

報告 鉄道橋におけるアルミニウム系流電陽極パネルによる電気防食の試験的適用の経過について

堀澤 誠*1・松田 芳範*2・阿部 雄太*3・蝦名 仁美*4

要旨：塩害環境下にある鉄筋コンクリート構造物の劣化対策として、電気化学的防食工法による有効性が確認されている。電気防食は外部電源方式と流電陽極方式に大分されるが、当社では2010年3月より鉄筋コンクリートの橋りょうにおいて、試験的にアルミニウム系流電陽極パネルを用いた流電陽極方式の電気防食をおよそ8年間適用してきた。その中でパネルの導通不良が生じ防食効果が低下したため、パネル本体と固定方法を改良、変更することでパネルの導通不良を解消した。現時点ではパネルの導通、復極量ともに安定傾向にあり、防食効果が得られていると考えられる。

キーワード：電気防食, 塩害, 鉄筋腐食, 流電陽極, 維持管理

1. はじめに

鉄筋コンクリート（以下 RC）構造物は、塩害によりコンクリート内部にある鋼材が腐食し、鋼材断面の減少によって構造物の耐力を低下させる。塩害環境の厳しい RC 構造物では、変状が確認された時点で急激に耐力低下するケースが多く、適切な劣化対策を実施する必要がある。その対策として電気化学的補修工法のうち電気防食は多くの実績があり、鉄道橋りょうでも採用されている。

ここでは、現地試験施工として2010年3月（1985年供用開始、経年25年）にアルミニウム系流電陽極パネル（以下、アルミパネル）を用いた流電陽極方式の電気防食工法を施工した橋りょうについて、電気防食の適用からおおよそ8年間の調査結果を報告する。この8年間には、防食効果の確認のため12回の点検・調査を行ってきた。約3年経過した時点で導通不良箇所が確認されたため、2014年に改良型パネルの再設置を行った。さらに2016年から2回の RC 桁の調査結果を踏まえ、電気防食適用からこれまでの経過について報告する。

2. 現地試験概要

2.1 適用橋りょう

アルミパネルを用いた電気防食を適用した構造物は、日本海沿岸に位置する鉄道橋で RC 単純床板橋（桁長6.59m, 幅員4.80m）2連、供用開始から経年33年である。海岸線より20m程度の距離に位置しており、海からの飛来塩分が橋りょうに供給される環境にある。施工前の調査では、主桁側面におけるコンクリート表面付近の塩化物イオン量は、海側で約22kg/m³、山側で約19kg/m³と高い値を示しており厳しい塩害環境である。橋りょう



図-1 現地試験適用橋りょう

の全景を図-1に示す。

2.2 電気防食適用範囲

試験施工前の2009年10月（経年24年7か月）に自然電位法によりコンクリート内部の鉄筋腐食の診断を実施した。診断は ASTM 基準で評価し、測定結果により防食範囲を決定した。ASTM 基準を表-1に、測定結果を図-2示す。床板橋の海側に90%以上の確率で鉄筋腐食が生じていると診断された箇所が広範囲で確認され、実際のコンクリートにもひび割れや浮きが生じていた。鉄筋腐食診断の結果と主桁山側に変状が生じていないことから、海側の変状箇所の断面修復を行った後、床板橋の海側半面を電気防食適用範囲としアルミパネルを設置することにした。なお、断面修復は、鉄筋の錆をワイヤブラシで除錆し補修部界面にプライマーを塗布した後、ポリマーセメントモルタルを用いて行った。

2.3 当初施工時の流電陽極方式電気防食システム

アルミパネルを流電陽極としてコンクリート面に設置するシステムであるため、維持管理上、コンクリート表面の目視検査ができないことが課題であった。継続的に目視を実施できるようにパネルとパネルを離して、スリットを設けることにした。アルミパネルの配置図を図-3、設置状況を図-4、桁断面図を図-5に示す。アルミパネ

