

粗面化処理を省略できる Zn/Al 溶射技術の評価

園家 啓嗣*

Assessment of the Zn/Al Metal Spraying Technology without Blast Treatment

Keiji SONOYA

Synopsis : Recently, in the view of maintenance-free type corrosion prevention of steel bridges, thermal spraying with good durability and long life is desired. Zn/Al metal spraying is spotlighted due to its low life cycle cost (LCC). Zn/Al metal spraying without blast treatment, one of corrosion prevention methods, has better efficiency and environmental property, such as less fume, than the conventional method based on JIS H 8305. In this paper a comparison was made on the properties of the Zn/Al sprayed coating without blast treatment and the coating of the conventional method. In the results, it was shown that the coating of Zn/Al metal spraying without blast treatment had the same properties as conventional method based on JIS H 8305. This Zn/Al metal spraying was applied to steel bridges and they showed the good corrosion resistance.

Key words: Zn/Al metal spraying; corrosion prevention; blast treatment.

1. 緒言

橋梁等の防食法としては昔から塗装が一般的に使用されてきた。最近、メンテナンス・フリーの観点から、Table 1 に示すように耐久性が優れ長寿命化が可能であると言われている防食溶射法の適用が望まれるようになった。環境面からも、防食溶射法など塗装よりもライフサイクルコスト (LCC) の低い防錆技術が求められている。

防食溶射法には JIS に準じる Zn, Al 等を用いた一般的な溶射法¹⁾ (プラスト処理を行った後, Zn, Al 等を溶射する方法) がある。新しい手法として、JIS に準じた通常の溶射法とは異なって前処理 (粗面処理) を簡素化する手法が考えられる。この手法は、粗面形成材を塗布した後 Zn/Al 擬合金を溶射する工法である。プラスト処理をしなくて済むので、現地向きの溶射法である。以下では、MS (Metal Spray) 工法²⁾と呼ぶ。

日本での防食溶射法の実績としては、福岡北九州高速道路公団向けの高速 5 号線 (西月隈-福重間の 18 km) の橋梁の防食に溶射を適用して安定した品質が得られた例³⁾などがある。

MS 工法は、粗面化処理を簡素化できるので効率が良く、粗面化処理により発生する粉塵を防止できるため JIS に準じた溶射法よりも環境に優しい溶射施工であると考えられる。

本報では、新しい手法の MS 工法の有効性を評価するため、MS 工法と従来の防食溶射法の溶射皮膜の性能 (密着力、耐食性、組織等) を比較した。なお、従来の防食溶射法としては、溶射材料に実績のある Zn-Al 合金を用い、溶射プロセスにはフレーム溶射を選定した。以後、この防食溶射法を CP (Corrosion Prevention) 溶射と呼ぶ。

Table 1. Predicted lives of various corrosion protecting measures.

Coating method environments	Galvanizing (as galvanized)	Zinc-aluminum alloy (spraying and sealing)	Polyurethane resin type painting	Fluororesin type painting
General environments (mountain areas)	100	100	40	60
Relatively harsh environments (urban areas)	60	70	30	45
Harsh environment (coastal areas)	25	60	20	30

(remarks): 1. Sources from Road Bridge Specification (2001) of Japan Bridge Construction Association

2. Numerical numbers in years

平成 18 年 2 月 15 日受付 平成 18 年 4 月 26 日受理 (Received on Feb. 15, 2006; Accepted on Apr. 26, 2006)

* 石川島播磨重工 (株) 生産技術センター (Production Engineering Center, Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd., 1 Shin-Nakahara-cho Isogo-ku Yokohama 235-8501)

2. 実験方法

2.1 溶射法の概略

溶射は、燃焼または電気エネルギーを用いて溶材料を加熱し、溶融または半溶融状態にした粒子を基材に衝突させて皮膜を形成する方法である(JIS H 8300)。熱源によって各種方法があるが、防食目的の溶射法としてはFig. 1の如く溶線式フレーム溶射⁴⁾とアーク溶射⁴⁾がある。

