インフラ向け重防食塗装の特徴と今後の動向

宮 下 剛^a

^a 大日本塗料(株) (〒324-8516 栃木県大田原市下石上 1382-12)

Characteristics of Heavy Duty Coating for Infrastructure and Future Trends

Tsuyoshi MIYASHITA^a

^a Dai Nippon Toryo Co., Ltd (1382-12, Shimoishigami, Ohtawara-shi, Tochigi 324-8516)

Keywords : Life Cycle Cost (LCC), Corrosion Protection, Durability

1. はじめに

公共性の高い橋梁などの社会インフラは我々の生活に欠かせない重要な資産である。鋼橋を永く使い続けるためには腐食を抑制し、その耐力を維持する必要がある。鉄は酸素と水により酸化され最も安定な酸化鉄に戻るという習性がある。塩化物イオンなどの腐食性イオンによりその速度が加速度的に早まることも知られている。これらを制御し使いやすい状態に加工してその状態を維持するために“防食”が用いられる。“防食”において最も経済性が高く汎用的な手段が“塗装”である。海上に架かる長大橋(瀬戸大橋など)は海塩粒子や温度湿度の変化、紫外線などの影響を受け非常に過酷な腐食環境に曝される。日本は島国であり周囲を海に囲まれ、このような過酷な腐食環境で鉄を使用する場面が多い。早期に腐食するがメンテナンスがし難い環境では長期耐久性を期待した“重防食塗装”が用いられる。

“重防食塗装”という言葉が使われ始めたのはまだ歴史は浅く、またはっきりとした定義づけを行った著書は『重防食

塗装の実践』日本鋼構造協会編(1988年)¹⁾が最初であろう。ここでは重防食塗装系を『海岸または海面上のような厳しい腐食環境に建設される鋼構造物の塗替え周期が10年以上となる性能を有する塗装系をいう』と定義づけしている。

公共性の高い橋梁などの社会インフラはこの重防食塗装系が規定されており長期耐久性を有し、過酷な海上橋などでも塗り替え周期の延長を実現している。

2012年完成した東京スカイツリー[®]では同様の考えを応用し省工程化した重防食塗装系が採用されており景観性を維持しつつ25年の長期耐久性が期待されている²⁾。

2. インフラの建設動向

(一社)日本橋梁建設協会の統計データ³⁾(図1)によると橋梁受注実績は平成11年頃まで増加傾向を示し、多い年で鋼材トン数として約90万tの受注があった。その後、減少傾向が続き近年では25万t前後で推移している。一方、2017年12月の報道では地方自治体や道路公社が管理する道路橋について、老朽化に伴う架け替えを含めた修繕費用が今後

図1 橋種別受注実績

50 年間で 27 兆円に上るとの推計結果を筑波大や高知工大などの研究グループが発表する⁴⁾など、これまで作ってきた社会インフラを維持するための費用が今後増大することが予測されている。現存の社会インフラを供用し続けるためには適切な点検・診断のもと必要な補修・補強が肝要であり、重防食塗装の果たす役割は大きいことが伺える。

3. 重防食塗装の特徴

2005 年公益社団法人日本道路協会より発刊された鋼道路橋塗装・防食便覧⁵⁾において新たに建設される道路橋は表 1 に示す C-5 塗装系を適用することが望ましいとした。C-5 塗装系はエポキシ樹脂塗料下塗りを 1 回で 120 μm 塗装することで省工程化を図っており、また、上塗り塗料をふっ素樹脂塗料上塗とすることで塗替え周期の延長を期待されており、ライフサイクルコスト(LCC)の低減を果たしている。

現在適用される、鋼道路橋防食便覧(2014 年 3 月)においても同一の考えを踏襲しており高耐久材料の適用による LCC の低減が実践されている。

C-5 塗装系における各材料の構成と機能を表 2 に示した。各材料の持つ機能を組み合わせることで鋼材の長期防食性能をシステムとして発揮している。

4. 重防食塗装の周辺・応用技術
(LCC(ライフサイクルコスト)の低減技術)

