

論文 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

山口 明伸*1・武若 耕司*2・川俣 孝治*3・名倉 政雄*4

要旨: 金属溶射による犠牲陽極方式電気防食工法がコンクリート構造物に及ぼす防食効果および犠牲陽極自身の電気的特性を把握することを目的として、各種環境下において実験的検討を実施した。ここでは、溶射金属とその下地処理の違いが陽極材の付着特性に与える影響、あるいは、各種環境下における溶射金属や溶射方法の違いが防食効果に与える影響等について検討した結果を報告する。

キーワード: 電気防食, 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、塩害や中性化を受けるコンクリート構造物に対し、その内部鋼材の腐食反応に直接関与してこれを停止させることのできる極めて有力な補修工法であると同時に、新設構造物における予防保全的対策としてもその効果が期待できる工法であり、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⁾。電気防食工法は、「外部電源方式」と「犠牲陽極方式(流電陽極方式)」の2種類に大別されるが、このうち外部電源方式は、直流電源装置から強制的に防食電流を供給するため、構造物の立地環境や劣化状態に応じて防食電流の調整が可能であり、防食効果の維持管理が比較的容易な手法であるが、電源設備の設置も含めて施工費用が高いのが難点である。これに対して、犠牲陽極方式は、文字通り陽極材が鋼材の犠牲となり徐々に溶け出しながら電流を供給するしくみであり、電源設備の設置も電気代も不要で簡単安価である代わりに、防食期間中に防食電流を調整することは不可能であり、構造物の劣化状態や環境条件により、防食効果が大きく左右される可能性がある。さらに陽極材自体も消耗するため適宜交換する必要があり、特に金属溶射による犠牲陽極材を用いた工法の場合は、陽極材の施工が非常に簡単にできる半面、パネル陽極材に比べて消耗が速いため、適切な溶射金属とその耐用期間を選定するのが難しいのが現状である。しかしながら、我が国の持つ膨大な社会資本の維持管理を考える場合、電気防食工法の中でも特に安価で施工の容易な金属溶射犠牲陽極方式の利点は極めて大きく、特に海洋環境コンクリート構造物の予防保全、事後保全に対する長期的かつ効果的防食工法とするための検討が今後益々重要となると考えられる^{2)~4)}。

以上のことから、著者らは、金属溶射犠牲陽極方式に

よる電気防食工法の防食効果を長期安定的に保持するための最適な維持管理手法を構築することを目指し、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を明確にするための一連の暴露試験を実施している。現在も試験は継続中であり、ここでは暴露期間一年までの結果について報告する。

2. 実験概要

2.1 金属溶射の概要

(1) 溶射金属と溶射方法

本研究では、現在犠牲陽極材として検討されている主な金属を用いた場合の内部鋼材の防食効果とその特性を明らかにすることを目的とし、以下の4種類を対象としている。すなわち、亜鉛とアルミニウムにインジウムを加えた合金(Al-Zn-In:略記号I)、亜鉛とマグネシウムの合金(Al-Mg:略記号M)、亜鉛とアルミニウムの擬合金(Al-Zn:略記号AZ)、および亜鉛(Zn:略記号Z)金属である。各陽極材は、表-1に示す各溶射金属の標準施工方式によって後述の暴露試験体に施工した。目標膜厚はいずれも300 μ mである。なお「AZ」については、溶射金属、施工方法ともに、既に実用化されている溶射システムに準じており、溶射前には試験体表面の素地調

表-1 溶射金属と施工方法

| 溶射金属 | 略記号 | 前処理 | 溶射方式 | 後処理 | 目標膜厚 |
|----------|-----|---------------|----------|------|-------------|
| Al-Zn-In | I | 素地調整 | アーク溶射 | — | 300 μ m |
| Al-Mg | M | | プラズマ溶射 | | |
| Zn | Z | | ガスフレーム溶射 | | |
| Al-Zn | AZ | 素地調整 粗面化处理 | 常温アーク溶射 | 封孔処理 | |

*1 鹿児島大学 工学部 海洋土木工学科 准教授 博士(工学)(正会員)

*2 鹿児島大学 工学部 海洋土木工学科 教授 工博(正会員)

*3 住友大阪セメント(株) 新規事業探索プロジェクト 博士(工学)(正会員)

*4 飛島建設(株) 土木事業本部 新規事業統括部(正会員)

