

論文 金属溶射を応用した流電陽極方式電気防食工法の防食効果とその評価手法に関する実験的研究

清水 鉄兵^{*1}・武若 耕司^{*2}・山口 明伸^{*3}・入江 隼輝^{*4}

要旨: 本論文は、金属溶射を応用した流電陽極方式電気防食工法のコンクリート構造物への適用について、防食効果および溶射金属の特性を把握することを目的とした曝露実験を実施し、環境条件と溶射金属種類とが防食効果に与える影響を明らかにするとともにモニタリング測定と解体調査によって得られた内部鋼材の腐食状況との関係について検討を行った。

キーワード: 電気防食, 流電陽極方式, 犠牲陽極, 溶射金属, 復極量, 防食電流

1. はじめに

電気防食工法は、主に塩害環境下にあるコンクリート構造物に対し、内部鋼材の腐食反応を電気化学的に抑制して耐久性を向上させる極めて有効な工法である。既設構造物はもちろん、新設構造物に対する予防保全対策としても期待されており、既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⁾。この工法は「外部電源方式」と「流電陽極方式(犠牲陽極方式)」の2種類に大別される。「外部電源方式」は、直流電源装置を設置し、直流電源のプラス出力に陽極材を、マイナス出力に防食対象鋼材を接続し防食電流を供給するものである。この方式は、劣化状況に応じて防食電流量が調節可能で維持管理が比較的容易な手法であるが、電源装置の配線設備が複雑な事や、施工費用が高いのが難点としてあげられる。これに対し「流電陽極方式(犠牲陽極方式)」は、陽極材として用いられる金属がそのまま反応して防食電流を供給するもので、前者に比べ電源の設置や電気代も不要なため簡単安価ではあるが、電流量を調節することは不可能であり、陽極材は消耗するためそれに応じた交換が必要となる。しかし、これからの予防保全を含めた維持管理を考えていく場合、簡単安価という利点は極めて大きく、陽極材に使用する金属の特性や、犠牲陽極の消耗度による溶射サイクルの確立など、実用化に向けた検討が今後更に重要となってくる。

そこで本研究では、「流電陽極方式」を長期安定的に保持するため維持管理手法を構築するために不可欠となる、各種陽極材および環境条件における防食効果とその耐用期間の把握を目的とし、約2年間の各種曝露試験を行った²⁾。ここでは主に、通電中における防食効果の推定状況と、解体調査によって得られた実際の鉄筋腐食状況との関連に着目した検討結果を述べる。

2. 実験概要

2.1 金属溶射の概要

本検討で犠牲陽極材として用いた金属はアルミニウムと亜鉛の擬合金 (Al-Zn: 略記号 AZ), アルミニウムと亜鉛にインジウムを加えた合金 (Al-Zn-In: 略記号 I), アルミニウムにマグネシウムを加えた合金 (Al-Mg: 略記号 M), 亜鉛金属 (Zn: 略記号 Z) の4種類である。表-1に示すように、溶射前のコンクリート表面に素地調整及び粗面形成材による粗面化処理、また、それぞれの溶射システムに準じて溶射を行った。なお、AZについては溶射後に、皮膜の安定化や緻密化のために封孔処理材を塗布している。また、目標膜厚はいずれも300 μ mである。

2.2 曝露試験体の概要

実験に用いた試験体は15cm \times 15cm \times 5cmの小型モルタル試験体と、40cm \times 40cm \times 7cmの中型コンクリート試験体の2種類である。試験体の形状は、図-1、図-2に示す通りであり、小型試験体にはパンチングメタルを、中型試験体には鉄筋を埋設し、いずれも陰極側排流端子と接続している。配合は表-2に示す通り、いずれも水セメント比60%とし、内部鋼材の腐食を促進させるため練混ぜ時にNaClを12kg/m³添加し、28日間の屋内気中養生後に後述の各種溶射金属及び方式(表-1参照)に

表-1 溶射金属種類と施工方法

溶射金属	前処理	溶射方式	後処理	目標膜厚
AZ-Zn-In	素地調整	アーク溶射	—	300 μ m
Al-Mg		プラズマ溶射		
Zn		ガスフリューム溶射		
Al-Zn	素地調整 粗面化処理	常温アーク溶射	封孔処理	

