

常温金属溶射工法におけるアルミニウム・マグネシウム合金溶射皮膜の性能評価

Performance Assessment of the Room Temperature Metal Spraying Method of Aluminium - Magnesium Alloy Coating

技術開発部門
研究部研究第1グループ
防食技術チーム
Technical Development Div.
Research Dept.
Research Group 1.
Protective Coatings Technology Team.



新井 彰悟
Arai Shougo

塗料事業部門 構造物塗料事業部
構造物塗料テクニカルサポートグループ
Coating Business Div.
Protective Coatings Dept.
Technical Support Group



松本 剛司
Matsumoto Tsuyoshi



松野 英則
Matsuno Hidenori

1. はじめに

金属溶射は鋼材よりも電位が卑な金属(亜鉛、アルミニウム、マグネシウムおよびそれらの合金など)を溶融した粒子を鋼材表面に吹き付けて皮膜を形成し、犠牲陽極作用や環境遮断効果により防食する工法である^{1),2)}。

金属溶射の中には亜鉛溶射や亜鉛・アルミニウム擬合金(以下ZnAl擬合金と示す)溶射などがあり、その種類として溶融した金属粒子が高温で皮膜形成するJIS H 8300(亜鉛、アルミニウムおよびそれらの合金溶射)やISO 2063(THERMAL SPRAYING-ZINK, ALUMINIUM AND THEIR ALLOYS)などの工法と、溶融した金属粒子がほぼ常温(40~70°C)まで冷却されて皮膜形成する常温金属溶射システムのMetal Spray工法(以下MS工法と示す)がある(特許公報平3-28507)。MS工法の特長を表1に示す。MS工法は鋼材表面での皮膜形成時の温度が常温であるため、作業性や安全性に優れている³⁾。また粗面形成材(弊社商品名:ブラストン#21)を適用することで、ブラスト処理(Sa2½)だけでなく動力工具処理(St3)においても適用可能となる。

近年では、厳しい腐食環境において高い防食性を示すことからアルミニウム・マグネシウム合金(以下AlMg合金と示す)溶射が海浜地域や橋梁の桁端部などで

適用されている。MS工法においても、AlMg合金溶射を確立した。本報では、その皮膜性能に関して報告する。

表1 MS工法の特長

| | |
|-----------|------------------------------|
| 溶射直後の板温 | 常温(40~70°C) |
| 粗面形成材の適用 | 可能 |
| 素地調整のグレード | ブラストSa 2 ½* 動力工具処理 St3* |
| 粗面形成材の適用 | 適用可能 |
| 塗装仕様 | <p>溶射皮膜 粗面形成材 鋼材</p> |

* ISO 8501-1:2007で規定

2. 実験

2.1 耐食性試験(耐中性塩水噴霧試験、キヤス試験、耐複合サイクル試験)

(1) 鋼材種

- 炭素鋼(JIS G 3101,素地調整:グリットブラスト処理 ISO-Sa2½)、t4.5×70×150mm
- 溶融亜鉛めっき鋼材(HDZ55, JIS H 8641)、t4.5×70×150mm

表2 耐食性評価の供試仕様

| 試験板No. | 1 | 2 | 3 | 4 |
|--------|-----------------------|------------------------|-----------------------------------|--|
| 仕様 | AlMg合金溶射 | ZnAl擬合金溶射 | 一般外面の塗装仕様 C-5塗装系 ¹⁾ | 新設溶融亜鉛めっき面用 外面塗装仕様 ZC-I ¹⁾ |
| 素地調整 | グリットブラスト処理 ISO-Sa2½ | | | — |
| 粗面化処理 | 粗面形成材 | | — | — |
| 防食下地 | AlMg合金溶射 (100μm以上) | ZnAl擬合金溶射 (100μm以上) | 無機ジンクリッチペイント (75μm) | 溶融亜鉛めっき HDZ55 |
| 封孔処理 | 封孔処理材 | | — | — |
| ミストコート | — | — | 厚膜形エポキシ樹脂系 塗料下塗 | — |
| 下塗り | — | — | 厚膜形エポキシ樹脂系 塗料下塗 (120μm) | 亜鉛めっき用エポキシ樹脂系 塗料下塗 (40μm) |
| 中塗り | ふっ素樹脂塗料用中塗 (30μm) | | | |
| 上塗り | ふっ素樹脂塗料上塗 (25μm) | | | |