整および粗面形成剤塗布による粗面化処理，溶射後には封孔処理材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を施している。

(2) 溶射金属の付着強度

表-1 に示す「I」, 「M」, 「Z」の3種は，現在開発中の新しい犠牲陽極システムであるため，陽極材としての目標付着強度 (1 N/mm²) および目標膜厚 (300 μm) を確保するための予備試験を実施した。なおその際，前処理における素地調整の影響を検討するため，各陽極材を溶射する試験体の表面粗度を3段階 (S・M・L: 写真-1) に変化させた。いずれの場合もノズル径 5mm の0.5MPa 直圧式ブラスト装置を用いて0.7~2.0mmのホワイトアルミナを1kg/minで吹付けることにより素地調整を行っており，今回はその吹付け時間を1分間 (S)，2分間 (M)，および3分間 (L) として粗度調整を行った。

図-1 は，溶射金属が目標膜厚を確保している状態での付着強度試験結果を示したものであり，「Z」はいずれの粗度レベルにおいても目標強度を満足しているが，「I」および「M」では，素地調整の際に十分な粗度レベルを確保しておく必要がある。したがって，これ以降の本実験における素地調整では，表面粗度を「L」レベルに統一した。

2.2 暴露試験体の概要

実験に用いた試験体は15×15×5 cm (小型モルタル試験体) と40×40×7 cm (中型コンクリート試験体) の2種類である。各試験体の形状は図-2, 図-3 に示す通りであり，小型試験体にはパンチングメタルを，また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，コンクリートおよびモルタルの練混ぜ時に NaCl 12kg/m³ を外割りで添加した。いずれの試験体の場合も，28日間の屋内気中養生後に各種溶射金属および方式 (表-1 参照) により溶射を施し，溶射被膜面 (打設面) 以外の側面および背面 (打設底面) をエポキシ樹脂により被覆し，後述する各暴露環境に設置後，内部鋼材と溶射膜を電氣的に接続することにより通電を開始した。陽極接続材の形状を写真-2 に示す。

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



粗度レベル: 左上「S」, 左下「M」, 右「L」

写真-1 試験体の表面粗度

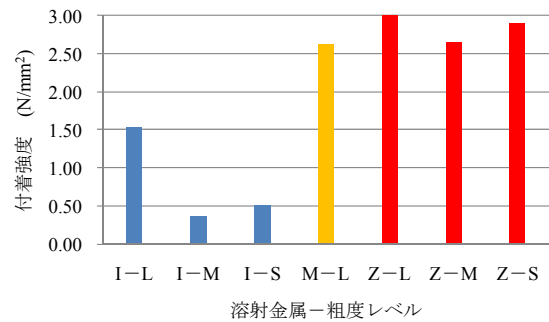


図-1 溶射金属の付着強度

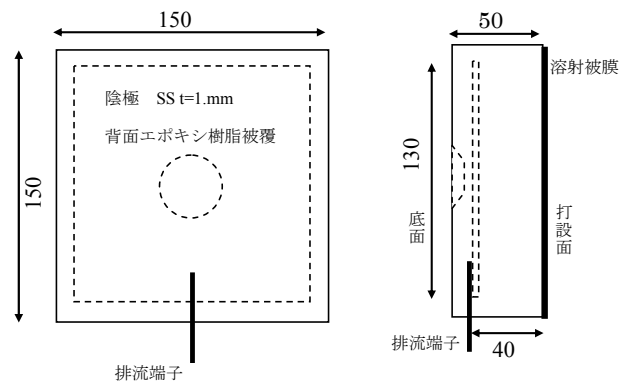


図-2 小型試験体の概要

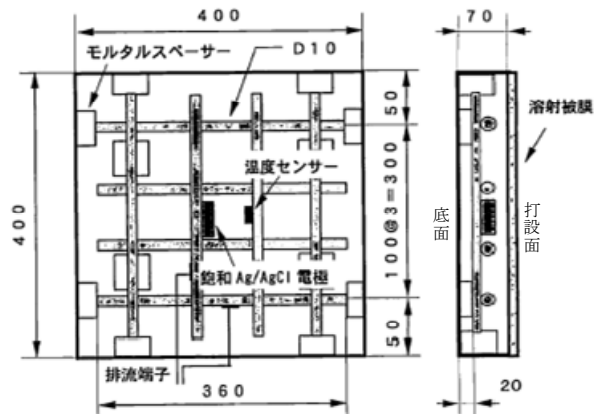


図-3 中型試験体の概要

なお、暴露開始前の初期鋼材腐食状況を図-4、写真-3、写真-4に示す。内部鋼材の腐食面積率は、小型試験体で計25%程度、中型試験体で計8%程度であり、中型試験体よりも小型試験体の方が内部鋼材の腐食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腐食が顕著であることが確認された。

