

論文 鉄道高架橋へ適用した間欠通電方式による電気防食工法の防食効果

並松 沙樹*1・吉田 幸司*2・三村 典正*3・中野 松二*4

要旨：鉄筋腐食が進行した鉄道高架橋の補修方法として間欠通電方式による電気防食を実施した。対象とした鉄道 RC ラーメン高架橋は部位毎にかぶり、鋼材量、腐食環境が異なっているため、本来は部位毎に防食回路を分割する必要があったが、経済性を考慮し、防食回路を同一として電気防食を施工し、防食効果の常時計測により効果を確認した。その結果、通電初期には腐食が見られた中央スラブに多くの通電量が分配されていたが、通電継続とともに部位毎の分配状況が改善され、十分な防食効果が得られることが確認できた。

キーワード：塩害、中性化、鋼材腐食、電気防食、間欠通電、電流分配、鉄道高架橋

1. はじめに

我が国では現在、高度経済成長期に建設された構造物が供用 50 年以上を迎えており、これらの構造物の健全性の確保が課題となっている。鉄道構造物については、経年劣化による変状が生じても取り替えが容易でないため、定期的に検査を実施し、発見した変状に対して補修・補強対策をして長期間使用していくことが求められている。また、今後老朽化した構造物は増加の一途をたどるため、維持管理コストの増大や人材不足が課題となり、経済性や効率化の観点から優れた維持管理方法が好まれている。

鉄筋コンクリート構造物については、腐食状態に合わせて様々な補修・補強対策が実施されており、電気防食工法も鉄道橋に対する有効な対策の 1 つと考えられている^{1),2)}。

電気化学的防食工法設計施工指針(案)では、「電気防食回路の設計は、防食電流を均一に鋼材に流すことを目的とする。」¹⁾としている。部位毎にかぶり、鋼材量、腐食環境が異なり、腐食速度やコンクリートの抵抗が大きく異なる鉄道 RC 高架橋においては、1 つの回路で防食すると防食電流を均一に流すことができないため、防食回路を分割することが推奨されている。

本論文では、本来は部位毎に防食回路を分割する必要がある鉄道 RC 高架橋において経済性を考慮し、防食回

路を同一として間欠通電方式による電気防食工法を施工した。施工後、常時計測により得られた鋼材電位や復極試験の結果から、腐食条件が異なる部位を同一回路で通電した場合の防食効果について確認した。

2. 事前調査概要

2.1 橋りょう概要

対象とした高架橋は、供用後 50 年以上が経過している東海地方に位置する桁長 24m の 3 径間鉄道 RC ラーメン高架橋である。海岸からの距離が 5km 以上であり、飛来塩分の影響はない場所に位置している。図-1 に対象橋りょうの全景写真を示す。

2.2 事前調査

事前調査として、各部位毎に外観調査、中性化深さ測定、コンクリート中の塩化物イオン量測定、EPMA 分析、鉄筋調査、自然電位測定を実施した。図-2 に調査箇所の詳細を示す。No.1~No.9 の位置で、中性化深さ測定および塩化物イオン量測定を実施した。No.10~No.12 の位置では鉄筋はつり調査および EPMA 分析を実施した。事前調査結果については表-1 にまとめた。中性化深さについて、中央スラブは No.2、縦梁海側は No.5、縦梁山側は No.6 の測定値を採用している。



図-1 対象橋りょう

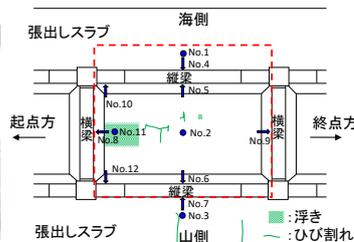


図-2 調査箇所

表-1 事前調査結果

部位	中央スラブ		縦梁_海側		縦梁_山側	
躯体の状態	浮き有り		浮き無し		浮き無し	
鋼材の状態	発錆有り		発錆無し		発錆無し	
設計かぶり	40mm		60mm		60mm	
かぶり	32mm		57mm		58mm	
中性化深さ	14mm		20mm		42mm	
塩化物イオン量	深さ	Cl ⁻	深さ	Cl ⁻	深さ	Cl ⁻
	(mm)	(kg/m ³)	(mm)	(kg/m ³)	(mm)	(kg/m ³)
	0-20	0.5775	0-20	0.6787	0-20	0.5137
	20-40	1.2980	20-40	0.7073	20-40	0.9900
	40-60	0.9240	40-60	0.9141	40-60	1.2045

