

論文 海洋環境下での金属溶射型流電陽極方式電気防食法の防食効果に関する実験的検討

山本 誠^{*1}・湯地 輝^{*2}・山口 明伸^{*3}・武若 耕司^{*4}

要旨: 本研究では、コンクリート構造物へ金属溶射型流電陽極方式電気防食法を積極的に適用するため、長期間安定した防食効果を持続可能な溶射施工システムの確立を目的とし、湿潤環境下および海洋環境下に曝露した供試体の防食電流密度の発生状況、復極量および曝露期間約 2 年が経過した時点での解体調査結果から有用性のある施工システムを提案する。また、本工法では、溶射金属の種類が長期的な防食効果の安定性に起因するため、本検討で提案する施工システムを用いた 2 種類の溶射金属を海洋環境下に約 8 ヶ月間曝露し、防食電流密度の発生状況およびその防食性の検討を行った結果を示す。

キーワード: 電気防食, 流電陽極方式, 溶射金属, 電流密度, 海洋環境

1. はじめに

塩害劣化を受けたコンクリート構造物の補修工事では、耐久性の向上を目的とした電気防食工法の適用が薦められ、その実績も増加している。電気防食工法は、防食電流の供給方式の違いにより外部電源方式と流電陽極方式に大別される。現在、コンクリート構造物に対する電気防食工法では、外部電源方式の適用が主流であり、この方式では直流電源装置を用いてコンクリート内部鋼材の腐食状況に応じた防食電流量を調整することが可能であり、防食効果の維持管理が比較的容易であるとともに、各種機関において、その適用範囲と防食基準が制定されている¹⁾。一方で、流電陽極方式は、陽極材である金属の反応性により防食電流が供給されるため、電源装置が不要であり、施工も簡便である。しかし、防食電流量の調整は出来ないため、長期間安定して防食効果を維持するには、使用する金属の種類や設置方法を十分に検討する必要がある。これまで、その設置方法としてアーク溶射などの金属溶射方法を用いた施工システムによる防食効果などが検討されており²⁾、特に、海洋環境下でのコンクリート構造物の予防保全、事後保全に対する補修工法としての確立が求められている。

そこで、著者らは、金属溶射を利用した流電陽極方式電気防食工法に関して、長期的に安定した防食効果を維

持するための施工システムを検討するため、湿潤環境下および飛沫帯にある海洋環境下での曝露試験を長期間実施しており、曝露期間約 4 ヶ月までの結果に関しては、平成 22 年土木学会年次講演会で報告した³⁾。今回、海洋曝露開始から約 2 年が経過したため、その一部の供試体を解体し、内部鋼材の防食状況を確認したのでその結果を報告する。また、本論文では、上述の検討から施工システムとして有効であると判断した手法を用いて、陽極材となる金属の種類に関する追加試験を実施し、曝露期間約 8 ヶ月で解体調査を行ったので、その結果も併せて報告する。

2. 実験概要

本実験では、シリーズ 1 として金属溶射施工システムに関する検討、シリーズ 2 としてシリーズ 1 から得た施工システムを用いた陽極材金属の種類に関する検討を実施した。

2.1 シリーズ 1 実験概要

(1) 溶射金属と溶射施工方法

本実験では、著者らの既往の研究により多湿環境下で極めて高い防食効果のあることを確認した^{3)~5)}亜鉛にインジウムを加えた合金とアルミニウムの擬合金（以下、擬合金 a と称する）を溶射金属として用いた。また、溶射施工システムは、表-1 に示すように全ての供試体で溶射前にコンクリート表面をブラスト処理により素地調整した。その後、粗面形成材塗布による粗面化処理、溶

表-1 各供試体の施工システム

略記号	素地調整	粗面形成材	封孔処理材	目標膜厚
B	ブラスト	なし	なし	300 μ m
BF			あり	
BSF		あり		

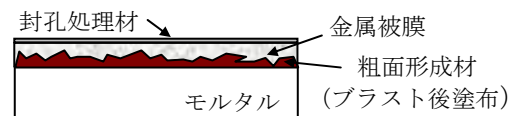


図-1 陽極システム概要

*1 住友大阪セメント(株) 建材事業部 技術開発 G (正会員)