2.3 暴露環境の概要

暴露環境は、「20℃・乾湿繰り返し」、「40℃・乾湿繰り返し」、「20℃・相対湿度90%」、「40℃・相対湿度90%」、「海洋環境」、の5種類であり、試験体と各暴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。写真-5に海洋環境の暴露状況を示す。

2.4 測定項目

比較用の無防食試験体を除き、暴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、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時間後オフ電位の測定後、再度接続することとした。

なお、次章では主に防食電流密度と復極量に関する検討を行うが、防食電流密度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4時間後復極量である。

3. 結果と考察

3.1 外観観察

これまでのところ、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ておらず外観上の大きな変化は無いが、写真-6に示すように、暴露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ている。例えば、小型試験体における（40℃・乾湿繰り返し）の「Z」、（40℃・相対湿度90%）「I」など、特に過酷な腐食環境下で見受けられる傾向がある。ただし今回の「I」の場合など、高



写真-2 陽極接続材の形状

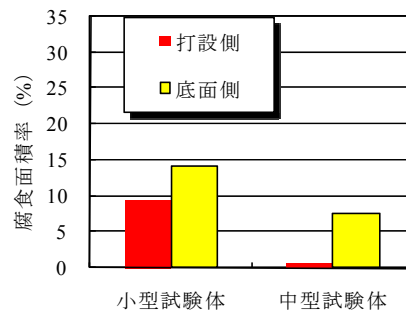
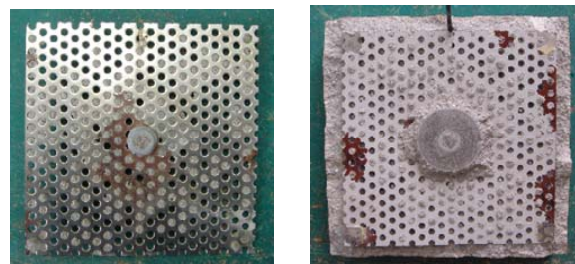


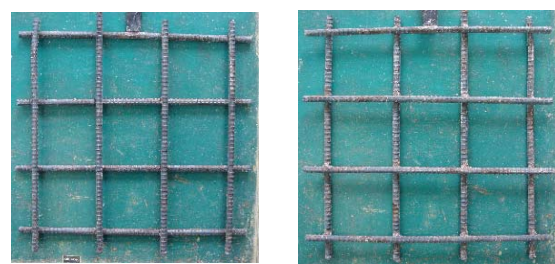
図-4 内部鋼材の初期腐食面積率



打設側

底面側

写真-3 内部鋼材の初期腐食状況 (小型試験体)



打設側

底面側

写真-4 内部鋼材の初期腐食状況 (中型試験体)

表-3 暴露試験体と環境条件

| 溶射金属 | 20℃ | | 40℃ | | 海洋暴露 |
|------|-------------|-------------|-------|-------|-------|
| | 乾湿 | 90% | 乾湿 | 90% | |
| I | 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 |
| M | 小型・2体／中型・2体 | - | 小型・2体 | - | - |
| Z | 中型・2体 | - | 小型・2体 | - | - |
| AZ | 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 | 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 |

注) 表記方法【試験体タイプ・暴露試験体の数】



写真-5 海洋環境への暴露状況



40℃乾湿繰り返し：小型試験体「Z」
(白い変色部分が溶射膜の浮き)

写真-6 暴露試験体の外観

湿度環境においては界面の水分の存在等により剥離後であっても安定した復極量を保持している場合があった。したがって、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 各種環境下における防食効果

(1) 多湿環境下の防食効果

図-5 から図-8 は、「20℃・相対湿度 90%」および「40℃・相対湿度 90%」の多湿環境下における小型試験体「I」および「AZ」の防食電流密度と復極量の経時変化を示したものである。なお、防食電流密度、復極量ともに3か月間ごとの平均で示してある。

