

塗膜の耐久性に関する調査・考察

Investigation and Consideration on Durability of Coating Film

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



清水 悠平
Yuhei SHIMIZU



宮下 剛
Tsuyoshi MIYASHITA

1. はじめに

道路橋は高度経済成長期に建設されたものが現在供用中の全橋の約4割を占めている。そのうち建設後50年を経過するものが2016年度には約20%、2026年度には47%まで達すると推計されている¹⁾。これらの高齢化した社会資本を全て取り壊し、新たに建設し直すことは今日の日本の財政事情から現実的ではない。従って、これらのインフラストックを適切なメンテナンスにより長寿命化させ、長期にわたり供用していくことが重要な課題である。

これら大型鋼構造物の防食手法の一つとして、効果的かつ経済的な面から塗装が幅広く適用されており、LCC(ライフサイクルコスト)の観点から、防食塗料に対する長期耐久性の要求は近年益々高まってきている。

重防食塗装仕様は、優れた防食性を発現する防食下地、および高い環境遮断性を有し防食下地を保護する下塗塗膜、耐候性に優れ太陽光に由来する紫外線を遮断し、鋼構造物に美観性を付与する上塗塗膜から構成される。

そこで、本報においては塗膜の長期耐久性を決定する重要な因子である以下2つの塗膜特性に焦点を当て、重防食塗装仕様における塗膜の耐久性について調査し考察を行った。

- ①塗膜の消耗に関する調査・考察
- ②塗膜の環境遮断性に関する調査・考察

2. 防食塗膜の耐久性に関する考察

日本を代表する海峡部橋梁である本州四国連絡橋においては、亜鉛による犠牲防食機能を有する無機ジンクリッチペイントを防食下地とした重防食塗装仕様を標準的な防食法として過去から取り入れている。

本橋の防食思想としては、無機ジンクリッチペイントの保護層である下塗り層の露出が生じる前の段階に、中塗りと上塗りを塗り替えることを基本としている²⁾。このような塗り替えを行うことで、防食下地である無機ジンクリッチペイントは、理論上劣化や消耗を生じることなく健全な防食機能を維持し続けることから、長期にわたり構造物耐久性の低下を抑制することができる(図1参照)。

上記の思想から、防食下地である無機ジンクリッチペイントを健全な状態に保つことが防食設計上重要である。防食下地を環境から保護する目的で、高い遮断性を有するエポキシ樹脂塗料が下塗り層として塗装される。しかし、エポキシ樹脂塗料は樹脂の構造上紫外線に弱く、樹脂の分解により劣化し塗膜が消耗しやす

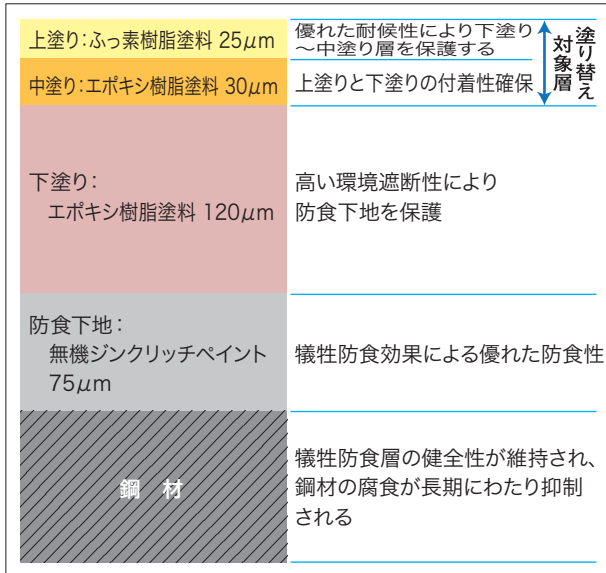


図1 海峡部橋梁の外面塗装仕様と防食思想

いため、これを保護するために耐候性に優れた上塗塗膜が必要となる。

本報においては、上記海峡部橋梁の防食思想を参考とし、架設後長期にわたり無機ジンクリッチペイントを健全な状態に保持することを前提とした塗膜の耐久性について、鋼道路橋防食便覧（公益社団法人日本道路協会発行）に記載の塗装系を例に塗膜の消耗（後記2.1）、および塗膜の環境遮断性（後記2.2）という2つの視点から考察を行った。

