

# 論文 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

佐々木和仁\*1・武若耕司\*2・蓮井健二\*3

**要旨：**素材表面に簡便に金属を付着させることが可能な常温金属溶射工法を利用し、亜鉛あるいは亜鉛-アルミニウム擬合金などの溶射被膜を流電陽極とした電気防食システムの鉄筋コンクリート構造物への適用性について、試験体規模での性能評価実験、ならびに実構造物への現場施工実験を実施し、検討を行った。

**キーワード：**電気防食, 流電陽極方式, 金属溶射, 亜鉛-アルミニウム擬合金

## 1. はじめに

コンクリート構造物に対する防食技術の一つとして、流電陽極方式電気防食法がある。この防食法は、現在の電気防食の主流である外部電源方式に比較して、電源設置が不要で、施工や維持管理も大幅に簡略化され、過防食の心配もない、という多くの利点を有している。しかし、大気中のコンクリートにこの流電陽極方式を適用するためには、陽極材とコンクリートとの密着性を十分に確保することが必要不可欠となってくる。

このため著者らは、導電性を阻害せず陽極材とコンクリートとの密着性を高めることのできる粗面形成材を陽極の下地材として用い、この上に、低温度で簡便に金属を付着させることのできる常温アーク溶射工法により被膜状の流電陽極を施工する流電陽極システムを開発した。

本論では、このような金属溶射被膜による流電陽極方式電気防食システムについて、試験体規模での性能評価実験、および実構造物への現場施工実験を行い、そのコンクリート構造物への適用性について検討を行った。

## 2. 溶射工法の概要

今回検討を行った溶射工法の特徴は、密着性確保のための粗面形成材を下地処理材として使用した点と、作業面の温度を上げずに作業する

ことのできる常温アーク溶射機により流電陽極を施工した点である。

ここで、粗面形成材とは、**図-1**に示すように、エポキシ樹脂とセラミック骨材を混合した特殊プライマーをコンクリート表面にスプレー塗布することによって、凸凹な面を形成させ、そのアンカー効果によって溶射被膜とコンクリートの密着性を高めるためのものである。なお、この粗面形成材塗布面は、多孔質で溶射被膜とコンクリートとの接触点が多数形成されるため、この塗布により導電性が阻害されることはない。

また、常温アーク溶射機は、従来までのアーク溶射機とは異なり、アーク部の外側から圧縮空気を噴射させ溶滴を加速、微粒化、冷却し、半熔融状態で基材表面に衝突させ、被膜を形成させるものである。このため、施工面が常温に近いまま作業ができることのほか、溶射効率がよいこと、金属ヒュームが少ないこと等の利点を有し、エアスプレー感覚で金属溶射ができるという特徴も有する。

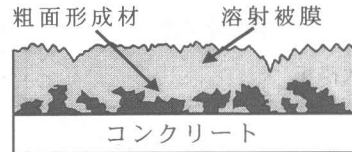


図-1 粗面形成材の概要

\*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 鹿児島大学助教授 工学部 海洋土木工学科 (正会員)

\*3 大日本塗料(株) 防食塗料部

### 3. 各種溶射被膜の性能評価実験

#### 3.1 供試体の概要

実験に用いた供試体は、図-2に示すように40 cm×40 cm×7 cmのスラブ型、および10 cm×10 cm×36 cmの角柱型の2種類の鉄筋コンクリート供試体である。供試体の内部には、あらかじめブラッシングにより浮き錆を除去し、アセトンで脱脂したD10の異形鉄筋を、スラブ供試体では10 cm間隔で格子状に配筋し、角柱供試体では、かぶり3 cmと7 cmの2段配筋として埋設した。コンクリートは目標スランプ値を8 ±1 cmとして、それぞれ細骨材の違う表-1の配合で作製した。なお、鉄筋を腐食しやすい環境に置き防食効果をより明確に判断するため、W/Cを60%としNaClを12 kg/m<sup>3</sup>混入した。