これらの結果から、多湿環境下のいずれの温度条件および溶射金属においても、一年間の暴露期間を通じてある程度の防食電流密度と復極量が得られており、従来の防食システムである「AZ」はもちろん、開発中の「I」についてもその防食効果が確認できた。また、「AZ」はいずれの温度条件でもほぼ同様の安定した防食効果を示しているのに対し、「I」は20℃環境下において非常に高い復極量を示しており、防食性能の温度依存性が「AZ」よりも大きい可能性がある。

(2) 乾湿繰り返し環境の防食効果

図-9 および図-10 は、「20℃・乾湿繰り返し環境下」における「I」、「M」、「Z」、「AZ」の各種中型試験体の防食電流密度と復極量を示したものである。なお、防食電流密度と復極量は、図-5 から図-8 までと同様に3ヶ月間ごとの平均で示してある。

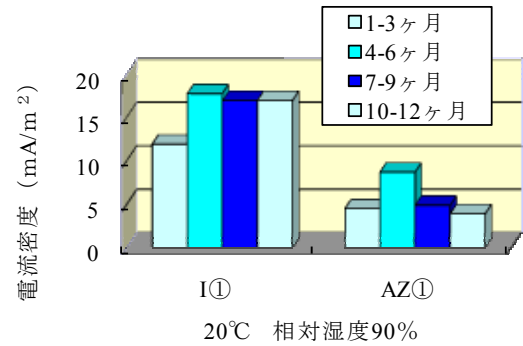


図-5 防食電流密度の経時変化 (小型：20℃・RH90%)

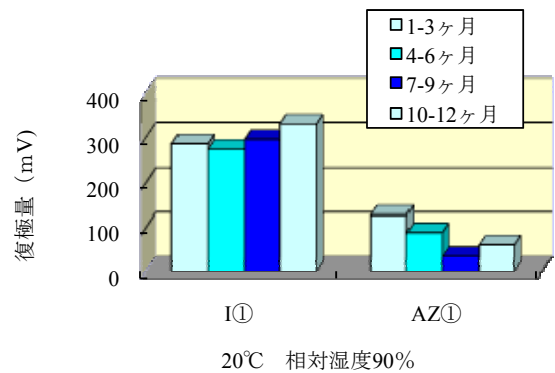


図-6 復極量の経時変化 (小型：20℃・RH90%)

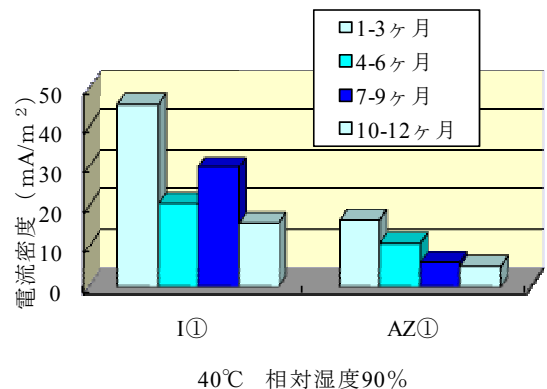


図-7 防食電流密度の経時変化 (小型：40℃・RH90%)

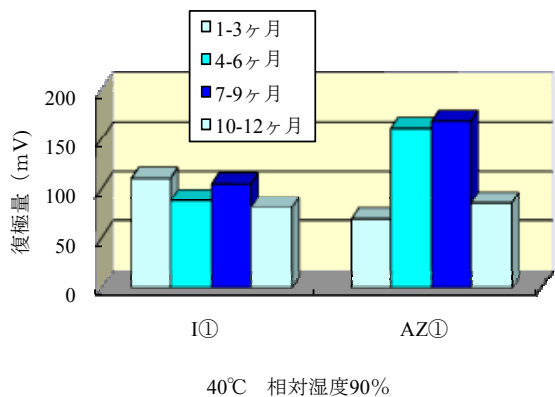


図-8 復極量の経時変化 (小型：40℃・RH90%)

