耐アルカリ型 AI-Mg 溶射鉄筋を用いたコンクリート部材の耐食性と力学性状

Corrosion resistance and mechanical properties of concrete member using Al-Mg metal spraying reinforcement

北見工業大学工学部社会環境工学科	○学生員	伊井龍斗 (Ryuto li)
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 西日本イノベーションズ株式会社	正 員	広野邦彦 (Kunihiko Hirono)
NEXCO 西日本イノベーションズ株式会社	正 員	杦本正信 (Masanobu Sugimoto)

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物は、一般に優れた耐久性を有 する構造であり、適切に維持管理することにより長期間 供用することができる。一方で、コンクリートが早期に 劣化する事例も多数報告されており、その中でも塩害に よる鉄筋腐食は深刻な劣化現象の一つとして認識されて きた。その対策としては、かぶりを大きくする方法や水 セメント比を小さくして塩化物イオンの拡散係数を低減 する方法などが考えられる。しかし、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 ような極めて厳しい腐食環境下にあるコンクリート構造 物に対しては、上記のような対策だけでは不十分であり、 より積極的な鉄筋防食方法の適用が必要とされる。

その対策には防食鉄筋の使用が有効であり、代表的な ものとしては、エポキシ樹脂塗装鉄筋やステンレス鉄筋、 溶融亜鉛めっき鉄筋が挙げられる^{1,2,3}。いずれも土木 学会において設計および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、予防保全を目的として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^{4),5),6)}。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 おり、今後優れた防錆・防食技術の一つとして構造物の 長寿命化への貢献が期待されている。Al-Mg 溶射は、工 場施工のほか、現場での施工も可能であることから、コ ンクリート構造の補強材である鉄筋にも適用可能と考え られるが、コンクリート中における Al-Mg 溶射を施した 鉄筋の防食効果やコンクリート用補強材として用いた場 合の力学的特性は不明である。

本研究は、厳しい腐食環境下に曝されるコンクリート 構造物の耐久性向上に寄与する防食鉄筋の一つとして Al-Mg 溶射を施した鉄筋に着目し、コンクリート用補強 材への適用性を明らかにすることを目的としている。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影響を及ぼす ことを報告してきた ⁷。これは、コンクリートのアルカ リ環境下において溶射合金の主体であるアルミニウムが 浸食を受けるためであり、Al-Mg 溶射鉄筋をコンクリー ト中で使用するには耐アルカリ性を有する封孔剤による 溶射皮膜の保護が必要と考えられる。

そこで本研究では、耐アルカリ性を有するエポキシ樹 脂系封孔剤を施したAl-Mg溶射鉄筋のコンクリート用補 強材としての適用可能性を明らかにするため、Al-Mg溶 射鉄筋のコンクリート中における耐食性とともに、コン クリート部材に用いた場合の力学性状を把握するため RC はりの静的曲げ載荷試験を行った。また、載荷試験 に先がけ、使用するAl-Mg溶射鉄筋の付着特性を把握す るため、鉄筋の引抜き試験も同時に行った。

2. コンクリート中における耐食性

2.1 実験概要

本実験では、耐アルカリ型Al-Mg溶射鉄筋のコンクリ ート中における耐食性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-」に準拠した実 験を行った。

2.2 実験方法

Al-Mg 溶射の仕様を表-1に、本実験で使用した鉄筋を 表-2 に示す。耐アルカリ性を有するエポキシ樹脂系封 孔剤は、既報告^ηを参考に1種類選定した。その塗布量 は、メーカー推奨の標準塗布量(160g/m²)および既報告⁸⁾ を参考に2水準(80、160g/m²)設定するとともに、封孔処 理を施さない溶射鉄筋と普通鉄筋を含めて計4種類の鉄 筋を使用した。母材には、丸鋼 φ13(SR235)を使用した。

図-1 に促進腐食試験の概要を示す。試験は、JCI-SC3 に準拠し、φ100×200mmの円柱コンクリート供試体中 にAl-Mg溶射を施した丸鋼をかぶりが20mmとなる位置 に2本配置した。

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:3.16g/cm³)、細骨材に幕別川産陸砂 (表乾密度:2.61 g/cm³)、粗骨材に北見産砕石(表乾密 度:2.84 g/cm³、最大寸法:20mm)、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 66%とし、目標スランプは 10±2.5cm、目標空気量は 4.5±1%とした。コンクリートの塩化物イオン含有量は、 1.2kg/m³ および 12kg/m³ 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±1℃、85±5%RH の恒温恒湿室内 にて封緘養生した。