(2) 供試仕様

耐食性試験の供試仕様を表2に示す。

(3) 耐食性試験方法

1) 耐中性塩水噴霧試験

JIS K 5600 7-1 (耐中性塩水噴霧性) に準拠し、6000時間供試後、一般部およびクロスカット部の評価を行った。試験条件を表3に示す。

表3 塩水噴霧試験の条件

| 項目 | 調整の範囲 |
|-------------|-----------------------------|
| 試験槽温度 | 35±2℃ |
| 試験槽内の相対湿度 | 98~99% |
| 加湿器の温度 | 47±1℃ |
| 塩水の濃度 (35℃) | 50±5 g/l |
| pH (33~35℃) | 6.5~7.2 |
| 噴霧用圧縮空気圧力 | 70~170 kPa |
| 噴霧量 | 1~2 ml/80cm ² /h |

2) キャス試験

JIS H 8502 (めっきの耐食性試験方法) に準拠し、720時間供試後、一般部およびクロスカット部の評価を行った。試験条件を表4に示す。

3) 耐複合サイクル試験

金属溶射面の塗装系における品質規格として、東

表4 キャス試験の条件

| 項目 | 調整時 | 試験中 |
|--|--------------|--------------------------------|
| 塩化ナトリウム溶液の濃度 | 50±5 g/l | 50±5g/l |
| 塩化第二銅 (CuCl ₂ ·2H ₂ O) 溶液の濃度 | 0.26±0.02g/l | — |
| pH | 3.0 | 3.0~3.2 |
| 圧縮空気圧力 | — | 70~167kPa |
| 噴霧量 | — | 1.5±0.5ml/80cm ² /h |
| 空気飽和器温度 | — | 63±2℃ |
| 塩水タンク温度 | — | 50±2℃ |
| 試験槽温度 | — | 50±2℃ |

日本高速道路株式会社、中日本高速道路株式会社、西日本高速道路株式会社から発刊されている構造物施工管理要領において、品質基準が定められている⁴⁾。

品質基準は表5に示す耐複合サイクル試験条件

表5 耐複合サイクル試験の条件

| 段階 | 時間 | 温度 | 条件 |
|----|---------|-------|--------------|
| 1 | 0.5h | 30±2℃ | 塩水噴霧 |
| 2 | 1.5h | 30±2℃ | 湿潤 (95±3)%RH |
| 3 | 2.0h | 50±2℃ | 熱風乾燥 |
| 4 | 2.0h | 50±2℃ | 温風乾燥 |
| 5 | 段階1に戻る。 | | |

に6000時間供試して、下記基準を満たすことが規定されている。

- ①一般部の異常がないこと
- ②カット部変状幅10mm以下であること

(4)耐食性評価方法

試験板の下半分に素地に達するようにプラスチックカッターにてクロスカットを施し、下記の方法にて評価を行った。

一般部評価:ASTM D 610(さび)、ASTM D 714-02(膨れ)に準拠した。

クロスカット部評価:カット部近傍のさび幅、膨れ幅で評価した。

なお、AlMg合金溶射のクロスカットは構造物施工管理要領に規定されている金属溶射の品質規格項に準拠した欠陥(溶射皮膜内に留まる深さ)を施して試験に供した。

2.2 密着力試験

MS工法では粗面形成材を塗布し、表面粗さを確保することで動力工具処理鋼板に対しても密着力を確保している。AlMg合金溶射においても、密着力の管理基準を満たすか確認した。