*1 鹿児島大学大学院 理工学研究科 海洋土木工学専攻 (正会員)

*2 鹿児島大学大学院 理工学研究科 教授 工博 (正会員)

*3 鹿児島大学大学院 理工学研究科 准教授 博(工) (正会員)

*4 鹿児島大学大学院 理工学研究科 海洋土木工学専攻 (非会員)

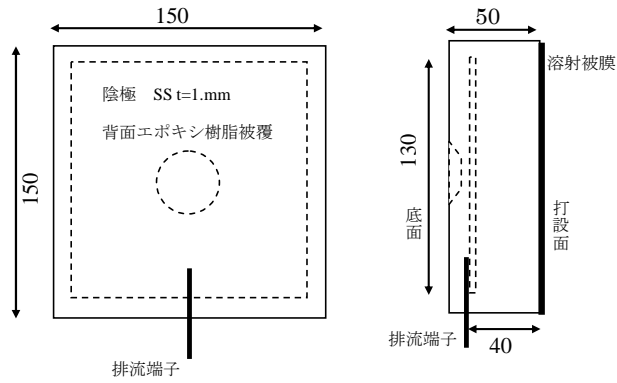


図-1 小型試験体の概要

より溶射を施し、溶射面（打設面）以外の側面および背面をエポキシ樹脂により被覆し、後述の各曝露環境に設置後、陰極側排流端子と溶射を施したコンクリート表面の陽極側排流端子とを電氣的に接続する事により通電を開始した。

なお、鋼材の初期状況を把握するために、曝露開始時（防食前）における小型および中型試験体を一体ずつ解体し、内部鋼材の初期腐食状況を調査した。図-3 に、内部鋼材の様子を写真-1、写真-2、に示す。内部鋼材における腐食面積率は、小型試験体で25%程度、中型試験体で8%程度であり、小型試験体の方が腐食の進行が速く腐食面積率が大きくなっており、またいずれの場合も底面側の方が腐食が顕著であることが確認された。

2.3 曝露環境の概要

曝露環境は「20℃湿潤」「40℃湿潤」「20℃乾湿繰り返し」「40℃乾湿繰り返し」の屋内環境4種類に「海洋環境」を加えた計5種類であり、試験体と各曝露環境の組み合わせは表-3に示す通りである。なお、乾湿繰り返し環境は、一週間おきに乾燥状態（相対湿度60%）と湿潤状態（相対湿度90%）の繰り返しであり、海洋環境は、鹿児島湾内における海上飛沫帯である。各曝露は平成18年12月14日より開始し、約2年間実施した。写真-3に海洋環境の曝露状況を示す。

2.4 曝露機関中の測定項目

比較用の無防食試験体（以下BK）を除き、曝露期間中の内部鋼材と溶射膜は常時電氣的に接続しておくことを原則とするが、定期的な外観観察および防食電流量、抵抗、鋼材電位（オン電位）の測定を実施する際には、防食状態の確認のために一旦接続を切り離し、インスタントオフ電位、4時間後オフ電位（既往の研究結果に基づき、復極がほぼ安定した後の電位）を測定した後、再度接続することとした³⁾。電位測定は、小型試験体は背面から鉛照合電極を用いて、中型試験体は埋め込み型の鉛照合電極によって実施した。

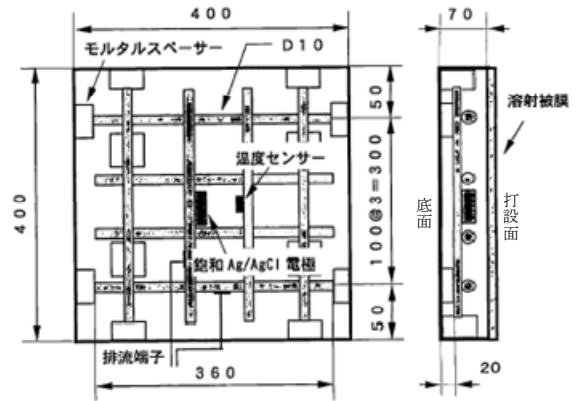


図-2 中型試験体の概要

表-2 各試験体の配合条件

小型試験体用モルタル配合

W/C	S/C	NaCl
0.6	2.0	12 kg/m ³

中型試験体用コンクリート配合 (kg/m³)