先に C-5 塗装系を例に挙げ基本的な重防食塗装を解説した。ここで LCC とは建設から供用を終えるまでの総費用(初期投資費+維持管理費+解体撤去費)を意味する言葉である。近年これを算出し最も経済的な手段を講じることが望まれており、製作される重要大型構造物は計画的な維持管理を義務付けている場合もある⁶⁾。LCC を低減する手法として

- (1) 耐久性の高い材料の適用により次回のメンテナンスまでの期間を延長する方法
- (2) 従来の工程を省略できる材料の適用により、一回の施工コストを削減する方法
- (3) 施工上の工夫により耐久性を上げる、あるいは工程を短縮し、結果として LCC を低減する方法
- (4) 塗膜診断などを活用し、適正な塗替え周期を把握する方法

が挙げられる。以下にこの 4 つの手法を解説する。

4. 1 高耐久性材料の適用

既述の通り、LCC を低減するには高耐久性材料の適用により、塗替え周期を長くするのが効果的である。一方、重防食塗装の場合、この性能を最大限に発揮するためには無機ジンクリッチペイント塗膜を健全な状態に維持しなければならない。従って、塗装系の上塗りおよび中塗りの消耗速度が塗

表 1 一般外面向け塗装仕様 C-5 塗装系

塗装工程		塗料名	使用量 (g/m ²)	目標膜厚 (μm)	塗装間隔 (20℃)
製鋼工場	素地調整	ブラスト処理	ISO Sa2 1/2		4 時間以内
	プライマー	無機ジンクリッチプライマー	160	(15)	6 か月以内
橋梁 製作工場	2 次素地調整	ブラスト処理	ISO Sa2 1/2		4 時間以内
	防食下地	無機ジンクリッチペイント	600	75	2 日～10 日
	ミストコート	エポキシ樹脂塗料下塗	160	—	1 日～10 日
	下塗	エポキシ樹脂塗料下塗	540	120	1 日～10 日
	中塗	ふっ素樹脂塗料用中塗	170	30	1 日～10 日
	上塗	ふっ素樹脂塗料上塗	140	25	—

表 2 各材料の構成と機能

工程	塗料名称	構成	機能
プライマー	無機ジンクリッチプライマー	亜鉛末を高濃度に含有しエチルシリケートをバインダー成分とした湿気硬化型塗料で 15 μm 程度の薄膜である	鋼材を加工し重防食塗装を施すまでの間、鋼材の腐食を抑制する目的で使われ、下記防食下地と同様の機能を示す
防食下地	無機ジンクリッチペイント	亜鉛末を高濃度に含有しエチルシリケートをバインダー成分とした湿気硬化型塗料で厚膜化を可能としたもの	鋼材と直接接触することで犠牲防食作用を示し鋼材がイオン化し腐食することを抑制する
ミストコート	エポキシ樹脂塗料下塗+希釈剤	下記下塗塗料を希釈して用いる	無機ジンクリッチペイントの空隙を埋め発泡抑制を行うことで連続した下塗塗膜を形成させる
下塗	エポキシ樹脂塗料下塗	エポキシ樹脂とアミン樹脂からなる 2 液の反応硬化型厚膜塗料	環境遮断を行い、水、水蒸気、塩化物イオンなどの腐食因子が防食下地へ到達し難い状態を作る
中塗	ふっ素樹脂塗料用中塗	通常上塗に近い色相でエポキシ樹脂塗料で構成される	下塗、上塗との付着を確保し、上塗の仕上がり向上させるための色、表面平滑性を有する
上塗	ふっ素樹脂塗料上塗	耐候性の良いふっ素樹脂とイソシアネート樹脂からなる 2 液の反応硬化型上塗塗料	下層を紫外線から守り、長年に渡り塗膜消耗量が少なく耐久性が高い