促進腐食試験は、湿潤期間(温度 70℃、相対湿度 90%) が3日間、乾燥期間(温度 15℃、相対湿度 65%)が4日間

表-1 Al-Mg 溶射の仕様

金属溶射	アルミニウム(95%)・マグネシウム(5%)合金
皮膜厚さ	$180\pm40\mu m$
溶射方法	プラズマアーク金属溶射(TAPS 溶射) ⁴⁾

表-2 促進腐食試験に用いた溶射鉄筋

略号	Al-Mg 溶射	封孔処理	封孔剤塗布量
Ν	—	_	—
MS0	0	_	_
MS80	0	0	80g/m ²
MS160	0	0	160g/m ²





注)*: Al-Mg 溶射皮膜が全域に渡って損傷 **: Al-Mg 溶射皮膜が部分的に損傷

図-2 鉄筋腐食状況(20 サイクル終了後)

を1サイクルとする乾湿繰返しを20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。また、20サイクル終 了時点で供試体を解体し、鉄筋を取り出した。その後、 鉄筋表面に生じた発錆の状況を透明シートに複写し、錆 の部分を黒く塗りつぶしたシートをスキャナで読み込み、 画像処理により腐食(発錆)面積の測定を行った。

2.3 実験結果および考察

図-2 に 20 サイクル終了時点における鉄筋の腐食状況 および腐食面積率を示す。普通鉄筋では、いずれの塩化 物イオン含有量においても試験片全域に渡って腐食が観 察された。また、封孔処理を施していない溶射鉄筋 MS0 では、塩化物イオン含有量 12kg/m³の場合に全域に 渡って腐食が観察された。MS0 は、溶射皮膜を保護す る封孔処理を施していないため、セメント水和生成物で ある水酸化カルシウムと溶射皮膜の主成分であるアルミ ニウムが液相反応により水素を発生し、溶射皮膜が浸食 を受けたことによると考えられる。したがって、コンク リート中ではAI-Mg溶射皮膜を保護する適切な封孔処理 が必要であると考えられる。

一方、耐アルカリ性を有するエポキシ樹脂系封孔剤を 塗布した溶射鉄筋 MS80 と MS160 では、鉄筋腐食は確 認されなかった。しかし、MS80 では、部分的な Al-Mg 溶射皮膜の剥がれを確認した。これに対して MS160 で は、封孔剤表面での変状や溶射皮膜の剥がれ等は全く確認されず、良好な耐食性を有することを確認した。

この封孔処理層は、コンクリート打込み後の液相条件 下においてAI-Mg溶射皮膜を保護する役割を果たすとと もに、硬化後のコンクリート中においても鉄筋腐食に寄 与するものと考えられる。また、塩化物イオン等の劣化 因子の作用に対しては、封孔処理層に加えてAI-Mg溶射 皮膜が有する防錆・防食効果⁸が重層的に機能するもの と考えており、今後海洋環境下における曝露実験を実施 し長期的な耐食性を検証する予定である。

3. コンクリートとの付着性

3.1 実験概要

本実験では、耐アルカリ性を有するエポキシ樹脂系封 孔剤を塗布した Al-Mg 溶射鉄筋のコンクリートとの付着 性を検討した。付着性の評価は、土木学会規準「引抜き 試験による鉄筋とコンクリートとの付着強度試験方法 (案)(JSCE-E-503-2013)」に準拠した実験により行った。

3.2 実験方法

表-3 に実験に用いた鉄筋の仕様を示す。促進腐食試 験の結果を踏まえて、良好な耐腐食性が得られた MS160 に加えて、耐アルカリ性に対する安全性を考慮 し封孔剤を200g/m³とした MS200を使用し、普通鉄筋 N と比較した。母材となる異形鉄筋には、D13(SD345)の ものを使用した。封孔剤には、前述した耐食性試験と同 じく耐アルカリ性を有するエポキシ樹脂系塗料を用いた。

略号	Al-Mg 溶射	封孔剤 (塗布量)	外観状況		
Ν	_	_			
MS160	0	○(160g/m ²)			
MS200	0	○(200g/m ²)			





図-4 付着応力~すべり曲線

図-3 に引抜き試験の概要を示す。コンクリート立方 体供試体の一辺の長さは 150mm とした。鉄筋とコンク リートの付着区間は自由端側に設け、その長さは鉄筋 (D13)の直径(D)の4倍(4D=52mm)とした。

コンクリートの使用材料は、2章で用いたものと同様 である。試験時の目標圧縮強度を 30.0±3.0N/mm² とし て配合設計を行い、水セメント比は65%とした。目標ス ランプは 10±2.5cm、目標空気量は 4.5±1%とした。コ ンクリート打込み後、材齢2日で脱型し、その後材齢28 日まで 20±2℃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。

荷重は、鉄筋の引張応力度の増加が毎分 50N/mm² 以 下となる載荷速度で引抜き試験を実施した。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。

