

# 剥離抑制型塗料適用による効果の検証

Verification of the Effect by Applying Peeling-Resistance Paint

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



清水 悠平  
Yuhei SHIMIZU



寺田 悠貴  
Yuki TERADA



山内 健一郎  
Kenichiro YAMAUCHI

## 1. はじめに

高度経済成長期を中心に日本国内では社会基盤として膨大な数の鋼構造物が建設され、現在においてもその多くが供用され続けている。これら鋼構造物の多くは補修塗装の繰り返しにより維持管理され延命化が図られてきた。しかしながら、繰り返し塗り重ねが行われ過剰膜厚となった塗膜は、塗膜内に蓄積した応力の増大に起因して、塗膜剥離のリスクが高まっていくことが知られており、現在供用されている多くの鋼構造物が同様のリスクを抱えていると言われている。本課題に対して、著者らの研究グループは塗膜の線膨張係数に着目した新たなコンセプトの塗料を研究し、塗り重ねるほど塗膜の自然剥離現象を抑制可能な「剥離抑制型塗料」の開発に成功した<sup>1)</sup>。本開発塗料はこれまでの塗料にはない機能を有しており、既に様々な鋼構造物にて実用化が進められ、徐々にではあるが防食塗料として浸透し始めている。

本報においては、本開発塗料適用による剥離抑制効果のさらなる検証を目的とし、種々の試験を新たに実施したので結果を報告する。また、これらの知見を基に現在開発を進めている新たな機能を付与した剥離抑制型塗料についても、開発経緯・設計コンセプトに焦点を当て概要を報告する。

## 2. 剥離抑制型塗料

### 2.1 線膨張係数

塗膜の自然剥離現象は、塗膜が収縮・膨張した際に発生する応力によって引き起こされる。すなわち、塗膜が収縮・膨張すると塗膜と素地の界面で応力が発生し、応力が素地に対する塗膜の付着力を上回る場合に塗膜の剥離が発生する。塗膜の収縮・膨張は大別して①塗膜内樹脂の硬化反応に起因するもの(塗膜の硬化収縮)、②温度変化に起因するもの(塗膜の熱収縮・熱膨張)がある。著者らの研究グループは過去の検討の結果から、塗膜の自然剥離現象に対して支配的な要因は②温度変化に起因する塗膜の熱収縮・熱膨張であり、①塗膜内樹脂の硬化反応に起因する硬化収縮と比較し、影響がはるかに大きいことを見出した<sup>2)</sup>。

②はすなわち温度変化に対する塗膜の寸法変化であり、温度が1℃変化した時の寸法変化は線膨張係数という塗膜特性で表される。線膨張係数は物質固有の数値であり、物質の種類により大きく異なる。代表的な素材の線膨張係数を表1に示す。

種々素材の中で鉄は線膨張係数が低く、温度変化に対する寸法安定性に優れた素材といえる。一方で、一般的な塗膜の線膨張係数は鉄の5倍以上高い数値を示

し、温度変化に応じて寸法が大きく変化する材料であるといえる。

表1 種々素材の線膨張係数

線膨張係数 [10 <sup>-5</sup> /K]			
鉄		1.2	
一般的な塗膜		鉄の5~6倍	
代表的な素材の線膨張係数			
素材	線膨張係数 [10 <sup>-5</sup> /K]	素材	線膨張係数 [10 <sup>-5</sup> /K]
アルミニウム	2.4	ニッケル	1.3
金	1.4	ポリエチレン	18.0
銀	1.9	ポリカーボネイト	7.0
銅	1.7	エポキシ塗膜	6.5
亜鉛	3.3	ウレタン塗膜	9.7

## 2.2 剥離抑制メカニズム

前述のとおり、塗膜の自然剥離現象に対して支配的な要因は、温度変化に起因する塗膜の熱収縮・熱膨張である（以降、本現象を線膨張現象と称する）。鋼材と比較し線膨張係数が高い一般塗膜で補修塗装を繰り返した場合、両者の線膨張係数の差に起因して塗膜の自然剥離現象が生じる。一方で、線膨張係数を低減させた剥離抑制型塗料は温度変化に対する熱収縮・熱膨張が小さく寸法安定性に優れるという特長を有している。このため、一般塗膜上に剥離抑制型塗料を塗り重ねた場合、一般塗膜の熱収縮・熱膨張による寸法変化が抑制され、一般塗膜を含む塗膜全体の寸法安定性が向上する。これにより、塗膜全体の応力が低減され、結果として剥離抑制効果が発現する。また、剥離抑制型塗料を塗り重ね塗膜全体に占める剥離抑制型塗膜の膜厚割合が増加することで、塗膜全体の寸法変化を抑制する効果が高まり、剥離抑制効果もさらに向上していく。本機能は膜厚の増加に伴い自然剥離リスクが増大していく従来の塗料とは異なる全く新しい機能である。（図1、図2）