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

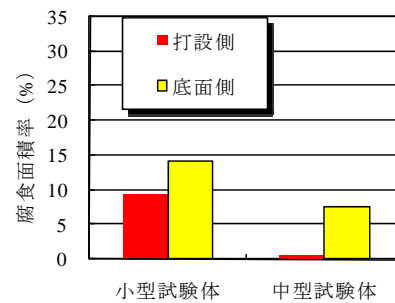


図-3 内部鋼材の初期腐食面積率

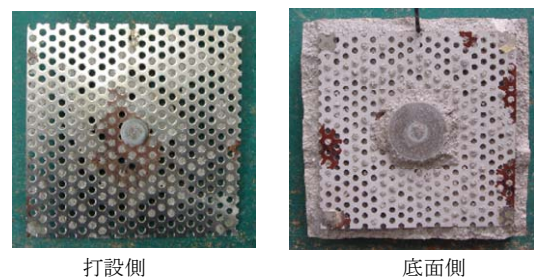


写真-1 内部鋼材の初期腐食状況（小型試験体）

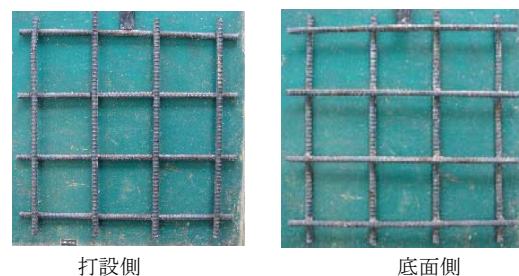


写真-2 内部鋼材の初期腐食状況（中型試験体）

表-3 曝露環境と曝露試験体の概要

溶射金属	20°C		40°C		海洋暴露
	乾湿	90%	乾湿	90%	
Al-Zn-In	小型・1体／中型・1体	小型・1体／中型・1体	小型・2体	小型・1体	中型・2体
Al-Mg	小型・2体／中型・2体	-	小型・2体	-	-
Zn	中型・2体	-	小型・2体	-	-
Al-Zn-In	小型・2体／中型・2体	小型・1体／中型・1体	小型・2体	小型・1体	中型・2体
無防食	小型・2体／中型・2体	小型・1体／中型・1体	小型・2体	小型・1体	中型・2体



写真-3 海洋環境への曝露状況



(「Z」40°C乾湿繰り返し：白い変色部分が溶射膜の浮き)

写真-4 溶射膜の剥離状況の一例

なお、次章の検討で用いている「防食電流密度」とは、測定された電流量を溶射膜面積当たりの電流密度で表したものであり、「復極量」とは、4時間後オフ電位とインスタントオフ電位の電位差から求めた復極量を意味する。また、評価を行う上で、それぞれ測定日毎の平均を算出し「平均防食電流密度」、「平均復極量」として指標に用いた。屋内環境に関しては、1週間に1回、計73回の測定、海洋環境に関しては2週間に1回、計27回の測定の平均となっている。

2.5 解体調査

曝露試験約2年後に通電を終了し、全ての供試体を解体し内部の鋼材を取り出して実際の腐食状況の評価した。評価に当たり、鋼材の腐食状況を表-4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、小型試験体についてはパンチングメタル表面を1cm²毎に、中型試験体については鉄筋表面を2cm²毎の範囲に区分けして、それぞれ目視により腐食レベルの評価を行った。

表-4 内部鋼材における腐食レベル評価の水準

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 欠損まで至らないが、腐食が著しい状態	
レベル3 激しい腐食により欠損している状態	

