

亜鉛・アルミ擬合金溶射による電気防食工法の開発

Development of Cathodic Protection Method for Concrete Structures by Zinc-Aluminium Pseudo Alloy Spray Coating

名倉 政雄^{*1} 槇島 修^{*2} 糸川 浩之^{*1} 松久保 博敬^{*3}
Masao Nagura Osamu Makishima Hiroyuki Itokawa Hirotaka Matsukubo
芦田 公伸^{*3} 相澤 匡^{*4} 里 隆幸^{*4}
Kiminobu Ashida Tadashi Aizawa Takayuki Sato

【要旨】

亜鉛およびアルミ線材を常温金属溶射によりコンクリート表面にコーティングし、形成された亜鉛・アルミ擬合金皮膜の犠牲陽極作用により鉄筋の防食を行う新たな電気防食工法について、その適用性を実験的に検証した。実験では、小型供試体を用いて各種環境条件下での防食性能、耐久性能を確認するとともに、防食システムの構成ならびに施工性を把握するために実構造物での試験施工を実施した。

本文では、亜鉛アルミ擬合金溶射による電気防食工法について、2年間にわたり実施した基礎実験の結果ならびに現在も追跡調査中である実構造物での試験施工の状況を示し、新たな電気防食工法としての可能性を述べた。

【キーワード】 電気防食工法 流電陽極方式 常温金属溶射 亜鉛・アルミ擬合金 予防保全 防食電流

1. はじめに

電気防食工法は、塩害や中性化により劣化が進行しているコンクリート構造物の有効な補修技術として、近年需要が拡大している。また、近年では既設構造物ばかりでなく、新設構造物の予防保全技術としても期待が高まっている。

電気防食工法は、コンクリート表面に設置した陽極からコンクリート中の鋼材に電流を供給し、鋼材の腐食反応を停止させるものである。電流の供給方式により外部電源方式と流電陽極方式に大別され、国内では外部電源方式が主流となっている。しかし、外部電源方式では供用後も電流の供給が必要なため、電源装置の点検や防食電流の調整・モニタリングなどのための継続的な維持管理が必要とされる。

一方、今回開発した亜鉛・アルミ擬合金溶射による電気防食工法は、流電陽極方式によるもので、常温金属溶射によりコンクリート表面にコーティングされた亜鉛・アルミ擬合金皮膜とコンクリート中の鋼材のイオン化傾向の差を起電力とする電流を供給する。電源装置が不要なため維持管理が非常に簡便で、さらに形状追随性、施工性、経済性にも優れるため、新たな電気防食工法としての適用性の拡大が期待される。しかし、印加できる電圧に制約があること、陽極となる亜鉛・アルミ擬合金皮膜が消耗するため、その防食性能、耐久性などが実用上の課題であった。ここでは、本工法の実用化に向け実施

した小型試験体を用いた防食性能、耐久性能確認のための基礎実験ならびに防食システム、施工性を把握するために実施した試験施工について述べる。

なお、本工法の開発は、飛鳥建設(株)、電気化学工業(株)および大日本塗料(株)の3社の共同研究として実施した。

2. 工法概要

2.1 防食システム

本工法の防食システムを、図-1に示す。防食皮膜は、粗面形成材、亜鉛・アルミ擬合金皮膜、封孔処理材の3層から構成される。また、鉄筋と溶射皮膜を接続させるための排流端子および鉄筋の防食効果を確認するためのモニタリング用照合電極が設置される。

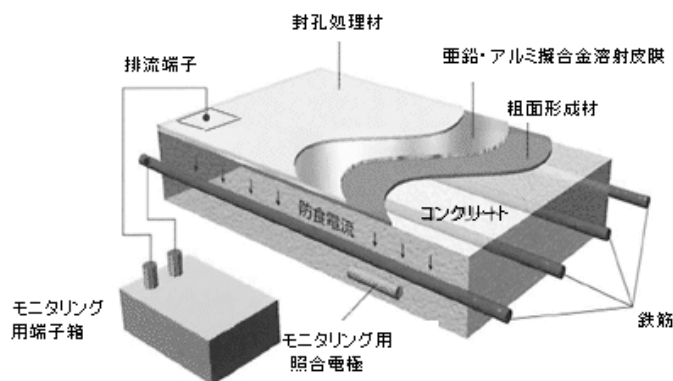


図-1 基本システム

1. 土木事業本部 土木技術部 環境リニューアルグループ
2. 土木事業本部 土木技術部 設計グループ
3. 電気化学工業 (株)
4. 大日本塗料 (株)