2.1 塗膜の消耗に関する調査・考察

前述のとおり、長期にわたり防食下地層を健全な状態に維持するためには、環境遮断性は優れるが耐候性に劣るエポキシ樹脂塗膜を保護する必要がある。そのため、上塗塗膜としては紫外線による劣化や酸素・水によって分解され難い、耐候性に優れる塗料を選定することが望ましく、過去から様々な塗料種において耐候性の評価が実施されている。

一般的に暴露環境における塗膜の劣化消耗は、塗膜表面の樹脂が光沢低下を起し、その後白亜化を生じ進行していく。この樹脂の劣化現象は紫外線（光エネルギーによる切断）、水分（加水分解）、酸素（酸化）などの因子により引き起こされ、紫外線の影響が最も大き

いとされている³⁾⁴⁾。

海洋技術総合研究施設（駿河湾、ISO 9223:2012で腐食性カテゴリーC4に分類される厳しい腐食環境）における暴露試験の結果から、光沢が低下しない初期状態を塗膜劣化の誘導期間とし、種々塗膜の消耗速度を評価した結果をまとめ、表1に示す⁵⁾。

表1 種々塗膜の消耗速度

上塗塗料の種類	年間平均消耗速度	誘導期間
エポキシ樹脂塗料	10.0 $\mu\text{m}/\text{年}$	—
ポリウレタン樹脂塗料	2.0 $\mu\text{m}/\text{年}$	2年
ふっ素樹脂塗料	0.5 $\mu\text{m}/\text{年}$	7年

上記、ふっ素樹脂塗料の誘導期間7年、年間平均消耗速度0.5 μm を、例えば鋼道路橋防食便覧に規定されるC-5塗装系のふっ素樹脂塗料上塗（膜厚25 μm ）に当てはめた場合、上塗塗膜の消耗までの期間は以下となる。なお、施工時における膜厚のバラつきを考慮し、耐用年数の算出に使用する膜厚は塗装目標膜厚の80%⁵⁾として計算している。

$$\frac{\text{誘導期間}7\text{年} + (\text{塗装目標膜厚}25\mu\text{m} \times 80\%)}{\text{年間消耗速度}0.5\mu\text{m}} = 47\text{年}$$

式1

一方で、沖縄を代表とする紫外線量の多い地域における塗膜劣化に関する研究報告は多数あるが、その一例として、ポリウレタン樹脂塗料は沖縄における暴露試験の結果、つくばと比較して約2.4倍の塗膜消耗量となっており⁶⁾、一般的に紫外線量の厳しい環境では消耗量が一般環境の2倍程度になるとされている⁷⁾。上記塗装仕様を紫外線量の多い地域に適用した場合の耐用年数を以下に算出する。なお、塗膜の光沢低下が生じない初期誘導期間についても一般環境の7年から半分⁸⁾の3.5年と仮定して計算した。

$$\frac{\text{誘導期間}3.5\text{年} + (\text{塗装目標膜厚}25\mu\text{m} \times 80\%)}{\text{年間消耗速度}1.0\mu\text{m}} = 23.5\text{年}$$

式2

これらの結果をまとめると、過去報告の暴露試験における上塗りの消耗速度から、重防食塗料における上塗塗膜は一般地域にて47年、強紫外線地域においては23.5年で消失し、中塗塗膜が露出する計算となる。鋼道路橋に対して重防食塗料の適用が開始してから30年程度が経過した現在においても、全面塗り替え塗装が行われた事例が極めて少ないことから、本年数は妥当性を有するものであると推測する⁸⁾。

ただし、本年数については、あくまでも上塗塗膜が塗膜として残存している年数を示した理論値である。実際の鋼構造物においては、上塗塗膜の膜厚減少により、中塗塗膜が透け、美観性を低下させるリスクや、上塗塗膜の紫外線遮断機能の低下に伴って、上塗塗膜を透過した紫外線が中塗塗膜表面の樹脂を劣化させ、中塗/上塗塗膜の層間付着性を低下させるなどのリスクを含む。このようなリスクは上記年数以前に生じ始めることに注意が必要である。