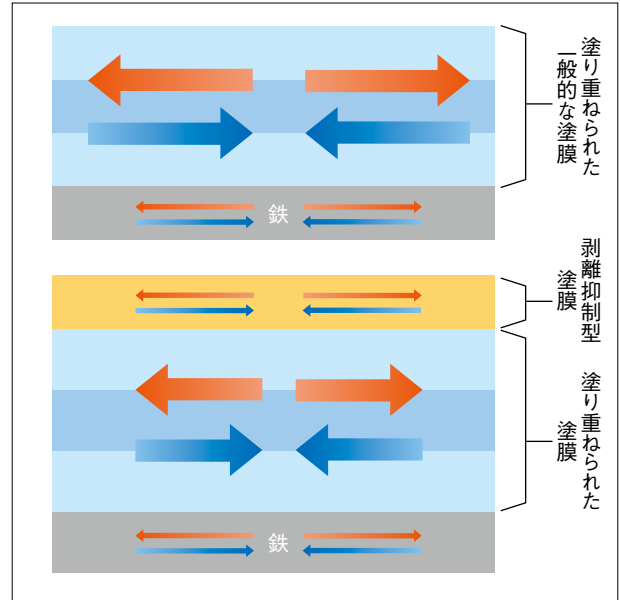


図1 剥離抑制型塗料による寸法変化抑制

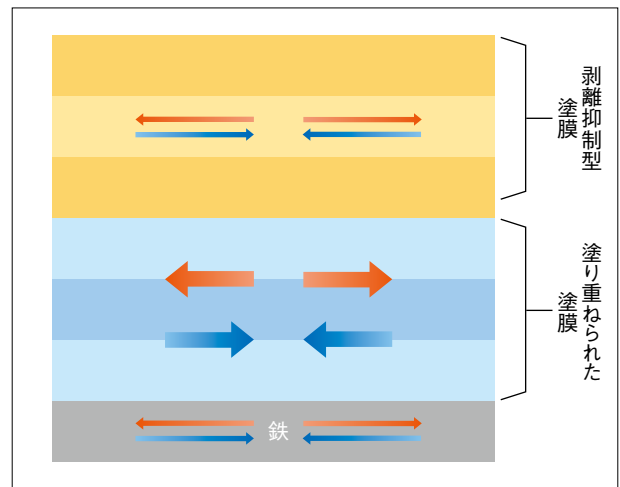


図2 剥離抑制型塗料の膜厚増加に伴う抑制効果向上

## 2.3 適用による効果

塗膜は補修塗装により膜厚が増加すると環境遮断性が増していく。一方で、厚膜化により塗膜内応力が増加するため、付着力は徐々に低下していく。補修塗装の繰り返しの厚膜化した塗膜は、いずれ塗膜内応力が鋼材との付着力を上回り、塗膜の割れや剥離などの変状に至る（図3）。本現象は線膨張係数の高い従来の

塗料を適用している限り避けられないため、これを未然に防ぎ健全な防食機能を維持する目的で、ブラスト法などによる定期的な既存塗膜の全面除去工法が必須となる。

しかし、線膨張係数の低い剥離抑制型塗料を適用した場合、厚膜化による塗膜の環境遮断性向上は同様であるが、厚膜化するほど剥離抑制効果が高まるという特長を有していることから、既存塗膜を含む塗膜全体の付着力が維持される。従って、既存塗膜の全面除去を伴わない3種ケレンや4種ケレン程度の素地調整を実施する補修塗装においても、塗膜剥離の危険性を回避あるいは延引することが可能になると考える(図4)。

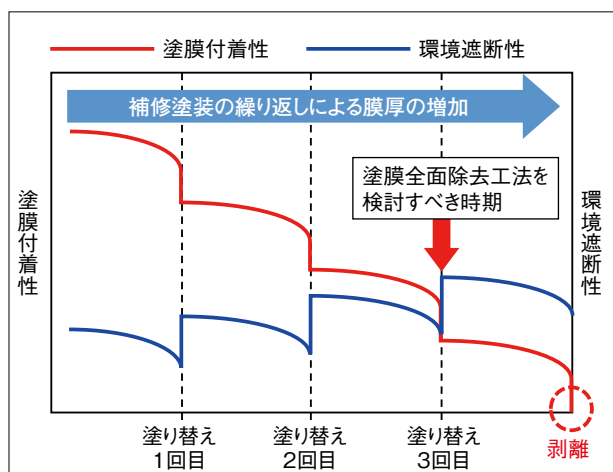


図3 塗膜の付着性/遮断性推移モデル (従来塗料適用時)

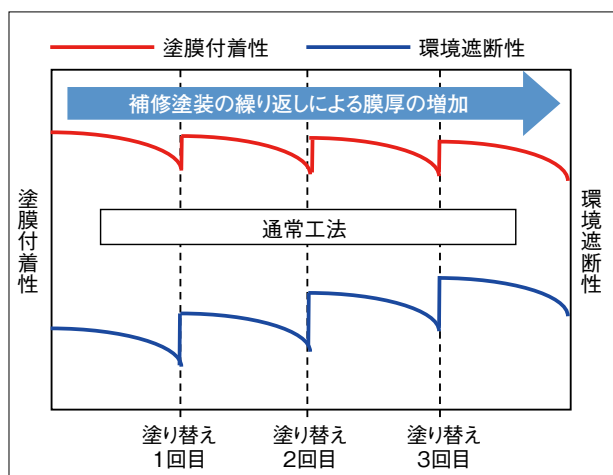


図4 塗膜の付着性/遮断性推移モデル (剥離抑制型塗料適用時)

