

# コンクリート中における損傷を付与した Al-Mg 溶射鉄筋の耐腐食性能

Corrosion Resistance of Al-Mg metal spraying reinforcement with damage in concrete

北見工業大学工学部地域未来デザイン工学科 ○学生員 八島一也 (Kazuya Yashima)  
 北見工業大学工学部社会環境系 正員 井上真澄 (Masumi Inoue)  
 北見工業大学工学部社会環境系 正員 崔 希燮 (Heesup Choi)  
 NEXCO 西日本インベーションズ(株) 正員 広野邦彦 (Kunihiko Hirono)  
 NEXCO 西日本インベーションズ(株) 正員 杵本正信 (Masanobu Sugimoto)

## 1. はじめに

海水飛沫を常時受けるような海洋環境下や凍結防止剤が繰返し散布される極めて厳しい腐食環境下に曝されるコンクリート構造物においては、信頼性ある防食方法としてエポキシ樹脂塗装鉄筋(以下、EP鉄筋と称す)が多くの構造物に適用されている。しかし、海外では、沿岸部においてEP鉄筋を用いた鉄筋コンクリート橋脚群がEP鉄筋の腐食に起因して早期劣化が生じた事例が報告されている。これは、EP鉄筋の運搬時や施工時の塗膜損傷やコンクリート中において塗膜剥離が生じていたこと、厳しい塩分環境と高温多湿な環境条件が主要な原因であったとされている<sup>1)</sup>。

一方、予防保全を目的として長期防食性に優れるアルミニウム・マグネシウム合金溶射(以下、Al-Mg溶射と称す)を用いた新しい防食技術が研究開発されている<sup>2),3)</sup>。現在、Al-Mg溶射はその優れた防食性能を生かし、沿岸部の鋼橋や鋼桁端部の伸縮装置、支承、高力ボルトなどへの普及が図られている。今後、その優れた防食性能を生かして、コンクリート用補強材に用いる鉄筋の新たな防食技術として適用が期待される。

Al-Mg溶射により被覆した鉄筋をコンクリート用補強材として用いる場合、コンクリートのアルカリ環境下から溶射合金の主成分であるアルミニウムの浸食を避けるために封孔処理による溶射皮膜の保護が必要となる。これまで著者らは、Al-Mg溶射皮膜に被覆する封孔剤の仕様がコンクリート中での付着性や耐食性に及ぼす影響を検討してきた。その結果、Al-Mg溶射鉄筋に耐アルカリ性を有するエポキシ樹脂系封孔剤を施すことによりコンクリート中において良好な耐食性と付着性が得られること<sup>4)</sup>、鉄筋コンクリート部材の補強材に使用した場合の力学的特性を明らかにしている<sup>5)</sup>。

Al-Mg溶射鉄筋に施す封孔処理は、耐アルカリ性の付与が主目的であるが、Al-Mg溶射皮膜にエポキシ樹脂塗料を重ねたデュアルコーティング構造になっているのがAl-Mg溶射鉄筋の特徴である<sup>4)</sup>。またAl-Mg溶射皮膜は、皮膜による環境遮断作用とともに、Mgは皮膜に傷が生じたとき水分や酸素が供給されるとその化合物が傷を塞ぐ自己修復効果を発揮することから高い防食性能を期待できる<sup>6)</sup>。しかし、コンクリート中における防食性能に関するデータは不足しており、コンクリート中に含有する塩化物イオン量の影響や皮膜に損傷を受けた場合の犠

牲防食効果、EP鉄筋等の既存防食鉄筋に対する優位性は不明である。

そこで本研究では、Al-Mg溶射の特長である犠牲防食効果に着目し、損傷を付与したAl-Mg溶射鉄筋を塩分含有コンクリート中に埋め込んだ供試体を作製して促進腐食試験を行い、その耐腐食性能についてEP鉄筋と比較検討を行った。