*1 東日本旅客鉄道株式会社 構造技術センター コンクリート構造グループ（正会員）

*2 東日本旅客鉄道株式会社 構造技術センター コンクリート構造グループ 副課長（正会員）

*3 東日本旅客鉄道株式会社 新潟支社 新潟土木技術センター 橋りょう検査グループ

*4 株式会社ナカボーテック 技術統括部 RC技術課（正会員）

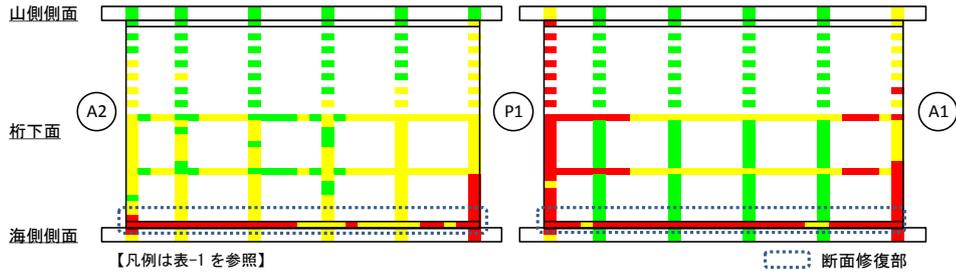


図-2 自然電位分布図（施工前 2009 年 10 月）

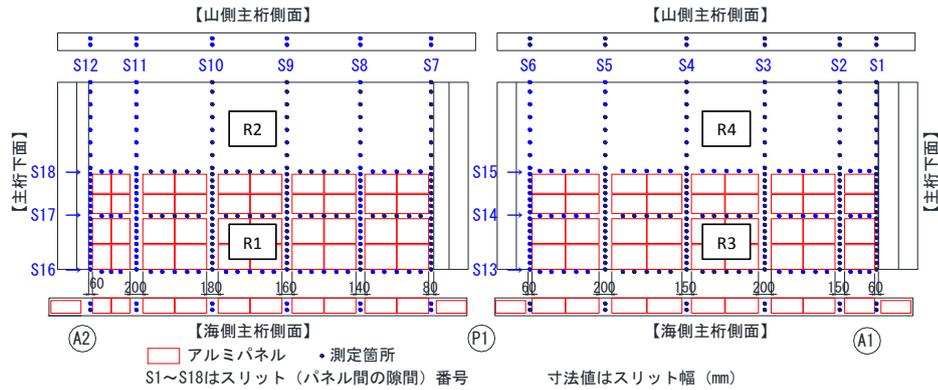


図-3 アルミパネル配置図



図-4 アルミパネル設置状況

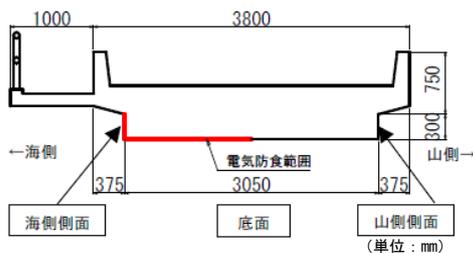


図-5 主桁断面図

ルの取付方法は施工性、システムの簡便性を考慮し、図-6 に示すようにパネル間の導通材を兼ねた固定レールにパネルをはめ込み、面接触で固定する方法を採用した。防食効果の確認は、このスリット部分で追跡調査を行った。測定は、電気防食のモニタリングとして一般的に使用される埋設式照合電極（ MnO_2 ：二酸化マンガン）と可搬式照合電極（SSE：飽和塩化銀）で行い、オン電位（ E_{on} ）、インスタントオフ電位（ E_{io} 、以下オフ電位）、24 時間後のオフ電位（ E_{of} ）、無防食部自然電位（ E_c ）のほか、陽極発生電流（ I_a ）も調査した。埋設式照合電極は各径間につき 2 箇所設置した。A2-P1 は R1（防食部）、R2（無防食部）、

表-1 ASTM C 876 による鋼材腐食性評価

自然電位 (E) (V vs CSE)	鋼材腐食の可能性
■ $-0.20 < E$	90%以上の確率で腐食なし
■ $-0.35 < E \leq -0.20$	不確定
■ $E \leq -0.35$	90%以上の確率で腐食あり



図-6 アルミパネル固定状況

P1-A1 は R3（防食部）、R4（無防食部）とし、防食部および無防食部双方の追跡調査を行えるようにした。また、常時データロガーで E_{on} 、 E_{of} 、 E_c 、 I_a の他、気温・湿度も計測した。

3. 経過報告

3.1 調査履歴

2009 年 10 月の試験施工前の調査から 2017 年 5 月の調査までの履歴を表-2 に示す。2008 年の事前調査において変状箇所を確認し、断面修復範囲を決定した。2009 年 10 月に自然電位測定（初期値）を行い、継続的な測定を実施してきた。前述のとおり 2010 年 3 月にアルミパネルを設置し、流電陽極方式の電気防食を開始した。その後、

