

鋼構造物への適用に向けた粉体塗料の防食性能に関する検討

○山中翔¹⁾, 坂本達朗¹⁾, 木村武久²⁾, 吉村秀治²⁾

1. はじめに

鋼構造物の維持管理において、腐食は安全性に関わる重大な変状の一つである。このとき、鋼構造物に対して腐食を防止（以下、防食とする）する代表的な手法は塗装であり、現場での施工が容易であるとして、有機溶剤を用いた液状の塗料（以下、溶剤型塗料とする）が一般的に使用される¹⁾。近年、鋼構造物の維持管理に対する省力化や費用の低減の観点から、現行よりも長期間の防食性を有する溶剤型塗料が求められている。しかしながら、溶剤型塗料の技術開発は古くから行われており、材料レベルでの更なる防食性の向上は鈍化傾向にある。そのため、防食性の向上に対しては、溶剤型塗料以外の塗料構成についても検討する必要がある²⁾。

そこで、筆者らは溶剤型塗料以外で汎用的に使用される塗料として、熱硬化性タイプの粉末状の塗料（以下、粉体塗料とする）に着目した。本稿では、粉体塗料の特徴について述べるとともに、代表的な鋼構造物である鋼橋に対する粉体塗料の適用可能性を把握するため、筆者らがこれまでに実施した内容^{3,4)}について解説する。具体的には、鋼橋への適用に向けて最適化した粉体塗料を用いた塗装仕様について、屋外暴露試験から防食性を評価した結果を紹介する。さらに、鋼橋を模擬した試験体を対象として、粉体塗料を用いた塗装仕様の施工性を確認するとともに、屋外に暴露した際の長期間の防食性を評価した結果を紹介する。

2. 粉体塗料の特徴

粉体塗料は、溶剤型塗料と同様に、樹脂、硬化剤、顔料および添加剤などを原料としている。粉体塗料を製造する際は、これらの原料を固体のまま混合し、約 100℃で熔融混練する。混練したものを冷却した後に粉砕して微粉化することにより、粉体塗料が製造される。

従来、粉体塗料は電気機器や鋼製家具、ガードレールや自動車部品などの小型製品への適用が多かったが、材料技術や塗装技術の向上によって適用範囲が広がり、近年では高欄や鉄塔などの大型の土木構造物への適用が増えつつある⁵⁾。

鋼材への粉体塗料の塗膜形成機構の概要を図 1 に示す。まず、専用の塗装機により帯電させた粉体塗料を鋼材表面へ付着させる。この工程を静電塗装と呼ぶ。

その後、塗装した鋼材を約 140～200℃に加熱することで粉体塗料が熔融、硬化することで、塗膜が形成される。なお、粉体塗装を

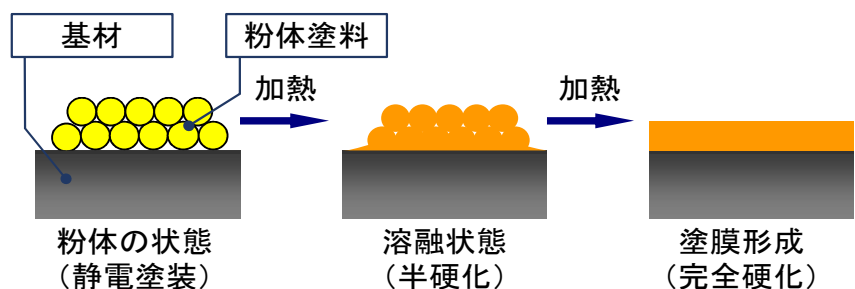


図 1 粉体塗料の塗膜形成機構

厚膜で形成するために、静電塗装時の塗布量を多くした場合は、静電反発によって鋼材表面に塗料が付着しにくくなる。一方で、予め鋼材を粉体塗料の熔融温度である約 140～200℃に加熱した状態で静電塗装することで、鋼材に付着し、熔融した塗料に対してさらに塗料が付着するため、容易に厚膜化できる。

このように、粉体塗料は溶剤型塗料とは異なる方法で鋼材表面に塗膜が形成され、鋼材との密着性の向上や、厚膜化による環境遮断性の向上によって、溶剤型塗料よりも防食性を向上できる可能性がある。

一方、粉体塗料の塗装には加熱を必要とするため、既設鋼橋の塗替えとしての適用は困難であり、新設する鋼橋に対して、鋼橋製作工場での塗装時に適用することが適切と考えられる。

