

封孔処理が Al-Mg 溶射鉄筋のコンクリートとの付着性に及ぼす影響

Influence of sealing treatment of Al-Mg spraying reinforcement on bond strength in concrete

北見工業大学工学部社会環境工学科	○学生員	天野雄介 (Yusuke Amano)
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 (Heesup Choi)
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)フジエンジニアリング	正員	広野邦彦 (Kunihiko Hirono)
(株)フジエンジニアリング	正員	杵本正信 (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、溶融亜鉛めっき鉄筋が挙げられる^{1,2,3)}。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⁴⁾。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、溶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⁴⁾。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も大いに資する技術になると考えられる。

木下らは、Al-Mg 溶射を施した鉄筋の付着強度試験結果より、無処理鉄筋に対する最大付着応力度の比は約 92%であること、Al-Mg 溶射鉄筋のすべり量が大きいことを報告しており、この要因として封孔処理の影響を指摘している⁵⁾。封孔処理とは、一般に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ために施されるものであり、コンクリートのアルカリ環境下ではアルミニウムを保護する役割も果たす。一方で、鋼材表面に溶射を施した場合には、封孔処理の仕様により皮膜表面粗さに変化し、鋼材間の摩擦接合継手のすべり係数が低下することも報告されており⁶⁾、コンクリートとの付着性状の改善のためには、封孔処理の仕様について詳細な検討が必要であると考えられる。

本研究では、Al-Mg 溶射鉄筋の付着性状の改善を目的として、封孔処理の有無や封孔剤の種類および塗布量が

Al-Mg 溶射鉄筋のコンクリートとの付着特性に及ぼす影響について実験的に検討を行った。

2. 実験概要

本研究では、封孔処理の有無や封孔剤の種類および塗布量が Al-Mg 溶射鉄筋のコンクリートとの付着特性に及ぼす影響を明らかにするために、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、実験を行った。

2.1 実験に用いた溶射鉄筋

表-1 に本実験で使用した Al-Mg 溶射の仕様を示す。本研究ではアルミニウム(95%)・マグネシウム(5%)合金を用いたプラズマアーク溶射にて鉄筋を被覆した。これに溶射皮膜の物理化学的性質の改善とコンクリートのアルカリ環境下にてアルミニウムを保護する役割を担う封孔処理を施した。

表-2 に実験で使用した鉄筋と封孔処理の仕様を示す。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、塩化マグネシウム水溶液を用いた水性封孔(MS-1)と現在溶射ボルトなどで汎用されている仕様として無機有機複合樹脂封孔(MS-2,3)を使用した。無機有機複合樹脂については、既報告⁵⁾にも使用(塗布量 250

表-1 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	100~300 μm
溶射方法	プラズマアーク金属溶射(TAPS 溶射)

表-2 実験に使用した溶射鉄筋

略号	溶射	封孔剤	外観状況
N	無	—	
MS-0	有	無	
MS-1	有	水性封孔 (塩化マグネシウム 1:水 20)	
MS-2	有	無機有機複合樹脂封孔 (50g/m ²)	
MS-3	有	無機有機複合樹脂封孔 (125g/m ²)	

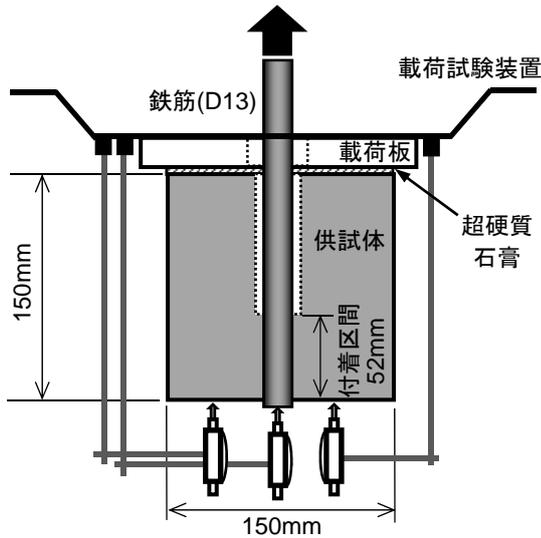


図-1 引抜き試験概要

表-3 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				AE 剤 C×%
		W	C	S	G	
58	44	197	340	746	1033	0.032

g/m²)されており、付着強度の低下が報告されていることから、本実験では塗布量を抑えて 50g/m²(MS-2)および 125g/m²(MS-3)の 2 水準を設定した。さらに封孔処理

