

Al-Mg 溶射鉄筋のコンクリートとの付着特性に関する基礎的研究

Fundamental study on bond characteristic between Al-Mg metal spraying reinforcement and concrete

北見工業大学 工学部 社会環境工学科 ○学生員 木下裕一朗 (Yuichiro Kinoshita)  
北見工業大学 工学部 社会環境工学科 正 員 井上真澄 (Masumi Inoue)  
北見工業大学 工学部 社会環境工学科 正 員 崔 希燮 (Choi Heesup)  
北見工業大学 工学部 社会環境工学科 正 員 岡田包儀 (Kaneyoshi Okada)  
株式会社 フジエンジニアリング 正 員 松本正信 (Masanobu Sugimoto)

1. はじめに

飛来塩分環境下や凍結防止剤が散布されるような極めて激しい腐食環境下にあるコンクリート構造物の劣化対策としては、長期間の供用に耐えられるような防食法の適用が有効である。このような塩害を受ける環境にコンクリート構造物を建設する場合に最も確実な方法は、錆びない、あるいは錆びにくい補強材を使用する方法である。代表的な補強材としては、エポキシ樹脂塗装鉄筋やステンレス鉄筋、熔融亜鉛めっき鉄筋が挙げられる<sup>1,2,3)</sup>。いずれも各種学会において設計、施工に関する技術が規準化されており、実用化への取り組みが進められている。一方で、予防保全を目的に、長期的維持管理やライフサイクルコスト(LCC)およびミニマムメンテナンスの観点から長期防食性に優れる金属溶射を用いた新しい防食技術(Al-Mg プラズマアーク溶射)が研究開発されている<sup>4)</sup>。Al-Mg プラズマアーク溶射は、優れた防食性能と高い密着性、ヒューム(金属の粉塵)の発生が少なく作業性も高い溶射工法とされており、現在高架道路構造物桁端部の伸縮装置や支承、高力ボルトなどへ普及が図られている。金属溶射の供試体レベルでの耐久性確認試験では、熔融亜鉛めっき仕様に比べて Al-Mg 溶射仕様は約 6 倍程度の防錆・防食性能を有することが示されている<sup>4)</sup>。今後、Al-Mg 溶射は、優れた防錆・防食技術の一つとしてコンクリート構造物の長寿命化に大いに資すると考えられる。

そこで本研究では、Al-Mg 溶射を施した鉄筋のコンクリート構造物材への適用性に関する基礎的データを得ることを目的として、コンクリートとの付着特性について実験的に検討した。

2. Al-Mg を用いたプラズマアーク溶射技術

金属溶射は、鋼の主成分である鉄の自然電位より卑な金属として、アルミニウム、亜鉛・アルミニウム合金および亜鉛・アルミニウム擬合金、アルミニウム・マグネシウム合金等を用い、熔融状の微粒子として吹き付けて鋼材表面に溶射被膜を形成し腐食原因となる物質を遮断(環境遮断性)することで鋼材を保護する防食性を有する。また、環境を遮断する他、傷等が生じて母材(鋼材)が露出し、この部分に水分が付着すると溶射被膜が溶解して母材の腐食を防ぐ犠牲防食作用(電気化学的防食性)もその特徴である。

電気化学的防食作用と環境遮断性は、金属の種類によって異なり、一般に亜鉛、アルミニウム、亜鉛・アルミ

ニウム、アルミニウム・マグネシウム合金など様々な金属溶射が存在するが、本研究ではその中で最も耐久性を有するとされているアルミニウム(95%)・マグネシウム(5%)合金を用いたプラズマアーク溶射(以下、Al-Mg 溶射)を用いる。この合金の特徴的な防食性能は、溶射皮膜に傷が生じたときの自己修復機能であり、傷の部分に水が供給されると、この部分に局部電池が形成され、水は局部的に強アルカリ性となる。亜鉛やアルミニウムはこの強アルカリ水に溶解するが、マグネシウムは化合物となって析出して再び鋼材表面を強固に被覆することから、傷が生じる以前のような環境遮断作用に回復できることになる<sup>4)</sup>。

