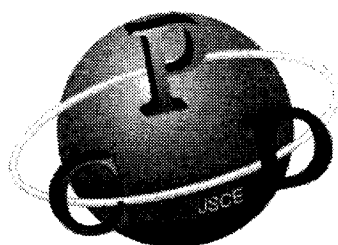


平成25年度技術発表会

論文集

平成25年11月22日



公益社団法人 土木学会西部支部

平成 25 年度技術発表会論文集

2013年11月22日初版

発行者 公益社団法人 土木学会西部支部  
発行所 公益社団法人 土木学会西部支部  
編集組織 公益社団法人 土木学会西部支部技術者教育部会  
(主査：矢野 真一郎、副主査：中村 聖三  
委員：野中 雄一郎、村瀬 聖文、寺町 賢一、松尾 英治、六丸 政伸)  
〒810-0041  
福岡市中央区大名2-4-12 シーティーアイ福岡ビル2階  
電話：092-717-6031、FAX：092-717-6032  
E-mail：jsce-w@io.ocn.ne.jp  
ホームページ：http://www.jsce.or.jp/branch/seibu/index.html

印刷 株式会社サガプリンティング  
〒849-0936  
佐賀市鍋島町森田909  
電話：0952-34-5100、FAX：0952-34-5200

# 金属粉を含有するシリコーン樹脂塗料を用いた

## 重防食塗装システムの性能評価

(株)シールドテクス 砂田 正明

小林 和夫

三菱重工鉄構エンジニアリング(株) 鈴木 俊光

### 1. はじめに

橋梁等，社会資本の耐久性向上に対する要求が近年高まっている．耐久性向上，長寿命化は，これらにかかる維持管理費用の低減に直結し，ライフサイクルコスト（LCC）の削減，ひいては社会資本整備費用の低減にもつながることから，我が国にとっては喫緊の課題の1つであることは疑いのないところである．

現在，鋼構造物の防食技術による耐久性向上，長寿命化策としては，重防食塗装や溶融亜鉛メッキ，溶射によるところが主体である．重防食塗装は，鋼道路橋等の大型鋼構造物や海浜部等，厳しい腐食環境に置かれる鋼構造物に対する新規塗装仕様の一般外面塗装系としてC-5塗装系（以下，C-5と略記）が，塗替え塗装仕様の塗替え塗装系としてRc-I塗装系（以下，Rc-Iと略記）が推奨されている<sup>2)</sup>．これらはジンクリッチペイントを防食下地とし，これに発錆要因の鉄素地への侵入を防ぐ目的でエポキシ樹脂系塗料を重ねて塗布し，加えて耐紫外線性を向上させ美観を保持する目的でふっ素樹脂系塗料を塗り重ねることで，防錆性能と耐紫外線性能とを併せ持つ設計となっている．重防食塗装は，通常の塗装と同様に特別な設備，器具を必要とせず，施工が簡便であり，現場において補修，塗替えが容易であることも特長の1つといえるが，大半は主剤と硬化剤の2液を配合する上，シンナーを加えると3液配合となり，さらにC-5やRc-Iの場合では5層塗りとなるため，作業に手間と時間を要する．

溶融亜鉛メッキは，亜鉛の溶融工程があるため工場のみでしか加工出来ず，鋼材を浸漬する槽は鋼材に適した大きさのものを処理工程数だけ準備する必要があり，ものによっては鋼材の製造地と溶融亜鉛メッキの加工地，消費地（鋼構造物の施工現場）とが遠く離れており，運送に多大な手間とコストが必要となる場合がある．

溶射は，熱により軟化した材料を対象構造物に吹き付け，表面に皮膜を形成する工法である．溶融亜鉛メッキと異なり施工する鋼材の大きさに制限はないが，小さな曲率半径や複雑な形状を持つ部材や狭陰部への施工，補修が難しいといったデメリットもある．

本文で報告する金属粉を含有するシリコーン樹脂塗料を用いた重防食塗装システムは，図-1に示すように第1層にシリコーン樹脂と亜鉛，アルミニウム粉末からなり犠牲陽極作用により防食機能を発現する防食下地（以下，RF防食下地と略記）を，第2層にシリコーン樹脂とアルミニウム粉末からなり，空隙のない連続塗膜とアルミニウム粉末とにより遮断防食機能を発現する上塗（以下，RF-P上塗と略記）を配した2層で構成されており，非常に高い防錆効果を発揮する．