を施さない溶射鉄筋(MS-0)と溶射を施さない無処理鉄筋(N)を加えて計 5 種類の鉄筋を使用した。

2.2 供試体概要

図-1 に供試体概要を示す。コンクリート立方体供試体の一辺の長さは 15cm 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)の直径の 4 倍(4D=52mm)とした。

表-3 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：3.14g/cm³)を、細骨材には幕別川産陸砂(表乾密度：2.61g/cm³)、粗骨材には北見産砕石(表乾密度：2.84g/cm³、M.S.=20mm)を用いた。目標スランブは 10±2.5cm、試験時の目標圧縮強度を 30.0±3.0N/mm²として配合を決定した。

コンクリートの打ち込みにおいては、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±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。

2.3 試験方法

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。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。

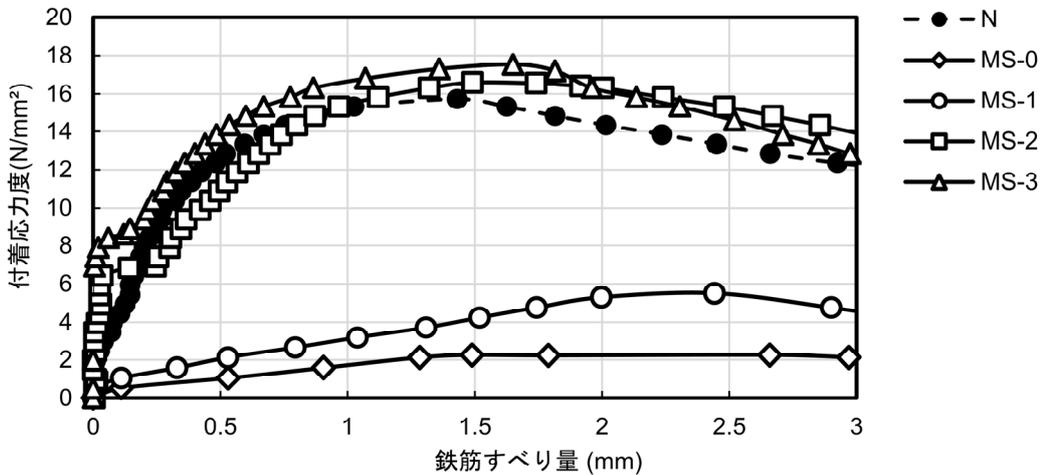


図-2 付着応力～すべり曲線

表-4 引抜き試験結果

鉄筋種類	すべり量 0.002D 時の付着応力度(N/mm ²)				すべり量 0.002D 時の付着応力度比(%)	最大付着応力度 (N/mm ²)				最大付着応力度比(%)
	2.43	4.25	2.47	Ave : 3.05 [0.28]		14.8	19.0	15.7	Ave : 16.5 [0.11]	
N	2.43	4.25	2.47	Ave : 3.05 [0.28]	100	14.8	19.0	15.7	Ave : 16.5 [0.11]	100
MS-0	—	—	—	—	—	1.94	2.25	—	Ave : 2.10 [0.07]	12.7
MS-1	0.971	0.530	—	Ave : 0.75 [0.29]	24.6	10.5	5.51	3.63	Ave : 6.55 [0.44]	39.7
MS-2	5.34	7.43	5.93	Ave : 6.23 [0.14]	204	18.2	16.0	16.6	Ave : 17.0 [0.05]	103
MS-3	6.31	6.90	7.91	Ave : 7.04 [0.09]	231	17.8	17.2	15.3	Ave : 17.5 [0.01]	106

