル方式 桁端電気防食工法	1	1	1	1	1	1	—	1	1	—	2,3	2,3	—	1,2	1,2

番号	点検方法
1	現場での目視確認
2	直流電源装置内メーターの確認
3	計測機器での測定
4	遠隔装置での監視および測定

表-3.3.7 点検方法一覧（防食効果確認、陽極システムの状態確認）

No.	工 法 名	点検方法														
		防食効果確認						陽極システムの状態確認								
		鉄筋電位 (照合電極)			鉄筋電位(外付 け照合電極)			復極量			陽極システム変 状の有無			陽極電位値		
		日常	定期	詳細	日常	定期	詳細	日常	定期	詳細	日常	定期	詳細	日常	定期	詳細
1-1	ニッケル被覆炭素繊維方式	—	—	4	—	—	4	—	—	4	—	—	1	—	—	4
1-2	TCユニット方式	—	3	—	—	—	—	3	—	1	1	—	—	3	—	
2-1	貼付け型シート陽極方式 e-sheet・NP工法	—	3,4	3,4	—	—	3	—	3,4	3,4	1	1	1	—	—	—
2-2	貼付け型モール陽極方式 e-cover・C工法	—	3,4	3,4	—	—	3	—	3,4	3,4	1	1	1	—	—	—
3-1	チタンメッシュ方式															
3-2	チタンリボンメッシュ方式	4	4	—	—	—	1	—	4	—	—	1	—	—	—	—
3-3	チタングリッド方式															
4	チタンロッド方式	—	2	2	—	—	—	—	2	2	1	1	1	—	—	—
5	亜鉛・アルミ擬合金溶射 方式	—	—	3	—	—	—	—	—	—	1	1	1	—	—	—
6-1	チタン溶射方式	—	3	3	—	—	3	—	3	3	1	1	1	—	3	3
6-2	チタンリボンメッシュ方式	—	3	3	—	—	3	—	3	3	1	1	1	—	3	3
6-3	ALAPANEL方式	—	3	3	—	—	3	—	3	3	1	1	1	—	3	3
6-4	亜鉛シート方式	—	3	3	—	—	3	—	3	3	1	1	1	—	3	3
7-1	導電性塗料方式 (キャブロンコート方式)	—	3	—	—	3	—	—	3	—	—	3	—	—	—	3
7-2	チタントレイ方式	—	3	—	—	3	—	—	3	—	—	3	—	—	—	3
8-1	チタングリッド方式	—	2	2,3	—	—	3	—	2	2,3	—	1	1	—	—	3
8-2	PI-Slit方式	—	2	2,3, 4	—	—	3	4	4	2,3, 4	—	1	1	—	—	3
9-1	導電性塗料方式 (イマコP30アノード方式)	—	3	3	—	3	3	—	3	3	—	1	1	—	—	3
9-2	導電性モルタル方式	—	3	3	—	3	3	—	3	3	—	1	1	—	—	3
10-1	ECPパネル方式 桁端電気防食工法	—	2,3	2,3	—	—	—	—	2,3	2,3	—	—	2,3	—	—	2,3
10-2	ECPパネル方式 桁端電気防食工法	—	2,3	2,3	—	—	—	—	2,3	2,3	—	—	2,3	—	—	2,3

※水色ハッチングは、流電陽極方式の電気防食工法

番号	点検方法
1	現場での目視確認
2	直流電源装置内メーターの確認
3	計測機器での測定
4	遠隔装置での監視および測定



表-3.3.8 点検方法一覧（防食対象の状態確認、配線、配管材）

No.	工 法 名	点検方法					
		防食対象の 状態確認			配線、配管材		
		防食対象部 表面			配線、配管、 ボックスの損傷		
		日常	定期	詳細	日常	定期	詳細
1-1	ニッケル被覆炭素繊維方式	—	—	1	—	—	1
1-2	TCユニット方式	—	1	—	1	1	—
2-1	貼付け型シート陽極方式 e-sheet・NP工法	—	1	1	1	1	1
2-2	貼付け型モール陽極方式 e-cover・C工法	—	1	1	1	1	1
3-1	チタンメッシュ方式						
3-2	チタンリボンメッシュ方式	—	1	—	—	1	—
3-3	チタングリッド方式						
4	チタンロッド方式	—	1	1	1	1	1
5	亜鉛・アルミ擬合金溶射方式	—	1	1	—	1	1
6-1	チタン溶射方式	—	1	1	1	1	1
6-2	チタンリボンメッシュ方式	—	1	1	1	1	1
6-3	ALAPANEL方式	—	1	1	1	1	1
6-4	亜鉛シート方式	—	1	1	1	1	1
7-1	導電性塗料方式 (キャブロンコート方式)	—	1	—	—	1	—
7-2	チタントレイ方式	—	1	—	—	1	—
8-1	チタングリッド方式	—	1	1	—	1	1
8-2	PI-Slit方式	—	1	1	—	1	1
9-1	導電性塗料方式 (エマコCP30アノード方式)	—	1	1	1	1	1
9-2	導電性モルタル方式	—	1	1	1	1	1
10-1	ECPパネル方式 桁端電気防食工法	—	1	1	1	1	1
10-2	ECPパネル方式 桁端電気防食工法	—	1	1	1	1	1

※水色ハッチングは、流電陽極方式の電気防食工法

番号	点検方法
1	現場での目視確認
2	直流電源装置内メーターの確認
3	計測機器での測定
4	遠隔装置での監視および測定

表-3.3.9 点検方法一覧（追加点検項目）

No.	工 法 名	点検方法																	
		追加点検項目																	
		バトランプ			分配電流測定			陽極システム			モニタリングボックスの点検			発生電流測定			電源バッテリーの状況		
		日常	定期	詳細	日常	定期	詳細	日常	定期	詳細	日常	定期	詳細	日常	定期	詳細	日常	定期	詳細
6-1	チタン溶射方式	-	1	1	-	-	3												
6-2	チタンリボンメッシュ方式	-	1	1	-	-	3												
6-3	ALAPANEL方式										-	1	1	-	3	3			
6-4	亜鉛シート方式										-	1	1	-	3	3			
9-1	導電性塗料方式 (エマコP30アノード方式)							-	-	1									
9-2	導電性モルタル方式							-	-	1									
10-1	ECPパネル方式 析端電気防食工法																-	3	3
10-2	ECPパネル方式 析端電気防食工法																-	3	3

番号	点検方法
1	現場での目視確認
2	直流電源装置内メーターの確認
3	計測機器での測定
4	遠隔装置での監視および測定

(1) 直流電源装置

電気防食工法を保有する専門家が望ましいと考える「直流電源装置の点検方法」の回答結果を表-3.3.6に示す。このうち「装置の稼働状態、箱体の外観点検」は、概ねの回答が現場での目視確認であり、日常点検での回答が多かった。また、一部の遠隔装置を保有する専門家からは、「装置の稼働状態」を日常的に遠隔装置での監視および測定との回答があった。

「装置内配線および端子、通電電流・電源電圧、避雷器の状態確認」の点検頻度は概ねの回答が定期または詳細点検時に目視および測定による回答であった。

なお、流電陽極方式は直流電源装置を必要としないため対象外とする。

(2) 防食効果の確認

専門家が望ましいと考える「防食効果確認の点検方法」の回答結果を表-3.3.7に示す。一部の遠隔装置を保有する専門家より、「鉄筋電位」・「復極量」を日常点検とする回答があったが、概ねの回答は定期点検または詳細点検での測定であった。

また、二つの専門家より「外付け照合電極による鉄筋電位の確認」を定期点検時に行うことが望ましいとする回答があった。

(3) 陽極システムの状態確認

電気防食工法を保有する専門家が望ましいと考える「陽極システムの状態確認の点検方法」の回答結果を表

-3.3.7に示す。このうち「陽極システム変状の有無」については、日常点検による現場での目視確認との回答が約半数あった。

また、「陽極電位値の確認」は定期点検または詳細点検時の回答が多く、一部の専門家からは無しとの回答もあった。

#### (4) 防食対象の状態確認

電気防食工法を保有する専門家が望ましいと考える「防食対象の状態確認の点検方法」の回答結果を表-3.3.8に示す。すべての回答が定期点検または詳細点検時に現場での目視確認によるものであった。

#### (5) 配線・配管材の状態確認

電気防食工法を保有する専門家が望ましいと考える「配線・配管材の状態確認の点検方法」の回答結果を表-3.3.8に示す。すべての回答が日常点検、定期点検または詳細点検時に現場での目視確認によるものであった。

#### (6) 追加点検項目

電気防食工法を保有する専門家が望ましいと考える「追加点検項目の状態確認の点検方法」の回答結果を表-3.3.9に示す。パトランプの目視点検、詳細点検時の分配電流測定などの回答があった。また、流電陽極方式を保有する専門家からは、モニタリングボックスの目視確認および陽極発生電流の測定との回答があり、桁端等狭隘部への外部電源方式を保有する専門家からは、電源バッテリーの状況を定期点検により計測するとの回答も得られた。

#### (7) 点検方法のまとめ

##### 1) 目視確認による点検

- ・直流電源装置の稼働状態および箱体外観、陽極システムおよび配線配管材の変状の有無、については、概ね日常点検時に行うことが望ましいとの回答が多かった。
- ・直流電源装置内の配線、端子、避雷器等の確認、また、防食対象部コンクリート表面の損傷確認については、定期点検または詳細点検との回答が多かった。
- ・流電陽極方式においては、直流電源装置の代わりとして、モニタリングボックスの目視点検を定期点検または詳細点検との回答が、確認された。

以上より、直流電源装置の稼働状態、および外観変状の有無の確認等については、日常点検により行い、目視確認のうち専門性が必要となる項目については、定期点検または詳細点検によることが望ましいという傾向がみられた。

##### 2) 計測による点検

- ・点検方法に機器の特性による違いはあるものの、概ねの回答が「直流電源装置内メーターの確認」および「計測機器での測定」であり、一部の専門家から「遠隔装置での監視および測定」との回答があった。
- ・定期点検時に通電電流、電源電圧、内部照合電極による鉄筋電位の計測、および復極量による防食効果の確認との回答が、多かった。
- ・詳細点検時に外付け照合電極による鉄筋電位の確認、陽極電位値の確認、分配電流測定等の回答が得られた。
- ・遠隔装置を保有する専門家からは、装置の稼働状態、鉄筋電位、復極量の確認を日常点検により実施する旨の回答があった。
- ・流電陽極方式を保有する専門家からは、陽極の残存寿命の目安となる発生電流測定の回答があった。

以上より、計測による点検は、主に防食効果の確認を定期点検時に行う回答であった。その他の計測項目として陽極電位値、分配電流測定等は一部の専門家からの回答であり、流電陽極方式や遠隔装置を保有する専門家からは、それぞれに特化した項目や測定頻度の違いなどの回答があった。

### 3) 全体の考察

- ・目視点検については、比較的行きやすい点検が日常点検時に行われており、陽極システムや配線配管材等は、専門家によっては定期点検および詳細点検との回答がみられた。
- ・計測による点検は概ね定期点検時に行われており、詳細点検の回答として一部の専門家からは防食システムに特化したものと思われる回答があげられた。
- ・遠隔監視は装置の稼働状態のほか、電流電圧、鉄筋電位および復極量の測定が可能であり現地への移動の必要がなく有効的なシステムではあるが、モルタル材や配管材の一部損傷など、計測値に直接影響を及ぼさない部分的な変状がある場合には、定期的な目視点検は必要であると考えられる。

## 3.3.4 点検項目の評価基準

### (1) 直流電源装置の状況確認

直流電源装置の状況確認についてアンケート結果一覧を表-3.3.10 に示す。

#### 1) 装置の稼働状態の確認

直流電源装置の稼働状況は装置外部、あるいは内部に設置された表示灯を目視で確認するとの回答があった。表示灯の例を写真-3.3.1, 3.3.2 に示す。後述するが、パトランプを除くすべての表示灯は、装置が正常に稼働している場合に点灯するものであった。また、これと同時に表示灯を保護するカバーに劣化および損傷がないか確認するとの回答もあった。この表示灯が装置の異常を示す場合の対策として、表示灯が直流電源装置異常を示す場合、装置の開閉器(電源のON/OFF)を確認し、OFFであった場合はONに切り替える、あるいはヒューズ等の部品を交換するとの回答があった。

このことから、直流電源装置の開閉器がOFFであった場合、表示灯が消灯するので、点検時に表示灯が消灯状態であった場合、開閉器を確認する必要があると考えられる。また、電源が正常に稼働していた場合、あるいはこの対策を実施し、電源が復旧したにも関わらず、表示灯が消灯状態であった場合は表示灯の故障が考えられるので部品交換が必要である。

#### 2) 箱体の損傷、発錆

箱体等の損傷例を写真-3.3.3, 3.3.4 に示す。箱体および扉のヒンジ部、パッキンの変状を目視で点検し、これにより塗装の剥がれおよび装置の稼働に支障をきたす異常があった場合、塗料の補修や箱体の修理を実施するという回答があった。

#### 3) 装置内配線および端子

配線および端子台の損傷および腐食の有無を目視で確認し、損傷したものがあった場合、新品と交換するとの回答があった。

#### 4) 通電電流および電圧

通電電流および電圧を写真-3.3.2 に示すような直流電源装置に設置されているメーター、あるいは計測器(テスター等)で計測し、竣工時あるいは前回点検時と比較して、計測値が異常値でないことおよび安定していることを確認するとの回答があった。なお、その基準値については1社のみ「前回の±50%以内であること」としていた。この計測値が異常値あるいは不安定な場合の対策として、電流を正常な値に調整するという回答があ

った。また、メーター表示値と計測器の値を比較し、異なる値を示していないかを確認するとの回答もあった。これは、装置に設置されているメーターが正しく通電電流および電圧計測しているかを確認するためと考えられる。

### 5) 避雷器

避雷器の例を写真-3.3.5, 3.3.6 に示す。避雷器は雷等による異常電圧から直流電源装置を保護するために設置されている。これを目視により点検し、損傷および劣化がないことを確認するとの回答があった。避雷器には、正常に稼働していることを目視で確認するための機能が存在する(LED ランプ等)。この機能により避雷器が異常を示したことが確認された場合、新品と交換する必要があるとの回答があった。

表-3.3.10 点検項目の評価基準一覧（直流電源装置の状態確認）

目的	項目番号	点検項目	評価基準	方法	対策
直流電源装置の状態確認	①	装置の稼働状況の確認	・表示灯の点灯の確認 ・表示灯カバーの劣化/損傷の確認	目視	・開閉器のON ・ヒューズ等の交換 ・カバーの交換
	②	箱体の損傷、発錆	・損傷、腐食が進行していないこと ・ヒンジ部、パッキンに劣化がないこと	目視	・補修塗料で補修 ・装置の稼働に支障をきたす場合は修理する ・新規交換
	③	装置内配線および端子	・配線の劣化がないこと ・端子台や基盤の損傷、腐食がないこと	目視	・損傷部分の取替
	④	通電電流、電圧	・異常値を示していないこと ・数値が安定していること ・竣工時あるいは前回点検時と比較 ・前回の±50%以内であること	メーター計測器	・電流調整 ・メーター表示値と計測器での値の比較
	⑤	避雷器	・損傷、劣化がないこと ・避雷器が異常を示していないこと	目視	・新品と交換



写真-3.3.1 装置外部表示灯例

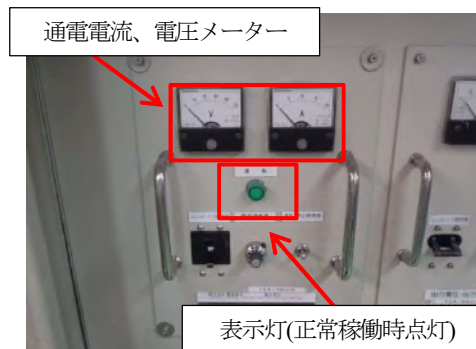


写真-3.3.2 装置内部表示灯例



写真-3.3.3 箱体の損傷例



写真-3.3.4 箱体の腐食例



写真-3.3.5 避雷器例①



写真-3.3.6 避雷器例②

## (2) 防食効果確認

防食効果確認の方法についてアンケート結果一覧を表-3.3.11 に示す。

### 1) 鉄筋電位(埋設照合電極)

電気防食工法を適用したコンクリート構造物では写真-3.3.7 に示すように照合電極を埋設(以下、埋設照合電極と呼ぶ)している。防食効果確認のため埋設照合電極のケーブルを直流電源装置に引き込み、直流電源装置に設置されているメーター、あるいは計測器(テスター等)を用いて鉄筋電位を計測する。この計測値が安定している場合は、鉄筋電位を正しく計測しているとの回答があった。また、電源がオン時に鉄筋電位値が卑側に、オフ時に貴側に変化することを確認するとの回答があった。電気防食工法(陰極防食法)は、コンクリートに設置した陽極から鉄筋に電流を供給し鉄筋電位を卑化させる工法である。このため、電源がオン時に鉄筋電位が卑化することを確認することで、電流が鉄筋に供給されているか、あるいは陽極と鉄筋を逆に結線(逆結線)していないかを調べることができる。PC 構造物では、上記の条件を満たし、電気防食工法が正常に機能していても鉄筋電位を必要以上に卑化(過防食)した場合に、鋼材表面に発生する水素により PC 鋼材が脆化する。これを防ぐため、鉄筋電位を水素発生電位( $-1000\text{mV vs. CSE}$ )より貴な値を保つとの回答があった。上記の点検で異常があった場合の対策として、通電電流値を増減させるとの回答があった。電源オン時に鉄筋電位が卑化しない場合は、電位が十分に卑化するまで通電電流値を増加、PC 構造物での鉄筋電位が水素発生電位を示した場合は、通電電流値を減少させる必要がある。

### 2) 鉄筋電位(外付け照合電極)

(1) の点検では埋設照合電極を用いており、このとき計測される鉄筋電位は照合電極の埋設位置付近のみであり、照合電極の埋設位置以外の鉄筋電位を計測したい場合(照合電極埋設位置以外で電流の分布が悪い恐れがある場合等)は、コンクリート表面に外付けの照合電極を取り付け、計測器(テスター等)を用いて鉄筋電位を計測する必要がある。このときの評価基準および対策は、(1) と同様との回答があった。

### 3) 復極量

電位変化量を  $100\text{mV}$  以上で管理するとの回答があった。これは、鉄筋コンクリートに電気防食工法を適用した場合の防食効果確認方法である。この手法は、電源オフ時から電源オン時の鉄筋電位、あるいは電源オン時から電源オフ後一定時間経過後(例えば、24 時間後)の鉄筋電位を比較し、その電位変化量(前者を分極量、後者を復極量と呼ぶ)が  $100\text{mV}$  以上であれば防食効果が得られているとするものである。なお、電源オン時の鉄筋電位は電圧降下による誤差を除去するため、防食電流を遮断した直後のインスタントオフ電位とする。一般に電位変化量の計測に用いられている復極試験の概念図を図-3.3.5 に示す。ただし、コンクリート中の酸素の供給性が悪い環境(没水環境等)である場合、復極量  $100\text{mV}$  以上となるためには長時間を要することがある。こ

の場合の防食効果確認方法として、鉄筋が不活性となり、腐食が停止する鋼材防食電位を $-850\text{mV vs.CSE}$  (鋼材防食電位)より卑であることを確認するとの回答があった。これらの条件を満足しない場合の対策として、(1)と同様に通電電流値を増減させるとの回答があった。このとき、電位変化量が $100\text{mV}$ 以上および鋼材防食電位 $-850\text{mV vs.CSE}$ を満たない場合は、通電電流値を増加する必要がある。また、これらを満たす場合でも通電電流値を増加させたとき、陽極劣化の早期発生、および(1)で述べた通り過防食によるPC鋼材の水素脆化の恐れがある。このため、評価基準を満たすときに、上記の恐れがある場合は通電電流値を減少させる必要がある。

表-3.3.11 点検項目の評価基準一覧 (防食効果確認)

目的	項目番号	点検項目	評価基準	方法	対策
防食効果確認	⑥	鉄筋電位 (埋設照合電極)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・数値が安定していること</li> <li>・PC積の場合、水素発生電位より貴であること</li> <li>・電源オン時に電位値が卑側に、オフ時に貴側に变化すること</li> </ul>	メーター計測器	・通電電流値の増減
	⑦	鉄筋電位 (外付け照合電極)	⑥と同様	計測器	⑥と同様
	⑧	復極量	<ul style="list-style-type: none"> <li>・電位変化量<math>100\text{mV}</math>以上</li> <li>・鋼材防食電位<math>-850\text{mV vs.CSE}</math>より卑</li> <li>・上記のいずれかを満足していること</li> </ul>	計測器	⑥と同様



写真-3.3.7 鉛照合電極設置例

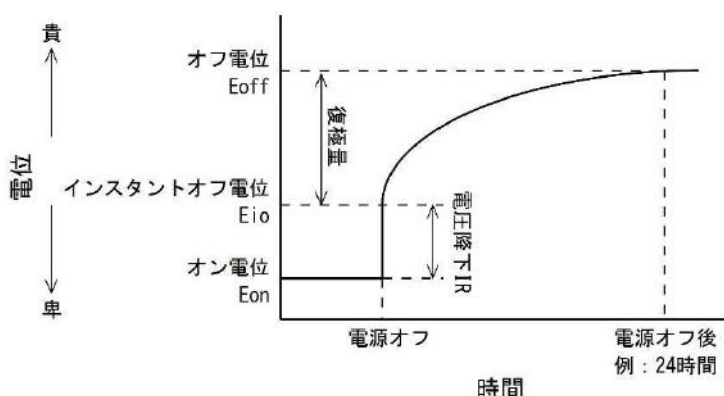


図-3.3.5 復極量の概念図

### (3) 陽極システムの状況確認

陽極システムの状況確認についてアンケート結果一覧を表-3.3.12に示す。

1) 陽極システムの変状の有無

陽極システムの変状の有無は、目視および打音調査によって確認するとの回答があった。ただし、電気防食工法は、図-3.3.6~3.3.18 に示すように種々の陽極システムが存在し、それぞれで確認方法が異なる。このとき、アンケートの回答から4つ方式に大別した。それぞれの方式の概要およびアンケートの結果を以下の①~④に記載する。

① ニッケル被覆炭素繊維，チタントレイ，ALAPANEL，亜鉛シート方式

陽極材をコンクリート表面に設置し、陽極材とコンクリート間にバックフィル材(電解質)を充填する方式である。アンケート結果から、点検の際にはバックフィルの漏れおよび陽極材の浮きの有無を目視観察し、これらが発生した場合はバックフィルの再注入あるいは陽極材の再設置を行うとの回答があった。

② チタン溶射方式

コンクリート表面に陽極材を溶射して設置する方式である。アンケート結果から、点検の際には溶射被膜の損傷および浮きの有無を目視観察し、これらが発生した場合は陽極材の再溶射を行うとの回答があった。

③ チタンリボンメッシュ，チタングリッド，PI-Slit，導電性モルタル方式

陽極材をコンクリート中に設置し、導電性が良いモルタルで埋設(被覆)する方式である。アンケート結果から、点検の際には被覆モルタルにひび割れおよび剥離の有無を目視観察および打音調査し、これらが発生した場合は被覆モルタルの補修を行うとの回答があった。

④ 導電性塗料(エマコ CP30 アノード，キャブロンコート)，貼り付けモール，e-sheet 方式

陽極材をコンクリート表面に塗布あるいは貼り付けし、設置する方式である。アンケート結果から、点検の際には陽極材に損傷および剥離の有無を目視観察し、これらが発生した場合は陽極材の補修あるいは貼り直しを行うとの回答があった。

2) 陽極電位

3.4.2 (1) に示す点検と同様の方法で陽極電位を計測する。この計測値が安定している場合は、陽極電位を正しく計測しているとの回答があった。このとき、陽極電位が不安定な場合、陽極に変状が発生している恐れがあるため、陽極材の目視確認あるいは補修を実施する必要がある。また、電源がオン時に陽極電位が貴化することを確認するとの回答があった。これによって、電流が陽極材より流出、あるいは陽極と鉄筋を逆に結線(逆結線)していないかを調べることができる。電源がオン時に陽極電位が貴化しない場合、配線を確認し、逆結線等の配線ミスの有無を調べる必要がある。

表-3.3.12 点検項目の評価基準一覧 (陽極システムの状態確認)

目的	項目番号	点検項目	評価基準	方法	対策
陽極システムの状態確認	⑨	陽極システムの変状の有無	<ul style="list-style-type: none"> <li>バックフィル漏れ、保護カバーあるいは陽極被覆材の劣化、陽極材の浮きがないこと (ニッケル被覆炭素繊維、チタントレイ、ALAPANEL、亜鉛シート)</li> <li>溶射被膜に損傷、剥離がないこと (チタン溶射)</li> <li>被覆モルタルにひび割れ、剥離がないこと (チタンリボンメッシュ、チタングリッド、PI-Slit、導電性モルタル)</li> <li>陽極材に損傷、剥離がないこと (導電性塗料、キャブロン、貼り付けモール、e-sheet)</li> </ul>	目視、打検等	<ul style="list-style-type: none"> <li>止水処理、バックフィル再注入 (ニッケル被覆炭素繊維)</li> <li>陽極材の新規交換 (チタントレイ、ALAPANEL、亜鉛シート)</li> <li>再溶射 (チタン溶射)</li> <li>被覆モルタル補修 (チタンリボンメッシュ、チタングリッド、PI-Slit、導電性モルタル)</li> <li>陽極材の補修 (導電性塗料、キャブロン、貼り付けモール)</li> <li>保護シートによる防護または貼り直し (e-sheet)</li> </ul>
	⑩	陽極電位	<ul style="list-style-type: none"> <li>電源オン時に電位値が貴側に、オフ時に卑側に变化すること</li> <li>数値が安定していること</li> </ul>	計測器	<ul style="list-style-type: none"> <li>配線、端子台の確認</li> <li>陽極材の変状の確認</li> <li>陽極材の補修</li> </ul>



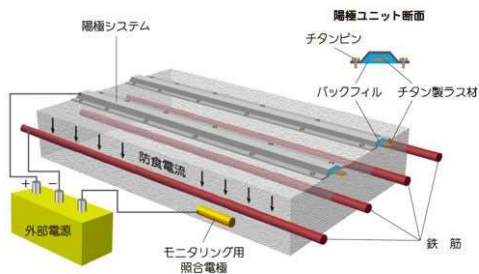


図-3.3.6 ニッケル被覆炭素繊維方式

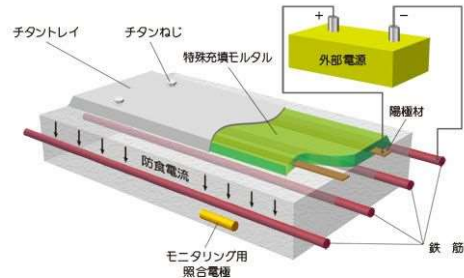


図-3.3.7 チタントレイ方式

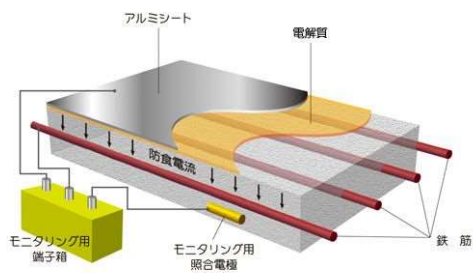


図-3.3.8 ALAPANEL 方式

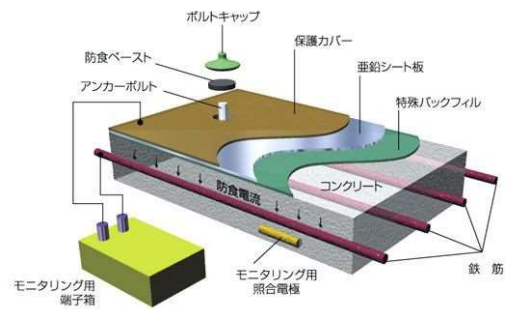


図-3.3.9 亜鉛シート方式

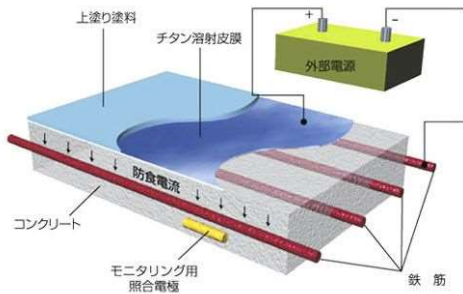


図-3.3.10 チタン溶射方式

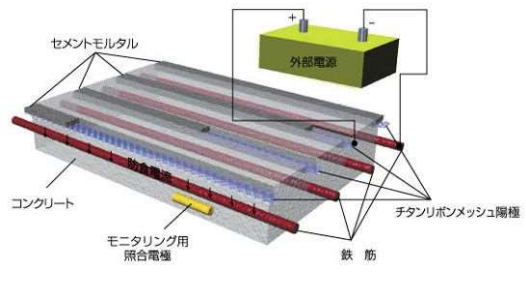


図-3.3.11 チタンリボンメッシュ方式

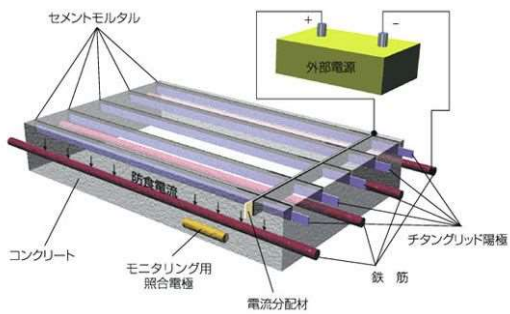


図-3.3.12 チタングリッド方式

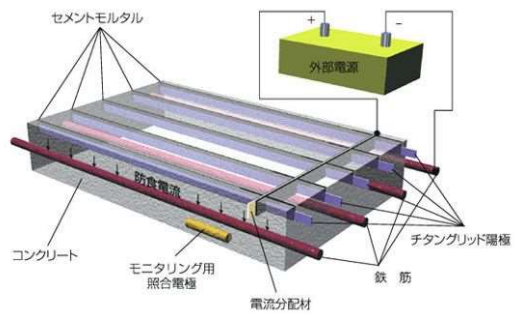


図-3.3.13 PI-Slit 方式

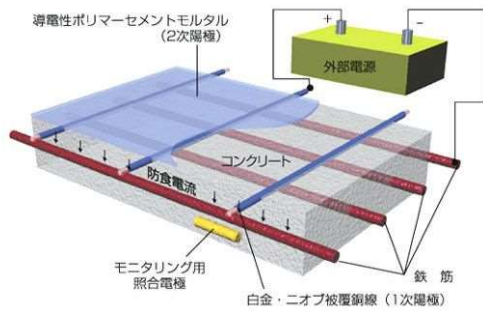


図-3.3.14 導電性モルタル方式

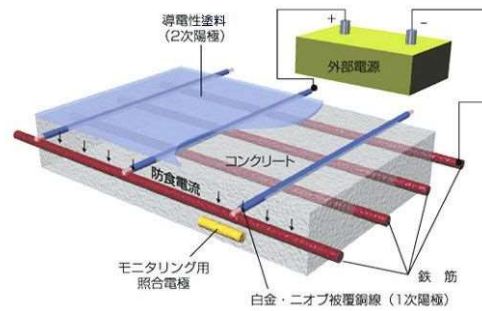


図-3.3.15 導電性塗料方式

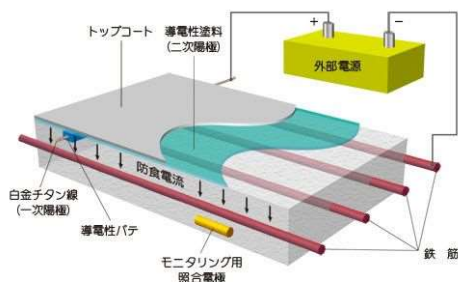


図-3.3.16 キャプロンコート方式



図-3.3.17 貼り付けモールド方式

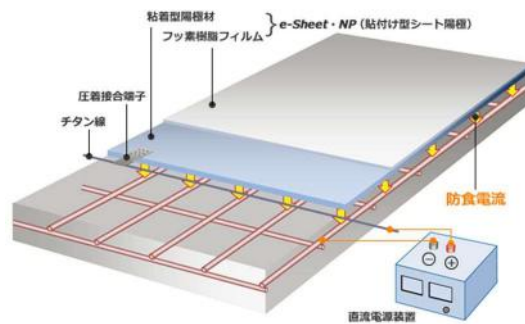


図-3.3.18 e-sheet 方式

#### (4) 防食対象の状態および配線・配管材の確認

防食対象の状態および配線・配管材の確認について、アンケート結果一覧を表-3.3.13 に示す。

##### 1) 防食対象の状況確認

電気防食工法の目的はコンクリート中鉄筋の防食が目的であるため、点検では鉄筋腐食による躯体(防食対象)の変状の有無を確認する必要がある。この方法として、躯体のひび割れおよび錆汁の有無を目視確認および打音調査により調べ、これらが発生した場合、防食電流値が適正な値であることおよび防食効果(電位変化量 100mV であること)の確認を行うとの回答があった。

##### 2) 配線, 配管, ボックスの損傷

鉄筋および陽極材に結線した配線の気露出部は、写真-3.3.8, 3.3.9 のような電線管およびプルボックスで

保護する。これらの損傷、劣化の有無を目視確認により調べ、これらが発生した場合は補修あるいは新規交換を行うという回答があった。

表-3.3.13 点検項目の評価基準一覧（防食対象の状態および配線・配管材の確認）

目的	項目番号	点検項目	評価基準	方法	対策
防食対象の状態確認	⑪	防食対象表面	・躯体のひび割れや錆汁がないこと	目視、打検等	・防食効果確認 ・分配電流確認 ・発生電流確認(流電陽極方式) ・陽極材の補修
配線・配管材	⑫	配線、配管、ボックスの損傷	・損傷や劣化がないこと ・配管材支持具やサドル等の固定材の脱落がないこと	目視	・損傷部の補修または新規交換



写真-3.3.8 電線管設置例



写真-3.3.9 プルボックス設置例

#### (5) 追加項目

専門者が、これまでの点検項目に追加して実施しているものを表-3.3.14 に示す。

##### 1) パトランプの設置

直流電源装置には写真-3.3.10 に示すような装置の異常(受電停止)を知らせるパトランプを設置する場合がある。このパトランプは、直流電源装置に異常があるときに点灯する。これを目視確認によって調べ、点灯していた場合は、原因の調査を行うとの回答があった。また、このパトランプの外観上の損傷の有無を確認し、損傷があった場合は新規交換するとの回答もあった。

##### 2) 分配電流測定

復極量は、通常照合電極の埋設位置のみ行うため、埋設位置以外の部位の鉄筋で電流が十分に供給されていない場合、これを検知することができない。したがって、防食対象にひび割れや錆汁が確認された場合に、それらの部位に電流が分配されているかを調べる必要がある。この方法として、異常発生部位を中心にプルボックス内の配線を用いて分配電流を計測する。これと同時にプルボックス内の配線の劣化および損傷の有無を確認するとの回答があった。この結果、対策の回答として、電流が流れていない部位および分配電流に大きな偏りがあった場合、配線等を確認し、電流が流れにくい部位がないか確認するとあった。また、陽極システムの劣化が原因であった場合は電源をオフして補修する。

##### 3) 発生電流測定(流電陽極方式のみ)

流電陽極方式でも同様に陽極と鉄筋間を流れる通電電流値を計測する必要がある。アンケートの結果では、前回の計測結果と比べ、大きく変化はないことを評価基準としていた。このとき電流が流れていなかった場合、陽極と鉄筋の結線状態を調べ、正しく接続されているかを確認するとの回答があった。

##### 4) モニタリングボックス点検

モニタリングボックスの写真を写真-3.3.11に示す。陽極発生電流を計測するための設備を保護する箱体である。点検方法は腐食およびほこりがないことを確認し、これらが発生した場合、錆およびほこりの除去あるいは、新規交換を行うとの回答があった。

表-3.3.14 点検項目の評価基準一覧（追加項目）

目的	項目番号	点検項目	評価基準	方法	対策
追加項目	⑬	パトランプの設置	・異常時にランプが点灯 ・外観上の損傷がないこと	目視	・ランプが点灯している場合、原因を調査し、処置を行う ・誤作動の場合、配線系統を確認 ・損傷があった場合、新規交換
	⑭	分配電流測定	・各ブルボックス内配線に流れる電流を調べる ・ブルボックス内の結線部に劣化、損傷がないこと	計測器	・電流の大きな偏りや流れてない部分を発見した場合は、配線等を確認 ・電源オフして補修する
	⑮	発生電流測定	・前回測定と比べ、大きく変化はないこと	計測器	・陽極の結線状態を確認する
	⑯	モニタリングボックス点検	・端子台等に腐食やほこりがないこと	目視	・さびやほこりの除去 ・新規交換



写真-3.3.10 パトランプ設置例



写真-3.3.11 モニタリングボックス例

### 3.3.5 新しい点検方法・技術

新しい点検方法・技術を下記に示す。

#### (1) モバイル型遠隔監視システム（ピーエス三菱）

(仕様)

- ・復極量一覧表示＋色分けによる一時診断支援
- ・アラームメール機能／グラフ表示も可能
- ・通電電流、電圧、ON 電位 インスタント OFF 電位 OFF 電位、復極量等自動測定
- ・電流調整のみ現地で実施

(概要)

維持管理の「見える化」を簡単に実現させる「イージーMモニター」は、様々な維持管理プログラムをモバイル端末に搭載し、何時でも、何処でも、維持管理の「見える化」を可能にしたモバイルツールである。電気防食工法に関しては、遠隔監視装置から配信されるデータの中から作動状況を把握できる最低限の情報をもとに、色別で作動状況を表示するプログラムとなっている。電気防食工法の維持管理に遠隔監視装置とイージーMモニターを使用することにより、

- ① 専門的知識を有さずとも電気防食工法の作動を「一次診断」できる。
- ② 何時でも、何処でも現状の作動状況を把握できる。

- ③ 定期点検の頻度を減らすことが可能となる。
- ④ 各種アラームメールを指定した担当者に自動配信されるために、異常内容をすぐさま把握できる。



復極量の結果一覧

【イージーMモニターからのアラーム】  
 ○○橋について、通電停止の可能性があります。  
 至急イージーMモニターを確認の上、  
[mobilemonitor@psmic.co.jp](mailto:mobilemonitor@psmic.co.jp) まで、  
 状況をお知らせ下さい。  
 担当技術者から、対応策について連絡します。

電源ストップのアラームメールの例

図-3.3.19 イージーM モニター

## (2) パソコン型遠隔監視制御システム（日本防蝕工業）

### （仕様）

- ・警報メッセージ機能／グラフ表示も可能／自動電流調整機能
- ・通電電流，電圧，ON 電位 インスタント OFF 電位 OFF 電位，復極量等自動測定

### （概要）

本システム（CP-Watcher）は、コンクリート構造物の鉄筋電気防食用遠隔監視制御システムである。管理事務所に設置された親局パソコンは、電話回線を経由し、直流電源装置に内蔵された監視装置（子局）とデータ通信し、電気防食装置の運転状況及び鉄筋の防食状況を、管理事務所にてリアルタイムに監視と電気防食装置の遠隔制御ができる。また、監視装置は豊富な自動機能を有し、現地で異常が発生した時には管理事務所へ警報通知する等、信頼性の高い設備管理が実現できる。

### （特徴）

#### ①システム管理ソフトウェア（親局）

- ・監視子局で計測したデータを受信し、重要な時系列管理データとしてパソコンのハードディスクへ保存。
- ・時系列管理データは、管理ソフトウェアにて検索し、時系列グラフ表示。
- ・時系列管理データより、月単位でまとめた報告書として印刷可能。

#### ②監視装置（子局）

- ・本監視装置 1 台で最大 16 回路の電気防食装置を管理可能。
- ・自動防食監視機能 防食電流、出力電圧、1 回路あたり最大 4 個の照合電極に対する鉄筋のオン電位，インスタントオフ電位を，定期的に自動計測。
- ・自動防食効果確認試験機能 毎月 1 回予め設定された日時に，防食電流を自動的に 24 時間停止して，鉄筋電位の復極量を自動計測。
- ・自動電流調整機能 回路毎の 4 個の照合電極に対する鉄筋のインスタントオフ電位が最適な値となるように，定期的に防食電流を自動調整。
- ・データ収録機能 自動計測した時系列データは，監視子局内のメモリーに保持しているため，過去の経過を参照可能。メモリー容量は，回路毎に約 2400 レコード。
- ・警報機能 万一電源装置や防食状況に異常が発生しても，管理事務所親局の警報用プリンターに警報メッセージが出力されますので，異常の早期発見が可能。

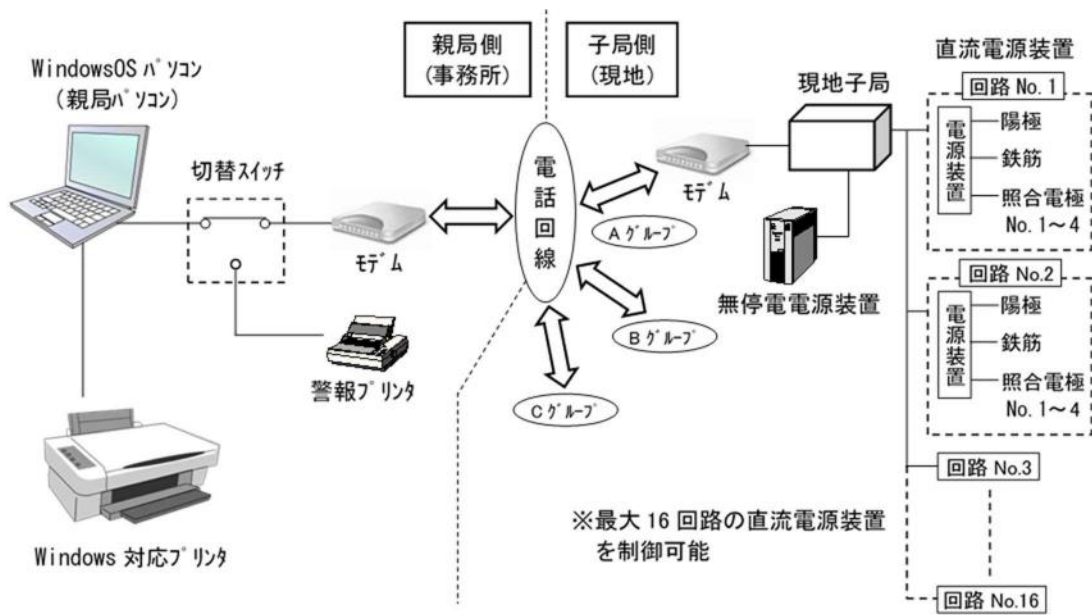


図-3.3.20 パソコン型遠隔監視制御システム



写真-3.3.12 子局の外観



写真-3.3.13 親局の外観

### (3) 現地測定補助器具

#### ①msPOT (インスタントオフ電位差計) (ナカボーテック)

(概要)

インスタント OFF 電位測定のための簡略化を可能とする測定器具。直流電源装置内には、モニタリング回路用の電位測定バイパス回路が設けてある。このバイパス回路端子台は電源装置表面部に有り、P1 端子側に専用測定器 (ms POT)の電源側、+端子側に測定器の陽極側を接続して電位を測定する。この専用測定器は、高入力抵抗を有する電位差計であり、防食電流を手動で遮断 (OFF)することなく、オン電位及びインスタントオフ電位が連続的にデジタル表示で測定できることが特徴である。



○ : インスタントオフ電位差計



(商品名 : m s POT)

写真-3.3.14 インスタントオフ電位差計

#### ②ONOFF タイマー+デジタル表示パネル (東興ジオテック)

(概要)

オン・オフタイマーの設置オン・オフタイマーを標準に組み込んでおり、それによって電流遮断時間及び通電時間が自由に設定でき、オフ電位・インスタントオフ電位の測定が簡単である。電位測定パネルの設置電位測定用に 100MΩ の内部抵抗を備えた測定器具を使用せず、電位の測定が可能である。



写真-3.3.15 ONOFF タイマー+デジタル表示パネル



#### (4) 貼り付け型照合電極 (ショーボンド建設)

(概要)

- ・外付け照合電極の合理化
- ・貼り付けるだけでコンクリート中の鉄筋の自然電位が測定可能。
- ・導電性粘着材を使用しているため、コンクリートを濡らさずに測定可能。
- ・導電性粘着材で貼り付けるため、測定点がずれない。



写真-3.3.16 貼り付け型照合電極

### 3.3.6 直流電源装置の概要

直流電源装置に関するアンケート結果一覧を表-3.3.15～3.3.17に示す。

表-3.3.15 直流電源装置の制御方式

No.	工 法 名	直流電源方式の制御	
		制御方式	理由等
1-2	TCユニット方式	定電圧方式 /その他	塩害環境の厳しい場所(屋外)に設置する場合、弊社では定電流方式に比べて構造が比較的単純で壊れにくい定電圧方式を標準としている。一方、電源装置の設置場所が屋内等、塩害による劣化が無いものと判断された場合には、構造が複雑ではあるが通電環境に応じて制御方式を切り替えられる定電流/定電圧方式を選定していることが多い。
2-1	貼付け型シート陽極方式 e-sheet・NP工法	定電流方式	環境条件に左右されず、一定の通電電流量が確保できるように定電流方式を採用している
2-2	貼付け型モール陽極方式 e-cover・C工法	定電流方式	環境条件に左右されず、一定の通電電流量が確保できるように定電流方式を採用している
3	チタンメッシュ方式 チタンリボンメッシュ方式 チタングリッド方式	定電流方式	防食効果を確実に確保・維持するため。 (定電圧方式においては、定電流方式よりも上記の確保・維持に劣る)
4	チタンロッド方式	定電圧方式	陽極間をチタンワイヤーで直列に結線しているが、チタンワイヤーが細い為、高圧な電圧が長時間負荷された場合、破断の恐れがある。ただし電圧リミッターを設置することにより、定電流方式でも可能である。電源装置は、定電圧・定電流どちらでも制御可能なような仕様としている。
6-1	チタン溶射方式	定電圧方式 その他(定電流/定電圧方式)	塩害環境の厳しい場所(屋外)に設置する場合、弊社では定電流方式に比べて構造が比較的単純で壊れにくい定電圧方式を標準としている。一方、電源装置の設置場所が屋内等、塩害による劣化が無いものと判断された場合には、構造が複雑ではあるが通電環境に応じて制御方式を切り替えられる定電流/定電圧方式を選定していることが多い。
6-2	チタンリボンメッシュ方式	定電圧方式 その他(定電流/定電圧方式)	塩害環境の厳しい場所(屋外)に設置する場合、弊社では定電流方式に比べて構造が比較的単純で壊れにくい定電圧方式を標準としている。一方、電源装置の設置場所が屋内等、塩害による劣化が無いものと判断された場合には、構造が複雑ではあるが通電環境に応じて制御方式を切り替えられる定電流/定電圧方式を選定していることが多い。
7-2	チタントレイ方式	定電流方式	直接防食電流を制御できるため 遠隔監視システムでは、電位制御機能により防食電流を自動調整する
8-1	チタングリッド方式	定電流方式	環境によりコンクリート抵抗が相違した場合にも、安定した復極量を得るためには、定電圧方式より定電流方式の方が望ましい。
10-1	ECPパネル方式 桁端電気防食工法	定電圧方式	本工法では、ソーラー電源を用いることを基本としており、定電圧方式の方が電源作製上有利であること。陽極への負担低減を考えた場合、定電圧方式の方が有利であることが既往の研究でもしられているため。

表-3.3.16 箱体外側のランプ

No	工 法 名	点灯条件				色			
		受電 ランプ	運転 ランプ	パト ランプ	バッテリー ランプ	受電 ランプ	運転 ランプ	パト ランプ	バッテリー ランプ
1-2	TCユニット方式	正常	正常	異常発生		白	赤	黄・青・赤	
2-1	貼付け型シート陽極方式 e-sheet・NP工法		正常				緑		
2-2	貼付け型モール陽極方式 e-cover・C工法		正常				緑		
4	チタンロッド方式		正常	異常発生			緑	異常時 赤	
6-1	チタン溶射方式	正常	正常	異常発生		白	赤	黄・青・赤	
6-2	チタンリボンメッシュ 方式	正常	正常	異常発生		白	赤	黄・青・赤	
7-2	チタントレイ方式	正常	正常			緑	緑		
8-1	チタングリッド方式	正常	正常			白	青		
10-1	ECPパネル方式 析端電気防食工法	正常	正常		正常	青	青		青

表-3.3.17 計器盤での計測項目および方法

No.	工 法 名	計器盤での計測項目および方法			
		電流値	電圧値	鉄筋電位値	バッテリー電圧
1-2	TCユニット方式	1	1	2	
		2	2		
2-1	貼付け型シート陽極方式 e-sheet・NP工法	1	1	-	
		2	2	-	
2-2	貼付け型モール陽極 方式 e-cover・C工法	1	1	-	
		2	2	-	
3-1	チタンメッシュ方式	2	2	2	
3-2	チタンリボンメッシュ 方式				
3-3	チタングリッド方式				
4	チタンロッド方式	1	1	1	
6-1	チタン溶射方式	1	1	2	
		2	2		
6-2	チタン溶射方式	1	1	2	
		2	2		
7-2	チタントレイ方式	1	1	1	
				2	
8-1	チタングリッド方式	1	1	1	
10-1	ECPパネル方式 桁端電気防食工法	2	1	2	2

番号	計測方法
1	メーター表示読み取り
2	テスターで計測

表-3.3.18 外部電源装置仕様一覧

No.	2-2	4	6-1	
報告会社名	ショーボンド建設	東興ジオテック	ナカボーテック	
供給メーカー	ショーボンド建設	東興ジオテック	ナカボーテック	
工法名	e-cover・C	チタンロッド	チタン溶射	
外観	1次側電源	商用電源	商用電源	
	表示灯	あり	あり	
	表示灯カバー	なし	あり	
	塗装	あり	あり	
内装	回路通電表示灯	なし	あり	
	メータ	デジタル×2	デジタル×2	アナログ×2
	通電方式	(定電流・定電圧)	(定電圧)	定電圧
	制御ダイヤル	バーニア	1回転	(タップ)
	1次側ブレーカー	不明	あり	あり
	遠隔	なし	なし	なし
	遠隔警報	—	—	—

No.	6-2	7-2	8-1	
報告会社名	ナカボーテック	日本防蝕工業	ピーエス三菱	
供給メーカー	ナカボーテック	日本防蝕工業	ピーエス三菱	
工法名	チタンリボンメッシュ	チタントレイ	チタングリッド	
外観	1次側電源	商用電源	商用電源	
	表示灯	あり	なし	あり
	表示灯カバー	あり	なし	あり
	塗装	あり	あり	あり
内装	回路通電表示灯	あり	あり	不明
	メータ	デジタル×2	アナログ×2	デジタル×1
	通電方式	定電流	(定電流・定電圧)	不明
	制御ダイヤル	バーニア	バーニア	バーニア
	1次側ブレーカー	あり	あり	不明
	遠隔	なし	なし	あり
	遠隔警報	—	—	なし

No.	追加-1	追加-2	追加-3	
報告会社名	住友大阪セメント	住友大阪セメント	住友大阪セメント	
供給メーカー	日本防蝕工業	住友大阪セメント	住友大阪セメント	
工法名	チタンメッシュ チタンリボンメッシュ チタングリッド	チタンリボンRMV	エルグリッド	
外観	1次側電源	商用電源	ソーラー	商用電源
	表示灯	なし	なし	あり
	表示灯カバー	なし	なし	なし
	塗装	あり	あり	あり
内装	回路通電表示灯	あり	—	あり
	メータ	アナログ×2	アナログ×1	デジタル×1 (市販電源)
	通電方式	定電流	定電圧	定電流
	制御ダイヤル	バーニア	バーニア	バーニア
	1次側ブレーカー	あり	あり	あり
	遠隔	あり	—	—
	遠隔警報	あり	—	—

#### (1) 直流電源装置の制御方式について

直流電源装置の制御方式として、定電流方式、定電圧方式、および両方式の併用を採用しており、各工法や使用環境によって異なる。アンケート結果での両制御方式の特徴を下記に示す。

なお、遠隔監視システムでは、電位制御機能により防食電流を自動調整することも可能となる。

##### (定電流方式)

- ・環境条件に左右されず、一定の通電電流量が確保できる。
- ・定電圧方式に比べ、防食効果を確実に確保・維持できる。
- ・電流制御のために、高圧な電圧が長時間負荷された場合、工法によっては陽極等の破断の恐れがあるため、電圧リミッターを設置することが必要。

##### (定電圧方式)

- ・構造が比較的単純で壊れにくい。
- ・塩害環境の厳しい場所（屋外）の設置に適する。

##### (定電流/定電圧方式)

- ・構造が複雑
- ・通電環境に応じて細かな制御が可能。
- ・ソーラー電源を用いる場合、電源作製上有利であり、陽極への負担が少ない。

#### (2) 箱体外側のランプについて

受電ランプ、運転ランプにより作動状態が直接確認できるように設置されている場合が多く、いずれも正常時に点灯する。ソーラー電源方式の場合は、バッテリーランプが設置されており、この場合も正常時に点灯する。また、パトランプについては異常時に点灯して異常を知らせる。点灯色については、いずれのランプも工法によってまちまちであり、統一性はない。流電陽極方式の場合は、箱体へのランプ設置はされていない。

#### (3) 計器盤での計測項目および方法

計器盤で、電流値と電圧値が確認することができ、メーターが設置されている場合は、メーター表示でそのまま読み取れるが、メーターが設置されていない場合は、テスターで読み取る必要がある。また、鉄筋電位値についても同様である。また、ソーラー電源の場合は、バッテリー電圧についての計測が必要となる。

流電陽極方式についても、電流、鉄筋電位についての計測は同様に実施されている。

#### (4) 外部電源装置の外観

外部電源装置の外観を下記に示す。

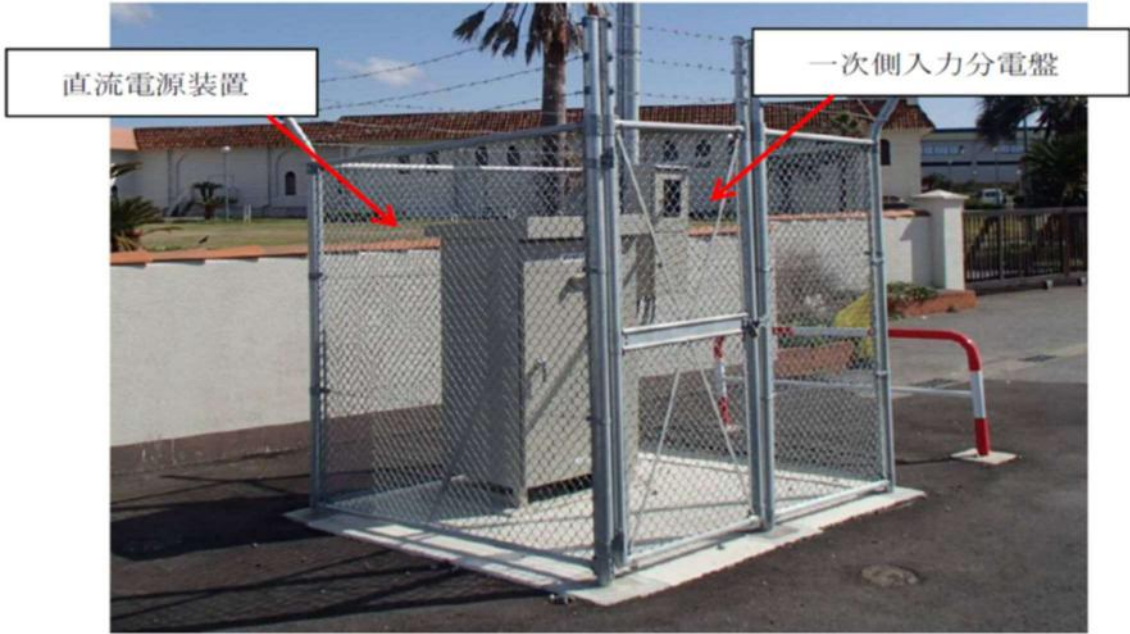


写真-3.3.17 TCユニット方式 (オリエンタル白石)



写真-3.3.18 貼付け型モール陽極方式（ショーボンド建設）





写真-3.3.19 チタンメッシュ方式 (住友大阪セメント)



写真-3.3.20 チタンロッド方式 (東興ジオテック)



写真-3.3.21 チタン溶射方式 (ナカボーテック)

直流電源装置 12回路分ユニット



定電流制御方式 直流電源装置



写真-3.3.22 チタンリボンメッシュ方式 (ナカボーテック)

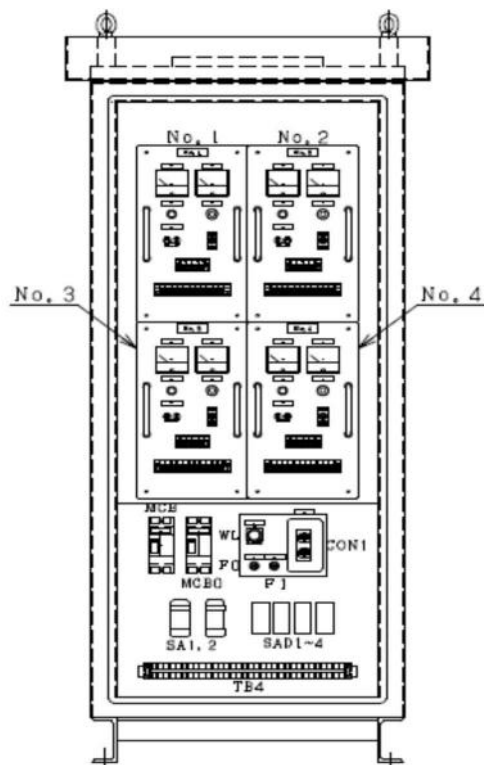


写真-3.3.23 チタントレイ方式 (日本防蝕工業)

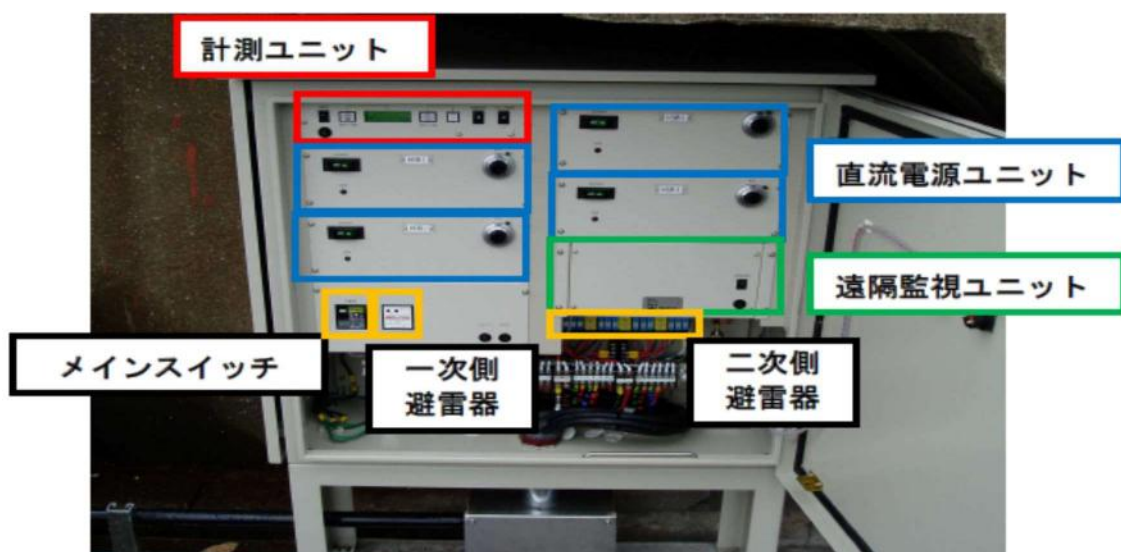
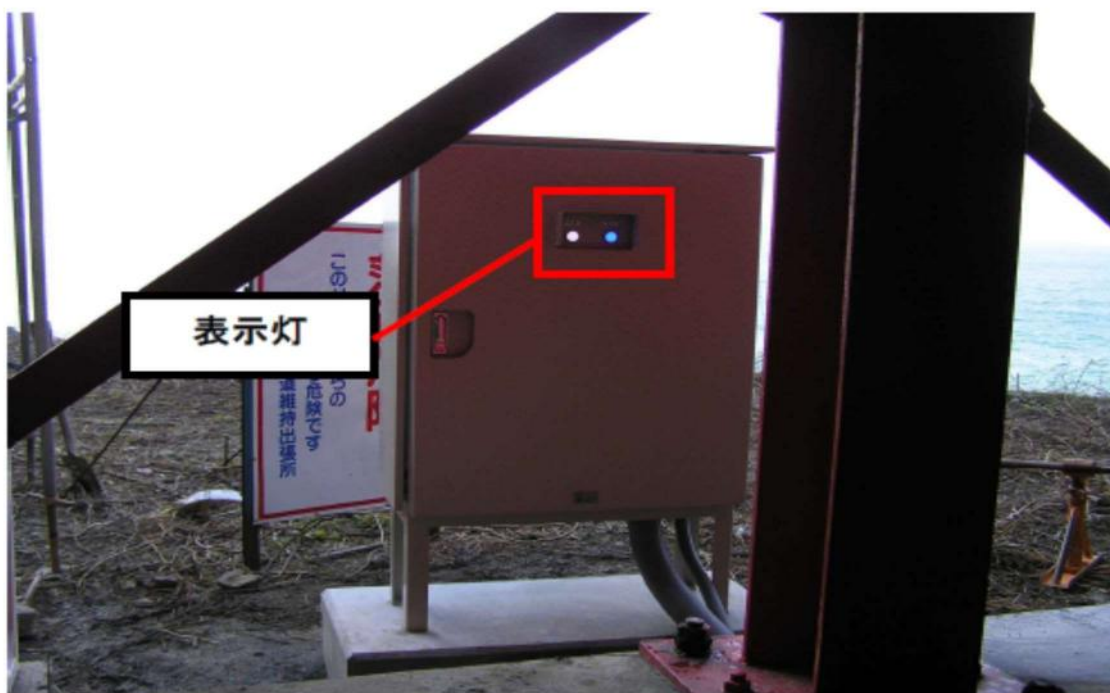


写真-3.3.24 チタングリッド方式 (ピーエス三菱)



写真-3.3.25 ECP パネル方式・桁端電気防食工法（三井住友建設）



写真-3.3.26 チタンメッシュ，チタンリボンメッシュ，チタングリッド方式（日本防蝕工業）





写真-3.3.27 チタンリボンRMV (住友大阪セメント)



写真-3.3.28 エルグリッド方式 (住友大阪セメント)



写真-3.3.29 流電陽極方式モニタリングボックス (ナカボーテック)

## 4. まとめ

### 4.1 はじめに

本章では、2.で示した電気防食の維持管理に関する管理者アンケートと、3.で示した専門家（電気防食メーカー）アンケート、等を踏まえ、電気防食の維持管理の現状と、必要とされる維持管理の内容を比較、検討することにより、課題や方向性についての整理や提案を行った。

### 4.2 電気防食における維持管理の実施状況

電気防食の維持管理に関する橋梁の管理者を対象としたアンケートでは、回答があった29橋梁のうち、電気防食の維持管理を実施していない橋梁は、実施の有無が不明な場合も含めて、10橋梁（34.5%）であった。また、電気防食適用後に不具合が発生した橋梁は、11橋梁（37.9%）であった。アンケート結果によると、維持管理を実施していない橋梁は、構造物や電気防食の不具合の有無も確認できていないことがわかる。また、維持管理を実施している橋梁の不具合の発生率は、概ね50%であった。

### 4.3 電気防食の維持管理内容に関する現状とその評価

電気防食の維持管理内容について、管理者アンケートから現状を把握するとともに、専門家アンケートにおいて必要とされる維持管理内容と比較することにより、現状の評価を行う。

#### 4.3.1 点検実施者

管理者アンケートによると、日常的な点検による電源装置の稼働状況や目視確認は、管理職員が実施する橋梁もあるが、その他の点検項目については、パトロール業務や点検業務の受託者が実施しており、施工業者が行う場合もあった。この現状は、専門家アンケートにおいて、日常的な点検の実施は管理者が、定期点検や詳細点検は、専門的知識を有する専門業者が、実施することが望ましいとする結果と、合致するものであった。

また、雷などの影響が考えられる場合の臨時点検において、管理者アンケートでは、管理者、パトロール業務受託者とも点検を行う回答があった。

#### 4.3.2 点検頻度

電源装置の稼働状況や目視確認、および配線・配管・プルボックスの目視確認などの日常的な点検の項目は、管理者アンケートにより得られた不具合の有無、および橋梁点検の判定結果を分析した結果、およそ1回/月以上の頻度で実施することが望ましいと考えられる。専門家アンケートでは1週～1ヶ月に1回程度が望ましいと回答されており、分析の結果と近い値である。

一方、管理者アンケートによる点検の実施頻度は、1ヶ月に1回の頻度で実施している橋梁は29橋中9橋程度であり、2/3以上の橋梁では点検間隔は1年に1回以下、または実施していないという結果であった。

既往のマニュアルにおいては、日常的な点検の項目の実施頻度は6ヶ月に1回程度となっており、望ましい頻度を踏まえつつ、管理者負担を勘案したような頻度となっている。

外部電源の電流量・電圧量、電気防食効果（鉄筋電位、復極量）などの定期点検や詳細点検で実施する項目については、管理者アンケートにより得られた不具合の有無、および橋梁点検の判定結果を分析した結果、1年～2年に1回程度の頻度で実施することが望ましいと考えられる。専門家アンケートでは1年～2年に1回程度が望ましいと回答されており、分析の結果と近い値である。

一方、管理者アンケートによる点検の実施頻度は、上記のような内容の点検が実施されていない橋梁も多い

ものの、実施している橋梁においては、2年に1回程度の頻度で実施されている橋梁が多かった。

アンケートの分析結果一覧を、表-4.3.1に示す。

なお、6編に示す電気防食の維持管理マニュアルでは、本編でのアンケート結果を踏まえ、「新設コンクリート橋の電気防食マニュアル（案）」を踏襲しつつ、目視点検に当たる内容の点検を1回以上/6か月、計測点検に当たる内容の点検を1回以上/1～3年で行うよう、記載した。

表-4.3.1 アンケート分析結果の総括

	橋梁定期点検の判定結果との相関	管理者へのアンケート調査	電気防食メーカーへのアンケート調査	新設コンクリート橋の電気防食マニュアル（案）における点検頻度
主に装置等の目視点検	1回/年以上行っている橋梁はAまたはB判定。	9橋程度の橋梁では、1回/月程度の頻度で実施。残りの橋梁は1回/年以下の頻度で実施	1回/週～1回/月	1回/6ヶ月
主に防食効果の計測点検	1/2回/年以上行っている橋梁は、全橋でAまたはB判定。	19橋中10橋程度の橋梁で実施されており、1/2回/年程度の頻度での実施が多い。	1回/1～2年	1回/2年

#### 4.3.3 点検項目

管理者アンケートでは、日常的な点検の項目として、主に電源装置の稼働状況と目視確認を実施し、配線・配管・プルボックスの目視確認を行う橋梁もあった。専門家アンケートにおいて専門家が望ましいと考える日常的な点検の項目は、主に電源装置の稼働状況と目視確認であるが、約半数の業者が陽極システムの目視確認を上げていた。また、配線、配管材の状態確認は、定期点検での項目とした業者もあった。

定期点検項目については、管理者アンケートでは、陽極システムの目視確認、外部電源の電流量・電圧量、電気防食効果（鉄筋電位、復極量）が上げられていた。専門家アンケートにおいて専門家が望ましいと考える定期点検の項目も概ね同様であり、全ての橋梁で満足しているわけではないが、概ね必要な点検項目は計画されているものと考えられる。

また、臨時点検を実施する場合は、主に雷などの影響を考慮しており、専門家との意見と一致する。

#### 4.3.4 遠隔システムについて

管理者アンケートでは、遠隔システムによる電気防食の維持管理を実施している橋梁はなかった。専門家アンケートにおいては、遠隔システムを導入することで、電源装置の稼働状況のみならず、電流量や電圧量、および復極量の管理も日常的な点検で可能となる可能性があるとしている。

#### 4.3.5 点検方法と点検結果の評価

管理者アンケートでは、点検方法と点検結果の評価についての回答は少なかったため、専門家アンケート結果や、電気防食における一般的な現状をもとに、主な点検項目の点検方法と点検結果の評価について以下に取りまとめた。

#### (1) 直流電源装置

直流電源装置の稼働の有無については、一般的に運転・受電ランプ（表示灯）や、パトランプの目視確認により行う。これらが無い場合は、電気メーター稼働状況等の目視確認による。また、箱体、装置内配線・端子の損傷、および避雷器の状態は目視で行い、損傷の程度に応じて対応する。通電電圧や電流は、設置されているメーターや、場合によってはテスターで計測し、その安定性や設定値との解離により評価する。

#### (2) 電気防食効果の確認

埋設照合電極や外付け照合電極による鉄筋電位の計測、鉄筋電位の ON-OFF 時の変化、および復極量の計測により、電気防食効果を確認する。鉄筋電位は、安定性の確保や、PC の場合の水素発生電位 (-1000mVvs.CSE) より貴な電位であることが必要となる。また、復極量は 100mV 以上で管理する。

#### (3) 陽極システムの状況確認

陽極システムの状況は、目視や打音調査によって確認する。各陽極システムによって確認の着目点や、不具合があった場合の対策が異なるため、各陽極システムの原理を理解した上で対応する必要がある。また、陽極電位の安定性により、状況を判断する場合もある。

#### (4) 配線・配管・プルボックスの状況確認

配線・配管・プルボックスの状況は、目視により確認する。損傷、劣化の程度に応じて、補修や交換を行う。

### 4.4 電気防食の維持管理方法における課題と方向性

管理者アンケート、専門業者アンケート、および電気防食の現状から、電気防食の維持管理方法における課題と方向性について検討した。

#### 4.4.1 電気防食における維持管理の認識の必要性和確実な実施

管理者アンケートによると、約 35% の橋梁で電気防食の維持管理がなされていない。維持管理の未実施は、電気防食の効果を損なうばかりでなく、構造物の劣化にも繋がる。電気防食の維持管理計画書の作成を確実にし、関係者に周知の上、維持管理の実施者を明確にすることが重要と考えられる。

#### 4.4.2 点検実施者、点検頻度、および点検項目と方法の明確化

電気防食の維持管理で最も重要なものとして点検が挙げられる。点検の確実な実施のためには、維持管理マニュアル等により点検要領を明確にしておく必要がある。

##### (1) 点検実施者

点検実施者として、日常的な点検は、日常の巡回時に目視にて実施するものであるため、管理者あるいは、パトロール業務の受託者が行うことが望ましい。定期点検は、維持管理計画に基づき定期的に行うものであり、点検項目として電位値や復極量を確認する必要があるため、専門的知識を有する管理者もしくは管理者が指名する専門業者が行うことが望ましい。また、詳細点検は、日常・定期点検の結果から異常が発見された場合に実施するものであるため、専門的知識を有する専門業者が行うことが望ましい。

## (2) 点検頻度

点検頻度は、日常的な点検では、最低1回/月を目安に、橋梁の点検パトロールに合わせて行うことが望ましい。しかし、実際には日常的な点検が行われていないケースもあるようである。そのため、管理者に日常の中で簡便に点検を行ってもらい仕組みづくりが重要であり、日常的な点検のやり方やポイントをまとめた資料とそれによる指導、またチェックリスト等が有効ではないかと考える。定期点検の頻度は、橋梁定期点検要領での5年に1回が効率的であるが、今回の管理者アンケートや専門家アンケート結果から、1～5年に1回と、その頻度を高める必要がある。これは電気防食が電気化学的な反応に期待する工法であり、電気の継続的供給が必要であるためと考えられる。また、災害発生時など、「何かあったら点検（臨時点検）をする」ことを周知徹底するのが重要と考える。

## (3) 点検項目と方法

標準的な点検項目と方法として、日常的な点検では、直流電源装置の稼働状況と損傷・劣化状況の目視確認を、定期点検では、計測による鉄筋電位や復極量測定による電気防食の効果確認と、陽極システムや配線・配管・プルボックスの損傷・劣化の目視確認を提案する。

### 4.4.3 点検結果の評価と対応について

#### (1) 直流電源装置

直流電源装置の稼働状況を目視確認するためには、箱体外面から簡易に確認できるように表示灯を設置することが必要である。現状では、この表示灯の有無、表示灯の色、種類および点灯状況が標準化されていない。これらを標準化することで直流電源装置稼働状況の点検が容易になると考えられる。また、直流電源装置を構成する部品および部材には箱体、配線、端子および避雷器等が存在する。これらの損傷、劣化および腐食を目視で評価するためには写真見本等を作成し、判断を容易にする必要がある。

また、通電電流および電圧計測の際の異常値および数値の安定度合に明確な評価基準が記載されていない。これらの基準を明確化する必要がある。

#### (2) 電気防食効果

鉄筋電位計測においては、埋込み型照合電極で測定する場合、直流電源装置内に鉄筋電位を計測するためのモニタリング端子の設置を標準とする必要がある。このとき、モニタリング端子には結線間違いによる誤計測を防ぐため、配線接続先を明記することが重要である。また、上述の通電電流および電位計測と同様に異常値および数値の安定度合の基準を明確化する必要がある。外付け照合電極を用いて鉄筋電位を計測する場合、計測位置周辺のプルボックスより鉄筋の接点を取り出す必要がある。このため、プルボックス内の配線は容易に取り出せ、配線接続先を明記することが重要である。

復極量を計測する場合、現状では復極量を計測するための時間、および乾湿繰り返しによりコンクリートの湿潤状況が変化する干満帯部での防食基準が標準化されていない。そのため、これらを標準化する必要がある。

#### (3) 陽極システムの状況確認

電気防食は様々な陽極システムが存在するため、それぞれ劣化形態が異なる。そのため、各方式の陽極システムを点検する際の着眼点を整理し、陽極の劣化を定義する必要がある。この場合、取り換えおよび補修の可否を判定するための基準も必要と考えられる。また、陽極が正常に機能しているかを調べるため陽極電位を計

測する場合がある。このとき、鉄筋電位の計測と同様にモニタリング端子の設置、配線接続先の明記、および異常値や数値の安定度合の基準を標準化する必要がある。

#### (4) 配線・配管・プルボックスの状況確認

配線・配管材の劣化は通電に大きな影響を及ぼす。このため、点検の際は配線・配管材の目視確認を標準化する必要がある。また、この場合、取り換えおよび補修の可否を判定するための基準も必要と考えられる。

### 4.4.4 外部電源装置の仕様について

外部電源装置は、日常的な点検で最も点検頻度が多く、その仕様が点検の容易さや点検結果に大きな影響を及ぼす。全ての電気防食の専門業者で仕様を統一することは難しいが、今後の統一への一助として、現状について紹介する。

#### (1) 直流電源装置の設置について

直流電源装置は、外部電源方式において防食電流を流す直流電源装置、および照合電極による鋼材電位のモニタリング装置を含む設備であり、最近ではこれらの装置に通信回線による遠隔監視制御システムが付加されたものもある。電源装置の設置は塩害環境の厳しい場所に設置する場合もあるため、実績に基づいた信頼性および耐久性を有するものとし、海岸線に設置する場合は海水飛沫が当たらないよう配慮する必要がある。

外部電源方式は商用の交流電流を直流に変換して防食電流を流す方式が一般的である。設置までの一般的な概略手順を以下に示す。

- ① 防食対象付近において直流電源装置設置位置を決定する
- ② 受電する電気の種類を確認し、必要電力量を満足する受電契約を行う
- ③ 受電ポール、引込計器盤（積算電力計）を設置する（一般的に電気需要家が用意）
- ④ 直流電源装置を設置する。（配線配管含む）
- ⑤ 接地工事を行う。
- ⑥ 必要に応じて基礎コンクリート、フェンスを施工。

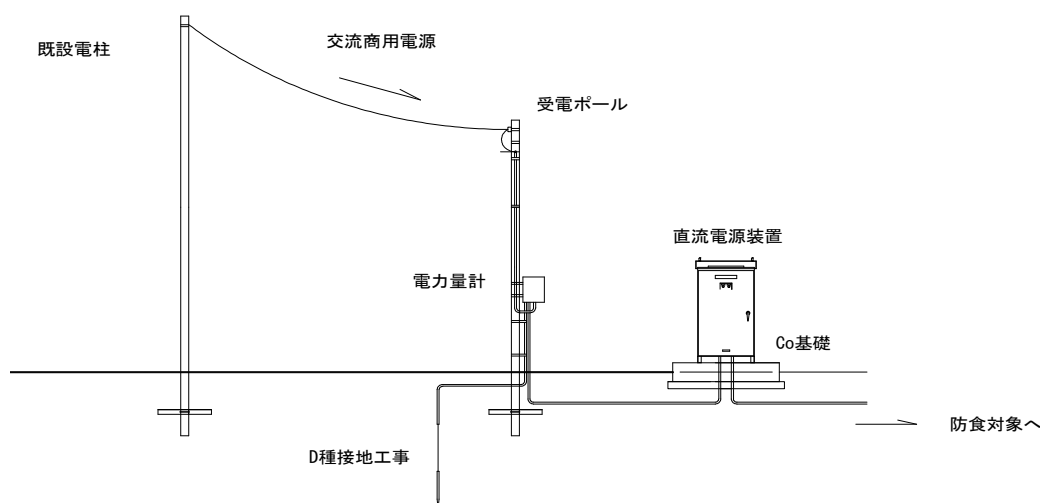


図-4.4.1 直流電源装置の設置例



## (2) 直流電源装置の制御方式

直流電源装置は制御方式により定電流方式、定電圧方式、定電位方式に分類される。このうち、定電流方式および定電圧方式は適用されている事例が多いが、定電位方式の実績は少ないようである。



写真-4.4.1 【定電流方式】（遠隔監視システム付加）



写真-4.4.2 【定電圧方式】（タップ方式）



写真-4.4.3 定電流定電圧切替方式

## (3) 標準化のための検討事項

### 1) 受電および運転表示ランプ

主に施設管理者が受電／運転状況を簡易に確認するため、扉前面の見やすい箇所にランプが設置されている場合もあるが、特に基準がないためメーカー仕様によってはランプがないものもある。また、ランプの大きさ、色、フードの装着等も特に基準がないため、ある程度の統一化、標準化が望まれる。



写真-4.4.4 受電および運転表示ランプ（その1）



(フードなし/ランプ白・赤)



(フードなし/ランプ緑・赤)

写真-4.4.5 受電および運転表示ランプ (その2)

## 2) 計器盤の仕様

直流電源装置内には一般的に電流計および電圧計が設置されており、最近の装置では鉄筋電位値を示す装置もある。これらの計器盤にはアナログ式またはデジタル式があり、メーカー仕様により相違があるのが現状である。



アナログ式 (電流計・電圧計)



デジタル式 (電流計・電圧計)

写真-4.4.6 計器盤

## (4) 設置位置について (塩害環境への対応例)

直流電源装置は厳しい塩害環境に設置する場合もあり、設置場所に応じた劣化防止対策が重要となる。



(箱体腐食)



(計器盤)

写真-4.4.7 塩害環境での劣化



写真-4.4.8 専用波避けシートによる設置例



写真-4.4.9 海岸沿い高所への設置例

(5) 設置位置について (落雷地域への対応例)

落雷地域に直流電源装置を設置する場合、落雷により一次側 (商用電源側) および二次側 (防食対象側) から雷サージが侵入し直流電源装置が被害を受ける場合があるため、対策としてサージアブソーバーを一次側および二次側に設置することが有効的である。



写真-4.4.10 落雷による損傷例



写真-4.4.11 サージアブソーバーの増強

(6) 設置位置について (寒冷地域への対応例)

寒冷地に直流電源装置を設置する場合、湿気や結露等から内部回路を保護するためにスペースヒーターを設置する事例がある。また、積雪が多い場合においては設置位置の積雪量を考慮したうえ、基礎コンクリート等により嵩上げすることが有効的である。



写真-4.4.12 積雪地域での設置位置

#### 4.5 遠隔監視システムについて

遠隔監視システムを利用した場合は、下記に示すメリットがあるが、現地での目視点検が必要な事項については、通常システム同様に現地で実施する必要がある。

- 現地に赴いてメーターや計測器を用いて測定しなければならない点検項目を、現地に赴くことなく、簡単に、高頻度で測定できる。
- 電氣的な不具合や異常を早期に検出できる。
- 詳細な測定データを利用することで、傾向の把握やトラブル発生時の原因推定などの高度な維持管理を行える。
- 最も高頻度で点検を必要とする項目が、遠隔監視システムで点検可能な場合には、現地点検の頻度を下げることができる。

これらのメリットを踏まえ、遠隔監視システムを用いた場合の維持管理の例を表-4.5.1に示す。

表-4.5.1 電気防食の維持管理における比較表（遠隔監視システムの有無）

目的	No.	点検項目	遠隔監視システムの有無					
			無			有		
			点検方法	点検の種類および頻度 ※1			点検方法	点検の種類および頻度 ※2
日常	定期	詳細						
直流電源装置 の状態確認	①	装置の稼働状態の確認	目視	1回/週～1回/月	1回/年～1回/2年	1回/5年	遠隔監視システム	(1回/日程度)
	②	箱体の損傷・発錆	目視	1回/週～1回/月	1回/年～1回/2年	1回/5年	目視	遠隔監視システムなしと同程度または低頻度
	③	装置内の配線および端子	目視	-	1回/年～1回/2年	1回/5年	目視	遠隔監視システムなしと同程度または低頻度
	④	通電電流、電圧	メーター、計測器	-	1回/年～1回/2年	1回/5年	遠隔監視システム	(1回/日程度)
	⑤	避雷器	目視	-	1回/年～1回/2年	1回/5年	目視	遠隔監視システムなしと同程度または低頻度
防食効果確認	⑥	鉄筋電位(埋設照合電極)	メーター、計測器	-	1回/年～1回/2年	1回/5年	遠隔監視システム	(1回/日程度)
	⑦	鉄筋電位(外付照合電極)	計測器	-	-	1回/5年	メーター、計測器	遠隔監視システムなしと同程度または低頻度
	⑧	復極量	計測器	-	1回/年～1回/2年	1回/5年	遠隔監視システム	(1回/日程度)
陽極システムの状態確認	⑨	陽極システムの変状の有無	目視、打検等	-	1回/年～1回/2年	1回/5年	目視、打検等	遠隔監視システムなしと同程度または低頻度
	⑩	陽極電位	計測器	-	-	1回/5年	計測器	遠隔監視システムなしと同程度または低頻度
防食対象の状態確認	⑪	防食対象表面	目視、打検等	-	1回/年～1回/2年	1回/5年	目視、打検等	遠隔監視システムなしと同程度または低頻度
配線・配管材	⑫	配線、配管、ボックスの損傷	目視	-	1回/年～1回/2年	1回/5年	目視	遠隔監視システムなしと同程度または低頻度

※1 専門家アンケートの多数派意見を記載

※2 遠隔監視システムの標準的な頻度を記載(※なお、遠隔監視システムの詳細や付帯機能は各社で異なる)

#### 4.6 流電陽極方式の電気防食について

電気防食は、外部から電流を供給する外部電源方式と、金属間のイオン化傾向の違いを利用して電流を供給する流電陽極方式の2種類がある。前者は、外部電源装置から電流を供給するため、電流量を制御可能であるが、流電陽極方式では、電流を制御することが出来ないが、モニタリングボックスの目視確認、電気防食効果の確認、および陽極システムの状況確認は点検する必要がある。

流電陽極方式においても、発生電流値の異常値や数値の安定度合、およびこれを計測するモニタリングボックスが損傷した場合の交換要否の基準を標準化する必要がある。

#### 4.7 記録について

橋梁に適用した電気防食工法を長期間、有効に適用するための維持管理を行うためには、定期的な点検の実施と結果の確認が必要であり、そのために点検結果を適切な方法で記録することが重要である。

構造物は、長期間にわたり供用されるため、電気防食工法の維持管理においても、維持管理組織の変更や担当者の交代等を考慮する必要がある、すなわち、電気防食工法の維持管理で重要となる点検記録を継続実施するためには、簡易で一定の方法で記述されることが重要である。このためには、あらかじめ点検項目や方法、および結果と評価の記述方法を定めた点検記録表を作成し、それに記述することが望ましい。また、点検は定期的に長期間実施されるため、そのデータの整理や取り扱いが容易となるように、書面とともに電子データで保存することが必要である。

#### 4.8 新工法の開発について

電気防食工法は通電し続けることで、その効果を発揮するため、特に外部電源方式の維持管理においては、停電などによる電気供給に対する維持管理リスクが課題である。この維持管理リスクに関しては、管理者へのアンケート調査においてもリスク回避が強く望まれている。そこで、これらの管理者ニーズ（維持管理リスクの回避）に対し、点検行為以外の方策として、商用電源の確保が不要となり、停電の影響を受けない太陽光発電（自然エネルギー）などの新たな工法の開発が望まれている。

### 3 編/付録-1 管理者へのアンケート調査票

次項より、管理者へのアンケートを行った際の調査票を示す。

電気防食工法を用いた道路橋の維持管理に関する調査票

名前： \_\_\_\_\_ 所属： \_\_\_\_\_  
 TEL： \_\_\_\_\_ FAX： \_\_\_\_\_ e-mail： \_\_\_\_\_

A. 橋梁に関する基本的項目

橋梁名称	(漢字)	(カナ)
橋梁の所在地 (緯度経度は起点側)	路線名；	住所；
	緯度；	経度；
橋梁の管理者		
橋梁の竣工年度	西暦	年 月
適用示方書（建設時）	道路橋示方書 年（ 年）	
海岸線からの距離	約 m	
凍結防止剤散布	散布の有無； 1. あり（2011年度 kg/km/年、2012年度 kg/km/年、2013年度 kg/km/年）	
	2. なし	
橋梁の利用状況 (交通センサス参照)	交通制限； 1. あり（ ）， 2. なし	
	交通量； 台/日， 内大型車交通量； 台/日（参照センサス 年/ 年 月）	
橋梁の構造形式	橋の種類； 1. P C橋， 2. R C橋， 3. 鋼橋， 4. その他（ ）	
	桁形式； 1. 床版橋， 2. 桁橋， 3. 箱桁橋， 4. 鈹桁橋， 5. その他（ ）	
	径間数； 径間	橋長； m 全幅員； m 橋台・橋脚高さ；最少 m（現地盤、H.W.Lから）
橋梁位置図 橋梁一般図		



**B. 補修（電気防食）に関する項目**

電気防食適用前の補修 有無		あり（補修年度 年度、 年度、 年度） ・ なし ・ 不明					
補修工法（補修年度は西暦）		（ 年度）, （ 年度）					
電気防食採用の理由		1. LCC1, 2. LCC2, 3. 長寿命化対策1, 4. 長寿命対策2, 5. 電気防食の再劣化 6. その他（記載下さい）, 7. 不明					
適用した電気防食	電気防食の施工年度	年度	年度	年度	年度	年度	合計
	適用した電気防食の方式						
	径間数	径間	径間	径間	径間	径間	
	面積	m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	
	回路数	回路	回路	回路	回路	回路	
	全体工事費	万円	万円	万円	万円	万円	
	補修工種						—
	電気防食適用部位						—
電気防食適用後の想定供用年数		年、 不明					
電気防食適用前の劣化調査		調査報告書 あり ・ なし					
報告書あり （ 年度）		主たる劣化要因 : 1. 塩害 2. 中性化 3. ASR 4. 凍害 5. 化学的浸食 . その他 ( ) ひび割れ <sup>※1</sup> : あり ・ なし ・ 不明 ※1 はく離・はく落 <sup>※1</sup> : あり ・ なし ・ 不明 主たる劣化要因に起因するもの <結果の代表値：全塩化物イオン量, 中性化深さなど>					
報告書が複数ある場合は、適当なものを選択し、年度を記載		全塩化物イオン量 kg/m <sup>3</sup> （測定位置： 桁 コンクリート表面から mm, かぶり mm） 全塩化物イオン量 kg/m <sup>3</sup> （測定位置： 桁 コンクリート表面から mm, かぶり mm）					
電気防食設計・竣工図書		あり（存在する資料）, なし					

**C. 電気防食の維持管理に関する項目**

点検の有無	点検有無； 1. 行っている, 2. 行っていない, 3. 不明 「行っている」を選択した場合は下記も記入ください。						
点検の主な手法	手法； 1. 現地点検, 2. 遠隔管理, 3. 現地と遠隔の併用						
点検の実施状況 実施者 (現地測定項目のみ, 遠隔管理項目は含まない)	点検項目	頻度	実施者		点検項目	頻度	実施者
点検記録の保管状況	保管状況； 1. あり, 2. なし, 3. 不明						
橋梁の定期点検結果等 (電気防食を適用した部分)	定期点検年月； (西暦) 年 月						
	対策区分； 1. A, 2. B, 3. C, 4. E1, 5. E2, 6. M, 7. S, 8. その他 ( ) , 9. 不明						
適用後の不具合の有無 (メンテナンスも含む)	不具合； 1. あり, 2. なし, 3. 不明 「あり」を選択した場合は下記も記入ください。 1. コンクリート1, 2. コンクリート2, 3. 電源装置, 4. モニタリング装置, 5. 陽極システム 6. 配線配管, 7. その他 ( )						
維持管理・点検に係る費用	1. 0~50万円/年 2. 50~100万円/年 3. 100~300万円/年 4. 300~500万円/年 5. 500万円/年以上 6. 不明						

**D. 意見およびその他資料**

電気防食の維持管理に関する 気付き点 (要望等)	維持管理以外のことでも結構です。電気防食に関するご意見やお考えがあれば記載頂くと今後の資料となります。
現在の状況 (現在の状況に関する写真等)	

外観の状況などが分かるような写真, あるいは, 何かしらの不具合などが生じた時の写真など

### 3 編/付録-2 電気防食メーカーへのアンケート調査票

次項より、電気防食メーカーへのアンケートを行った際の様式を示す。

記入日：平成 年 月 日

共同研究「電気防食工法を用いた道路橋の維持管理手法に関する研究」における  
電気防食システムの維持管理に関する調査票

電気防食システムの維持管理に関するアンケート回答のお願い

大変お手数かと思いますが、以下のアンケートにご回答いただきますよう、お願い申し上げます。

本アンケートの目的は、電気防食工法の維持管理標準およびシステム標準を提案するための情報を得ることであり、回答社の皆様が望ましいと考えるコンクリート中鉄筋やPC鋼材に対する電気防食システムの維持管理および電気防食用直流電源装置に関してご回答を頂きたく、お願いいたします。

アンケート記載時の留意点

- ①アンケート中の問1および問2は、電気防食工法ごとにお答え下さい。複数の場合は適宜ページ数を増やして複数ご回答下さい。
- ②ご回答を選択する問いについては、別表1から3から番号を選択してご回答下さい。
- ③問2.3において、適用構造物の条件によりご回答が異なる場合は、適宜ページ数を増やして複数ご回答下さい。

問1 回答者情報

本調査票回答者の情報を表1の空欄に記載してください。

表1 回答者情報

氏名		所属	
住所	〒		
連絡先	TEL :	E-mail :	
工法名	番号 :  ※別表1参照（電気防食工法を保有されない場合は、この欄に「保有なし」とご記載いただき、これ以降、記載をせず、ご返却願います）		

## 問 2 電気防食システム点検に関する質問

以下の問 2.1～2.4 の質問についてご回答ください。

### 問 2.1 点検実施者に関する質問

回答社が望ましいと考える日常点検、定期点検および詳細点検の、**現地で実際に実施する者**に関して、表 2 の当てはまる番号に○印をつけてください。なお、「管理者以外」の場合は () 内のいずれかに○印を、「その他」を選択した場合は具体的に記入してください。

表 2 現地で実際に実施する者

点検の種類	実施者
日常	1. 管理者 / 2. 管理者以外 ( 元請け/ 専業者/ コンサルタント ) / 3. その他 ( ) / 4. なし
定期	1. 管理者 / 2. 管理者以外 ( 元請け/ 専業者/ コンサルタント ) / 3. その他 ( ) / 4. なし
詳細	1. 管理者 / 2. 管理者以外 ( 元請け/ 専業者/ コンサルタント ) / 3. その他 ( ) / 4. なし

#### ※用語の定義

日常点検：日常の巡回時に目視にて実施するもの

定期点検：維持管理計画に基づき定期的実施するもの

詳細点検：日常・定期点検の結果から異常が発見された場合に実施するもの

問 2.2 点検内容に関する質問

回答社が望ましいと考える日常点検、定期点検および詳細点検の点検頻度や方法に関して、表 4 および表 5 に記載してください。なお、回答にあたって想定する対象構造物の条件は、表 3 とします。

表 4 および表 5 に追加したい点検項目がありましたら、項目番号⑬以降に記入してください。点検頻度は別表 2、点検方法は別表 3 の一覧表から番号を選択して記載してください。表 5 には、各点検項目の判定基準および点検結果が判定基準を満たしていない場合の対応を回答できる範囲で記載してください。

なお、適用構造物の条件により、表 4、表 5 のご回答が異なる場合は、pp.6～pp.8 の表 3 (追加分) ～表 5 (追加分) を適宜追加していただき、複数ご回答下さい。

表 3 想定する適用構造物の条件

適用対象	①. 橋梁 / 2. 栈橋 / 3. その他 ( )
構造方式	①. RC 橋 / 2. PC 橋 / 3. その他 ( )
適用部位	1. 床板 / ②. 桁 / 3. 橋脚 / 4. その他 ( )
供用状況	1. 新設 / ②. 供用中
水がかり	①. なし / 2. あり (雨水) / 3. あり (海水) / 4. あり (雨水と海水)
劣化状態	1. 潜伏期 / ②. 進展期 / ③. 加速期(前期) / 4. 加速期(後期) / 5. 劣化期
補修履歴	1. あり ( 回) / ②. なし / 3. 不明
補修工法 ※上記「あり」の場合	1. 断面修復 / 2. 表面被覆 / 3. ひび割れ補修 / 4. その他 ( ) / 5. 不明 ※複数回答可
遠隔監視・制御装置の有無	1. 監視のみ / 2. 監視と制御 / ③. なし

表 4 点検項目表

目的	項目 番号	点検項目	点検頻度			点検方法		
			※別表 2 参照			※別表 3 参照、複数回答可		
			日常	定期	詳細	日常	定期	詳細
直流電源装置 の状態確認	①	装置の稼働状態の確認 (ランプの確認)						
	②	箱体の損傷、発錆の確認						
	③	装置内配線および端子の 損傷、発錆の確認						
	④	通電電流、電源電圧						
	⑤	避雷器の状態確認						
防食効果確認	⑥	鉄筋電位値 (埋設照合電極)						
	⑦	鉄筋電位値 (外付け照合電極)						
	⑧	復極量						
陽極システム の状態確認	⑨	陽極システム変状の有無						
	⑩	陽極電位値						
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、錆汁の有無						
配線配管材の 状態確認	⑫	配線、配管、ボックスの 損傷の確認						
追加したい 点検項目	⑬							
	⑭							
	⑮							
	⑯							

表 5 点検項目の評価基準

項目 番号	点検内容と判定基準 ※可能であれば基準元の記載（土木学会 CL107 や自社基準など）	判定が不合格の 場合の対応
①		
②		
③		
④		
⑤		
⑥		
⑦		
⑧		
⑨		
⑩		
⑪		
⑫		
⑬		
⑭		
⑮		
⑯		



問 2.3 適用構造物の条件が異なる場合の維持管理方法

適用構造物の条件が表 3 と異なった場合に、点検方法、頻度、および評価方法が違う場合は、表 3～5 を追加してご回答下さい。いくつ追加していただいても構いません。

表 3 (追加分) 想定する適用構造物の条件

適用対象	1. 橋梁 / 2. 栈橋 / 3. その他 ( )
構造方式	1. RC 橋 / 2. PC 橋 / 3. その他 ( )
適用部位	1. 床板 / 2. 桁 / 3. 橋脚 / 4. その他 ( )
供用状況	1.新設                      2.供用中
水がかり	1.なし    2.あり (雨水)    3.あり (海水)    4.あり (雨水と海水)
劣化状態	1.潜伏期    2.進展期    3.加速期(前期)    4.加速期(後期)    5.劣化期
補修履歴	1. あり ( 回) / 2. なし / 3. 不明
補修工法 ※上記「あり」の場合	1. 断面修復 / 2. 表面被覆 / 3. ひび割れ補修 / 4. その他 ( ) / 5. 不明    ※複数回答可
遠隔監視・制御装置の有無	1. 監視のみ / 2. 監視と制御 / 3. なし

表 4 (追加分) 点検項目表

目的	項目番号	点検項目	点検頻度 ※別表 2 参照			点検方法 ※別表 3 参照、複数回答可		
			日常	定期	詳細	日常	定期	詳細
直流電源装置 の状態確認	①	装置の稼働状態の確認 (ランプの確認)						
	②	箱体の損傷、発錆の確認						
	③	装置内配線および端子の 損傷、発錆の確認						
	④	通電電流、電源電圧						
	⑤	避雷器の状態確認						
防食効果確認	⑥	鉄筋電位値 (埋設照合電極)						
	⑦	鉄筋電位値 (外付け照合電極)						
	⑧	復極量						
陽極システム の状態確認	⑨	陽極システム変状の有無						
	⑩	陽極電位値						
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、錆汁の有無						
配線配管材の 状態確認	⑫	配線、配管、ボックスの 損傷の確認						
追加したい 点検項目	⑬							
	⑭							
	⑮							
	⑯							

表 5 (追加分) 点検項目の評価基準

項目 番号	点検内容と判定基準 ※可能であれば基準元の記載 (土木学会 CL107 や自社基準など)	判定が不合格の 場合の対応
①		
②		
③		
④		
⑤		
⑥		
⑦		
⑧		
⑨		
⑩		
⑪		
⑫		
⑬		
⑭		
⑮		
⑯		

問 2.4 新しい点検手法・技術に関する質問

電気防食システムの点検に関する新たな手法および技術がありましたら、その方法や写真を記載してください。新しい遠隔監視・制御装置などもありましたらご紹介下さい。

○点検方法
○写真

問 3 直流電源装置に関する質問

電気防食における直流電源装置を自社で製作しているものを使用している場合、装置の標準について以下の項目にご回答ください。

問 3.1 直流電源装置の制御方法について

直流電源装置の制御方法について、表 6 にご回答ください。

表 6 直流電源装置の制御方法について

制御方式	当てはまるものに○印を記入して下さい。 1. 定電流方式 2. 定電圧方式 3. その他
理由等	(上記制御方式としている理由、および3.その他の場合の詳細を可能な範囲で記入して下さい)

問 3.2 箱体外側のランプについて

箱体外側にランプが取り付けられている場合、そのランプの種類を表 7 にご回答ください。また、ランプが点灯する条件を記入してください。

表 7 箱体外側のランプについて

○箱体外側のランプの種類 (当てはまるものに○印、その他の場合は()内に記入してください)			
受電ランプ / 運転ランプ / その他( )			
○ランプが点灯する条件および色 (当てはまるものに○印、その他の場合は空欄に追加してください)			
受電ランプ	正常	/	異常発生 色:
運転ランプ	正常	/	異常発生 色:
	正常	/	異常発生 色:
	正常	/	異常発生 色:

問 3.3 計器盤での計測項目および方法

直流電源装置内での計測盤を用いて計測できる項目およびその計測方法について表 8 にご回答ください。

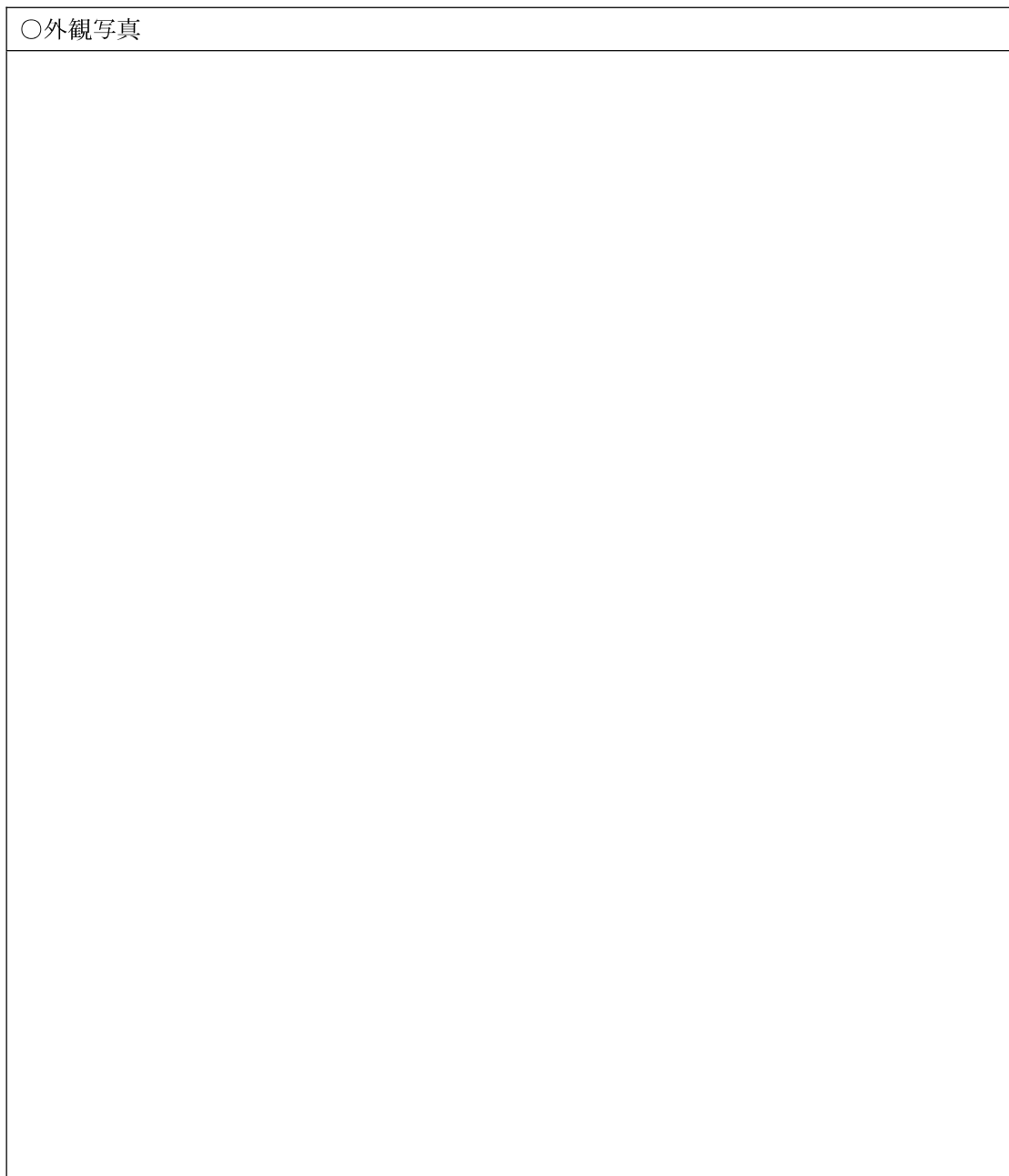
表 8 計器盤での計測項目および方法

○計測盤で計測できる項目 (当てはまるものに○印、その他の場合は()内に記入してください) ※複数回答可	
電流値 / 電圧値 / 鉄筋電位値 / その他( )	
○上記の計測方法 (当てはまるものに○印、その他の場合は空欄に追加してください) ※複数回答可	
電流値	メーター表示読み取り / テスターで計測
電圧値	メーター表示読み取り / テスターで計測
鉄筋電位値	メーター表示読み取り / テスターで計測

問 3.4 直流電源装置の外観

直流電源装置の箱体および箱体内部の様子がわかるような写真や図面がございましたら添付して下さい。

○外観写真



《別紙》 選択項目表

別表1 電気防食の工法名一覧 ※CAESAR 報告書より抜粋

番号	電気防食の工法名
1	チタンメッシュ陽極方式
2	パネル陽極方式
3	導電性塗料方式 (エマコ CP30 アノード方式)
4	導電性塗料方式 (キャプロンコート方式)
5	チタン溶射方式
6	導電性モルタル方式
7	チタンリボンメッシュ方式
8	チタングリッド方式
9	PI-Slit 方式
10	チタントレイ方式
11	ニッケル被覆炭素繊維方式
12	チタンロッド方式
13	亜鉛シート方式
14	亜鉛・アルミ擬合金溶射方式
15	ALAPANEL 方式
16	その他
	16.その他を選んだ場合は、方式を明記ください。
17	不明

別表2 点検頻度の一覧

※CAESAR 報告書より抜粋

番号	点検の頻度
1	毎日
2	1回／週程度
3	1回／月程度
4	1回／3ヶ月程度
5	1回／半年程度
6	1回／年程度
7	1回／2年程度
8	1回／5年程度
9	その他 (頻度を記載願います)

別表3 点検方法の一覧

番号	点検方法
1	現場での目視確認
2	直流電源装置内メーターの確認
3	計測機器での測定
4	遠隔装置での監視および測定



## 4 編 供用中の橋梁の調査

### 1. はじめに

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剥離などの変状が生じている事例が報告されている。

そこで、電気防食工法を適用している直轄橋梁 58 橋に対して実施した調査票の回答から、6 橋について現地で概略調査を行い、その結果から構造物の変状や電気防食システムの不具合、施工後の維持管理状況などを考慮して 3 橋を選定し詳細調査を実施した。調査対象橋梁一覧を表-1.1.1 に示す。

更に、電気防食の適用から約 20 年が経過した B 橋において、変状が確認された陽極被覆モルタル周囲での防食効果の確認、耐用年数を経過した流電陽極方式防食板の消耗量調査、計測不良が報告された照合電極の調査等を追加調査として行い、同様な事象が起きた場合に有用となる知見が得られた。

調査は足場または高所作業車により近接し、その近傍での表面電位分布や分配電流などの測定により電気防食の効果を評価するとともに、直流電源装置や配管材など付帯設備の確認、また、通電方式や陽極設置方式に応じた調査を行い、今後の維持管理に向けて具体的な方策となるような知見が得られた。

表-1.1.1 調査橋梁一覧

対象	電気防食方式	概略調査	詳細調査	追加調査	電気防食適用 括弧内は概略調査時の経過年数
A 橋（東北）	チタンロッド <sup>®</sup>	○	○	—	適用 1999 年（15 年）
X 橋（東北）	チタングリッド <sup>®</sup>	○	—	—	適用 1996 年（18 年）
Y 橋（北陸）	チタンリボンメッシュ・チタングリッド <sup>®</sup> チタンロッド <sup>®</sup> ・チタン溶射	○	—	—	適用 2000 年（14 年） ※新設時より適用
B 橋（北陸）	チタンメッシュ・チタングリッド <sup>®</sup> 流電陽極（亜鉛）	○	○	○	適用 1996 年（18 年）
C 橋（九州）	チタンリボンメッシュ縦置き	○	○	—	適用 2005 年（9 年）
Z 橋（沖縄）	チタン溶射・チタングリッド <sup>®</sup> チタンロッド <sup>®</sup> ・チタンリボンメッシュ・ チタンメッシュ	○	—	—	適用 2002 年（12 年） ※新設時より適用

○：調査実施

#### ※付録資料

- ・付録-1 概略調査報告書（6 橋）
- ・付録-2 詳細調査報告書（A 橋）
- ・付録-3 詳細調査報告書（B 橋）
- ・付録-4 詳細調査報告書（C 橋）
- ・付録-5 追加調査報告書（B 橋）

## 2. 調査内容

本研究は、電気防食工法を適用したコンクリート構造物における施工後の変状や電気防食装置の維持管理について調査を行い、今後の維持管理マニュアル作成の資料を収集することを目的とするものである。

概略調査～維持管理マニュアルまでの基本的なフローを図-2.1.1に示す。

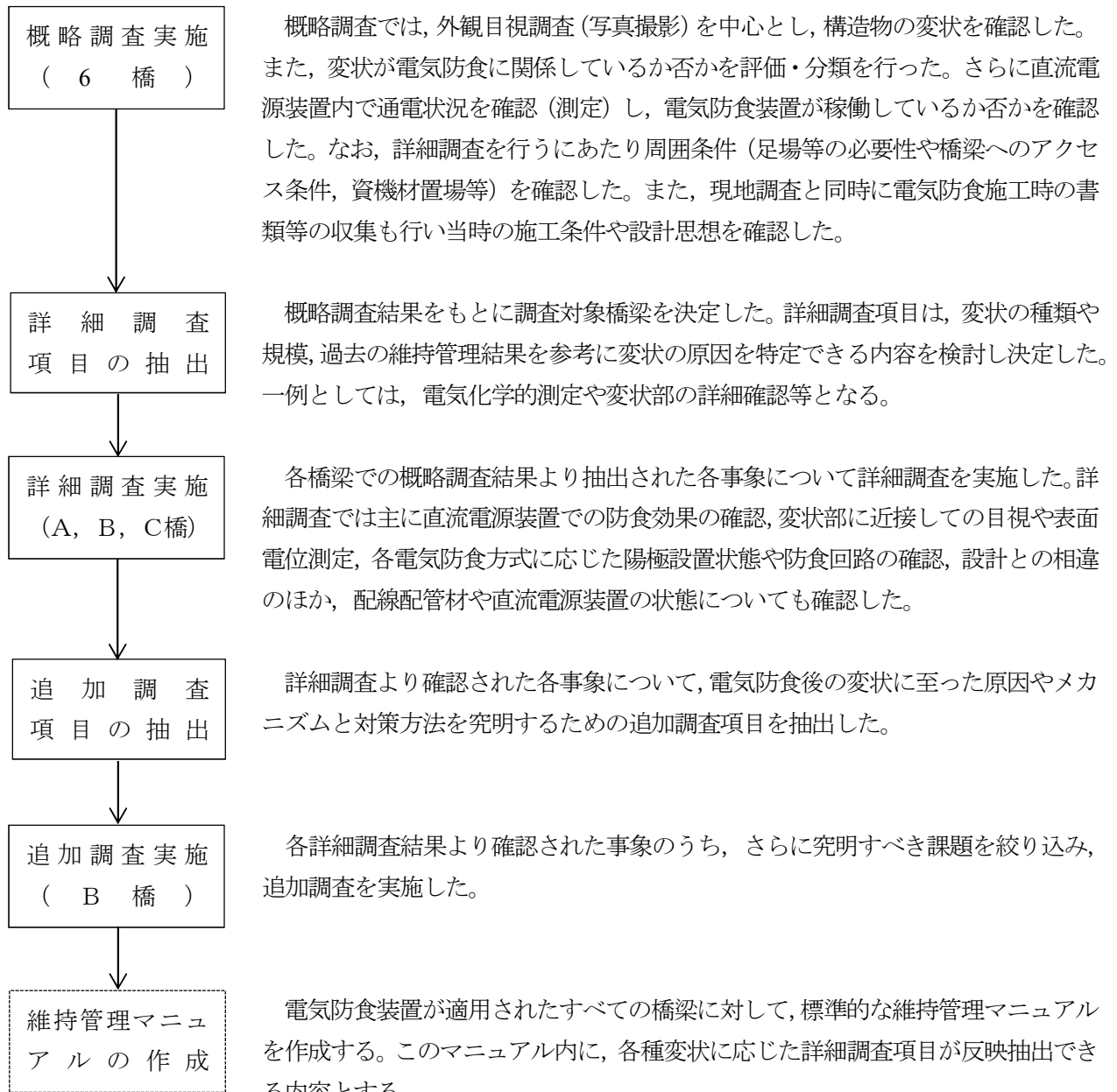


図-2.1.1 維持管理マニュアル作成までの実橋調査の流れ

### 3. 概略調査（6橋）

#### 3.1 概略調査対象橋梁

電気防食工法を適用している58橋に実施した調査票の回答から、6橋について現地で概略調査を行った。

表-3.1.1 概略調査対象橋梁

A橋（東北地方）	X橋（東北地方）	Y橋（北陸地方）
		
B橋（北陸地方）	C橋（九州地方）	Z橋（沖縄）
		

#### 3.2 確認された事象

概略調査では外観目視での変状確認を中心に、その変状と電気防食との関係について評価・分類を行った。

##### 3.2.1 陽極システム、防食対象コンクリートの主な変状等

- (A橋) 電気防食範囲に鉄筋腐食が原因と思われるコンクリートの剥落、設計と異なる陽極配置
- (X橋) 変状は特に確認されていない
- (Y橋) チタンロッド方式で分配材の被覆モルタル劣化、チタン溶射方式で溶射被膜の剥離や摩耗劣化
- (B橋) チタンメッシュ方式で被覆モルタルの劣化、流電陽極方式で防食板の変形やパテ材の剥離
- (C橋) 主桁や床版でのひび割れ等、橋脚部チタンリボンメッシュ陽極の露出、モルタル劣化や変色等
- (Z橋) 変状は特に確認されていない

表-3.2.1 概略調査で確認された主な変状

A橋 コンクリート剥落	B橋 防食板の変形	C橋 陽極材の露出
		

### 3.2.2 直流電源装置、配線配管等の主な変状等

- (A橋) 配管材の割れ
- (X橋) 変状は特に確認されていない
- (Y橋) チタン溶射方式でプルボックス蓋の脱落、配線の断線等
- (B橋) 配管固定金具からの錆汁
- (C橋) 橋脚部の配管材脱落、橋脚回路の断線による分配電流の偏り、パイロットランプの視認性不良
- (Z橋) 遠隔モニタリングシステム一部回路の機能停止、管理者が遠隔の運用を知らない

表-3.2.2 概略調査で確認された主な変状

A橋 配管材の割れ	Y橋 プルボックス蓋脱落	C橋 パイロットランプ 視認性不良
		

### 3.2.3 書類調査および維持管理状況

- (A橋) パイロットランプの確認は月1回、定期点検頻度は3年毎の頻度との回答  
塩化物含有量調査、はつり調査も行われている
- (X橋) 維持管理の情報は不明（調査票では保管アリとの回答）  
桁4本の陽極更新工事、直流電源装置の更新が行われている
- (Y橋) 遠隔モニタリングにより月1回の測定、年1回の定期点検が行われている  
落雷やトラブルによる遠隔の停止、照合電極4本の更新等を確認
- (B橋) 年1回程度の定期点検が実施されている  
チタンメッシュ G3 桁照合電極測定不能を確認
- (C橋) 電気防食適用9年後に点検1回のみ実施  
橋脚部での配管材脱落により不通電期間があった（期間は不明）
- (Z橋) 1回も点検されていない  
遠隔モニタリングシステムが運用されていない（管理事務所内で周知されていない）

表-3.2.3 概略調査で確認された主な変状

C橋 橋脚部配管材脱落	Z橋 遠隔モニタリングシステム	Z橋 遠隔モニタリングシステム
		

### 3.3 概略調査結果のまとめ

各橋梁における調査結果を以下に示す。なお、調査内容の詳細は「付録-1」を参照のこと。

#### (A橋)

電気防食対象範囲の桁底面コンクリートに剥落が確認された。電気防食方式はチタンロッド方式であり、桁ハンチより陽極が内部に挿入されている。また、陽極配置も設計通り行われていないため、防食電流の供給性が疑われた。詳細調査により剥落部での表面電位による防食効果確認、防食回路の分配電流および回路抵抗装置の確認を行う必要があると考えられた。

#### (X橋)

通電値は正常範囲にあり、陽極システムに特に不具合等は確認されていない。

#### (Y橋)

新設時から4方式の電気防食が適用されており毎年点検が行われている。チタングリッド方式では電流分配材被覆モルタルの劣化、チタン溶射方式では溶射被膜の剥がれや損傷が確認された。また、遠隔モニタリングシステムが運用されており、月1回の防食効果の確認や年1回の定期点検が行われている。