検討対象となる供試体は12種類で、それぞれの溶射条件は表-2に示す通りである。

溶射被膜の施工を大別すると、図-3に示すように、1種類のための溶射被膜からなっているもの(以下、単独被膜施工と称す)と、2種類の溶射被膜を組み合わせたもの(以下、複合被膜施工と称す)とに分けられる。前者には、亜鉛溶射のみのも(No.1)と亜鉛-アルミニウム擬合金(以下、亜鉛アルミと称す)溶射のもの(No.2)とがあり、いずれも目標溶射膜厚は300 μmとした(ただし、角柱供試体の目標膜厚は100 μm)。後者については、まず亜鉛アルミ溶射被膜を目標厚100 μmで施工し(これを2次陽極と称す)、その上に、より活性化が高いと考えられる亜鉛

溶射被膜を膜厚あるいは面積を変化させて中心部に施工(これを1次陽極と称す)した(No.3~6)。これは、1次陽極で発生した電流をより安定な2次陽極でコンクリート表面に均一に分配させること、作業性や経済性および1次陽極消耗時の再施工の簡便化を図ること等を考えたものである。また、今回検討を行った仕様では、1次陽極の亜鉛溶射被膜のかわりに亜鉛板を取り付けたもの(No.7~8)、その亜鉛板をアクリルカバーで覆ったもの(No.9)についても検討を行うことにした。

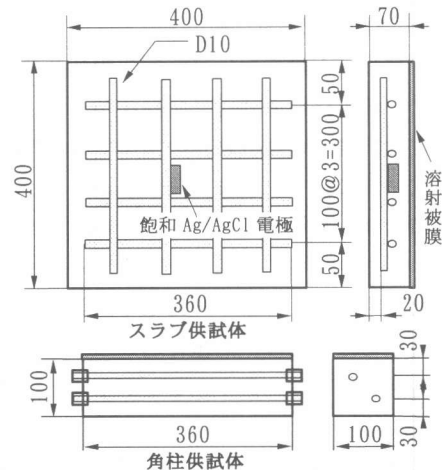


図-2 供試体の概要 (単位:mm)

表-1 コンクリートの配合

供試体の種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
			W	C	S*	G	NaCl
スラブ	60	52	202	337	886	819	12
角柱	60	51	196	327	901	847	12

\*スラブ:熊本県緑川産川砂(比重2.56 吸水率2.53%)  
角柱:静岡県富士川産川砂(比重2.62 吸水率1.78%)

表-2 供試体の溶射条件

No.	1次陽極		2次陽極		
	種類	割合			
スラブ	1	亜鉛溶射 100%*	(300 μm**)	—	
	2	亜鉛-アルミ擬合金溶射 100%	(300 μm)	—	
	3		(150 μm)	亜鉛-アルミ擬合金溶射 100% (100 μm)	
	4	亜鉛溶射 20%	(300 μm)		
	5		(600 μm)		
	6	亜鉛溶射 40%	(300 μm)		
	7	亜鉛板 20%	(1000 μm***)		
	8	亜鉛板 40%			
	9	亜鉛板+アクリルカバー		(1000 μm)	
	10	無処理			
角柱	1	亜鉛溶射 100%	(100 μm)	—	
	2	亜鉛-アルミ擬合金溶射 100%	(100 μm)	—	

\*供試体表面積に対する溶射施工面積の比率  
\*\*溶射の目標膜厚 \*\*\*亜鉛板の板厚

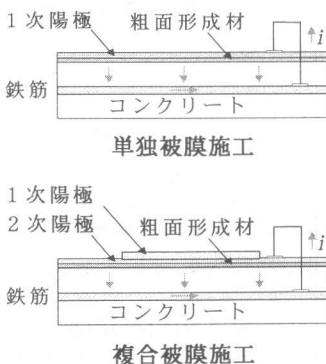


図-3 被膜施工の種類

### 3. 2 実験方法

作製した供試体を、屋外に設置した海水散布4時間と乾燥20時間を1サイクルとする海水散布槽に暴露し、溶射被膜からの排流端子と鉄筋とを短絡させ、各種溶射被膜の流電陽極性能について検討を行った。検討にあたっては、所定のサイクル毎に、海水散布時と乾燥時の各供試体の回路電流量および鉄筋分極量を測定した。