替え周期を左右する大きな要素となる。山本ら⁷⁾や横地ら⁸⁾によればポリウレタン樹脂塗料上塗りの消耗速度は2μm／年であり、ふっ素樹脂塗料とポリウレタン樹脂塗料の消耗速度の比率は光沢保持率の対比が1：4であることから、ふっ素樹脂塗料の消耗速度は0.5μm／年と報告している⁹⁾。

ふっ素樹脂塗料上塗りは分子間の結合エネルギーが高く、紫外線の劣化を受けにくいいため、橋梁に使用されて20年以上経過している今日においても良好な耐候性を示している。『重防食塗料ガイドブック』¹⁰⁾では、塗膜の消耗は光沢低下が始まった時点から起こるとしているが、海洋施設での暴露試験結果から、光沢低下が始まるまでの期間(誘導期間)は図2のようにふっ素樹脂塗料上塗りの場合で7年、ポリウレタン樹脂塗料上塗りでは2年となる。一方、ふっ素樹脂塗料上塗りの消耗速度は同場所で0.33～0.43μm／年であり、安全サイドの数値を採用しても0.5μm／年となる。塗膜厚のばらつきから有効膜厚は標準膜厚の80%と考えると、ポリウレタン樹脂塗料上塗りの消耗期間は2(誘導期間)÷25(膜厚)×0.8(有効膜厚係数)÷2(消耗速度)≒12年となる。同様に、ふっ素樹脂系上塗りの消耗期間は7+25×0.8÷0.5≒45年となり、ふっ素樹脂塗料上塗りを適用すれば40年以上の耐久性が期待できることになる。

4. 2 省工程形塗料の適用

重防食塗装の分野においても直接的な施工コストの削減が強く求められているが、その手段の一つとして省工程化による塗装工期の短縮が挙げられる。塗料および塗装技術の進歩により、一層当たりの塗膜厚を大きくすることが可能となったことで塗装回数を削減する省工程システムが確立され、従

来2回で塗装していた膜厚を1回で塗装可能な厚膜形塗料、下中兼用塗料、中上兼用塗料あるいは下上兼用塗料といった塗料が開発されている。これらの塗料を塗装仕様に組み込むことで従来5工程であったものを3工程に短縮し、1回の施工コストを削減することでLCCの低減が可能となった。これらの塗料は一度に多くの膜厚をつける都合上、有効成分量も多く、結果としてVOC排出量が少なくなるため環境負荷低減にも一役かっているものが多い。

2012年に竣工した東京スカイツリー[®]は観光塔、電波塔の機能を有した国内最高層(634m)の鋼構造物である。ここでも重防食塗装が適用され今日に至っているが、ここで採用された塗装仕様は表3に示す省工程型の塗装仕様となっている。基本的なC-5塗装系の防食下地部分をミストコートが削減可能な有機ジンクリッチペイントとし、中塗り、上塗り部分を省工程化した厚膜形ふっ素樹脂塗料上塗りを適用することで5工程を3工程とし、同時に従来仕様に比べVOC削減率30%以上を果たしている²⁾。

4. 3 施工上の工夫によるLCC低減

構造物を長期に渡り保護する場合、その構造から比較的早期発錆する弱点部が従前の塗膜調査や模擬桁の暴露試験などより確認されている。弱点部となる部位は

- ①ボルト接合部やフランジのエッジなどの隅角部の多い構造
- ②腐食促進物質である塩化物イオンなどが堆積しやすく、雨がかりがし難く容易に洗い流されないような下フランジ下面
- ③水分影響を長期間うける支承部周辺

図2 駿河湾海上暴露試験結果(色相：グリーン)