(1) 粗面形成材

粗面化処理は、溶射皮膜の密着性を向上させるためにコンクリート表面に不規則な凹凸を付ける処理である。無機系粒子を含む二液形エポキシ樹脂系材料で赤錆色に着色しており、エアスプレーにて吹き付ける。塗布密度は、コンクリートと溶射皮膜の通電性を確保するため、コンクリートの素地が一定の割合で残るよう施工する(写真-1)。

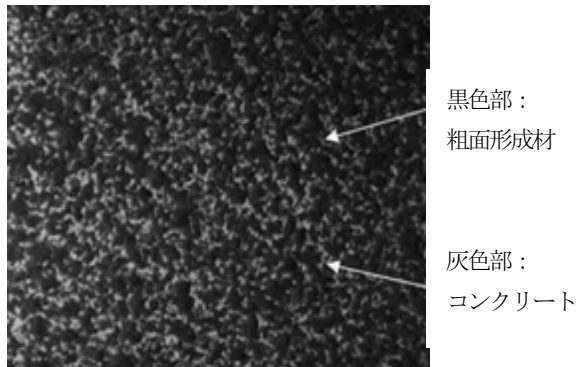


写真-1 粗面形成剤の塗布状況

(2) 亜鉛・アルミ擬合金溶射被膜

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、互層状の亜鉛・アルミ擬合金皮膜を形成する(写真-2)。皮膜の厚さは、200~300μmを基本としている。

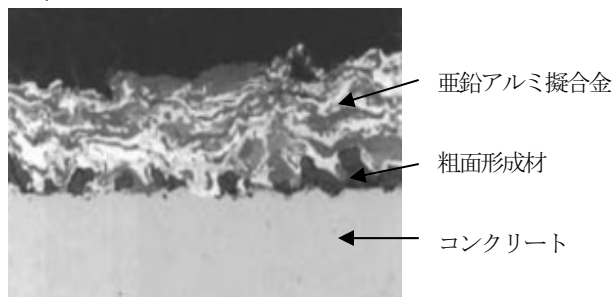


写真-2 溶射断面の電子顕微鏡 (SEM) 画像

(3) 封孔処理材

溶射された金属皮膜の内部には微細な気孔が存在するため、腐食性因子が溶射皮膜内に浸入しやすくなる。このため、封孔処理材を溶射皮膜内に浸透・充てんさせることで金属皮膜の活性を抑制し、耐久性を向上させる。さらに、美観確保、塗装色の調整のため、封孔処理の機能を持たせた上塗り用封孔処理材 (FDK 封孔材) も併用する。

封孔処理材は、リン酸を含有した一液性のブチラール樹脂系の材料で、浸透性が高い。色相は白色で、エアースプレーにて吹き付ける。

(4) 排流端子

排流端子は、15cm~20cm 角の鋼板・亜鉛板・チタン

板等を 20m² 程度に1ヶ所配置し、溶射金属と鉄筋を接続し、電気回路を形成させるものである。

(5) 照合電極

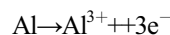
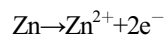
照合電極は、鉄筋の電位を継続的に計測し、防食効果の確認を行うものである。アルカリ環境下においても長期的に安定した電位を示す、飽和塩化銀電極、鉛電極、ハフニウム銀電極、二酸化マンガン電極などを用いる。

2.2 防食の原理

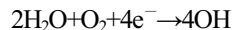
亜鉛・アルミ擬合金溶射による電気防食工法は、異種金属のイオン化傾向の違いを利用して、鉄よりイオン化傾向の大きい亜鉛・アルミ擬合金からコンクリート中の鉄筋に防食電流を供給し、鉄筋の電位を卑な方向(マイナス方向)へ変化させ、電位差を解消させることで鉄筋の腐食反応を電気化学的に抑制させるものである。

鉄筋と亜鉛・アルミ擬合金を短絡(導通)させると、イオン化傾向の差により亜鉛・アルミ擬合金を陽極(アノード)、鉄筋を陰極(カソード)、コンクリートを電解液とした電流の回路が形成され、以下のような電気化学的反応が進行する。

(アノード側)



