

第4章 溶射の鋼橋への適用

4-1 溶射の概要

4-1-1 鋼橋における溶射

溶射とは、JISの規定では「燃焼または電気エネルギーを用いて溶射材料を加熱し、溶融またはそれに近い状態した粒子を素地に吹き付けて皮膜を形成すること」とされている。

その歴史は非常に古く 1910 年にスイスのショープ博士 (Dr.M.U.Schoop) によって発明され、その後種々の改良がなされ、近年では装飾や防食、肉盛り、機能皮膜の形成など幅広い分野に応用されている技術である。

現在、鋼橋における防食法としては塗装，耐候性鋼材，溶融亜鉛メッキ，金属溶射があるが、新設鋼橋の防食法としては塗装が主流である。

溶射は耐久性では塗装より優れているが、「作業コストが塗装に比べて割高である」、「作業に特殊技術が必要」、「狭隘部や現場継手部への対応が困難」といった理由からあまり採用されなかった。しかし近年ライフサイクルコストの観点から塗装以外の防食法も見直される傾向にあり、溶射の採用も一部で見られる。

鋼橋での溶射は一般的に亜鉛やアルミニウムの合金及び擬合金を使用したフレーム溶射やアーク溶射（常温溶射）が用いられることが多い。

以下に橋梁で実績のある主な溶射団体とその特徴を示す。

表 4-1 主な溶射団体

団体名	溶射工法	溶射材料	素地調整		構成 会社数
			製品 ブラスト	粗面 形成材	
MS工法協議会	擬合金常温溶射	Zn/Al 擬合金	無し	有り	67社
防食溶射協同組合 (日本溶射工業会)	合金常温溶射 JIS溶射	亜鉛合金、 アルミニウム合金	有り	無し	31社
日本メタライジング 防錆協会	擬合金常温溶射 JIS溶射	Zn/Al 擬合金	有り	無し	18社
G.M.S工法協会	擬合金常温溶射 JIS溶射	Zn/Al 擬合金	有り	無し	9社
I.M.C工法協会	擬合金常温溶射 合金常温溶射 JIS溶射	Zn/Al 擬合金 Zn/Al 合金	有り 無し	無し 有り	60社
メタアーク工法協会	擬合金常温溶射 合金常温溶射	Zn/Al 擬合金 Zn/Al 合金	有り	無し 有り	40社

* 福岡北九州高速道路公社登録団体（平成14年2月18日現在）

4-1-2 溶射材料の種類

溶射材料は、各種金属、セラミック、プラスチックなどがあるが、鋼橋では主に亜鉛、アルミニウム、亜鉛・アルミニウム合金（以下Zn・Al合金という）及び亜鉛・アルミニウム擬合金（以下Zn・Al擬合金という）などが使用されている。以下に主な溶射材料と溶射皮膜の特徴を示す

1) 亜鉛溶射

亜鉛皮膜の耐久、耐食性は亜鉛メッキとほぼ同じである。優れた犠牲陽極作用があり、一般環境下では長寿命な防食法として期待できる。今までに多くの実績があるが、海岸部などの塩害環境下では亜鉛の消耗が著しい。

2) アルミニウム溶射

アルミニウム皮膜は、極めて優れた耐食性を有するが、大気中での乾湿の繰り返しによる極性の逆転や酸化物の形成による不動態化に留意する必要がある。

3) Zn・Al合金溶射

Zn・Al合金皮膜は、亜鉛とアルミニウムの合金線材を溶射材料としたフレーム溶射により形成される。アルミニウムの重量が大きい方が耐久性に優れるといわれているが、アルミニウムを多く混合することは技術的に難しいため、現状ではアルミニウム重量が5%、13%、15%の合金線材が使用されている。耐食性は亜鉛皮膜より優れているが、皮膜表面は経時で酸化されやすい。

4) Zn・Al擬合金溶射

Zn・Al擬合金皮膜は、亜鉛とアルミニウムの2本の線材を溶射材料としたアーク溶射により形成される。Zn：Alの標準的な体積比率は50：50程度であるが、作業部位によってある程度比率がばらつく。耐食性は亜鉛皮膜より優れている。

なお、擬合金溶射という用語は、正式な用語ではなく、JISでは「複合溶射：2種類以上の溶射材料を同時に溶射して皮膜を形成する溶射」として定義されている。

5) 溶射材料による耐食性

各種溶射材料の耐食性比較の一例を以下に示す。

表 4-2 キャス試験における皮膜の耐食性（赤錆発生までの時間）

	膜厚（ μm ）	耐久時間	溶融亜鉛メッキに対する腐食速度の比率
溶融亜鉛メッキ	純Zn層：25 (合金層：50)	3日	1
Zn溶射	110	13日	1
Zn・Al擬合金溶射 (無封孔)	120	21日	0.69
Zn・Al擬合金溶射 +封孔処理	120 (+40)	43日	0.34
Al溶射	110	40日	0.33