3. 実験概要

鉄筋コンクリートは、鉄筋とコンクリートが一体となり、互いに力を伝達しあいながら荷重に抵抗するという複合材料である。したがって、構成材料そのものの力学的性質と同時に、鉄筋とコンクリートの間で行われている相互の力の伝達機構、すなわち付着の性質は非常に重要である。本研究では、Al-Mg 溶射鉄筋とコンクリートとの付着特性を確認するために、土木学会規準「樹脂被膜鉄筋の付着強度試験方法(JSCE-E-516-2010)」に準拠した付着強度試験を行い、無処理鉄筋との比較検討を行った。

3.1 Al-Mg 溶射鉄筋

表-1 に本実験で使用した Al-Mg 溶射鉄筋の仕様を示す。母材となる異形鉄筋には、D19(SD345)のものをを使用した。写真-1 に使用した鉄筋の外観を示す。封孔処理とは、溶射皮膜の開口気孔に封孔剤を浸透させて気孔を充填し、皮膜の化学的性質および物理的性質を改善する処理である。また、コンクリートのアルカリ環境下においてアルミニウムを保護する役割も果たす。

表-2 に鉄筋の引張試験結果を示す。降伏点、引張強さおよび伸び率ともに溶射の有無による差異は観察されなかった。

表-1 溶射の仕様

|      |                              |
|------|------------------------------|
| 溶射金属 | アルミニウム(95%)・<br>マグネシウム(5%)合金 |
| 皮膜厚さ | 100～300 μm                   |
| 溶射方法 | プラズマアーク 金属溶射(TAPS 溶射)        |
| 封孔処理 | 有(基本仕様)                      |



(左：無処理鉄筋 右：溶射鉄筋)  
写真-1 鉄筋の外観

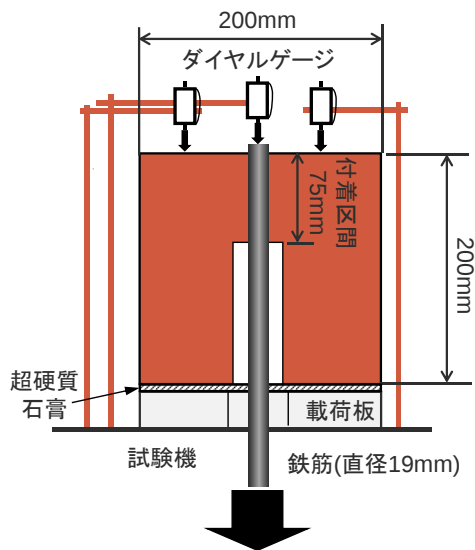


図-1 実験概要

### 3.2 供試体概要

図-1 に供試体概要を示す。「樹脂被膜鉄筋の付着強度試験方法(JSCE-E-516-2010)」では、D19の被覆鉄筋に対して一辺の長さ15cmの立方体コンクリート供試体の使用を標準として規定されている。予備実験において、規定サイズを用いて自由端側に付着区間75mmを設けた供試体を作製し、引抜き試験を実施したところ、コンクリートに割裂ひび割れが発生するなどして、正確な最大付着応力度を得ることができなかった。そこで、本研究では、コンクリート供試体のサイズを変更し、1辺の長さ20cmの立方体コンクリート供試体を用いた試験を実施することとした。付着長は、規定どおり75mmとした。

表-1 にコンクリートの配合を示す。セメントには、早強ポルトランドセメント(密度:  $3.14\text{g/cm}^3$ )を、細骨材には幕別川産陸砂(表乾密度:  $2.61\text{g/cm}^3$ )、粗骨材には北見産碎石(表乾密度:  $2.84\text{g/cm}^3$ 、M.S.=20mm)を用いた。目標スランプは  $8.0 \pm 2.5\text{cm}$ 、試験時の目標圧縮強度を  $30.0 \pm 3.0\text{N/mm}^2$  として配合を決定した。なお、試験材齢での圧縮強度は、 $30.9\text{N/mm}^2$  であった。

コンクリートの打込みにおいては、コンクリートとの付着区間の鉄筋表面を清掃し、油類、汚れなどを取り除

表-2 鉄筋の引張試験結果

| 異形棒鋼 | 降伏点<br>( $\text{N/mm}^2$ ) | 引張強さ<br>( $\text{N/mm}^2$ ) | 伸び(%) |
|------|----------------------------|-----------------------------|-------|
| 無処理  | 377                        | 578                         | 24.1  |
| 溶射   | 379                        | 577                         | 23.2  |