#### (B橋)

試験施工として3方式の電気防食が適用されており、年1回程度の頻度で点検が行われている。約18年が経過しており(概略調査時点)、チタンメッシュ方式では被覆モルタルの剥落、流電陽極方式ではパテ材の剥離剥落、一部の照合電極測定不能が確認されている。また、通電方式がそれぞれ異なり、チタンメッシュ方式では定電流方式、チタングリッド方式では定電位方式、流電陽極方式の3種類が適用されているため、特に季節による防食効果の影響を確認するためにも詳細調査を行う必要があると考えられた。

#### (C橋)

チタンリボンメッシュ縦置き方式が適用されており、干満部を有する橋脚も防食対象となっている。その部分において陽極材の露出、被覆モルタルの変色が確認されている。また、期間は不明であるが過去に配管材が脱落しており、電流の偏りが生じていた可能性があったとの報告がされている。定期点検は電気防食適用9年後の1回のみであり維持管理も十分行われていないため判断し、詳細点検を行う必要があると考えられた。

#### (Z橋)

新設時から5方式の電気防食が適用されており、遠隔モニタリングシステムが導入されているものの点検が行われておらず、管理事務所のヒアリングでも遠隔モニタリングシステムの存在を知らなかった。なお、外観目視で特に変状等は確認されていない。また、詳細調査を行うには橋梁点検車や作業船が必要となる。

検討の結果、詳細調査対象橋梁として、構造物や電気防食システムに不具合がみられた3橋梁を選定した。




- ①A橋 コンクリートおよび電気防食システムに不具合があり、詳細調査の必要性がある。
- ②B橋 陽極システムに不具合があり、通電方式の異なる3種類の電気防食が適用されている。
- ③C橋 電気防食適用後9年でモルタル劣化などの不具合が報告されている

## 4. 詳細調査および追加調査

### 4.1 調査対象橋梁

概略調査を実施した6橋から、変状の種類や規模、過去の維持管理結果を参考に変状や不具合の原因を特定できる内容を検討し3橋を選定した。更にB橋において追加調査を行った。

表-4.1.1 詳細調査・追加調査対象橋梁

A橋（東北地方） 詳細調査	B橋（北陸地方） 詳細調査・追加調査	C橋（九州地方） 詳細調査
		

### 4.2 調査内容

詳細調査は主に直流電源装置での防食効果の確認、変状部に近接しての目視や表面電位測定、各電気防食方式に応じた陽極設置状態や防食回路の確認、配線配管材や直流電源装置の状態について確認した。

追加調査は詳細調査で確認された事象のうち、さらに究明すべき課題を絞りこみ、変状や不具合が生じたメカニズムの解明を目的として調査を実施した。

#### 4.2.1 通電状態および防食効果の確認

電気防食の通電状態を確認するため、各橋梁において電流や電圧の測定、防食効果確認のための復極量試験を実施した。B橋では、外部電源方式（定電流方式、定電位方式）、流電陽極方式の3方式が適用されており、それぞれの方式において、測定時期の違いによる特性や防食効果への影響を確認することができた。

C橋では、橋脚が防食対象であり、環境レベルに応じて上部が気中部・下部が干満部として回路分けがされていた。測定の結果、気中部回路では電流密度を多く要していること、干満部回路では復極反応に時間を要することが確認された。また、湿潤環境での防食基準の適用には考慮すべきであることを認識した。

表-4.2.1 通電状態測定状況

B橋 チタングリッド部	B橋 流電陽極部	C橋 チタニウムメッシュ部
		

#### 4.2.2 陽極システムおよびコンクリートの確認

陽極設置面に近接して目視点検およびたたき点検を実施した。A橋では電気防食適用部で鉄筋腐食を伴う剥落が生じており、別途、剥落部を中心とした電位分布の結果より分極量が小さい箇所と剥落部の関係性が確認された。また、B橋においては耐用年数を経過した流電防食板が使用されており、その防食板に反りや表面の波打ち、パテ材の剥離や剥落などが確認された。特に耐用年数が近づいた場合は目視点検を強化し、防食効果が損なわれることを未然に防止する必要があることを認識した。

表-4.2.2 目視点検およびたたき点検

A橋 コンクリート剥落	B橋 陽極被覆材剥落	C橋 陽極被覆材浮き
		
B橋 流電防食板波打ち	C橋 ひび割れ	たたき点検状況
		

#### 4.2.3 配管材の確認

A橋およびC橋の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。当時は可とう性のある波付合成樹脂管（一重管）が多く使用されており、経年劣化によるものと思われる。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等も確認された。

配管材の劣化を放置した場合、配管材脱落や断線により防食電流の供給停止を招く恐れがあるため、変状を確認した場合には早急に対処する必要があると考えられた。




表-4.2.3 配管材の変状

A橋 配管材の割れ	B橋 金具からの錆汁	C橋 樹脂プラグ抜け落ち
		

#### 4.2.4 プルボックスの確認

B橋において、プルボックス内樹脂材の充填や特殊ビスによる上蓋撤去が困難なプルボックスがあり、内部を確認することができなかった。また、C橋においては、配線が集中しており結線部の確認等が困難な箇所もあった。プルボックスは結線部の確認や分配電流の確認などを行えるよう、維持管理を行う上でも容易に内部が確認できる構造にしておく必要があることを認識した。

表-4.2.4 プルボックス

B橋 プルボックス内樹脂充填	B橋 プルボックス上蓋の特殊ビス	C橋 プルボックス内配線密集
		

#### 4.2.5 直流電源装置の確認

C橋の直流電源装置は海岸線道路沿いに設置されており、箱体塗装の色褪せ、内部金属部の腐食や扉ゴムパッキンの劣化などが確認されている。直流電源装置は塩害環境に設置される場合が多く、点検時に箱体外観や内部端子台の劣化等が確認された場合は、早期に補修または部品交換等を行う必要がある。

また、管理者が日常点検において確認するパイロットランプのカバーが経年劣化により色褪せており昼間での視認が困難であったため、必要に応じて交換を行うことが望ましい。

表-4.2.5 直流電源装置

C橋 金属部の腐食	C橋 扉ゴムパッキンの劣化	C橋 パイロットランプ劣化
		



#### 4.2.6 表面電位の測定

各変状部の周囲において、表面電位測定による内部鋼材電位の確認、電源オンオフによる電位変化での防食電流供給の確認、復極量試験による防食効果の確認等を行った。

B橋のチタングリッド方式において、陽極被覆モルタル浮き部での各補修段階での測定を行った結果、補修前後で防食効果に違いがあること、モルタルの水分量が分極量に大きく影響することなどを確認することができた。

表-4.2.6 各変状部での表面電位測定状況

B橋 チタングリッド部	B橋 流電陽極部	C橋 チタンボンメッシュ部
		

#### 4.2.7 分配電流の確認

B橋チタンメッシュ方式において、クリップオン電流計により分配電流を測定した結果、4本の桁に対し電流が均等に分配されていることが確認された。

電気防食は各部材に均一な電流が供給されていることが重要である。電気防食後に防食電流不足に起因するものと思われる変状が生じた場合、その部位への電流量を確認するためにも必要な調査となる。

表-4.2.7 分配電流測定状況

B橋 分配状況 (4桁)	クリップオン電流計	クリップオン電流計
		

## 5. 橋梁調査結果のまとめ

詳細調査、追加調査で得られた知見を以下に示す。なお、調査内容の詳細は「付録-2,3,4,5」を参照のこと。

### 5.1 A橋調査より

・A橋のコンクリート剥落部（G3桁）における表面電位分布測定の結果、分極量が50mV未満と小さい値を示した。比較として行った変状のない隣接する桁においても、同様な分極量の小さい範囲が確認されており、その範囲において今後劣化する可能性があることが考えられた。

### 5.2 B橋調査より

・チタンメッシュ方式、被覆モルタル剥落部（G1桁）および浮き部（G4桁）での表面電位による復極量は、健全部と同様高い値を示しており、被覆モルタルの剥落は今回の大きさ（10×10cm）程度では電気防食効果に与える影響は小さいと考えられた。

・チタングリッド方式、被覆モルタル浮き部での分極量は防食基準を満たしていたが、新規モルタルに置き換えたことで若干の分極量増加があり、浮きにより少なからず防食効果が損なわれていたものと考えられた。

・流電陽極防食板（亜鉛シート）は耐用年数を過ぎており、一部のパテ剥落や防食板の反りがあるが、高い分極量が得られており、防食機能を維持していることが確認された。

・定電流方式による通電の場合、温暖時（夏季）において分極量が減少する傾向にあるため、通電量の調整は電流を多く要する夏季に行うことで、年間を通じて防食効果を維持できるものと考えられる。

・過年度からのモニタリング測定不能箇所は照合電極本体の故障ではなく、電流経路の一部の接続不良が原因であった。照合電極の不良と断定前にケーブル結線部や端子部の確認を行うことが必要である。

### 5.3 C橋調査より

・橋脚下部にみられた被覆モルタルの剥離・変色は、干満帯に位置していることや陽極材かぶり厚さの不足、一時的に通常より多くの電流が流れたことなどが原因となって生じたものと考えられ、適用箇所の条件に応じた電気防食工法の選定や設計が重要である。

・表面塗装のひび割れや浮き部、被覆モルタル変状部付近で測定した表面電位による分極量は防食基準を満たしていない結果となったが、健全部との差もなく、現時点では鋼材腐食に起因する変状がみられていないことから、防食効果は得られているものと考えられる。

### 5.4 共通

・陽極設置コンクリート面の目視点検が厳しい施設においては、維持管理計画書に点検方法やその手段を具体的に明記することで、管理者への維持管理の必要性が増すものと考えられる。

・配管材の割れや固定プラグの抜け落ち、プルボックスの開放不可な箇所などが確認された。維持管理を考慮した使用材料の標準化、施工方法の統一化が望まれる。

### 最後に

電気防食工法は、適切な防食電流を均一に供給する必要があるが、構造物の仕様や環境条件、陽極配置や防食回路構成など様々な要因によって電流の偏りが生じる可能性もある。

調査で行った表面電位測定や電流分配測定は、電気防食の効果を詳細に把握することができるため、このような調査を定期的実施する必要があると考える。

## 6 A橋調査結果抜粋

A橋では電気防食適用桁にコンクリートの剥落が確認されたため、表面電位測定による調査を行った。

### 6.1 電気防食方式の概要

適用されている電気防食方式は、外部電源方式のうち陽極を点状に設置するチタンロード方式となる。桁下フランジ全面が防食対象であり、ハンチから桁内部に陽極が設置されている。

### 6.2 外観調査

写真-6.2.1に示すようなコンクリートの剥落が30cm程度の範囲で確認されており、その範囲を中心に近接調査ができるよう足場を設置した。



写真-6.2.1 底面部の剥落箇所 (G3桁)

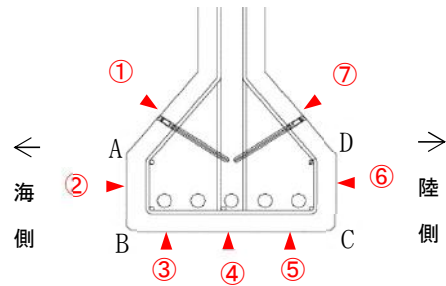


図-6.3.1 表面電位測定位置図

### 6.3 コンクリート表面電位分布測定

コンクリート剥落部の防食状態を確認するため、剥落部の周囲において表面電位分布を測定した。図-6.3.1に測定位置を、図-6.3.2に自然電位分布を、図-6.3.3に分極量分布をそれぞれ示す。

#### 6.3.1 自然電位測定結果

測定の結果、海側ハンチから下面にかけて $-200\text{mV}$ (vs.CSE)より卑な値が確認された。これは海側で塩化物イオンや水分の供給が多く、陸側に比べて腐食しやすい環境であることが原因と推察される。

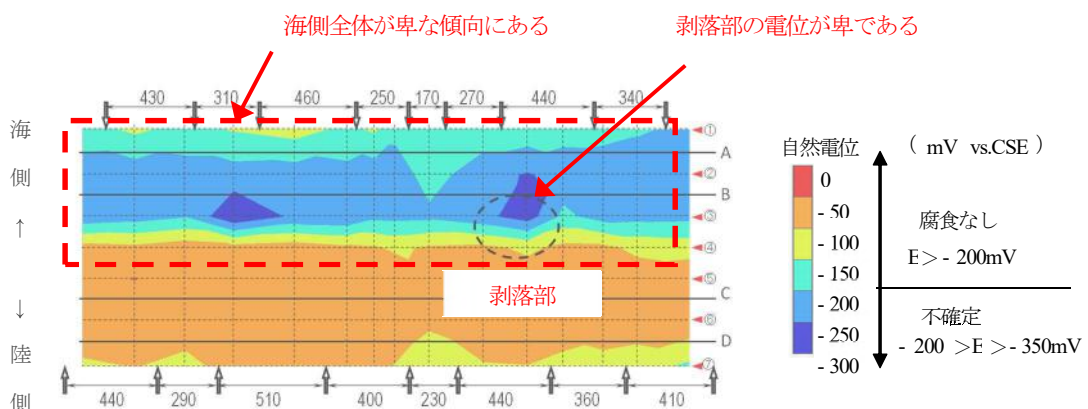


図-6.3.2 G3桁自然電位分布図

### 6.3.2 分極量測定結果

分極反応は電気防食を通電した際に、陽極からコンクリート内部の防食対象鋼材（鉄筋）に防食電流が流入し鉄筋の電位がマイナス方向に変化する現象である。その通電オフ時と通電オン時の電位変化量を分極量とし、100mV以上の電位変化量があれば、防食基準を満たしているものとされている。

測定の結果、分極量分布は概ね100mV以上を示しているが、劣化部付近では50mV未満となった。

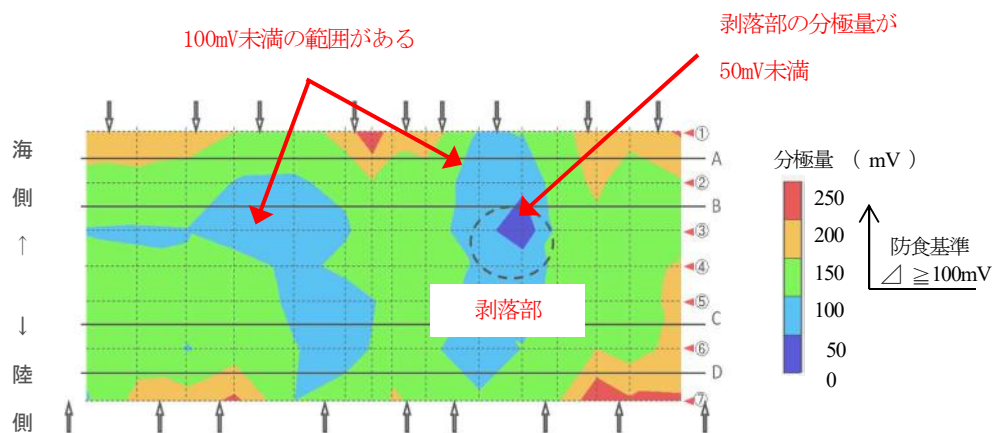


図-6.3.3 G3杭分極電位分布図

### 6.4 内部照合電極での復極量試験結果

モニタリング用埋設照合電極での復極量試験結果グラフを図-6.4.1に示す。杭底面部（Re-11,14,17）に復極量が不足していることが確認された。

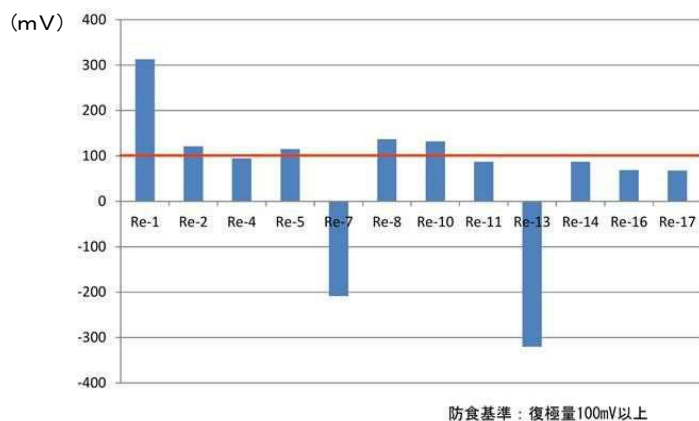


図-6.4.1 復極量試験結果一覧

### 6.5 調査よりわかったこと

表面電位分布測定により剥落部の電位が卑であり分極量も少ないこと、海側と陸側において腐食環境が異なることなどを表面電位により確認することができた。また、内部照合電極試験結果との整合により陽極システムの特性や防食効果への影響を把握することができた。

## 7 B橋

B橋では外部電源方式（定電流方式，定電位方式），流電陽極方式の3方式が適用されており，それぞれの通電方式における測定時期（温暖時，寒冷時）の違いによる特性を確認した。

### 7.1 通電方式の概要

チタンメッシュ方式では定電流方式，チタングリッド方式では定電位方式，流電陽極方式の3方式でそれぞれ通電されている。

表-7.1.1 直流電源装置，モニタリングボックス



### 7.2 定電流方式の特性（チタンメッシュ方式）

チタンメッシュ方式における測定結果の比較を表-7.2.1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，回路抵抗の増加，インスタントオフ電位の卑化および復極量の増加が確認された。

表-7.2.1 通電結果の比較

	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		
回路抵抗	17.6Ω			17.7Ω			23.7Ω		
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.mV）基準に換算

### 7.3 定電位方式の特性（チタングリッド方式）

チタングリッド方式における測定結果の比較を表-7.3.1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ている。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。

表-7.3.1 通電結果の比較

		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		
回路抵抗		----			36.7Ω / 51.0Ω			73.3Ω / 110.0Ω			81.5Ω / 121.3Ω		
照合	Ins.	OFF	復極	Ins.	OFF	復極	Ins.	OFF	復極	陽極被覆モルタル浮き部調査のため測定していない			
電極	OFF	電位	量	OFF	電位	量	OFF	電位	量				
№	R1	-726	-308	418	-691	-314	377	-677	-290				387
1	R2	-668	-333	335	-664	-345	319	-684	-326				358
№	R1	-754	-518	236	-731	-522	209	-725	-497				228
2	R2	----	----	----	-676	-479	197	-770	-451	319			

※飽和硫酸銅（CSE.mV）基準に換算

### 7.4 流電陽極方式の特性（亜鉛シート方式）

流電陽極方式における測定結果の比較を表-7.4.1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。

表-7.4.1 通電結果の比較

		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		
照合	Ins.	OFF	復極	Ins.	OFF	復極	Ins.	OFF	復極	—	—	—	
電極	OFF	電位	量	OFF	電位	量	OFF	電位	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.mV）基準に換算

## 7.5 調査よりわかったこと

通電電流、電圧、回路抵抗、鋼材電位、復極量に着目して比較した結果、測定時期（気温）の違いにより、通電量および防食効果への影響があることが確認された。特に定電流方式制御の場合、温暖時に防食効果が低下する恐れがあるため、通電電流量の設定は夏季（温暖時）に行う必要があることを確認した。

### (1) 定電流方式の特性

測定の結果、定電流方式のため季節を通して電流値は一定値を示しているが、寒冷時には回路抵抗が増加したことによる電圧の増加や復極量の増加が確認された。

定電流通電の場合、温暖時に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、通電量の設定は、電気防食運用開始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得られるよう適切な電流量を設定しなければならない。

### (2) 定電位方式の特性

測定の結果、定電位方式のため季節を通して鋼材電位は一定値を示しているが、寒冷時回路抵抗が増加しており通電電流の低下はあるものの、同程度の復極量が得られていた。寒冷時に電流が低下したものの分極抵抗の増加により、温暖時と同程度の復極量が得られているものと考えられる。

なお、現状での復極量は防食基準に対して 200mV 以上あるため、調整可能であれば通電量を抑えることで、陽極システムの長寿命化にも寄与するものと考えられる。

### (3) 流電陽極方式

測定の結果、寒冷時に通電電流の低下はあるものの、温暖時と同程度の復極量が得られていた。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-7.5.1 に陽極鋼材間の電位差測定結果を示す。僅かな差はあるが気温の違いによる影響は小さく、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。

表-7.5.1 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℃		
	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

(単位;mV)

## 8 C橋

C橋の電気防食方式は外部電源方式のうちチタンリボンメッシュ縦置方式であり、干満部を有するP1橋脚も防食対象とされている。特に水面付近での陽極露出やモルタル変色が確認されており、湿潤部での特性を通电結果とあわせて確認した。

### 8.1 橋脚陽極部の変状

橋脚部の陽極設置面において、陽極材の露出や被覆モルタル変色等が確認された。過去に橋脚部の配管材が脱落したことでA2側に2倍の電流が供給（A1側は不通電）されていた期間があったとの報告があり、多くの電流が流れたことによりモルタルの劣化が助長されたことが考えられる。

表-8.1.1 橋脚陽極材の露出，モルタルの変状

P1 橋脚全景	A2 側水面付近の変状	配管材の脱落
		
陽極かぶり厚確認	上から4段目の変色	上から6段目の変色
		

知見より、電気防食では通电により陽極材周辺には酸素発生反応が生じ、塩化物イオンが存在する環境においてさらに過大電流を印加した場合、塩素ガスの発生によりpHが低下することでコンクリートの酸性化を引き起こすと言われている。

A2側のモルタルの変状部は、かぶり厚の小さい湿潤環境で多く確認されており、そのかぶりの小さい箇所に塩分が吸着し、配管材脱落時に多くの電流が流れたことにより塩素ガスが発生したことでモルタルの劣化や変色が助長された可能性が高いものと考えられる。

また、橋脚部周囲の河床状況として、A1側は土砂が多く堆積しておりA2側に水流が集中していることから、電気防食施工当時と河床の環境が変化したことも劣化を助長した要因と思われる。

湿潤環境への電気防食の注意点として、環境に応じた回路分けを行うことや所定のモルタルかぶり厚の確保を行うこと、また、維持管理において過剰な電流が流れることなく、所定の防食効果が得られる適切な通电を行う事が、陽極システムの早期劣化を防止するためにも重要であると考えられる。



## 8.2 橋脚気中部回路での測定例

本構造物への電気防食回路は、主桁回路、床版回路、橋脚回路で構成される。さらに橋脚回路は高さ方向に、気中部および干満部に分けられている。通電時の測定結果を表-8.2.1 に示す。

気中部回路の電流密度に着目すると、他の回路と比較して高い傾向となった。No.3 回路は図-8.2.1 に示すように1~7段までの陽極が対象であるが、施工当初とは河床の環境が変化しており、実際には7段目の陽極は没水していた。そのため、防食電流は電気抵抗の小さい湿潤部（7段目）に多く流れたことで、陽極2~3段目位置にある照合電極への電流供給が減少したことで、所定の電位変化量を得るために多くの電流を要していることが考えられる。

表-8.2.1 通電測定結果

回路	通電電流 (A)	通電電圧 (V)	極間抵抗 ( $\Omega$ )	防食面積 ( $m^2$ )	電流密度 ( $mA/m^2$ )
No.1 回路(主桁)	0.38	2.72	7.20	334.2	1.10
No.2 回路 (床版)	0.32	7.88	24.60	198.9	1.60
No.3 回路 (橋脚気中部)	0.19	3.34	17.60	27.2	7.00
No.4 回路 (橋脚干満部)	0.02	1.45	72.50	10.5	1.90

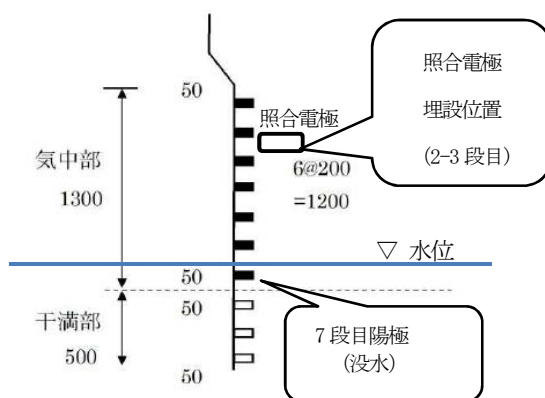


図-8.2.1 P1 橋脚陽極配置環境



写真-8.2.1 橋脚下部没水状況

## 8.3 調査よりわかったこと (C橋)

現地調査および書類調査の結果、陽極部変状の原因として過大な電流が流れていた可能性があること、水面に近く電気抵抗が小さくなり電流が多く流れたこと、陽極のかぶり厚が小さく通電によるガスの発生でモルタルが脆弱化したこと、通電量が早くに劣化および変色したことが可能性として考えられる。

特に防食対象が湿潤環境となる場合は、環境に応じた回路分け、所定のモルタルかぶり厚の確保を行うこと、また、過剰な電流が流れることのないよう適切な通電量を維持していくことが、防食システムの早期劣化を防止するためにも重要であることを認識した。

## 4 編/付録-1 概略調査報告書

### 1. A橋

#### 1.1 対象橋梁の概要

橋梁の概要を表-1.1.1 に示す。

表-1.1.1 A橋の概要

名称	A橋		
所在地	東北地方	路線名	一般国道7号
橋梁管理者	東北地方整備局秋田河川国道事務所	竣工	1976年10月
構造形式	PC桁橋 2径間, 橋長39.2m, 全幅員10.8m		
海岸からの距離	約800m	日交通量	10850台 (うち大型車823台)
凍結散布材の散布	あり (2011年度 53t, 2012年度 51t, 2013年度 53t [t/km/年])		

<調査写真>

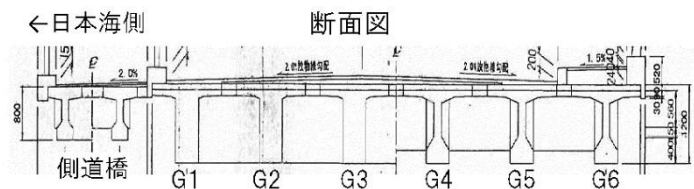


橋梁全景

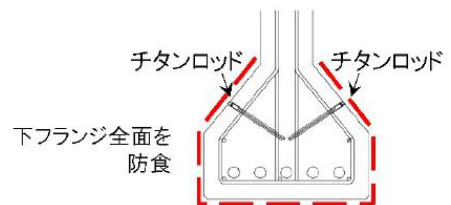


桁下の状況

<橋梁概要図, 電気防食概要図>



橋梁断面図 (2径間6主桁)



電気防食範囲 (チタンロッド方式)

## 1.2 電気防食に関する事項（調査票より）

電気防食に関する事項を表-1.2.1 に示す。

表-1.2.1 電気防食に関する事項（A橋）

電気防食適用前の補修	なし
電気防食適用前の劣化調査	1998 年度実施 劣化要因：塩害 ひび割れ：なし 剥離・剥落：なし 塩化物イオン量 2.93kg/m <sup>3</sup> (G1 桁 表面から 45mm, かぶり 48mm) 1.93kg/m <sup>3</sup> (G1 桁 表面から 45mm, かぶり 48mm)
電気防食施工年度	1999 年度 ※電防経過年数 15 年（調査時）
電気防食方式	チタンロッド方式
電気防食適用径間	2 径間
防食回路数	6 回路（直流電源装置 3 基）
全体工事費	2,480 万円
補修工種	電気防食＋その他工事
適用部位	T 桁 下フランジ部
電気防食設計・竣工図書	あり（別紙）

## 1.3 電気防食の維持管理に関する事項（調査票より）

電気防食の維持管理に関する事項を表-1.3.1 に示す。

表-1.3.1 電気防食の維持管理に関する事項（A橋）

点検の有無	あり	
点検手法	現地点検	
点検項目・頻度	1. パイロットランプ点灯確認	月 1 回
	2. 電源装置目視	3 年
	3. 配線・配管・プルボックスの目視	3 年
	4. 陽極材の設置状況目視	3 年
	5. 各回路の電流量	3 年
	6. 各回路の電圧量	3 年
	7. 鉄筋電位 (On 電位, Instant Off 電位)	3 年
	8. 復極量	3 年
	9. 雷発生時等の臨時検査	3 年
	10. その他	臨時

#### 1.4 定期点検結果他に関する事項（調査票より）

電気防食の定期点検結果他に関する事項を表-1.4.1 に示す。

表-1.4.1 定期点検結果他（A橋）

定期点検結果（2014年1月）	・対策区分：S 詳細調査の必要あり	
電気防食適用後の不具合	1. 電気防食範囲内コンクリート	あり（一部剥落）
	2. 直流電源装置	なし
	3. 陽極材	なし
	4. 陽極分配材	なし
	5. 配線配管	あり（配管材割れ）
	6. その他	なし

#### 1.5 外観目視調査結果

##### 1.5.1 電気防食対象範囲内コンクリート

外観目視調査の結果、T桁下フランジの一部（2径間目 G3桁）に鉄筋腐食が原因と思われるコンクリートの剥落が確認された。本劣化位置に着目して詳細調査を行う必要があると判断した。

##### 1.5.2 直流電源装置

直流電源装置は全回路運転がされていた。通電電圧は6.0~6.9V、通電電流は0.02~0.03Aと表示されていた。また、直流電源装置箱体外面に損傷等は認められなかった。ただし、測定回路等の位置が不明であり、概略調査では各種測定はできなかった。



写真-1.5.1 G3桁の外観状況（第2径間）



写真-1.5.2 直流電源装置の状況

##### 1.5.3 配線配管材

配管材の一部に割れが生じていた。割れは下フランジの角部で多く確認された。ただし、配線材料には損傷は認められなかった。またボックス内の結線状況は確認していないため、詳細調査時において可能な範囲で点検を行う必要がある。

#### 1.5.4 陽極材および陽極分配材の状況

陽極材の脱落、消失は無かった。また、陽極分配材の断線も認められなかった。ただし、陽極設置位置が均等に割り付けされていなかったため、施工図面との整合を取る必要がある。



写真-1.5.3 配線配管の状況

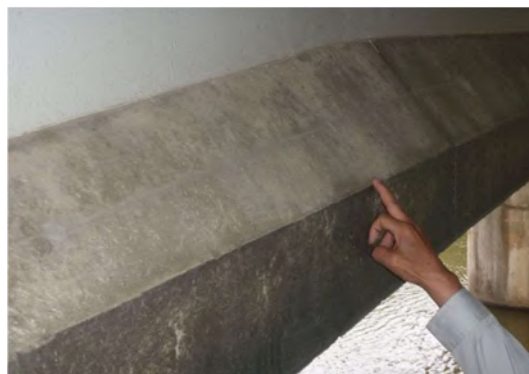


写真-1.5.4 陽極および陽極分配材の状況

#### 1.5.5 電気防食対象範囲外の変状

電気防食対象範囲外の横桁にコンクリートの剥落が確認された。この部位は陽極が設置されていない範囲であり、塩害劣化が生じたものと推定された。

#### 1.5.6 周囲環境条件

劣化部を中心として詳細調査を行う場合、調査対象位置は護岸コンクリートで斜面になっていることから簡易的な足場が必要となる。少なくとも、高さ方向は下フランジハンチ部に手が届く高さが必要であり、かつ水平な足場が必要であることを確認した。



写真-1.5.5 横桁の変状部 (スパン 2 G4 桁)



写真-1.5.6 桁下の状況

## 1.6 書類調査

A橋では、電気防食施工後に電気防食の点検および構造物の調査を実施していた。調査項目は電位測定、塩化物含有量試験、はつり調査であった。

電位測定は竣工時からほぼ毎年1月～3月頃に実施されていた。その結果、第2径間目G6桁以外は100mV以上の復極量が確認されていた。G6桁については通電調整を行い、経過観察を行うものとされていた。電位測定の点検結果から、照合電極位置における復極量はG6桁以外問題ないと判断できるが、防食電流密度が小さいと伺えることとオン電位が記載されていない。特に通電電流については直流電源装置の表示値が記録されていた。したがって、詳細調査により再度電位測定を行い整合性の確認、さらにG6桁について通電調整試験による分極量の確認が必要であると判断された。

また、平成26年度にA1-P1間のG1桁およびG2桁で塩分含有量試験が行われていた。G1桁については、平成18年度に実施された塩分含有量試験との比較を行っている。その結果、鉄筋位置における塩分量に大きな差は認められなかった。また、鉄筋位置において多量の塩分量が確認されたが、はつり調査の結果からは鉄筋の腐食は認められておらず、電気防食による腐食抑制効果が得られていたといえる。

## 1.7 詳細調査項目（案）

概略調査結果をもとに、A橋での詳細調査に必要な項目を抽出した。

表-1.7.1 A橋詳細項目一覧

分類	項目	内容	数量	備考
電気防食範囲内 コンクリート	表面電位分布	G3桁変状部を中心に（2m程度の範囲） 自然電位 通電電位 分極量	1箇所	
直流電源装置	電圧・電流測定	通電電圧・通電電流の計測	6回路	
	電位測定	オン電位 インスタントオフ電位 オフ電位	6回路	
	分配電流測定	No.3.1回路 G3桁、G4桁への分配電流測定	1回路	
配線配管材	結線部の確認	プルボックス内の目視 結線部の状況確認	可能な範囲で	
陽極、陽極分配材	陽極設置間隔	G3桁変状部の陽極設置間隔の計測		
その他	簡易足場	G3桁劣化部	1箇所	
	G6桁	G6桁通電調整試験	1回路	

## 2. X橋

### 2.1 対象橋梁の概要

書類調査より、2010年に電気防食再劣化調査が行われており、過去に最大3年半の電流不通電期間の可能性があったこと、断面修復およびひび割れの影響での防食電流の低下、また、チタングリッド陽極被覆材の浮きによる防食電流の低下などの報告が確認された。その後、補修工事が行われており、G5、G6桁のチタンメッシュ方式はチタングリッドへ更新、G7、G8桁のチタングリッドも更新（方式変更なし）され、電源装置も耐用年数経過のため更新されている。なお、概略調査においては、通電値は正常範囲にあり、陽極材や配線配管材に不具合などは確認されなかった。

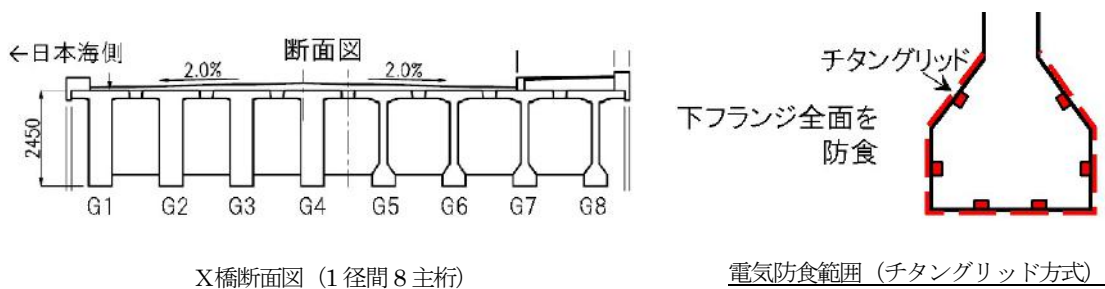
表-2.1.1 X橋の概要

名称	X橋		
所在地	東北地方	路線名	一般国道7号
橋梁管理者	東北地方整備局酒田河川国道事務所	竣工	1981年
構造形式	PC桁橋 1径間、橋長46.0m、全幅員14.5m		
電気防食適用年度	1996年 ※電防経過年数18年（調査時）	適用部位	T桁下フランジ部
電気防食方式	チタングリッド方式		
点検状況	2009年8月定期点検実施	対策区分	C：速やかに補修の必要あり

<調査写真>



<橋梁概要図，電気防食概要図>



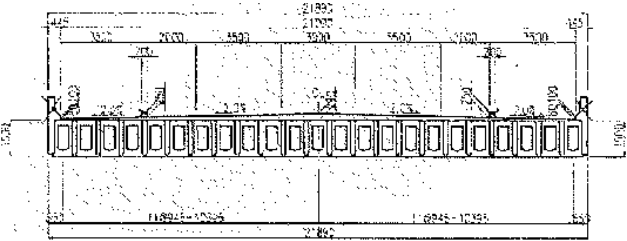
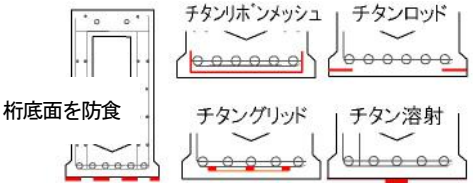


### 3. Y橋

#### 3.1 対象橋梁の概要

橋梁の概要を表-3.1.1 に示す。

表-3.1.1 Y橋の概要

名称	Y橋		
所在地	北陸地方	路線名	国道8号
橋梁管理者	北陸地方整備局高田河川国道事務所	竣工	2000年3月
構造形式	PC中空床版桁橋 2径間, 橋長75.3m, 全幅員21.9m		
海岸からの距離	約100m	日交通量	11,160台 (大型車3,307台)
凍結防止材の散布	あり (2013年度 15.5t/km/年)		
<p>&lt;調査写真&gt;</p> <div style="text-align: center;">  <p>Y橋全景 (1径間側山側より)</p>  <p>桁下面の状況 (チタングリッド方式範囲)</p> </div>			
<p>&lt;橋梁概要図, 電気防食概要図&gt;</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>Y橋断面図 (2径間23主桁)</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>電気防食範囲 (4方式)</p> </div> </div>			



### 3.2 電気防食に関する事項（調査票より）

電気防食に関する事項を表-3.2.1に示す。新設時より電気防食が適用されている。

表-3.2.1 電気防食に関する事項（Y橋）

電気防食適用前の補修	なし ※新設時からの適用
電気防食適用前の劣化調査	なし
電気防食施工年度	2000年度 ※電防経過年数14年（調査時）
電気防食方式	1径間山側（G1～G14）：チタンリボンメッシュ方式 1径間海側（G15～G23）：チタングリッド方式 2径間山側（G1～G14）：チタンロッド方式 2径間海側（G15～G23）：チタン溶射方式
電気防食適用径間	2径間
電気防食面積	1径間：818.8㎡ 2径間：880.8㎡ 合計1,700㎡
防食回路数	4回路（各方式1回路）
全体工事費	10,700万円
補修工種	電気防食のみ（新設時）
適用部位	桁下面
電気防食設計・竣工図書	あり（別紙）

### 3.3 電気防食の維持管理に関する事項（調査票より）

電気防食の維持管理に関する事項を表-3.3.1に示す。

表-3.3.1 電気防食の維持管理に関する事項（Y橋）

点検の有無	あり	
点検手法	現地点検，遠隔モニタリングシステム	
点検項目・頻度	1. パイロットランプ点灯確認	1回/年程度
	2. 電源装置目視	1回/年程度
	3. 配線・配管・プルボックスの目視	1回/年程度
	4. 陽極材の設置状況目視	1回/年程度
	5. 各回路の電流量	1回/月
	6. 各回路の電圧量	1回/月
	7. 鉄筋電位（On電位，Instant Off電位）	1回/月
	8. 復極量	1回/月
	9. 臨時点検	1回/年程度

### 3.4 定期点検結果他に関する事項（調査票より）

電気防食の定期点検結果他に関する事項を表-3.4.1 に示す。

表-3.4.1 定期点検結果他（Y橋）

定期点検結果（2014年9月）	・対策区分：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	
電気防食適用後の不具合 （アンケート結果及び 概略調査結果より）	1. 電気防食範囲内コンクリート	あり
	2. 陽極材および陽極分配材	あり
	3. 直流電源装置	なし
	4. 配線配管	あり
	5. その他	なし

### 3.5 外観目視調査結果

#### 3.5.1 電気防食対象範囲内コンクリート

一部の桁間詰部に白色の析出物が確認され、橋面側からの水の供給があると考えられた。また、橋脚部の点検足場に塩分の付着が確認され、本橋は厳しい塩害環境に置かれていることが確認された。



写真-3.5.1 桁間詰部からの析出物



写真-3.5.2 点検足場への塩分付着

#### 3.5.2 陽極材および陽極分配材の状況

各方式の現状写真を示す。チタンリボンメッシュ方式、チタングリッド方式に変状は確認されなかった。



写真-3.5.3 チタンリボンメッシュ方式

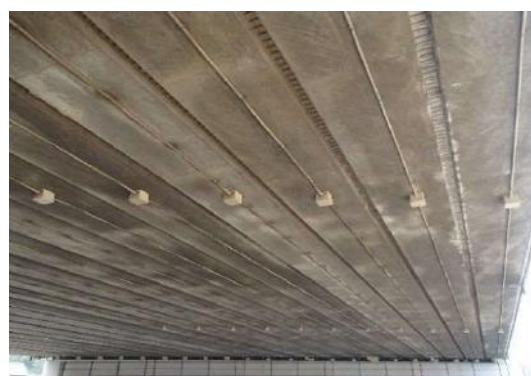


写真-3.5.4 チタングリッド方式

チタンロッド方式に電流分配材被覆モルタルの劣化が確認された。また、チタン溶射方式において被膜の剥がれが顕著にみられた。2 径間側は、河床エプロン部に砂や石の堆積があることから、砂の巻き上げにより溶射被膜が損傷していることも考えられる。



写真-3.5.5 チタンロッド方式



写真-3.5.6 チタン溶射方式



写真-3.5.7 チタンロッド方式  
(電流分配材被覆モルタルの変状)



写真-3.5.8 チタン溶射方式  
(溶射被膜の剥がれ)

### 3.5.3 直流電源装置

本橋においては遠隔モニタリングシステムが適用されており、月1回の頻度で復極量試験および通電調整が行われている。



写真-3.5.9 直流電源装置計器盤



写真-3.5.10 遠隔モニタリングシステム

### 3.5.4 配線配管材

チタン溶射方式範囲においてプルボックス蓋の脱落、陽極ケーブルの外れが確認された。



写真-3.5.11 プルボックス蓋外れ



写真-3.5.12 陽極ケーブル外れ

### 3.5.5 電気防食対象範囲外の変状

桁底面全体が電気防食対象であるため、対象外の変状について目視確認は行っていない。

### 3.5.6 周囲環境条件

桁端部は護岸ブロック上から、橋脚部は点検足場上からの目視点検が可能である。しかし桁中央部は高さ 4m 弱あるため、近接しての詳細調査を行う場合は、高所作業車等による点検となる。河川上については、足場の設置や橋梁点検車等が必要となることを確認した。



写真-3.5.13 Y橋全景



写真-3.5.14 桁端部状況

### 3.6 書類調査

本橋では電気防食の適用から約 15 年間、毎年定期的に点検が行われている。チタンロッド方式においては、チタンリード線の被覆モルタルの剥落、チタン溶射方式においては、溶射被膜の剥がれが確認されている。

本橋は電気防食適用開始から、遠隔モニタリングシステムにより定期的に測定が行われているが、遠隔モニタリングシステムのトラブルや落雷による停電などの理由で、通電が停止している期間のあることが確認されている。

また、チタングリッド方式において 4 箇所全ての照合電極の更新が報告されている。内容は、照合電極の劣化が理由であり、電気防食適用開始から 12 年目で 2 箇所の更新、15 年目以降に 2 箇所のハフニウム照合電極が鉛照合電極に更新が行われている。

電気防食の適用開始から、遠隔モニタリングシステム自体の点検が行われておらず、詳細調査により、現地測定値と遠隔モニタリングシステム値との整合性を確認する必要がある。

### 3.7 詳細調査項目（案）

概略調査結果をもとに、Y 橋での詳細調査に必要な項目を抽出した。

表-3.7.1 Y 橋詳細項目一覧

分類	項目	内容	数量	備考
電気防食範囲内 コンクリート	詳細目視	劣化調査資料をもとに確認		
陽極 陽極分配材	チタンロッド方式 チタン溶射方式 詳細調査	チタングリッド方式、リード線の被覆モルタル剥離部 チタン溶射方式、溶射被膜の健全性（付着性、陽極間導通等）	劣化範囲	
直流電源装置	通電測定 （電圧・電流）	通電電圧 通電電流（電流密度）	4 方式	遠隔モニタリングシステムとの整合性確認
	鉄筋電位測定 （照合電極）	オン電位 インスタントオフ電位 オフ電位	モニタリング 16 箇所	
配線配管	結線部の確認	プルボックス内の目視 結線部の状況確認	可能な範囲で	
	分配電流の確認	クリップオン電流計による 分配電流確認		

## 4. B橋

### 4.1 対象橋梁の概要

橋梁の概要を表-4.1.1に示す。

表-4.1.1 B橋の概要

名称	B橋		
所在地	北陸地方	路線名	国道8号
橋梁管理者	北陸地方整備局高田河川国道事務所	竣工	1974年4月
構造形式	PC桁橋 17径間, 橋長340.02m, 全幅員11.35m		
海岸からの距離	約0m	日交通量	11,160台 (大型車3,307台)
凍結防止材の散布	なし		

<調査写真>



B橋全景 (第8径間に電気防食適用)



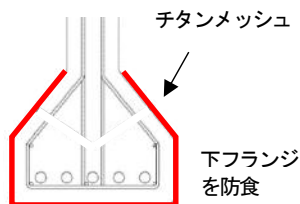
電気防食適用範囲 (第8径間)

G1~G4: チタンメッシュ方式

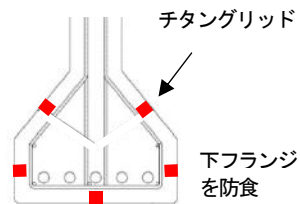
G5~G7: チタングリッド方式

G8~G11: チタン溶射方式

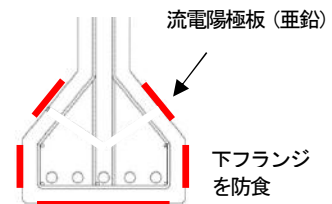
<電気防食概要図>



チタンメッシュ方式



チタングリッド方式



流電陽極方式

#### 4.2 電気防食に関する事項（調査票より）

電気防食に関する事項を表-4.2.1に示す。

表-4.2.1 電気防食に関する事項（B橋）

電気防食適用前の補修	あり（S57年度～ 断修・塗装）※供用開始約8年後
電気防食適用前の劣化調査	あり（年度不明） 劣化要因：塩害 ひび割れ：あり 剥離・剥落：あり 塩化物イオン量：データなし
電気防食施工年度	1996年度 ※供用開始約18年後（調査時）
電気防食方式	G1～G4：チタンリボンメッシュ方式 G5～G7：チタングリッド方式 G8～G11：流電陽極方式（亜鉛シート方式）
電気防食適用径間	1径間（P7-P8径間）
電気防食面積	66 m <sup>2</sup> （3方式合計）
防食回路数	3回路（各方式1回路）
全体工事費	試験施工のため不明
補修工種	塗膜除去＋電気防食
適用部位	主桁下フランジ部
電気防食設計・竣工図書	あり（別紙）

#### 4.3 電気防食の維持管理に関する事項（調査票より）

電気防食の維持管理に関する事項を表-4.3.1に示す。

表-4.3.1 電気防食の維持管理に関する事項（B橋）

点検の有無	あり	
点検手法	現地点検	
点検項目・頻度	1. パイロットランプ点灯確認	1回/年程度
	2. 電源装置目視	1回/年程度
	3. 配線・配管・プルボックスの目視	1回/年程度
	4. 陽極材の設置状況目視	1回/年程度
	5. 各回路の電流量	1回/年程度
	6. 各回路の電圧量	1回/年程度
	7. 鉄筋電位（On電位, Instant Off電位）	1回/年程度
	8. 復極量	1回/年程度
	9. 臨時点検	1回/年程度

#### 4.4 定期点検結果他に関する事項（調査票より）

電気防食の定期点検結果他に関する事項を表-4.4.1 に示す。

表-4.4.1 定期点検結果他（B橋）

定期点検結果（2013年12月）	対策区分：B 状況に応じて補修を行う必要がある	
電気防食適用後の不具合 （アンケート結果及び 概略調査結果より）	1. 電気防食範囲内コンクリート	あり
	2. 陽極材および陽極分配材	あり
	3. 直流電源装置	あり
	4. 配線配管	なし
	5. その他	なし

#### 4.5 外観目視調査結果

##### 4.5.1 電気防食対象範囲内コンクリート

陽極システムの形状から、コンクリート表面を観察できたのはG5～G7に適用されているチタングリッド方式のみである。外観目視においてはひび割れ、剥離等の損傷劣化はみられなかった。

##### 4.5.2 陽極材および陽極分配材の状況

チタンメッシュ方式 G1 桁底面に被覆モルタルの剥落が確認された。また、流電陽極方式範囲において、防食板端部パテ材剥落防止のため、養生ネットが設置されていた。



写真-4.5.1 チタンメッシュ方式陽極被覆モルタル剥落部（G1 桁底面）



写真-4.5.2 流電陽極方式部養生ネット設置状況（G8～G11 桁）



#### 4.5.3 直流電源装置

橋梁点検車により近接して通電状況を確認した。チタンメッシュ回路 R3，チタングリッド回路 No.2 の R2 照合電極の測定値が安定しておらず測定不能であった。

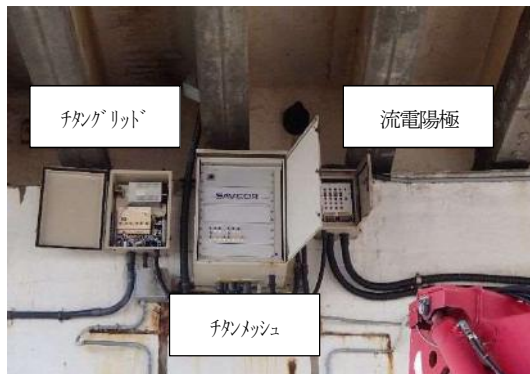


写真-4.5.3 直流電源装置及び流電モニタリングボックス

#### 4.5.4 配線配管材

今回の概略調査においては、特に異常は確認されなかった。

#### 4.5.5 電気防食対象範囲外の変状

電気防食対象範囲外において、他径間での主桁部の剥落、同径間での横桁部の剥落を確認した。



写真-4.5.4 主桁の変状（他径間）



写真-4.5.5 横桁の変状（同径間）

#### 4.5.6 周囲環境条件

桁下面は地上から 5m 程度の高さにあり、直流電源装置も高い位置に設置されているため、詳細調査を行う場合は、高所作業車を使用しての調査となる。

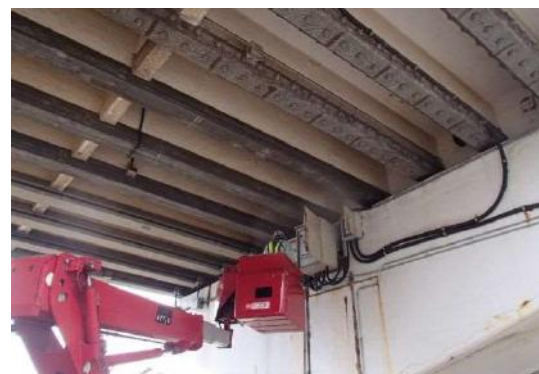


写真-4.5.6 高所作業車による調査状況

#### 4.6 書類調査

B橋では電気防食の適用から約17年間、定期的に点検が行われている。各方式の主な変状として、チタンメッシュ方式での被覆モルタルひびわれ、浮き、チタングリッド方式での被覆モルタル劣化、ひびわれ、流電陽極方式においては防食板端部パテ材の剥離が確認されている。

防食効果の確認は、電気防食適用開始から定期的に復極量試験が行われており、概ね防食基準が得られていることを確認した。また、チタンメッシュ G3 桁において2014年11月時点で電位の測定不能が報告されている。今回、概略調査時の測定においても電位表示値が不安定のため測定ができなかった。照合電極の機能が損なわれている可能性が考えられるため、詳細調査により確認する必要がある。

#### 4.7 詳細調査項目（案）

概略調査結果をもとに、B橋での詳細調査に必要な項目の案を以下に示す。

表-4.7.1 B橋詳細調査項目一覧

分類	項目	内容	数量	備考
電気防食範囲内 コンクリート	詳細目視	劣化調査資料をもとに確認		
陽極 陽極分配材	被覆モルタル、パテ 材劣化部	詳細目視 チタンメッシュの剥落部 チタングリッドのひびわれ部 流電陽極のパテ変状	劣化部	
直流電源装置	通電測定 (電圧・電流)	通電電圧 通電電流（電流密度）	3方式	
	鉄筋電位測定 (照合電極)	オン電位 インスタントオフ電位 オフ電位	モタリング 12箇所	
		チタングリッド G3 桁 照合電極	1箇所	
配線配管	結線部の確認	プルボックス内の目視 結線部の状況確認	可能な範 囲で	
	分配電流の確認	クリップオン電流計による 分配電流確認		

## 5. C橋

### 5.1 対象橋梁の概要

橋梁の概要を表-5.1.1に示す。

表-5.1.1 C橋概要

名称	C橋		
所在地	九州地方	路線名	一般国道220号
橋梁管理者	九州地方整備局宮崎河川国道事務所	竣工	1963年4月
構造形式	RC桁橋 2径間, 橋長30.0m, 全幅員9.25m		
海岸からの距離	約20m	日交通量	6,935台 (大型車台数不明)
凍結防止材の散布	なし		

<調査写真>



C橋全景 (海側より)

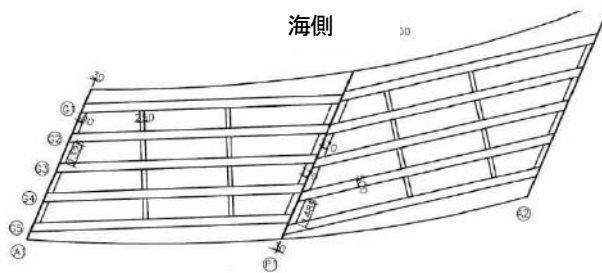


桁下の状況

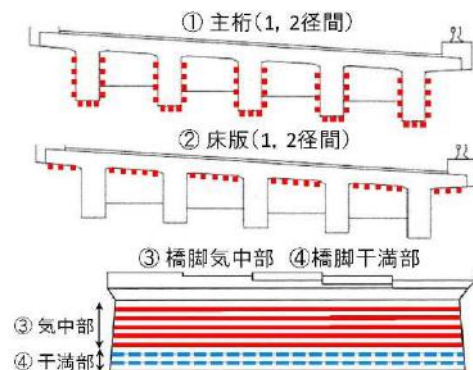


P1 橋脚の状況

<橋梁概要図, 電気防食概要図>



C橋平面図



陽極配置図 (チタンリボンメッシュ方式)

## 5.2 電気防食に関する事項（調査票より）

電気防食に関する事項を表-5.2.1に示す。

表-5.2.1 電気防食に関する事項（C橋）

電気防食適用前の補修	あり（1991年度 表面被覆）※供用開始約28年後
電気防食適用前の劣化調査	1991年度実施 劣化要因：塩害 ひび割れ：あり 剥離・剥落：あり 塩化物イオン量 2.20kg/m <sup>3</sup> （G1桁 表面から40mm, かぶり47mm） 0.97kg/m <sup>3</sup> （G2桁 表面から40mm, かぶり47mm）
電気防食施工年度	2005年度 ※電防経過年数14年（調査時）
電気防食方式	チタンリボンメッシュ方式
電気防食適用径間	2径間
電気防食面積	570 m <sup>2</sup>
防食回路数	4回路（主桁, 床版, P1橋脚気中部, P1橋脚干満部）
全体工事費	4,472万円
補修工種	電気防食+橋面防水+表面被覆+断面修復
適用部位	主桁, 床版, 橋脚
電気防食設計・竣工図書	あり（別紙）

## 5.3 電気防食の維持管理に関する事項（調査票より）

電気防食の維持管理に関する事項を表-5.3.1に示す。

表-5.3.1 電気防食の維持管理に関する事項（C橋）

点検の有無	あり	
点検手法	現地点検	
点検項目・頻度	1. パイロットランプ点灯確認	1回のみ
	2. 電源装置目視	1回のみ
	3. 配線・配管・プルボックスの目視	1回のみ
	4. 陽極材の設置状況目視	1回のみ
	5. 各回路の電流量	1回のみ
	6. 各回路の電圧量	1回のみ
	7. 鉄筋電位（On電位, Instant Off電位）	1回のみ
	8. 復極量	1回のみ
	9. 臨時点検	なし

## 5.4 定期点検結果他に関する事項（調査票より）

電気防食の定期点検結果他に関する事項を表-5.4.1 に示す。

表-5.4.1 定期点検結果他（C橋）

定期点検結果（2014年11月）	対策区分：C 速やかに補修等を行う必要がある	
電気防食適用後の不具合 (アンケート結果及び 概略調査結果より)	1. 電気防食範囲内コンクリート	あり（ひび割れ，浮き）
	2. 陽極材および陽極分配材	あり（P1 橋脚 A2 側陽極材の一部露出）
	3. 直流電源装置	あり（一部通電なし）
	4. 配線配管	あり（配管材脱落）
	5. その他	あり

## 5.5 外観目視調査結果

### 5.5.1 電気防食対象範囲内コンクリート

外観目視調査の結果，桁の一部にひび割れや浮きなどが確認された。



写真-5.5.1 A1-P1 G2 桁 ひび割れ



写真-5.5.2 P1-A2 G4 桁 ひび割れ

### 5.5.2 陽極材および陽極分配材の状況

主桁および床版に陽極材や電流分配材の変状は特に確認されていない。しかし，P1 橋脚側面の河床付近で，陽極被覆モルタルの剥がれや変色が確認された。



写真-5.5.3 P1 橋脚 A2 側 被覆モルタル

### 5.5.3 直流電源装置

直流電源装置は全回路が運転されており、箱体外面に損傷等は認められなかった。通電状態の簡易測定の結果、No.1回路（主桁）、No.2回路（床版）は復極量も満足しており特に問題はなかった。No.3回路（P1橋脚気中部）、No.4回路（PI橋脚干満部）は、配管材の脱落のため通電が遮断されており、測定不能な状態であった。



写真-5.5.4 直流電源装置（全景）



写真-5.5.5 直流電源装置（内部）

### 5.5.4 配線配管材

P1橋脚A1側において配線配管の脱落が確認された。なお、A2側配管材上に流水跡と思われる小石の存在が確認されており、水位上昇を繰り返したことで配管材の脱落に至った可能性も考えられるが、詳細調査により配管材の固定状況を確認の上、脱落原因の推定を行う必要がある。



写真-5.5.6 配管材の脱落（P1橋脚A1側）

### 5.5.5 電気防食対象範囲外の変状

電気防食対象範囲外において、横桁の浮き、落橋防止システムの浮き（コンクリート）、支承の腐食が確認された。

### 5.5.6 周囲環境条件

A1-P1 側においては水の流れもなく、脚立もしくは簡易枠組足場等に対応可能であるが、P1-A2 側は水量が多く流れもあるため、A2 側で調査を行う場合、強固な足場もしくは橋面からの橋梁点検車が必要であることを確認した。

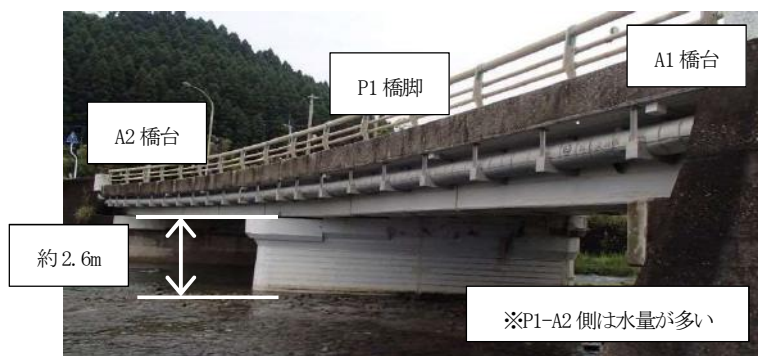


写真-5.5.7 C橋の調査環境

### 5.6 書類調査

C橋では電気防食施工約8年経過後に、電気防食の点検および構造物の調査を実施していた。調査項目としては、電気防食システムの外観目視、防食効果の確認であった。電位測定は2014年に実施されている。主桁、床版については復極量100mV以上を満足しており、防食効果が得られていることが確認されているが、P1橋脚回路においては、配管材の脱落により配線が断線しており、測定不可として報告されている。



写真-5.5.8 P1 橋脚部配管材の脱落（定期点検資料より）

## 5.7 詳細調査項目（案）

概略調査結果をもとに、C橋での詳細調査に必要な項目の案を以下に示す。

表-5.7.1 C橋詳細調査項目一覧

分類	項目	内容	数量	備考
電気防食範囲内コンクリート	表面電位分布	電気防食範囲内劣化部における外部照合電極による電位変化の確認	2箇所程度	
	ひびわれ	位置、深さ、錆汁の有無等の詳細確認	2箇所程度	
陽極陽極分配材	被覆モルタルの変色	A1橋脚P2側（下部） 変色部のサンプリング（分析） はつり調査（かぶり厚確認、陽極材劣化度確認）	2箇所程度	
直流電源装置	通電測定 （電圧・電流）	通電電圧 通電電流（電流密度）	4回路	
	鉄筋電位測定 （照合電極）	オン電位 インスタントオフ電位 オフ電位	モニタリング 10箇所	
配線配管材	配管材脱落部の確認	A1橋脚P1側 水位上昇跡等の確認		
	結線部の確認	プルボックス内の目視 結線部の状況確認	可能な範囲で	
	分配電流の確認	P1橋脚A1側とA2側の分配確認	2回路	配線復旧後



## 6. Z橋

### 6.1 対象橋梁の概要

橋梁の概要を表-6.1.1に示す。

表-6.1.1 Z橋概要

名称	Z橋		
所在地	沖縄県	路線名	一般国道331号
橋梁管理者	沖縄総合事務局南部国道事務所	竣工	2002年3月
構造形式	プレビーム合成桁 2径間, 橋長56m, 全幅員40.8m		
海岸からの距離	約0m	日交通量	3,173台 (大型車164台)
凍結散布材の散布	なし		

<調査写真>

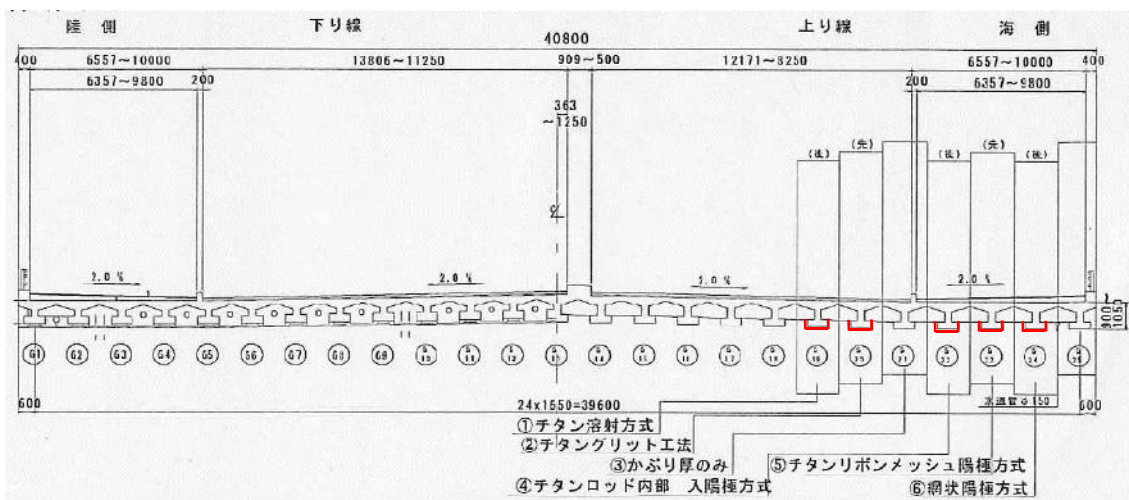


Z橋全景



電気防食対象(桁下面)

<橋梁概要図, 電気防食概要図>



下フランジを防食

## 6.2 電気防食に関する基本的項目（調査票より）

電気防食に関する事項を表-6.2.1に示す。新設時より電気防食が適用されている。

表-6.2.1 電気防食に関する事項（Z橋）

電気防食適用前の補修	なし ※新設時からの適用
電気防食適用前の劣化調査	なし
電気防食施工年度	2002年度 3月 ※電防経過年数13年（調査時）
電気防食方式	上り線 (G19)：チタン溶射方式 上り線 (G20)：チタングリッド方式 上り線 (G21)：かぶり厚のみ 上り線 (G22)：チタンロッド方式 上り線 (G23)：チタンリボンメッシュ方式 上り線 (G24)：チタンメッシュ方式
電気防食適用径間	2径間
電気防食面積	380 m <sup>2</sup>
防食回路数	6回路（各方式1回路）
全体工事費	不明
補修工種	電気防食のみ（新設時）
適用部位	桁下面
電気防食設計・竣工図書	あり（別紙）

## 6.3 維持管理に関する事項（調査票より）

電気防食の維持管理に関する事項を表-6.3.1に示す。

表-6.3.1 電気防食の維持管理に関する事項（Z橋）

点検の有無	なし	
点検手法	遠隔モニタリングシステム	
点検項目・頻度	1. パイロットランプ点灯確認	なし
	2. 電源装置目視	なし
	3. 配線・配管・プルボックスの目視	なし
	4. 陽極材の設置状況目視	なし
	5. 各回路の電流量	なし
	6. 各回路の電圧量	なし
	7. 鉄筋電位 (On 電位, Instant Off 電位)	なし
	8. 復極量	なし
	9. 臨時点検	なし

## 6.4 定期点検結果他に関する事項（調査票より）

電気防食の定期点検結果他に関する事項を表-6.4.1 に示す。

表-6.4.1 定期点検結果他（Z橋）

定期点検結果	対策区分：A 損傷がみとめられないか、損傷が軽微で補修を行う必要がない	
電気防食適用後の不具合 (アンケート結果及び 概略調査結果より)	1. 電気防食範囲内コンクリート	なし
	2. 陽極材および陽極分配材	なし
	3. 直流電源装置	あり
	4. 配線配管	なし
	5. その他	なし

## 6.5 外観目視調査結果

### 6.5.1 電気防食対象範囲内コンクリート

電気防食が適用されたコンクリート表面に、目立った変状等は確認されなかった。

### 6.5.2 陽極材および陽極分配材の状況

各方式の現状写真を示す。護岸からの目視においては特に変状は確認されなかった。



写真-6.5.1 チタン溶射方式（No. 1 回路）※後施工

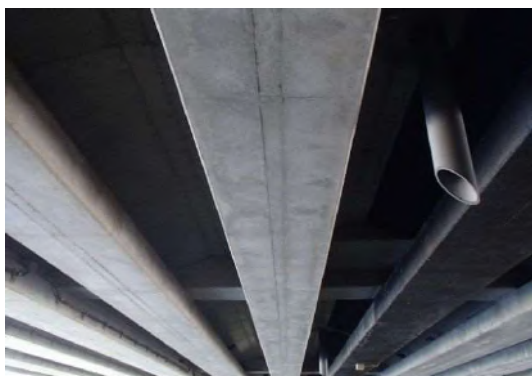


写真-6.5.2 チタングリッド方式（No. 2 回路）※先施工





写真-6.5.3 チタンロッド方式 (No. 3 回路) ※先施工



写真-6.5.4 チタンリボンメッシュ方式 (No. 4 回路) ※先施工



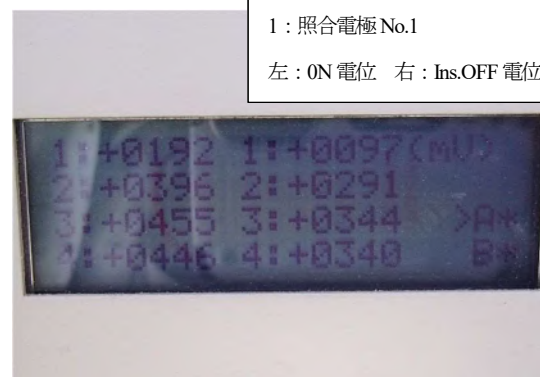
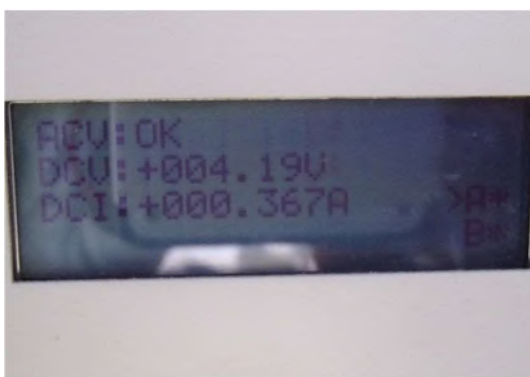
写真-6.5.5 チタンメッシュ方式 (No. 5 回路) ※後施工

### 6.5.3 直流電源装置

直流電源装置の箱体外面に損傷等は認められなかった。遠隔モニタリングシステムが設置されており、簡易測定の結果、No.4回路の電源がOFFであり遠隔モニタリングの表示も消えていた。また、No.5回路において通電電流および電圧の計測ができない状態であった。



写真-6.5.6 直流電源装置, 遠隔モニタリングシステム



1 : 照合電極 No.1  
左 : 0N 電位 右 : Ins.OFF 電位

写真-6.5.7 遠隔モニタリング表示値 (正常の場合)



上段 : 電圧値 (ゼロ)  
下段 : 電流値 (ゼロ)

写真-6.5.8 遠隔モニタリング表示値の異常 (No. 5 回路)

#### 6.5.4 配線配管材

各方式において配管材があり、チタン溶射方式のみプルボックスが設置されていた。表面に汚れや変色があるものの、損傷劣化等は特に確認されなかった。



写真-6.5.9 配管材（電線管）



写真-6.5.10 プルボックス

#### 6.5.5 電気防食対象範囲外の変状

Z橋はPC桁25本で構成されており、そのうち電気防食適用桁は5本である。他の桁についても簡易目視を行ったが、特に劣化等は確認されなかった。

#### 6.5.6 周囲環境条件

桁端部は護岸ブロックより点検が可能であるが、大部分が川面上にあることから、近接しての詳細調査を行う場合は、小型船または橋梁点検車を用いての点検となることを確認した。



写真-6.5.11 Z橋全景

#### 6.6 書類調査

Z橋では電気防食適用から約13年経過しているが、アンケートの回答からは電気防食に関する点検は行われていないとの回答であった。現場事務所のヒアリングでも、遠隔モニタリングシステムの存在について担当者レベルで把握されていない状況であった。また、管理事務所にあるべき遠隔モニタリングシステム親機の存在が不明であった。

電気防食の適用開始から、遠隔モニタリングシステム自体の点検が行われておらず、詳細調査により、現地測定値と遠隔モニタリングシステム値との整合性を確認する必要があると判断された。

## 6.7 詳細調査項目（案）

概略調査結果をもとに、Z橋での詳細調査に必要な項目の案を以下に示す。

表-6.7.1 Z橋詳細調査項目一覧

分類	項目	内容	数量	備考
電気防食範囲内 コンクリート	詳細目視	劣化調査資料をもとに確認		
陽極 陽極分配材	詳細目視	劣化調査資料をもとに確認		
直流電源装置	通電測定 (電圧・電流)	通電電圧 通電電流（電流密度）	5方式	遠隔モニタリ ングシステム との整合性確 認
	鉄筋電位測定 (照合電極)	オン電位 インスタントオフ電位 オフ電位	モニタリ ング 10箇所	
配線配管	結線部の確認	プルボックス内の目視 結線部の状況確認	可能な範 囲で	
	分配電流の確認	クリップオン電流計による 分配電流確認		





## 2. 詳細調査内容

### 2.1 調査内容

A橋における詳細調査は、先に実施した概略調査結果に基づき、下記の項目について実施した。

表-2.1.1 A橋詳細調査項目

調査区分	No	対象位置および項目	内容
測定調査	1	G3桁下フランジ変状部	表面電位分布測定
	2	チタンロッド陽極	陽極設置間隔の確認 (G3桁, G4桁)
	3	分配電流測定	直流電源装置位置 (全回路) プルボックス内 (G3桁, G4桁)
	4	通電状態の測定	通電電圧, 通電電流の測定 オン電位, インスタントオフ電位, オフ電位の測定
	5	G6桁下フランジ部	過年度測定異常値の確認 (分配電流等)
目視調査	6	プルボックス内	結線部の目視確認等
	7	配線配管材	変状部の目視確認等

### 3. 詳細調査結果

調査は第2 径間 G3 桁および G4 桁を対象に、仮設足場を設置して調査を実施した。

#### 3.1 G3 桁の詳細調査

##### 3.1.1 G3 桁の下フランジの変状

A橋の G3 桁では、下フランジ部に写真-3.1.1 に示すコンクリートの剥落や、写真-3.1.2 に示すような茶褐色の変状が認められたため、各種調査を実施した。



写真-3.1.1 G3 桁の変状部



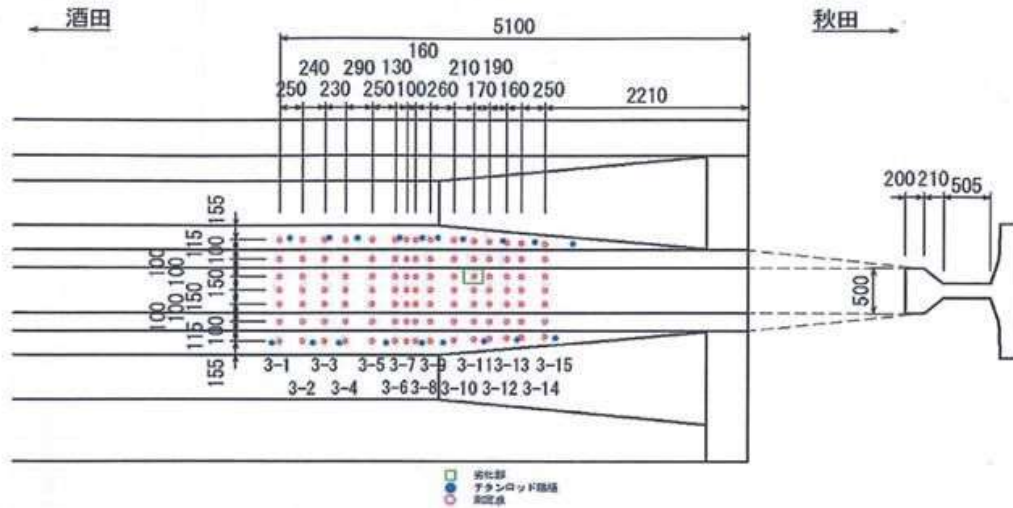
写真-3.1.2 G4 桁被覆モルタル剥落部

##### 3.1.2 表面電位分布測定結果 (G3 桁・G4 桁)

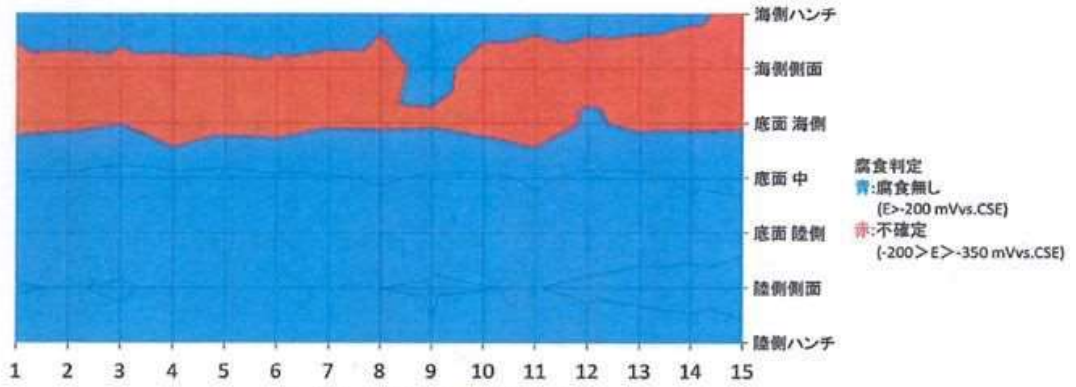
鉄筋の自然電位は、G3桁およびG4桁ともに海側ハンチから底面にかけて $-200\text{mV}$  (vs.CSE) より卑な電位が確認され、腐食の程度は不確定の領域が多い。陸側に向かうにつれて、ASTMの防食基準において腐食なしの領域となっていた。

分極量の分布については、G3桁では $100\text{mV}$ 以上の分極量が得られている範囲が多く、劣化部付近で $50\text{mV}$ 未満の分極量となっていた。その他、底面では $50\text{mV}$ 以上 $\sim 100\text{mV}$ 未満の分極量の範囲が多く存在した。一方、G4桁では $50\text{mV}$ 以上 $\sim 100\text{mV}$ 未満の分極量の範囲が大半を占め、一部は $50\text{mV}$ 未満の分極量の位置も存在した。ただし、 $50\text{mV}$ 未満の分極量の範囲においても、現在、劣化は顕在化していない。自然電位、分極量の分布を図-3.1.1、図-3.1.2に示す。

### G3桁測定点図



### G3桁 自然電位分布図



### G3桁 分極量分布図

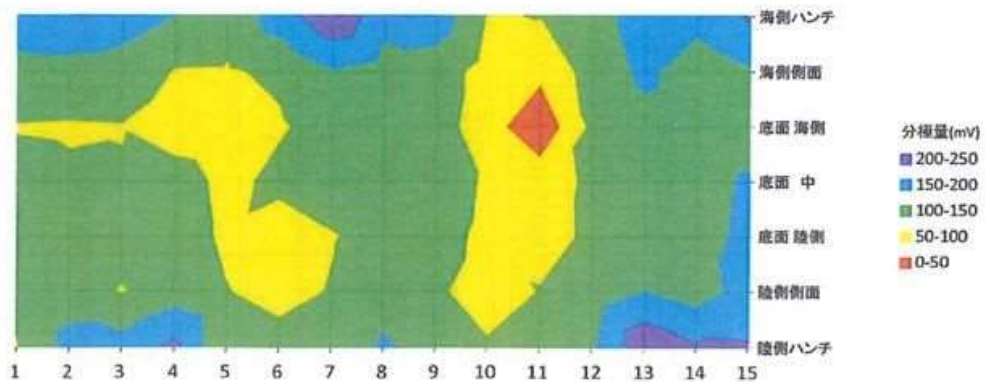
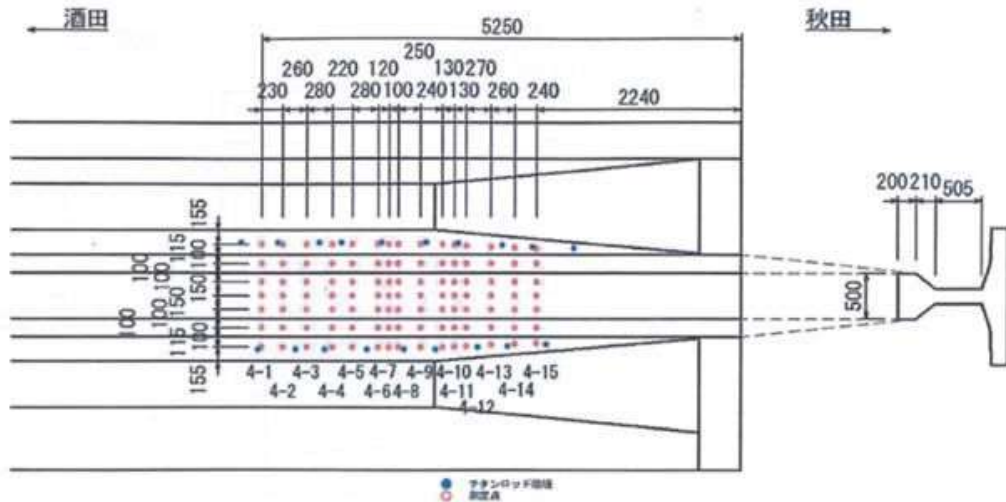
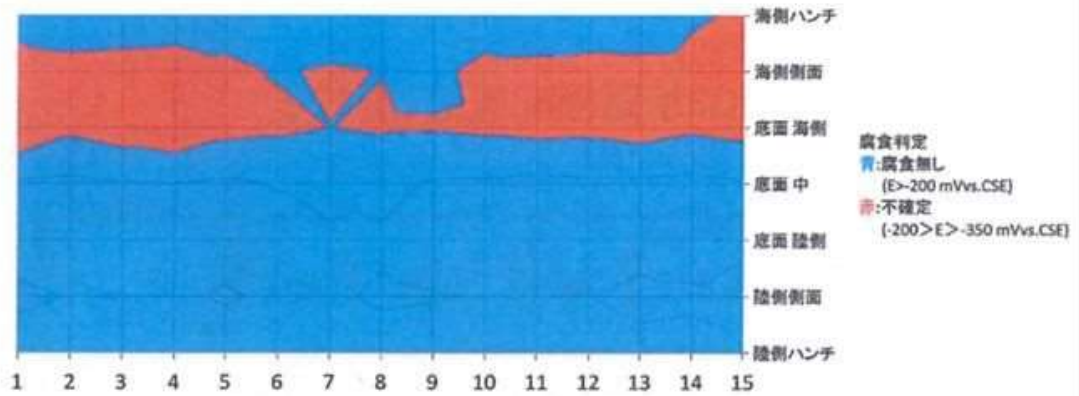


図-3.1.1 G3桁の自然電位, 分極量分布図

### G4桁測定点図



### G4桁 自然電位分布図



### G4桁 分極量分布図

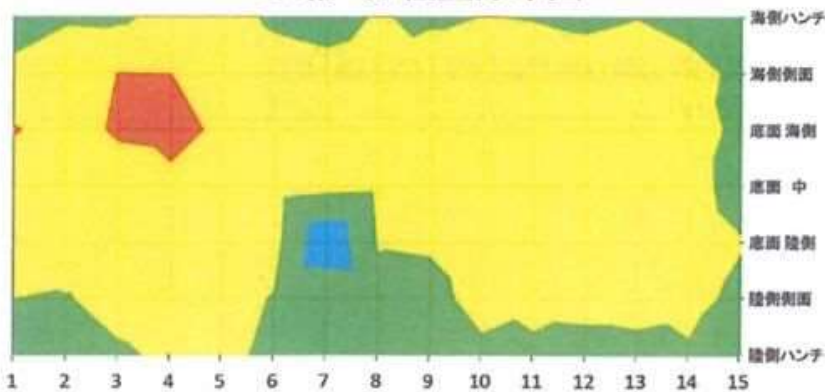


図-3.1.2 G4 桁の自然電位, 分極量分布図

### 3.2 チタンロッド陽極設置間隔調査結果

#### 3.2.1 調査結果

足場仮設範囲内におけるG3桁およびG4桁の陽極設置間隔を測定した結果を図-3.2.1、図-3.2.2に示す。測定の結果では、G3桁およびG4桁ともに設計上の陽極設置間隔は380mm～420mmであるのに対し、実際はG3桁で230mm～510mm、G4桁では240mm～490mmであり、設計値から大きく逸脱していた。これは、実際の配筋位置が設計値と異なっていたため、施工時に陽極設置位置を変更したものと推測される。

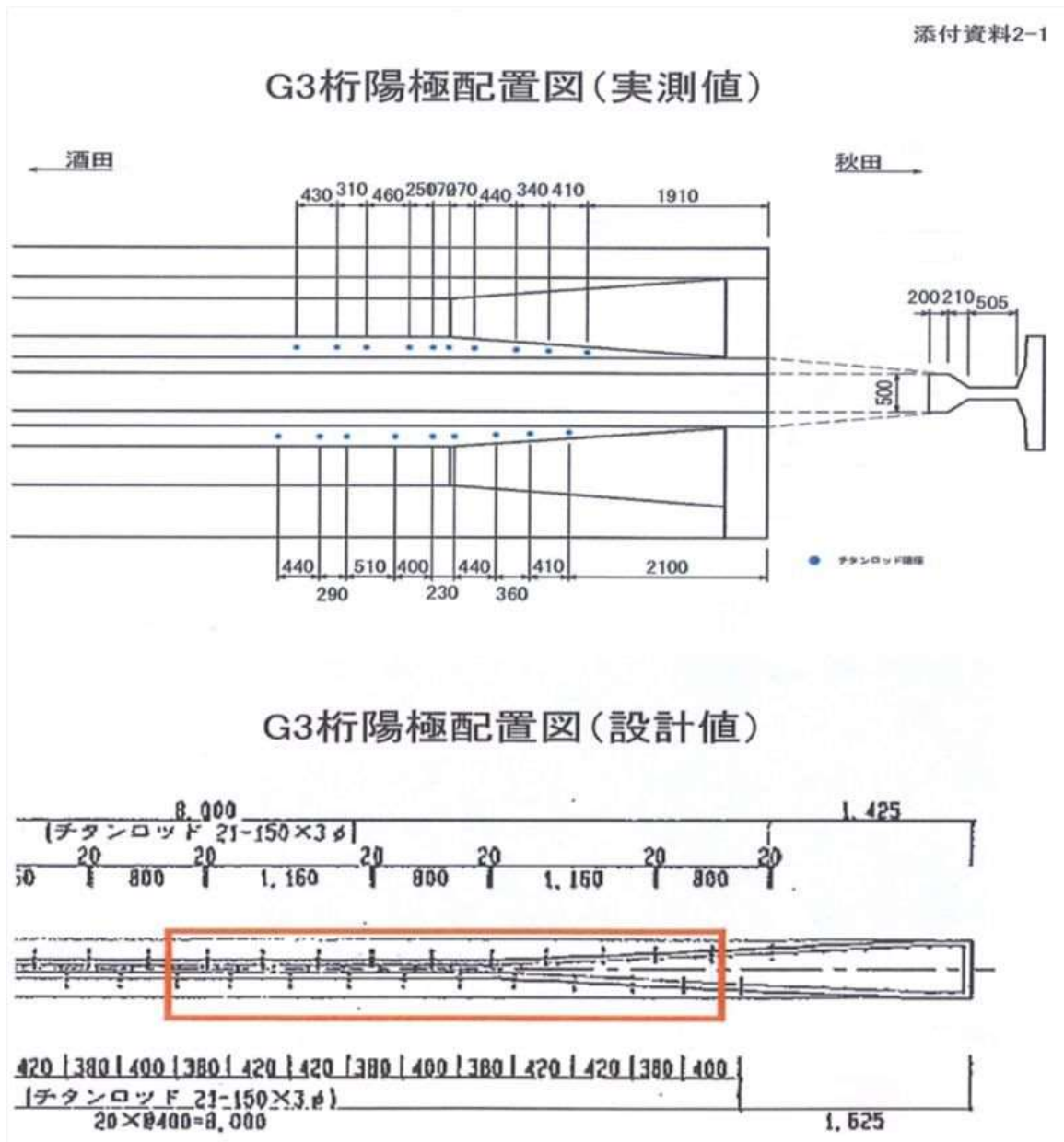
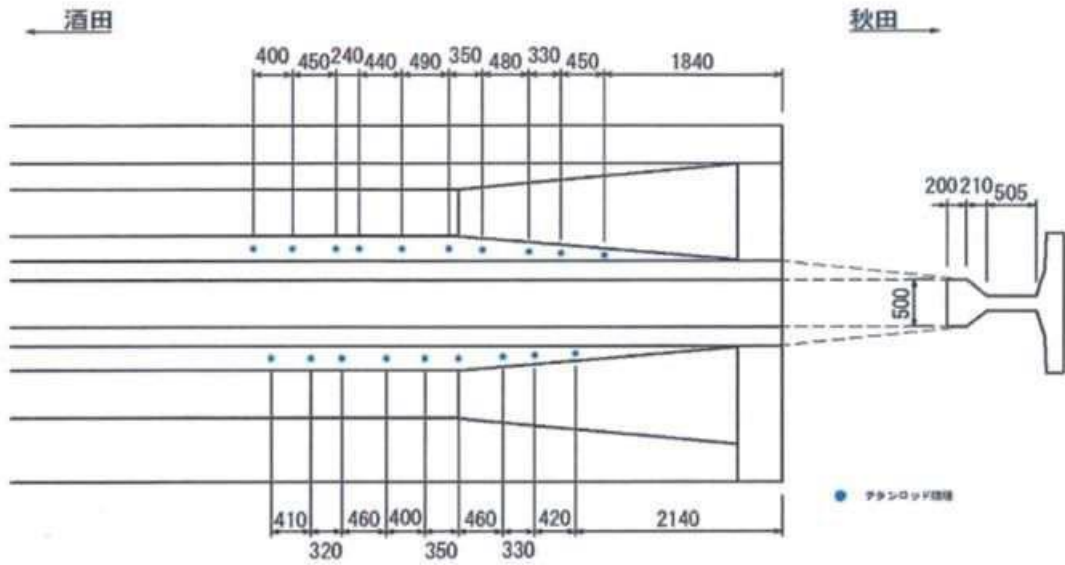


図-3.2.1 G3桁のチタンロッド陽極位置測定結果

### G4桁陽極配置図(実測値)



### G4桁陽極配置図(設計値)

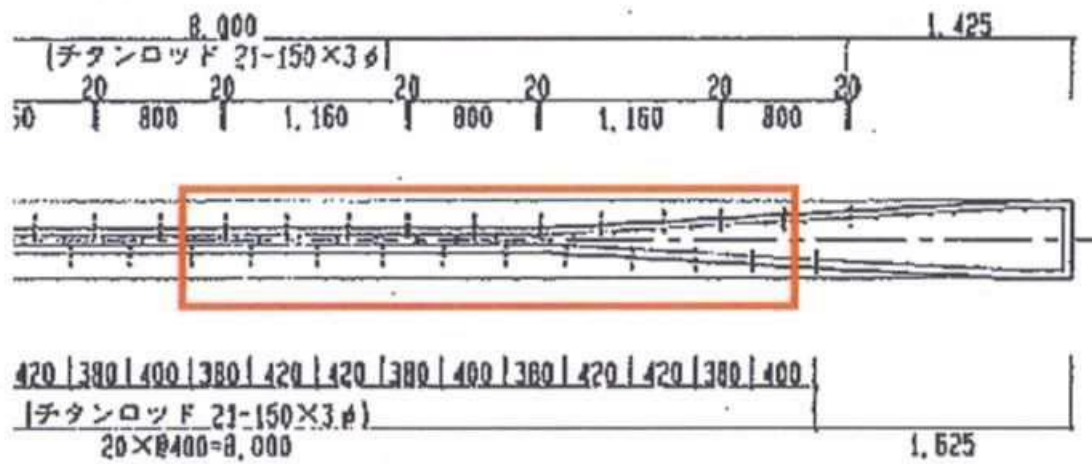


図-3.2.2 G4桁のチタンロッド陽極位置測定結果

### 3.3 分配電流測定結果

#### 3.3.1 調査結果

各防食回路における各桁への分配電流をクリップオン電流計により測定した（表-3.3.1）。なお、後のプルボックス内点検で確認した結果、直流電源装置位置では陽極ケーブルが各回路2本接続されていたが、設計図書と異なり、直流電源装置には各桁それぞれの陽極ケーブルが配線されていないことが判明した（図-3.3.1および図-3.3.2）。このため、No.3.1回路とNo.3.2回路のプルボックスで無抵抗電流計を用いて直接分配電流を測定した。

その結果、表-3.3.2に示すように回路No.3.1ではG3桁に35.4mA（55.7%）、G4桁には28.1mA（44.3%）の電流が流れていた。また回路No.3.2ではG5桁に16.4mA（58.8%）、G6桁には11.5mA（41.2%）の割合で電流が流れていた。極端に大きい分配差は認められないが、概ね6:4程度の割合で防食電流に差が生じていた。

表-3.3.1 直流電源装置位置における分配電流測定結果

回路 No.	スパン	通電電圧 (V)	通電電流 (A)	桁	分配電流 (A)	防食面積 (㎡)	電流密度 (mA/㎡)
1.1	1	6.0 (6.06)	0.06 (0.07)	G1	0.07	23	3.0
				G2	0.02	23	0.9
1.2		6.5 (6.62)	0.05 (0.08)	G3	0.05	23	2.2
				G4	0.00	23	0.0
2.1		6.0 (6.11)	0.06 (0.05)	G5	0.03	23	1.3
				G6	0.01	23	0.4
2.2	2	6.2 (6.22)	0.03 (0.04)	G1	0.02	23	0.9
				G2	0.02	23	0.9
3.1		6.5 (6.65)	0.04 (0.06)	G3	0.06	23	2.6
				G4	0.01	23	0.4
3.2		6.8 (7.02)	0.02 (0.02)	G5	0.04	23	1.7
				G6	0.00	23	0.0

注1) 通電電圧および通電電流は、直流電源装置表示値であるが、（ ）内は幹線ケーブルで直接測定した値を示す。

注2) 分配電流は、クリップオン電流計で測定しているため精度は低い。

注3) 後に、プルボックス内確認を実施した結果、直流電源装置位置では分配電流は測定できないことが判明した。したがって、測定可能な3.1回路および3.2回路でプルボックス内結線を一時切断し、分配電流を測定した。

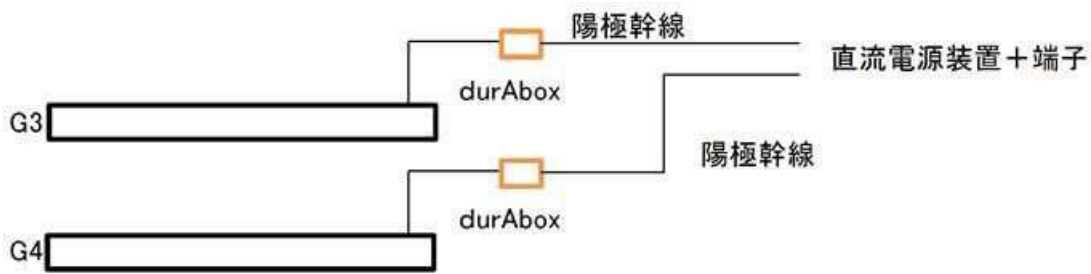


図-3.3.1 設計図書に示されている陽極接続図

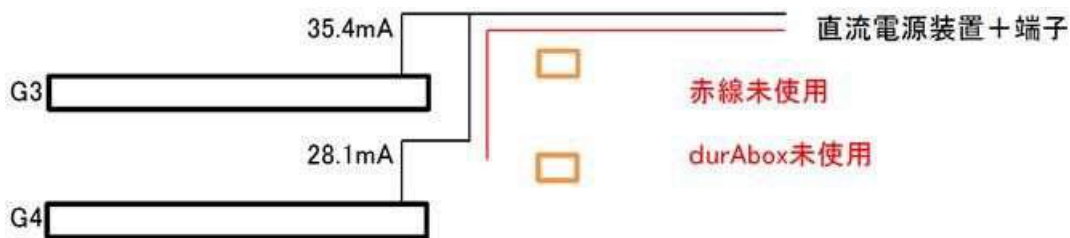


図-3.3.2 実際の陽極接続図と分配電流

表-3.3.2 プルボックス内における分配電流測定結果 (3.1回路および3.2回路)

回路 No.	スパン	通電電流 (mA)	桁	分配電流 (A)	防食面積 (m <sup>2</sup> )	電流密度 (mA/m <sup>2</sup> )	分配割合	備考
3.1		63.5	G3	35.4	23	1.5	55.7	
			G4	28.1	23	1.2	44.3	
3.2	2	27.9	G5	16.4	23	0.7	58.8	DurAboxなし
			G6	11.5	23	0.5	41.2	DurAboxなし
3.2		27.6	G5	15.8	23	0.7	57.2	DurAboxなし
			G6	11.8	23	0.5	42.8	DurAboxあり



### 3.4 通電状態測定結果

#### 3.4.1 電圧, 電流測定結果

各防食回路の通電電圧および通電電流を直流電源装置位置で測定した（測定結果は次項の電位測定結果と合わせて表-3.4.1に示す）。通電電圧・通電電流ともに直流電源装置表示値と若干の差はあるものの大きな差は認められず、安定した通電状態であった。通電電流から算出した通電電流密度は、0.4~1.3mA/m<sup>2</sup>で、比較的小さい電流密度での通電であった。また、電源電圧は、電源装置のリミッター（7V）の限界に近い6~6.8V程度であった。なお、復極量不足が確認されているG6桁の通電電流量は0.4mAで、最も小さく、通電時電圧は6.8Vと最も大きい電圧が印加されていた。

#### 3.4.2 電位測定結果

各防食回路の電圧・電流測定結果、および埋設照合電極での電位測定結果を表-3.4.1、図-3.4.1に、復極量測定イメージを図-3.4.2に示す。

表-3.4.1 電流・電圧・電位測定結果

照合電極: 二酸化マンガン照合電極												
回路No.	スパン	桁	通電電圧 (V)	通電電流 (A)	防食面積 (m <sup>2</sup> )	電流密度 (mA/m <sup>2</sup> )	照合電極 No.	On電位 (mV)	Ins.Off電位 (mV)	Off電位 (mV)	復極量 (mV)	備考
1.1	1	G1, G2 (G1)	6.0 (6.06)	0.06 (0.07)	46	1.3 (1.5)	Re-1	-536	-518	-205	313	PC線
							Re-2	-367	-365	-244	121	下フランジ底面
							Re-3	—	—	—	—	電防対象外
1.2		G3, G4 (G3)	6.5 (6.62)	0.05 (0.08)	46	1.1 (1.7)	Re-4	-316	-310	-215	95	PC線
							Re-5	-282	-279	-164	115	下フランジ底面
							Re-6	—	—	—	—	電防対象外
2.1		G5, G6 (G5)	6.0 (6.11)	0.06 (0.05)	46	1.3 (1.1)	Re-7 <sup>*1)</sup>	+230	+230	+21	-209	PC線
							Re-8	-418	-404	-267	137	下フランジ底面
							Re-9	—	—	—	—	電防対象外
2.2	2	G1, G2 (G2)	6.2 (6.22)	0.03 (0.04)	46	0.7 (0.9)	Re-10 <sup>*1)</sup>	-341	-305	-173	132	PC線
							Re-11	-255	-250	-163	87	下フランジ底面
							Re-12	—	—	—	—	電防対象外
3.1		G3, G4 (G4)	6.5 (6.65)	0.04 (0.06)	46	0.9 (1.3)	Re-13 <sup>*1)</sup>	+240	+236	-84	-320	PC線
							Re-14	-257	-254	-167	87	下フランジ底面
							Re-15	—	—	—	—	電防対象外
3.2	G5, G6 (G6)	6.8 (7.02)	0.02 (0.02)	46	0.4 (0.4)	Re-16 <sup>*1)</sup>	-362	-359	-290	69	PC線	
						Re-17	-199	-198	-130	68	下フランジ底面	
						Re-18	—	—	—	—	電防対象外	

- \*1) Re-7,10,13,16については過去の点検結果からも電位の不安定や照合電極の不良が確認されていた。  
 →通電電圧および通電電流は、直流電源装置表示値であるが、( )内は幹線ケーブルで直接測定した値を示す。  
 →防食面積は概算面積 (1桁23m<sup>2</sup>×2桁=46m<sup>2</sup>)

Re-4,11,14,16,17で100mV未満の復極量となった。なおRe-7,10,13,16（モニタリング対象；PC鋼線）では電位の不安定や照合電極の不良（過去の測定記録より）が確認されている（全照合電極12本中4本）。正常と判断される照合電極のうち、復極量不足は下フランジ底面部(Re-11,14,17)が最も多く、1箇所(Re-4)はPC鋼線位置における復極量不足であった。なお、すべての照合電極位置で過防食電位まで電位が卑化した照合電極は認められなかった。

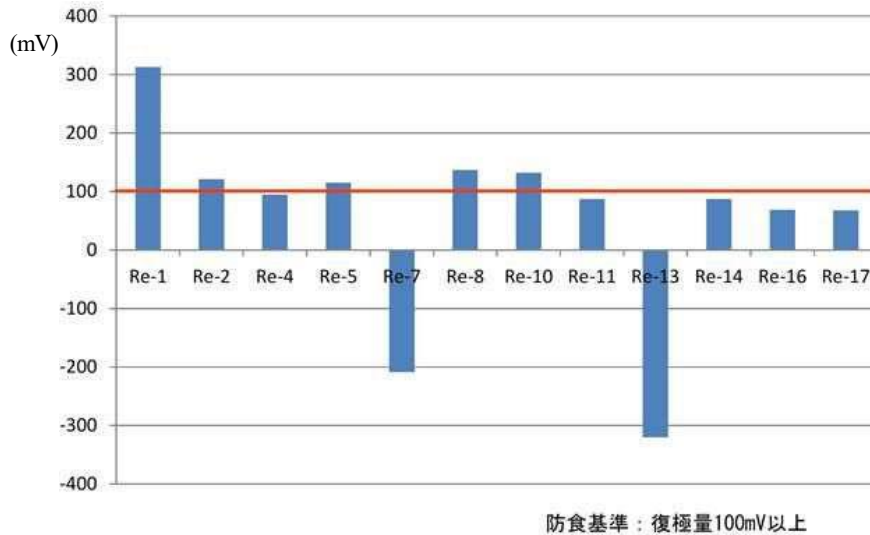


図-3.4.1 防食効果（復極量）一覧

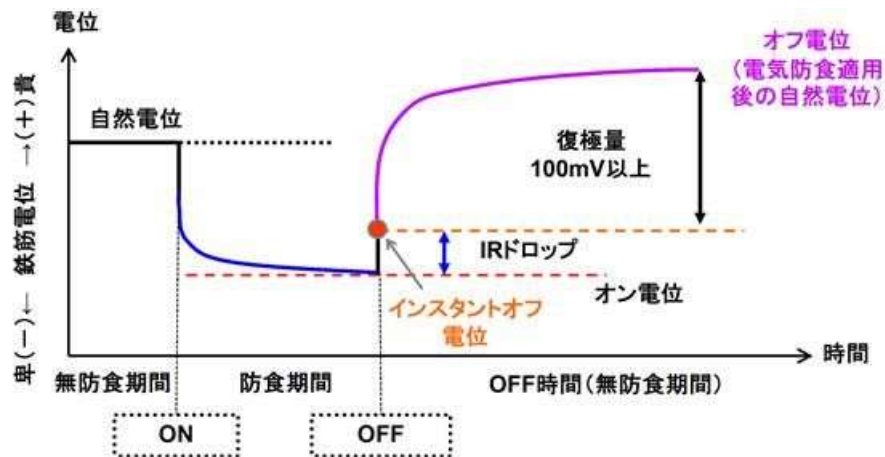


図-3.4.2 電位測定（復極量測定）イメージ図

### 3.5 G6 桁下フランジの測定電位の異常

#### 3.5.1 測定結果

平成27年1月の段階で管理者が行った電気防食の点検結果によれば、G6桁の下フランジの測定で異常な電位が測定されており、防食効果の判定ができていない。そのため、今回の詳細調査においてG6桁の通電量調査を実施し、測定電位の検証と防食効果の判断を行った。

その結果、表-3.5.1 に示すように回路 No.3.2 では G5 桁に 16.4mA (58.8%) , G6 桁には 11.5mA (41.2%) の割合で電流が流れていた。極端に大きい分配差は認められないが、概ね 6:4 程度の割合で防食電流に差が生じていた。なお、G6 桁には電流の分配差を極力小さくするための durAbox が設置されていた。そのため、durAbox ありの場合の分配電流も測定したが、図-3.5.1, 図-3.5.2 に示すように durAbox ありとなしの大きな差は認められなかった。

表-3.5.1 回路No. 3. 2分配電流測定結果

回路 No.	スパン	通電電圧 (mA)	桁	分配電流 (A)	防食面積 (m <sup>2</sup> )	電流密度 (mA/m <sup>2</sup> )	分配割合	備考
3.2	2	27.9	G5	16.4	23	0.7	58.8	DurAboxなし
			G6	11.5	23	0.5	41.2	DurAboxなし
3.2	2	27.6	G5	15.8	23	0.7	57.2	DurAboxなし
			G6	11.8	23	0.5	42.8	DurAboxあり

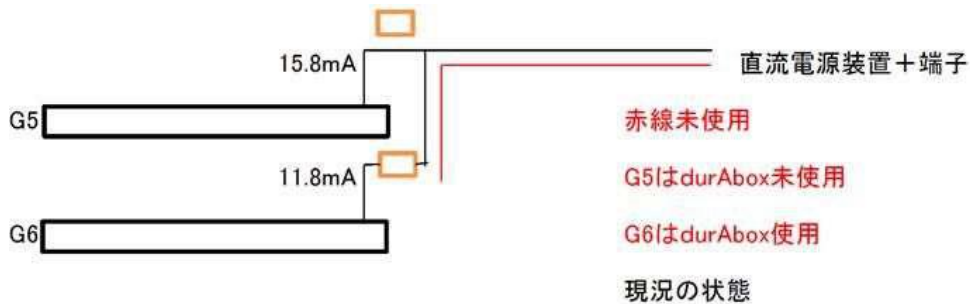


図-3.5.1 G5 および G6 桁の現況の分配電流

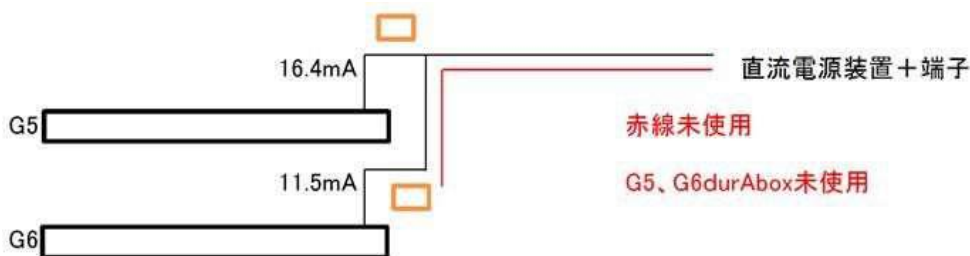


図-3.5.2 G5 および G6 桁で durAbox 未使用の場合の分配電流

調査前に確認できていた復極量不足の防食回路No.3.2, Re-17 (No.2スパンG6桁) に対し, G6桁単独での通電調整試験結果を表-3.5.2, 表-3.5.3に示す。

G6桁にはdurAboxが設置されていたため, durAboxありの場合となしの場合の2パターンで通電調整試験(分極試験; E log I試験)を実施した。その結果, 1.0mA/m<sup>2</sup>程度の電流密度で100mV以上の電位変化量が得られることが確認できたが, この場合の通電電圧は, 10~13V程度であり, 通電電圧・通電電流測定で確認できたように既に7V近い通電電圧が負荷していること, 本電源装置には, コンダクターバー(チタン線)の損傷を考慮した電源電圧リミッター(上限7V)が設置してあること, および分配電流測定結果でG6桁への流入電流が若干少ないことから判断し, これ以上通電電流量を増加させることができないと考えた。試験後は, 現況復旧(durAbox接続)とした。

表-3.5.2 G6桁通電調整試験結果 (durAboxなし)

測定回数	通電電圧 (V)	通電電流 (mA)	防食面積 (m <sup>2</sup> )	電流密度 (mA/m <sup>2</sup> )	Re-16				Re-17				外部照合電極			
					自然電位 (mV)	On電位 (mV)	Ins.Off電位 (mV)	分極量 (mV)	自然電位 (mV)	On電位 (mV)	Ins.Off電位 (mV)	分極量 (mV)	自然電位 (mV)	On電位 (mV)	Ins.Off電位 (mV)	分極量 (mV)
1	6.81	12.50	23	0.54	-293	-365	-364	71	-134	-179	-179	45	699	660	660	39
2	10.23	18.75	23	0.82	-293	-394	-393	100	-134	-212	-212	78	699	629	629	70
3	13.50	25.00	23	1.09	-293	-411	-410	117	-134	-236	-236	102	699	552	552	147

照合電極種類 : 二酸化マンガン照合電極(埋設照合電極)、鉛照合電極(外部照合電極)

表-3.5.3 G6桁通電調整試験結果 (durAboxあり)

測定回数	通電電圧 (V)	通電電流 (mA)	防食面積 (m <sup>2</sup> )	電流密度 (mA/m <sup>2</sup> )	Re-16				Re-17				外部照合電極			
					自然電位 (mV)	On電位 (mV)	Ins.Off電位 (mV)	分極量 (mV)	自然電位 (mV)	On電位 (mV)	Ins.Off電位 (mV)	分極量 (mV)	自然電位 (mV)	On電位 (mV)	Ins.Off電位 (mV)	分極量 (mV)
1	6.55	12.50	23	0.54	-279	-373	-372	93	-128	-180	-180	52	697	603	605	92
2	10.01	18.80	23	0.82	-279	-426	-425	146	-128	-215	-215	87	697	559	559	138
3	13.30	25.00	23	1.09	-279	-462	-459	180	-128	-238	-238	110	697	539	539	158

照合電極種類 : 二酸化マンガン照合電極(埋設照合電極)、鉛照合電極(外部照合電極)

### 3.6 プルボックス内結線状況確認結果

#### 3.6.1 測定結果

足場仮設範囲内（No.2スパン）のA2側プルボックスを開放し、ボックス内の結線状況を目視にて確認した。各ボックス内には分配電流の均一化を図るためのdurAboxが収納されていたが、G6桁以外は陽極幹線が接続されていなかった（設計図書上は全て接続）。

また、各防食回路は2桁で1回路が構成され、各桁の陽極幹線はそれぞれ直流電源装置まで配線される設計となっていたが、実際には陽極幹線は2本の桁の始点で接続されており、陽極幹線は1本で直流電源装置まで配線されていた（直流電源装置に接続されていた2本の電線のうち、1本は陽極に接続されていなかった）。写真-3.6.1に回路No.2.2のボックス内結線状況を示す。コンクリート中から取り出した白いワイヤー線は陽極幹線である。ボックス内赤ケーブル線にG1桁およびG2桁ともに接続されていた。

各ケーブルの結線部はビニルテープによる養生のみであったが、ボックス内の結露もなく、端子部の腐食等も確認されなかった。テープ養生を撤去した部位は、自己融着テープ+ビニルテープで補修し復旧した。

G1桁プルボックス



G2桁プルボックス



写真-3.6.1 回路No. 2. 2プルボックス内配線接続状況

### 3.7 配管材状況確認結果

#### 3.7.1 測定結果

配線配管材に使用されている電線管（PF 管）の一部に割れが確認された。割れの発生部位は下フランジ部の曲げ部に見られた。PF 管損傷の状況を写真-3.7.1 に示す。



写真-3.7.1 配管材（PF 管）の損傷

## 4. 調査結果のまとめ

### 4.1 表面電位分布測定結果（G3桁・G4桁）

自然電位測定の結果から、海側ハンチ部や海側側面部の方が陸側に比べ卑な電位を示し、腐食程度が大きい傾向であると判断されるが、ASTM C 876の腐食判定では不確定領域（ $-200 \sim -350\text{mV vs CSE}$ ）であった。これは、海側からの塩化物イオンや水分等の供給が多いことから、鉄筋腐食についても若干海側に面している部分の方が腐食しやすい環境であることが推測できる。腐食の状況を写真-4.1.1に示す。



写真-4.1.1 G3桁の変状部

陽極設置間隔についてはそれが離れるほど、防食電流の減衰（消費）があるため、陽極から遠い位置の鉄筋では十分な防食状態が得られていない可能性が高い。このことから分配電流量が大きいG3桁に損傷が認められた原因としては、電気防食施工以前の腐食環境がG4桁よりも厳しかったことに加え、陽極配置の遠近による防食効果の差があげられる。

分極量についての調査によれば、G3桁とG4桁では腐食のあるG3桁のほうに分配電流が多く供給されている（図-3.1.1、図-3.1.2）ため、分極量も大きいと考えられる。しかしながら本橋では、チタンロッド陽極がハンチ部から設置されているためG3桁下フランジ底面部への電流分布が悪く、電位変化量（分極量）が少なくなる傾向であったこと、チタンロッド陽極の配置が設計と異なっており、1本の陽極からの防食電流供給範囲が明確になっていなかった（例えば、チタンリボンメッシュ方式であれば、陽極設置間隔は最大300mmである）ことも腐食の原因の1つと考えられる。

なお、G3桁腐食箇所の更なる劣化防止のためには、一般的には防食電流を増加する方法があるが、現時点での電圧が6V以上と高いことから防食電流を増加させることが不可能である（本電源装置には最大電圧7Vのリミッターが装備されているため）。本橋では分極量不足を改善する方法として新たに電源装置を追加して別回路を構成するか、他の陽極システムを新たに設置し防食回路を構成する必要がある。

## 4.2 durAbox の設置について

durAboxは、図-4.2.1に例示するように、桁内の接地抵抗より大きい抵抗を負荷することにより、環境条件等により生じる陽極接地抵抗の差を小さくして、分配電流を均一化するものである。

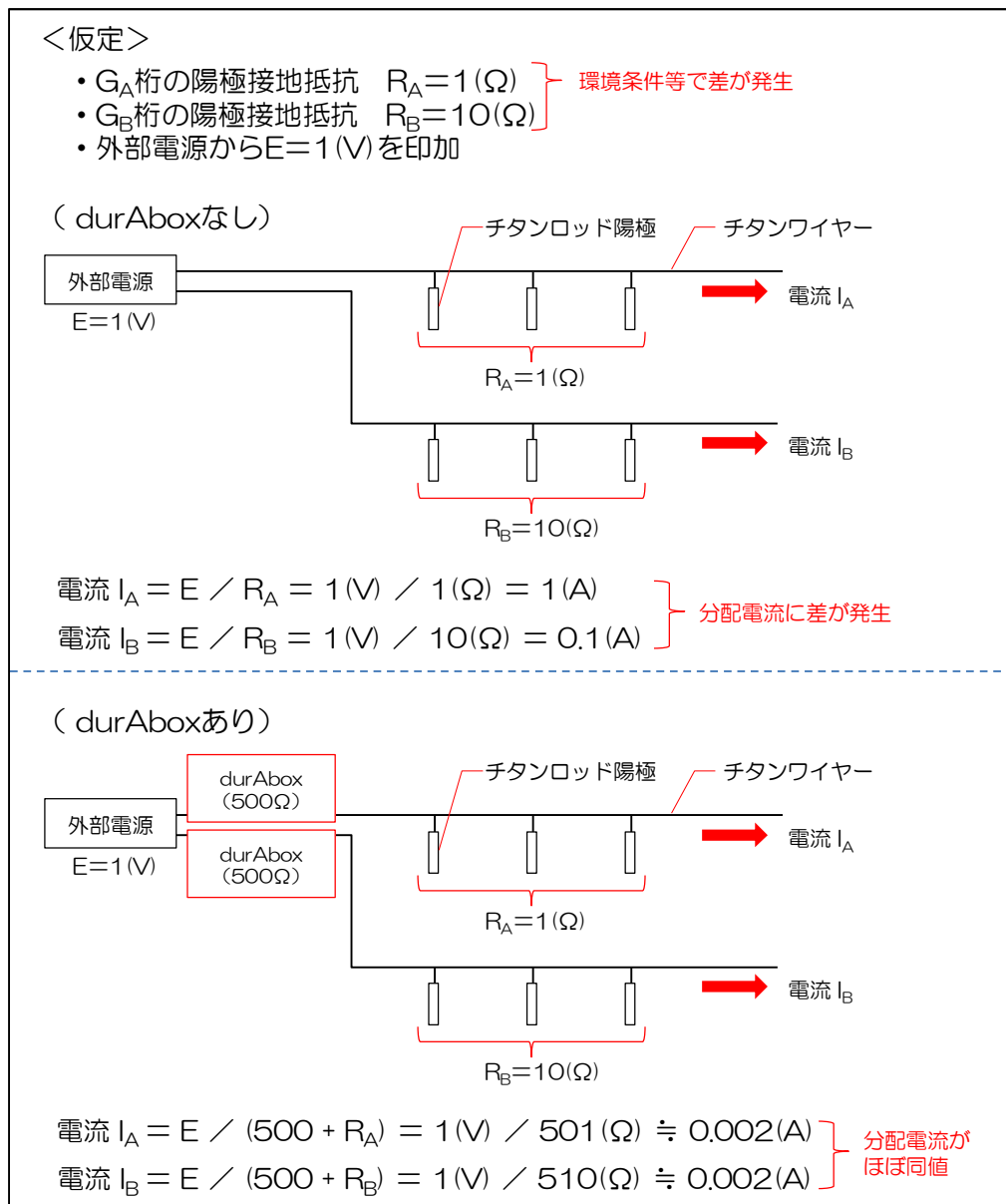


図-4.2.1 durAboxによる分配電流の均一化の例

本橋の電気防食装置ではプルボックス内にdurAboxが設置されていたものの、一部の陽極幹線が接続されておらず、No.2スパン G6桁以外では機能していなかった。

しかしながら、G6桁における通電試験結果から、durAboxの有無による通電電圧や通電電流への影響はないことが確認された。



#### 4.3 G6 桁の電位回復方法について

G6桁へは $1.0\text{mA}/\text{m}^2$ 程度の電流密度で通電すれば $100\text{mV}$ 以上の電位変化量が得られることが判明した。しかしながら、現在の通電電圧・通電電流は $6.8\text{V}-0.02\text{A}$ である。防食電流密度を $1.0\text{mA}/\text{m}^2$ とした場合、通電電流は $0.05\text{A}$ 必要であり、回路抵抗は $R=6.8/0.02=340\Omega$ であることから $17\text{V}$ 程度の負荷が必要となる。また、実測の通電試験においても、 $10\sim 13\text{V}$ の通電電圧が必要であった（通電時電圧は、通電開始時から徐々に増加して必要電圧でほぼ安定する傾向がある）。本直流電源装置およびチタンロード方式では $17\text{V}$ まで通電電圧を上昇させることができないため、現状のまま通電電流量を増加させることはできない。電位回復方法としては、陽極数量を増加させ防食回路全体の接地抵抗を極端に下げて通電する（但し、チタンロード陽極には個々に抵抗が装着されているため、十分な接地抵抗の低減効果が得られるか否かは不確定）等の対策が必要である。