2.2 溶射施工

2.2.1 MS工法

軟鋼(200×200×10t)の基材に粗面処理としてSt3程度のケレン処理を行った後、セラミックス粒子(骨材)入りの粗面形成材(プラスノン#21:大日本塗料株式会社)を適量(目標値:50 μ m程度)塗付した。この処理は、ブラスト処理の代替として、基材表面に基材と溶射皮膜の密着性に必要な凹凸粗面を形成するために、骨材の役割を担うセラミックス(SiO₂)粒子を含有した2液性溶剤型エポキシ樹脂系塗料(粗面形成材)を基材に塗布するものである²⁾。その後、純亜鉛と純アルミニウムの線材(1.3mm)を同時に送給しアーク溶射により100 μ m程度積層した(Fig. 2)。溶射皮膜の組成は、亜鉛とアルミニウムが重量比で約3:1とした。

2.2.2 CP溶射

軟鋼(200×200×10t)の基材に下地処理としてブラスト処理を行って清浄度:Sa2.5以上、表面粗さ:Ra8 μ m以上とした。溶射は、亜鉛:アルミニウム=85:15(重量比)の合金線(4.6mm ϕ)を用いて厚さ100 μ m程度溶線式フレ

ーム溶射した(Fig. 2)。

2.3 評価項目

MS工法とCP溶射の皮膜性能を比較するため、下記の項目を試験評価した。

2.3.1 外観観察

MS工法及びCP溶射した試験板の外観を比較した。外観観察に使用したものは封孔材〔MS工法:ブチアール樹脂(MSシラー:大日本塗料株式会社), CP溶射:無機系塗料(セラテクトGSシール:関西ペイント株式会社)]を塗付してある。

2.3.2 顕微鏡組織観察

MS工法及びCP溶射した皮膜(無封孔処理材)の顕微鏡組織をライツ社の光学顕微鏡を用いて100倍で観察した。

2.3.3 硬さ測定

MS工法及びCP溶射した皮膜(無封孔処理材)について、皮膜が薄いので、荷重:100gでマイクロビッカース硬さを測定し5点の平均を求めた。

2.3.4 密着力測定

MS工法及びCP溶射した皮膜(無封孔処理材)について、JISH 8661「亜鉛、アルミニウム及びそれらの合金溶射—溶射皮膜試験方法」の引張試験方法(A法)に基づいて、皮膜密着力を測定した。エルコメータ社(英国)製のアドヒージョンテスタを使用して5点測定し、その平均値を求めた。

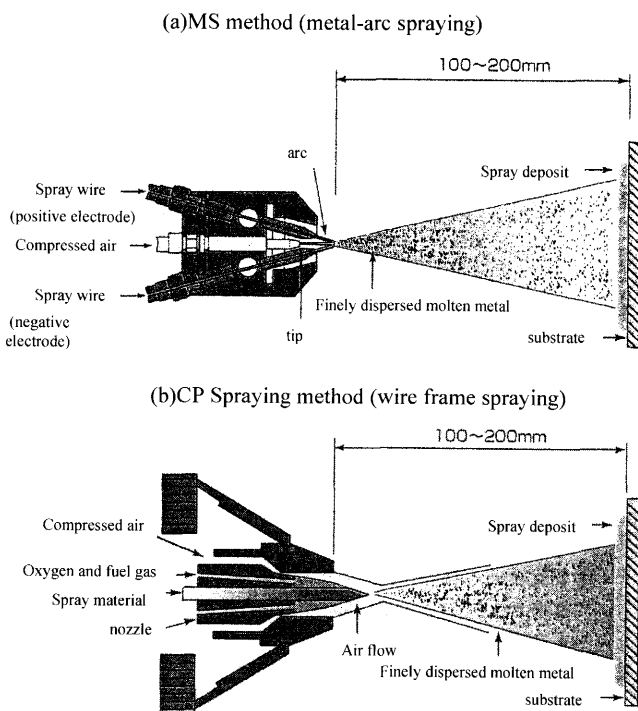


Fig. 1. Schematic diagrams of metal-arc spraying, and wire flame thermal spraying methods.

