塗装講座 (第Ⅺ講)

色材, 73 [6], 312-316 (2000)

橋梁の防食対策

田中 誠*

1. はじめに

橋梁は、交通路を連絡するために、河川、湖沼、海峡、運河、溪谷、鉄道線路、道路などの上に架設する構築物である。橋梁に用いられている材料は、古くは石や木材であった。その後材料技術や橋梁設計技術の発達によって、鋼やコンクリートで作られるようになった。

コンクリート橋梁は、メンテナンスフリーで60年以上の耐久性が期待されていた。しかし、昭和59年(1984年)4月9日にNHKがコンクリートの早期劣化について特集した「コンクリートクライシス」を切っ掛けに、塩分による鉄筋腐食やアルカリ骨材反応などによるコンクリートの早期劣化が広く一般に知られるようになった。コンクリート構造物もメンテナンスが必要であるというのが今の一般認識となっている。

鋼製の橋梁の防食は、被覆による方法と耐食性材料の適用に分けられる。被覆による防食で、最も利用されているのが塗装である。耐食性材料として橋梁に実用されたものに耐候性鋼材がある。耐候性鋼材の適用は、1980年代に始まり、JR関連だけでもすでに数百連に達し、今後とも適用例が増加すると考えられる。さらに、これまでの耐候性鋼材が適用できなかった塩化物イオンの多い環境にも適用可能な海浜用耐候性鋼材が開発され、最近実用に供され始めている。

鉄道分野では、JR関係だけでも4万連を越える鋼製の橋梁(鋼鉄道橋)を保有している。その多くは、構造用鋼に塗装したものである。ここでは、鋼鉄道橋に適用されている防食塗装や今後の課題などを紹介する。

2. 鋼鉄道橋の防食塗装

鋼鉄道橋の塗装による防食対策は、「鋼構造物塗装設計施工指針」¹⁾(以後は塗装指針という)にもとづいて実施されている。塗装指針における防食塗装の考え方や概要について以下に紹介する。

2.1 塗装指針の概要

鋼鉄道橋は60年以上の使用が期待されている。実際に、JR関係では平均使用年数が60年を超えており、100年近く使用されているものも少なくない。このように、鋼鉄道橋は60年以上の使用が前提で、その防食対策である塗装には、可能な限りの長期間の耐久性が期待されている。現状の塗料技術では、単一の塗料のみでこれらの要求をみたすことができない。そこで、美観性、防食性等の要求を満足するために、複数の異なる性質を持つ塗料を組合わせたものを使用している。これを塗装系と称している。塗装指針は、塗装系の選定や将来発生す

図-1 塗装による防食対策の工程

平成12.4.3受理
Corrosion Protection Methods for Bridges
Makoto TANAKA

* (財)鉄道総合技術研究所
東京都国分寺市光町2-8-38 (〒185-8540)

〔氏名〕 たなか まこと
〔現職〕 (財)鉄道総合技術研究所
〔趣味〕 読書、アウトドアスポーツ
〔経歴〕 昭和55年東北大学理学部化学科卒、
同年日本国有鉄道入社、昭和57年
鉄道技術研究所化学研究室入所

る塗替え塗装について、鋼鉄道橋の製作から廃棄までの全行程を網羅できるよう図-1 に示す内容で構成されている。

橋梁製作に当たって、設計時に適用すべき塗装系を選択することになる。もっとも耐久性が高いと考えられる塗装系でもせいぜい20～30年程度の耐久性しか期待できないのが現状である。したがって、複数回の塗替え塗装を実施しなければならない。塗替え塗装を効果的に行うためには、塗膜の劣化状態を判定し、鋼へのダメージが少なく、しかも少ない塗装経費で施工が可能な最適の時期を判定しなければならない。塗替え塗装は、塗膜の劣化度評価結果に応じた施工がなされる。塗替え塗装に用いる塗装系は、原則として橋梁新設時と同じ系が適用される。しかし、塗膜劣化が当初の想定を越えるほど激しい場合やその他の情勢が変化した場合は塗装系の変更も考慮する必要がある。