2.2 塗膜の環境遮断性に関する調査・考察

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⁹⁾。

- 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、これによる膨れ・さびの発生

Mengesら¹⁰⁾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=塗膜厚の二乗に比例)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(以下式3参照)。

式中の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、塗膜の付着性が維持さ

塗膜耐久性の考え方に関する

G. Menges , W. Schneiderらの関係式

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

L : 耐用期間 D : 拡散係数(mm²/sec)
t : 膜厚(mm) τ : 付着力その他の要因

式3

れている間は鋼界面への腐食生成物の滞留や鋼界面に沿った横方向への拡がりは妨げられるので致命的な欠陥にはならない(腐食誘導期間)。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生成物が滞留し、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、膨れや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性が維持されている期間(腐食進展期間)をτとしている。

つまり上記式から、①塗膜厚が厚く、②腐食性物質の拡散速度の遅い塗膜層を有し、かつ③鋼表面への付着力に優れる塗装仕様が耐用年数の長い塗装仕様であると言える。

一方で、Guruviah¹¹⁾, Baumann¹²⁾およびFunke¹³⁾らは、塗膜の透湿度は大きくても、酸素透過性は必ずしも大きいとは限らず、酸素の透過性が腐食反応の律速条件と成り得ることを報告している。つまり、金属の酸化反応(さびの発生・進行)に必須となる成分である酸素の遮断性の良否が塗装仕様の耐用年数を大きく左右すると推定している。

そこで本報においては、上記式中D(拡散係数)と耐用年数の関係に着目し、主たる腐食性物質であり、かつ腐食反応速度を支配する酸素に対する塗膜の遮断性に関し考察を行った。

重防食塗装系の定義は「ジンクリッチペイントの防食下地、腐食因子の遮断性に優れた下塗り、耐候性に優れた上塗りの塗り重ねによって構成され、海岸または海上のような厳しい腐食環境において、新設塗装に期待される耐久性(防食性能と耐候性能)が30年以上となる塗装系」とされている¹⁴⁾¹⁵⁾。また、上記耐久性を有する重防食塗装系の透湿度と酸素透過係数の目標値は以下表2のとおり報告されている¹⁶⁾。

表2 重防食塗装系の透湿度と酸素透過係数の目標値

塗装系	透湿度 ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot 24\text{h}^{-1}$)	酸素透過係数 ($\text{cm}^3\cdot\text{cm}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sec}^{-1}\cdot\text{cmHg}^{-1}$) $\times 10^{-11}$
重防食塗装系	3以下	1以下
一般塗装系 ¹⁾	8以下	100以下

1) 一般塗装系塗膜は、A塗装系(フタル酸樹脂仕様)やB塗装系(塩化ゴム系)を想定している。

重防食塗装系とは公益社団法人日本道路協会発刊の鋼道路橋防食便覧に規定されるC-5塗装系(以下表3)に代表される塗装仕様であり、防食下地を除いた下塗り～上塗りの3層合計175 μm にて環境遮断を担うこととなる(通常、ミストコート層は膜厚として換算しない)。

表3 鋼道路橋防食便覧規定のC-5塗装系

塗装工程	塗料名	目標膜厚	環境遮断層 (下塗り～上塗り) 総膜厚:175 μm
防食下地	無機ジンクリッチペイント	75 μm	
ミストコート	エポキシ樹脂塗料下塗	—	
下塗り	エポキシ樹脂塗料下塗	120 μm	
中塗り	ふっ素樹脂塗料用中塗	30 μm	
上塗り	ふっ素樹脂塗料上塗	25 μm	

上記表2中に規定されている酸素透過係数の目標値は単位膜厚当たりの酸素透過量のため、これをC-5塗装系の環境遮断層(下塗り～上塗り)の総膜厚である175 μm 当たりの酸素透過量に換算した。

$$1 [(\text{cm}^3\cdot\text{cm}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sec}^{-1}\cdot\text{cmHg}^{-1}) \times 10^{-11}] \times \frac{1}{0.0175\text{cm}} \\ = 57 [(\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sec}^{-1}\cdot\text{cmHg}^{-1}) \times 10^{-11}]$$