定期的に各種電位、電流を測定し、24時間後の復極量が100mV以上あること、電流密度が1~30mAの範囲にあることを確認し、防食システムの状況を経過観察してきた。2011年6月（電気防食後経過15か月）の点検で一部復極量が100mVに満たない箇所を確認し、2013年2月（防食後経過35か月）には、導通不良のパネルが確認できたため、パネル本体と取付方法を改良し、パネルの再設置を行った。この時コンクリート桁の一部にひび割れを確認したが未補修のまま電気防食を継続した。その後、2016年以降にひび割れ箇所の詳細調査を実施している。試験開始から改良型へ更新するまでの期間を当初試験期間（2010年3月~2014年6月）とし、それ以降を改良型試験期間（2014年6月~）とする。

3.2 当初試験期間（2010年3月~2014年6月）

2010年3月の試験施工後、定期点検で電位等を測定してきた。復極量とオフ電位(E_{off})の経年変化を図-7に示す。オフ電位の値は、 MnO_2 照合電極とSSE照合電極で測定した値を飽和硫酸銅(CSE)基準に換算した。パネル設置直後、復極量が十分に得られない箇所もあったが、概ね半年程度で安定した。その後1年3か経過した2011年6月の点検では急激に復極量が低下した箇所が散見された。その後も追跡調査を実施しアルミパネルへの導通不良が生じていることを確認した。アルミパネルへの導通不良は、パネル間の導通材を兼ねた固定レールとパネルの接触部に固定レールの腐食生成物が堆積し、接触面積が減少することで生じたと考えられる。腐食の原因は、パネル内面に塗布されていたジェル状の電解質がレール部に流出したこと、海からの飛来塩分が侵入したためだと考えられた。

表-2 試験施工の経緯

年月	項目	特記事項
2008年5月	事前調査	断面修復範囲の決定
2009年10月	自然電位測定	測定後、海側の変状部を断面修復
2009年11月	自然電位測定	断面修復後
2010年3月	パネル設置	試験施工、電気防食開始
2010年6月	定期点検①	
2010年10月	定期点検②	
2010年12月	定期点検③	
2011年6月	定期点検④	一部で復極不足を確認
2011年10月	定期点検⑤	
2012年1月	定期点検⑥	
2013年2月	定期点検⑦	導通不良を確認
2014年6月	パネル改良再設置	設置時にひび割れを確認、未補修
2014年9月	定期点検⑧	
2015年6月	定期点検⑨	
2015年9月	定期点検⑩	
2016年7月	詳細調査①	パネルを取外しひび割れ調査
2017年5月	詳細調査②	パネルを取外しひび割れ部はつり調査

3.3 改良型試験期間（2014年6月~）

(1) 改良型アルミパネルへの更新

これまでの定期点検での測定データや外観検査から適用してきた防食システムには大きく2つの課題が確認された。①パネル内面に塗布している電解質が流出しやすいことがある。レール部やパネルはらみ出し防止用のリベット部からの流出を確認している。②パネルと導通材（固定レール）の接触不良を生じやすく、防食電流が停止することがある。

そのため2014年6月（防食後経過4年3か月）に当初のアルミパネルを撤去し、改良型アルミパネルに取り替えた。パネル撤去前と取り替え後の復極量とアルミパネルの導通状況を図-8、9に示す。

(2) 改良型アルミパネルについて

改良型のパネルは内面に配置する電解質をジェル状から粘土質状に変更することで、パネル外部への流出防止を図った。またパネルと導通材の固定方法は、レールにはめ込む方法（面接触）から耐候性のあるチタンビスで導通材とパネルを直接機械的に固定する方法に変更とした。さらにパネル外面にはFRPシートで被覆することで、パネル外面の腐食を抑制、高耐久性を期待したパネルとした。

