

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溶射方法が防食効果に与える影響

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ている。実験では、各種溶射システムを適用した供試体を波浪の影響を直接受ける飛沫帯の海洋環境下に曝露し、各溶射システムにおける防食電流密度の発生状況、復極量の測定を実施し、その防食性能を評価した。また、曝露開始から約2, 3年が経過した時点で供試体を解体し、内部鋼材の防食状況を調査すると共に、溶射被膜の外観状況を確認した結果を示す。

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進められ、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るため、コンクリート内部鋼材の腐食状況に応じ防食電流量を調整し、供給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、塩害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、波浪の影響を直接受ける飛沫帯の海洋環境下において曝露試験を実施した。曝露期間約2年までの結果に関しては、平成24年コンクリート工学年次論文集で報告した³⁾。今回、海洋曝露開始から約3年間が経過したため、曝露供試体を解体し、内部鋼材の防食状況、溶射被膜状況を確認した

のでその結果を報告する。

2. 実験概要

2.1 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高い防食効果のあることを確認した⁴⁾ 亜鉛にインジウムを加えた合金とアルミニウムからなる溶射金属を用いた。また、溶射施工方法は、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、金属溶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た3種類の施工方法を検討した。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。溶射方式はアーク溶射であり、目標膜厚を300 μmとした。なお、試験では、防食効果を比較するため、金属溶射を施していない無通電供試体も同一環境に暴露している。

2.2 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400×400×70 mm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照合電極(以下、Pb電極と称する)を埋設した。コンクリート配合は、表-2に示すように水セメント比60%とした。さらに、内部鋼

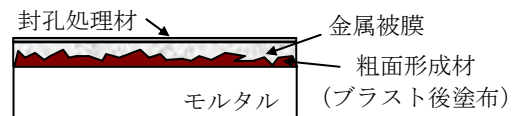


図-1 陽極システム概要

*1 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)

*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 教授 博(工) (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)

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		

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 12 kg/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 に示した各施工システムにより溶射し、溶射被膜面（打設面）と打設面裏側以外の 4 側面をエポキシ樹脂により被覆した。その後、供試体を海洋環境に設置し、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 8.5～28.5℃、月平均相対湿度 65～76%）の海洋環境である。

2.3 曝露期間中の測定

曝露期間中は、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、測定結果から 4 時間後復極量を算出した。また、溶射金属から発生する防食電流量は、通電状態で内部鋼材と溶射被膜の間に直列となるよう無抵抗電流計を接続して測定し、この測定値を溶射施工面積(0.16 m²)で除したものを防食電流密度とした。

2.4 解体調査

本実験では、海洋環境への曝露開始から約 2 年（通電開始から約 790 日）および約 3 年（通電開始から約 1100 日）が経過した時点で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 2 cm 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分けすることで評価した。





さらに、内部鋼材の腐食面積率を測定すると共に、はつり出した内部鋼材の腐食減量を測定した。腐食減量は、2-メルカプトベンゾチアゾールをインヒビターとして混入した 10%クエン酸アンモニウム溶液に浸漬して、除錆した後、重量を測定することで求めた。

なお、供試体の解体直前には、溶射被膜の劣化状況の指標とするため、目視により溶射被膜のはく離あるいは溶射金属表面を手で擦ることで、その脆弱状況を確認した。

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

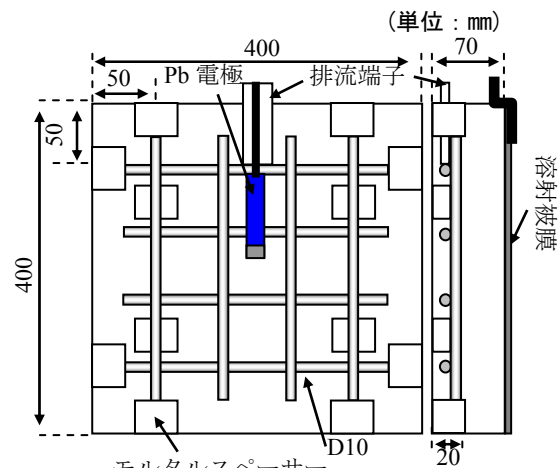


図-2 供試体概要



写真-1 海洋曝露環境

2. 実験結果

2.1 防食状況と施工方法

図-3 には、海洋環境下における曝露開始から 100 日ごとに防食電流密度を平均した値を示す。なお、曝露 501～600 日の期間は定期測定を実施していない。また、供試体の解体は、曝露 1100 日程度で実施したが、曝露 1000 日から 1100 日の期間で台風の影響を受け、溶射金属と内