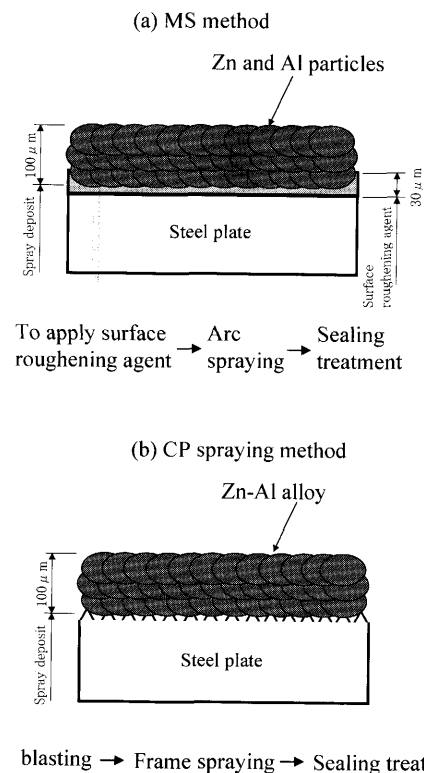


Fig. 2. Schematic cross-sections of deposits by the MS method and the JIS thermal spray method.

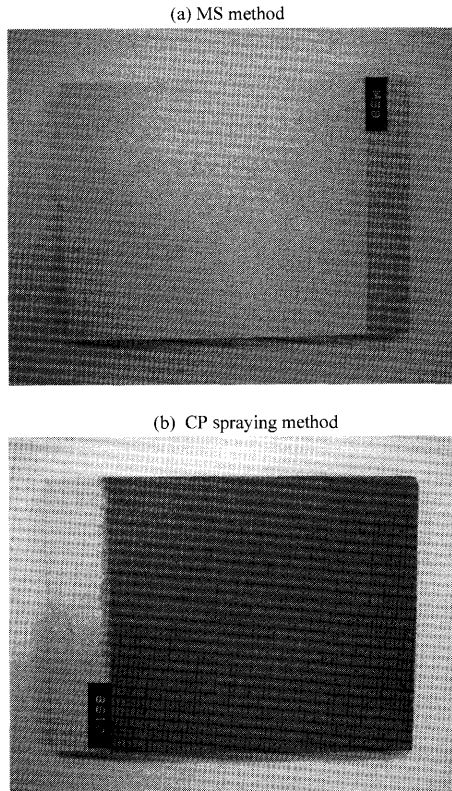


Fig. 3. Exterior appearance of Zn/Al deposits prepared by MS method (a) and JIS thermal spray method (b) after sealing.

2・3・5 摩擦係数の測定

MS工法及びCP溶射した皮膜（無封孔処理材）表面の摩擦係数は、（社）日本建築学会のすべり試験方法に準じて測定した³⁾。

2・3・6 腐食試験

MS工法及びCP溶射した皮膜（いずれも無封孔処理）について、JIS H 8661「亜鉛、アルミニウム及びそれらの合金溶射—溶射皮膜試験方法」の塩水噴霧試験に準じて、25°Cで5% NaClを噴霧する試験を行った。JIS規格では噴霧時間が72時間であるが、500時間まで試験を行って加速条件下での溶射皮膜の腐食状態を比較した。

3. 試験結果

3.1 外観観察

MS工法とCP溶射両者の試験板の外観をFig. 3に示す。多少色調が異なるが、両者とも封孔処理された溶射面は滑らかで差異は認められなかった。

3.2 顕微鏡組織観察結果

MS工法及びCP溶射した皮膜の代表的な顕微鏡組織をFig. 4に示す。MS工法の皮膜組織の場合は、下地に粗面形成材の層が認められる。溶射皮膜は亜鉛とアルミニウムが含まれたZn/Al擬合金の積層組織であった。