1) 公益社団法人 鉄道総合技術研究所 〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38

2) 株式会社トウペ 東日本事務所 〒346-0016 埼玉県久喜市久喜東 1-6-21 AP011

3. 粉体塗料を用いた塗装仕様に関する検討

長期防食性が期待される溶剤型塗料の塗装仕様では、一般に、鋼材に対して犠牲防食作用を生じる金属溶射や金属めっきのほか、亜鉛粉を含有した塗料が第 1 層目に用いられる⁶⁾。これらの材料は防食下地と呼ばれる。また、第 2 層目以降には防食性に優れるエポキシ樹脂塗料が用いられるが、同塗料は紫外線によって樹脂が分解され易いため、上塗りに耐候性の高いポリウレタン樹脂塗料などが用いられる。

このような塗装仕様の概念と、前章の粉体塗料の特徴を考慮して、筆者らはエポキシ樹脂から成る粉体塗料を用い、これに対して防食下地および上塗り塗料を組み合わせた塗装仕様を提案した。本章ではこの塗装仕様の防食性を評価した結果について解説する。

3.1 試験片

粉体塗料を用いた 5 種類の検討仕様（以下、検討塗装仕様 P-A～P-E とする）を表 1 に示す。粉体塗料には、樹脂や防錆顔料等の原料種や配合割合を検討し、鋼橋への適用に向けて最適化した粉体エポキシ樹脂塗料を採用した³⁾。防食下地には、鋼橋への適用実績がある擬合金常温溶射、アルミニウム (Al) 溶射、亜鉛 (Zn) 溶射、亜鉛粉を含有した塗料である有機ジンクリッチプライマを採用し、上塗り塗料には環境にやさしい水系ポリウレタン樹脂塗料上塗を採用した。また、これらの塗装仕様と防食性を比較する溶剤型塗料を用いた比較用の仕様（以下、塗装仕様 S-A～S-E とする）を表 2 に示す。ここでは、これらの塗装仕様を 150×70×3.2mm のブラスト鋼板に塗装したものを試験片とした。また、塗膜の損傷の有無による防食性の評価を目的として、φ2mm のエンドミルを用いて、各試験片に対して鋼素地まで達する人工傷を導入した（図 2(a)）。

表 1 粉体塗料を用いた検討塗装仕様の概要

試験片記号	P-A	P-B	P-C	P-D	P-E
1 層目 (防食下地)	擬合金常温 金属溶射 Zn-Al 系 膜厚：150 μm	Al 溶射 膜厚：150 μm	Zn 溶射 膜厚：150 μm	有機ジンクリッチ プライマ 膜厚：20 μm	下地処理なし
2 層目	粉体エポキシ樹脂塗料 膜厚：200 μm				
3 層目	水系ポリウレタン樹脂塗料上塗 膜厚：30 μm				

注 1：試験片 P-A に対して、ブラスト処理後に粗面化処理（変性エポキシ樹脂セラミック骨材混合）を実施した。

注 2：試験片 P-A, B 及び C に対して、金属溶射皮膜中の空隙を樹脂で埋める封孔処理を実施した。

表 2 溶剤型塗料を用いた比較用塗装仕様の概要

試験片記号	S-A	S-B	S-C	S-D	S-E
1 層目 (防食下地)	擬合金常温 金属溶射 Zn-Al 系 膜厚：150 μm	Al 溶射 膜厚：150 μm	Zn 溶射 膜厚：150 μm	有機ジンクリッチ プライマ 膜厚：20 μm	下地処理なし
2 層目	厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料 膜厚：120 μm				
3 層目	ポリウレタン樹脂塗料用中塗 膜厚：30 μm				
4 層目	ポリウレタン樹脂塗料上塗 膜厚：30 μm				