(1)鋼材種

炭素鋼(JIS G 3101、素地調整:ISOブラスト処理Sa2½、動力工具処理St3)、t6.0×300×300mm

(2)供試仕様

密着力試験の供試仕様を表6に示す。

(3)試験方法

日本建築工学会認定油圧式試験機(サンコーテック

ノ(株)製テクノテスターR-20000ND)を用い、40mm角型治具で試験した³⁾。

(4)評価方法

試験体1体につき9点測定し、9点の密着力の平均値が2.3N/mm²(MPa)以上であることを合格基準とした³⁾。

2.3 すべり試験

AlMg合金溶射およびZnAl擬合金溶射の試験体に対して、すべり試験を実施し、高力ボルト接合面への適用性を評価した。

(1)鋼材種

SM490A(JIS G 3106、孔径24.5mm、素地調整:ISOブラスト処理Sa2½)、t22×95×390mm(母材)、t12×95×390mm(添接板)

(2)供試仕様

すべり試験の供試仕様を表7、摩擦接合面の組み合わせを表8に示す。摩擦接合面として、溶射同士の組み合わせだけでなく、無機ジンクリッチペイントと溶射の組み合わせも評価した。塗装後に母材と添接板を組み立てるまで一定期間経過する条件を想定し、暴露した組み合わせでも評価した。

表7 すべり試験の供試仕様

| 粗面化処理 | 粗面形成材 | |
|-------|--------------------------|-----------|
| | AlMg合金溶射 | ZnAl擬合金溶射 |
| 防食下地 | 膜厚:100μm以上(母材、添接板ともに) | |
| 封孔処理 | なし | |
| ボルト | 溶融垂鉛めつき高力ボルト(F8T M22×85) | |

表6 密着性試験の供試仕様

| 試験板No. | 5 | 6 | 7 | 8 |
|--------|------------------------|---------------|------------------------|---------------|
| 素地調整 | グリットブラスト処理 ISO-Sa2½ | 動力工具処理 St3 | グリットブラスト処理 ISO-Sa2½ | 動力工具処理 St3 |
| 粗面化処理 | 粗面形成材 | | | |
| 防食下地 | AlMg合金溶射(100μm以上) | | ZnAl擬合金溶射(100μm以上) | |
| 封孔処理 | なし | | | |

表8 高力ボルト接合面の組み合わせ

| 試験体 No. | 母材 | 添接板 | 暴露 |
|---------|------------------------------------|------------------------------------|---------------|
| A | 粗面形成材/ ZnAl擬合金溶射(100 μ m以上) | 粗面形成材/ ZnAl擬合金溶射(100 μ m以上) | なし |
| B | 粗面形成材/ AlMg合金溶射(100 μ m以上) | 粗面形成材/ AlMg合金溶射(100 μ m以上) | なし |
| C | | | あり (沖縄6か月) |
| D | 粗面形成材/ AlMg合金溶射(100 μ m以上) | 無機ジンクリッチペイント (75 μ m) | なし |
| E | | | あり (沖縄6か月) |
| F | 無機ジンクリッチペイント (75 μ m) | 粗面形成材/ AlMg合金溶射(100 μ m以上) | なし |
| G | | | あり (沖縄6か月) |

(3) 試験方法

1) 試験体の組み立てと高力ボルトの締め付け

試験体3体のうち、1体は片側をすべり側としてワイヤーストレインゲージ(以下WSGと記す)を張付けた高力六角ボルト(F8T)を使用し、反対側を固定側としてWSGを張付けてない高力六角ボルト(F8T)を使用した(図1参照)。残りの2体は全てWSG無の高力六角ボルトとした。日本建築学会編「高力ボルト接合設計施工ガイドブック」(2016)に準じて、試験体を締め付け後、試験に供した⁵⁾。