2.2 塗装系の概要と選択方法

鋼鉄道橋は、その構造から合成桁、トラス、プレートガーダ、トラフガーダに大きく分けられる。合成桁は鋼桁の上に道床（バラストやスラブ軌道が敷設できるコンクリート構造；道路の床板に相当）をもつ構造で、トラフガーダは、数m程度の小さい桁に使用されるものである。トラスとプレートガーダは、図-2のような構造で、もっとも普通に見ることができる。プレートガーダは、その断面形状からI型断面と箱型断面に分けられ、箱型断面のものを箱桁と称している。これらの橋梁に適用される塗装系は、その構造に最適なものとしなければならない。このため、塗装指針では、橋梁の構造、架設環境（腐食性の違い等）、架設工法の違いを考慮し、13種の塗装系から選択できるようにしている。

塗装の適用される部位で分類すると、大きく外面用、箱桁内面用と添接部用の塗装系に分けられる。箱桁内面は、密閉空間となり美装を必要としない特徴がある。添接部とは、部材と部材をボルト・ナットで接合する箇所をいい、橋梁架設後に現場において塗装することになる。ここでは、最も面積的に大きく、外部から観察できる外面に適用される防食塗装について紹介する。

図-2 橋梁の構造例

塗装指針に規定される外面用塗装系の代表例を表-1 に示す。塗装系は、橋梁の架設環境条件の違いと橋梁部位の特性から一般環境用塗装系、特殊環境用塗装系と特定部位用塗装系に大分される。一般環境と特殊環境の区分は、橋梁架設環境の腐食性の区分に塗替え塗装作業の難易等を加味したものである。特定部位は、鋼鉄道橋固有の問題として、まくら木が直載される上フランジ上面と桁端部をいう。特定部位は、他の部位に比較し、腐食等の塗膜劣化の進行が早い箇所である。

塗装系BとDは油性系の塗料を用いた塗装系で、安価なためもっとも使用量の多い塗装系である。その他の塗装系は、エポキシ樹脂系塗料を中心とした塗装系で、長期の耐久性が期待でき長期防錆型塗装系（重防食塗装系ともいわれる）と称している。塗装指針策定に先立ち、1976年に塗装系B、H、JおよびLを含む8種の塗装系を実物の橋梁を用いた塗装試験に供し、その後定期的に塗膜の状態変化を追跡調査している。この橋梁は、日本海に面し、海岸線から約50m、海水面から約5mの高さで、多量の飛来塩分を被る環境に位置している。塗装系Bは、架設後3年で腐食が観察され始め、その後腐食面積が増大し約6年程度で塗り替えるべき状態にいたった。しかし、塗装系H、JおよびLは、その塗膜表面に白亜化や光沢低下は見

表-1 鋼鉄道橋に適用される外面用塗装系の例

別	系	使用される塗料種	備考
一般環境	B	エッチングプライマ+鉛系さび止めペイント+長油性フタル酸樹脂塗料	5層で約120 μ m
	D	エッチングプライマ+鉛系さび止めペイント+結露面用塗料	5層で約120 μ m
	E, G	エッチングプライマ+E: タールエポキシ樹脂系塗料, G: 厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料	4層で約270 μ m
特殊環境	H	厚膜型無機ジンクリッチペイント+厚膜型エポキシ樹脂系塗料+ポリウレタン樹脂塗料	6層で約250 μ m
	J	厚膜型有機ジンクリッチペイント+厚膜型エポキシ樹脂系塗料+ポリウレタン樹脂塗料	6層で約250 μ m
	L, M	無機ジンクリッチプライマ+L: 厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料, M: タールエポキシ樹脂系塗料	4層で約290 μ m
特定部位	S	専用プライマ+ガラスフレーク塗料	3層で約1mm
	R	専用プライマ+超厚膜型エポキシ樹脂塗料	2層で約400 μ m

注：塗装系Hは新設時のみの塗装系、備考欄は新設時の塗膜層数と塗膜厚み

られるが、初期に発生した塗膜欠陥部からの腐食以外に腐食の増大が観察されておらず、20年以上経過した時点でも塗替え塗装が必要な状況にはいたっていない²⁾。したがって、試験した長期防錆型塗装系は、現時点で20年以上の耐久性が期待できる塗装系といえる。