### 3. 剥離抑制効果の検証

#### 3.1 検証の目的

これまでの検討結果から、線膨張係数を低減した剥離抑制型塗料を塗り重ねることで、既存塗膜を含む塗膜全体の線膨張係数が低下し、塗膜の自然剥離現象が抑制される傾向にあることを見出している。加えて、剥離抑制型塗料の膜厚増加に伴い、剥離抑制効果はさらに向上していくことがわかっている。これらの知見から、剥離抑制型塗料の剥離抑制効果は塗膜の線膨張係数のみで決まるものではなく、既存塗膜および剥離抑制型塗膜それぞれの膜厚因子に強く影響を受けていることが示唆される。

そこで本報においては剥離抑制型塗料適用による効果の定量化を目的とした検証の一環として、線膨張係数が明らかな塗膜からなる塗装系を対象とし、塗装系の塗り重ね回数を変化させることで膜厚因子による自然剥離現象への影響を検討した。また、繰り返しの塗り重ねにより剥離現象を生じやすくなった上記塗装系に対して、剥離抑制型塗料を複数の膜厚水準で塗り重ね、剥離抑制効果の膜厚依存性を検証した。

#### 3.2 検証1: 脆弱既存塗膜に対する検証

##### 3.2.1 試験条件

###### ①試験下地の作製

繰り返しの補修塗装によって過剰膜厚となり、蓄積した塗膜内応力により付着性を失った塗膜(死膜)の自然剥離現象を模擬するため、SPCC-SD鋼板(70×150×t3.2mm)に対して容易に剥離する脆弱なビニル樹脂系塗膜50 $\mu$ mを塗装し試験下地とした。試験下地の剥離状態を図5に示す。

###### ②試験片の作製

作製した試験下地の上に公益社団法人日本道路協会発刊「鋼道路橋防食便覧」に規定されるRc-III塗装系を1回、3回、6回塗り重ねた3種類の試験片を作製した。本試験片は繰り返し補修塗装が行われた既存塗膜を模擬している。次いで、これら3種類の試験片に対し

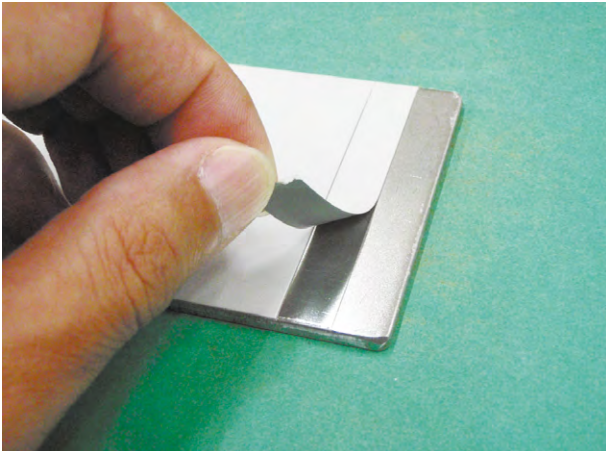


図5 試験下地の剥離状況

て、同じくRc-III塗装系をベースに下塗工程を剥離抑制型塗料に置き換えた剥離抑制型Rc-III塗装系を塗り重ね試験に供した。これら供試塗装仕様と各塗膜の線膨張係数を表2に示す。

剥離抑制型塗料の塗り回数は1回、2回、3回、6回の4水準とし、段階的に膜厚が変化するように設定した。また、比較として剥離抑制型Rc-III塗装系を塗り重ねない水準も設けた。なお、各塗料の塗装間隔は1日と

表2 塗装系詳細

## Rc-III塗装系

工程 <sup>1)</sup>	品名	膜厚 [ $\mu\text{m}$ ]	線膨張係数 [ $10^{-5}/\text{K}$ ]
下塗	変性エポキシ樹脂塗料下塗	60	4.25
下塗	変性エポキシ樹脂塗料下塗	60	4.25
中塗	ふっ素樹脂塗料用中塗	30	6.62
上塗	ふっ素樹脂塗料上塗	25	8.58
Total		175	—

1) 鋼材露出部のみを対象としたタッチアップ工程は割愛

## Rc-III塗装系

工程	品名	膜厚 [ $\mu\text{m}$ ]	線膨張係数 [ $10^{-5}/\text{K}$ ]
下塗	剥離抑制型塗料	60-360 <sup>1)</sup>	2.52
中塗	ふっ素樹脂塗料用中塗	30	6.62
上塗	ふっ素樹脂塗料上塗	25	8.58
Total		115-415	—

1) 60 $\mu\text{m}$ ×1回塗り～6回塗り

し、最終層塗装完了後、23°C/50%RH環境下にて168時間養生したものを試験に供した。

## ③試験方法

養生完了後の試験片に対して、鋼材まで達する井形のカットを施し、50°C(2時間)→降温(1時間)→-30°C(2時間)→昇温(1時間)を繰り返す1サイクル6時間のヒートサイクル試験に供した。試験開始後25サイクル、50サイクル、100サイクル時点で試験片を観察し、塗膜の変状有無および変状程度を評価した。表3に塗膜変状状態の判定基準を示す。