なお、防食効果の違いを検討するために溶射面に向いている鋼材面を「溶射面側」、その裏面を「溶射裏面側」として別々に腐食レベルを評価した。

3 結果と考察

3.1 外観観察

曝露期間を通じて、いずれの試験体においても内部鋼材の腐食によるひび割れの発生は確認されず外観上の大きな変化は無かったが、写真-4に示すように、曝露

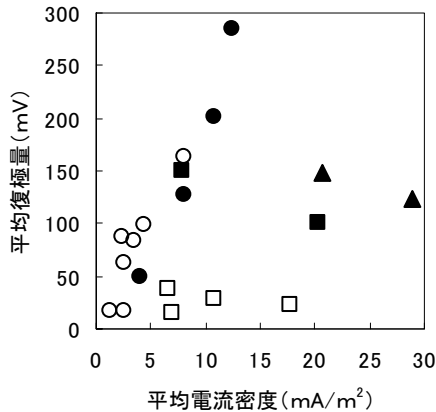
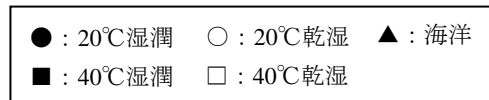


図-4 平均電流密度と平均復極量(環境毎)

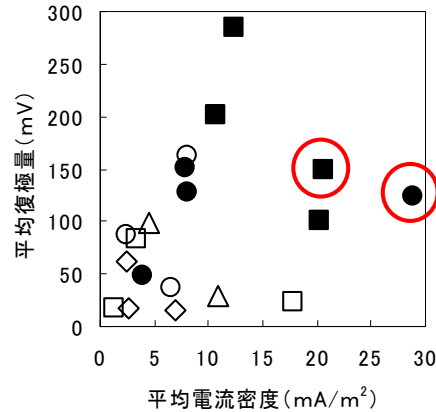


図-5 平均電流密度と平均復極量(金属種類毎)

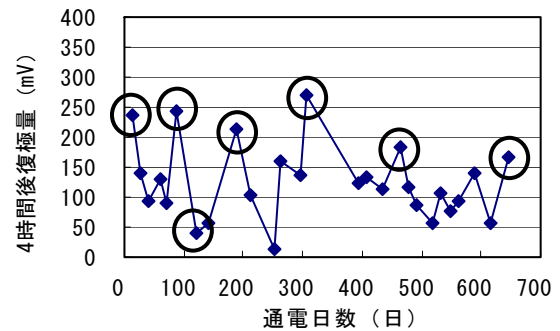
開始から約半年経過当たりから、一部の試験体に溶射膜の部分的な浮きや剥離が散見された。例えば、小型試験体における(40℃・乾湿繰り返し)の「Z」、(40℃・RH90%)「I」など、特に過酷な腐食環境下で見受けられる傾向があった。ただし後述する「I」の場合など、高湿度環境においては剥離後であっても安定した復極量を保持している場合もあり、溶射膜の部分的な剥離が、必ずしも直ちに急激な防食効果の低下を引き起こすとは言えない。

3.2 通電期間中の防食状態の評価

図-4, 5は、全ての曝露試験体について、通電中における平均電流密度と平均復極量を示したものである。ただし、環境および溶射金属が同条件となる試験体に関してはその平均値で表示している。なお、項目が多岐にわたるため、図-4は曝露環境の観点から、図-5は溶射金属の観点から表記した。以下それぞれの要因について検討する。

(1) 各環境における防食状況

図-4に示されるように、20℃環境下においては、供試体によって程度はことなるものの、湿度条件に関係なく平均防食電流量と平均復極量はほぼ比例関係を示しており、例えば100 mVの復極量を得るためには少なくとも5 mA/m²程度以上の防食電流が確保される必要があることが分かる。しかしながら、40℃環境下のより過酷な環境ではその関係に大きなバラツキがみられ、豊富な防食電流が供給されているにも拘わらず十分な復極量が得られていないケースが確認される。特に乾湿繰り返し環境下では、全試験体とも復極量が20~50 mV程度となり十分な防食効果が得られていないことが予想された。一方、海洋環境下においては、100 mV以上の復極量は得られており、防食効果は期待できるが、20℃環境の結果と比較すると、かなり豊富に供給されている防食電流量から予想されるほどの復極量ではないことが



注) ○囲みは湿度70%以上の日

図-6 復極量の経時変化(I, 海洋)