表3 東京スカイツリー[®]に採用された塗装仕様

塗装工程		塗料名	使用量 (g/m ²)	目標膜厚 (μm)	塗装間隔 (20℃)
製鋼工場	索地調整	プラスト処理 ISO Sa2 1/2	160	(15)	4時間以内
	プライマー	無機ジンクリッチプライマー			6か月以内
タワー製作工場	2次索地調整	プラスト処理 ISO Sa2 1/2	600	75	4時間以内
	防食下地	有機ジンクリッチペイント			1日～10日
	下塗	エポキシ樹脂塗料下塗			1日～10日
	上塗	厚膜形ふっ素樹脂塗料上塗			—

などが挙げられる。こういった弱点部に対して、予め十分な防食性を有する適切な塗装仕様を適用し、全体的な発錆を抑制する工夫がなされている。また、フランジなどエッジ処理についても鋼道路橋塗装・防食便覧で規定されている例を代表として2Rの面取り加工がなされており、これによる膜厚不均一を極力避け、局部劣化が発生し難い構造となっている。その他の弱点部に対しても例えば溶接線周りの塗装前処理の適正化、構造的に結露水が堆積しない、あるいは高湿度とならないような内面構造や内面空調管理などが挙げられ、設計・施工側面における早期発錆の抑制に対する工夫が随所に垣間見られる。近年建設、あるいは補修される橋梁ではLCCの低減に対してこの施工上の工夫も重要な要素であり防食材料との相乗効果により、よりよい防食状態を長期間維持している。

4. 4 塗膜診断による適正な塗替え時期の把握

鋼構造物の防食状態を正しく把握し、塗替え時期を適正化するために塗膜診断が活用されている。塗膜診断はこれまで、外観観察、附着性試験、色調、光沢の記録などを行うことで判断されてきた。近年では塗膜下の鋼材の状態を非破壊で確認できるカレントインタラプタ法¹¹⁾(ISO 13129)を用いた塗膜診断も提唱され、見た目とともに鋼材の健全度を数値化評価することで構造物の防食状態の健全性を担保する技術も活用され始めている。

適切な塗替え時期を判断し、最も経済的な塗替え時期に環境に合った補修を行うことでLCCを低減することが可能となる。

5. 重防食塗装の今後の動向

5. 1 材料開発動向

本報はここまで塗装に限った記載をしてきたが本来重防食を考えた場合、耐食性金属被覆や電気防食、溶射なども非常に重要な技術である。塗装は比較的安価で経済性の高い材料として利用されているが、今後は特にメンテナンスのし難い場所においてはLCCの観点より初期投資費用が高くとも耐久性の高い材料の適用が望まれると考える。

重防食塗装材料においては現在最も依存している亜鉛の代替を考慮しておく必要がある。亜鉛の既存埋蔵量可採年数＝現有埋蔵量／年間消費量を単純に計算すると24年という数字が確認できる¹²⁾。枯渇と直結する数字ではないが逼迫していることは十分に伺える値である。現在確認されている埋蔵量と消費量、埋蔵量ベースと言われる技術的に採掘可能であるが経済的理由などで未だ採掘されていない量を考慮しても2050年には不足する状況が予測されている。鉄に電子を与え犠牲防食作用のある現在の重防食の考えを踏襲可能な新たな防食下地を開発するか、全く異なる方法で長期耐久性を示す材料開発が望まれる。

これら高機能な長期耐食性材料を実現し実装するためには材料開発もさることながら新しい耐食性材料を適切に評価する方法、実績を追跡し実証していく活動、耐食性材料の持つ弱点の克服と適切な適用も重要な課題になると考える。

一方、図3¹³⁾に示す通り今後50年を超える架設橋梁数は現在でも増加傾向にあり、膨大な社会資本ストックに対してより経済的なメンテナンス方法の開発、よりよい材料開発が求められる。とりわけ鉄が塩化物イオンの影響を受けさびた状態に対してどのようにメンテナンスを行うことが最良なのかは現時点ではまだ開発途上であり、今後の補修材料の革新が期待される。