## 5. おわりに

今回の調査から当該橋梁においては、通電は直流電源装置の表示値などの値から安定した状態であったと判断された。また、プルボックス内の点検においてもプルボックス内に結露もなく、端子部の腐食等も確認されなかった。配管材の確認においては一部割れが生じていたが、可とう性のある波付合成樹脂管（一重管）が使用されていたためこれが劣化したものであると推察された（現在では耐候性のある二重管や可とう性機械用配管材等が使用されている）。

コンクリート表面においては、下フランジ底面部の一部にコンクリートの劣化が確認された。原因は、適用されている電気防食工法の設計および施工状態と環境条件に起因しているものと推察され、劣化箇所を含む下フランジ底面で復極量がPC鋼線に対する復極量に比べ少ない傾向であったことがコンクリートの劣化の原因であると推察された。

今回の調査では、直流電源装置の確認のみではコンクリートの各部位における通電状況は確認できず、コンクリートの劣化として現れることが再確認された。通常電気防食工法の効果を判定するためには、照合電極の電位測定を実施するが、照合電極が設置されていない部位の評価については分配電流を測定し防食状態を推定することが有効である。特に電気防食工法の設計、施工の良否、環境条件によっては規定の復極量が得られていない場合もあるため、照合電極が設置されていない部位がある場合には、定期点検時に分配電流を測定し、すべての部位における電位分布の把握が推奨される。

## 4 編/付録-3 詳細調査報告書 (B橋)

### 1. B橋電気防食概要

#### 1.1 調査概要

対象施設：B橋 (PCT桁橋・17径間11主桁)

調査日：2015年11月16日～2015年11月18日

#### 1.2 電気防食適用位置

試験施工として第8径間に適用されている。(G1桁～G11桁下フランジ)

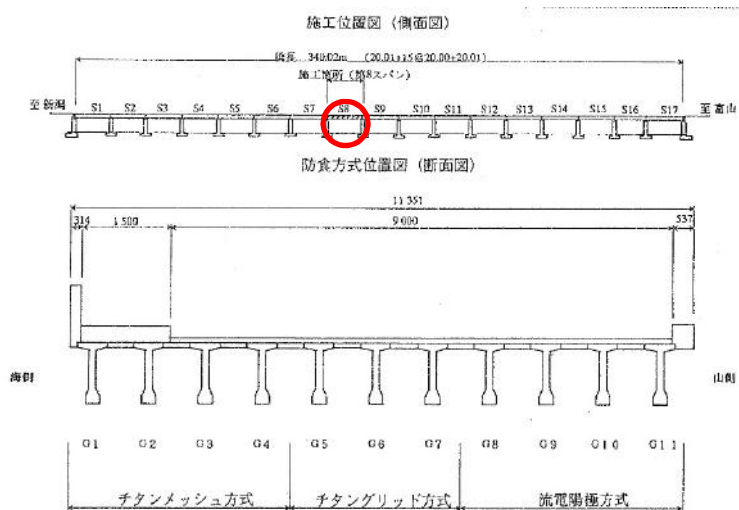


図-1.2.1 B橋電気防食適用位置

### 1.3 電気防食方式

#### 1.3.1 チタンメッシュ方式 (外部電源方式, 面状設置方式)

チタンメッシュ陽極をコンクリート表面に設置し、これをモルタル (オーバーレイ材) で被覆する。

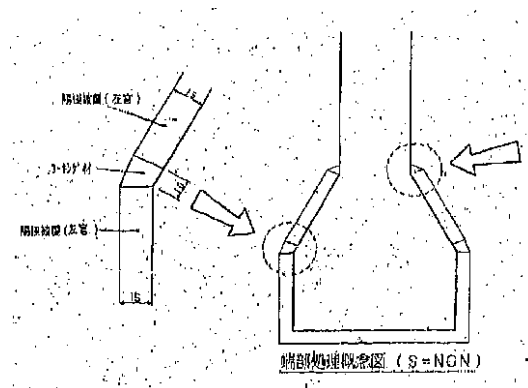


図-1.3.1 チタンメッシュ方式の概要

### 1.3.2 チタングリッド方式（外部電源方式，線状設置方式）

チタングリッド陽極を一定間隔で切削した溝に設置し，セメントモルタルにより充填する。

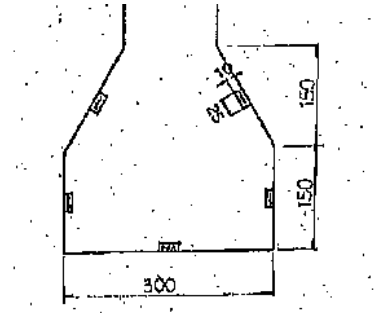


図-1.3.2 チタングリッド方式の概要

### 1.3.3 流電陽極方式（流電陽極方式，面状設置方式）

保護カバーで覆われた亜鉛シート，特殊バックフィルからなる亜鉛防食板をアンカーボルトでコンクリート表面に設置する。

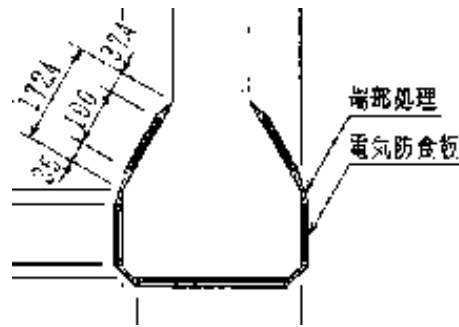


図-1.3.3 流電陽極方式方式の概要

### 1.4 回路構成とモニタリング位置

電気防食の効果を確認するためのモニタリング装置は，各方式において4箇所設置されている。

表-1.4.1. B橋の電気防食回路構成

方式	回路数	モニタリング数
チタンメッシュ	1	4
チタングリッド	2	4
流電陽極	—	4

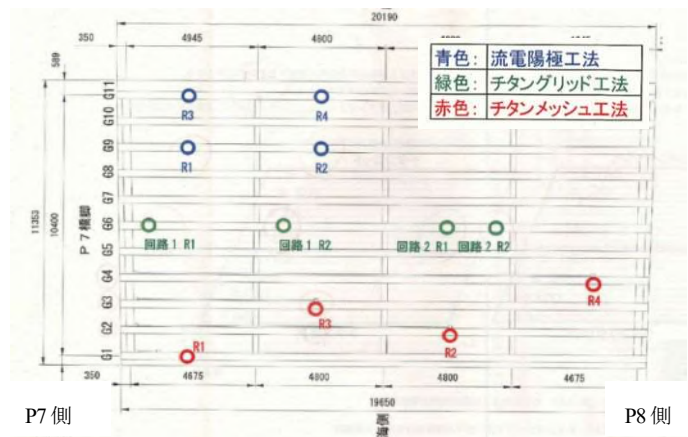


図-1.4.1 B橋モニタリング位置図

## 2. 詳細調査内容

### 2.1 調査内容

B橋における詳細調査は、先に実施した概略調査結果に基づき、下記の項目について実施した。

表-2.1.1 B橋詳細調査項目

調査区分	No	対象位置および項目	内容
目視調査	1	コンクリート面 陽極設置面	近接目視・たたき点検による変状の有無確認
	2	直流電源装置	外観、端子台等の状況を確認
	3	配線配管	設置状況、配管材固定状況等を確認
	4	プルボックス	設置状況、結線部の状況等を確認
測定調査	5	通電状態の測定	通電電圧・通電電流の測定
	6	防食効果の確認	オン電位、インスタントオフ電位、オフ電位の測定
	7	被覆モルタル剥落部	表面電位による防食効果確認 (チタンメッシュ方式：G1桁)
	8	内部照合電極不能部	表面電位による防食効果確認 (チタンメッシュ方式：G3桁)
	9	分配電流測定	チタンメッシュ回路での分配電流測定

### 3. 詳細調査結果

#### 3.1 陽極設置コンクリート面確認結果

チタンメッシュ方式において2箇所剥落を確認した。G1桁は概略調査時に確認していたが、G4桁については新たなものであり、剥落部周辺において浮きも確認された。また、チタングリッド方式においては、G5桁の一部に陽極被覆モルタルの浮きがみられた。流電陽極方式では間詰めモルタルの浮きや剥落が全体的にみられ、剥落による第三者被害防止のための養生ネットが設置されていた。また、防食板表面に波を打ったような変形が確認された。



写真-3.1.1 G1桁被覆モルタル剥落部

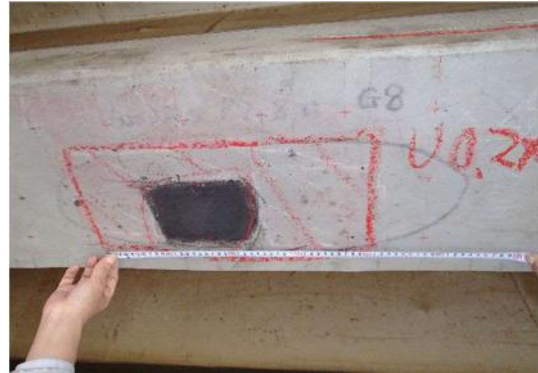


写真-3.1.2 G4桁被覆モルタル剥落部



写真-3.1.3 G5桁被覆モルタル浮き部



写真-3.1.4 G9桁パテ剥落部



写真-3.1.5 流電防食板波打ち状況



写真-3.1.6 たたき点検状況

### 3.2 直流電源装置・モニタリングボックス確認結果

本橋の下面は海水浴場の砂浜の一部であるため、直流電源装置、流電陽極方式のモニタリングボックスはP7橋脚の上部に設置されていた。箱体外観に劣化や損傷等は認められず、扉の開閉や鍵の開錠もスムーズに行えており、内部端子台の劣化等もなく状態は良好であった。



写真-3.2.1 直流電源装置・モニタリングボックス



写真-3.2.2 チタンメッシュ方式  
(直流電源装置)



写真-3.2.3 チタングリッド方式  
(直流電源装置)



写真-3.2.4 流電陽極方式  
(モニタリングボックス)

### 3.3 配線配管材確認結果

チタンメッシュ方式は1回路であり、4本の桁に配管材が分配されている。配管材は塩ビ製であり、配管は樹脂製サドルおよび樹脂製アンカーで固定されていた。樹脂製のため腐食もなく健全であった。

チタングリッド方式は、橋軸方向に回路が分割されており桁を横断するため、可とう性のある波付合成樹脂製配管材が設置されており、固定材としてチタンメッシュ方式と同様、樹脂製サドルおよび樹脂製アンカーで固定されていた。配管材の劣化や損傷等もなく健全であった。

流電陽極方式においてもチタングリッド方式と同様、波付合成樹脂製可とう管が使用されていたが、各桁に分配するための橋脚に設置された配管材の固定にSUS製サドルおよびSUS製アンカーが使用されており、その部分で錆汁の汚れが確認された。（電防対象外の橋脚部表面）

全体の評価として配管材の脱落等は確認されておらず、固定状況は良好であった。



写真-3.3.1 チタンメッシュ方式  
(直線部配管状況)



写真-3.3.2 チタンメッシュ方式  
(樹脂製配管材固定具)



写真-3.3.3 チタングリッド方式  
(桁横断部配管状況)



写真-3.3.4 流電陽極方式  
(SUS製金具からの錆汁)



### 3.4 プルボックス確認結果

プルボックスは結線部の収納やケーブル分岐点となる場所である。チタンメッシュ方式においては、各ケーブル結線部が写真-3.4.1に示すように、弾性シリコン材で絶縁処理が施されており腐食もなく健全であることが確認された。

チタングリッド方式では、写真-3.4.2に示すように、プルボックス上部に切り込み孔があり、そこから樹脂材がプルボックス内部に充填されており、プルボックスを開放することができなかった。

流電陽極方式では、写真-3.4.3に示すよう、プルボックスの上蓋を固定するためのビス頭が一般的なドライバーで回すことができない特殊構造であったこと、また、養生ネットで固定されていたため、結線部の確認ができなかった。

なお、チタンメッシュ方式P7橋脚部に設置してあるプルボックスは、外側および内側ともに損傷等もなく健全であった。



写真-3.4.1 チタンメッシュ方式結線部



写真-3.4.2 チタングリッド方式（樹脂充填）



写真-3.4.3 流電陽極方式（特殊ビス仕様）



写真-3.4.4 橋脚部プルボックス

### 3.5 通電電圧・電流測定結果

チタンメッシュ方式の通電方式は定電流方式であるため、電流値に過年度との差はなく概ね一定であることが確認された。電圧値は測定時期が冬季のこともあり回路抵抗が増加しており、夏季（過年度6月における測定では1.76V）と比較して大きい値であることが確認された。

チタングリッド方式の通電方式は、過年度報告書より定電位方式であることが確認されているが、過去の通電結果が入手できず、通電電圧および電流値の評価がし難いところではあるが、防食効果も確認されており適性な範囲での通電がされているものと思われる。

流電陽極方式においては、通電電流のみの測定となる。モニタリング4箇所における通電電流を測定した結果、R1=4.68mA, R2=4.44mA, R3=5.54mA, R4=6.16mA であり、ほぼ均等な発生電流であることが確認された。

また、オフ時の陽極電位は、それぞれR1=-941mV, R2=-915mV, R3=-887mV, R4=-917mVであった。亜鉛の固有電位は一般的に-1000mV程度であるため、耐用年数を過ぎているが電位の大幅な電位の貴化はなく、陽極として機能していることが確認された。

なお、外部電源方式の電源装置は市販のものが使用されていた。

表-3.5.1 通電測定結果

電気防食方式	回路 No	通電電流 (A)	通電電圧 (V)	防食面積 (m <sup>2</sup> )	電流密度 (mA/m <sup>2</sup> )
チタンメッシュ方式	—	0.107	1.89	22.0	4.86
チタングリッド方式	1	0.073	2.68	11.0	6.64
	2	0.039	1.99	11.0	3.55
流電陽極方式	—	—	—	—	—



写真-3.5.1 外部電源方式測定状況



写真-3.5.2 流電陽極方式測定状況

### 3.6 防食効果測定結果

直流電源装置およびモニタリングボックスにて、埋設照合電極により防食効果の確認試験である復極量試験を行った。復極量試験の結果を表-3.6.1に示す。なお、各方式において照合電極が異なるため、飽和硫酸銅基準（CSE）に換算している。測定の結果、チタンメッシュ方式R3を除き、防食基準を満足しており、インスタントオフ電位についても過防食電位 $-1000\text{mV}$ より貴であるため、適正な範囲での通電状態であることが確認された。

チタンメッシュ方式R3（G3桁）においては、電位値が不安定であり測定ができなかった。過年度の報告書からも2011年11月時点より測定不能との記録があるため、照合電極の機能が損なわれていることや、配線経路の接点不良が考えられるため、詳細調査を行い早急に復旧することが望ましい。

表-3.6.1 復極量測定結果（防食基準 $100\text{mV}$ 以上）

単位：mV

	チタンメッシュ方式 (飽和塩化銀)			チタングリッド方式 (鉛電極)			流電陽極方式 (二酸化マンガン)		
	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	-481	-245	236	-691	-314	377	-519	-170	349
R2	-489	-125	364	-664	-345	319	-477	-213	264
R3	-----	-----	-----	-731	-522	209	-640	-186	454
R4	-595	-263	332	-676	-479	197	-506	-237	269

飽和硫酸銅（CSE）基準に換算

### 3.7 陽極被覆モルタル剥落部における表面電位の確認

チタンメッシュ方式, G1 桁被覆モルタル剥落部において, 外部照合電極により表面電位での復極量試験を行った。測定の結果, 剥落部においても周囲と同等の電位変化を示しており, 被覆モルタルの剥離による防食効果への影響は特に確認されなかった。



写真-3.7.1 チタンメッシュG1桁剥落部測定状況



写真-3.7.2 チタンメッシュ健全部測定状況

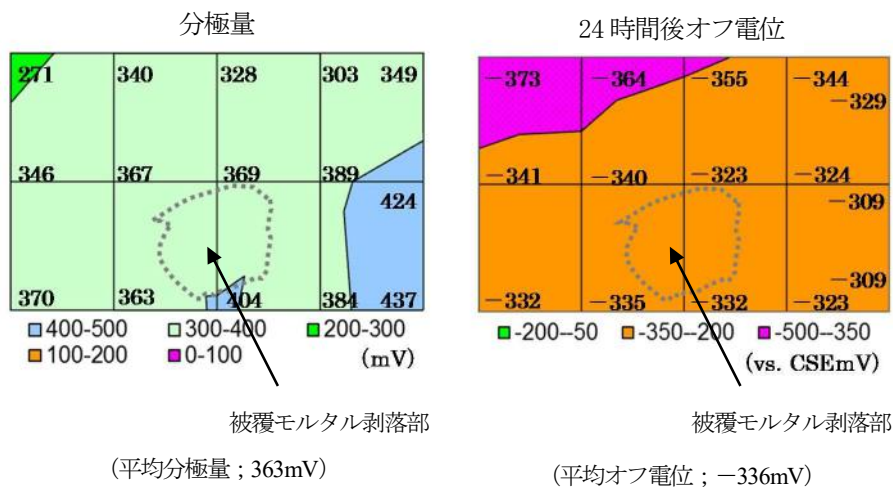


図-3.7.1 外部照合電極による表面電位分布結果 (チタングリッド方式G1桁)

### 3.8 照合電極測定不能桁における表面電位の確認

埋設照合電極による測定が不能であった、チタンメッシュ方式G3桁において、外部照合電極により表面電位での復極量試験を行った。測定の結果、平均436mVの分極量が得られており、24時間後のオフ電位も貴化していることから、測定不能である埋設照合電極の代替として、外部照合電極により防食効果があることを確認できた。

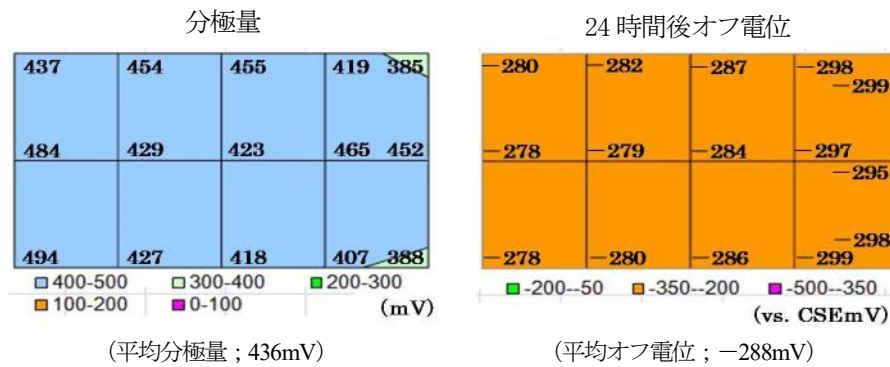


図-3.8.1 外部照合電極による表面電位分布結果 (チタングリッド方式G3桁)

### 3.9 分配電流測定

プルボックスの開放が可能なチタンメッシュ方式において、分配電流を測定した。図-3.9.1 に示すように、直流電源装置から4本の桁それぞれに配線が分配されている。この分配電流を各プルボックスにおいて、クリップオン電流計を用いて測定を行った。クリップオン電流計は、電流による磁界を測ることによって、電気回路を開くことなく測定できる電流計である。測定値はいずれも0.03A~0.04Aであり、均等に分配されていることが確認された。

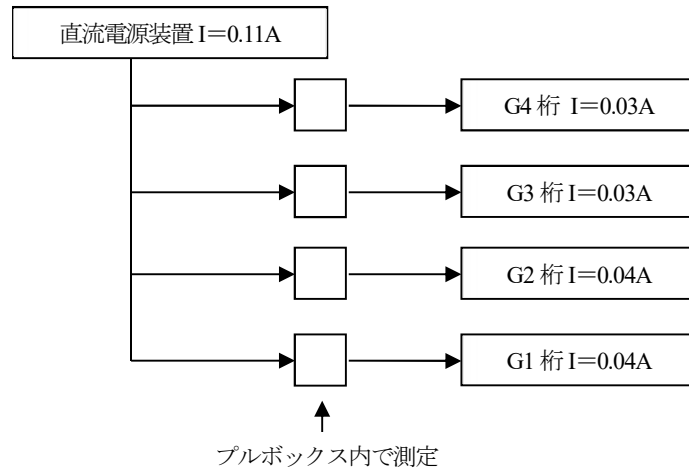


図-3.9.1 分配電流計結果 (チタンメッシュ方式)



写真-3.9.1 チタンメッシュ方式  
配線分配状況 (P7橋脚側面)



写真-3.9.2 電流測定状況

## 4. 調査結果のまとめ

B橋における詳細調査結果を以下に考察する。

### 4.1 外部電源方式

チタンメッシュ方式 G1 において、10×10cm 程度の陽極被覆材の剥落が確認された。これまでにチタンメッシュ方式において確認されている剥落例とは異なっており、本件に類似した剥落の確認例はない。今後、類似の剥落例の確認に注意を払う必要がある。このような剥落が生じる可能性としては、小石や突起物等の物理的な衝突やモルタル被覆施工時の生じる空気層や練混ぜ不足のモルタル塊の存在に起因することが考えられるが、現時点でこの原因を特定することはできない。

一般的に外部電源方式での陽極被覆材の劣化は、陽極周辺への電流集中や過防食による、塩素ガス発生に伴う被覆モルタルの変状、変色等が考えられるが、過去の通電データからは過防食による劣化とは考えにくい。

今後、同様の劣化事例を調査するとともに、陽極材周辺の反応や劣化のメカニズムを解明し、電気防食システムとしての耐用年数のあり方、維持管理の手法についても検討していく必要がある。

### 4.2 流電陽極方式

防食板パネルの表面において波を打った状態の変形が確認された。内部の陽極材が消耗したことにより剛性が不足し、FRP保護板が追従し変形に至ったものと考えられる。また、変形は道路に面した側で大きく、この面では太陽光などが樹脂カバーの変形を助長していることも考えられる。

亜鉛シート方式の間詰めパテは、亜鉛シート間の導通リード線の保護やバックフィル材の保護を目的として施工されているため、細長比の大きい形状であることや下地処理が不十分になり易いことなどもあり、同様の変状も確認されていることから、現在ではエポキシパテが用いられている。また、亜鉛シートの樹脂板の変形は、道路に面した側で大きく、この面では太陽光などが樹脂カバーの変形を助長していると考えられる。

本損傷との直接的な関係性はないが、本亜鉛シート（流電陽極）方式は施工後約19年が経過しており、本方式の耐用年数である15年を経過しても十分な防食効果が得られているが、今後、防食効果が低下する可能性が大きいため、寿命が近づいた場合は消耗量調査などにより確認することが重要と考えられる。

### 4.3 直流電源装置

直流電源装置、モニタリングボックスは腐食等もなく良好に維持されていた。塩害環境である海岸付近に設置する場合、前面扉や内部端子台が腐食することが多く、定期点検時に詳細部の確認を行い、必要に応じて部品交換等のメンテナンスを行うことが望ましい。

### 4.4 プルボックス

チタングリッド方式のプルボックスは、内部に樹脂材等が充填されており、結線部の確認ができなかった。また、流電陽極方式のプルボックスは、一般工具での上蓋の撤去が不可であった。

プルボックス内には電線の結線部が収納されていることから、維持管理上、容易に補修が行える構造にしておかなければならない。

#### 4.5 配線配管

配管材は厳しい環境の中、経年劣化や破損も特にみられず概ね良好であった。一般的に使用されている合成樹脂材の配管材は耐候性が弱点であるため、本橋のように直射日光を避けた桁内への設置が望ましい。

また、流電陽極方式の配管材の一部に SUS 製固定材からの錆汁が確認された。防食対象外ではあるが、防錆対策および耐食性のある材料への検討が望まれる。(現在はチタン製に変更)

#### 4.6 防食効果の確認

コンクリート内部に設置されたモニタリング装置での防食効果の確認は、定期点検が適切に行われており良好な防食状態が維持されていた。なお、チタンメッシュ方式 R3 照合電極による測定が不能であった。過去の点検報告からも測定不能と記載されており、防食システムとしての適切な維持管理を行う上でも、発見時での早急な対応が望まれる。

#### 4.7 表面電位の測定

チタンメッシュ方式被覆モルタル剥落部において、表面電位による復極量試験の結果、健全部と同等の電位変化量が確認された。また、不良が疑われる照合電極埋設付近コンクリート表面での測定においても、防食基準を満たす電位変化があることが確認されている。

今回のように、変状部の周囲において表面電位の測定により鋼材電位の変化を確認することは、変状部への防食電流の流入および防食効果の確認が行え、有効な調査手法であることが確認できた。

#### 4.8 分配電流の確認

防食電流の分配測定については、チタンメッシュ方式のみの測定であったが、桁4本にそれぞれ均等に分配されている結果が得られた。このようにプルボックスを開放して分配電流を確認することは、変状部への電流供給の確認において有効な調査手法であることが確認できた。



## 5. おわりに

本橋への電気防食の適用は、供用開始 22 年後の 1996 年に P7-P8 径間に適用され 19 年が経過している。陽極被覆材やモニタリング装置の一部に劣化や損傷はあるものの、コンクリート本体からの錆汁や劣化等は特に確認されておらず、電気防食は有効的に機能しているものと思われる。なお、比較となるが、写真-5.1, 5.2 に示すように、電気防食非適用部においては劣化が確認されている。



写真-5.1 電気防食非適用部の劣化



写真-5.2 非適用部の劣化（電気防食径間内）

本詳細調査の結果、軽微と判断される損傷が確認されたが、維持管理上の今後参考とすべき知見が多数得られた。これらの知見を参照して電気防食に有用な維持管理の手法を構築することが、今後の社会資本の長寿命化に大きく貢献すると判断できる。

## 4 編/付録-4 詳細調査報告書 (C橋)

### 1. C橋電気防食概要

#### 1.1 調査概要

対象施設：C橋 (RC橋・2径間5主桁)

調査日：2015年12月14日～2015年12月17日

#### 1.2 電気防食適用位置

主桁、床版、PI橋脚 (気中部、干満部) に適用されている。

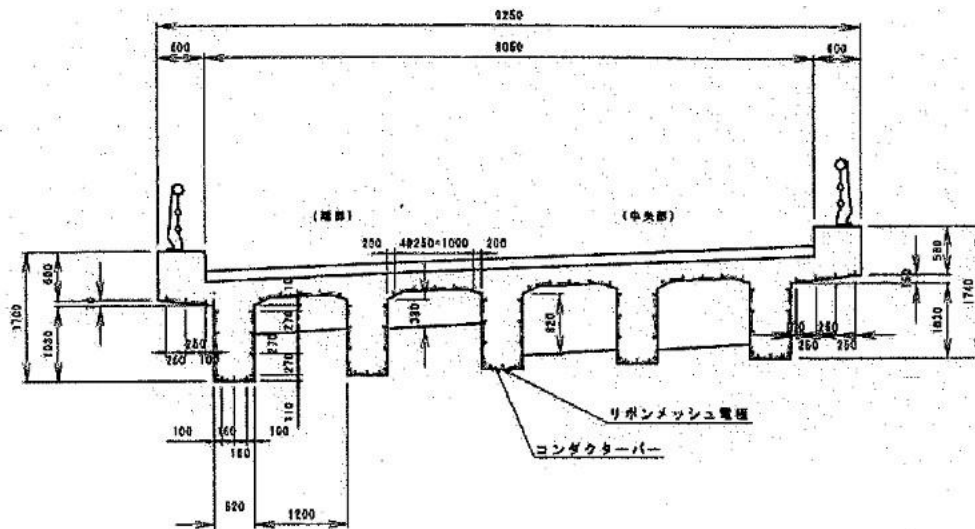


図-1.2.1 C橋陽極配置図 (主桁・床版)

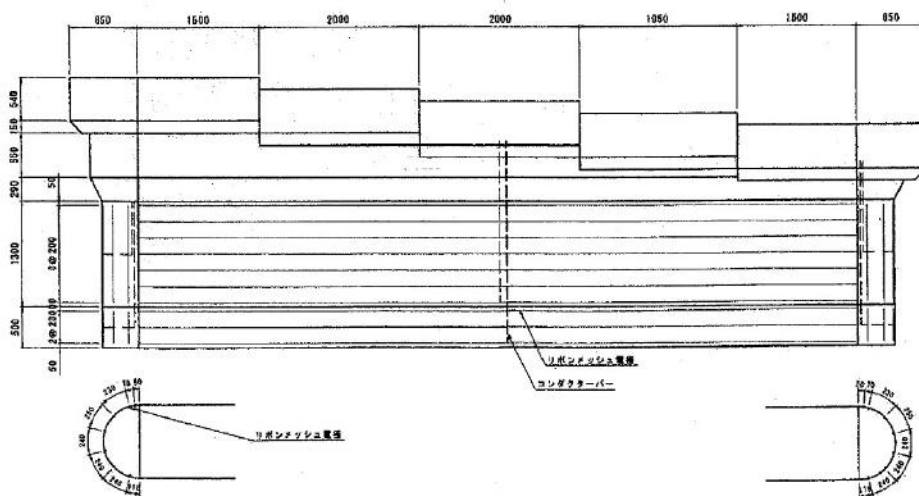
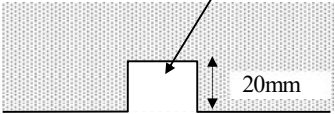
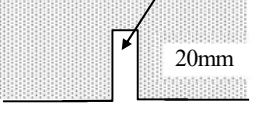
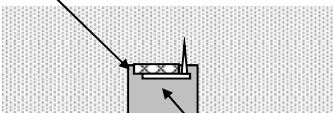
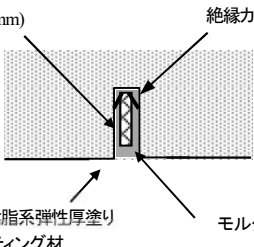


図-1.2.2 C橋陽極配置図 (P1橋脚 気中部・干満部)

### 1.3 電気防食方式

本橋に適用されている電気防食方式は、チタンリボンメッシュ方式のうち陽極材を縦置きにした方式である。縦設置することで溝切り施工の省力化を図るとともに、陽極材先端に絶縁カバーを施し鉄筋との絶縁、電流分布を改善した方式である。(外部電源方式、線状設置方式)

表-1.3.1 チタンリボンメッシュ陽極設置要領図 (本橋は縦置きを適用)

横置きの場合 (標準)	縦置きの場合
<p>&lt;溝切り&gt;</p>  <p>25mm</p> <p>20mm</p> <p>溝形成</p>	<p>&lt;溝切り&gt;</p>  <p>8mm</p> <p>20mm</p> <p>溝形成</p>
<p>&lt;陽極設置&gt;</p>  <p>陽極(13mm)</p> <p>モルタル</p>	<p>&lt;陽極設置&gt;</p>  <p>陽極(13mm)</p> <p>絶縁カバー</p> <p>モルタル</p> <p>アクリル樹脂系弾性厚塗り保護コーティング材</p>

当初、電気防食工の適用は主桁のみであったが、床版部 (表面被覆工)、さらに橋脚部 (脱塩工法) が電気防食工に変更された経緯が入手資料より読み取れる。

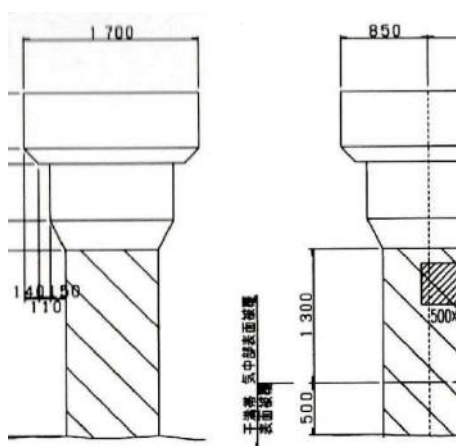


図-1.3.1 脱塩工法 (当初)

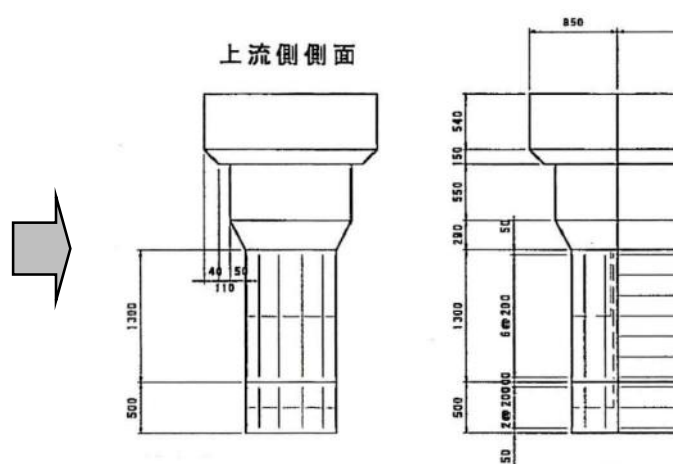


図-1.3.2 電気防食工法 (変更)

### 1.4 回路構成および陽極配置

電気防食回路は部材別に主桁回路，床版回路，橋脚回路で構成される。さらに橋脚回路は高さ方向に，気中部および干満部に分けられている。

表-1.4.1 C橋の電気防食回路構成

回路	部位	対象面積	ユニット出力	モニタリング数
No.1回路	主桁部	334.2 m <sup>2</sup>	20V×10A	各径間×2=4箇所
No.2回路	床版部	198.9 m <sup>2</sup>	20V×10A	各径間×1=2箇所
No.3回路	橋脚気中部	27.2 m <sup>2</sup>	5V×1A	A1/A2×各 1=2箇所
No.4回路	橋脚干満部	10.5 m <sup>2</sup>	5V×1A	A1/A2×各 1=2箇所

陽極配置状況写真，陽極配置図を以下に示す。P1橋脚においては気中部7段目までは陽極が確認できたが，干満部である8段目以降は，土砂の堆積・水の浸漬により直接確認することができなかった。



写真-1.4.1 A1-P1 主桁部・床版部



写真-1.4.2 P1 橋脚気中部・干満部

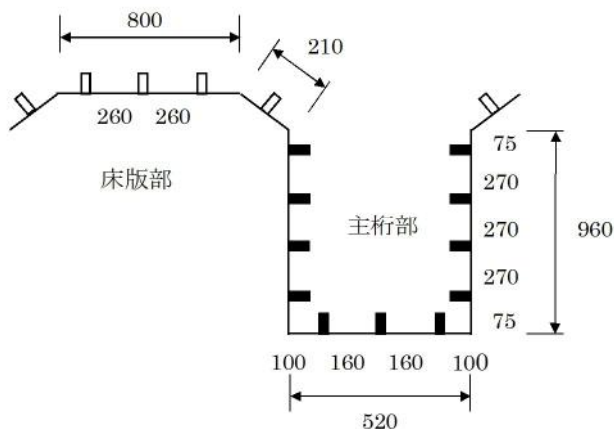


図-1.4.1 主桁／床版部陽極配置図

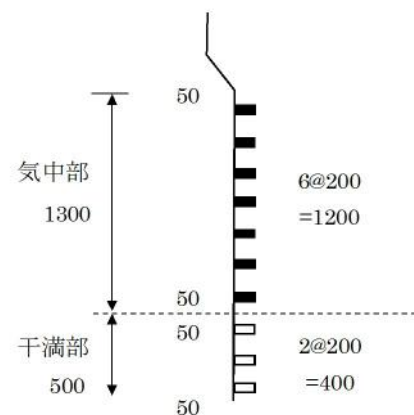


図-1.4.2 P1橋脚部陽極配置図

## 2. 詳細調査内容

### 2.1 調査内容

C橋における詳細調査は、先に実施した概略調査結果に基づき、下記の項目について実施した。

表-2.1.1 C橋詳細調査項目

調査区分	No	対象位置および項目	内容
目視調査	1	コンクリート面 陽極設置面	近接目視、たたき点検による確認
	2	陽極外観変状部	陽極かぶり深さ、変色部モルタルの確認
	3	主桁表面変色部	簡易はつり調査による金属片の確認
	4	直流電源装置	外観、端子台等の状況を確認
	5	配線配管	設置状況、配管材固定状況等を確認
	6	プルボックス	設置状況、結線状況等を確認
計測調査	7	通電状態の測定	通電電圧、通電電流の測定
	8	防食効果の確認	オン電位、インスタントオフ電位、オフ電位の測定
	9	躯体変状部	変状部周囲での表面電位測定

### 3. 詳細調査結果

#### 3.1 陽極設置コンクリート面確認結果

##### 3.1.1 主桁・床版部

概略調査で確認された変状部に足場により近接し、外観目視およびたたき点検を行った。劣化部周囲におけるたたき点検からは鉄筋腐食特有の異音は確認されておらず、鉄筋腐食による劣化の特徴である、浮きや錆汁等もみられないため、これらの劣化は鉄筋腐食に起因するものではないと判断された。

また、これら変状部の周囲において表面被覆を一部撤去し、外部照合電極を押し当て、電源のオンオフにより電位変化の有無について確認した。

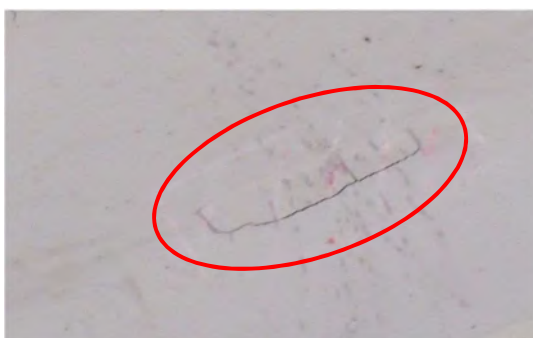


写真-3.1.1 G1 桁床版ハンチ部の浮き



写真-3.1.2 G2 桁底面のひび割れ

##### 3.1.2 P1 橋脚部

P1橋脚において陽極材の露出、被覆モルタルの変色等の変状がA2側側面に多く見られた。過年度報告書より橋脚部の配管材が脱落した期間にA2側に2倍の電流が供給（A1側は不通電）されていた可能性があるとの報告があり、多くの電流が流れたことで、モルタルの劣化を助長したものと考えられる。



写真-3.1.3 P1 橋脚 (A1 側)



写真-3.1.4 P1 橋脚 (A2 側)

知見より、電気防食では通電により陽極材周辺には酸素発生反応（①式）が生じ、塩化物イオンが存在する環境ではさらに過大電流を印加した場合、陽極材のインスタントオフ電位が約1.119V (vs SCE) より貴になると塩化物イオンが電子を放出し、塩素発生反応（②式）による塩素ガスの発生、次亜塩素酸の生成（③式）や次亜塩素酸と塩素の生成（④式）によりpHが低下し、コンクリートの酸性化を引き起こすと考えられている。

酸素発生反応	$2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$	.....	①式
塩素発生反応	$2\text{Cl}^- \rightarrow \text{Cl}_2 + 2\text{e}^-$	.....	②式
次亜塩素酸の生成	$\text{Cl}^- + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{HClO} + \text{H}^+ + 2\text{e}^-$	.....	③式
次亜塩素酸と塩素の生成	$\text{Cl}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{HClO} + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$	.....	④式

A2側において確認されているモルタルの変状は、水面に近い湿潤環境に多く確認されており、かぶりの小さい箇所に塩分が吸着し、多くの電流が流れたことにより塩素ガスが発生し、次亜塩素酸が生成される酸性化により劣化した可能性が高く、設計時において、環境に応じた回路分けにより電流の集中を避けることやかぶり厚さの確保などの配慮が必要である。

### 3.1.3 陽極かぶり厚の確認

P1橋脚A2側，陽極露出部において，表面からのかぶり厚を確認した。チタンリボンメッシュ縦置き方式の場合，溝深さ20mmに対して約13mm幅の陽極を設置するため，7mmのかぶり厚が標準となるが，少ないところで2～3mmであった。かぶり深さが不足する原因として，溝深さが不足していたこと，モルタル充填や陽極挿入時に表面側に陽極が移動したことなどが考えられる。



写真-3.1.5 陽極かぶり厚確認状況



写真-3.1.6 かぶり厚確認 (2～3mm)

### 3.1.4 陽極被覆モルタル変色部の確認

P1橋脚A2側，上段から4段目と6段目において，陽極周囲モルタルの確認を行った。干満部に近い6段目はモルタルの変色が濃いことが確認された。



写真-3.1.7 P1 橋脚 A2 側 (4 段目陽極)



写真-3.1.8 P1 橋脚 A2 側 (6 段目陽極)

### 3.1.5 主桁底面変色部の確認

主桁底面の陽極間に変色が確認された。たたき検査においては浮き等の変状もなく、鉄筋探査により表層付近での金属反応が確認されたため、その箇所表面被覆を除去した結果、写真-3.1.12に示すように、腐食した釘の存在を確認した。釘は先端が断面欠損しており、頭部より防食電流が流入し先端部から流出する電食により、錆汁が発生し変色に至ったものと考えられる。

本橋のように電気防食施工時に既に表面被覆が施されている場合、陽極設置範囲以外の金属片の確認が困難となり、通电後に電食または腐食によりコンクリート表面に変色が発生する場合があるため、電気防食施工時には金属片の残置のないよう留意して施工する必要がある。



写真-3.1.9 G1 桁底面の変色



写真-3.1.10 金属片探査状況 (金属片確認)



写真-3.1.11 はつり完了

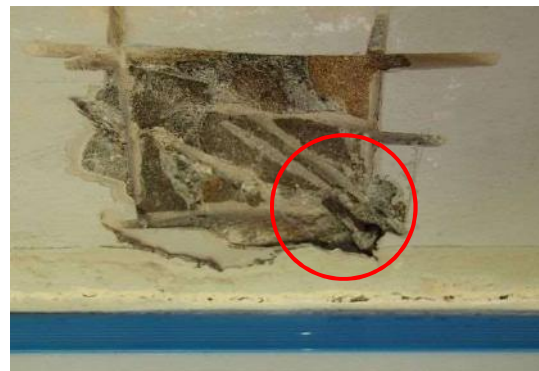


写真-3.1.12 金属片確認



写真-3.1.13 金属片確認 (釘)



写真-3.1.14 はつり部復旧完了



### 3.2 直流電源装置確認結果

本橋の直流電源装置は海岸沿いに面した場所に設置されており、箱体外観の塗装の色褪せ、箱体内部での金属部の腐食、扉ゴムパッキンの劣化等が確認された。また、扉前面の受電／運転ランプのカバーが色褪せており、点灯を確認することが困難であった。そのため、現在ではフードの装着した仕様を標準としている。

また、電源遮断を知らせる警告灯が設置されており、正常に動作することを確認した。



写真-3.2.1 直流電源装置全景



写真-3.2.2 直流電源装置箱体



写真-3.2.3 金属部の腐食



写真-3.2.4 ゴムパッキンの劣化



写真-3.2.5 警告灯



写真-3.2.6 受電ランプ／運転ランプ

### 3.3 配線配管材確認結果

写真-3.3.1に示すように、主桁と床版の配線配管は桁を横断するルートで設置されていた。また、概略調査時に脱落していた橋脚部の配管材は復旧されており通電も開始されていた。

配管材は可とう性のある一重波付合成樹脂管が用いられており、樹脂製サドルにてSUS製ビスまたはチタン製ビスにより固定されていた。なお、海側に面した曲がり部において、写真-3.3.4に示すように配管材の割れが数か所確認された。本橋のように、紫外線劣化に対する耐候性、耐久性に対する認識が乏しい年代に施工された電気防食施設においては、配管材の劣化についても注視して目視点検を行う必要がある。なお、現在では耐候性のある二重管を標準としている。

今回のような配管材の損傷劣化が確認された場合、まず、電線に傷がないか健全性を確認した上で、なるべく早い段階で配管材の応急処置を行う必要がある。応急処置としては、劣化部に同径の管を被せ、耐候性を有するテープにより被覆するなどの方法が考えられる。なお、定期点検時に配線健全性の確認を行った上で、その部分の配管材を更新することが望ましい。

本橋のような海岸沿いの厳しい環境に配管を行う場合は、耐候性、耐久性を考慮しなければならない。例えば、直射日光や潮風を避けた位置への設置、且つ、極力曲がり部を少なくする配管ルート設計が望まれる。



写真-3.3.1 主桁・床版配管状況



写真-3.3.2 橋脚部配管復旧確認

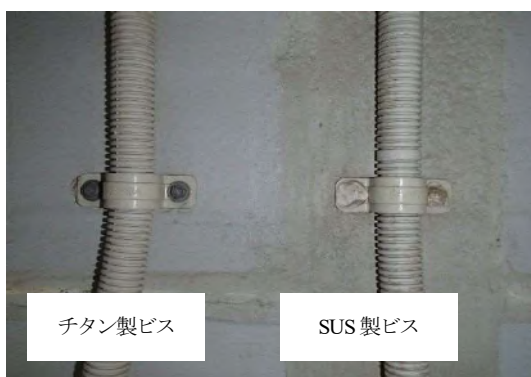


写真-3.3.3 配管固定状況



写真-3.3.4 配管材の割れ

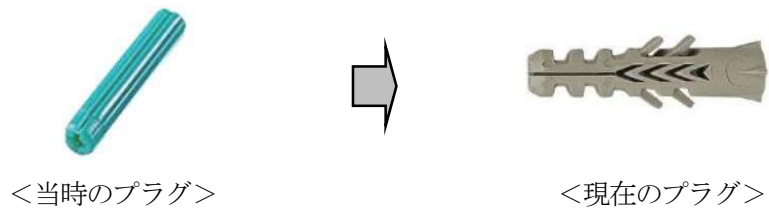
なお、橋脚上部において配管材を固定するサドルの脱落が確認された。状況としては、削孔内に挿入したビスを固定するための樹脂プラグが抜け落ちていた。なお、現在は羽根付きのあるプラグを標準としている。



写真-3.3.5 配管材の脱落



写真-3.3.6 樹脂プラグ抜け落ち



<当時のプラグ>

<現在のプラグ>

図-3.3.1 樹脂プラグ仕様

### 3.4 プルボックス確認結果

プルボックスは防食電流の通電点であり、結線部の収納やケーブル分岐点となる場所でもある。本調査では山側の3箇所、海側の3箇所においてプルボックス内部の状態を確認した。

山側のプルボックスは共通配線ルートのため、ケーブルが集中しており結線部の確認が困難であった。海側のプルボックスは結線数も少なく内部には余裕があった。

ケーブル結線部は、絶縁用自己融着テープの上にビニルテープが巻かれており、剥がれや損傷もなく良好であった。また、プルボックス内の結露対策として、下側面に水抜き孔が設置されていた。

配線が集中したプルボックスでは、電線の行先確認や結線部の確認が困難となるため、結線数および配線数に応じた大きさのプルボックスを選定することが、維持管理の面からも望ましいと考える。

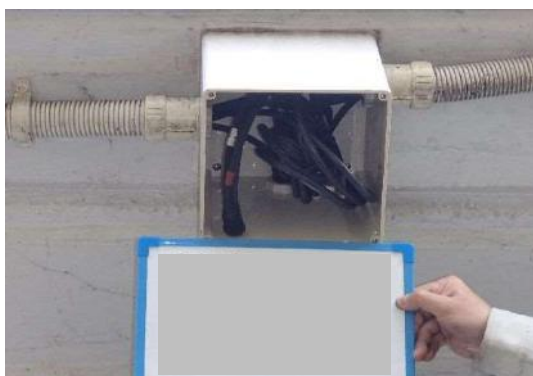


写真-3.4.1 山側プルボックス（配線集中箇所）

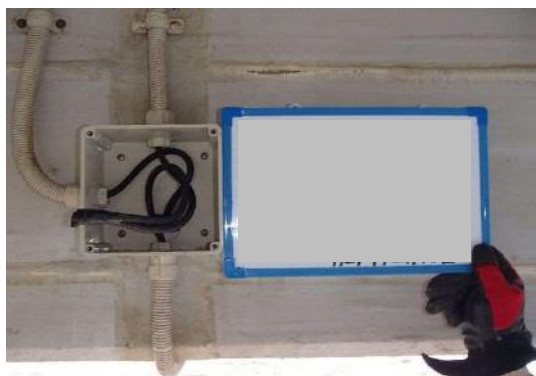


写真-3.4.2 海側プルボックス（端部分岐箇所）



写真-3.4.3 底面水抜き孔の確認

### 3.5 通電電圧・電流測定結果

通電時の測定結果を表-3.5.1 に示す。通電電圧を通電電流で除した回路抵抗 ( $R=V/I$ ) より、床版No.2 回路は主桁と比較して回路抵抗が高い状態であることが確認された。床版部はコンクリートのかぶり厚が大きいこと、乾燥状態にありコンクリート抵抗が高くなっていることなどが考えられる。

また、No.3 回路の電流密度は他の回路と比較して高い傾向となった。No.3 回路は図-3.5.1 に示すように1～7 段までの陽極が対象であるが、施工当初とは河床の環境が変化しており、実際には7 段目の陽極は没水していた。そのため、防食電流は電気抵抗の小さい湿潤部 (7 段目) に多く流れたことで、陽極2～3 段目位置にある照合電極への電流供給が減少したことで、所定の電位変化量を得るために多くの電流を要していることが考えられる。

表-3.5.1 通電測定結果

回路	通電電流 (A)	通電電圧 (V)	極間抵抗 ( $\Omega$ )	防食面積 ( $m^2$ )	電流密度 ( $mA/m^2$ )
No.1 回路(主桁)	0.38	2.72	7.20	334.2	1.10
No.2 回路 (床版)	0.32	7.88	24.60	198.9	1.60
No.3 回路 (橋脚気中部)	0.19	3.34	17.60	27.2	7.00
No.4 回路 (橋脚干満部)	0.02	1.45	72.50	10.5	1.90

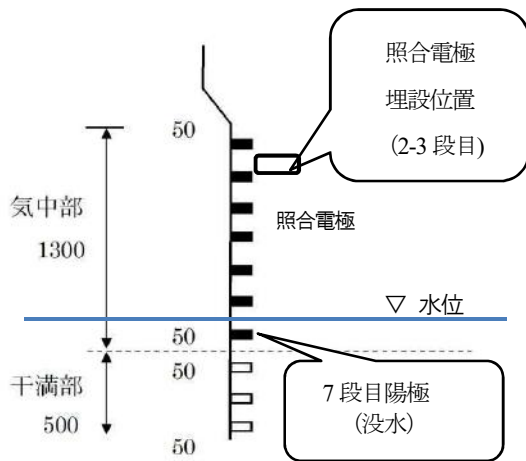


図-3.5.1 P1 橋脚陽極配置環境



写真-3.5.1 橋脚下部没水状況

### 3.6 防食効果測定結果

復極量試験の結果を表-3.6.1に示す。橋脚干満部を除いて24時間後の復極量は防食基準が満足されていた。橋脚干満部は没水しており、復極反応に必要な酸素の拡散速度に時間を要すると判断し、オフ時間44時間後まで延長して測定を行った結果、いずれの箇所においても復極量の増加が確認された。

なお、橋脚干満部の照合電極埋設部は水中に没水しており、オフ電位は-750mV前後の非常に卑な電位であることから、水中環境での鋼材電位を示しているものと考えられる。

また、橋脚干満部の防食効果を断線復旧前のOFF電位を基準とした場合、200mV以上の復極量が得られていることが確認されており、点検結果の保管とその活用が維持管理において重要であることを認識した。

表-3.6.1 復極量測定結果（防食基準100mV以上） (mV vs MNO)

回路	番号	通電時		24時間後		44時間後			
		ON電位 (mV)	Ins.OFF (mV)	OFF電位 (mV)	復極量 (mV)	OFF電位 (mV)	復極量 (mV)	24時間 後との差	
No.1 主桁	R1-1	-542	-456	-276	180	-250	206	26	
	R1-3	-525	-356	-249	107	-238	118	11	
	R2-1	-670	-395	-258	137	-214	181	44	
	R2-3	-593	-475	-337	138	-310	165	27	
No.2 床版	R1-2	-584	-433	-259	174	-236	197	23	
	R2-2	-465	-375	-223	152	-197	178	26	
No.3 橋脚気中部	R3-1	-507	-452	-327	125	-312	140	15	
	R3-2	-702	-500	-332	168	-303	197	29	
No.4 橋脚干満部	R4-1	-829	-815	-746	69	-723	92	23	
	H27.11.26 断線復旧前の自然電位					-583	232	-----	
	R4-2	-818	-813	-776	37	-754	59	22	
					H27.11.26 断線復旧前の自然電位		-494	319	-----



写真-3.6.1 直流電源装置での測定状況

### 3.7 コンクリート表面および陽極変状部周囲における表面電位の確認

浮きやひび割れ等が確認された箇所において、防食電流の有無を確認するため、電源オンオフによる表面電位の変化を測定した。測定は固有電位を保持するシート状の貼付型照合電極を用いており、比較としてG1, G2桁において鉛照合電極による測定も行った。測定後、ケレンした箇所は表面被覆を復旧した。表-3.7.1に表面電位測定結果を示す。(写真-3.7.4内、黒丸：貼付型照合電極、赤丸：鉛照合電極による測定)



写真-3.7.1 G1桁ケレン状況



写真-3.7.2 G1桁ケレン完了



写真-3.7.3 貼付型照合電極

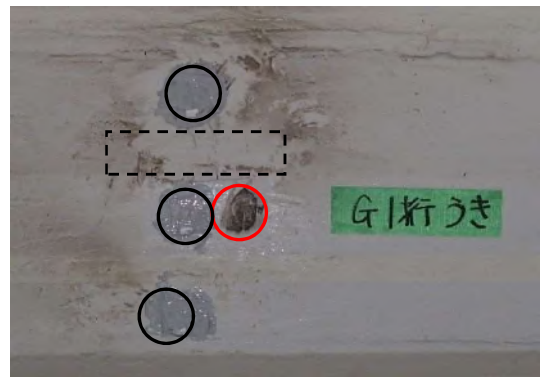


写真-3.7.4 G1桁照合電極設置完了



写真-3.7.5 G1桁表面電位測定状況



写真-3.7.6 G1桁表面被覆復旧完了

本来、コンクリート表面電位の測定には測定面全体を十分に湿潤することが必要であるが、本橋は表面被覆が施されており、ケレンした部分での調査となるため、貼付型照合電極により電位の変化を把握することを目的とした調査を行った。測定の結果、いずれの箇所においても電位変化のあることが確認された。

表-3.7.1 表面電位測定結果

部材	OFF電位 (mV)	Ins.OFF電位 (mV)	電位変化量 $\Delta E$ (mV)	部材
<b>G1桁床版</b>				
①貼付型	-121	-101	20	
②貼付型	-147	-116	31	
③貼付型	-201	-169	32	
②鉛照合	-199	-162	37	
<b>G2桁底面</b>				
①貼付型	-316	-288	28	
②貼付型	-322	-291	31	
③貼付型	-302	-270	32	
③鉛照合	-380	-310	70	
<b>G3桁底面</b>				
①貼付型	-297	-274	23	
②貼付型	-257	-252	5	
<b>P1 陽極劣化部3段目</b>				
①貼付型	-228	-204	24	
②貼付型	-312	-271	41	
③貼付型	-337	-301	36	
④貼付型	-341	-299	42	
<b>P1 陽極劣化部5段目</b>				
①貼付型	-448	-404	44	
②貼付型	-457	-419	38	
③貼付型	-564	-520	44	
④貼付型	-627	-572	55	
<b>P1 陽極健全部3段目</b>				
①貼付型	-256	-225	31	
②貼付型	-272	-230	42	
③貼付型	-306	-262	44	
④貼付型	-294	-254	40	
<b>P1 陽極健全部5段目</b>				
①貼付型	-304	-269	35	
②貼付型	-332	-300	32	
③貼付型	-348	-323	25	
④貼付型	-358	-333	25	

※CSEに換算。(貼付型照合電極：読み値-75mV 鉛照合電極：読み値-800 mV)



## 4. 調査結果のまとめ

C橋における詳細調査結果を以下に考察する。

### 4.1 主桁部、床版部

A1-P1 径間、P1 橋脚において目視調査、たたき点検を行った。数箇所において小範囲の変状やひび割れ等が確認されたが、その周囲に浮きや錆汁の発生等はみられておらず、鉄筋腐食を起因とする劣化によるものではなく、表面被覆の割れや膨れに起因するものと推察された。

### 4.2 P1 橋脚部

A2側下段の河床付近において、陽極材の露出、被覆モルタルの劣化および変色が確認された。配管材の脱落により断線した期間にA2側に多くの電流が流れ、水面に近い陽極位置で劣化が助長された可能性が高い。

なお、茶色の変色は知見より、通電によるモルタル中の鉄分濃縮によるものと言われている。4段目より6段目のほうが湿潤環境にあるため、電流が流れやすい6段目の変色がより進行したものと考えられる。

特に防食対象が湿潤環境となる場合は、環境に応じた回路分け、所定のモルタルかぶり厚の確保を行うこと、また、過剰な電流が流れることのないよう適切な通電量を維持していくことが、防食システムの早期劣化を防止するためにも重要であることを認識した。

### 4.3 主桁底面変色部

電気防食の施工は、前処理工としてコンクリート表面の目視または磁石等を利用して、金属片を探索し処理を行うことが一般的であるが、本橋の場合、電気防食施工前より表面被覆が施されているため、チタンリボンメッシュ溝切部以外での金属片を確認することが困難であり、残置された金属片からの錆汁により変色に至ったものと考えられる。なお、通電後に変色が見られた場合、完全に独立した金属片については防食電流への影響は小さいものと考えられるため、定期点検時などに近接しての対応が望ましい。

また、コンクリート表面に非磁性体（エポキシ系等）の塗膜がある場合は、電磁誘導法による鉄筋探索器であれば影響を受けずに探索が可能であることを確認した（電磁波レーダー法では不可）。

### 4.4 直流電源装置

外観の色褪せや内部金属に軽微な腐食が確認されたが、作動状況等に問題はなく機能は有しているものと判断された。なお、日常点検時において確認する受電／運転ランプのカバーが色褪せており、点灯有無の確認が困難であり、点検者がランプ確実に確認できるよう、維持していく必要がある。

また、本橋は通電遮断を知らせる警告灯が設置されており、正常に作動することを確認した。落雷等により電源が落ちた場合、日常点検での表示灯確認では気が付かない場合があり、長期間の通電停止を防止するためにも警告灯の設置は必要であることを認識した。

### 4.5 プルボックス（ケーブル結線部）

プルボックスは樹脂製であり、外面の目立った損傷や劣化もなく健全であった。また、ケーブル結線部は自己融着テープ、ビニルテープで絶縁被覆されており良好であった。また、電線や結線部が密集しており確認が困難な箇所もあった。維持管理の面からも、サイズに余裕をもったプルボックスの選定が望まれる。

#### 4.6 配線配管

本橋の配管は桁を横断するルートにて配置されており、海側に面した直角曲り部に配管材の割れが確認されている。本橋のような海岸に面した厳しい環境に設置する場合、曲りを極力少なくする配管ルートとし配管材の耐久性を向上させるためにも、直射日光や潮風を避けた配置とすることが望ましい。

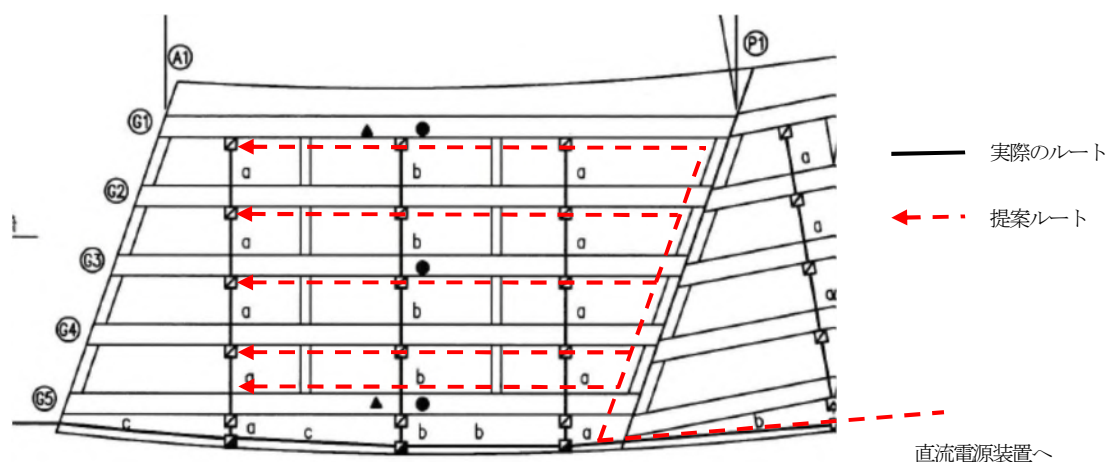


図-4.6.1 配線配管ルート (案)

#### 4.7 防食効果の確認

復極量試験は、オフ 24 時間後の電位変化量により判定を行う事が一般的であるが、本橋のようにコンクリート表面に酸素遮断性の表面被覆等が施されている環境、また、湿潤部等でコンクリート表面に水膜がある環境等では、復極反応に必要な酸素の拡散が遅くなり復極に時間を要すると言われている。今回の測定でもオフ時間を延長した結果、干満部を含む全ての箇所において復極量の増加が確認されており、復極量試験はコンクリート表面環境を考慮した上で防食効果を評価しなければならない。

#### 4.8 湿潤環境への防食

橋脚干満部である No.4 回路は、測定電位および現場確認からも水中環境にあると言える。コンクリートが湿潤環境にある場合、溶存酸素の供給が少なく腐食速度は小さいと言われている。

No.4 回路のような湿潤環境において、所定の電位変化量を確保するために過剰な通電を行うことは陽極や配線、直流電源装置への負荷も過剰になるうえ、電気防食システムの老朽化を早める結果となりかねないため、防食基準の適用に考慮する必要があると考える。

#### 4.9 表面電位による確認

変状部の防食効果確認方法として、表面電位の測定により電位変化量があることが確認された。電気防食装置は供用中において、部分的な変状が生じることも考えられ、今回のように表面電位の測定により鋼材電位の変化を確認することは、変状部への防食効果の確認において有効な調査手法であることが確認できた。

## 5. おわりに

本橋への電気防食の適用は、供用開始42年後の2005年に適用され9年が経過している。主桁および床版は防食基準も満足されており良好な状態であったが、P1橋脚部においては過去にA1側配管材の脱落が生じておりA1側が不通電（期間は不明）となったことで、A2側に2倍の電流が流れていた可能性が高く、A2側の陽極被覆モルタルに茶褐色の変色、モルタルの劣化、陽極材の露出等の変状が確認されている。



写真-5.1 A1側配管材の脱落



写真-5.2 A2橋脚没水部状況

この配管材の脱落が早期に確認できなかった理由として、日常点検、定期点検等による電気防食システムの維持管理が行われていないことが背景にある。先に管理者向けに実施した調査票からも定期点検が行われたのは、電気防食適用開始から9年後の1回のみであることが確認されている。

本橋の場合、陽極システム（陽極材や配線配管材）の全体目視を行うためには、橋面より長梯子により河川敷に降りて長靴（胴長）にて河川内に入る必要がある。このような手間を要することが管理者の点検意識を遠ざけている場合も考えられる。本橋のように目視点検が困難な施設の場合は、維持管理計画書に点検方法を具体的に明記するとともに施設管理者への周知を行うことで、電気防食システムを適切に維持管理していかなければならない。

## 4 編/付録-5 追加調査報告書 (B橋)

### 1. 追加調査概要

#### 1.1 調査概要

調査概要：詳細調査で確認された事象のうち、さらに究明すべき課題を絞りこみ調査を実施した。

調査日：2017年2月13日～2017年3月15日（本調査）

2017年3月17日（モルタル硬化後の確認）

#### 1.2 追加調査位置

今回調査位置を図-1.2.1に示す。

- 電気防食調査 A . . . 直流電源装置, モニタリング装置
- 電気防食調査 B・F . . . チタングリッド部 (G5桁)
- 電気防食調査 C・E . . . 亜鉛シート部 (G9桁)
- 電気防食調査 G . . . チタンメッシュ部 (G3桁)

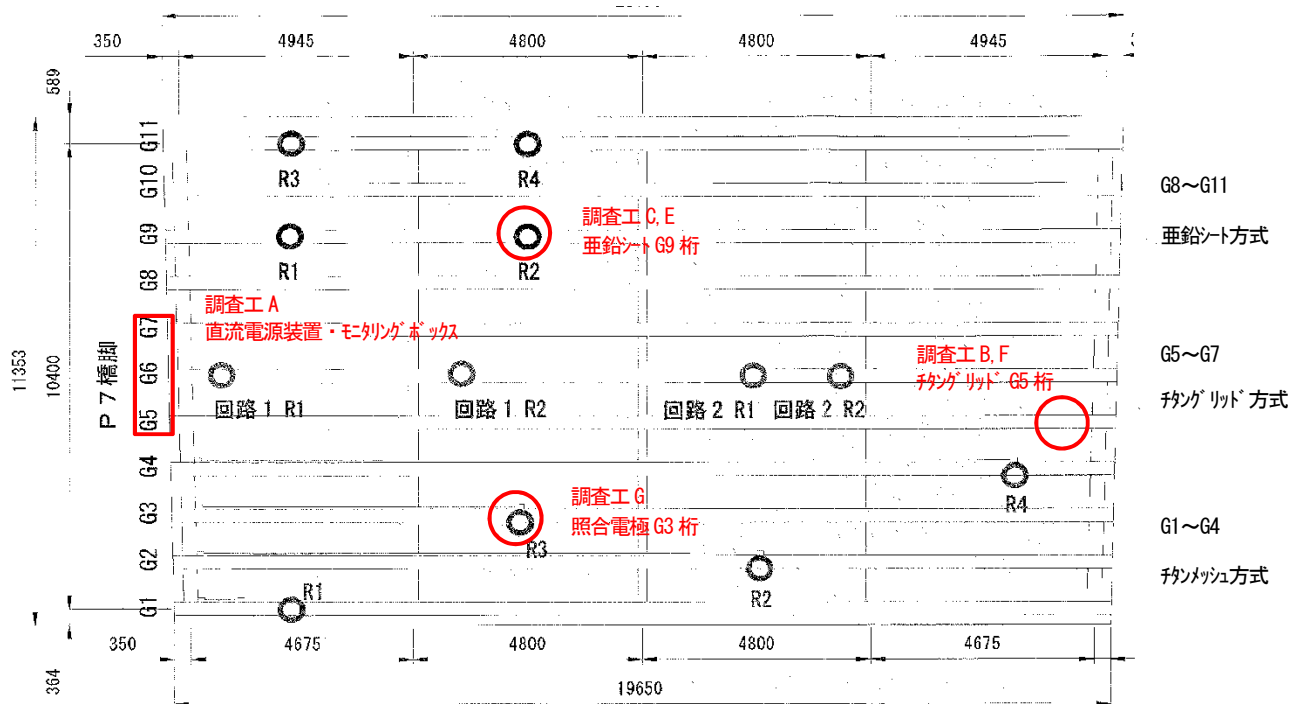


図-1.2.1 調査実施位置図

## 2. 追加調査項目

### 2.1 調査項目

追加調査項目を表-2.1.1に示す。調査は本調査（3日間）、モルタル硬化後の確認（1日）に分けて実施した。

表-2.1.1 調査項目

調査区分	調査目的・内容	実施日
1. 電気防食調査A (通電測定)	チタンメッシュ方式, チタングリッド方式および亜鉛シート方式の電流・電圧値ならびに照合電極の電位を測定。 ① 調査開始時 ② 調査終了時 ③ 調査中, 通電を再開した各段階	2/13 2/15 3/17
2. 電気防食調査B (チタングリッド表面電位測定)	チタングリッド方式の被覆モルタルの浮き部について, 外部照合電極（鉛照合電極）を用いて表面電位を測定。 ① 現状（モルタルが浮いた状態）での測定 ・オン電位 ・インスタントオフ電位 ・オフ電位（電源オフ後1時間*1経過後） ② 陽極設置後モルタル復旧前での測定 ・オン電位（電源オン後3時間*1経過後） ・インスタントオフ電位（電源オン後3時間*1経過後） ③ モルタル補修*2*3後（モルタル硬化後）の状態での測定 ・オン電位（電源オン後24時間*1経過後）  *1)電位測定の経過時間は目安である。実際の測定は電位変化が落ち着いたことを確認して行うこととする。 *2)通電を停止して, 浮き部(□500mm×50mm程度で深さ30mm程度)のモルタル補修（電気防食用被覆モルタル）を行う。浮き部のモルタルを除去する際は, どの箇所から浮きが生じているかを確認できるよう注意深く除去する。また, モルタルは2層仕上げとし, 2層目は1層目が硬化した後に施工する。 *3)補修用モルタル材は, 別途打合せ協議時に指定するものを使用する。	2/14 2/14 2/14  2/14 2/14  2/15
3.電気防食調査C (亜鉛シート調査)	亜鉛シートの採取と既設と同程度の亜鉛シート設置を行う。 ① 撤去箇所の選定（底面1枚, 側面2枚） ② 撤去部周辺の防護網を一時撤去 ③ 撤去部のパテを除去 ・オン電位, オフ電位（電源オフ後1時間*1経過後） ④ 亜鉛シート撤去 ⑤ 撤去箇所のコンクリート外観観察 ⑥ 代替の亜鉛シート設置, 結線, パテ埋め	2/13 2/13 2/14  2/14 2/15 2/15

調査区分	調査目的・内容	実施日
3.電気防食調査C (亜鉛シート調査)	<p>⑦亜鉛シート設置後パテ復旧前での測定 ・オフ電位 ・オン電位（電源オン後1時間*1経過後）</p> <p>⑧ 防護網の復旧</p> <p>⑨ 撤去した亜鉛板は丁寧に梱包して発送し，電気防食調査Eを実施する</p> <p>⑩ 調査B，調査Dで行うモルタル材齢28日以降の付着状況に併せて防食板パテ付着状況等健全性の近接確認</p> <p>*1)電位測定の間経過時間は目安である。実際の測定は電位変化が落ち着いたことを確認して行うこととする。</p>	<p>2/15 2/15 2/15 2/15</p> <p>3/17</p>
4. 電気防食調査E (亜鉛シート消耗状況調査)	<p>撤去した亜鉛シートの消耗状況を調査する。</p> <p>① 外観観察（腐食生成物除去の前後）</p> <p>② 重量測定</p> <p>③ 腐食生成物除去（酢酸アンモニウム水溶液浸漬）</p> <p>④ 乾燥後，重量測定</p> <p>⑤ 残寿命算出</p>	<p>3/2 (報告書)</p>
5. 電気防食調査F (チタングリッド表面電位測定)	<p>チタングリッド方式の被覆モルタルの浮き部について，電気防食調査Bの完了後モルタル材齢28日以降に外部照合電極(鉛照合電極)を用いて表面電位(オン電位，インスタントオフ電位)を測定する。</p> <p>①モルタル材齢28日以降の付着状況の近接目視確認</p> <p>②オン電位，インスタントオフ電位の測定</p>	<p>3/17</p>
6. 電気防食調査G (照合電極調査)	<p>不良となっているチタンメッシュ方式G3桁の埋設照合電極(電極番号:R3)の原因調査を行う。</p> <p>① チタンメッシュ方式回路の電源オフ</p> <p>② 照合電極箇所のプルボックス解放，配線切断</p> <p>③ 照合電極本体ケーブルでの測定（照合電極の健全性確認）</p> <p>④ 本体不良であれば照合電極を取り出しての調査（別途）</p>	<p>3/17</p>

### 3. 通電状態の確認

#### 3.1 調査概要

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。

#### 3.2 防食効果の確認

チタンメッシュ方式、チタングリッド方式および亜鉛シート方式の電流・電圧値ならびに照合電極の電位を測定した。復極量試験の電源停止後のオフ時間は一般的に24時間後とされているが、調査の中で陽極補修等の作業があり都合上48時間としている。

##### 3.2.1 復極量試験の測定結果

測定結果を表-3.2.1に示す。各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-1000mV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。

表-3.2.1 復極量試験測定結果

チタンメッシュ方式				チタングリッド方式				亜鉛シート方式			
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	<b>341</b>	R1-1	-677	-290	<b>387</b>	R1	-549	-215	<b>334</b>
R2	-619	-158	<b>461</b>	R1-2	-684	-326	<b>358</b>	R2	-478	-207	<b>271</b>
R3	-590	-145	<b>445</b>	R2-1	-725	-497	<b>228</b>	R3	-648	-256	<b>392</b>
R4	-708	-234	<b>474</b>	R2-2	-770	-451	<b>319</b>	R4	-505	-254	<b>251</b>

※飽和硫酸銅（CSE.mV）基準に換算

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

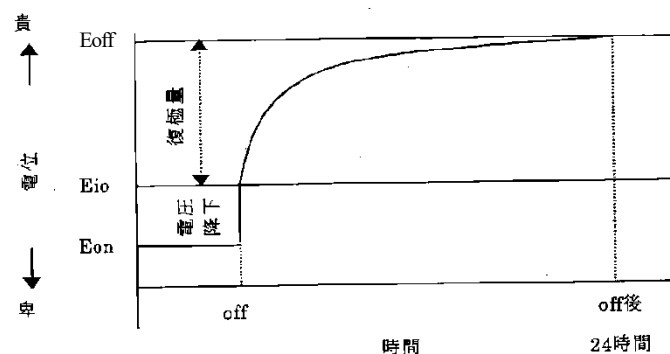


図-3.2.1 復極量試験概念図

### 3.3 チタンメッシュ方式（定電流方式）調査結果

#### 3.3.1 過年度調査結果との比較

チタンメッシュ方式における測定結果の比較を表-3.3.1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。

表-3.3.1 通電結果の比較（概略調査，詳細調査，追加調査）

	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.mV）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

#### 3.3.2 過年度調査結果との比較（寒冷時の傾向について）

H29/03（再追加調査時）における通電電流，電圧の結果を表-3.3.2 右側に追記して示す。電圧は気温が低い時期に増加していることが確認された。

表-3.3.2 通電電流，通電電圧の比較（概略調査，詳細調査，追加調査）

	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	100mA	107mA	110mA	117mA
電圧	1.76V	1.89V	2.61V	2.46V

※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



各測定での通電電圧を通電電流で除した回路抵抗を比較した結果、寒冷時の H29/02（追加調査時）および H29/03（再追加調査時）において回路抵抗の増加が確認された。

回路抵抗

- 1) 概略調査時 H27/06 (6月測定 21°C)  $1.76V \div 0.100A = 17.6\Omega$
- 2) 詳細調査時 H27/11 (11月測定 17°C)  $1.89V \div 0.107A = 17.7\Omega$
- 3) 追加調査時 H29/02 (2月測定 4°C)  $2.61V \div 0.110A = 23.7\Omega$
- 4) 再追加調査 H29/03 (3月測定 8°C)  $2.46V \div 0.117A = 21.0\Omega$

3.3.3 定電流方式通電の考察

- 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) 既往の資料を図-3.3.1に示す。寒冷時にはコンクリート抵抗および全抵抗の増加 (①)、また、鉄筋の分極抵抗の増加 (②) があるとの報告がされている。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

試 験 体	RC はり ③		PC はり ④	
	温 暖	寒 冷	温 暖	寒 冷
気 温 (°C)	22.6	-0.6	19.1	-0.14
電 流 (mA)	2.76	1.85	10.8	5.66
起 電 力 (mV)	713	729	840	825
全 抵 抗 (ohm)	270	411	110	201
コンクリート抵抗 (ohm)	109	204	39.5	107
復 極 量 (mV)	164	200	239	211
アノード分極抵抗 (*)	26.6	25.7	24.6	27.1
カソード分極抵抗 (*)	16.1	29.1	16.1	27.0
デ ー タ 数	7	9	7	7

(\*) : ohm・m<sup>2</sup>

図-3.3.1 温暖時と寒冷時の電気化学的特性\*1)

\*1) 堺孝司, 千葉丈夫; 寒冷環境における鉄筋およびプレストレストコンクリート構造物の流電陽極方式による電気防食特性: コンクリート工学論文集 第7巻第2号, pp.9-17, 1996年7月

### 3.4 チタングリッド方式（定電位方式）調査結果

#### 3.4.1 過年度調査結果との比較

チタングリッド方式における測定結果の比較を表-3.4.1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。

表-3.4.1 通電結果の比較（概略調査、詳細調査、追加調査）

		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°C			17°C			4°C			8°C		
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	陽極被覆モルタル浮き部調査のため測定していない		
	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			

※飽和硫酸銅（CSE.mV）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

#### 3.4.2 定電位方式通電の考察

- 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。

### 3.5 流電陽極方式（亜鉛シート方式）調査結果

#### 3.5.1 過年度調査結果との比較

流電陽極方式における測定結果の比較を表-3.5.1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。（図-3.3.1に寒冷時の電気化学的特性を示す）

表-3.5.1 通電結果の比較（概略調査，詳細調査，追加調査）

	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°C			17°C			4°C			8°C		
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	Eoff	復極量	Eio	Eoff	復極量	Eio	Eoff	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.mV）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

#### 3.5.2 流電陽極方式の考察

1) H29/02，H29/03（寒冷時）には通電電流の低下はあるものの，H27/06，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-3.5.2に陽極鋼材間の電位差測定結果を示す。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。

表-3.5.2 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°C			H29/02/4°C		
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

(単位:mV)

3) アノード電位の平均値は $-866\text{mV}$  (CSE) であり、亜鉛の初期電位 $-1,080\text{mV}$  (CSE) に対し $214\text{mV}$ の貴化が確認された。図-3.5.1に栈橋での流電陽極方式の電位測定事例を示す。経年とともに陽極が消耗し電位が貴化している傾向が示されており、本施設においても同様の傾向が確認された。

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。

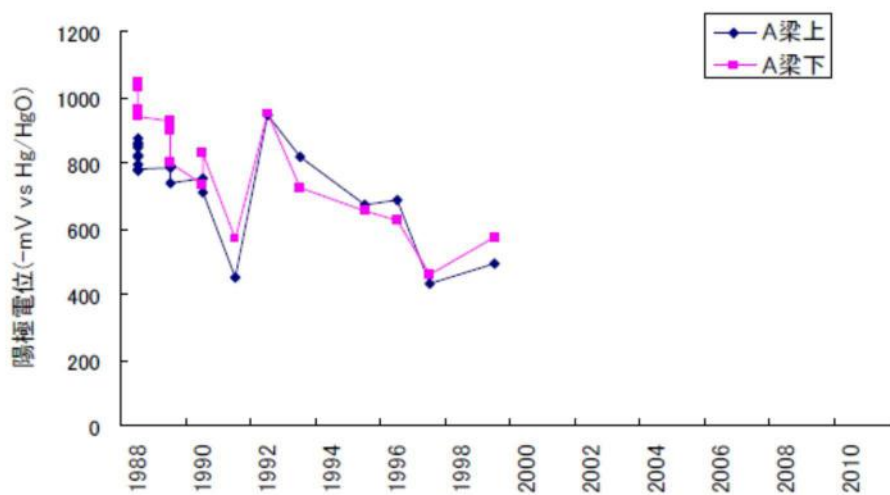


図-3.5.1 流電陽極電位の経年変化<sup>\*1)</sup>

\*1) 栈橋の現地調査について：港湾空港技術研究所 相談事例

## 4. 陽極被覆モルタル浮き部での防食効果の確認

### 4.1 調査概要

チタングリッド方式において確認された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-4.1.2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。

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、実績のあるモルタル材を1層10mm程度で充填した。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。

各調査段階での表面電位測定結果を「表-4.2.1 各状態における表面電位測定結果」に示す。



写真-4.1.1 被覆モルタル浮き部



写真-4.1.2 P1 陽極材確認 (二枚重ね)



写真-4.1.3 表面電位測定状況



写真-4.1.4 モルタル被覆完了

## 4.2 調査結果

### 4.2.1 測定結果一覧

モルタルの浮き部を中心に 100×100mm メッシュにてマーキングを行い、外部照合電極（鉛照合電極）を用いて表面電位を測定した。測定の時系列と陽極の状態一覧表を表-4.2.1 に示す。

表-4.2.1 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)		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)		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)		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)		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)		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)		測定⑤から 通電1時間後 のオン電位	復極量 175mV

## 4.2.2 各段階における測定結果詳細

### (1) 調査① モルタル浮き状態での復極量確認（オフ1時間後）

電源オン状態で陽極周囲のオン／インスタントオフ電位を測定後、電源を遮断して1時間後のオフ電位を測定して復極量を求めた。いずれの測定点においても100mV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。

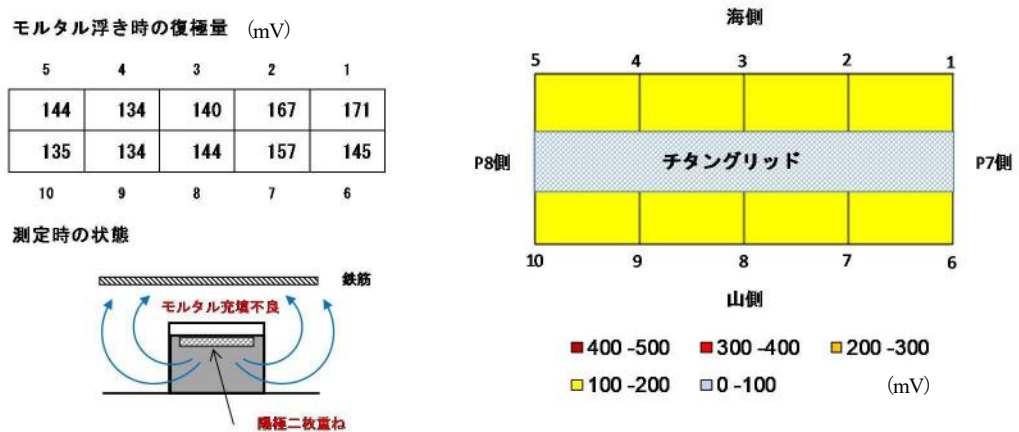


図-4.2.1 オフ1時間後の復極量（分布図）

### (2) 調査② 陽極固定のみでの分極量確認（通電1時間後）

モルタルが剥落した状態を再現するため陽極を樹脂ピンで溝内に固定後、電源投入1時間後のオン／インスタントオフ電位を測定しオフ電位からの分極量を確認した。なお、陽極を樹脂ピンで固定しており実際の剥落より付着が高い状態であり予備的な条件である。

いずれの測定点においても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。

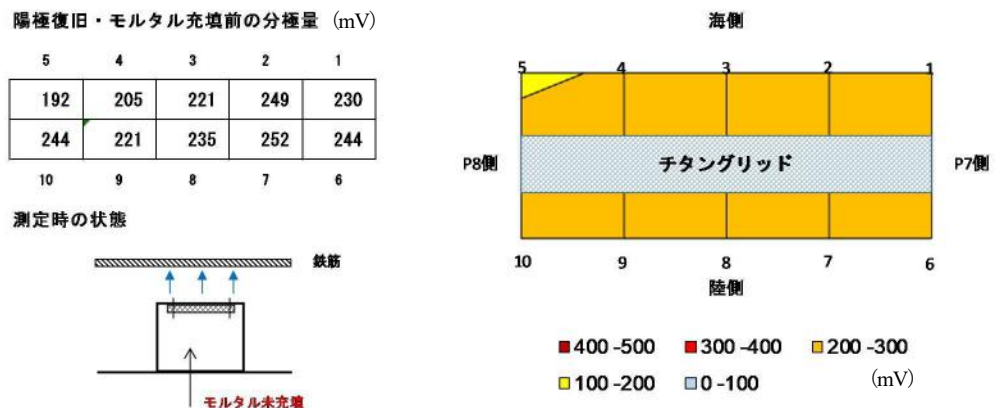


図-4.2.2 通電1時間後の分極量（分布図）

### (3) 調査③ モルタル充填後の分極量確認（通電1時間後）

陽極周囲を電気防食用モルタルで充填を行い、24時間後における電源投入1時間後のオン/インスタントオフ電位を測定し、オフ電位からの分極量を確認した。

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。

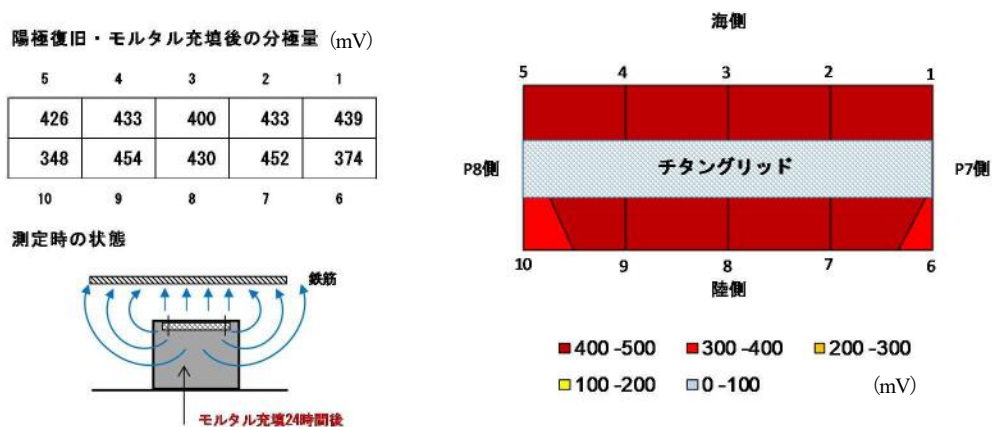


図-4.2.3 通電1時間後の分極量（分布図）

### (4) 調査④ インスタントオフ電位の差

モルタル浮き状態でのインスタントオフ電位、充填硬化後のインスタントオフ電位との差を求めた。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）

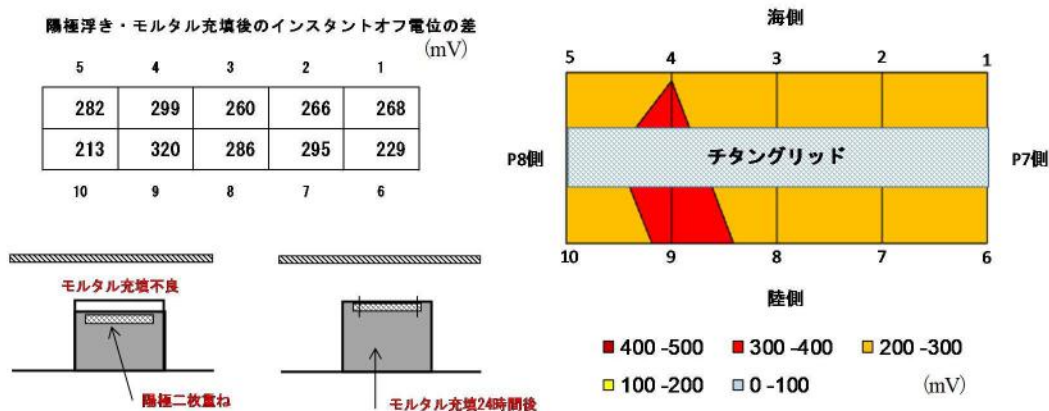


図-4.2.4 インスタントオフの電位差（分布図）



(5) 調査⑥ モルタル材齢 28 日後以降の復極量確認（通電停止 1 時間後）

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、水和反応が終わりモルタルの抵抗が増加したためと思われる。

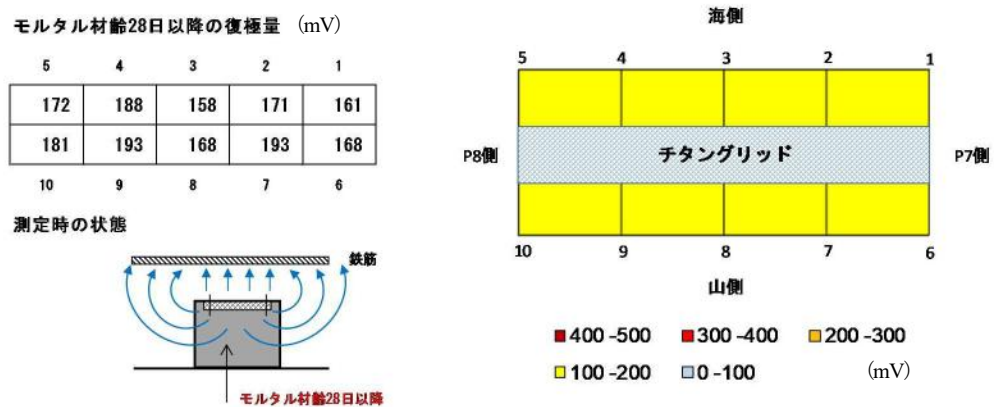


図-4.2.5 浮き部モルタル材齢 28 日後の通電停止 1 時間後の復極量（分布図）

### 4.3 調査結果の考察

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)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)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、分極量が増大したものと考えられる。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)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。

## 5. 耐用年数を経過した防食板の調査

### 5.1 調査概要

耐用年数が経過して使用されている流電陽極（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、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、試験機関にて消耗量調査を行った。

防食板の撤去は周囲のモルタルを除去後、アンカーボルトキャップおよび固定ナット等を取り外し、防食板内部の形状が崩れないよう慎重に撤去した。コンクリート面に付着したバックフィル（電解質）の清掃後、コンクリート面の確認を行った。固定アンカーボルト表面からと思われる錆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、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、防護網を復旧した。

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。



写真-5.1.1 既設防食板（亜鉛シート）



写真-5.1.2 亜鉛防食板撤去完了



写真-5.1.3 コンクリート表面確認



写真-5.1.4 代替防食板設置完了

## 5.2 調査結果

### 5.2.1 表面電位調査

調査対象となる防食板の周囲を 100mm 間隔でマーキングを行い、外部照合電極（鉛照合電極）を用いて表面電位を測定した。測定時系列を表-5.2.1 に、表面電位測定状況を写真-5.2.1、写真-5.2.2 に示す。

なお、測定値はオン電位であり、防食板間の狭い場所での測定でもあるため、測定値に防食評価を求めるものではなく、あくまで部位別における比較や電位変化の増減等を確認するものとする。

表-5.2.1 亜鉛シートの表面電位測定時系列

番号	測定日時	陽極状態	測定項目	備考
①	2/14 15:11	既設防食板	オン電位	
②	2/14 16:13	〃	オフ電位	①通電停止 1 時間後
③	2/15 11:12	代替板設置・パテ復旧前	オフ電位	①通電停止 20 時間後
④	2/15 13:45	代替板設置・パテ復旧前	オン電位	③通電 2 時間後



写真-5.2.1 既設防食板周囲オン電位測定



写真-5.2.2 代替防食板周囲オン電位測定

防食板周囲の表面電位は以下に示す位置で行った。

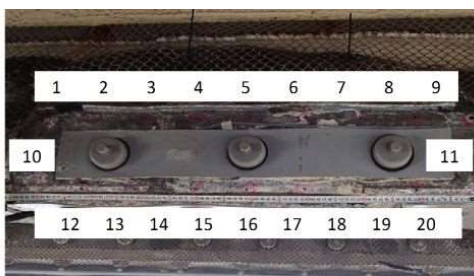


図-5.2.1 山側側面防食板測定位置(20点)

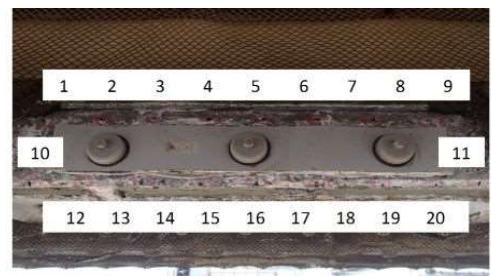


図-5.2.2 海側側面防食板測定位置(20点)

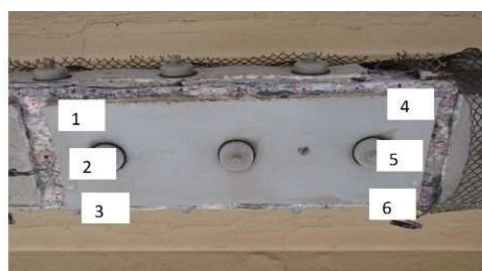


図-5.2.3 底面防食板測定位置(6点)

## 5.2.2 表面電位測定結果

### (1) 調査② 既設防食板設置状態での復極量確認（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。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。

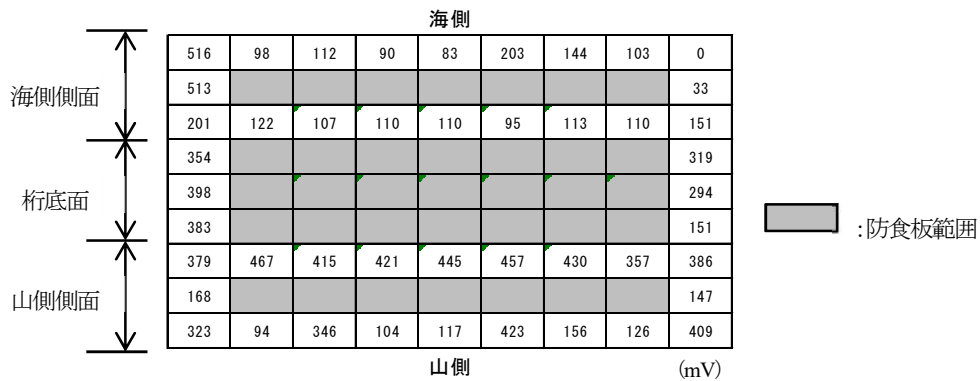


図-5.2.4 オフ1時間後復極量

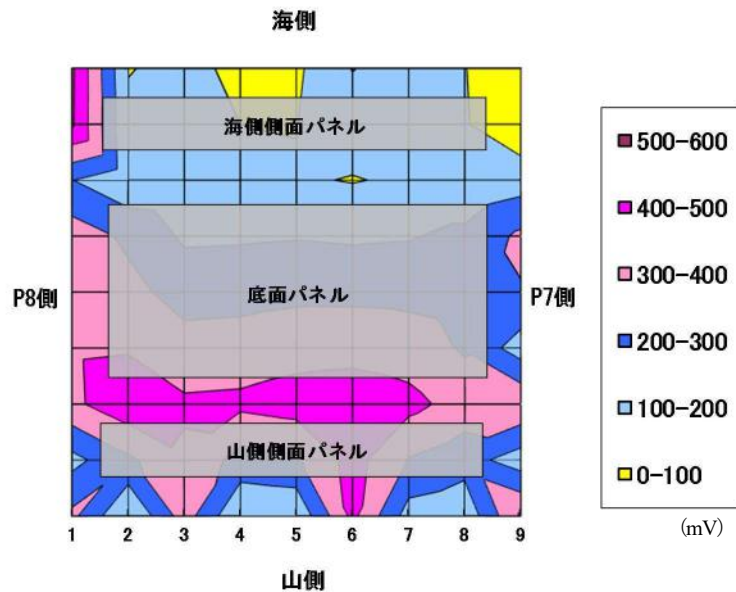


図-5.2.5 オフ1時間後復極量（分布図）

(2) 調査③ 既設防食板設置状態での復極量確認 (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。測定結果を表-5.2.2 に示す。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。

表-5.2.2 既設防食板での復極量オフ時間の比較

オフ経過時間	海側側面	桁底面	山側側面
停止 1 時間後	138 mV	317 mV	227 mV
停止 20 時間後	247 mV	464 mV	333 mV
差 (増分)	109 mV	147 mV	106 mV

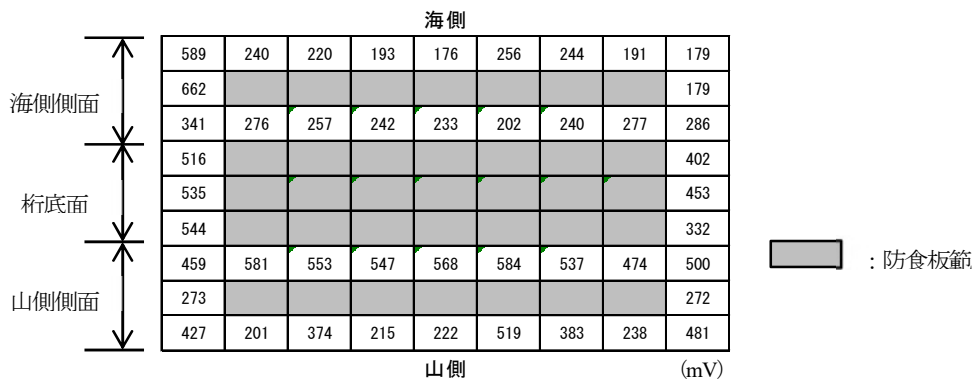


図-5.2.6 オフ 20 時間後復極量

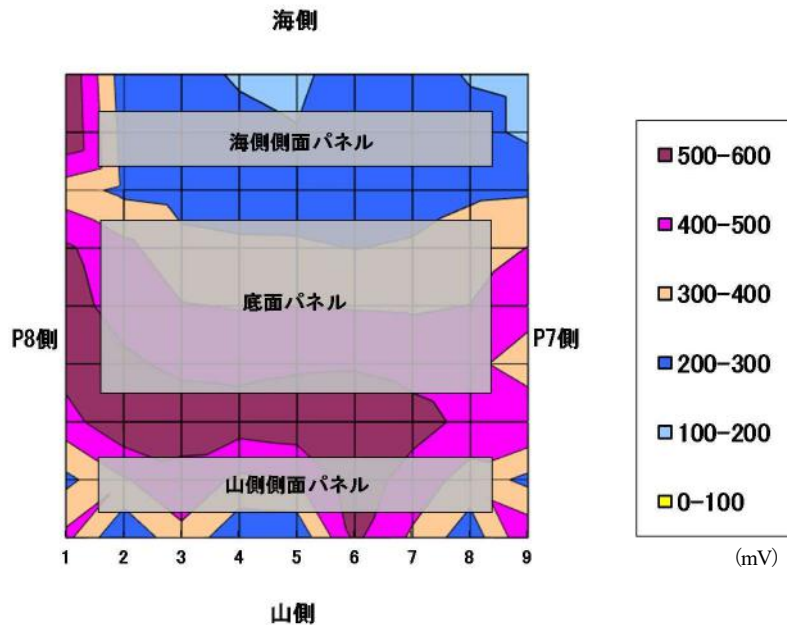


図-5.2.7 オフ20時間後復極量 (分布図)

(3) 調査④ 代替防食板設置状態での分極量確認 (通電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ン電位の比較を表-5.2.3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。

表-5.2.3 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

(mV vs CSE)

### 5.2.3 陽極消耗量調査

採取した防食板（桁底面部1枚＋側面部2枚＝計3枚）の陽極消耗量調査を行った。表-5.2.4 に消耗量分析結果および消耗状況写真を示す。底面防食板の消耗率が大きいことが確認された。

表-5.2.4 消耗率分析結果のまとめ

試料 No.	寸法(mm)	初期質量	残質量	消耗質量	消耗率	推定残寿命	推定総寿命
		$W_i$ (g)	$W_f$ (g)	$W_c$ (g)	$C$ (%)	$T_r$ (年)	$T$ (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

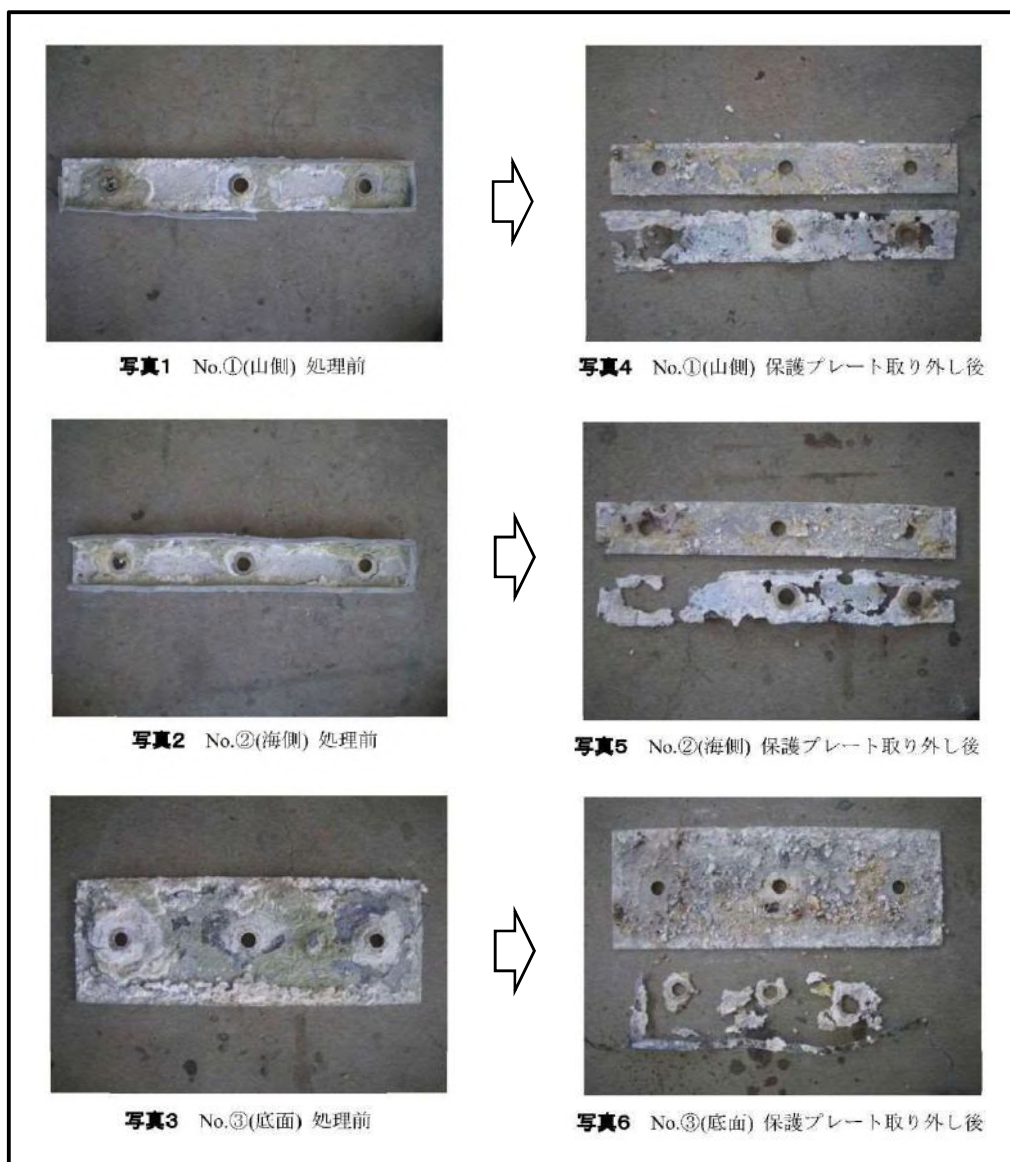
(注) 経過年数  $t$ (年) : 21、厚み 2mm、密度  $7.1\text{g/cm}^3$

[算出式]

$$\text{消耗率 } C(\%) = W_c / W_i$$

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

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



不純物を取り除いた後の各防食板の消耗形態を図-5.2.8に示す。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。



図-5.2.8 酸処理後の陽極状況（亜鉛）



### 5.3 調査結果の考察

耐用年数を過ぎた防食板周囲での表面電位を測定することで、防食効果を定量的に確認することができた。また、消耗量調査により部位別の消耗程度を把握することができた。調査結果からの考察を以下に示す。

#### 1)表面電位測定結果より

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、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する。

表-5.3.1 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	オフ 20 時間後
復極量	247 mV	464mV	333 mV	348 mV	—

mV vs CSE

#### 2)防食効果確認試験について

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について

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。

## 6. モニタリング測定不具合の調査

### 6.1 調査概要

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調査を行った。なお、先に実施した概略調査および詳細調査でも測定不可であった。

表-6.1.1 概略調査時、詳細調査時測定結果 (R3測定不能)

照合電極	H27/06 (概略調査)			H27/11 (詳細調査)		
	Ins.OFF	OFF	復極量	Ins.OFF	OFF	復極量
R1	-458	-259	199	-481	-245	236
R2	-427	-130	297	-489	-125	364
R3	----	----	----	----	----	----
R4	-487	-262	225	-595	-263	332

(mV)

### 6.2 調査内容

#### 6.2.1 各段階における詳細調査内容

調査は、高所作業車により直流電源装置端子台およびG3桁照合電極埋設部に近接して行った。

##### (1) 測定端子台での測定 (通常の測定方法)

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。

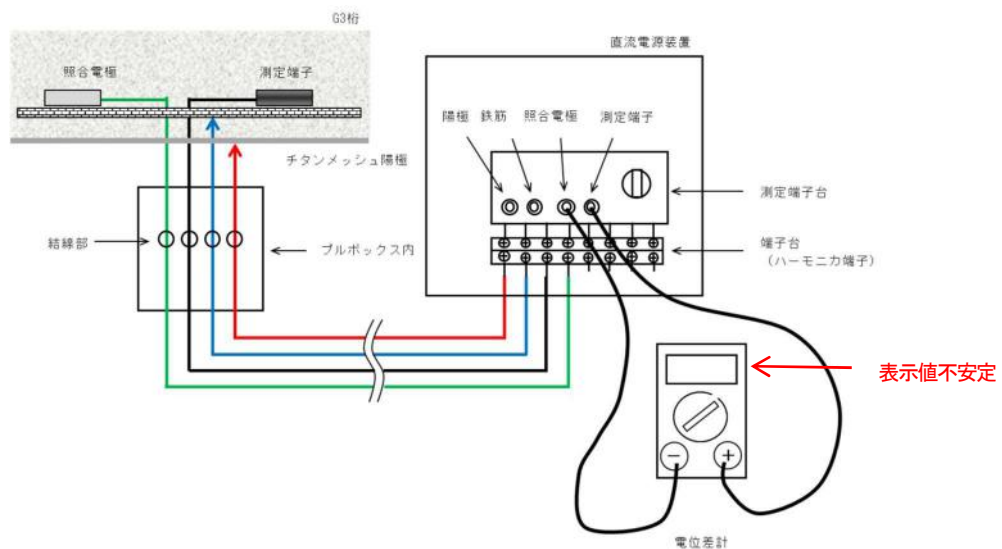


図-6.2.1 測定端子台での測定 (通常の測定方法)



写真-6.2.1 電位値不安定の状況 (17.1mV → 195.7mV)

(2) 照合電極本体ケーブルでの測定

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。

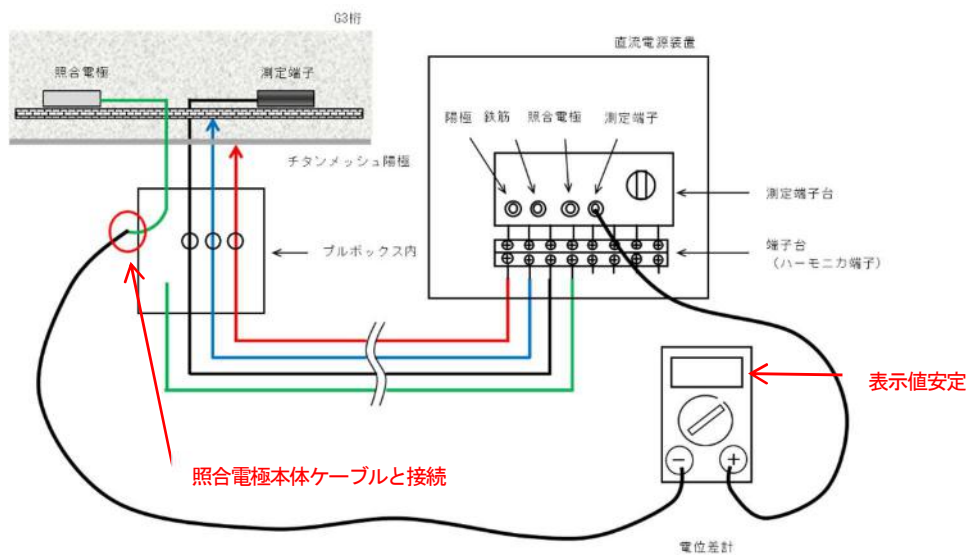


図-6.2.2 照合電極本体ケーブルでの測定



写真-6.2.2 電位値確認状況



写真-6.2.3 電位値安定確認 (145.5mV)

### (3) 照合電極と結線されていたリード線の確認

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。

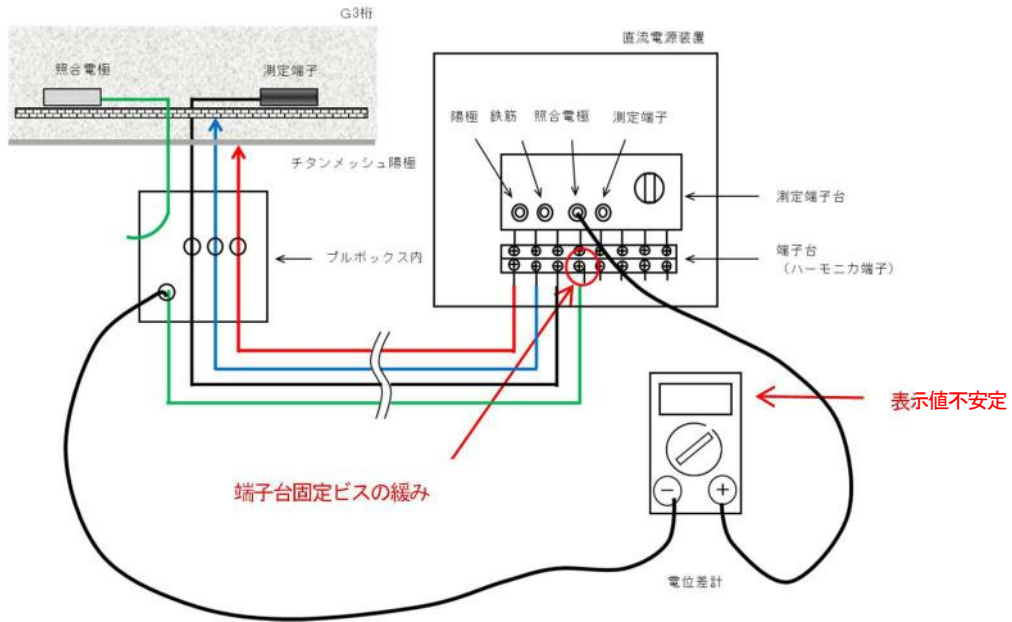


図-6.2.3 照合電極と結線されていたリード線の確認

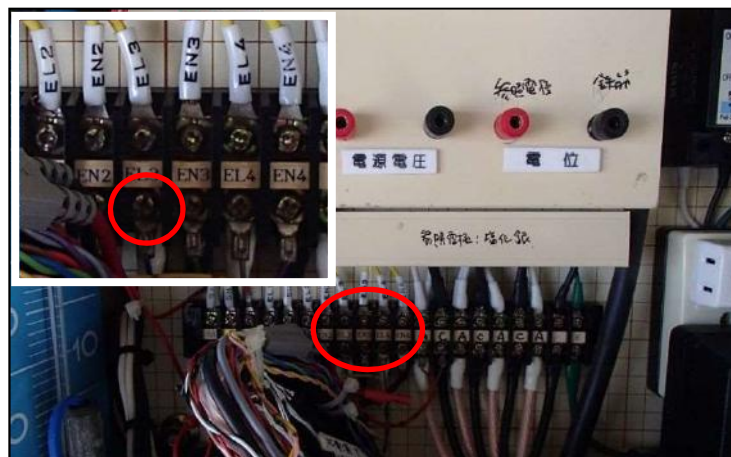


写真-6.2.4 ハーモニカ端子リード線固定部

#### (4) 復旧後の確認（通常の測定方法）

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。

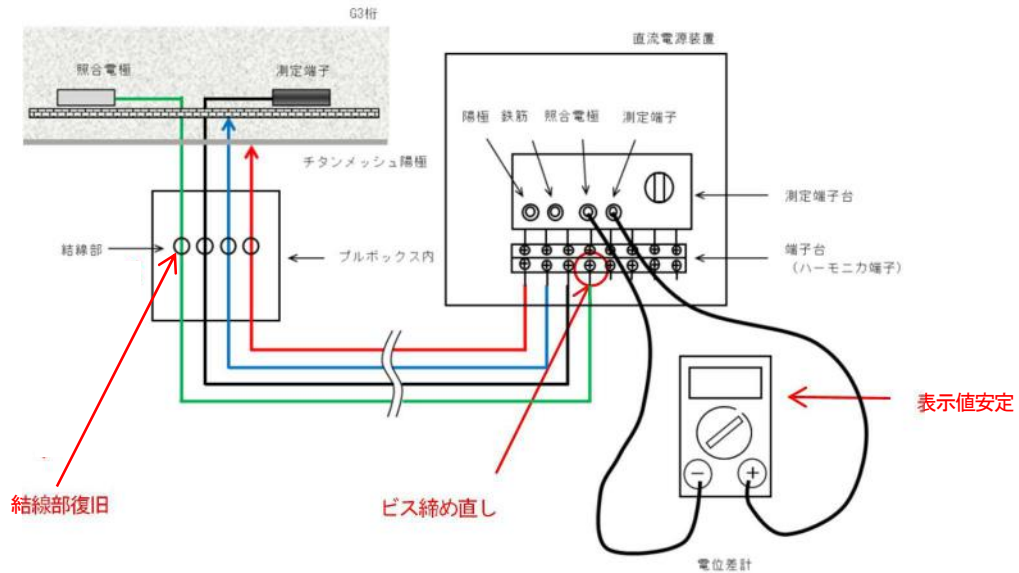


図-6.2.4 復旧後の確認（通常の測定方法）

### 6.3 調査結果の考察

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。

#### 調査手順（参考）

- ①電位差計のケーブルが測定端子に確実に接続されていることを確認  
→確実に接続されていない場合、電位値が不安定となる
- ②リード線の結線部、端子接続箇所等の固定状況、結線部被覆の状態を確認  
→結線部や接続部に欠陥がある場合、電位値が不安定となる
- ③照合電極本体リード線との結線部を解体し、延長リード線の導通を確認  
→リード線に損傷等や接点不良がある場合、ノイズ等により電位値が不安定となる
- ④照合電極本体のケーブルと排流端子ケーブルを直接接続して確認  
→ここで電位値が不安定であれば照合電極の不良を視野に入れた調査を計画する