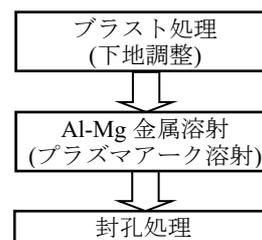
## 2. Al-Mg溶射の仕様

表-1に本実験で使用した溶射および封孔処理の仕様を示す。溶射に用いる金属には、アルミニウム(95%)・マグネシウム(5%)の合金を使用し、溶射方法はプラズマアーク溶射とした<sup>6)</sup>。

図-1にAl-Mg溶射鉄筋の溶射工程を示す。溶射の施工においては、母材素地と溶射材料の密着力を確保する必要があり、素地調整の良否が防食性能に大きく影響する。そこで金属溶射の素地調整では、JIS H 8300「亜鉛・アルミニウム及びそれらの合金溶射」に準拠して、鋼材表面の除錆度として最高品位であるISO Sa3を確保した。また表面粗さは、母材と溶射皮膜間で十分な密着力を得るために、Ra(算術平均粗さ)  $\geq 8.0 \mu\text{m}$  以上、Rz(最大粗さ)  $\geq 50 \mu\text{m}$  をAl-Mg溶射用の素地調整の管理値として設定した<sup>7)</sup>。その後、専用の溶射ガンを用いて

表-1 Al-Mg溶射の仕様

要因	仕様
溶射金属	アルミニウム(95%)・マグネシウム(5%)合金
溶射皮膜厚	180±40 $\mu\text{m}$
溶射方法	プラズマアーク溶射
封孔処理	エポキシ樹脂系封孔剤(塗布量: 160g/m <sup>2</sup> )



溶射ガン

図-1 Al-Mg溶射鉄筋の製造工程

表-2 使用した鉄筋の種類

鉄筋の種類		外観
普通鉄筋	N	
Al-Mg 溶射	Al-Mg(傷なし)	
	Al-Mg(傷 φ 1mm)	
	Al-Mg(傷 φ 3mm)	
	Al-Mg(傷 φ 5mm)	
EP 鉄筋	EP(傷なし)	
	EP(傷 φ 1mm)	
	EP(傷 φ 3mm)	
	EP(傷 φ 5mm)	

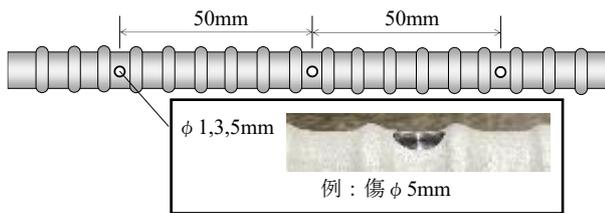


図-2 鉄筋の皮膜損傷状況

所定の厚みで Al-Mg 溶射を施し、最後に封孔処理を行った。

封孔処理とは、一般に溶射皮膜の開口気孔に塗料などを浸透させて気孔を充填し、溶射皮膜の化学的性質および物理的性質を安定化させるために施される処理である。本研究のようにコンクリート用の補強鉄筋への使用を考える場合には、溶射合金の主体となるアルミニウムをコンクリートのアルカリ環境下から保護する役割も果たす。そこで封孔処理は、既報告を参考に耐アルカリ型のエポキシ樹脂系封孔剤を  $160\text{g/m}^2$  塗布する仕様とした<sup>4)</sup>。

### 3. 実験概要

本研究では、コンクリート中における損傷を付与した Al-Mg 溶射鉄筋の耐腐食性能を把握することを目的として、JCI-SC3「塩分を含んだコンクリート中における補強用棒鋼の促進腐食試験方法-乾湿繰返し法-」<sup>8)</sup>に準拠した実験を行った。

