

報告 亜鉛・アルミ擬合金溶射による電気防食工法を適用した構造物の防食状況

金子 泰明*1・加藤 佳孝*2・平間 昭信*3・野村 倫一*4

要旨：本稿では、試験的に施工した亜鉛・アルミ擬合金溶射による電気防食工法の防食効果を把握するために実施した追跡調査の結果を報告する。飛来塩分による塩害環境にある A 高架橋と、内在塩分と中性化による鉄筋腐食が確認された B 高架橋に対して、試験施工を実施した。追跡調査の結果、亜鉛・アルミ擬合金溶射による電気防食工法の防食効果が確認されたが、溶射膜の一部が浮く現象が確認された。また、復極量が小さく、想定した防食効果が得られていない箇所に対して、乾電池を取り付けることで起電力を増加させる方法を適用したところ、復極量および電流密度の増加が確認された。

キーワード：電気防食, 流電陽極方式, 復極量, 電流密度, ハイブリッド方式

1. はじめに

コンクリート構造物の劣化の一つとして、鉄筋の腐食がある。一般に、コンクリート中の空隙水は pH12~13 の強アルカリ性である。そのため、コンクリート中鉄筋の表面には不動態皮膜が形成され、腐食しにくい状態にある。しかし、中性化や塩化物イオンの影響によって不動態皮膜が破壊されることで鉄筋が腐食し、体積膨張によってひび割れや剥落が生じる¹⁾。

コンクリート構造物中の鉄筋の腐食を抑制する方法として、電気防食工法がある。電気防食工法は、構造物外部に取り付けた陽極からコンクリートを介して内部の鉄筋に電流を供給することで、鉄筋の腐食を抑制する工法である。電気防食工法には外部電源方式と流電陽極方式があり、流電陽極方式は、鉄よりも電位が卑な金属である亜鉛やアルミニウム合金などを陽極材としてコンクリート表面に設置し、内部の鉄筋と導通させることで防食電流を供給するシステムである。流電陽極方式では、鉄筋と陽極の電位差を起電力としていることから、発生電流量を任意に制御することができない。そのため、かぶりコンクリートが乾燥して高抵抗である場合には起電力が不足する例も報告されている²⁾。しかし、直流電源装置が不要で、施工も簡便であり、過防食の心配がない等の維持管理面での利点が挙げられる。

流電陽極方式の中でも、亜鉛線材、アルミニウム線材を用い、常温金属溶射方式にてコンクリート面に溶射した亜鉛・アルミ擬合金を陽極とする、亜鉛・アルミ擬合金溶射による電気防食工法は溶射型の陽極式であるため、複雑な部材形状に適用可能である³⁾。

本稿では、亜鉛・アルミ擬合金溶射による電気防食工法を試験的に施工した構造物の外観や、復極量といった防食効果を追跡調査した結果について報告する。

2. 亜鉛・アルミ擬合金溶射による電気防食工法のシステム構成

図-1 に亜鉛・アルミ擬合金溶射による電気防食工法のシステム構成を示す。本工法での陽極の設置手順を次に示す。

- ・ ディスクサンダーやポリマーセメントモルタルなどによるコンクリート面の下地調整
- ・ 金属溶射との付着性を向上させるための粗面形成剤の吹き付け
- ・ 亜鉛・アルミ擬合金の溶射
- ・ 封孔処理材の散布

亜鉛とアルミの線材を半熔融状態で付着させるため、擬合金と呼ばれる複層一体構造をなす。また、常温溶射方式であるため、コンクリートが熱の影響をほとんど受けず、めくれや剥がれが生じにくい。

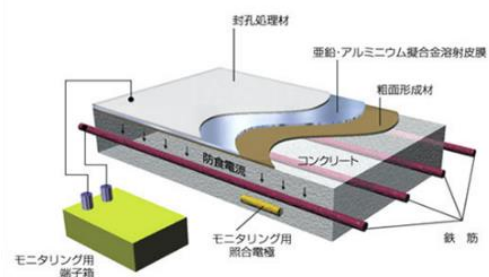


図-1 基本システム

*1 飛島建設 (株) 技術研究所研究開発グループ (正会員)