*1 東海旅客鉄道(株) 総合技術本部技術開発部 研究員 (正会員)

*2 東海旅客鉄道(株) 総合技術本部技術開発部 チームマネージャー 工博 (正会員)

*3 ショーボンド建設(株) 補修工学研究所 副所長 工博 (正会員)

*4 ショーボンド建設(株) 技術本部技術部 主査 (正会員)

(1) 外観調査

打音および目視にて外観変状調査を実施した。張出しスラブ山側で線路直角方向に大きなひび割れを2本確認した。また、中央スラブの一部に浮きやひび割れが見られた(図-2記載)。

(2) 鉄筋はつり調査

図-3にはつりにより鉄筋腐食状態を確認した結果を示す。浮きのあった中央スラブの鉄筋は、縦梁の鉄筋と比較し、腐食が確認できた。また、かぶり厚測定では、縦梁のかぶり厚は実測値と設計値が同等であるが、中央スラブは実測値が設計値を約8mm下回る結果となった。

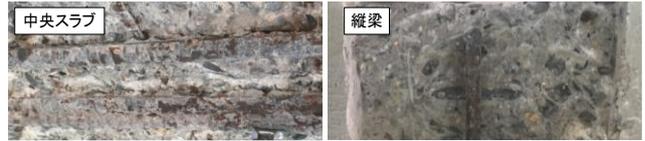


図-3 鉄筋腐食状態

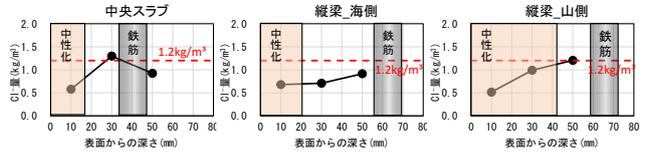


図-4 中性化深さおよび塩化物イオン量

(3) 中性化深さ測定・塩化物イオン量測定

中性化深さ測定は、NDIS 3419「ドリル削孔粉を用いたコンクリート構造物の中性化深さ試験方法」、塩化物イオン量測定は、JIS A1154「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法」に準拠して実施した。

(4) EPMA分析

はつり部より採取したコンクリート片にてEPMA分析を実施した。分析元素は、塩素、炭素、マグネシウム、硫黄の4元素とした。どの部位においても中性化の影響を受け、コンクリート内部へ塩化物イオンや硫黄イオンが濃縮したことを確認した。

2.3 事前調査結果まとめ

図-4に各部位における鉄筋位置と中性化深さおよび塩化物イオン量の関係を示す。

全部位においてコンクリート表面からの深さ40～60mmの比較的深部における塩化物イオン量が0.9～1.2kg/m³であることから建設時の材料から塩化物イオンが供給されたと推定した。

外観調査で浮きや鉄筋腐食が見られた中央スラブについては、中性化残りが18mmであり、鉄筋近傍での塩化物イオン量が最大1.3kg/m³と腐食発生限界塩化物イオン量1.2kg/m³を上回る結果となった。これは、中性化の進行とともに中性化フロントが鉄筋近傍まで到達し、コンクリート中の塩化物イオン量が濃縮した影響と考えられる⁴⁾⁵⁾。そのため、内在塩分のみの場合と比較し、鉄筋近傍の塩化物イオン量が高くなり、中央スラブの腐食速度が大きくなったと考えた。

一方、縦梁はかぶりが十分に確保できているため、现阶段では中性化フロントが鉄筋位置まで到達しておらず、鉄筋腐食は見られなかった。

以上より、対象橋りょうは内在塩分が含まれており、中性化と内在塩分の複合劣化が生じた中央スラブは内在塩分のみの影響を受ける縦梁と比較し、鉄筋腐食が進行したと考えられる。縦梁も今後中性化が進行すると中央スラブと同様に塩化物イオンの移動濃縮が生じ、腐食速