試験に用いた鉄筋の種類を表-2に示す。コンクリート中に埋設する鉄筋の母材には D13(SD345)のものを使用し、健全な Al-Mg 溶射鉄筋に加えて、溶射皮膜の一部を人為的に損傷させた鉄筋を用いた。損傷部は、図-2に示すように、全長 210mm の鉄筋中央部とその中央部から 50mm 離れた箇所計 3 点で皮膜に傷をつけ、鉄筋素地を露出させている。傷の大きさは、直径  $\phi 1, 3, 5\text{mm}$  の 3 種類とした。また、比較対象とした EP 鉄筋についても健全なものに加えて、Al-Mg 溶射鉄筋と同様の水準で皮膜損傷を付与した。

試験体の概略を図-3に示す。試験は、JCI-SC3に準拠し、 $\phi 100 \times 200\text{mm}$  の円柱コンクリート供試体中に試験対象とした鉄筋をかぶり径 20mm となる位置に 2 本ずつ配筋した。なお、損傷を付与した鉄筋については、かぶり

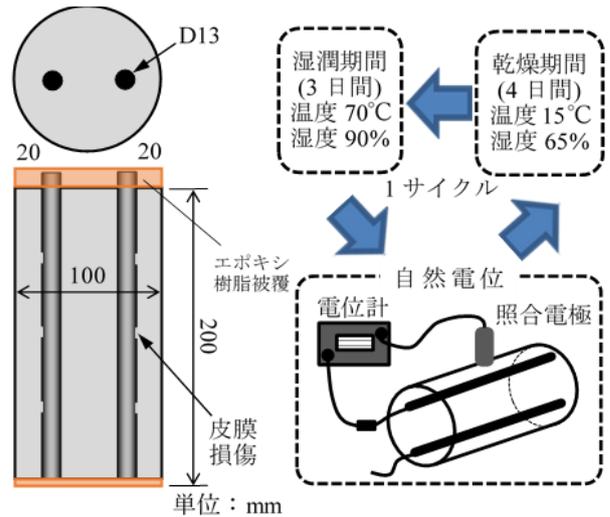


図-3 促進腐食試験概要

り側に損傷部が向くように配置した。

コンクリートの使用材料は、セメントに普通ポルトランドセメント(密度： $3.16\text{g/cm}^3$ )、細骨材に常呂川産陸砂(表乾密度： $2.58\text{g/cm}^3$ )、粗骨材に北見産砕石(表乾密度： $2.89\text{g/cm}^3$ 、最大寸法： $20\text{mm}$ )、混和剤として AE 剤(天然樹脂酸塩)を用いた。コンクリートの水セメント比は 65%とし、目標スランブは  $10 \pm 2.5\text{cm}$ 、目標空気量は  $4.5 \pm 1\%$ とした。厳しい塩分環境下に曝されたコンクリート構造物を想定し、コンクリートの塩化物イオン含有量は  $12\text{kg/m}^3$  となるように、NaCl(一般試薬)を用いて調整した。供試体は、打込み後材齢 2 日で脱型し、材齢 28 日まで  $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 、 $85 \pm 5\%RH$  の恒温恒湿室内にて封緘養生した後に促進腐食試験を開始した。

促進腐食試験は、湿潤期間(温度  $70^\circ\text{C}$ 、相対湿度 90%)が 3 日間、乾燥期間(温度  $15^\circ\text{C}$ 、相対湿度 65%)が 4 日間を 1 サイクルとする乾湿繰返しを 10 サイクルまで行った。1 サイクル終了毎に、鉄筋の自然電位およびクラックスケールを用いてコンクリートのひび割れ幅を測定した。鉄筋の自然電位は、各鉄筋の最小かぶり(20mm)位置に照合電極を設置し測定した。照合電極には、飽和銀/塩化銀電極(vs Ag/AgCl)を用い、測定値は飽和硫酸銅電極電位(vs CSE)に換算した。また、10 サイクル終了時点で供試体を解体し、鉄筋を取り出し腐食状況を観察した。