塗装系の環境区分と形状等の区分に対応した選択例を表-2に示す。一般環境用塗装系は橋梁架設環境の腐食性が低い箇所へ適用され、特殊環境用塗装系は腐食性の高い環境に適用されるのを原則としているが、構造や架設環境から塗替え塗装の間隔（塗替え塗装周期）を長期間としたい場合は、一般環境と想定される箇所でも特殊環境用塗装系が適用できる。たとえば、東北新幹線の東京から大宮付近の鋼鉄道橋は、その多くが跨線橋や跨道橋のため、塗替え塗装作業が困難と当初に予想され、特殊環境用塗装系が適用されている。

一般環境で夜間しか塗装作業ができない箇所では、結露による塗装面の濡れが予想され、塗装系Bが適用できない。そこで、高湿度環境でも塗装できるよう開発した結露面用塗装系Dを適用する。コンクリートとの接触部は、コンクリートのアルカリ成分のため油性系塗料は早期にはく離などの劣化にいたる。そこで、耐薬品性が高いエポキシ樹脂系塗料を用いた塗装系を適用する。構造上塗替え塗装が困難な箇所や常湿地帯は、塗替え塗装周期延伸を目的にエポキシ樹脂系塗料の塗装系を適用する。

塗装系は、橋梁製作工場で上塗り塗料まで塗装（全工場塗装）する場合と、中塗り塗料と上塗り塗料を橋梁架設後に現場で塗装（現場塗装）する場合がある。工場塗装はスプレーを用いた塗装が、現場塗装は刷毛塗りが基本である。このため、現場塗装より工場塗装の方が塗膜厚みの均質な塗膜を得やすいと考えられ、工場塗装が防食上好ましい。しかし、工場から現場までの運搬や架設工事で塗膜が損傷を受ける。この箇所がその後の塗膜耐久性に影響するため、設計時に採用した橋梁構造と架設工法の塗膜に与える影響と塗装系の特性を考慮し、全工場塗装と現場塗装を使い分けの必要がある。表-3に特殊環境用塗装系での使い分けの例を示す。トラスは、どのような架設工法を用いても多くの塗膜損傷を受ける構造である。このため、損傷部の補修塗装作業量が多くなり、外観の仕上がりも悪くな

表-3 特殊環境用塗装系の選択例（構造および架設工法別）

架設工法	構造			
	合成桁	トラス	プレートガーダ	トラフガーダ
ベント・クレーン架設	H*, J*	H	L*	L*
手延架設	J		J	
ケーブルエレクション		H		
跳出し架設		J		

注：*は全工場塗装が適用可能な場合の塗装系

ると考えられる。このため、トラスは架設工法によらず現場塗装を適用する。ベント・クレーン工法は、足場を組みクレーン等で架設するため、塗膜損傷が発生しにくいと考えられ、全工場塗装が適用可能である。手延架設工法は、橋梁の一端を保持し、ローラ上を転がしながら橋梁を引き出し架設する。このため、下フランジ下面がローラからの圧力を受ける。この場合は、圧縮されても塗膜損傷を受け難い有機ジンクリッチペイントを用いた現場塗装の塗装系Jを適用することになる。

2.3 工場塗装

塗装系の防食性能を十分に発揮するためには、塗装前の鋼板の表面処理（素地調整）が重要である。東海道新幹線建設前は、圧延された鋼板をそのまま使用していた。そのため、鋼板表面に鉄の酸化皮膜（マグネタイトを主成分とする黒色の皮膜で黒皮と称す）が残存した面に脱脂程度の処理で塗装することになる。黒皮上への塗装は、時として塗膜の付着性が低くなり、はく離などの早期劣化の原因となっていた。そこで、東海道新幹線建設を期に、素地調整法にプラスト処理が導入され今日にいたっている。

素地調整法は、表-4に示すように、一般環境用と特殊環境用で架設環境の腐食性の違いや適用する塗料の違いから若干異なる処理となっている。素地調整と塗装に際して留意する点を表-5に示す。プラスト処理および溶接部の処理における留意点は、塗装前の鋼板表面と塗膜との付着性が最大限に発揮されるために必要な条件である。素地調整後3時間以内の塗装は、相対湿度80%以下の環境でプラスト処理した鋼表面の腐食が塗膜性能に大きな影響を与えない時間範囲の中から、プラスト工程から塗装工程への移行時間を考慮して、達成可能と考えられる時間を設定し決められた。プラスト作業は、相対湿度80%以上の場合に作業禁止としている。これは、気温0℃以上の場合、相対湿度が80%を越えると、金属表面に水膜が形成され濡れた状態となる（ISO 9223）。このため、鋼の腐食反応がいちじるしく促進され、3時間以内でも実用上で問題となるほどの腐食生成物で覆われることとなる。そのため、作業は相対湿度80%以下で実施するよう定めている。

