

鋼構造物用の省工程塗替え塗装系の開発

○ [土] 坂本 達朗 [土] 鈴木 慧 (鉄道総研)

[土] 鈴木 隼人 (建設塗装工業)

Development of Process-saving Repainting System for Steel Structures

○Tatsuro Sakamoto, Akira Suzuki, (Railway Technical Research Institute)

Hayato Suzuki, (Kensetsu Tosou Kougyou)

In the case of repainting a painted steel railway bridge, only one layer of paint can be applied in a day. Therefore, it is necessary to reduce the number of painting processes to ensure the quality of construction. In addition, in recent years, cracking and stripping of the old coating film has been observed in the early stages after repainting. One of the reasons for these degradations is the accumulation of internal stress in the old coating film due to the shrinkage on curing of the coating layer.

The authors have developed a new process-saving repainting system to solve these problems. In this study, tests were conducted to understand the internal stresses of various paints used in process-saving repainting system and conventional repainting system.

キーワード: 省工程型塗替え塗装系, 内部応力, エポキシ樹脂塗料, 促進劣化

Key Words: Process-saving repainting system, Internal stresses, Epoxy resin paint, Accelerated deterioration

1. はじめに

塗装された鋼鉄道橋の全面塗替えに用いられる一般的な塗装仕様として、塗装系 T-7 が挙げられる。これは、鋼構造物の防食マニュアルとして鉄道事業者を中心に利用されている鋼構造物塗装設計施工指針¹⁾に記載されるものであり、塗膜を残す箇所に対して 3 回、鋼素地を露出させる箇所に対して 4 回塗り重ねる仕様である。塗替えは屋外作業であり、施工期間中は降雨等による塗膜の性能低下が懸念されるものの、原則として 1 日に 1 回しか塗装できない。このため塗膜の品質を確保するためには、塗装工程をなるべく少なくしたいニーズがある。また、近年において塗替え後の早期に旧塗膜を残した箇所での割れ、剥がれといった塗膜変状が散見されている(図 1)。これは、本来除去すべき脆弱な旧塗膜が残った状態で塗装されることに起因し、塗り重ねた塗料の硬化・収縮によって生じる内部応力が旧塗膜にも影響するためと考えられる。旧塗膜の健全性を評価する定量的手法が確立されていないため、塗料を複数回塗り重ねることへの課題が生じている。

筆者らは、上述のニーズや課題を解決できる塗装系とし

て、塗装回数が少なく長期耐久性や現場での施工性が従来の塗装系と同程度の性能である省工程の塗装仕様(以下、省工程型塗装系とする)を開発した^{2), 3)}。本研究では省工程型塗装系の概要を述べるとともに、塗膜の内部応力に着目し、省工程型塗装系と塗装系 T-7 に使用される種々の塗料の内部応力の把握を目的とした試験を実施した。



割れの事例 割れ、剥がれの事例

図 1 塗膜変状の例¹⁾

2. 省工程型塗装系の特徴

2.1 塗装系の概要

省工程型塗装系と塗装系 T-7 の概要を表 1 に示す。塗装系 T-7 は旧塗膜の上に 3 回塗り重ねるのに対して、省工程

表 1 省工程型塗装系と塗装系 T-7 の概要

塗装系	工程	塗料名	区分 ^注	標準塗布量 (g/m ²)	目標膜厚 (μm)	
					1 層あたり	全体
省工程型塗装系	第 1 層	ハイソリッド型厚膜変性エポキシ樹脂系塗料	補修	300	90	230
	第 2 層	ハイソリッド型厚膜変性エポキシ樹脂系塗料	補修	300	90	
	第 3 層	シリコン変性エポキシ樹脂塗料上塗	全面	150	50	
塗装系 T-7	第 1 層	厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料	補修	200	60	230
	第 2 層	厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料	全面	200	60	
	第 3 層	厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料	全面	200	60	
	第 4 層	厚膜型ポリウレタン樹脂塗料上塗	全面	150	50	