注) [] : 変動係数

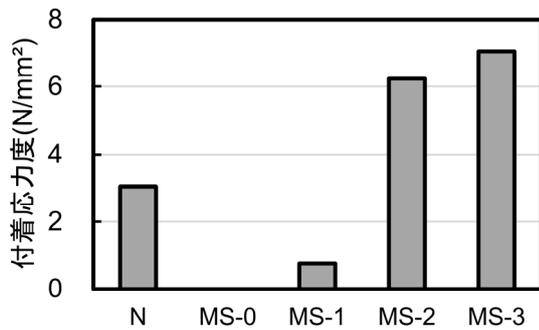


図-3 すべり量 0.002D 時の付着応力度

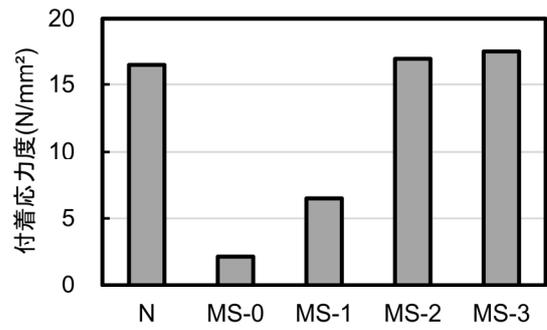


図-4 最大付着応力度

3. 実験結果および考察

図-2 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、各要因の代表例を示したものである。また、この結果に基づき、すべりの初期段階にあたる $0.002D=0.026\text{mm}$ のすべり量における付着応力度および最大付着応力度を整理して表-4 と図-3,4 に示す。

図-2 によると、封孔剤として無機有機複合樹脂を用いた MS-2 および MS-3 については、無溶射の普通鉄筋 N と類似した付着応力～すべり曲線を示した。0.002D 時の付着応力度(図-3)および最大付着応力度(図-4)を各要因 3 体の平均で比較すると、N よりも MS-2 および MS-3 の方が大きな値を示した。特に 0.002D 時の付着応力度の平均値は変動係数が大きいものの、N に対して MS-2 および MS-3 では約 2 倍大きくなった。これは、溶射皮膜の表面粗さによる影響が大きいものと推察される。また、既報告では 0.002D 時の付着応力度は、無処理鉄筋に対して溶射鉄筋の方が 1.5 倍程度大きいことを報告⁵⁾しており、同様の傾向ではあるものの、本実験結果の方が N に対する付着応力度比が大きくなった。封孔剤の塗布量を既報告(塗布量 250g/m^2)の半以下に抑制したことで溶射皮膜表面が粗くなっていると考えられ、これが付着応力度の増加に寄与したものと推察される。

最大付着応力度は、N に対する比で MS-2 が 103%、MS-3 が 106%となっており、溶射した鉄筋の方が最大付着応力度が若干大きくなった。N の最大付着応力度の結果はばらつきがあるものの、MS-2 および MS-3 の封孔仕様を施した溶射鉄筋は、無処理の普通鉄筋と同等の付着性能を有するものと考えられる。

一方、無封孔の MS-0 および水性封孔を施した溶射鉄筋 MS-1 は荷初期よりすべり量が大きく、0.002D 時の付着応力度および最大付着応力度ともに、溶射を施していない無処理鉄筋 N よりも低下した。特に無封孔の MS-0 では荷直後からすべりを生じており、著しく付着強度が低下している。これは溶射皮膜の主成分であるアルミニウムがコンクリートのアルカリに浸食され、溶射皮膜が損傷を受けたことによるものと考えられる。同様に、MS-1 の封孔仕様は、アルカリ環境下におけるアルミニウムの保護機能が不十分であり、溶射鉄筋の封孔仕様としては適さないものと考えられる。

4. まとめ

本研究では、封孔処理の有無や封孔剤の種類および塗

布量が Al-Mg 溶射鉄筋のコンクリートとの付着特性に及ぼす影響を明らかにするために、鉄筋の引抜き試験を行った。以下に、本実験の範囲で得られた知見をまとめる。

- 1) Al-Mg 溶射鉄筋に無機有機複合樹脂を用いて $50\sim 125\text{g/m}^2$ の封孔処理を施した場合、鉄筋のすべりの初期段階にあたる 0.002D 時の付着応力度は普通鉄筋に対して大きく上回ることで、最大付着応力度についても普通鉄筋より大きくなった。
- 2) 封孔処理を施さない Al-Mg 溶射鉄筋では、コンクリートとの付着強度が著しく低下した。これは、コンクリートのアルカリ環境下においてアルミニウムが浸食され溶射皮膜が損傷を受けたことが原因と考えられる。

今後、現在並行して進めている溶射鉄筋のコンクリート中での腐食抵抗性に関する実験結果を踏まえて、コンクリート用補強材に適用可能な Al-Mg 溶射鉄筋の溶射仕様および封孔仕様の詳細を検討していく予定である。

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

- 3) 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
- 4) 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
- 5) 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
- 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《新設橋・溶射ボルト編》、pp.1-6、2015.7
- 7) 木下裕一郎、井上真澄、崔 希燮、岡田包儀、牧本正信：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：土木学会北海道支部論文報告集、Vol.72、E-05、2016.2
- 8) 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