* 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（案）」より

4-1-3 溶射の工法

溶射の方法としては、下図に示す通り加熱用電源の種類により分類される。

現在、鋼橋の溶射では主に溶線式フレイム溶射、アーク溶射、及びアーク溶射の一種である常温溶射が用いられている。

常温溶射という言葉は正式な用語ではないが、本報告書では通常のアーク溶接に比べて低い温度で溶射できるアーク溶射の総称として用いる。

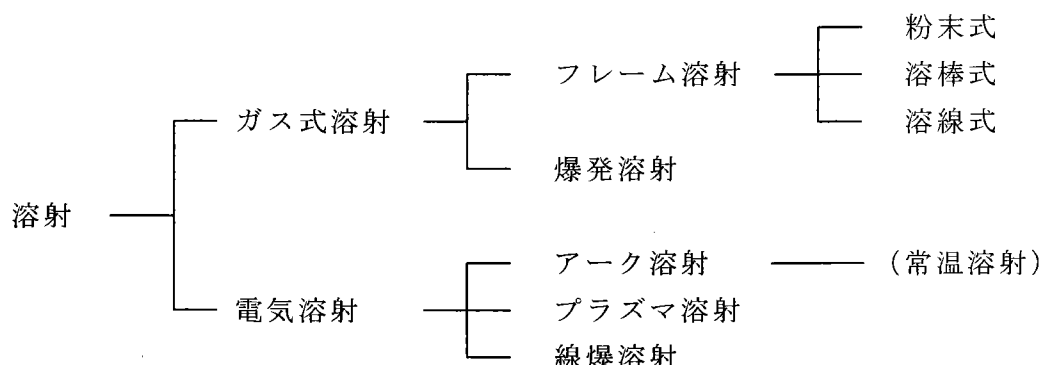


図 4-1 加熱用電源の種類による分類

1) 溶線式フレイム溶射

溶線式フレイム溶射は可燃ガス（プロパンガスやアセチレンガス）と酸素との混合ガス燃焼炎中にワイヤー状の溶射材料を送り込んで加熱・溶融し、圧縮空気 で微粒化して素材に吹き付けて皮膜を形成する。

主な特徴

- ①溶射装置が比較的安価で、加工コストも比較的安い
- ②電源が不要
- ③可燃性高圧ガスを使用するため、取り扱いに注意が必要
- ④装置の取り扱いに特殊技術が必要

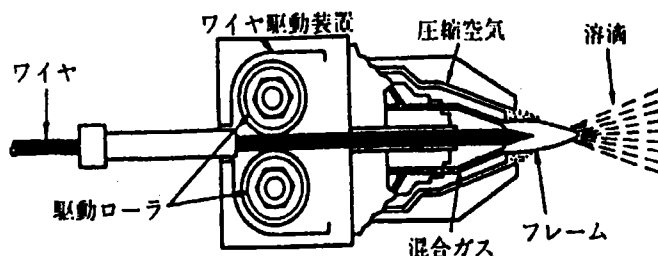
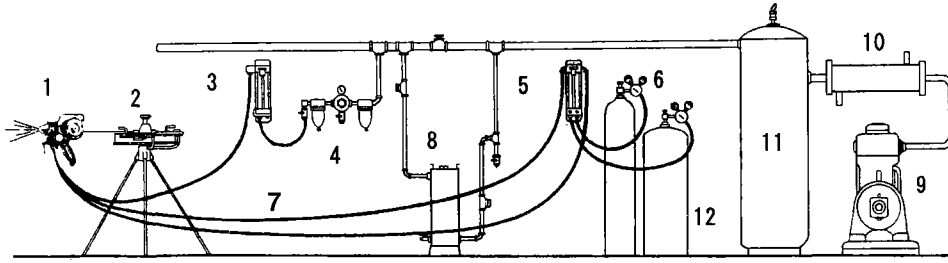


図 4-2 フレイム溶射ガンの一例



- | | | |
|--------------|-------------|--------------------|
| 1. ガス溶線式溶射ガン | 5. ガス流量計 | 9. 空気圧縮機 |
| 2. ワイヤコントロール | 6. ガス調整器 | 10. 圧縮空気乾燥機 |
| 3. 空気流量計 | 7. ホース類 | 11. エアレシーバー |
| 4. 空気調整器 | 8. エアークリーナー | 12. アセチレンまたはプロパン酸素 |

図 4-3 フレーム溶射装置の一例

2) アーク溶射及び常温溶射

アーク溶射は2本の金属線材間に電氣的にアークを発生させて、瞬時に加熱・溶融して、圧縮空気で微粒化を行って素地に吹き付けて皮膜を形成する方法である。

また、常温溶射はアーク溶射の一種で、溶射材料（一般的には亜鉛とアルミニウム）をアークにより溶融し、これを低温の空気流によって微粒化し、急激に冷却して液状の過冷却の状態です素面表面に吹き付け、低温（一般に50℃程度）で被覆する方法である。