### 3. 3 結果および考察

#### 3. 3. 1 スラブ供試体における結果

図-4および図-5は、スラブ供試体において、溶射被膜から鉄筋へ流入した防食電流量を、それぞれ単位陽極面積当たりに換算し(以下、電流密度と称す)、乾燥時と海水散布時のそれぞれの値について、約2年間の経時変化を示したものである。

全体的な傾向として、いずれの供試体とも乾燥時の電流密度は海水散布時の約半分程度まで減少した。しかし、その乾燥時においても、通常電気防食に必要とされている<sup>2)</sup>、5~10mA/m<sup>2</sup>の電流密度はいずれの供試体においても十分に確保されていた。

また、溶射被膜の種類に関して見てみると、単独被膜施工のものについては、亜鉛アルミ被膜(No.2)のほうが、亜鉛被膜(No.1)の場合よりも多くの電流を供給できているようであった。さらに、複合被膜施工のものについては、1次陽極の膜厚を変化させたもの(No.3~5)では、150 $\mu$ mのものは300 $\mu$ mあるいは600 $\mu$ mのものに比べて供給電流量が小さく、ある程度の膜厚を有していないと大きな電流量を得ることができないようであった。しかし、1次陽極の施工面積を変化させたもの(No.6)では、かえってその面積の大きいほうが電流量は小さくなっている。これは、2次陽極として施工した亜鉛アルミ被膜の活発な反応が電流供給に大きく寄与し、1次陽極がこれを覆う形となり、相対的に電流量が小さくなったものと考えられた。

また、複合被膜施工とすることにより、全般的には単独被膜施工の場合と比較して、特に、

初期の供給電流量は明らかに増大するようであったが、長期的な電流供給性能については、それほど高い優位性は認められなかった。これらのことは、当初複合被膜方式で期待していた1次陽極としての亜鉛被膜の役割が十分に発揮されていない可能性があることを示唆するもので、今後この方式の有用性も含め、さらに検討する必要がある。

亜鉛溶射のかわりに亜鉛板を1次陽極として用いたもの(No.7,およびNo.8)に関しては、施工面積が広いものほど大きな電流量が得られる傾向にあり、亜鉛溶射を用いたものと傾向が異なったが、この原因はこれまでのところ明確ではない。また、亜鉛板の表面に保護用のアクリルカバーを取りつけたもの(No.9)についても、発生電流量自体は、カバーの無いものと大差はないようであった。

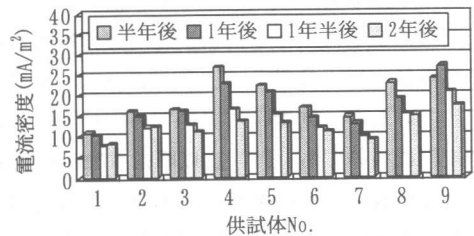


図-4 乾燥時電流密度の経時変化

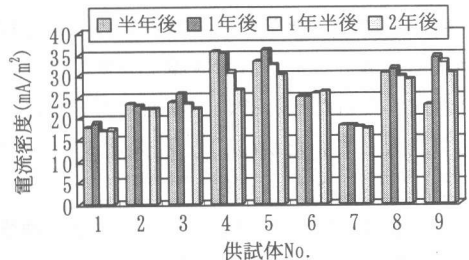


図-5 海水散布時電流密度の経時変化

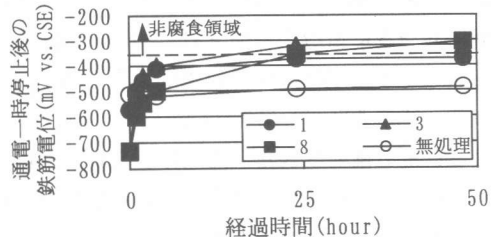


図-6 鉄筋電位の経時変化

図-6は、2年後に回路を開放し測定した鉄筋電位の復極状況について、その経時変化の一例を示したものである。

電気防食を施したいずれの供試体についても、防食基準である100mVシフト量は満足していた。通電停止後の鉄筋電位の推移を見ると、一部の供試体で、電位安定後もASTMの自然電位の規準における腐食領域を出ないものも確認されたが、無処理の供試体と比較すると、電気防食を施工した場合の電位は明らかに貴な値となっており、溶射被膜の流電作用による防食性能は確保されているものと考えられた。