*2 東京理科大学 理工学部土木工学科教授 博(工) (正会員)

*3 飛島建設 (株) 技術研究所研究開発グループ (正会員)

*4 西日本旅客鉄道 (株) 構造技術室 コンクリート構造 (正会員)

3. A 高架橋

3.1 概要

A 高架橋は、1950 年代に竣工した 3 径間連続 2 主版桁橋である。海岸線より約 100m に位置し、飛来塩分による塩害が生じていた桁の一部で試験施工を実施した。浮きや剥離が確認された部分は、ハンドブレイカー等によりはつり、断面修復を施した。その他の既設コンクリート部については、サンドブラストにより表面を処理し、防食効果を均一化させるためにポリマーセメントモルタルを施工した。電気防食対象面積は 155m² であり、図-2 に示すように 4 箇所に二酸化マンガン照合電極を埋設した。照合電極は、2 つの回路に分けられた各 20m² の溶射範囲内に 2 カ所設置しており、それぞれの回路で防食電流の ON, OFF を可能にしている。写真-1 に施工後の外観を示す。

3.2 計測概要

(1) 定期計測

防食効果の持続状態を確認するため、鉄筋電位および防食電流量について経時的に計測した。表-1 に計測時期を示す。施工から 2 年間は 3 ヶ月に 1 度の頻度で計測し、その後は約 6 ヶ月に 1 度の頻度で計測した。

埋設した照合電極位置での鉄筋電位 (on 電位, in-off 電

表-1 計測時期

回数	計測日
溶射前自然電位	2010 年 2 月 27 日
電源装置設置完了	2010 年 3 月 3 日
第 1 回	2010 年 3 月 16 日
第 2 回	2010 年 6 月 24 日
第 3 回	2010 年 10 月 12 日
第 4 回	2010 年 12 月 9 日
第 5 回	2011 年 2 月 9 日
第 6 回	2011 年 4 月 11 日
第 7 回	2011 年 8 月 29 日
第 8 回	2012 年 3 月 29 日
第 9 回 (詳細調査)	2012 年 10 月 23 日
第 10 回	2017 年 3 月 1 日
第 11 回	2017 年 9 月 14 日



写真-1 施工後の外観

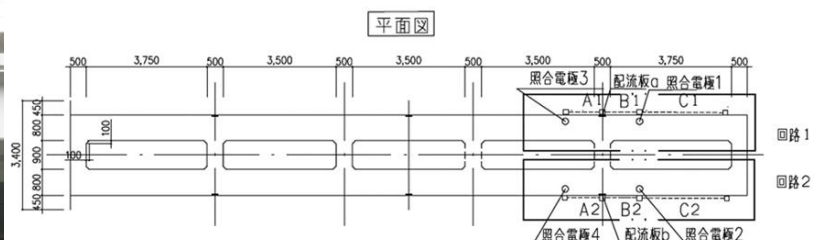


図-2 照合電極設置位置

位, off 電位) を計測し、復極量を算定した。また、無抵抗電流計を接続して防食電流を計測した。

(2) 詳細調査

施工から 2 年経過した段階で、溶射膜の健全性に関する追跡調査を実施した。追跡調査では、定期計測に加え目視および打音調査、付着強度、含水率を計測した。

3.3 定期計測結果

(1) 鉄筋電位

図-3 に鉄筋の自然電位 (off 電位) を、図-4 に複極量の経時計測結果を示す。電気防食開始初期と比較して、鉄筋の自然電位が貴化している傾向が確認された。また、自然電位による腐食判定基準として適用されている ASTM C 876 では、自然電位が $-200\text{mV}(\text{vs.CSE})$ 以上であ

