

Al-Mg 溶射鉄筋を用いた RC 部材の力学的特性

Mechanical properties of RC members using Al-Mg spraying reinforcement

北見工業大学工学部地域未来デザイン工学科	学生員	高橋 刀宇真(Toma Takahashi)
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	杵本 正信 (Masanobu Sugimoto)

1. はじめに

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極めて厳しい腐食環境下にあるコンクリート道路橋等に対しては、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である。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、ステンレス鉄筋および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たアルミニウム・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、コンクリート構造物の補強材である鉄筋にも適用可能と考えられる。

Al-Mg 溶射を施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⁷⁾。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を確認している。一方、これらの研究は溶射鉄筋自体の基礎的性質に関する検討が主体であり、Al-Mg 溶射鉄筋を補強材として使用した RC 部材の力学的挙動は不明である。

そこで本研究では、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把握することを目的として、RC はりの静的ならびに疲労曲げ載荷試験を行い、溶射を施していない普通鉄筋を用いた RC はりとの比較検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

表-1 に溶射の仕様を示す。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⁸⁾。

表-2 に実験に使用した Al-Mg 溶射鉄筋を示す。コンクリート中における耐食性と付着性に関する既報告⁷⁾の結果に基づき、耐アルカリ性を有するエポキシ樹脂系封孔剤を用いた。その塗布量は 160g/m^2 と 200g/m^2 の 2 水準とし、普通鉄筋と比較した。母材鉄筋には、引張鉄筋用に D13(SD345)とスターラップ用に $\phi 6$ (SR235)を使用した。

供試体作製に用いたコンクリートの計画配合を表-3 に示す。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/cm^3)を使用し、細骨材に幕別川産陸砂(表乾密度: 2.61g/cm^3)、粗骨材に北見産碎石(表乾密度: 2.81g/cm^3 、最大寸法: 20mm)、混和剤として AE 剤(天然樹脂酸塩)を用いた。設計基準強度を 24N/mm^2 として配合設計を行い、目標スランプは $12\pm 2.5\text{cm}$ 、目標空気量は $4.5\pm 1.5\%$ とした。打込み後材齢 1 日で脱型し、その後材齢 7 日まで $20\pm 1^\circ\text{C}$ の恒温室内で散水養生を行った。

2.2 RC はり供試体概要

表-4 に作製した RC はり供試体の略号と要因を、図-1 に RC はり供試体の概要図を示す。供試体寸法は $100\times 200\times 1500\text{mm}$ とし、引張鉄筋には D13(SD345、 $f_t=360\text{N/mm}^2$)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生じないように、せん断スパンにはスターラップとして $\phi 6$ (SR235、 $f_t=300\text{N/mm}^2$)を 85mm 間隔で配置した。

2.3 載荷方法および測定項目

1) 静的曲げ載荷試験(シリーズ S)

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、供試体が破壊するまで単調載荷した。計測項目は、載荷荷重、支間中央のたわみ、鉄筋ひずみ、ひび割れ状況とした。

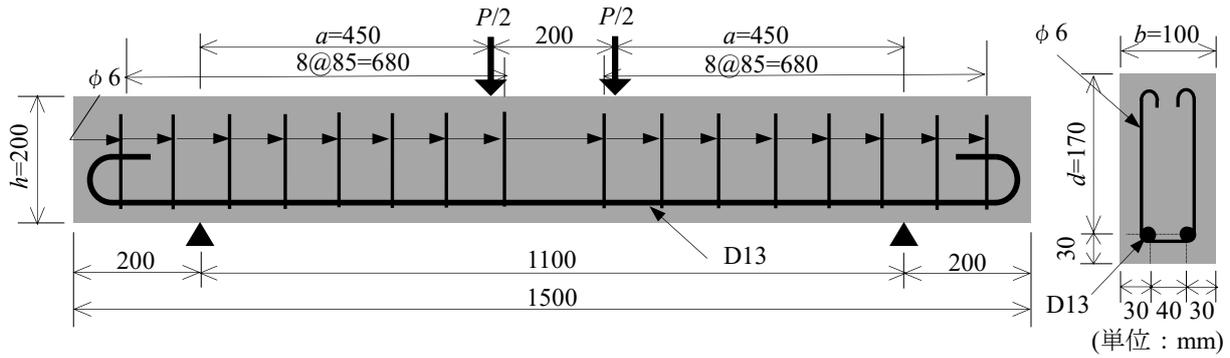


図-1 RCはり供試体の概要

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±40μm
溶射方法	プラズママーク金属溶射(TAPS 溶射) ⁴⁾