(カソード側)



以上の電気化学的反応により、鉄筋には電子が常時供給されることとなり、この結果として鉄筋の発錆の原因であるマクロセルが解消され錆の進行が停止する(図-2)。

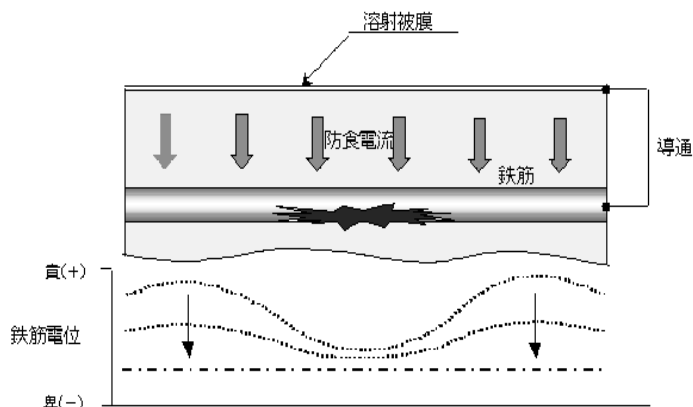


図-2 防食電流と鉄筋電位

3. 基礎実験での防食性能の評価

3.1 目的

温度、湿度、塩分の供給状況の相違が防食性能、溶射被膜の耐久性に及ぼす影響を評価するため、2年間にわたって各種養生条件下での暴露実験を実施した。

3.2 実験方法

(1) 供試体

実験に用いた試験体は、図-3に示す40×40×7cmのコンクリート試験体であり、打設面側を素地調整したのち粗面形成材を塗布し常温金属溶射により厚さ300 μ mの亜鉛・アルミ擬合金層を形成した。なお、溶射面以外の側面、背面はエポキシ樹脂により被覆している。また、鉄筋と排流端子とは通電をON-OFFできる構造とするとともに、鉄筋電位計測のため照合電極（飽和Ag/AgCl）を試験体中に埋設した。

配合は表-1に示すとおりである。いずれも水セメント比を60%とし、内部鋼材を腐食させるためNaCl 12kg/m³を外割で添加した。試験体は、28日間の屋内気中養生の後に亜鉛・アルミ擬合金溶射を施し、後述する各環境条件下に設置して通電を開始した。

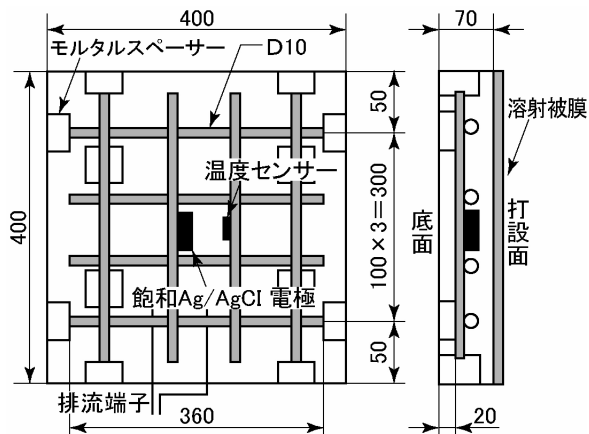


図-3 供試体形状

表-1 コンクリート配合

W/C	W	C	S	G	NaCl
60%	202kg	337kg	886kg	819kg	12kg

(2) 環境条件

環境条件は、「20℃乾湿繰り返し」、「20℃湿度90%」、および「海洋暴露」の3種類とした。乾湿繰り返し環境は、乾燥湿度60%、湿潤湿度90%を一週間おきに繰り返した。「海洋暴露」環境は、鹿児島湾内の海上飛沫帯である（写真-3）。

(3) 測定項目

電流密度、鉄筋電位および溶射被膜の劣化状態の変化を経時的に計測、観察した。また、約2年間の促進実験終了時に解体実験を行い、鉄筋腐食量を測定した。

電流密度は、1mA以下の分解能を有する無抵抗電流計を陰極と排流端子の間に設置して計測した。鉄筋電位は、通電時電位（ON電位）、通電遮断時電位（インスタントOFF電位）ならびに通電遮断後4時間電位（OFF電位）