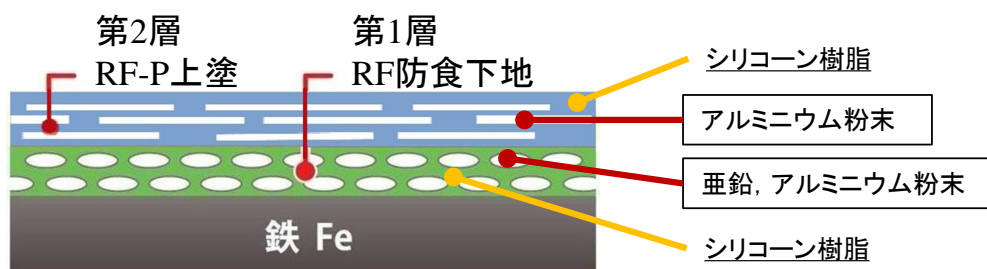


図-1 金属粉を含有するシリコーン樹脂塗料を用いた重防食塗装システムの模式図

本文では、金属粉を含有するシリコーン樹脂塗料を用いた重防食塗装システムについて、従来の重防食塗装や溶融亜鉛メッキ、溶射との性能比較評価試験につき報告を行うものである。

## 2. 性能比較評価試験

### 2.1 従来の重防食塗装との性能比較

#### 2.1.1 複合サイクル試験

金属粉を含有するシリコーン樹脂塗料を用いた重防食塗装システムと従来の重防食塗装との耐久性比較のため、複合サイクル試験を行った。試験の条件は、JIS K 5600-7-9 サイクル A に従い、試験装置内にて試験片に対して塩化ナトリウム 5%水溶液を 35℃で 2 時間噴霧し（塩水噴霧）、これを 60℃、25±5%RH で 4 時間乾燥させ（乾燥）、さらに 50℃、95%RH で 2 時間湿潤させ（湿潤）、塩水噴霧→乾燥→湿潤を 1 サイクルとして 315 サイクル行った。

比較対象としては、C-5 と Rc- I とを選択し、金属粉を含有するシリコーン樹脂塗料を用いた重防食塗装システムとこれらの塗装仕様を表-1 に、315 サイクル後の試験結果を図-2 に示した。

一般部では、金属粉を含有するシリコーン樹脂塗料を用いた重防食塗装システム、C-5、Rc- I のいずれも異常は認められなかった。

クロスカット部では C-5 については、直径 2～8mm 程度の膨れや鉄素地からの赤錆の発生及び赤錆の発生に基づくと推察される剥がれが認められた。Rc- I については、幅 1～3mm 程度の膨れや鉄素地からの赤錆の発生が認められた。

一方、金属粉を含有するシリコーン樹脂塗料を用いた重防食塗装システムについては、白錆と僅かな赤錆が発生したのみで、塗膜の膨れや剥がれは全く認められなかった。

C-5 や Rc- I には、鉄素地とエポキシ樹脂系塗料からなる防食層との間にジンクリッチペイントが入る様に設計されており、これに含まれる亜鉛が上述のような犠牲陽極作用により、鉄素地を守る効果を及ぼすと考えられている。ところが実際には、C-5 や Rc- I では、試験開始直後においても金属粉を含有するシリコーン樹脂塗料を用いた重防食塗装システムに見られたような犠牲陽極作用発現の目安であるクロスカット部からの白錆の発生は目視では観察できず、試験の進展に従って赤錆や膨れ、剥がれが