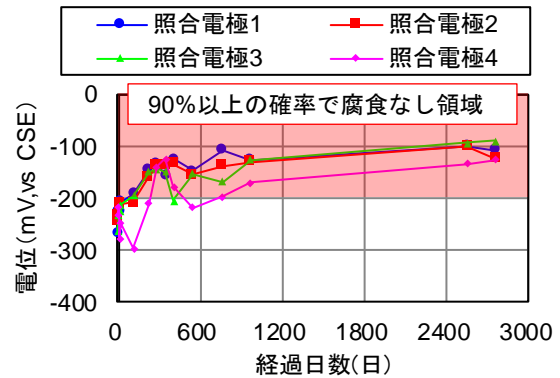


図-3 自然電位の経時変化

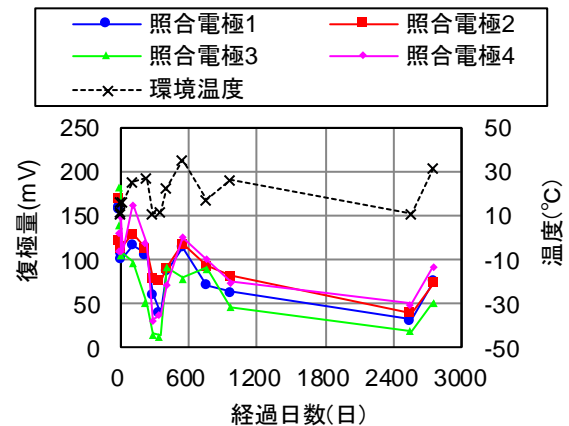


図-4 復極量の計測結果

れば、「90%以上の確率で腐食なし」の判断となることから、照合電極埋設位置では、防食効果が発揮されている。

復極量は、環境温度の影響を受けて夏期に大きく、冬期に小さくなる傾向が確認された。復極量の最大値は、第3回計測時の163mVであり、最小値は第5回計測時の16mVであった。

(2) 電流密度

図-5に電流密度の経時計測結果を示す。復極量と同様に、環境温度の影響を受ける傾向が確認された。同じ夏期でも、回路1、2のどちらとも1度目の夏期で電流密度が最大となり、経時的に電流密度が低下する傾向が確認された。

3.4 詳細調査

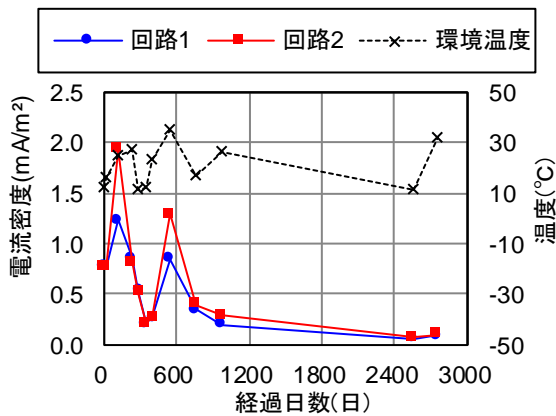


図-5 電流密度の経時変化

目視調査および打音検査によって、溶射膜が浮いている状況が確認された。浮きが確認された箇所は全てポリマーセメントモルタルで断面修復した箇所であり、断面修復していない箇所には確認されなかった。写真-2に示すように、浮いている部分を剥がした溶射膜背面およびモルタル表面に析出物が確認された。析出物を採取して、SEM/EDSによる元素分析を実施した。写真-3に分析に用いた溶射膜を、写真-4に電子顕微鏡画像を、図-6および表-2に計測結果を示す。分析の結果、Znのピークが一番強く確認され、次点でOのピークとなった。このことより、析出物は亜鉛酸化物である可能性がある。

