

塗膜剥離に影響する因子の考察および塗膜剥離抑制塗料の開発

(株)四国総合研究所 化学バイオ技術部 大捕 秀基
(株)四国総合研究所 化学バイオ技術部 西森 修次
(株)四国総合研究所 化学バイオ技術部 坂口 聡彦

キーワード： 防食塗料
鋼構造物
補修塗装
塗膜剥離
内部応力
線膨張係数

Key Words : Anticorrosion paint
Steel structure
Repair paint
Coating peeling off
Internal stress
Coefficient of linear expansion

Consideration of factors influencing coating film peeling and development of paint film peeling control paint

Shikoku Research Institute, Inc., Chemical and Biological Technologies Department
Hideki Otori, Shuji Nishimori and Toshihiko Sakaguchi

Abstract

When the repair coating of steel structure is repeated, the coating film thickens. Stress is accumulated inside the paint film by applying paint on the paint film, and when the internal stress exceeds the adhesion force between the paint film and the base material, there is a high possibility that the whole paint film peeling will occur.

In order to verify the technique for suppressing this coating film peeling phenomenon, we devised our own test method and conducted various tests. As a result of those tests, we found out the factors influencing the peeling of the coating film are that the linear expansion coefficient α_1 of the coating dominates. Further, we found out the peeling was difficult due to the change in film peeling easiness depending on the film thickness, by changing the linear expansion coefficient α_1 of this coating film to $3.2 \times 10^{-5} (/^{\circ}C.)$ as a result of consideration of a threshold value.

By using this paint focusing on this linear expansion coefficient α_1 , it is possible to drastically extend the interval of repair painting and to reduce the maintenance cost of steel structure, so this result will cause a change in the formulation design of the paint industry in the future.

1. はじめに

橋梁やプラント設備等の鋼構造物における補修塗装（塗替え）では、旧塗膜の劣化が顕著である場合や、従来の補修方法では性能が維持できないと判断された場合、1種ケレン（ブラスト処理）後に多層塗りで補修が行われることが多い¹⁾。しかし、旧塗膜の劣化程度が維持可能と判断された場合、3種ケレンや4種ケレン程度の素地調整で旧塗膜を多く残したまま塗り重ねが行われるケースがある。この塗り重ねが繰り返され過膜厚になると、塗膜の内部応力の増大により、全面的な剥離のリスクが高くなる^{2,3)}（図1）。

このような設備保守における差し迫った問題に対応すべく、筆者らは塗膜の耐剥離性維持に寄与する防食塗料の開発を行った。本稿では、耐剥離性に影響する塗膜物性について検証した結果を報告する。

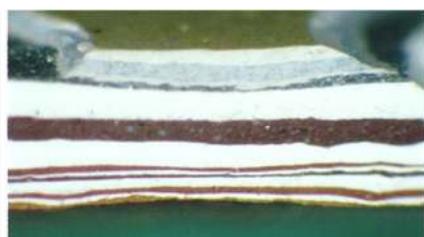


図1 剥離した塗膜の断面

2. 応力理論に基づく塗膜剥離要因の考察

塗膜剥離は、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するが、塗膜の付着力を上回る応力が発生するとその箇所から剥離する。

塗膜の収縮・膨張は、①樹脂の硬化反応によるもの（硬化収縮）、②温度変化によるもの（熱膨張・収縮）があるが、ここでは本研究で特に着目した②の熱膨張・収縮について述べる。

実環境下において塗膜は温度変化に晒される。環境温度が $T_1 \sim T_2$ に変化するとき塗膜に生じる応力 σ は次式で表される。

$$\sigma = \int_{T_1}^{T_2} \alpha \cdot E \, dT = \int_{T_1}^{T_g} \alpha_1 \cdot E_1 \, dT + \int_{T_g}^{T_2} \alpha_2 \cdot E_2 \, dT \quad (1)$$