式4

式4の結果より、塗膜の遮断性という観点から、ジンクリッチペイント層を除く、下塗り層～上塗り層の酸素透過量が57[($\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sec}^{-1}\cdot\text{cmHg}^{-1}$) $\times 10^{-11}$]以下である塗装仕様であれば、重防食塗装系と同様に海岸・海上のような厳しい腐食環境においても、約30年以上の耐久性が見込めると推察する。

3. まとめ

本報においては、長期にわたりジンクリッチペイント層を健全な状態に保持することを前提とした重防食塗装仕様の耐久性について、既往の研究報告を調査し、塗膜の消耗、塗膜の環境遮断性という2つの視点から考察した。

その結果、海岸または海上のような厳しい腐食環境において、30年以上の耐久性(防食性能と耐候性能)を有するとされる重防食塗装系とは、以下2つの性能を備えた塗装仕様であることがわかった。

①塗膜の消耗に関する調査・考察

上塗塗膜については、消耗年数が一般地域にて47年、強紫外線地域においては23.5年となる耐候性に優れた塗膜であること。

②塗膜の環境遮断性に関する調査・考察

下塗り～上塗りの酸素透過量が57[($\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sec}^{-1}\cdot\text{cmHg}^{-1}$) $\times 10^{-11}$]以下となる遮断性に優れた塗膜であること。

4. おわりに

本報では塗膜の耐久性について、2つの側面より調査・考察を行い、鋼道路橋防食便覧に記載の重防食塗装系が有する性能を提示した。しかしながら、塗料は供用される環境や塗装時の施工品質など、種々の条件により発現する塗膜性能が大きく異なることから、本報にて取りまとめた考察は、あくまでも重防食塗装系の性能を決定する一因子である。

高齢化を迎えつつあるインフラストックの長期供用とライフサイクルコストの低減に対して、重防食塗料が担う役割は、今後さらに拡大していくものと考えられる。そのため、重防食塗料は今後も様々な新材料を組み合わせ多様に進化していくものと推察する。

当社は重防食塗料を提供することで、インフラストックの長寿命化における一側面を担っている。本報にて

提示した性能要件をはじめとする優れた塗膜性能を備えた高品質な重防食塗料の開発・提供を通して、今後も幅広く社会に貢献していきたい。

参考文献

- 1) 社団法人日本鉄構造協会：
JSSCテクニカルレポート No.55,
鋼橋塗装のLCC低減のために, 付-21, 2002
- 2) 一般財団法人日本防錆技術協会：防錆管理,
60(8), 307-312, 2016-08
- 3) 社団法人日本塗料工業会：
重防食塗料ガイドブック 第4版, P142, 2013
- 4) 社団法人日本鋼構造協会：重防食塗装
－防食原理から設計・施工・維持管理まで－,
P40, 2012
- 5) 社団法人日本塗料工業会：
重防食塗料ガイドブック 第4版, P143, 2013
- 6) 建設省土木研究所 社団法人鋼材倶楽部：
共同研究報告書整理番号238号
土木鋼材用重防食被覆材料の利用技術に関する
共同研究報告書(Ⅲ), P.32, 2000
- 7) 社団法人日本鋼構造協会：重防食塗装
－防食原理から設計・施工・維持管理まで－,
P45, 2012
- 8) 社団法人日本鋼構造協会：重防食塗装
－防食原理から設計・施工・維持管理まで－,
P68, 2012
- 9) 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
- 10) G. Menges & Schneider: Kautschuk und
Gummi Kunststoffe, 25, (5), 213, 1972
- 11) S. Guruviah : J. O. C. C. A., 53[8], 669-67,
1970
- 12) K. Baumann : Plaste und Kautschuk,
19, 455-461, 1972
- 13) W. Funke : Ind. Eng. Chem., Prod. Res. Dev.,
17[1], 50-53, 1978
- 14) 社団法人日本鋼構造協会：重防食塗装
－防食原理から設計・施工・維持管理まで－,
P33, 2012
- 15) 公益社団法人日本道路協会：鋼道路橋防食便覧,
P.II-4, 2014
- 16) 岩見勉, 糟谷誠, 門田進, 守屋進：
鋼構造物塗替塗装の性能規定化, Structure Paint-
ing, Vol.32, No.2, P.36-42, 2004