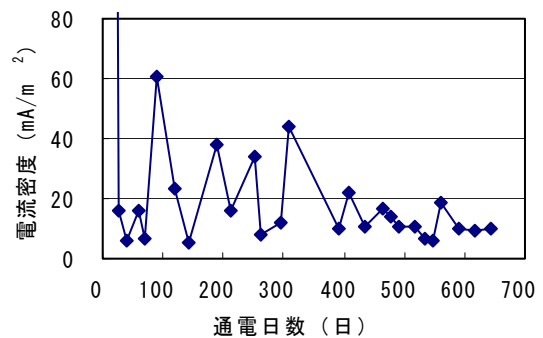


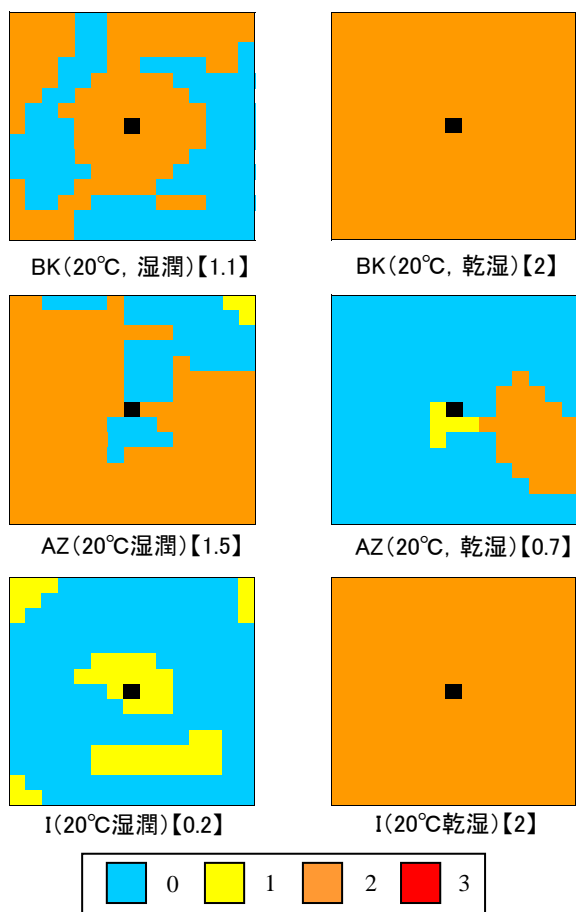
図-7 電流密度の経時変化(I, 海洋)

分かる。

(2) 各溶射金属種類による防食状況

図-5は、金属種類ごとの平均電流密度と平均復極量を示したものである。屋内環境に関しては、塗りつぶしが湿潤環境、くり抜きが乾湿繰り返し環境、赤丸が海洋環境をそれぞれ示している。

この結果から、「AZ」は湿度環境の違いの影響が比較的小さく、いずれの環境でも安定した防食電流の供給と復極量が得られていることが分かる。「I」は、湿度環境の変化には大きな影響を受けないものの、乾湿繰り返し環



【 】: 平均腐食レベル

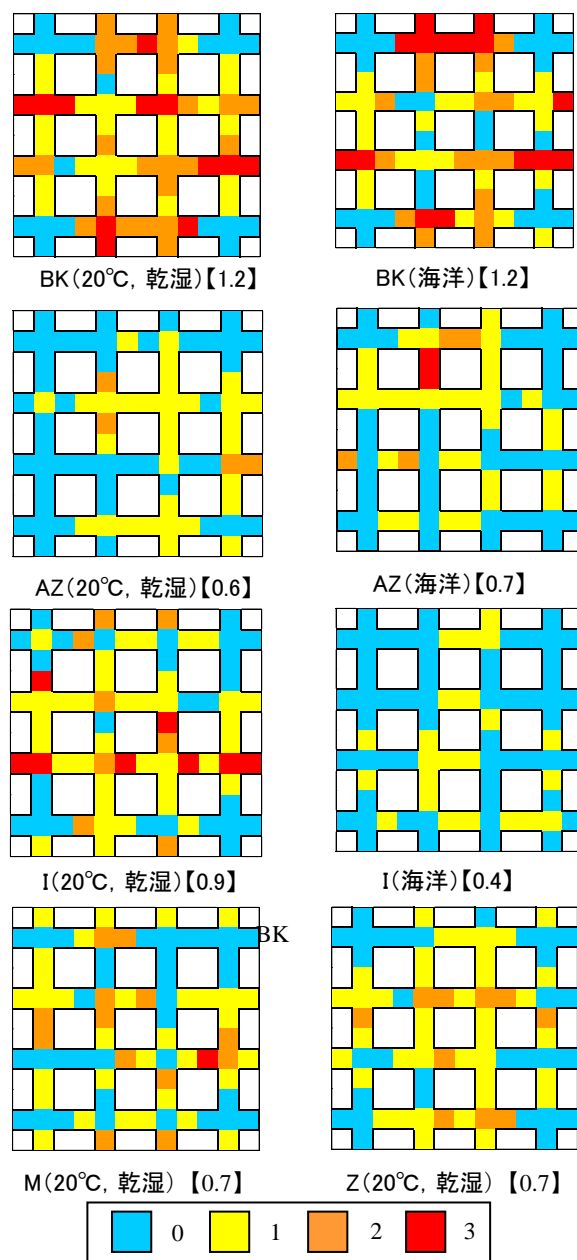
図-8 溶射裏面側における腐食レベル(小型試験体)