式(1)において、 T_g は塗膜のガラス転移温度を示し、 α_1 、 α_2 はガラス領域及びゴム領域にお

ける塗膜の線膨張係数を示し、 E_1 、 E_2 は同様に弾性率を示す。

ここで、 $\alpha_1 < \alpha_2$ 、 $E_1 \gg E_2$ より、式(1)は次のように簡略化される。

$$\sigma \approx \int_{T_1}^{T_g} \alpha_1 \cdot E_1 \, dT \quad (2)$$

式(2)より、 σ を小さくするためには T_g 、 α_1 、 E_1 を小さくすることが有効である。従来の一般大気部向け塗料に対する設計では T_g や E_1 を下げる手法が多く用いられてきたが、この手法は塗膜の耐湿性が低下する為、防食塗料としては本来望ましくない。そこで、 α_1 を意識的に下げるアプローチを取ることで、防食性を確保しつつ耐剥離性を向上させることが可能と考えた。

3. 耐剥離性確認試験

3.1 耐剥離性促進試験方法

塗膜の耐剥離性を評価する試験規格は無い為、試験方法の検討を行った。現場の塗膜剥離は、下層に付着性が悪くなった旧塗膜が存在することから、旧塗膜を再現する為容易に剥離するビニル樹脂を用いた。そのビニル樹脂層の上に、某現場で塗膜剥離が発生した塗装仕様や耐剥離性を評価したい塗装系を塗り重ねし、ヒートサイクル試験（ $-30^\circ\text{C} \rightarrow \text{常温} \rightarrow 50^\circ\text{C} \rightarrow \text{常温}$ ）を行った。

結果、現場で生じた塗装仕様は顕著に塗膜剥離が発生し（表1）、現場の状況を再現することが出来た。そこで、本試験方法を耐剥離性試験として採用し、今後の様々な評価に用いる事とした。

表1 ヒートサイクル試験結果

	弱溶剤型仕様(現場仕様)	強溶剤型厚膜仕様
下塗	弱溶剤型エポキシ (100 μm)	強溶剤型エポキシ (50 μm)
中塗	弱溶剤型ウレタン (30 μm)	強溶剤型厚膜エポキシ (175 μm)
上塗	弱溶剤型ウレタン (30 μm)	強溶剤型ウレタン (50 μm)
サイクル試験後外観		
実観	塗膜剥離多発	塗膜剥離ほぼ無し

3.2 既存の防食塗装仕様を用いた試験

α_1 をはじめとする各種塗膜物性と剥離の関係を確認するため、既存の防食塗料製品を用いた耐剥離性試験（ヒートサイクル）を行った。

供試塗料は、実際の鋼構造物に補修塗装されている防食塗装仕様を参考とした5つの仕様（表2）とした。

表2 供試塗料一覧

		塗料種	膜厚
仕様1	下塗	弱溶剤形変性エポキシ樹脂塗料 (α_1 大)	100 μm
	中塗	弱溶剤形エポキシ樹脂塗料 (α_1 大)	30 μm
	上塗	弱溶剤形ウレタン樹脂塗料	30 μm
仕様2	下塗	弱溶剤形変性エポキシ樹脂塗料 (α_1 小)	50 μm
	中塗	厚膜形エポキシ樹脂塗料 (α_1 小)	175 μm
	上塗	ウレタン樹脂塗料	35 μm
仕様3	下塗	-	-
	中塗	厚膜形エポキシ樹脂塗料 (α_1 小)	175 μm
	上塗	ウレタン樹脂塗料	35 μm
仕様4	下塗	-	-
	中塗	厚膜形エポキシ樹脂塗料 (α_1 小)	350 μm
	上塗	ウレタン樹脂塗料	35 μm
仕様5	下塗	弱溶剤形変性エポキシ樹脂塗料 (α_1 大)	50 μm
	中塗	超厚膜形エポキシ樹脂塗料 (α_1 極大)	350 μm
	上塗	ウレタン樹脂塗料	35 μm

素地（SPCC-SD 鋼板 70×150×3.2mm）には容易に剥離する層（ビニル樹脂）を形成し、十分養生をしたのちに供試塗料を塗り重ねた（表3）。

表3 試験片の仕様

	塗料種	膜厚
1層目 【脆弱層】	ビニル樹脂 (塩化ビニル/酢酸ビニル 共重合体)	50 μm
2層目以降	供試塗料	規定の膜厚

養生後、試験片の上部および下部の2箇所に素地まで達する#型のカットを挿入し、ヒートサイクルに供した。

塗膜外観に顕著な差が見られた60サイクル後の結果を表4に示す（ただし、早期に剥離した仕様5については6サイクル後の外観）。

表4 試験結果と各種塗膜物性の対応

	仕様1	仕様2	仕様3	仕様4	仕様5
サイクル試験後外観					
外観評価	×	◎	○	◎	××
E_1	小	大	大	大	極大
T_g	低	高	高	高	高
α_1	大	小	小	小	極大