*2 鹿児島大学大学院 理工学研究科 物質生産科学専攻 (正会員)

*3 鹿児島大学大学院 理工学研究科 准教授 工博 (正会員)

*4 鹿児島大学大学院 理工学研究科 教授 工博 (正会員)

射後には封孔処理材の塗布による被膜の安定化および緻密化のための封孔処理の手段を組み合わせることにより、3種類の施工システムを検討した。図-1には、上記に示した全ての処理を行った場合の概念図を示す。なお、溶射方式は、アーク溶射であり、目標膜厚 300 μ m で塗布した。

(2) 曝露供試体および曝露環境の概要

実験に用いた供試体は、寸法 400 \times 400 \times 70mm のコンクリート供試体であり、図-2 に示す。また、供試体中には、異形鉄筋 (D10) を埋設し陰極側排流端子と接続するとともに、供試体中央部に通電中の内部鋼材の防食状況をモニタリングするために鉛合金電極 (以下、Pb 電極と称する) を埋設した。配合は表-2 に示す通り、水セメント比 60%とし、内部鋼材の腐食を促進させるため、コンクリートの練混ぜ時に NaCl 12kg/m³を外割りで添加した。供試体は、コンクリート打設後 28 日間の屋内気中養生後に溶射金属を表-1 に示した施工システムにより溶射し、溶射被膜面 (打設面) と打設裏面以外の 4 側面をエポキシ樹脂により被覆した。その後、供試体を各曝露環境に設置し、内部鋼材と溶射被膜をリード線で接続することによって通電を開始した。また、曝露環境は、写真-1 に示す鹿児島湾内における海上飛沫帯 (気象庁調べ月平均気温 8.5 \sim 28.5 $^{\circ}$ C, 月平均相対湿度 65 \sim 76%) の海洋環境および室内の湿潤環境 (室温 20 \pm 3 $^{\circ}$ C, 湿度 90%以上) である。

(3) 曝露期間中の測定

曝露期間中の測定では、供試体中に埋設した Pb 電極を用いて内部鋼材のオン電位、インスタントオフ電位、および通電停止 4 時間後電位を測定し 4 時間後復極量を算出した。なお、防食電流量の測定では、通電状態で内部鋼材と溶射膜の間に直列となるよう無抵抗電流計を接続することで測定し、この測定値を溶射施工面積 (0.16m²)で除したものを防食電流密度とした。

2.2 解体調査

シリーズ 1 では、海洋環境への曝露期間約 2 年が経過した時点で一部の供試体を解体し内部鋼材を取り出して腐食状況を評価した。評価では、鋼材の腐食状況を表-3 に示すように、「レベル 0: 健全な状態」、「レベル 1: 表面が腐食により変色している状態」、「レベル 2: 欠損までには至らないが、腐食が著しい状態」、「レベル 3: 激しい腐食の進行により欠損している状態」の 4 段階に設定した上で鉄筋表面を 2cm ごとの範囲に分け、打設面 (溶射面) 側と打設面裏側を目視によりレベル評価した。