境で復極量が低下する傾向があり、多湿環境において極めて有効な防食効果が得られると考えられた。図-6 に示した「I」の海洋環境下における測定結果からも、気象条件が湿度 70%以上となった期間で高い復極量が得られていることが分かる。なお、「I」の海洋環境のように、豊富な電流量の供給のわりに復極量が得られていないケースは、図-7 に示す電流密度の経時変化のように、通電開始直後に極めて大きな防食電流が供給されたことによる影響と考えられる。「M」、「Z」については、全体的に上記の 2 種類ほどの電流量あるいは復極量は得られていないが、「Z」の 20℃環境では 100 mV 程度の復極量が得られており、環境条件によっては防食効果が期待できる。

3.3 解体調査における検討

(1) 腐食レベルによる防食効果の確認

全供試体を解体し内部鋼材を取り出したところ、「BK」を含む全ての小型、中型試験体において、溶射面側での腐食は曝露初期の状態からほとんど進行していなかった。一方で溶射裏面側は、「BK」の腐食も曝露期間中に進行し、各供試体の腐食状況にも差異が生じている結果となった。つまり本実験による電気防食の防食効果は、主に鋼材の溶射裏面側に作用したと考えられるため、腐



【 】: 平均腐食レベル

図-9 溶射裏面側における腐食レベル(中型試験体)

食状況の評価に際しても、溶射裏面側を対象とした。

図-8、図-9 に、小型試験体、中型試験体それぞれの溶射裏面における腐食レベル分布図の一部を示す。程度の差はあるものの、ほとんどのケースで「BK」と比較して腐食の進行が抑制されていることが確認できた。特に、通電中の状況から高い防食効果が推測されていた、20℃乾湿繰り返し環境および海洋環境の「AZ」、20℃湿潤環境および海洋環境の「I」については、ほとんど腐食の進行が見られず極めて有効な防食効果が認められた。一方で、乾湿繰り返し環境下の「I」については十分な防食効果が得られていなかった。この原因の一つに、前述した溶射被膜の剥離が考えられる。特に「I」の場合は、反応性が高いために通電後に過剰な腐食電流量が供給される傾向があるが、その際の腐食生成物等の影響で溶射膜