部鉄筋の接続が切断された時期があるため、ここには曝露 1000 日までを示した。図-4 には、気象庁調べによる鹿児島市の降雨量を防食電流密度と同様に曝露期間中 100 日ごとに平均した値を示す。「B」では、他の供試体と比較して、通電初期から 100 日までの平均防食電流が大きく、通電の経過とともに平均防食電流密度が低下する傾向があった。その後、曝露 601~700 日の期間には、降雨量の影響により、一時的に平均防食電流密度が増加したが、通電開始 700 日以降の平均防食電流密度は、曝露初期と比較して降雨量の少ない期間で急激に減少した。次に、封孔処理材を塗布した「BF」、「BSF」では、曝露初期から 7 mA/m² 前後で安定した平均防食電流密度が供給される傾向を示し、封孔処理材が溶射金属の反応を安定させる効果であると考えられる。しかし、これら供試体でも通電開始 600 日以降から降雨の影響を受けやすくなることが確認された。そこで、写真-2 a) ~ c) には、曝露 2 年後の各供試体の陽極表面状況を示す。いずれの供試体においても大きな損傷はないが、曝露時に下側となる供試体端部の一部の金属被膜が若干剥れていることを確認した。したがって、この時期の前後から溶射金属とコンクリート界面に雨水あるいは波しぶきなどにより海水が浸入し易くなり、水分による金属被膜の反応が敏感となり防食電流密度の増減が生じたものと考えられる。

図-5 には、防食状況を確認するために実施した 4 時間後復極量を通電開始から 100 日ごとに平均した値を示す。「B」では、防食電流密度の減少にしたがい平均 4 時間後復極量も減少し、曝露 400 日以降において外部電源方式電気防食工法で用いられる 100 mV シフトを満足しない状況が確認された。また、材齢 900 日以降では、平均 4 時間後復極量が 20 mV 程度と非常に小さくなった。「BF」、「BSF」の平均 4 時間後復極量は、防食電流密度が安定していた曝露開始から 500 日の期間で概ね 100 mV 前後で推移していた。しかし、曝露 700 日以降の平均 4 時間後復極量は、平均防食電流密度が初期通電とほぼ同等であるにも関わらず、低下する傾向が確認され、曝露 800 日以降には 50mV 程度と電気防食基準とされる 100 mV シフトを満足しない状況となった。この結果については、後述するように波浪の影響により直接的に波しぶき等の外力を受ける塩害環境では、部分的に溶射皮膜のはく離などの変状が確認されていることから、この変状によって、防食電流の供給が内部鋼材に対して不均一となって、防食電流量が同一であっても復極量を満足しない状況となったと考えられる。