この結果より、たとえ E_1 が大きく T_g が高くとも、 α_1 さえ小さければ塗膜剥離し難いことが判った。

3.3 α_1 が異なる仕様の膜厚別試験

塗膜剥離に α_1 が支配的に寄与することから、 α_1 の値が異なる2種類の塗料を用いて、膜厚との関係性を確認する試験を行った。供試塗料は α_1 が比較的大きく実構造物で過膜厚時に塗膜剥離を生じた塗装仕様A（従来品）と、意図的に α_1 が小さくなるように配合した塗装仕様B（開発品）を用い、ヒートサイクル試験を行った。

結果（表5）、3.2の試験同様、 α_1 が大きいAは110サイクルと早い段階で大きく剥離し、 α_1 が小さいBは130サイクルでも軽微な剥離であった。また、Aはこれまで知られている通り厚膜ほど剥離面積が大きくなったが、Bは厚膜ほど剥離面積が小さいというこれまでの知見とは異なる驚くべき結果が得られた。

表5 α_1 が異なる仕様の膜厚別試験結果

塗装仕様A(従来品) 線膨張係数 α_1 : 大		塗装仕様B(開発品) 線膨張係数 α_1 : 小	
薄膜	厚膜	薄膜	厚膜
ヒートサイクル 110c		ヒートサイクル 130c	

3.4 剥離傾向が変化する閾値の確認試験

前述の試験結果より、塗膜の α_1 を変化させることで、厚膜化するほど塗膜剥離が生じ易くなる領域と、厚膜化するほど塗膜剥離し難くなる領域の境界値、つまり閾値が存在することが推察された。そこで、この閾値を確認するため、 α_1 を極端に小さくした塗料 C (100%) と、 α_1 を極端に大きくした塗料 D (0%) を試作し、この2種類の塗料をブレンドすることで傾斜的に α_1 の値を変化させた 11 種類の供試塗料を作製した。また、膜厚は薄膜仕様の $60\mu\text{m} \times 1$ 回と、厚膜仕様の $120\mu\text{m} \times 3$ 回 ($360\mu\text{m}$) の2水準とし、これまでと同様のヒートサイクル試験を行った。

その結果 (表 6)、 α_1 が大きい D (0%) は厚膜ほど早期に塗膜剥離面積が拡大し、薄膜ほど剥離面積が小さくなる傾向を示した。一方、 α_1 を小さくした C (100%) は厚膜ほど剥離面積が小さくなる傾向を示した。そして、この従来の概念とは異なる厚膜ほど剥離面積が小さくなる現象は、ブレンド率 70%以上から生じており、その閾値を測定したところ塗膜の線膨張係数 α_1 が $3.2 \times 10^{-5} [^\circ\text{C}]$ 以下であることが判った。

3.5 塗膜剥離抑制塗料の実機展開

塗膜は塗替え補修が行われ厚膜化すると遮断性が増す。一方、付着力は厚膜化することで内部応力が大きくなり、相対的に素地との付着力は小さくなる。何度も塗替え補修を行うといずれ内部応力が素地との付着力を上回り、塗膜の割れや剥離が発生する (図 2)。

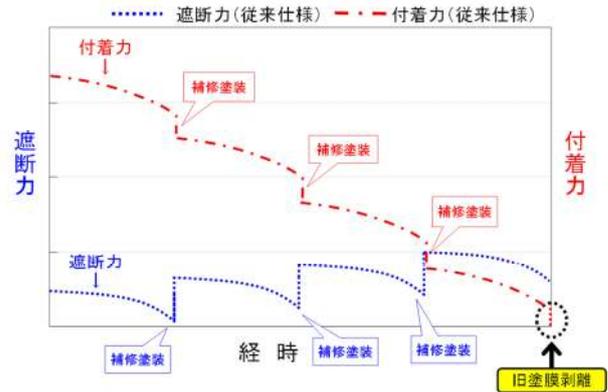


図 2 従来塗料を用いた補修塗装

これらは従来の塗料を使用している限り避けられない現象であり、これを未然に防ぎ健全な防食状態を維持するためには、ある時期にブラスト等による旧塗膜の除去が必要となる。