表-2 実験に使用した鉄筋の種類

Al-Mg 溶射+封孔 160g/m ²	
Al-Mg 溶射+封孔 200g/m ²	
普通鉄筋	

表-3 コンクリートの計画配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				AE 剤 (C×%)
		W	C	S	G	
66	46	195	295	800	1011	0.074

表-4 RCはり供試体要因

シリーズ	供試体略号	鉄筋仕様
S (静的)	S-N	普通鉄筋
	S-160	Al-Mg 溶射+封孔 160g/m ²
	S-200	Al-Mg 溶射+封孔 200g/m ²
F (疲労)	F-N	普通鉄筋
	F-160	Al-Mg 溶射+封孔 160g/m ²
	F-200	Al-Mg 溶射+封孔 200g/m ²

表-5 疲労曲げ荷重試験条件

上限荷重(kN)	32.7
下限荷重(kN)	11.4
荷重速度(Hz)	5
疲労荷重	正弦波による部分片振り荷重
計測時期	0、1万、5万、20万、50万、100万、200万回

2) 疲労曲げ荷重試験(シリーズ F)

表-5に疲労曲げ荷重試験の条件を示す。荷重条件および計測項目は静的曲げ荷重試験と同様である。試験は、曲げひび割れの発生を確認した後、上限荷重(32.7kN)まで静的曲げ荷重を行い、上限荷重到達後、下限荷重を11.4kNとして200万回繰返し荷重を行った。なお上限荷重は、設計荷重作用下を想定し主鉄筋の引張応力が許容引張応力度(196N/mm²)⁹⁾となる計算上の荷重(32.7kN)とし、下限荷重はひび割れ発生荷重に設定した。疲労荷重は正弦波による部分片振り繰返し荷重とし、荷重速度は5Hzとした。また、試験開始時および1万、5万、20万、50万、100万、200万回に到達した時点で繰返し荷重を一旦停止し、上限荷重の32.7kNまで静的曲げ荷重試験を行った。静的曲げ荷重試験時には、支間中央部のたわみ、等曲げモーメント区間のひび割れ幅、供試体のひび割れ状況を計測した。いずれの供試体も200万回で破壊に至らなかったため、200万回荷重終了後供試体が破壊するまで静的曲げ荷重を行った。

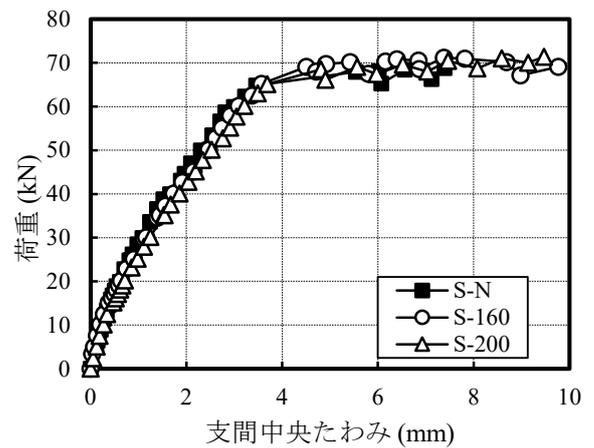


図-2 荷重と支間中央たわみの関係

表-6 静的曲げ荷重試験結果

供試体名	ひび割れ発生荷重(kN)	降伏荷重(kN)	最大荷重(kN)
S-N	16.0	64.8	69.8
S-160	16.0	65.2	71.6
S-200	16.0	65.1	71.2

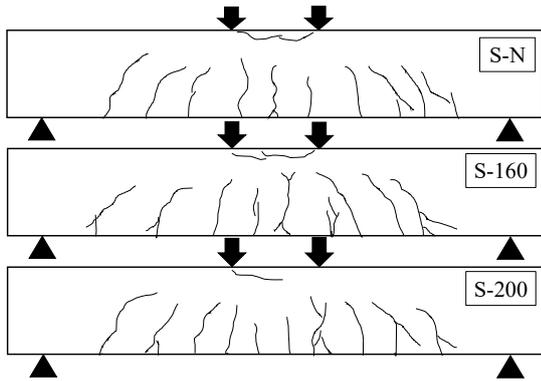


図-3 静的曲げ載荷試験後のひび割れ状況

3. 実験結果および考察

3.1 静的曲げ載荷試験(シリーズ S)

図-2に荷重と支間中央たわみの関係を、表-6に静的曲げ載荷試験結果を示す。ひび割れ発生荷重はいずれの供試体についても16.0kNであり、降伏荷重および最大荷重についても概ね同様の値となった。また、荷重～支間中央たわみ曲線においても、Al-Mg 溶射の有無や封孔剤の塗布量の違いにかかわらず、概ね同様の挙動を示すことを確認した。