塗装作業における塗料種ごとの温度と湿度の制限は、形成される塗膜の期待性能が十分に発現できる範囲となるように設けている。多くの塗料は、相対湿度の上限を85%としている。この理由は、施工時の気温20℃の場合、塗装された塗料から溶剤揮発のため塗装面の温度が外気温よ

表-2 塗装系の選択例（架設環境や形状等の区分による選択）

形状等の区分	架設環境の区分	
	田園・山間等の腐食性の低い環境	海岸等の腐食性の高い環境
鉄桁外面	B, E, G	H, J, L, M
塗装作業が夜間しかできない箇所	D	L, M
構造上塗替え塗装が困難な箇所	E, G	
常湿地帯		
コンクリートに接触する鋼材		
箱桁内面等（密閉状態の箇所）	EE	MN

表-4 鋼板の塗装前処理

塗装系	原板加工前の処理	塗装直前の素地調整
一般環境用	原板プラスト後にエッチングプライマ塗布	原板加工で生じた損傷箇所を除錆度 B Sa 2(ISO 8501-1) 以上まで部分プラストしエッチングプライマ塗布
	無処理（黒皮鋼板）	加工・組立て後に除錆度 B Sa 2(ISO 8501-1) 以上まで全面をプラストし塗装系の第1層目を塗布
特殊環境用	原板プラスト後に無機ジンクリッチプライマ塗布	加工・組立て後に除錆度 B Sa 2 1/2(ISO 8501-1) 以上まで全面をプラストし塗装系の第1層目を塗布

表-5 作業上の留意点

作業	留意点
プラスト作業	相対湿度 80% 以下の屋内での施工 表面付着物等の除去
塗装作業	素地調整後 3 時間以内の塗装 塗装時の気温および相対湿度の制限
溶接部の処理	加熱処理または 48 時間以上経過後の塗装 溶接方法、表面状態により中和処理

り 2.5℃低くなると仮定すると、塗料表面で大気中の水蒸気が液体に変わる相対湿度（露点）は約 85% となり、これより相対湿度が高い場合には、目視で確認できるほどの水膜が塗料表面に形成され、塗膜仕上りやその上に塗装された塗膜との付着に影響するためである。ただし、結露面用塗料は、相対湿度 90% まで施工可能なように開発された材料のため、上限を 90% としている。無機ジンクリッチペイントは、空気中の水分との反応で塗膜硬化が進む材料であるため、逆に 50% を相対湿度の下限値として定めている。

屋外施工では、塗膜表面に付着した飛来塩分が塗膜性能に大きく影響する。付着した塩分の塗膜の性能に与える影響試験で、油性系塗料の場合に付着塩分量が 50mg/m² 以上、長期防錆型塗装系では 100mg/m² 以上の場合に、塩分付着面に塗装された塗膜のふくれ発生やはく離といった実用上問題となる変状にいたる結果が得られた。そこで、塗装に際しては、塗膜表面の付着塩分量を測定し、上記の値を越える場合は水洗等の除塩作業をするよう定めている。なお、塩分の飛来は地域で異なり、日本海側では海岸から比較的離れた箇所でも相当量の飛来が想定³⁾されており、日本海側での施工は特に注意が必要である。

2.4 塗替え塗装

塗膜は環境中の各種因子との相互作用で徐々に変化し、鋼の

腐食を抑制する能力が低下する。このため、防食性能の回復・補強を目的とした塗替え塗装が必要となる。JR 東日本の塗替え塗装実績調査によると、塗装系 B の塗替え塗装周期の平均は約 13 年⁴⁾であった。橋梁の使用期間を 60 年と仮定すると平均で 4 回の塗替え塗装が実施されることになり、塗替え塗装が大きな比重を占めることがわかる。