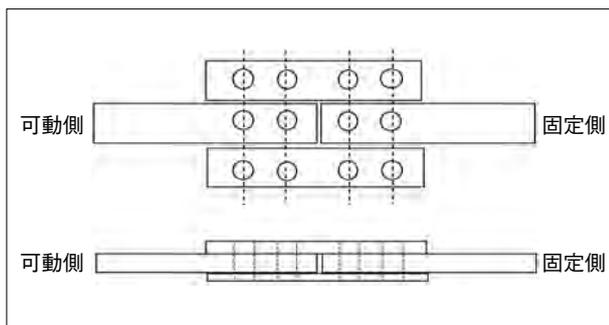


図1 すべり試験体

2) すべり係数試験

試験体(n数=3体)を引張試験機に取付け、荷重を加え、すべりが発生するまで徐々に载荷した。すべり点の確認は、次のいずれかの現象が生じた場合とした。

- ① すべり音が発生したとき
- ② 引張試験機の指針が停止または降下したとき
- ③ 試験体のけがき線がずれたとき

このときのすべり荷重を測定記録し、すべり係数を次式(1)より算出した⁵⁾。

$$\mu = \frac{P}{m \cdot n \cdot N}$$

式(1)

(μ :すべり係数、P:すべり荷重、m:摩擦面数、n:ボルト本数、N:ボルト軸力[kN])

すべり係数 $\mu=0.45$ 以上を合格基準とする。

3) リラクゼーション試験

すべり側にWSG付高力六角ボルトを使用した試験体にて、リラクゼーション試験を行った。測定は、締め付け直後(1分経過後)→30分後→1時間後→3時間後→6時間後→12時間後→24時間→48時間→72時間(以下24時間毎27日間)にて評価した。

3. 試験結果

3.1 耐食性試験結果

3.1.1 耐中性塩水噴霧試験結果

耐中性塩水噴霧試験6000時間供試後の外観写真ときび、膨れの評価結果を表9に示す。

AlMg合金溶射はZnAl擬合金溶射と同等の耐食

性を示し、C-5塗装系や新設溶融亜鉛めっき面用外面塗装仕様(ZC-I)と比較して、良好な耐食性を有している。

3.1.2 キャス試験結果

キャス試験720時間供試後の外観写真とさび、膨れの評価結果を表10に示す。

表9 耐中性塩水噴霧試験6000時間供試後の評価結果

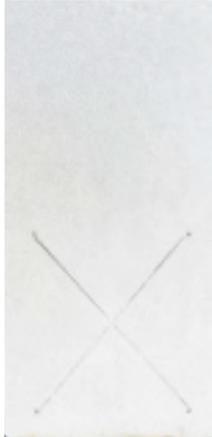
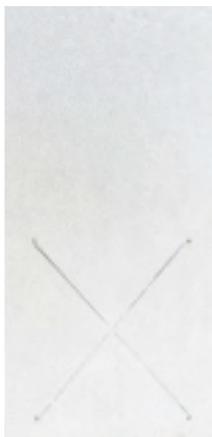
| 試験板No. | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---------------|--|--|---|--|
| 仕様 | AlMg合金溶射 | ZnAl擬合金溶射 | C-5塗装系 | ZC-I |
| 外観写真 |  |  |  |  |
| 一般部さび | 10 | 10 | 10 | 10 |
| 一般部膨れ | 10 | 10 | 10 | 8F |
| クロスカット部さび[mm] | 0.0 | 0.0 | 5.0 | 1.0 |
| クロスカット部膨れ[mm] | 0.0 | 0.0 | 4.5 | 9.0 |

表10 キャス試験720時間供試後の評価結果

| 試験板No. | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---------------|---|---|--|---|
| 仕様 | AlMg合金溶射 | ZnAl擬合金溶射 | C-5塗装系 | ZC-I |
| 外観写真 |  |  |  |  |
| 一般部さび | 10 | 10 | 9P | 9P |
| 一般部膨れ | 10 | 10 | 10 | 10 |
| クロスカット部さび[mm] | 0.0 | 0.0 | 5.0 | 1.0 |
| クロスカット部膨れ[mm] | 0.0 | 1.0 | 4.0 | 8.0 |

キヤス試験においても、AlMg合金溶射はZnAl擬合金溶射と同等の耐食性を示し、C-5塗装系や新設溶融亜鉛めっき面用外面塗装仕様(ZC-I)と比較して、良好な耐食性を有している。