表-1 塗装仕様

( ) 内は乾燥膜厚又は塗布量

	金属粉を含有するシリコーン樹脂塗料を用いた重防食塗装システム	重防食塗装 C-5	重防食塗装 Rc- I
第 1 層	RF 防食下地 (100μm)	無機ジンクリッチペイント (75μm)	有機ジンクリッチペイント (600g/m <sup>2</sup> )
第 2 層	RF-P 上塗 (75μm)	エポキシ樹脂塗料下塗 ミストコート (160g/m <sup>2</sup> )	弱溶剤型変性エポキシ樹脂塗料下塗 (240g/m <sup>2</sup> )
第 3 層	—	エポキシ樹脂塗料下塗 (120μm)	弱溶剤型変性エポキシ樹脂塗料下塗 (240g/m <sup>2</sup> )
第 4 層		ふっ素樹脂塗料中塗 (30μm)	弱溶剤型ふっ素樹脂塗料中塗 (170g/m <sup>2</sup> )
第 5 層		ふっ素樹脂塗料上塗 (25μm)	弱溶剤型ふっ素樹脂塗料上塗 (140g/m <sup>2</sup> )

	金属粉を含有するシリコーン樹脂塗料を用いた重防食塗装システム	重防食塗装 C-5	重防食塗装 Rc- I
試験前			
試験後			

図-2 複合サイクル試験結果

\* : 試験後の C-5、Rc- I の試験片表面に見られる白色物は、塩水噴霧時の塩水中に含まれる塩の残留分である。

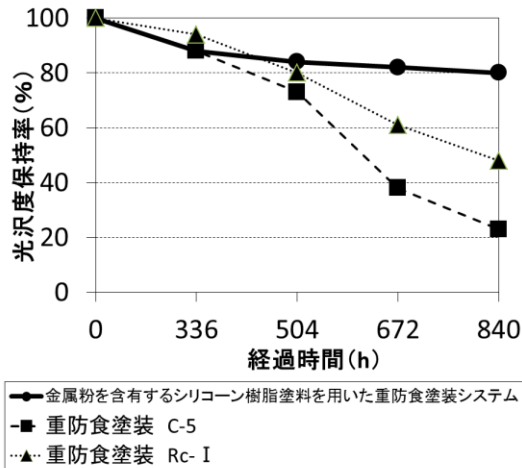


図-3 光沢度保持率の比較

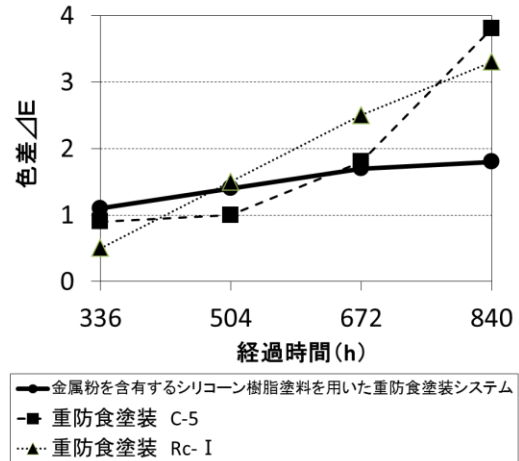


図-4 色差 (ΔE) の比較

見られるようになっていった。このことは C-5 や Rc-I において、クロスカット部の鉄素地の腐食により発生した赤錆がクロスカット部から鉄素地と塗膜との界面を塗膜方向へと成長して塗膜の膨れや剥がれを誘発し、劣化の増大を招いたという劣化機構が考えられる。

一方、金属粉を含有するシリコーン樹脂塗料を用いた重防食塗装システムでは、上述のようにクロスカット部において白錆が発生し、遅れて若干の赤錆が発生しているものの、塗膜の膨れや剥離は起こっていない。これは RF 防食下地に含まれる亜鉛から発生した白錆がクロスカット部の鉄素地を覆い、鉄素地や鉄素地と塗膜との界面への塩分や水分、酸素の供給が抑えられることによりクロスカット部からの発錆やクロスカット部周辺の塗膜の膨れ、剥がれといった不具合の進行が抑制されていることによるものと考察される。このことから金属粉を含有するシリコーン樹脂塗料を用いた重防食塗装システムは、高い防錆性能を有していることが分かった。

### 2.1.2 促進耐候性試験

金属粉を含有するシリコーン樹脂塗料を用いた重防食塗装システムと従来の重防食塗装との耐紫外線性能を比較するため、メタルハライドランプ式促進耐候性試験を行い、塗膜の光沢度保持率を図-3に、色差を図-4に示した。