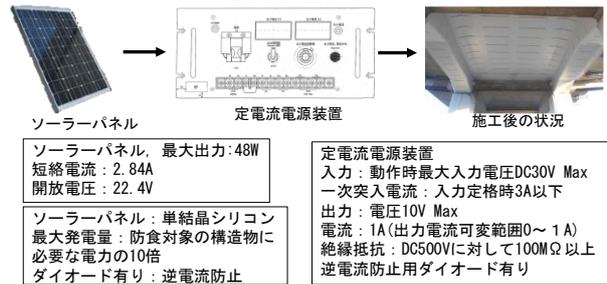


図-5 防食システムの概要

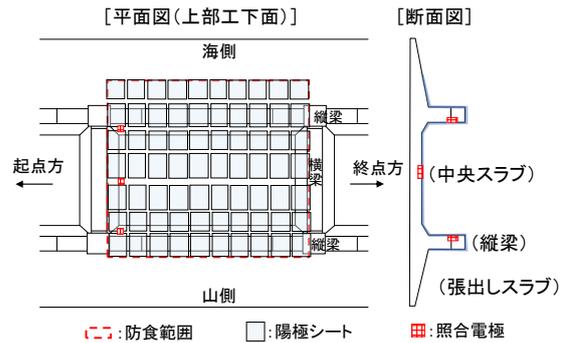


図-6 防食範囲および照合電極位置

度が大きくなる可能性がある。

3. 試験施工概要

3.1 間欠通電方式による電気防食工法について

鉄筋腐食箇所の補修方法として、防食電流の均一性を考慮し、施工が容易な貼付け型シート工法による電気防食工法⁶⁾を採用した。防食電流の供給には、ソーラーパネルを用いたため、夜間は無通電状態となるが、間欠通電時の電位シフト基準による制御方法については検討され、有用性を確認できているためその知見に基づいて防食効果の判断を行うことにした^(例えば7)。図-5に防食システムの概要を示す。

3.2 防食範囲

図-6に防食範囲および照合電極位置を示す。防食範囲は、中央スラブ、縦梁海側、縦梁山側、張出しスラブの上部工下面の合計33.1m²とし、陽極シートを分割して貼り付けた。今回、対象の橋梁は、表面保護工が未施工であり、過去の補修痕があった縦梁の一部については電

気防食に支障がない無機系材料にて補修を実施した。鉄道 RC 高架橋は部位毎に鋼材量、かぶりや腐食度合いが異なることから防食回路は別回路とすることが望ましいが、今回は経済性を考慮し、全ての部位を同一回路で通電した。また、回路電圧は防食回路保護のため定格を 10V としている。

4. 試験施工後の計測結果

4.1 通電前の自然電位測定

試験施工箇所の鉄筋腐食状態を確認するために JSCE-E601-2000「コンクリート構造物における自然電位測定方法(案)」に準拠し、通電前に自然電位を測定した。陽極シートは、分割して貼り付けているため各シート間に 40mm 程度の隙間があり、コンクリートの面が露出している。測定は、各シート間の隙間毎に合計 63 箇所で行った。図-7 に詳細な測定箇所、表-2 に測定結果を示す。

ASTM C 876 の腐食判定基準を用いて評価を行った結果、大部分は「90%以上の確率で腐食なし」となったが、中央スラブのみ「不確定」となる箇所が見られた。表中において、不確定と判定された箇所を黄色で塗りつぶしたところ起点側の海側内側および山側内側に集中しており、2.2 の事前調査における浮き・ひび割れおよび鉄筋腐食が見られた箇所の近傍であった。なお、浮き・ひび割れ箇所は事前調査後に補修を実施した。

4.2 カソード分極試験結果

埋め込み型照合電極を用いて、カソード分極試験を実施した。

図-8 に通電前に実施したカソード分極試験結果を用い、分極量 50mV 以上で外挿したターフェル直線と自然電位との交点から腐食速度を腐食電流密度として算出した結果を示す。腐食電流密度は、防食範囲へ電流が均一に通電していると仮定している。

算出した腐食電流密度は、中央スラブが $0.27\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 、縦梁海側が $0.09\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 、縦梁山側が $0.10\mu\text{A}/\text{cm}^2$ となり、中央スラブの腐食電流密度は縦梁の約 2.6 倍程度であった。また、CEB の腐食判定基準を用いて評価した結果、中央スラブは「低から中程度の腐食速度」、縦梁は「不働状態」となり、中央スラブは縦梁と比べ、腐食が進行していることが明確となった。

4.3 ソーラーパネルと回路電圧の経時変化

図-9 にソーラーパネルおよび回路電圧の経時変化を示す。天候や季節等の変化を受け、日々変動しているが、順調に発電し、通電を実施している。最初の 2 日間は電気計測用の抵抗に 100Ω を使用していたため、その抵抗部分で電圧が消費され、通電電流量は 235mA (電流密度 $5\text{mA}/\text{m}^2$) で回路電圧は電源定格の 10V に到達した。その