表3 判定基準

判定結果	変状程度	塗膜外観例
○	カット部のみ局所的に塗膜の浮きが発生	
△	カット部を起点とする20mm以上の塗膜浮き、割れが発生	
×	全面変状発生	

## 3.2.2 試験結果

ヒートサイクル試験後の評価結果を表4に示す。

検証グループA:Rc-III塗装系1回(膜厚175 $\mu\text{m}$ )

Rc-III塗装系のみを1回適用したTP.1-1に関しては、50サイクル経過時点よりカット部周辺を起点とした塗膜浮きおよび割れを生じ、100サイクル経過時点で試験片全面に変状が進展した。本結果は脆弱な試験下地の介在により、鋼材と塗膜が適切に付着していない状態でのヒートサイクル試験という今回の試験条件を考えれば、

表4 評価結果一覧

工 程	検証グループA：Rc-III塗装系1回(膜厚175 $\mu$ m)										
	TP.1-1		TP.1-2		TP.1-3		TP.1-4		TP.1-5		
	塗装回数	膜厚 [ $\mu$ m]	塗装回数	膜厚 [ $\mu$ m]	塗装回数	膜厚 [ $\mu$ m]	塗装回数	膜厚 [ $\mu$ m]	塗装回数	膜厚 [ $\mu$ m]	
Rc-III塗装系 <sup>1)</sup>	4 (1)	175	4 (1)	175	4 (1)	175	4 (1)	175	4 (1)	175	
剥離抑制型塗料	0	0	1	60	2	120	3	180	6	360	
ふっ素樹脂塗料用中塗	0	0	1	30	1	30	1	30	1	30	
ふっ素樹脂塗料上塗	0	0	1	25	1	25	1	25	1	25	
Total <sup>1)</sup>	4	175	7	290	8	350	9	410	12	590	
評価結果	25サイクル	○		○		○		○		○	
	50サイクル	△		○		○		○		○	
	100サイクル	×		○		○		○		○	

工 程	検証グループB：Rc-III塗装系3回(膜厚 525 $\mu$ m)										
	TP.1-6		TP.1-7		TP.1-8		TP.1-9		TP.1-10		
	塗装回数	膜厚 [ $\mu$ m]	塗装回数	膜厚 [ $\mu$ m]	塗装回数	膜厚 [ $\mu$ m]	塗装回数	膜厚 [ $\mu$ m]	塗装回数	膜厚 [ $\mu$ m]	
Rc-III塗装系 <sup>1)</sup>	12 (3)	525	12 (3)	525	12 (3)	525	12 (3)	525	12 (3)	525	
剥離抑制型塗料	0	0	1	60	2	120	3	180	6	360	
ふっ素樹脂塗料用中塗	0	0	1	30	1	30	1	30	1	30	
ふっ素樹脂塗料上塗	0	0	1	25	1	25	1	25	1	25	
Total <sup>1)</sup>	12	525	15	640	16	700	17	760	20	940	
評価結果	25サイクル	△		○		○		○		○	
	50サイクル	×		△		○		○		○	
	100サイクル	×		△		○-△		○		○	

工 程	検証グループC：Rc-III塗装系6回(膜厚 1,050 $\mu$ m)										
	TP.1-11		TP.1-12		TP.1-13		TP.1-14		TP.1-15		
	塗装回数	膜厚 [ $\mu$ m]	塗装回数	膜厚 [ $\mu$ m]	塗装回数	膜厚 [ $\mu$ m]	塗装回数	膜厚 [ $\mu$ m]	塗装回数	膜厚 [ $\mu$ m]	
Rc-III塗装系 <sup>1)</sup>	24 (6)	1,050	24 (6)	1,050	24 (6)	1,050	24 (6)	1,050	24 (6)	1,050	
剥離抑制型塗料	0	0	1	60	2	120	3	180	6	360	
ふっ素樹脂塗料用中塗	0	0	1	30	1	30	1	30	1	30	
ふっ素樹脂塗料上塗	0	0	1	25	1	25	1	25	1	25	
Total <sup>1)</sup>	24	1,050	27	1,165	28	1,225	29	1,285	32	1,465	
評価結果	25サイクル	×		△		○		○		○	
	50サイクル	×		△		△		○		○	
	100サイクル	×		×		△		○		○	

1) 塗装回数の( )内数値は塗装系の適用回数、( )外数値は塗装系を構成する各塗膜の総塗装回数

Rc-III塗装系適用塗料の線膨張係数から容易に推測できる妥当な結果である。一方で、Rc-III塗装系の上に剥離抑制型Rc-III塗装系を塗り重ねたTP.1-2～TP.1-5の試験片に関しては、100サイクル経過後も塗膜変状を認めず、試験開始前と同様の塗膜外観を維持していた。本試験結果よりRc-III塗装系1回塗り(175 $\mu$ m)に対しては、同塗装系がほとんど付着性を有してい