C-5、Rc-I は、共に試験開始直後から光沢度の減少、色差の増加を示し、840 時間 (5 週間) 後には光沢度保持率がそれぞれ 23、48%、色差がそれぞれ 3.8、3.3 となった。一方、金属粉を含有するシリコーン樹脂塗料を用いた重防食塗装システムでは、光沢度保持率が 80%、色差が 1.8 となり高い耐紫外線性能を保持していることが確認された。

金属粉を含有するシリコーン樹脂塗料を用いた重防食塗装システムは、主としてシリコーン樹脂からなり、樹脂の基本骨格はシロキサン結合 (-Si-O-結合) である。これに対して C-5、Rc-I は主にエポキシ、ふっ素樹脂からなり、樹脂の基本骨格は、通常の有機樹脂と同じ炭素同士の結合 (-C-C-結合) である。地表の太陽光は 300nm 以上の波長領域にあり、ほとんどの有機樹脂はこの領域に感度波長をもっているために紫外線による劣化を起こすが、シロキサン結合の紫外線の吸収は 280nm 以下の領域で起こるため、シリコーン樹脂系塗料は、地表において太陽光の影響を受けることが少ない<sup>3)</sup>。こうした両者の樹脂の基本骨格の違いが塗装の耐紫外線性能に影響したものと考えられる。

## 2.2 溶融亜鉛メッキとの性能比較

次に、金属粉を含有するシリコーン樹脂塗料を用いた重防食塗装システムと溶融亜鉛メッキとの防錆性能の比較のため、CASS 試験を行った。CASS 試験はメッキの性能評価試験として多用されており、試験条件は、JIS H 8502 メッキの耐食性試験方法 7.3 項に従い、試験片に対して塩化ナトリウム 5% に塩化第二銅を添加し pH3 に調整した水溶液を 50°C で噴霧するものである。

金属粉を含有するシリコーン樹脂塗料を用いた重防食塗装システムの塗装仕様は、RF 防食下地を 100 $\mu\text{m}$  塗布し、これに RF-P 上塗を 75 $\mu\text{m}$  塗布する標準的な仕様を用いた。

比較対象としては、溶融亜鉛メッキ板 HDZ-55（溶融亜鉛メッキ 550g/m<sup>2</sup>以上が施された鋼板）を選択し、試験結果を図-5 に示した。HDZ-55 については発錆が著しいことから、試験後 1 週間（168 時間）で試験を打ち切った。

一方、金属粉を含有するシリコーン樹脂塗料を用いた重防食塗装システムは 2 週間（336 時間）後、クロスカット部にごく僅かに白錆と赤錆が発生したものの一般部には異常は全く認められなかった。

このことは、一般部においては RF-P 上塗が水分、塩分、酸素等の錆の発生要因を遮断していることに起因するものと考察される。また、クロスカット部においては RF 防食下地により犠牲陽極作用が働き、鉄よりも電氣的に卑なる亜鉛が鉄よりも先に錆びることで亜鉛から発生した白錆が鉄素地を覆い、鉄素地や鉄素地と塗膜との界面への水分、塩分、酸素等の侵入が抑制されることによって鉄素地の腐食が抑えられて鉄素地からの赤錆の発生、並びにこれによる塗膜の膨れ、剥離が抑えられているものと考察される。

### 2.3 溶射との性能比較

金属粉を含有するシリコーン樹脂塗料を用いた重防食塗装システムと溶射との防錆性能の比較のため複合サイクル試験を 180 サイクル行い、試験結果を図-6 に示した。試験条件は 2.1.1 項と同様とした。金属粉を含有するシリコーン樹脂塗料を用いた重防食塗装システムの塗装仕様は、RF 防食下地を 100 $\mu\text{m}$  塗布し、これに RF-P 上塗を 75 $\mu\text{m}$  塗布する標準的な仕様を用いた。比較対象としては、JIS H 8300 準拠ガスフレーム式で施工した亜鉛アルミニウム溶射（100 $\mu\text{m}$  厚）にエポキシ樹脂系封孔材を 40g/m<sup>2</sup> 施工したものをを用いた。