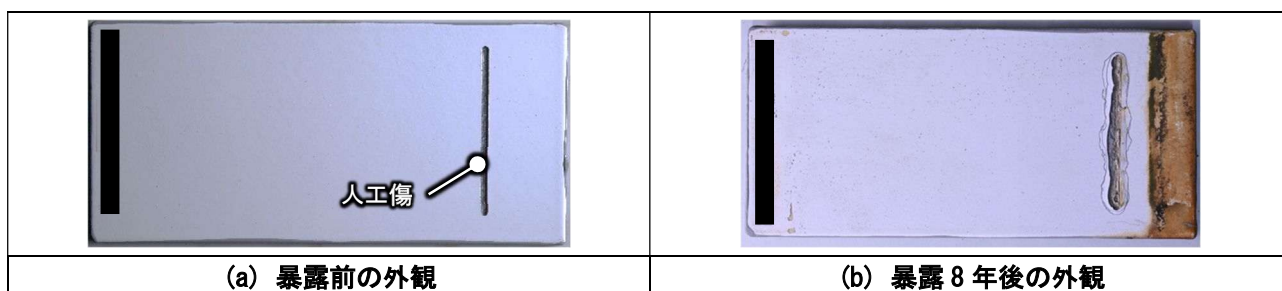


図 2 試験片の外観例

3.2 防食性の評価方法

防食性は、製作した試験片を沖縄本島内の暴露試験場に設置し、8 年間の暴露試験を実施して評価した。試験片は半年毎に回収し、人工傷の周辺（以下、カット部とする）とそれ以外の箇所（以下、一般部と呼ぶ）について、目視による塗膜の割れや剥がれ、さびの発生程度およびカット部に生じる膨れの面積によって防食性を評価した。なお、塗膜膨れの範囲は目視で評価するとともに画像解析によって当該範囲の面積を算出した。

3.3 防食性の評価結果

目視による観察の結果、一般部においては全ての試験片で塗膜の変状や腐食は確認されず、防食性に大きな違いが見られなかった。一方、カット部においては全ての試験片で膨れが確認された。暴露後の塗装試験片の一例として、暴露 8 年後の塗装仕様 P-A の外観を図 2(b) に示す。

次に、各塗装仕様のカット部の膨れ面積について、比較結果を表 3 に示す。粉体塗料と溶剤型塗料の使用に関わらず、防食下地の無い塗装仕様 P-E、S-E では、他の塗装仕様と比較して膨れが拡大傾向にあり、膨れの要因は鋼材の腐食によるものであることが確認された。この結果より、粉体塗料を用いた塗装仕様にも防食下地の導入が重要であることが分かった。また、A1 溶射を防食下地とした塗装仕様 P-B、S-B でも顕著な膨れが生じた。傷内部の腐食生成物の色相が白色であることから、膨れの要因は A1 溶射の腐食であると考えられる。溶射した A1 の皮膜が損傷した場合、損傷箇所近傍の A1 は腐食しやすいことが知られている⁴⁾。特に、本試験ではφ2mm のエンドミルで人工傷を設けており、プラスチックカッターを用いた一般的な人工傷の導入方法よりも傷の幅が大きい。これらにより、塗装仕様 P-B、S-E では他の防食下地を用いた塗装仕様と比較して A1 溶射が顕著な腐食に至ったと推定される。

A1 溶射以外の防食下地を適用した粉体塗料の塗装仕様 P-A、P-C、P-D では、塗膜膨れの大きな変化は見られず、溶剤型塗料において最も塗膜膨れが小さい塗装仕様 S-A と同等の良好な防食性を示した。以上から、粉体塗料を用いた塗装仕様は、Zn を主体とした防食下地を適用することで長期防食性を付与できる可能性が得られた。

表 3 各塗装仕様の膨れ面積の比較結果

提案塗装仕様	膨れ面積の程度	比較用塗装仕様	膨れ面積の程度
P-A	○	S-A	○
P-B	×	S-B	×
P-C	○	S-C	○
P-D	○	S-D	○
P-E	△	S-E	△

注：表中の記号は次の通り。○…膨れ面積 500mm² 以下 △…膨れ面積 500～1600mm² ×…膨れ面積 1600mm² 以上

4. 鋼橋を模擬した試験体を用いた粉体塗料の施工性・防食性評価⁴⁾

粉体塗料の施工性は、鋼橋を模擬した試験体に対する塗装試験を実施して評価した。また、長期間の防食性は、塗装試験で実施した試験体を屋外に暴露して所定時間毎での塗膜の外観観察と付着力測定を実施して評価した。

4.1 試験体

試験体は、鋼橋の一般的な形状である平坦部および狭隘部（エッジ部、溶接部、ボルト部）を有するものとして、溶接構造用圧延鋼材を溶接して作製した 2 体の I 型桁（寸法 800×500×200mm）を、両面からボルト添接したものとした（図 3）。この試験体に対して前章の提案塗装仕様 P-A を適用した。