注：補修…鋼材露出箇所に対して塗布する条件、全面…塗装面全体に塗布する条件

型塗装系では 1 回の塗装で済み、旧塗膜への内部応力の蓄積の低減が期待できる。上塗りとして使用するシリコン変性エポキシ樹脂塗料上塗は、良好な付着性を有するエポキシ樹脂塗料にシリコン成分を配合することで耐候性を向上させた塗料であり、塗装系 T-7 の上塗り塗料と比較して同等以上の耐候性を確保しつつ、旧塗膜に直接塗布できる。なお、素地調整によって鋼素地を露出させた箇所に対する省工程型塗装系の塗装回数は 3 回であり、塗装系 T-7 よりも 1 回少ない。また、合計膜厚は双方の塗装系とも 230μm であり、同程度の防食性が期待できる。

2.2 塗装系の長期耐久性²⁾

省工程型塗装系の長期耐久性を評価するため、室内促進劣化試験による防食性、耐候性、旧塗膜への付着性評価を実施した。防食性については、腐食鋼板に塗装したものを試験片として、JIS K 5600-7-9「サイクル腐食試験方法」に規定される複合サイクル試験を実施した。耐候性については、JIS K 5600-7-7「促進耐候性及び促進耐光性（キセノンランプ法）」に規定されるキセノンランプ照射+蒸留水噴霧による試験を実施した。旧塗膜への付着性については、鋼鉄道橋で使用される上塗り塗膜を数年間屋外に暴露したのに対して塗装したものを試験片として、JIS K 5600-7-2「耐湿性（連続結露法）」に規定される耐湿試験を実施した。各試験の結果、省工程型塗装系は塗装系 T-7 と比較して同程度の防食性、耐候性、旧塗膜への付着性を有することを確認した²⁾。

2.3 塗装系の現場施工性³⁾

省工程型塗装系の現場施工性を評価するため、実際の鋼鉄道橋にて塗替え施工試験を実施し、仕上りの外観、作業時間、膜厚などから施工性を評価した。その結果、塗装系 T-7 と比較して同程度の作業時間で仕上り状態に大きな差異はないことを確認した。膜厚については一部の塗料製造メーカーにおいて塗装系 T-7 よりも少ない膜厚となり、注意して施工管理する必要性が生じたが、規定膜厚は満足しており、防食上の大きな問題は無いことを確認した。

3. 各塗装系に使用される塗料の内部応力評価

塗膜の内部応力を評価する手法として、リン青銅板を用いたバイメタル法⁴⁾が挙げられる。これは、リン青銅板の片面に塗装した際の変形程度から塗膜の内部応力を評価する手法であり、比較的簡便に内部応力を評価することができる。そこで本研究では、塗装系 T-7 と省工程型塗装系に使用される塗料を対象に、以下について検討した。

①内部応力に対する塗膜厚および塗重ね回数の影響

②旧塗膜に塗り重ねる塗装系の比較

①では塗料の基本的な特性を把握するという観点から、代表的な塗料として塗装系 T-7 に用いられる厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料を用いて実施した。②では表 1 の区分で全面とした工程（塗装系 T-7…3 回塗、省工程型塗装系…1 回塗）で比較した。ただし、実鋼橋の塗膜に対してシリコン変性エポキシ樹脂塗料のみを適用した事例は少なく長期付着性に関する知見が十分でないため²⁾、省工程型塗装系については表 1 の 2 層目および 3 層目を塗装した場合の内部応力の影響も評価した。各試験の概要を表 2 に示す。

なお、経年によって塗膜を構成する樹脂が劣化した際の内部応力の挙動を把握するため、過去の研究⁵⁾において塗膜の劣化が確認された環境条件である高温多湿条件に曝した場合の内部応力についても評価した。

表 2 各試験の概要

試験項目	使用塗料と塗装条件
①内部応力に対する塗膜厚および塗重ね回数の影響	厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料 塗装回数：1～4 回 目標膜厚：25～100μm
②旧塗膜に塗り重ねる塗装系の比較	厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料 2 回塗 +厚膜型ポリウレタン樹脂塗料上塗 1 回塗 (塗装系 T-7 を想定)
	シリコン変性エポキシ樹脂塗料上塗 1 回塗 (省工程型塗装系を想定) ハイソリッド型厚膜変性エポキシ樹脂系塗料 1 回塗 +シリコン変性エポキシ樹脂塗料上塗 1 回塗 (省工程型塗装系を想定)