溶射についてはクロスカット部、一般部共に白錆が発生した。一方、金属粉を含有するシリコーン樹脂塗料を用いた重防食塗装システムについては、クロスカット部にごく僅かに白錆と赤錆が発生したのみであった。

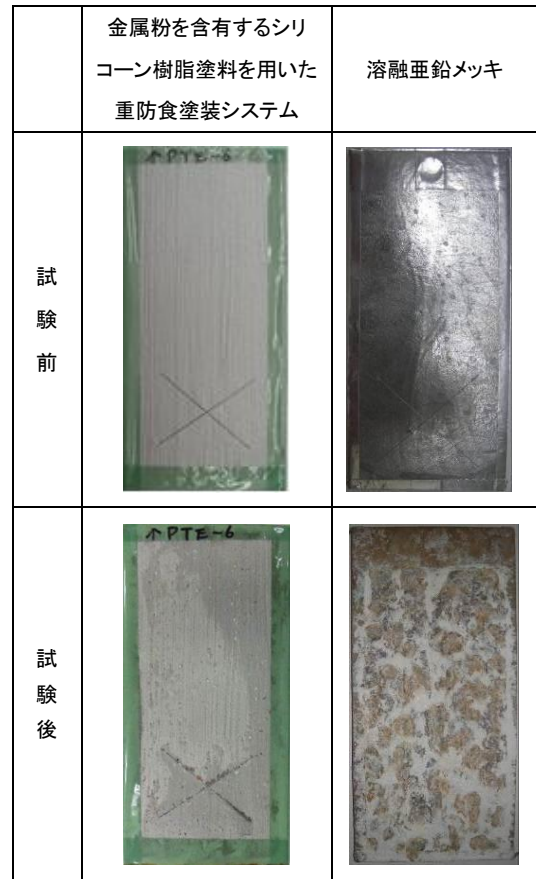


図-5 CASS 試験結果

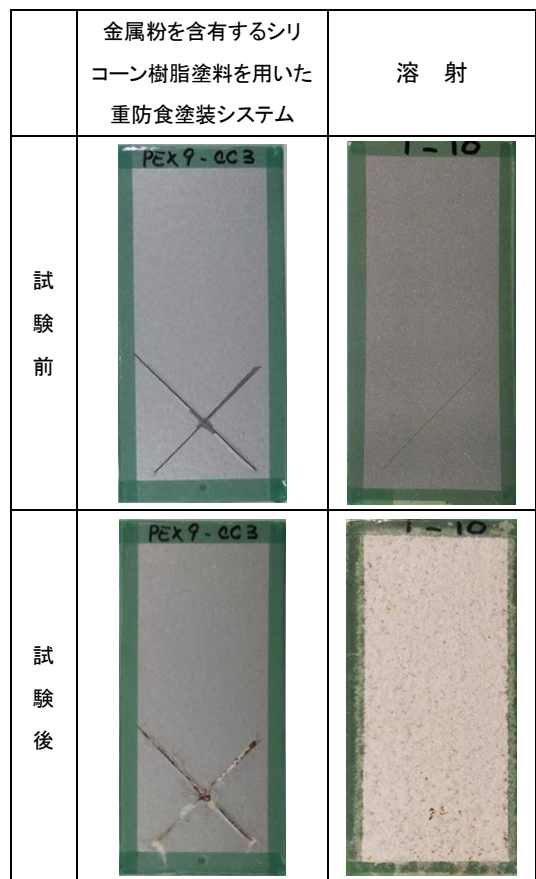


図-6 複合サイクル試験結果

### 3. 重防食塗装の耐久性向上のための防食下地の検討

#### 3.1 防食下地への適用

従来の重防食塗装の耐久性を向上させるためには、防食下地の防錆性能を向上させることが重要であると考えられる。なぜならば、従来の重防食塗装が発錆や紫外線による劣化を起し、ふっ素樹脂系塗料からなる耐紫外線層やエポキシ樹脂系塗料からなる防食層が失われた場合には、ジンクリッチペイントからなる防食下地が鉄素地を守る最後の砦となるためであり、防食下地の防錆、耐紫外線性能の向上が耐久性向上において重要となる。よって、従来のジンクリッチペイントに代わる防食下地として金属粉を含有するシリコン樹脂塗料を用いた重防食塗装システムの RF 防食下地を採用する防食システムを考案した。