### 3.3.2 角柱供試体における結果

図-7は、角柱供試体において、各溶射被膜から鉄筋に供給される電流密度について、海水散布時と乾燥時にわけて、それぞれの値の経時変化を示したものである。

亜鉛単独溶射、亜鉛アルミ単独溶射ともに、上記のスラブ供試体と同様、乾燥時の電流密度は海水散布時と比較して、約1/2~1/3程度減少していたが、乾燥時においても、いずれの溶射被膜についても、200日以降は10mA/m<sup>2</sup>前後の値で比較的安定に推移しており、電気防食としての流電作用は十分に確保されていると考えられた。

図-8は、2段配筋した亜鉛アルミ単独溶射供試体を例として、溶射被膜で発生した電流が2段配筋されたそれぞれの鉄筋にどの程度の割合で流入していたか(以下、流入電流率と称す)について示したものである。

海水散布時においては、かぶり3cmの鉄筋と7cmの鉄筋の流入電流率の比は、約1年間、ほぼ5:5で変わらず推移しており、どちらの鉄筋にも均等に電流が供給されていた。しかし、乾燥時においては、両者の比は平均で6:4となり、特に200日~300日にかけては、7:3となる状況も確認された。これは、乾燥時には、コンクリートの抵抗が増大し、この影響が現れたことによるものと考えられた。

一方、図-9は、特に上下の鉄筋の供給電流

量の差が大きかった試験開始から270日後の乾燥過程終了直後に測定した鉄筋電位の復極状況を示したものである。

かぶり7cmの鉄筋の復極量は、かぶり3cmの場合と比較して約半分程度であったが、通電停止から1時間経過時点ですでに防食基準である100mVシフト量を満足しており、少なくとも今回の室内実験の範囲では、かぶり7cmまでの間の多段配筋では、溶射被膜の防食性能は確保されるようである。

ただし、流電陽極方式の場合には通電量をコントロールすることが不可能なため、このように鉄筋が多段配筋されている場合、電位管理を十分に行なう等、かぶりのより大きな鉄筋への防食性に配慮する必要がある。

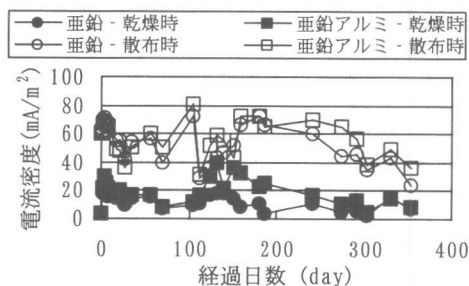


図-7 角柱供試体の電流密度の経時変化

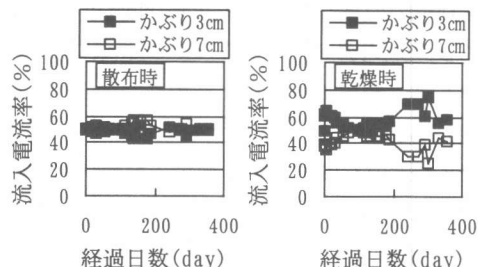


図-8 散布時(左)と乾燥時(右)の流入電流率

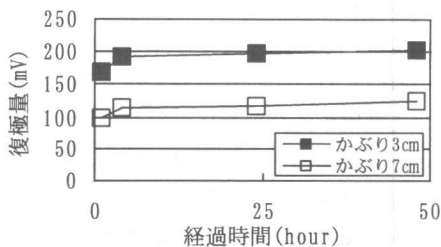


図-9 復極量の経時変化

#### 4. 実構造物への試験施工

##### 4.1 施工場所

施工場所は、日本海側の海岸線から約 10m ほどの所に位置するポストテンション方式 PC 桁で、冬期を中心として極めて多量の海水飛沫を浴びる環境にある。本橋は昭和 47 年に建設され、その後昭和 57~62 年にかけて被覆コーティングと断面修復による補修がなされた実績がある。しかし、本施工直前の調査においても鉄筋電位は -350mV (vs. CSE) 以下の値となり内部鋼材の腐食は進行していると予想された。そこで、図 - 10 に示すように、この橋桁の下フランジ部底面とウェブ部、および上フランジの一部を防食範囲とし、1997 年 9 月に、今回検討を行っている金属溶射被膜による流電陽極方式電気防食システムの試験施工を実施した。