※今回の調査では、③④の調査により照合電極が健全であることを確認した上で、

②の調査により端子接続不良箇所を発見した。

## 測定データ

- ①電気防食調査 A（通電データ測定）
- ②電気防食調査 B, F（チタングリッド表面電位測定）
- ③電気防食調査 C（亜鉛シート周囲表面電位測定）

① 電気防食調査A 防食効果確認（復極量試験）

測定日：平成29年2月13日 (Eon/Eio電位)・15日 (Eoff電位)	測定者：三宅、大島
---	-----------

【チタンメッシュ方式】

適用桁：	G1・G2・G3・G4	通電電流：	110mA	電流密度：	5.0mA/m <sup>2</sup>						
照合電極：	飽和塩化銀	通電電圧：	2.61V	対象面積：	22.0m <sup>2</sup>						
回路	照合電極	計測値 (mV)				照合電極	飽和硫酸銅 (換算、mV)				判定 (100mV ≤ ΔE)
		Eon	Eio	Eoff	ΔE		Eon	Eio	Eoff	ΔE	
No. 1	R1	-492	-485	-144	341	R1	-612	-605	-264	341	合格
	R2	-541	-499	-38	461	R2	-661	-619	-158	461	合格
	R3	-596	-590	-145	445	R3	-716	-710	-265	445	合格
	R4	-652	-588	-114	474	R4	-772	-708	-234	474	合格

※ R3：電気防食調査Gの実施補修後の値としている

※ 換算電位：計測値-120mV

【チタングリッド方式 No.1回路】

適用桁：	G5・G6・G7	通電電流：	32.9mA	電流密度：	3.0mA/m <sup>2</sup>						
照合電極：	鉛電極	通電電圧：	2.42V	対象面積：	11.0m <sup>2</sup>						
回路	照合電極	計測値 (mV)				照合電極	飽和硫酸銅 (換算、mV)				判定 (100mV ≤ ΔE)
		Eon	Eio	Eoff	ΔE		Eon	Eio	Eoff	ΔE	
No. 1	R1	+96	+123	+510	387	R1	-704	-677	-290	387	合格
	R2	+69	+116	+474	358	R2	-731	-684	-326	358	合格

※ 換算電位：計測値-800mV

【チタングリッド方式 No.2回路】

適用桁：	G5・G6・G7	通電電流：	14.5mA	電流密度：	1.3mA/m <sup>2</sup>						
照合電極：	鉛電極	通電電圧：	1.65V	対象面積：	11.0m <sup>2</sup>						
回路	照合電極	計測値 (mV)				照合電極	飽和硫酸銅 (換算、mV)				判定 (100mV ≤ ΔE)
		Eon	Eio	Eoff	ΔE		Eon	Eio	Eoff	ΔE	
No. 2	R1	+65	+75	+303	228	R1	-735	-725	-497	228	合格
	R2	+25	+30	+349	319	R2	-775	-770	-451	319	合格

※ 換算電位：計測値-800mV

【流電陽極方式】

適用桁：	G8・G9・G10・G11	通電電流：	下表に記載	電流密度：	-----						
照合電極：	二酸化マンガン	通電電圧：	-----	対象面積：	-----						
照合電極	通電電流	計測値 (mV)				照合電極	飽和硫酸銅 (換算、mV)				判定 (100mV ≤ ΔE)
		Eon	Eio	Eoff	ΔE		Eon	Eio	Eoff	ΔE	
R1	2.35mA	-683	-635	-301	334	R1	-597	-549	-215	334	合格
R2	2.64mA	-581	-564	-293	271	R2	-495	-478	-207	271	合格
R3	3.00mA	-778	-734	-342	392	R3	-692	-648	-256	392	合格
R4	2.30mA	-605	-591	-340	251	R4	-519	-505	-254	251	合格

陽極電位 (参考)：R1=-967mV、R2=-963mV、R3=-960mV、R4=-912mV

※ 換算電位：計測値+86mV

② 電気防食調査B,F 表面電位計測結果 (チタングリッド)

【計測時系列】

番号	計測日時	陽極状態	計測項目	備考
①	2/14 9:10	モルタル除去前	Eon・Eio	—
②	2/14 10:15	〃	Eoff	①オ 1h後
③	2/14 13:57	新規陽極設置・モルタル充填前	Eon・Eio	②オ 1h後
④	2/15 14:57	新規陽極設置・モルタル硬化後	Eon・Eio	②オ 24h後
⑤	3/17 14:20	モルタル材齢28日以降	Eon・Eio	—
⑥	3/17 15:20	〃	Eoff	⑤オ 1h後

【計測写真】



マーキング完了



表面電位計測状況



② 表面電位計測結果 ※CSE変換

表面電位（浮き部）

単位：mV

番号	計測日時		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均
①	2/14 9:10	Eon	-607	-584	-571	-579	-572	-583	-575	-573	-585	-575	-580
		Eio	-572	-565	-540	-536	-541	-543	-558	-548	-539	-535	-548
②	2/14 10:15	Eoff	-401	-398	-400	-402	-397	-398	-401	-404	-405	-400	-401
	②-①	復極量	171	167	140	134	144	145	157	144	134	135	147
③	2/14 13:57	Eon	-714	-706	-656	-639	-624	-694	-702	-671	-657	-629	-669
		Eio	-631	-647	-621	-607	-589	-642	-653	-639	-626	-601	-626
	②-③	分極量	230	249	221	205	192	244	252	235	221	201	225
④	2/15 14:57	Eon	-961	-933	-854	-920	-920	-819	-953	-914	-943	-784	-900
		Eio	-840	-831	-800	-835	-823	-772	-853	-834	-859	-748	-820
	②-④	分極量	439	433	400	433	426	374	452	430	454	348	419
	①-④	分極差	268	266	260	299	282	229	295	286	320	213	272

※ 換算電位：計測値-800mV

表面電位（浮き部モルタル補修材齢28日以降）

単位：mV

番号	計測日時		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均
⑤	2/14 9:10	Eon	-621	-729	-649	-765	-772	-601	-824	-734	-821	-738	-725
		Eio	-597	-663	-623	-693	-689	-585	-725	-676	-719	-666	-664
⑥	2/14 10:15	Eoff	-436	-492	-465	-505	-517	-417	-532	-508	-526	-485	-488
	⑥-⑤	復極量	161	171	158	188	172	168	193	168	193	181	175

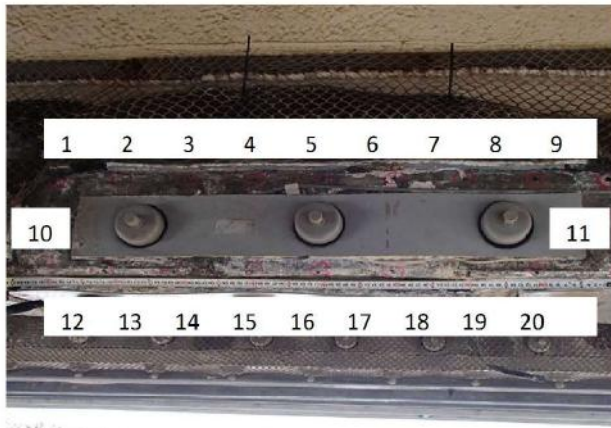
※ 換算電位：計測値-800mV

### ③ 電気防食調査C 表面電位計測結果 (亜鉛シート)

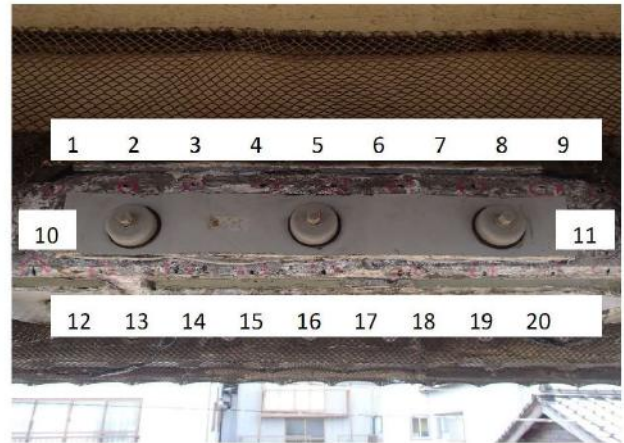
#### 【計測時系列】

番号	計測日時	陽極状態	計測項目	備考
①	2/14 15:11	既設防食板設置	Eon	—
②	2/14 16:13	〃	Eoff	①オフ 1h後
③	2/15 11:12	代替防食板設置・パテ復旧前	Eoff	①オフ 20h後
④	2/15 13:45	代替防食板設置・パテ復旧前	Eon	③オフ 2h後

#### 【計測位置】



山側側面 (山から海を見る)



海側側面 (海から山を見る)



底面 (山から海を見る)

③ 表面電位計測結果 ※CSE換算

表面電位 (山側) 單位 : mV

番号	計測日時	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	平均
①	2/14 15:26	Eon	-844	-524	-812	-526	-517	-884	-719	-549	-637	-605	-847	-912	-884	-882	-900	-917	-869	-814	-925	-698
②	2/14 16:13	Eoff	-521	-430	-466	-422	-400	-461	-563	-423	-469	-458	-468	-445	-469	-461	-455	-460	-439	-457	-539	-471
	②-①	復極量	323	94	346	104	117	423	156	126	409	168	379	467	415	421	445	457	430	357	386	227
③	2/15 11:12	Eoff	-417	-323	-438	-311	-295	-365	-336	-311	-483	-333	-388	-331	-331	-335	-332	-333	-340	-340	-425	-364
	③-①	復極量	427	201	374	215	222	519	383	238	481	273	459	581	553	547	568	584	537	474	500	333
④	2/15 13:45	Eon	-928	-767	-796	-720	-701	-780	-625	-1004	-610	-920	-1129	-1108	-1108	-1113	-1126	-1063	-1075	-1050	-872	-769
	③-④	分極量	511	444	358	409	406	415	289	693	277	246	587	741	777	778	794	730	743	710	447	405

表面電位 (底面) 單位 : mV

番号	計測日時	1	2	3	4	5	6	平均	
①	2/14 15:26	Eon	-905	-970	-992	-744	-748	-651	-835
②	2/14 16:13	Eoff	-551	-572	-609	-425	-454	-500	-519
	②-①	復極量	354	398	383	319	294	151	317
③	2/15 11:12	Eoff	-389	-435	-448	-342	-295	-319	-371
	③-①	復極量	516	535	544	402	453	332	464
④	2/15 13:45	Eon	-787	-912	-954	-1097	-654	-879	-881
	③-④	分極量	398	477	506	755	359	560	509

表面電位 (海側) 單位 : mV

番号	計測日時	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	平均
①	2/14 15:26	Eon	-511	-518	-569	-603	-506	-512	-547	-548	-460	-948	-691	-599	-561	-528	-562	-572	-574	-600	-665	-573
②	2/14 16:13	Eoff	-511	-415	-425	-400	-423	-422	-435	-450	-427	-435	-540	-489	-448	-433	-452	-462	-467	-478	-464	-435
	②-①	復極量	0	103	144	203	83	90	112	98	516	33	513	151	110	95	110	110	107	122	201	138
③	2/15 11:12	Eoff	-332	-327	-325	-347	-330	-319	-327	-308	-281	-286	-405	-322	-321	-326	-329	-330	-317	-324	-324	-326
	③-①	復極量	179	191	244	256	176	193	220	240	589	662	286	277	240	202	233	242	257	276	341	247
④	2/15 13:45	Eon	-913	-1081	-1093	-852	-777	-938	-929	-973	-860	-974	-956	-1124	-1128	-1102	-1119	-1117	-1119	-1126	-1115	-941
	③-④	分極量	581	754	768	505	447	619	602	665	492	711	688	551	802	776	790	787	802	802	791	614

## 5 編 撤去橋梁の調査

### 1. はじめに

#### 1.1 背景と目的

本編では秋田県国道7号線に架設されていた荒磯橋撤去PC桁を対象とし、電気防食工法の防食効果を現地試験と有限要素法による数値解析による評価することを目的とした。荒磯橋は電気防食工法を適用していたにもかかわらず、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再び顕在化した橋梁である。変状が再び顕在化した原因としては、初期の鋼材腐食度の空間分布、コンクリートと断面修復材の電気抵抗率の相違、陽極システムの配置などが推測されたが、供用期間中に実施された点検結果の書類調査のみでは情報が不足しており、原因特定は困難であった。

そこで本編では、荒磯橋の予定供用期間の終了に伴い撤去・移設された同橋のPC主桁を活用し、詳細調査を実施することで変状が再び顕在化した原因を特定することを研究目的とした。併せて、その成果に基づき、電気防食工法を適用した橋梁の維持管理の留意点を整理した。電気防食工法が施工された橋梁で再び鋼材腐食に伴う変状が再び顕在化した事例は極めて稀有であり、従って、その原因を解明した研究事例は他に例を見ない。本編の検討を通じて原因を特定し、電気防食工法の有効性ならびに信頼性を再検証することは、電気防食を適用したコンクリート構造物の維持管理技術の向上に極めて貴重な知見を提供するものである。

本編での調査対象橋梁は、秋田県由利本荘市内の国道7号線上に架橋されていた荒磯橋である。同橋梁から採取したPCa桁を茨城県つくば市の土木研究所内にて保管し、同所内にて種々の調査を実施した。荒磯橋は2径間単純PCポストテンションT桁(6主桁)橋で、架橋位置は日本海の海岸線から300mである。第2径間のPC桁の下フランジを中心に飛来塩分による塩害に起因する変状が生じていたため、外部電源・点状陽極方式の電気防食工法が適用された。

#### 1.2 本編の構成

5編(撤去橋梁の調査)は5章から成り、その概要は以下の通りである。

第1章(はじめに)では、本編の実施内容に関する背景と目的、ならびに、本編の構成を示した。

第2章(荒磯橋の概要)では、書類調査によって荒磯橋の諸元、環境外力、延命化計画と補修・補強履歴および既存の追跡調査の結果を整理した。特に、防食回路については設計図書を整理するとともに再現設計を実施した。また、追跡調査結果については、電気防食工法の運転状況について、電源電圧・電流や電位、復極量の経時変化を整理した。

第3章(撤去桁の調査結果)では、土木研究所内に保管された荒磯橋の撤去桁に対して、現状把握のための調査として、外観調査、鉄筋間および陽極間の導通確認、鋼材電位、コンクリートの電気抵抗率、圧縮強度を測定した。さらに、詳細調査として、既設埋設陽極を用いた通電試験、陽極やバックフィル材の消耗度、コンクリートと断面修復材の電気抵抗率、鋼材腐食状況などを調査し、電気防食適用後に変状が再び生じた原因を追究した。

第4章(FEMによる防食効果の評価)では、撤去桁にて測定した各種物性値を入力値として有限要素法によ

り鋼材の分極量の分布を計算した。また、その計算結果を撤去桁での実測値と比較することで、有限要素法による鋼材の分極量分布の予測の有用性や課題について検討した。

第5章（調査結果のまとめと本検討から得られた知見）では、調査結果をまとめて電気防食工法適用後に荒磯橋に変状が再び顕在化した原因について述べるとともに、そこから得られた電気防食工法の維持管理上の留意点を整理して示した。



法人 道路保全技術センター：平成10年度 荒磯橋他24橋調査設計業務 報告書)に記載のあったコンクリートコア中の塩化物イオン濃度分布の測定結果を再分析し、表面塩化物イオン濃度と見掛けの塩化物イオン拡散係数を「土木学会規準：実構造物におけるコンクリート中の全塩化物イオン分布の測定方法(案)(JSCE-G 573-2003)の附属書2(参考)コンクリート中の全塩化物イオン濃度分布に基づいた見掛けの拡散係数の算出方法」により算出した。結果を表-2.1.1に示す。コアは桁のウェブ部分から採取されたものである。なお、参考として、荒磯橋と同様にチタンロッド方式により電気防食による補修がなされた海士剥橋の調査結果も併せて示す。さらに、表-2.1.2には、同報告書に記載されていた土木研究所方式塩分捕集器で評価した飛来塩分量の評価結果を引用して示す。

表-2.1.1より、コア試料の分析の結果をみると、荒磯橋の表面塩化物イオン濃度は10.0~15.4 kg/m<sup>3</sup>となっており、海士剥橋と比較しても塩害外力(飛来塩分量)が多いことが推察される。また、表-2.1.2の結果を見ても、荒磯橋は海士剥橋よりも飛来塩分量が多い傾向にあることがわかる。これらより、荒磯橋の立地環境は、秋田県沿岸部でも厳しい部類に入る橋梁であると推察される。

表-2.1.1 コア試料による塩害外力の評価結果

橋梁(諸元)	部位	表面塩化物イオン濃度(kg/m <sup>3</sup> )	見かけの塩化物イオン拡散係数(cm <sup>2</sup> /年)
荒磯橋	G3 桁-海側	12.5	0.35
竣工：S40年度	G4 桁-海側	10.0	0.22
調査：H10年度	G3 桁-山側	15.4	0.30
調査時の供用期間：32年	G4 桁-山側	13.1	0.34
海士剥橋	G2 桁-海側	5.5	1.05
竣工：S51年度	G3 桁-海側	8.3	0.22
調査H10年度	G2 桁-山側	4.6	1.68
調査時の供用期間：21年	G3 桁-山側	3.0	0.66

表-2.1.2 土研式塩分捕集器による日平均飛来塩分量(mdd)測定結果

荒磯橋		海士剥橋	
設置・採取日	日平均飛来塩分量(mdd)	設置・採取日	日平均飛来塩分量(mdd)
平成15年12月04日	設置	平成15年12月03日	設置
平成16年01月07日	1.710	平成16年01月06日	1.363
平成16年02月03日	3.723(最大値)	平成16年02月02日	2.795(最大値)
平成16年03月02日	3.611	平成16年03月01日	2.727
平成16年04月06日	1.254	平成16年04月05日	1.304
平成16年05月01日	0.182	平成16年04月30日	0.118
平成16年05月30日	0.084	平成16年05月30日	0.033
平成16年07月04日	0.044(最小値)	平成16年07月03日	0.025(最小値)
平成16年08月01日	0.078	平成16年07月31日	0.031
平成16年08月30日	1.085	平成16年08月29日	0.795
平成16年09月30日	0.421	平成16年09月30日	0.343
平成16年10月31日	0.131	平成16年10月30日	0.078
平成16年11月30日	3.186	平成16年11月30日	1.988
平均値	1.292	平均値	0.967

### 2.1.3 荒磯橋の延命化計画と補修・補強履歴および追跡調査

本検討の調査の範囲では、入手できた維持管理記録は平成10年度（1998年度）以降のものである。ここでは、入手できた範囲の維持管理記録にて荒磯橋の延命化計画と補修・補強履歴および電気防食施工後の追跡調査の結果を整理する。主要な補修・補強履歴と変状の目視確認の履歴は表-2.1.3の通りである。なお、本項で示す追跡調査の結果は主として外観とコンクリート中鋼材の復極量についてであり、電気防食回路や経時的な通電状況の整理については、2.2項にて詳細に記載する。

表-2.1.3 荒磯橋の補修・補強と変状の目視確認の履歴

年度	補修・補強履歴	変状の目視確認の履歴
1965年 (S40)	竣工	
1979年 (S54)	落橋防止装置	
1982年 (S57)	高欄・防護柵	
1985年 (S60)	伸縮装置取替え	
1988年 (S63)	橋梁拡幅	
1997年 (H9)	断面修復（はつり調査の埋戻しであるが、比較的規模が大きい。図-2.1.3参照）	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 既設部のスパン2のG4, G5桁に橋軸方向のひび割れを確認。G5桁の一部にはく離を確認。</li> <li>✓ 近接点検調査およびはつり調査により、PC鋼線の腐食・破断が確認される。</li> </ul>
1999年 (H11)	脱塩工（下部工） 断面修復 電気防食工（既設部上部工） 伸縮装置取替え・外ケーブル 舗装・排水施設・表面塗装（拡幅部）	
2001年 (H13)		<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ ごく一部で仕上げ材のはく離などの軽微な変状が確認されるが、防食状態は良好。</li> </ul>
2002年 (H14)		<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ ごく一部で仕上げ材のはく離などの軽微な変状が確認されるが、防食状態は良好。</li> </ul>
2003年 (H15)	はつり調査部について断面修復。	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 鋼材腐食に起因するひび割れ・浮きが確認される。</li> <li>✓ 埋めこみ照合電極による復極量は100 mV以上であり、防食規準を満足していた。</li> <li>✓ 詳細調査の結果、浮部周囲の復極量は100 mVより小さかった。</li> </ul>
2004年 (H16)	橋面防水工	
2010年 (H22)		<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 防食対象の下フランジに設置された埋め込み型照合電極により測定した復極量は、下フランジ下面において100 mV未満になるものがあった。</li> <li>✓ 安定した電位を示さない照合電極が一部で確認された。</li> <li>✓ H21年度の橋梁定期点検結果と今年度の現地踏査結果を比較しており、損傷が著しく進行していること、特に、補修した断面修復材が浮いて、その後剥落して剥離・鉄筋露出に至っていることを指摘している。</li> </ul>



(1) 平成 10 年度（1998 年度）（平成 10 年度 荒磯橋他 24 橋調査設計業務 報告書より）

荒磯橋の現況について述べられており、要約すると次のようになる。

- ✓ これまで一度も塩害補修を行っていないのは、顕著な兆候が表れなかったため。（少なくとも、平成 9 年度までは特段の補修工事は実施されていないようである。）
- ✓ しかし、平成 9 年度の調査において、次の事象が確認されている。
  - 近接点検調査およびはつり調査により、PC 鋼線の腐食・破断が確認された。
  - ウェブコンクリートから採取したコアによる含有塩分量調査によると、PC シース位置（G3 桁）で  $4.5 \text{ kg/m}^3$  に達していた。中性化深さは 4.4 cm であった。
  - 表面に凍害が原因と考えられるポップアウトが主桁ウェブのあちこちで観察された。
  - 荒磯橋は全面にわたり湿っており、橋面からの水の浸透も他の橋梁に比べて多いようである。
- ✓ 塩害の兆候は明白であり、第 2 スパンでは、塩害特有の幅の広い橋軸方向ひび割れが随所に見られる。特に、山側に位置する G5、G6 桁においては、部分的にコンクリートのはく離・はく落も見られる。

このように、荒磯橋は塩害環境の厳しさに加えて、主桁のコンクリートは PC 桁としては物質透過抵抗性がさほど高くはないこと、橋面からの漏水も懸念され、コンクリート中鋼材は極めて厳しい状況にあったことが理解できる。写真-2.1.1 は、はく離・はく落の変状が確認された G5 桁および G6 桁のはつり調査部の PC 鋼線の状況である。また、図-2.1.2 は、はつり部において確認された PC 鋼線の腐食状況であり、図-2.1.3 は荒磯橋のスパン 2 の断面修復箇所である。これらの図より、スパン 2 の G5 桁と G6 桁が特に PC 鋼線の腐食が進行し、断面修復箇所が多いことがわかる。本検討では、腐食状況が厳しいスパン 2 の G5 桁を中心に調査を行っている。また、比較のために、腐食状況が比較的緩やかなスパン 2 の G3 桁も対象とした。

同報告書内には、荒磯橋の延命策として、次のような記載がある。

「荒磯橋については・・・（中略）・・・、新技術である電気防食工法の試験的採用によって、今後の腐食進行を抑止し、また耐荷力増強効果のある外ケーブルを主桁に補強することで、長期的供用を維持していく計画である。ただし、この場合、電気防食部分は主桁下フランジ部に限られるので、その他の表面には、塗装処理を施す・・・（中略）・・・さらに近いうちに、橋面工、伸縮装置に関しても、補修工事を予定している。」

つまり、既設部の上部工の対策としては、①変状が著しい下フランジ部は電気防食工法を採用、②それ以外の部分は表面塗装処理、③橋面防水工などの排水設備の補修は、優先度を下げているものの、事後に必ず実施するという方針が立てられていることが理解できる。



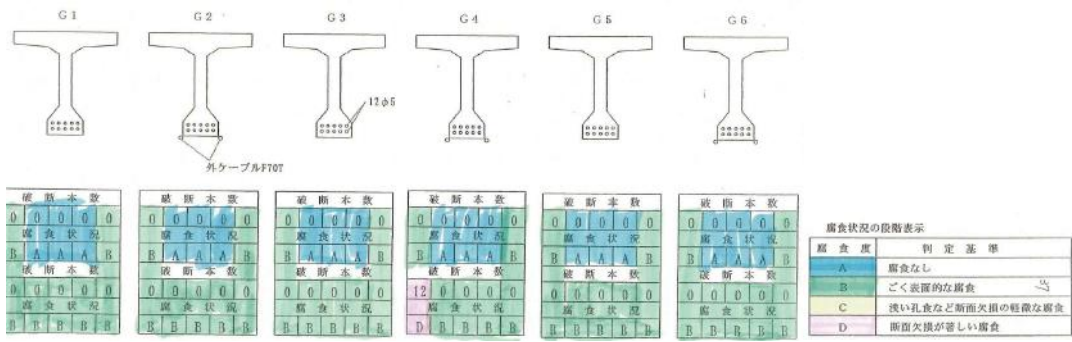
(a) G5 桁



(b) G6 桁

写真-2.1.1 荒磯橋第 2 スパンはつり部の PC 鋼線の状態

【荒磯橋スパン1】



【荒磯橋スパン2】

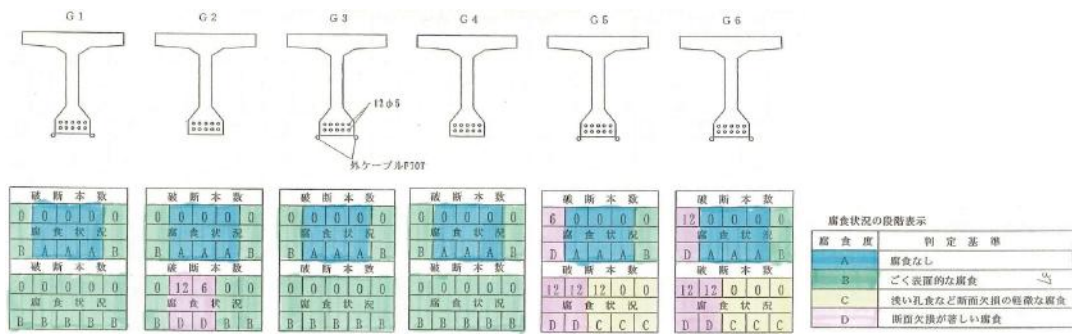


図-2.1.2 荒磯橋のPC鋼線の腐食状況

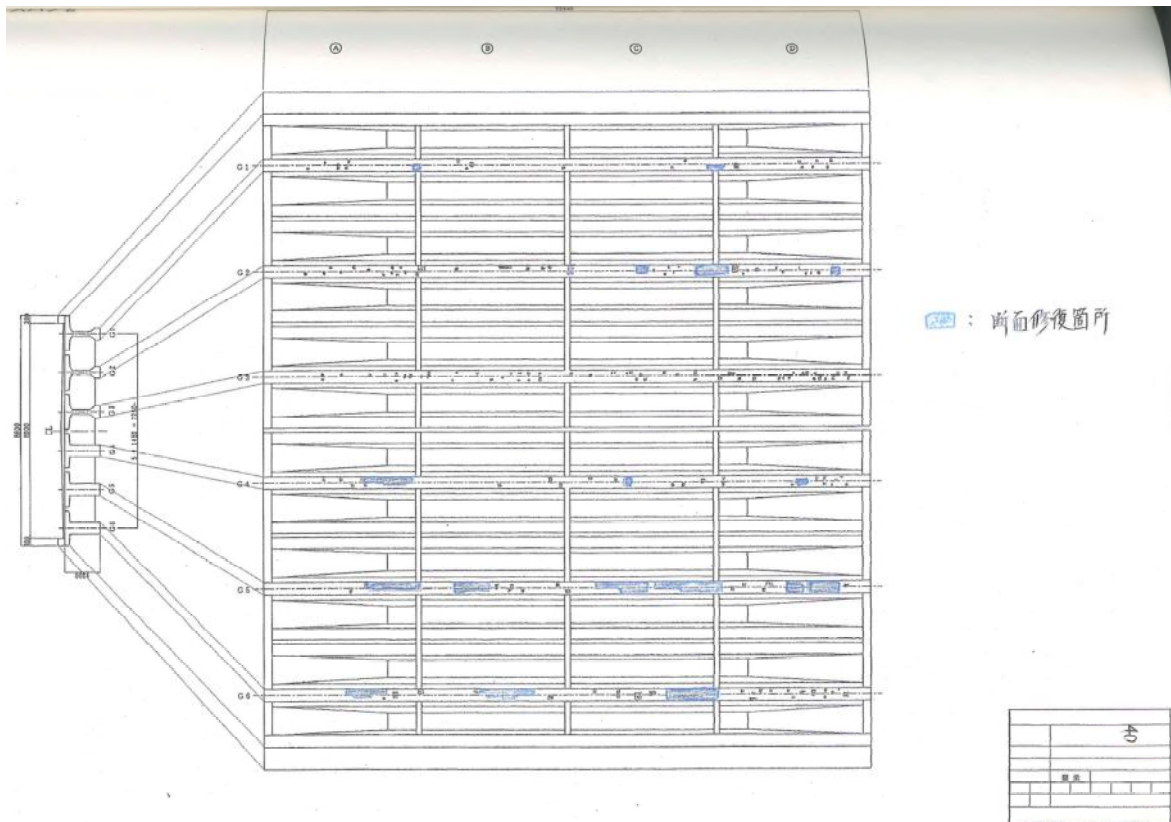


図-2.1.3 荒磯橋（スパン2）の断面修復箇所

(2) 平成 13 年度 (2001 年度) (平成 13 年度 象潟橋他調査検討 報告書より)

電気防食施工後の荒磯橋の追跡調査の結果について述べられており、要約すると次のようになる。

- ✓ 仕上げ材 (ごく薄い被膜) やモルタルのはく離などが部材のごく限られた部位で報告されているが、**写真-2.1.2** と **写真-2.1.3** に示すように、鋼材腐食が主因ではないと考えられる。
- ✓ 防食対象の下フランジに設置された埋め込み型照合電極により測定した復極量はいずれの回路でも 100 mV 以上であり、防食効果ありと判定されている。



写真-2.1.2 仕上げ材のはく離 (スパン2 G5 桁)



写真-2.1.3 はく離 (スパン2 G2 桁)

(3) 平成 14 年度 (2002 年度) (平成 14 年度 本荘地区塩害調査検討業務 報告書より)

電気防食施工後の荒磯橋の追跡調査の結果について述べられており、要約すると次のようになる。

- ✓ 仕上げ材 (ごく薄い被膜) やモルタルのはく離などが部材のごく限られた部位で報告されているが、平成 13 年度の報告と同様に鋼材腐食が主因ではないと考えられる。特に、はく離部分については周辺部に浮きはないことが報告されている。(スパン 1 G2 桁)
- ✓ 防食対象の下フランジに設置された埋め込み型照合電極により測定した復極量はいずれの回路でも 100 mV 以上であり、防食効果ありと判定されている。

(4) 平成 15 年度 (2003 年度) (平成 15 年度 本荘地区塩害調査検討業務 報告書より)

電気防食施工後の荒磯橋の追跡調査の結果について述べられており、要約すると次のようになる。

- ✓ 2003 年 10 月の調査で、スパン 2 の G2 桁の下フランジにひび割れと浮きを確認している (**写真-2.1.4** および **写真-2.1.5**)。
- ✓ 2004 年 1 月の調査で、さらにスパン 2 の G6 桁の桁下にひび割れを確認している (**写真-2.1.6**)。
- ✓ 防食対象の下フランジに設置された埋め込み型照合電極により測定した復極量はいずれの回路でも 100 mV 以上であり、防食効果ありと判定されている。
- ✓ 鋼材腐食に伴うひび割れが発生したため、スパン 2 の秋田側の桁端部付近において、詳細調査を実施している。その結果、各桁に変状が発生していることが確認されている (**表-2.1.4**)。
- ✓ スパン 2 の G2 桁の下フランジにおいて発生した浮きの周辺にて電位測定を実施したところ、浮き部分を中心に 16 時間復極量が 100 mV 以下となった (**図-2.1.4**)。
- ✓ **表-2.1.4** に示される変状に対して、はつり調査などを実施し、原因についての考察がなされている。**表-2.1.5** に、報告書の抜粋を示す。



写真-2.1.4 下フランジ下面のひび割れ  
(スパン2 G2桁)



写真-2.1.5 はつり後の鋼材の状況  
(スパン2 G2桁)



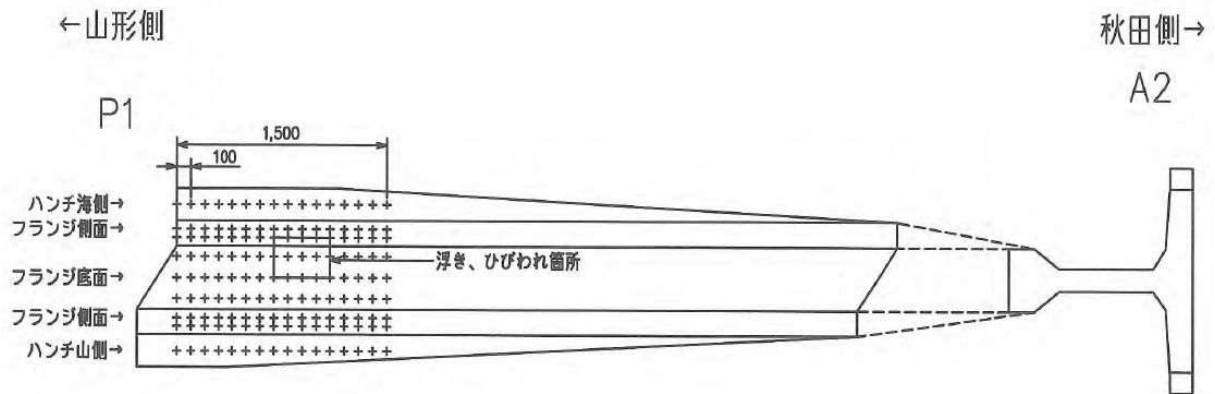
写真-2.1.6 桁下のひび割れ (スパン2 G6桁)

表-2.1.4 詳細調査 (近接目視) により判明した変状 (スパン2)

表 - 6.5.1 変状箇所一覧

桁	ひびわれ	浮き	その他	備考 (6.7参照)
G1	幅 0.3×長さ 400mm	100×100mm		写真 18
	幅 0.5×長さ 600mm			写真 19
	幅 1.5×長さ 600mm			写真 20
G2	幅 0.8×長さ 700mm	450×200mm	はつり調査	写真 21
	幅 0.8×長さ 1000mm			写真 21
	幅 0.6×長さ 500mm	50×50mm		写真 22
	幅 0.5×長さ 700mm	200×100mm		写真 23
G3	幅 0.2×長さ 700mm	×mm		写真 23
		200×100mm	はつり調査	写真 24
		200×100mm	はつり調査	写真 24
G4	幅 0.6×長さ 850mm			写真 25
	幅 0.3×長さ 600mm			写真 25
G5			陽極頭部の変色	写真 26
	幅 0.9×長さ 1600mm			写真 27
	幅 0.9×長さ 1100mm			写真 28
G6	幅 1.0×長さ 700mm			写真 29
	幅 0.5×長さ 900mm			写真 30
	幅 0.5×長さ 600mm			写真 30
	幅 0.5×長さ 400mm			写真 30
	幅 0.7×長さ 1200mm			写真 31
	幅 0.5×長さ 1000mm			写真 32
		150×150mm		写真 33

(平成 15 年度 本荘地区塩害調査検討業務 報告書より抜粋)



G2下フランジ展開図

図-6.5.2 調査範囲図

測定点は①～⑨まで計9点×16列 144点とした。

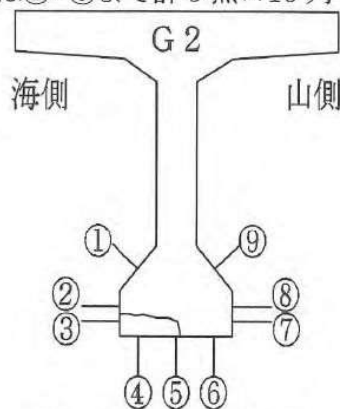


図-6.5.3 測点位置

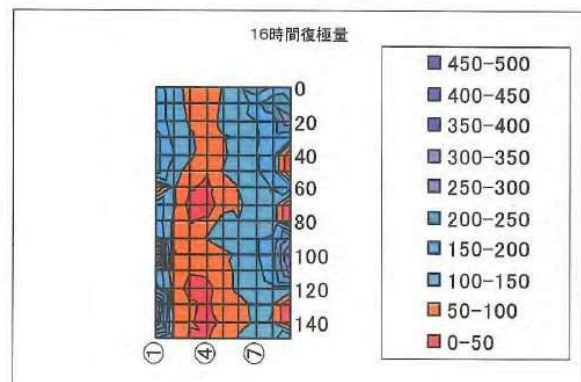
- ① 海側ハンチ
- ② 海側側面上
- ③ 海側側面下
- ④ 海側底面
- ⑤ 中央底面
- ⑥ 山側底面
- ⑦ 山側側面下
- ⑧ 山側側面上
- ⑨ 山側ハンチ

--- 浮き箇所

--- コンクリートハツリ箇所

復極量	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨
0	178	112	86	72	106	143	114	158	172
10	182	121	85	65	108	109	188	242	204
20	185	120	91	67	121	121	150	172	279
30	213	138	109	68	95	104	146	175	158
40	213	148	113	65	88	149	148	159	
50	216	124	76	53	103	113	147	162	
60		105	57	38	68	103	139	152	165
70	180	105	28	12	81	87	142	125	
80	181	92	47	57	120	103	111	123	
90	202	94	75	102	110	112	147	155	259
100	471	104	52	68	95	103	145	178	361
110	184	80	56	63	84	111	136	177	309
120	207	85	24	29	80	111	125	144	137
130	392	87	58	41	73	81	113	102	
140	359	91	55	36	56	82	107	97	
150	159	90	44	46	67	105	121	139	193

図-6.5.7 復極量



(平成15年度 本荘地区塩害調査検討業務 報告書より抜粋) [単位: mV]

図-2.1.4 調査範囲と16時間復極量の分布 (スパン2・G2桁)

表-2.1.5 詳細調査における原因推定の結果（報告書の抜粋）

## 6.6 考察

### 6.6.1 全体概要

当該構造部物内部に取り付けてある個々照合電極の判定結果からは 100mV 以上の復極量が得られており、適切な防食電流が供給されている。

しかし、一部外観変状が確認されたため、詳細調査を行った結果、調査対象部（G2 浮き部分の周辺）では、100mV 以下の箇所が確認され、鋼材の腐食の進行と外観変状箇所との相関があるものと推定された。

以下に浮き、ひび割れ等の外観変状について、部位毎の状況および考察を取りまとめた。

### 6.2.2 G2 桁下、側面に発生したひび割れ、浮きに関して

〔状況〕

- ・ 当該箇所のコンクリートを撤去した結果、鋼材が腐食しひび割れに沿って錆汁が流出していた（写真 - 6.2.1~2 参照）。
- ・ 錆の発生時期については不明。



写真 - 6.6.1 G2 下面



写真 - 6.6.2 G2 下面 はつり後

〔推定原因〕

- ・ 過去の補修時において鋼材の周辺に錆などによる空隙またはひび割れが存在し、下フランジの一部に対し十分な防食電流が供給されていなかった。
- ・ 過密配筋箇所に建設当初からの空隙などが存在したことによって、下フランジの一部に対し十分な防食電流が供給されていなかった。
- ・ 過去に修復したモルタルの電気抵抗値が躯体コンクリートと比較して高いため、既補修部に防食電流が供給されにくい状況にあった。

次頁に続く

### 6.6.3 G3桁ハンチ部に発生した浮きに関して

〔状況〕

- ・ 当該箇所のハンチ部分のコンクリート表層に浮きが確認されたため、かぶりコンクリートを撤去したところスターラップ筋の腐食が確認された（写真 - 6.6.3～4 参照）。
- ・ 鉄筋と陰極の電氣的導通は確保されていた。
- ・ 近傍の陽極には適切な電圧が印加されていた。



写真 - 6.6.3 G3 ハンチ部



写真 - 6.6.4 G3 ハンチ部

〔推定原因〕

- ・ 電気防食施工以前に鉄筋周辺のコンクリートに剥離層が存在し、剥離部に面した鋼材に十分な防食電流が供給されていなかった。

### 6.6.4 G4桁陽極周辺のコンクリートが変色し、流出物の痕跡が確認されたことに関して

〔状況〕

- ・ 当該箇所の陽極のうち5本において、陽極埋設部のコンクリートが周辺の陽極と比較して変色し、流出物の痕跡が確認された。（写真 - 6.6.5 参照）
- ・ バックフィル材が流出した痕跡は確認できなかった。
- ・ 陽極には適切な電圧が印加されていた。（写真 - 6.6.6 参照）

〔推定原因〕

- ・ 何らかの原因で削孔部に水が回り、埋め戻し材を通じてコンクリート表面に水が染み出したものと推測された。



写真 - 6.6.5 G4 陽極頭部



写真 - 6.6.6 電圧確認（正常値）

次頁に続く

6.6.5 その他ひびわれ、浮き、点錆に関して

[状況]

- ・ 大断面修復部に桁底面の軸直角方向、G5 桁側面と下面にひび割れが確認された(写真 - 6.6.7 ~8 参照)。
- ・ 電氣的導通の確保されていない腐食金属(露出したアンカー類)の存在が確認された(写真 - 6.6.9 参照)。



写真 - 6.6.7 G5 桁側面のひび割れ



写真 - 6.6.8 G5 桁下面のひび割れ



写真 - 6.6.9 G5 桁の非導通金属(腐食)

[推定原因]

- ・ 大断面修復周辺の軸方向のひび割れは電気防食適用以前から存在していた可能性が推測された。2000年5月に撮影された同箇所の写真 - 6.6.10~11を参照。
- ・ 桁底面の軸直角方向のひび割れは、電気防食適用以前の補修材の乾燥収縮によって引き起こされ、その後内部鋼材の腐食によって割れが進行したことが推測された(1999年9月に撮影された同箇所の写真 - 6.6.12 参照)。



写真 - 6.6.10 防食前の2000年5月撮影

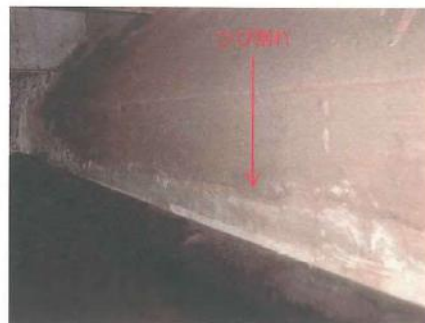


写真 - 6.6.11 防食前の2000年5月撮影



写真 - 6.6.12 1999年9月撮影



(5) 平成 16 年度 (2004 年度) (平成 16 年度 本荘地区橋梁電気防食追跡調査 報告書より)

- ✓ 防食対象の下フランジに設置された埋め込み型照合電極により測定した復極量はいずれの回路でも 100 mV 以上であり、防食効果ありと判定されている。
- ✓ 一方、下フランジの下面や側面の一部において外観変状が見受けられ、特定箇所において僅かながら浮きやひび割れの進展が確認されている。
- ✓ スパン 2 (G2, G3, G5 桁) を対象として、外部設置型の照合電極にて鋼材の自然電位分布、復極量分布を測定した。その結果、概ね復極量は 100 mV 以上であったが、外観変状が見られた下フランジの一部では復極量が 100 mV に達していない箇所が確認された。
- ✓ 1998 年 8 月の調査結果と比較すると、自然電位は全体的に貴側にシフトしており、鋼材周囲の腐食環境が改善されていると判断されたが、変状が確認されている部位の自然電位は ASTM C87-6-80 の判定基準で腐食域と判定された。
- ✓ 前年の調査時のはつり調査を行った際の補修材 (スパン 2・G2 桁) で浮きが確認されている。

(6) 平成 22 年度 (2010 年度) (平成 22 年度 管内橋梁調査設計業務 電気防食調査報告書より)

平成 15 年度 (2003 年度) の詳細調査と同様の位置で外部照合電極による電位分布の評価がなされており、要約すると次のようになる。

- ✓ 防食対象の下フランジに設置された埋め込み型照合電極により測定した復極量は、下フランジ下面において 100 mV 未満になるものがあつた。
- ✓ 安定した電位を示さない照合電極が一部で確認された。
- ✓ H21 年度の橋梁定期点検結果と今年度の現地踏査結果を比較しており、損傷が著しく進行していること、特に、補修した断面修復材が浮いて、その後剥落して剥離・鉄筋露出に至っていることを指摘している。損傷の原因は、過去に補修した断面修復材付近に多くの損傷が見られることから、マクロセル腐食によるものと推測している。図-2.1.5 に H21 年度と H22 年度の変状の比較結果、図-2.1.6 に断面修復材の位置と変状位置の比較図を示す。

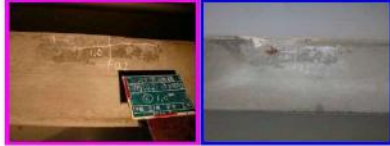
6.3. 荒磯橋の地質影響評価

6.3.1. 橋梁定期点検結果との対比

本橋は、昭和40年度に竣工し45年経過した単純RCポステンT桁橋(2連)である。昭和61年度に海側へ側道橋として単純鋼板桁橋(2連)の架設。昭和63年度に山側へ単純RCポステンT桁橋(2連)にて拡幅されている。

昨年度の平成21年度に橋梁定期点検が実施されている。特に損傷が著しい第2径間の桁下のH21橋梁定期点検結果と今年度の現地調査結果を対比して以下に示す。

①：写真番号41



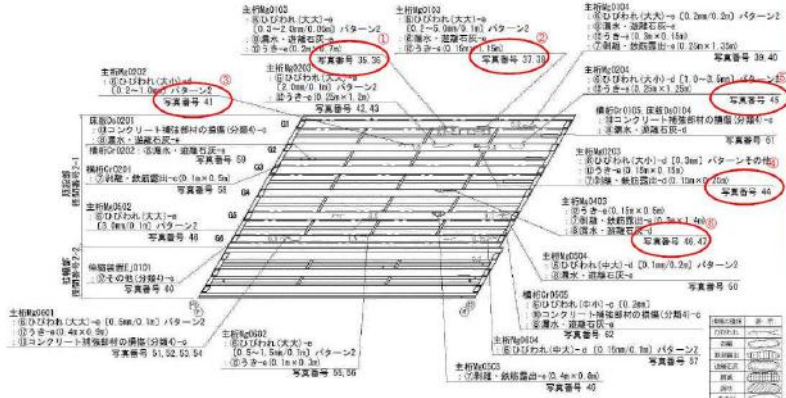
①：写真番号35



②：写真番号37



<凡例>  
赤紫の囲み線 …… H21 橋梁定期点検結果  
青の囲み線 …… 今年度の現地調査



③：写真番号45



④：写真番号44



⑤：写真番号46



H21 橋梁定期点検結果と今年度の現地調査結果を比較すれば、損傷が著しく進行していることは明らかである。特に、補修した断面修復材が剥いてきて、そしてその後剥落して剝離・鉄筋露出に至っている(⑤：写真45が代表的である)。

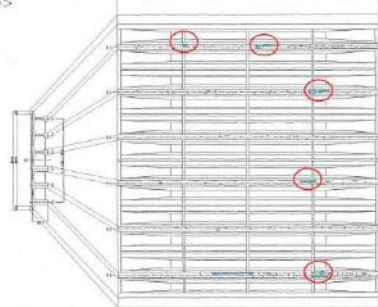
図-2.1.5 H21年度とH22年度の変状の比較結果

■ 断面補修箇所と損傷(鋼材露出を伴う剝離)との位置関係

H19 報告書より損傷部の断面修復箇所を示す平面図と、今年度実施した損傷図を対比した結果を示す。対比の結果、損傷部の断面修復箇所と今回確認した損傷の位置はほぼ合致する。電気防食範囲において実施した断面修復材が剝離して鋼材が露出しているものと考えられる。

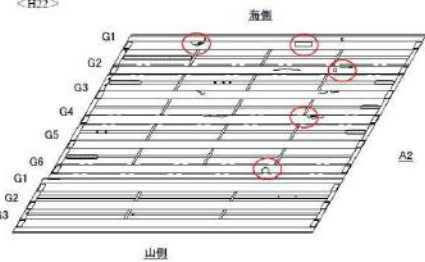
第1径間

<H19>



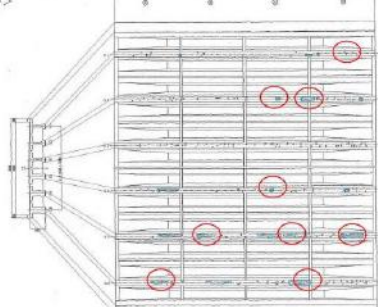
第1径間

<H22>



第2径間

<H19>



第2径間

<H22>

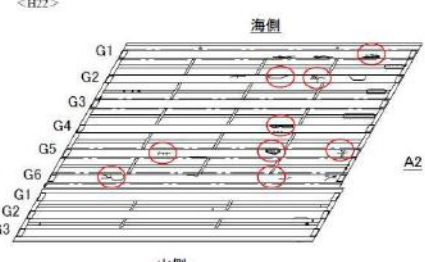


図-2.1.6 断面修復材の位置と変状位置の比較図

## 2.2 定期点検に関する書類調査

### 2.2.1 防食回路の設計

#### (1) 荒磯橋に適用された電気防食の陽極システムの特徴と当時の設計図書の整理

##### 1) 荒磯橋に適用された電気防食の陽極システムの特徴

荒磯橋に適用された電気防食の陽極システムの特徴を以下に示す。

- ① 外部電源方式の点状陽極方式であり、陽極システムはチタンロッドである。
- ② 回路割りはスパン1、スパン2ともに、G1桁とG2桁、G3桁とG4桁、G5桁とG6桁の組合せで、それぞれ1回路の構成になっている。
- ③ チタンロッド陽極は桁単位でチタン・ワイヤーによって接続されている。
- ④ 照合電極は奇数番号の桁（G1、G3、G5桁）に設置されており、偶数番号の桁（G2、G4、G6桁）には設置されていない。

荒磯橋に使用された電気防食用の陽極材の特徴はメーカーのカタログでは次のようになっている。なお、図-2.2.1には使用された陽極材の概要図を示す。

- ① 連続した1本のワイヤー（チタン・ワイヤー）で個々の陽極を接続することで、容易かつ安価に施工ができる。
- ② 陽極は、コンクリートに削孔した $\phi 12\text{ mm}$ の孔に専用バックフィル・グラファイト材を注入した後に、孔内部に挿入し取り付ける。連続した相互の陽極は $\phi 1.2\text{ mm}$ のチタン製のワイヤーを使って連結し、コンクリート表面に削溝した溝内部に埋設する。
- ③ 陽極には個々に固定抵抗体が内蔵されている。これにより、通電時の電圧降下（IRドロップ）による電流分配への影響を最小限にとどめ、長く連続した陽極回路を可能にしている。
- ④ 陽極は任意の長さに変更できるロッド部（電流を発生させる部分）の長さに加えて、チタン製の胴体部分が約 $45\text{ mm}$ ある。
- ⑤ 陽極の発生電流量は陽極への印加電圧、陽極周辺のコンクリートの抵抗値、陰極回路の抵抗、陽極とバックフィル材の長さによって設定される。湿潤かつ塩分を多量に含んだコンクリート環境下におけるデュラノードの最大許容電流量は $800\text{ mA/m}^2$ （陽極表面積あたり）を連続的に超えないことが推奨される。

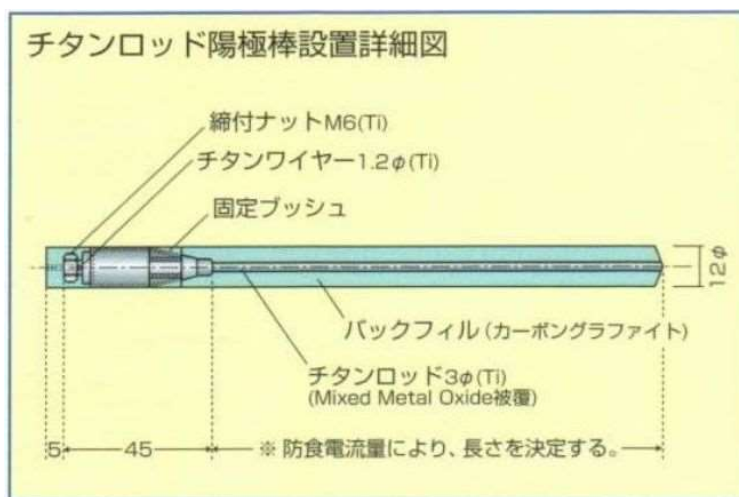


図-2.2.1 荒磯橋に使用された電気防食用の陽極の概要図

## 2) 当時の設計図書の整理

以下に、「平成10年度 荒磯橋電気防食工施工要領書」から電気防食関連の文書や図面の抜粋を示す。

### 【文書リスト（平成10年度 荒磯橋電気防食工施工要領書より抜粋）】

1. 工事概要
2. 電気防食の設計（桁1本あたりで計算するものとする）
  - 1) 防食範囲の鉄筋表面の算定
  - 2) 必要電流
  - 3) 電極数量
  - 4) 陽極の配置
  - 5) 使用電極の本数
  - 6) 直流電流装置
3. 使用材料
  - 1) 使用材料一覧表
  - 2) 使用数量の詳細
4. 施工計画
  - 1) 施工手順

#### 荒磯橋補修材料

- ①断面修復工（大断面修復用充填モルタル）
- ②断面修正材（小断面用）

使用した断面修復材 アーマー#520の電気抵抗測定結果

使用した断面修正材 エマコの電気抵抗率測定結果

### 【図面リスト（平成10年度 荒磯橋電気防食工施工要領書より抜粋）】

荒磯橋構造一般図

荒磯橋 主桁電気防食一般図（一般桁）

荒磯橋 主桁電気防食一般図（補強桁）

荒磯橋電気防食配管・配線図

電源・電源装置取付図，照合電極取付詳細，陰極端子（排流・測定端子）取付要領

はじめに

本要領書では、チタンロッド陽極内部挿入方式による電気防食を既設PC橋主桁下フランジ部に適用し、海からの飛来塩分によって引き起こされている主桁内部の鉄筋・PC鋼材の腐食とそれに伴うコンクリートのひびわれ、剥離を防止し、橋の期待寿命を延命することを目的としている。

1. 工事概要

1) 工事名称

親川橋修繕工事（荒磯橋修繕工事の内、電気防食工）

2) 工事場所

秋田県由利郡岩城町内道川地内（位置図参照）

3) 橋梁名・構造

荒磯橋

単純PCポストテンションングT桁 2径間（L=2×22.5m, B=13.6m）

4) 橋梁管理者

建設省東北地方建設局秋田工事事務所

5) 工事期間

平成10年8月～11月

6) 工事概要

チタンロッド陽極内部挿入方式による電気防食を既設PC橋主桁下フランジ部に適用し、海からの飛来塩分によって引き起こされている主桁内部の鉄筋・PC鋼材の腐食とそれに伴うコンクリートのひびわれ、剥離を防止する

工事工程

工事概要（数量は2スパン分を示す）

1.準備工事	照明仮設	1式
	コンクリート表面清掃	306㎡
2.事前調査	自然電位測定	306㎡
	鉄筋位置探査	306㎡
	補強ケーブル位置探査	306㎡
3.電極設置工事	コンクリート削孔	1680箇所
	コンクリート削溝	600m
	プライマー塗布	1680箇所
	グラファイト充填	1680箇所
	陰極溶接	30箇所
	陽極挿入・リード線設置	1式
	配線接続	1式
4.モニター	照合電極の設置	18箇所
	ボックス設置工事 電源、モニターボックス設置	1式
5.復旧工事	表面モルタル補修	
	残材撤去	1式
6.追跡調査	防食電位、電圧、電流測定 （通電直後、通電適宜） on/off電位復極量測定 （1ヶ月後）	1式

2. 電気防食の設計（桁1本あたりで計算するものとする）

1) 防食範囲の鉄筋表面の算定

防食対象部は桁フランジ部の両端から1.5mを除いた部分とする。（全長19.44m）

コンクリート表面積：

フランジ部

①  $0.45 \times 19.44 = 8.748 \text{m}^2$

フランジ側面部

②  $0.18 \times 19.44 \times 2 = 6.998 \text{m}^2$

フランジ測面上部

③  $0.25 \times 19.44 \times 2 = 9.72 \text{m}^2$

①+②+③ =  $25.466 = 25.5 \text{m}^2$ （桁1本あたり）

合計  $25.5 \text{m}^2 \times 12 \text{本} = 306 \text{m}^2$

鉄筋及びシース表面積：

鉄筋表面積： $9.831 \text{m}^2$ （桁1本あたり）

合計  $9.831 \times 12 \text{本} = 117.972 \text{m}^2$

シース表面積： $16.551 \text{m}^2$ （桁1本あたり）

合計  $16.551 \times 12 \text{本} = 198.612 \text{m}^2$

（次ページ鉄筋計算書参照）

鉄筋量計算書（桁1本当たり）

物件名：荒磯橋

部位	種類	鉄筋径 (mm)	長さ (m)	表面積 (m <sup>2</sup> )	本数	計 (m <sup>2</sup> )	約 (m <sup>2</sup> )	
A区間	主筋	0.009	9	0.25434	8	2.03472		
		0.013	2.3	0.093886	32	3.004352		
						鉄筋小計	5.039072	5.039
	シース管	0.035	4.5	0.49455	2	0.9891		
	シース管	0.035	4.2	0.46158	2	0.92316		
	シース管	0.035	3.9	0.42861	2	0.85722		
	シース管	0.035	3.6	0.39564	2	0.79128		
	シース管	0.035	3.6	0.39564	2	0.79128		
	シース管	0.035	2.7	0.29673	2	0.59346		
	シース管	0.035	1.8	0.19782	2	0.39564		
	シース管	0.035	0.6	0.06594	2	0.13188		
					シース小計	5.47302	5.473	
B区間	主筋	0.009	5.6	0.158256	8	1.268048		
		0.013	2.3	0.093886	14	1.314404		
						鉄筋小計	2.580452	2.58
	シース管	0.035	22.4	2.46176	2	4.92352		
	シース管	0.035	2.4	0.26376	2	0.52752		
シース管	0.035	1.6	0.17584	2	0.35168			
					シース小計	5.80272	5.803	
C区間	主筋	0.009	4.8	0.135648	8	1.085184		
		0.013	2.3	0.093886	12	1.126632		
						鉄筋小計	2.211816	2.212
シース管	0.035	24	2.6376	2	5.2752			
					シース小計	5.2752	5.275	

	鉄筋表面積	シース表面積
A区間	5.039	5.473
B区間	2.58	5.803
C区間	2.212	5.275
桁1本小計	9.831	16.551
桁12本合計	117.972	198.612

## 2) 必要電流

設計防食電流密度：鉄筋部 20.0mA/m<sup>2</sup>、シース部5.0mA/m<sup>2</sup>とする。  
必要電流量 I = 20.0 × 鉄筋表面積 = 20.0 × 9.831m<sup>2</sup> = 196.62mA  
5.0 × シース表面積 = 5.0 × 16.551m<sup>2</sup> = 82.775mA  
合計279.375≒280mA

## 3) 電極数量

使用電極 durAnode 2  
電極の許容発生電流量を0.2mA/cm（陽極ロッド部長さ）とすると必要電極長さは計 1400cm となる。

## 4) 陽極の配置

本構造物はPC構造であり電流斑を抑えるために陽極設置位置は帯筋の間隔に合わせて配置させるものとする。（後記、陽極棒設置箇所図参照）  
また、ケーブルがフランジ下部に集中している場所（図C部）は長い陽極を交互に設置するものとした。

## 5) 使用電極本数

### A 区間

陽極設置参考図A区間の部分は10cmの陽極を300mmピッチで両面から設置するものとする。  
陽極数計60本（添付図参照）  
10cm陽極×60本：各陽極の許容発生電流量は0.2mA×10cm=2mA  
区間許容発生電流量は2mA×60本=120mA

### B 区間

陽極配置参考図B区間の部分は10cmの陽極を200mmピッチで両面から設置するものとする。  
陽極数計56本（添付図参照）  
10cm陽極計56本：各陽極の許容発生電流量は0.2mA×10cm=2mA  
区間許容発生電流量は2mA×56本=112mA

### C 区間

陽極配置参考図C区間の部分は15cmの陽極を200mmピッチで両面から交互に配置するものとする。（添付図参照）  
20cm陽極×24本：各陽極の最大発生電流量は0.2mA×15cm=3mAとなる。  
区間許容発生電流量は3mA×24本=72mA

よって桁1本当たり

10cmの陽極を116本、15cmの陽極を24本使用するものとする。

合計許容発生電流量は304mAとなる。

想定必要電流量は280mAであるので合計陽極長さは約9%増しの余裕率を見るものとする。

## 6) 直流電流装置

桁2スパンあたりの合計許容発生電流量は3,648mA（304mA×桁12本）となる。

桁2本につき1回路設けるため計6回路とする。

durApower2.56は1台につき2回路で構成されているため本橋梁ではdurApower2.56を計3台使用するものとする。

### 3. 使用材料

#### 3-1. (2スパン/桁12本あたり)

##### 1) 使用材料一覧表 (数量詳細は次ページ計算書を参照)

材料名	規格・仕様	数量	備考
陽極棒/チタンロッド (durAnode 2)	白金系金属酸化物 (MMO) 被覆高純度チタン製 100×3φ	1392本	500Ω抵抗体内臓
同上陽極棒	同上150×3φ	288本	
バックアップラファイト	カーボンラファイト 300ml	152本	導電パテ陽極材 カートリッジ型
プライマー	エポキシリコー	6缶	バックアップ下地用
陽極電源ワイヤー	高純度チタン製 1.2φ	600m	陽極接続用
陰極接続端子	PVCケーブル付	12本	排流端子用
陰極接続端子	PVCケーブル付	18本	測定端子用
照合電極	二酸化マンガン電極又は 銀/塩化銀電極	18個	電位測定用
ディストリビューションボックス (durAbox 2)	ABS樹脂製 IP66	12個	陽極ケーブル配線用
電源装置 (durApower 2.56)	133×110×180mm MAX 15V 2.56A	3台	遠隔操作システム対応型
モニタリング端子台付き ステンレスボックス		1台	
波付きPF管	28φ	30m	
波付きPF管	36φ	129m	
ブリードボックス	塩ビ製 100×100×100	6箇所	照合電極配線用
ブリードボックス	塩ビ製 200×200×100	13箇所	メインケーブル配線用
メインケーブル	600V CV2mm <sup>2</sup> 2Cケーブル	123m	陽極、陰極配線
照合電極ケーブル	600V CVV-S1.25mm <sup>2</sup> 6C ケーブル	231m	
電極ケーブル (被覆あり)	600V 1.25mm <sup>2</sup> PVCケーブル	48m	
ホリマセメントモルタル	エモ S88C	333kg	埋め戻し、仕上げ用



2) 使用数量の詳細 (2スパン/桁12本あたり)

バックフィルグラファイト

陽極総延長数量  $182.4\text{m} \div 1.2\text{m/本} = 152\text{本}$

プライマー

削孔総数  $1680\text{箇所} \div 300\text{箇所/3リットル} = 5.6 \approx 6\text{缶}$

陽極電源ワイヤー (チタンワイヤー)

$25\text{m} \times \text{桁両面} \ 2 \times 12\text{本} = 600\text{m}$

陰極接続端子

(排流端子用)  $1\text{箇所} \times 12\text{桁} = 12\text{本}$

(測定端子用)  $3\text{箇所} \times 6\text{桁} = 18\text{本}$

計30本

照合電極

各桁  $3\text{箇所} \times 6\text{本} = 18\text{個}$

ディストリビューション/ジャンクションボックス

陽極用各桁  $1\text{箇所} \times 12\text{本} = 12\text{個}$

電源装置

$15\text{V} \ 2.56\text{A} \times 3\text{台}$

波付きPF管 (φ28)

$2.5\text{m} \times 8\text{箇所} = 20\text{m}$

$5\text{m} \times 2\text{箇所} = 10\text{m}$

計30m

波付きPF管 (φ36)

$2.5\text{m} \times 2\text{箇所} = 5\text{m}$

$5\text{m} \times 2\text{箇所} = 10\text{m}$

$36\text{m} \times 1\text{箇所} = 36\text{m}$

$46\text{m} \times 1\text{箇所} = 46\text{m}$

$12\text{m} \times 1\text{箇所} = 12\text{m}$

$10\text{m} \times 2\text{箇所} = 20\text{m}$

計129m

プルボックス (100×100×100)

$1\text{箇所} \times 6\text{桁} = 6\text{箇所}$       計6箇所

プルボックス (200×200×100)

$1\text{箇所} \times 12\text{桁} = 12\text{箇所}$

$1\text{個} \times 1\text{箇所} = 1\text{箇所}$       計13箇所

メインケーブル (CV2mm<sup>2</sup> 2C)

$4\text{m} \times 12\text{桁} = 48\text{m}$

$10\text{m} \times 2\text{箇所} = 20\text{m}$

$10\text{m} \times 1\text{箇所} = 10\text{m}$

$45\text{m} \times 1\text{箇所} = 45\text{m}$

計123m

照合電極ケーブル (CVV-S 1.25mm<sup>2</sup> 6C)

$6\text{m} \times 6\text{箇所} = 36\text{m}$

$36\text{m} \times 3\text{箇所} = 99\text{m}$

$12\text{m} \times 3\text{箇所} = 36\text{m}$

$10\text{m} \times 6\text{箇所} = 60\text{m}$

計231m

電極ケーブル

$2\text{m} \times 2 \times 12\text{桁} = 48\text{m}$       計48m

ポリマーセメントモルタル

$8.75\text{kg} \times 24\text{箇所 (陰極)}$       210kg

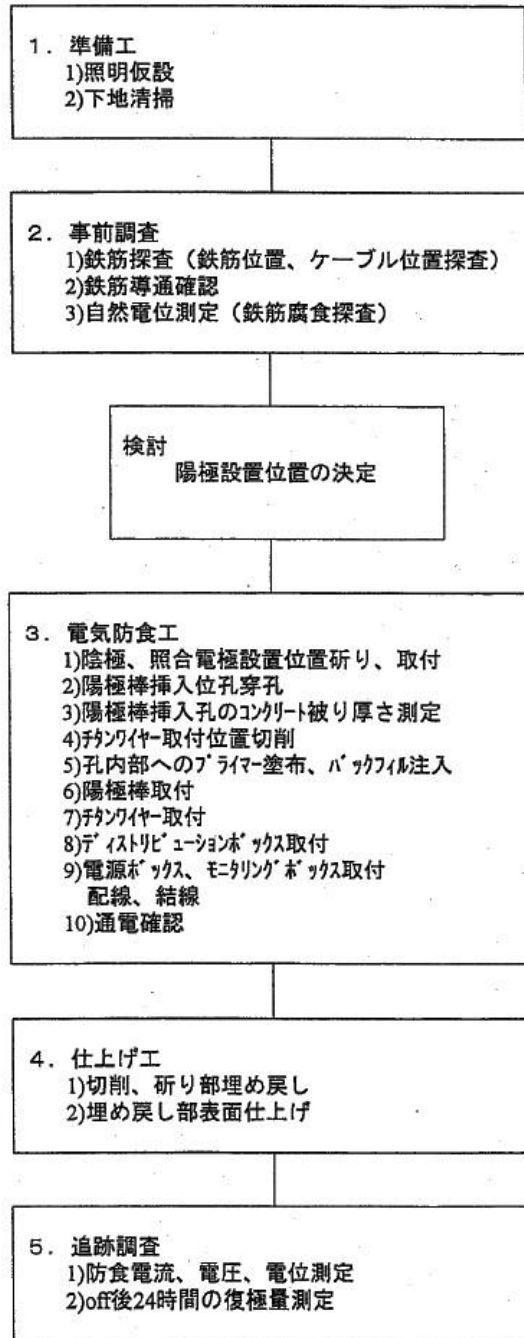
$8.75\text{kg} \times 12\text{箇所 (照合電極)}$       105kg

$0.03\text{kg} \times 600\text{m} = 18\text{kg}$       18kg

計333kg

## 5. 施工計画

### 1) 施工手順



## 荒磯橋補修材料

### ① 断面修復工

(大断面修復用充填モルタル：はつり厚さ5cm以上の場合の断面修復)

一般名：無機系 低発熱型充填モルタル

1㎡当たりの配合 (単位：kg)

特殊ブレックスモルタル(粉体)	水	収縮低減剤	合計
1904	286	14.3	2204.3

品質規格

試験項目	試験方法	試験条件	単位	規格値
比重(硬化体)	J I S A 1110	—	—	2.2±0.1
圧縮強度	土木学会基準	20℃、28日	N/mm <sup>2</sup>	40.0以上
曲げ強度	J I S R 5201	20℃、28日	N/mm <sup>2</sup>	7.0以上

### ②断面修正材(小断面用)

一般名：特殊セメント系補修モルタル

1㎡当たりの配合 (単位：kg)

特殊セメント	水	合計
1950	335	2285

品質規格

試験項目	試験方法	試験条件	単位	規格値
比 重	J I S A 1116	—	—	2.2±0.1
圧縮強度	J I S R 5201	20℃、28日	N/mm <sup>2</sup>	45.0以上
曲げ強度	J I S R 5201	20℃、28日	N/mm <sup>2</sup>	6.0以上

アーマ#520の電気抵抗測定結果

三菱マテリアル株式会社  
セメント研究所

1. 使用材料及び配合

アーマ#520及び収縮低減剤(ヒビガード)を用いた。試験配合を表1に示す。

表1 試験配合

アーマ#520	水	収縮低減剤
20 kg	3.0 kg	150 cc

2. 試験方法

供試体作製から測定までの手順を図1に、測定方法を図2に示す。

図2に示すように4×4×16cm供試体をセットし、両端の電圧を上げていき、3分間通電し電圧が一定になったときの電流値を測定し、計算により抵抗値を算出した。

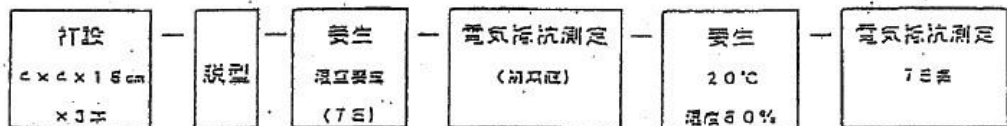


図1 測定手順

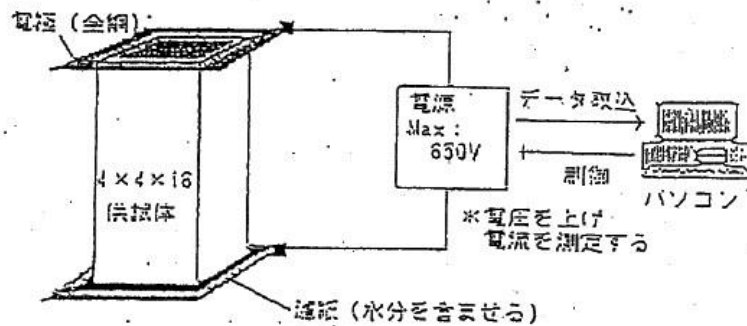


図2 測定方法

3. 測定結果

材齢28日における、アーマ#520電気抵抗の測定結果を表2に示す。

表2 アーマ#520の電気抵抗測定結果

	電気抵抗値 (kΩ・cm)
材齢28日	11

以上

(5) 抵抗率測定結果

各補修材料の抵抗率の変化を、図-4.7に示す。抵抗率の値も乾燥収縮量と同様に相対湿度の値の影響を大きく受けるが、棧橋下面においてはいずれの補修材料についても抵抗率は小さい値を示し、電気防食の適用に支障のないことが推測される。

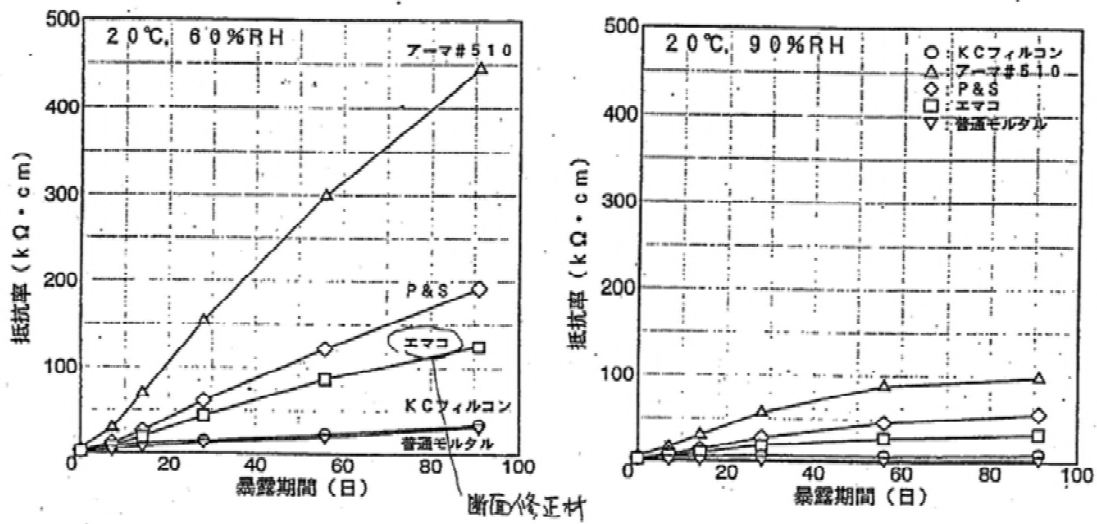
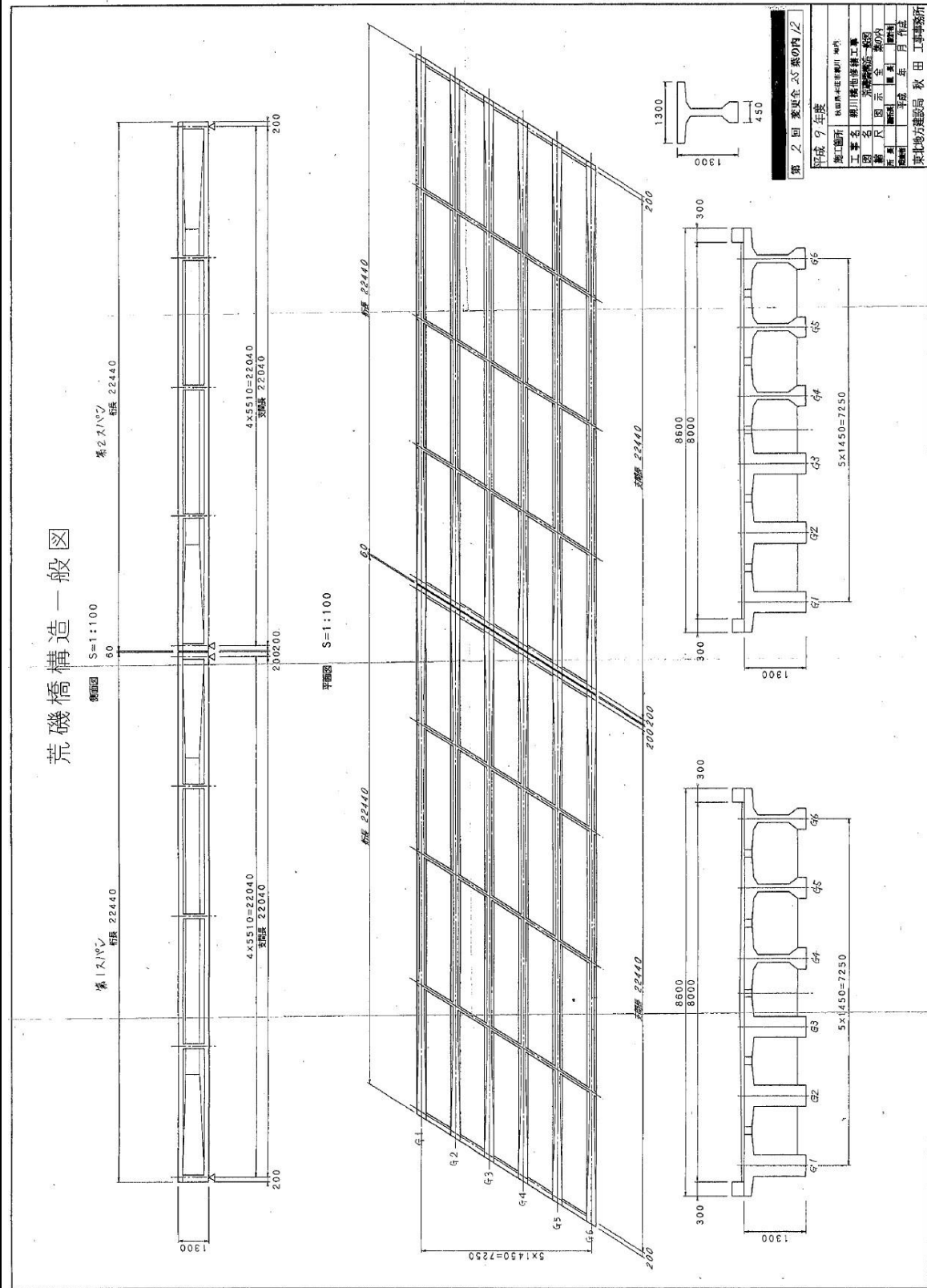


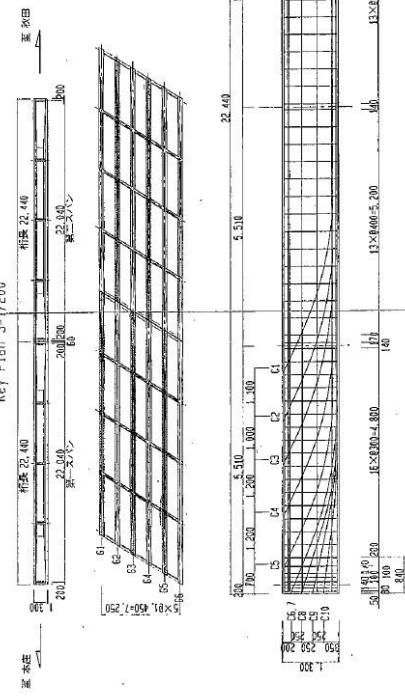
図-4.7 補修材料の抵抗率測定結果

荒磯橋構造一般図

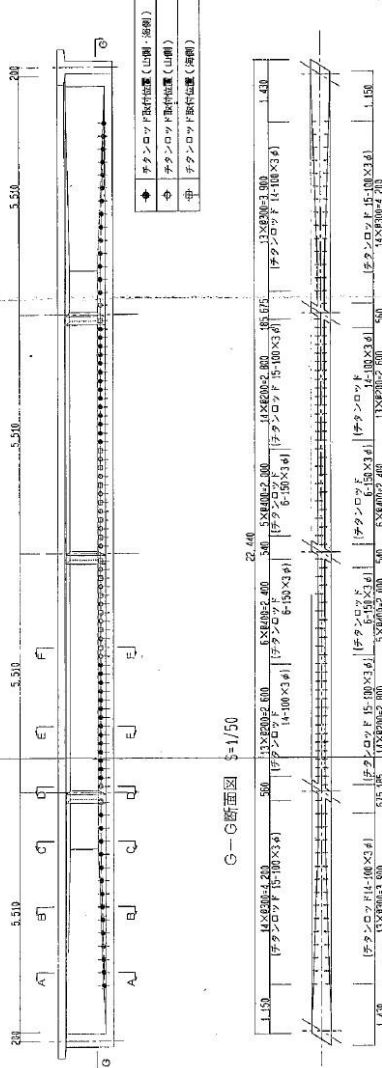


荒磯橋 主桁電気防食一般図（一般桁）

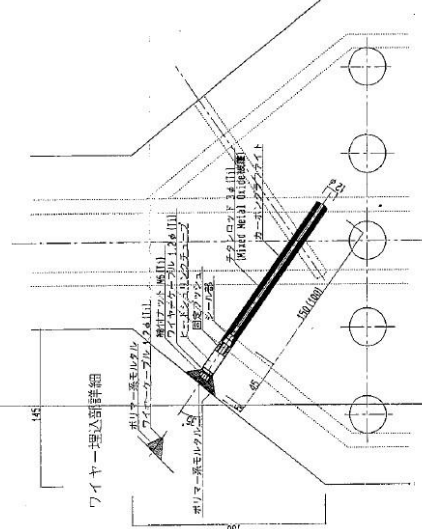
材料名	規格・仕様	単位	数量
防食剤	50%塩化亜鉛ペースト	kg	120
防食剤	50%塩化亜鉛ペースト	kg	500
防食剤	50%塩化亜鉛ペースト	kg	5
防食剤	50%塩化亜鉛ペースト	kg	0
防食剤	50%塩化亜鉛ペースト	kg	250
防食剤	50%塩化亜鉛ペースト	kg	65
防食剤	50%塩化亜鉛ペースト	kg	70
防食剤	50%塩化亜鉛ペースト	kg	5
防食剤	50%塩化亜鉛ペースト	kg	0



陽極棒配置図（一般桁：第一スパン=G1, G3, G5 第二スパン=G2, G4） S=1/50



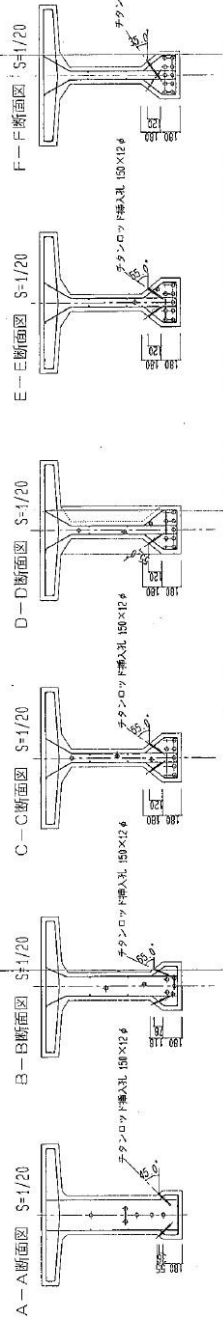
チタンロープ取付部詳細図 S=1/2



第2回 家屋安全点検の内訳

平成	年度
2024	2025

施工箇所 林田町本町新田川内  
 工事名 荒磯橋電気防食工事  
 種別 電気防食工事  
 所長 田中 隆夫  
 副所長 田中 隆夫  
 監理 田中 隆夫  
 監理 田中 隆夫  
 監理 田中 隆夫











## (2) 再現設計

図-2.2.2～図-2.2.4 に荒磯橋の G5 桁の再現設計図面（それぞれ、陽極配置図、G5-3 詳細図、配線配管図）を示す。また、表-2.2.1～表-2.2.3 に再現設計による設計照査の結果を示す。表-2.2.1 に示されるように、再現設計による設計照査の結果をまとめると、次のようになる。

### 1) 防食電流密度

20 mA/m<sup>2</sup> の電流密度で鋼材を 100 mV シフトさせる場合、鋼材の分極抵抗は 5 Ω m<sup>2</sup> (50 kΩ cm<sup>2</sup>) となる。「コンクリート構造物の健全度診断マニュアル (案), 土木研究所, 1998」によれば、鋼材の分極抵抗 50 kΩ cm<sup>2</sup> は「腐食性は軽微」の評価になる (評価基準は表-2.2.2 を参照)。2.1.3 項に示した実際の荒磯橋の当初の劣化状況からは、腐食性大の評価が妥当であり、そのことを考慮すると、20 mA/m<sup>2</sup> の設計防食電流密度は少し小さめの設計値であると評価される。また、シースでは設計防食電流密度を 5 mA/m<sup>2</sup> としていた。同様に計算すると、シースの分極抵抗は 20 Ω m<sup>2</sup> (200 kΩ cm<sup>2</sup>) となり、これは腐食なし相当の分極抵抗である。2.1.3 項の図-2.1.2 に示すように、実際のシースは主桁底面位置のシースと桁中央部 (内部) のシースとでは、かぶり厚さが異なるため、腐食程度が異なり、主桁底面の位置のシースの方が分極抵抗は相当に低いと推定される。従って、シースにおいても一部の部分では設計防食電流密度が若干小さめの設計値になっていると評価される。

### 2) 陽極の数量

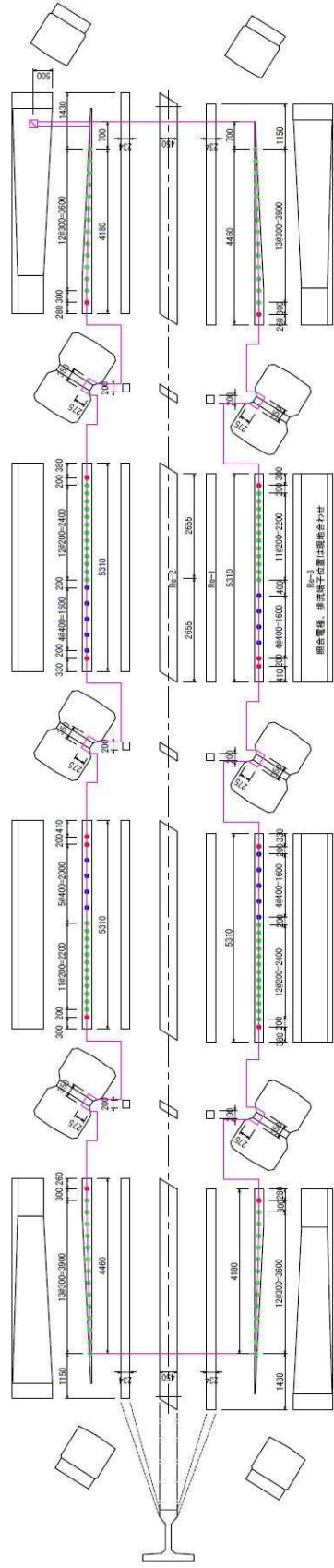
表中に示す各区間における鉄筋量と電流量、必要陽極数量の過不足から考察すると、A 区間と B 区間とで陽極量が不足気味で、この区間では防食電流の不足が懸念される。

### 3) 直流電源装置, チタン・ワイヤーの IR ドロップなど

直流電源装置容量は 15 V×2.56 A であり、容量は満足する。ただし、最も通電点に近い陽極で 1020 mV で電圧を印加したとき、末端の陽極では 554 mV となり、約 54%まで電圧が降下する。そのため、陽極から供給される電流分布が均一にならない懸念がある。

荒磯橋チャタレット方式電気防食装置 陽極配置図

陽極配置展開図 S=1.50



チャタレット方式のルートは推定

No. 2 65-3詳細 S=1.20

- 凡 例
- : チャタレット陽極 (L=50)
  - : チャタレット陽極 (L=100)
  - : チャタレット陽極 (L=150)
  - : チャタレット方式のルート

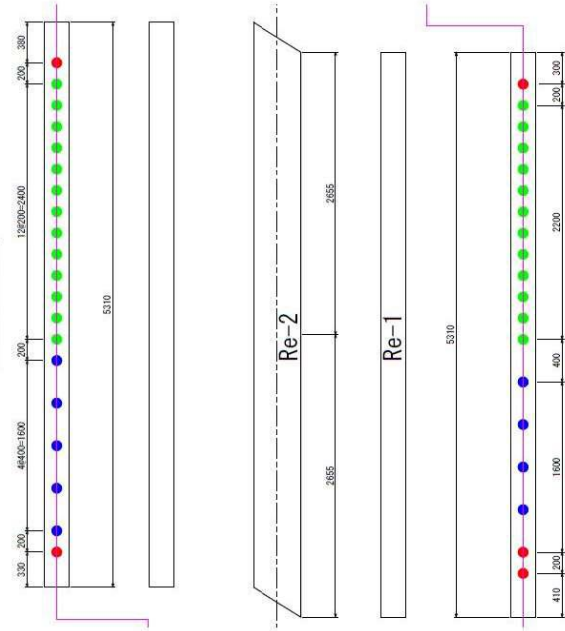
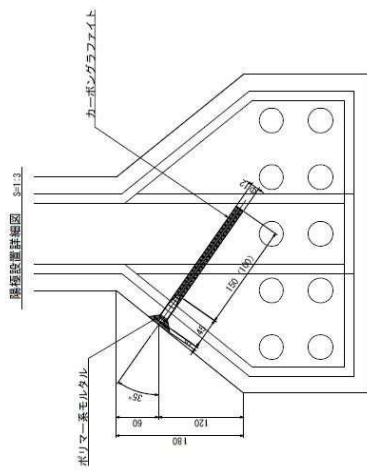
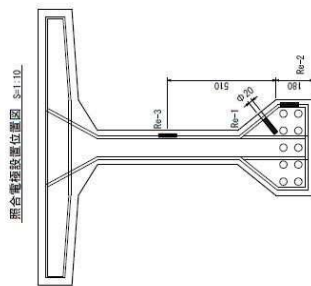
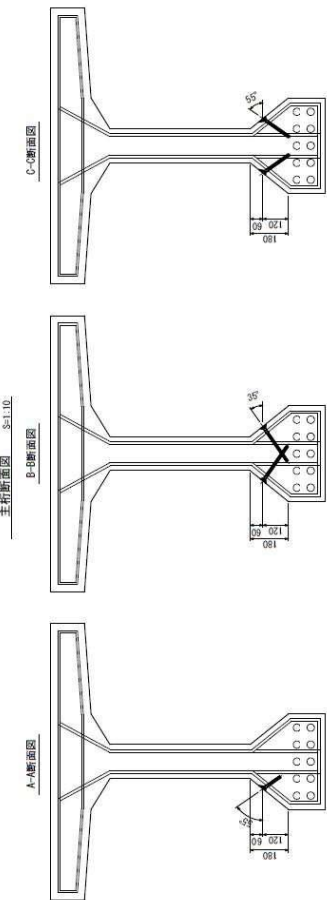
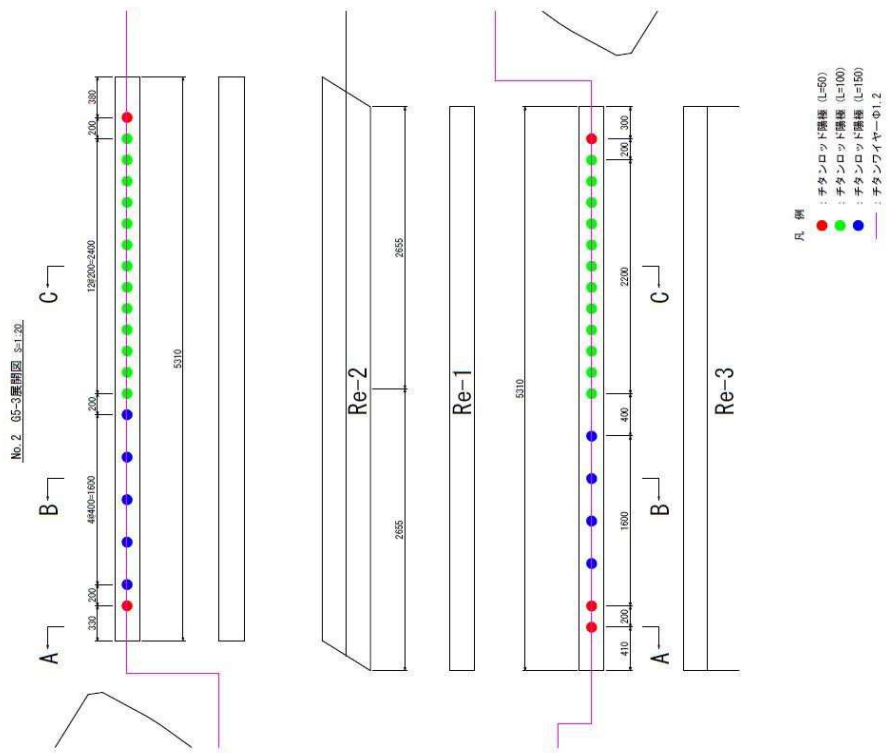


図-2.2.2 再現設計図面 (陽極配置図)

荒磁橋子タンロット方式電気防食装置 G5-3詳細図

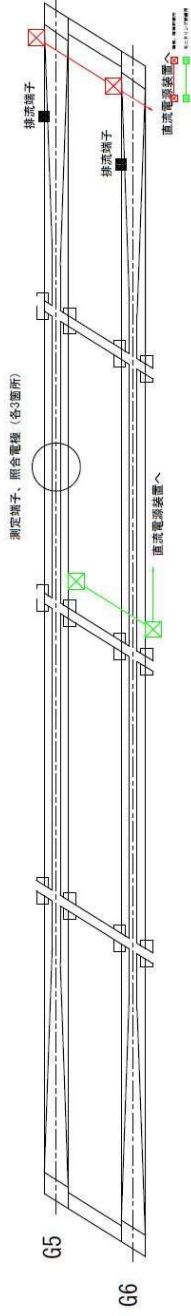


- 凡 例
- : タンロット陰極 (L=50)
  - : タンロット陽極 (L=100)
  - : タンロット陽極 (L=150)
  - : タンワイヤ—φ1.2

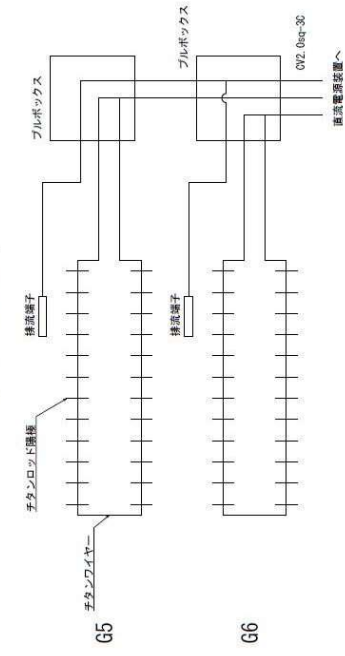
図-2.2.3 再現設計図面 (G5-3 詳細図)

荒礎橋子タノンロード方式電気防食装置 配線配管図

No.2 G5, G6配線図 ①-120.



No.2 G5, G6配線図 ①-110.



照合電線設置位置図 ①-110.

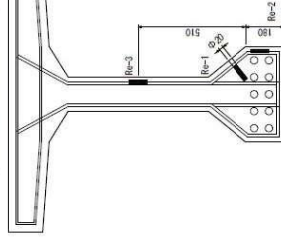


図-2.2.4 再現設計図面 (配線配管図)

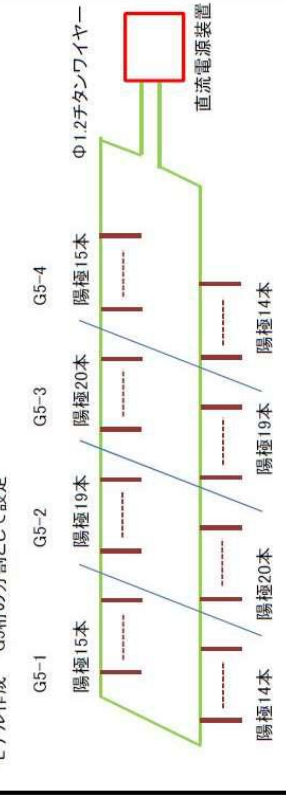


表-2.2.2 再現設計による設計照査 (その2)

項目	当初設計内容	設計照査結果																																							
防食電流密度	<p>桁1本当たりの防食電流計算</p> <p><b>設計防食電流密度：鉄筋部 20.0mA/m<sup>2</sup>、シース部5.0mA/m<sup>2</sup>とする。</b>  <b>必要電流量 1 = 20.0 × 鉄筋表面積 = 20.0 × 9.831m<sup>2</sup> = 196.62mA</b>  <b>5.0 × シース表面積 = 5.0 × 16.551m<sup>2</sup> = 82.775mA</b>  <b>合計279.375mA ≒ 280mA</b></p> <p>桁1本当たりの防食面積は25.5m<sup>2</sup></p> <p>コンクリート表面積当たりの防食電流密度は</p> <p><math>280\text{mA} \div 25.5\text{m}^2 = 10.98\text{mA}/\text{m}^2</math></p>	<p>桁に、20mA/m<sup>2</sup>の電流密度で100mVシフトさせる場合、分極抵抗は5Ω・m<sup>2</sup>(50kΩ・cm<sup>2</sup>)となる。</p> <table border="1" data-bbox="319 739 414 985"> <thead> <tr> <th>阻値原</th> <th>分極抵抗 Rel(Ω・cm<sup>2</sup>)</th> <th>腐食性</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>I, II</td> <td>R<sub>p</sub> ≧ 40</td> <td>大</td> </tr> <tr> <td>III</td> <td>40 &lt; R<sub>p</sub> ≦ 60</td> <td>軽微</td> </tr> <tr> <td>IV</td> <td>R<sub>p</sub> &gt; 60</td> <td>なし</td> </tr> </tbody> </table> <p>分極抵抗50kΩ・cm<sup>2</sup>は腐食性軽微程度の評価である。          荒機橋の当初劣化状況を考慮すると少し小さい設計防食電流密度と評価できる。</p> <p>コンクリート構造物の健全度診断マニュアル(案)</p> <p>また、シース管では5mA/m<sup>2</sup>の電流密度としていた。同様に計算すると、分極抵抗は20Ω・m<sup>2</sup>(200kΩ・cm<sup>2</sup>)となり、腐食なしと評価できる。</p> <p>定性的な評価において、シース管の電流密度はシース管の位置によって異なると推定できる。          例えば、主桁底面位置のシース管と桁中央部のシース管とは、かぶり厚さが異なるため、中央部のシース管のほうが分極抵抗が高いと推定できる。</p> <p><b>設計電流密度を分極抵抗に置き換えると若干小さい設計値と評価できる。</b></p> <p>また、コンクリートライブラリー1071に記載されている設計防食電流密度1~30mA/m<sup>2</sup>と比較しても小さい設計防食電流密度と考えられる。</p>	阻値原	分極抵抗 Rel(Ω・cm <sup>2</sup> )	腐食性	I, II	R <sub>p</sub> ≧ 40	大	III	40 < R <sub>p</sub> ≦ 60	軽微	IV	R <sub>p</sub> > 60	なし																											
阻値原	分極抵抗 Rel(Ω・cm <sup>2</sup> )	腐食性																																							
I, II	R <sub>p</sub> ≧ 40	大																																							
III	40 < R <sub>p</sub> ≦ 60	軽微																																							
IV	R <sub>p</sub> > 60	なし																																							
チタンロッド陽極の数量	<p>使用電極 durAnode 2              電極の許容発生電流量を0.2mA/cm (陽極ロッド部長さ) とすると必要電極長さは計 1400cmとなる。</p> <p>A区間              陽極設置参考図A区間の部分は10cmの陽極を300mmピッチで両面から設置するものとする。              陽極数計60本 (添付図参照)              10cm陽極 × 60本；各陽極の許容発生電流量は0.2mA × 10cm = 2mA              区間許容発生電流量は2mA × 60本 = 120mA</p> <p>B区間              陽極設置参考図B区間の部分は10cmの陽極を200mmピッチで両面から設置するものとする。              陽極数計56本 (添付図参照)              10cm陽極 × 56本；各陽極の許容発生電流量は0.2mA × 10cm = 2mA              区間許容発生電流量は2mA × 56本 = 112mA</p> <p>C区間              陽極設置参考図C区間の部分は15cmの陽極を200mmピッチで両面から交互に配置するものとする。(添付図参照)              20cm陽極 × 24本；各陽極の最大発生電流量は0.2mA × 15cm = 3mAとなる。              区間許容発生電流量は3mA × 24本 = 72mA</p> <p>よって桁1本当たり              10cmの陽極を116本、15cmの陽極を24本使用するものとする。              合計許容発生電流量は304mAとなる。              想定必要電流量は280mAであるので合計陽極長さは約9%増しの余裕率を見るものとする。</p> <div data-bbox="861 1052 1212 1209" style="border: 1px solid red; padding: 5px;"> <p>図面上、 10cm陽極54本 5cm陽極4本</p> </div> <div data-bbox="989 1052 1069 1209" style="border: 1px solid red; padding: 5px;"> <p>図面上、 10cm陽極50本 5cm陽極4本</p> </div> <div data-bbox="1117 1052 1212 1209" style="border: 1px solid red; padding: 5px;"> <p>図面上、 15cm陽極18本 5cm陽極6本</p> </div> <div data-bbox="1308 1142 1388 1523" style="border: 1px solid red; padding: 5px;"> <p>図面上、 15cm陽極18本、10cm陽極104本、5cm陽極14本 陽極発生電流合計 276mA &lt; 280mA</p> </div>	<p>陽極発生電流はメーカ一値であるため、深く評価はしないが、0.2mA/cm<sup>2</sup>は陽極電流密度としてやや大きい。              陽極表面積をカーボンバッキングフィルム面積と見立てた場合、Φ12mm × 陽極長100mmとなる。              表面積は、1.2cm × 3.14 × 10cm × (1.2cm/2)<sup>2</sup> × 3.14 = 38.8cm<sup>2</sup>となる。              10cmの陽極を使用した場合、発生電流は2mA、陽極電流密度は2mA ÷ 38.8cm<sup>2</sup> = 0.0515mA/cm<sup>2</sup> = 515mA/m<sup>2</sup>となる。チタンリボンメッシュ陽極やチタンメッシュ陽極等のチタン系陽極材料の陽極電流密度は100mA/m<sup>2</sup>で設定されているのに対し倍程度の発生電流密度で設定されていた。              陽極発生電流密度が大きいと、塩化物イオン等が陽極周辺に集積し、pHの低下や塩素ガス、次亜塩素酸ガス等が発生し、ガラスプロテクティング現象が懸念される。</p> <p>陽極数量</p> <p>各区間における鉄筋量と電流量、必要陽極数量の過不足は以下のとおり。</p> <table border="1" data-bbox="1021 268 1181 940"> <thead> <tr> <th>区間</th> <th>鋼材区分</th> <th>鋼材面積 (m<sup>2</sup>)</th> <th>電流密度 (mA/m<sup>2</sup>)</th> <th>防食電流 (mA)</th> <th>陽極数量</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2">A</td> <td>鉄筋</td> <td>5.039</td> <td>20</td> <td>100.8</td> <td>128.2</td> </tr> <tr> <td>シース管</td> <td>5.473</td> <td>5</td> <td>27.4</td> <td>6.4%不足</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">B</td> <td>鉄筋</td> <td>2.580</td> <td>20</td> <td>51.6</td> <td>80.6</td> </tr> <tr> <td>シース管</td> <td>5.803</td> <td>5</td> <td>29.0</td> <td>50%多</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">C</td> <td>鉄筋</td> <td>2.212</td> <td>20</td> <td>44.2</td> <td>70.6</td> </tr> <tr> <td>シース管</td> <td>5.275</td> <td>5</td> <td>26.4</td> <td>2%多</td> </tr> </tbody> </table> <p>設計上の数量</p> <p>陽極と鉄筋、シース管位置が均一な離隔ではないため、電流・電位分布に強弱がある。              したがって、必要防食電流 = 陽極発生電流 = 陽極発生電流で不足する。              設計上、9%の余裕が戻込まれているが、9%が妥当かどうかの評価はできない。              電流密度の不足も考慮するとやや分布が考慮されていないように感じる。</p> <p>B区間については問題ないが、A区間およびC区間では防食電流の不足が懸念される。</p>	区間	鋼材区分	鋼材面積 (m <sup>2</sup> )	電流密度 (mA/m <sup>2</sup> )	防食電流 (mA)	陽極数量	A	鉄筋	5.039	20	100.8	128.2	シース管	5.473	5	27.4	6.4%不足	B	鉄筋	2.580	20	51.6	80.6	シース管	5.803	5	29.0	50%多	C	鉄筋	2.212	20	44.2	70.6	シース管	5.275	5	26.4	2%多
区間	鋼材区分	鋼材面積 (m <sup>2</sup> )	電流密度 (mA/m <sup>2</sup> )	防食電流 (mA)	陽極数量																																				
A	鉄筋	5.039	20	100.8	128.2																																				
	シース管	5.473	5	27.4	6.4%不足																																				
B	鉄筋	2.580	20	51.6	80.6																																				
	シース管	5.803	5	29.0	50%多																																				
C	鉄筋	2.212	20	44.2	70.6																																				
	シース管	5.275	5	26.4	2%多																																				



表-2.2.3 再現設計による設計照査 (その3)

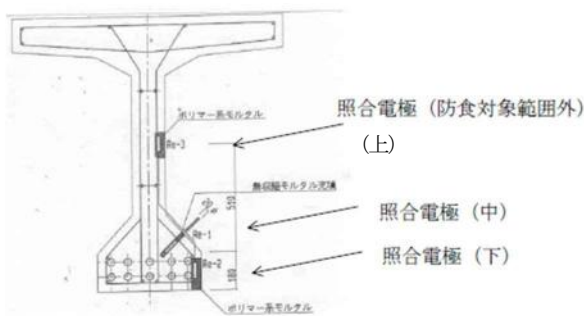
項目	当初設計内容	設計照査結果
IRドロップ等	<p>特に記載なし</p>	<p>モデル作成 G5桁の分割として設定</p>  <p>陽極15本 陽極19本 陽極20本 陽極15本 陽極14本</p> <p>陽極14本 陽極20本 陽極19本 陽極14本</p> <p>Φ1.2チタンワイヤー 直流電源装置</p> <p>陽極形状はそれぞれ異なるが、各陽極に510Ωの抵抗があるため、固定抵抗に支配されるとし陽極形状は考慮しないものとする。</p> <p>G5桁とG6桁で防食回路が構成されている。 1桁当たりの陽極接地抵抗は以下にて算出される。</p> <p>G5桁の陽極接地抵抗 (RaG5)</p> $RaG5 = \frac{1}{\frac{1}{Ra1} + \frac{1}{Ra2} + \frac{1}{Ra3} + \frac{1}{Ra4}} = 3.75\Omega$ <p>チタンワイヤーの抵抗 (Rw)</p> <p>チタンの抵抗率 = 50 μΩ・cm、ワイヤーの断面積 = 0.045cm<sup>2</sup>、ワイヤー長さ(片道)約30m</p> $Rw = 50 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm} \times 3000\text{cm} \div 0.045\text{cm}^2 = 3.33\Omega$ <p>カソード接地抵抗は格子状に鉄筋が陽極数に比べて大きく配置されているため無視する。</p> <p>陽極接地抵抗 = 3.75 + 3.33 = 7.08Ω</p> <p>G5、G6桁回路のトータル抵抗は</p> $R = \frac{1}{\frac{1}{RaG5} + \frac{1}{RaG6}} = 3.54\Omega$ <p>直流電源装置容量は15V × 2.56Aであり、容量は満足する。</p> <p>ただし、チタンワイヤーの導体抵抗が3.33Ωあり、片側140mA流したとき、140mA × 3.33Ω = 466mVの電圧降下がある。また陽極に510Ωの抵抗があるため、1本あたり2mA流すためには陽極1本当たり1020mV印加しなければならない。最も通電点に近い陽極で1020mV印加したとき、末端の陽極では554mVとなり、約54%まで電圧が降下する(均一な電流分布にならない)。</p>

## 2.2.2 運転状況

本項では、電気防食の運転を開始して以降の荒磯橋の通電条件（電圧、電流）、鉄筋の電位や復極量の経時変化についてまとめる。荒磯橋は1998年11月13日に通電を開始されているが、通電開始時および通電開始初期の期間の通電条件や内部鋼材のE-logI試験（分極試験）の結果は、調査資料からは得られなかった。使用されていた埋め込み型の照合電極は二酸化マンガン電極であり、その設置桁・回路・位置は表2.2.4に示す通りである。

表-2.2.4 荒磯橋の照合電極の設置桁・回路・位置

スパン	桁	回路 No.	照合電極の 設置桁と位置およびNo.			
			桁 位置	中	下	上*
1	G1-G2	1.1	G2	Re-1	Re-2	Re-3
	G3-G4	1.2	G4	Re-4	Re-5	Re-6
	G5-G6	2.1	G6	Re-7	Re-8	Re-9
2	G1-G2	2.2	G1	Re-10	Re-11	Re-12
	G3-G4	3.1	G3	Re-13	Re-14	Re-15
	G5-G6	3.2	G5	Re-16	Re-17	Re-18



※ 設置位置が「上」の照合電極 (Re3, Re6, Re9, Re12, Re15, Re18) は防食対象範囲外のウェブに試験的に設置されていたものである。

### (1) 電源電圧と通電電流の推移

図-2.2.5に、荒磯橋における各スパン・各回路の電圧および電流の経時変化を示す。荒磯橋の電気防食は定電圧制御方式で運転されていたと推測される。なお、電圧は電源装置のディスプレイによって確認されたものであると推測される。一方、電流は0.1Aや0.2Aなどの少数第一位で切り上げられているデータは電源装置のディスプレイで確認されたものであると推測される。一方、小数第二位の数値も有する電流のデータは、電源装置にマルチメータを挿入して測定された結果であると推測される。すなわち、電流のデータはそのほとんどが小数第二位の数値を丸められているものである。従って、0.1Aのデータであっても、その範囲は0.05~0.14Aまで変動している可能性があることに留意する必要がある。

図-2.2.5より、初期の設定電圧は不明であるものの、全ての回路において3.6~3.8Vで運転を開始していたものと推測される。スパン2については、防食対象の回路の一部において復極量不足が懸念されたため、2000年の夏に設定電圧を増加させている。また、2011年の12月以降、設定電圧を何度か調整していることが確認される。しかし、設定電圧を上昇させても電流は増加しておらず、むしろ低下した回路もある。

### (2) 復極量の推移

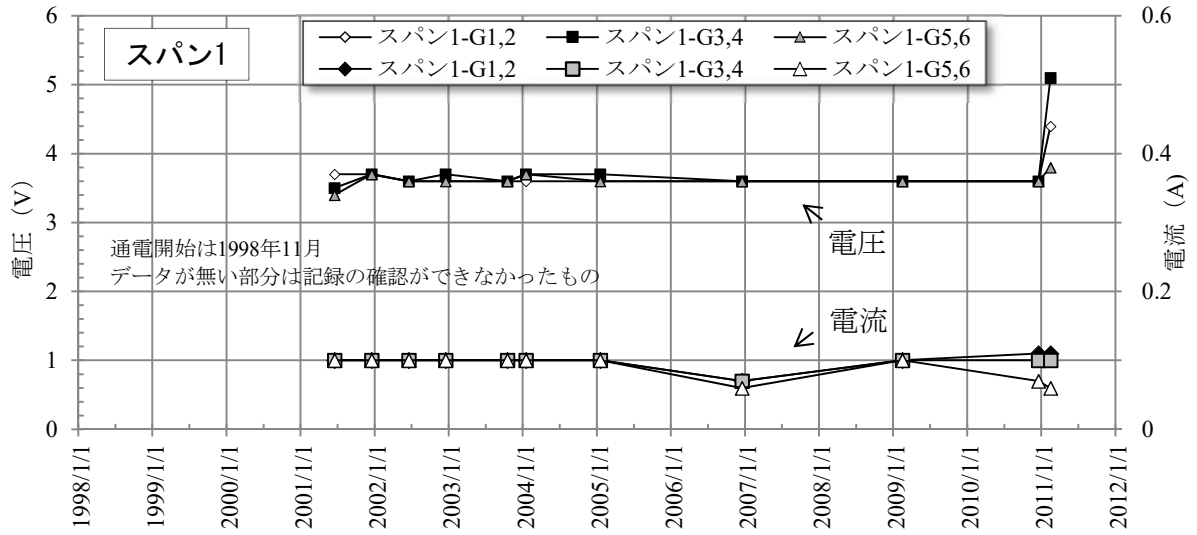
図-2.2.6に、荒磯橋各回路に埋め込まれた照合電極によって測定された24時間後復極量を示す。図-2.2.6より、同一回路内で測定される復極量に100mV以上の差があるものもあり、同一回路内における防食電流の分布が均一でないことが確認される。特徴的な傾向としては、照合電極(中)で測定される復極量(図-2.2.6の(a)と(b)において黒塗りのデータ)が大きく、照合電極(下)で測定される復極量(図-2.2.6の(a)と(b)において白抜きデータ)が小さい傾向がある。そのため、照合電極(下)の復極量に合わせて設定電圧を決定していたものと考えられる。なお、防食対象ではないウェブに埋め込まれた照合電極によって測定された復極量(図-2.2.6の(c))はおおよそ70mV以上で推移している。

### (3) インスタントオフ電位の推移

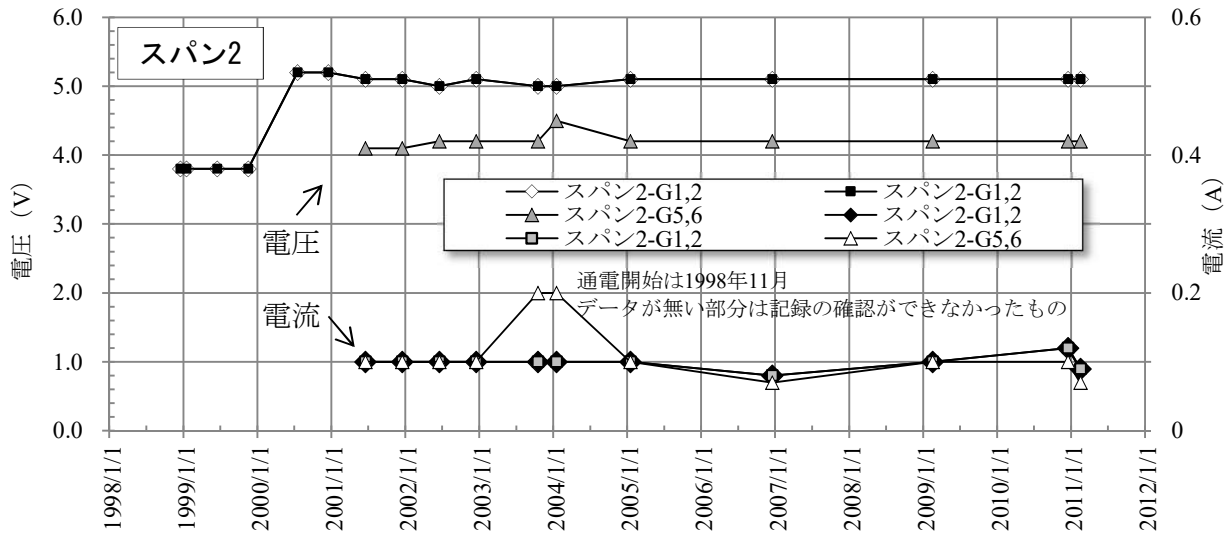
図-2.2.7 に、インスタントオフ電位の推移を示す。図-2.2.7 より、同一回路内で測定されたインスタントオフ電位は、照合電極（中）で測定されるインスタントオフ電位（図-2.2.7 の(a)と(b)において黒塗りのデータ）が卑側で、照合電極（下）で測定される復極量（図-2.2.7 の(a)と(b)において白抜きデータ）は貴側の傾向が確認できる。回路 1.1 の G2-Re2 に着目すると、測定時期における電位のバラツキが他の照合電極より大きく、また、後述する 24 時間後オフ電位の測定結果も他のモニタリングポイントの結果と大きく異なることから、他の金属の干渉あるいは照合電極が不良である可能性がある。さらに、スパン 2（秋田側）では、インスタントオフ電位が  $-700 \text{ mV vs CSE}$  に達するまで電位が卑化するときがあり、水素発生電位に近づいている。復極量不足が懸念されるものの、設定電圧を無理に上げなかったのは、PC 鋼材の水素脆化を避けるためと推測される。