ない状態であっても、剥離抑制型塗料1回塗り(60 $\mu$ m)で十分な剥離抑制効果を発現することがわかった。

#### 検証グループB:Rc-III塗装系3回(膜厚525 $\mu$ m)

Rc-III塗装系を3回塗り重ねたTP.1-6に関しては、25サイクル経過時点よりカット部周辺を起点とした塗膜浮きおよび割れを生じ、50サイクル経過時点で全面変状に至った。TP.1-1の結果と比較し、Rc-III塗装系の膜厚

増加に伴って塗膜の剥離現象が促進される結果となった。一方で、Rc-III塗装系を3回塗り重ねた上に剥離抑制型塗料を1層適用したTP.1-7、および2層適用したTP.1-8に関しては、剥離抑制型塗料の膜厚に比例して塗膜の剥離現象が抑制されていく傾向を認めた。なお、剥離抑制型塗料の塗装回数を2回以上( $\geq 120\mu\text{m}$ )としたTP.1-8以降の試験片においては、100サイクルのヒートサイクル試験後も塗膜の浮き・割れの進展は生じなかった。

#### 検証グループC:Rc-III塗装系6回(膜厚 1,050 $\mu\text{m}$ )

TP.1-1およびTP.1-6の結果と比較し、Rc-III塗装系を6回塗り重ねたTP.1-11に関しては、さらに塗膜の剥離現象が促進され25サイクル経過時点で塗膜の全面変状を生じた。また、検証グループBの結果と同様、Rc-III塗装系の膜厚増加に伴って剥離抑制に必要な剥離抑制型塗料の膜厚も増加する傾向を認め、剥離抑制型塗料180 $\mu\text{m}$ (TP.1-14)の適用で剥離抑制効果を発現した。

これらの検証結果から、塗膜の剥離現象および剥離抑制型塗料の剥離抑制効果に関し、いずれも明確な膜厚依存性を認めた。剥離抑制型塗料の剥離抑制有効膜厚はRc-III塗装系1回(175 $\mu\text{m}$ )に対して1層60 $\mu\text{m}$ 、Rc-III塗装系3回(525 $\mu\text{m}$ )に対して2層120 $\mu\text{m}$ 、Rc-III塗装系6回(1,050 $\mu\text{m}$ )に対してもわずか3層180 $\mu\text{m}$ であり、概ねRc-III塗装系の20%程度の膜厚で十分な剥離抑制効果が得られる結果であった。なお、今回の試験条件はほとんど付着性を有していない状態の既存塗膜上、かつ温度差80 $^{\circ}\text{C}$ にもおよぶヒートサイクル条件下での検討であったことから、実際の鋼構造物がおかれている状況と比較し極めて厳しい条件下での試験であったと考える。従って、実際の鋼構造物への適用においては、上記結果以上に剥離抑制効果は高まるものと推測する。

### 3.3 検証2:新設塗装系に対する効果検証

前記検証1の結果より、Rc-III塗装系1回(TP.1-1=175 $\mu\text{m}$ )の試験片においても微弱ながら塗膜の線膨張現象に起因する付着性の低下を生じていることがわかる。本結果より、線膨張係数の高い塗膜から構成される塗装仕様に関しては、外観上観測可能な塗膜変状までは至らない状態においても、塗膜の線膨張現象による塗膜内応力は断続的に発生し続けており、鋼材に対する塗膜の付着性は経時で低下していく傾向にあることが示唆される。すなわち、新設塗装の段階から、塗膜の線膨張現象に起因する塗膜付着性低下は生じ続けており、経年で塗膜耐久性に悪影響をおよぼしているものと推察する。本推察に基づき、著者らの研究グループでは新設塗装向け剥離抑制型塗料も開発しており、前記補修塗装向け剥離抑制型塗料と同様に良好な剥離抑制効果を認めている<sup>3)</sup>。

一方で、新設塗装向けの塗装仕様に着目すると、新設塗装に特有な塗料である無機ジンクリッチペイントが防食下地として適用されている。無機ジンクリッチペイントは亜鉛末による犠牲防食作用により鋼の腐食を抑制する機能を有しており、同機能を発現させるため塗膜中に多量の亜鉛末を含んだ塗料である(JIS K 5553の規定では加熱残分中の亜鉛末量は $\geq 75\text{wt}\%$ )。亜鉛の線膨張係数は $3.3 \times 10^{-5}/\text{K}$ のため、亜鉛末を多量に含んだ本塗料の線膨張係数は他塗料と比較し低いことが予想される。従って、線膨張係数の大きく異なる無機ジンクリッチペイント塗膜と一般エポキシ樹脂系塗膜に対して温度変化が加わった場合、両塗膜の線膨張現象の程度も異なる。すなわち、熱収縮・熱膨張の違いにより発生した塗膜間応力が両塗膜の層間に集中することとなる。本現象を検証するため、C-5塗装系および同塗装系に対してRc-III塗装系を塗り重ね、意図的に過剰膜厚とした試験片にヒートサイクル試験を実施した。加えて、過剰膜厚試験片にさらに剥離抑制型Rc-III塗装系を塗り重ね、本塗装系においても3.2項と同様の剥離抑制効果が発現するのか検証を行った。