を分解能1mV以下の直流電圧計により測定した。また、復極量はOFF電位とインスタントOFF電位の差として算出した。なお、土木学会では、OFF電位は24時間後の値を用いるものとなっているが、事前の計測で4時間後OFF電位と24時間後OFF電位との差は少ないことが確認できたために4時間後OFF電位をOFF電位として扱うこととしている。



写真-3 海洋暴露の状況

3.3 実験結果

(1) 電流密度、復極量

電流密度、復極量の経時変化を図-4に示す。電流密度は、「20℃乾湿繰り返し」ならびに「20℃湿度90%」を行ったものは、時間とともに電流密度が減少する傾向が認められた。また、「海洋暴露」供試体では、外気温の上昇により電流密度の値が増大することが確認できた。一定環境条件下での結果は、通電により鉄筋の腐食が時間とともに抑制されることを示し、暴露環境下では外気温の変化などが電流密度に影響を与えていることが確認できた。

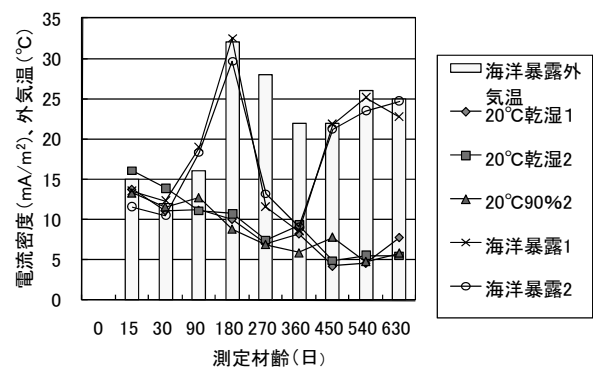


図-4 電流密度の経時変化

一方、復極量の経時変化を図-5に示す。復極量については、土木学会「電気化学的防食工法設計施工指針」において防食基準として示される100mVをほぼ満足しているが、「20℃湿度90%」の試験体で防食基準を下回

るケースが認められた。

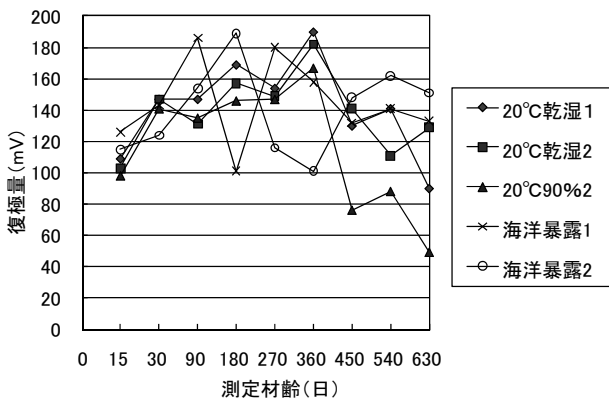


図-5 復極量の経時変化

(2) 溶射皮膜

「20°C室内乾湿繰り返し」試験体の2年経過後の状況を写真-4に示す。試験体には、排流端子周辺に若干の浮きが発生するとともに反応生成物と思われる白色の析出物が一部で認められたが、全体的にはほぼ健全な状態であった。また、「20°C相対湿度90%」の試験体もほぼ同様であった。一方、飛沫帯部に設置した海洋暴露の供試体は、排流端子周辺の溶射被膜に比較的大きな浮きが認められ、その他の部分においても若干の浮きを確認した。これらの結果より、溶射皮膜の劣化については環境条件による影響とともに、排流端子の形状、材質などが影響している可能性が考えられる。



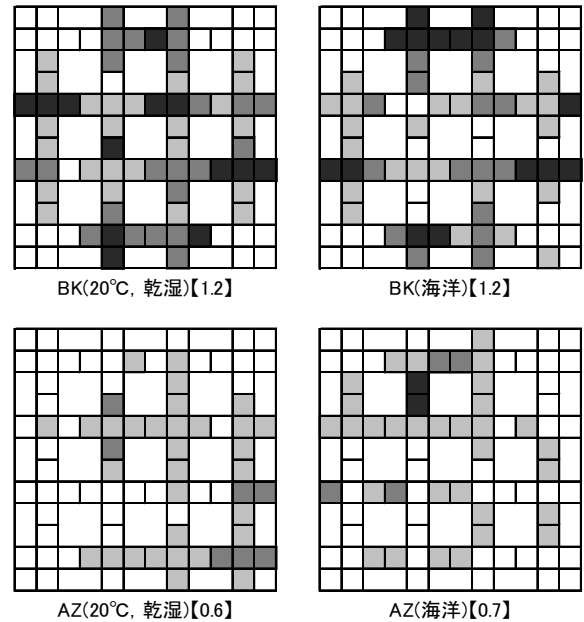
写真-4 2年経過後の溶射被膜の状況

(3) 鉄筋腐食

解体実験により、亜鉛・アルミ擬合金被膜による鋼材の防食効果を目視確認した。効果の確認は、電気防食を施さず同様の養生を行った試験体(BK)と比較することにより行った。