##### 4.2 電気防食の施工工程

施工作業は、図 - 11 のフローに沿って実施した。まず、旧塗装をサンドブラストおよびディスクサンダーにより剥ぎ取り、コンクリート表面を露出させた。また、部分的にスターラップ筋が露出するまでハツリ取り、二酸化マンガ照合電極を埋設するとともに、スターラップ筋に排流端子を溶接した。ハツリ部を断面修復後、電気防食施工範囲のコンクリート表面に粗面形成材をスプレー塗布と、常温アーク溶射機による金属溶射を行った。溶射作業終了後の溶射面には上塗り材を一部種類をかえて塗装し、最後に陽極および鉄筋からの配線を測定用のスイッチボックスに接続して、全作業工程を終了した。

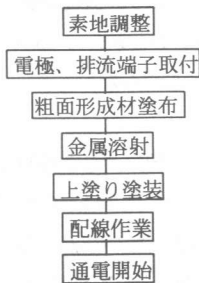


図 - 11 作業工程フロー

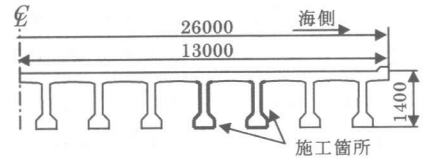


図 - 10 施工箇所断面図

##### 4.3 溶射被膜等の条件

検討を行った溶射被膜は、表 - 3 に示すように、亜鉛あるいは亜鉛アルミをそれぞれ単独で溶射したもの (No.1, および No.2)、2 次陽極となる亜鉛アルミの上に 1 次陽極の亜鉛溶射被膜を面積比 30% として溶射したもの (No.3)、さらに 1 次陽極の亜鉛溶射被膜のかわりに亜鉛板を取り付けたもの (No.4) の 4 種類である。なお、亜鉛を部分的に溶射した No.3 については、上塗り材の性能についても検討を行うために、室内実験結果から<sup>3)</sup>、ある程度の保護性能が期待された 2 種類をそれぞれ施工した。また、亜鉛溶射にかえて亜鉛板を施工した No.4 については、亜鉛板と 2 次陽極との密着性などを持たせるためのバックフィル材があるものとならないものにかけて施工を行った。

##### 4.4 結果および考察

図 - 12 は、代表的な 4 仕様における、通電開始から現在までの電流密度および鉄筋電位の復極状況について、約 15 ヶ月間の経時変化を示したものである。前述した室内実験の乾燥時の状況と同様に、いずれの仕様についても、その電流密度は時間とともに減少する傾向が見られた。また、電流密度の値そのものは、室内実験に比べて極めて小さく、12 ヶ月後では 1 mA/m<sup>2</sup> にも満たない状況となった。

表 - 3 溶射条件

No.	1 次陽極	2 次陽極	上塗り材	面積 (m <sup>2</sup> )
1	亜鉛溶射 100% 300 μm	-	A 種*	4.8
2	亜鉛-アルミ擬合金溶射 100% 300 μm	-	A 種	4.6
3-1	亜鉛溶射	亜鉛-アルミ擬合金溶射	A 種	3.3
3-2	30% 300 μm	100% 100 μm	B 種	3.1
4-1	亜鉛板**	亜鉛-アルミ擬合金溶射	A 種	3.4
4-2	30% 1000 μm	100% 100 μm	A 種	3.4