### 4. 実験結果および考察

#### 4.1 自然電位

図-4に10サイクルまでの自然電位の経時変化を示す。普通鉄筋 N の自然電位をみると、乾湿繰返しサイクル初期から  $-500\text{mV CSE}$  という非常に卑な電位を示し、2 サイクル終了時点でコンクリート供試体のかぶり面に鉄筋に沿ったひび割れが発生しており、この段階でコンクリート中の鉄筋は腐食しているものと考えられる。その後、3 サイクル目以降は電位が貴な方向に急激に変化する傾向を示した。これは、鉄筋の腐食によって生成される錆の影響によるものと考えられる<sup>9)</sup>。すなわち、コンクリ

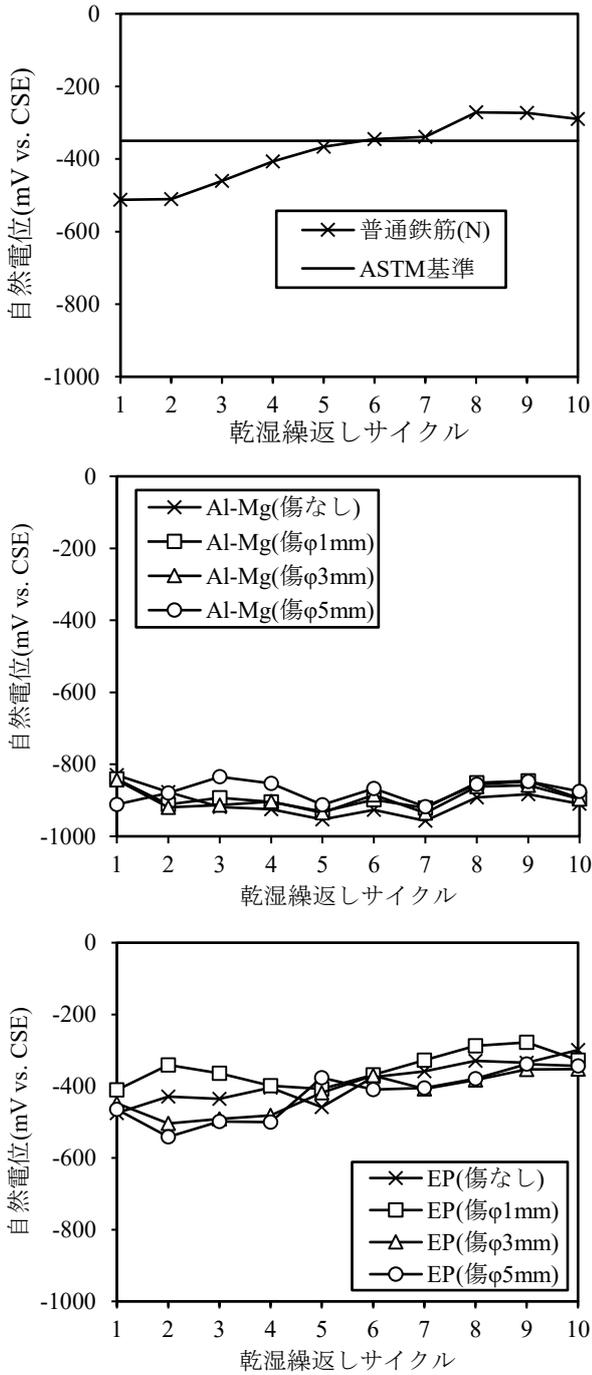


図-4 自然電位の経時変化

ート中に含有する塩化物イオンの作用により不動態皮膜が破壊され、溶出した鉄イオンは溶存酸素と結合し酸化鉄となり、鉄筋表面に付着し錆層を形成し緻密化するため、鉄イオンの溶出を阻害することによるものと推察される。

次に Al-Mg 溶射鉄筋の自然電位をみると、損傷の有無や大きさに関わらず概ね-800~-950mV CSE 程度を推移しており、乾湿繰返しサイクルに伴う特徴的な挙動は認められなかった。なお、Al-Mg 溶射鉄筋の電位は、普通鉄筋よりも卑な電位を示しているが、これは鉄筋表面に施した Al-Mg 溶射皮膜の電位を示していると推察される