図-6は、2年経過後の「20°C乾湿繰り返し」および「海洋暴露」した試験体の鉄筋腐食状況を鉄筋の腐食レ

ベルを4段階に区分して示したものである。区分した腐食レベルは、表-2に示す通りである。また、図中には、腐食レベルに重み付けを行い、腐食面積比との関係で算出した腐食グレードを示している。腐食グレードの値からも判るとおり、亜鉛・アルミ擬合金被膜による防食効果が確認された。



注) 図中の記号

- AZ: 亜鉛・アルミ
- BK: ブランク供試体
- 【 】: 腐食グレード
- 腐食レベル0 : □
- 腐食レベル1 : ◻
- 腐食レベル2 : ◼
- 腐食レベル3 : ◼

図-6 鉄筋の腐食評価

表-2 腐食レベル

腐食レベル 0	健全な状態
腐食レベル 1	表面が腐食により変色している状態
腐食レベル 2	欠損まで至らないが、腐食が著しい状態
腐食レベル 3	激しい腐食により欠損している状態

4. 実構造物での試験施工

4.1 構造物概要

竣工後約30年経過した神戸淡路鳴門自動車道・門崎高架橋にて試験施工を実施した。本構造物は、海岸線上に位置しており、飛来塩分の影響を常時受けるとともに暴風時には波しぶきが直接構造物にかかる環境下にある(写真-5)。

構造物のコンクリート中に含まれる全塩化物イオン濃度と鉄筋位置の関係を図-7に、施工前の自然電位の測定結果を表-3に示す。全塩化物イオン量は表面部分で5.0kg/m³程度、温度ひび割れ防止のために配置されたメ

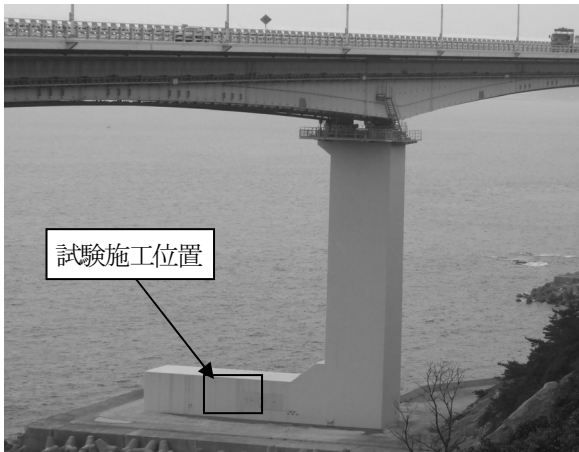


写真-5 構造物概要

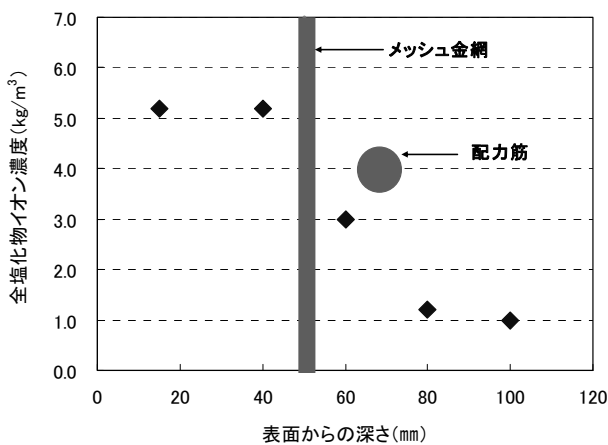


図-7 全塩化物イオン濃度と鉄筋位置の関係

表-3 自然電位の測定結果

自然電位 (mV:CSE)		ASTM C-876 による区分の割合 (%)	
最大値	-263	-200mV<E	0
最小値	-756	-350mV<E≤-200	14
平均	-463	E≤-350	86