3. シリーズ 1 の結果と考察





3.1 各施工システムにおける防食状況

図-3、4には、それぞれ湿潤環境下および海洋環境下

表-2 コンクリート配合

W/C	kg/m ³				
	W	C	S	G	NaCl
0.6	202	337	886	819	12

表-3 腐食レベル評価の水準

	
レベル 0 健全	レベル 1 変色
	
レベル 2 欠損なし	レベル 3 欠損あり

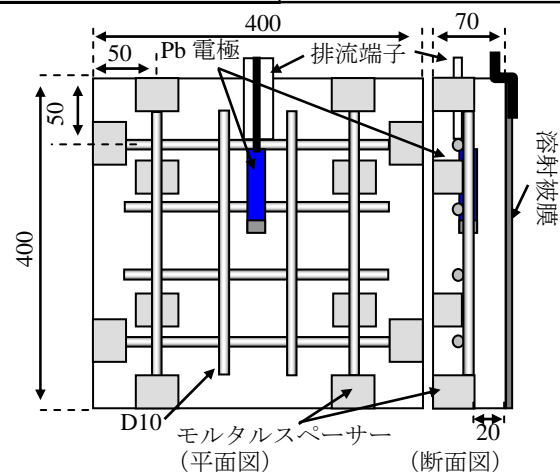


図-2 供試体概要



写真-1 海洋曝露環境

における通電 200 日までの防食電流密度の経時変化を示す。この結果から湿潤環境下では、「B」、「BF」のように粗面形成材が存在しない施工システムにおいて、通電初期の約 1 ヶ月程度で急激な防食電流の供給が確認され、その後減少する傾向が確認された。一方で、「BSF」は、時間の経過にしたがい緩やかに防食電流が供給され、初期の急激な電流の供給が抑制されていることが確認された。海洋環境下では、施工システムの違いにより初期の

防食電流の供給状況に大きな差は確認されないが、「B」では通電開始から約 1 ヶ月を経過した時点で一時的に $20\text{mA}/\text{m}^2$ を超える防食電流密度が供給されるなど他と比較して防食電流のバラツキが大きい傾向が確認された。

図-5 の a), b) には、それぞれ湿潤環境下における通電開始から 100 日ごとに平均した防食電流密度と 4 時間後復極量を示す。この結果より、「B」では通電開始から 100 日までの平均防食電流密度が大きく次第に防食電流密度が低下し、一時的に防食電流密度が大きくなるなどバラツキが大きくなる傾向がある。本試験での湿潤環境下では、季節により、若干の温度や湿度変動があるため、金属被膜が粗面形成材と封孔処理材がないことで敏感に反応したものと考えている。また、4 時間後復極量は、通電の経過に伴って小さくなる傾向が確認されたが、防食電流密度が一時的に大きくなった期間の復極量は、これに伴って大きくなった。「BF」では、初期に若干多くの防食電流が供給されるが通電 200 日以降安定的に防食電流が供給されている。「BSF」では、供給される防食電流は通電初期から比較的小さいもののほぼ一定の防食電流が供給されており、4 時間後復極量では外部電源方式電気防食法で用いられる「100mV シフト」防食基準を通電から 500 日以降から満足するようになった。これは、100mV 以下の復極量であっても継続して安定的な防食電流を内部鋼材に供給することにより次第に鋼材周辺の

腐食環境が改善された結果であると示唆できる。図-6 の a), b) には、それぞれ海洋環境下における通電開始から 100 日ごとに平均した防食電流密度と 4 時間後復極量を示す。なお、材齢 500~600 日の間は定期測定が実施できなかった。「B」では、湿潤環境下と同様に通電の経過とともに防食電流密度が低下し、「BF」、「BSF」では通電初期から安定した防食電流が供給される傾向がある。しかし、いずれの施工システムにおいても通電 600 日以降

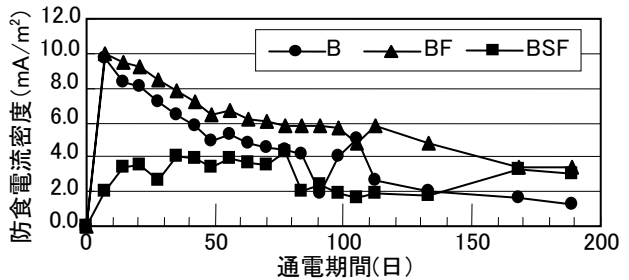


図-3 防食電流密度経時変化 (湿潤環境)

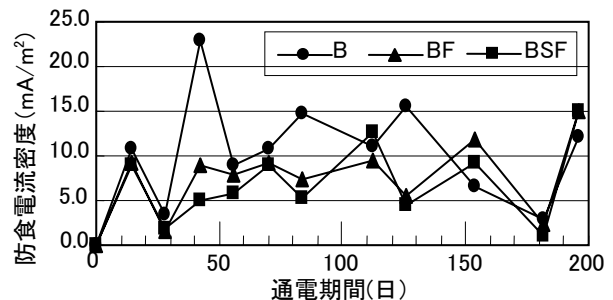


図-4 防食電流密度経時変化 (海洋環境)