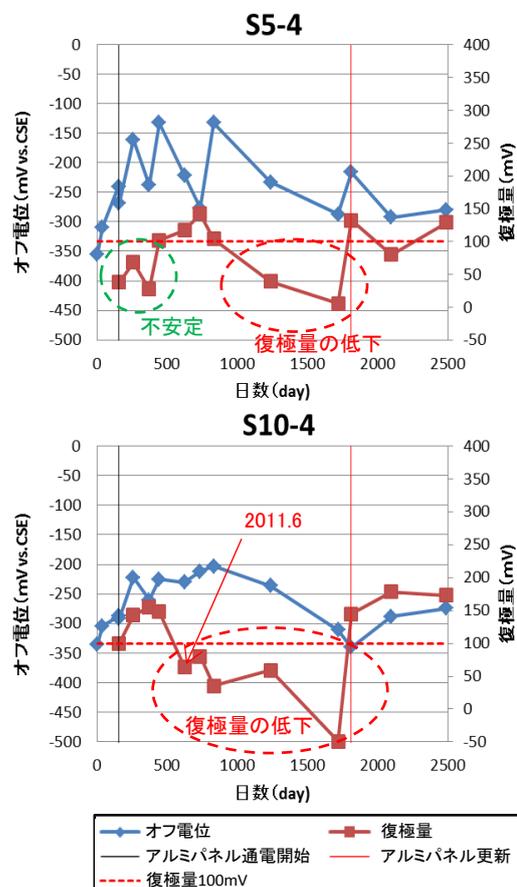


図-7 復極量とオフ電位の経年変化

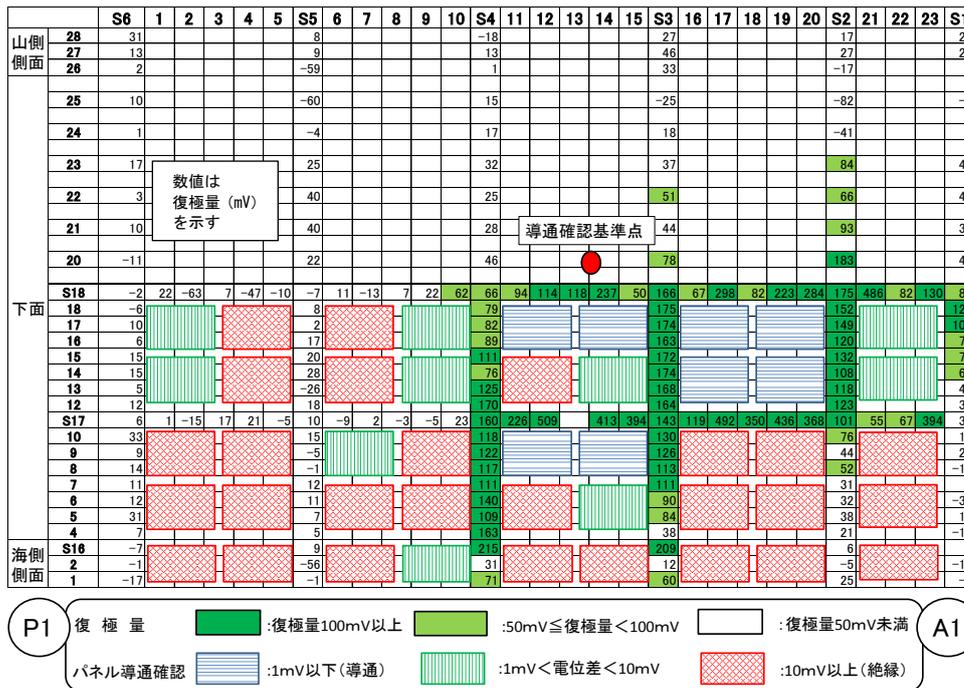


図-8 復極量およびパネル導通確認試験結果 (当初パネル撤去前: 2014年6月)



図-9 復極量およびパネル導通確認試験結果 (改良型パネル: 2016年7月)

(3) 改良型試験追跡調査

改良型パネルへの更新の際、導通不良期間に劣化したと考えられるひび割れを確認していたが、電気防食を継続するため、無補修のまま経過観察した。パネルを更新してから復極量やパネルの導通が安定しており、数値的には良好に推移していたが、目視検査でひび割れが進行している可能性が考えられたため、ひび割れ調査を実施することにした。

3.4 ひび割れ調査 (2016年7月, 2017年5月)

(1) 調査概要

2016年7月(防食後経過6年4か月)にRC桁に生じていたひび割れについて、一部パネルを外して調査を行った。また、翌年2017年5月(防食後経過7年2か月)にはひび割れ幅の増加が認められたため、現地調査を再度実施した。主なひび割れ発生位置を図-10に調査結果を表-3に示す。