主な特徴

- ① フレーム溶射に比べると溶射装置が高価だが稼働費は安い
- ② 溶射ガンが比較的軽く、大型の電源が必要
- ③ 可燃性ガスを使用しない
- ④ フレーム溶射に比べて作業が簡単
- ⑤ 皮膜結合力がガス式に比べて大きい

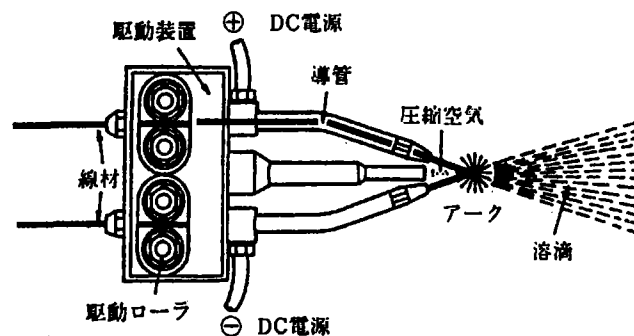


図 4-4 アーク溶射ガンの一例

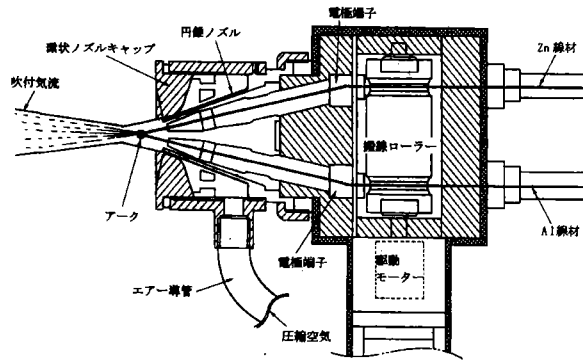


図 4-5 常温溶射ガンの一例

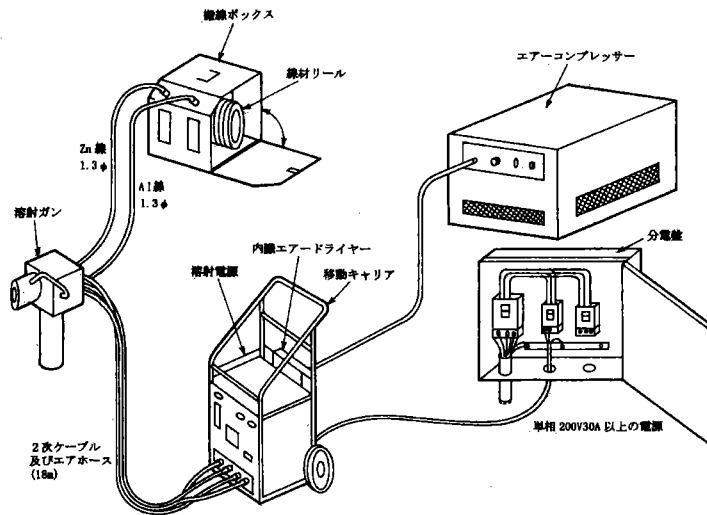


図 4-6 常温溶射装置の一例

4-1-4 溶射の管理

溶射材料・溶射機器の確認、溶射条件の確認の他に、目視判定による外観検査及び電磁式微厚計による皮膜厚さの確認が一般的である。

4-1-5 溶射の変状

溶射皮膜の変状は大きく分けて以下の3種類に分類できる。これらの変状は発生原因により発現する時期が異なるものと考えられる。

また、促進耐食試験などで見られる溶射皮膜の経時劣化も概ねこれらに代表される。

- ①溶射皮膜の割れ、膨れ、はがれ
- ②溶射皮膜の白錆化、消耗
- ③局所的な赤錆の発生

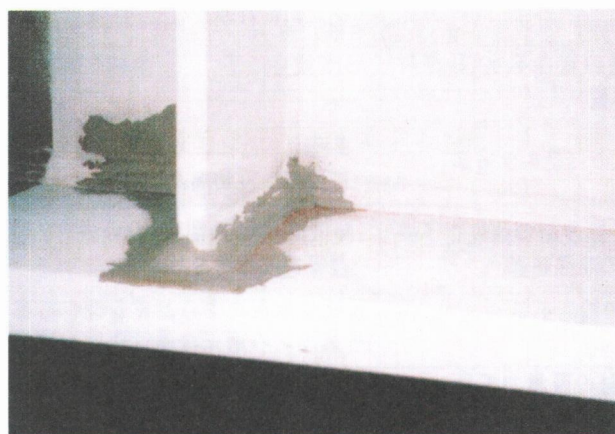


写真 4-1 溶射皮膜のはがれ

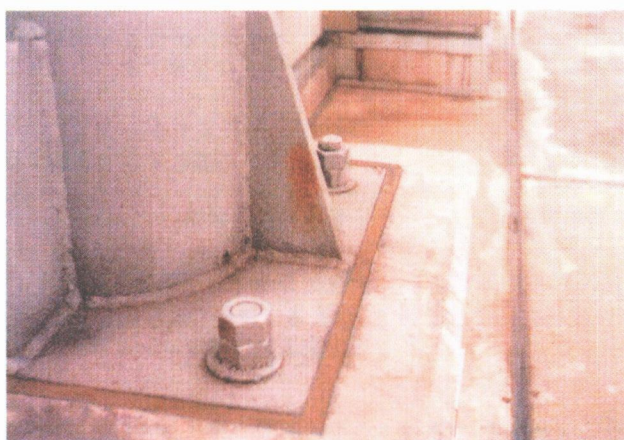


写真 4-2 局所的な赤錆

* 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(案)」
より抜粋

溶射皮膜が変状する経緯には、種々のケースが考えられるが、施工面、構造面から考えられる主な要因とその対策を下表に示す。

表 4-3 溶射皮膜の変状の要因と対策