3.1 試験手順

(1) 塗装方法

寸法 150×20×0.1mm のリン青銅板に対して、エアスプレーで各塗料を塗装したものを試験片とした。このときシリコン変性エポキシ樹脂塗料上塗は使用量の 20%をシンナーで希釈し、それ以外は 15%で希釈した。また、リン青銅板裏面に対して簡単に剥離可能なスプレー糊を塗布した紙でマスキングすることで、銅板を変形させることなく銅板の裏面への塗料付着を防いだ。塗装したリン青銅板は 23℃に調温したデシケーター内で 168 時間（1 週間）養生した。なお、マスキングした紙は養生終了後に除去した。

表 2 の試験項目①においては、1 層あたりの目標膜厚を 25μm として 1～4 回塗装した試験片と、1 層あたりの目標膜厚を 50～100μm として 1 回塗装した試験片を作製した（表 3）。試験項目②においては、表 1 に示す目標膜厚で各塗料を塗装したものを試験片とした。

表 3 試験項目①の塗装工程

試験片 記号	塗料名	目標膜厚 (μm)		塗装回数 (回)
		1層あたり	全体	
A	厚膜型変性エポキシ 樹脂系塗料	25	25	1
B			50	2
C			75	3
D			100	4
E		50	50	1
F		75	75	1
G		100	100	1

(2) 促進劣化試験方法

過去の研究⁵⁾において塗膜の割れ発生が確認された条件である 75℃, 85%RH に設定した恒温恒湿槽に試験片を設置し、変形に伴う一定の傾向が認められるまで試験を実施した。以下、これを促進試験と呼ぶ。なお、試験片の変形過程においてリン青銅板に余計な力を受けないようにするため、試験片は吊るして設置した (図 2)。



図 2 試験片の設置状況

(3) 内部応力の評価方法

回収した試験片をデシケーター内で 48 時間 (2 日間) 乾燥させた後、レーザ変位計を用いて試験片の変形程度を測定した (図 3)。これは、試験片の変形過程でわずかな捻じれが生じ、目視での測定が困難なためである。測定ピッチは 50μm とし、測定された三次元データから、受け台上面を基準として図 4 に示す式で 3 地点の平均値からたわみ量を算出した。試験片には塗装の有無に依らず重力によるたわみが生じるため、未塗装時のたわみ量との差分 (以下、たわみ変形量とする) から内部応力の変動を評価した。

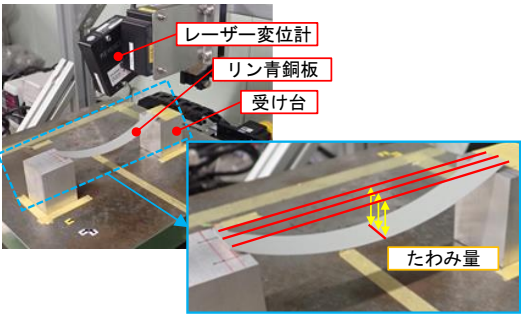


図 3 リン青銅板のたわみ量の測定状況

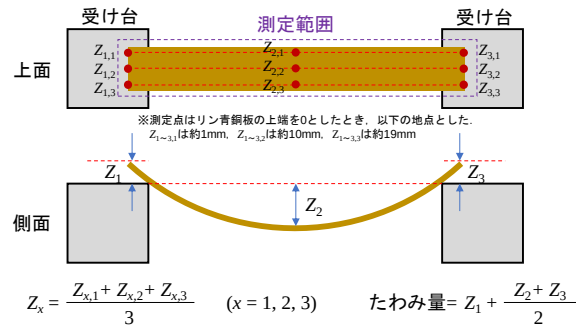


図 4 たわみ量の算出方法

3.2 試験結果と考察

(1) 内部応力に対する塗膜厚および塗重ね回数の影響

促進試験時間に対するたわみ変形量の関係を図 5 に示す。図中の凡例には電磁式膜厚計で測定した実膜厚を括弧書きで示している。塗装したリン青銅板を養生した時点 (試験時間 0 時間) のたわみ変形量と促進試験時間 168 時間のたわみ変形量を比べると、促進試験時間 168 時間後のたわみ変形量は 4~10 倍に増加している。これは、塗膜を構成する樹脂成分の化学反応が高温高湿環境に曝されることで促進され、塗膜の硬化・変形が加速された影響と推定される⁵⁾。また、促進試験時間の経過とともにたわみ変形量が増大していることから、樹脂の脆化に伴って内部応力が増加する傾向があると考えられる。