### (4) オフ電位の推移

図-2.2.8 に、24 時間後オフ電位の推移を示す。いずれも  $-300 \sim -200 \text{ mV vs CSE}$  の電位を示しており、ASTM C876 の基準で考えると、モニタリングポイント付近のコンクリート中鋼材の腐食状況は不確定であると判断される。2.1.3 で述べたように、荒磯橋の桁内部の鋼材は腐食がかなり進行していた。そのため、電気防食を運転する前の鋼材の自然電位は  $-350 \text{ mV vs CSE}$  よりも卑側であったと推測される。電気防食運転開始後の 4 年経過時点でのオフ電位が  $-350 \text{ mV vs CSE}$  よりも貴側になったのは、鋼材表面でのカソード反応に起因する鋼材表面近傍の pH の上昇や塩化物イオンが電気泳動によって鋼材表面から離れたことが原因（防食電流による副次的効果）の可能性がある。ただし、データが現存している範囲では、24 時間後オフ電位が時間の経過とともに貴側に変化することはなく、ほぼ一定値となっているため、この防食電流による副次的効果は限定的であったと考えられる。一方、照合電極埋設部は断面修復がなされるため、塩化物イオンを含むコンクリートは除去される。そのため、鋼材表面の環境は腐食開始前の状態に戻るため、鋼材の自然電位は電気防食運転開始当初から  $-300 \sim -200 \text{ mV vs CSE}$  の電位を示していた可能性もある。なお、前述のように、G2-Re2 は電位の変動が大きくかつ他のモニタリングポイントと大きく異なる電位を示しており、他の金属の干渉あるいは、照合電極の不良などの可能性が示唆される。

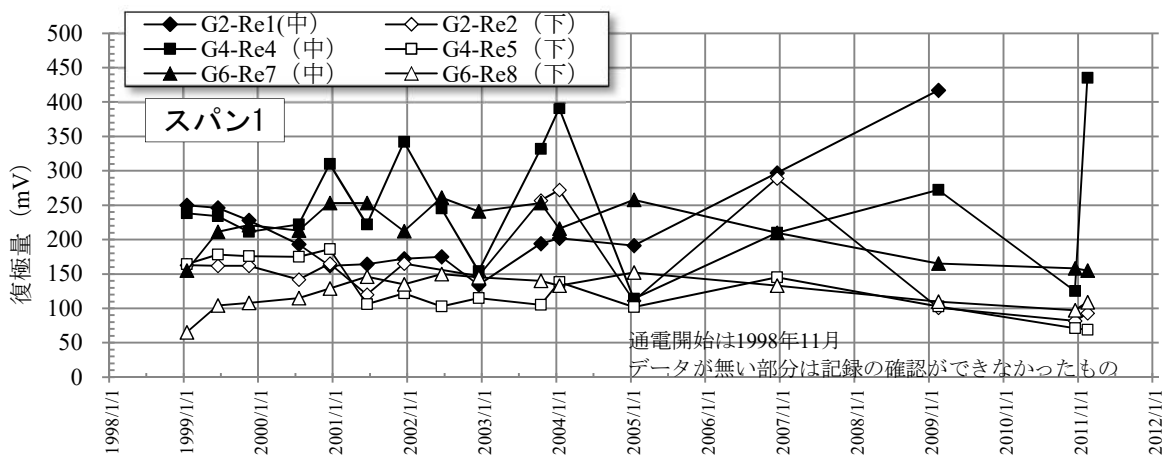


(a) スパン1 (酒田側)

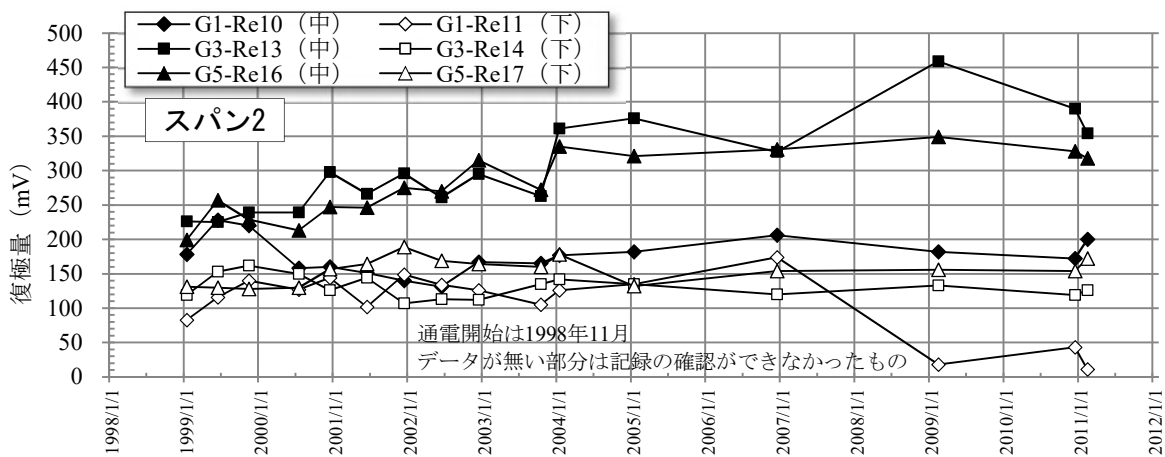


(b) スパン2 (秋田側)

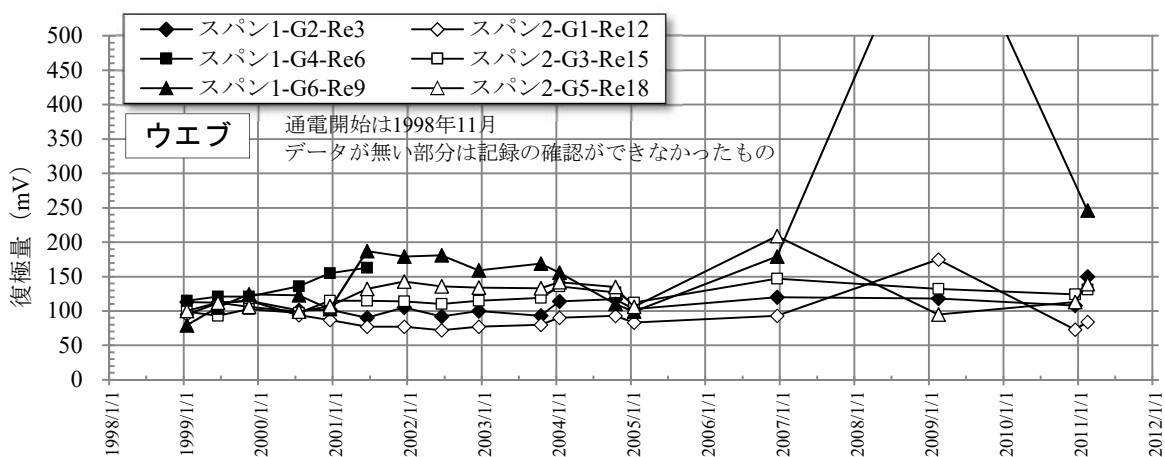
図-2.2.5 電圧と電流の推移



(a) スパン1の埋め込み照合電極による測定結果

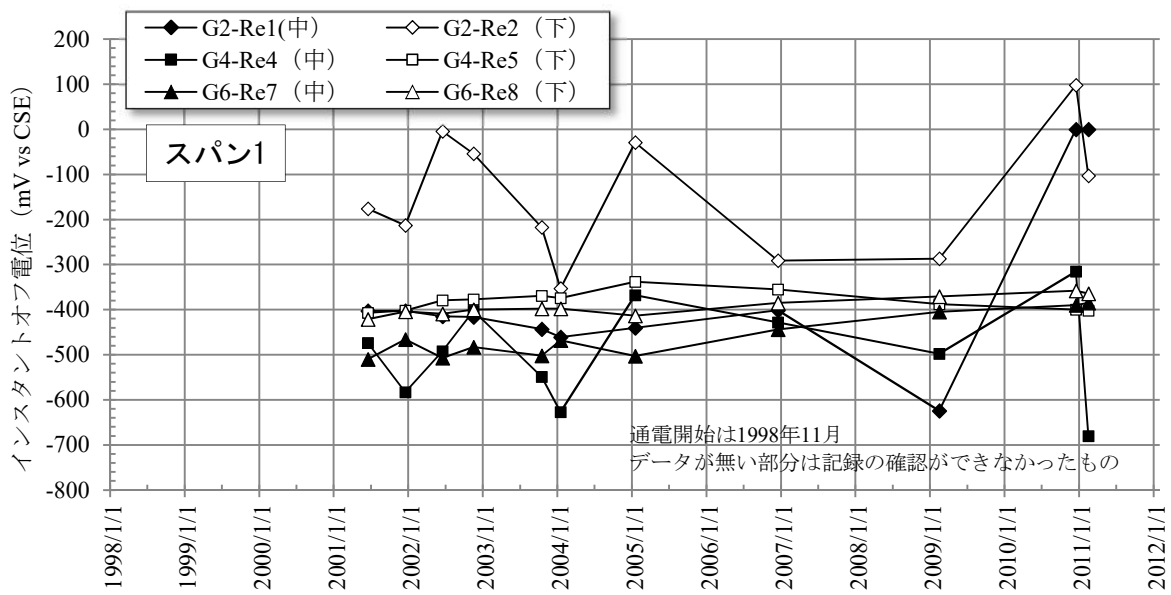


(b) スパン2の埋め込み照合電極による測定結果

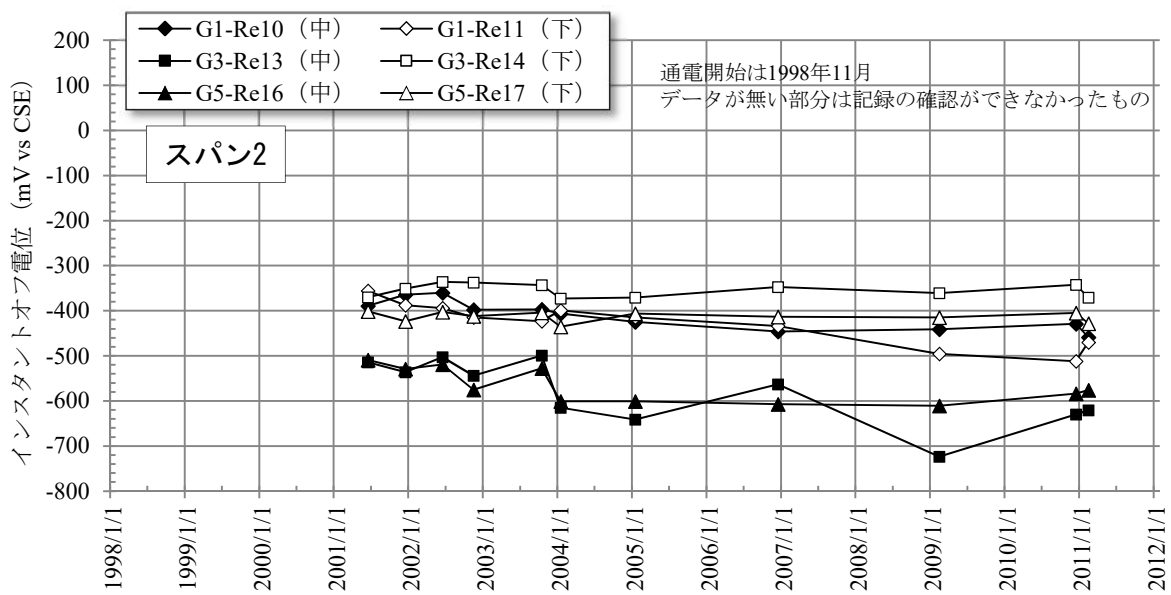


(c) ウェブ部の埋め込み照合電極による測定結果

図-2.2.6 復極量の推移

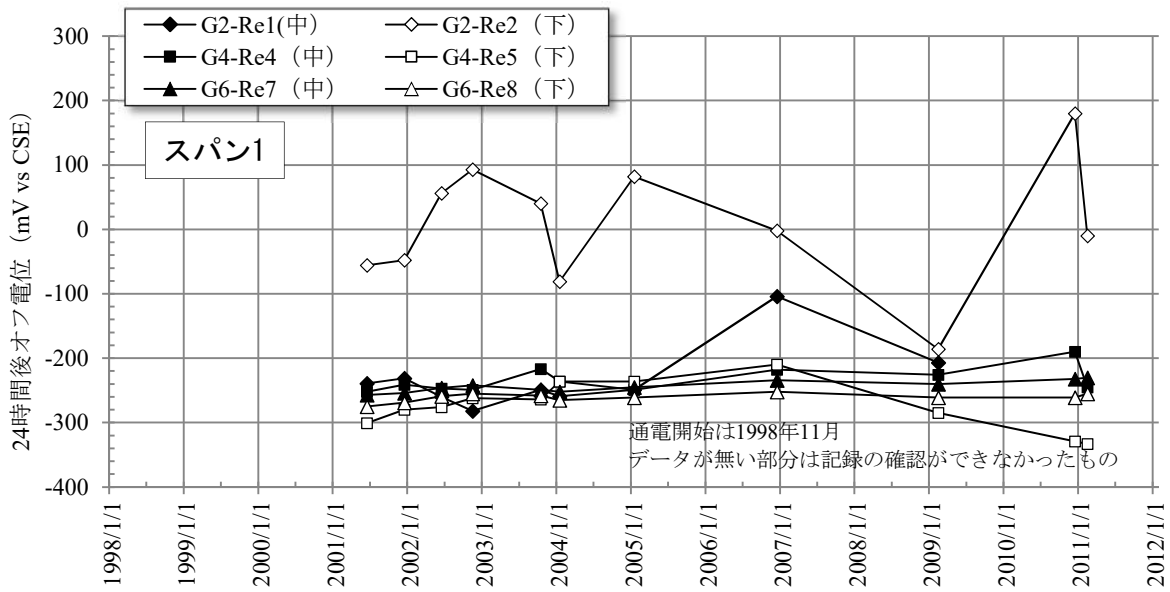


(a) スパン1の埋め込み照合電極による測定結果

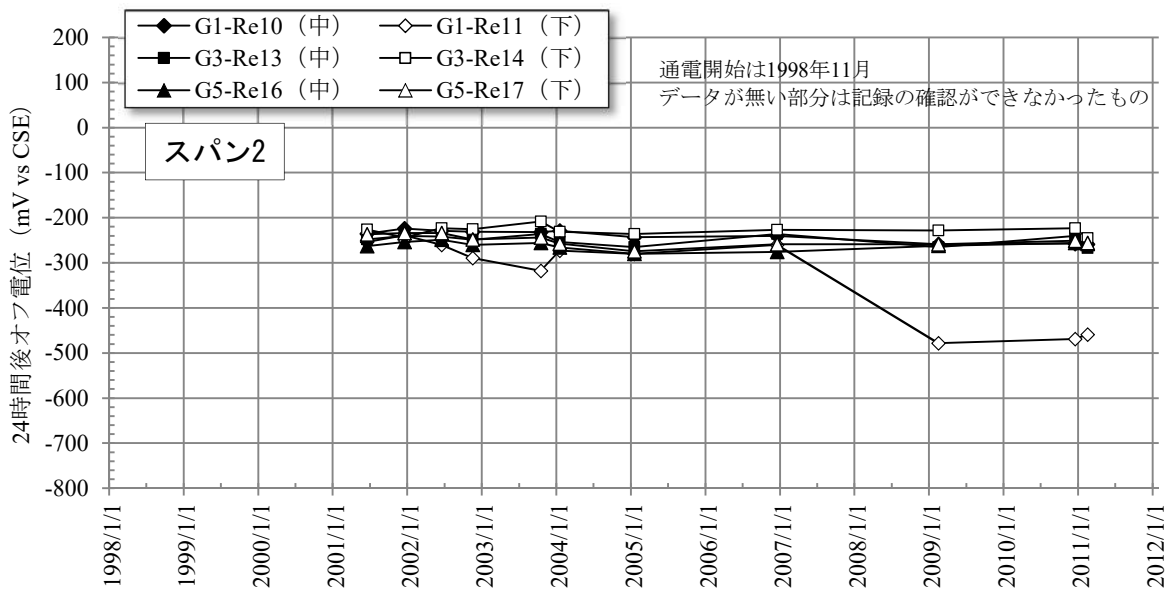


(b) スパン2の埋め込み照合電極による測定結果

図-2.2.7 インスタントオフ電位の推移



(a) スパン1の埋め込み照合電極による測定結果



(b) スパン2の埋め込み照合電極による測定結果

図-2.2.8 24時間後オフ電位の推移

### 3. 撤去桁の調査結果

#### 3.1 撤去桁の現状把握のための調査

##### 3.1.1 はじめに

本項では、供用環境から撤去され、土木研究所に移設された桁（以下、撤去桁）に対して実施した事前調査について示す。本事前調査は、おおよその桁の状態を把握し、以後の調査計画を立てるための基礎資料を取得するために実施した。以下に、調査対象と調査項目の概要を示す。

##### (1) 調査対象

荒磯橋の第二スパンのG3桁とG5桁の一部を対象とした。本調査におけるG3桁とG5桁の調査対象範囲を図-3.1.1に示す。図-3.1.1に示すように、荒磯橋の1本桁は4つのブロックから構成されている。本報告書では酒田側からブロック番号を付すこととした。従って、例えばG5桁は酒田側からG5-1、G5-2、G5-3、G5-4の4ブロックで構成される。このうち、本項での調査対象は図-3.1.1に示すようにG5-2、G5-3、G5-4に加えてG3-3である。

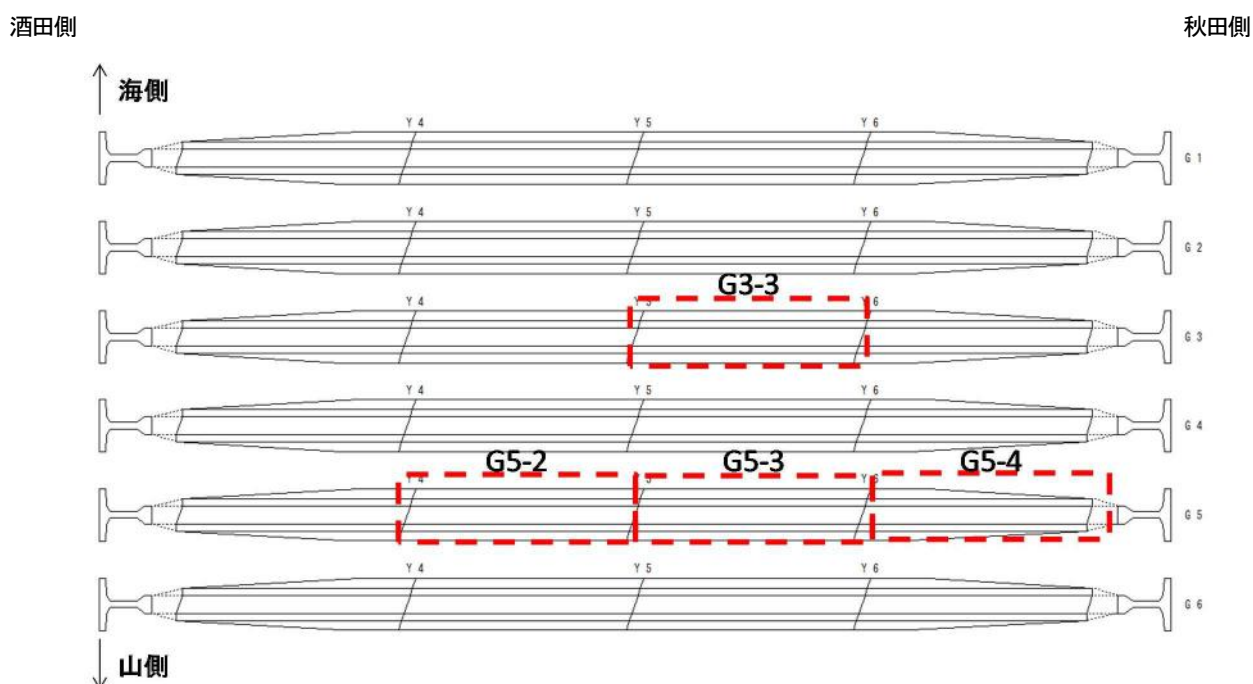


図-3.1.1 本調査における調査対象範囲

##### (2) 調査日と天候

調査日と天候情報について下記に示す。天候情報は気象庁のデータを参照し、調査実施時間帯のつくば市における9～15時のデータを示している。

- ・調査日：2015年2月24日
- ・天候：曇り
- ・気温：7.5 ～ 10.2℃
- ・湿度：67 ～ 97%



### (3) 調査内容

#### 1) 外観調査

変状の近接目視調査を実施するとともに、その位置を記録した。

#### 2) 鉄筋間および陽極間の導通確認

鉄筋間の導通を確認するために、桁の切断面に露出した鉄筋に電圧計を接続し、電位差を測定した。試験対象の桁の切断面を写真-3.1.1～写真-3.1.4に示す。試験では鉄筋のうち的一本を基準鉄筋と定め、電位差計の端子を基準鉄筋とその他の鉄筋に接続し、電位差が1mV未満であればそれらの鉄筋が導通していると判定した。

また、陽極間の導通を確認するために、桁から露出している陽極部分に電位差計の端子を接続し、陽極間の電位差を確認した。



写真-3.1.1 G3-3における鉄筋間導通確認試験



写真-3.1.2 G5-2における鉄筋間導通確認試験



写真-3.1.3 G5-3における鉄筋間導通確認試験



写真-3.1.4 G5-4における鉄筋間導通確認試験

### 3) 自然電位

G3-3, G5-3 および G5-4 において、電気防食を施した鋼材の腐食状況についての基礎情報を得るために自然電位の測定を行った。測定位置はスターラップの直上とした。G3-3 および G5-3 の測定位置と G5-4 の測定位置を図-3.1.2 および図-3.1.3 にそれぞれ示す。図-3.1.2 中に示すように、測定は下フランジにおいて等間隔で行ったほか、G3-3 と G5-3 については各桁の端部から4つ目の測定位置をそれぞれ A-Line, B-Line と定め、これら二つの Line に沿ってウェブでの測定を行った。また G5-4 については下フランジの底面においてのみ測定を行った。

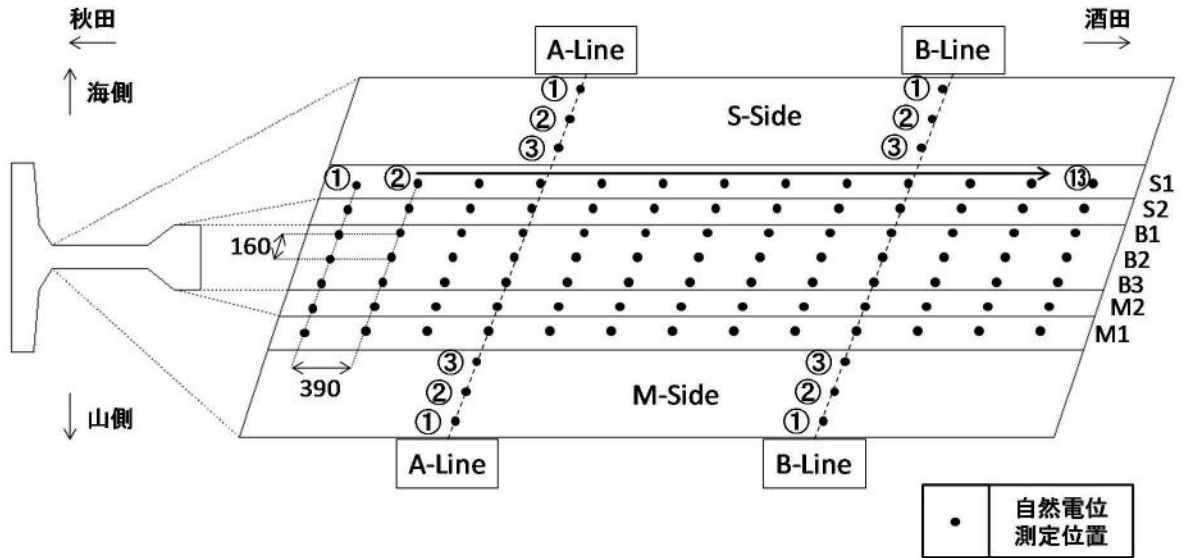


図-3.1.2 G3-3 と G5-3 における自然電位の測定位置

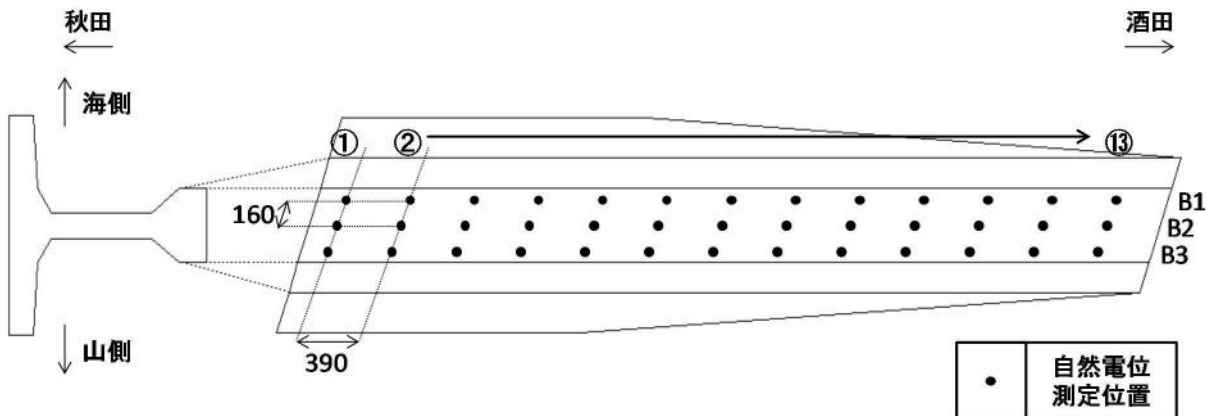


図-3.1.3 G5-4 における自然電位の測定位置

#### 4) 鉄筋のオン電位とインスタントオフ電位

直流電源装置を桁切断面に露出した鉄筋および下フランジを一部はつり出して露出させた陽極に接続し、直流電流を印加し、G3-3 および G5-3 において、鉄筋のオン電位およびインスタントオフ電位を測定した。測定位置を図-3.1.4 に示す。3)で説明した A-Line, B-Line に沿う箇所を測定位置とした。また、内部に埋設された照合電極を用いた測定も実施した。

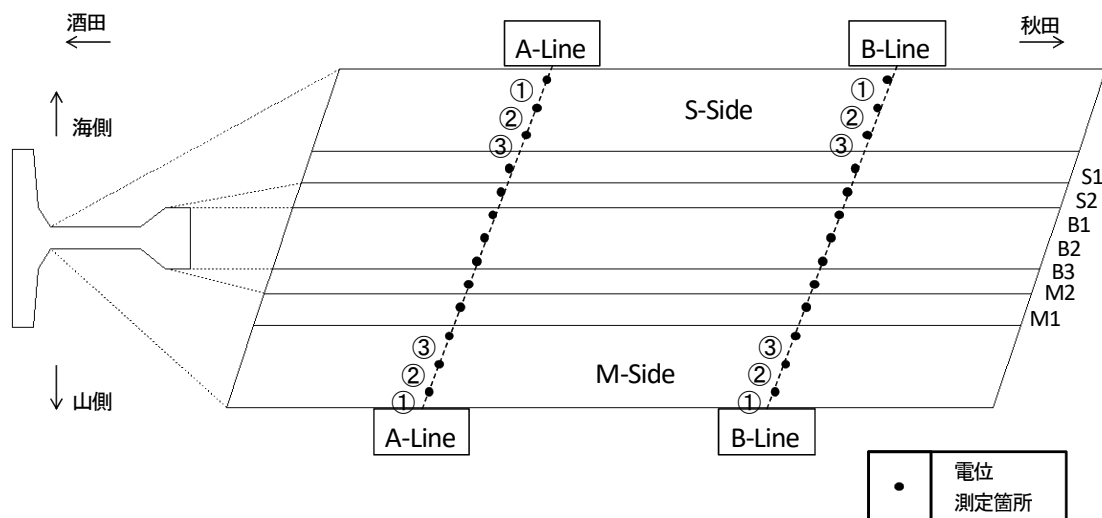


図-3.1.4 オン電位とインスタントオフ電位の測定位置

#### 5) 電気抵抗率

G3-3 および G5-3 において図-3.1.5 および図-3.1.6 に示した測定箇所(A-Line, B-Line 近傍箇所において内部鋼材の位置などの関係より選定)において非破壊試験である4プローブ法により電気抵抗率の測定を行った。なお、G5-3 の B-Line・B の位置は断面修復材の電気抵抗率であり、それ以外の位置は全て母材コンクリートの電気抵抗率である。

#### 6) コンクリートの圧縮強度

G3-3 および G5-3 において非破壊試験である反発硬度法によりコンクリートの圧縮強度を推定した。推定位置を図-3.1.5 および図-3.1.6 に示す。なお、G3-3 では母材コンクリートの、G5-3 では断面修復材のコンクリートの圧縮強度をそれぞれ推定した。また、各点において推定された圧縮強度の偏差が平均値の±20%以上になる値があればそれを棄却し、新たに平均値を算出して測定結果とした(日本材料試験技術協会が定める方法に基づく)。

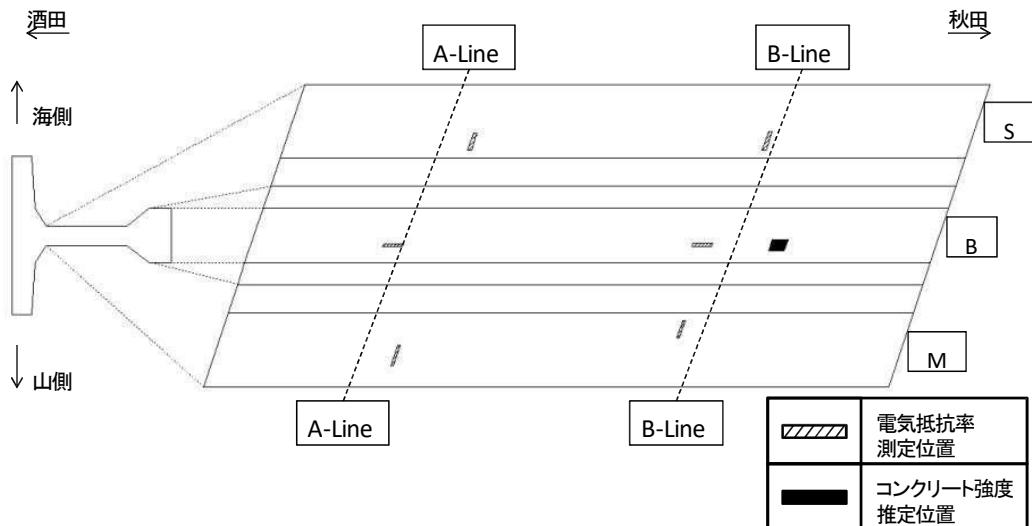


図-3.1.5 G3-3 における電気抵抗率の測定位置およびコンクリートの圧縮強度の推定位置

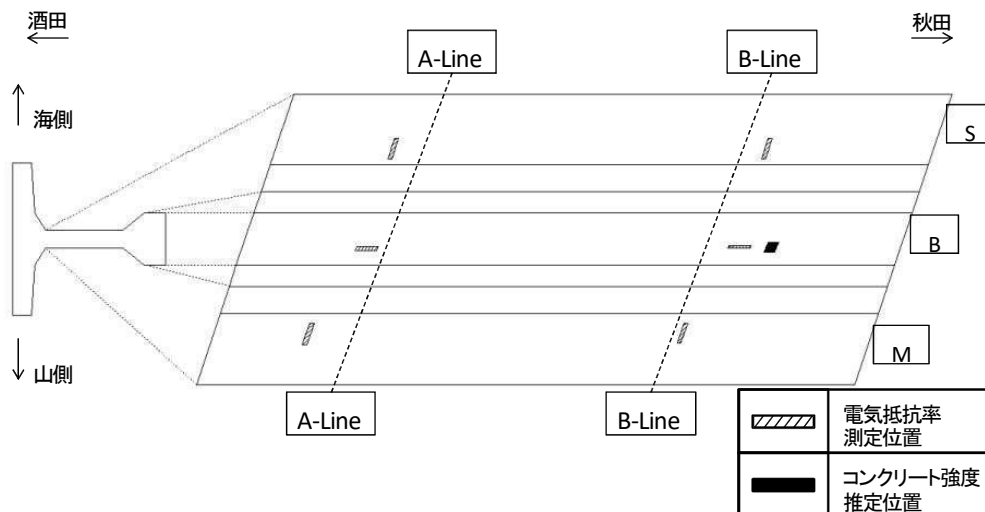


図-3.1.6 G5-3 における電気抵抗率の測定およびコンクリートの圧縮強度の推定位置

### 3.1.2 外観調査

外観調査の結果をそれぞれ図-3.1.7 から図-3.1.10 に示す。なお、図中に示す写真番号は表-3.1.1 に示す写真番号と対応している。

図-3.1.7 より G3-3 では下フランジを中心に若干の浮きや点錆等が見られる。これと比較して図-3.1.8 に示す G5-2 では調査対象範囲の約 3 分の 1 で浮きが生じており、今回の外観調査では最も劣化の進行が見られた。同様に図-3.1.9 より G5-3 でも下フランジの一部で大きな浮きやひび割れが生じている。また、図-3.1.10 から分かるように G5-4 でも下フランジで同様に浮きやひび割れが生じていた。G5 桁下フランジのひび割れについてクラックスケールでひび割れ幅を測定したところ、ひび割れ幅 0.05~0.15 mm がほとんどであったが、G5-3 の下フランジの一部には 0.35 mm のひび割れ幅を有するひび割れも存在した。これら下フランジの浮きや比較的大きいひび割れが発生した原因は鉄筋腐食であると推測される。一方ウェブの一部に見受けられる斜め方向のひび割れは原因が定かではないが切断・運搬時のねじりなどによって生じたものと推察される。

概観すると、G3桁については重篤な変状は見られないが、G5桁について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ることが確認された。

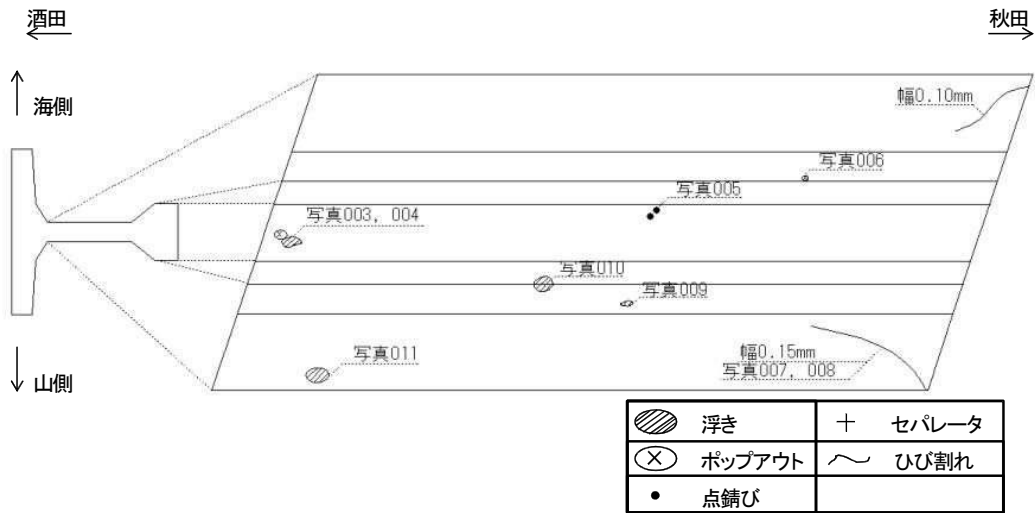


図-3.1.7 G3-3 における外観調査結果

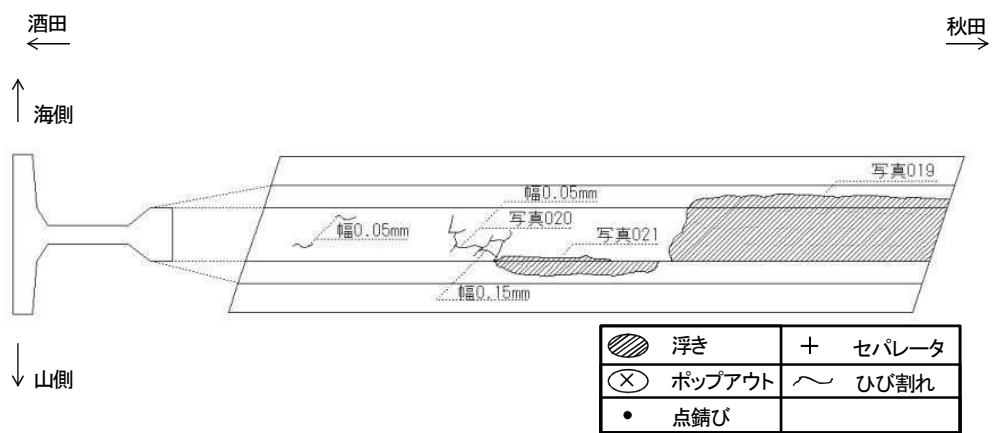


図-3.1.8 G5-2 における外観調査結果（下フランジ部のみ）

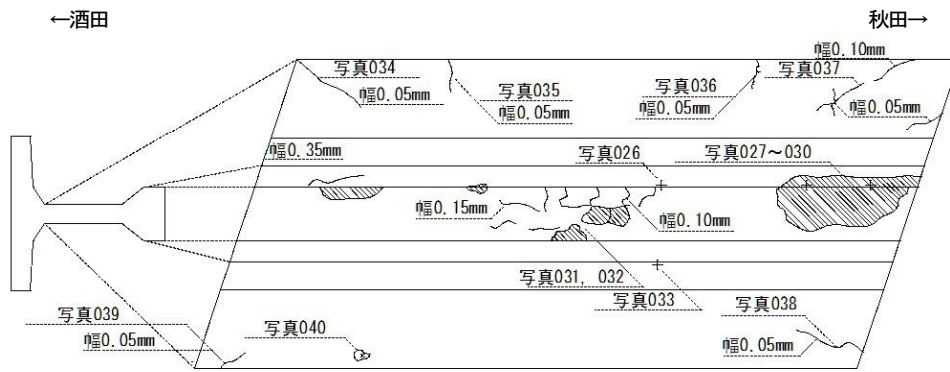


図-3.1.9 G5-3 における外観調査結果

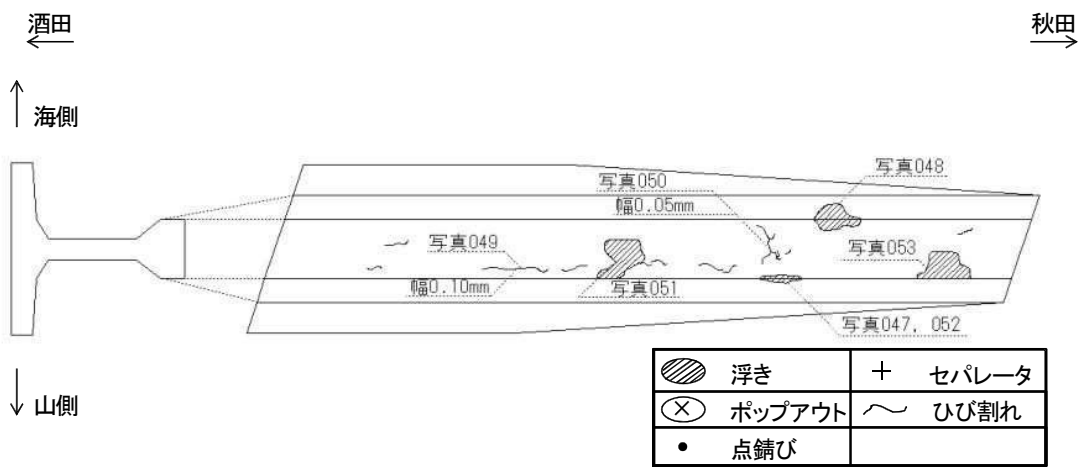


図-3.1.10 G5-4 における外観調査結果 (下フランジ部のみ)

表-3.1.1 外観調査箇中 (図-3.1.7～図-3.1.10) の変状の写真 (No.は同箇中の写真番号)

その1

No.	写真	No.	写真
000	 000_G3-3_下フランジ_全景	001	 001_G3-3_側面-南側_全景
002	 002_G3-3_側面-北側_全景	003	 003_G3-3_下フランジ_ポップアウト
004	 004_G3-3_下フランジ_ポップアウト_接写	005	 005_G3-3_下フランジ_点錆
006	 006_G3-3_側面-南側_ポップアウト	007	 007_G3-3_側面-北側_ひび割れ-1

表-3.1.1 外観調査箇中 (図-3.1.7～図-3.1.10) の変状の写真 (No.は同箇中の写真番号)

その2

No.	写真	No.	写真
008	 <p>008_G3-3_側面-北側_ひび割れ-2</p>	009	 <p>009_G3-3_側面-北側_浮き-1</p>
010	 <p>010_G3-3_側面-北側_浮き-2</p>	011	 <p>011_G3-3_側面-北側_浮き-3</p>
012	 <p>012_G3-3_側面-北側_配管ボックス</p>	013	 <p>013_G5-2_下フランジ-底面-全景-1_</p>
014	 <p>014_G5-2_下フランジ-底面_全景-2</p>	015	 <p>015_G5-2_側面-南側_全景</p>



表-3.1.1 外観調査箇中 (図-3.1.7～図-3.1.10) の変状の写真 (No.は同箇中の写真番号)

その3

No.	写真	No.	写真
016	 <p>016_G5-2_側面-南側_全景-2</p>	017	 <p>017_G5-2_側面-北側_全景-1</p>
018	 <p>018_G5-2_側面-北側_全景-2</p>	019	 <p>019_G5-2_下フランジ-底面_浮き-1</p>
020	 <p>020_G5-2_下フランジ-底面_ひび割れ-1</p>	021	 <p>021_G5-2_下フランジ-底面_浮き-2</p>
022	 <p>022_G5-2_陽極導通確認_導通なし-1</p>	023	 <p>023_G5-2_陽極導通確認_導通なし-2</p>

表-3.1.1 外観調査箇中 (図-3.1.7～図-3.1.10) の変状の写真 (No.は同箇中の写真番号)

その4




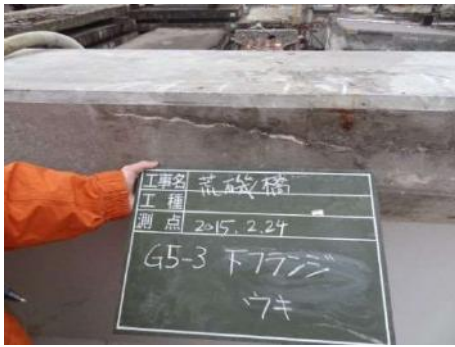




No.	写真	No.	写真
024		025	
	024_G5-3_下フランジ_底面-全景		025_G5-3_側面-南側_全景
026		027	
	026_G5-3_下フランジ_セパレータ		027_G5-3_下フランジ_浮き-1
028		029	
	028_G5-3_下フランジ_浮き-2		029_G5-3_下フランジ_浮き-3
030		031	
	030_G5-3_下フランジ_浮き-3-接写		031_G5-3_下フランジ_浮き-4

表-3.1.1 外観調査箇中 (図-3.1.7～図-3.1.10) の変状の写真 (No.は同箇中の写真番号)

その5

No.	写真	No.	写真
032		033	
	032_G5-3_下フランジ_浮き-5		033_G5-3_下フランジ側面_セパレータ
034		035	
	034_G5-3_側面-南側_ひび割れ-1		035_G5-3_側面-南側_ひび割れ-2
036		037	
	036_G5-3_側面-南側_ひび割れ-3		037_G5-3_側面-南側_ひび割れ-4
038		039	
	038_G5-3_側面-北側_ひび割れ-1		039_G5-3_側面-北側_ひび割れ-2

表-3.1.1 外観調査箇中 (図-3.1.7～図-3.1.10) の変状の写真 (No.は同箇中の写真番号)

その6

No.	写真	No.	写真
040	 <p>040_G5-3_側面-北側_ポップアウト</p>	041	 <p>041_G5-4_下フランジ-底面_全景</p>
042	 <p>042_G5-4_側面-南側_全景</p>	043	 <p>043_G5-4_側面-西側_全景-1</p>
044	 <p>044_G5-4_側面-西側_全景-2</p>	045	 <p>045_G5-4_側面-東側_全景-1</p>
046	 <p>046_G5-4_側面-東側_全景-2</p>	047	 <p>047_G5-4_下フランジ-浮き</p>

表-3.1.1 外観調査箇中 (図-3.1.7～図-3.1.10) の変状の写真 (No.は同箇中の写真番号)

その7

No.	写真	No.	写真
048	 <p>048_G5-4_下フランジ-底面_はく離</p>	049	 <p>049_G5-4_下フランジ-底面_ひび割れ-1</p>
050	 <p>050_G5-4_下フランジ-底面_ひび割れ-2</p>	051	 <p>051_G5-4_下フランジ-底面_浮き-1</p>
052	 <p>052_G5-4_下フランジ-底面_浮き-2</p>	053	 <p>053_G5-4_下フランジ-底面_浮き-3</p>

### 3.1.3 各種鋼材と配線との導通確認

鉄筋間導通確認試験の試験結果を表-3.1.2 から表-3.1.5 に示す。電位差が 1 mV 以上のデータについてはセルを灰色で示した。なお、この検討は桁が架設されていた時の状態を評価するものではなく、今後、通電試験を実施する上で鋼材の導通をどのように取るべきかを確認するためのものである。

G3-3 においては、基準鉄筋 No.1 の鉄筋と No.4, No.5, No.8~No.10 の鉄筋の導通が確認できなかった。特に No.9 については No.1 との電位差が 70 mV 以上であった。G5-2 については、No.1 と No.10 が他の鉄筋との導通が確認できなかった。G5-3 および G5-4 については、導通試験を実施した範囲では、導通が確認できた。

一方、陽極間の導通については、全ての陽極での導通が確認できた。ただし、写真-3.1.5 に示すように、G5-2 では 1ヶ所でチタン・ワイヤーの導通が確保されていない箇所が確認された。

表-3.1.2 G3-3 における鉄筋間導通確認試験

基準 鉄筋	電位差 (mV)													
	配置鉄筋No.													
No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	a	b	c	d
1	—	0.36	0.37	1.64	1.64	0.37	0.45	1.64	93.3	-5.80	0.36	0.37	0.37	0.37
9	-80.7	-80.3	-80.2	-78.9	-78.7	-79.8	-79.7	-78.4	—	-75.8	-79.5	-79.4	-79.3	-79.2

基準	シース管No.									
鉄筋	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
1	3.05	0.05	0.04	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01

基準鉄筋をテスターの一端子に接続して測定

シース管 No.は左上から①, ②の順で下段は左から⑥, ⑦, 右下が⑩とした。

表-3.1.3 G5-2 における鉄筋間導通確認試験

基準 鉄筋	電位差 (mV)													
	配置鉄筋No.													
No.	1	2	3			6	7			10	a	b	c	d
1	—	1.37	0.97			1.14	1.25			1.54	1.37	0.97	1.38	1.39
2	-1.39	—	-0.41			-0.23	-0.12			-1.60	-0.01	-0.02	0.00	0.00

基準	シース管No.									
鉄筋	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
1	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01

基準鉄筋をテスターの+端子に接続して測定

シース管 No.は左上から①, ②の順で下段は左から⑥, ⑦, 右下が⑩とした。

表-3.1.4 G5-3 における鉄筋間導通確認試験

基準 鉄筋	電位差 (mV)													
	配置鉄筋No.													
No.	1	2	3			6	7			10	a	b	c	d
1	-	-0.06	-0.03			0.00	-0.08			0.00	-0.09	-0.01	0.01	0.00

基準 鉄筋	シース管No.									
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
1	0.00	0.02	0.01	0.00	0.03	0.01	0.02	0.00	0.04	0.02

基準鉄筋をテスターの+端子に接続して測定  
シース管 No.は左上から①, ②の順で下段は左から⑥, ⑦, 右下が⑩とした。

表-3.1.5 G5-4 における鉄筋間導通確認試験

基準 鉄筋	電位差 (mV)													
	配置鉄筋No.													
No.	1	2				6	7			10	a	b	c	d
1	-	-0.27				-0.25	0.00			-0.01	0.00	-0.01	0.00	-0.01

基準 鉄筋	シース管No.									
	①	②	③	④	⑤	⑥				⑩
1	0.01	0.01	0.03	0.00	0.03	0.01				0.02

基準鉄筋をテスターの+端子に接続して測定  
シース管 No.は左上から①, ②の順で下段は左を⑥, 右下が⑩とした。



写真-3.1.5 G5-2 におけるディストリビュータと陽極 (表示は31.047mV)

### 3.1.4 内部照合電極の作動確認

G3-3 および G5-3 に設置されている内部照合電極（各ブロックに3本ずつ）のケーブルと排流端子を電圧計に接続し、鋼材電位を測定した。後述する3.1.5内に示すように、鋼材電位は安定して測定できていることから、内部照合電極は正常に作動していると判断した。

### 3.1.5 鋼材の自然電位、オン電位、インスタントオフ電位の分布

G3-3 の自然電位測定結果を下フランジとウェブに分けて表-3.1.6 と表-3.1.7 に示す。同様に G5-3 の測定結果を表-3.1.8 と表-3.1.9 に、G5-4 の測定結果を表-3.1.10 に示す。なお ASTM C 876 による腐食判定基準は表-3.1.11 に示すとおりである。

それぞれの桁について下フランジの側面および底面の平均値を算出したところ、側面よりも底面における自然電位が若干ではあるが卑な値となり、下フランジの底面で腐食傾向が強いと考えられる。また、下フランジとウェブ側面を比較すると、明らかに下フランジの自然電位が卑化しており、腐食傾向が強いと判断される。

各電位の測定結果について、G3-3 における測定結果を表-3.1.12 に、G5-3 における測定結果を表-3.1.13 にそれぞれ示す。また、G3-3 および G5-3 のコンクリート内部に埋設された照合電極による測定結果を表-3.1.14 に示す。また照合電極の埋設位置を図-3.1.11 に、各測定位置における分極量比を図-3.1.12～図-3.1.15 にそれぞれ示す。ここでいう分極量比とは、各測定位置における分極量を、照合電極 Re-2 近傍の測定位置である M2 における分極量で除した値である。

これらの結果より、陽極周辺の鉄筋（ウェブ下側と下フランジのテーパ部）の分極量と比較して、下フランジ側面・底面の分極量は小さくなる傾向が確認された。

表-3.1.6 G3-3（下フランジ）における自然電位

測定位置	自然電位[mV vs CSE]													平均値	
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬		
S1	-441	-386	-332	-398	-469	-439	-478	-447	-394	-389	-415	-399	-	-415	-427
S2	-390	-410	-341	-379	-577	-471	-565	-421	-441	-395	-417	-463	-	-439	
B1	-388	-399	-391	-369	-468	-489	-488	-422	-491	-409	-369	-481	-376	-426	-434
B2	-358	-369	-416	-345	-433	-475	-459	-460	-467	-391	-422	-479	-410	-422	
B3	-403	-372	-460	-382	-424	-467	-455	-451	-538	-459	-488	-531	-495	-456	
M2	-413	-400	-401	-376	-388	-433	-456	-422	-432	-408	-409	-444	-466	-419	-426
M1	-404	-407	-414	-411	-423	-464	-483	-454	-459	-448	-426	-414	-431	-434	

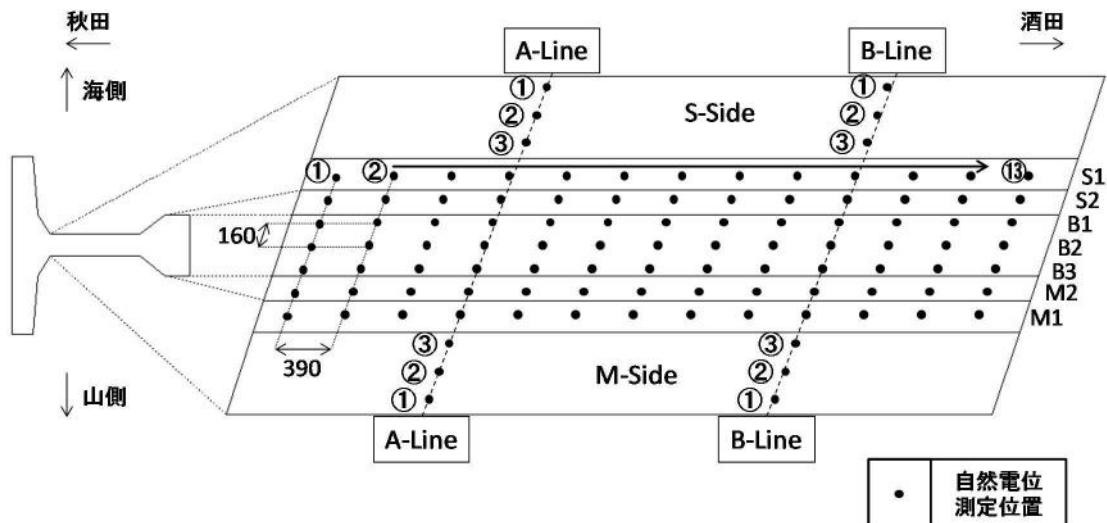




表-3.1.7 G3-3 (ウェブ) における自然電位

測定位置		自然電位[mV vs CSE]		
		①	②	③
S-Side	A-Line	-361	-353	-376
	B-Line	-321	-326	-359
M-Side	A-Line	-366	-342	-339
	B-Line	-370	-348	-352

表-3.1.8 G5-3(下フランジ)における自然電位

測定位置	自然電位[mV vs CSE]													平均値	
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬		
S1	-449	-495	-467	-459	-425	-442	-395	-441	-500	-510	-525	-484	-	-466	-471
S2	-440	-463	-507	-434	-458	-519	-438	-488	-485	-545	-474	-469	-	-477	
B1	-450	-466	-514	-446	-485	-521	-472	-490	-480	-572	-571	-521	-483	-498	-489
B2	-486	-522	-462	-363	-354	-415	-425	-504	-520	-599	-551	-475	-502	-475	
B3	-484	-597	-481	-368	-366	-449	-514	-477	-519	-560	-538	-548	-508	-493	-476
M2	-519	-578	-464	-406	-404	-422	-455	-449	-460	-524	-540	-566	-495	-483	
M1	-522	-481	-469	-411	-415	-416	-439	-406	-457	-493	-538	-554	-484	-468	

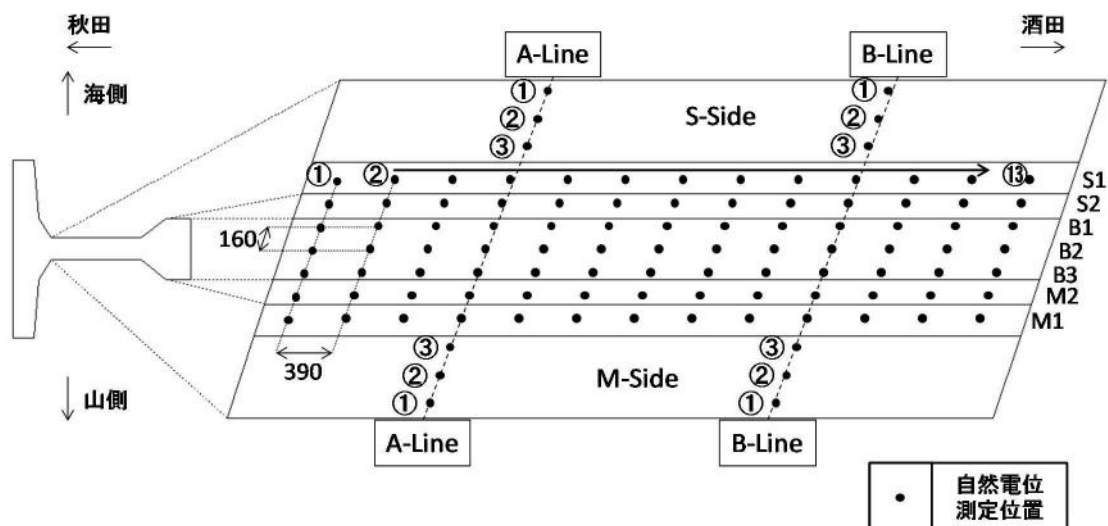


表-3.1.9 G5-3(ウェブ)における自然電位

測定位置		自然電位[mV vs CSE]		
		①	②	③
S-Side	A-Line	-377	-385	-439
	B-Line	-320	-318	-399
M-Side	A-Line	-301	-302	-307
	B-Line	-318	-303	-329

表-3.1.10 G5-4(下フランジ)における自然電位

測定位置	自然電位[mV vs CSE]												
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬
B1	-468	-435	-468	-470	-515	-473	-456	-485	-486	-480	-509	-512	-478
B2	-505	-502	-506	-497	-593	-527	-410	-433	-543	-527	-560	-490	-495
B3	-595	-607	-557	-513	-555	-541	-463	-480	-625	-574	-559	-448	-554

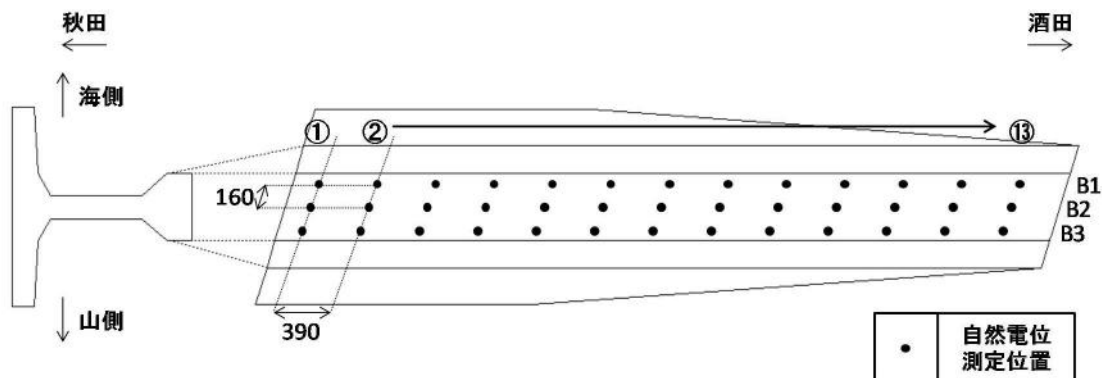


表-3.1.11 ASTM C 876 による腐食判定基準

自然電位E [mV vs CSE]	腐食判定
$-200 < E$	90%以上の確立で腐食なし
$-350 < E \leq -200$	不確定
$E \leq -350$	90%以上の確立で腐食あり

表-3.1.12 G3-3 における電位分布 [CSE 照合電極]

測定位置	ウェーブ(S-side)											
	①				②				③			
	自然電位 [mV vs]	on電位 [mV vs]	ins電位 [mV vs]	分極量 [mV]	自然電位 [mV vs]	on電位 [mV vs]	ins電位 [mV vs]	分極量 [mV]	自然電位 [mV vs]	on電位 [mV vs]	ins電位 [mV vs]	分極量 [mV]
A-Line	-370	-455	-397	27	-348	-526	-467	119	-352	-731	-632	280
B-Line	-366	-443	-381	15	-342	-479	-418	76	-339	-743	-618	279
測定位置	下フランジ											
	S1				S2							
	自然電位 [mV vs]	on電位 [mV vs]	ins電位 [mV vs]	分極量 [mV]	自然電位 [mV vs]	on電位 [mV vs]	ins電位 [mV vs]	分極量 [mV]				
A-Line	-398	-952	-803	405	-379	-616	-584	205				
B-Line	-394	-638	-581	188	-441	-1015	-719	278				
測定位置	下フランジ											
	B1				B2				B3			
	自然電位 [mV vs]	on電位 [mV vs]	ins電位 [mV vs]	分極量 [mV]	自然電位 [mV vs]	on電位 [mV vs]	ins電位 [mV vs]	分極量 [mV]	自然電位 [mV vs]	on電位 [mV vs]	ins電位 [mV vs]	分極量 [mV]
A-Line	-369	-627	-586	218	-345	-598	-551	206	-382	-615	-591	209
B-Line	-491	-640	-593	103	-467	-604	-548	81	-538	-656	-601	63
測定位置	下フランジ											
	M1				M2							
	自然電位 [mV vs]	on電位 [mV vs]	ins電位 [mV vs]	分極量 [mV]	自然電位 [mV vs]	on電位 [mV vs]	ins電位 [mV vs]	分極量 [mV]				
A-Line	-411	-951	-773	362	-376	-620	-573	197				
B-Line	-459	-1186	-911	452	-432	-673	-599	167				
測定位置	ウェーブ(M-side)											
	①				②				③			
	自然電位 [mV vs]	on電位 [mV vs]	ins電位 [mV vs]	分極量 [mV]	自然電位 [mV vs]	on電位 [mV vs]	ins電位 [mV vs]	分極量 [mV]	自然電位 [mV vs]	on電位 [mV vs]	ins電位 [mV vs]	分極量 [mV]
A-Line	-321	-415	-354	33	-326	-501	-440	114	-359	-755	-663	304
B-Line	-361	-463	-401	40	-353	-530	-469	116	-376	-861	-684	308

表-3.1.13 G5-3 における電位分布 [CSE 照合電極]

測定位置	ウェブ(S-side)											
	①				②				③			
	自然電位 [mV vs]	on電位 [mV vs]	ins電位 [mV vs]	分極量 [mV]	自然電位 [mV vs]	on電位 [mV vs]	ins電位 [mV vs]	分極量 [mV]	自然電位 [mV vs]	on電位 [mV vs]	ins電位 [mV vs]	分極量 [mV]
A-Line	-318	-337	-337	19	-303	-385	-387	84	-329	-573	-565	236
B-Line	-320	-344	-340	20	-318	-379	-378	60	-399	-584	-573	174

測定位置	下フランジ							
	S1				S2			
	自然電位 [mV vs]	on電位 [mV vs]	ins電位 [mV vs]	分極量 [mV]	自然電位 [mV vs]	on電位 [mV vs]	ins電位 [mV vs]	分極量 [mV]
A-Line	-459	-908	-848	389	-434	-585	-569	135
B-Line	-525	-869	-764	239	-474	-549	-543	69

測定位置	下フランジ											
	B1				B2				B3			
	自然電位 [mV vs]	on電位 [mV vs]	ins電位 [mV vs]	分極量 [mV]	自然電位 [mV vs]	on電位 [mV vs]	ins電位 [mV vs]	分極量 [mV]	自然電位 [mV vs]	on電位 [mV vs]	ins電位 [mV vs]	分極量 [mV]
A-Line	-446	-425	-423	-23	-363	-497	-497	134	-368	-567	-568	200
B-Line	-571	-636	-634	63	-551	-592	-590	39	-538	-583	-580	42

測定位置	下フランジ							
	M1				M2			
	自然電位 [mV vs]	on電位 [mV vs]	ins電位 [mV vs]	分極量 [mV]	自然電位 [mV vs]	on電位 [mV vs]	ins電位 [mV vs]	分極量 [mV]
A-Line	-411	-793	-698	287	-406	-548	-532	126
B-Line	-538	-1293	-797	259	-540	-606	-595	55

測定位置	ウェブ(M-side)											
	①				②				③			
	自然電位 [mV vs]	on電位 [mV vs]	ins電位 [mV vs]	分極量 [mV]	自然電位 [mV vs]	on電位 [mV vs]	ins電位 [mV vs]	分極量 [mV]	自然電位 [mV vs]	on電位 [mV vs]	ins電位 [mV vs]	分極量 [mV]
A-Line	-301	-334	-333	32	-302	-405	-401	99	-307	-629	-583	276
B-Line	-377	-428	-424	47	-385	-471	-467	82	-439	-816	-694	255

表-3.1.14 各桁の照合電極の電位分布 [CSE 照合電極]

測定位置	照合電極 番号	内部照合電極							
		G3-3				G5-3			
		自然電位 [mV vs]	on電位 [mV vs]	ins電位 [mV vs]	分極量 [mV]	自然電位 [mV vs]	on電位 [mV vs]	ins電位 [mV vs]	分極量 [mV]
上	Re-2	-	-332	-281	-	-339	-440	-435	96
中	Re-1	-	-1184	-486	-	-306	-955	-635	329
下	Re-3	-	-437	-408	-	-342	-447	-444	102

※G3-3 の自然電位は未測定

照合電極取付詳細 S=1/10

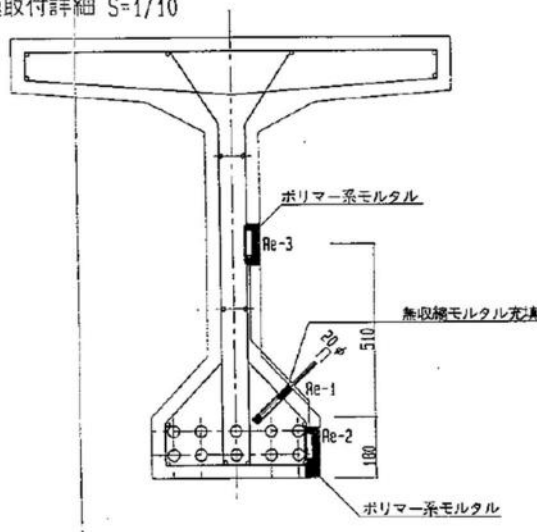


図-3.1.11 照合電極の埋設位置

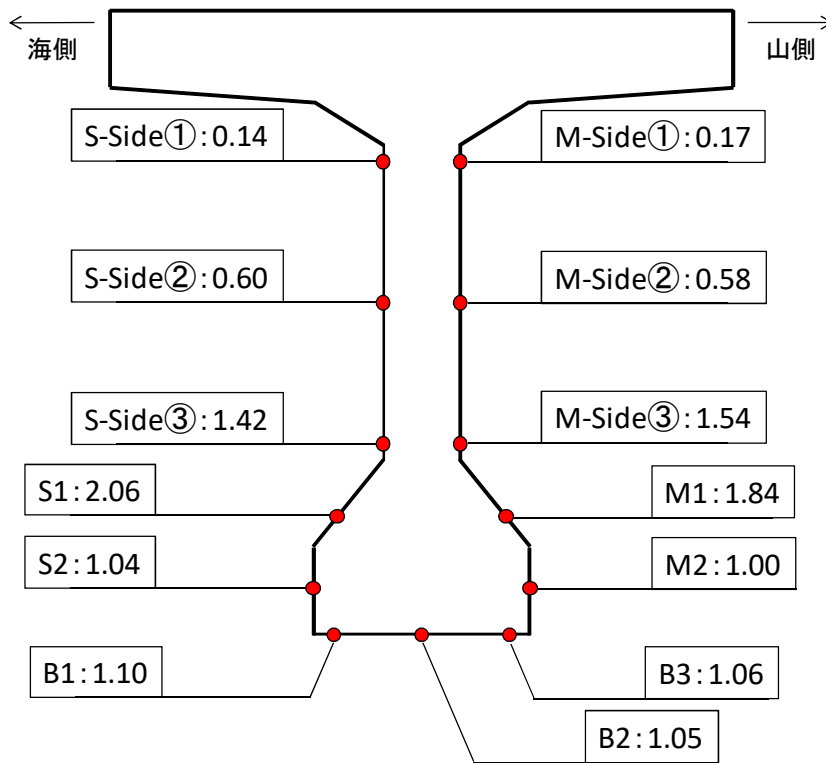


図-3.1.12 G3-3・A-Line における各分極量比

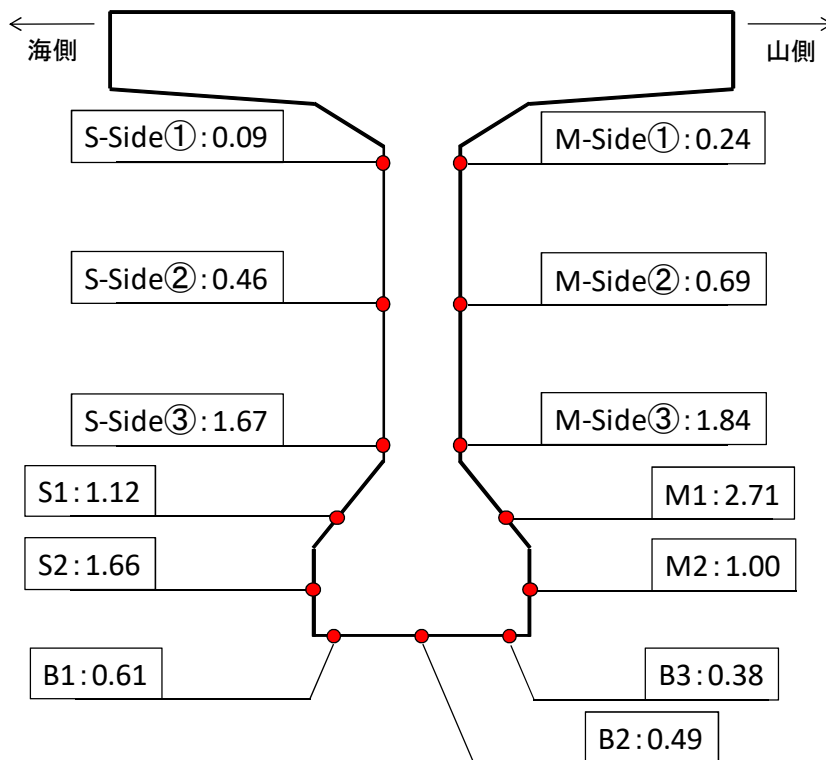


図-3.1.13 G3-3・B-Line における各分極量比

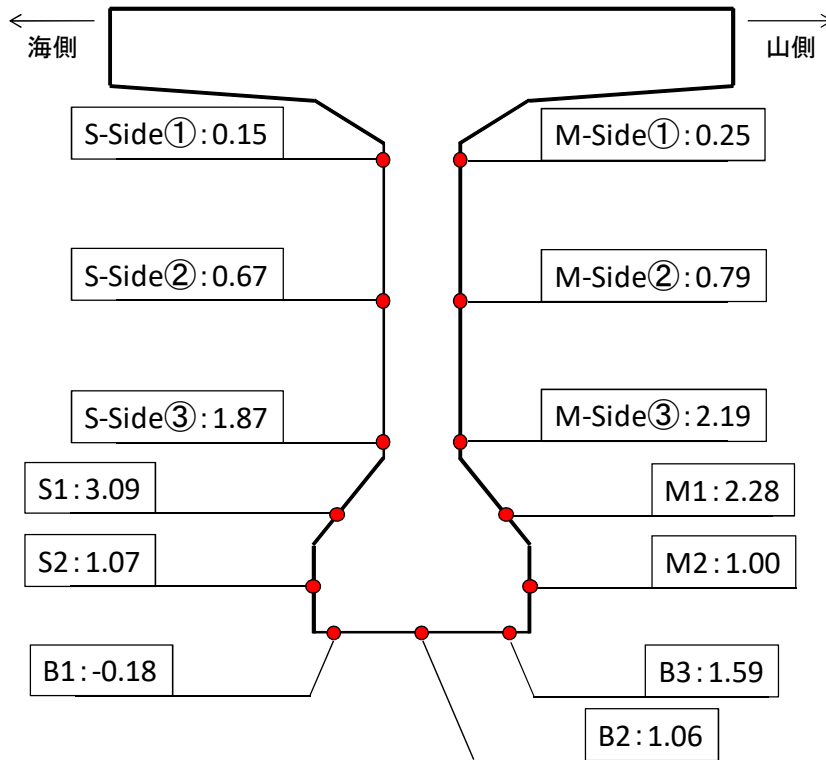


図-3.1.14 G5-3・A-Line における各分極量比

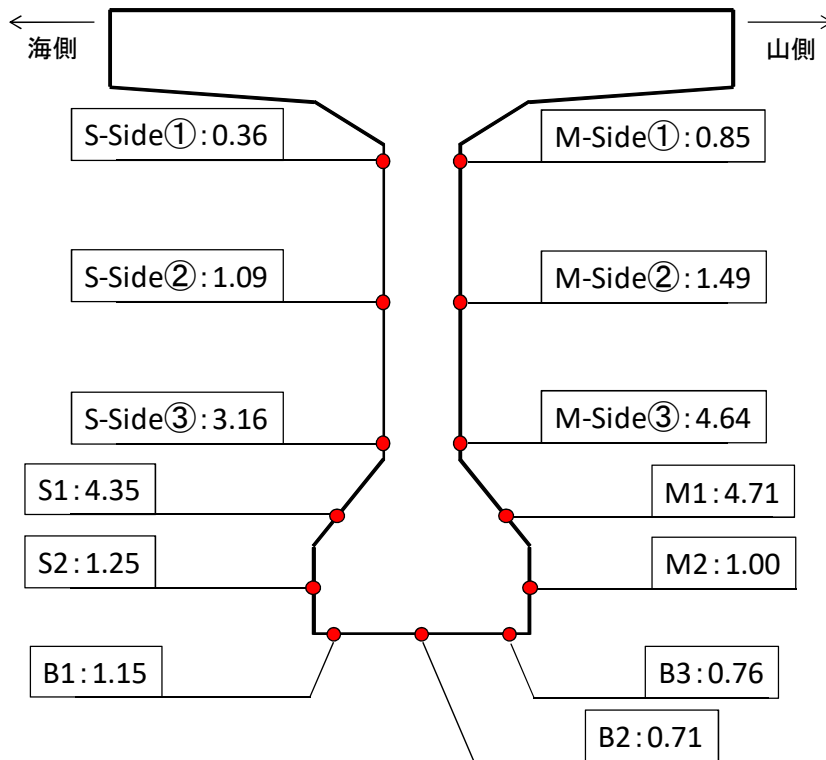


図-3.1.15 G5-3・B-Line における各分極量比

### 3.1.6 コンクリートの電気抵抗率

電気抵抗率の測定結果について G3-3 における測定結果を表-3.1.15 に、G5-3 における測定結果を表-3.1.16 にそれぞれ示す。断面修復材の電気抵抗率を測定したデータについてはセルを灰色で示した。なお、測定は A-Line と B-Line の各測定箇所において3回ずつ行い、それらの算術平均値を測定結果とした。

G3-3, G5-3 ともにウェブよりも下フランジにおける電気抵抗率の方がやや低くなる傾向が得られた。これは、保管中の雨水によるコンクリートの含水率の上昇によるもの、あるいは、シースなどの鋼材が測定値に影響を与えた可能性が考えられる。また今回の測定結果の範囲では、断面修復材と母材コンクリートの電気抵抗率には大きな差はないと判断される。

表-3.1.15 G3-3 における電気抵抗率

		電気抵抗率[kΩ・cm]		
		S	B	M
A-Line	1回目	62.4	73.5	89.1
	2回目	64.0	70.2	89.1
	3回目	62.5	73.8	88.1
	平均	63.0	72.5	88.8
B-Line	1回目	90.1	51.2	78.2
	2回目	80.0	49.8	74.9
	3回目	86.0	60.7	77.9
	平均	85.4	53.9	77.0

表-3.1.16 G5-3 における電気抵抗率

		電気抵抗率[kΩ・cm]		
		S	B	M
A-Line	1回目	82.0	59.0	86.2
	2回目	89.8	56.2	86.3
	3回目	90.5	62.9	91.2
	平均	87.4	59.4	87.9
B-Line	1回目	85.0	51.8	75.0
	2回目	84.3	48.4	74.9
	3回目	82.2	46.5	76.3
	平均	83.8	48.9	75.4

### 3.1.7 コンクリートの圧縮強度

反発硬度法により推定した圧縮強度は G3-3 では 34.3 N/mm<sup>2</sup>、G5-3 では 32.8 N/mm<sup>2</sup> であり、両者の間に大きな差は見られなかった。なお、既往の詳細調査結果（建設省 東北地方建設局 秋田工事事務所・財団法人 道路保全技術センター：平成 10 年度 荒磯橋他 24 橋調査設計業務 報告書）では、設計基準強度 40 N/mm<sup>2</sup> に対して、コア試料（φ10×18 cm）の圧縮極強度が 36.7 N/mm<sup>2</sup>（寸法の補正後強度）であることが報告されており、本検討の結果とほぼ同等であった。

## 3.2 詳細調査

### 3.2.1 既設埋設陽極を用いた通電試験

本項では、撤去されて土木研究所（つくば市）敷地内に移設された荒磯橋の G5 桁を対象として実施した通電試験の結果を示す。また、G3 桁の一部に対して通電した結果も必要に応じて、G5 桁の通電試験の結果との比較として示す。

通電試験の主な目的は、コンクリート中鋼材の分極量から防食電流の均一性を評価し、その結果から防食効果を判断することにある。ただし、表-3.2.1 に示すように、通電試験の種類は3種類に分類され、さらにそれぞれの通電試験によって想定される陽極システムの状態が異なる。通電対象の G5 桁は、図-3.2.1 に示すように、酒田側から4つのブロック（G5-1, G5-2, G5-3, G5-4）に分割されて移設されている。通電試験に際しては、それぞれのブロック間の鋼材やチタン・ワイヤーの導通を確保している。ただし、G5-2 のチタン・ワイヤーの結線不良箇所（前節の写真-3.1.5 に示した表-3.1.1 の No.23）については、導通を確保した状態、あるいは、特段の措置を施さずにそのままの状態（導通不良の状態）で通電試験を実施した。このような試験を実施したのは、G5-2 のチタン・ワイヤーの結線不良が防食機能に与える影響を調査するためである。

表-3.2.1 通電試験の種類と目的

記載位置	通電試験の種類	想定される陽極システムの状態
3.2.1 (1)	G5 桁全ブロックを接続した通電試験	陽極システムが設計通りに全て導通している状態。G5-2 のチタン・ワイヤーの結線不良箇所（前節の表-3.1.1 の No.23）もリード線で導通を確保した状態。
3.2.1 (2)	G5 桁および G3 桁のブロックごとの通電試験	陽極システムが設計通りに全て導通している状態
3.2.1 (3)	ディストリビュータ（チタン・ワイヤー）の結線状況の影響を考慮した通電試験	G5-2 のチタン・ワイヤーの結線不良箇所（前節の表-3.1.1 の No.23）に特段の措置を施さない状態。

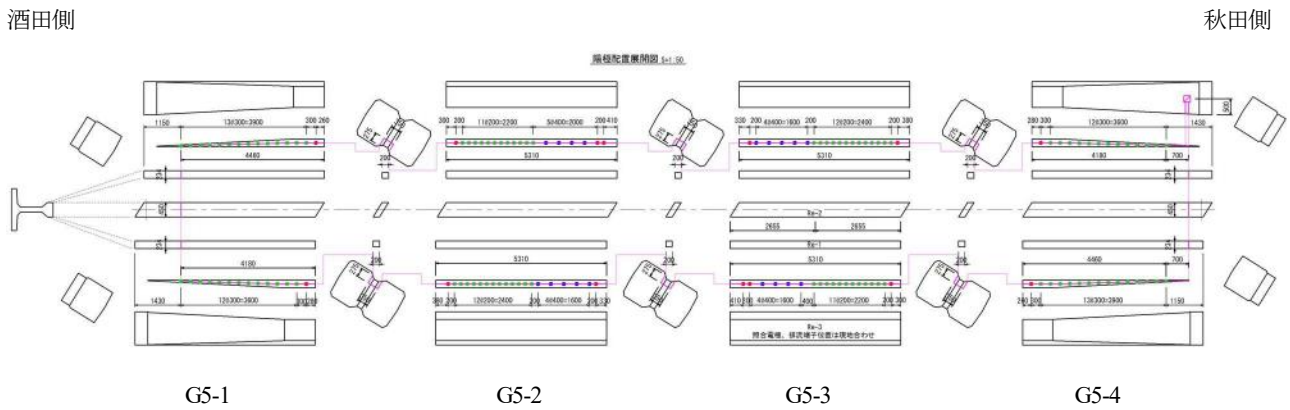


図-3.2.1 荒磯橋 G5 桁の展開図

(1) G5 桁全ブロックを接続した通電試験

本項では、陽極システムが設計通りに全て導通している状態を想定し、G5-2 のチタン・ワイヤーの結線不良箇所（前節の写真-3.1.5 に示した表-3.1.1 の No.23）もリード線で導通を確保した状態で通電試験を行った。この状態での通電は2回実施し、それぞれ2015年8月31日、2016年6月9日である。ここでは、通電試験の結果を時系列で整理して示し、その後に全体を通しての考察を示す。

1) 2015年8月31日実施分

①通電条件

全てのコンクリート中鋼材および陽極システムのそれぞれの導通を確認した後、通電量は、2005年1月26日時点でG5桁とG6桁からなる回路に通電されていた0.1Aの1/2である50mAとG5桁に分配電流が多かった可能性を考慮して75mAの2通りで通電を行った。なお通電時の気温は23.3～23.9℃で、湿度は81～86%RHであった。

各ブロック間での分配電流を表-3.2.2に示す。通電試験結果から、G5-1およびG5-4の電流分配が小さくなっているが、設置されている陽極数量も少ないため、大きなバランスの崩れではないと判断された。区間毎のコンクリート面積当たりの防食電流密度に換算すると、0.93～3.14mA/m<sup>2</sup>（50mA通電時）となる。なお、75mA通電時においても電流分配の傾向に大きな変化はなかった。

上記の結果から、チタン・ワイヤーが確実に結線されて導通が確保できている場合、チタン・ワイヤーの IR ドロップは電流分布に大きな影響は与えていなかったと判断された。その要因としては、各陽極に内蔵されている 510 Ω の固定抵抗と陽極のバックフィル材が適切に働いているためと考えられる。なお、50 mA 通電時の G5-1 山側の電流分配が 0 mA となっているが、G5-1 端部でチタン・ワイヤーがループしているため、G5-1 への電流分配はあるものとした。

表-3.2.2 通電時の分配電流

50 mA 通電時の分配電流の測定結果

通電電流 (mA)	陽極列	RF → G5-4 (mA)		G5-4 → G5-3 (mA)		G5-3 → G5-2 (mA)		G5-2 → G5-1 (mA)	
50	海側	25	合計	20	合計	13	合計	5	合計
	山側	24	49	20	40	14	27	0	5

50 mA 通電時の区間ごとの流入電流量

通電電流 (mA)	陽極列	G5-4 (mA)		G5-3 (mA)		G5-2 (mA)		G5-1 (mA)	
50	海側	5	合計	8	合計	8	合計	5	合計
	山側	4	9	14	22	14	22	0	5

75 mA 通電時の分配電流の測定結果

通電電流 (mA)	陽極列	RF → G5-4 (mA)		G5-4 → G5-3 (mA)		G5-3 → G5-2 (mA)		G5-2 → G5-1 (mA)	
75	海側	39	合計	34	合計	23	合計	3	合計
	山側	35	74	27	61	17	40	6	9

75 mA 通電時の流入電流量

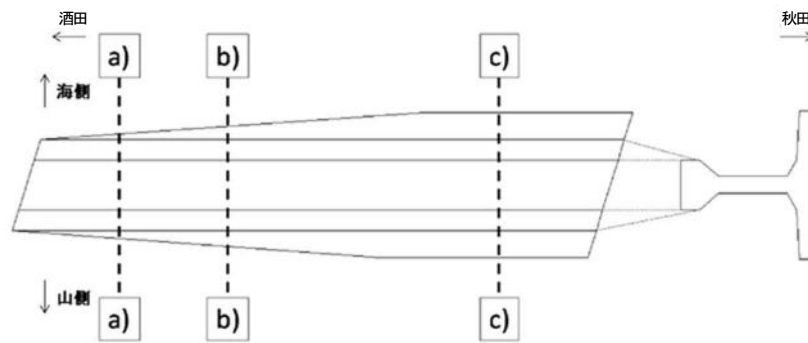
通電電流 (mA)	陽極列	G5-4 (mA)		G5-3 (mA)		G5-2 (mA)		G5-1 (mA)	
75	海側	5	合計	11	合計	20	合計	3	合計
	山側	8	13	10	21	11	31	6	9



## ②電位変化量（分極量）

防食対象範囲内（下フランジ）の電位変化量については、全体的な傾向として桁両側から陽極を設置している範囲では比較的分極量が多く、陽極が千鳥配置になっている範囲では分極量が少ない傾向が見られた。また、シースが下フランジに配置されている範囲では分極量が少ない傾向にある。さらに下フランジ角部では陽極が桁両側から配置されている部位でも一部分極量が少ない部分を確認された。

G5-1（支間端部）は変状図がないためG5-4（前節の図-3.1.10）を参考にすると、比較的劣化箇所が少ないブロックである。主な劣化は、幅0.1 mm以下のひび割れや部分的な浮きである。これらの劣化は主に下フランジ角部に位置している。図-3.2.2より、測定位置a)およびb)の防食対象範囲内では50 mA 通電で100 mV以上の電位変化量（分極量）が確認された。しかしながら、支間中央部に近づくると電位変化量は100 mVに達していない。すなわち、下フランジ部にシースが含まれてくると電位変化量が少なくなる傾向にある。本区間では、300 mm ピッチで桁両側から陽極が設置されている。桁端部のように下フランジ部では鉄筋量に対して陽極数量が十分であったが、支間中央に向かうに従って増加する鉄筋量に追従できていなかった可能性がある。設計照査上もこの区間は鋼材量に対して設計陽極数が不足していた部位である。



(変状図なし)

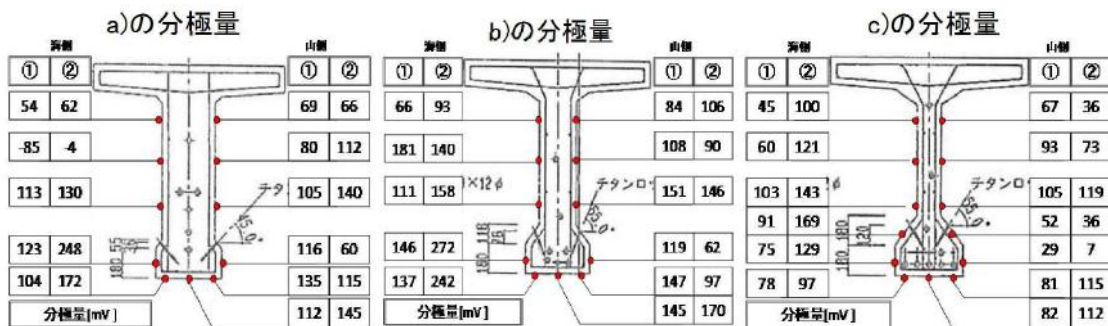


図-3.2.2 G5-1 電位変化量（①：50 mA 通電時，②：75 mA 通電時）

G5-2（支間中央部）では、支間中央部で下フランジ底面全面に浮きが生じている。また、下フランジ角部にも広範囲で浮きが生じている。図-3.2.3より、測定位置 a)~c)の防食対象範囲内では 50 mA 通電で 100 mV 以上の電位変化量（分極量）が得られなかった。測定位置 b)および c)は、400 mm ピッチで桁片側から千鳥配置で陽極が設置されている。測定位置 a)では 200 mm ピッチで桁両側から陽極が配置されている。測定位置 a)では 200 mm ピッチで陽極配置されているが下フランジにシースが集中している部位であることから電流分布が均一になり難かったと考えられる。また、測定位置 b)および c)ではシースがすべて下フランジ内に配置されるためコンクリート中の鋼材量は最も多くなり、陽極から供給される防食電流の殆どがシースに流入し、結果として最外縁部のスターラップの分極量が小さくなったと考えられる。

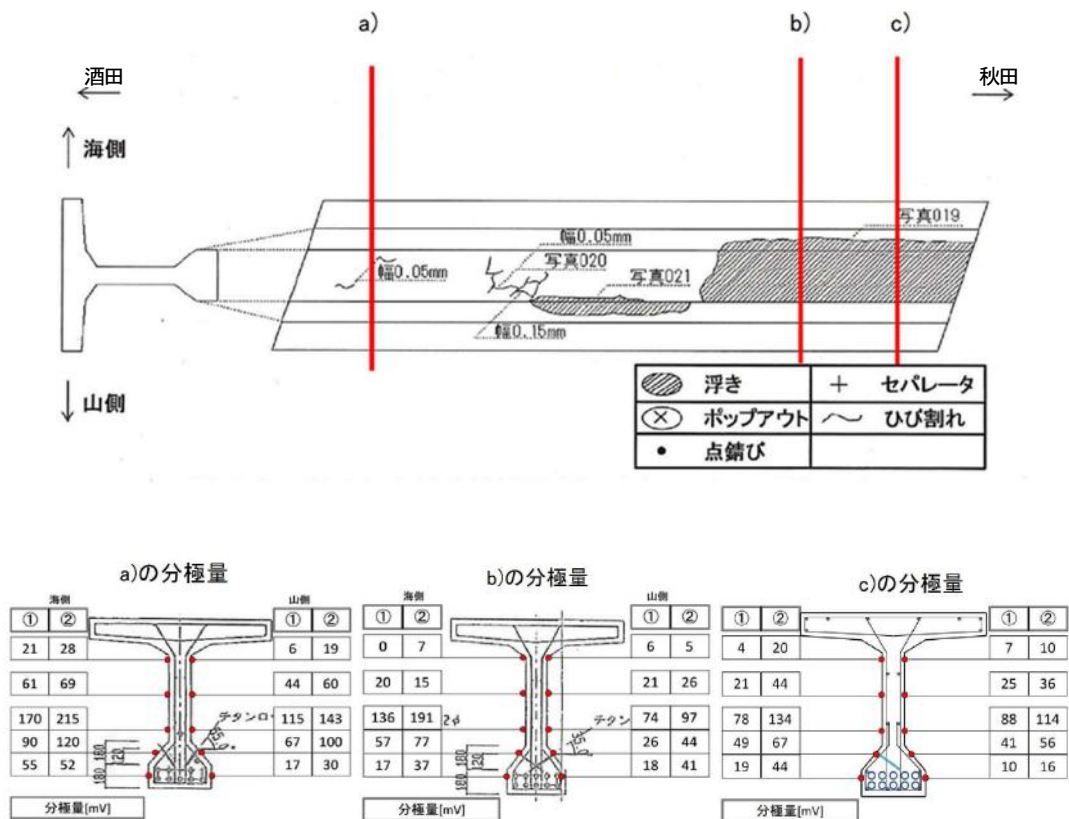


図-3.2.3 G5-2 電位変化量 (① : 50 mA 通電時, ② : 75 mA 通電時)

G5-3（支間中央部）では、支間中央部で下フランジ底面に浮きが生じている。また、下フランジ角部の浮きやひび割れが多数発生している。図-3.2.4より、測定位置 a)~c)の防食対象範囲内では 50 mA 通電で 100 mV 以上の電位変化量（分極量）が得られなかった。測定位置 a)および b)は、400 ピッチで桁片側から千鳥配置で陽極が設置されている。測定位置 c)では 200 mm ピッチで桁両側から陽極が配置されている。測定位置 a)および b)では下フランジ底面に広い範囲で浮きが確認されている。G5-3 では 200 mm ピッチで陽極が配置されている測定位置 c)においても桁の劣化が生じていることと電位変化量も 100 mV 未満であることが確認された。

G5-3 は埋設照合電極（二酸化マンガン照合電極 +95mV vs CSE, 報告書より）が設置されているブロックである。図-3.2.5 および表-3.2.3 と表-3.2.4 に示すように、埋設照合電極位置の通電試験結果では、ハンチ部から挿入された照合電極位置では 100mV 以上の分極量が確認できたが、下フランジ底面部では 40~53mV の分極量となった。埋設照合電極位置は、G5-3 測定位置 c)に近く、表面電位と同じ傾向であった。

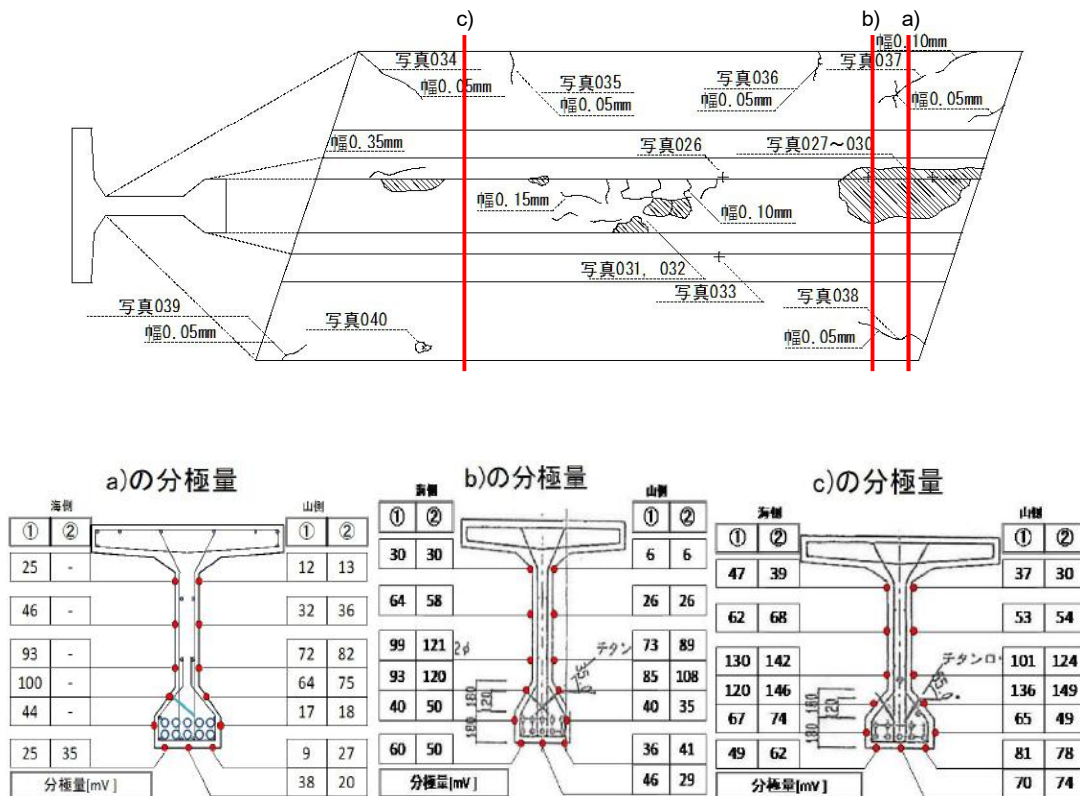
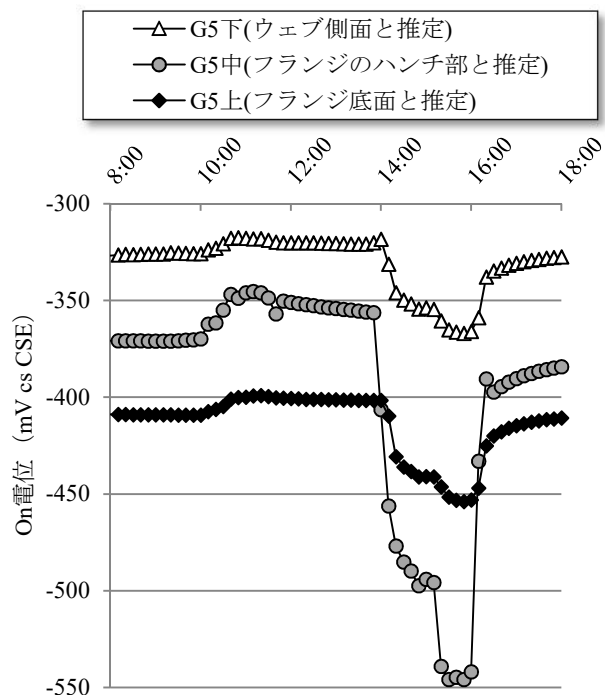


図-3.2.4 G5-3 電位変化量 (① : 50 mA 通電時, ② : 75 mA 通電時)



(おおよそ 14:00~15:00 の時間帯で 50 mA, 15:00~16:00 の時間帯で 75 mA の通電)

図-3.2.5 埋設照合電極の通電試験中の On 電位の推移

表-3.2.3 G5-3 埋設照合電極の On 電位 (通電量 50mA)

位置	自然電位 (mV)		On 電位 (mV)		分極量 (mV)
	MnO <sub>2</sub>	CSE	MnO <sub>2</sub>	CSE	
上 (下フランジ底面)	-401	-306	-441	-346	40
中 (ハンチ部から挿入)	-355	-260	-496	-401	141
下 (ウェブ)	-321	-226	-355	-260	34

表-3.2.4 G5-3 埋設照合電極の On 電位 (通電量 75mA)

位置	自然電位 (mV)		On 電位 (mV)		分極量 (mV)
	MnO <sub>2</sub>	CSE	MnO <sub>2</sub>	CSE	
上 (下フランジ底面)	-401	-306	-454	-359	53
中 (ハンチ部から挿入)	-355	-260	-546	-451	191
下 (ウェブ)	-321	-226	-367	-272	46

※注：データロガーで連続測定したデータを引用しているため、インスタントオフ電位は計測されていない。  
ただし、IR ドロップが小さかったため、自然電位と On 電位の差から分極量を評価した。

G5-4（支間端部）は比較的劣化箇所が少ない範囲である。主な劣化は、幅 0.1mm 以下のひび割れや部分的な浮きである。これらの劣化は主に下フランジ角部に位置している。図-3.2.6 より、比較的劣化の少ない測定位置 a)において防食対象範囲内で 100mV 以上の電位変化量（分極量）が得られていない。劣化が確認されている測定位置 b)および c)の防食対象範囲内では 50mA 通電で 100mV 以上（1 箇所のみ 97mV）の電位変化量（分極量）が得られた。G5-1 と同様に、桁の支間中央部に近い部位では十分な電位変化量が得られない傾向にある。逆に、シースが少ない支間端部では 100mV 以上の電位変化量が得られた。

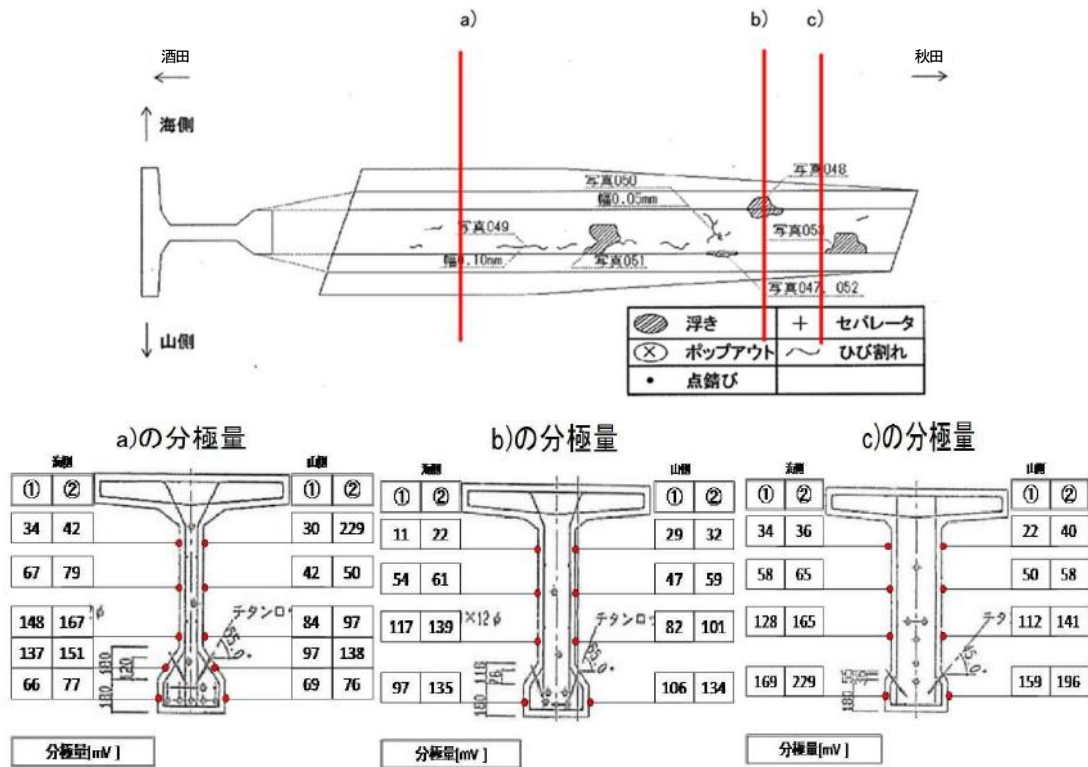


図-3.2.6 G5-4 電位変化量 (① : 50 mA 通電時, ② : 75 mA 通電時)

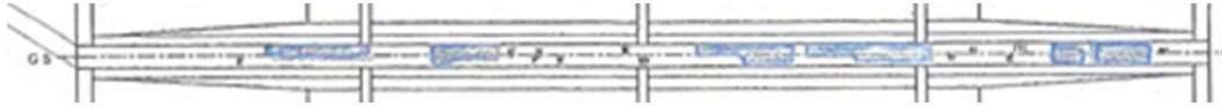
## 2) 2016年6月9日実施分

G5 桁の全てのブロックを接続し、かつ、チタン・ワイヤーの導通も全て確保した状態で、50 mA の電流（電源装置の電圧で 1.8 V）で通電した。その上で、下フランジの側面部に鉛照合電極を設置し、スターラップの自然電位、50 mA 通電時のオン電位、インスタントオフ電位を測定し、分極量を評価した。

結果を図-3.2.7 に示す。図-3.2.7 より、自然電位は桁端部側では貴側の傾向があるが、支間中央部に向かうにしたがって卑側になっていることがわかる。桁端部側の下フランジ内部のシースの量は比較的少なく、防食電流が十分供給されていたために、鋼材周囲の腐食環境が改善されたために、鋼材の自然電位が貴側になった可能性がある。また、断面修復状況と変状図を比較すると、断面修復部で劣化が顕著であるとは言い難い。特に G5-2 桁の支間中央側は断面修復が施されていないにもかかわらず、はく離・はく落の変状が確認できる。したがって、防食電流の不均一性の原因を断面修復材のみに帰着することはできず、陽極の配置なども考慮した考察が必要である。

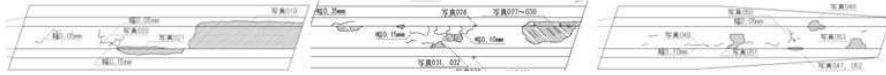
←酒田側 G5-1 G5-2 G5-3 G5-4 秋田側→

G5桁下フランジ部断面修復状況（施工記録より）



G5桁下フランジ変状図（撤去後の調査）

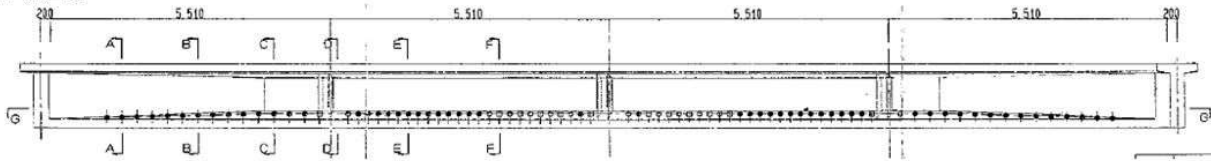
G5-1は  
変状図なし



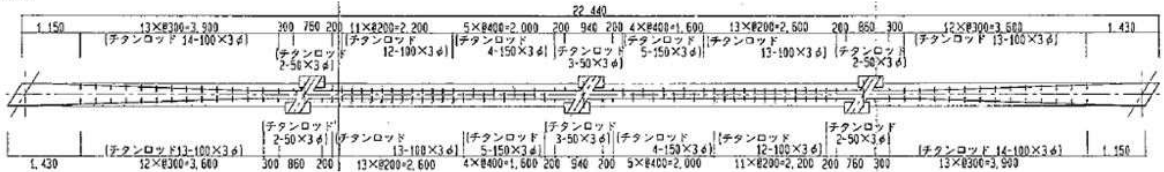
G5桁側面図（シース配置図）



陽極棒配置図



G-G断面図



断面図

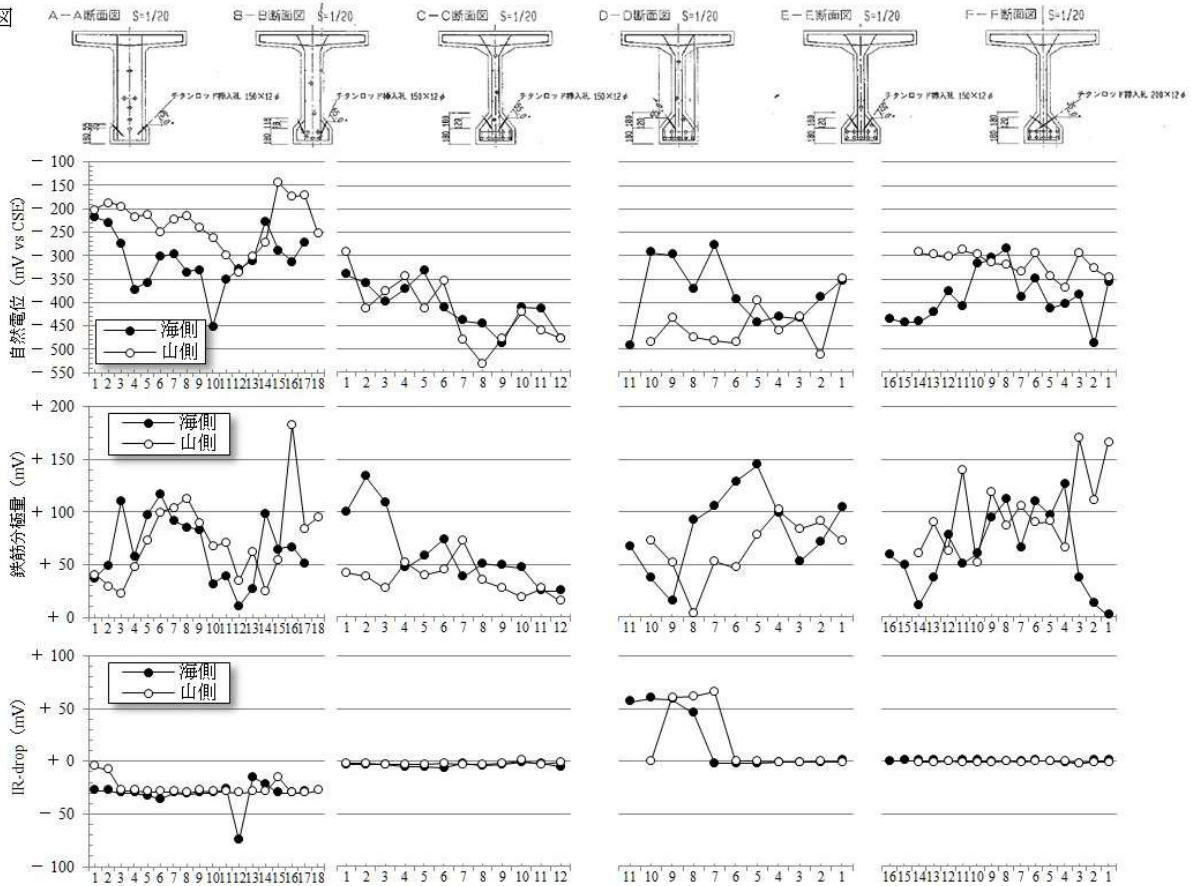


図-3.2.7 通電試験結果（2016年6月9日実施分，下フランジ側面部の自然電位，分極量，IR-drop）

(2) G5 桁および G3 桁のブロックごとの通電試験 (2016 年 6 月 9 日実施分)

G5-3 および G3-3 を単独で通電した時の桁最外縁部に位置するスターラップを貼付け型照合電極 (ハイドロゲルシートにシート状の銀塩化銀電極が貼付されたもの) および内部照合電極で測定したときの分極量分布を 図-3.2.8 と 図-3.2.9 に示す。通電電流は 5.0, 12.5, 50.0 mA (防食対象面積当たりの電流密度は 0.71, 1.79, 7.14 mA/m<sup>2</sup>) である。

図-3.2.8 と 図-3.2.9 より、内部照合電極の設置位置を考慮すると、分極量は外部の貼付け照合電極と同等の結果であった。また、内部照合電極で分極が確認されても、下フランジ底面部などには防食電流が届いていないことが確認できる。本測定では、外部照合電極として貼付け型照合電極を使用した。この電極の特徴は、電極とコンクリート表面との間にハイドロゲルが挿入される点であり、ハイドロゲルにより電極とコンクリート表面との間の接触抵抗が低減できるため、コンクリート表面に散水せずにコンクリート内部の電位を測定することが可能になる。本測定では、散水をすることが不要であったため、コンクリートの抵抗を乱すことなく電位を測定できた。その結果、以前よりも顕著に分極量の分布が明確になり、下フランジ底面およびウェブではほとんど分極せず、陽極が埋設されている下フランジハンチ部の分極量が大きくなったと考えられる。

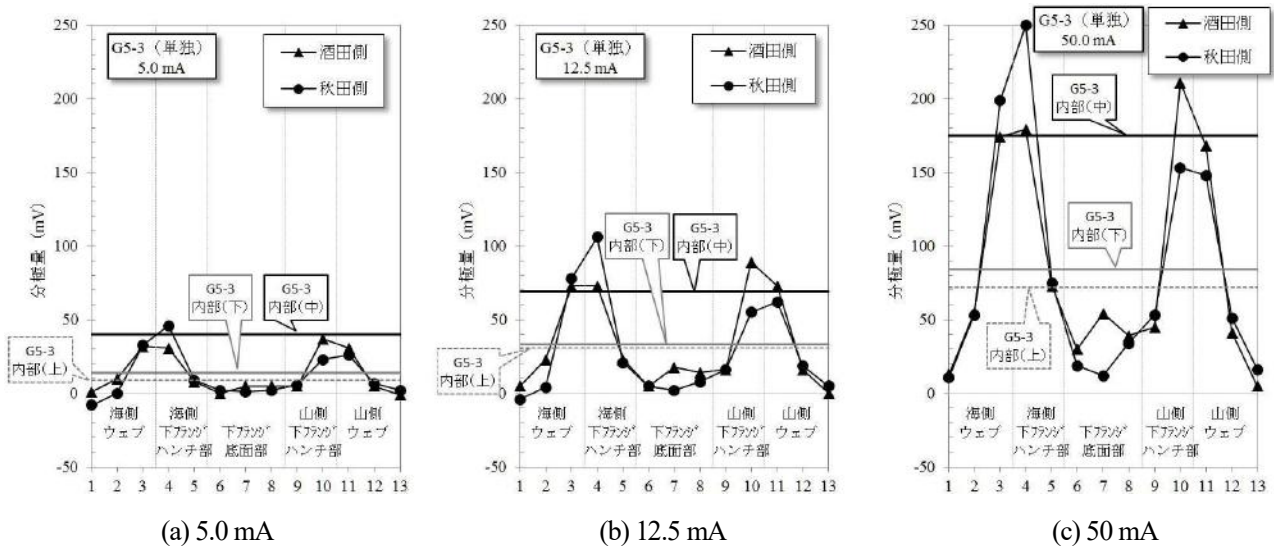


図-3.2.8 最外縁部のスターラップの分極量の分布 (G5-3 単独)

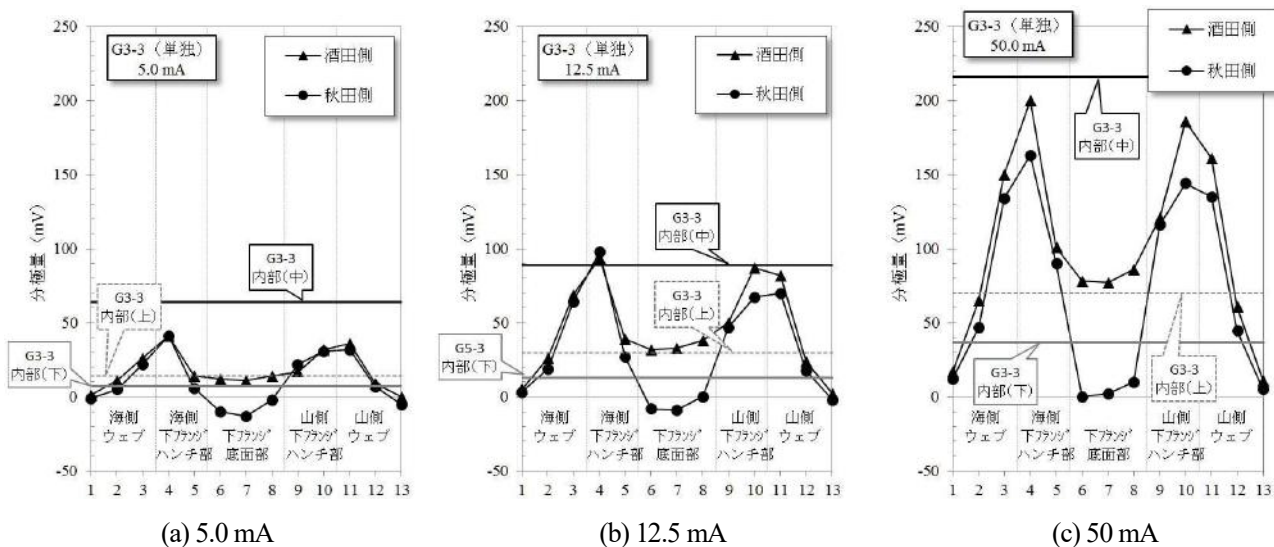


図-3.2.9 最外縁部のスターラップの分極量の分布 (G3-3 単独)

図-3.2.10 にこのときの  $E$ - $\log I$  試験結果を示す。測定に用いた照合電極は内部照合電極である。最大の電流密度は  $7.14 \text{ mA/m}^2$  (防食対象面積あたり) であり、このときの通電電流は  $50.0 \text{ mA}$ 、インスタントオフ電位は G5-3 と G3-3 でそれぞれ  $-452$ ,  $-513 \text{ mV vs CSE}$  である。水素発生電位に関する防食基準  $-1000 \text{ mV vs CSE}$  にはまだ余裕があり、電流の設定値を増加させることは可能であると考えられるが、図-3.2.8 と図-3.2.9 に示したように、下フランジ底面部がほとんど分極していなかったことを考えると、電流を増加させても下フランジ底面部の防食効果の確保は困難であったと予想される。

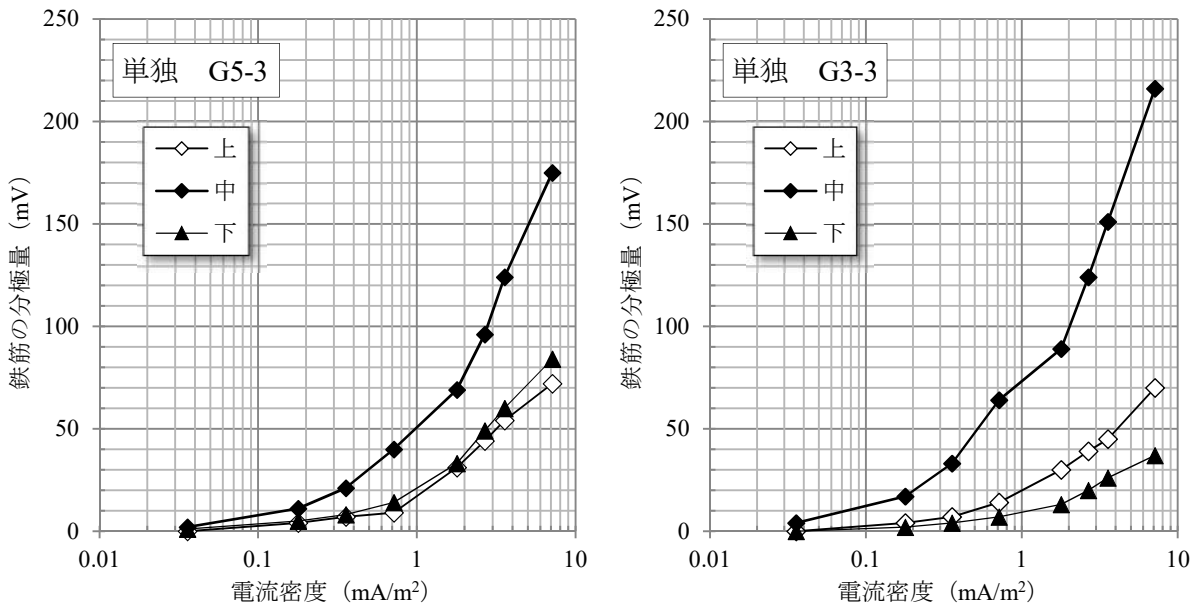


図-3.2.10  $E$ - $\log I$  試験結果 (内部照合電極により測定)