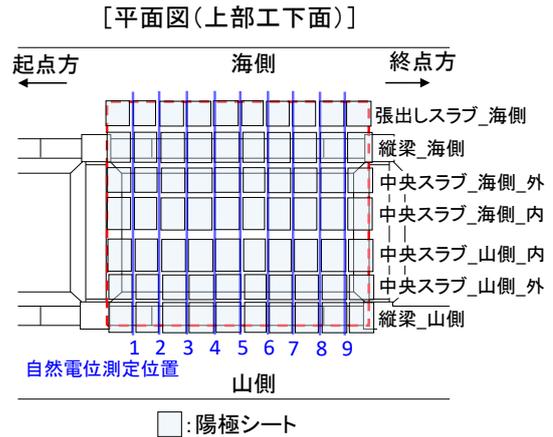


図-7 自然電位測定箇所

表-2 自然電位測定結果 (通電前)

E _{off}	(mVvsCSE)								
起点側から	1	2	3	4	5	6	7	8	9
張出_海側	-153	-154	-136	-137	-120	-133	-133	-122	-148
縦梁_海側	-110	-120	-140	-96	-77	-74	-99	-123	-60
中央_海外	-156	-197	-205	-166	-158	-171	-161	-155	-116
床版_海内	-223	-240	-204	-200	-200	-190	-207	-180	-150
中央_山内	-233	-240	-231	-215	-184	-183	-166	-159	-172
中央_山外	-157	-155	-164	-182	-168	-137	-129	-147	-121
縦梁_山側	-126	-122	-82	-26	-99	-110	-73	-107	-78

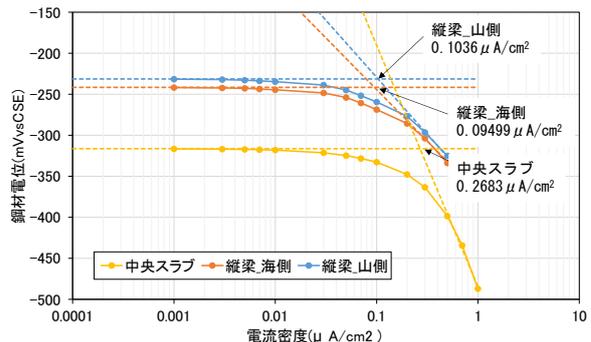


図-8 カソード分極試験結果

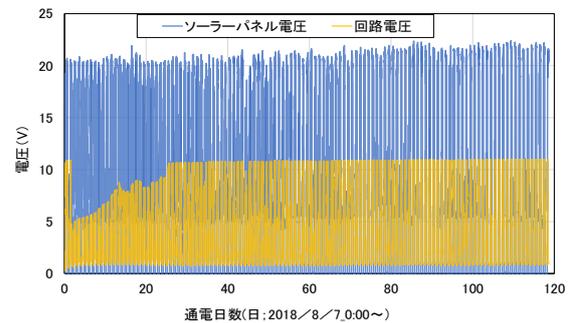


図-9 ソーラーパネルおよび回路電圧の経時変化

ため、2 日後に電流計測回路の抵抗を 100Ω から 1Ω に変更した。また、回路電圧の低下に伴い、通電電流密度を $5\text{mA}/\text{m}^2$ から $10\text{mA}/\text{m}^2$ に再設定した。その際、回路の電圧は 5V 程度であったが、通電継続による抵抗上昇により、回路電圧が徐々に大きくなり、通電 30 日後に電源の定格 10V に到達した。このように、通電期間が長くなるにつれ全体の回路電圧が上昇し、防食回路全体の抵抗が

上昇するのは、鋼材表面や陽極表面での電極反応による濃度分極や、鋼材表面の環境改善効果により鋼材の再不働態化が進行し、それに伴い抵抗分極が増加したことが影響していると考えられる。

4.4 通電電流密度の経時変化

図-10 に各部位の通電電流密度の経時変化の計測結果を示す。計測結果には、回路全体の電圧と通電電流密度も併せて示した。

通電初期に大部分を占めていた中央スラブの通電電流密度は、通電 30 日目までは、防食効果による全体の回路電圧や防食回路全体の抵抗の上昇に伴い次第に低下した。その他の部位については値が上昇した。