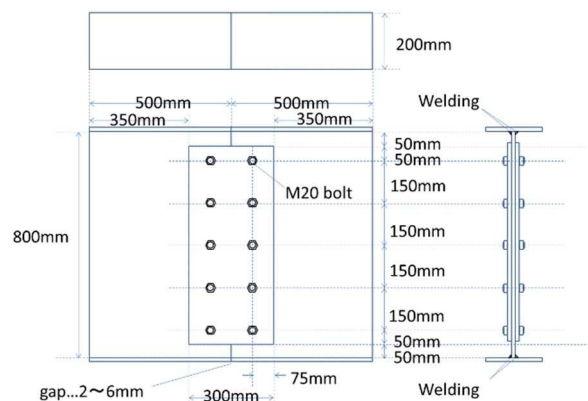


図 3 鋼橋を模擬した試験体の組図

4.2 塗装方法と施工性評価

試験体への塗装は屋内で実施した。通常の条件で擬合金常温金属溶射を実施した後、粉体塗料を塗装した。具体的には、大型電気炉で試験体を約 170℃に予熱した状態で粉体塗料を静電塗装した後、180℃、20 分の条件で塗膜を硬化させた。粉体塗料の塗装状況を図 4 に示す。上塗り塗料は、試験体を十分に放冷した後に実施した。

試験体の外観を確認した結果、塗膜の膨れやピンホールの発生は見られなかった。一方、各部材のエッジ部では部分的に塗膜の薄い個所が確認されたほか、ボルト部ではボルト、ナット、平座金、添接板といった部材間で塗膜が連続的に形成されていなかった(図 5)。

このような傾向は溶剤型塗料による塗装でも確認されるが、塗膜と塗膜の間隙から腐食が進行する懸念がある。このため、粉体塗料を鋼構造物に適用する場合には、エッジ部やボルト部への塗装を改善する手法の検討が必要である。その手法として、今後は、塗装した粉体塗料が熔融する際の流動性の最適化に向けた材料配合や塗装方法について検討する。

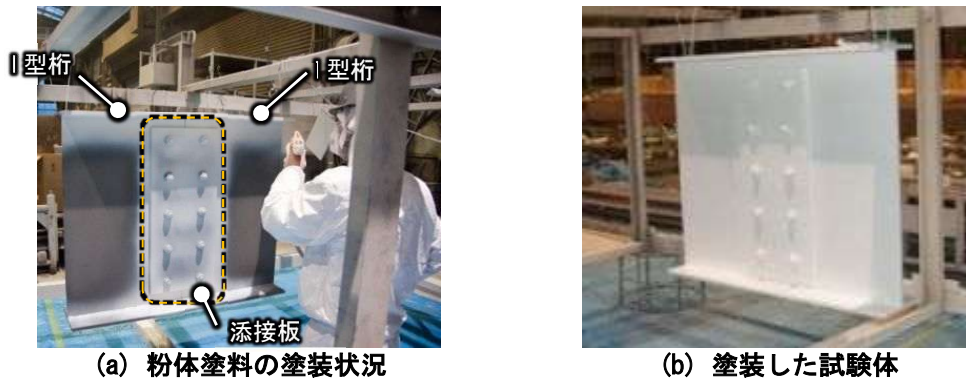


図 4 試験体への粉体塗装状況

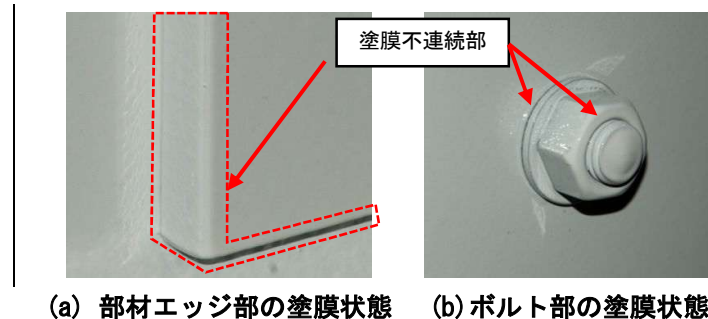


図 5 塗膜の不連続部分の例

4.3 暴露方法および防食性評価

塗装後の試験体は、千葉県銚子市内の暴露試験場に設置し、約 10 年間の暴露試験を実施した。暴露試験場での鋼橋を模擬した試験体の架設状況を図 6(a) に示す。なお、試験体の I 型桁部分の垂直部材(以下、腹板とする)の両面が南北を向くように設置した。