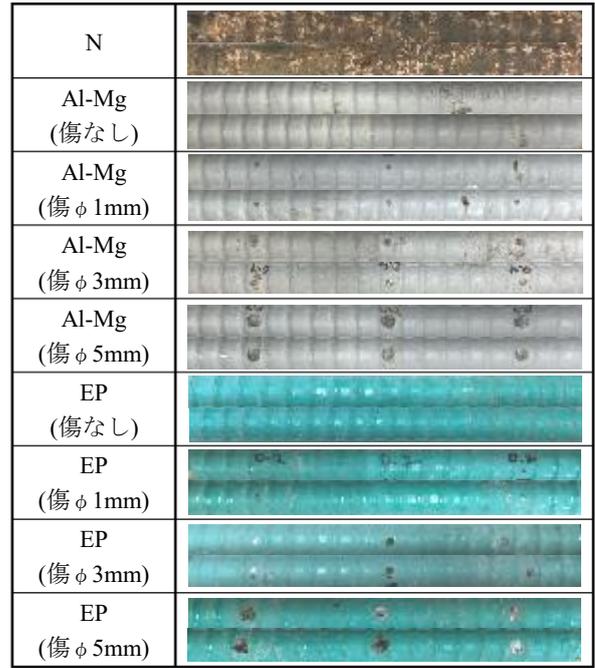


写真-1 鉄筋の腐食状況

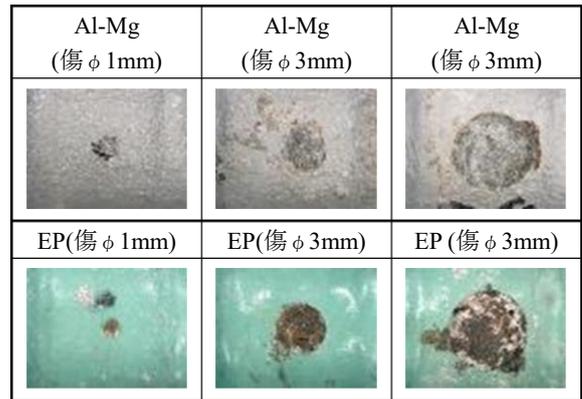


写真-2 損傷部の腐食状況

4). 一方、EP 鉄筋の自然電位をみると、Al-Mg 溶射鉄筋と同じく、損傷の有無や大きさによる明確な傾向は確認されず、概ね-250~-550mV CSE 程度を推移した。

#### 4.2 鉄筋の腐食状況

写真-1 に 10 サイクル終了後コンクリート供試体から取り出した鉄筋の腐食状況を示す。普通鉄筋 N では、全域に渡って腐食が観察された。これに対して損傷を付与していない Al-Mg 溶射鉄筋(Al-Mg)および EP 鉄筋(EP)では、鉄素地の腐食は確認されなかった。一方で損傷を付与した場合、EP 鉄筋では、損傷を付与して鉄素地を露出させた部分で腐食が確認された。

写真-2 に損傷を付与した鉄筋の一例を拡大して示す。EP 鉄筋では、鉄素地を露出させた部分に腐食が観察されるとともに、部分的には損傷部周辺にもエポキシ樹脂塗装部の膨れや鉄素地の腐食が観察された。一方で Al-Mg 溶射鉄筋では、鉄素地を露出させた部分には腐食は確認されなかった。溶射皮膜に含有する Mg は、皮膜に傷が生じたとき水分や酸素が供給されると、犠牲防食作用により Mg の化合物が傷を塞ぐ自己修復効果を発揮す



(a) Al-Mg (b) Al-Mg(傷φ3mm)

写真-3 Al-Mg 溶射皮膜の剥離状況

ることが知られており<sup>6)</sup>、その効果により高濃度の塩分を含むコンクリート中においても鉄素地に腐食を生じなかったものと推察される。今後、鉄素地の露出部やその近傍における腐食生成物に着目した元素分析を行い、Al-Mg 溶射による犠牲防食作用について詳細な検討を行う予定である。