2.2 解体調査結果

(1) 外観観察

写真-3 a) ~ c) には、曝露 3 年後の各供試体の陽極

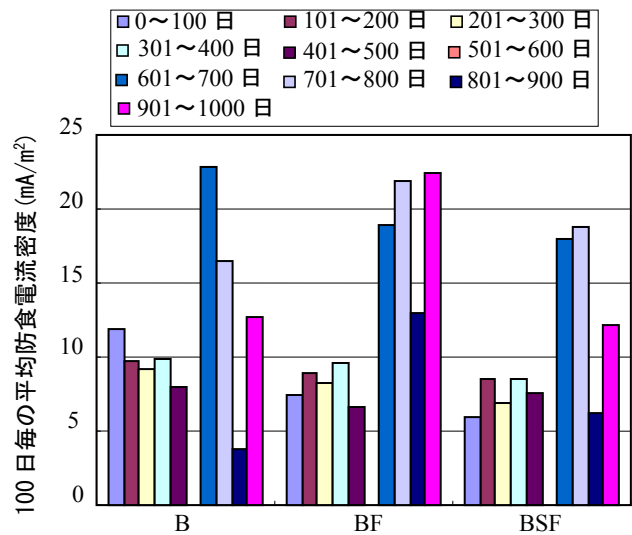
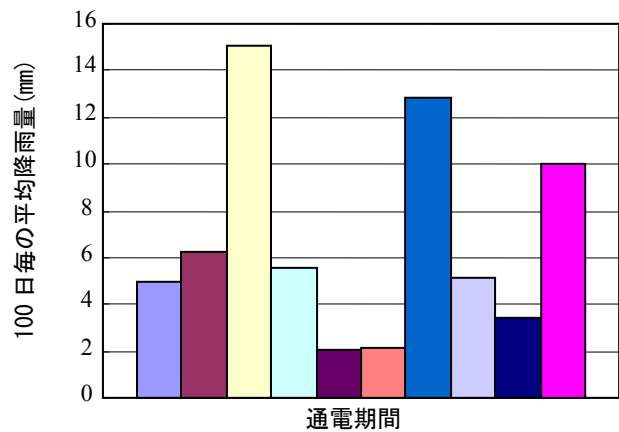
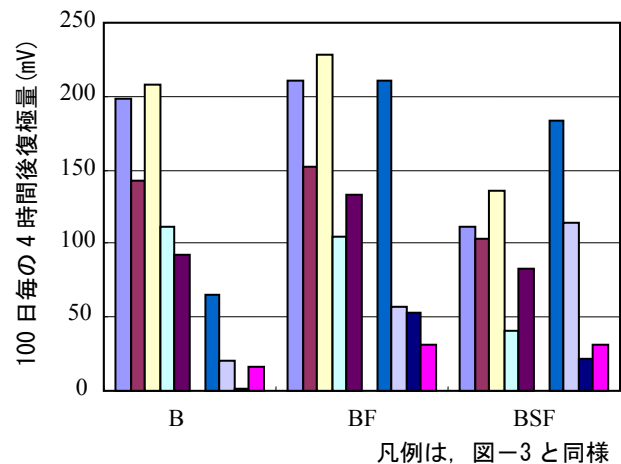


図-3 通電開始から 100 日毎の平均防食電流密度



凡例は、図-3 と同様
図-4 鹿児島市降雨量（気象庁調べ）



凡例は、図-3 と同様
図-5 通電開始から 100 日毎の平均 4 時間後復極量

表面状況を示す。「B」では、曝露 3 年後には、溶射被膜の大部分で劣化しており、一部はコンクリート表面が露出している箇所も確認された。また、溶射金属表面は、手で擦ると粉状になり脆弱な状態であった。したがって、封孔処理材のように溶射金属表面を保護していない状態では、防食電流の発生に寄与しない溶射金属の自己腐食

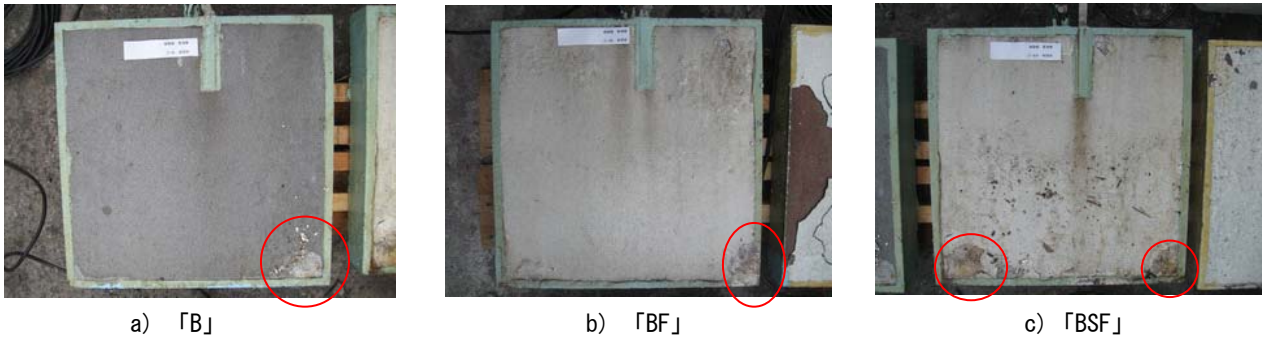


写真-2 溶射金属表面状況 (曝露 2 年後)