塗替え塗装前の塗膜状態の違いが、塗替え塗装経費や塗替えた塗膜の耐久性に大きく影響する。このため、経費を考慮しつつ、最適の塗替え塗装時期を判定する必要がある。鉄道で実施している塗り替え塗装時期の判定は、橋梁部材別に外観を観察し、見本写真と照らし合わせて塗膜劣化度の評点を付け、橋梁の構造別に各部材の重要度から重み付けした劣化度を計算して行っている。日本道路公団では、外観観察者の感性の違いによる差を排除する目的で画像処理技術を用いた塗膜劣化状態評価法⁵⁾による判定も実施している。

鋼鉄道橋の塗替え塗装は、外観観察の結果から計算された劣化度別に表-6 に示す素地調整を行うことから始まる。道路関係では、素地調整法としてプラスト処理を採用している。しかし、鋼鉄道橋の多くは、完全に覆った施工が不可能に近い構造となっている。このため、特殊な場合をのぞき、プラスト処理を素地調整法として採用できない。劣化度Ⅰは全面の劣化であり、プラスト処理以外の方法では十分な素地調整が期待できないのが現状である。したがって、塗装指針ではこのような事態にいたらぬよう、劣化度Ⅲの段階に塗替え塗装を計画するよう推奨している。

塗替え塗装時の塗装系は、原則として新設時の塗装系と同一の系が採用される。ただし、一般環境用塗装系 B がすでに適用されている橋梁で、塗替え塗装作業が困難（制約が多い場合など）である場合や腐食性の高い環境に位置し塗替え塗装周期を延伸したい場合にはエポキシ樹脂系の塗装系に変更できる。

特殊環境用塗装系の塗替え塗装には、部分塗替え塗装と全面

表-6 塗膜劣化程度と素地調整

劣化度	施工法	備考
Ⅰ	動力工具、手工具の併用で全面に鋼を露出させる	鋼露出箇所の処理程度は ISO 8501-1 の C St 3 以上とするが、くぼみにはさびや旧塗膜が残存することがある。
ⅡおよびⅢ	活膜は残し、さび部や鋼素地に達する塗膜異状部は動力工具、手工具の併用で除去し鋼を露出させる。鋼素地に達しない塗膜異状部は異状部分を除去する。	
Ⅳ	ワイヤーブラシおよびペーパー等で塗膜表面の粉化物や汚れを除去する。塗膜異状部は異状部分を除去する。	

表-7 特殊環境用全面塗替え塗装例（塗装系Jの刷毛塗り例）

工程	塗料名	使用量 (g/m ²)	適用箇所
第1層	厚膜型エポキシ樹脂ジンクリッチペイント	300	鋼露出部のみ
第2層	厚膜型エポキシ樹脂ジンクリッチペイント	300	
第3層	厚膜型エポキシ樹脂系塗料下塗	200	
第4層	厚膜型エポキシ樹脂系塗料下塗	200	
第5層	ポリウレタン樹脂塗料用中塗	130	全面
第6層	ポリウレタン樹脂塗料上塗	110	

塗替え塗装の2種類がある。部分塗替え塗装は、塗膜の欠陥部（周りの塗膜と比較して薄いか塗装時に不純物を巻き込んだりしたとかで防食性能の低い箇所）から早期の腐食が発生した場合に実施される。塗膜欠陥部周辺の健全な塗膜が高い防食性能を持つために、腐食性の高い環境での塗膜欠陥部の腐食は、鋼材の面方向に進展するより鋼材内部に向かって進行し孔食になりやすい特徴を持つ。このため、腐食面積の増大を待ってから塗替え塗装では、鋼材に大きなダメージを与えることになる。したがって、塗膜欠陥部からの腐食等の変状が見られた段階で、変状部分のみを塗替え、その周辺の健全部と防食性能を合わせるための部分塗替え塗装が実施される。全面塗替え塗装は、景観上塗替えが必要になった場合と塗膜全体の防食性能が低下した場合に実施される。全面塗替え塗装の例として、塗装系Jを用いた場合を表-7に示す。塗替え塗装は、全塗料を全面に施工するのではなく、素地調整で鋼が露出した部分に防食性回復を目的に第1層から第6層まで適用され、旧塗膜残存部は防食性の補強と美装を兼ねた第4層から第6層までの3層のみが適用される。