溶射皮膜の割れ、膨れ、はがれ

要因		対策
素地調整	素地鋼材の黒皮除去不良	ブラスト処理で除去する。又はショッププライマー鋼材を適用する。
	素地鋼材の浮き錆除去不良	ブラスト処理及びパワーツール処理で完全に除去する。
	素地鋼材の油脂類除去不良	溶剤脱脂処理を入念に実施する。特に多量の油脂残留部はブラスト処理などの機械的処理が望ましい。
	超音波探傷検査時の液体グリセリン除去不良	大量の水と洗浄用ブラシで完全に除去する。
	素地調整後の付着粉塵除去不良	エアブローによる清掃後、溶剤脱脂処理を入念に行う。
	粗面調整の粗さ不足	JIS規格に基づく研磨材を選定する。
	表面粗さのばらつき過多	表面粗さ計による管理を徹底する。
	ブラスト処理面の活性化不良	制限時間の厳守、湿度、露点管理又は湿度コントロール
溶射	溶射熱による皮膜の収縮	溶射ガンの運行速度及び被溶射面との距離を適正に管理する。
	溶射皮膜の密着力不足	溶射ガンと被溶射面の適正な距離を確保し、ガンの離れすぎを管理する。
	溶射皮膜の凝集力不足	
	溶射直後、封孔処理前の冠水	封孔処理までの保護養生を徹底する。又は直後に封孔処理を実施する。屋内施工又は湿度コントロール。
	粗面処理面に水分残留	溶射施工前の確認検査を徹底する。屋内施工又は湿度コントロール。

溶射皮膜の白錆化、消耗

要因	対策
コンクリートからのアルカリ水との接触による溶射皮膜の消耗	遊離石灰の処置 塗装
融雪剤	溶射皮膜の増強（皮膜厚アップ）、表面塗装

局所的な赤錆の発生

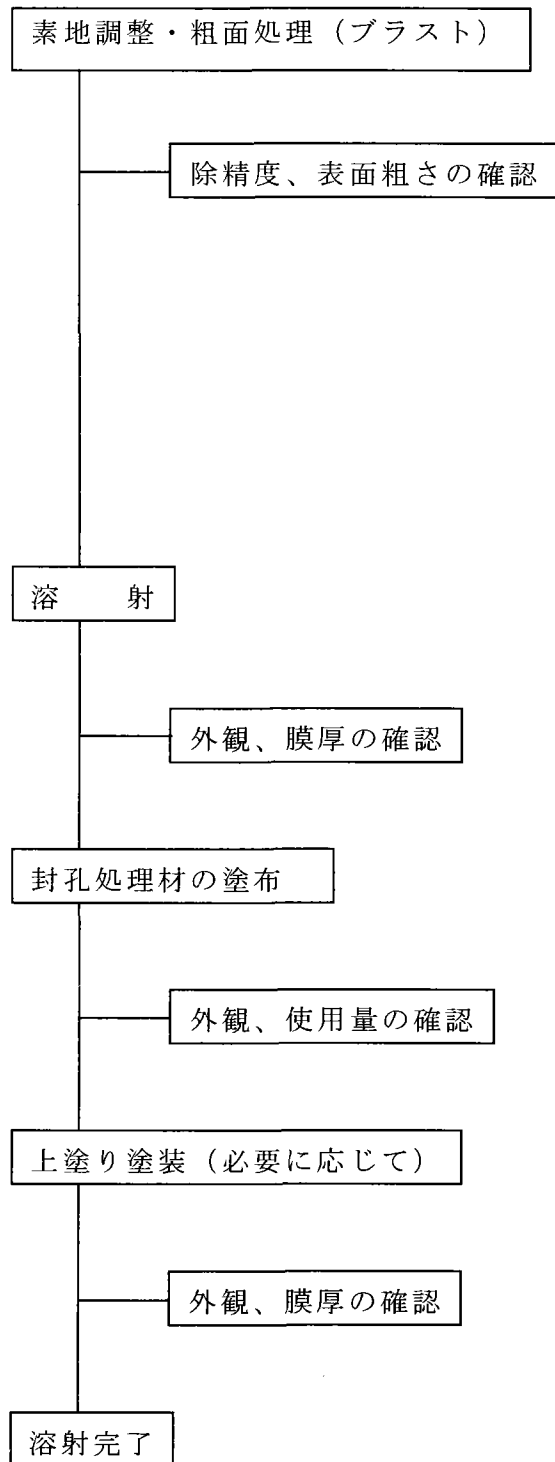
要因	対策
局所的な皮膜厚不足	溶射皮膜の膜厚管理を徹底する 部材自由端角部などをR加工する
異種金属との接触	絶縁処理を施す
もらい錆（外部からの錆汁）	錆発生原因の除去