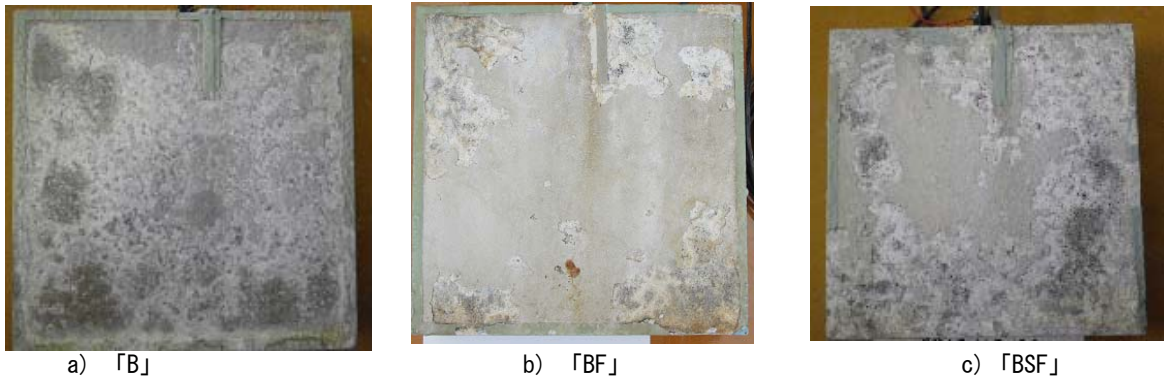


写真-3 溶射金属表面状況 (曝露 3 年後)

が溶射金属表面で平行して生じ、陽極材としての寿命も短くなることが示唆される。その結果として、内部鋼材への防食電流の分布が不十分となり、先に示した復極量も曝露の経過とともに減少したものと考えられる。「BF」では、曝露3年後においても他と比較して劣化程度は、健全であり、封孔処理材が残存している箇所は手で擦っても特に変化はなかった。一方で、粗面形成材を用いることで溶射被膜の付着力向上を期待した「BSF」では、曝露2年目までその劣化がほとんど確認されなかったが、曝露3年後には半分程度の部分で劣化が確認された。ただし、コンクリート表面が露出している箇所はほとんどなかった。既往の研究³⁾では、粗面形成材と封孔処理材を併用することが初期の過剰な防食電流の供給を抑制できるとあるが、本試験における溶射被膜の付着耐久性は、粗面形成材のない「BF」と比較して劣る結果となった。「BSF」の金属表面は、曝露場の都合により、最も波浪の影響を受け易いと考えられる場所に曝露されたことも劣化要因の一つであると考えられ、今後は粗面形成材の有無を含めた溶射被膜の付着力に着目した検討も行う予定である。

写真-4には、曝露3年後解体直前の無通電供試体および「BSF」供試体の打設面裏側を示す。溶射被膜を施工した面は、打設面側である。この結果から、無通電供試体のひび割れ幅が0.25～0.80mm程度と大きく、供試体の一部では、コンクリートの膨れが確認され、曝露環境として非常に厳しい塩害環境であることが確認され

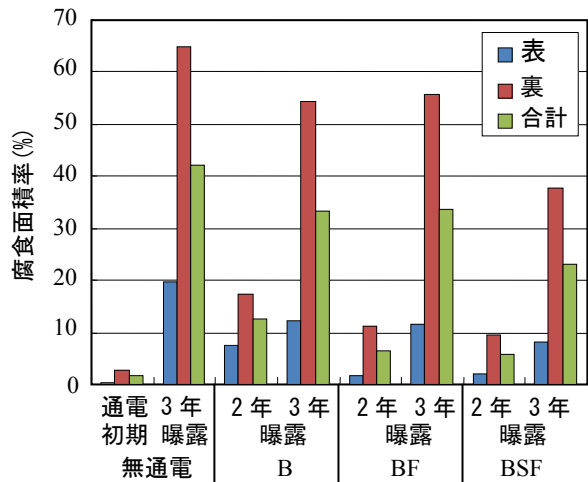
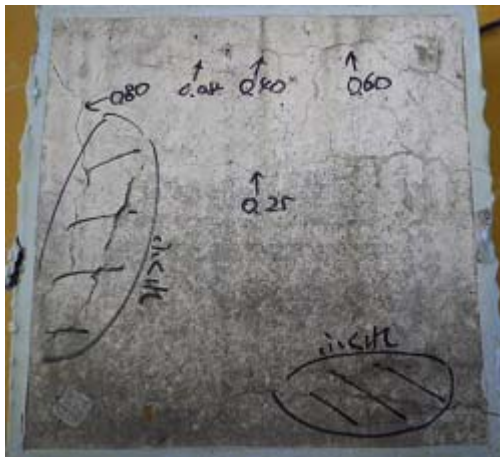