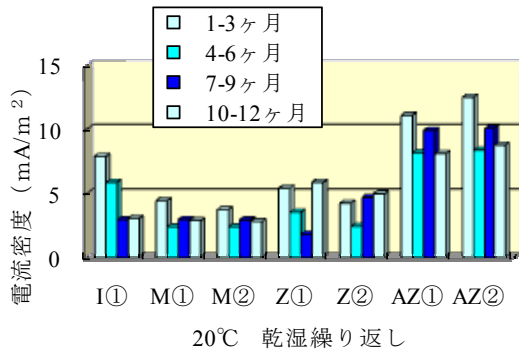


図-9 防食電流密度の経時変化 (中型: 20°C・乾湿)

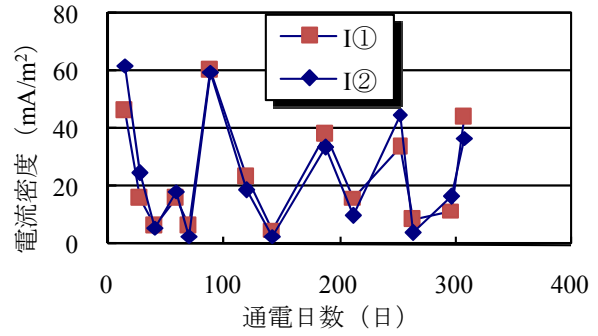


図-12 防食電流密度の経時変化 (中型「I」: 海洋)

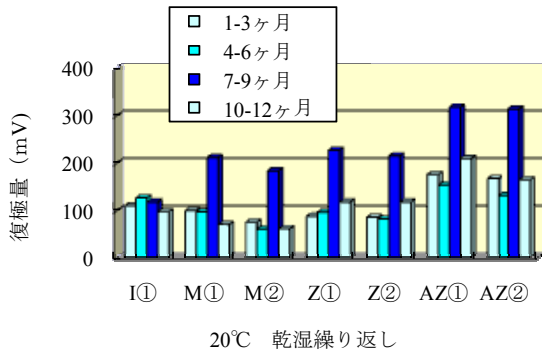


図-10 復極量の経時変化 (中型: 20°C・乾湿)

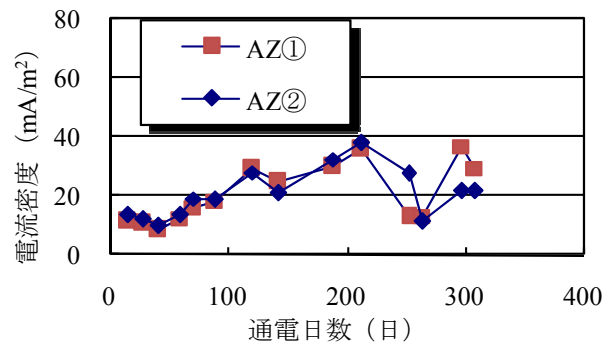


図-13 防食電流密度の経時変化 (中型「AZ」: 海洋)

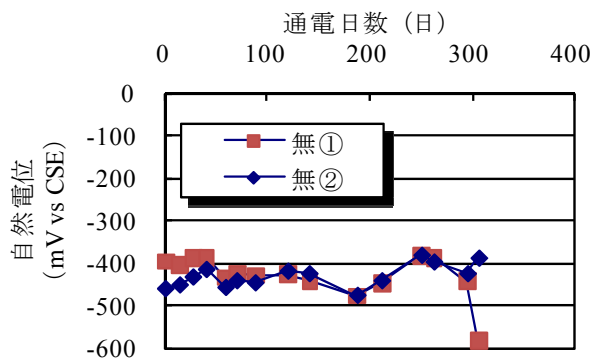


図-11 無処理試験体の自然電位 (中型「無」: 海洋)

これらの結果から、4種類の溶射金属のいずれの場合でも一年間の暴露期間を通じて防食電流密度と復極量が維持されていることが確認され、犠牲陽極方式による長期的な防食効果が確認された。ただし、「I」および「M」の復極量が経時的に若干低下する傾向が認められるが、他の環境条件の結果や、溶射膜の状況などから勘案すると、溶射金属自体の特性だけでなく、封孔処理等の二次的な処理方法の影響も影響している可能性がある。

(3) 海洋環境下

まず海洋環境に暴露した無溶射の比較用試験体の内部鋼材の自然電位を、図-11に示す。図のように暴露開始当初から自然電位が-400~-500mV (CSE) 程度の卑な状態を推移しており、活発な腐食状態にあると考えら