表-3に付着強度試験結果を示す。付着試験は、建研式付着試験機を用い、浮きが確認された近傍で実施した。

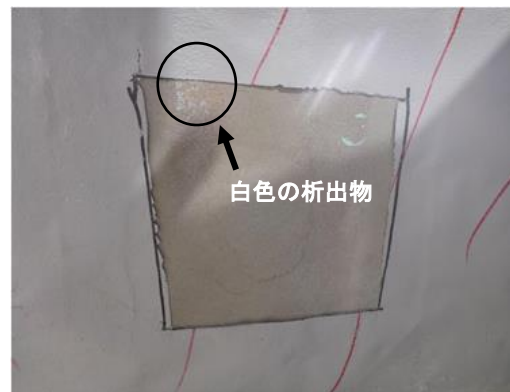


写真-2 溶射膜背面の析出物

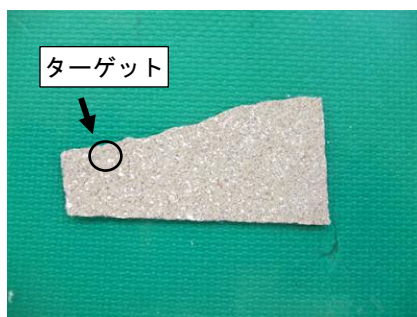


写真-3 分析試料

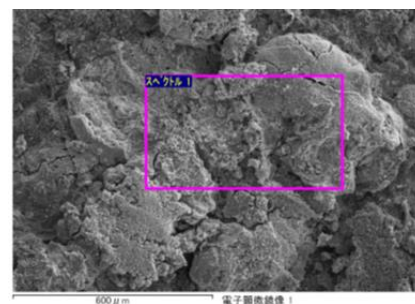


写真-4 電子顕微鏡画像

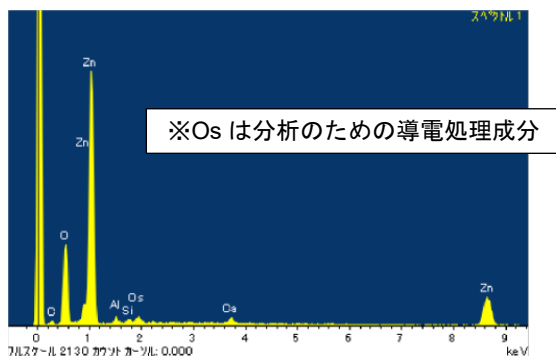


図-6 元素スペクトル

表-2 元素分析結果

元素	質量濃度(%)	原子数濃度(%)
C	4.59	1.11
O	23.32	0.65
Al	1.27	0.19
Si	0.67	0.16
Ca	1.25	0.19
Zn	68.91	1.01
計	100	—

表-3 付着強度試験結果

母材	圧縮強度 (N/mm ²)	破断状況
断面修復材	2.19	粗面形成材
		母材：粗面=3：7
コンクリート+モルタル	2.88	母材：粗面=6：4
		母材：粗面=8：2

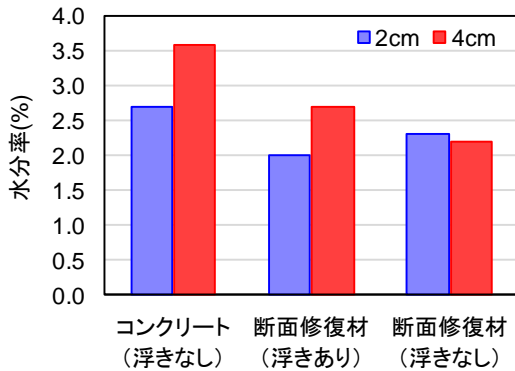


図-7 水分率測定結果

電動カッターを用いて母材に至るまで切欠きを入れ、エポキシ樹脂で鋼製のアタッチメントを接着した。なお、計測値は N=2 の結果を平均したものである。付着強度は、母材が断面修復材の場合（以下、断面修復材）は 2.19N/mm²、母材が既設コンクリートで表面がポリマーセメントモルタル（以下、既設コンクリート）の場合は 2.88N/mm² となった。溶射膜に浮きが確認されている断面修復材の場合で付着強度が若干小さくなったが、既設コンクリートと同程度であった。

断面修復材の場合では、粗面形成材と断面修復材の界面で破壊していることに対して、既設コンクリートの場合では、ポリマーセメントモルタルとコンクリートの界面で破壊しており、付着強度は同程度であったが、破壊状態が異なる結果であった。

断面修復部のみに浮きが発生していたことから、コンクリートに比べると若材齢である断面修復材からの水分が溶射膜に影響している可能性を考え、水分率を計測した。水分率の計測には高周波容量式コンクリート・モルタル水分計を用いた。図-7 に水分率の計測結果を示す。なお、計測値は N=2 の結果を平均したものである。断面修復材の水分率は、浮きの有無に関わらず同程度であった。そして、断面修復材よりも、溶射膜の浮きが認められないコンクリートの方が、水分率が高い値であった。