一方、CP溶射の場合の溶射皮膜は、亜鉛（明部）とア

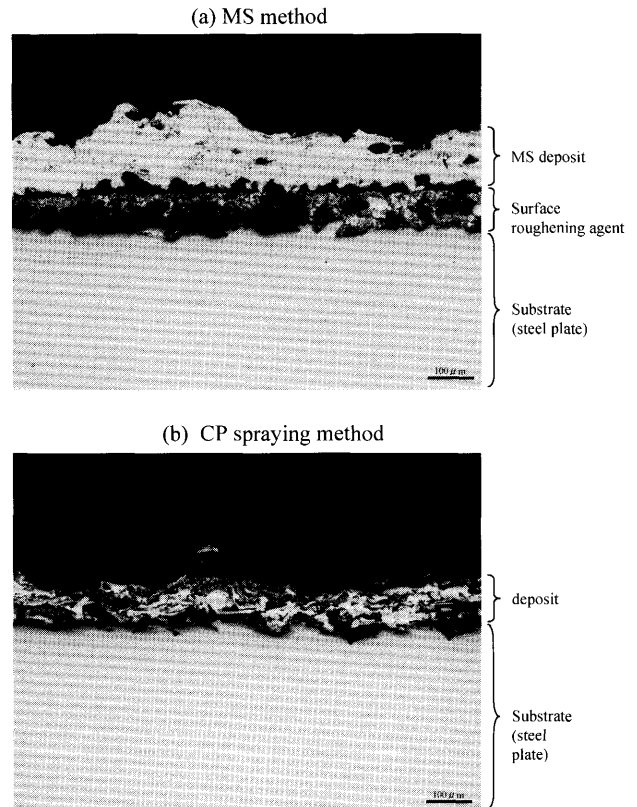


Fig. 4. Microstructure of Zn/Al deposits prepared by MS method (a) and JIS thermal spray method (b).

Table 2. Hardness of deposits prepared by the MS method and JIS thermal spray method.

Spray method	Measured values*	Average values
MS method	39.2 39.9 35.8 40.5 39.1	38.9
CP spraying method	36.8 40.1 47.9 33.1 40.0	39.6

Remarks: *measured by the load of 0.98N

ルミニウム（暗部）が混在した積層組織を呈していた。

3.3 硬さ測定結果

MS工法及びCP溶射した皮膜のマイクロピッカース硬さ測定結果をTable 2に示す。MS工法及びCP溶射ともに溶射皮膜の平均硬さはHV: 39程度であった。なお、CP溶射皮膜は、AlとZnが層状になっているため硬さ測定値に多少バラツキが認められた。

3.4 密着力測定結果

MS工法及びCP溶射した皮膜の密着力測定結果をTable 3に示す。MS工法による皮膜の密着力は平均で2.4MPaとなった。破断位置は、破断部を断面マイクロ観察した結果、主に粗面形成材と溶射皮膜の界面であった。この値は、土木構造物常温溶射研究会の鋼橋の常温金属溶射設計・施工マニュアル⁵⁾及び福岡高速5号線鋼橋防錆工事の特記仕様書⁶⁾で要求されている基準値（3点の平均値：2.3MPa以上）を満足している。なお、粗面形成材の塗布量が少ないと皮

膜の密着力が低下する場合があるため、品質上の管理は必要であると考えられる。

一方、CP溶射した皮膜の密着力は平均で4.1MPaとなり、MS工法のそれと比べも高い値を示した。破断位置は、破断部を断面マイクロ観察した結果、溶射皮膜と基材との界面であった。上記の特記仕様書の基準値も十分満足しており、CP溶射の場合の密着力は特に問題ないと判断される。

3.5 摩擦係数測定結果

MS工法による溶射皮膜の無封孔処理材の摩擦係数は0.55~0.7であり、CP溶射による溶射皮膜の摩擦係数は0.68となり、いずれも鋼道路橋防食便覧の規格値(>0.4)を満足していた³⁾。

3.6 塩水噴霧試験結果

3.6.1 外観観察結果

MS工法及びCP溶射した皮膜について500時間まで塩水

Table 3. Adhesion strength of deposits prepared by MS method and JIS thermal spray method.