これは、通電初期において、腐食が見られ、分極抵抗が小さい中央スラブに通電が集中していたが、通電継続により中央スラブの鋼材表面の環境改善効果が他部位と比較し、早期に現れ、不働態被膜が再形成されたことによる分極抵抗の上昇の影響と推定した。

通電 30 日目以降は、全体回路電圧が定格 10V に達したため全部位で電流密度が低下している。

4.5 通電量の比率と経時変化

図-11 に通電量の比率と経時変化について示す。前述のように通電 30 日目以降に回路の電圧が定格に達し、通電量が設定値よりも低下したため、通電量全体に対する各部位の通電量の割合の経時変化を求めた。通電量の割合は、計測時の通電量全体を分母、各施工箇所の通電量を分子とした。電流の切れ替わり時期に比率が極端に変化するデータについては、計測のエラーと考え、グラフより取り除いた。また、図の右側には防食面積全体に対する各部位のコンクリート表面積の割合を記載しており、この値と比較し、計測した通電量の割合が上回る場合は通電が集中していると言える。今回、中央スラブにおいては、陽極側だけでなく軌道側にも鉄筋があり、防食電流が影響している鋼材表面積が不明であったため、部位毎の通電量を比較するための基準として防食対象部位毎のコンクリート表面積を指標として用いた。

(1) 測定結果

全部位における通電量の割合は、通電 30 日以降安定して推移している。

中央スラブは、計測した通電量の割合が面積比から求めた通電量の割合の約 1.6 倍であるが、その他の部位においては、計測した通電量の割合が面積比から求めた通電量の割合を下回っており、中央スラブに多くの電流が集中していることを確認した。実際は電流の多くが中央スラブに供給されており、部位毎に均一な分配状況ではない。

(2) 実際の電流分配状況を考慮した腐食電流密度

ターフェル直線から腐食電流密度を算出する際、部位

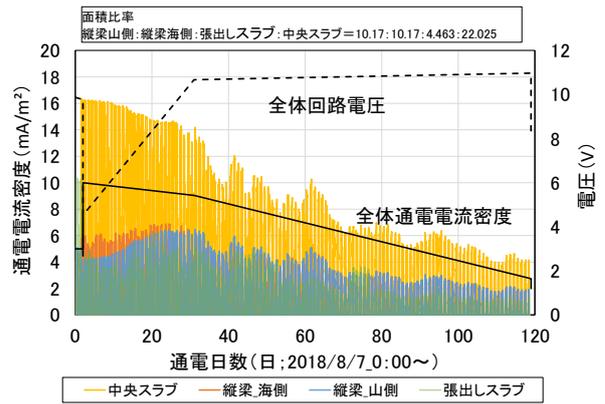


図-10 通電電流密度の経時変化

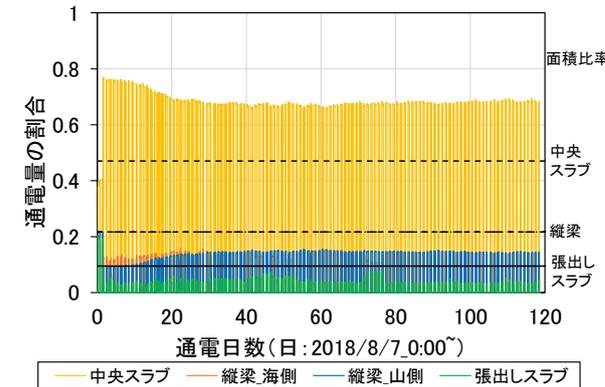


図-11 通電量の比率と経時変化

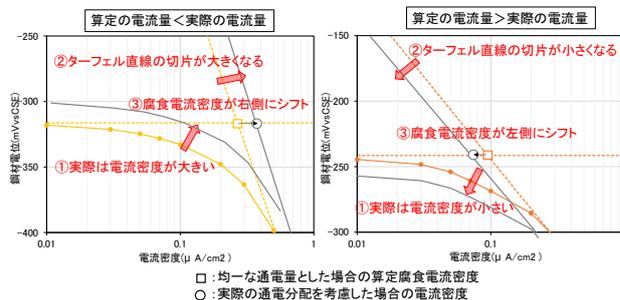


図-12 腐食電流密度のイメージ図

毎の電流分配が均一であることを前提条件としているため、実際の電流分配状況を踏まえた腐食電流密度と相違が生じていると考えた。図-12 に腐食電流密度のイメージ図を示す。