2016年7月のひび割れ調査では4か所(①~④)のひ

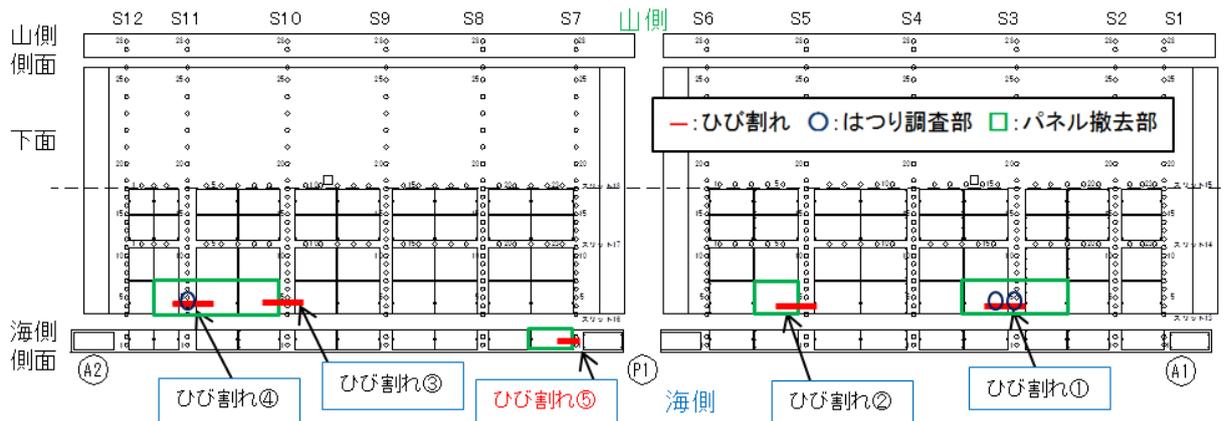


図-10 橋軸方向のひび割れ発生位置

表-3 ひび割れ調査結果

調査位置	2016年調査		2017年調査		ひび割れの進展	錆汁の有無
	長さ L(mm)	ひび割れ幅 t(mm)	長さ L(mm)	ひび割れ幅 t(mm)		
ひび割れ①	500	0.40	800	0.85	あり	なし
ひび割れ②	300	0.05	300	0.20	あり	なし
ひび割れ③	400	0.50	400	0.50	なし	なし
ひび割れ④	800	1mm 以上	800	1mm 以上	なし	なし
ひび割れ⑤	—	—	350	0.35	—	なし

ひび割れ幅は最大値、2016年ひび割れ①はスリット部のみ調査（パネル下は未測定）

ひび割れを確認していたが、2017年5月の調査で新たに2連目海側側面にひび割れ⑤が確認された。2017年調査ではひび割れ周囲のアルミパネルを取り外し、2016年調査と比較した。その結果、ひび割れ①と②においてひび割れ幅が拡大しており、劣化が進行していることが確認された。また、すべてのひび割れ箇所で行った打音検査の結果、軽微な浮きが確認された。ここで劣化が進行しているひび割れ①（パネル箇所、スリット部）とひび割れ幅が最大となる④の箇所についてはつり調査を実施した。

(2) ひび割れ①

ひび割れ①の状況を図-11に示す。この箇所は2009年に断面修復を行った箇所であったが、パネル箇所、スリット部ともに鉄筋が腐食しており、ひび割れも鉄筋位置から生じていた。よってこのひび割れは、鉄筋の腐食によるひび割れであるといえる。特にスリット部の錆は赤褐色で表面に軽微な断面欠損していた。スリット部では、陽極パネルとの距離が離れている分、防食効果が弱まるのが考えられる。ひび割れ①に近い測定箇所S3-4、S3-5の測定データを図-12に示す。パネル設置直後から1年半くらいの期間は、復極量が100mV未満の時期が多く、防食効果が不十分であった。復極量が基準に満たなかった理由は、鉄筋に塩分を多く含んだ錆が残っており、防食電流が錆の還元消費された可能性がある。また、前述の図-8に示す当初パネルの撤去前の導通状況を見ると、海側のパネルは絶縁となっているものが多く、当

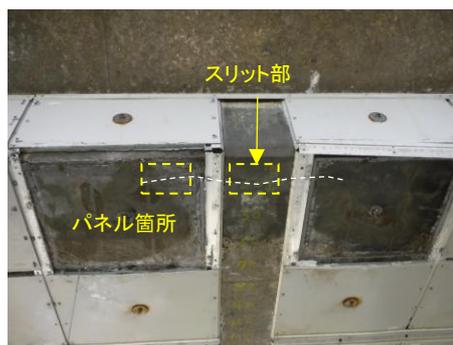


図-11 ひび割れ①の状況

初試験期間には十分な防食効果が得られなかった可能性が高い。理由としては、図-13に示すようにパネルと固定レールの接触面にレール材の白色腐食生成物が付着・堆積することで、パネルと導通材が接触不良を起し絶縁状態になったためだと考えられる。