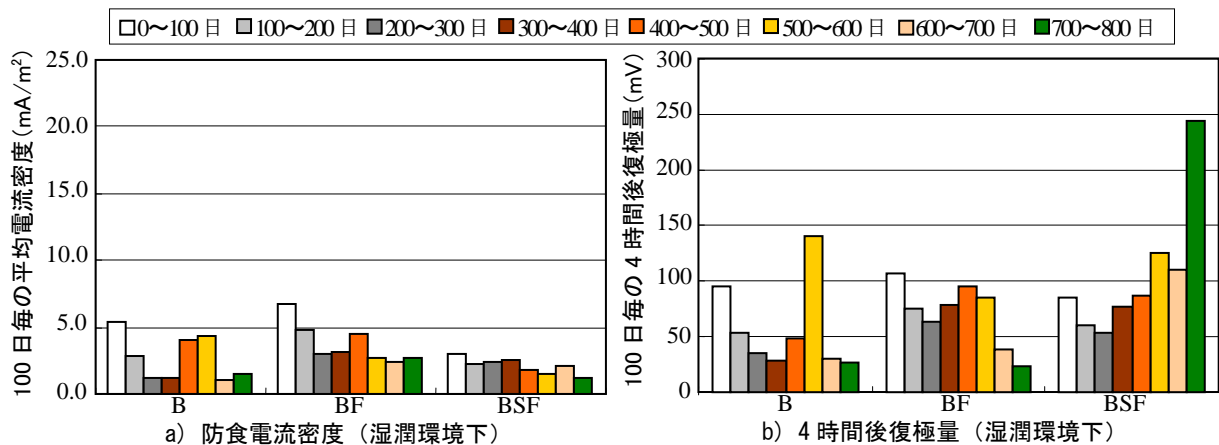


図-5 通電開始から 100 日ごとの平均 (湿潤環境下)

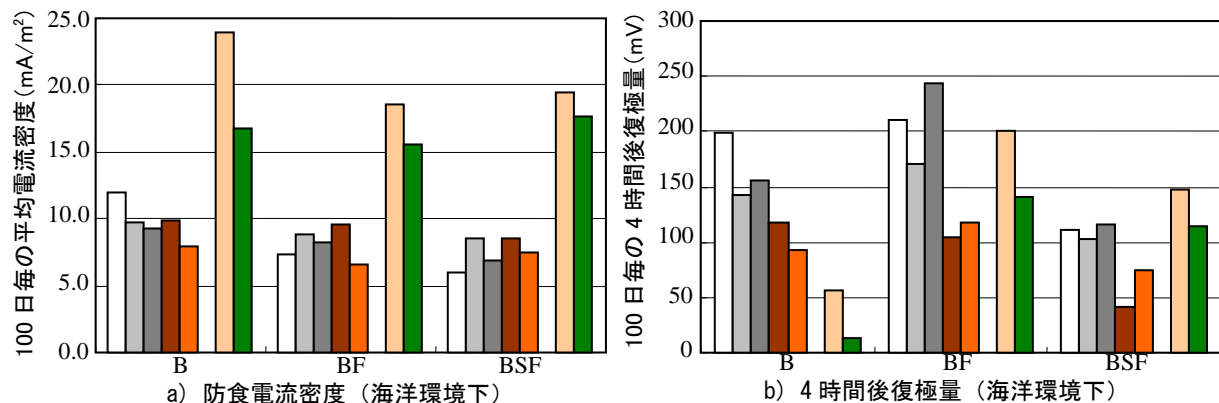


図-6 通電開始から 100 日ごとの平均 (海洋環境下)

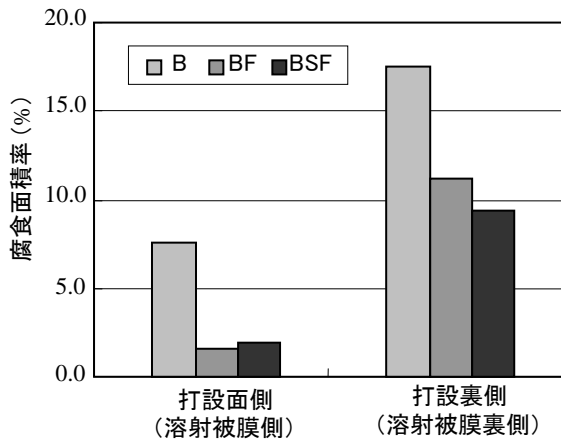


図-7 腐食面積率 (海洋環境下暴露約2年後)