図-3に静的曲げ載荷試験後のひび割れ状況を示す。いずれの供試体も張鉄筋降伏後、曲げスパン圧縮部コンクリートが圧縮破壊して終局に至った。溶射の有無や封孔剤の塗布量にかかわらず、ひび割れの発生状況に大きな差異は認められなかった。

3.2 疲労曲げ載荷試験(シリーズ F)

1)支間中央たわみと繰返し回数の関係

図-4に上限荷重時および除荷時の支間中央たわみと繰返し回数の関係を示す。いずれの供試体も載荷回数に伴い、上限荷重時のたわみおよび残留たわみは徐々に増加する傾向を示した。また、静的曲げ載荷試験時と同じく、Al-Mg 溶射の有無や封孔剤の塗布量による明確な差異は確認されなかった。

2)ひび割れ幅と繰返し回数の関係

図-5にひび割れ幅と繰返し回数の関係を図-6に200万回繰返し載荷終了直後のひび割れ状況図を示す。図-5には、上限荷重載荷時の最大曲げひび割れ幅と除荷時の残留ひび割れ幅を示した。いずれの供試体も載荷回数に伴い上限荷重時の最大ひび割れ幅および残留ひび割れ幅が徐々に増加する傾向を示した。ひび割れ状況図においては、等曲げモーメント区間に発生したひび割れの本数はいずれのケースも3本であり、ひび割れ間隔にも明確な差異は観察されない。一方で同一載荷回数において曲げスパン内に発生した最大ひび割れ幅は、F-N<F-160<F-200の順で大きくなっており、Al-Mg 溶射鉄筋を用いたRC 供試体の方が普通鉄筋を用いた場合より大きくなる傾向を示した。既報告のAl-Mg 溶射鉄筋の引抜き試験結果においては、封孔剤塗布量の増加に伴いすべり出しの付着応力度が低下することが報告されており、封孔剤の被覆による付着性の低下が影響しているものと推察される。

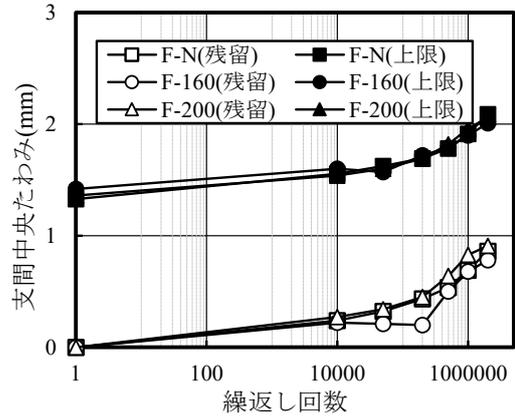


図-4 支間中央たわみと繰返し回数の関係

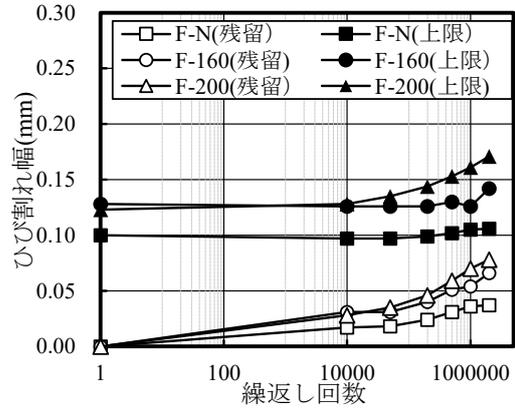


図-5 ひび割れ幅と繰返し載荷の関係

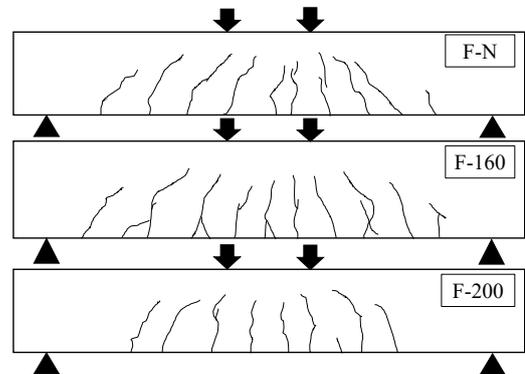


図-6 200万回繰返し載荷終了後のひび割れ状況

3)残存曲げ耐力確認試験

いずれの供試体も200万回の繰返し載荷を行っても疲労破壊に至らなかったため、200万回繰返し載荷終了後に静的曲げ載荷試験を実施し、残存曲げ耐力を確認した。

図-7に残存曲げ耐力確認試験時の荷重と支間中央たわみの関係を示す。Al-Mg 溶射の有無や封孔剤の塗布量に関わらず降伏荷重および最大荷重はほぼ同等の値を示した。同じ荷重における支間中央たわみも静的曲げ載荷試験結果と同等の挙動を示しており、Al-Mg 溶射の有無や封孔剤の塗布量の違いが繰返し載荷したRC はりの耐荷性能や変形挙動に及ぼす影響は小さいものと考えられる。