4. B 高架橋

4.1 概要

B 高架橋は、外部から塩化物イオンが供給される環境



写真-5 区間 1 での施工状況

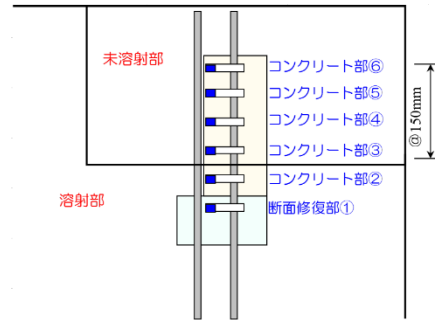
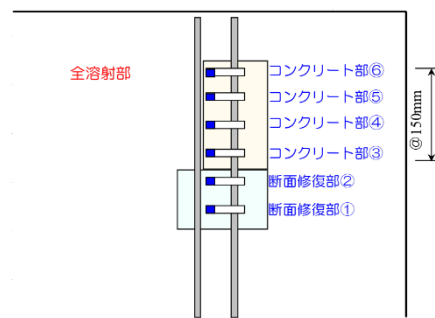


図-8 区間 1 での照合電極埋設位置



(a) 写真-6 区間 2 での施工状況



(b)

図-9 区間 2 での照合電極埋設位置

ではないが、コンクリートに内在塩分が存在し、中性化の進行も確認された。本橋では、溶射工法を部分的に実施した区間（以下、区間 1）と、全面に溶射した区間（以下、区間 2）で防食効果をモニタリングしている。写真-5,6 に施工後の状態を、図-8,9 に照合電極の配置を示す。施工面積は区間 1 が 22m²、区間 2 が 24mm² である。