に防食電流密度が急激に上昇した。これは、測定日直前から数日前に掛けて雨が降った日が多いためと推測している。また、「B」の4時間後復極量は、通電の経過に伴い低下し、防食電流密度が大きくなったにも関わらず600日以降の復極量は逆に小さくなっていることが確認された。これは、後述する解体調査において外見上浮きなどは殆ど確認されないものの、溶射被膜とコンクリート表面の付着性が低下している部分があり、防食電流に不均一性が生じているものと推測する。また、「BF」では、通電期間中ほぼ100mVの復極量を満足し、「BSF」では、必ずしも100mVの復極量を満足していない。しかし、「BSF」では、600日以降の復極量が防食電流量の上昇とともに大きくなる傾向が確認できた。これら結果から「BSF」の施工システムは、通電期間中に供給される防食電流密度が他と比較小さい傾向にあるが、継続して安定した防食電流を供給する手段であると評価できる。

3.2 各環境における防食電流密度

図-5, 6に示したように、海洋環境下では施工システムに関わらず金属被膜から発生する防食電流密度は、湿润環境と比較すると大きい傾向がある。これは、海洋環境下の供試体では天候により金属被膜表面に直接雨水あるいは海水の飛沫が掛かるため、金属被膜の反応促進とコンクリート抵抗の減少に起因するものと考えられる。したがって、金属被膜による防食電流密度は、金属被膜表面への水分供給に左右されると推測できる。

3.3 解体調査結果

図-7には、海洋環境下において約2年間の暴露後に解体して得られた各供試体の腐食面積率を示す。この結果より「B」では、他と比較して溶射被膜施工側(打設面側)とその裏側の如何に関わらず腐食面積率が大きいこと確認された。これは、先に示した4時間後復極量が通電の経過とともに減少し、通電400日以降の4時間後復極量が100mV以下となり、700日以降では、20mV程度まで低下していることが原因であると推測できる。

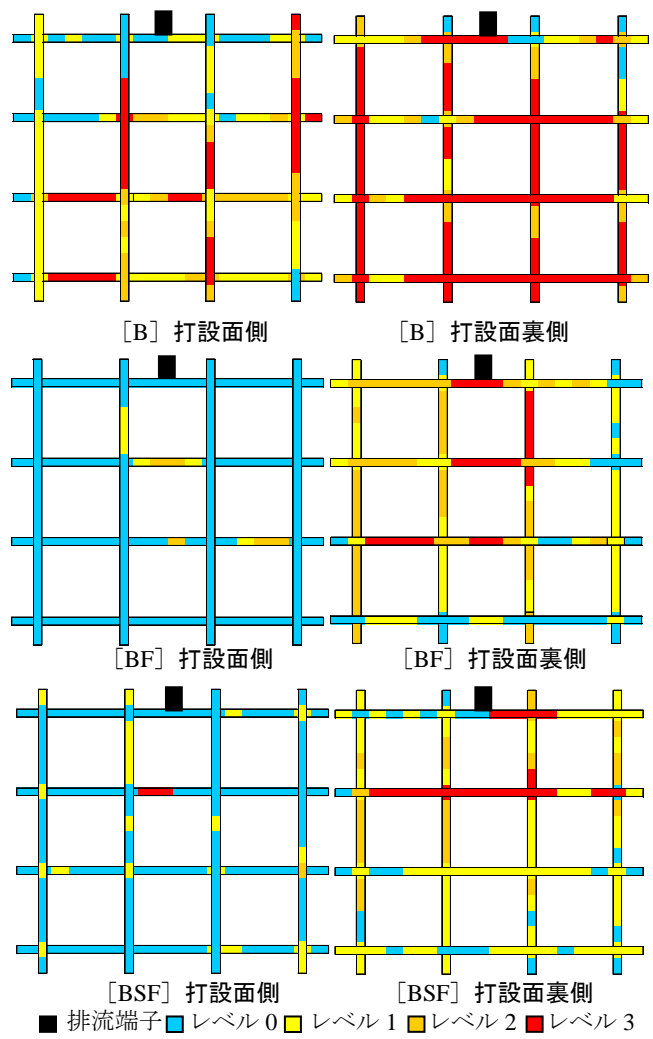


図-8 シリーズ1の鋼材腐食レベル (海洋環境; 暴露約2年後)