* 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(案)」より抜粋

4 - 2 溶射の施工

4-2-1 作業工程

【粗面形成材を用いない場合】



【粗面形成材を用いる場合】

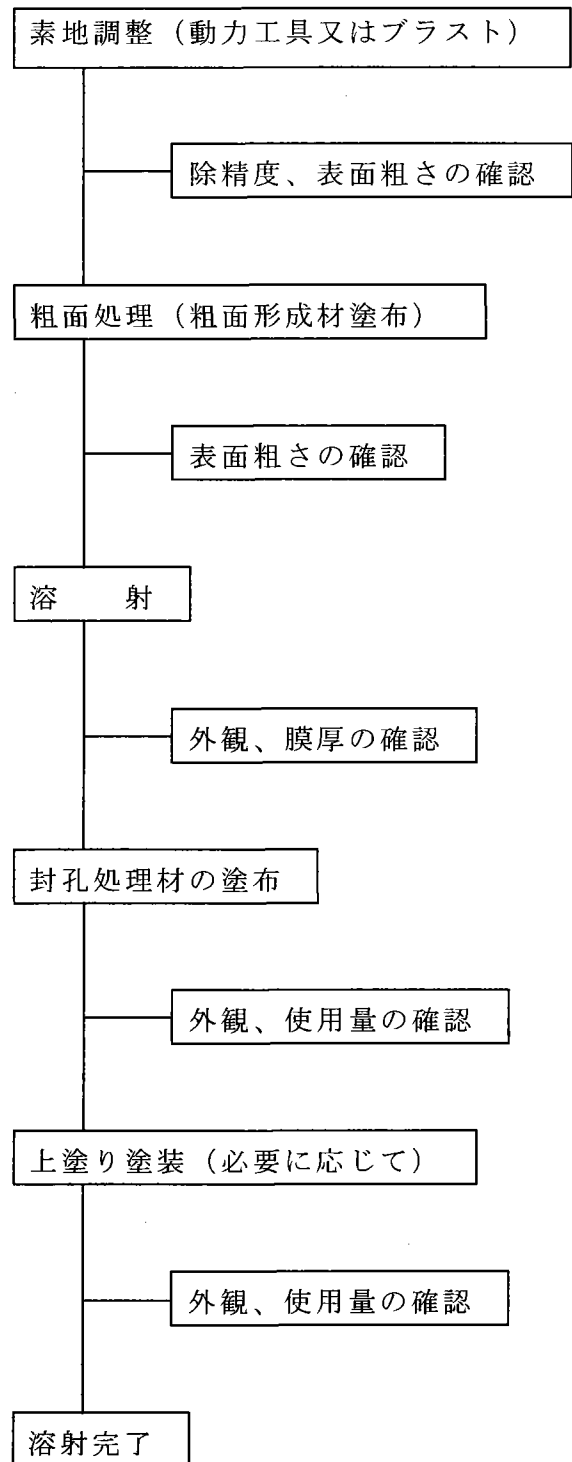


図 4-7 溶射作業工程

4-2-2 各溶射工程

1) 素地調整

素地調整は、溶射面に付着したミルスケール、さび、油脂類、汚れなどの付着障害物を除去し、溶射皮膜の付着性を確保するための粗度を形成するとともに、犠牲陽極作用を働かせるために素地との導電性を確保する目的で行う。