3.3 実験結果および考察

図-4 に引抜き試験で得られた付着応力~すべり曲線 を示す。図中の各曲線は、各3体を平均化したものであ る。また、この結果に基づき、最大付着応力度を整理し たものを図-5 に示す。付着応力~すべり曲線より、エ ポキシ樹脂系封孔剤を塗布した溶射鉄筋 MS160 と MS200 は、普通鉄筋 N と比較すると載荷初期からのす べり量が若干大きい傾向を示した。しかし、最大付着応 力度は、両溶射鉄筋ともに普通鉄筋Nよりも大きくなっ ており、コンクリートとの良好な付着性が確認された。



図-3 引抜き試験概要



4. RC はりの静的曲げ載荷試験

4.1 実験概要

本実験では、Al-Mg 溶射鉄筋を用いたコンクリート部 材の基礎的な力学性状を把握することを目的として、 RC はりの静的曲げ載荷試験を行った。

4.2 実験方法

RC はりの補強材に用いる Al-Mg 溶射鉄筋の仕様は、 上述した試験の結果を踏まえて MS160 と MS200 を選定 し、普通鉄筋 N を用いた RC はりと比較検討した。使用 材料は、セメントに早強ポルトランドセメント(密度: 3.14g/cm³)を使用し、骨材および混和剤については 2 章 で用いたものと同様である。水セメント比は66%とした。 打込み後、材齢1日で脱型し、その後材齢7日まで20± 1℃の恒温室内で散水養生を行った。載荷試験時のコン クリートの圧縮強度は 27.1N/mm² であった。

図-6にRCはり供試体の概要および載荷方法を示す。 供試体寸法は 100×200×1500mm とし、引張鉄筋には D13(SD345、 f=360N/mm²)を2本配置した。有効高さは 170mm、引張鉄筋比は 1.49%である。また、曲げ破壊に 先行してせん断破壊が先行しないように、せん断スパン にはスターラップとして ϕ 6(SR235、 f_y =300N/mm²)を 85mm 間隔で配置した。

令和元年度 土木学会北海道支部 論文報告集 第76号





図-7 荷重と支間中央たわみの関係

静的曲げ載荷試験の載荷条件は、支点間距離 1100mm、 曲げスパン200mm、せん断スパン有効高さ比(a/d)2.25の 対称2点集中載荷とした。計測項目は、載荷荷重、支間 中央のたわみと引張鉄筋ひずみ、ひび割れ状況とした。

4.3 実験結果および考察

図-7 に荷重と支間中央たわみの関係を示す。図中に 静的曲げ載荷試験の結果も示した。ひび割れ発生荷重は いずれのケースも 17.5kN であり、降伏荷重および最大 荷重についても概ね同様な値となった。また、荷重~支 間中央たわみ曲線についても、概ね同様な傾向を示して いる。破壊は、両供試体ともに引張鉄筋降伏後、曲げス パン圧縮部コンクリートが圧壊して終局に至った。

図-8 に静的曲げ試験後の各供試体のひび割れ状況を示す。溶射の有無にかかわらず、ひび割れの発生状況に も大きな差異は認められなかった。

以上よりAl-Mg溶射鉄筋は、コンクリート部材の補強 材として適用可能性を有すると考えられる。

5. まとめ

本研究では、耐アルカリ性を有するエポキシ樹脂系封 孔剤を施した Al-Mg溶射鉄筋のコンクリート用補強材へ の適用可能性を明らかにするため、Al-Mg溶射鉄筋のコ ンクリート中における耐食性とともに、コンクリート部 材への適用可能性を検討するためコンクリートとの付着 性および RC はりの基礎的な力学性状について実験を行 った。本実験の範囲で得られた知見を以下にまとめる。

 耐アルカリ性を有するエポキシ樹脂系封孔剤を適量 塗布することで高濃度の塩分を含有するコンクリー ト中において良好な耐食性が得られた。



- 鉄筋の引抜き試験より、エポキシ樹脂系封孔剤を施 した Al-Mg 溶射鉄筋はコンクリートとの良好な付着 性を有することを確認した。
- Al-Mg 溶射鉄筋を用いた RC はりの曲げ性状は、無 溶射の普通鉄筋を使用した場合と比較してほとんど 差異は見られなかった。

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) 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) 土木学会: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 -130、2014.1
- 3) 土木学会:亜鉛めっき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 -154、2019.3
- 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≪新設橋・溶射ボルト編≫、pp.1-6、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、土木学会年次学術講演会 講演概要集、Vol.69、I-079、2014.8
- 6) 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
- 7) 柴田大輝、井上真澄、崔 希燮、広野邦彦、杦本正 信:Al-Mg 溶射鉄筋のコンクリート部材への適用性 に関する基礎的研究:土木学会北海道支部論文報告 集、Vol.75、E-12、2018
- 村山康雄、元井邦彦、福永靖雄:道路構造物への金 属溶射を適用するための基礎耐久性試験、鋼構造年 次論文報告集、Vol.22、pp.496-503、2014.11