メッシュ金網位置 (かぶり 50mm) で 5.0~3.0kg/m³ 程度認められる程度であった。

配力鉄筋付近 (かぶり 65mm) では 3.0~1.0kg/m³ 程度含まれている。自然電位の平均値は -463mV (CSE) で、ASTM-C876 による判定区分の割合は、90%以上の確率で腐食ありと判断された。部分的なはつりによる鉄筋の目視観測では、メッシュ金網全面に錆の発生が認められ断面欠損も一部発生していた。一方、配力筋については、部分的に錆の発生が認められる程度であった。

4.2 施工内容

電気防食の適用は、橋脚下部の高さ 2m、幅 5m の 10 m² の範囲とした (図-8)。排流端子を 2 か所、照合電極を溶射範囲内に 2 か所と溶射範囲外に 1 か所設けた。また、自然電位観測孔を溶射範囲外に 3 か所設けている。

施工は、先ず下地処理としてディスクサンダーを用いてコンクリート表面の脆弱層を除去した。次に、粗面形成材をエアスプレーにて約 150g/ m² 均等に吹き付けた。24 時間の養生の後、常温アーク溶射機を使用して亜鉛・アルミ擬合金を 250μm の厚さで溶射した (写真-6)。さらに、封孔処理剤および色合わせ用の着色封孔処理剤を各々 150g/m² ずつエアスプレーにて吹付けた。下地処理から封孔処理剤までは、2 日間の工程であった。

亜鉛・アルミ擬合金溶射の状況は写真-6 のとおりである。

4.3 追跡調査結果

追跡調査は、施工後 3 ヶ月毎に防食電流密度、鉄筋電位の計測ならびに外観調査を実施し、現在も継続中である。防食電流密度は、無抵抗電流計を使用して、電流値が安定した状態で計測を実施した。復極量は、インスタント OFF 電位と 24 時間後 OFF 電位の差から算出した。

防食電流密度の経時変化を図-9 に示す。流電陽極方式の防食電流密度は、その原理から気温や湿度の影響を受けることが知られているが、本計測結果においても夏場の 7 月には約 25mA/m² と高い防食電流密度を示したが、

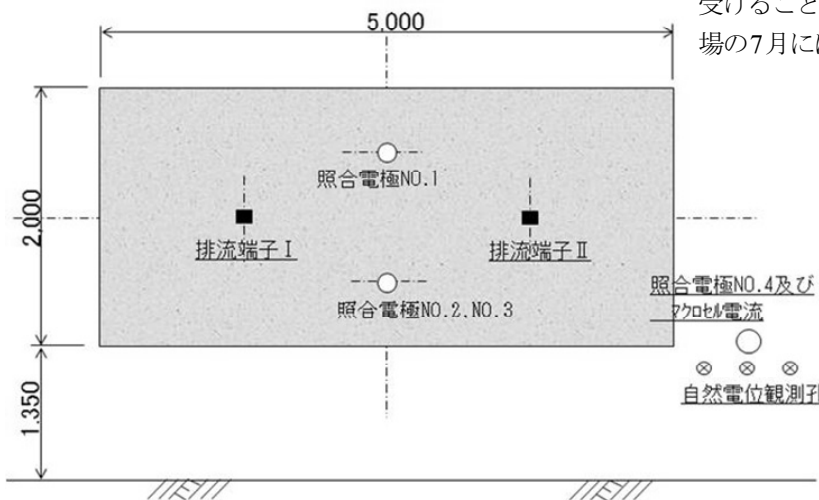


図-8 試験施工計画図



写真-6 常温金属溶射の状況

冬場の2月には約5mA/m²と夏場に比べ低下した。

復極量の経時変化を図-10に示す。接続のトラブルを是正した7月以降の復極量は、ほぼ安定した値を示し、No.1メッシュ金網、No.2メッシュ金網およびNo.3配力筋の復極量は、夏場の7月で63mV、74mVおよび34mVを、冬場の2月で、55mV、29mVおよび44mVを示した。夏場に対する冬場の復極量の変動は、No.1メッシュ金網で12%程度、No.2メッシュ金網で60%程度低下したが、逆に配力筋は22%程度上昇した。復極量は防食電流密度に比べ、季節変動による環境の影響を受け難い傾向にある。言い換えれば、同程度の復極量を得るのに、夏場は