「BF」、「BSF」では、溶射被膜施工側鋼材の腐食面積率が2%程度と同程度であり、「B」と比較して腐食の進行を抑制できていると判断できる。「BF」、「BSF」の打設面裏側鋼材の腐食状況も同様に「B」と比較して半分程度まで腐食を抑制出来ていることが確認できた。また、溶射被膜面側と比較して打設面裏側鋼材の腐食面積率が大きい原因は、通電前の段階でコンクリートのブリーディングの影響により腐食が進行していたことが考えられる。図-8には、海洋暴露約2年後の解体調査により得られた内部鋼材の腐食レベルを目視判定(表-3参照)した結果を示す。この結果からも「B」では、溶射被膜施工側(打設面側)、打設面裏側に関わらず全面で腐食の進行が確認された。一方で「BF」、「BSF」では、打設面裏側の鋼材の腐食が確認されたが、溶射被膜施工面である打設面側の鋼材表面の腐食レベルは、ほぼ健全であり、少なからず内部鋼材の腐食を抑制したと判断できる。解体調査結果からも粗面形成材、封孔処理材を用いた施工システムが金属被膜単独で施工された場合よりも防食性能が高いことを確認した。

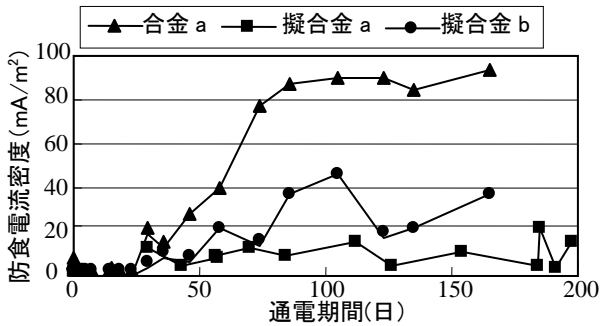


図-9 各溶射金属における防食電流密度の経時変化



写真-2 合金 a 解体直前の皮膜表面状況

4. シリーズ 2 実験概要

4.1 溶射施工方法

シリーズ 2 では、シリーズ 1 の実験結果を参考とし、通電初期の急激な防食電流の供給および海洋環境下である程度の防食効果を得ることが出来た溶射被膜の施工システムであるコンクリート表面のプラストによる素地調整 ⇒ 粗面形成材の塗布 ⇒ 金属の溶射 ⇒ 封孔処理材の塗布の手順によって構成した施工システムを適用し、溶射被膜を塗布した。

4.2 溶射金属の種類

シリーズ 2 では、竹谷ら⁹⁾の検討により有効であるとされた亜鉛、アルミニウムおよびイリジウムの合金（以下、合金 a と称する）および合金 a とアルミニウムの擬合金（以下、擬合金 b と称する）を溶射金属とし、溶射被膜厚さ 300 μm で塗布し、それぞれの防食効果に関して検討した。なお、試験結果の一部では、シリーズ 1 で同一の施工システム、溶射被膜厚さ、曝露条件で評価した擬合金 a の結果を比較した。

4.3 その他試験概要と測定概要

本実験では、シリーズ 1 で作製したコンクリート供試体を約 1 年間屋内気中環境下で養生した供試体を用いて実施した。したがって、供試体の仕様はシリーズ 1 と同様である。また、曝露環境は写真-1 に示す海洋曝露とし、曝露期間中の測定項目および曝露期間約 8 ヶ月後の解体調査方法は、シリーズ 1 と同様である。しかし、復極量に関しては、通電停止 24 時間後の電位測定を行い 24 時間後復極量を用いて評価した。