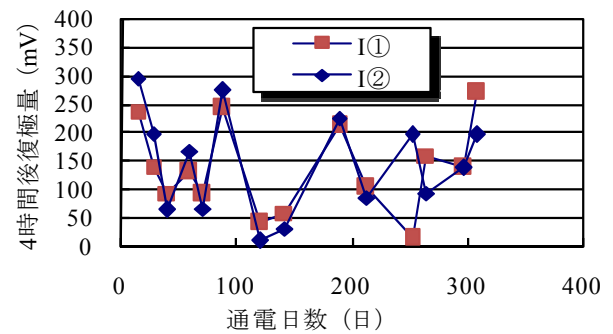


図-14 復極量の経時変化 (中型「I」: 海洋)

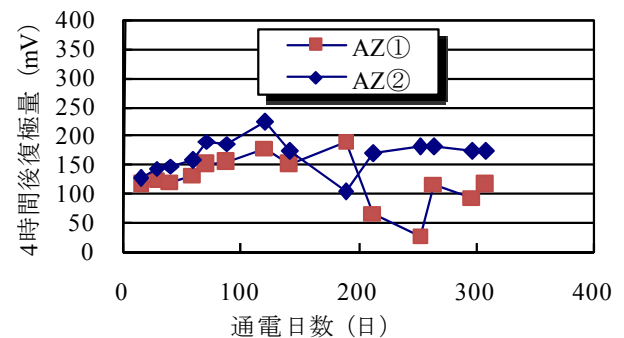


図-15 復極量の経時変化 (中型「AZ」: 海洋)

れる。それに対して、海洋環境下に暴露した「I」および「AZ」の防食電流密度と復極量を図-12 から図-15 に示す。電気防食を施した「I」と「AZ」の試験体は、値の変動はあるものの、暴露期間一年を通じて概ね100mV以上の十分な復極量を保持しており、高い防食効果が持続していることが確認できる。また前述の室内試験の結果同様に「I」は「AZ」に比較して気温や湿度の環境条件の変化に伴う変動が大きい傾向があるが、その変動幅は時間とともに減少傾向にあるようである。この現象も、溶射金属自体の特性だけでなく、封孔処理等による溶射膜の安定化処理の影響が考えられるため、溶射膜の消耗後の状況を分析するなど引き続き検討する必要がある。

4. まとめ

本研究では、各種溶射金属を用いた犠牲陽極方式電気防食工法がコンクリート構造物に及ぼす防食効果を明らかにするため、各種環境下において実験的に検討した。その結果以下のことが確認できた。

- (1) 犠牲陽極方式による電気防食法は、高湿度環境や乾湿環境を繰り返し環境、海洋環境など多様な環境条件で適用可能である。
- (2) 既に実用化されている亜鉛アルミニウム擬合金 (Al-Zn) はもちろん、それにインジウムを加えた Al-Zn-In 合金、アルミニウムとマグネシウムによる Al-Mg 合金、亜鉛なども犠牲陽極式電気防食工法の陽極材として十分な防食効果を発揮することを確認した。

- (3) 暴露環境や溶射金属の違いが防食効果に及ぼす影響をある程度把握することができたが、溶射金属自体のより詳細な消耗特性や、下地処理および封孔処理などを含めた金属溶射システムとしての特性等についても今後検討を進めていく必要がある。

謝辞：本研究は、鹿児島大学、飛島建設（株）、住友大阪セメント（株）、電気化学工業（株）、大日本塗料（株）による共同研究の成果の一部である。実験に多大なご協力を頂いた九州電力総合研究所、清水鉄兵氏（鹿児島大学）、前田聡氏（前鹿児島大学研究員）、相澤匡氏（大日本塗料（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) 例えば、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、土木学会、2001
- 2) 蓮井健二、里隆幸、武若耕司、森山守：常温金属溶射による鉄筋コンクリートへの電気防食の検討、防せい管理、Vol.43, No.9, pp.335-340, 1999.9
- 3) 武若耕司、里隆幸、Karyapradja M. F.：亜鉛およびアルミニウム金属溶射被覆による流電陽極方式電気防食の可能性、コンクリート工学年次論文報告集、No.36, pp.169-176, 1994.10
- 4) 佐々木和仁、武若耕司、蓮井健二、森山守：土木学会年次学術講演会講演概要集 第5部、Vol.53rd, pp.264-265, 1998.10