写真-3 に Al-Mg 溶射鉄筋で確認された封孔処理剤の剥離状況を示す。本実験の範囲においては、Al-Mg 溶射鉄筋の鉄素地に腐食は観察されなかったものの、解体したコンクリート供試体から鉄筋を取り出す際に Al-Mg 溶射皮膜面に塗布したエポキシ樹脂系封孔剤が一部剥離し、Al-Mg 溶射皮膜面が露出する箇所が観察された。この原因は現時点において不明であるが、原因の一つとして封孔剤の塗布量が考えられる。本実験では、コンクリートのアルカリ環境下での使用を想定して既報告<sup>4)</sup>を参考に耐アルカリ型のエポキシ樹脂系封孔剤を  $160\text{g/m}^2$  塗布した。しかし、本実験で用いた異形鉄筋の場合、リブやふしの影響を受け、封孔剤の塗布量が部分的にばらついていいる可能性がある。今後、封孔剤の塗布方法や塗布量についてもより詳細な検討が必要である。

## 5. まとめ

本研究では、Al-Mg 溶射の特長である犠牲防食効果に着目し、損傷を付与した Al-Mg 溶射鉄筋を塩分含有コンクリート中に埋め込んだ供試体を作製して促進腐食試験を行い、その耐腐食性能について EP 鉄筋と比較検討を行った。損傷を付与した場合、EP 鉄筋では損傷を付与して鉄素地を露出させた部分で腐食が確認されたのに対して、Al-Mg 溶射鉄筋では鉄素地を露出させた部分には腐食は確認されなかった。これは Al-Mg 溶射皮膜の犠牲防食作用によるものと推察される。

## 謝辞

Al-Mg プラズマアーク合金溶射にあたっては、(株)川金コアテック札幌工場にお世話になりました。ここに記して、感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 土木学会：エポキシ樹脂塗装鉄筋を用いる鉄筋コンクリートの設計施工指針(改訂版)，コンクリートライブラリー112，2013.3
- 2) 村山康雄，大城壮司，松井隆行，小島裕貴，中村聖三：Al-Mg 合金溶射された部材の Al-Mg 溶射ボルトによる継手のすべり係数，土木学会年次学術講演会講演概要集，Vol.69，I-079，2014.8
- 3) 元井邦彦，大城壮司，松井隆行，藤川圭介，貝沼重信：Al-Mg 合金溶射された部材の Al-Mg 溶射ボルトによる継手の疲労耐久性に関する実験的検討，土木学会年次学術講演会講演概要集，Vol.69，I-080，2014.8
- 4) 井上真澄，崔希燮，広野邦彦，杵本正信：コンクリート中における Al-Mg 合金溶射鉄筋の耐食性と付着特性に関する検討，セメント・コンクリート論文集，Vol.73，pp.272-278，2020.3
- 5) 高橋刀宇真，井上真澄，崔希燮，広野邦彦，杵本正信：Al-Mg 溶射鉄筋を用いた RC 部材の力学的特性，土木学会北海道支部論文報告集，Vol.77，E-10，2021.2
- 6) 西日本高速道路株式会社：アルミニウム・マグネシウム合金溶射 設計施工管理要領，2015.7
- 7) 武藤和好，入江政信，村山康雄，福永靖雄：既設鋼橋桁端部の防食に着目した金属溶射機器の開発，土木学会年次学術講演会講演概要集，Vol.69，I-078，2014.8
- 8) 日本コンクリート工学会：塩分を含んだコンクリート中における補強用棒鋼の促進腐食試験方法-乾湿繰返し法-(JCI-SC3)，JCI 規準集，pp.99-105，2004
- 9) 仁平達也，井原啓知，関博：中性化および乾湿繰返しを受けるコンクリート中の鉄筋腐食について，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp.815-820，2003