Spray method	Measured values (MPa)	Average values
MS method	2.4 2.6 2.3 2.3 2.4	2.4
CP spraying method	5.7 3.8 3.3 4.3 3.3	4.1

噴霧試験した試験片の外観をFig. 5に示す。

MS工法による皮膜表面は、試験時間が経過しても白錆、赤錆等の発生はなく、ほとんど変化が認められなかった。

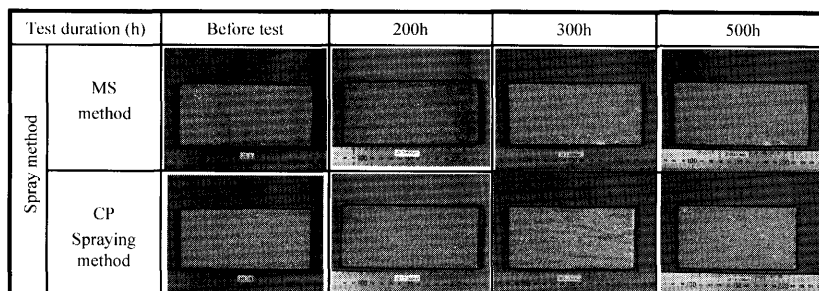
一方、CP溶射の皮膜表面は200時間経過後から長手方向に筋状の凹部が生じ皮膜表面が溶出し始める。試験時間が長くなるに従って凹部は少しずつ深くなっていく傾向を示し、合金内の電気化学的に卑なZnの選択的な腐食が進行したものと考えられる⁷⁾。

3.6.2 試験後の顕微鏡組織観察結果

MS工法及びCP溶射した皮膜について200時間、300時間及び500時間塩水噴霧試験した試験片の断面の皮膜組織をFig. 6に示す。試験時間が200時間の皮膜断面の顕微鏡組織は、MS工法及びCP溶射した皮膜ともに溶射皮膜部の減肉はほとんど認められなかった。なお、MS工法の粗面形成材と基材の界面には、前処理がSt3程度のケレン処理のみであるため酸化物が存在していた。

試験時間が300時間の場合、MS工法では、粗面形成材と溶射皮膜を含む全体の膜厚の変化はほとんど認められなかった。

一方、CP溶射の場合は、溶射皮膜は腐食により減肉しており、最小膜厚は60 μ m程度になった。試験時間が500時間になると、MS工法では溶射皮膜自身の腐食減肉も進



Remarks: Test conditions:25°C, 5% NaCl aqueous solution is sprayed (according to JIS Z 2371)

Fig. 5. Results of neutral salt spray corrosion tests.

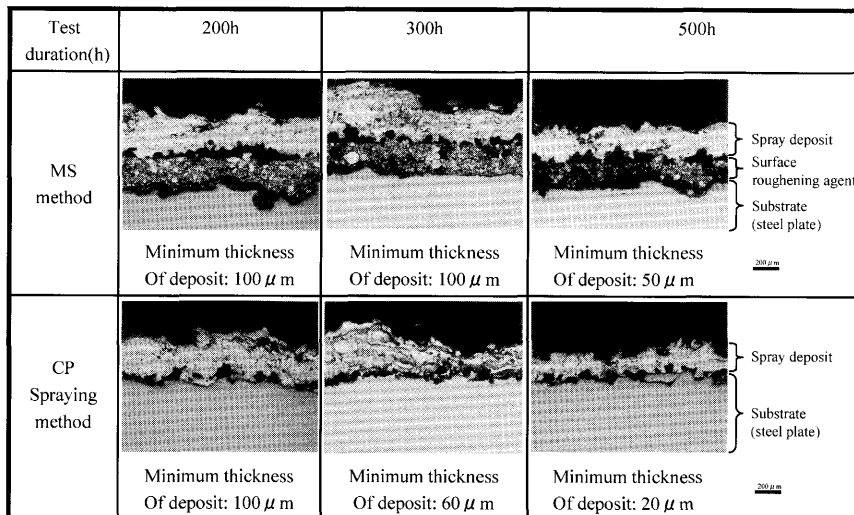


Fig. 6. Microstructure after the neutral salt spray tests of deposits prepared by MS method and JIS thermal spray test.

Table 4. Comparison of various properties of deposits prepared by the MS method and JIS thermal spray method.