図-6 鋼材の腐食面積率

た。一方で、「BSF」では、0.08～0.15mm程度のひび割れ幅が確認されたが、無通電供試体と比較すると内部鋼材の劣化が抑制されていると考えられる。なお、いずれの供試体も打設面側にコンクリートのひび割れは、確認されなかった。

(2) 内部鋼材の腐食状況

図-6には、曝露直前、および曝露2、3年後の供試体解体時に取り出した内部鋼材の打設面側と打設面裏側の腐食面積率を示す。この結果から、いずれの供試体においても、曝露直前と比較して腐食面積が増加していることが確認される。特に、打設面裏側での腐食面積率が大きくなっていることが確認された。しかし、曝露3年後に着目すると、「B」、「BF」、「BSF」のいずれも無通電供



[無通電]



[BSF]

写真-4 供試体外 (曝露3年後 打設面裏側)

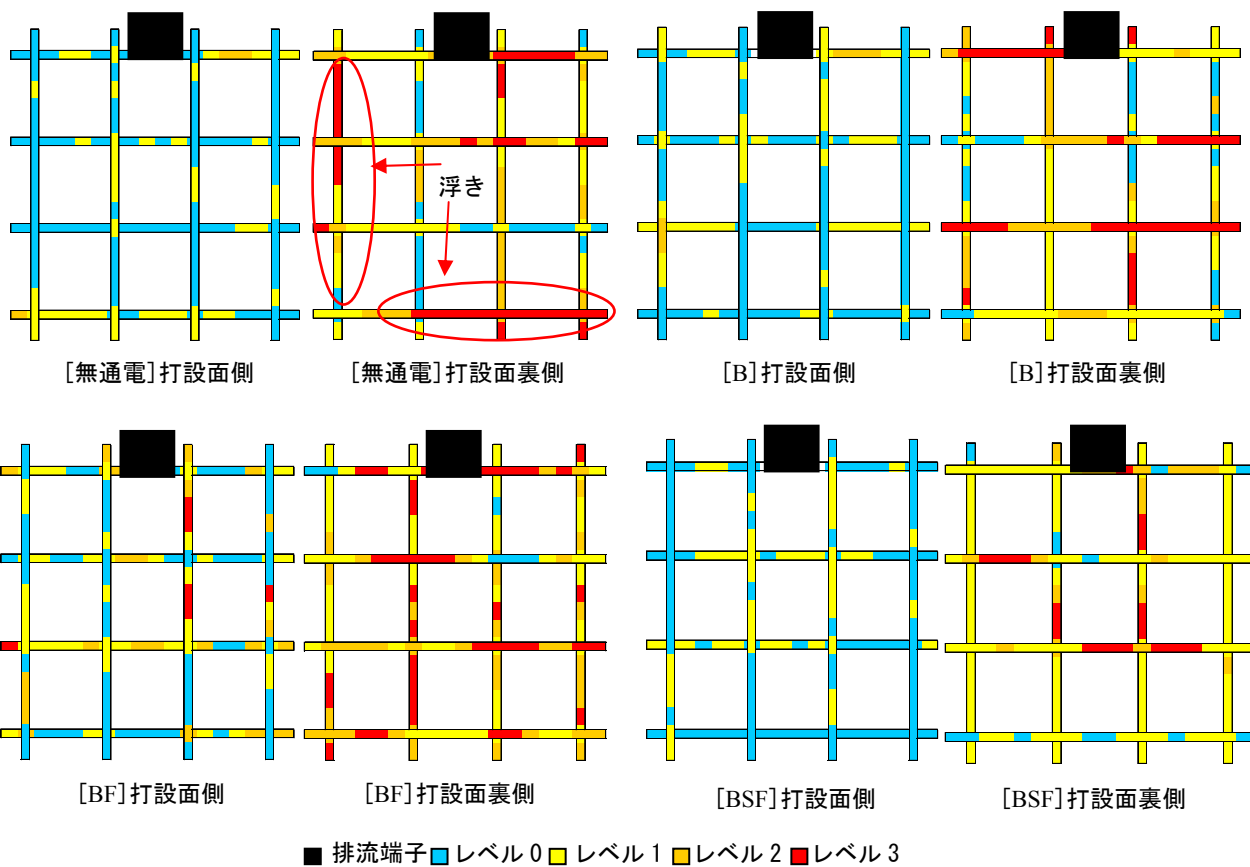


図-7 鋼材腐食レベル

(曝露3年後)