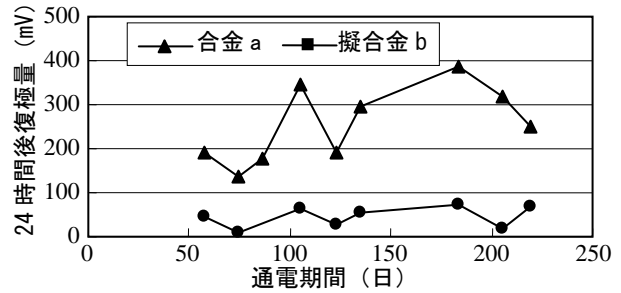


図-10 24 時間後復極量 (シリーズ 2; 海洋環境)

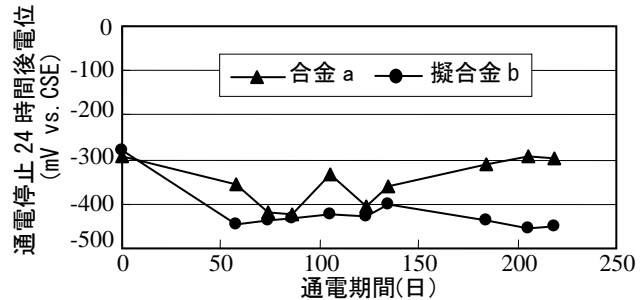


図-11 通電停止 24 時間後電位 (シリーズ 2; 海洋環境下)

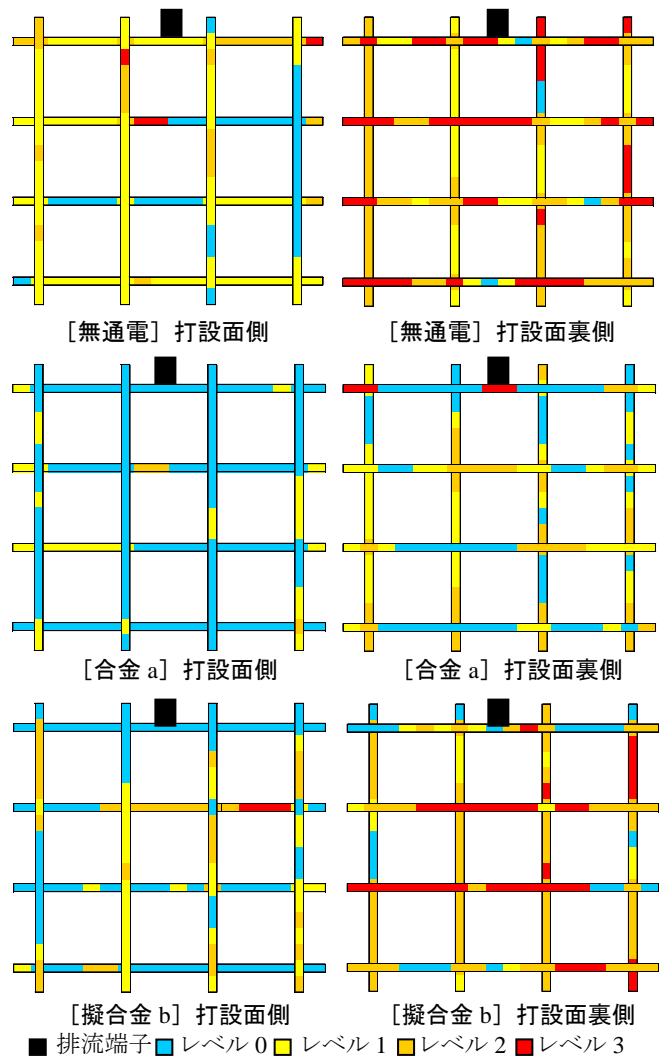


図-12 シリーズ 2 の鋼材腐食レベル

(海洋環境; 曝露約 2 年後)

5. シリーズ2の結果と考察

5.1 各溶射金属における防食状況

図-9には、海洋環境下における各溶射金属の防食電流密度の経時変化を示す。この結果から合金aと擬合金bは、通電初期から次第に防食電流密度が大きくなる傾向がある。また、合金a、擬合金bの防食電流密度は、それぞれ擬合金aと比較して約8倍、約3倍程度の防食電流を安定して供給する能力があることが確認できた。