この点において RF 防食下地は、犠牲防食機能と耐紫外線性とを併せ持つため、本項では C-5 の防食下地である無機ジンクリッチペイントの置換えとして、表-2 に示すように RF 防食下地を第 1 層に適用し、第 2 層以降は従来の C-5 塗装とする仕様（以下、本塗装仕様と略記）を考えた。なお、従来の重防食塗装 C-5 では、無機ジンクリッチペイントに生じる空隙を封孔するためのミストコート処理は必須であるが、本塗装仕様では RF 防食下地が封孔処理（ミストコート）の不要な連続塗膜を形成することからミストコートは不要となり、本塗装仕様の層数は合計 4 層塗りとなる。C-5 と比較すると 1 層の減少になるが、無機ジンクリッチペイントはミストコートにより封孔されて初めて 1 つの機能を持つため、本塗装仕様は C-5 と比較して仕様変更はないとみなすことが出来ると考える。また、従来のシリコン樹脂系塗料には、重防食塗装の様な有機系塗料は付着し難く、このような防錆システムの確立は困難であると考えられてきたが、本塗装仕様において適用を考えた RF 防食下地は、防錆性能と耐紫外線性能に優れるだけでなく、塗膜表面に適度な凹凸を形成し、アンカー効果により有機系塗料に対して良好な付着性を発現するものと考えられる。

表-2 塗装仕様

( ) 内は乾燥膜厚又は塗布量

	本塗装仕様	重防食塗装 C-5
第 1 層	RF 防食下地 (100μm)	無機ジンクリッチペイント (75μm)
第 2 層	エポキシ樹脂塗料下塗 (120μm)	エポキシ樹脂塗料下塗 ミストコート (160g/m <sup>2</sup> )
第 3 層	ふっ素樹脂塗料中塗 (30μm)	エポキシ樹脂塗料下塗 (120μm)
第 4 層	ふっ素樹脂塗料上塗 (25μm)	ふっ素樹脂塗料中塗 (30μm)
第 5 層	—	ふっ素樹脂塗料上塗 (25μm)

#### 3.2 RF 防食下地とエポキシ樹脂塗料との付着性

RF 防食下地、一般的なシリコン樹脂系塗料、シリコンエラストマー塗料と上塗エポキシ樹脂塗料との付着力を調べるためアドヒージョンテストを行い、試験結果を表-3 に示した。RF 防食下地のみがエポキシ樹脂塗料に対して良好な付着性を示すことが分かった。

#### 3.3 付着性に関する考察

各種シリコン樹脂系下塗塗料と上塗エポキシ樹脂塗料との付着性と付着面の粗さとの関係について考察

表-3 各種シリコン樹脂系塗料の比較

シリコン樹脂系下塗塗料の種類	上塗エポキシ樹脂塗料との付着力 (N/mm <sup>2</sup> )	シリコン樹脂系下塗塗料塗膜表面の Ra	凹凸の大きさ (μm)	
			直径	深さ
RF 防食下地	1.1	6.121	1~27	4.2~12.6
一般的なシリコン樹脂系塗料	0.4	0.648	1~9	0.8~2.6
一般的なシリコンエラストマー塗料	付着せず 測定不能	0.776	2~20	2.4~8.2

するため、共焦点顕微鏡を用いて各種シリコーン樹脂系下塗塗料塗膜表面の中心線表面粗さ（以下 Ra と略記）の測定（JIS B 0601 準拠）を行い、平均値を測定結果として表-3 に示した。Ra が大きいほど表面が粗く、小さいほど表面が平滑であることを表している。同じシリコーン樹脂系塗料にも関わらず、RF 防食下地の Ra は他のそれと比べて約 7.9~9.4 倍大きかった。粗い下地が良好な付着性を有する理由としてアンカー効果が考えられる。