3.1.3 耐複合サイクル試験結果

耐複合サイクル試験6000時間供試後の結果を表11に示す。

表11 耐複合サイクル試験6000時間供試後の評価結果

| N数 | N1 | N2 |
|---------------|--|--|
| 外観写真 |  |  |
| 一般部さび | 10 | 10 |
| 一般部膨れ | 10 | 10 |
| クロスカット部さび[mm] | 0.0 | 0.0 |
| クロスカット部膨れ[mm] | 0.0 | 0.0 |

AlMg合金溶射の仕様において、耐複合サイクル試験6000時間供試後、一般部、カット部ともに変状はみられず、東日本高速道路株式会社、中日本高速道路株式会社、西日本高速道路株式会社から発刊されている構造物施工管理要領に規定されている品質規格を満たしていることを確認した。

3.2 溶射皮膜の密着力試験結果

グリットブラスト処理鋼板および動力工具処理鋼板に対する、AlMg合金溶射およびZnAl擬合金溶射の密着力測定結果を図2に示す。棒グラフの値は測定した9点の平均値である。

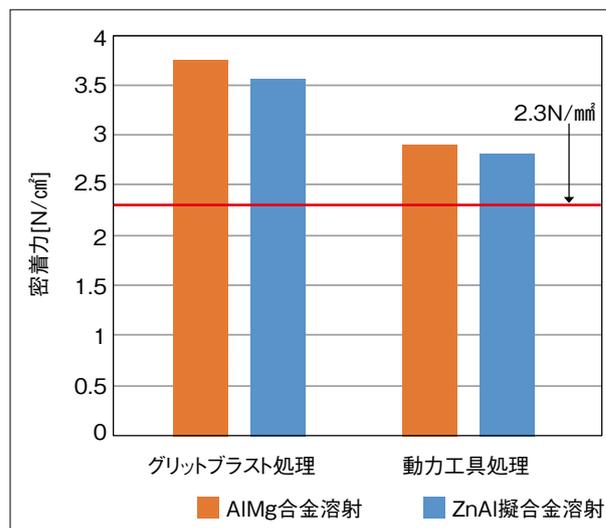


図2 密着力測定結果

AlMg合金溶射、ZnAl擬合金溶射ともに密着力2.3N/mm²以上の値を示し、鋼橋の常温金属溶射設計・施工・補修マニュアルに規定されている密着力の管理基準を満たしていることを確認した。また、動力工具処理鋼板においてもAlMg合金溶射、ZnAl擬合金溶射ともに2.3N/mm²以上の密着力を示した。このため、粗面形成材の塗布により粗面化処理を施すことで、管理基準値以上の密着力を確保できることが示された。

3.3 すべり試験結果

3.3.1 すべり係数試験結果

すべり係数試験結果を表12に示す。式(1)を用いて計算したすべり係数は、すべての接合面の組み合わせで0.45以上の値を示し、めっき高力ボルト接合の設計基準を満たした。

3.3.2 リラクゼーション試験結果

72時間までのリラクゼーション試験結果を図3、27日間までのリラクゼーション試験結果を図4に示す。AlMg合金溶射の組み合わせは、すべて72時間後も導入軸力の残存率の低下は10%未満であった。また27日後において、ZnAl擬合金溶射では導入軸力の残存率の低下は15%程度であったが、AlMg合金溶射では10%未満だった。従って、高力ボルト接合の接合面にAlMg合金溶射を施した場合においても、塗装後に母

材と添接板を組み立てるまで一定期間経過しても、設計上要求される耐力を十分確保できる。

表12. すべり係数試験結果

| 試験板 No. | 母材 | 添接板 | 暴露 | すべり係数 |
|---------|--|--|---------------|-------|
| A | 粗面形成材/ ZnAl擬合金溶射 (100 μ m以上) | 粗面形成材/ ZnAl擬合金溶射 (100 μ m以上) | なし | 0.483 |
| B | 粗面形成材/ AlMg合金溶射 (100 μ m以上) | 粗面形成材/ AlMg合金溶射 (100 μ m以上) | なし | 0.660 |
| C | 粗面形成材/ AlMg合金溶射 (100 μ m以上) | 粗面形成材/ AlMg合金溶射 (100 μ m以上) | あり (沖縄6か月) | 0.644 |
| D | 粗面形成材/ AlMg合金溶射 (100 μ m以上) | 無機ジंकリッチ ペイント (75 μ m) | なし | 0.630 |
| E | 粗面形成材/ AlMg合金溶射 (100 μ m以上) | 無機ジंकリッチ ペイント (75 μ m) | あり (沖縄6か月) | 0.633 |
| F | 無機ジंकリッチ ペイント (75 μ m) | 粗面形成材/ AlMg合金溶射 (100 μ m以上) | なし | 0.512 |
| G | 無機ジंकリッチ ペイント (75 μ m) | 粗面形成材/ AlMg合金溶射 (100 μ m以上) | あり (沖縄6か月) | 0.629 |