### 3.3.1 試験条件

#### ①供試塗装仕様

グリットブラスト処理を施したSS400鋼(Rzjis=25 $\mu$ m、70×150×t3.2mm)に対して、鋼道路橋防食便覧に規定されるC-5塗装系を塗装した。表5にC-5塗装系と各塗膜の線膨張係数を示す。次いでRc-III塗装系を1, 3, 6回塗り重ね、段階的に膜厚が増加していく試験片を製作した。本試験片は新設塗装後、繰り返し補修塗装が行われた既存塗膜を模擬している。加えて、C-5塗装系にRc-III塗装系を6回塗り重ねた試験片に対しては、さらに剥離抑制型Rc-III塗装系を塗り重ねた。なお、剥離抑制型塗料の塗り回数は1回, 2回, 3回, 6回の4水準とし、段階的に膜厚が変化するように設定した。また、比較としてRc-III塗装系を塗り重ねないC-5塗装系のみを試験片、および剥離抑制型Rc-III塗装系を塗り重ねないC-5塗装系+Rc-III塗装系6回の試験片も併せて供

試した。なお、各塗料の塗装間隔は原則1日とし、最終層塗装完了後、23°C/50%RH環境下にて168時間養生したものを試験に供した。

#### ②試験方法

試験方法は3.2.1 ③項記載の方法と同一とした。

表5 C-5塗装系

工程	品名	膜厚 [ $\mu$ m]	線膨張係数 [10 <sup>-5</sup> /K]
防食下地	無機ジンクリッチペイント	75	測定不可 <sup>1)</sup>
ミストコート	エポキシ樹脂塗料下塗	—	3.95
下塗	エポキシ樹脂塗料下塗	120	3.95
中塗	ふっ素樹脂塗料用中塗	30	6.42
上塗	ふっ素樹脂塗料上塗	25	9.33
Total		250	—

1) 塗膜特性から測定サンプルの製作が困難なため未測定

### 3.3.2 試験結果

ヒートサイクル試験後の評価結果を表6に示す。

表6 評価結果一覧

工程	検証グループA：自然剥離現象の膜厚依存性の検証							
	TP.2-1		TP.2-2		TP.2-3		TP.2-4	
	塗装回数	膜厚 [ $\mu$ m]	塗装回数	膜厚 [ $\mu$ m]	塗装回数	膜厚 [ $\mu$ m]	塗装回数	膜厚 [ $\mu$ m]
C-5塗装系 <sup>1)</sup>	5 (1)	250	5 (1)	250	5 (1)	250	5 (1)	250
Rc-III塗装系 <sup>1)</sup>	0	0	4 (1)	175	12 (3)	525	24 (6)	1,050
剥離抑制型塗料	0	0	0	0	0	0	0	0
ふっ素樹脂塗料用中塗	0	0	0	0	0	0	0	0
ふっ素樹脂塗料上塗	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	5	250	9	425	17	775	29	1,300
評価結果	25サイクル		○		△		×	
	50サイクル		○		△		×	
	100サイクル		○		△		×	

工程	検証グループB：剥離抑制型Rc-III塗装系による効果検証							
	TP.2-5		TP.2-6		TP.2-7		TP.2-8	
	塗装回数	膜厚 [ $\mu$ m]	塗装回数	膜厚 [ $\mu$ m]	塗装回数	膜厚 [ $\mu$ m]	塗装回数	膜厚 [ $\mu$ m]
C-5塗装系 <sup>1)</sup>	5 (1)	250	5 (1)	250	5 (1)	250	5 (1)	250
Rc-III塗装系 <sup>1)</sup>	24 (6)	1,050	24 (6)	1,050	24 (6)	1,050	24 (6)	1,050
剥離抑制型塗料	1	60	2	120	3	180	6	360
ふっ素樹脂塗料用中塗	1	30	1	30	1	30	1	30
ふっ素樹脂塗料上塗	1	25	1	25	1	25	1	25
Total	32	1,415	33	1,475	34	1,535	37	1,715
評価結果	25サイクル		△		○		○	
	50サイクル		×		△		○	
	100サイクル		×		△		○	

1) 塗装回数の()内数値は塗装系の適用回数、()外数値は塗装系を構成する各塗膜の総塗装回数

表6の結果を以下にまとめる。

#### 検証グループA:自然剥離現象の膜厚依存性検証

前述の検証1とは異なり、本項の検証では脆弱な試験下地が存在していないため、C-5塗装系のみ適用のTP.2-1およびC-5塗装系にRc-III塗装系を1回塗り重ねたTP.2-2に関しては、100サイクルのヒートサイクル試験後も概ね良好な結果を示した。一方、C-5塗装系にRc-III塗装系を3回塗り重ねたTP.2-3、および6回塗り重ねたTP.2-4に関しては塗膜剥離が生じ、膜厚の増加に伴って変状も甚大となっていく傾向を認めた。なお、剥離現象を認めたTP.2-3、TP.2-4のいずれに関しても、剥離の起点は無機ジンクリッチペイント層内表層側(エポキシ樹脂塗料下塗側)の凝集破壊であった(図6)。