塗膜のアンカー効果についてさらに考察を深めるには、塗膜の凹凸の具合を具体的に知る必要があるため、Ra データから各種シリコーン樹脂系下塗塗料の塗膜表面の凹凸の直径と深さを測定し、表-3 に加えて示した。付着力と凹凸の直径については相関が低いと考えられるが、付着力と凹凸の深さについては一定の相関があると考えられる。具体的には付着力が  $0.4\text{N}/\text{mm}^2$  以下の場合、つまり付着性が不良と判断される場合の凹凸の深さは  $8.2\mu\text{m}$  以下であるという関係である。換言すれば、凹凸が深いほど塗膜の深部まで塗料が浸透し、アンカー効果が効果的に働き付着性が向上するものと考察される。この点、RF 防食下地の凹凸の深さは、他のシリコーン樹脂系塗料に比べて深く、最大で  $12.6\mu\text{m}$  である。このことから、RF 防食下地に対する付着性の良さが凹凸の深さでも裏付けられたこととなる。

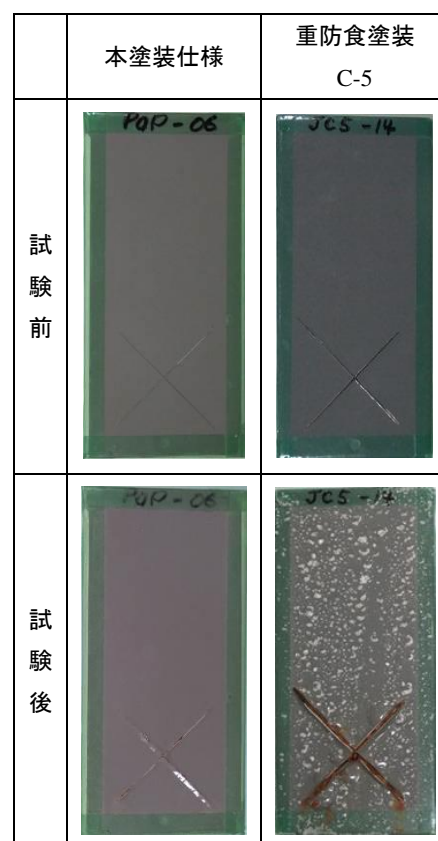


図-7 複合サイクル試験結果

\* : 試験後の C-5 の試験片表面に見られる白色物は、塩水噴霧時の塩の残留分である。

### 3.4 防錆性能の評価

本塗装仕様と C-5 の防錆性能に付き比較評価するため、表-2 に示した塗装仕様につき複合サイクル試験を 315 サイクル行い、試験結果を図-7 に示した。試験条件は 2.1.1 項と同様とした。本塗装仕様と C-5 とでは、一般部では差が認められなかったものの、クロスカット部では本塗装仕様で赤錆、白錆の発生が殆ど無かったのに対して、C-5 は赤錆と赤錆がクロスカット部の塗膜と鉄素地との界面を塗膜方向に成長し、塗膜を持ち上げることにより発生すると考えられる膨れや剥がれが発生した。このことにより本塗装仕様は、高い防錆性能を有することが示された。

## 4. 結論

金属粉を含有するシリコーン樹脂塗料を用いた重防食塗装システムは、従来の重防食塗装や溶融亜鉛メッキ、溶射に比べて同等以上の防錆性能を持つことが分かった。また、従来の重防食塗装の防食下地を無機ジंकリッチペイントから金属粉を含有するシリコーン樹脂塗料を用いた重防食塗装システムの RF 防食下地に置き換えることで従来の重防食塗装の仕様を変更することなく、防食機能の長寿命化を図ることが期待できる。

## 5. 参考文献

- 1) 砂田正明, 小林和夫, 鈴木俊光 : 金属粉を含有するシリコーン樹脂防錆塗料を下塗層に適用した重防食塗装の性能評価, 土木学会年次学術講演会, Vol.68, No.1, pp.587-588, 2013.
- 2) 鋼道路橋塗装・防食便覧 : 社団法人日本道路協会, 2005.
- 3) 伊藤邦雄 : シリコーンハンドブック, pp474-475, 1990.
- 4) (社) 日本鋼構造協会 : 重防食塗装 防食原理から設計・施工・維持管理まで, 技報堂出版, 2012. 2.
- 5) 兼田教一, 中元雄治 : 無機ジंकリッチペイントの剥離に関する調査研究, 防錆管理, pp14~19, 2010, 4.