表-3 コンクリートの配合

| W/C<br>(%) | s/a<br>(%) | 単位量( $\text{kg/m}^3$ ) |     |     |      | AE 剤<br>( $\text{C} \times \%$ ) |
|------------|------------|------------------------|-----|-----|------|----------------------------------|
|            |            | W                      | C   | S   | G    |                                  |
| 58         | 44         | 197                    | 340 | 762 | 1071 | 0.028                            |

いた。また、正確な鉄筋の付着長を確保するために、付着長以外の鉄筋部分にはコンクリートとの付着を絶つための軟質ビニール管で被覆し、鉄筋が載荷面に対して垂直となるように型枠内に固定した。コンクリート打設後、2日後に脱型し、その後材齢7日まで  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  の水中で養生した。養生終了後、直ちに引抜き試験を行った。なお、供試体は各要因につき3体ずつ作製した。

### 3.3 試験方法

荷重は、鉄筋の引張応力度の増加が毎分  $50\text{N/mm}^2$  以下となる載荷速度で引抜き試験を実施した。一方、すべり量は、自由端側の鉄筋とその周辺のコンクリートにダイヤルゲージを取り付け、相対変位により測定した。

## 4. 実験結果および考察

### 4.1 最大付着応力度

図-2 に引抜き試験で得られた最大付着強度および自由端変位が  $0.002D=0.0038\text{mm}$  における付着応力の平均値を示す。鉄筋のすべり出し部分である、自由端変位が  $0.002D$  における付着応力で比較すると、溶射鉄筋の方が無処理鉄筋よりも大きいものの、最大付着応力度については溶射鉄筋の方が小さくなった。しかし、溶射鉄筋の無処理鉄筋に対する最大付着応力度の比は約92%であり、樹脂被覆鉄筋用棒鋼の品質規格(JSCE-E 103-2010)で規定された最大付着応力度比85%を上回る結果となった。したがって、本実験で使用した溶射鉄筋は、コン