実際の電流量がターフェル関係から算定した電流量と比較して大きい中央スラブでは、図-12 の左図に示すように、実際の防食面積比率に対する通電量が大きいことから自然電位とターフェル直線の交点は、右側にシフトし、実際の腐食電流密度は算出した腐食電流密度 $0.27\mu\text{A}/\text{cm}^2$ より大きい値となると考えられる。一方、実際の電流量がターフェル関係から算定した電流量と比較し小さい縦梁や張出しスラブでは、図-12 の右図に示すように実際の防食面積比率に対する通電量が小さいことから自然電位とターフェル直線の交点は、左側にシフトし、縦梁の実際の腐食電流密度は算出した腐食電流密度 $0.10\mu\text{A}/\text{cm}^2$ より小さい値となることが考えられる。つま

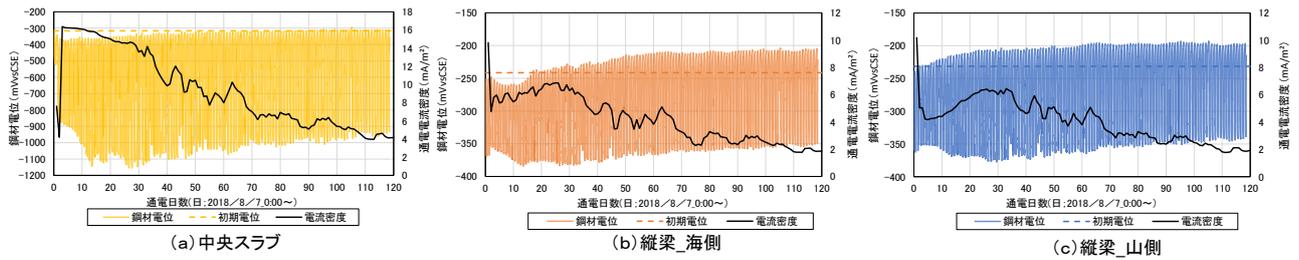


図-13 鋼材電位の経時変化

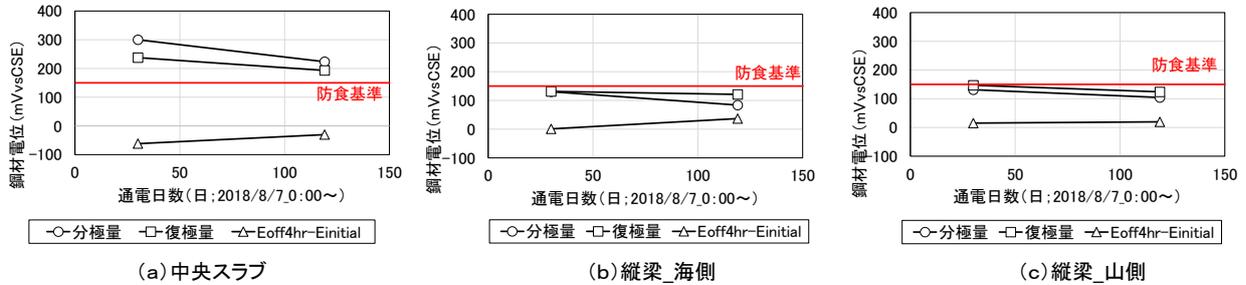


図-14 復極試験結果の経時変化

り、実際の腐食電流密度の差は 2.6 倍以上となり、中央スラブは縦梁や張出しスラブと比較し、腐食速度も大きくなると考えている。

4.6 鋼材電位の経時変化

鋼材電位は、埋め込み照合電極（鉛）を用いて計測期間中 10 分毎にデータロガーで取得した。計測した鋼材電位は、いずれも銅硫酸銅照合電極基準に変換している。図-13 に各部位毎の鋼材電位の経時変化を示している。計測結果には、部位毎の通電電流量とコンクリート表面積から求めた電流密度 (mA/m^2) も併せて示した。

通電 2 日目以降に電流密度が大きく変化するのは前述の通り、抵抗交換が影響している。また、間欠通電方式のため、鋼材電位は、通電状態のオン電位（以下、 E_{on} ）となると急激にマイナス方向へ変化し、安定化した後、無通電状態のオフ電位（以下、 E_{off} ）になるとプラス方向へ徐々に変化することを繰り返す。日々復極試験を実施しているような挙動を示した。そのため、図中の上限値が E_{off} の最大値、下限値が E_{on} の最小値であり、その差は、IR ドロップを含む日中の鋼材電位の変化量を示す。