Spray method	External appearance	hardness	adhesion strength	Coefficient of friction	Corrosion resistance	Fabrication shop capacity	cost	Comprehensive evaluation
MS method	○ (1)	○ (1)	○ (0.6)	○ (1)	◎ (2.5)	△ (0.5)	○ (1.06)	○ (1)
CP spraying method	○ (1)	○ (1)	◎ (1)	○ (1)	○ (1)	◎ (1)	○ (1)	○ (1)

(remarks)1.◎: excellent, ○: good, △: fair (a half of JIS specified value is fair)

2. values in parenthesis are values for MS method with 1 for CP spraying method

み、最小膜厚は50 μ m程度となった。

一方、CP溶射の場合は、溶射皮膜の減肉は非常に大きくなり最小膜厚は20 μ m程度になった。

以上のことから、MS工法による皮膜の減肉量は、長時間になる程CP溶射よりも少なくなる傾向にあることが明らかとなった。このように、MS工法による皮膜の長時間の耐食性が良好なのは、Zn、Alが完全溶融せず擬合金になっているので、AlがZnの腐食に対してバリアになるためと推定される⁵⁾。

3.7 溶射施工能力

CP溶射の溶射能力は試算の結果720m²/日程度と高い。一方、MS工法の場合は、エポキシ樹脂の粗面形成材を溶融させないように溶射時の入熱量を抑える必要があるため、溶射能力は360m²/日程度となった。

3.8 コスト比較

MS工法の必要経費は、前処理、溶射施工（溶射材料含む）、封孔処理（封孔材含む）等を試算した結果、溶射能力等からCP溶射の必要経費より約1.06倍と若干高くなった。

3.9 総合評価

MS工法とCP溶射の性能を総合的に比較評価した結果をTable 4に示す。

MS工法による皮膜は密着力がCP溶射に比べて劣るが、土木構造物常温溶射研究会の鋼橋の常温金属溶射設計・施工マニュアル⁵⁾で要求されている基準値（2.3MPa以上）を満足している。MS工法の溶射施工能力はCP溶射の1/2程度であるが、皮膜の長時間の耐食性はCP溶射と比べて優れている。また、MS工法に必要な経費もCP溶射と同程度であることから、総合的に評価すると、MS工法は実績のあるCP溶射と同様に、防食溶射法として橋梁等に適用可能であると判断される。

4. MS工法の鋼橋への適用

MS工法は皮膜性能が良好であることを明らかにした。鋼橋の防食法として、実際に塗装だけでなくMS工法の適用も試みた。

4.1 鋼床版と主桁の溶射

工場で鋼床版と主桁を製作し、それに伴ってMS工法も適用した。鋼床版は上面（無機ジンクリッチペイント塗布）以外を全てMS工法で施工した。数量の多いアングル等の小物の溶射、また狭あい部の溶射については適正条件になるよう慎重な施工が必要であった。

4.2 現地施工

製作した鋼床版と主桁は、工場でブロックに組立て、現地に搬送後架設した。現場継手は溶接完了後溶射し、製作開始後2年間で鋼橋（総長：214m）を完成させた。

5. 結言

CP溶射（JISに準じた従来の防食溶射法の中の種類）とMS工法について、溶射皮膜の性能を比較し、MS工法の有効性を評価した。

(1) MS工法による皮膜は密着力がCP溶射に比べて劣るが、土木構造物常温溶射研究会の鋼橋の常温金属溶射設計・施工マニュアル⁵⁾で要求されている基準値（2.3MPa以上）を満足している。

(2) MS工法の溶射施工能力はCP溶射の1/2程度であるが、皮膜の長時間の耐食性はCP溶射と比べて優れている。また、MS工法に必要な経費もCP溶射と同程度である。

(3) 総合的に評価すると、MS工法は実績のあるCP溶射と同様に、防食溶射法として橋梁等に適用可能であると考えられる。

文 献

- 1) 日本溶射工業会：FKD新設橋梁防錆溶射工事仕様書，2000年10月。
- 2) MS工法協議会：新設橋梁常温擬合金溶射防錆仕様書，1999年11月。
- 3) D.Denma and M.Kashiki: *Ishikawajima-Harima Tech. Rev.*, **42** (2002), No. 4, 238.
- 4) 日本溶射工業会：防錆溶射ガイドブック，2000年9月。
- 5) 土木構造物常温溶射研究会：鋼橋の常温金属溶射設計・施工マニュアル，2001年4月。
- 6) 福岡北九州高速道路公団：福岡高速5号線鋼橋防錆工事の特記仕様書，2001年1月。
- 7) 金属便覧，金属学会，1990年3月。