### (3) ディストリビュータ (チタン・ワイヤー) の結線状況の影響を考慮した通電試験

#### 1) 2016年6月9日実施分

図-3.2.11 にディストリビュータ (チタン・ワイヤー) の結線状況を示す。撤去後の通電試験時には隣合うブロック間の接続は、下フランジ底面から露出するディストリビュータにリード線付きワニ口クリップを取付けて結線することで確保される。実際の供用中には、ディストリビュータを横桁中に埋め込んで隣り合うブロックの陽極を結線していた。ディストリビュータは G5-1 の桁端部でループし、G5-4 の桁端部でプルボックス (図-3.2.11 には PB と標記される) を経由して電源装置へ接続される。

調査の結果、図-3.2.11 に示すように、G5-1 海側、G5-2 海側に 1 箇所ずつ、圧着端子で接続されている箇所を確認された (それぞれ圧着端子 1、圧着端子 2)。さらに、これらの部位は圧着端子 2 から発生した緑青 (銅の酸化物) によると思われる変色が確認された。圧着端子 2 の両端に電圧計を接続し、導通を確認したところ、導通が無いことが確認された (前節の写真-3.1.5 参照)。このため、圧着端子 2 から G5-1 側の海側の陽極は、図-3.2.11 中の陽極 A との導通がないことが確認された。なお、全ての通電試験を実施した後、圧着端子 2 の付近をハツリ取った状況を写真-3.2.1 に示す。

この事実から、G5-2 の下フランジ底面の秋田側で劣化が顕著であったのは、圧着端子 2 の接続が不良による可能性が考えられた。即ち、圧着端子 2 が断線していたと仮定すると、図-3.2.11 中の A 系統と B 系統から電流が供給される。このとき、B 系統の終点の電圧降下 (IR ドロップ) が最も大きくなるため、コンクリート中鋼材への防食電流の供給がない、あるいは、極めて小さかった可能性がある。

また、G5-2・山側・下フランジハンチ部にある陽極 No.18 と陽極 No.19 間 (圧着端子 2 と対面側) の導通が不安定であった。この導通不良は、供用中、撤去から運搬中、撤去後調査中にいずれで生じたのかは不明確であった。

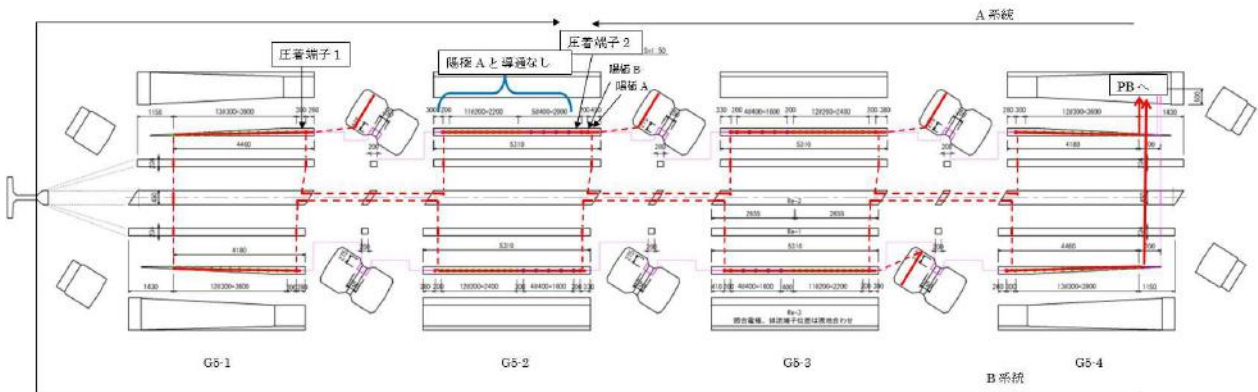


図-3.2.11 ディストリビュータ (チタン・ワイヤー) の結線状況



写真-3.2.1 圧着端子 2 (G5-2 桁) 付近のハツリ状況 (左 : ハツリ後, 右 : ハツリ前)

そこで、G5 桁を全ブロック接続して、次のような通電試験を計画した。電流 20 mA による通電においては、次のような結線条件で通電を実施する。その後、全ての導通を確保して電流 50 mA で通電を実施する。

- ✓ G5-1～G5-4 を接続する際、実際の導通状況を再現する。すなわち、陽極の導通の確保は桁の切断面から露出するチタンを接続することのみによる。
- ✓ G5-2・海側・下フランジハンチ部にある「圧着端子 2」を跨いだ導通は確保しない。
- ✓ G5-1・海側・下フランジハンチ部にある「圧着端子 1」については、現地で隣り合う陽極間の導通チェックを実施する。結果として導通を確認したので、特に処置をせずに通電を実施する。
- ✓ G5-2・山側・下フランジハンチ部にある陽極 No.18 と陽極 No.19 間の導通は確保しない。
- ✓ 他の陽極については、陽極の位置を調査する際に導通を切ってしまった陽極が存在する可能性があるため、それについては別途、導通を確保する。結果としてすべての導通を確認したため、特に処置はしない。

図-3.2.12 に通電時の各ブロックへの供給電流量と IR ドロップの測定結果を示す。圧着端子 2 とその対面のディストリビュータ・陽極結線不良部の導通を確保しない状態で通電（電流 20 mA まで）した結果をみると、G5-2 の測定箇所 No.5 と No.4（山側）あるいは No.13 と No.12（海側）で IR ドロップが大きく変化しており、この部分でディストリビュータが断線していることがわかる。この状態で桁最外縁部のスターラップの分極量分布の測定結果を図-3.2.13(a)と図-3.2.14(a)に示す。これらの図より、G5-1 と G5-2 は全ての部位において鉄筋が分極していないことがわかる。一方、図-3.2.12 で圧着端子 2 とその対面のディストリビュータ・陽極結線不良部の導通を確保した状態で通電（電流 50 mA）した結果をみると、G5-2 の測定箇所 No.5 と No.4（山側）あるいは No.13 と No.12（海側）の陽極の IR ドロップはほぼ等しくなった。この状態で桁最外縁部のスターラップの分極量分布の測定結果を図-3.2.13(b)と図-3.2.14(b)に示す。これらの図より、同図の(a)とは異なり、G5-1 と G5-2 は G5-3 と G5-4 と同等の分極量分布となっていることがわかる。このことより、ディストリビュータの断線が防食電流の供給に影響を及ぼしていた可能性がある。

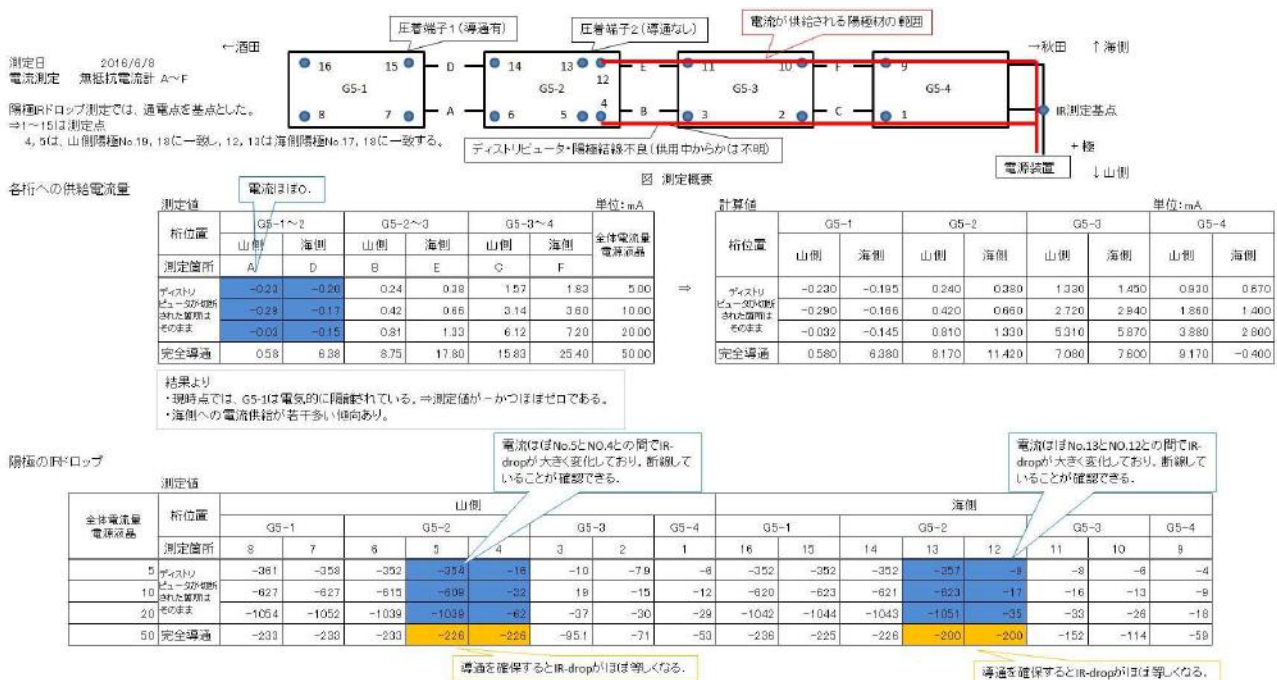
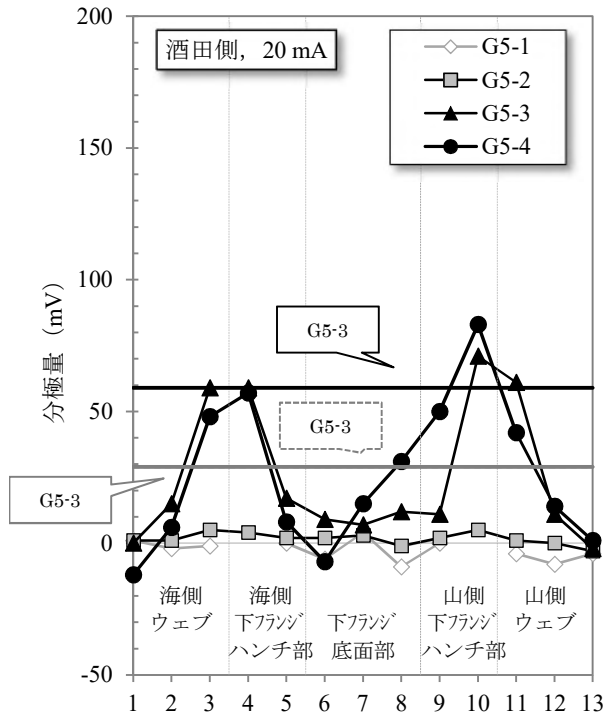
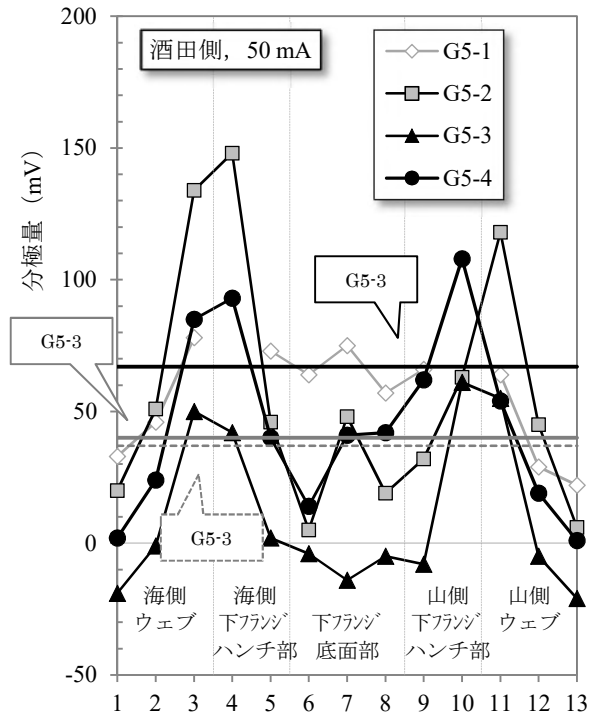


図-3.2.12 通電時の各ブロックへの供給電流量と IR ドロップ [単位 : mV]

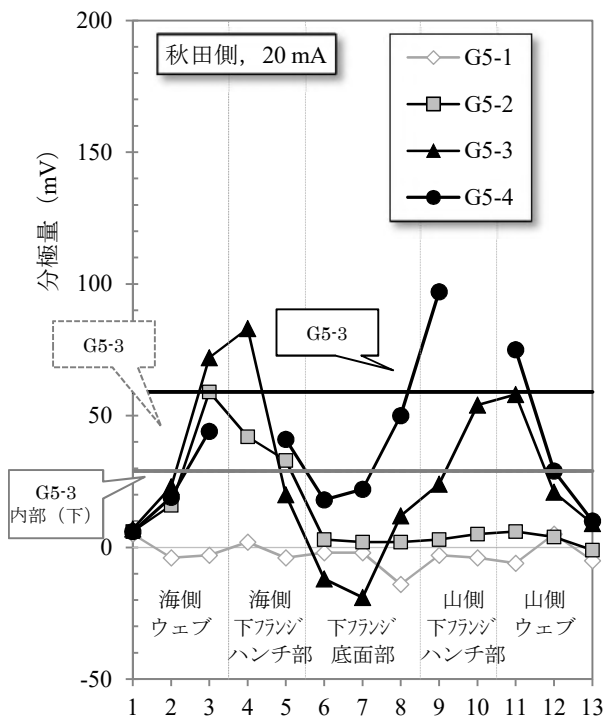


(a) 電流 20 mA (断線部有り)

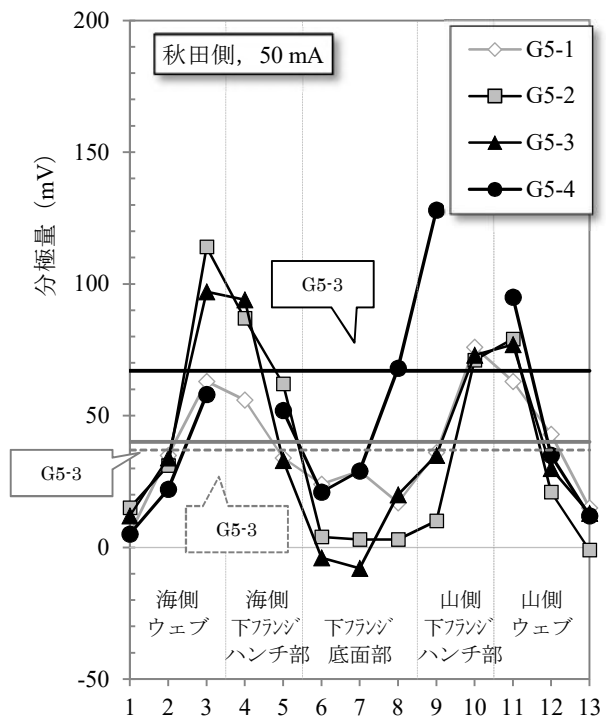


(b) 電流 50 mA (断線部無し, 完全導通)

図-3.2.13 各ブロックの分極量 (酒田側)



(a) 電流 20 mA (断線部有り)



(b) 電流 50 mA (断線部無し, 完全導通)

図-3.2.14 各ブロックの分極量 (秋田側)

## 2) 2017年4月27日実施分

### ①橋軸方向のスターラップの電位変化量

G5桁の全てのブロックを接続した状態で、50 mAの電流（電源装置の電圧で1.8 V）で通電した。その際、ディストリビュータを結線していた圧着端子1と圧着端子2の接続状況を次のようにした。

結線状況Ⅰ：圧着端子1，圧着端子2ともに切断して導通させない。

結線状況Ⅱ：圧着端子1のみ結線して導通させ、圧着端子2は切断して導通させない。

結線状況Ⅲ：圧着端子1，圧着端子2ともに結線して導通を確保する。

その上で、下フランジの側面部に鉛照合電極を設置し、スターラップの自然電位と50 mA通電時のインスタントオフ電位を測定し、分極量を評価した。なお、自然電位は前日の4月26日に測定したものであり、厳密な分極量を評価することはできなかったため、電位変化量として結果を示す。

結果を図-3.2.15に示す。図-3.2.15より、結線状況Ⅰのとき、G5-2の海側で電位変化量が小さくなっていることが確認できる。後述するが、圧着端子1および圧着端子2が断線しているために、防食電流がG5-2の海側の陽極に供給されていないことが原因である。さらに、このとき、G5-2の山側のスターラップの電位変化量も小さい。G5-2の海側の陽極に防食電流が供給されなかったことで、山側の陽極から海側の鋼材に防食電流が供給された分だけ、電位変化量が減少したものと考えられる。

結線状況Ⅱと結線状況Ⅲのときは、G5-2の海側の陽極への防食電流が供給されるようになったため、スターラップの電位変化量も大きくなった。しかし、若干であるが、G5-2の海側のスターラップの電位変化量は結線状況Ⅱの方が全体的に結線状況Ⅲよりも低くなる傾向があった。これは、結線状況Ⅱの場合、圧着端子2が断線しているために、ディストリビュータのIRドロップがG5-2の海側で最も大きくなり、結果として鋼材への防食電流の供給量が少なくなったためと考えられる。

### ②分極量

①と同様に、G5桁の全てのブロックを接続した状態で、50 mAの電流（電源装置の電圧で1.8 V）で通電した。その際、ディストリビュータを結線していた圧着端子1と圧着端子2の接続状況を次のようにした。

結線状況Ⅰ：圧着端子1，圧着端子2ともに切断して導通させない。

結線状況Ⅱ：圧着端子1のみ結線して導通させ、圧着端子2は切断して導通させない。

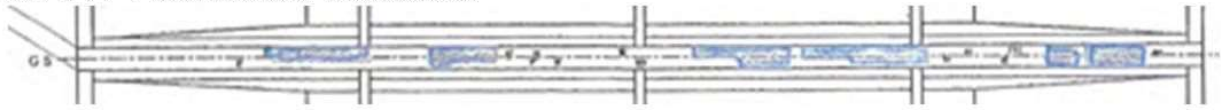
結線状況Ⅲ：圧着端子1，圧着端子2ともに結線して導通を確保する。

その上で、図-3.2.16に示す位置でスターラップの分極量を貼付け型照合電極（ハイドロゲルシートにシート状の銀塩化銀電極が貼付されたもの）で測定した。併せて、内部照合電極でも分極量（図-3.2.17）を測定した。

図-3.2.16より、結線状況Ⅰのとき、G5-2においてスターラップの分極量分布が結線状況ⅡやⅢの時と比較して低くなっていることがわかる。これは、前述したように、圧着端子の断線処理の影響である。また、全体的な傾向として、防食対象の部分の分極量分布に着目すると、下フランジ底面の分極量が低く、また、支間中央部になるほどその傾向が強くなるのがわかる。支間中央ほど下フランジに配置されるシースが多くなり、最外縁部のスターラップまで防食電流が届かなくなることが理解できる。一方で、陽極に近い下フランジ側面やハンチ部のスターラップの分極量は下フランジ部より明らかに大きくなっている。この傾向から、下フランジ上段のシースには防食電流は供給されているが、下段のシースには防食電流が十分に供給されていなかった可能性がある。

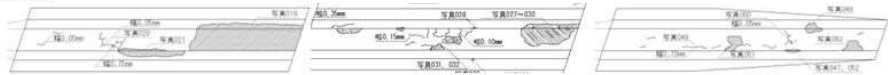
内部照合電極（G5-3の内部に設置）で測定したときの分極量（図-3.2.17）に着目すると、中部に設置（下フランジのハンチ部から挿入して設置）された照合電極で測定した分極量は、結線状況によって分極量の変動が認められたが、100 mVシフトを満足していた。このため、仮に、供用期間中にG5-1またはG5-2に存在した圧着端子が断線したとしても、そのことをモニタリング結果から検知することは困難であったと考えられる。

←酒田側 G5-1 G5-2 G5-3 G5-4 秋田側→  
G5桁下フランジ部断面修復状況（施工記録より）

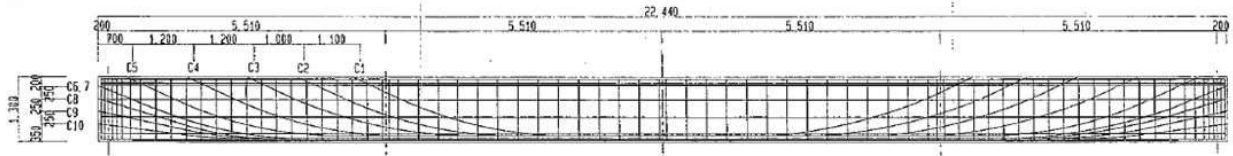


G5桁下フランジ変状図（撤去後の調査）

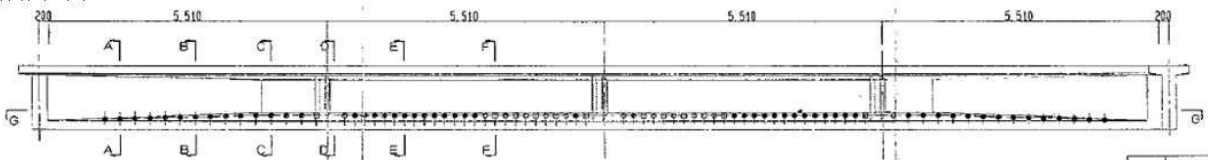
G5-1は  
変状図なし



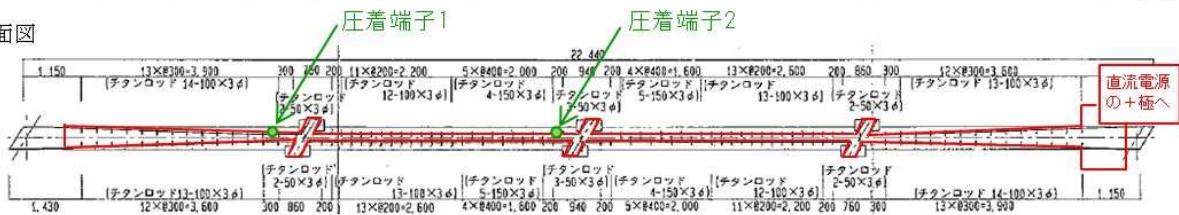
G5桁側面図（シース配置図）



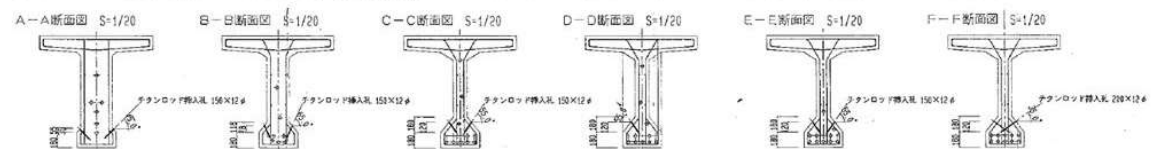
陽極棒配置図



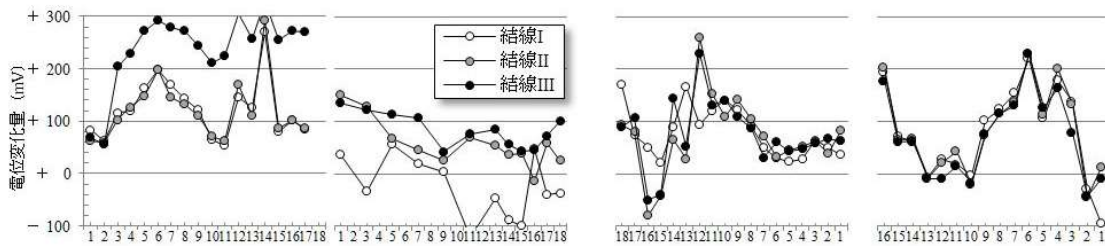
G-G断面図



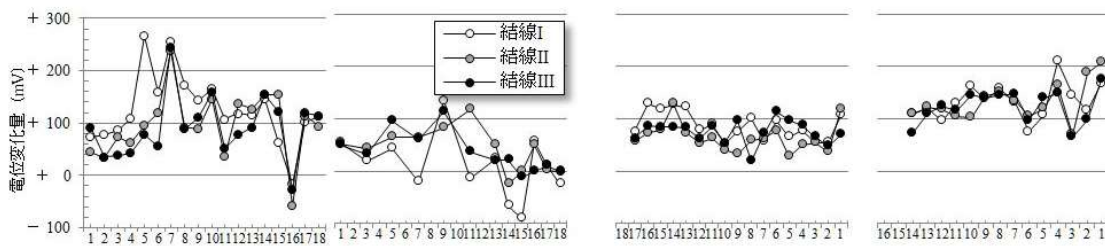
断面図



海側



山側



※結線の定義

結線I：圧着端子1、2ともに導通なし。結線II：圧着端子1は結線、圧着端子2は導通なし。結線III：圧着端子1、2ともに結線。

図-3.2.15 通電試験結果（2017年4月27日実施分、電位変化量）

←酒田側 G5-1 G5-2 G5-3 G5-4 秋田側→

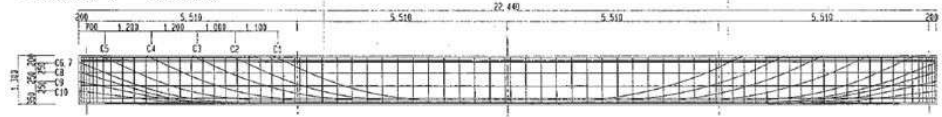
G5桁下フランジ部断面修復状況 (施工記録より)



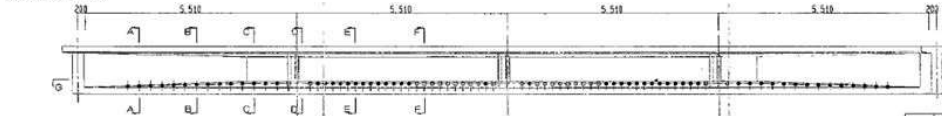
G5桁下フランジ変状図 (撤去後の調査)

G5-1は  
変状図なし

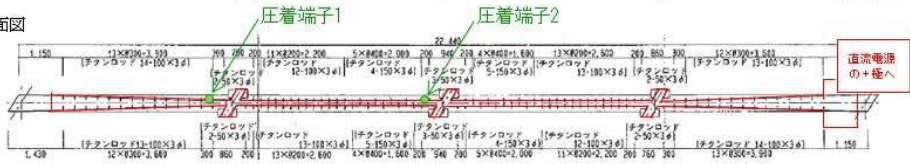
G5桁側面図 (シーブ配置図)



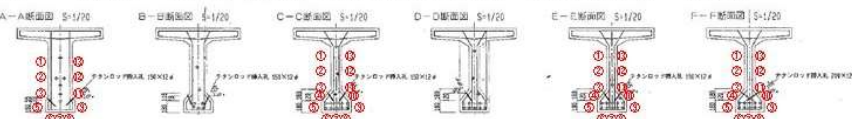
陽極棒配置図



G-G断面図

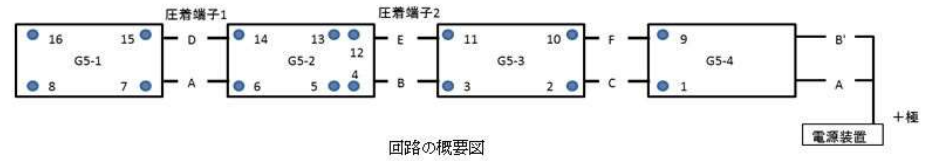


断面図



図内の○数字は分極量の測定位置

桁間の電流量の評価結果



桁の各ブロックに供給される電流 (mA)

桁位置	G5-1			G5-2			G5-3			G5-4		
	山側 A	海側 D	トータル	山側 B	海側 E	トータル	山側 C	海側 F	トータル	山側 A'	海側 B'	トータル
結線状況 I	8	0	8	12	0	13	6	11	16	6	4	10
結線状況 II	16	-10	6	9	10	19	5	10	14	5	4	8
結線状況 III	1	5	7	8	13	21	5	8	12	5	4	8

<通電結果>

(1) 結線状況 I

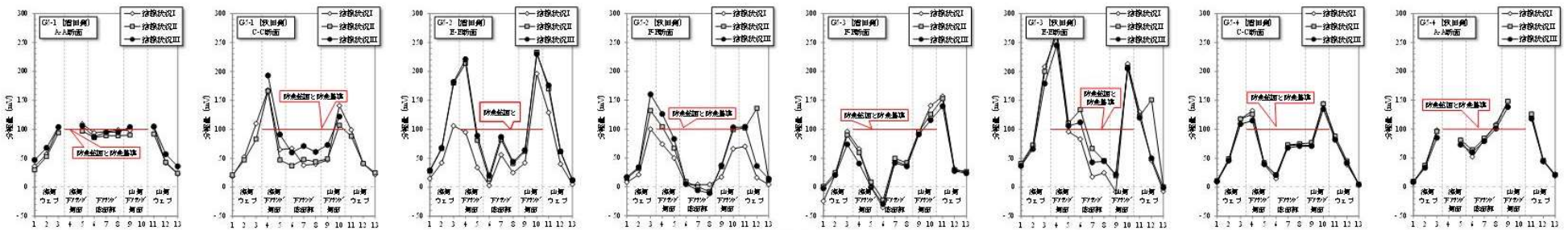
G5-1海側は、山側から海側端子1手前まで供給されている可能性はある。G5-2海側は電流供給なしと判断できる。

(2) 結線状況 II

G5-1からG5-2に向けて一方向の電流(つまり、G5-1からG5-2へ供給)が確認される。図中13までは、電流が回り込んでいると推測できる。

(3) 結線状況 III

全体に電流が供給されている。G5-2に全体の4割程度の電流が供給されている。最も腐食が著しい桁がG5-2であり、防食に必要な電流が集中している可能性がある。一方、外観上健全であるG5-1と4は、同程度の電流量であり、他と比較すると電流量も小さい。



50 mA通電時の分極量(測定位置は断面図を参照)

※結線の定義

結線状況I: 圧着端子1, 2ともに導通なし。結線状況II: 圧着端子1は結線, 圧着端子2は導通なし。結線状況III: 圧着端子1, 2ともに結線。

いずれの結線状況も、電源装置から50 mAの電流を通電した。

図-3.2.16 通電試験結果 (2017年4月27日実施分, 分極量)

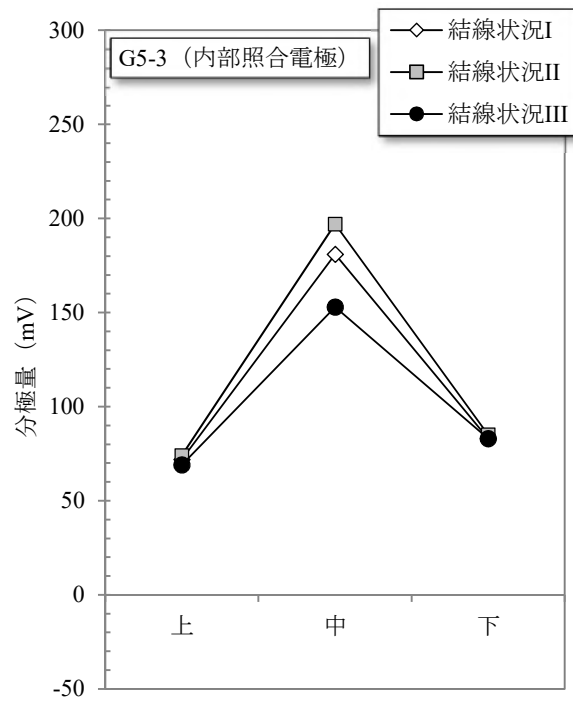


図-5.2.17 内部照合電極で測定した分極量

### 3.2.2 陽極の消耗度

3.2.1(3)で示したように、ディストリビュータの結線不良によって特に G5-2 で防食電流が供給できていない可能性が示唆された。そこで、本項では、陽極システムのチタン・ワイヤーを導通させて通電試験した時の陽極の電位変化の測定結果を示す。通電時期は2016年4月15日～同16日である。測定はまず、コンクリート中鋼材、陽極材（チタン・ワイヤー）の導通をそれぞれ確保した後、鉛照合電極を測定対象の陽極のすぐ傍の下フランジのハンチ部に設置して電位を測定した。通電に先立ち、陽極の自然電位を測定した。その後、G5桁のブロック毎に1ブロックあたり12.5 mAの電流を1時間程度通電し、陽極のオン電位とインスタントオフ電位を測定した。

図-3.2.18～図-3.2.20に、陽極の自然電位 $E_0$ 、12.5 mA/ブロックで通電時の陽極のオン電位 $E_{on}$ および陽極インスタントオフ電位 $E_{io}$ 、陽極の分極量 $(=E_{io}-E_0)$ 、12.5 mA/ブロックで通電時のIR-drop $(=E_{on}-E_{io})$ の測定結果を示す。なお、陽極の番号が小さいほど、桁端部側に陽極が位置していることを示している。

図-3.2.18～図-3.2.20を概観すると、同一ブロック内の陽極電位は、測定結果のばらつきが大きく、特異な傾向を示す陽極を検出することはできなかった。一方で、測定項目ごとに次のような特徴が確認された。

- ✓ 陽極の自然電位（図-3.2.18）は、変状が激しいG5-2において比較的卑側の値が測定された。
- ✓ 陽極の分極量（図-3.2.19）は、変状が激しいG5-2、変状が比較的多いG5-3においてアノード分極しにくい傾向が確認された。なお、G5-1およびG5-4は陽極量が少なくなるため、陽極1本当たりから流出する防食電流が大きくなり、分極量も大きくなったと考えられる。しかし、それを差し引いても、変状が確認されるG5-2はアノード分極しにくい傾向にあると判断される。
- ✓ G5-2とG5-3では陽極のIR-drop（ $E_{on}$ と $E_{io}$ の差から算出）が小さい傾向にある。

防食電流を多く供給した陽極はアノード反応によってバックフィル材のpHを低下させる。そのため、そのような陽極は自然電位が貴化する傾向がある。また、バックフィル材も消耗し、IR-dropが大きくなる傾向がある。言い換えれば、防食電流の供給量が少なかった陽極の自然電位は相対的に卑側になり、IR-dropも小さくなる。この点を考慮したうえで今回の測定結果を評価すると、G5-2とG5-3（特にG5-2）では陽極材の消耗度が低いと推測される。ただし、IR-dropの測定結果は、コンクリートの含水率の多寡やひび割れの有無に伴って変化するコンクリートの電気抵抗率にも影響を受ける。従って、今回の現象が陽極システムの消耗によるものか、コンクリートに起因するものかについては、直接、バックフィル材のpHを測定して検証する必要がある。

そこで、G5桁の複数個所からバックフィル材を採取し、バックフィル材のpHを評価した。評価は、pH紙に純水を吹き付けた後、直ちに採取したバックフィル材に接触させ、そのときのpH紙の変色状況を確認することで行った。結果を写真-3.2.2と写真-3.2.3に示す。写真-3.2.2より、G5-2のpH紙が青色に変色しておりアルカリ性であることが確認できる。さらに、写真-3.2.3より、G5-2はpH10程度、G5-3はpH4程度であることが確認できる。この結果より、G5-2ではバックフィル材が消耗していないことが確認され、G5-2には供用期間を通じての積算電流量が他のブロックと比較して少ないことが確認された。従って、G5-2で変状がより顕著に生じたのは、陽極への防食電流の供給量が少なかったためであることが裏付けられた。



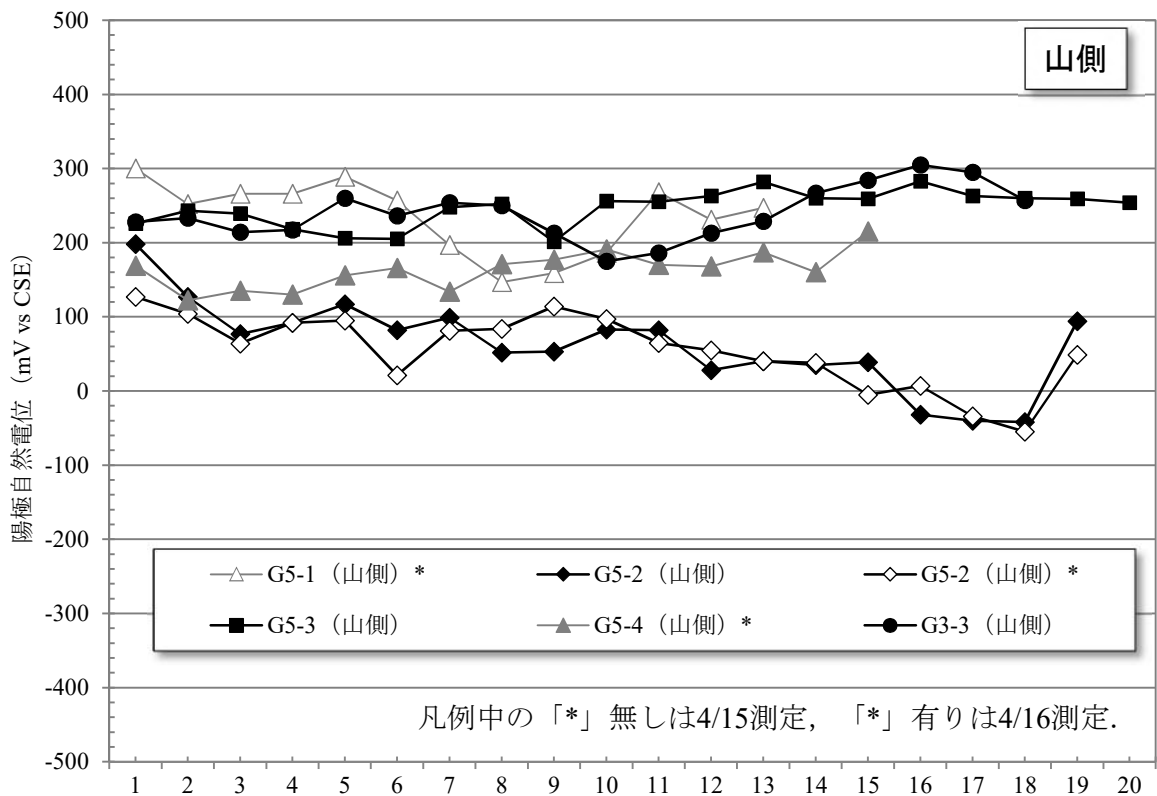
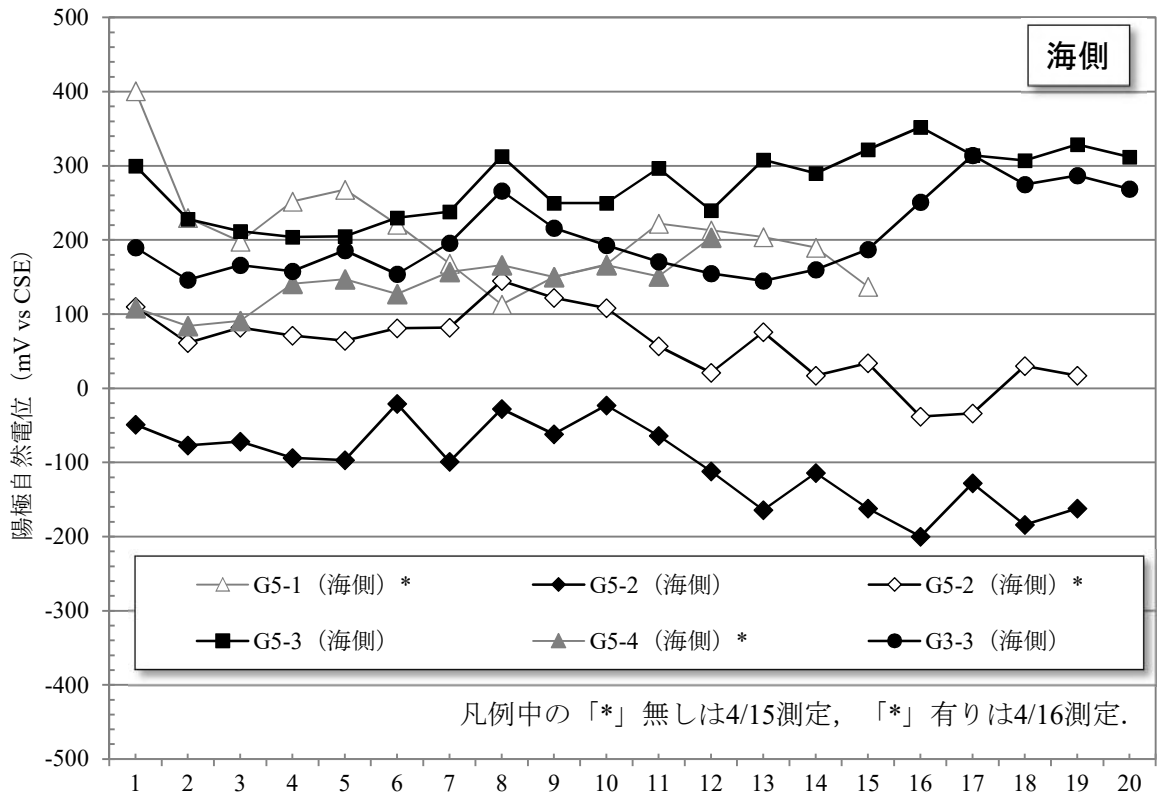


図-3.2.18 陽極の自然電位 (番号が若いほど、桁端部側。つまり、下フランジ部のPC鋼材量が少ない。)

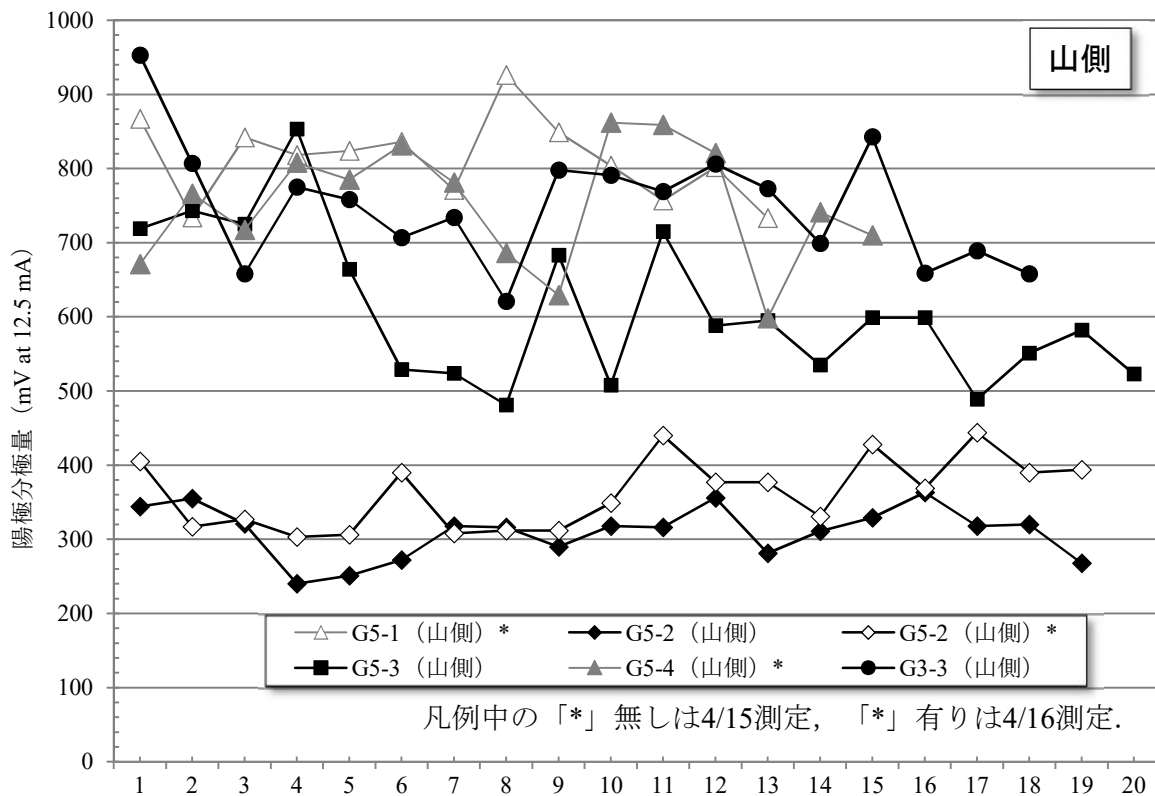
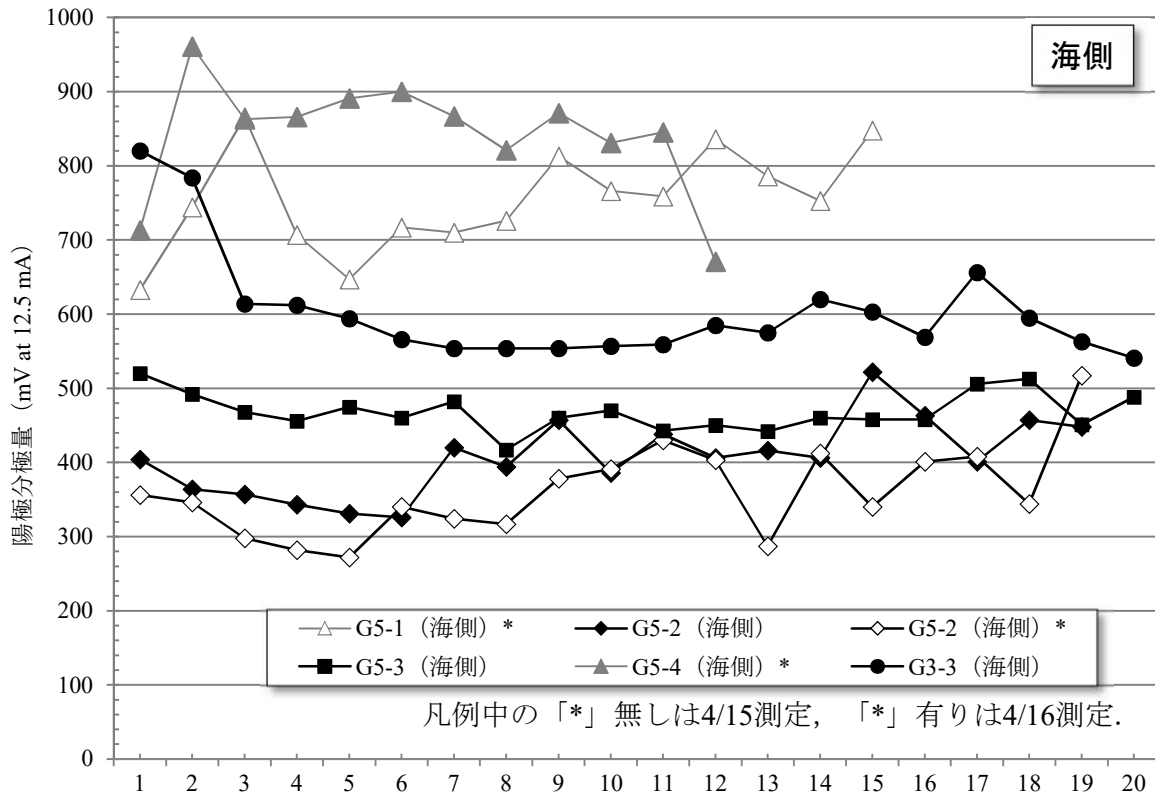


図-3.2.19 陽極の分極量 (番号が若いほど、桁端部側。つまり、下フランジ部のPC鋼材量が少ない。)

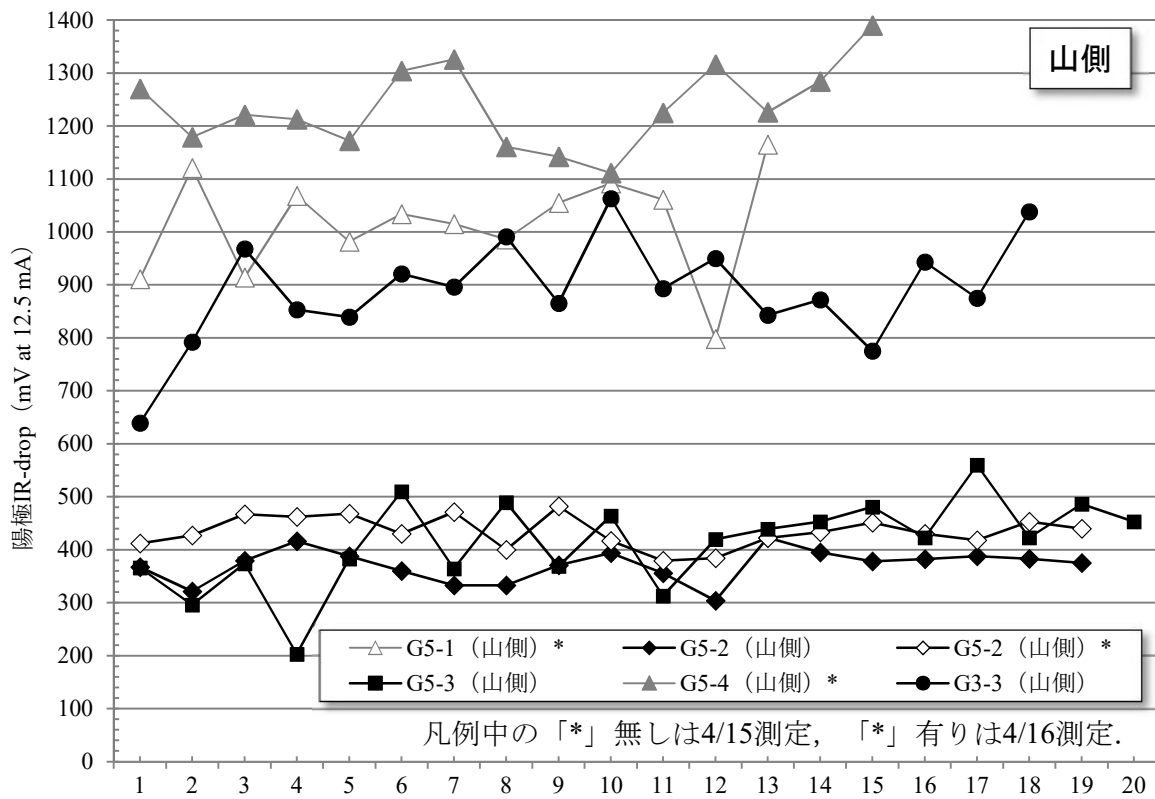
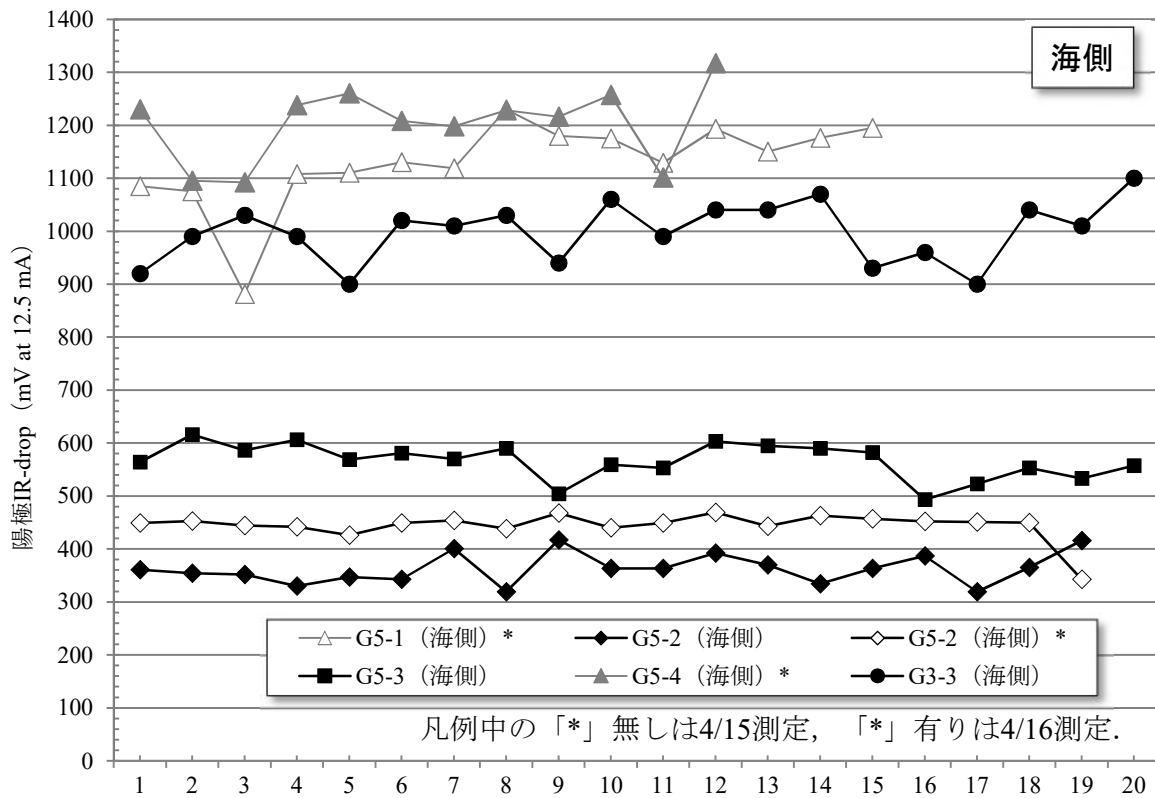


図-3.2.20 陽極の IR-drop (番号が若いほど、桁端部側。つまり、下フランジ部の PC 鋼材量が少ない。)



(G5-2 の pH 紙が変色しておりアルカリ性であることが確認できる)

写真-3.2.2 バックフィル材の pH 評価試験



(G5-2 は pH10 程度, G5-3 は pH4 程度)

写真-3.2.3 バックフィル材の pH 評価試験

### 3.2.3 コンクリートと断面修復材の電気抵抗率

G5-3 の浮部から採取した断面修復材（大断面修復部位であるので、使用材料はアーマー#520 と推定される）を $\phi 4.48 \times 9.49$  cm に成型加工し、土木学会規準 JSCE-K562 に規定される四電極法にて断面修復材の電気抵抗率を測定した。断面修復材の採取位置は G5-3 桁の下フランジ部の底面であり、写真-3.2.4 および図-3.2.21 に示す部位から採取した。



写真-3.2.4 断面修復材の採取位置（赤線で囲んだ部分を採取）

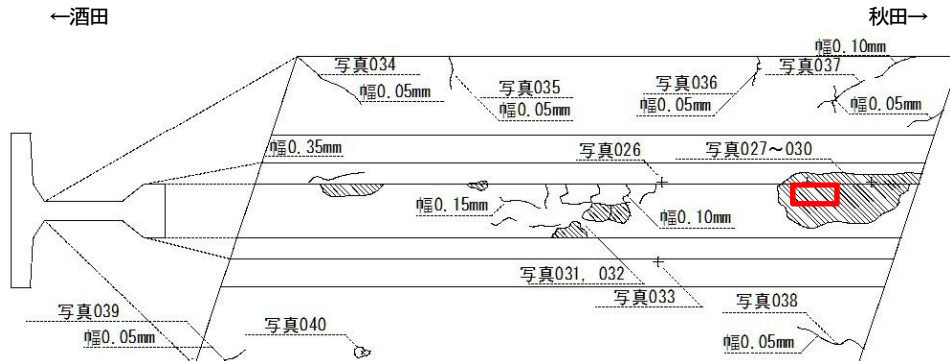


図-3.2.21 断面修復材の採取位置

成型加工は、次の手順で実施した。

- ① 採取した断面修復材の破片を内寸 $\phi 15 \times 30$  cm の鋼製型枠内に設置し、そこに早強ポルトランドセメントと山砂と水を練混ぜて作製したモルタル（W/C=40%，S/C=1.7）を充填する。
- ② 1日間湿布養生した後に脱型し、さらに7日間湿布養生する。
- ③ 乾式のコアドリルとグラインダーで $\phi 4.48 \times 9.49$  cm に成型加工（以下、供試体）する。
- ④ 供試体を20℃の恒温室内にて1日間、気中に放置した後、四電極法（JSCE-K 562）にて電気抵抗率を測定する。
- ⑤ さらに、供試体を真空脱気により飽水処理（7日間）した後、供試体の電気抵抗率を測定する。

測定結果を表-3.2.5に示す。「平成10年度 荒磯橋電気防食施工要領書」（2.2.1(1)の2）を参照によればアーマー #520 の電気抵抗率は材齢28日で11 k $\Omega$  cm（高湿度環境下で養生と推測される）とされている。これ

に対して今回の測定結果は、有姿状態（実環境下に近い状態での含水状態）では 72.4 kΩ cm、飽水状態では 8.3 kΩ cm であった。高湿度環境下での養生と飽水処理した状態で、かつ、評価材齢が大きく異なるものの、高含水状態の電気抵抗率は施工要領書に記載される数値と採取試料とでは大きな差はないと判断される。一方、有姿状態での電気抵抗率の測定結果は 72.4 kΩ cm となった。ここで、表-3.1.16 の G5-3 における電気抵抗率の測定結果を見ると、鉄筋やシースの影響を受けにくいウェブ部の電気抵抗率は 62～91 kΩ cm であった。

これらの結果を踏まえると、コンクリートと大断面修復で用いられた断面修復材の電気抵抗率は、実環境下においてほぼ同程度であったと推測され、断面修復材が母材コンクリートよりも高抵抗になることで防食電流の分配を阻害した可能性は低いと考えられる。ただし、気中環境下の断面修復材の電気抵抗率は経時的に増加し、一定値にほぼ収束する。つまり、断面修復材の施工直後は母材コンクリートよりも電気抵抗が低く、さらに、鉄筋周囲の腐食環境も改善されて鉄筋の分極抵抗も大きくなるため、施工直後は防食電流が分配されやすく、かつ、鉄筋は分極しやすい状況になっていると推察される。一方、供用が再開されて時間が経過すると、断面修復材の電気抵抗率は徐々に上昇し、母材コンクリートと同等になる。この場合、施工直後と比較すると防食電流分布は広がりにくくなると推測される。ただし、本研究の範囲では、断面修復材の電気抵抗率の経時変化が防食電流の広がりによらず影響を定量的に明らかにすることは困難であり、本件については引き続き検討を継続する必要がある。

図-3.2.22 に下フランジとウェブ部分の付け根部の深さ方向の含水率（G5-2）を示す。これより、深部ほど含水率が高く、電気抵抗率が低くなることが予想される。このことから、陽極から流れる電流は、主としてコンクリート内部を流れ、表層側には流れにくいと予想される。

表-3.2.5 断面修復材の電気抵抗率

供試体の状態	電気抵抗率 kΩ cm	供試体質量 g	見掛けの密度 g/cm <sup>3</sup>
有姿	72.4	322.94	2.16
飽水	8.3	330.12	2.21

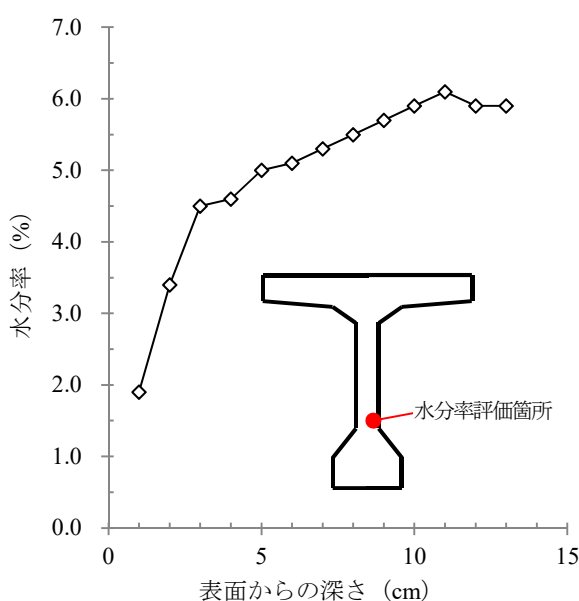


図-3.2.22 下フランジとウェブ部分の付け根部の深さ方向の含水率（G5-2）

### 3.2.4 鋼材腐食

電気防食適用後に変状が顕著であった部位の一つである、G5-3 の下フランジ底面をハツリ、鋼材の腐食状況を確認した。図-3.2.23 にハツリの位置を示す。この位置は大断面修復で補修された箇所であり、ハツリは断面修復材を完全に撤去できるまで実施した。結果として、腐食が軽微な部分は最下段のシースが半分ほど露出する状況まで、PC 鋼線が露出する程の腐食が進行した部分は最下段のシースの背面までハツリ取った。

表-3.2.6 にハツリの過程およびハツリ完了後の状況写真を示す。また、表-3.2.6 には、電気防食施工前の大断面修復部の修復前の調査写真（平成 10 年度荒磯橋他 24 橋調査設計業務報告書より）も示す。撤去桁の調査の結果、断面修復材のはく離・はく落部分は鋼材腐食が顕著であり、シース内部の PC 鋼線も露出して腐食が確認された。なお、電気防食施工前の大断面修復部の調査写真を見ると、この当時から PC 鋼線が破断する程の腐食が生じていることがわかる。防食電流が下フランジ底面部に十分供給されていなかったことを踏まえると、電気防食施工前に腐食が顕著であった箇所において引き続き腐食が進行し、他の部位に先んじて変状が生じたと考えられる。

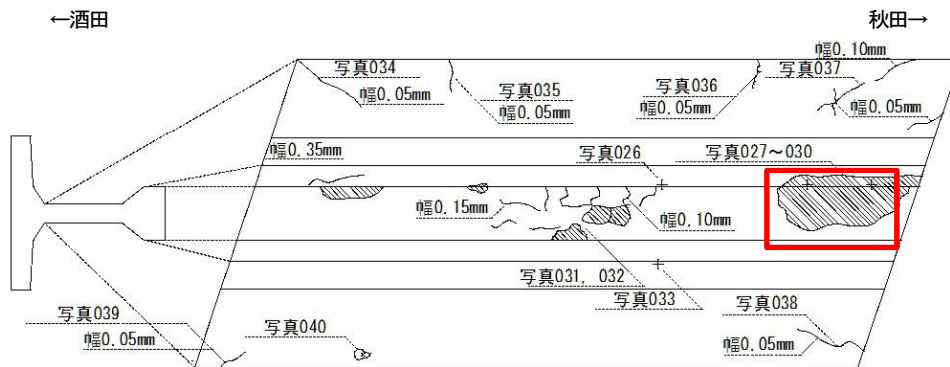


図-3.2.23 ハツリ箇所の位置 (G5-3)

表-3.2.6 撤去桁のハツリ調査 (G5-3 下フランジ底面) と電気防食施工前のハツリ調査の写真

No.

写真

000



002



No.001 の赤囲み部分を  
ハンマーでたたき落とした状況。

004



ハツリ完了時  
赤囲み部分は断面修復材のはく離・はく落  
が顕著であった部分。

006

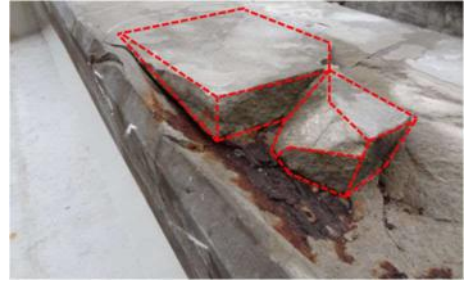


桁電気防食施工前 (G5 桁)  
(平成 10 年度荒磯橋他 24 橋調査設計業務報告書より)

No.

写真

001



003



No.003 の接写

005



ハツリ完了時  
赤囲み部分は断面修復材のはく離・はく落  
が顕著であった部分。

007



電気防食施工前 (G6 桁)  
(平成 10 年度荒磯橋他 24 橋調査設計業務報告書より)



## 4. FEMによる防食効果の評価

### 4.1 FEMの概要と入力パラメータの決定

#### 4.1.1 FEMの概要

コンクリート部材の電気防食の分極量を数値解析で解くために、本研究では有限要素解析（以下、FEM）を用いた。FEMでは、任意形状の幾何モデルにおいてラプラス方程式を解き、陽極から鉄筋に流入する鉄筋表面積あたりの防食電流密度を計算する。そして、鉄筋表面積あたりの防食電流と  $E - \log i$  関係式から鉄筋の分極量を算出する。

ラプラス方程式は式(4.1)によって示され、コンクリート内部の電位分布は式(4.1)に従うとする。

$$\nabla(\sigma \nabla \phi) = 0 \quad (4.1)$$

ここで、 $\sigma$ ：コンクリートの電気伝導率 (S/m)、 $\phi$ ：電位 (V) である。

また、境界条件を式(4.2)～式(4.4)に示す。コンクリート表面は絶縁壁とし、電流は流れないものとするので、式(4.2)により示される。さらに、コンクリート中の鉄筋と陽極の表面では、分極現象により電流の大きさに依存して電位が変化するため、本研究では式(4.3)および式(4.4)によって境界条件を定義した。

$$n \cdot (\sigma \nabla \phi) = 0 \quad (4.2)$$

$$E_c = E_{0c} - E_{cb} - I \cdot R_c \quad (4.3)$$

$$E_a = E_{0a} + E_{ca} + I \cdot R_a \quad (4.4)$$

ここで、 $E_c$ ：鉄筋の電位 (V)、 $E_a$ ：陽極の電位 (V)、 $E_{0c}$ ：鉄筋の自然電位 (V)、 $E_{0a}$ ：陽極の自然電位 (V)、 $E_{cb}$ ：鉄筋のバイアス電位 (V)、 $E_{ca}$ ：陽極のバイアス電位 (V)、 $R_c$ ：鉄筋の分極抵抗 ( $\Omega \text{m}^2$ )、 $R_a$ ：陽極の分極抵抗 ( $\Omega \text{m}^2$ )、 $I$ ：電流密度 ( $\text{A/m}^2$ ) である。

#### 4.1.2 入力パラメータの決定

##### (1) 桁の幾何モデル（陽極・鋼材・部材断面形状）

図4.1.1にFEMの対象とした部位の幾何モデルを示す。計算対象はG5-3ブロックとG5-4ブロックの一部であり、図4.1.2に示すように、G5-3はA断面、G5-4はD断面である。なお、幾何モデルを作成するに際し、計算負荷を低減するために、下記のような簡素化を行っている。

- ・ スターラップの間隔の中央部分で区切って幾何モデルを構成する。従って、陽極は区切り位置に存在するようになる。図4.1.1中の紫色部分が陽極のモデルである。
- ・ バックフィル材の電気抵抗率はコンクリートの電気抵抗率に等しいとする。したがって、幾何モデルではコンクリート中に陽極が直接埋め込まれる形となる。
- ・ シースは全て橋軸方向に対して水平に配置する。実際には傾斜して配置されるシースも断面内には存在するが、これらも橋軸方向に対して水平に配置する。
- ・ コンクリート中の電気抵抗率は一律とする。実際には、断面修復材の存在や含水率分布によって電気抵抗率は一律ではないが、幾何モデルの簡素化のために電気抵抗率を一律とした。
- ・ 幾何モデルに複数の陽極がある場合、陽極間のIR-dropは生じないものとする。



(2) 陽極のアノード分極抵抗と鋼材の分極抵抗

陽極のアノード分極抵抗と鋼材の分極抵抗を表-4.1.1 と表-4.1.2 に示す。鋼材に関する境界条件は、鋼材の腐食状況を踏まえて図-4.1.3 に示すように複数の部位に分けて与えた。なお、上フランジおよびシースについては鋼材の腐食度を実験により判定できていないため、周囲の部位における実験結果などから表-4.1.3 に示す腐食グレードを与え、既存の文献を参考にして決定した。それ以外のウェブおよび下フランジにおける鋼材の境界条件については、以降に示す簡易分極試験の試験結果に基づき、電流密度の関数として与えた。

表-4.1.1 G5-3 の A 断面の解析における各パラメータ

部位	物性	値	単位
コンクリート	電気抵抗率	49.767	[kΩ・cm]
上フランジ (腐食A)	自然電位	-388	[mV]
	カソード分極抵抗	2155.367	[kΩ・cm <sup>2</sup> ]
ウェブ	自然電位	-388	[mV]
	カソード分極抵抗	$71.152 \times I^{(-0.285)}$	[kΩ・cm <sup>2</sup> ]
	バイアス電位	$0.4958 \times I$	[mV]
下フランジ 側面	自然電位	-558	[mV]
	カソード分極抵抗	$77.692 \times I^{(-0.459)}$	[kΩ・cm <sup>2</sup> ]
	バイアス電位	$44.055 \times \ln(I + e^{(-4.059)}) - 178.836$	[mV]
下フランジ 底面	自然電位	-621	[mV]
	カソード分極抵抗	$83.806 \times I^{(-0.421)}$	[kΩ・cm <sup>2</sup> ]
	バイアス電位	$0.2992 \times I$	[kΩ・cm <sup>2</sup> ]
シース (腐食A)	自然電位	-388	[mV]
	カソード分極抵抗	356.722	[kΩ・cm <sup>2</sup> ]
	バイアス電位	105	[mV]
シース (腐食D)	自然電位	-621	[mV]
	カソード分極抵抗	20.861	[kΩ・cm <sup>2</sup> ]
陽極	電圧	12500	[mV]
	自然電位	-120	[mV]
	カソード分極抵抗	9.755	[kΩ・cm <sup>2</sup> ]
	バイアス電位	585	[mV]

※表中の I は鉄筋における電流密度を示している

表-4.1.2 G5-4・D 断面の解析における各パラメータ

部位	物性	値	単位
コンクリート	電気抵抗率	49.875	[kΩ・cm]
上フランジ (腐食A)	自然電位	-388	[mV]
	カソード分極抵抗	2155.367	[kΩ・cm <sup>2</sup> ]
ウェブ	自然電位	-388	[mV]
	カソード分極抵抗	$61.093 \times I^{(-0.192)}$	[kΩ・cm <sup>2</sup> ]
	バイアス電位	$0.4253 \times I$	[mV]
下フランジ	自然電位	-348	[mV]
	カソード分極抵抗	$34.698 \times I^{(-0.088)}$	[kΩ・cm <sup>2</sup> ]
	バイアス電位	$2.694 \times \ln(I + 1)$	[mV]
シース (腐食A)	自然電位	-400	[mV]
	カソード分極抵抗	356.722	[kΩ・cm <sup>2</sup> ]
	バイアス電位	105	[mV]
シース (腐食B)	自然電位	-348	[mV]
	カソード分極抵抗	707.272	[kΩ・cm <sup>2</sup> ]
陽極	電圧	15700	[mV]
	自然電位	-120	[mV]
	カソード分極抵抗	9.755	[kΩ・cm <sup>2</sup> ]
	バイアス電位	585	[mV]

※表中の I は鉄筋における電流密度を示している

表-4.1.3 鉄筋の腐食グレード

腐食グレード	鋼材の腐食状況
A	施工時の状態を保ち腐食が認められない
B	部分的に浮き錆が認められる
C	表面の大部分に腐食が認められる
D	鉄筋の全周にわたり断面欠損が認められる。

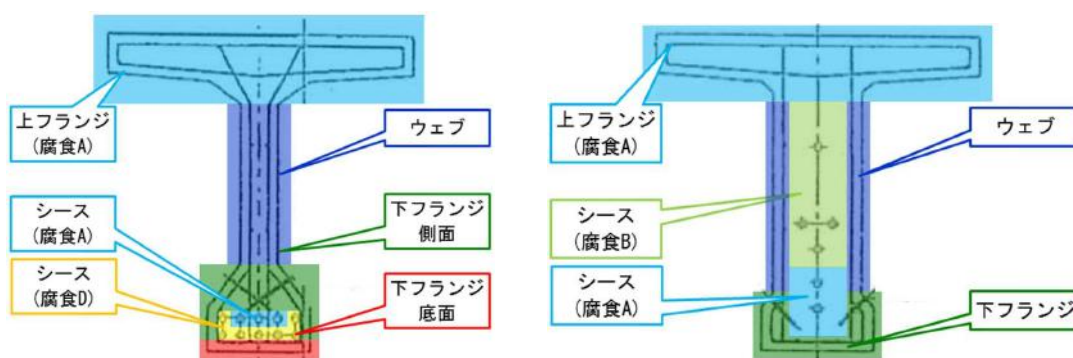


図-4.1.3 鋼材の分極抵抗の与え方

簡易分極試験と数値解析の連携によるカソード分極抵抗推定手法を以下に示す。また、本推定手法のフローを図-4.1.4に示す。さらに、これ以降用いる変数について、以下に列挙する。

- $i$  : 簡易分極試験における測定回 ( $i=1, 2, \dots, n$ )
- $j$  : 簡易分極試験における測定点①～⑤ ( $j=1, 2, \dots, 5$ )
- $I_{ij}$  :  $i$  回目の測定における解析より算出される測定点  $j$  直下における電流密度 ( $\text{mA}/\text{m}^2$ )
- $I_{ij \max}$  :  $i$  回目の測定における電流密度  $I_{ij}$  の最大値 ( $\text{mA}/\text{m}^2$ )
- $\Delta E_{ij}$  :  $i$  回目の測定時における測定点  $j$  の実験結果としての分極量 ( $\text{mV}$ )
- $\Delta E_{aj}$  :  $i$  回目の測定時における測定点  $j$  の解析結果としての分極量 ( $\text{mV}$ )
- $R_{ci}$  :  $i$  回目の測定より推定されるカソード分極抵抗 ( $\Omega \text{m}^2$ )
- $E_{bi}$  :  $i$  回目の測定より推定されるバイアス電位 ( $\text{mV}$ )

<カソード分極抵抗の推定手順>

- 1) 後述する簡易分極試験の手順に従い、簡易分極試験を実施する。
- 2) 分極量が 100 mV 近傍に達した際の電流量と電圧をもとにコンクリートの電気抵抗率を設定する。
- 3) 簡易分極試験の 1 回目の測定時に設定した電流量とその際の電圧を参考にして数値解析を実行する。なお、カソード分極抵抗はデータベースから導出される仮の値を与える。
- 4) 図-4.1.5(a)に示すように解析より算出された①～⑤の測定点における電流密度  $I_{11} \sim I_{15}$  と実験値である分極量  $\Delta E_{11} \sim \Delta E_{15}$  について最小二乗法を用いて近似直線を算出し、その近似直線の傾きをカソード分極抵抗  $R_{c1}$  とする。なおこの近似直線は原点を通るものとする。
- 5)  $I_{11} \sim I_{15}$  に  $R_{c1}$  を乗ずることで解析結果としての分極量  $\Delta E_{a11} \sim \Delta E_{a15}$  を算出する。
- 6) 次に設定した電流量とその際の電圧を参考にし、同様に数値解析を実行する。
- 7) 図-4.1.5(b)に示すように解析より算出された①～⑤の測定点における電流密度  $I_{11} \sim I_{15}$  のうち  $I_{(i-1)j \max}$  よりも

小さな値を除外し、残った  $I_{ij}$  と  $\Delta E_{ij}$  について近似直線を算出し、その近似直線の傾きをカソード分極抵抗  $R_{ci}$ 、切片をバイアス電位  $E_{bi}$  とする。なお、この近似直線は  $I_{(i-1)j \max}$  の点を必ず通るものとする。

- 8)  $I_{i1} \sim I_{i5}$  のうち  $I_{(i-1)j \max}$  よりも小さな値を除外し、残った  $I_{ij}$  について以下の式(4.5)より解析結果としての分極量  $\Delta E_{aj}$  を算出する。

$$\Delta E_{aj} = R_{ci} I_{ij} + E_{bi} \quad (4.5)$$

- 9) (4)~(7)を  $i=n$  まで繰り返し行う。

- 10) 簡易分極試験用陽極の設置箇所における  $I_{ij}$  と  $\Delta E_{aj}$  を評価することでカソード分極曲線を得る。また、同様に  $I_{ij}$  と  $R_{ci}$ 、 $E_{bi}$  を評価することで電流密度とカソード分極抵抗とバイアス電位の関係を数式化する。

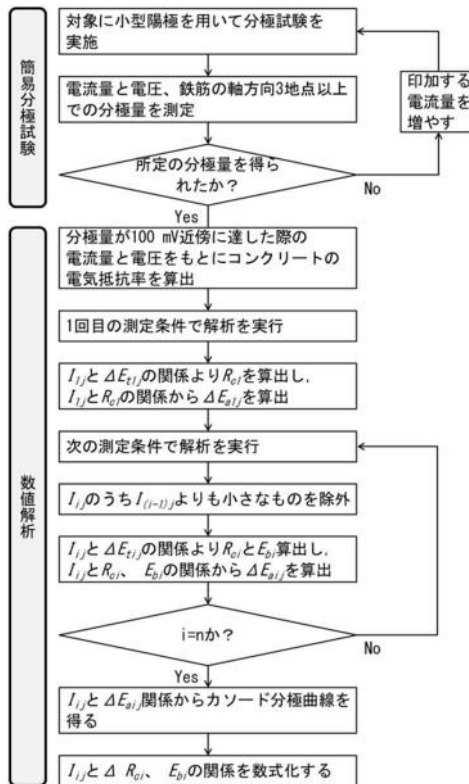


図-4.1.4 コンクリート中鋼材のカソード分極抵抗の推定手順

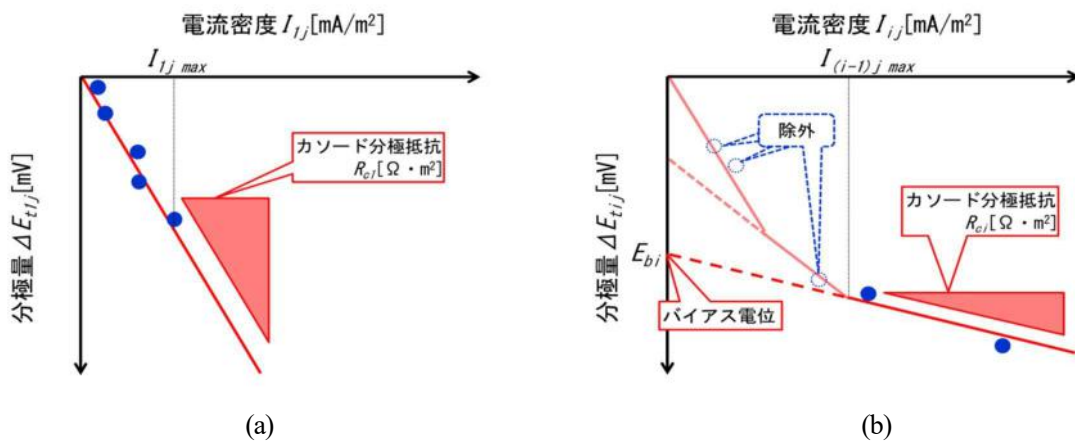


図-4.1.5 カソード分極抵抗とバイアス電位の決定方法

### <簡易分極試験の手順>

簡易分極試験はG5-3ではウェブ、下フランジ側面、下フランジ底面、G5-4については天地順当に静置しているためウェブ、下フランジ側面のみで測定を行った。簡易分極試験のフローを図4.1.6に示す。なお、簡易分極試験は測定対象箇所1箇所につき簡易分極試験用陽極の中心点1点とその周囲4点の計5点を測定点とするのを標準としているが、対象の形状などの問題により測定点を5点確保するのが難しい場合は、最低3点まで減らしてもよいこととした。

まず、図4.1.7に示す簡易分極試験用陽極、測定対象鉄筋、直流電源装置を図4.1.8に示すように接続し回路を形成し、図4.1.8に示す①～⑤の測定点にて、鉄筋の自然電位を測定する。次に、直流電源装置より任意の電流量を設定して通電を行い、鉄筋の電位が安定した時点で電流量、電圧、および①～⑤の測定点にて鉄筋のオン電位とインスタントオフ電位を測定し、自然電位とインスタントオフ電位の差から分極量を算出する。その後、直流電源装置により設定する電流量を増やし、再び鉄筋の電位が安定した時点で同様の測定を行うという作業を分極量が所定の値を得られるまで繰り返し行う。目安としては分極量が50 mVまでに2点以上、100 mVまでに2点以上、250 mVまでに2点以上の測定を行うものとする。測定後、分極量を鉄筋表面積あたりの電流密度で評価することで見かけのカソード分極曲線を得る。

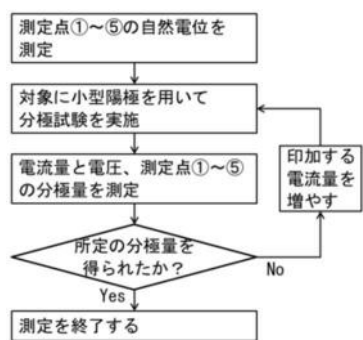


図4.1.6 簡易分極試験のフロー

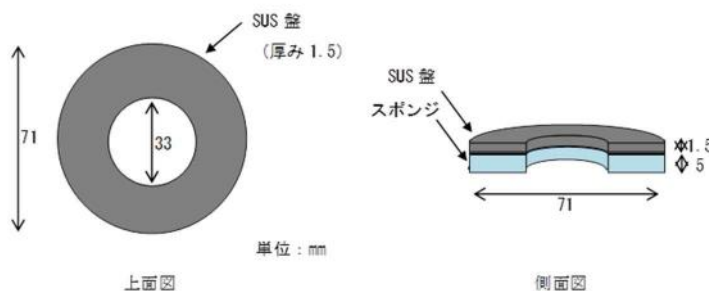


図4.1.7 簡易分極試験用の陽極

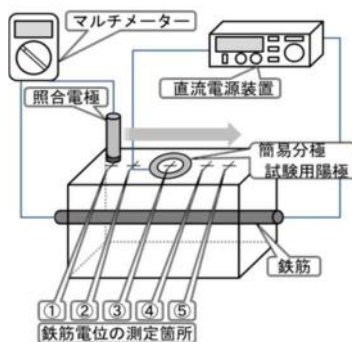


図4.1.8 簡易分極試験の構成

### (3) コンクリートの電気抵抗率

コンクリートの電気抵抗率は測定結果を考慮し、50 kΩ cmとして計算した。

### (4) 電圧と電流の与え方

G5桁に50 mAの電流が供給され、かつ、防食電流が各陽極から均等に流出したと仮定し、そのときの陽極1本当たりから流出する防食電流量が幾何モデル上の陽極からも流出するように電圧の数値を調整した。

## 4.2 解析結果と実測値との比較

### 4.2.1 比較対象とした実測値について

4.1.2 節の図4.1.2 に示したように、解析対象とした部位は G5-3 の支間中央部付近の断面（A 断面）と、G5-4 の桁端部付近の断面（D 断面）である。この解析結果と比較する実測データは表4.2.1 および図4.2.1 ように取得したものである。実測位置は解析対象と同じ配筋となっている断面とした。そのため、G5-2 および G5-1 の実測値も比較対象として採用している。

### 4.2.2 分極量による比較結果と考察

図4.2.2 および図4.2.3 に、A 断面および D 断面の解析結果と実測した分極量分布の実測結果を示す。図4.2.2 および図4.2.3 より、FEM により分極量分布を概ね評価できていることが認められる。

ここで、図4.2.4 および図4.2.5 に、A 断面および D 断面の解析結果と実測した分極量を比較した結果を示す。図4.2.4 より、解析結果は 2016 年 6 月 9 日の測定結果と最もよく一致する傾向が認められる。解析に用いた鋼材のカソード分極抵抗は、2015 年 8 月下旬に実施した簡易分極試験の結果に基づいて決定している。カソード分極抵抗には温度依存性があるため、気温の条件が近い 2016 年 6 月 9 日の結果との相関がよくなったと考えられる。また、2016 年 6 月 9 日の実測値は G5-3 のみを通电して得られたものに対し、2017 年 4 月 24 日の実測値は、G5-1～G5-4 を全て接続して G5 桁の回路にて通电して得られたものである。G5-1～G5-4 を全て接続すると、ディストビュータであるチタン線内で IR-drop が生じ、海側の陽極と鋼材間の電圧と山側の陽極と鋼材間の電圧が異なる。また、G5-1～G5-4 の各ブロックに均等に電流が分配されているわけではなく、陽極量や鋼材量によって各ブロックに供給される電流はそれぞれ異なる。これらの影響が解析値と 2017 年 4 月 24 日の実測値との差異になったと考えられる。

さらに、図4.2.4 および図4.2.5 より、解析ではほとんど分極しなかった部位でも、実測では分極していることが認められる。今回の解析ではコンクリートの電気抵抗率を  $50 \text{ k}\Omega \text{ cm}$  一定とした。しかし、実際の部材では、3.2.3 項で検討したように、コンクリート内部ほど高含水率になっており、含水率分布に応じてコンクリート内部の電気抵抗率も不均一になっていると考えられる。今回の解析で用いた電気抵抗率は、測定対象をコンクリート表層部として得たものであることを踏まえると、コンクリートの内部ほど電気抵抗率が小さくなることが予想される。一般に、コンクリートの電気抵抗率が小さくなると、防食電流は広く分配されることになる。したがって、コンクリートの電気抵抗率の入力値を見直すことで、解析結果の精度を向上させることができると考えられる。

このように、コンクリート中鋼材の分極量分布の評価に基づく電気防食工法の補修効果の予測は、現状技術で十分に可能である。しかし、解析に用いる入力データについては、吟味が必要であることは言うまでもない。なお、荒磯橋の電気防食工法の設計がなされた当時においては、現在のように廉価かつ高性能の計算機や汎用 FEM ソフトウェアの入手することはできず、防食電流や分極量の分布を机上で予測するのは困難であった。現在は低コストで FEM を実施できる環境が整っており、今後は数値解析を用いて防食効果を事前に確認しながら防食システムを設計することが望まれる。

表-4.2.1 解析結果と比較する実測データの諸元

比較対象	実測位置	測定日	陽極の結線方法	通電電流	参考
A 断面	G5-3 酒田側	2016年6月9日	G5-3のみ	12.5 mA/G5-3	3.2.1 (2) 項
	G5-3 酒田側	2017年4月24日	G5-1~G5-4を全て接続	50.0 mA/G5 桁	3.2.1 (3) 2) ②項
	G5-2 秋田側	2017年4月24日	G5-1~G5-4を全て接続	50.0 mA/G5 桁	3.2.1 (3) 2) ②項
D 断面	G5-4 秋田側	2017年4月24日	G5-1~G5-4を全て接続	50.0 mA/G5 桁	3.2.1 (3) 2) ②項
	G5-1 酒田側	2017年4月24日	G5-1~G5-4を全て接続	50.0 mA/G5 桁	3.2.1 (3) 2) ②項

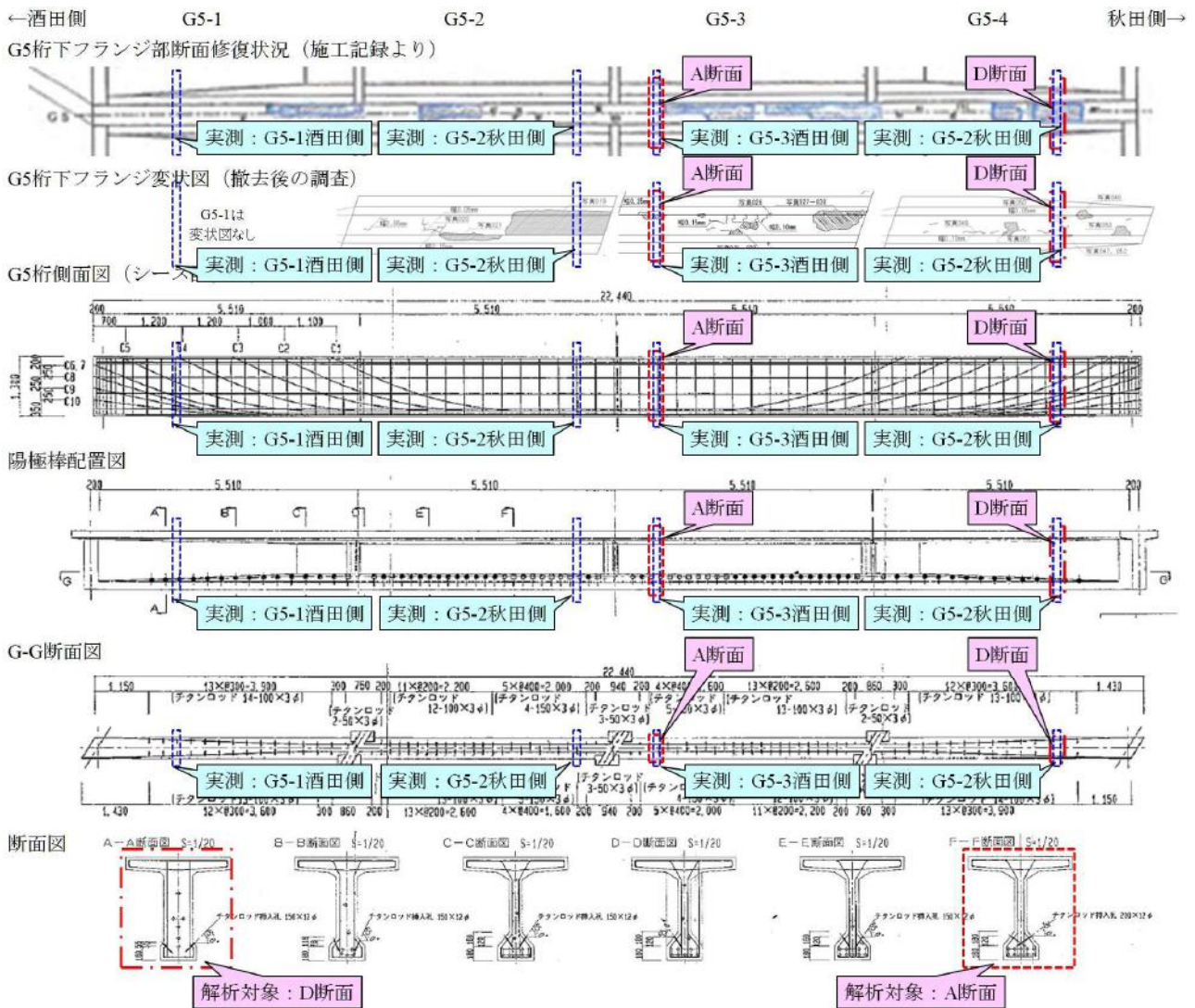


図-4.2.1 解析対象および実測対象



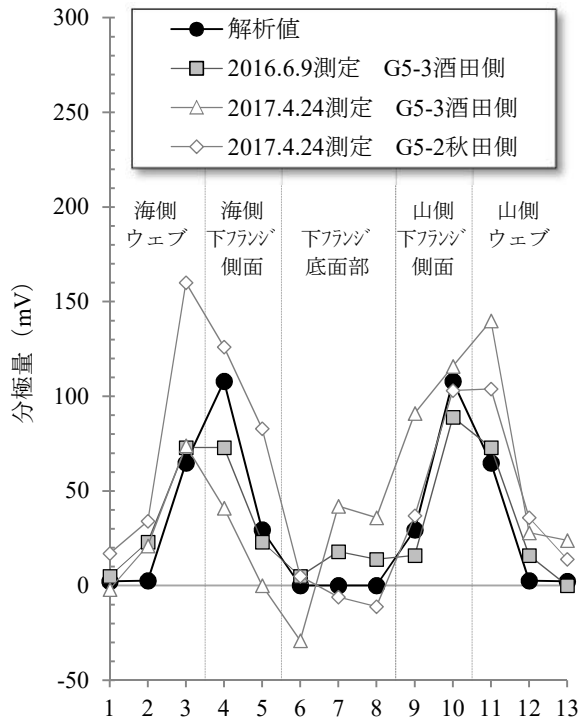


図-4.2.2 A断面の解析結果と実測した分極量分布

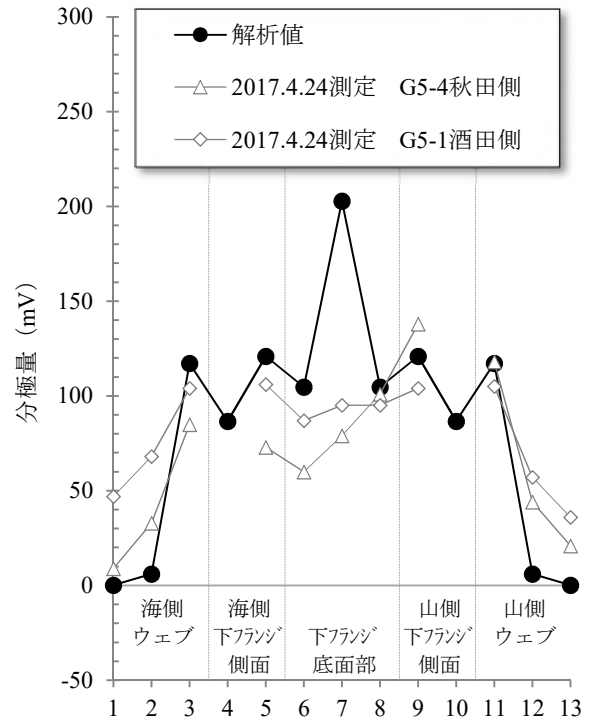


図-4.2.3 D断面の解析結果と実測した分極量分布

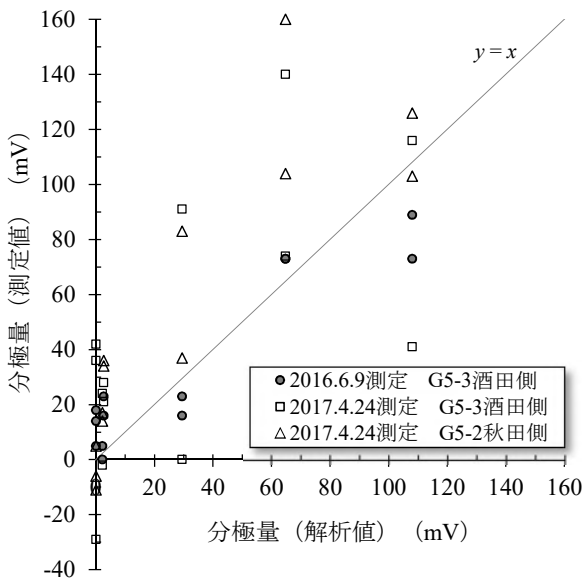


図-4.2.4 A断面の解析結果と実測した分極量の関係

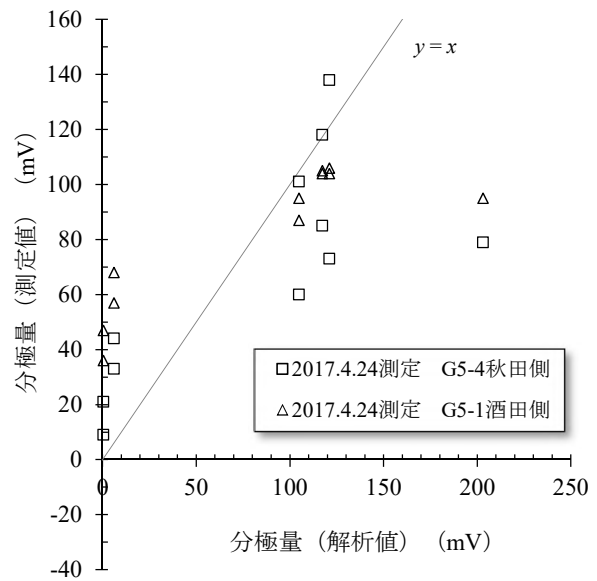


図-4.2.5 D断面の解析結果と実測した分極量の関係

## 5. 調査結果のまとめと本検討から得られた知見

### 5.1 調査結果のまとめ

本編では、荒磯橋の予定供用期間の終了に伴い撤去・移設された同橋のPC主桁を活用し、詳細調査を実施することで変状が再び顕在化した原因を特定することを研究目的とした。併せて、その成果に基づき、電気防食工法を適用する橋梁の設計・施工及び維持管理の留意点を整理した。本橋梁では、電気防食工法が適用されていたが、一部の部位でかぶりの剝落などの変状が再び顕在化したものである。本節では、電気防食工法適用後に荒磯橋に変状が再び顕在化した原因について調査した結果のうち、主要なものをまとめて示す。

#### (1) 第2章（荒磯橋の概要）の調査結果のまとめ

第2章では、書類調査によって荒磯橋の諸元、環境外力、延命化計画と補修・補強履歴および既存の追跡調査の結果を整理した。特に、防食回路については設計図書を整理するとともに再現設計を実施した。また、追跡調査結果については、電気防食工法の運転状況について、電源電圧・電流や電位、復極量の経時変化を整理した。

荒磯橋の電気防食工法は外部電源方式・点状陽極方式であった。その陽極システムは、棒状の陽極をポストテンション方式プレストレストT桁の下フランジのハンチ部から挿入し、それらの陽極をチタン・ワイヤーで結線して構成されていた。そのため、荒磯橋に適用された電気防食工法の陽極の設置位置は、施工実績の多い面状陽極方式や線状陽極方式とは異なるものであった。

また、本検討であらたに荒磯橋に適用されたものと同じ電気防食工法の再現設計を実施した結果、荒磯橋の当初の劣化状況を考慮すると、設計防食電流密度は少し小さめの設計値であると評価された。また、一部の区間では鋼材量に比して陽極量が不足気味であることや、ディストリビュータとなるチタン・ワイヤーが長めであるため、通電点から末端部間までのIRドロップが若干大きめであることから、陽極から供給される電流分布が均一にならない懸念があると評価された。運転状況としては、一部のモニタリングポイントで復極量が防食基準（100 mV シフト）を満足しないものが存在し、設定電圧を何度か調整していることが確認された。

なお、荒磯橋の桁から採取したコア試料の分析の結果をみると、表面塩化物イオン濃度は10.0～15.4 kg/m<sup>3</sup>となっており、荒磯橋の立地環境は、秋田県沿岸部でも厳しい部類に入る橋梁であると推察された。また、荒磯橋は塩害環境の厳しさに加えて、主桁のコンクリートはPC桁としては物質透過抵抗性がさほど高くはないこと、橋面からの漏水も懸念され、コンクリート中鋼材は極めて厳しい状況にあったことが認められた。

#### (2) 第3章（撤去桁の調査結果）の調査結果のまとめ

第3章では、土木研究所内に保管された荒磯橋の撤去桁に対して、現状把握のための調査として、外観調査、鉄筋間および陽極間の導通確認、鋼材電位、コンクリートの電気抵抗率、圧縮強度を測定した。さらに、詳細調査として、既設埋設陽極を用いた通電試験、陽極やバックフィル材の消耗度、コンクリートと断面修復材の電気抵抗率、鋼材腐食状況などを調査し、電気防食適用後に変状が再び生じた原因を追究した。

その結果、調査対象としたG3桁とG5桁のうち、G3桁については重篤な変状は見られないが、G5桁について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ることが確認された。また、自然電位の測定結果より、ウェブや下フランジ側面よりも下フランジ底面で腐食傾向が強い結果が得られた。また、既設の陽極を用いて通電試験を実施した結果、陽極周辺の鉄筋（ウェブ下側と下フランジのハンチ部）の分極量と比較して、下フランジ側面・底面の分極量は小さくなる傾向が確認された。また、コンクリートと断面修復材の電気抵抗率に大きな違いはないことが確認された。

さらに、重篤な変状が確認されたG5桁について詳細調査を実施した。その結果、G5桁の一部にチタン・ワ

ワイヤーの結線不良が認められた。チタン・ワイヤーの結線不良部分について特段の導通処理を実施せずに通電試験を実施した結果、チタン・ワイヤーの結線不良によって、一部の部位で防食電流が供給されにくくなることが確認された。また、そのような部位では、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度が小さいことから、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。

### (3) 第4章（FEMによる防食効果の評価）の調査結果のまとめ

第4章では、撤去桁にて測定した各種物性値を入力値として有限要素法によって鋼材の分極量の分布を計算した。また、その計算結果を撤去桁での実測値と比較することで、有限要素法による鋼材の分極量分布の予測の有用性や課題について検討した。

その結果、FEMによりコンクリート中鋼材の分極量分布を概ね評価できることが認められた。ただし、解析結果の精度を高めるためには、解析の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の分布や温度の変化の影響を適切に考慮する必要があることが示唆された。なお、荒磯橋の電気防食工法の設計がなされた当時においては、現在のように廉価かつ高性能の計算機や汎用 FEM ソフトウェアの入手することはできず、防食電流や分極量の分布を机上で予測するのは困難であった。現在は低コストで FEM を実施できる環境が整っており、今後は数値解析を用いて防食効果を事前に確認しながら防食システムを設計することが望まれる。

## 5.2 本検討から得られた知見

本編で実施した調査の結果、一部の桁や部位に変状が生じた主要な原因は、(1) 陽極からコンクリート中鋼材への防食電流供給量の偏在、(2) 電源装置から陽極への防食電流分配機能の低下、(3) 電気防食施工前の桁毎あるいは部位毎の劣化程度あるいは劣化外力の差異など、であると考えられた。さらにそのメカニズムについて考察したところ、(1)については、棒状の陽極が下フランジのハンチ部から挿入されるように設置されていたため、下フランジ底面の鋼材（主にスターラップ）への防食電流の供給が潜在的に少なくなる傾向であったこと、(2)については、ディストリビュータとなるチタン線が銅製圧着端子により結線され、圧着端子部の銅とチタン線の界面でアノード・カソード反応が生じて腐食・導通不良発生し、結果として結線部近傍の陽極周囲のコンクリート中鋼材が防食されない状態になったことが指摘できた。これらの他にも種々の可能性が考えられ、それらは電気防食工法の設計・施工・維持管理に重要な示唆を与えるものと考えられた。そのため、本節ではそれらを表-5.2.1のようにまとめて示し、その上で、防食設計・施工・維持管理時の留意点を挙げることで、本編の結びとする。

表-5.2.1 荒磯橋で変状が再び顕在化したメカニズムとそこから得られる設計・施工・維持管理時の留意点（その1）

変状発生メカニズム	設計・施工時の留意点	維持管理時の留意点
<p>※項目右の（ ）内の記号の意味                      ○：今回の調査で変状発生の原因として確実視されたもの                      △：変状発生の原因として可能性が指摘されたもの</p>		
<p>◆陽極からコンクリート中鋼材への防食電流供給量の偏在</p>		
(1) 陽極配置		
<p>a) 潜在的に下フランジ底面の鋼材（主にスターラップ）への防食電流供給量が少なくなる配置であった。（○）</p>	<p>➤ 陽極の配置が防食電流分布に及ぼす影響を実験、数値解析、あるいは実績に基づいて検討する。防食対象鋼材が密に配置される部位（例えば、PC 桁においては支間中央付近の下フランジ）においては、特に留意が必要である。</p>	<日常点検レベル>
(2) コンクリート母材および断面修復材の電気抵抗率の上昇		
<p>b) 荒磯橋は竣工当初から桁上面からの漏水が問題となっており、母材コンクリートの含水状態は高く、従って、電気防食施工当初はコンクリートの電気抵抗率が低かった可能性がある。電気防食施工後に橋面防水工の設置と桁の表面被覆が実施された結果、雨水の供給が絶たれ、経時的に母材コンクリートの含水率が低下し、電気抵抗率が上昇した可能性がある。（△）</p>	<p>➤ 防食対象とする鋼材の表面積に対して、十分な陽極量が確保されているかを検討する。</p>	<定期・詳細点検レベル>
<p>c) 断面修復材の水和に伴う自己乾燥により、断面修復部の含水率が低下し、電気抵抗率が上昇した可能性がある。（△）</p>	<p>➤ 通電点と通電点から最遠の位置までの IR ドロップを算出し、IR ドロップが規格内となるように通電点を設置する。</p>	<p>➤ モニタリング位置での鋼材電位・復極量の経時変化を確認する。                      ➤ モニタリング装置（照合電極）の埋め込みが困難で、かつ、防食電流の供給が不足する懸念がある部位において、外部接触方式の照合電極を用いて、同じ部位の鋼材電位・復極量を経時的に評価する。このとき、防食電流が十分に供給される部位も比較対象として測定しておく。このとき、コンクリート表面部に過剰に水分を与えると防食電流分布が変化するため、外部接触方式の照合電極の種類の選定や設置・測定方法に留意する。</p>
<p>d) コンクリート表面部は乾燥により電気抵抗率が上昇し、内部は乾燥が抑制されて電気抵抗率が表面部と比較して低く保たれた。その結果、下フランジ上部に設置された陽極からシースへの防食電流供給量は確保される一方で、下フランジ底面部付近のスターラップには防食電流が供給され難くなった可能性がある。（△）</p>	<p>➤ PC 桁のようにコンクリートの水セメント比が小さく、コンクリートの電気抵抗率が高くなる場合には、陽極の配置が防食電流分布に及ぼす影響を検討する。</p>	<p>➤ 断面修復工を併用した場合は、母材コンクリートと断面修復材の電気抵抗率の経時変化を非破壊試験などにより評価する。</p>
<p>➤ 一般に、電気抵抗率が大きくなると、防食電流分布の広がり狭くなる。電気防食運転当初は(1)の影響が顕在化していなかったが、(2)の何れかの影響で電気抵抗率が上昇し、下フランジ底面部への防食電流供給不足が顕在化した可能性がある。</p>	<p>➤ 橋面からの漏水などによりコンクリートの含水状態が高い部材を防食対象とする場合、漏水対策実施などによる乾燥に伴うコンクリートの電気抵抗率の経時変化を見込んだ防食設計（陽極の配置、回路分け、電源装置の仕様）を実施する。</p>	<p>➤ 橋面防水工などの漏水対策によってコンクリート部材の含水率が変動することが予想される場合には、コンクリートや断面修復材の電気抵抗率を非破壊試験などによって測定する。</p>
	<p>➤ 設計で用いる断面修復材の電気抵抗率は、使用環境を考慮した養生・暴露条件で作製した供試体を用いて評価する。また、材齢に伴う断面修復材の電気抵抗率の変化を考慮する。</p>	<対策レベル>
		<p>➤ 陽極の配置や回路分けによって防食電流分布の改善が図れる場合は、陽極の配置の変更（増設など）や回路分けを検討する。                      ➤ 電源装置の仕様（定格）によって解決が図れるケースでは、電源装置の変更も検討対象となる。</p>

表-5.2.1 荒磯橋で変状が再び顕在化したメカニズムとそこから得られる設計・施工・維持管理時の留意点（その2）

<p>変状発生メカニズム</p> <p>※項目右の（ ）内の記号の意味</p> <p>○：今回の調査で変状発生の原因として確実視されたもの</p> <p>△：変状発生の原因として可能性が指摘されたもの</p>	<p>設計・施工時の留意点</p>	<p>維持管理時の留意点</p>
<p>◆電源装置から陽極への防食電流分配機能の低下</p> <p>(3) <u>ディストリビュータの結線</u></p> <p>e) チタン線のディストリビュータを銅製圧着端子により結線。圧着端子部の銅-チタン界面でアノード・カソード反応が生じ、アノード部が腐食して導通不良発生。(○)</p> <p>f) 導通不良の発生位置が1ヶ所の場合：電源装置から末端陽極までの距離が長くなり、IR-dropが増加したことで、防食電流が分配され難い箇所が発生した。(△)</p> <p>g) 導通不良の発生位置が2ヶ所の場合：電源装置から防食電流の供給が途絶する陽極が生じ、結果としてその陽極近傍のコンクリート中鋼材が防食されない状態になる。(○)</p> <p>➤ 電気防食運転当初はディストリビュータが導通していたが、経年によってe)が顕在化し、f)とg)が生じることで、防食電流分布が徐々に偏在した可能性がある。</p>	<p>➤ 電線の接続は全て接続箱内で行い、結線部は絶縁材を使用し、完全な防水処理を施す。</p> <p>➤ 異種金属が接触するような結線処理はしない。</p> <p>➤ 設計においては、電線長さに配慮して接続箱の設置位置・数量を決定しておく。</p>	<p>&lt;日常点検レベル&gt;</p> <p>➤ 電線および接続箱の目視（遠方可）点検。</p> <p>&lt;定期・詳細点検レベル&gt;</p> <p>➤ 結線処理が適切になされているかを近接目視により確認する。</p> <p>➤ 防食電流の分配を鋼材電位や電流を測定することで確認する。</p> <p>&lt;対策レベル&gt;</p> <p>➤ 結線に関する手直しを実施する場合は、次の項目に留意する。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 電線の接続は全て接続箱内で行い、結線部は絶縁材を使用し、完全な防水処理を施す。</li> <li>- 異種金属が接触するような結線処理はしない。</li> </ul>
<p>◆モニタリング範囲</p> <p>(4) <u>モニタリング（照合電極）位置</u></p> <p>h) 下フランジのハンチ部から挿入された照合電極は最も防食電流が供給される部位近傍に設置されており、PC鋼材の水素脆化を防止する観点からは適切な位置であったと判断される。(一)</p> <p>i) 一方、下フランジ側面の下方に照合電極が設置されていたが、この位置では最も防食電流が届きにくい下フランジ底面部中央のスターラップの電位を計測することはできない。(○)</p> <p>➤ 防食電流の供給量が最も少なくなる位置に照合電極が設置できなかった結果、防食電流供給不足を十分に把握することができなかった。</p>	<p>➤ モニタリング装置（照合電極）の埋め込みが困難で、かつ、防食電流の供給が不足する懸念がある部位がある場合は、次の項目を設計の段階で維持管理計画に織り込む。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 外部接触方式の照合電極を用いて鋼材電位・復極量を経時的に評価し、その結果に基づいて防食電流の調整を実施する。</li> </ul>	<p>&lt;日常点検レベル&gt;</p> <p>➤ 防食電流不足が懸念される部位で、かつ、モニタリングが行き届かない懸念がある部位について、特に留意して目視点検する（ひび割れ、浮きなどがないか）。</p> <p>&lt;定期・詳細点検レベル&gt;</p> <p>➤ モニタリング装置（照合電極）の設置箇所以外において、外部接触方式の照合電極を用いて、鋼材電位・復極量を評価する。測定位置は、防食電流の供給が不足する懸念がある部位（防食対象鋼材量が多い部位、陽極量が少ない部位、防食対象鋼材に対して陽極設置間隔が大きい部位、鋼材腐食量が多い部位、変状が確認される部位など）を重点的に選定することも重要であるが、防食電流が十分に供給される部位も比較対象として測定しておくことが望ましい。</p> <p>&lt;対策レベル&gt;</p> <p>➤ 技術的・費用的に可能であればモニタリング装置の増設について検討する。</p>

表-5.2.1 荒磯橋で変状が再び顕在化したメカニズムとそこから得られる設計・施工・維持管理時の留意点（その3）

<p>変状発生のメカニズム</p> <p>※項目右の（ ）内の記号の意味</p> <p>○：今回の調査で変状発生の原因として確実視されたもの</p> <p>△：変状発生の原因として可能性が指摘されたもの</p>	設計・施工時の留意点	維持管理時の留意点
<p>◆桁毎あるいは部位毎の劣化外力の差異</p> <p>(5) 塩害外力の空間分布</p> <p>j) 飛来塩化物イオン量（マイクロ環境の影響）（△）</p> <p>k) 桁上面からの水分供給量の分布（橋面防水工の影響）（△）</p> <p>➤ j), k)は鋼材の腐食度の空間分布に影響を及ぼす。</p> <p>➤ 上縁定着で施工されたポストテンション方式 PC 桁においては、上縁定着からシース内に液状水が浸潤し、それが鋼製シースおよびその内部の PC 鋼線を腐食させる可能性がある。</p>	<p>➤ 鋼材腐食が不均質である（空間分布を有する）ことを念頭に、陽極量・陽極配置を検討する。</p> <p>➤ 上縁定着方式である場合は、シース内部への液状水の浸潤が生じないように、防水工を必ず実施する。</p>	<p>&lt;日常点検レベル&gt;</p> <p>➤ 作用の強い部位について、留意して目視点検する（ひび割れ、浮きなどがないか）。特に断面修復が実施された箇所は、作用が強い部位と考えられる。</p> <p>➤ 上縁定着部から液状水が過剰に流入すると、桁側面部にシースに沿ったエフロッセンスが発生するときがある。</p> <p>➤ 舗装面の状態にも留意して目視点検する。</p>
<p>◆桁毎あるいは部位毎の劣化程度の差異</p> <p>(6) 鋼材量の空間分布</p> <p>l) 鋼材量に応じて陽極量を決定していたが、鋼材の空間分布、特に下フランジ部のシースの配置を考慮すること。（○）</p> <p>➤ 下フランジ部にシースが集中する支間中央部において下フランジ下面の主筋及びスターラップが防食され難くなった。</p> <p>m) 電気防食施工前にシースが腐食して欠損し、かぶりが剥離・剥落する程の劣化であった場合、劣化部位を断面修復する。このとき、シース内部の PC 鋼線が露出したまま断面修復材が打込まれる。すると、シースよりも PC 鋼材の方が比表面積は大きいので、PC 鋼材が露出したまま断面修復された状態では防食対象鋼材の表面積が局部的に増加することになる。（△）</p> <p>➤ 電気防食適用前に鋼製シースが腐食して欠損する程の劣化であった場合、その部位においては局所的に防食対象鋼材の表面積が増加する。そのため、局所的に防食電流が不足する可能性がある。</p>	<p>➤ 鋼材量が空間分布を有することを念頭に、陽極量・陽極配置を検討する。</p> <p>➤ 鋼材腐食が顕著であった部位については、次の点に留意して設計する必要がある。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- シースが消失して PC 鋼材が露出し、防食対象鋼材の表面積が増加すること。</li> <li>- 導通筋や補強鋼材の追加によって、防食対象鋼材が増加すること。</li> <li>- グラウト系の断面修復材が使用される部位においては、型枠を固定するための金属セパレータが埋めこまれる可能性もある。</li> </ul>	<p>&lt;日常点検レベル&gt;</p> <p>➤ 鋼材量が多いために防食電流不足が懸念される部位で、かつ、モニタリングが行き届かない懸念がある部位について、特に留意して目視点検する（ひび割れ、浮きなどがないか）。</p>

## 6編 維持管理マニュアル（案）の策定

### 1. はじめに

過年度実施の電気防食工法を適用した道路橋の管理者や専門業者へのアンケートも踏まえ、本研究の成果は電気防食工法の維持管理マニュアルへ反映している。

### 2. 目次構成

図-2.1 に示す通り、電気防食工法を適用した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。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章の記録に関しては章を立てて解説を行っている。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。