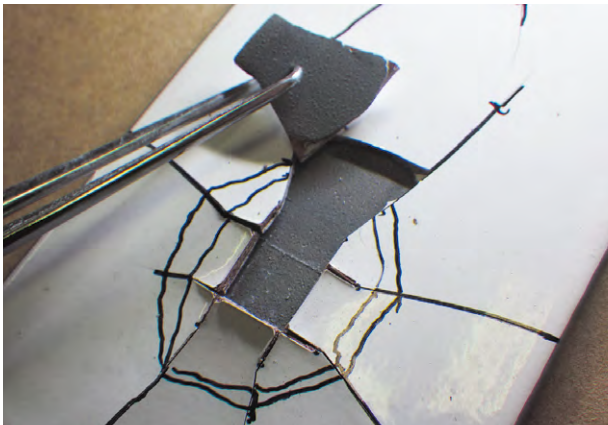


図6 塗膜剥離状況

#### 検証グループB:剥離抑制型Rc-III塗装系適用による効果の検証

25サイクル経過時点で著しい塗膜割れを生じたTP.2-4の塗膜に対して、剥離抑制型Rc-III塗装系を塗り重ねたTP.2-5～TP.2-8の試験片については明確な剥離抑制効果を認めた。剥離抑制型塗料を3回以上塗り重ねたTP.2-7、TP.2-8の試験片については、100サイクル経過後も塗膜変状の進展が抑制されていた。

今回の検証で確認された破壊形態は、前述の無機ジンクリッチペイントおよびエポキシ樹脂塗料下塗の線膨張係数差に起因する塗膜間応力による剥離プロセスを示唆する結果であると考えられる。すなわち、C-5塗装系(TP.2-1)やC-5塗装系にRc-III塗装系を1回適用した

試験片(TP.2-2)の様に塗り重ねられた一般塗膜の膜厚が薄い条件では、「無機ジンクリッチペイント塗膜の凝集力>線膨張現象による塗膜内応力」となるため、塗膜欠陥として顕在化することはない。一方で、前述のとおり線膨張現象による塗膜剥離には膜厚依存性があることから、度重なる塗り重ねによる膜厚の増大に伴って、線膨張現象による塗膜内応力も増加していく。そのため、「無機ジンクリッチペイント塗膜の凝集力<線膨張現象による塗膜内応力」となる条件において、初めて塗膜の剥離現象として変状が確認されることとなる。

新設塗装時にC-5塗装系が適用され、Rc-III塗装系により補修塗装が行われた鋼構造物の報告は未だ少ない。しかしながら、耐久性に優れ長期にわたり高い防食性能を維持し得るC-5塗装系に関しても、将来的には維持管理周期を迎え補修塗装を行う必要が生じる。その際に線膨張係数の高い一般塗膜からなるRc-III塗装系を適用し、補修塗装を繰り返していった場合、高齢化した多くの鋼構造物が現在抱えている塗膜の自然剥離現象を再現してしまう危険性があることを本検証結果は示唆していると考えられる。今回の検証においては、剥離現象を促進的に評価することを目的に意図的に過剰な塗り重ねを行い、剥離の傾向を評価した限定的な検証である。本件については、より定量性をもった試験結果を得ることを目的とし、今後も追加検証を予定している。

## 4. 剥離抑制型塗料の今後の展望

塗装鋼が腐食環境に曝される際の塗膜の劣化過程は、おおよそ次のように進行するとされている<sup>4)</sup>。

- 1) 腐食性物質の塗膜への浸透・拡散と塗膜/鋼界面への集積
- 2) 浸透・拡散した腐食性物質による塗膜/鋼界面での腐食反応の開始
- 3) 腐食生成物による塗膜の付着力低下と、これによる塗膜変状の発生



Mengesら<sup>5)</sup>は塗膜寿命を腐食性物質が鋼面に到達するまでの時間(腐食誘導期間=膜厚の二乗に比例)と腐食性物質が鋼面に到達した後、付着破壊が生じるまでの時間(腐食進展期間=塗膜欠陥が表面化するまでの期間)の和で説明しており、腐食性物質が鋼表面に到達するまでの時間をできるだけ延長し、さらに付着力を確保することが塗膜の長期耐久性の維持に繋がるとしている(式1参照)。

式1 塗膜耐久性の考え方に関する  
G.Menge,W.Schneiderらの関係式

$$L = t^2 / 6D + \tau$$

L: 耐用期間    D: 拡散係数(mm)  
t: 膜厚(mm)     $\tau$ : 付着力その他の要因

式中D(拡散係数)は酸素、水、塩化物イオンなどの腐食性物質が塗膜中に侵入し、内部に拡散する度合いを単位面積当たりの時間で示した値である。また、腐食性物質が鋼面に到達しても、塗膜の付着力が維持されている間は鋼と塗膜界面への腐食性物質の滞留や、鋼と塗膜界面に沿った横方向への腐食進展は妨げられるので、致命的な欠陥にはならない。しかし、塗膜の付着不良が生じた段階で付着不良部へ腐食性物質が滞留し、徐々に腐食現象を拡大していく。そのため、鋼表面に腐食性物質が到達した後、塗膜の膨れや鋼の発錆など外観上の欠陥として表面化するまでの塗膜付着力が維持されている期間(腐食進展期間)を $\tau$ としている。つまり、式1から①塗膜厚が厚く、②鋼表面への付着力に優れ、かつ③腐食性物質の拡散速度の遅い塗膜層を有する塗装仕様が耐久性に優れ、耐用年数の長い塗装仕様であると解釈できる。