図-10には、合金aと擬合金bの24時間後復極量の経時変化を示す。この結果から合金aでは、200~400mVの24時間後復極量が得られており、十分な防食効果が期待できる。しかし、擬合金bでは、防食電流密度が30mA/m²と非常に大きいにも関わらず24時間後復極量が50mV程度しか得られていない。そこで、図-11には、合金aおよび擬合金bの24時間後電位を示した。この結果から合金aでは、通電停止から24時間後に通電開始直前(図中の0日の電位)の自然電位とほぼ同程度まで復極していることが確認できるが、擬合金bでは通電開始直前の自然電位と比較して150mV程度卑な電位までの復極であることが確認できる。したがって、擬合金bでは、24時間の復極時間では完全な復極が行われな可能性があり、24時間後復極量での防食性能の評価は過小評価である可能性が示唆された。

5.2 外観観察と解体調査

写真-2には、合金aの解体直前の外観状況を示す。合金aの溶射被膜表面は、通電開始200日程度から表面全体に凹凸が確認されるようになったが、浮きは確認されていない。これは、先に示したように防食電流を非常に高いレベルで供給するため、陽極材である金属の腐食が短時間で進行したものと考えられる。

図-12には、無通電供試体、合金aおよび擬合金b供試体の内部鋼材の腐食レベルを目視観察した結果を示す。この結果から無通電供試体では、打設面側の鋼材表面の約2/3でレベル1~2が確認され、その裏面の約1/4がレベル3の腐食状態であることが確認され、供試体作製後約1年間の養生および海洋曝露環境下での厳しい腐食環境が伺える。また、合金a供試体の内部鋼材では、打設面側表面がほぼ健全であり、裏側の鋼材表面の一部に腐食が確認されるものの、防食効果が十分であったものと考えられる。擬合金b供試体の内部鋼材では、打設面側表面でレベル1~2が部分的に確認され、裏面ではレベル3までが確認され、防食効果が表面に集中した可能性がある。しかし、少なくとも無通電供試体と比較すると腐食が抑制されていることが確認できた。

6. まとめ

本研究では、金属溶射型流電陽極方式電気防食工法において安定的に防食電流を供給する施工システムおよび溶射金属の種類を検討するため、海洋環境下に供試体を曝露することにより検討した結果、以下のことが確認できた。

- (1) コンクリート表面をブラストにより素地調整後、粗面形成材および封孔処理材を用いる施工システムによって、通電初期の急激な防食電流の供給を抑制することが出来る。
- (2) (1)の施工システムを用いることにより、同一の溶射金属を用いた場合でも安定した防食電流を長期的に供給することが可能である。
- (3) 流電陽極方式電気防食では、厳しい曝露環境では外部電源方式で用いられる防食基準を必ずしも達成しない可能性があるが、少なくとも無防食と比較して防食効果が得られている。
- (4) 亜鉛、アルミニウムおよびインジウム合金のように防食電流の供給能力の高い金属を使用した場合、その防食効果は十分に期待できるが、流電陽極方式電気防食における陽極材の腐食が短時間で生じる。
- (5) 亜鉛、アルミニウムおよびインジウム合金とアルミニウムの擬合金は、亜鉛、インジウム合金およびアルミニウムとの擬合金よりも防食電流の供給能力が高い。

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) 佐々木和仁, 他:金属溶射を利用した流電陽極方式電気防食システムの実用可能性, コンクリート工学年次論文集, Vol.21, No.2, pp.1045-1050, 1999.7
- 3) 入江隼輝, 他:表面処理方法が金属溶射型流電陽極方式電気防食工法の防食効果に与える影響, 土木学会年次学術講演会講演概要集 第5部, Vol.65, pp.645-646, 2010.9
- 4) 山口明伸, 他:各種環境下における犠牲陽極方式電気防食工法の防食効果に関する実験的研究, コンクリート年次論文集, Vol.30, No.1, pp.1173-1178, 2008.7
- 5) 山本誠, 他:コンクリート構造物の諸条件が金属溶射型流電陽極方式電気防食法の防食効果に与える影響, 土木学会年次学術講演会講演概要集 第5部, Vol.66, pp.497-498, 2011.9
- 6) 竹谷正造, 他:アルミニウム-亜鉛系溶射膜を用いた流電陽極方式による鉄筋コンクリート構造物のカソード防食, コンクリート工学年次論文集, Vol.18, No.1, pp.837-842, 1996