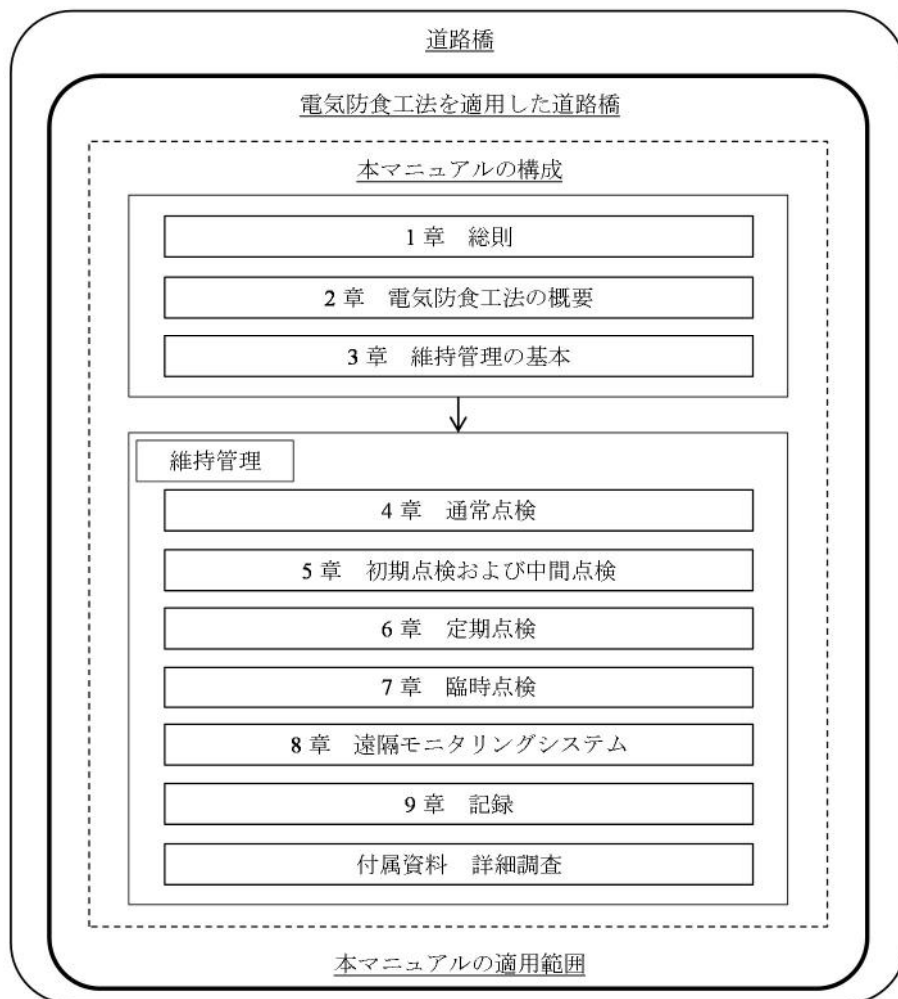


図-2.1 電気防食工法を適用した道路橋の維持管理の内容

### 3. 維持管理のポイント

表-3.1に示すように電気防食工法では、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ため、電源の供給方法の確認が必須となる。また、表-3.2、図-3.1に示すように陽極システムの設置においても各設置方法で点検のポイントが異なるため、電気防食工法が採用している陽極システムの確認も必須となる。

表-3.1 防食電流の供給方法に応じた維持管理上の特徴

防食電流の供給方法	維持管理上の特徴
外部電源方式	<ul style="list-style-type: none"> <li>・日常的に電源の稼働状況を確認することが重要</li> <li>・適用後の通電量調整が可能（定期的なモニタリングにより、適切に維持管理することができる）</li> <li>・直流電源装置や配線、配管等の劣化損傷の目視確認が必要</li> <li>・陽極材とその周辺の浮き、剥離、ひび割れ、劣化損傷の有無の目視観察が必要</li> </ul>
流電陽極方式	<ul style="list-style-type: none"> <li>・直流電源装置がないため、直流電源装置の点検が不要</li> <li>・定期的な防食電流のモニタリングは必要</li> <li>・陽極システムの浮き、剥離、劣化損傷の有無の目視観察が必要</li> <li>・陽極の消耗量調査が必要</li> </ul>

表-3.2 陽極システムの設置方法を踏まえた点検のポイント

陽極システムの設置方法	点検のポイント
外部設置方式（陽極材を取り付けた後にオーバーレイ材を施すもの）	陽極システムの浮き、剥離、ひび割れ、劣化損傷の有無を確認する必要がある
外部設置方式（陽極材を取り付けた後にバックフィル材を施すもの）	陽極システムの浮き、剥離、劣化損傷の有無、固定具（ねじ・シール材）の劣化損傷、バックフィル材の漏れを確認する必要がある
接着方式（陽極材とバックフィル材があらかじめ一体化された状態で設置するもの）	陽極システムの浮き、剥離、劣化損傷の有無、固定具（ねじ・シール材）の劣化損傷、バックフィル材の漏れを確認する必要がある
埋設方式（陽極材をコンクリート中に設置するもの）	陽極材とその周辺の浮き、剥離、ひび割れの有無を確認する必要がある
塗装方式	塗装材の劣化損傷を確認する必要がある
溶射方式	溶射被膜の損傷、浮きの有無を確認する必要がある



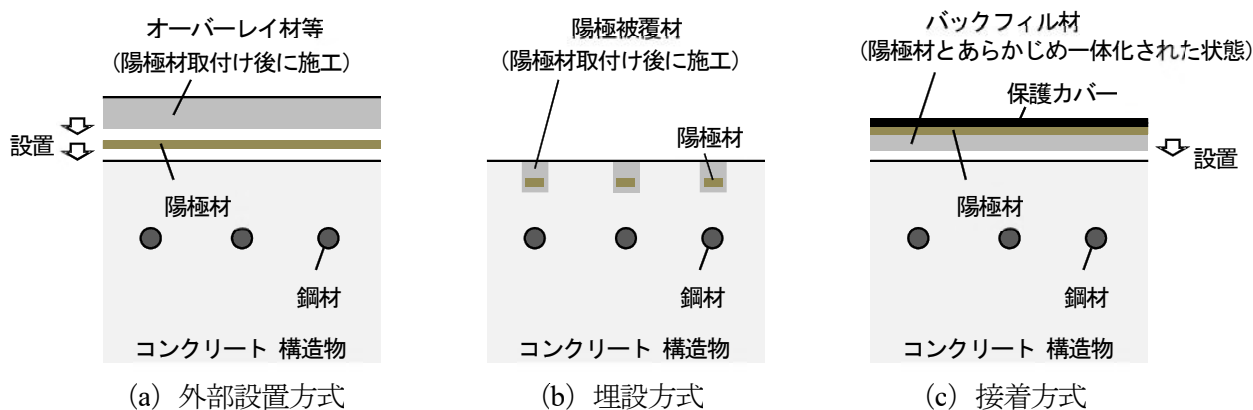


図-3.1 陽極システムの設置方法の概念図

## 4. 各種点検

### 4.1 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。そのため、これらを維持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、防食電流量の調整を行う「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<sup>1)</sup>」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>2)</sup>」を参考とした。表-4.1.1に各点検種別毎の実施目的、実施者、実施頻度、実施内容を示し、図-4.1.1には各点検種別毎の関わりを示す種別比較図を示す。

表-4.1.1 点検の種別まとめ

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ことを確認すること	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

### 4.2 実施者

実施者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者に委託して行う点検として分けした。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「専門的知識を有する技術者」が実施することとした。

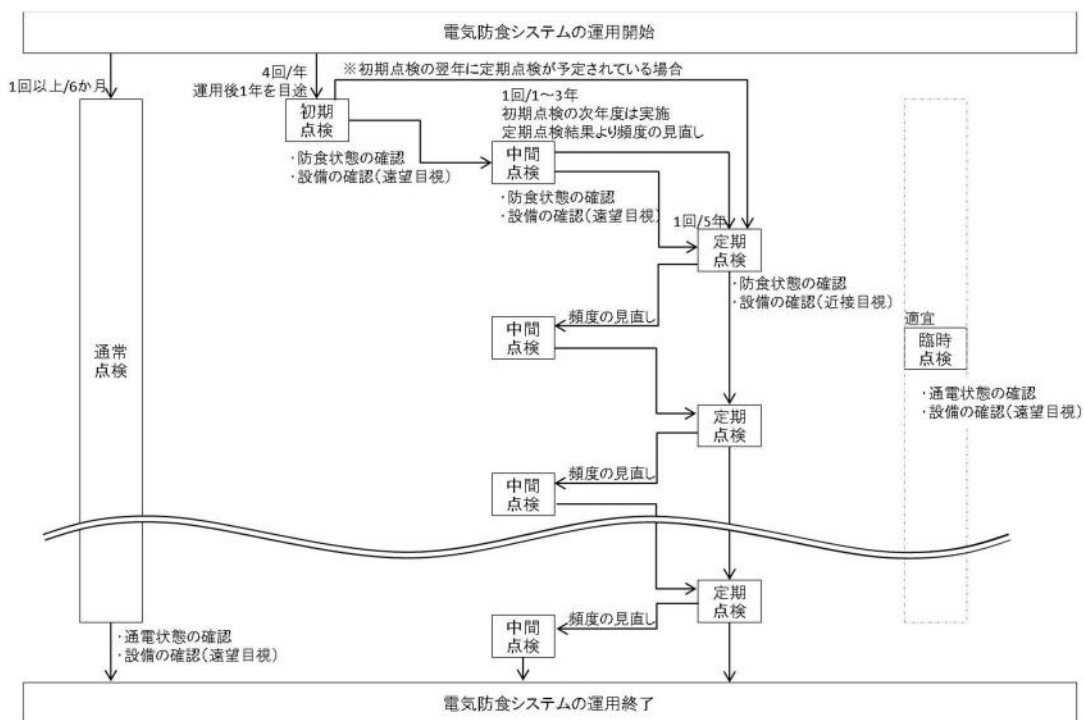


図-4.1.1 電気防食システムの点検の種別比較図

### 4.3 点検頻度

点検頻度については、管理者の現場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。現行の管理者が実施している点検頻度は、3編の2.3.7で示される通り、その多くが表-4.3.1に示すH12土研マニュアル<sup>3)</sup>、H13土木学会指針<sup>4)</sup>で提案されている頻度としていることがわかる。これに対して、3編の2.4.4で解説している通り、前述程度の頻度での点検を継続することにより、構造物の健全性が維持できることを裏付けられたことから、表-4.1.1に示す点検頻度が妥当と判断した。

表-4.3.1 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	H13.11
		土木研究所共研	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

【参考文献】

- 1) 橋梁定期点検要領；国土交通省，[http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-council/pdf/yobo3\\_1\\_6.pdf](http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-council/pdf/yobo3_1_6.pdf)，平成26年6月
- 2) 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，[http://www.cbr.mlit.go.jp/architecture/kensetsugijutsu/download/pdf/karute\\_youryou.pdf](http://www.cbr.mlit.go.jp/architecture/kensetsugijutsu/download/pdf/karute_youryou.pdf)，平成30年3月現在

- 3) 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) - ; 建設省土木研究所材料施工部化学研究室, (社)プレストレスト・コンクリート建設業協会, 共同研究報告書番号第 256 号, 平成 12 年 12 月
- 4) コンクリートライブラリー107号～電気化学的防食工法 設計施工指針(案) ; (社)土木学会, 平成 13 年 11 月

## 7 編 新工法の開発（間欠通電方式の検証）

### 1. はじめに

従来、鋼材コンクリート構造物における塩害劣化は、栈橋に代表されるように沿岸領域にある構造物や海砂の除去不足により、コンクリートに塩化物イオンが新設時より内在する構造物で顕著である。周囲を海で囲まれている我が国では、海岸線に位置するコンクリート道路橋が多数存在し、塩害劣化に悩まされている。さらに、1991年に施行されたスパイクタイヤ禁止条例以降、山間部などの寒冷環境に位置する道路橋では、道路表面の凍結、積雪を防止し、車両が安全して走行するために、凍結防止剤の散布が増加している。凍結防止剤には、NaCl、CaCl<sub>2</sub>、MgCl<sub>2</sub>などがあり、いずれも塩化物イオンを含む化合物である。つまり、これら凍結防止剤は、雪溶け水や雨水に流れ出てコンクリート中に浸透し、コンクリート中の鋼材が腐食する原因となる。したがって、コンクリート道路橋における塩害劣化は、沿岸環境のみで生じる劣化現象ではなく、人為的に生じる劣化現象として認識されはじめています。

電気防食工法は、塩害劣化を受けたコンクリート道路橋の補修対策として期待され、適用実績も増加している。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。流電陽極方式とは、コンクリート内部鋼材と比較してイオン化傾向が高い金属をコンクリート表面に設置し、内部鋼材と接続し、防食電流を供給する方法である。一方、外部電源方式とは、直流電源装置の+側、-側にそれぞれ電気防食用陽極と内部鋼材を接続し、防食電流を供給する方法である。現在は、内部鋼材の腐食状態に適した防食電流を自由にコントロール可能な外部電源方式が主流である。

しかしながら、外部電源方式は、防食電流を供給する直流電源装置を稼働させるための1次側電力を周囲の電線路から引き込む必要がある。一次側電力の供給では、構造物周囲に電線路がない場合には適用することができない。また、近年注目されている太陽光など自然エネルギーを利用し1次側電力を補うことは可能であり、適用事例も報告されている。電気防食工法では、防食期間中、常時防食電流を供給する必要があるため、夜間の電力供給を目的とした高価なバッテリーを備えなければならない。そのため、必要なバッテリー容量は、防食対象面積が広くなるにしたがって大きくなる。

また、第3編における管理者へのアンケート結果から電気防食工法の維持管理がより簡便になることが必要であることが確認された。その一つは、直流電源装置を管理する上で1次側電力の供給を第三者（電力会社）に頼らないことである。例えば、1次側電力の供給が停止（停電など）すると防食電流が停止するなどの管理リスクがある。

そこで、これら課題を解決するため、本検討では、1次側電力として自然エネルギーであるソーラーパネルを使用し、従来必要であったバッテリーを用いない電気防食工法の開発に着目することとした。つまり、本検討の電気防食工法は、日中のみに太陽光発電で発生した電力で防食電流を供給し、夜間は防食電流を供給しない断続通電による電気防食工法である。本工法では、1日の中で防食電流を供給可能な期間が日照時間に左右されるため、雨天等が続くように日照時間が全くない期間も生じる可能性は高い。また、我が国は南北に長く、各地域の気温差も大きいこと、塩化物イオンの供給状況にも差が生じるため、コンクリート内部鋼材の腐食環境は、各地域で異なる。したがって、本工法が全ての腐食環境で適用可能であるとは限らない。

本検討では、日中に防食電流を供給する防食時間の長さ、内部鋼材の腐食環境として曝露環境温度、内部塩化物イオン量およびシフト量に着目して基礎検討を実施した。

なお、本報告では、断続通電でなく間欠通電と表現している。これは、基礎的な情報を得ることを目的に実験的には定期的に防食電流の ON, OFF を行って評価したためである。実構造物に適用する場合は、不定期に電源が ON, OFF され、防食電流の供給時間も不規則であることに注意することが必要である。

最後に、検討試験では、室内恒温恒湿室および茨城県つくば市の土木研究所屋外曝露場および宮城県仙台市の東北大学内建屋屋上に供試体を曝露したが、土木研究所および東北大学に曝露した供試体に関しては、コンクリート中鋼材の腐食状態を各曝露環境で促進させるため、約1年後に試験を開始している。そのため、本報告書の試験結果の範囲からは、除外することをここに示す。これら供試体および室内試験において解体されていない供試体に関しては、引き続き試験を継続し、その結果が出た段階で報告する。

## 2. 実験概要

### 2.1 供試体概要

実験に用いた供試体は、図-2.1.1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。供試体中には、両端部を熱収縮チューブで被覆したφ6mmの磨き丸鋼を1本埋設し、鋼材の直上にはチタンリボンメッシュ陽極を設置した。なお、丸鋼の設置では、実験期間中に曝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ている。また、チタンリボンメッシュ陽極は、磨き丸鋼と同様に一部をモルタル供試体から露出させ、外部電源と接続できるようにした。各供試体は、型および養生後、鋼材およびチタンリボンメッシュ陽極が露出している面（2面）に対して、陽極を除く全ての部分をエポキシ樹脂で被覆し、湿度等の影響を受けないようにした。

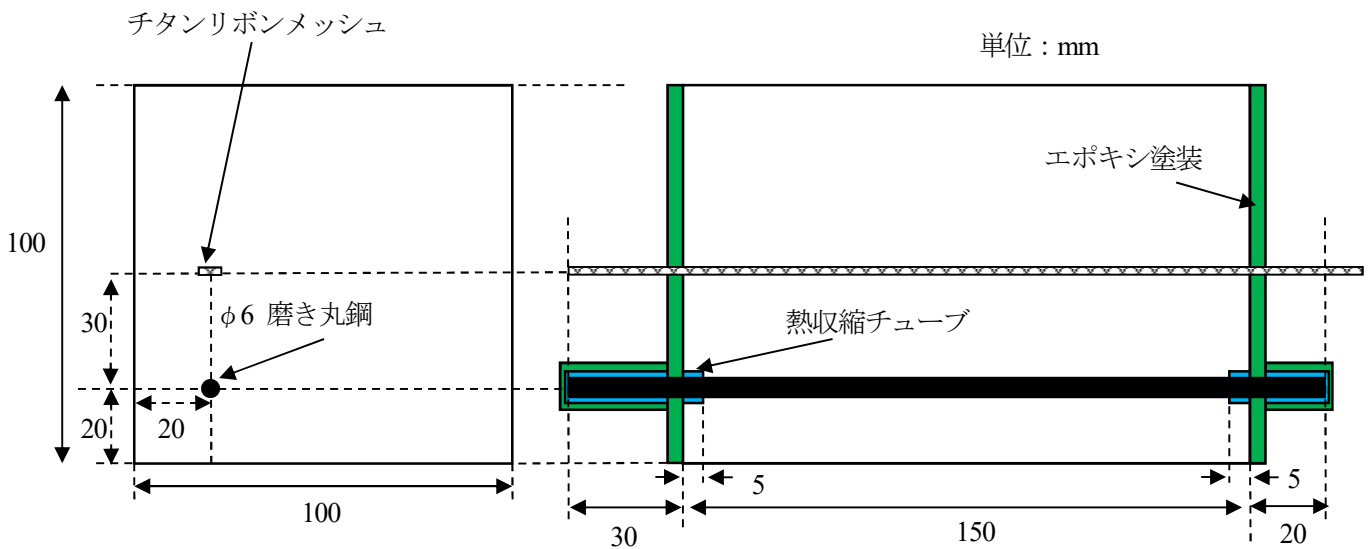


図-2.1.1 供試体概要図

モルタル配合は、W/C=40%のPC配合（表-2.1.1参照）をベースにモルタル配合を算出した。表-2.1.2には、モルタル配合を示す。なお、セメントは早強セメントを用いた。なお、塩化物イオン量は、PC配合のコンクリートに対して2.4 kg/m<sup>3</sup>および12.0 kg/m<sup>3</sup>となるように算出し、NaClとして外割りでモルタル混合時に添加した。

表-2.1.1 モルタル配合のベースPC配合（絶対容積）

W/C (%)	W (kg/m <sup>3</sup> )	s/a (%)	空気量 (%)	絶対容積(l/m <sup>3</sup> )			
				W	C	S	G
40.0	165	43.0	4.5	165	132	283	375

※セメント：早強セメント（比重3.13，単位量413kg/m<sup>3</sup>）

表-2.1.2 モルタル配合

W/C (%)	W (kg/m <sup>3</sup> )	空気量 (%)	絶対容積(kg/m <sup>3</sup> )				
			W	C	S	塩化物イオン量 (外添加) コンクリート m <sup>3</sup> 中に対する量	
						2.4 供試体の場合	12.0 供試体の場合
40.0	165	7.2	264	660	1178	3.8	19.2

※塩化物イオンは、コンクリートに対して2.4および12.0kg/m<sup>3</sup>となるように算出

表-2.1.3には、要因と水準を示す。塩化物イオン量は、限界腐食量程度として2.4kg/m<sup>3</sup>、厳しい腐食環境を模擬して12.0kg/m<sup>3</sup>とした。供試体曝露環境は、乾燥環境20℃-60%RH、湿潤環境20℃-90%RH、高温多湿環境40℃-90%RHの室内および一般屋外環境として茨城県つくば市にある土木研究所曝露場、寒冷地環境として宮城県仙台市にある東北大学内の建屋屋上にそれぞれ曝露した。なお、供試体作製後、約4ヶ月間、所定の曝露環境に各供試体を静置した後に通電を開始した。

間欠通電における通電時間は、4、8時間/日の2種類とし、いずれも午前8時に直流電源装置の電源がONとなるように市販のタイマーを用いて制御した。通電では、目標の電位シフト量が50mVおよび100mVとなるように定電流制御により、防食電流密度を調整した。なお、通電調整は、概ね3ヶ月に1回の頻度で実施した。試験の作製では、曝露スペースの関係で全ての要因と水準を組合せた供試体を作製することは困難であったため、表-2.1.4に示す割り振りで供試体を作製し、同時期に曝露した。なお、屋外2ヶ所の曝露供試体に関しては、各曝露環境において約1年間静置し、コンクリート内部鋼材の腐食を促進させたため、今回の試験結果報告の範囲から除外した。ただし、現在通電を開始し、各測定を実施しているため、今後試験結果が出た段階で報告する。表-2.1.4には、各供試体のNo.と各試験条件を示す。

表-2.1.3 要因と水準

要因	水準
塩化物イオン量	2.4 , 12 kg/m <sup>3</sup>
曝露環境	20℃, 60%RH (乾燥) 20℃, 90%RH 以上 (湿潤), 40℃, 90%RH 以上 (高温多湿) 曝露 (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

表-2.1.4 各曝露環境における供試体の割振り

室温 (°C)	湿度 (%RH)	塩化物イオン量 (kg/m <sup>3</sup> )	通電時間 (時間/日)	目標シフト量 (mV)	供試体 No.
20	60	12	8	100	65,67, 68,69,70,71
				50	57,61,73,74,75,76
			無通電		59,60,62,63,64,72,195
			初期解体※		58,66
20	90	12	4	100	85,86,87,88,89
				50	78,91,92,94,95,96
			8	100	97,98,99,100,101,102
				50	103,104,105,106,107,108
			無通電		80,81,82,83,84,196,197
			初期解体※		77,93
	2.4	4	100	9,10,11,12,13,14	
			50	15,16,17,18,19,20	
		8	100	21,22,23,24,25,26	
			50	27,28,29,30,31,32	
		無通電		4,5,6,7,8,55	
		初期解体※		1,2	
40	90	12	4	100	109,111,116,118
				50	119,121,120,122
			8	100	123,124,125,126
				50	127,128,129,130
			無通電		112,113,114,115,198
			初期解体※		110,117
	2.4	4	100	39,40,41,42	
			50	43,44,45,46	
		8	100	36,38,48,50	
			50	51,52,53,54	
		無通電		35,37,47,49,56	
		初期解体※		33,34	

※：初期解体とは、各養生環境において通電を開始する直前に解体した供試体を示す。



## 2.2 通電方法および測定項目

各供試体の通電では、各曝露環境において通電電流量および通電時間が同一である供試体を直列に複数個接続した。図-2.2.1には、例として3体の供試体を接続した場合の接続状況を示した。

また、湿潤環境では、同一回路あるいは、他回路の供試体から防食電流が侵入する可能性があるため、各供試体をプラスチック容器に入れて、防食電流の迷走が生じないように絶縁した。

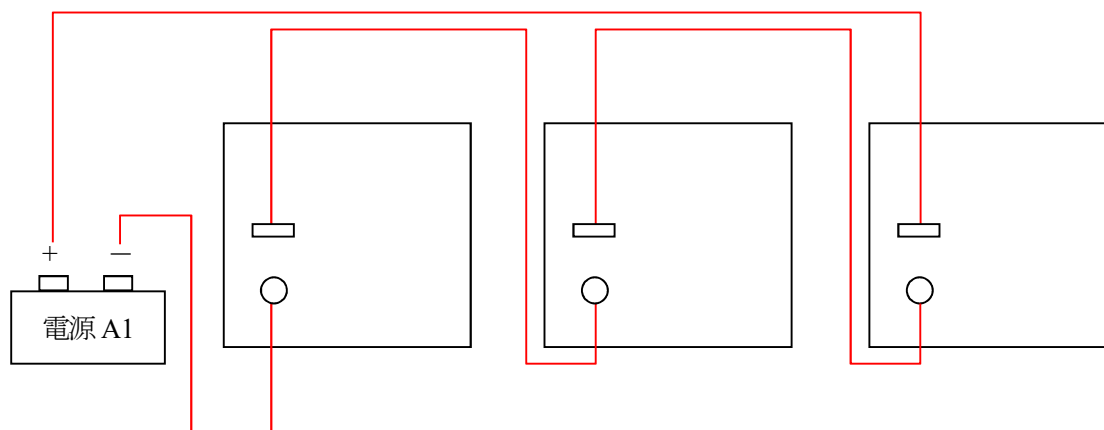


図-2.2.1 通電時の接続状況 (3体の供試体を同一電流量で供給する場合の例)

本試験では、各曝露環境に供試体を静置し、約4ヶ月後に通電を開始した。通電開始直前には、通電時の防食電流密度および初期の内部鋼材の分極性状を把握するため、すべての供試体で陰分極による分極曲線を測定した。初期防食電流密度は、得られた分極曲線から目標シフト量となるように求めている。なお、本報告書における防食電流密度は、通電電流密度を鋼材表面積で除することで算出した。通電を開始した後は、約3ヶ月ごとに内部鋼材のオン電位、インスタントオフ電位、通電停止4時間後および通電停止24時間後のオフ電位を測定し、24時間後復極量を参考にして、防食電流密度を調整した。また、一部供試体では、シート型のSSE電極を供試体側面に張り付け、データログを用いて内部鋼材のオン電位および通電停止中のオフ電位を連続的に測定した。

さらに、通電開始直前および通電経過9ヶ月後に各通電条件から2体の供試体を解体し、内部鋼材の腐食状況の目視確認および腐食減量を測定している。

供試体解体後、内部鋼材は、腐食減量を測定するために、2-メルカプトベンズチアゾールをインヒビターとして使い、クエン酸二アンモニウム10%水溶液に浸漬し、腐食生成物を除去後、重量を測定した。なお、測定した腐食減量  $W$  を用いて(1)式より、腐食電流量  $i$  を算出し、鋼材の有効面積  $A$  で除する事で腐食電流密度 ( $\mu A/cm^2$ ) を求めた。なお、通電後の腐食電流密度に関しては、通電開始後の評価を行うため、初期腐食減量を差し引いた腐食量と通電期間 (時間) を用いて評価している。

$$W=K \cdot i \cdot t \quad (1)式$$

$K$  : 鉄の電気化学当量 (1.042 g/A · h)

$i$  : 腐食電流量 (A)

$t$  : 時間 (h)

### 3. 実験結果

#### 3.1 各曝露環境における防食効果の検証

##### 3.1.1 試験室温 20°C, 湿度 60%の試験結果

###### (1) 無通電供試体の自然電位

図-3.1.1.1には、無通電供試体における自然電位の経時変化を示す。本環境での塩化物イオン量は、 $12.0 \text{ kg/m}^3$ のみであり、鋼材周辺の塩化物イオンは、多量に存在する環境であった。試験開始当初は、 $-600 \sim -500 \text{ mV vs.CSE}$ の範囲であり、ASTMの自然電位による腐食鑑定では、「90%以上の確率で腐食あり」の範囲であり、供試体間における電位差のバラツキも小さかった。しかし、曝露開始から150日程度までは、供試体間にバラツキがあり、 $-550 \sim -350 \text{ mV vs.CSE}$ の範囲で推移した。曝露開始から230日以降、自然電位は、貴側に移行し $-350 \text{ mV vs.CSE}$ より貴側で推移し、ASTM基準による「不確定」の範囲となり、供試体間での電位差も小さくなる傾向を示した。

これらの状況から、全体的には、腐食が進行している状況であると判断することができる。

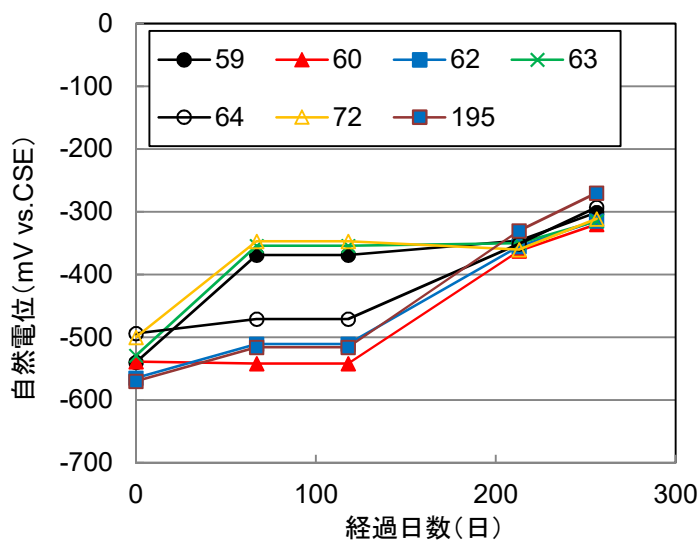


図-3.1.1.1 自然電位の経時変化 (20°C 60%  $[\text{Cl}^-] 12.0 \text{ kg/m}^3$ )

## (2) 防食電流密度

図-3.1.1.2 および 3.1.1.3 には、それぞれシフト量 100mV および 50mV における防食電流密度の経時変化を示す。防食電流密度は、通電当初は、25 ~ 50 mA/m<sup>2</sup> と大きな電流密度であり、目標シフト量 50 mV では、100 mV の約半分程度の電流密度であった。いずれの供試体も通電の経過とともに防食電流密度が低下し、目標シフト量 50 mV では、通電開始後 60 日程度、100 mV では通電開始後 120 日程度で 5 mA/m<sup>2</sup> まで低下した。これは、電気防食による通電により、鋼材表面で生成される水酸化物イオンの増加の影響およびコンクリートの硬化反応に起因するコンクリートの緻密化による塩化物イオンの固定化による鋼材表面での腐食環境の改善であると考えられる。

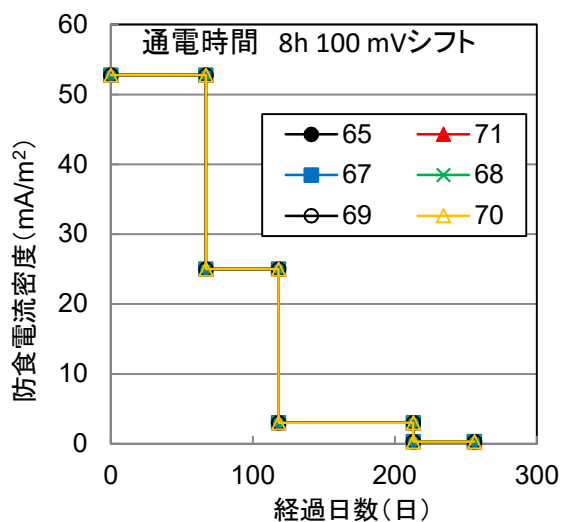


図-3.1.1.2 防食電流密度の経時変化  
(20°C 60% [Cl<sup>-</sup>]12.0kg/m<sup>3</sup> 100mV シフト)

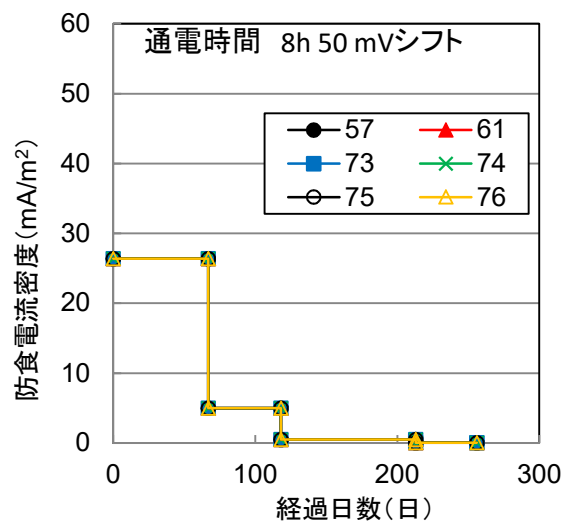


図-3.1.1.3 防食電流密度の経時変化  
(20°C 60% [Cl<sup>-</sup>]12.0kg/m<sup>3</sup> 50mV シフト)

### (3) 復極量

4 時間後の復極量の経時変化と平均復極量を図-3.1.1.4 ~ 3.1.1.6, 24 時間後の復極量の経時変化と平均復極量を図-3.1.1.7 ~ 3.1.1.9 に示す。

同一条件下の復極量には大きなバラツキは確認されず、概ね同様の傾向を示した。しかし、いずれの目標シフト量においても平均 4 時間後復極量および平均 24 時間後復極量は、概ね目標値の 2 倍程度となった。経時的には、通電の経過にしたがって、目標シフト量に近い値になる傾向を示している。初期復極量が目標復極量よりも極めて大きいのは、コンクリートの硬化反応によって緻密化することによる鋼材周辺の環境改善であると考えられる。また、防食電流密度は、先に示したように通電の経過とともに低減したものの、通電の長期化によって、鋼材周辺の腐食環境が改善されることが知られており、この効果によって少ない防食電流密度で大きな分極・復極をする状態となったと考えられる。

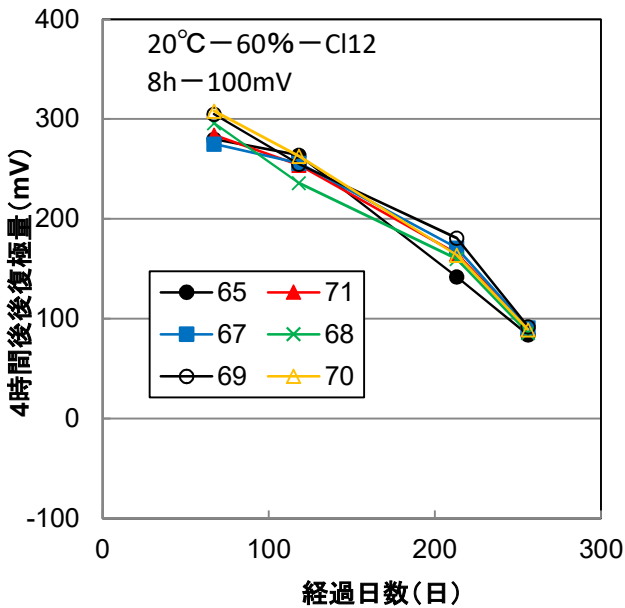


図-3.1.1.4 4 時間後復極量の経時変化  
(20°C 60% [Cl<sup>-</sup>]12.0kg/m<sup>3</sup> 100mV シフト)

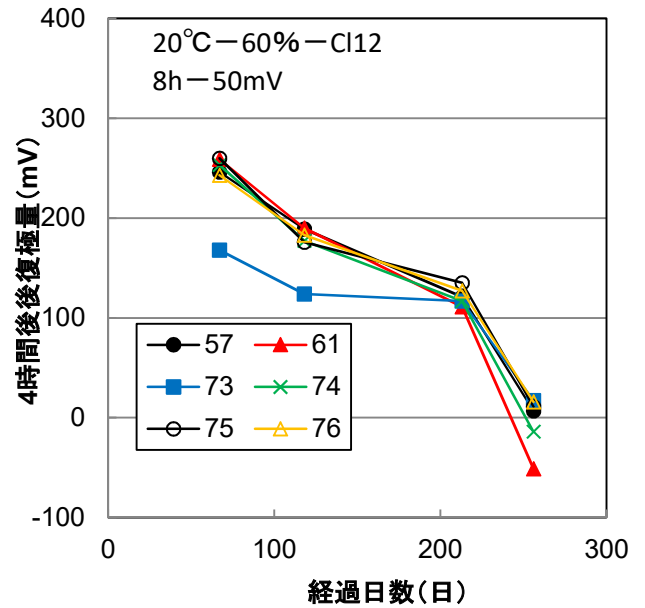


図-3.1.1.5 4 時間後復極量の経時変化  
(20°C 60% [Cl<sup>-</sup>]12.0kg/m<sup>3</sup> 50mV シフト)

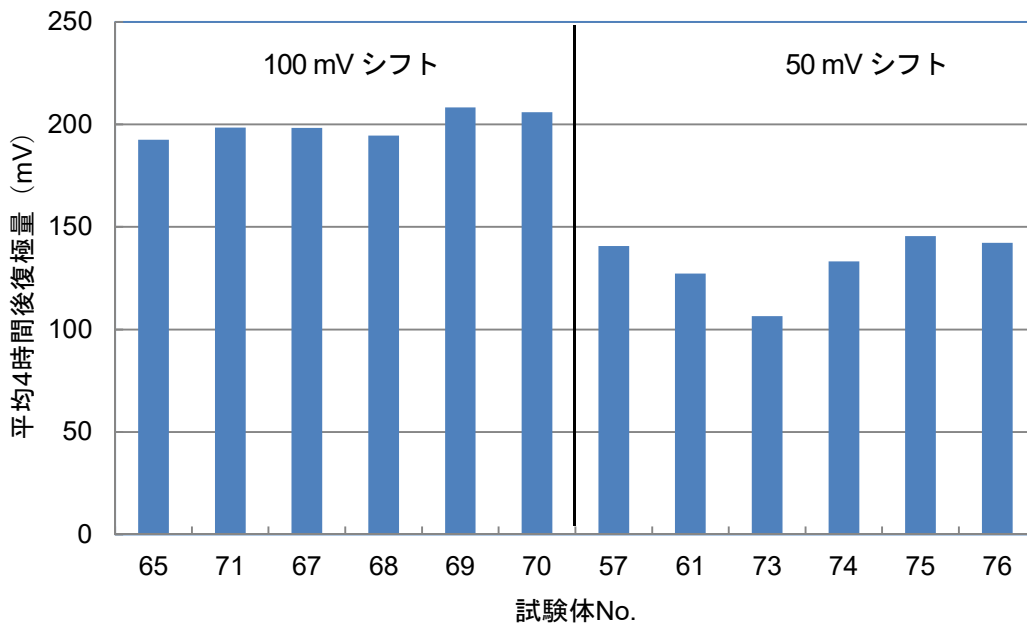


図-3.1.1.6 4 時間後復極量の平均

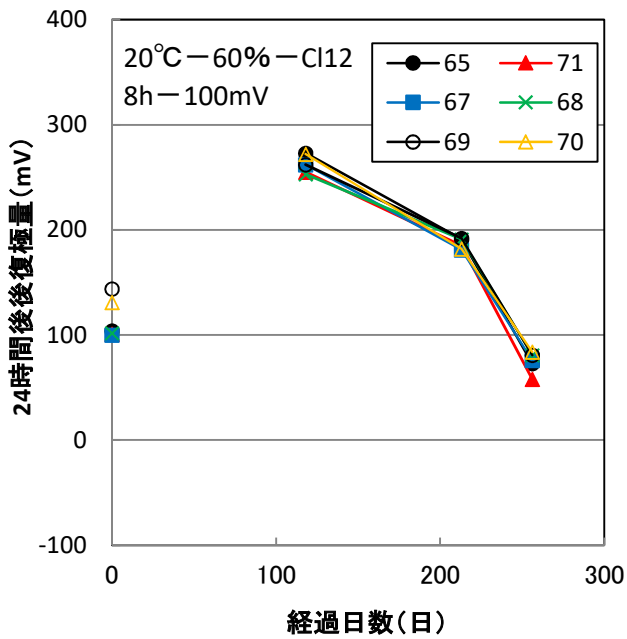


図-3.1.1.7 24時間後復極量の経時変化  
(20°C 60% [Cl<sup>-</sup>]12.0kg/m<sup>3</sup> 100mV シフト)

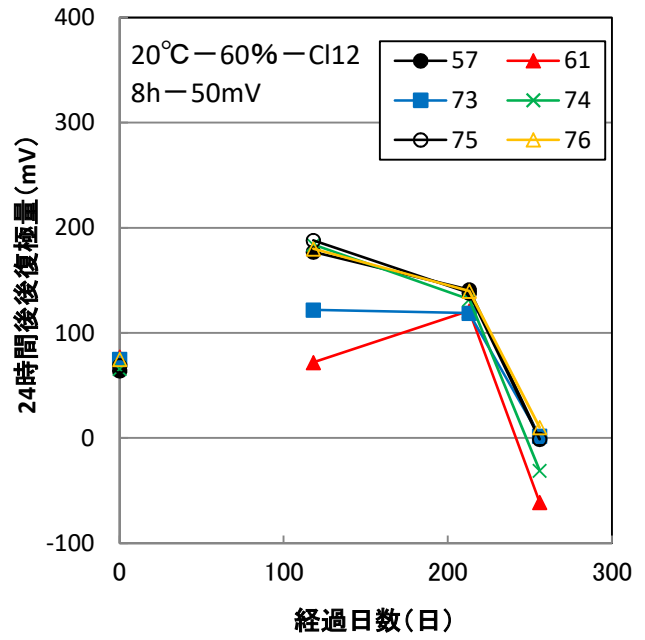


図-3.1.1.8 24時間後復極量の経時変化  
(20°C 60% [Cl<sup>-</sup>]12.0kg/m<sup>3</sup> 50mV シフト)

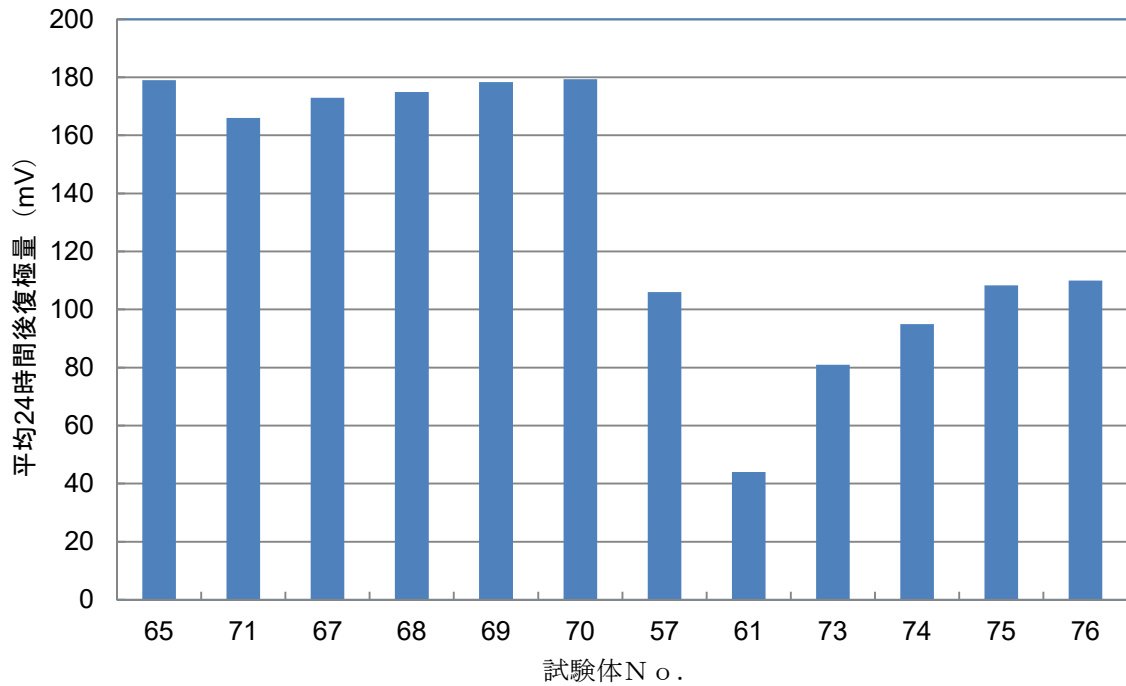


図-3.1.1.9 24時間後復極量の平均

図-3.1.1.10 および 3.1.1.11 には、4時間後復極量と24時間後復極量の差の経時変化を示す。なお、この値がプラスを示す場合は、24時間後復極量が4時間後復極量と比較して大きいことを示している。この結果、いずれの目標シフト量でも、目標シフト量の約2倍のシフト量が得られていた通電開始から200日程度までは、24時間後復極量が大きく、通電停止から24時間までの期間の内部鋼材は、復極状態にある。一方で、目標シフト量に概ね調整された通電開始後250日では、いずれの供試体も24時間後復極量が4時間後復極量と比較して小さくなることが確認された。

この状況は、間欠通電を実施している際、防食電流の供給が止まる間に内部鋼材が腐食状態に移行することが示唆される。間欠通電では、通電が停止されている期間に復極過程であれば防食効果が期待できるが、その期間内に腐食進行過程に電位が移行する場合には、防食効果が期待できない。

本環境では、概ね 24 時間の通電停止時は、復極過程であったが、目標シフト量の 2 倍が確保された時期が多く、シフト量が大きかったことに依存している可能性も考えられる。したがって、概ね目標シフト量となった今後の状況を観察する必要がある。また、復極量あるいは分極量を設定する際には、目標量を大きくして、復極時間を出来るだけ長くするなどの通電における設定方法が今後の検討課題である。

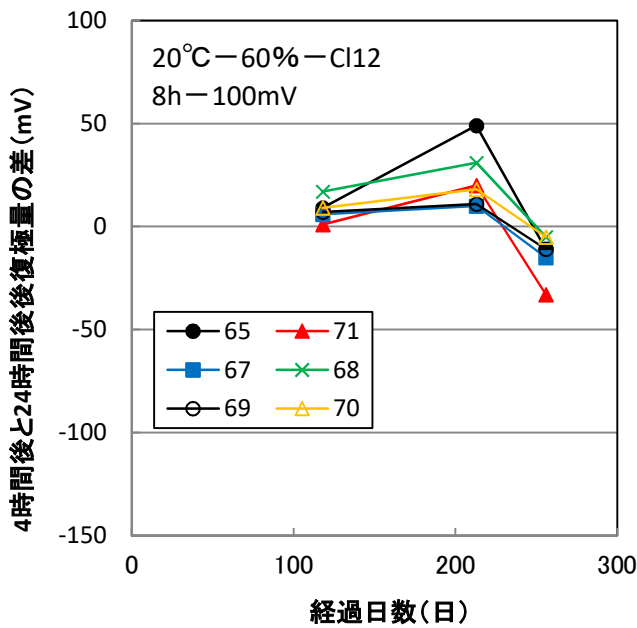


図-3.1.1.10 4時間後と24時間後復極量の差  
(20°C 60% [Cl<sup>-</sup>]12.0kg/m<sup>3</sup> 100mV シフト)

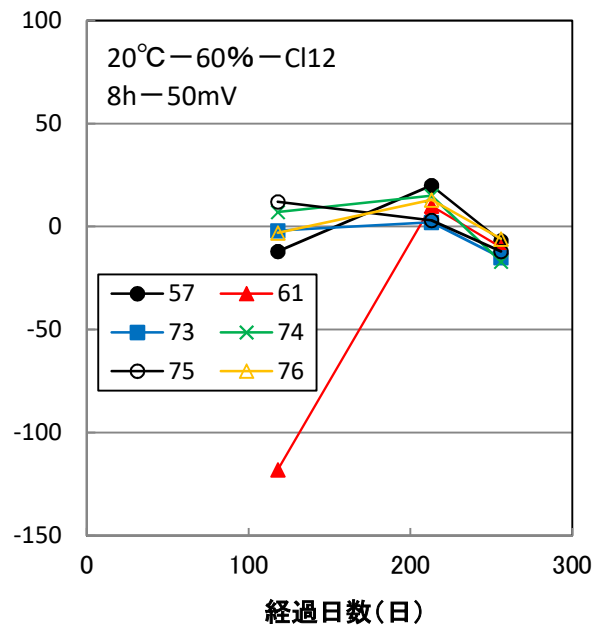


図-3.1.1.11 4時間後と24時間後復極量の差  
(20°C 60% [Cl<sup>-</sup>]12.0kg/m<sup>3</sup> 50mV シフト)

(4) 通電停止後の電位変化

図-3.1.1.12~3.1.1.15には、通電停止4時間後および24時間後の鋼材電位を示す。

通電停止時間に関わらず、概ね同様の電位挙動を示しており、通電開始から100~200日の期間における通電停止後の電位は、-400 ~ -350 mV vs.CSE の範囲の電位で維持されている。なお、通電停止時間による大きな違いはない。この電位範囲は、ASTM 基準における「90%以上の確率で腐食あり」を判断される領域である。

一方で、通電開始から250日を経過した2017年8月の時点では、通電停止24時間後電位が通電停止4時間後電位と比較して若干卑側に移行している状況が確認できる。

これは、先の復極量で示した通り、通電停止期間に内部鋼材が腐食状態に移行することを示唆する結果と考える。

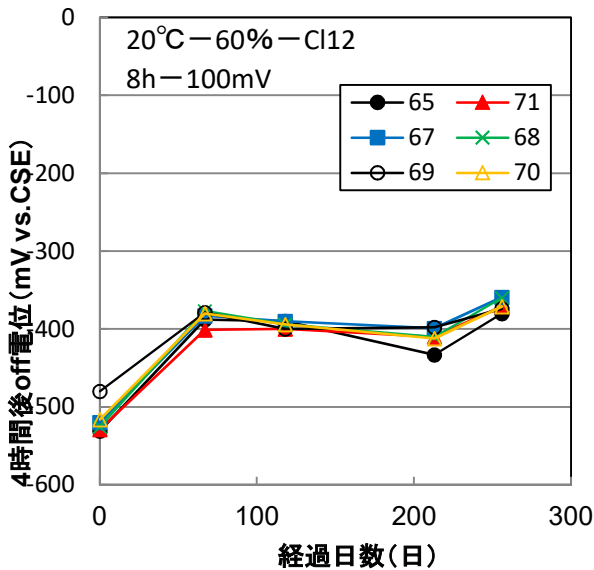


図-3.1.1.12 通電停止4時間後電位の経時変化 (20°C 60% [Cl<sup>-</sup>]12.0kg/m<sup>3</sup> 100mV シフト)

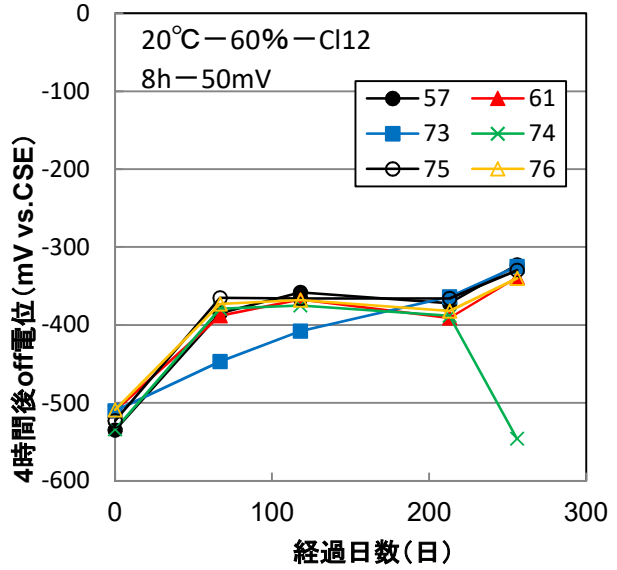


図-3.1.1.13 通電停止4時間後電位の経時変化 (20°C 60% [Cl<sup>-</sup>]12.0kg/m<sup>3</sup> 50mV シフト)

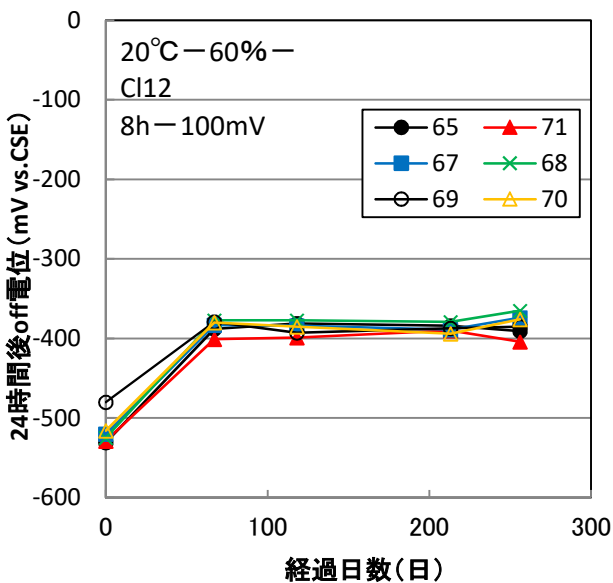


図-3.1.1.14 通電停止24時間後電位の経時変化 (20°C 60% [Cl<sup>-</sup>]12.0kg/m<sup>3</sup> 100mV シフト)

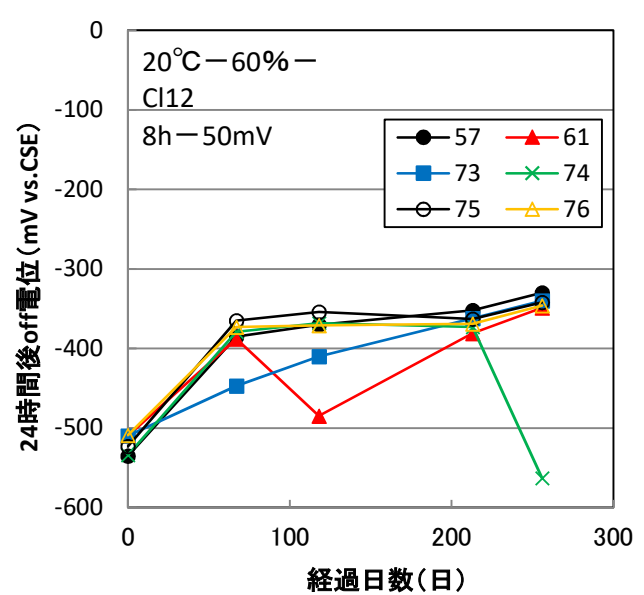


図-3.1.1.15 通電停止24時間後電位の経時変化 (20°C 60% [Cl<sup>-</sup>]12.0kg/m<sup>3</sup> 50mV シフト)

### (5) 腐食減量率と腐食電流密度

図-3.1.1.16には、通電直前に測定した腐食減量率および通電後約8ヶ月で解体した供試体から得られた鋼材の腐食減量率を示している。この結果、通電直前の腐食減量率も0.25%であった。また、通電約8ヶ月後の腐食減量率も通電直前の腐食減量率は、通電直前の腐食減量を差し引いて示しており、通電を実施することで若干ではあるが、腐食減量率が低下する傾向が確認されている。また、無通電供試体の腐食減量率も通電直前の腐食減量率と比較して、小さいことより、経過時間に伴いコンクリートの硬化反応が進むことでコンクリートの緻密化が進んだ影響もあると考えられる。なお、シフト量による大きな差は、この試験環境では確認されていない。

そこで、図-3.1.1.17には、ファラデー式を用いて求めた腐食電流密度を示している。腐食電流密度は、通電直前で1.1~1.4  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 程度であり、CEBの判定基準で激しい腐食速度であると評価できる。一方で、通電開始から約8ヶ月後において、無通電においても腐食電流密度が0.3  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 程度まで低下している。したがって、先に示したように経過時間に伴いコンクリートの緻密化が進んだ影響を受けていることの裏付けとなる。通電供試体と無通電供試体を比較するといずれのシフト量においても0.2  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 程度の腐食電流密度となっており、通電による防食効果が若干確認される。また、シフト量で比較すると、100 mVシフトでは、50 mVシフトよりも腐食電流密度が小さくなる傾向が見られるが、現時点では明確な差が見られない。

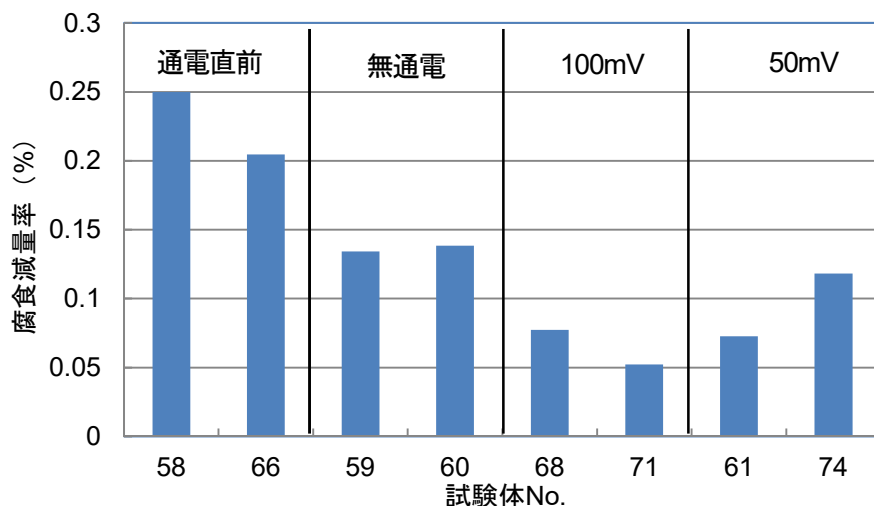


図-3.1.1.16 腐食減量率 (20°C 60% [Cl<sup>-</sup>]12.0kg/m<sup>3</sup>)

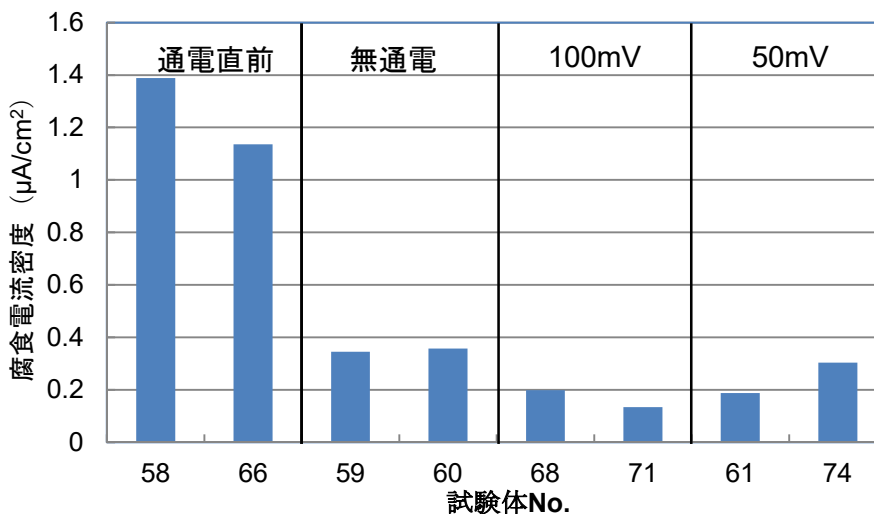


図-3.1.1.17 腐食電流密度 (20°C 60% [Cl<sup>-</sup>]12.0kg/m<sup>3</sup>)



(6) 分極曲線

図-3.1.1.18~3.1.1.20には、それぞれ目標シフト量100, 50mV および無通電供試体の通電開始直前と解体時の分極曲線を示す。なお、図中凡例は、例えば、「68-解体」の時、供試体 No.68 の通電約8ヶ月後の解体時の意味を持つ。

通電後のカソード分極曲線は、いずれの供試体においても、低電流密度領域で差が確認されるが、高電流密度領域ではほぼ同様のカソード曲線を描いており、酸素拡散限界の影響は確認されていない。

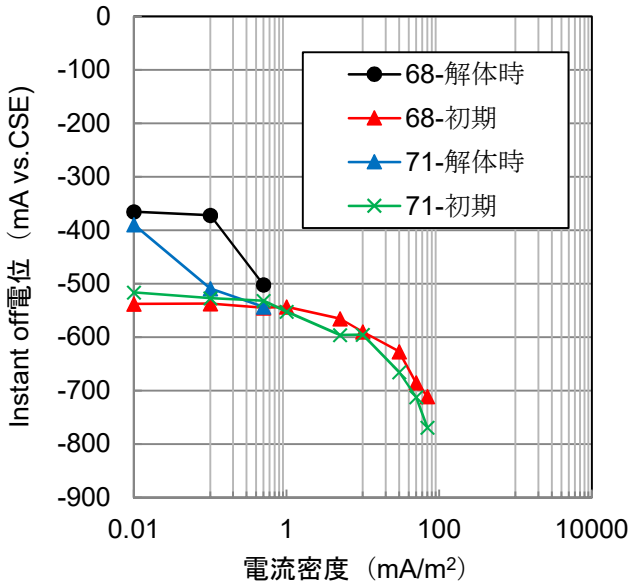


図-3.1.1.18 カソード分極曲線  
(20°C 60% [Cl<sup>-</sup>]12.0kg/m<sup>3</sup> 100 mV シフト)

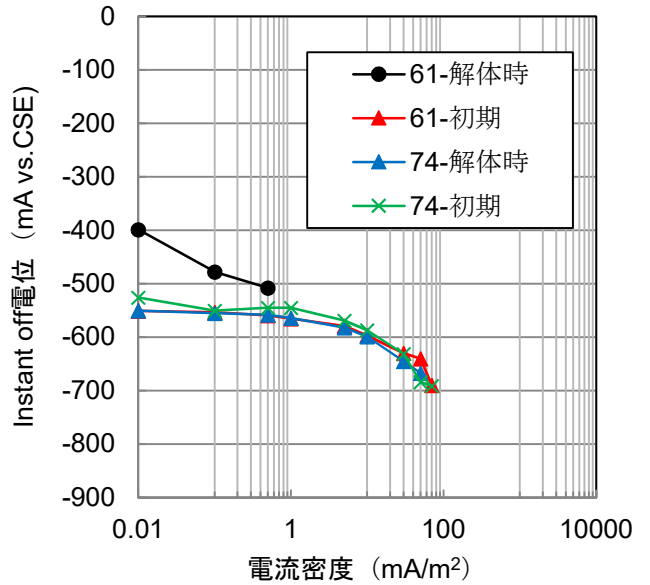


図-3.1.1.19 カソード分極曲線  
(20°C 60% [Cl<sup>-</sup>]12.0kg/m<sup>3</sup> 50 mV シフト)

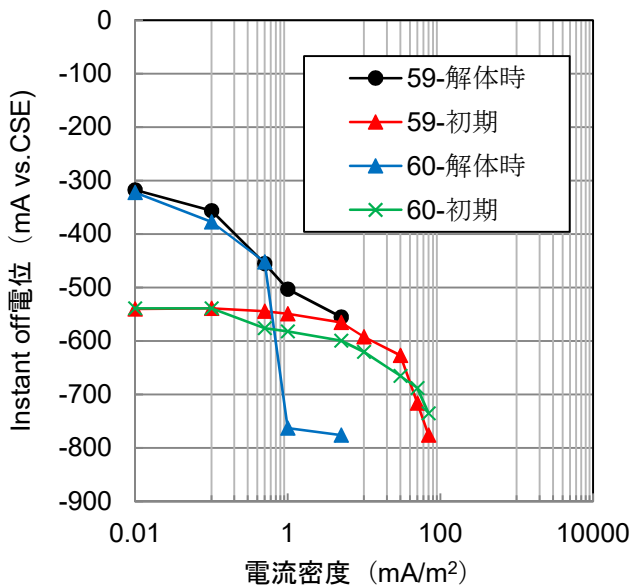


図-3.1.1.20 カソード分極曲線  
(20°C 60% [Cl<sup>-</sup>]12.0kg/m<sup>3</sup> 無通電)

### 3.1.2 20°C90%RH

#### (1) 無通電供試体の自然電位

塩化物イオン量  $12\text{kg/m}^3$  (以下、 $12\text{kg}$  と称す) を混入した無通電供試体の自然電位の経時変化を図-3.1.2.1 に示す。暴露開始前の自然電位は $-480\text{mV vs.CSE}$  から $-570\text{mV vs.CSE}$  であり、ASTM の判定基準では「90%以上の確率で腐食あり」であった。暴露期間 270 日後と暴露開始前の自然電位を比較すると、いずれの供試体も貴化し、270 日における自然電位は $-240\text{mV vs.CSE}$  から $-430\text{mV vs.CSE}$  であり、「不確定」、または「90%以上の確率で腐食あり」の判定となった。暴露期間の増加に伴う自然電位の経時変化に着目すると、140 日までは貴化傾向を示し、その後 270 日までほとんど変化がないことが分かる。140 日までの貴化傾向についてはセメントの水和反応により、鉄筋周囲の環境が改善されたことによると推察した。

次に、塩化物イオン量  $2.4\text{kg/m}^3$  (以下、 $2.4\text{kg}$  と称す) を混入した無通電供試体の自然電位の経時変化を図-3.1.2.2 に示す。暴露開始前の自然電位は $-280\text{mV vs.CSE}$  から $-400\text{mV vs.CSE}$  であり、塩化物イオン量  $12\text{kg}$  の供試体と比較して貴な電位であった。また、ASTM の判定基準では「不確定」、または「90%以上の確率で腐食あり」であった。暴露期間 270 日後と暴露開始前の自然電位を比較すると、いずれの供試体も貴化し、270 日における自然電位は $-130\text{mV vs.CSE}$  から $-350\text{mV vs.CSE}$  であり、「90%以上の確率で腐食なし」、または「不確定」の判定となった。暴露期間の増加に伴う自然電位の経時変化に着目すると、140 日までは貴化傾向を示し、その後 270 日までは一様でなかった。140 日までの貴化傾向の要因は、塩化物イオン量  $12\text{kg}$  と同様と推察した。

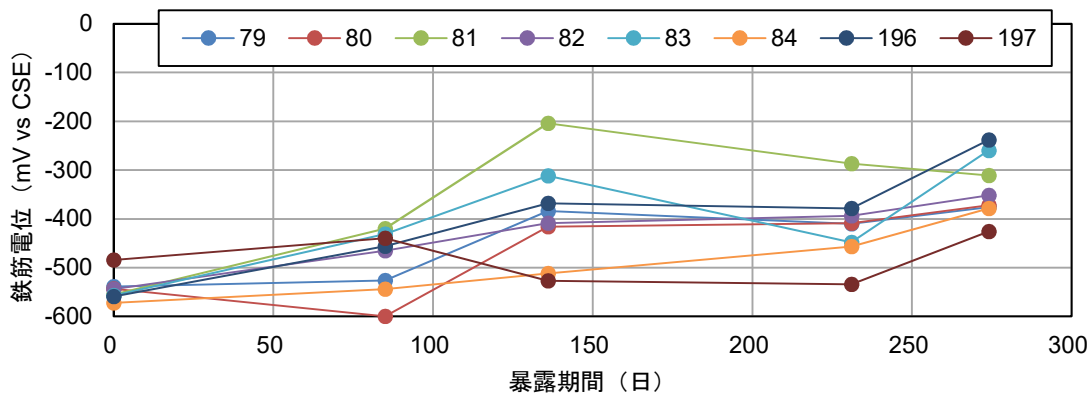


図-3.1.2.1 鉄筋電位の経時変化 (20°C90%RH 塩化物イオン量  $12\text{kg/m}^3$ )

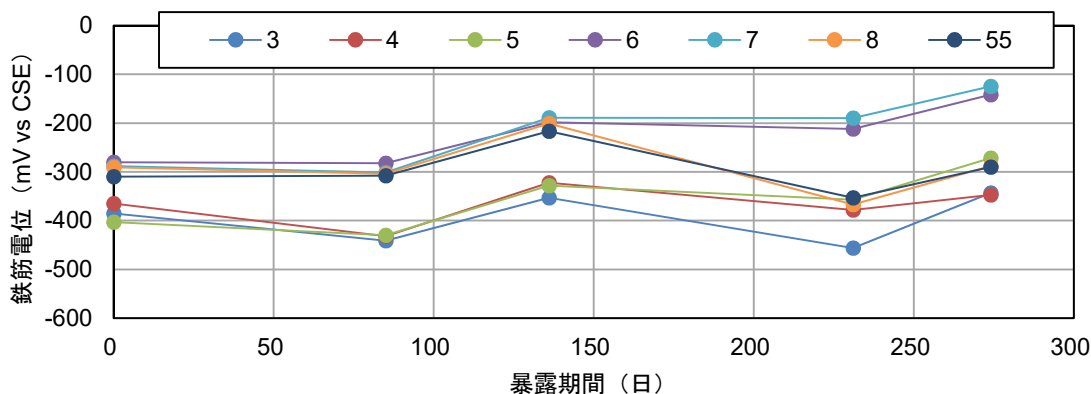


図-3.1.2.2 鉄筋電位の経時変化 (20°C90%RH 塩化物イオン量  $2.4\text{kg/m}^3$ )

## (2) 防食電流密度

通電供試体の防食電流密度の経時変化を図-3.1.2.3に示す。塩化物イオン量12kgと2.4kgの防食電流密度を比較すると、通電開始時では12kgのほうが大きな防食電流が必要であったことが分かる。これは塩化物イオン量の相違により、鋼材表面の活性状態が異なり、12kgのほうがより活性が高い状態であったためと考えられた。

塩化物イオン量12kgについて、通電条件によらず、通電期間の増加に伴って防食電流密度は小さくなった。これは通電によって、鉄筋周囲の環境改善が図られ、腐食速度が低下したためと考えられる。一方、塩化物イオン量2.4kgは、目標シフト量100mVの供試体については通電期間の増加に伴い防食電流密度が小さくなったものの、50mVの供試体では防食電流密度が大きくなったものもあった。これは、目標シフト量50mVでは防食電流密度が小さく、鉄筋の腐食速度（腐食電流密度）のほうが大きかったことを示唆しているものと推察した。

## (3) 復極量

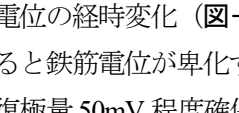
24時間後復極量の経時変化を図-3.1.2.4に、24時間後復極量の平均値を図-3.1.2.5に示す。復極量は目標シフト量を満足するように防食電流密度を調整し、概ね防食電流密度の増減とともに復極量も増減したが、目標シフト量を大きく上回るものや下回るもの、復極量がマイナスになるものが確認された。

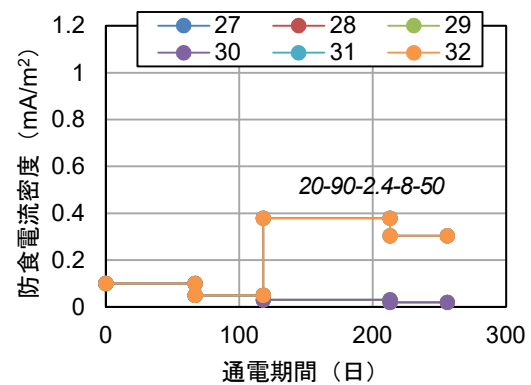
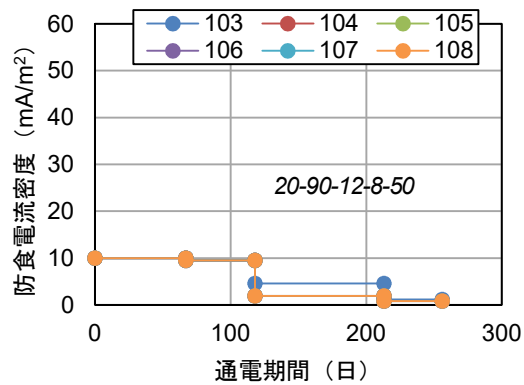
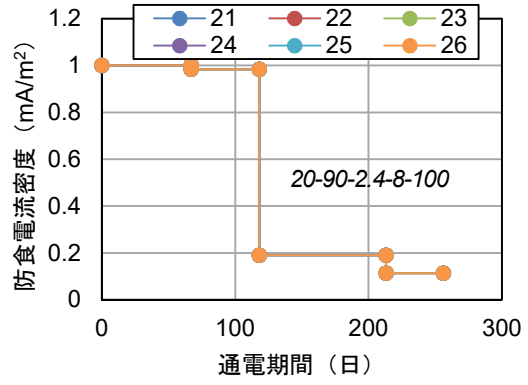
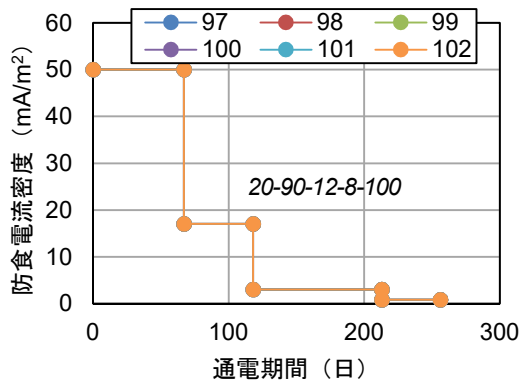
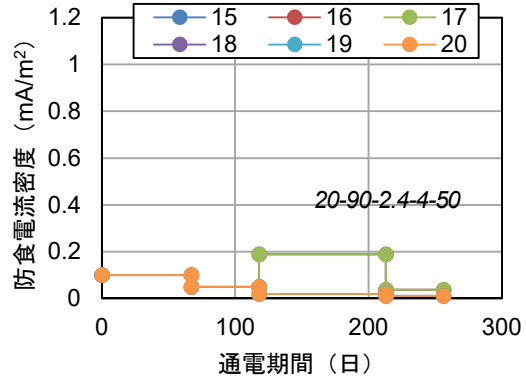
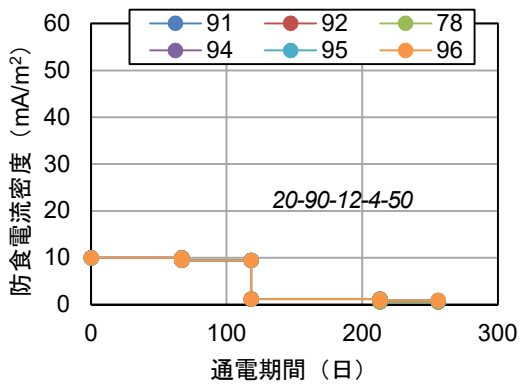
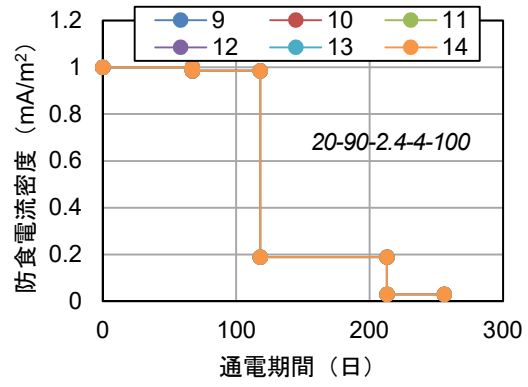
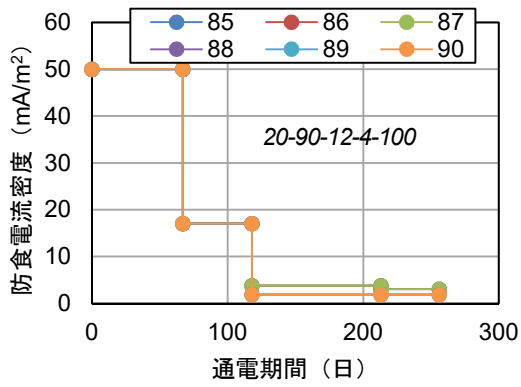
次に、24時間後復極量と4時間後復極量との差の経時変化を図-3.1.2.6に示す。4時間後復極量と比較して24時間後復極量が多い、または同程度であれば、通電により鉄筋周囲の環境や鉄筋表面の状態が改善されており、防食効果が確認される。一方、4時間後復極量よりも24時間後復極量が少ない場合は、鉄筋電位が卑化していることを示しており、防食効果が小さいと考えた。塩化物イオン量2.4kg、通電時間8時間の供試体に着目すると、通電期間260日では目標シフト量100mVの供試体No.21と22が、50mVの供試体No.29と32が24時間後復極量と4時間後復極量との差がマイナスとなった。これらについて24時間後の復極量をみると、いずれも目標シフト量を満足していなかった。このことから、これらの供試体については、シフト量の不足、つまり防食電流が不足していたことが考えられる。しかしながら、この考えにあてはまらない供試体も存在するため、今後、実験の継続に際して注視したいと考えた。

## (4) 通電停止24時間後の鉄筋電位

通電停止24時間後の鉄筋電位（24時間後オフ電位）の経時変化を図-3.1.2.7に示す。塩化物イオン量12kgの供試体について、通電開始前の自然電位は無通電供試体と同様に「90%以上の確率で腐食あり」の判定であった。一部の供試体を除くと、通電により120日までの期間は貴化傾向を示した。その後260日までの期間はほとんど変化がみられなかった。この120日までの貴化は無防食と同様であるため、セメントの水和反応により自由水などが減少することによって、鉄筋周囲の環境が変化することによるものと考えた。260日時点における鉄筋電位は「不確定」、または「90%以上の確率で腐食あり」と判定され、無通電供試体と同様であった。ここで、24時間後復極量と通電停止24時間後の鉄筋電位の経時変化を図-3.1.2.8に示す。24時間後復極量が小さくなると鉄筋電位が卑化する傾向にあった。特に復極量が50mVを下回るとより顕著にみられ、復極量が100mV程度で鉄筋電位は貴化する傾向にあった。このことから、本試験条件においては、鉄筋周囲の環境や鉄筋の表面状態の改善を図るためには100mV程度の復極量が必要と考えられた。

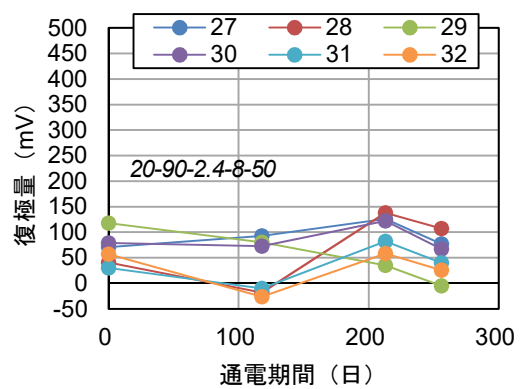
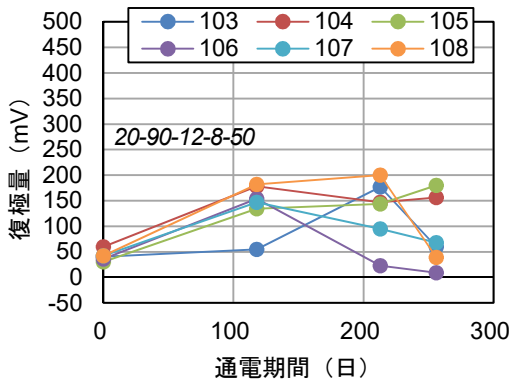
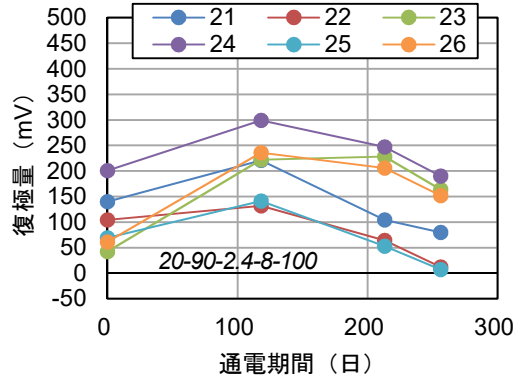
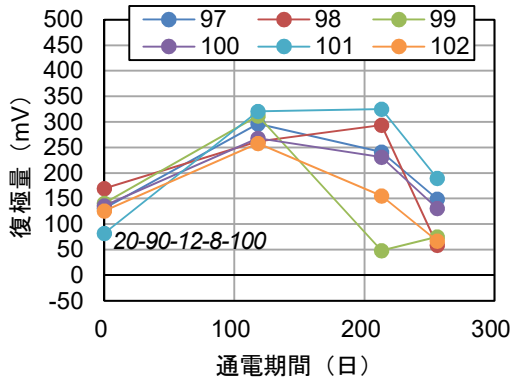
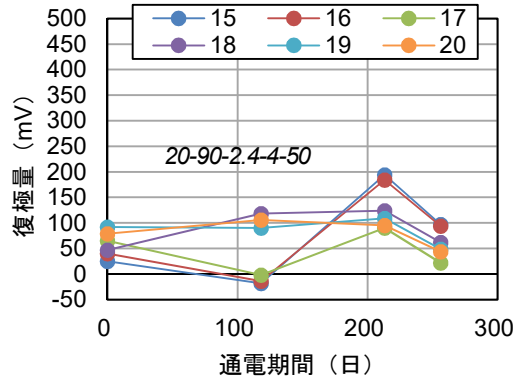
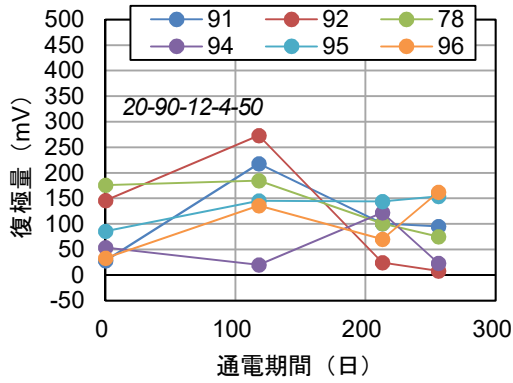
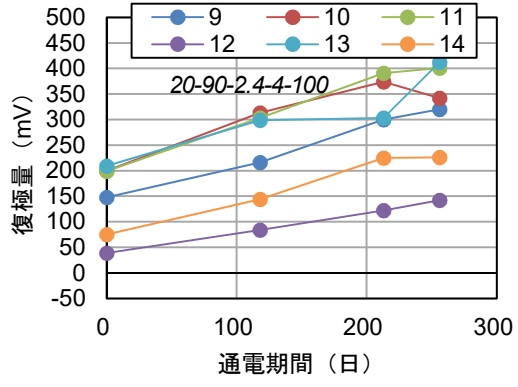
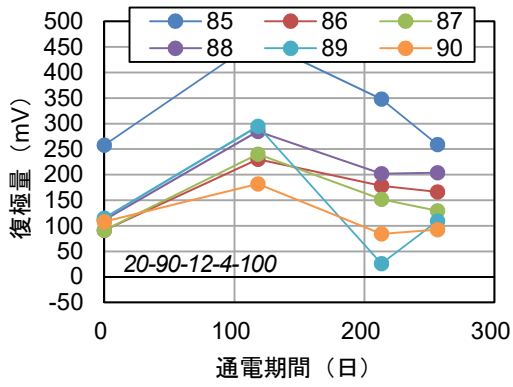
次に塩化物イオン量2.4kgについて、通電開始時の鉄筋電位は「不確定」、または「90%以上の確率で腐食あり」の判定であり、無通電供試体と同様であった。通電後の鉄筋電位の変化は、通電条件によらず、ほとんど

の供試体で貴化傾向となった。無通電供試体では、暴露 140 日まで貴化傾向であったものの、その後は貴化傾向を示す供試体だけでなく、電位の変化が小さいものもみられた。通電 260 日における鉄筋電位は「90%以上の確率で腐食なし」、または「不確定」の判定であった。ここで、24 時間後復極量と通電停止 24 時間後の鉄筋電位の経時変化（図-3.1.2.8) をみると、塩化物イオン量 12kg の供試体と同様に 24 時間後復極量が小さくなると鉄筋電位が卑化する傾向にあった。ただし、塩化物イオン量 12kg とは鉄筋電位が卑化する復極量が異なり、復極量 50mV 程度確保されていれば、鉄筋電位は貴化傾向を示した。これらの結果から、供試体に含まれる塩化物イオン量により防食効果の確保できる復極量が異なることが示唆された。

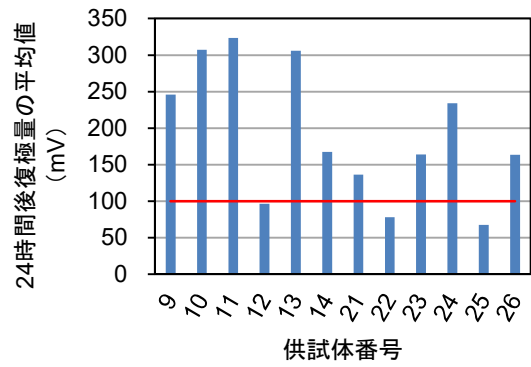
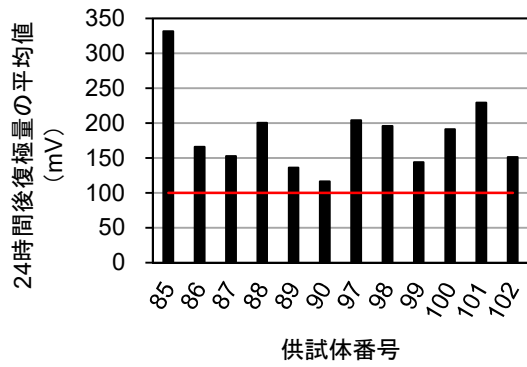


(図中に記載の数字 (A-B-C-D-E) は供試体の種別, 試験条件を示しており,  
A は温度, B は湿度, C は塩化物イオン量, D は通电時間, E は目標シフト量である)

図-3.1.2.3 防食電流密度の経時変化

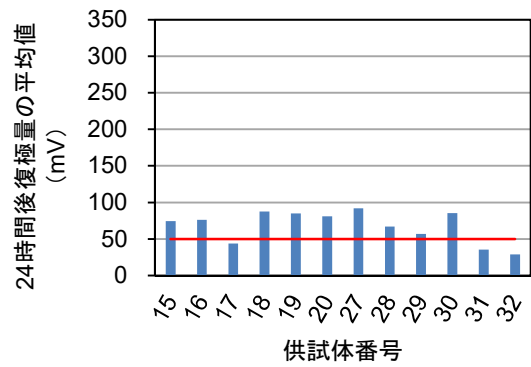
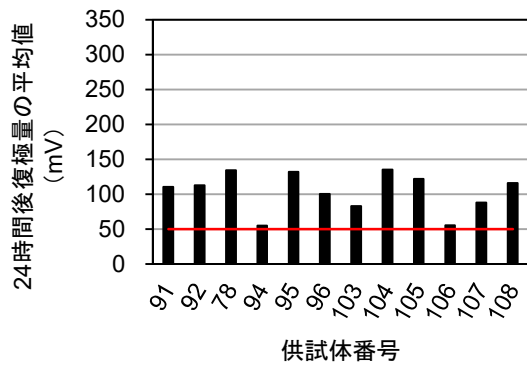


(図中に記載の数字 (A-B-C-D-E) は供試体の種別, 試験条件を示しており, Aは温度, Bは湿度, Cは塩化物イオン量, Dは通电時間, Eは目標シフト量である)  
 図-3.1.2.4 24時間後復極量の経時変化 (通电期間0日は24時間後分極量)



(a)塩化物イオン量 12kg/m<sup>3</sup>, 目標シフト量 100mV

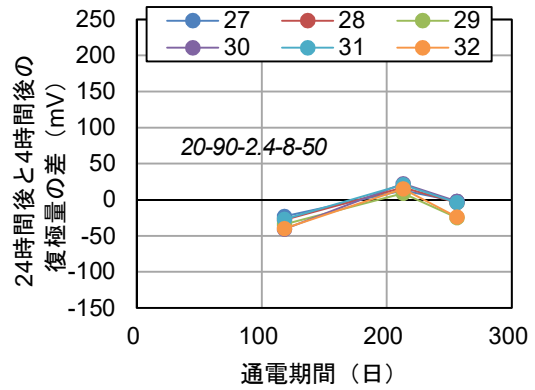
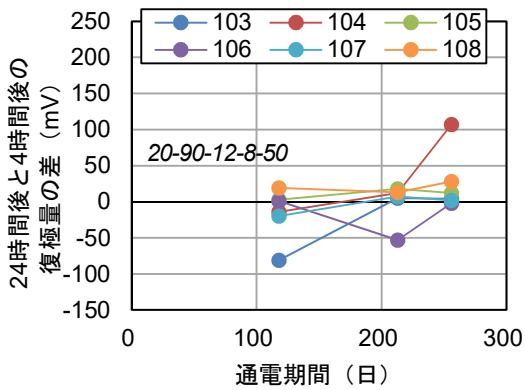
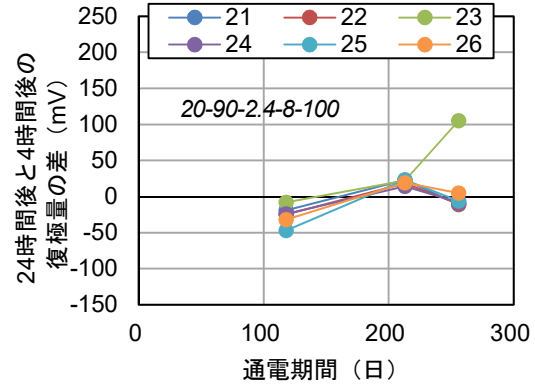
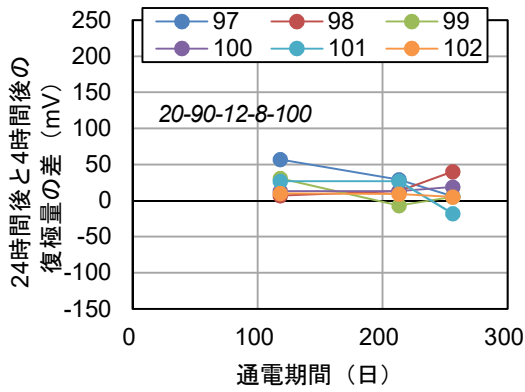
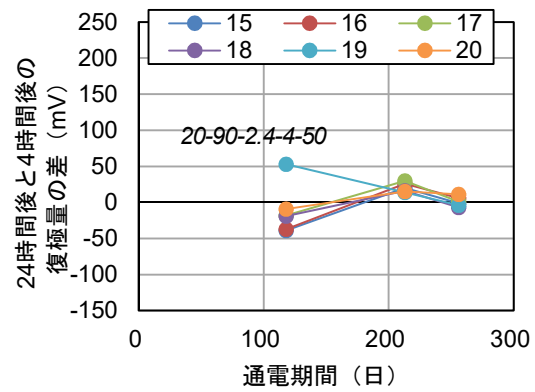
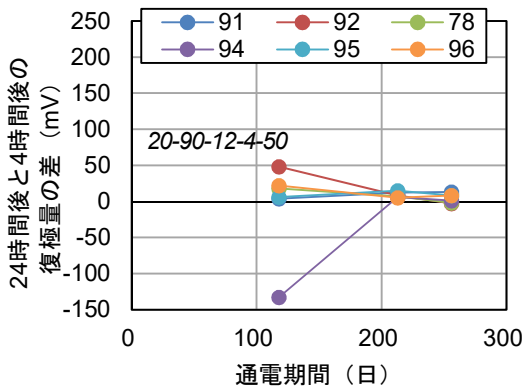
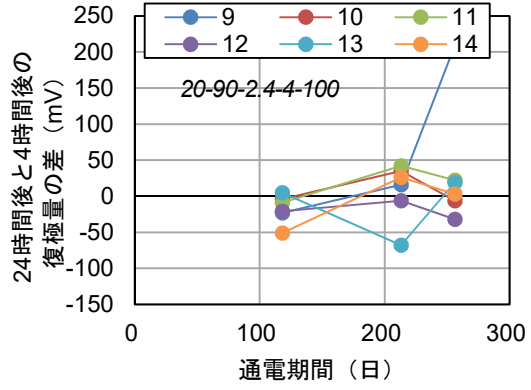
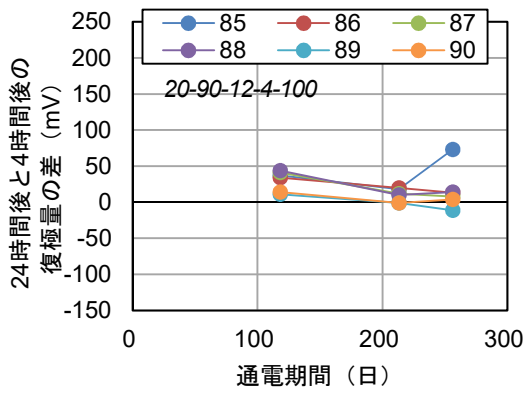
(c)塩化物イオン量 2.4kg/m<sup>3</sup>, 目標シフト量 100mV



(b)塩化物イオン量 12kg/m<sup>3</sup>, 目標シフト量 50mV

(d)塩化物イオン量 2.4kg/m<sup>3</sup>, 目標シフト量 50mV

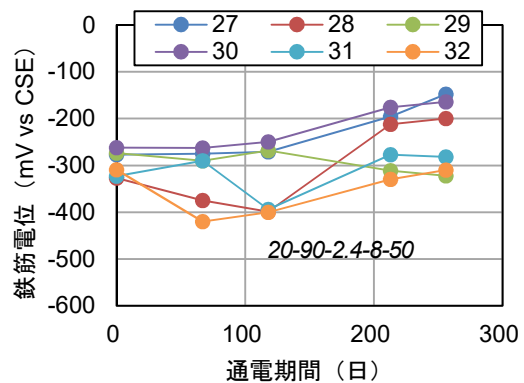
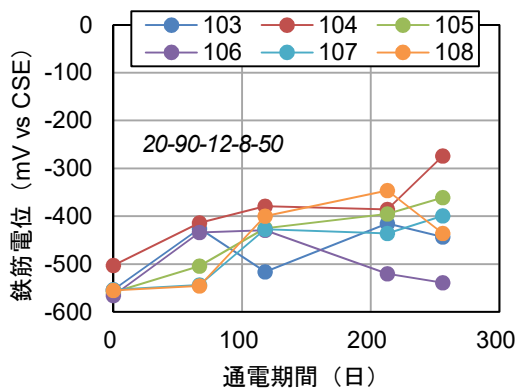
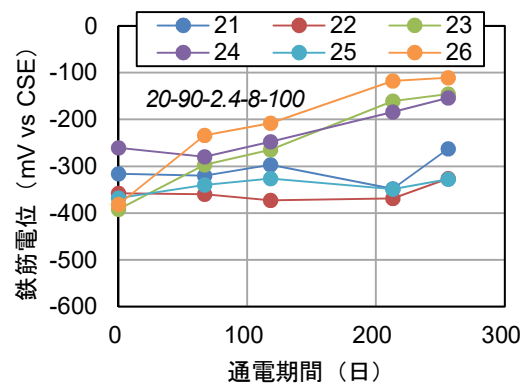
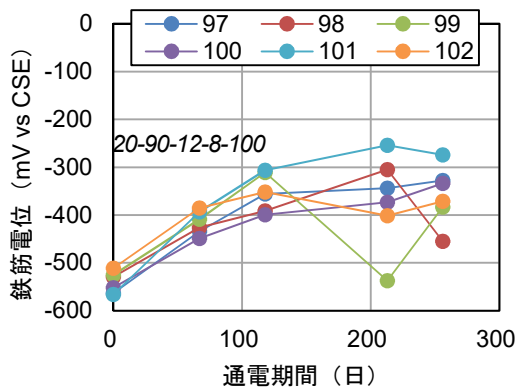
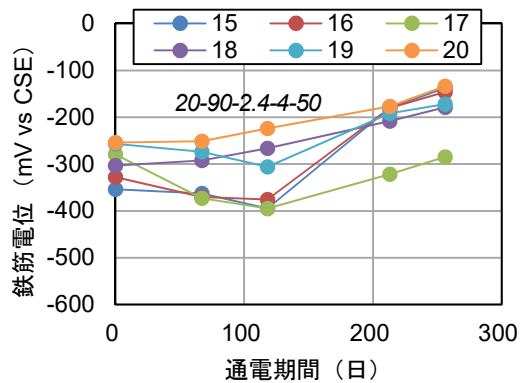
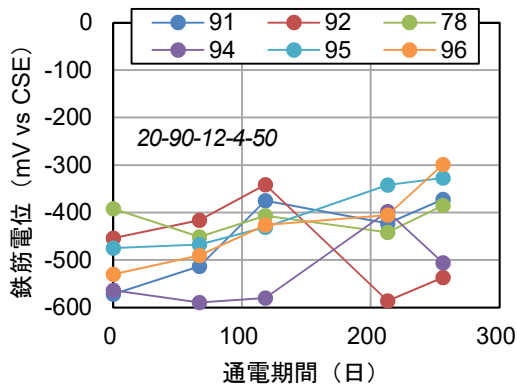
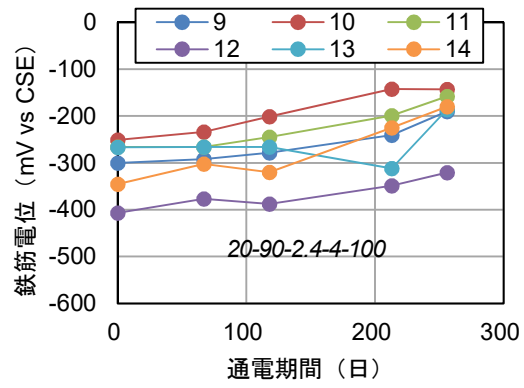
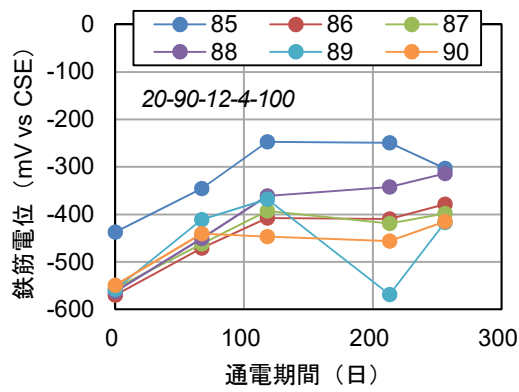
図-3.1.2.5 24時間後復極量の平均値



(図中に記載の数字 (A-B-C-D-E) は供試体の種別, 試験条件を示しており, Aは温度, Bは湿度, Cは塩化物イオン量, Dは通電時間, Eは目標シフト量である)

図-3.1.2.6 24時間後復極量と4時間後復極量との差の経時変化

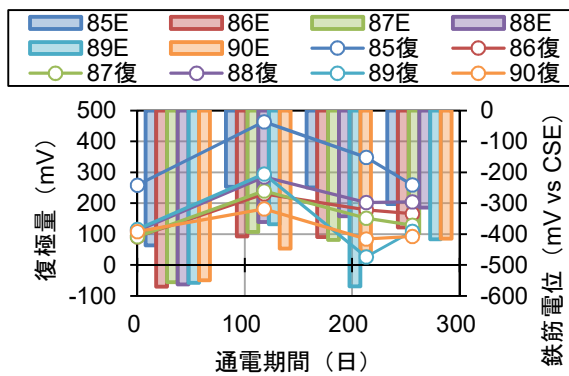




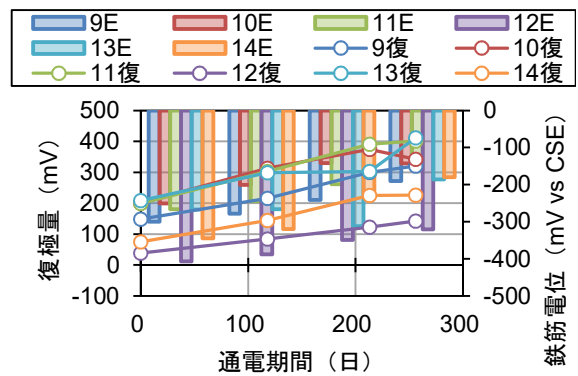
(図中に記載の数字 (A-B-C-D-E) は供試体の種別, 試験条件を示しており,

Aは温度, Bは湿度, Cは塩化物イオン量, Dは通电時間, Eは目標シフト量である)

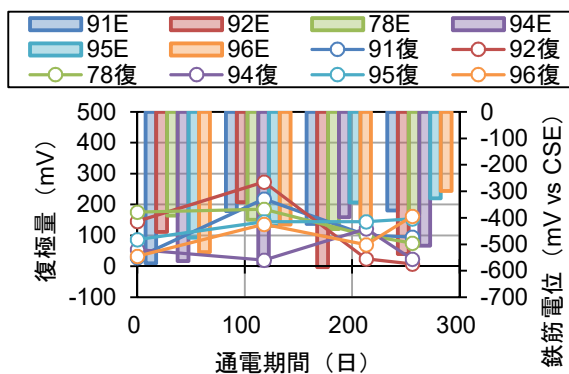
図-3.1.2.7 通电後の鉄筋電位 (24 時間後オフ電位) の経時変化 (通电期間 0 日は自然電位)



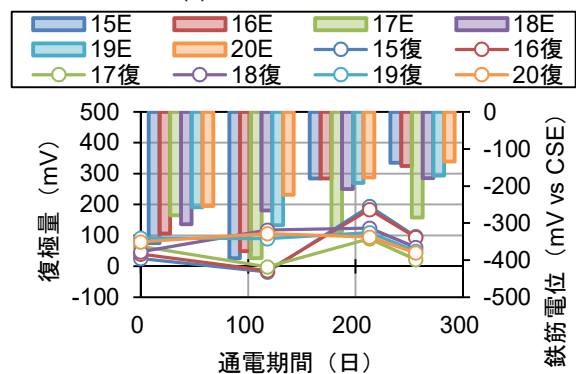
(a) 20-90-12-4-100



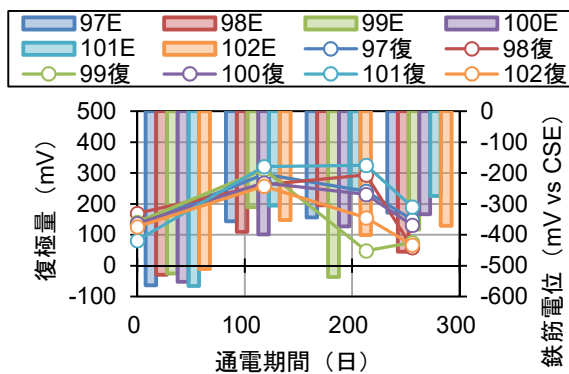
(e) 20-90-2.4-4-100



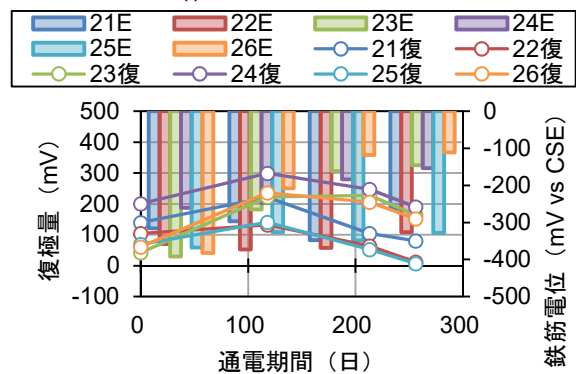
(b) 20-90-12-4-50



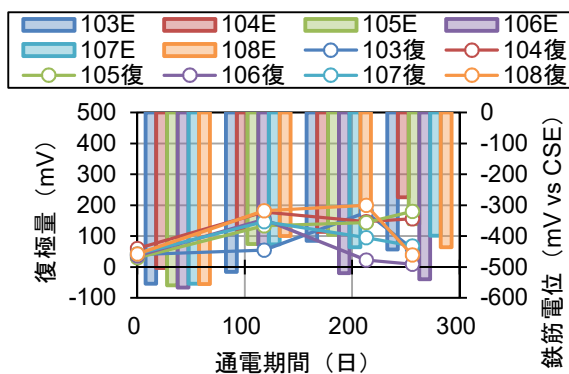
(f) 20-90-2.4-4-50



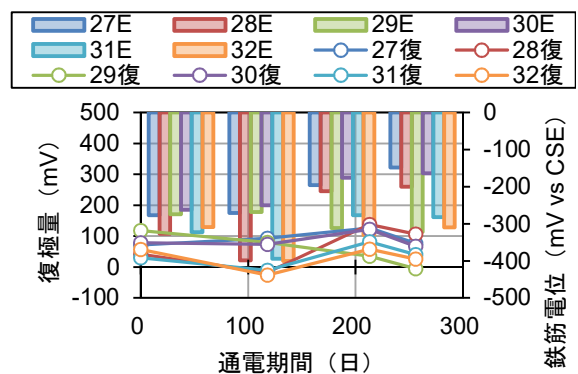
(c) 20-90-12-8-100



(g) 20-90-2.4-8-100



(d) 20-90-12-8-50



(h) 20-90-2.4-8-50

(凡例：数字 E は鉄筋電位を示し，数字復は復極量を示す．いずれも数字は供試体番号を示す．)  
 (図下に記載の数字 (A-B-C-D-E) は供試体の種別，試験条件を示しており，  
 A は温度，B は湿度，C は塩化物イオン量，D は通电時間，E は目標シフト量である)

図-3.1.2.8 24 時間後復極量と鉄筋電位 (24 時間後オフ電位) の経時変化

## (5) 腐食速度

通電 260 日後、無通電供試体を含む各通電条件 2 体ずつ供試体を解体して、鉄筋の腐食減少量を測定した。また通電試験開始前の腐食減少量を用いて、通電後の腐食減少率を算出した。なお、算出した腐食減少率は通電後（無通電供試体は当該雰囲気中における静置期間後）の腐食減少量から通電試験開始前の腐食減少量を差し引いて、通電期間のみの腐食によるものとした。

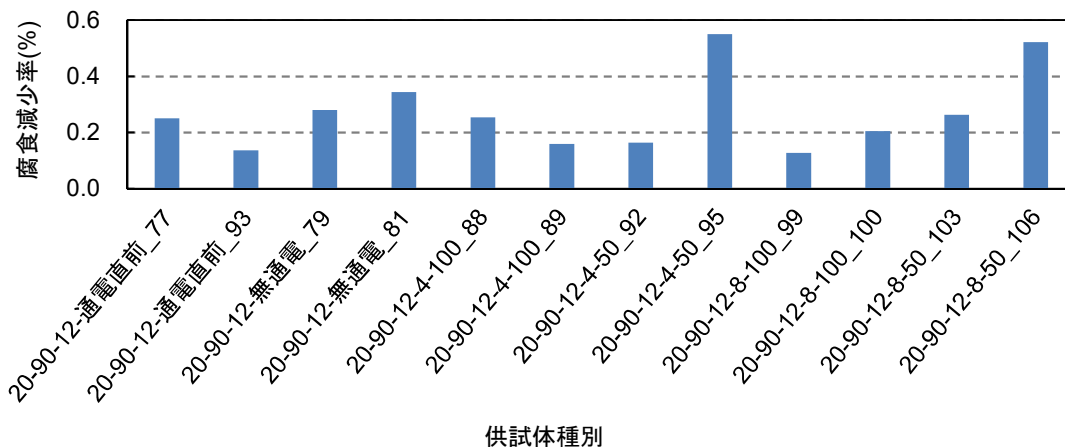
通電後の鉄筋の腐食減少率を図-3.1.2.9 に示す。図中には通電試験開始前の腐食減少率も併せて示した。塩化物イオン量 12kg の供試体について、通電試験開始前においても腐食減少が確認されており、鉄筋の腐食環境が過酷であることが分かる。また、無通電供試体と通電試験開始前供試体とを比較すると、無通電供試体のほうが腐食減少率が大きく、期間の増加に伴って腐食が進行していることが明らかとなった。通電供試体に着目すると、通電条件のうち通電時間による差異は確認できなかったものの、目標シフト量では 100mV のほうが 50mV に比べて腐食減少率が小さく、供試体ごとのばらつきも小さかった。これは通電条件による防食効果の違いを示していると考えられた。

塩化物イオン量 2.4kg の供試体について、通電試験前供試体では腐食減少はみられなかった。一方、本環境に 270 日暴露した無通電供試体では 0.3% 程度の腐食減少率が確認された。通電供試体については、通電条件による差異は確認されなかったものの、いずれの供試体も無通電供試体と比較して腐食減少率は小さかった。この結果から、塩化物イオン量 2.4kg の供試体は通電条件によらず、通電による防食効果が認められたと考えられた。

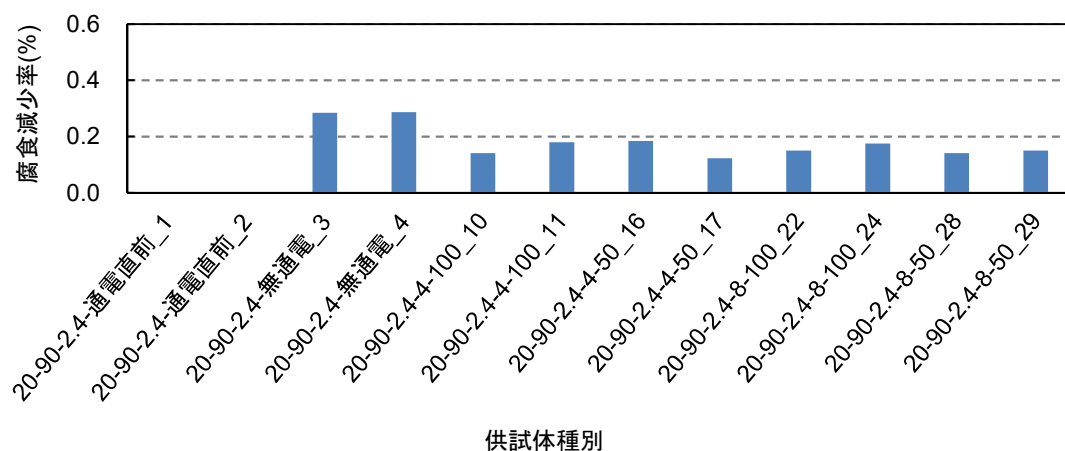
次に、鉄筋の腐食減量の測定結果から腐食速度（腐食電流密度）を算出した。各通電条件の腐食電流密度を図-3.1.2.10 に示す。塩化物イオン量 12kg について、CEB による腐食速度の判定基準によると、無通電供試体は「中速から高速の腐食速度」と判定された。通電供試体では、目標シフト量 100mV の供試体が「中速から高速」、または「低速から中速」と判定され、無通電供試体より腐食電流密度が小さかった。これに対して、目標シフト量 50mV の供試体はばらつきが大きく、「高速」、「中速から高速」、「低速から中速」と判定され、無通電供試体よりも腐食電流密度が大きい供試体もあった。このことから、目標シフト量 50mV と 100mV とを比較すると、100mV のほうが防食効果は高いと考えられた。

塩化物イオン量 2.4kg について、無通電供試体は塩化物イオン量 12kg と同様に「中速から高速」と判定された。これに対して、通電供試体は「低速から中速」と判定され、通電条件によらず、無通電供試体と比較して腐食速度（腐食電流密度）は小さかった。この結果から、塩化物イオン量 2.4kg では通電による防食効果が確認された。

しかしながら、腐食の抑制が認められた通電供試体においても、腐食速度は「低速から中速」、または「中速から高速」と判定された。このことから、本条件では電気防食による腐食の抑制は認められたものの、大幅な腐食速度の低減を得ることはできていない。



(a)塩化物イオン量 12kg/m<sup>3</sup> 供試体



(b)塩化物イオン量 2.4kg/m<sup>3</sup> 供試体

(図中に記載の数字 (A-B-C-D-E\_F) は供試体の種別, 試験条件を示しており,

A は温度, B は湿度, C は塩化物イオン量, D は通電時間, E は目標シフト量, F は供試体番号である)

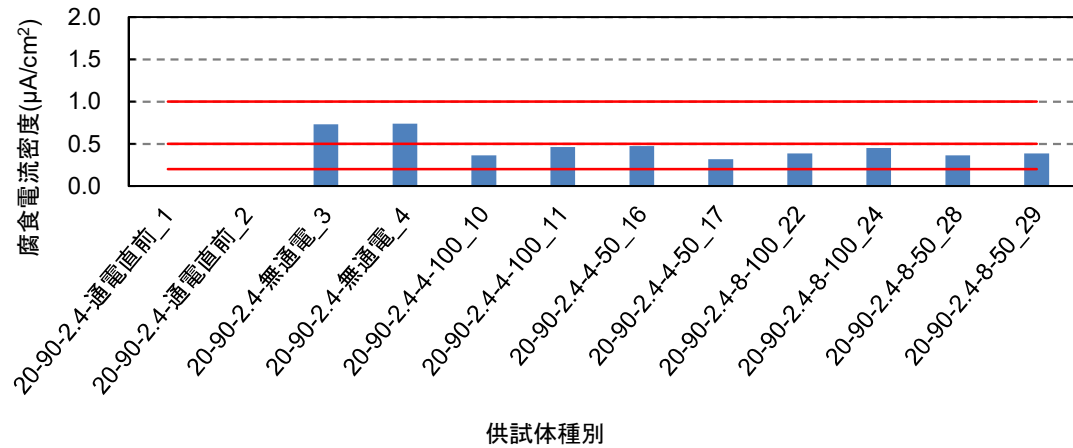
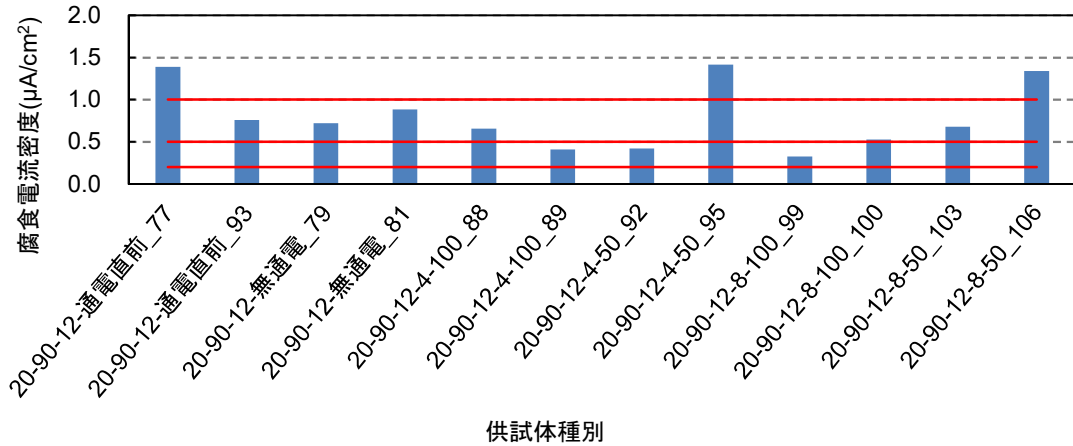
図-3.1.2.9 通電後の鉄筋の腐食減少率 (無通電供試体は暴露後の腐食減少率)

## (6) カソード分極曲線

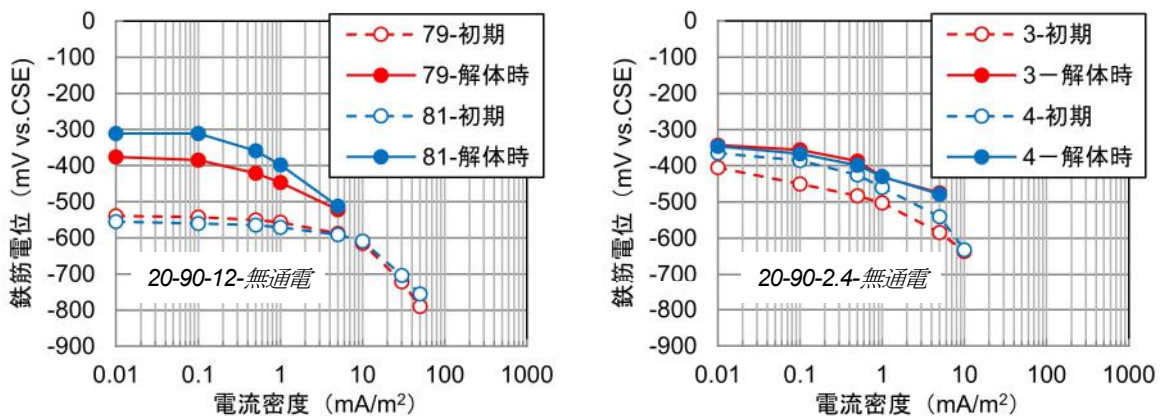
無通電供試体の暴露開始前 (初期) と暴露 270 日 (解体時) のカソード分極曲線を図-3.1.2.11 に示す。

塩化物イオン量 12kg について, 2 体ともに解体時のほうが鉄筋電位の貴化, および低い電流密度で大きく分極する傾向であったため, 初期に比べて, 鉄筋周囲の環境, 鉄筋表面の状態が改善されていると考えられた。これはセメントの水和反応によるものと推察した。塩化物イオン量 2.4kg については, 初期と解体時とを比較すると, 若干鉄筋電位が貴化しているものの, 分極曲線の形状は同様のものではなかった。