5. 2 設計・施工技術動向

設計・施工技術は防食を効果的に発揮させるためになくはない防食材料のパートナーであり、これまでの経験や知識を次世代に向け伝承し、継続的に進化することが望まれる。構造設計の過程で、より腐食しない構造物の設計を考えると製作過程における適切な処理技術、検査技術の進化により、構造上の弱点部を補い更なる長期耐久性の向上に向けた活動が期待される。

5. 3 AI, IoT, ビックデータなどの活用

近年IT産業の目覚ましい成長に伴って判断の自動化、ものとインターネットが繋がる社会、大量な過去のデータを整理し最適な状況を把握する技術などに応用されている。社会インフラの維持に対しても積極的な活用がなされ、土木学会等で

図3 道路橋整備の経年分布(国土交通省資料による)¹³⁾

は一つのセッションを構成し最新技術の議論がなされている。

構造物自身への本将来技術の活用はもとより、重防食塗装においても将来、正確な劣化予測やモニタリング、補修の自動化など一定の判断の元、人の手を借りず維持管理がなされる時代がやってくる可能性が高いと考えられる。

6. おわりに

筆者は長年重防食塗装に携わり、防食塗材やシステムの開発・改良を行ってきた。近年変化してきた流れは

- 1) 鉛・クロムなどの有害重金属を削減する活動
- 2) 地球温暖化に配慮した業界としての VOC 削減活動
- 3) LCC 低減を果たす省工程化、省力化、時間短縮化
- 4) より耐久性を向上させ、LCC 低減に寄与する高機能材料の提供
- 5) 安全・安心を提供する機能性材料の提供

である。

今後の動向にも少しだけ触れたが、今後は材料と施工の相乗効果により、より高い技術を提供しあうことで社会インフラの延命化や経済性の高い LCC を低減させた防食工法が実現することを期待したい。

また、材料については一定の品質を維持するための規格・基準は必要であるが、材料特性の規格・基準化に拘らず適切な性能規定を行うことと、それを早期に正しく実現するための新たな加速試験等の提案も必要であると考ええる。

重防食用の塗料は貯蔵・運搬・塗装準備・塗装作業・乾燥・供用など液体から固体に状態を変えながらその場の状況に応じて様々な性能・性状を要求される。より塗り易い材料を提供することで使い勝手がよく、且つ性能発現が確実になる。今後もより塗り易く、性能発現し易い塗料の開発・改良に邁進したいと考える。

(Received April 9, 2018)

文 献

- 1) (一社)日本鋼構造協会; 重防食塗装の実際, (山海堂, 1990).
- 2) 山本基弘, 山内健一郎, 堀長生, 奥田章子; 日本接着学会誌, 47, (9), 369 (2011).
- 3) (一社)日本橋梁建設協会; 統計, p.125 (2016).
- 4) 堤 盛人; 第35回建設マネジメント問題に関する研究発表・討論会, 全国の橋梁に係る将来の費用推計の試み(土木学会, 2017).
- 5) (公社)日本道路協会; 鋼道路橋塗装・防食便覧, (2005).
- 6) (財)港湾空港建設技術サービスセンター; 港湾の施設の維持管理計画書作成の手引き, 平成19年(2007).
- 7) 山本紀夫, 古家彦, 杉山剛史; 本四技報, 16, (61), 26 (1992).
- 8) 横地忠五, 瓜谷詔夫; 防錆管理, 32, (3), 68 (1988).
- 9) (一社)日本鋼構造協会; JSSCテクニカルレポート, No.55, (2002).
- 10) (一社)日本塗料工業会; 重防食塗料ガイドブック第4版, (2013).
- 11) 堀田裕貴, 森田さやか, 為信一郎; 第33回防錆防食技術発表大会講演予稿集, p.61 ((一社)日本防錆技術協会, 2013).
- 12) (独)物質・材料研究機構; 材料と全面代替戦略, p.11 (2007).
- 13) (一社)日本鋼構造協会; 重防食塗装, (技報堂, 2012).