図-13(a) に中央スラブの鋼材電位の経時変化を示す。通電量を変化させた通電 3 日目以降は、 E_{on} の変化量は徐々に大きく変化した。通電 90 日目までは E_{off} の最大値が初期電位（以下、 $E_{initial}$ ）の -316.3mV より小さい値を示した。このような結果となったのは、通電により卑化している量が大きいため、夜間の通電停止時間内に十分に復極しきれないことが原因と考えた。事実、通電 30 日目以降は、回路電圧が電源の定格に到達したことによる防食電流の減少の影響で、 E_{on} の変化量は低下し、 E_{off} の最大値は次第に貴化している。そして、通電 90 日目以降は、 E_{off} の最大値が $E_{initial}$ を上回り、常時計測している鋼材電位でも防食効果が現れてきていることが確認でき

表-3 埋め込み型照合電極を用いた復極試験の結果

中央スラブ							
通電日数 (日)	Einitial mVvsCSE	Eon mVvsCSE	Eio mVvsCSE	Eoff4hr mVvsCSE	分極量 mV	復極量 mV	Eoff4hr-Einitial mV
	①	②	③	④	①-③	④-③	④-①
2 (交換前)	-316.3	-601.0	-586.0	—	-269.7	—	—
2 (交換後)	-316.3	-791.8	-748.0	—	-431.7	—	—
30	-316.3	-1101.3	-616.0	-378.3	299.7	237.7	-62.0
118	-316.3	-917.0	-539.7	-346.8	223.4	192.9	-30.5
縦梁 海側							
通電日数 (日)	Einitial mVvsCSE	Eon mVvsCSE	Eio mVvsCSE	Eoff4hr mVvsCSE	分極量 mV	復極量 mV	Eoff4hr-Einitial mV
	①	②	③	④	①-③	④-③	④-①
2 (交換前)	-241.5	-323.0	-322.0	—	-80.5	—	—
2 (交換後)	-241.5	-341.0	-343.0	—	-101.5	—	—
30	-241.5	-377.0	-372.0	-240.4	130.5	131.6	1.1
118	-241.5	-329.0	-325.5	-204.4	84.0	121.1	37.1
縦梁 山側							
通電日数 (日)	Einitial mVvsCSE	Eon mVvsCSE	Eio mVvsCSE	Eoff4hr mVvsCSE	分極量 mV	復極量 mV	Eoff4hr-Einitial mV
	①	②	③	④	①-③	④-③	④-①
2 (交換前)	-231.4	-313.7	-312.0	—	80.6	—	—
2 (交換後)	-231.4	-339.0	-337.0	—	105.6	—	—
30	-231.4	-369.8	-363.0	-215.9	131.6	147.1	15.5
118	-231.4	-339.6	-336.1	-211.8	104.7	124.3	19.6

た。

図-13(b) に縦梁海側の鋼材電位の経時変化を示す。通電継続とともに、 E_{on} の変化量は徐々に大きくなり、夜間通電停止後の E_{off} も変化した。夜間通電停止後の E_{off} に着目すると、通電 20 日目までは卑化状態であり、その後、貴化状態へと変化し、通電 30 日目以降は貴化状態を維持している。

図-13(c) に縦梁山側の鋼材電位の経時変化を示す。通電継続とともに、 E_{on} の変化量は徐々に大きくなり、夜間通電停止後の E_{off} も変化した。夜間通電停止後の E_{off} については、防食直後から貴化状態を維持していることが確認できた。

4.7 埋め込み型照合電極を用いた復極試験

表-3 に埋め込み型照合電極を用いた復極試験の測定結果を示す。復極試験は昼間に実施し、通電停止 4 時間後にオフ電位を計測しているため復極試験時のオフ電位を E_{off4hr} とする。計測時期は、通電 2 日目、30 日目、118 日目の 3 期間である。

中央スラブの復極量は、通電 30 日時点で間欠通電方式における電気防食基準である 150mV 以上の電位変化量を満たしており、早い段階から防食効果が得られた。しかし、 E_{off4hr} と E_{initial} の差（通電前と比較した通電後の鋼材電位）が通電 118 日時点においても卑となった。これは、復極時間不足であったことが原因と考えられる。