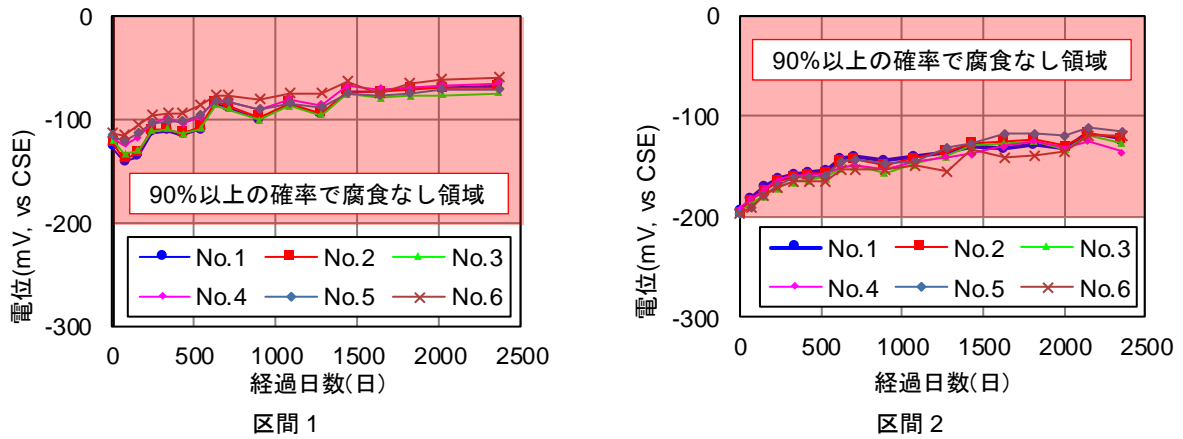


図-10 自然電位測定結果

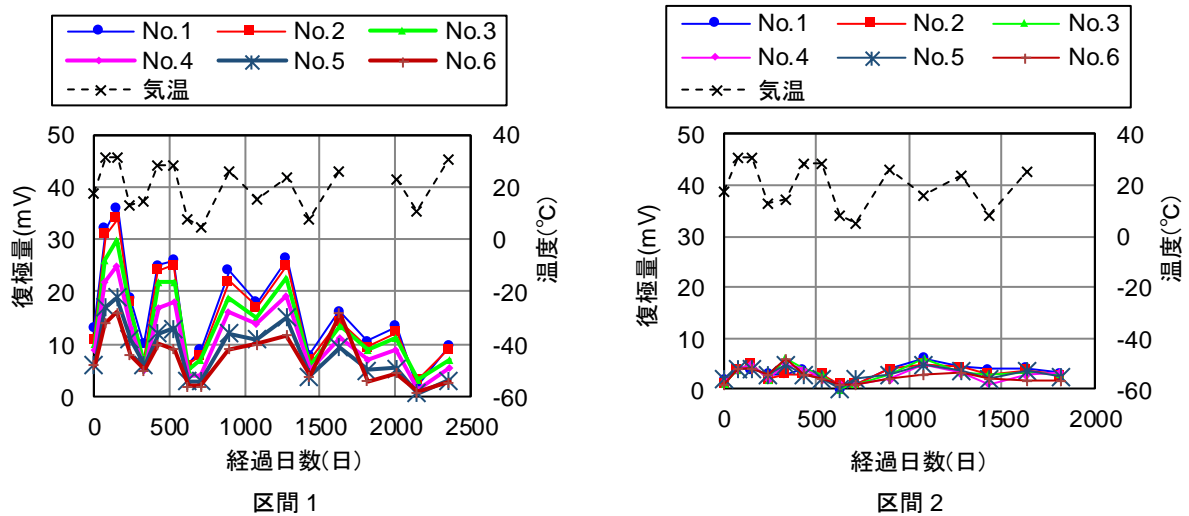


図-11 復極量測定結果

4.2 計測概要

計測は、施工が完了した2013年4月から2年間は3ヶ月に1度の頻度で実施し、その後は約6ヶ月に1度の頻度で実施している。埋設した照合電極位置での鉄筋電位 (on電位, in-off電位, off電位) を計測し、復極量を算定した。また、無抵抗電流計を接続して防食電流を計測した。

4.3 計測結果

(1) 鉄筋電位

図-10 に鉄筋の自然電位を示す。電気防食開始初期と比較して、鉄筋の自然電位が貴化している傾向が確認された。また、ASTM C 876 でも、「90%以上の確率で腐食なし」の判断となることから、照合電極埋設位置では、防食効果が発揮されている。

図-11 に復極量の経時測定結果を示す。A 高架橋と同様に、環境温度の影響を受けて夏期に大きく冬期に小さくなる傾向が確認され、経時的に小さくなる傾向が確認された。区間1の結果を見ると、溶射膜直下の照合電極 No.1 と No.2 が同程度の復極量であり、溶射膜から離れたほど復極量が小さくなり、No.6 の復極量が一番低い結

果であった。溶射膜から離れるほど防食効果は小さくなるが、50cm程度離れた場所でも防食効果があると考えられる。また、区間2は区間1と比較して復極量が小さく、10mVに達していなかった。

(2) 電流密度

図-12 に電流密度の経時計測結果を示す。復極量と同様に、環境温度の影響を受ける傾向が確認された。A 高架橋とは異なり、経時的な電流密度の低下傾向は確認できなかった。また、区間1と2で復極量の値が大きく異なるが、電流密度に大きな変化は確認できなかった。

4.4 流電陽極方式の防食効果改善に対する試み

流電陽極方式では電源装置がないため、任意に起電力を増加させることができない。そのため、電気防食の回路中に乾電池を取り付けることで起電力を増加する方法⁴⁾ (以下、ハイブリッド方式) を2018年4月より、区間2に適用した。写真-7 に乾電池を取り付けた分電盤の様子を示す。次の定期測定までに乾電池が切れないように、単1の乾電池を3本使用し、電池1本あたりの効果量を把握するために並列で接続した。なお、今回はハイブリッ