試体と比較して腐食面積率は小さく、電気防食の効果が確認される。最も腐食面積率が小さい供試体は、「BSF」であり、無通電供試体の半分程度であった。次に、図-7には、腐食程度を表-3による腐食レベルで目視判定した結果を示す。この結果から、いずれの供試体においても打設面側（溶射被膜施工側）の内部鋼材は、全体として腐食レベルが低いことが確認された。そこで、溶射被膜施工裏側である打設面裏側に着目すると無通電供試体では、外観観察で確認された浮き部分に腐食レベル3が集中していることが確認された。また、溶射による流電

陽極方式電気防食を適用した他の供試体においても目視観察では、腐食レベル3の部分も確認され、鋼材腐食が少しずつ進行しており、これは先に述べた腐食面積率の結果とも一致している。図-8には、曝露2年後および3年後の解体調査で測定した内部鋼材の腐食減量を示す。ここで、通電初期および曝露2年後での無通電供試体では、腐食減量の測定を実施していない。この結果から、流電陽極による電気防食を適用したいずれの供試体でも、曝露期間の経過にしたがって内部鋼材の腐食減量は増加する傾向がある。「B」の腐食減量は、曝露3年後の無通

電供試体と同程度であり、電気防食による防食効果が見られなかった。この原因として、「B」では、溶射被膜の劣化状況が激しかったため、見かけ上防食電流は供給されているが、防食電流の分配に不均一が生じ、防食効果を十分に発揮できなかったためと推測できる。封孔処理材を有する「BF」、「BSF」の腐食減量でも曝露期間の経過とともに腐食減量が増加した。これは、平均4時間後復極量で示したように、過酷な塩害劣化環境においては、常に100 mVシフトを満足できなかった場合、外部電源方式電気防食工法と同様の防食性能を期待することが困難であることを示唆するものである。しかし、その腐食減量は、無通電供試体の1/3程度であり、少なくとも内部鋼材の腐食進行速度を抑制できるものと考えられる。以上のことから、粗面形成材あるいは封孔処理材を用いない施工システムでは、長期間の継続した防食が困難であることが確認された。また、粗面形成材、封孔処理材を用いることにより、溶射金属の耐久性が向上することも確認できた。

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を検討するために、波浪の影響を直接的に受ける飛沫帯の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、本試験の範囲内で以下のことが確認できた。

- (1) 金属溶射型流電陽極方式電気防食工法では、溶射金属の施工システムがその防食効果に影響を及ぼす。
- (2) コンクリート表面をブラストにより素地調整をしたのみでは、波浪の影響を受ける環境下で溶射被膜のはく離が生じ易いため、長期的な防食効果の維持を期待できない。
- (3) 波浪の影響を直接的に受ける環境では、封孔処理材あるいは粗面形成材と封孔処理材を用い溶射金属を保護した場合でも暴露3年後ではく離等の現象が確認されたが、ブラストのみの施工システムと比較すると、溶射金属の耐久性は期待できる。
- (4) (3)の場合、溶射被膜の付着の観点から更なる検討が必要であると考えられる。

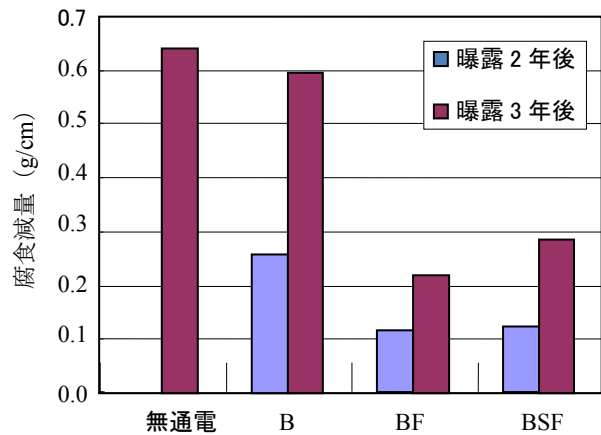


図-8 鋼材の腐食減量

- (5) 本試験のように、溶射皮膜表面が波浪等による外力を直接的に受けるような飛沫帯環境で約3年間の曝露を実施した結果においても、その防食効果は、無通電の場合の鉄筋腐食量を50~70%低減させる状況であった。

謝辞

本研究に際して、多大なるご協力を頂いた山田謙一氏（富士技建株式会社）を始めとする関係各位に深く感謝致します。

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
- 3) 山本誠，他：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，pp.1042-1047，2012
- 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