次に、促進試験時間 2520 時間経過した段階における実膜厚とたわみ変形量の関係を図 6 に示す。変形量は膜厚と概ね比例関係にあることから、膜厚が厚くなるほど内部応力が大きくなると考えられる。実構造物においては、狭隘部など塗布量が多くなりやすい箇所において内部応力が大きくなることが推定される。

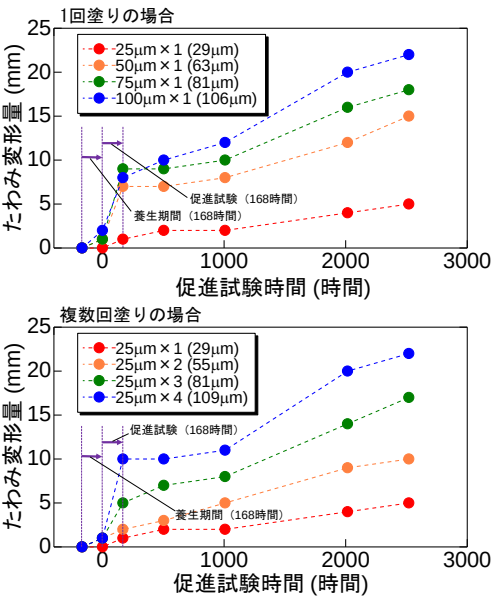


図 5 試験時間に対するたわみ変形量の関係

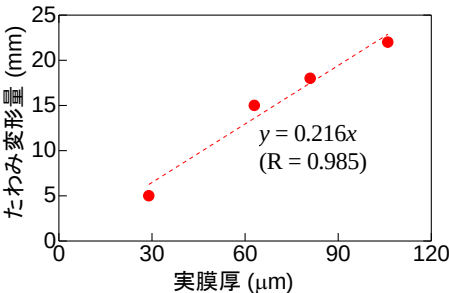


図 6 膜厚とたわみ変形量の関係

塗り重ね回数と内部応力の関係を明らかにするため、図 6 の点線として示される、膜厚に対するたわみ変形量の傾

きを促進試験時間ごとに算出した（表 4）。この結果から、1 層あたりの膜厚や塗装回数に関わらず、傾きの変化に大きな違いは見られない。続いて、同じ膜厚における塗り重ね回数の影響を確認するため、算出した傾きを用いて以下に示す数式で総乾燥膜厚の目標値と実測値の差分を補正し、目標膜厚におけるたわみ変形量を算出した。

$$A = B - (b - a)y$$

A: 目標膜厚における X 時間経過後のたわみ変形量

B: 実測した膜厚における X 時間経過後のたわみ変形量

a: 目標膜厚

b: 実測した膜厚

y: X 時間経過時の膜厚に対するたわみ変形量の傾き

同膜厚におけるたわみ変形量について、1 回塗りした場合に対する複数回塗りの比率（以下、増減率とする）を図 7 に示す。原因は不明であるが、膜厚が小さい場合には増減率は大きい傾向にあるものの、促進試験時間の経過に伴い増減率は 1 に収束し、塗装回数の違いによる差は解消される傾向にある。したがって、経年による塗膜の内部応力推移に対して塗装回数の違いは大きく影響しないと考えられる。

表 4 試験時間毎の膜厚に対するたわみ変形量の傾き

試験時間 (時間)	1 回塗り		複数回塗り	
	傾き	相関係数	傾き	相関係数
0	14	0.75	16	0.70
168	61	0.91	91	0.80
504	78	0.92	102	0.92
1008	98	0.97	115	0.98
2016	171	0.99	191	0.98
2520	197	0.99	215	0.98