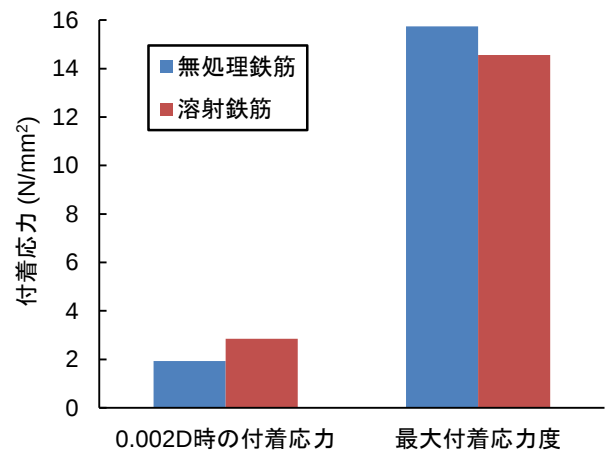


図-2 自由端変位  $0.002D$  時の付着応力および最大付着応力度

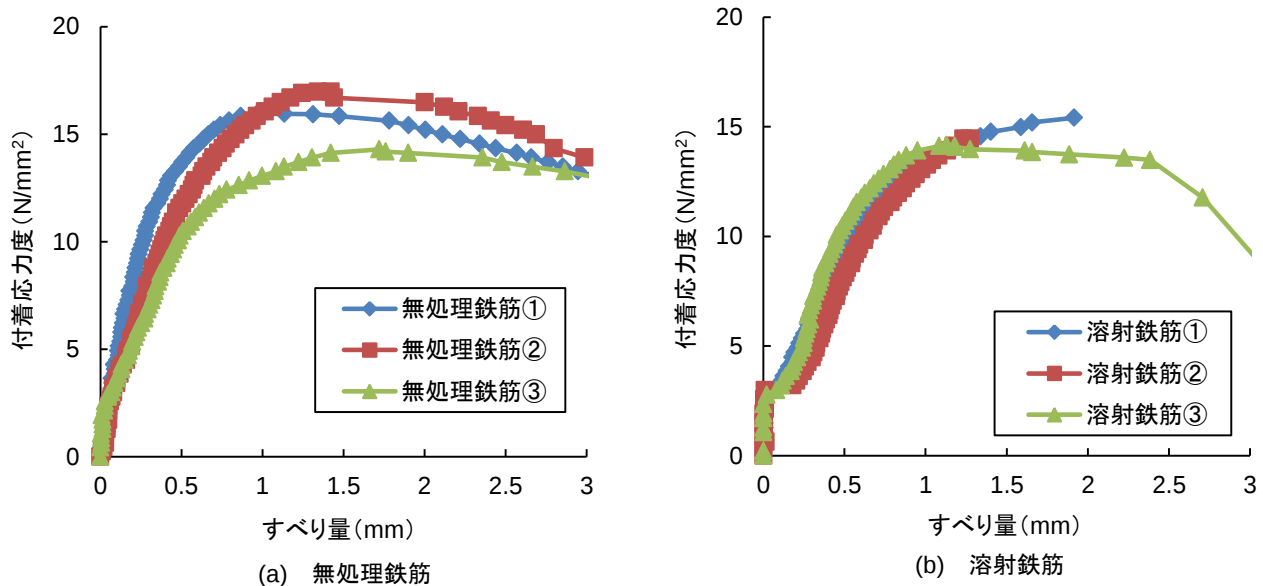


図-3 付着応力～すべり曲線

クリート用補強材として適用の可能性を有するものと考えられる。

#### 4.2 付着応力～すべり曲線

図-3 に引抜き試験の結果より得られた付着応力～すべり曲線を示す。なお、溶射鉄筋①および②では、最大付着応力度に到達後に荷重が徐々に低下したが、間もなくコンクリートに割裂ひび割れが発生したため、荷重低下後のデータが得られなかった。

図-3 より無処理鉄筋と溶射鉄筋では、鉄筋がすべり出してから挙動に差異が観察される。溶射鉄筋は、4.1 節で述べたようにすべり発生時の付着応力は無処理鉄筋よりも大きいものの、全体としては最大付着応力に到達するまでのすべり量は若干大きくなる傾向にあった。

溶射鉄筋における最大付着応力度の低下およびすべり量の増加傾向の原因の一つとして、封孔処理が挙げられる。前述したように金属溶射において封孔処理は、皮膜の化学的・物理的性質の改善に必要な処理である。既報告では、鋼材表面に金属溶射を施した場合において、封孔処理の仕様により皮膜表面粗さが変化し、鋼材間の摩擦接合継手のすべり係数が低下することが報告されている<sup>5)</sup>。また、本実験では引抜き試験に先立ち、鉄筋の引張試験を実施したが、降伏点以降に伸びが増大し始めると、溶射鉄筋表面の封孔処理膜が剥がれることを確認した。この封孔処理膜と溶射鉄筋間の付着性状も引抜き試験結果に影響しているものと考えられる。

これらのことを踏まえると、本実験で使用した溶射鉄筋の付着性能の低下は、封孔処理の影響が大きいものと推察され、今後溶射鉄筋の付着性能の改善に向けて、封孔処理の仕様(封孔剤の種類、皮膜厚さなど)について詳細な検討を行う必要がある。

#### 5. まとめ

本研究では、Al-Mg 溶射を施した鉄筋のコンクリート構造部材への適用性に関する基礎的データを得ることを

目的として、コンクリートとの付着特性について実験的に検討した。以下に、本実験の範囲において得られた知見をまとめる。

- 1) 溶射鉄筋の無処理鉄筋に対する最大付着応力度の比は約 92%であり、樹脂被覆鉄筋用棒鋼の品質規格(JSCE-E 103-2010)で規定された最大付着応力度比 85%を上回る結果となった。
- 2) 溶射鉄筋の最大付着応力度の低下やすべり量の増加は、封孔処理の影響が大きいものと考えられ、付着性能の改善には封孔処理の仕様について詳細な検討が必要である。

#### 謝辞

Al-Mg プラズマアーク金属溶射(TAPS 溶射)にあたっては、株式会社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) 日本建築学会編：「亜鉛めっき鉄筋を用いた鉄筋コンクリート造の設計施工指針(案)」、1979
- 2) 土木学会編：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
- 3) 土木学会編：ステンレス鉄筋を用いるコンクリート構造物の設計施工指針(案)、コンクリートライブラリー130、2014.1
- 4) 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《保全編(桁端部)》、pp.4-9、2015.7
- 5) 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、土木学会第 70 回年次学術講演会講演概要集、I-079、2014.8