しかし、 α_1 が小さい開発塗料 (α シリーズ) を用いると、塗替え補修時に遮断性が向上する点は同じであるが、厚膜ほど剥離し難くなる特徴があるため、素地との付着力は保持され、塗膜剥離の危険性を回避あるいは延命することが可能になる (図 3)。

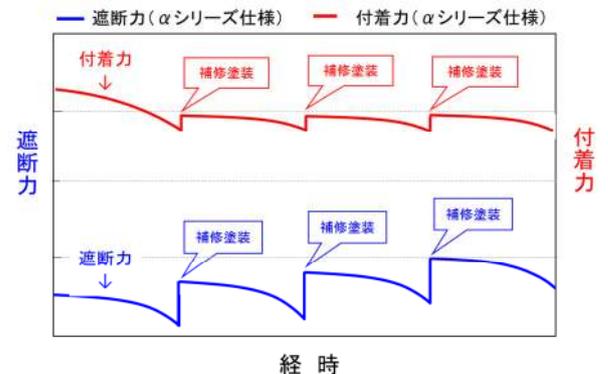


図 3 α シリーズを用いた補修塗装

表 6 閾値確認試験結果

	100%(C)	90%	80%	70%	60%	50%	40%	30%	20%	10%	0%(D)
薄膜 ($60\mu\text{m}$)											
								130cで終了	130cで終了	130cで終了	20cで終了
厚膜 ($360\mu\text{m}$)											
								80cで終了	50cで終了	30cで終了	20cで終了
								30cで終了	20cで終了	10cで終了	4cで終了

また、この α_1 が小さい開発塗料は、予防保全的になるべく早めの補修塗装の段階で導入する事によって、より付着力の高いレベルを保持することが可能である（図4）。

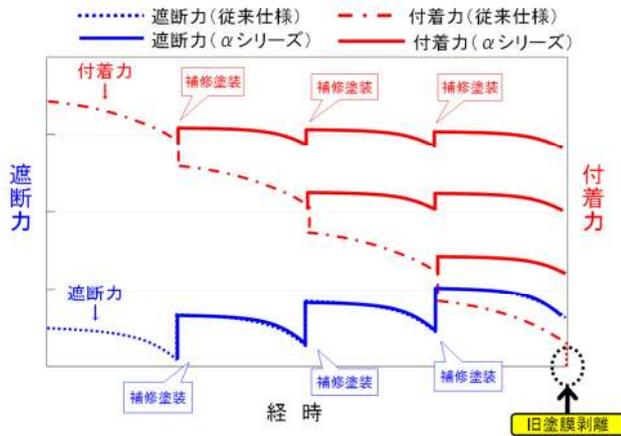


図4 α シリーズを導入後の付着力

4. まとめ

高度経済成長期に建造された鋼構造物は、塗替え補修が何度も行われ、塗膜剥離限界膜厚とされる1ミリ程度に達しているものが散見される。しかし、それらは今後も供用する必要があり、更に超長期の延命が望まれるが、それらを維持する費用は縮小される傾向にある。そのため、旧塗膜を全て除去する高額な工法を実施していくにはコスト的に無理があり、新たな延命手法を見出す必要がある。

そこで今回、塗膜の線膨張係数 α_1 に着目した塗料の開発を行ったところ、これまでの常識を覆す塗膜の挙動が明らかになり、この技術を用いることで超長期に使用する必要がある鋼構造物を延命出来る可能性が見えてきた。これまで塗料業界では α_1 に着目した塗料開発は行われていなかったが、今後は α_1 に着目した配合設計に進化していくものと思われる。

既にこの塗料を用いた実機塗装や試験塗装を実施しており、今後、追跡調査を行う予定である。

【謝辞】

本研究は平成25年度から5年間にわたって大手塗料メーカ3社（関西ペイント㈱、大日本塗料㈱、神東塗料㈱）と共同で研究し、得られた成果である。ご協力戴いた関係各位に謹んで感謝の意を表す。

【参考文献】

- 1) (公社) 日本道路協会：鋼道路橋防食便覧（第Ⅱ編 塗装編），pp.116-118（2014）
- 2) 関西鋼構造物塗装研究会：塗る，pp.95-99（2014）
- 3) (公財) 鉄道総合研究所：鋼構造物塗装設計施工指針，I 解-17（2013）