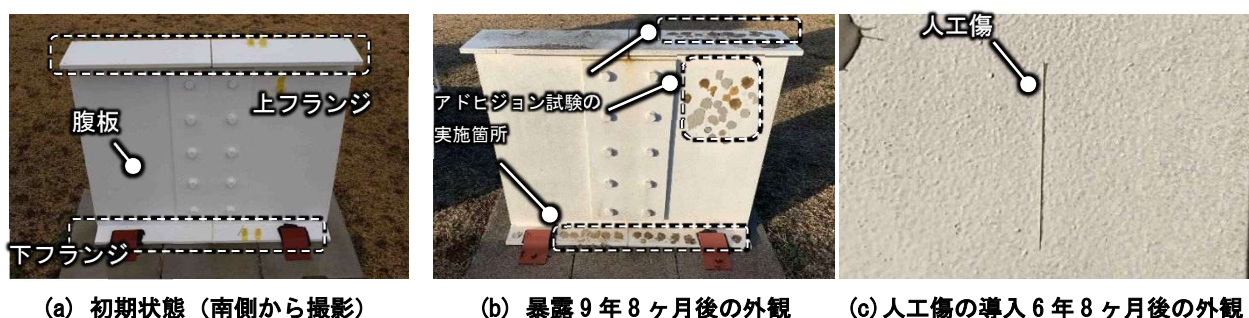


図 6 暴露した試験体の外観

防食性は、目視による塗膜の割れや剥がれ、さびの発生程度を確認するとともに、現場における一般的な塗膜特性評価試験であるアドヒジョン試験での付着力測定結果から評価した。なお、アドヒジョン試験の実施箇所は試験体の腹板の両面、上側の水平部材（以下、上フランジとする）の上面および下面南側、下側の水平部材（以下、下フランジとする）の上面南側とした。

暴露開始 9 年 8 ヶ月後の試験体の外観を図 6(b) に示す。外観を評価した結果、前節で述べた塗膜の不連続箇所を含めて、全ての部位において塗膜の変状や腐食は確認されなかった。また、暴露から 3 年後の調査時に試験体の各面に対して、カッターを用いて長さ約 50mm、幅約 0.1mm の人工傷を導入した結果、いずれからも鋼材の腐食や塗膜の膨れ、割れといった変状は確認されなかった（図 6(c)）。このように、塗膜欠陥部でも腐食が生じなかった要因の一つに、防食下地が鋼材の防食に寄与したことが挙げられる。

また、試験体の各部位に対する付着性を評価した結果、破断時応力はいずれの測定箇所においても 7 ～ 11MPa の範囲であり、経年による低下傾向は認められなかった。この結果より、塗膜は全体的に良好な付着性を保持していると考えられる。

これらの結果から、複雑な形状を有する試験体においても、粉体塗料を用いた塗装仕様は良好な防食性を期待できると考えられる。なお、本試験の暴露場所は、沖縄本島や宮古島などの環境と比較すると腐食しにくい環境である⁷⁾。このため、複雑な形状の部位に対して同塗装仕様を適用した場合の防食性について、今後は腐食性の高い環境に対する評価を実施する必要がある。

5. まとめ

鋼橋に対する粉体塗料の適用可能性を把握するため、鋼橋向けに最適化した粉体塗料を用いた塗装仕様の防食性評価結果や、鋼橋を模擬した試験体を対象とした粉体塗料の施工性・防食性の評価結果について紹介した。得られた主な知見は、以下の通りである。

(1) 鋼橋向けに最適化した粉体塗料を用いた塗装仕様を検討した結果、亜鉛を含む防食下地を第 1 層目に配置することで、長期間の防食性を付与できる可能性が得られた。

(2) 鋼橋を模擬した試験体に対して粉体塗料を塗装した結果、概ね問題なく塗装できたものの、鋼橋を構成する部材間で塗膜が不連続となる場合があることが確認された。

(3) 鋼橋を模擬した試験体に対して暴露試験を 10 年近く実施したところ、塗膜欠陥部においても腐食は確認されず、良好な付着性を保持していた。これにより、粉体塗料を用いた塗装仕様は長期間に渡って高い防食性能を有する可能性が得られた。

今後は、鋼橋を構成する部材間において粉体塗料が溶融する際の流動性の向上に向けた材料配合や塗装方法について検討するほか、腐食性の高い環境での暴露試験を通じて長期間の防食性評価を実施する予定である。本稿での知見が、鋼橋の防食に関する維持管理の一助となれば幸いである。

参考文献

- 1) 関西鋼構造物塗装研究会：塗る，2014
- 2) (公財)鉄道総合技術研究所：鋼構造物塗装設計施工指針，2013
- 3) 第 43 回防錆防食技術発表大会講演予稿集，pp. 31-36，(一社)日本防錆技術協会
- 4) 第 44 回防錆防食技術発表大会講演予稿集，pp. 67-72，(一社)日本防錆技術協会
- 5) 岡村俊良，黒田清次，水落宣夫，須藤忠：送電用鉄塔部材への粉体塗装，鉄塔，No. 128，pp. 47-55，2019
- 6) (一社) 日本鋼構造協会：「重防食塗装 防食原理・設計から施工・維持管理まで」，2012
- 7) (財)日本ウエザリングテストセンター：大気暴露試験ハンドブック，2007