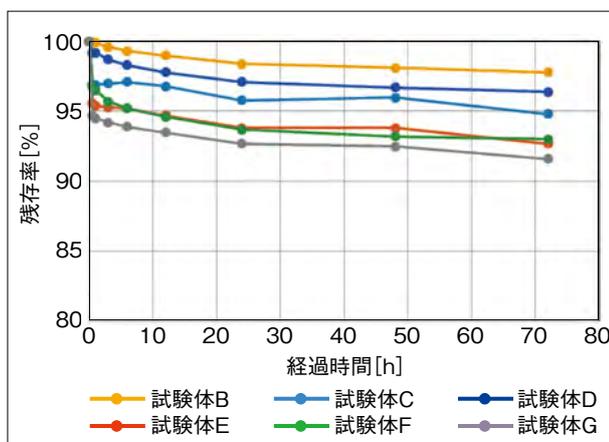


図3 リラクゼーション試験結果(72時間)

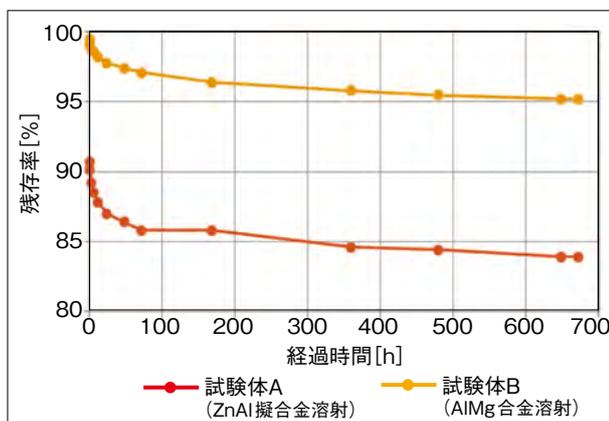


図4 リラクゼーション試験結果(27日間)

4. まとめ

常温金属溶射であるMS工法におけるAlMg合金溶射皮膜の性能を確認した結果、下記のことがわかった。

AlMg合金溶射皮膜の耐食性はZnAl擬合金溶射皮膜と同等で、かつC-5塗装系および新設溶融亜鉛めっき面用外面塗装仕様(ZC-1)より優れることを確認した。また、構造物施工管理要領の金属溶射面の塗装系における品質規格を満たしていることを確認した。クロスカットの傷の到達点の違いが耐食性へ及ぼす影響に関して、詳細な評価を実施中である。

AlMg合金溶射は粗面形成材の塗布により粗面化処理を施すことで、動力工具処理鋼板においても管理基準値以上の密着力を確保でき、また、高力ボルト接合の設計基準値以上のすべり係数を示し、設計上要求される耐力を十分確保できることが示された。

参考文献

- 1) 公益社団法人 日本道路協会：
鋼道路橋防食便覧(平成26年3月改定)
- 2) 大柴雅紀、奥野真司: 金属溶射材料の
実暴露における防食性評価
(DNTコーティング技報No.8, 技術解説-5)
- 3) 常温金属溶射設計・施工・補修マニュアル(案)
(改訂版 2018年4月 鋼構造物常温金属溶射研究会)
- 4) 構造物施工管理要領(令和元年7月、
東日本高速道路株式会社、中日本高速道路株式会
社、西日本高速道路株式会社)
- 5) 日本建築学会編
「高力ボルト接合設計施工ガイドブック」(2016)