素地調整の方法は一般的には粗面形成材を用いない場合はブラスト処理を、粗面形成材を用いる場合は動力工具処理またはブラスト処理を用いる。

素地調整の管理は目視及び表面粗さ計による除錆度、表面粗さの確認が一般的である。

2) 粗面処理

溶射皮膜の密着性を向上させるために、素地に不規則な凹凸を付ける前処理であり、素地調整と兼ねてブラスト処理で凹凸を付ける方法と、粗面形成材を塗布する方法がある。

粗面形成材を塗布する場合は、動力工具またはブラストによる素地調整を行った上に粗面形成材を塗布することにより素地に下図のような凹凸ができる。

粗面形成材の管理は目視による除錆の確認及び表面粗さ計による表面粗さの確認が一般的である。

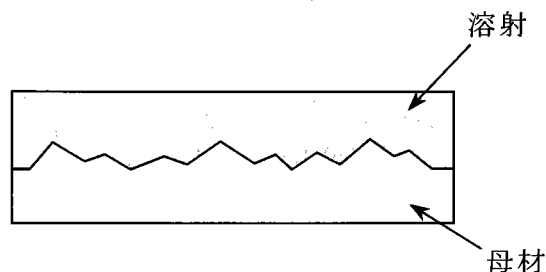


図 4-8 ブラスト処理断面

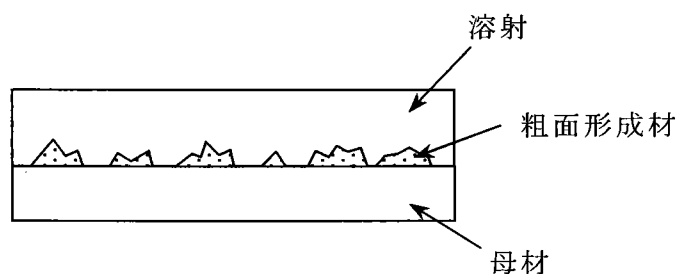


図 4-9 粗形成材処理断面

3)封孔処理

溶射したままの皮膜の内部には、多くの気孔が存在し、封孔処理を施さない溶射皮膜は腐食性因子が気孔を通過して素地に達して素地を腐食することにより、密着が損なわれ剥離することがある。

封孔処理は通常の塗装と違って膜を形成するのが第一の目的ではなく、封孔材を溶射皮膜に塗布することにより、封孔材が溶射皮膜全体に浸透して皮膜内の気孔がなくなり皮膜内部は強化され、溶射のままで使用する場合に比べて耐久性が向上する。

封孔処理材を着色することにより、上塗り塗装のように希望の色調とすることが可能である。

封孔処理の管理は目視等による封孔処理状態の確認（外観、乾燥状態）とともに、膜厚の測定が困難なことから、封孔処理材の使用量により管理することが重要である。

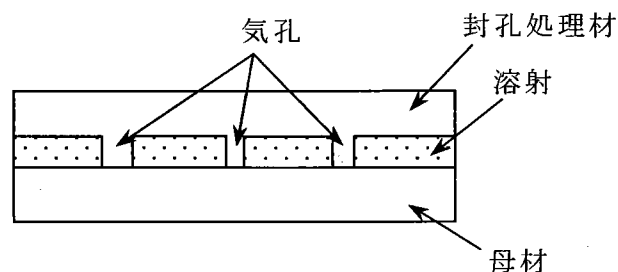


図 4-10 封孔処理材断面

4)上塗り塗装

溶射面に上塗り塗装を施す理由として、溶射皮膜は銀白色の金属色調でありこれが周囲の景観に合致しない場合や、塗装による溶射皮膜の強化および塗膜性能の持続が期待できることが挙げられる。すなわち、溶射皮膜上に塗装することにより、構造物の外観を環境に合わせた色調にするとともに耐久性、耐汚染上の向上が図れる。

溶射皮膜の上に適合する塗装系は油性系塗料以外のものであれば問題ない。ただし、溶射上に塗装する場合は塗装本来の光沢が得られないことがあるため注意する必要がある。

上塗り塗装の管理は一般的に目視等による上塗り塗装状態の確認（外観、乾燥状態）及び電磁式微厚計による塗膜厚の計測により行う。

4-3 溶射の鋼橋適用への課題

①狭隘部の処理

溶射が困難な狭隘部には、スカーラップのコバ面や HTB 継手部の一部、鋼床版の縦リブや耳縦桁の一部などがある。現状ではこれらの箇所にも局部的な塗装を行う例もあるが、防食の耐久性を平準化するためには、これらの部位にも溶射をすることが望ましい。

狭隘部の溶射を行うためには溶射ガンの改良や溶射を考慮した設計が必要である。また、一般的に溶射困難な箇所は目視による確認が難しいことから、品質管理方法についても検討する必要がある。