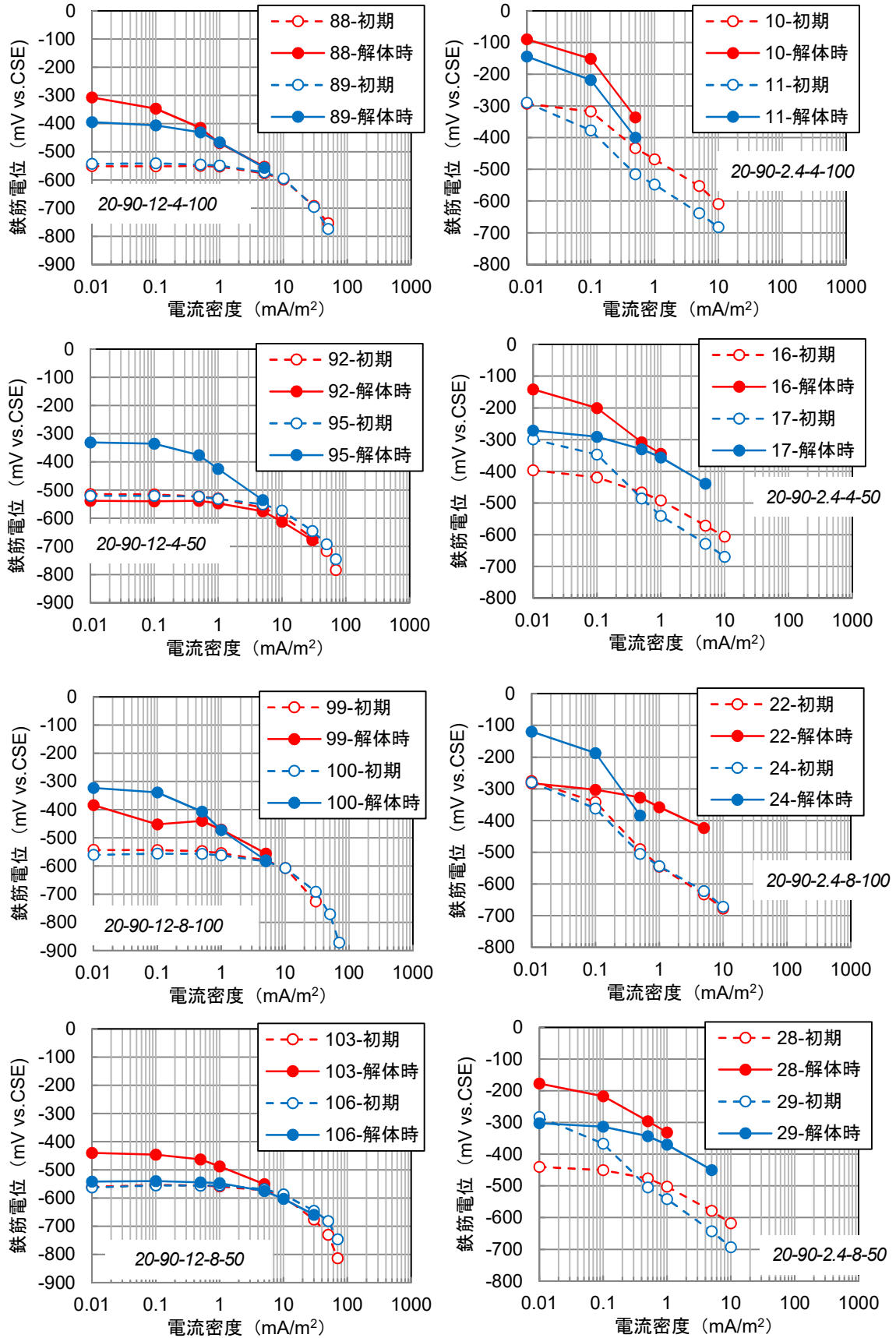
次に通電後の供試体のカソード分極曲線の変化を図-3.1.2.12 に示す。塩化物イオン量や通電条件によらず, ほとんどの供試体で初期に比べて解体時は鉄筋電位の貴化, および低い電流密度で大きく分極する傾向であった。これはセメントの水和反応, または通電によって, 鉄筋周囲の環境, 鉄筋表面の状態が改善されたためと考えられた。一方, 初期と比較して解体時の分極曲線が変化しないものや同様の分極量を得るために大きな電流密度が必要なものが確認された。これらの供試体は復極量が目標シフト量を満足しなかった時期があったため, 防食効果が小さかったと考えた。



(図中に記載の数字 (A-B-C-D-E\_F) は供試体の種別, 試験条件を示しており, Aは温度, Bは湿度, Cは塩化物イオン量, Dは通電時間, Eは目標シフト量, Fは供試体番号である)  
 図-3.1.2.10 通電後の鉄筋の腐食速度 (無通電供試体は暴露後の腐食速度)



(図中に記載の数字 (A-B-C) は供試体の種別, 試験条件を示しており, Aは温度, Bは湿度, Cは塩化物イオン量である)  
 図-3.1.2.11 通電前後の鉄筋のカソード分極曲線



(A-B-C-D-E : Aは温度, Bは湿度, Cは塩化物イオン量, Dは通電時間, Eは目標復極量を示す)

図-3.1.2.12 通電前後の鉄筋のカソード分極曲線

### 3.1.3 試験温度 40°C, 湿度 90%の結果

#### (1) 無通電供試体の自然電位経時変化

無通電供試体の自然電位経時変化を図-3.1.3.1に示す。

無通電供試体では、内在塩分量の違いにより自然電位の挙動が大きく異なった。 $[Cl^-] = 2.4\text{kg/m}^3$ では、暴露開始直後は $-450\text{mV vs.CSE}$ 程度を示していたが、時間の経過とともに貴側に变化し、130日以降は $-150 \sim -250\text{mV vs.CSE}$ の範囲で推移した。130日までの電位の貴化は、モルタルの硬化反応による緻密化が影響していると考えられる。ASTMの自然電位による腐食判定では、全ての供試体が「不確定」と判定され、腐食は生じていると判断される。一方、 $[Cl^-] = 12\text{kg/m}^3$ では、概ね $-400 \sim -500\text{mV vs.CSE}$ の範囲で推移した。ASTMの自然電位による腐食判定では、全ての供試体が「90%以上の確率で腐食あり」と判定される。 $-500 \sim -600\text{mV vs.CSE}$ を示していた期間が多いことから、大きな腐食速度で鉄筋の腐食が進行していたと推測される。

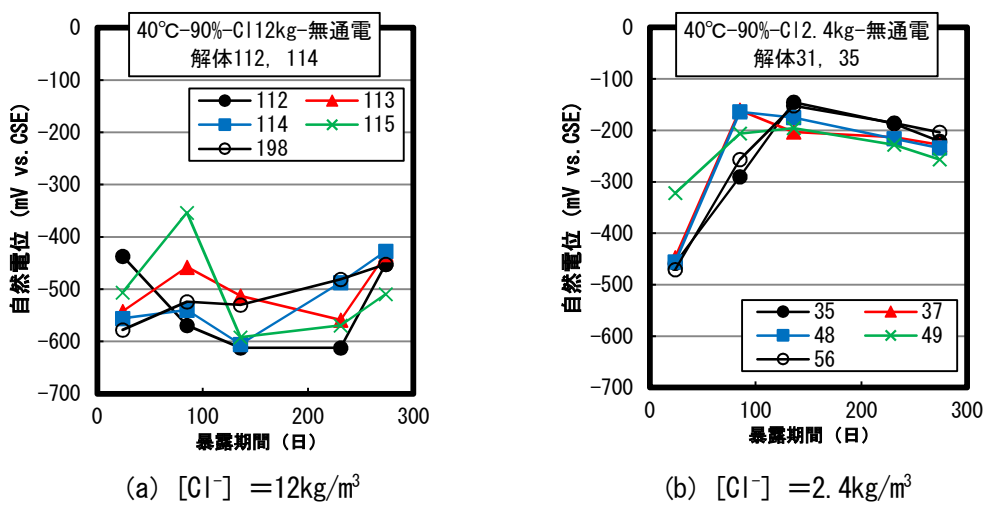


図-3.1.3.1 無通電供試体の自然電位経時変化

#### (2) 防食電流密度 (通電電流密度)

防食電流密度の経時変化を図-3.1.3.2 から図-3.1.3.5に示す。

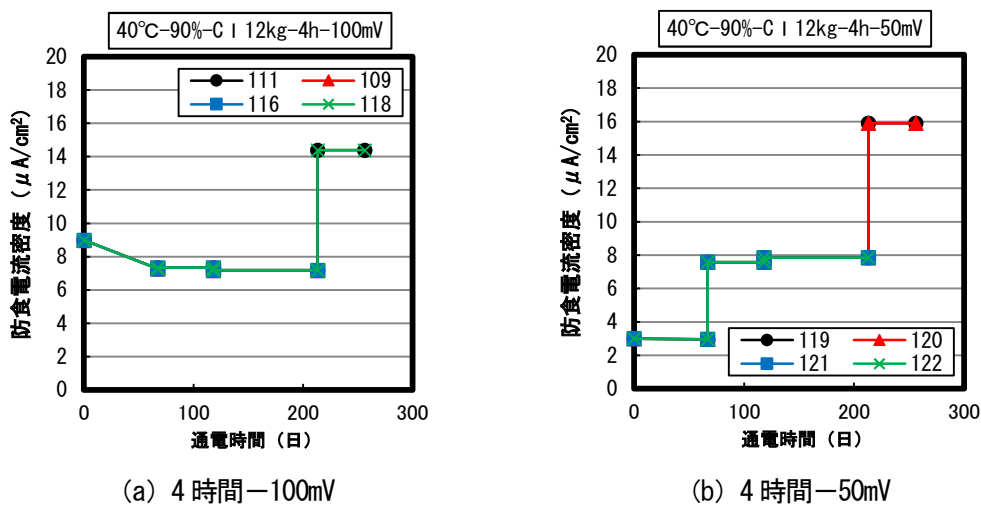
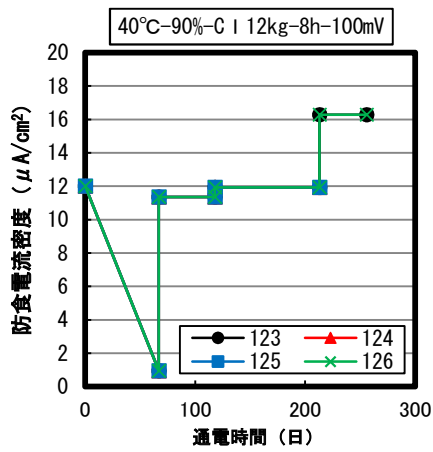
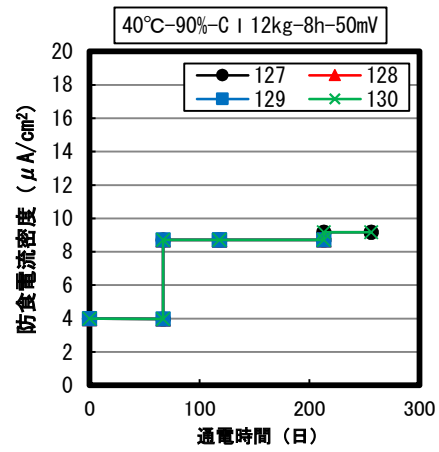


図-3.1.3.2 防食電流密度の経時変化 ( $[Cl^-] = 12\text{kg/m}^3$ ) ①

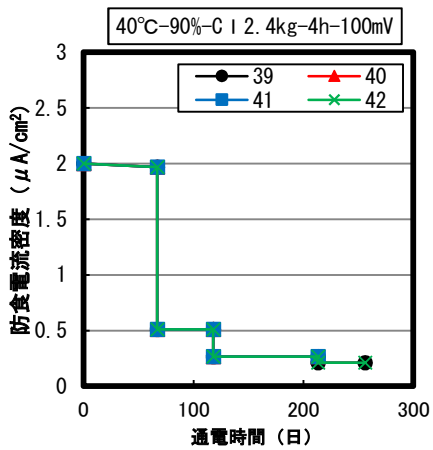


(a) 8時間-100mV

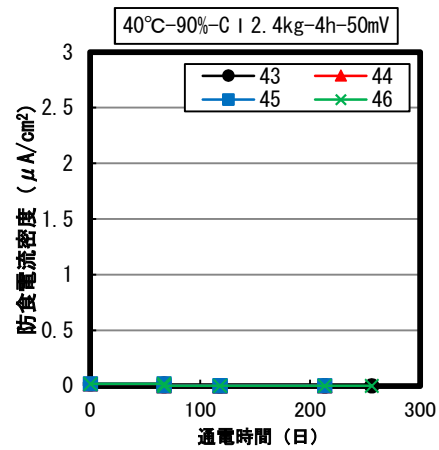


(b) 8時間-50mV

図-3.1.3.3 防食電流密度の経時変化 ( $[Cl^-] = 12kg/m^3$ ) ②

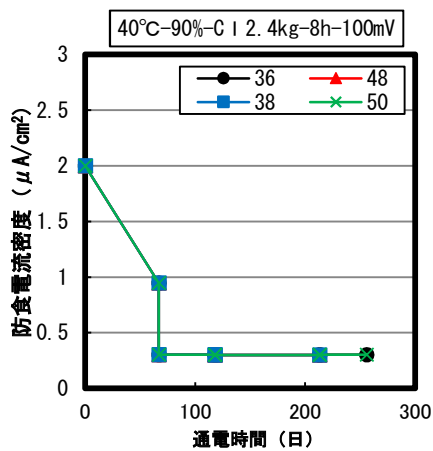


(a) 4時間-100mV

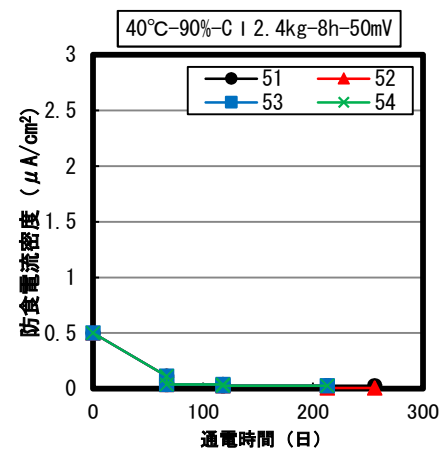


(b) 4時間-50mV

図-3.1.3.4 防食電流密度の経時変化 ( $[Cl^-] = 2.4kg/m^3$ ) ①



(a) 8時間-100mV



(b) 8時間-50mV

図-3.1.3.5 防食電流密度の経時変化 ( $[Cl^-] = 2.4kg/m^3$ ) ②



防食電流密度の挙動は、内在塩分量による違いが顕著に認められた。 $[Cl^-] = 12\text{kg/m}^3$ の供試体では、通電時間よりも目標シフト量による影響の方が強く表れており、目標シフト量が100mVの方が経時的に増加する傾向を示した。初期の防食電流密度は、目標シフト量100mVで9~12 $\mu\text{A/cm}^2$ 、目標シフト量50mVで3~4 $\mu\text{A/cm}^2$ であったが、256日経過時は目標シフト量100mVで約14~16 $\mu\text{A/cm}^2$ 、目標シフト量50mVで9~16 $\mu\text{A/cm}^2$ まで増加しており、海水中の鋼材並みの防食電流密度となった。防食電流密度の増加は、鉄筋の腐食速度が増加していることを意味しており、とくに4時間-50mVの供試体においてはひび割れが進行したことで防食電流密度が増加したと考える。一方、 $[Cl^-] = 2.4\text{kg/m}^3$ の供試体では、初期の防食電流密度は、目標シフト量100mVで約2 $\mu\text{A/cm}^2$ 、目標シフト量50mVで0.5 $\mu\text{A/cm}^2$ 以下であり、 $[Cl^-] = 12\text{kg/m}^3$ に比べて小さい電流で所定のシフト量を満足することができた。また、防食電流密度は目標シフト量100mVにおいて経時的に低下する傾向を示し、鉄筋表面の環境改善(⇒鉄筋表面の再不働態化)による防食電流密度の低減効果が認められた。

### (3) 復極量

4時間後の復極量の経時変化を図-3.1.3.6~図-3.1.3.9、4時間後の復極量と平均復極量を図-3.1.3.10、24時間後の復極量の経時変化を図-3.1.3.11~図-3.1.3.14、24時間後の復極量と平均復極量を図-3.1.3.15に示す。同条件でも分極特性の異なる供試体を、1回路につき複数個で通電していたため、目標分極量に調整するのが大変困難であった。各供試体の平均復極量は、 $[Cl^-] = 12\text{kg/m}^3$ では目標シフト量よりも下回っているのに対し、 $[Cl^-] = 2.4\text{kg/m}^3$ では上回っていた。また、 $[Cl^-] = 12\text{kg/m}^3$ の一部の供試体では、復極量がマイナスの値を示すものも認められた。ここで、4時間後と24時間後の復極量の差の経時変化を図-3.1.3.16~図-3.1.3.19に示す。ほとんどの供試体がマイナスの値を示していることから、24時間以内に復極過程(電気防食効果)が終了し、腐食進行状態に移行していることが考えられる。このような環境下での復極量判定は、復極量の最大値で行わなければならない。

間欠通電においては、通電を停止している期間の環境改善効果の程度が防食効果を大きく左右すると考えられる。通電停止期間が終始復極過程にあるときには防食効果が期待できるが、短時間で復極過程が終了して腐食進行過程に移行した時には、防食効果は期待できない。

40°C-90%RHの環境では、通電時間や目標シフト量とは無関係に、通電停止後短時間で鉄筋は腐食進行状態となった。

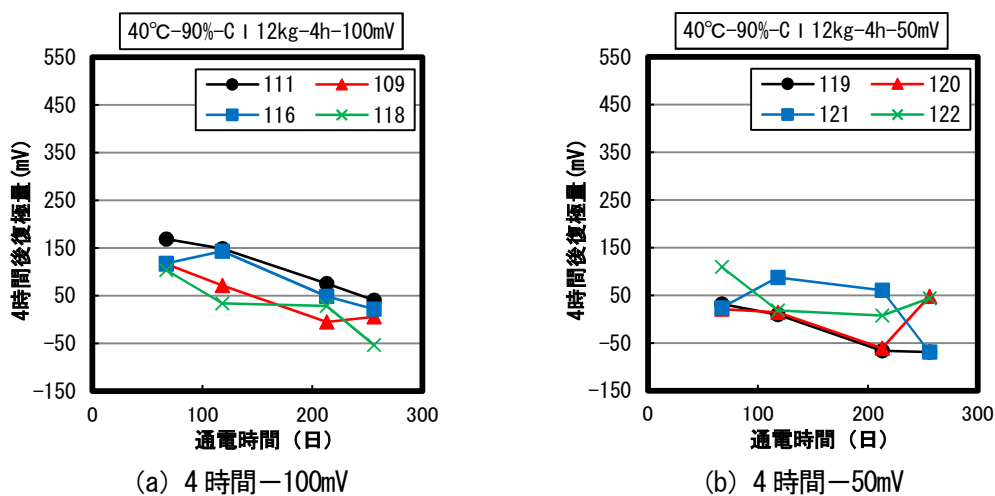
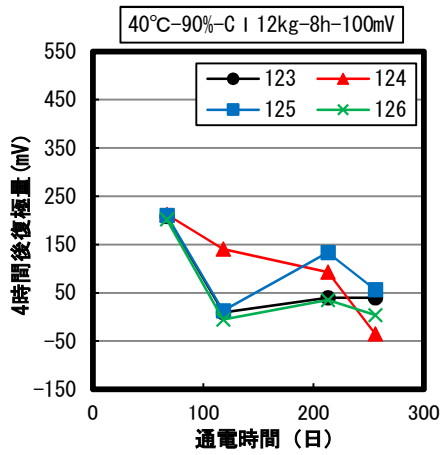
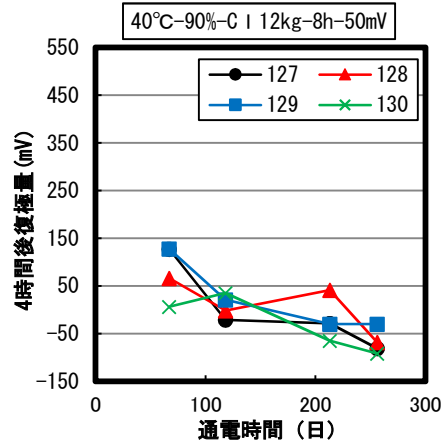


図-3.1.3.6 4時間後復極量の経時変化 ( $[Cl^-] = 12\text{kg/m}^3$ ) ①

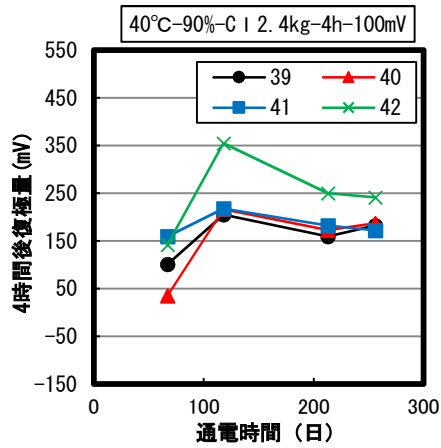


(a) 8時間-100mV

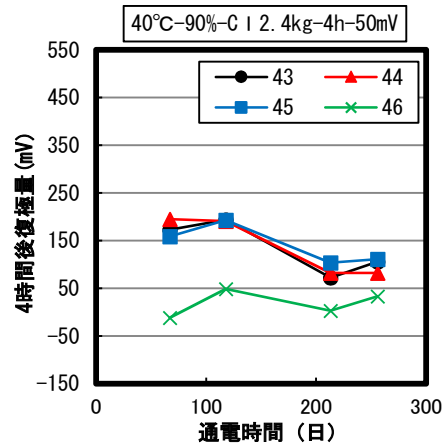


(b) 8時間-50mV

図-3.1.3.7 4時間後復極量の経時変化 ( $[Cl^-] = 12kg/m^3$ ) ②

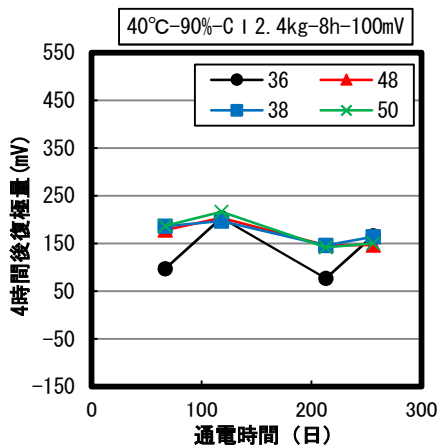


(a) 4時間-100mV

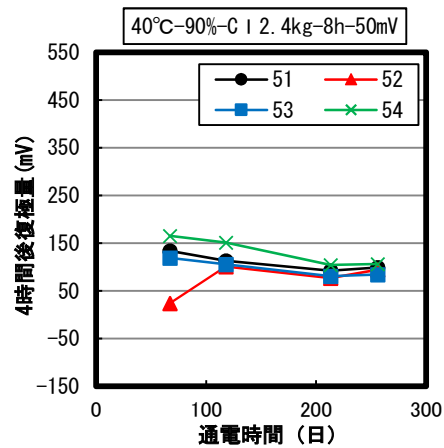


(b) 4時間-50mV

図-3.1.3.8 4時間後復極量の経時変化 ( $[Cl^-] = 2.4kg/m^3$ ) ①

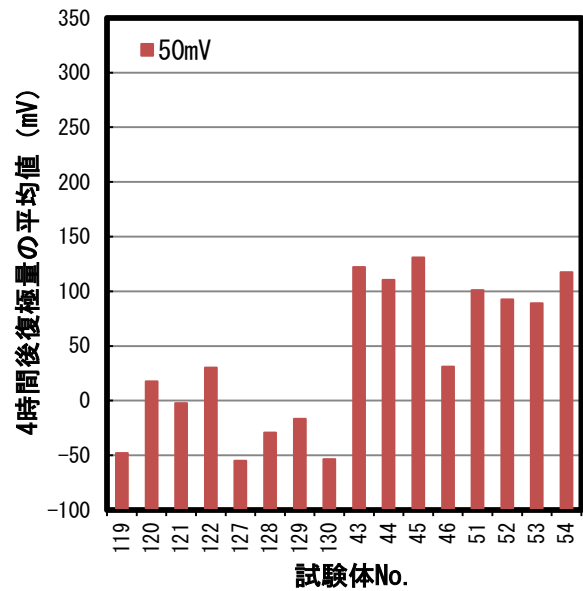
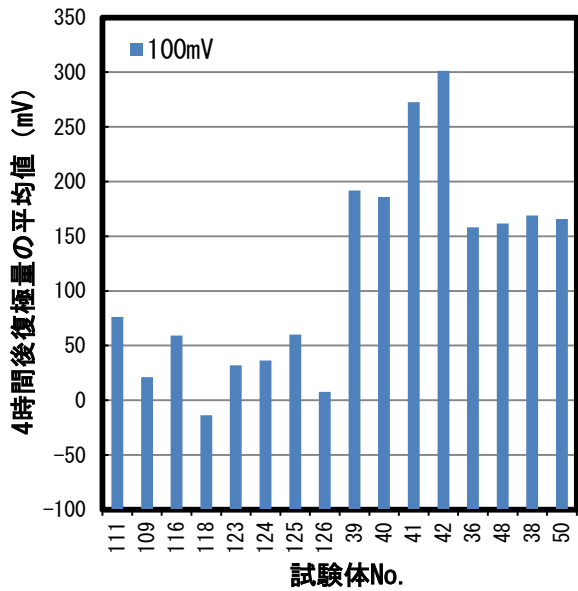


(a) 8時間-100mV



(b) 8時間-50mV

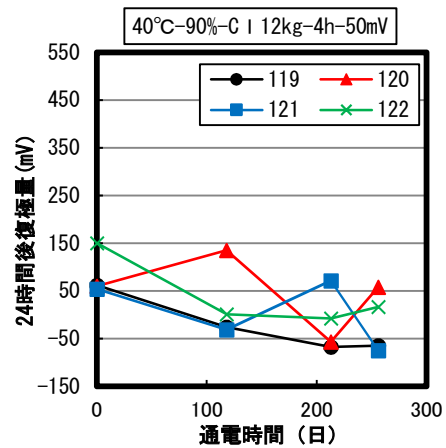
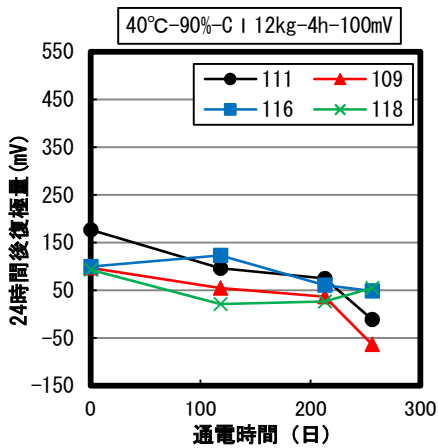
図-3.1.3.9 4時間後復極量の経時変化 ( $[Cl^-] = 2.4kg/m^3$ ) ②



(a) 目標シフト量 -100mV

(b) 目標シフト量 -50mV

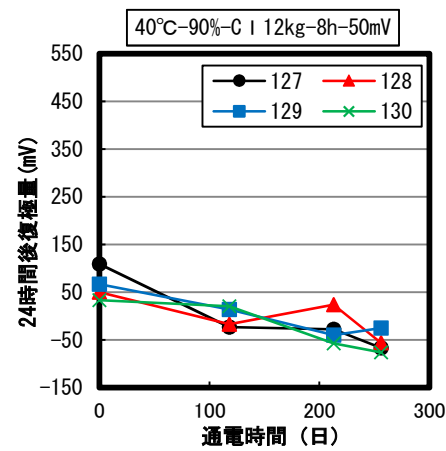
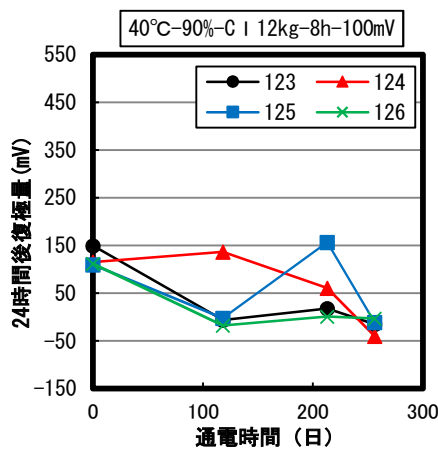
図-3.1.3.10 4時間後復極量の平均値



(a) 4時間-100mV

(b) 4時間-50mV

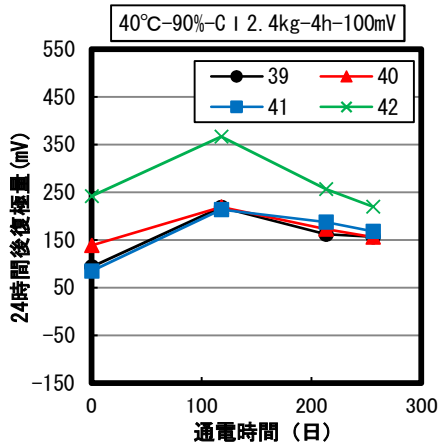
図-3.1.3.11 24時間後復極量の経時変化 ([Cl<sup>-</sup>] = 12kg/m<sup>3</sup>) ①



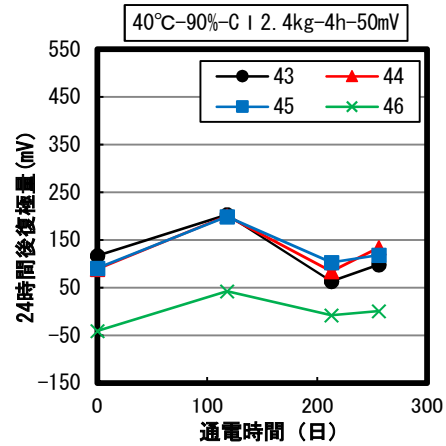
(a) 8時間-100mV

(b) 8時間-50mV

図-3.1.3.12 24時間後復極量の経時変化 ([Cl<sup>-</sup>] = 12kg/m<sup>3</sup>) ②

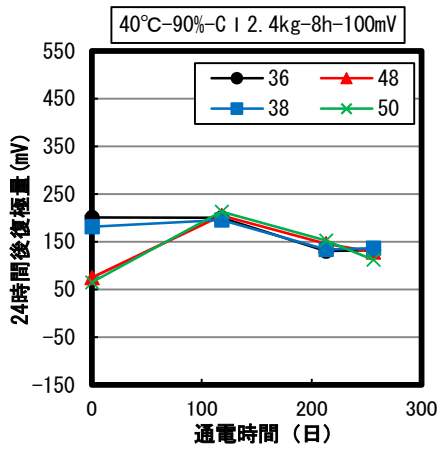


(a) 4時間-100mV

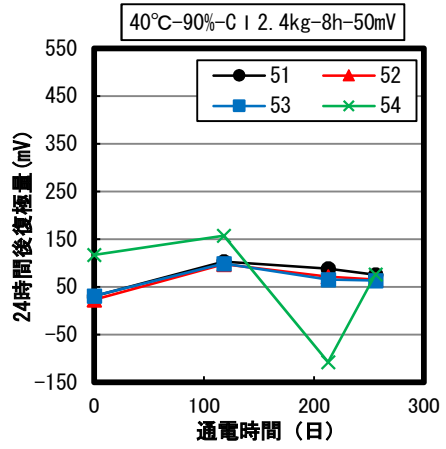


(b) 4時間-50mV

図-3.1.3.13 24時間後復極量の経時変化 ( $[Cl^-] = 2.4kg/m^3$ ) ①

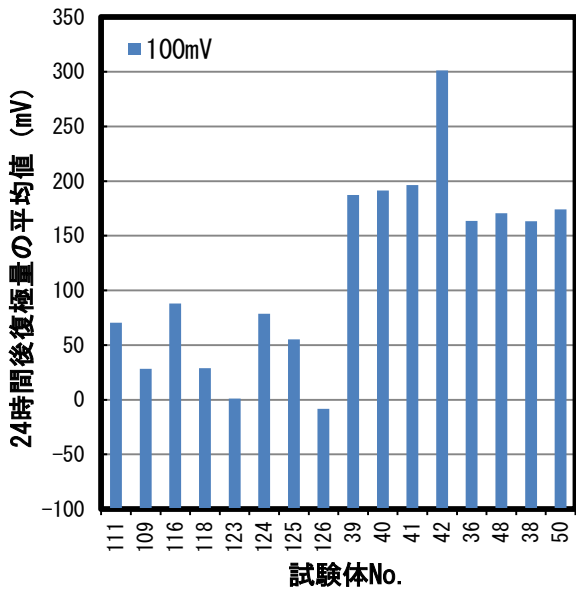


(a) 8時間-100mV

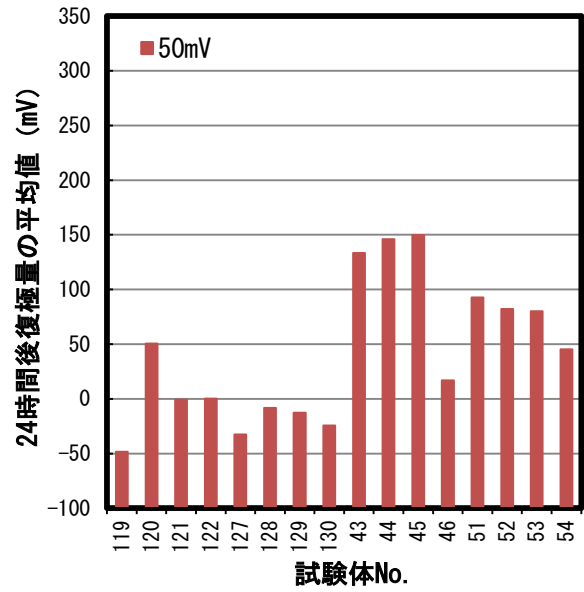


(b) 8時間-50mV

図-3.1.3.14 24時間後復極量の経時変化 ( $[Cl^-] = 2.4kg/m^3$ ) ②

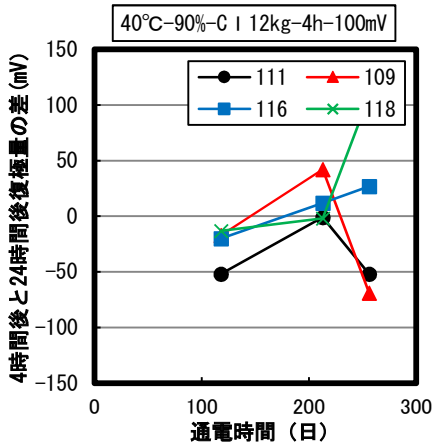


(a) 目標シフト量 -100mV

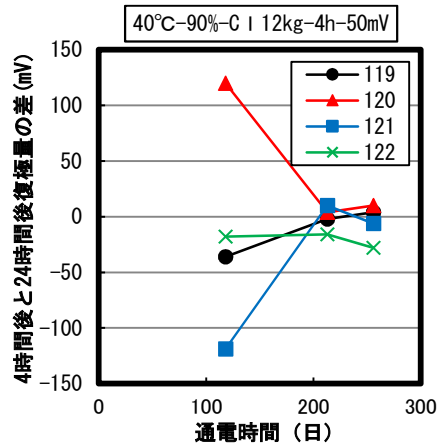


(b) 目標シフト量 -50mV

図-3.1.3.15 24時間後復極量の平均値

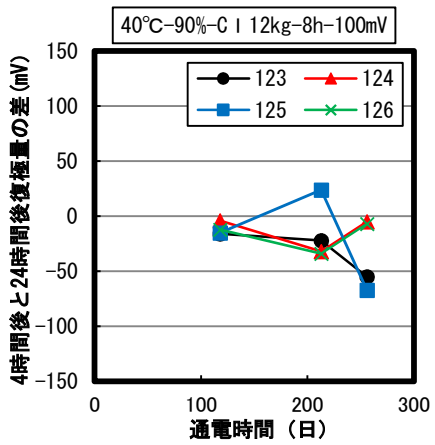


(a) 4時間-100mV

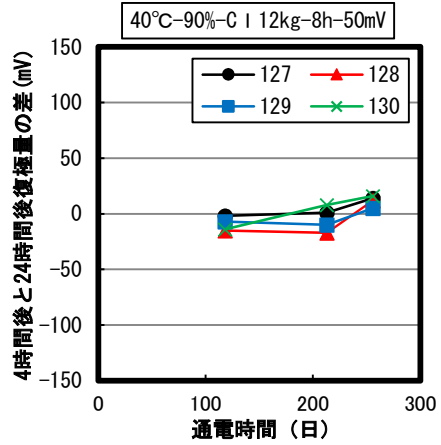


(b) 4時間-50mV

図-3.1.3.16 4時間後と24時間後復極量との差の経時変化 ( $[Cl^-] = 12\text{kg/m}^3$ ) ①

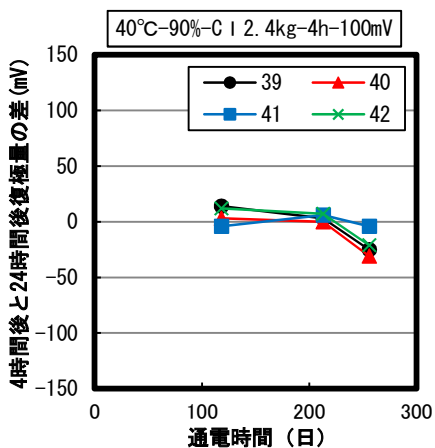


(a) 8時間-100mV

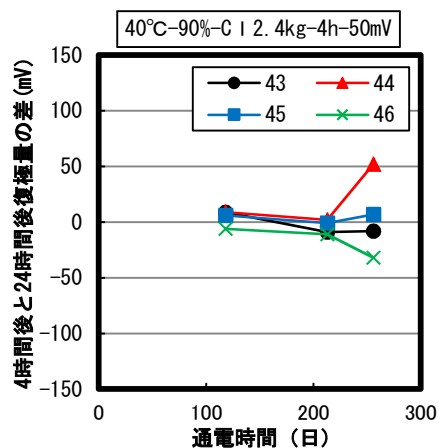


(b) 8時間-50mV

図-3.1.3.17 4時間後と8時間後復極量との差の経時変化 ( $[Cl^-] = 12\text{kg/m}^3$ ) ②

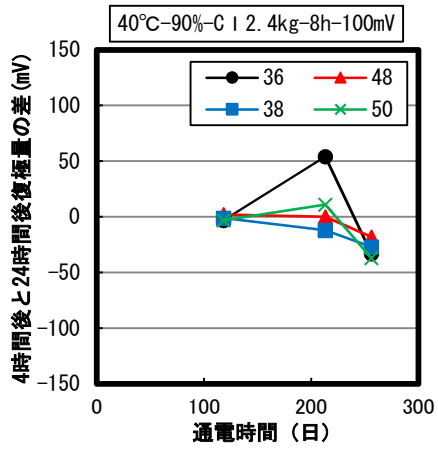


(a) 4時間-100mV

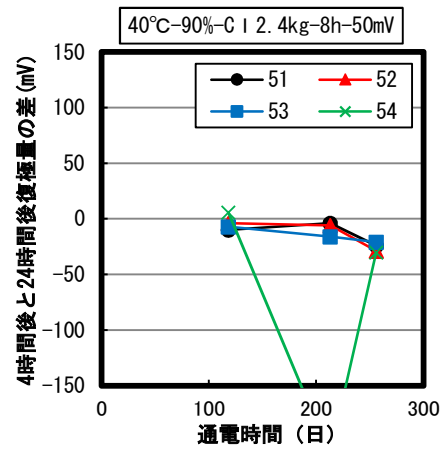


(b) 4時間-50mV

図-3.1.3.18 4時間後と24時間後復極量との差の経時変化 ( $[Cl^-] = 2.4\text{kg/m}^3$ ) ①



(a) 8時間-100mV



(b) 8時間-50mV

図-3.1.3.19 4時間後と24時間後復極量との差の経時変化 ( $[Cl^-] = 2.4\text{kg/m}^3$ ) ②

(4) 通電停止後の鉄筋自然電位

通電停止後の鉄筋自然電位（オフ電位）の経時変化を図-3.1.3.20～図-3.1.3.27 に示す。

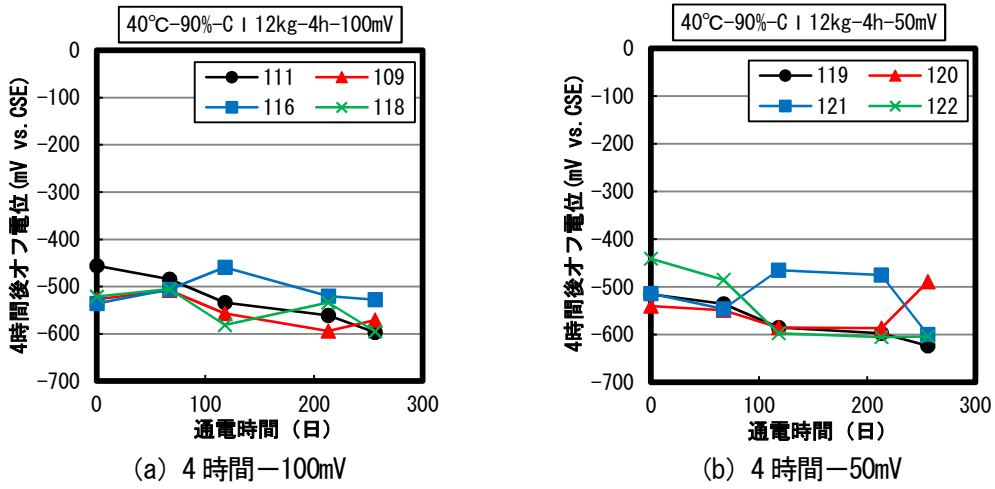


図-3.1.3.20 4時間後オフ電位の経時変化 ([Cl<sup>-</sup>] = 12kg/m<sup>3</sup>) ①

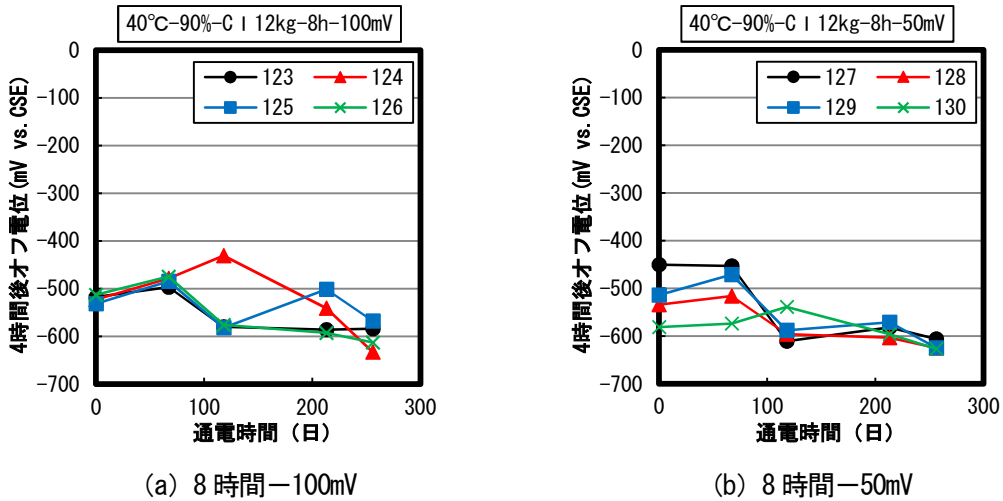


図-3.1.3.21 4時間後オフ電位の経時変化 ([Cl<sup>-</sup>] = 12kg/m<sup>3</sup>) ②

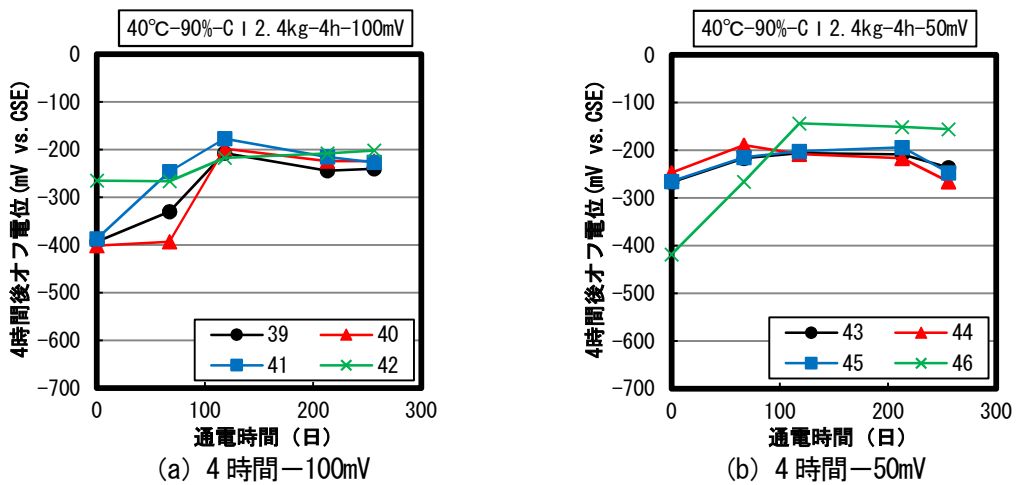
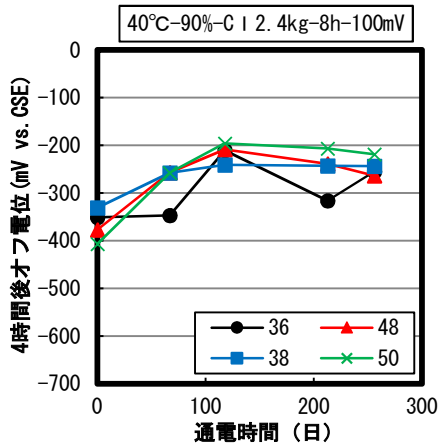
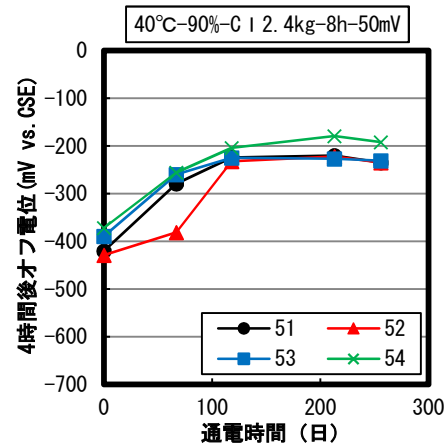


図-3.1.3.22 4時間後オフ電位の経時変化 ([Cl<sup>-</sup>] = 2.4kg/m<sup>3</sup>) ①

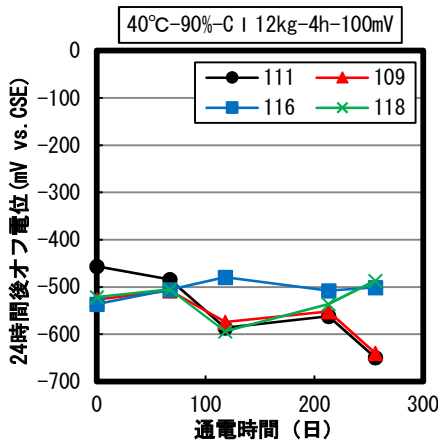


(a) 8時間-100mV

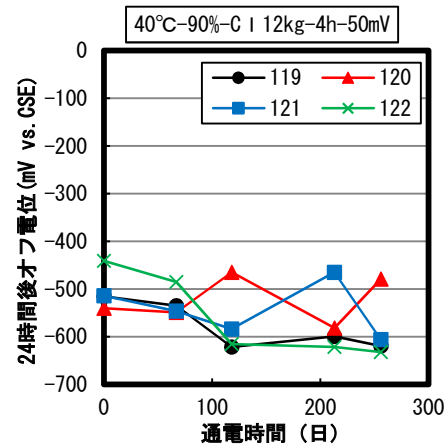


(b) 8時間-50mV

図-3.1.3.23 4時間後オフ電位の経時変化 ( $[Cl^-] = 2.4kg/m^3$ ) ②

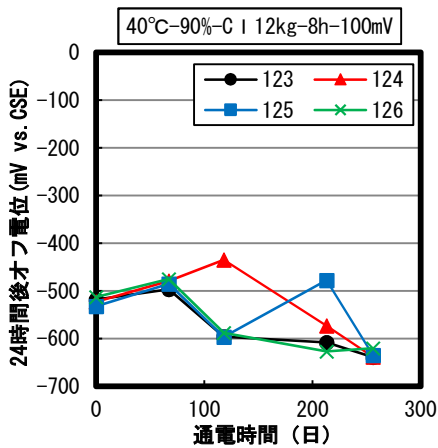


(a) 4時間-100mV

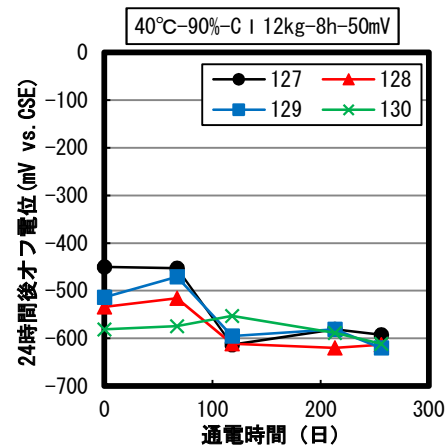


(b) 4時間-50mV

図-3.1.3.24 24時間後オフ電位の経時変化 ( $[Cl^-] = 12kg/m^3$ ) ①



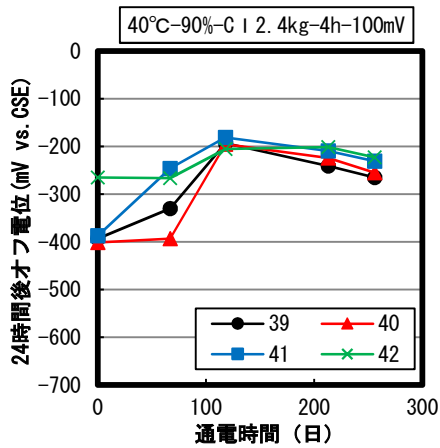
(a) 8時間-100mV



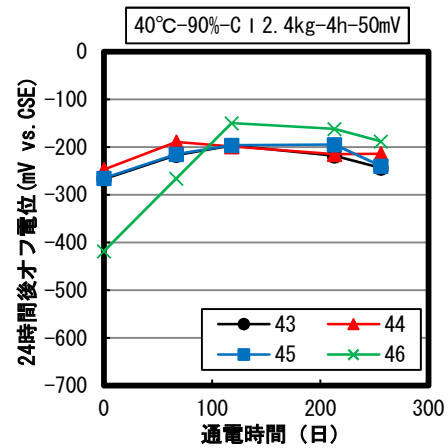
(b) 8時間-50mV

図-3.1.3.25 24時間後オフ電位の経時変化 ( $[Cl^-] = 12kg/m^3$ ) ②



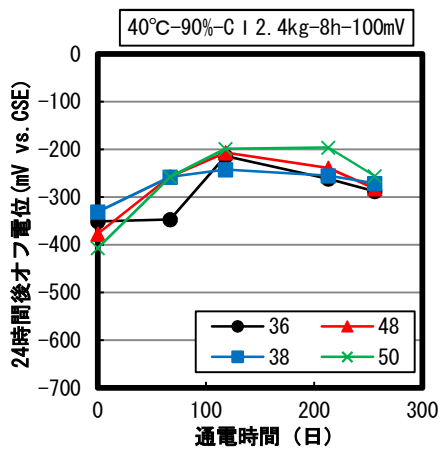


(a) 4時間-100mV

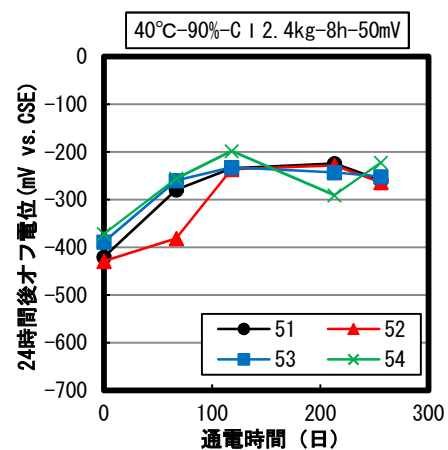


(b) 4時間-50mV

図-3.1.3.26 24時間後オフ電位の経時変化 ( $[Cl^-] = 2.4kg/m^3$ ) ①



(a) 8時間-100mV



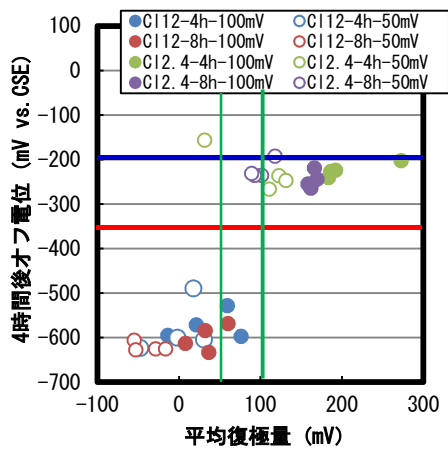
(b) 8時間-50mV

図-3.1.3.27 24時間後オフ電位の経時変化 ( $[Cl^-] = 2.4kg/m^3$ ) ②

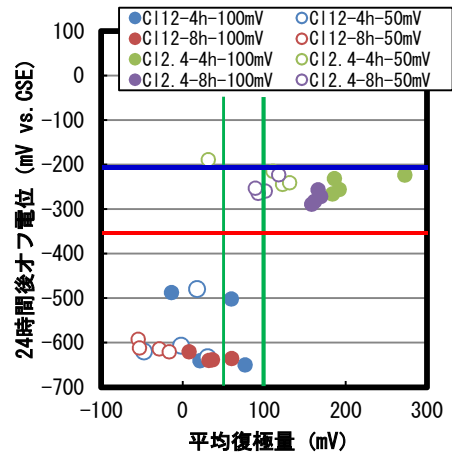
通电停止から4時間後および24時間後のオフ電位はいずれもCl量による違いが顕著に認められるが、 $[Cl^-] = 12kg/m^3$ では目標復極量を大きく下回る供試体がほとんどであったため、Cl量の違いあるいは目標復極量の調整不良による影響かは明確でない。

$[Cl^-] = 12kg/m^3$ では、オフ電位は概ね卑化傾向にあり、電気防食効果は認められない。ほとんどの供試体が4時間後オフ電位よりも24時間後オフ電位の方が卑な値を示しているため、通电停止時は短時間で腐食進行状態になっていると言える。一方、 $[Cl^-] = 2.4kg/m^3$ では、経時的に貴化傾向を示しているが、無通电供試体と同様の挙動を示していることから、モルタルの硬化反応によるものと考えられる。ほとんどの供試体が4時間後オフ電位よりも24時間後オフ電位の方が卑な値を示しているため、通电停止時は短時間で腐食進行状態になっていると言える。

平均復極量とオフ電位の関係を図-3.1.3.28に示す。4時間後と24時間後の平均復極量とオフ電位の関係に違いは認められなかった。平均復極量が100mV未満では、プロットは概ね「90%以上の確率で腐食あり」の領域に位置しており、全てが $[Cl^-] = 12kg/m^3$ での供試体であった。平均復極量が100mV以上では、プロットは概ね「不確定」の領域に位置しており、全てが $[Cl^-] = 2.4kg/m^3$ の供試体であった。



(a) 4 時間後オフ電位





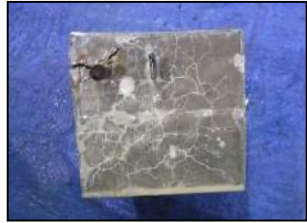

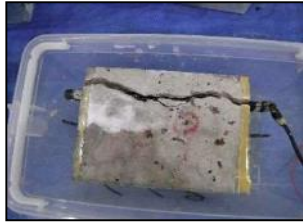
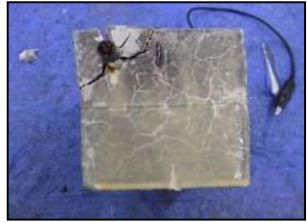





(b) 24 時間後オフ電位

図-3.1.3.28 平均復極量とオフ電位

(5) 外観観察

通電開始から 117 日が経過した時点で、 $[Cl^-] = 12\text{kg/m}^3$  の 4 時間-50mV の条件を除く供試体において鉄筋に沿ったひび割れが確認された。図-3.1.3.29 に示すように明らかな腐食ひび割れであり、ひび割れ幅は既に 0.2mm を超えていた。ただし、ひび割れ幅の大小と通電の有無に相関は認められず、個体差の影響のほうが大きいと思われる。 $[Cl^-] = 2.4\text{kg/m}^3$  の供試体には、ひび割れは認められなかった。

通電開始から 256 日経過後に外観観察と供試体の一部を解体して鉄筋の表面状態を観察した。無通電供試体は各条件 2 体ずつ、通電供試体は各条件 2 体ずつで総数は 20 体である。外観観察では、解体時においても  $[Cl^-] = 2.4\text{kg/m}^3$  の供試体にはひび割れは生じていなかった。一方、 $[Cl^-] = 12\text{kg/m}^3$  の供試体にはひび割れ幅 5mm を超えるひび割れが生じていた。ひび割れは全ての供試体で 2 方向に進行しており、鉄筋とかぶり部分のモルタルとの付着はほとんどなく、剥落寸前の状態であった。解体後の鉄筋の表面状態を図-3.1.3.30 に示す。40°C -90%RH の供試体の中で錆の生成が明らかに少なかったのは  $[Cl^-] = 2.4\text{kg/m}^3$ 、4 時間-50mV の供試体であった。その他の条件では鉄筋の表面全面に赤褐色の錆が生じており、 $[Cl^-] = 12\text{kg/m}^3$  の方が錆の進行が激しかった。

通電時間	目標シフト量	2017年3月17日 (117日経過)	2017年8月1日 (256日経過)	
無通電	無通電			
4時間	50mV			
	100mV	ひび割れなし		
8時間	50mV			

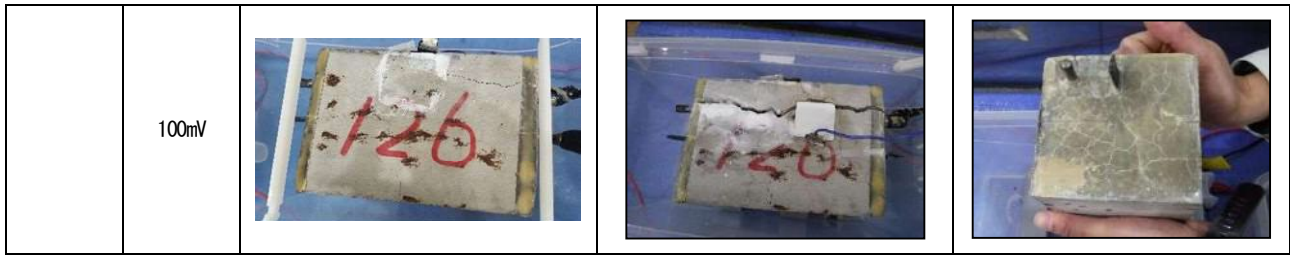


図-3.1.3.29 [Cl<sup>-</sup>] =12kg/m<sup>3</sup> 供試体のひび割れ状況











通電 時間	目標 シフト量	[Cl <sup>-</sup> ] =2.4kg/m <sup>3</sup>		[Cl <sup>-</sup> ] =12kg/m <sup>3</sup>	
		試体番号	写真	試体番号	写真
なし	なし	No. 35 No. 37		No. 112 No. 114	
4 時間	50mV	No. 44 No. 45		No. 121 No. 122	
	100mV	No. 40 No. 41		No. 109 No. 116	
8 時間	50mV	No. 53 No. 54		No. 128 No. 129	
	100mV	No. 38 No. 48		No. 124 No. 125	

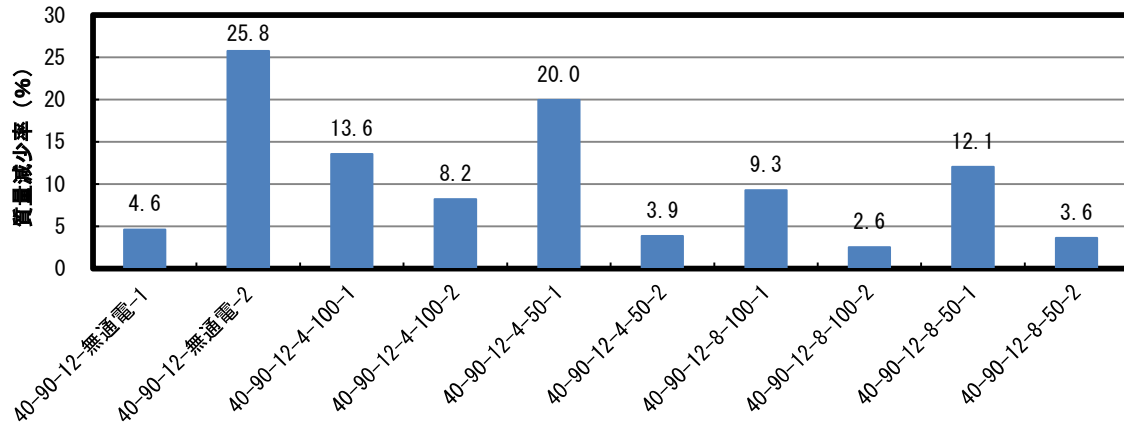
図-3.1.3.30 256 日経過時に解体した供試体の鉄筋表面状況

## (6) 質量減少率

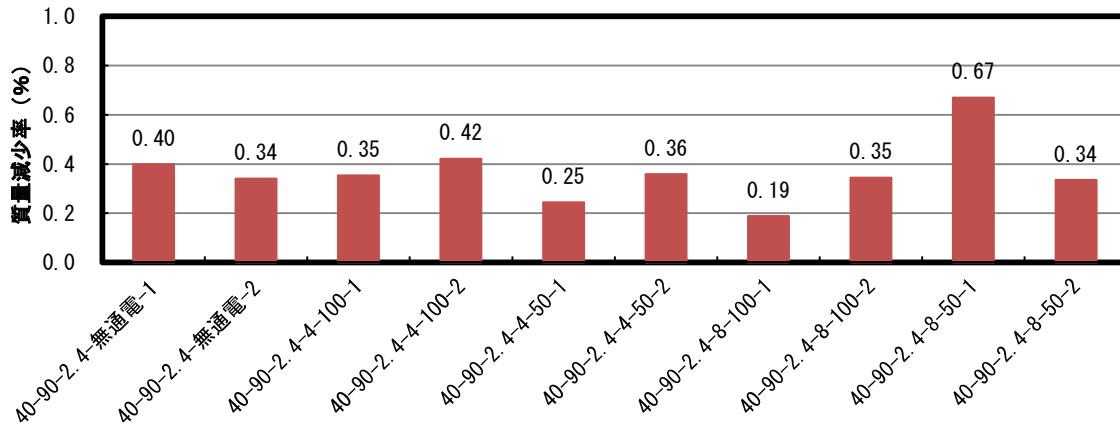
質量減少率を図-3.1.3.31に示す。

$[Cl^-] = 12\text{kg/m}^3$  の供試体の質量減少率は、同一条件におけるばらつきが大きかった。無通電供試体よりも通電供試体の方が質量減少率は小さい値を示したが、通電時間や目標シフト量との関係は不明確であった。

$[Cl^-] = 2.4\text{kg/m}^3$  の供試体の質量減少率は、いずれの条件においても無通電供試体と同程度の値であった。無通電供試体の質量減少率は、 $[Cl^-] = 12\text{kg/m}^3$  の無通電供試体の 1/10 以下であった。



(a)  $[Cl^-] = 12\text{kg/m}^3$



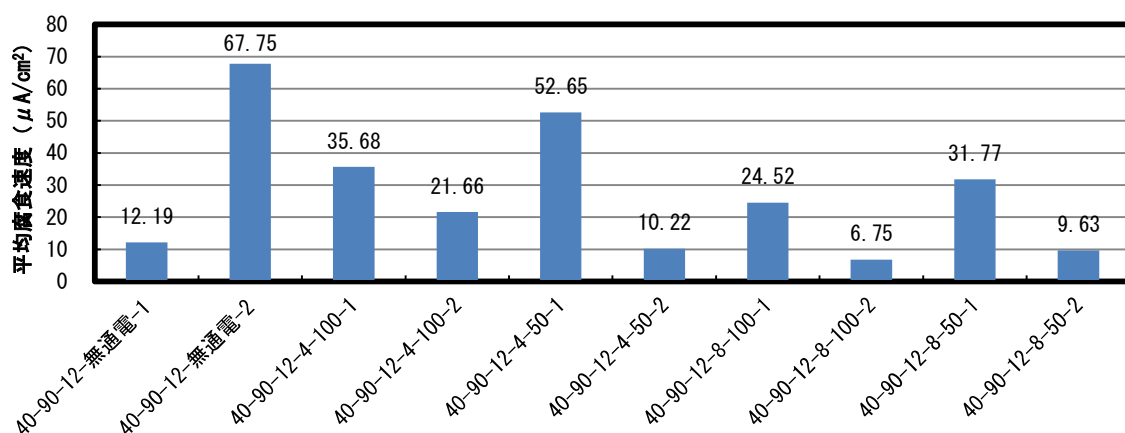
(b)  $[Cl^-] = 2.4\text{kg/m}^3$

図-3.1.3.31 質量減少率

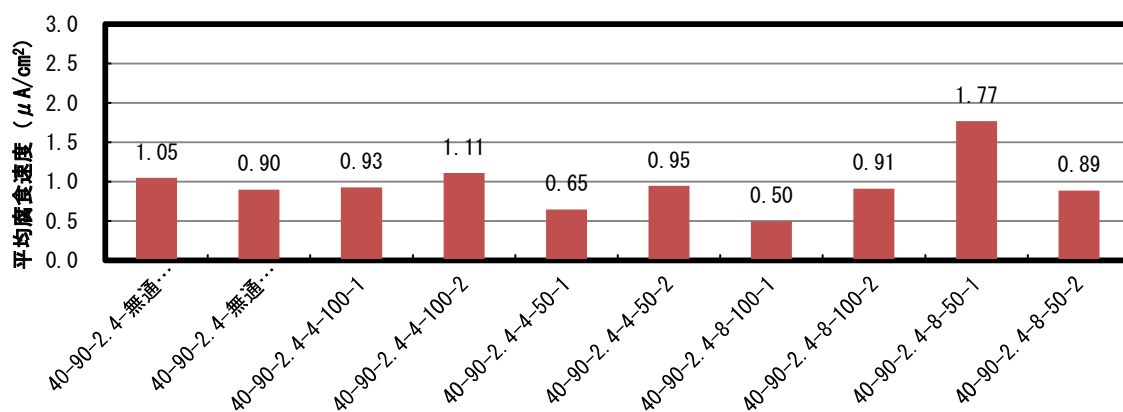
質量減少率から求めた平均腐食速度を図-3.1.3.32に示す。

$[Cl^-] = 12\text{kg/m}^3$  の無通電供試体の平均腐食速度は最大で  $67.75\mu\text{A/cm}^2$  であり、CEB の腐食速度判定では「高い腐食速度」に判定される。海水中の鋼材の腐食速度の3倍以上の値に相当し、極めて激しい腐食環境であることが窺える。通電供試体は最小で  $6.75\mu\text{A/cm}^2$  であり、腐食速度は 1/10 程度に抑えられているが、目標としている腐食速度以下 ( $0.1\mu\text{A/cm}^2$  以下：不働状態) には抑えられていない。

$[Cl^-] = 2.4\text{kg/m}^3$  の無通電供試体の平均腐食速度は、 $1.0\mu\text{A/cm}^2$  程度であり、CEB の腐食判定では「中～高程度の腐食速度」に判定される。通電供試体は最小で  $0.19\mu\text{A/cm}^2$  であり、腐食速度は 1/5 程度に抑えられているが、 $0.1\mu\text{A/cm}^2$  以下には抑えられていない。



(a)  $[Cl^-] = 12kg/m^3$



(b)  $[Cl^-] = 2.4kg/m^3$

図-3.1.3.32 質量減少率から求めた平均腐食速度

平均復極量と質量減少率の関係を図-3.1.3.33, 平均復極量と平均腐食速度の関係を図-3.1.3.34 に示す。平均復極量が 100mV を下回ると質量減少率が大きく増加しているのが図から読み取れる。平均復極量が 100mV を下回っているプロットの多くは  $[Cl^-] = 12kg/m^3$  の通電供試体であり,  $[Cl^-] = 2.4kg/m^3$  の 10 倍以上の速さで鉄筋腐食が進行していた。平均腐食速度は,  $[Cl^-] = 2.4kg/m^3$  の通電供試体でも最小値 :  $0.50\mu A/cm^2$ , 最大値 :  $1.77\mu A/cm^2$  であり, CEB の腐食判定指標である  $0.1\mu A/cm^2$  よりも大きい値であった。

よって,  $40^\circ C-90\%RH$  の環境下に暴露された  $[Cl^-] = 2.4kg/m^3$  以上の内在塩分を含む供試体に対し, 今回の通電条件 (通電時間, 目標シフト量) では, 通常期待されるレベルの電気防食効果は得られないと結論付ける。

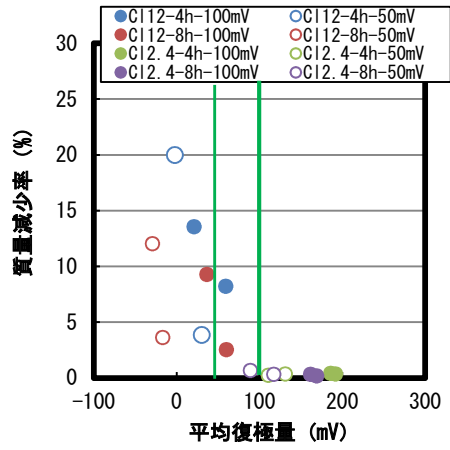


図-3.1.3.33 平均復極量と質量減少率

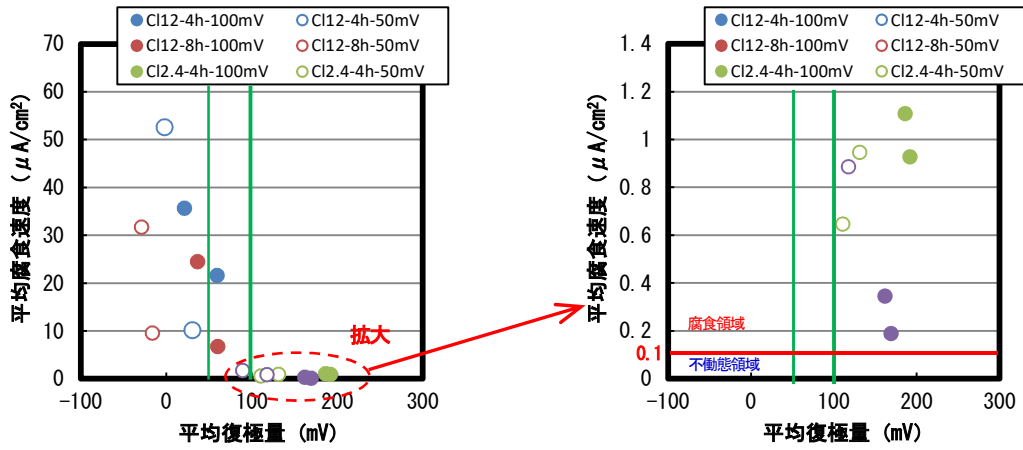


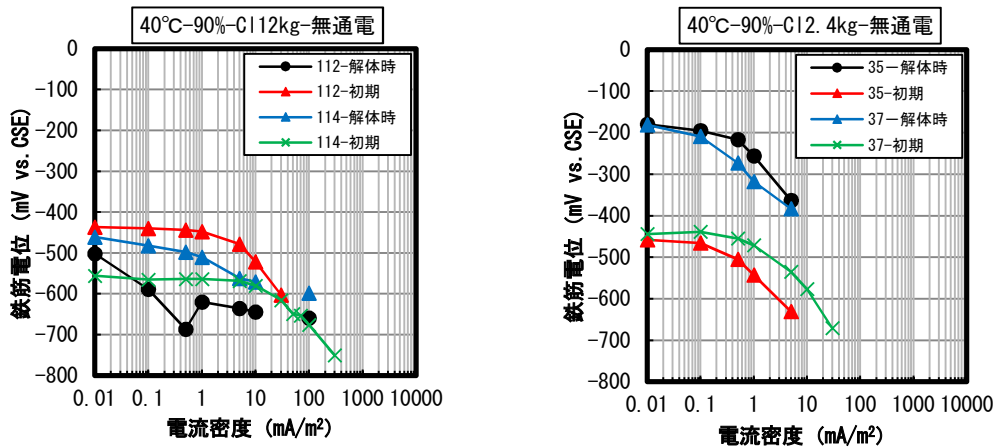
図-3.1.3.34 平均復極量と平均腐食速度

### (7) カソード分極曲線

試験開始時と供試体解体時に測定した鉄筋のカソード分極曲線を図-3.1.3.35～図-3.1.3.39に示す。

無通電供試体の自然電位は、いずれの内塩分量についても開始時に比べて解体時の方が貴な値を示しており、とくに $[Cl^-] = 2.4\text{kg/m}^3$ の方がその傾向が顕著であった。そのため、低電流密度領域の曲線に違いが生じているが、溶存酸素の拡散の影響が現れる $-600\text{mV vs. CSE}$ 以下の領域におけるカソード分極曲線の傾き、各電位に対する電流密度に違いは認められなかった。

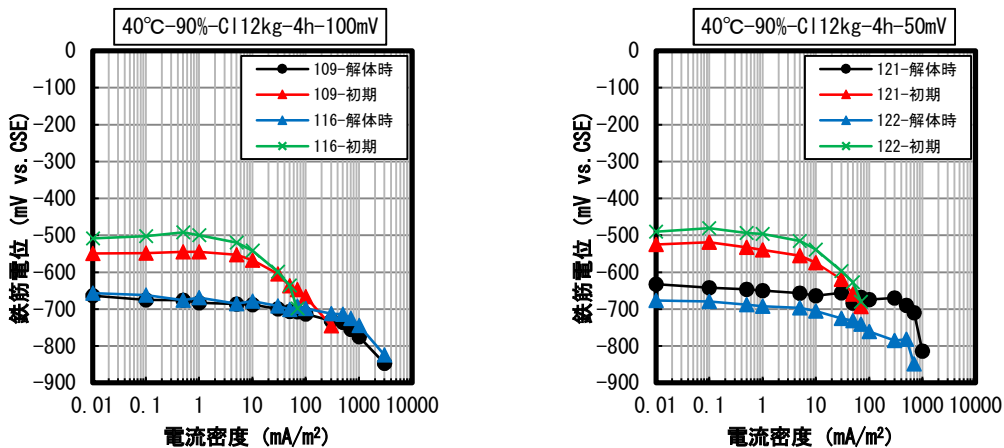
$[Cl^-] = 12\text{kg/m}^3$ の通電供試体は、いずれも開始時に比べて自然電位が卑化していた。溶存酸素の拡散の影響が現れる $-600\text{mV vs. CSE}$ 以下の領域では、解体時のカソード分極曲線の傾きの方が小さくなっており、各電位に対する電流密度も増加していた。これはひび割れの影響が大きいと考えられ、鉄筋の腐食によって生じた錆の還元電流が溶存酸素の還元電流に上乘せられているためと解釈される。一方、 $[Cl^-] = 2.4\text{kg/m}^3$ の通電供試体は、通電試験の影響(鉄筋のアノード分極抵抗の増大)でいずれも開始時に比べて自然電位が貴化していた。溶存酸素の拡散の影響が現れる $-600\text{mV vs. CSE}$ 以下の領域におけるカソード分極曲線の傾きに変化は認められないが、各電位に対する電流密度は低下していた。 $[Cl^-] = 2.4\text{kg/m}^3$ では、電気防食によって鉄筋表面への溶存酸素の供給速度を低く抑えていると言える。



(a)  $[Cl^-] = 12\text{kg/m}^3$

(b)  $[Cl^-] = 2.4\text{kg/m}^3$

図-3.1.3.35 無通電供試体のカソード分極曲線

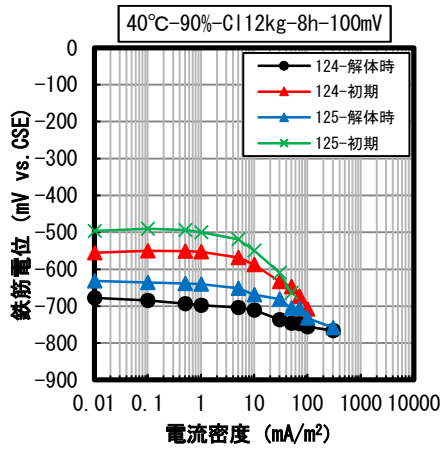


(a) 4時間-100mV

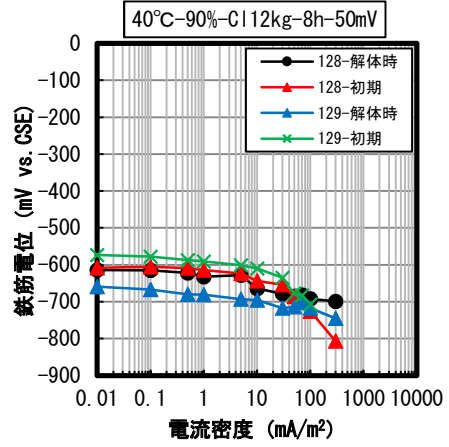
(b) 4時間-50mV

図-3.1.3.36 通電供試体のカソード分極曲線 ( $[Cl^-] = 12\text{kg/m}^3$ ) ①



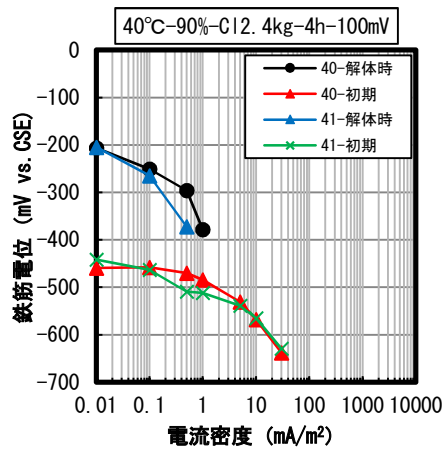


(a) 8時間-100mV

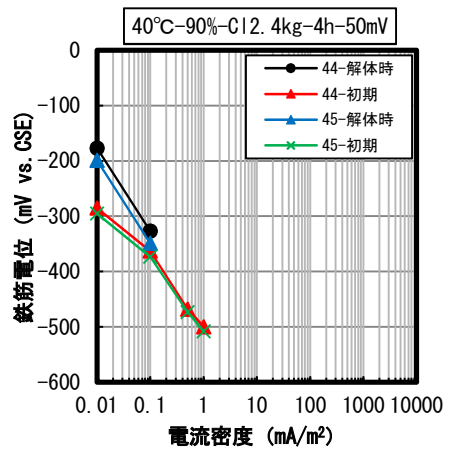


(b) 8時間-50mV

図-3.1.3.37 通電供試体のカソード分極曲線 ( $[Cl^-] = 12kg/m^3$ ) ②

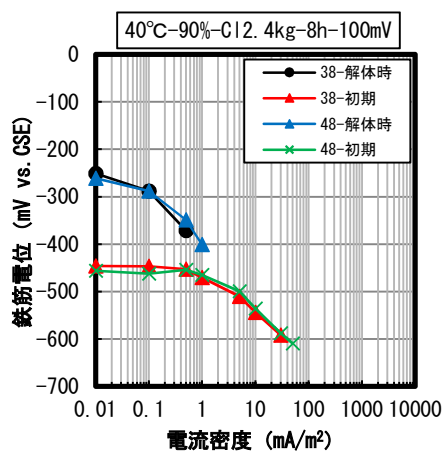


(a) 4時間-100mV

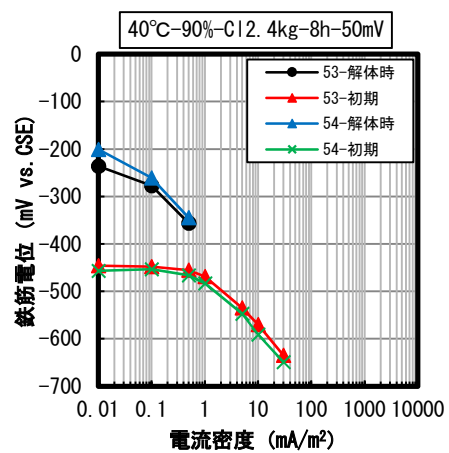


(b) 4時間-50mV

図-3.1.3.38 通電供試体のカソード分極曲線 ( $[Cl^-] = 2.4kg/m^3$ ) ①



(a) 8時間-100mV



(b) 8時間-50mV

図-3.1.3.39 通電供試体のカソード分極曲線 ( $[Cl^-] = 2.4kg/m^3$ ) ②

### 3.2 各条件の腐食電流密度

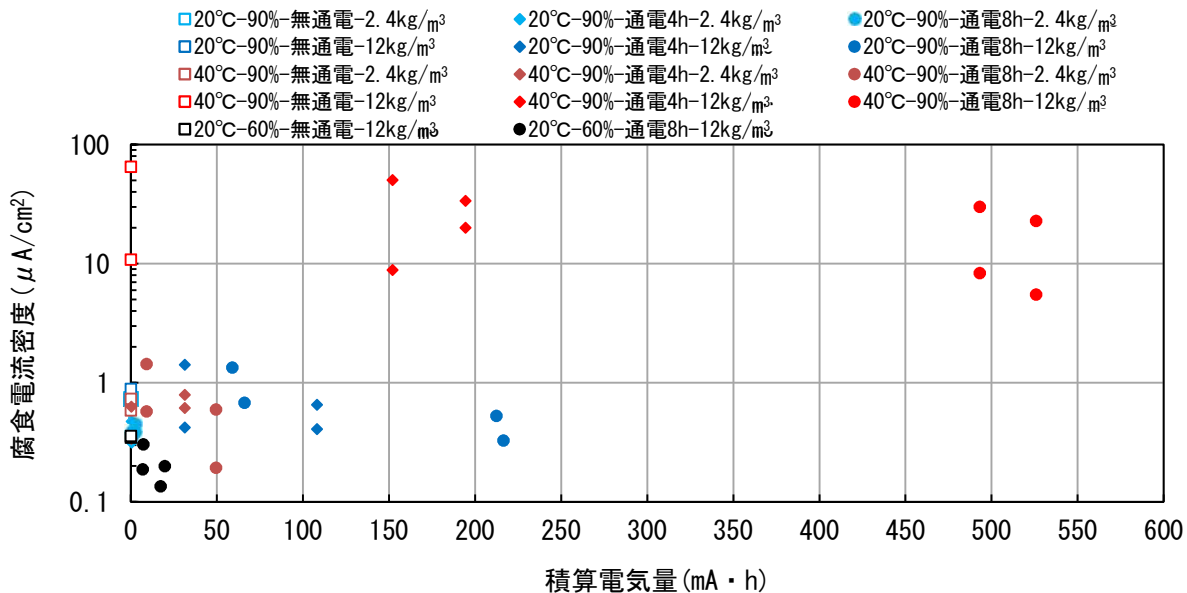
#### 3.2.1 積算通電電氣量および防食電流密度と腐食電流密度の関係

防食電流に通電時間を乗じた積算電氣量と通電終了後に測定した腐食減量から求めた腐食電流密度の関係を図-3.2.1に示す。各環境条件における防食電流密度と無通電供試体の腐食電流密度との関係を図-3.2.2に示す。

塩化物イオン量の大小によらず、通電供試体の腐食電流密度は積算電氣量が小さい場合には無通電供試体と同程度かそれ以上の値となり、積算電氣量が大きい程、低下する傾向があった。また、無通電供試体の腐食電流密度が低い程、より小さい積算電氣量で腐食電流密度が低下したことが確認された。しかし、通電供試体を含めた全ての供試体で腐食電流密度は $0.1 \mu A/cm^2$ 以上であった。これは、RILEM 腐食速度判定では「腐食性：低」以上を示したため、鋼材の腐食進行が認められた。特に温度 $40^\circ C$ 、塩化物イオン量 $12kg/m^3$ では、通電供試体を含む全てが $1.0 \mu A/cm^2$ を大幅に上回る値を示した。

図3.2.2から無防食の腐食電流密度が、 $1.0 \mu A/cm^2$ より低い場合は電気防食によって、上述のようにわずかな防食効果が認められた。これは、通電時間中は電気防食の防食効果があったことに加えて、鋼材表面の環境改善効果があったと考えられる。しかし、温度 $40^\circ C$ 、 $90\%RH$ 、塩化物イオン量 $12kg/m^3$ のような腐食性が高い条件では、腐食電流密度の低下はわずかであった。これは、通電停止時間中に腐食が進行し、鋼材表面の環境改善が生じなかったためと考えられる。

以上のことから、本実験の通電条件では電気防食に求められる防食効果は認められなかった。特に温度 $40^\circ C$ 、 $90\%RH$ 、塩化物イオン量 $12kg/m^3$ では、腐食電流密度が高い防食対象では防食効果は低いと考えられる。ただし、防食電流密度を高く、あるいは通電時間を長くすることで腐食は抑制できることが示唆された。



※凡例：温度-湿度-通電時間-塩化物イオン量

図-3.2.1 積算電氣量と腐食電流密度の関係

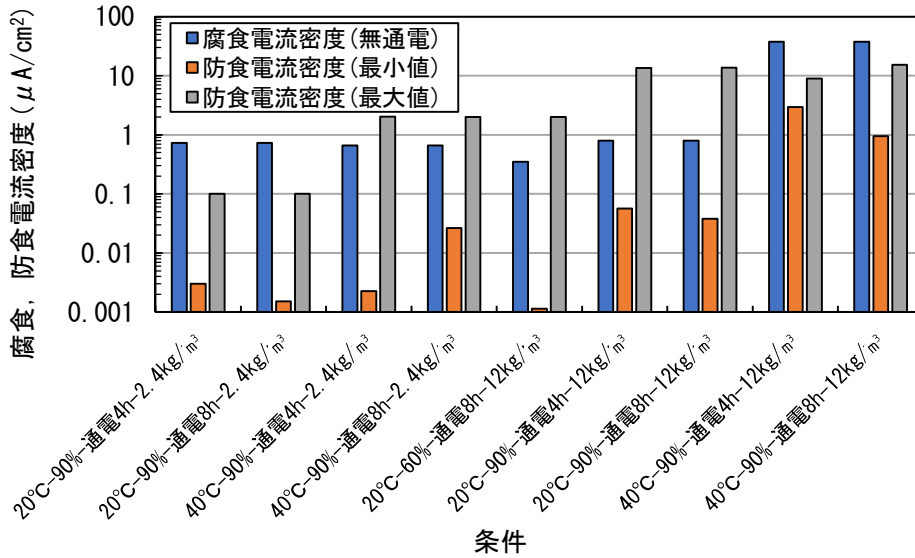
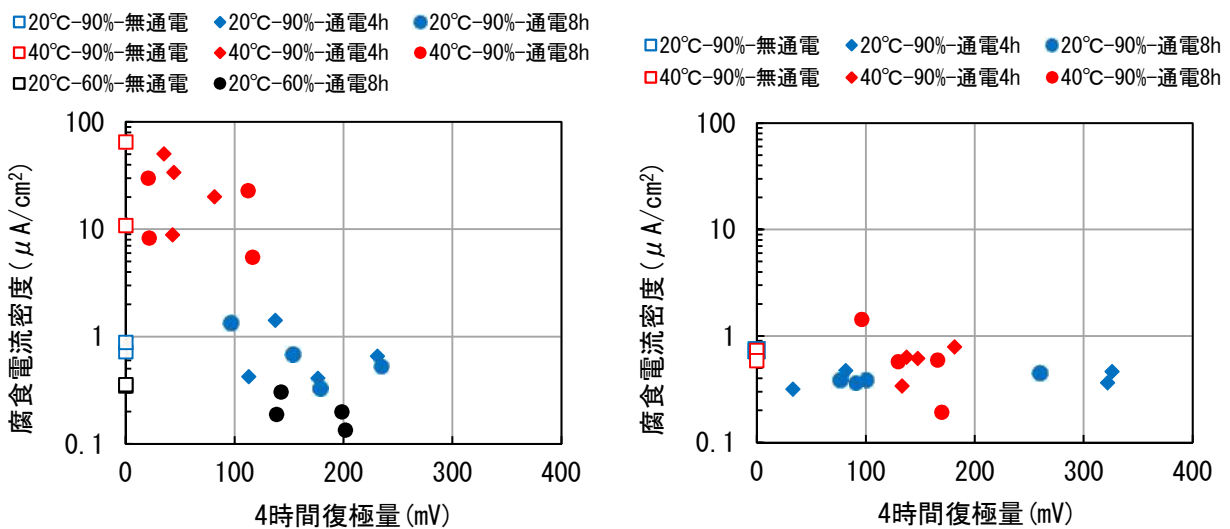


図-3.2.2 各環境条件における防食電流密度と無通電供試体の腐食電流密度の関係

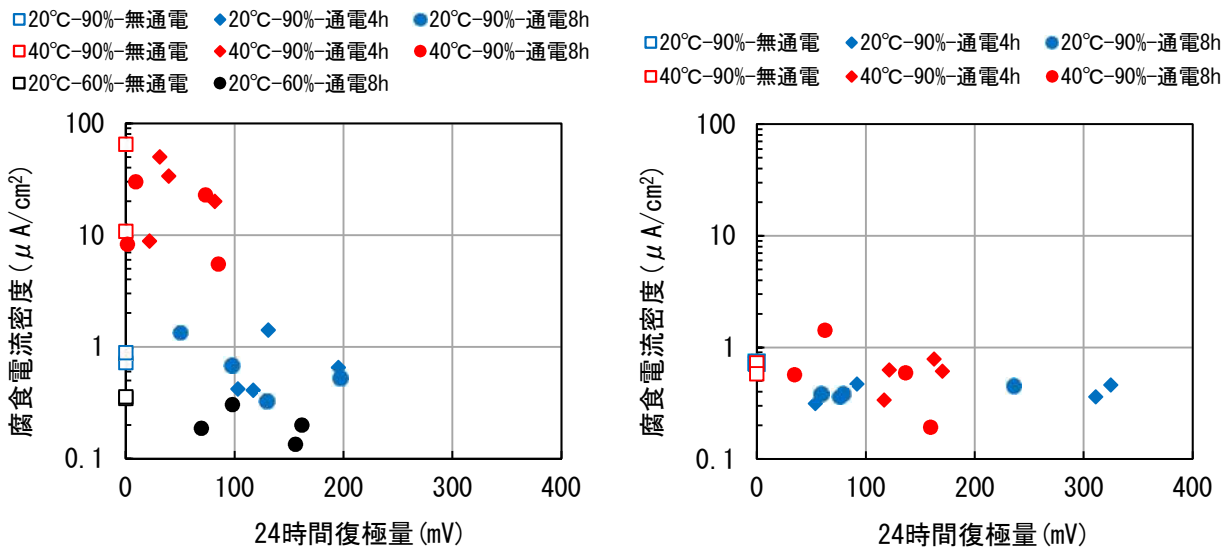
### 3.2.2 平均復極量と腐食電流密度の関係

通電期間中に測定した4および24時間復極量の平均値と腐食電流密度の関係を図-3.2.3および図-3.2.4に示す。塩化物イオン量の大小によらず、通電供試体の腐食電流密度は無通電供試体に比べ、低い傾向であった。塩化物イオン量が12kg/m³の供試体では、4および24時間復極量が大きくなる程、腐食電流密度が低下する傾向があった。しかし、復極量が100mVを満たした通電供試体でも、RILEM腐食速度判定では「腐食性：低」以上である0.1μA/cm²以上の値が認められた。このことから、本実験の通電条件では、一般的な防食基準であるシフト量100mV以上を保っても、防食効果が得られなかった。ただし、3.2.1項のように電気量を増加させると腐食電流密度は低下するため、シフト量100mVにこだわらず、防食電流密度および通電時間を増加させることで、腐食を抑制できることが示唆された。



※凡例：温度-湿度-通電時間

図-3.2.3 平均4時間復極量と腐食電流密度の関係(左:塩化物イオン量12kg/m³, 右:2.4kg/m³)

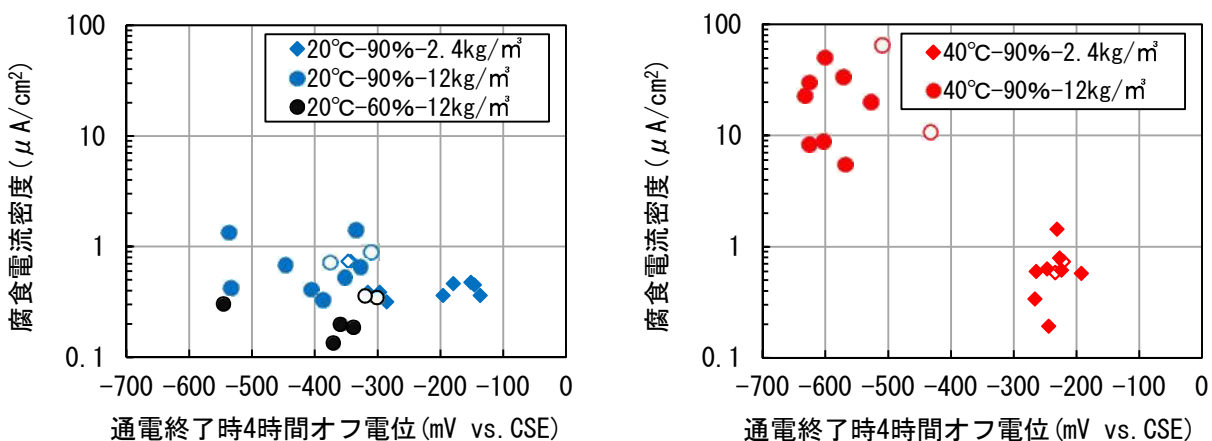


※凡例：温度-湿度-通電時間

図-3.2.4 平均24時間復極量と腐食電流密度の関係(左:塩化物イオン量 12kg/m<sup>3</sup>, 右:2.4kg/m<sup>3</sup>)

### 3.2.3 試験終了後の鋼材電位と腐食電流密度の関係

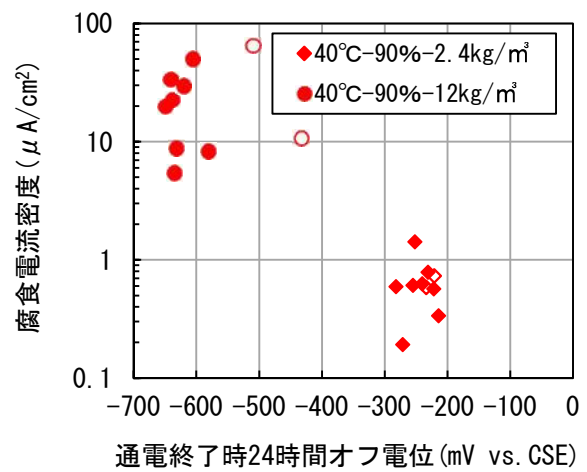
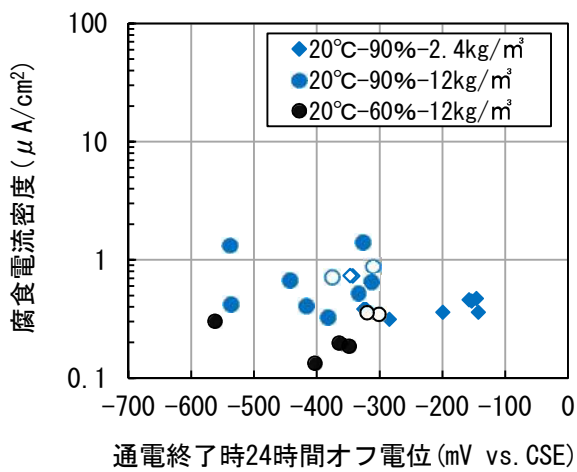
試験終了後、通電をオフし、4および24時間経過した鋼材電位と腐食電流密度の関係を図-3.2.5および図-3.2.6に示す。試験終了後の電位は温度および湿度が同様である場合、塩化物イオン量が12kg/m<sup>3</sup>の供試体に比べ、2.4kg/m<sup>3</sup>のものは貴な値で、腐食電流密度は小さい傾向であった。これは、塩化物イオン量が12kg/m<sup>3</sup>の場合は、鋼材表面が活性な状態であったが、2.4kg/m<sup>3</sup>のものは不動態化傾向だったためと考えられる。また、塩化物イオン量が12kg/m<sup>3</sup>の通電供試体の電位は、無通電供試体の自然電位と比べ、概ね卑な値であった。これは、無通電供試体では腐食部でアノード分極が進行することで自然電位が貴化し、一方で、通電供試体では定期的に外部からカソード電流が供給されることでアノード分極が抑えられたためと考えられる。これらの傾向は、通電オフ時間に関係なく認められた。



※<sub>1</sub> 白抜きは無通電供試体

※<sub>2</sub> 凡例：温度-湿度-塩化物イオン量

図-3.2.5 通電終了後4時間オフ電位と腐食電流密度の関係(左:20°C, 右:40°C環境)



※<sub>1</sub> 白抜きは無通電供試体

※<sub>2</sub> 凡例：温度-湿度-塩化物イオン量

図-3.2.6 通電終了後24時間オフ電位と腐食電流密度の関係(左:20°C, 右:40°C環境)

### 3.3 通電停止期間の復極状況

電気防食工法の原理は、コンクリート内部鋼材に防食電流を供給することで卑（-）方向に電位を分極させることである。したがって、鋼材は、防食電流の供給が停止すると鋼材周辺の水、酸素をともなって、貴（+）方向に復極し、通電停止時間が経過すると自然電位で安定し、電気防食における防食効果確認試験である復極量試験では、通電を停止した後 24 時間後の電位とインスタントオフ電位の差を復極量として評価する。その概念を図-3.3.1 に示す。なお、通電停止後の自然電位は、外気温等によって変動する。

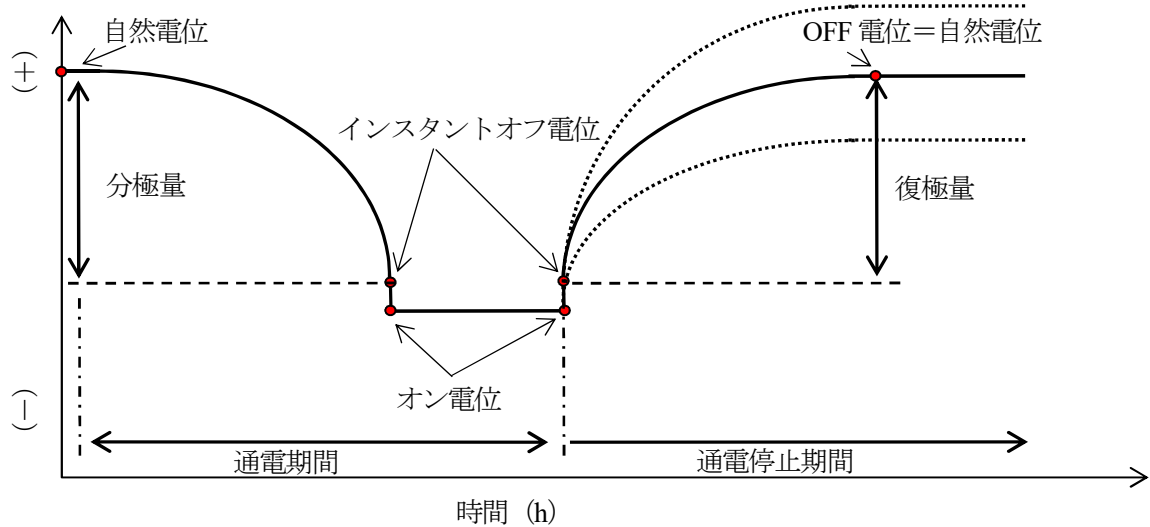


図-3.3.1 通電期間と通電停止期間中の鋼材電位の変動

また、通電停止後に安定するまでに必要とする時間は、鋼材周辺の環境等によって異なる。そこで、間欠通電における通電停止期間の復極状況がどのような状況であるかに着目した。図-3.3.2 には、貼り付け型の飽和銀塩化銀電極を室温 40℃、90%RH に曝露した供試体に張り付け、データロガを用いて連続的に内部鋼材の電位挙動を確認した結果を示す。測定で使用した貼付け型照合電極は、湿度の高い状態で使用すると照合電極電位の安定性が悪いため、設置して1週間以内の1日分のみを示した。なお、図中には、電位変化が顕著に確認された塩化物イオン量 12.0 kg/m<sup>3</sup>、1 日の通電時間が 4 時間の供試体（供試体 No.118）を示している。

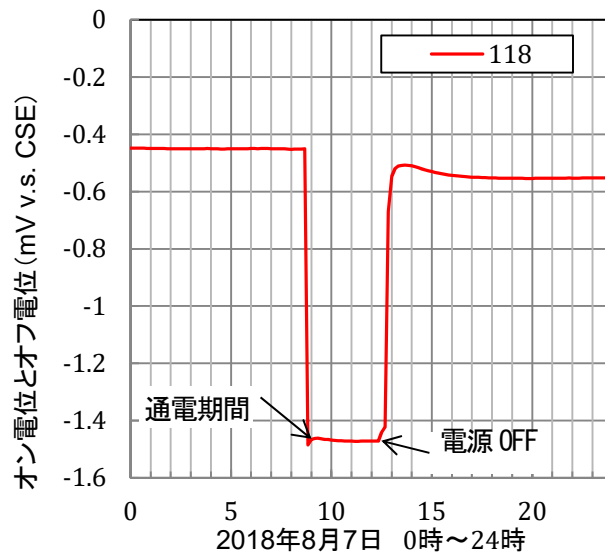


図-3.3.2 間欠防食中の電位変動の一例 (2018年8月7日)

この図に示される通電時の電位は、IRを含むオン電位である。鋼材への防食電流の供給を停止した後（電源オフ後）の電位の変動、つまり鋼材の復極状況に着目すると、通電停止から1時間程度で最も貴な電位を示し、その直後から電位が卑な方向に移行することが確認できる。これらを考察すると、鋼材が復極状態にある期間は、電気防食の効果により強制的に卑な電位に移行された後、鋼材周辺の環境に依存した鋼材電位まで復極しているため、少なくとも電気防食の効果が持続しているものと考えられる。しかし、自然状態の鋼材電位まで復極した後、短時間で電位が卑な方向に移行することは、防食電流による移行ではなく、鋼材の腐食進行に伴う電位の変化であると考えられる。本結果は、通電停止後1時間程度は、防食効果が得られていると考えられるが、通電停止1時間を経過した段階から次に通電が始まるまでの期間は、腐食が進行している状態になったと推測することができる。

このことから、厳しい腐食環境では、間欠通電により防食電流を供給すると通電停止後、短時間で鋼材の腐食が開始することが示唆されるため、電気防食による防食が十分でない可能性がある。

通常の電気防食では、防食期間中は常に防食電流が供給されているため、復極することはないが、間欠防食あるいは断続防食では、定期的あるいは不規則に防食電流の供給が停止する。したがって、間欠・断続通電による電気防食を適用する場合は、通電停止期間の電位の復極状況を把握することが重要である。また、復極量測定では、通常24時間を指標として測定されることが多いが、本結果で得られたような鋼材に対しては、24時間後の復極量よりも1時間後の復極量が大きくなる現象が生じる。つまり、復極量をどの時間で判断する必要があるかを検証することも必要である。

一方で、対象鋼材の復極速度が遅い場合には、適用が可能であると考えることができる。

### 3.4 間欠通電（断続通電）の適用にあたって

現在、電気防食工法では、構造物の供用期間中、常時防食電流を供給することが基本である。したがって、防食電流を供給するための直流電源装置を稼働させる電源の引き込み、あるいはソーラーパネルを用いた場合には蓄電池が必要不可欠となっている。本検討では、ソーラーパネルなどの自然エネルギーを用いた場合に蓄電池を用いず、断続的に防食電流を供給する電気防食工法に関して基礎的な実験を実施した。

今後は、本報告における実験を継続することにより、断続通電の課題解決になることを期待している。以下には、課題と展望を記載する。

#### <課題>

##### a) 適用範囲および防食面積の明確化

断続通電では、少なくとも1日の中で防食電流の供給が停止される期間があり、場合により数日間の供給停止、あるいは設定電流量以下の供給となる可能性がある。したがって、内部鋼材の腐食環境によっては、防食効果が十分に発揮されない場合がある。そこで、断続通電を適用するにあたっては、適用範囲を明確化することが必要である。例えば、構造物の立地条件にとらわれず、内部鋼材の腐食速度を適用範囲の判断基準とすることなどが考えられる。

また、断続通電が最も効果的となる電源システムは、ソーラーパネルなどの自然エネルギーを活用することである。例えば、ソーラーパネルを使用する場合、防食面積によってパネル面積を大きくする必要があり、現実的に設置可能なパネル面積には限界があるため、防食面積とパネル面積の関係も確立する必要がある。

##### b) 最適な電位シフト量の設定

現在、電気防食工法では、防食基準として電位シフト量を100 mV以上と設定することが一般的である。しかし、断続通電では、防食電流の供給が停止し短時間で内部鋼材の復極が終了し、次の通電が開始されるまでの間に腐食が開始することが考えられる。したがって、あらかじめ復極量を大きく設定するなどの手法により、できる限り通電停止期間中の鋼材を復極状態に維持すること、あるいは腐食環境にならないような手法を確立する必要がある。

##### c) 復極量測定時の最適なオフ時間の設定

現在、復極量を測定する場合、通電停止24時間後とすることが一般的である。断続通電では、鋼材の腐食環境により、通電停止期間に復極状態から腐食状態に電位が卑化することが考えられる。したがって、設定シフト量を測定するためのオフ時間の最適設計を行うことにより、復極状態を維持させる手段となる。

#### <展望>

本試験では、通電停止期間内の鋼材の復極速度が防食効果を発揮するための一つの目安であることが確認された。したがって、含水状態が高いコンクリート中の鋼材では、復極速度が遅いことが考えられるため、このような環境での適用は可能であるものと考えられる。また、断続通電による電気防食工法は、外部電源方式における直流電源装置の簡略化、自然エネルギーの適用など今後の電気防食工法の普及に大きく貢献する方法である。特に、道路橋では、桁端部、桁遊間部など防食面積が狭い箇所への電気防食の適用も有効であり、コン



パクトな電源システムを構築することが求められる。

今後、更なる検討を重ねることで、コンクリート道路橋における維持管理手法として本通電方法による電気防食工法が確立され、コンクリート道路橋の長寿命化へ貢献できることを期待する。

## 8 編 結論

### 1. 研究調査結果の要点

道路橋に対する維持管理は、ストックの増大と進行する老朽化、凍結防止剤を含めた塩害の進行、また、筐子トンネルでの事故をはじめとした維持管理に関する運用の変化を受けて、効率的かつ実効性のある点検と対策方法の整備が求められている。

電気防食工法のコンクリート橋への適用後の維持管理にあたっては、これまで土木研究所から提案している「コンクリート構造物中の電気防食要領（案）1988年」、「新設コンクリート橋の電気防食マニュアル（案）2000年」、土木学会で制定している「電気化学的防食工法設計施工指針（案）2001年」において、維持管理手法が示されている。しかしながら、これらの維持管理手法の提案後に長期間が経過しているなかで、その活用状況や効果などは検証されておらず、橋梁維持管理の体制確保や重要性が増しているなかでその更新もなされていない。また、その後開発された新しい陽極システムや、新たに発生している不具合などへの対応も必要となっている。

そこで、本共同研究では、電気防食適用橋梁における道路管理者への実態アンケートや維持管理データの整理、実橋調査やその解析検討などから、現行の維持管理手法の改善点を明確にし、電気防食工法の新たな維持管理マニュアル（案）を提案した。

#### 1.1 工法の現状と維持管理の実態

##### 1.1.1 電気防食工法の現状

本研究では、コンクリート橋における電気防食工法の現状を、国内で電気防食工法を保有する業者等へのアンケートから調査した。本報告書の第2編に示した調査結果の要点は以下のとおりである。

- ・電気防食工法は、2001年に土木学会で整理された以降も、陽極形式を中心に新たな工法が開発されてきている。陽極には点状・線状・面状があり、近年では線状や面状のものが増えてきている。
- ・工法概要およびその特徴を、構造部位や環境への適用性を工法などの指標ごとに一覧するとともに、耐用年数、コスト、施工実績、主な設備交換状況などについて、これまでの実績をもとに整理した。

##### 1.1.2 維持管理の実態

本研究では、コンクリート橋における電気防食工法の維持管理の実態を把握するために、橋梁を管理する道路管理者（ユーザ側）へのアンケートと、電気防食工法を保有する業者（メーカ側）へのアンケートの、両面から調査した。本報告書の第3編に示した調査結果の要点は以下のとおりである。

- ・電気防食の点検頻度として、工法保有業者（メーカ側）が理想とする管理水準等を整理した。日常管理の点検頻度としては、電気設備であることから毎月の点検が望ましいと考えていることがわかった。
- ・陽極システムの設置方法により点検のポイントが異なるため、目視点検において何を見るべきであるのか留意点を整理した。

- ・電気防食適用後の管理実態としての管理者アンケート調査結果では、毎月の稼働点検を行っているのは1/3程度で、2/3以上の橋梁は日常的な点検を年一回以下あるいは実施していない状況であった。
- ・維持管理上の課題として、点検項目や着目点が工法ごとに様々であり、機器の表記や表示灯なども統一されていないため、点検実施者に向けた要領や機器の標準化が必要であることが指摘された。
- ・点検管理を支援する技術として、通信による遠隔管理システムや、現場での防食状態調査機器などが開発され適用事例も報告されており、様々な状態監視を支援できることがわかった。

## 1.2 電気防食適用後の不具合実態調査

現状および実態調査を受け、電気防食工法の適用後の実橋の実態調査を行った。そして、不具合が生じている橋梁について現場における詳細調査を行った。本報告書の第4編および5編に示した調査結果の要点は以下のとおりである。

- ・コンクリートの剥落部では、鋼材分極量が50mV未満と小さい値を示した。剥落部周辺にも分極量の小さい範囲が確認され、今後劣化する可能性があることが危惧された。
- ・陽極被覆モルタルに数10cm程度の剥落や浮きなどの損傷が発生していても分極量は確保できる。しかし、陽極被覆モルタルを再補修することにより分極量が向上することから、防食効果は少なからず低下することがわかった。
- ・流電陽極方式は犠牲陽極量等に応じた耐用年数があり、通電期間が予定を超過しても設計余裕等から防食効果は得られるものの、部位により陽極消耗量は異なるため、耐用年数を考慮して点検によって陽極の残存量を確認する必要がある。
- ・干満部等の水分量変化の多い箇所が存在すると電流分配が不均一になることがあるため、適用箇所の条件に応じた電気防食工法の選定や回路分け等が必要となるほか、点検で通電状態を確認する必要がある。
- ・電気防食適用後に不具合の生じた撤去桁を対象として、電気化学的測定と数値解析により防食状態を評価した。その結果、適切な防食効果を得るためには、鋼材量や配筋、部材の形状を考慮して適切に陽極配置を選定するとともに、電線結線部の処置を適切に実施することの重要性を指摘した。
- ・陽極設置コンクリート面の目視点検が厳しい施設においては、維持管理計画書に点検方法やそれに必要な機材等の手段を具体的に明記することで、維持管理の着実な実施が進むものと考えられる。

## 2. 維持管理マニュアルの策定

本研究の調査結果をもとに、土木研究所および土木学会が策定した既往の維持管理手法を包括し更新するとともに具体的事項を拡充するかたちで、コンクリート道路橋の電気防食の維持管理マニュアルを策定した。現時点での技術基盤と維持管理体制での運用を踏まえて構成した。マニュアル作成における主な事項は次のとおりである。

## 2.1 点検種別と頻度の設定

電気防食は、まず、稼働し防食電流が流れていることが不可欠であり、さらにその電流が適切に調整されていることが求められる。マニュアルでは、維持管理および不具合実態等の調査結果から、点検種別とその頻度を定めた。電気防食工法の維持管理に関わる要点は次のとおりである。

- ・電気防食工法の維持管理では、「稼働状態」と「防食状態」の管理が必要である。稼働状態は防食電流が流れていることを確認し、防食状態の管理は鋼材の電位状態等の測定と電流量の設定を行う。
- ・「稼働状態」は、橋梁管理者が6か月に1回以上の頻度で行う「通常点検」により確認する。
- ・「防食状態」は、専門的知識を有する者が「初期点検」、「中間点検」、「定期点検」により、1～3年に一回以上の頻度で確認する。
- ・「初期点検」は、防食電流量の設定を主目的に、電気防食適用開始後の夏季には必ず実施する。

## 2.2 点検内容と記録

電気防食工法では、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ため、点状・線状・面状といった形態と、それらを埋設方法によりさらに分類し、目視点検において何を見るべきであるか具体的に解説した。

維持管理では、それを記録し将来の事象への診断と対策に備えるとともに、維持管理サイクルの効率化や高度化につなげることが重要である。維持管理マニュアルでは、それぞれの点検種別ごとに標準的な記録表の例を示して記載すべき事項や内容を示した。計測を伴うものについては、通電方式ごとに記録項目を設定し、代表的な電源装置ごとに現場での計測手順の事例も紹介した。

## 3. 今後の課題と展望

### 3.1 維持管理マニュアルの社会実装

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、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へ安定して流すことが不可欠である。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て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、次に述べる設計や施工へのフィードバック事項を含め、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。

本研究では、維持管理に関する研究調査に注力して進めてきたが、設計や施工に対してフィードバックする多くの知見も得られた。たとえば、計画設計に対しては、工法選定上の環境条件の制限や、維持管理を前提とした目視点検を可能とする電源装置表示灯の標準化や、損傷抑制や目視確認に配慮した配線類の配置が

必要であることがわかった。また、撤去橋梁の詳細調査や電流解析から得られた適正な電極配置などは、維持管理における対策ばかりでなく適用時の設計照査に参照すべき事項でもある。施工面では、配線の接続方法が原因となる不具合が複数みられたほか、それらを保護する配管等へのさまざまな留意事項もわかった。これらの知見は、維持管理マニュアルの対策にとどめるのではなく、計画、設計、施工に関する技術資料に反映すべきものである。

### 3.2 新技術の活用

新技術に関しては、陽極システムはメーカー側の間断なき技術開発により機能性や耐久性に富むものが開発されてきている。また、通信による遠隔管理システムや、現場での防食状態を簡易に調査できる機器などもとりに入れることにより、維持管理の高度化や信頼性の向上をはかってゆくことが望まれる。

本研究では、維持管理負担を軽減する技術の一つとして、間欠的な通電による電気防食の適用性について、基礎的な実験検討を行った。間欠的な通電は、商用電源や蓄電池を用いない簡易な電源装置による防食が可能となるため、維持管理をはじめとした適用上の課題が少なくなる。とくに予防的保全対策など防食の要求性能が高くない条件等で普及が期待されるが、適用基準に対する基礎的な情報が不足していることから、その評価データの実証調査を行った。本報告書の第7編に示したように、通電停止時間中の復極挙動に着目してその適用性を判断することが必要で、判断指標としては鋼材の腐食環境と腐食速度、設定する分極量などがあげられることがわかった。これらの知見は、通常の電気防食で通電停止が生じた際の評価にも示唆を与えるものとなった。なお、暴露試験等の実験調査を含む共同研究の本項目は、2年間の延長が決まっており適用性の実験調査が続けられている。今後の研究調査結果から成果を集約しあらためて報告することとしている。

---

共同研究報告書  
Cooperative Research Report of PWRI  
No.502 July 2018

編集・発行 ©国立研究開発法人土木研究所

---

本資料の転載・複写の問い合わせは

国立研究開発法人土木研究所 企画部 業務課  
〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6 電話029-879-6754