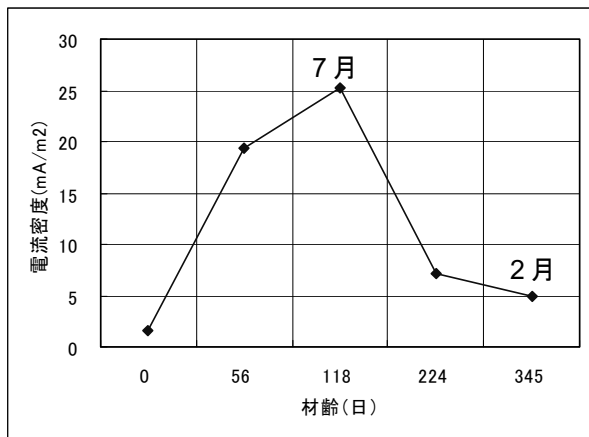


図-9 電流密度の経時変化

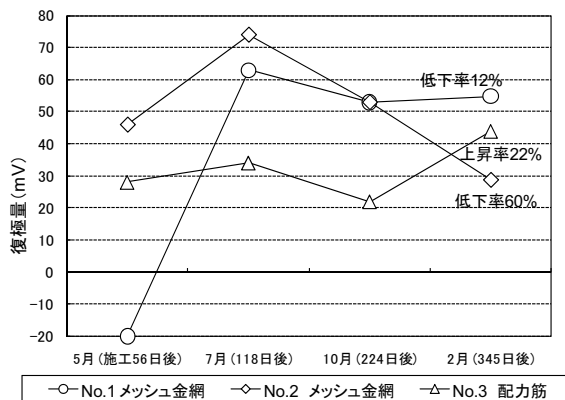


図-10 復極量の経時変化

高い電流密度が必要となるが、冬場は夏場に比べ低い電流密度で満足する。

5. 結論

亜鉛・アルミ擬合金を用いた流電陽極方式による電気防食工法の適用性について、各種基礎実験、試験施工によって得られた知見を以下に示す。

- 1) 防食電流密度、復極量は、腐食活性度に影響を与える温度、外部環境、通電後の経過時間などの影響を受けることがわかり、流電陽極方式の特性を把握できた。
- 2) 防食基準として規定されている100mVシフトに関しては、基準を満足しないケースが発生した。ただし、この場合においても鉄筋の防食を確認できており、流電陽極方式の特性に応じた防食基準の整備が求められる。
- 3) 溶射皮膜の耐久性については、一部で浮きなどの現象が認められ、今後その発生原因の検証が必要である。なお、追跡調査は今後とも継続することとしており、さらに防食性能、耐久性能についても検証を進めたい。

謝辞：本開発の一部は、鹿児島大学との共同研究として実施したものである。指導を頂いた工学部海洋土木工学科武若耕司教授、同 山口明伸准教授をはじめとする関係各位に深く感謝いたします。

【参考文献】

- 1) 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) 山口明伸, 武若耕司, 名倉政雄, 川俣孝治: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.1173-1178, 2008.
- 3) 山本賢司, 芦田公伸, 榎島修, 武若耕司: 鉄筋コンクリート壁試験体を用いた犠牲陽極法電気防食工法の防食効果に関する実証的研究, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol.8, pp.331-336, 2008.
- 4) 清水鉄兵, 武若耕司, 山口明伸, 入江隼輝: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.1381-1386, 2009.

Summary The adaptive flexibility of a new electrolytic protection method which provides protection against corrosion in rebar using the sacrificial anode of a zinc/aluminum pseudo-alloy membrane, and is formed by coating zinc and aluminum wire re material on the concrete surface by ambient temperature metallic spray, was experimentally verified. In the experiment, test construction was carried out at the actual structure, in order to understand the composition of the anticorrosion system and constraints of the construction, as well as to confirm anticorrosion and durability functions under various environmental conditions using a small-sized sample. In this article, results of the basic experiment carried out for 2 years regarding an electrolytic protection method by spraying a zinc/aluminum pseudo-alloy and the current conditions of the test construction of the follow-up research are shown, and its possibility as new electrolytic protection method is described.

Key Words : Cathodic protection method, Current-flow cathodic system, Metal spraying at room temperature Zinc-Aluminum pseudo alloy, Preventive maintenance, Corrosion protective current