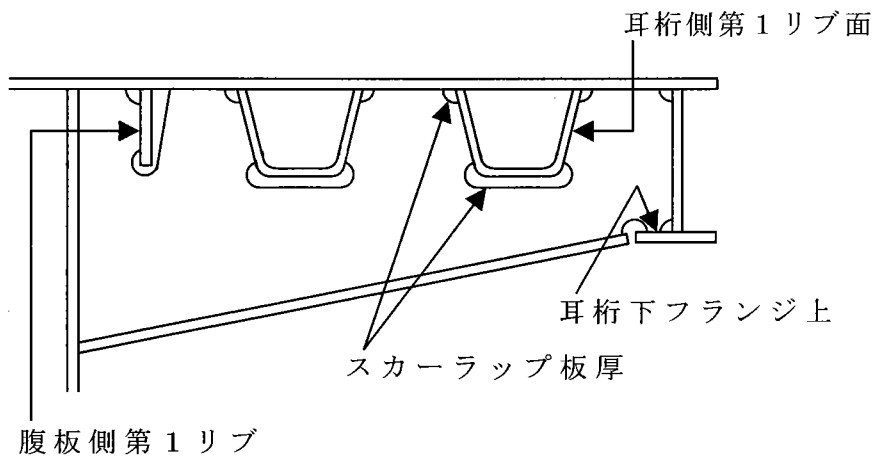


図 4-11 溶射困難箇所の一例

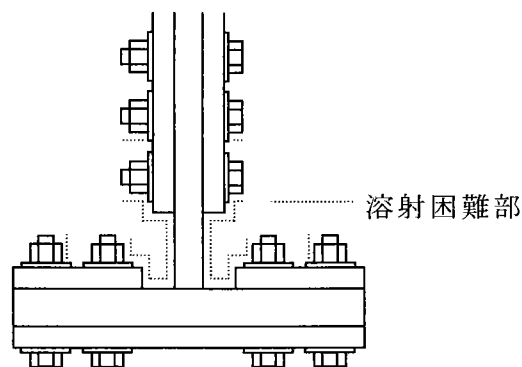


図 4-12 HTB継手部の溶射困難な部位

②現場継手部の対応

架設現場で現場継手部の溶射を行う場合、「現場でのブラスト作業が発生するため防塵対策や安全対策が必要となる」、「現場での作業量が多くなることから工期やコストが増大する」といった課題が生じる。

また高力ボルトに溶融亜鉛メッキ高力ボルトを採用する例があるが、メッキボルトを使用することで現場での溶射作業は少なくすむ反面、「メッキボルトを使用すると従来よりボルト本数が増える」、「溶射部とメッキ部とで耐久性が異なる」といった課題が生じる。

4-4 鋼橋における溶射の実績

本項は鋼構造技術研究会施工部会で実施したアンケートの結果による。

4-4-1 溶射の採用実績

1)平成11～12年度の鋼橋防錆方法の実績では、溶射の割合は重量比・件数比とも全体の1%であった。

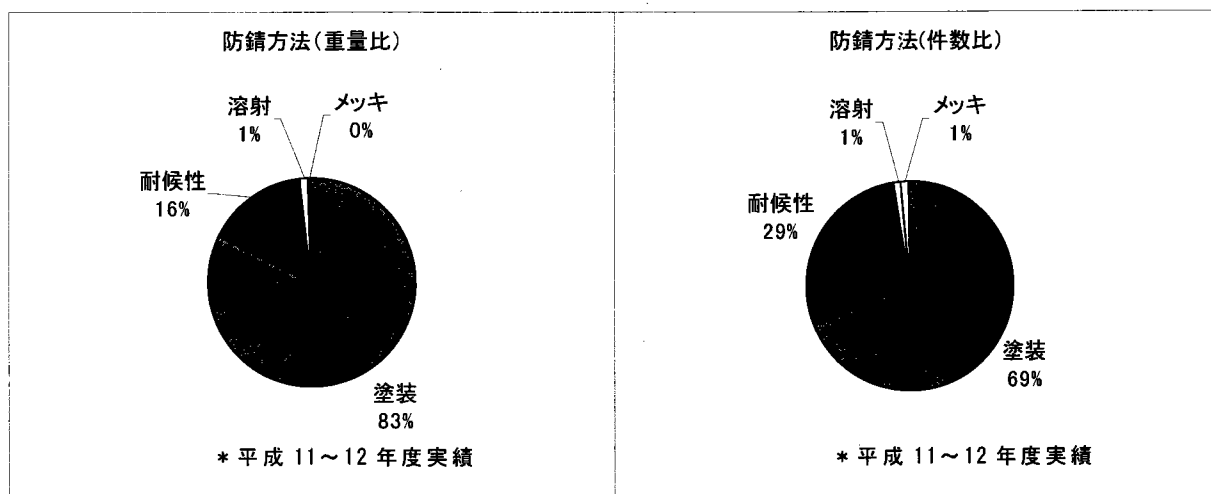


図 4-13 防錆方法

2)主な発注先としては、福北公社が全体の49%と最も多く、続いて国土交通省（旧運輸省）、JRとなっている。平成11年から平成12年にかけては福北公社での溶射採用により、4件から12件と増加している。