縦梁山側および縦梁海側の復極量は、通電 118 日時点においても 150mV 以上の電位変化量を満たしていなかった。しかし、 E_{off4hr} と E_{initial} の差は、通電 30 日時点において既に貴であり、鋼材表面の環境改善効果によりアノード反応抑制されていることが、鋼材電位の変化として現れている。

5. 防食効果の確認

今回の計測結果では、目標とする間欠通電の防食基準や復極量に比べ、小さい値となったことから、通電 30 日目と通電 118 日目の復極試験結果における分極量、復極量、 E_{off4hr} と E_{initial} の差の経時変化から防食効果を確認することとした。図-14 に復極試験結果の経時変化を示す。

E_{off4hr} と E_{initial} の差を比較すると、全ての部位において通電継続により貴に変化する傾向となった。これは、防食により鉄筋表面で溶存酸素の還元反応が生じ、水酸化物イオンが生成し、pH が上昇することで、徐々に防食方向に改善されており⁸⁾、防食効果が現れてきたためと考えられる。

また、中央スラブについては、他部位と比較し、かぶりが小さく、腐食が進行していたことから防食に必要な電流が集中し、鋼材電位の変化が大きくなり、分極量も非常に大きい結果となった。防食回路には、電圧一定の並列で防食電流が流れるため、防食回路毎の電気抵抗を調整しない限り、電気抵抗の低い部位へ電流が集中する。今回のような外部環境が同一の条件下において、かぶり厚やコンクリート中の塩化物イオン量等、コンクリート内部の条件の影響で電気抵抗が低く、腐食が進行している場合、防食効果を期待している部位に電流が集中し、効率的に防食できるということが確認できた。

以上より、同一回路で電気防食を実施することにより、配線の簡略化や電源装置の削減による経済的な利点だけでなく、構造物自体の腐食状況に合わせた効率的な防食電流の分配が人為的な制御なしに可能となる点も大きな利点であると言える。

6. まとめ

部位毎にかぶり、鋼材量、腐食環境が異なる鉄道 RC ラーメン高架橋において、防食回路を同一回路として電気防食を実施し、約 4 ヶ月間の通電期間の常時計測を実施した。その結果、本研究の範囲内で以下のことが明らかとなった。

- (1) カソード分極試験結果より、算出した腐食電流密度は、中央スラブが $0.27\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 、縦梁海側が $0.09\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 、縦梁山側が $0.10\mu\text{A}/\text{cm}^2$ であり、中央スラブの腐食速度は縦梁の約 2.6 倍程度となった。また、実際の通電分配状況を考慮して腐食電流密度を算出した場合、それ以上の差が生じていると推定できた。
- (2) 条件の異なる部位を同一回路で通電すると、通電初期は腐食が見られた中央スラブに多くの通電量が集中したが、通電継続に伴う鋼材表面の環境改善効果により部位毎の分配量の差が次第に小さくなることを確認した。
- (3) 目標とする間欠通電の防食基準や復極量に比べ、小さい値となったことから、 E_{off4hr} と E_{initial} の差の経時変化から防食効果を確認した。その結果、通電 4 か月後には全ての部位において貴に変化する傾向を確認した。
- (4) 腐食条件の異なる部位を同一回路で通電した結果、必要な箇所へ通電量が分配されており、経済性を考慮して、電気防食を実施する場合、同一回路で通電しても適切な効果が得られることを確認した。

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），2001.11
- 2) 日本コンクリート工学会：電気化学的手法を活用した実効的維持管理手法の確立に関する研究委員会報告書，2018.9
- 3) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等維持管理標準・同解説（構造物編）コンクリート構造物，丸善，2007
- 4) 松本光矢，曾我部正道，轟俊太朗，谷村幸裕：内的塩害と中性化の複合劣化を対象とした劣化予測に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.2，pp.1423-1428，2010
- 5) 吉田隆浩，徳納新也，大谷俊介，宮川豊章：中性化と内的塩害により複合劣化した RC 部材への流電陽極方式電気防食の適用性に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.1，pp.87-95，2014
- 6) 三村典正，二木有一，石川康登，鈴木潤：貼付け型シート陽極を用いた電気防食工法，土木学会第 67 回年次学術講演会，V-075，2012.9
- 7) 三村典正：塩害を受けた鉄筋コンクリート構造物への間欠通電方式による電気防食工法の適用に関する研究，京都大学学位論文，2018.3
- 8) 布田仁美，篠田吉央，松田芳範：コンクリート鉄道橋に適用した各種電気防食工法における長期検証結果，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp.1037-1042，2010