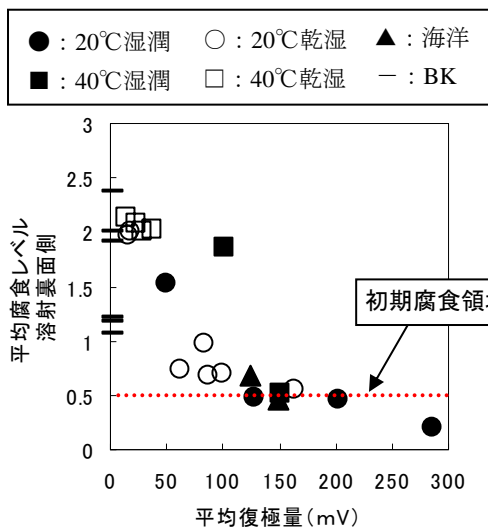


図-10 平均復極量と平均腐食レベル（環境別）

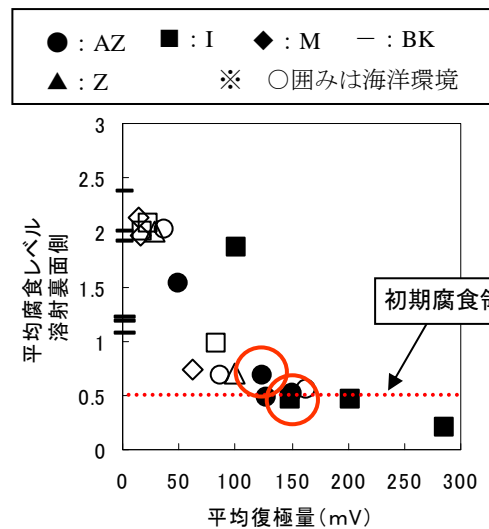


図-11 平均復極量と平均腐食レベル（金属種類別）

の浮きが生じ、結果的に防食効果の低下につながったと考えられ、溶射方式を含めた溶射システムや、下地処理、封孔処理等による、付着性や反応速度の制御等を検討することにより、改善される可能性がある。

なお、40℃環境下においては、ほとんど全ての供試体で全面的腐食レベルが2以上となる激しい腐食状況が確認されたが、40℃湿潤環境下の「AZ」のみは20℃乾湿繰返し環境の腐食状況と同程度にまで腐食の進行を抑制しており、「AZ」の高温環境下での高い防食性能が示された。

(2) 腐食レベルと復極量による防食効果の確認

環境条件および金属種類による防食効果をより明確に比較するため、各供試体の鋼材裏面における平均腐食レベルを算出した。図-10、11は、各供試体の平均腐食レベルと通電中の平均復極量との関係を示したものであり、図-10は環境条件別に、図-11は金属種類別にそれぞれ整理したものである。なお、曝露開始前の初期の平均腐食レベルはいずれも0.4~0.6程度であった。

これらの結果から、平均復極量が50mVを越える程度から明確な防食効果が得られはじめ、100mVを越えるとほぼ初期腐食状態のまま、ほぼ腐食の進行を停止できていることが分かる。

また、環境別（図-10）にみると、20℃環境下および海洋環境下では高い防食効果が得られているが、40℃環境下ではほとんど腐食の進行を抑制できていないことが分かり、環境による防食効果の明確な違いが認められる。一方、金属種類別（図-11）にみると、同じ溶射金属であっても、環境に応じてその防食効果が異なることが確認された。ただし、いずれの場合も防食効果と復極量の相関性は高く、溶射金属の種類に限らず復極量による防食効果のモニタリングが可能であると言える。

4. まとめ

本研究では、流電陽極方式電気防食工法の防食効果についての実験的検討を行い、以下の結論を得た。

- (1) 金属溶射を応用した流電陽極方式電気防食工法は、多湿環境、乾湿繰返し環境、海洋環境、など様々な環境において有効な防食工法であり、特に20℃環境下、海洋環境下等において高い防食効果が期待できる。
- (2) Al-Zn (AZ) は湿度環境によらず、安定した防食効果が得られる。また、Al-Zn-In (I) は特に多湿環境において、極めて有効な防食効果を発揮することが分かった。
- (3) 解体調査の結果から、いずれの環境においても通電中の防食電流、復極量、および腐食抑制効果の3者には概ね良い相関が得られた。ただし、高温環境化などの苛酷環境下では塗膜の剥離や腐食進行に伴ってこれらの関係が変化する場合がある。

- (4) コンクリート表面と溶射被膜との付着性は、過酷な環境になるほど低下し、被膜の浮きとして観察された。この現象は防食効果にも影響を及ぼすため、今後、溶射金属の反応特性の把握や下地処理などを含む施工システムの検討や、より長期的な効果の確認等を実施することにより、更に効果的な防食工法となる可能性がある。

謝辞：本研究は、島建設（株）、住友大阪セメント（株）、電気化学工業（株）、大日本塗料（株）による共同研究の一部である。川俣孝治氏（住友大阪セメント（株））、名倉政雄氏（飛島建設（株））、山本賢司氏（電気化学工業（株））を始めとする関係各位に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 土木学会：電気化学防食工法・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) 山口明伸、他：各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、コンクリート工学年次論文集、Vol.30、No.1、pp.1173-1178、2008.7
- 3) 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