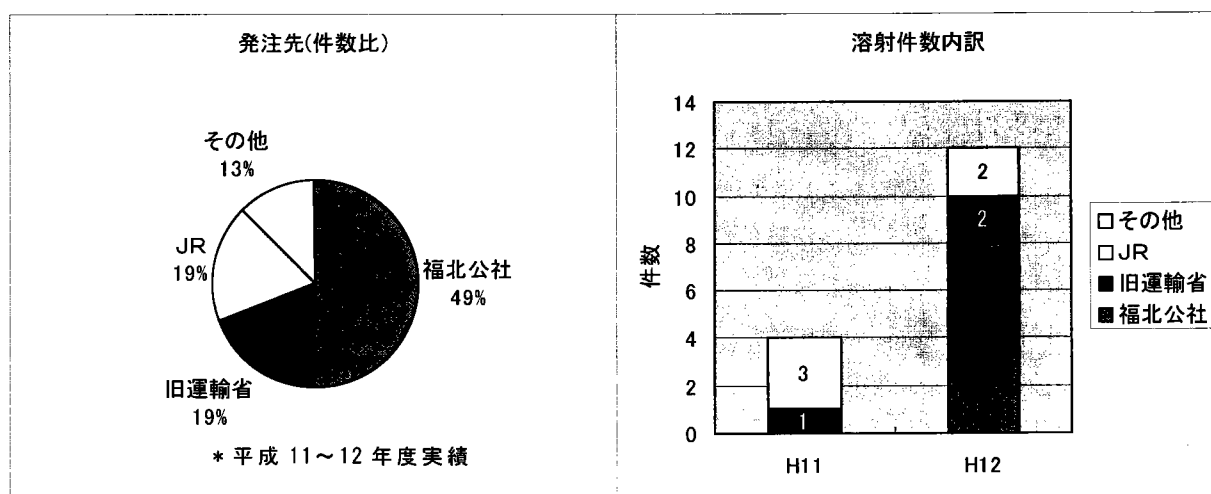


図 4-14 溶射適用物件の発注先

3)溶射方法及び溶射材料は常温アーク溶射（Zn・Al擬合金溶射）が67%で最も多かったが、これは福北公社で常温アーク溶射（Zn・Al擬合金溶射）が採用されるケースが多い（アンケートの範囲では全て常温アーク溶射であった）ことによる。なお、平成13年度以降は福北公社でもフレーム溶射の割合が増えている傾向にある。

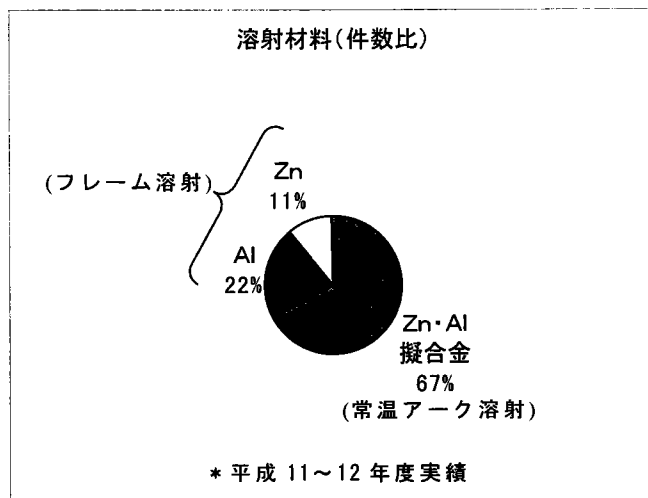


図 4-15 溶射材料及び溶射方法

4)MS工法における素地調整方法は約9割の物件でスweepプラストを行っている。

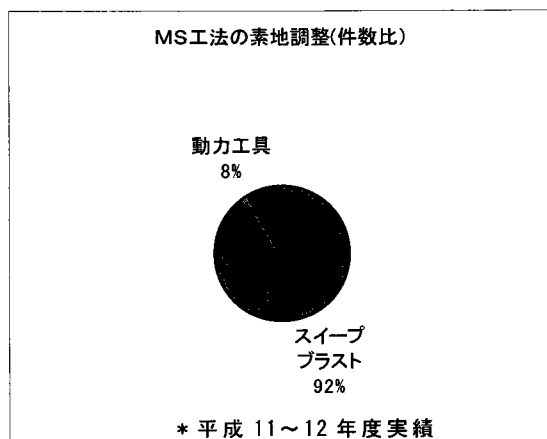


図 4-16 MS工法における素地調整方法

4-4-2 溶射の問題点

- ①作業能率が悪く工期がかかる。また作業単価も高い。
- ②スカーラップ、ボルト孔部等で溶射困難な部位がある。
- ③溶射皮膜の膜厚がばらつき、色むらが見られる。
- ④封孔処理材による着色に色むらが見られる。
- ⑤出荷前に溶射に当て傷等があった場合、溶射による補修が困難である。

参考文献・資料

- 1) 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（案）」
2001.4
- 2) JIS H 9300-1999「亜鉛、アルミニウム及びそれらの合金溶射－作業標準」
- 3) JIS H 8300-1999「亜鉛、アルミニウム及びそれらの合金溶射－溶射皮膜の品質」
- 4) JIS H 8401-1999「溶射皮膜の厚さ試験方法」
- 5) JIS H 8661-1999「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」
- 6) ISO 8501-1:1988「塗料及びその関連製品の施工前の素地調整－表面清浄の目視評価」
- 7) (社)日本道路協会「鋼道路橋塗装便覧」H2.6
- 8) MS工法協議会「福岡北九州高速道路公社 福岡都市5号線鋼製橋脚及び鋼桁防食仕様（案）」H12.8
- 9) 日本メタライジング防錆協会「低温アーク溶射技術について」（技術説明会資料） H12.11
- 10) (社)日本橋梁建設協会「鋼橋への亜鉛アルミ溶射の適用について」（技術講習会資料） H12.11
- 11) (社)日本橋梁建設協会「亜鉛アルミ溶射の品質管理について」（技術講習会資料） H12.11