なお、塗替え塗装作業は、新設時と同様に塗装作業時の気温、相対湿度および付着塩分量で制限される。

3. 今後の課題

第2次世界大戦後に物資不足がしばらく続き、鋼鉄道橋は腐食したまま放置されていた。そのため、それらの補修や更新に莫大な経費を要する事態にいたった。この時の経験が鋼橋梁等の構造物維持管理に関する研究を大きく推進した。その後、防食塗装の分野は、化学工業の目覚ましい発展により、20年以上の耐久性が期待できる塗装系が得られるようになった。しかし、これまでは新設時を想定した開発が中心であったため、塗替え塗装系の開発の観点からの展開は不十分と考えている。さらに、昨今の環境問題に対する社会情勢の変貌は、これまでの技術開発方針の大幅な変更を迫っている。これらの情勢や最近の調査結果等を踏まえて、今後検討すべき課題と考えられる項目を以下に示す。

(1) 鋼鉄道橋の平均使用年数は60年を超え、多数回の塗替え塗装を実施しているものも多い。このため、多層の厚い旧塗膜を持つ古い橋梁では、塗替え塗装塗膜の硬化収縮による内

部応力発生で塗膜われが突然に多数発生する可能性⁶⁾が高くなってきた。また、東海道新幹線建設以前に製造された橋梁は、黒皮鋼板の上に塗装されており、複数回の塗替え塗装の後に突然に広い面積で剥離する事例が増えてきている。このように、厚い旧塗膜を持つ橋梁や塗膜との付着性が悪い黒皮鋼板の橋梁における塗替え塗装時の問題を整理し、適した対処法を検討する必要がある。

(2) 腐食性が比較的高い環境の橋梁では、腐食箇所が前回の塗替え塗装時に腐食していた箇所と同じ箇所であることが多い⁶⁾。この箇所の劣化が塗替え塗装周期を決めることとなるため、塗替え塗装周期延伸を計るためには、ブラスト処理の困難な条件下でも適用可能なブラスト処理に匹敵する性能の素地調整方法や腐食生成物が残存しても十分な耐久性が期待できる塗装材の開発が望まれる。

(3) 長期防錆型塗装系は、20～30年の耐久性が期待できると述べたが、この根拠となったのは実橋梁を用いた約25年に及ぶ試験結果である。長期防錆型塗装系のように200 μ mを超える塗膜の実環境における耐久性を早期に推定できる方法がない⁷⁾。今後の高耐久性材料の開発や次に述べる環境対策を検討する上で、短期間に耐久性を推定できる手法の開発が急がれる。

(4) 地球環境問題は避けて通れない課題となり、来る21世紀は「環境の世紀」であるともいわれている。塗装分野も例外ではなく、塗料中のVOC（揮発性有機化合物）、鉛やクロム化合物の削減に向けた世界的な動きがある。環境問題を無視した技術開発が社会に受け入れられなくなる時代が到来しつつあると考えられるので、環境問題に対応した防食対策の有るべき姿を早急に検討する必要がある。

文 献

- 1) (財)鉄道総合技術研究所編集：「鋼構造物塗装設計施工指針」，研友社，1993。
- 2) 町田洋人，田中誠，江成孝文，遠藤三郎，桐村勝也：“実橋における長期防錆型塗装系の追跡調査”，第21回鉄構塗装技術討論会発表予稿集，p 39，1998。
- 3) 田中誠，江成孝文，町田洋人，遠藤三郎：“飛来塩分と風に関する一考察”，腐食防食'96講演集，D-206 S，1996。
- 4) 興水聡，藍郷一博，伊藤昭夫：“鉄道橋における塗装塗替え周期の延伸について”，第22回鉄構塗装技術討論会発表予稿集，p 35，1999。
- 5) 藤原博・三宅将・堀江啓夫：“鋼橋の塗膜劣化と塗膜下腐食との相関性に関する研究”，平成7年度試験研究所報告 Vol. 33，日本道路公団，1995。
- 6) 田中誠，町田洋人，江成孝文，遠藤三郎，桐村勝也：“多層の旧塗膜を持つ構造物の塗替え塗装”，防錆管理，Vol. 43，No. 8，p 293，1999。
- 7) 田中誠，江成孝文，町田洋人：“塗膜劣化評価試験に関する一考察”，防錆管理，執筆中，2000。