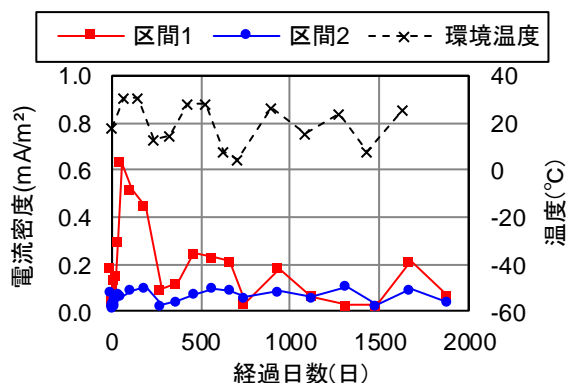


図-12 電流密度測定結果



写真-7 乾電池の取り付け状況

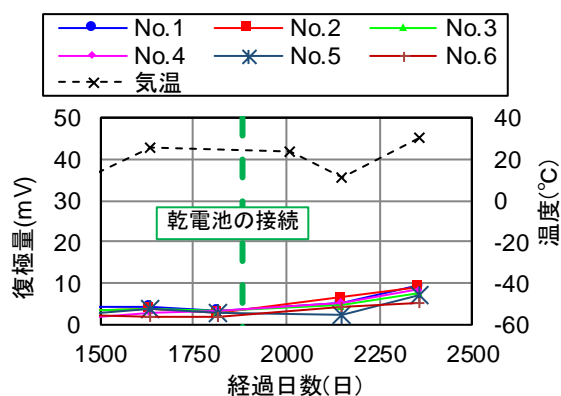


図-13 ハイブリッド方式適用後の復極量

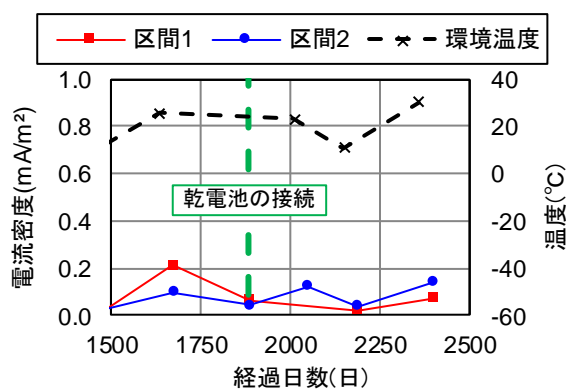


図-14 ハイブリッド方式適用後の電流密度

ド方式を試験的に適応したものであり、復極量を 100mV まで増加させることを目的としていない。ハイブリッド方式適用中の防食効果を計測するために、データロガーによって経時的に電位を計測し、データロガーに取り付けた抵抗値で電位を除すことで電流量を算出した。

図-13 にハイブリッド方式適用後の復極量を示す。復極量が増加する傾向が確認され、外気温が低下しても復極量が増加した。また、図-14 にハイブリッド方式適用後の電流密度を示す。ハイブリッド方式適用後に、区間 2 が区間 1 を上回る結果となり、ハイブリッド方式による防食効果の改善が確認された。

5. まとめ

亜鉛・アルミ擬合金溶射による電気防食工法の試験的な施工によって得られた結果を次にまとめる。

- (1) 亜鉛・アルミ擬合金溶射による電気防食工法の適用により、鉄筋の自然電位は経時的に貴化する傾向が確認された。
- (2) 復極量および電流密度は環境温度の影響を受け、夏期に高く冬季に低くなる傾向が確認された。
- (3) 亜鉛酸化物と思われる白色の析出物による溶射の浮きおよび膨れが確認されたが、付着強度や防食効

果に影響はないと考えられる。

- (4) 流電陽極方式の起電力を補強するハイブリッド方式を適用した結果、電流密度および復極量の増大が確認された。

謝辞：本報告は、飛島建設（株）、東京理科大学、デンカ（株）、大日本塗料（株）との共同研究の一部である。関係者各位に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 横田優：電気化学的手法によるコンクリート中の鉄筋腐食評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.12，No.1，pp.545-550，1990
- 2) 橋本永手，染谷望，加藤佳孝：各種要因が流電陽極電気防食工法の防食効果に与える影響の把握，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.1，2016
- 3) 名倉政雄，槇島修，糸川浩之，松久保博敬，芦田公伸，相沢匡，里隆幸：亜鉛・アルミ擬合金による電気防食工法の開発，とびしま技報，No.59，2009
- 4) 平間昭信，橋本永手，加藤佳孝，渡辺佳彦：乾電池の取り付けによる流電陽極方式電気防食工法の電気防食効果向上の検討，土木学会第 73 回年次学術講演会概要集VI-343，pp.685-686，2018