(3) ひび割れ④

ひび割れ④の状況を図-14に示す。この箇所は、Vカットのひび割れ充填による補修をされており、2009年の時点で既に幅の広いひび割れが生じていた可能性が高い。はつり調査の結果、鉄筋が腐食しており、ひび割れも鉄筋位置から生じていた。鉄筋の腐食膨張により充填補修

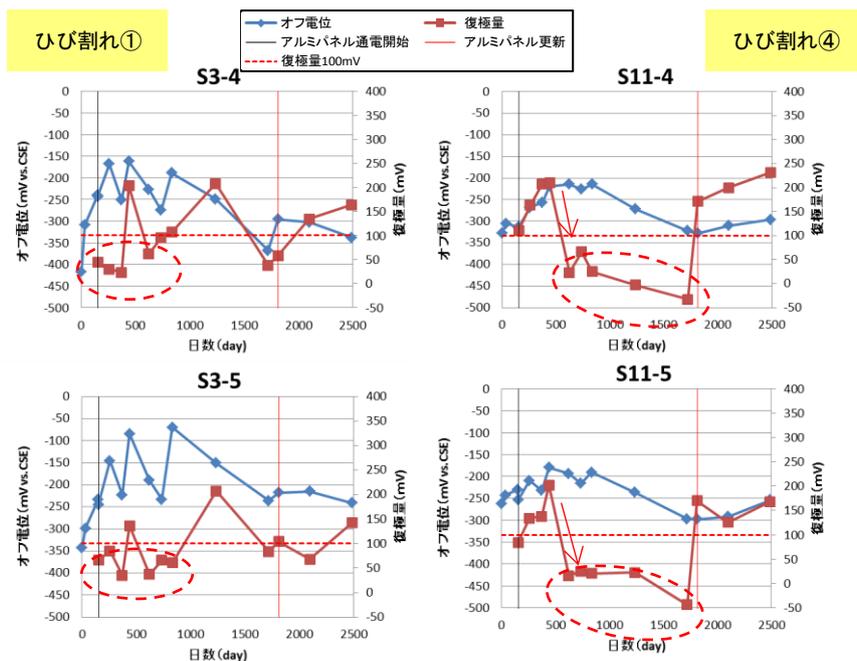


図-12 復極量とオフ電位の経年変化(ひび割れ①, ④付近)

箇所付近に再びひび割れが生じたものだと考えられる。ひび割れ④に近い測定箇所 S11-4, S11-5 の測定データを前述の図-12 に示す。

パネル設置直後から復極量が 100mV 以上あり防食効果があったと考えられるが、1年3か月後の測定から復極量が急激に低下し、改良型パネルに更新するまでの約3年間は防食効果が不十分であった。復極量が基準を満たなかった理由は、ひび割れ①部分同様、固定レールに生じた白色の腐食生成物によるパネルと導通材(固定レール)の接触不良が生じており、当初パネルには絶縁となっているものが多かったためである。よって、ひび割れ④の箇所でも当初試期間には十分な防食効果が得られなかった可能性が高い。

4. まとめ

本現地試験において、得られた知見は次の通りである。

- 1) 当初適用したシステムは、簡易的な面接触でパネルを固定していたが、接触面に生じた固定レールの腐食生成物により接触不良が生じ、導通不良となった。
- 2) パネルに導通があるにも関わらず、復極量が基準を満たなかった箇所があった。理由としては、防食電流が塩分を含んだ錆の還元で使用され、鉄筋の防食に寄与できなかった可能性を示唆している。
- 3) 桁のひび割れは、当初試験期間の防食効果が得られなかった時期に鉄筋腐食が進行し、生じた腐食ひび



図-13 腐食生成物



Vカット部充填補修跡



図-14 ひび割れ④の状況

割れである。ひび割れ劣化が進行した箇所は、復極量が基準を下回る期間があり、腐食が進行した可能性がある。

- 4) パネルと導通材を耐候性のあるチタンビスで直接固定する方法に変更し、改良したパネルの導通を確保した。現時点では復極量も安定傾向を示しており、防食効果が得られていると考えられる。

参考文献

- 1) 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, 土木学会, 2001
- 2) 布田仁美, 篠田吉央, 大谷俊介, 松田芳範: アルミニウム系流電陽極パネル方式電気防食工法の鉄道橋への適用試験における防食効果と温度変化の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, 2011
- 3) 堀澤誠, 浜走幸育, 土田詩織: RC 鉄道橋におけるアルミニウム系流電陽極方式電気防食工法の適用事例, 第32回土木学会関東支部新潟会 研究調査発表会, 2014