\* A 種：リン酸系インヒビター含有ブチラール樹脂クリヤー  
B 種：亜鉛メッキ用特殊エポキシシリコン樹脂塗料

\*\* 4-1 はバックフィル材有り、4-2 は無しとした

これは、室内実験では海水散布と乾燥の繰り返しであったが、今回の実施工箇所には雨水もほとんどあたらず、コンクリート内部の乾燥状態が連続しコンクリートの抵抗が高まったこと、および溶射被膜の表面に湿潤状態では生じにくい酸化被膜が生成され、反応を抑制したこと等により、流電作用が低下したものと考えられる。ただ、一部の施工箇所では15ヶ月を経過した12月の測定段階において、その流電作用が回復している状況も認められた。これは室内実験では見られなかった状況であり、この原因は、冬季になりそれまで乾燥環境にあった施工箇所に、海水飛沫あるいは降雪等により水分が供給され、コンクリートの抵抗が減少し、さらに、陽極反応が活発化したためと予想される。

また、復極量を見てみると、特にNo.1の亜鉛単独溶射においては、全体的に復極量は小さく、防食基準である100mVシフトを満足していない状況も認められた。これに対して、No.2の亜鉛アルミ単独溶射では、その電流密度自体は亜鉛単独溶射と同程度だったにもかかわらず、大きな復極量が得られていた。これは、溶射被膜自身の流電作用に加えて、大気中で生成されるアルミニウムの酸化物が被膜を緻密化させ、これによる酸素遮断効果等で鋼材の分極抵抗が高まったことが原因である可能性がある。1次陽極と2次陽極を組み合わせた複合方式のものでは、1次陽極として亜鉛溶射を用いた場合も亜鉛板を用いた場合も、電流供給能力および防食効果ともに亜鉛アルミ単独溶射よりも劣る結果となり、室内実験同様その有効性は確認できなかった。なお、被膜保護と美観確保のための上塗り材の性能比較、および亜鉛板施工におけるバックフィル材の効果等については、これらが明確となるまでの結果は得られていない。

## 5. まとめ

粗面形成材と常温アーク溶射金属被膜からなる流電陽極方式電気防食システムの実用性について、検討を行った結果を取りまとめると以下のようなものである。

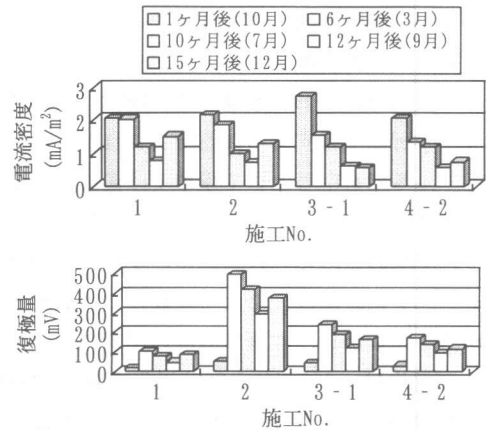


図-12 電流密度(上)と復極量(下)の経時変化

(1) 海水散布4時間と乾燥20時間を1サイクルとする試験槽内での性能評価実験においては、海水散布時、乾燥時に関係無く本システムによって電気防食に必要な電流が鉄筋に供給されることを確認した。ただし、鉄筋を多段配筋とした場合、特に乾燥時において、かぶりの厚い側の鉄筋に流入する電流量は小さくなることに配慮する必要がある。

(2) 実構造物への現場施工実験においては、コンクリートが常時乾燥の影響を受けていることもあり、本システムによる供給電流量は小さかったが、少なくとも溶射被膜が亜鉛アルミ擬合金の場合には、ある程度長期的な鉄筋防食性が期待できるようであった。

(3) 亜鉛と亜鉛アルミ擬合金を組み合わせた複合方式の溶射被膜については、今回の検討の範囲ではその有効性は発揮されておらず、今後課題が残された。

## 参考文献

- 1) 武若耕司, 他: 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法の可能性, コンクリート構造物の補修工法と電気防食に関するシンポジウム論文報告集, pp169-176, 1994, 10
- 2) 牛島栄, 他: 金属溶射被膜による鉄筋の電気防食効果の検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 14, No. 1, pp797-802, 1992
- 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法における上塗り塗装材の性能評価, 土木学会第52回年次学術講演会, No. 5, pp780-781, 1997, 9