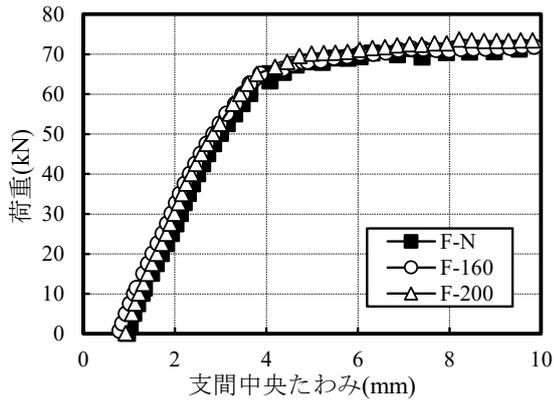


図-7 荷重と支間中央たわみの関係
(残存曲げ耐力確認試験)

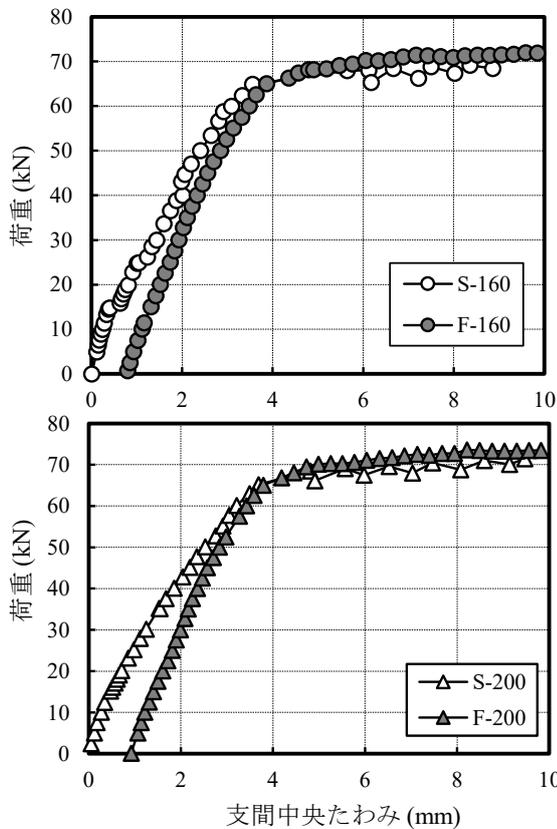


図-8 荷重と支間中央たわみの関係
(Al-Mg 溶射鉄筋、残存曲げ耐力確認試験)

Al-Mg 溶射鉄筋を用いた場合において、静的曲げ載荷試験と残存曲げ耐力確認試験の荷重と支間中央たわみの関係について比較した結果を図-8 に示す。F-160 および F-200 ともに静的曲げ載荷試験と 200 万回繰返し曲げ載荷試験を実施した後の静的曲げ載荷試験との結果はほぼ同等の挙動を示しており、Al-Mg 溶射鉄筋を用いた場合において疲労による耐力の低下は認められなかった。

4. まとめ

Al-Mg 溶射鉄筋のコンクリート用補強材への適用可能

性を把握することを目的として、RC はりの静的ならびに疲労曲げ載荷試験を行い、溶射を施していない普通鉄筋を用いた RC はりとの比較検討を行った。本実験の範囲で得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 静的曲げ載荷試験の結果、Al-Mg 溶射鉄筋を用いた RC はり供試体は、普通鉄筋を用いた場合と同等の耐荷性能と変形性能を有することを確認した。
- 2) 引張鉄筋が許容応力度となる荷重を上限荷重とした疲労曲げ載荷試験の結果、全供試体で 200 万回までの疲労曲げ載荷を行っても破壊に至らなかった。また、200 万回の疲労曲げ載荷終了後に実施した静的曲げ載荷試験の結果は、別途実施した静的曲げ載荷試験と同等の耐力を有しており、Al-Mg 溶射鉄筋を用いた RC はりの疲労に対する耐久性が確認された。
- 3) 疲労曲げ載荷試験において Al-Mg 溶射鉄筋を用いた RC 供試体の場合、等曲げモーメント区間に発生した最大ひび割れ幅は、普通鉄筋を用いた場合より大きくなる傾向を示した。これは封孔剤による被覆により付着性の低下が影響しているものと考えられる。

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) 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ー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ー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、大城社司、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、大城社司、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) 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
- 8) 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
- 9) 土木学会：コンクリート標準示方書(2002年制定)構造性能照査編、2002