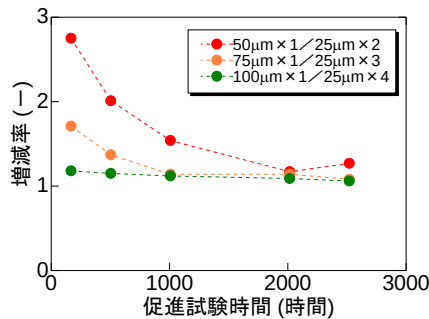


図 7 同膜厚で塗装回数が異なる場合のたわみ変形量比率

(2) 活膜上に塗り重ねる塗装系の比較

各塗装系における促進試験時間に対するたわみ変形量を図 8 に示す。図中の凡例には電磁式膜厚計で測定した実膜厚を括弧書きで表記している。塗装系 T7 の塗り重ねを想定した試験片のたわみ変形量が最も大きく、次いで省工程型塗装系の 2 層目と 3 層目を塗装した場合の試験片、3 層目のみを塗装した試験片の順となった。特に、省工程型塗装系の塗り重ねを想定した 3 層目のみ塗装した試験片では、たわみ変形量は極めてわずかであった。以上の結果から、省工程型塗装系を旧塗膜に塗り重ねた場合の内部応力の影響程度は、塗装系 T7 を使用する場合と比べて極めて小さく、内部応力の増大による旧塗膜からの剥がれや割れといったリスクを低減できることが明らかになった。

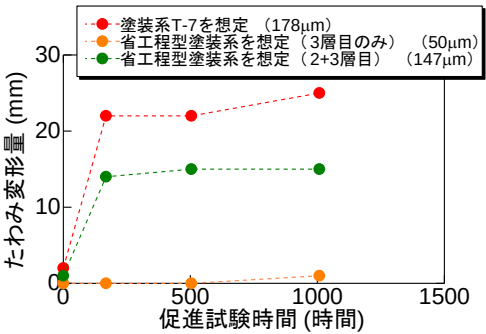


図 8 各塗装系における試験時間に対するたわみ変形量

4. まとめ

筆者らが開発した省工程型塗装系と、従来塗装系に使用される種々の塗料の内部応力の把握を目的として、リン青銅板を用いたバイメタル法により、膜厚や塗膜の劣化程度をパラメータとした試験を実施した。得られた知見を以下に示す。

- (1) たわみ変形量は膜厚と概ね比例関係にあることから、膜厚が厚くなるほど内部応力が大きくなると考えられる。実構造物においては、狭隙部など塗布量が多くなりやすい箇所において内部応力が大きくなることが推定される。
- (2) 同膜厚における 1 回塗りおよび複数回塗りの試験片のたわみ量を比較した結果、促進試験時間の経過に伴い塗装回数の違いによる差は収束する傾向にある。したがって、経年による塗膜の内部応力推移に対して塗装回数の違いは大きく影響しないと考えられる。
- (3) 省工程型塗装系を旧塗膜に塗り重ねた場合の内部応力の影響程度は塗装系 T7 を使用する場合と比べて極めて小さい。このことから、省工程型塗装系を適用することで内部応力の増大による旧塗膜からの剥がれや割れといったリスクを低減できると考えられる。

参 考 文 献

1) (公財) 鉄道総合技術研究所：鋼構造物塗装設計施工指針 2013

2) 坂本達朗, 木村武久, 真田祐介, 堀誠, 山本基弘, 佐藤大輔：ハイソリッド型塗料を用いた長期耐久型塗替え塗装系の検討, 鉄構塗装技術討論会発表予稿集, Vol.33, pp.69-74, 2010

3) 鈴木慧, 坂本達朗, 鈴木隼人：実橋梁に対する省工程型塗装系の施工性に関する検討, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.73, I-038, 2018

4) 坪田実：塗料・塗装の基礎知識と試験法, 塗装技術, Vol.49, No.2, pp.129-135, 2010

5) 鈴木隼人, 坂本達朗, 鈴木慧：塗膜特性への温度と湿度の影響に関する基礎検討, 防錆防食技術発表大会講演予稿集, Vol.38, pp.139-144, 2018