長期にわたり供用されている鋼構造物に対して本解釈を落とし込むと、①に関しては度重なる補修塗装により塗膜が厚膜化しているため要件を満たしている。一方で、②に関しては同様の理由から塗膜内応力が蓄積された状態にあり、塗膜厚が厚くなるほど付着力が低下していく傾向を示し、最終的には塗膜剥離に至ることから要件を満たしていない。従って、既存の補修塗装仕様においては、①と②が相反する要件となる。これに対し、著者らの開発した剥離抑制型塗料については、塗膜厚

が厚くなるほど塗膜剥離を抑制する機能を有する(=付着性に優れ、かつ良好な付着性を維持し続けることができる)ことから、①と②を両立させることが可能であり、塗膜の耐久性向上に大きく寄与することができるものとする。

一方で、③に対する剥離抑制型塗料の性能は従来塗料と同等である。これに対し西森らの報告<sup>6)</sup>では、塗膜内応力に影響を及ぼす塗膜特性として、ガラス転移温度・弾性率・線膨張係数を挙げ、このうちガラス転移温度・弾性率に関しては塗膜内応力の緩和を目的に低減させること自体は可能であるが、同時に塗膜の環境遮断性の低下を惹起することから望ましくない手法であることを指摘している。一方で、第三の塗膜特性である線膨張係数に関しては、同じく低減させることで塗膜内応力の緩和が可能であり、かつ環境遮断性の低下を必ずしも伴わないという興味深い考察がなされている。本考察より、塗膜の線膨張係数をコントロールし塗膜内応力を緩和している剥離抑制型塗料については、③に対する性能向上の検討裕度が高い状態にあると推測する。そのため、剥離抑制型塗料をベースに環境遮断性を向上させることで、塗膜の耐用年数を決める①～③の要件全てを高い水準で兼ね備えた新たな塗料の開発が可能であり、これまでの既存塗料では到達できなかった超長期耐用年数を実現できる可能性を秘めている。

上記高遮断性を有する剥離抑制型塗料については、新設塗装向け塗料・補修塗装向け塗料ともに既に開発を概ね完了し、大気部用塗料でありながら水中部向け塗料同等の環境遮断性を有することを確認している<sup>7)</sup>。なお、これらの開発塗料も当社より近日発売予定である。

## 5. 終わりに

現在供用されている多くの鋼構造物が抱える維持管理上の課題に対して、剥離抑制型塗料は経済性に優れた補修塗装という手段を用いて解決し得る性能を有している。加えて、優れた耐久性を有する重防食塗装系に対して剥離抑制型塗料を適用することで、これまで以上の耐久性の向上、および耐用年数の延伸が可能となる。

近年増加の一途を辿る高齢化した鋼構造物の長期供用化の実現、および維持管理上の腐食対策コストの圧縮は、もはや社会的ニーズであり、塗料のみならずあらゆる技術開発をとおして達成せねばならない極めて重要な課題である。とりわけ塗料並びに塗装に関しては、効果的かつ経済的な側面から広く適用されてきた長い歴史をもつ防食法であることから、これら塗料を提供する立場にある塗料メーカーの技術開発が負う社会的役割は今後益々大きくなるものと考えられる。当社は社会的な課題を解決する塗料の開発と提供、およびさらなる付加価値の創出を通じて、今後も広く社会の繁栄と豊かな暮らしの実現に貢献していきたいと考えている。

## 6. 謝 辞

今回報告の検証結果は株式会社四国総合研究所、関西ペイント株式会社殿と当社の共同研究により得た成果です。関係各位のこれまでの精力的な活動に深く感謝申し上げます。

### 参考文献

- 1) 大日本塗料株式会社：DNTコーティング技報 No.19, P.3-12, 2019
- 2) 第41回鉄鋼塗装技術討論会発表予稿集 「線膨張係数に着目した塗料の今後の展望」 P.37-46, 2018.11
- 3) 第39回防錆防食技術発表大会講演予稿集 「低線膨張係数を有する弱溶剤変性ポキシ樹脂塗料の性能評価」P.99-102, 2019.7
- 4) 山崎曜：表面技術 超厚膜塗装技術の現状と問題点, Vol.46, No.6, 1995
- 5) G. Menges & Schneider : Kautschuk und Gummi Kunststoffe, 25, (5), 213, 1972
- 6) 第43回鉄鋼塗装技術討論会発表予稿集 「高遮断性を有する剥離抑制型変性エポキシ樹脂塗料の設計と今後の展望」P.1-14, 2021.1
- 7) 第43回鉄鋼塗装技術討論会発表予稿集 「高遮断性を有する剥離抑制型変性エポキシ樹脂塗料の開発」P.15-22, 2021.1