

長期防錆型（重防食）塗装の歴史と現状

田中 誠
元(財)鉄道総合技術研究所

1. 長期防錆型（重防食）塗装の歴史

1.1 防食塗装の歴史

明治維新前後に、日本は西洋化を求めて、多くの技術導入が図られた。その中でも鋼を用いた構築物の導入が盛んに行われた。日本最初の鋼橋は、長崎の“くろがね橋”といわれ、1868年（明治元年）長崎製鉄所で製作された錬鉄製プレートガーダー橋である。鉄道では1874年（明治7年）に開業した大阪・神戸間に錬鉄製の鋼橋（ワーレントラス）が初めて適用された。鋼を屋外環境にそのまま放置したのでは腐食する。そのため、腐食防止を目的に塗装が適用された。当時の日本には防錆顔料製造技術がなく、鉛丹を防錆顔料とする塗料（西洋塗料）が輸入され使用されていた。

早々に西洋塗料の研究が始まり、鉛丹製造技術の完成とともに、1881年（明治14年）に初めて国産鉛丹さび止めペイントが光明社（後の日本ペイント株式会社）から発売された。明治末期から大正時代には多くの塗料会社が誕生し、その後の防食塗料は国産塗料が主流となった。

昭和初期には、合成樹脂の研究が始まり、フタル酸樹脂系塗料の採用や鉛丹に代わる鉛系さび止めペイントも用いられるようになった。第二次世界大戦後には、現在用いられているエポキシ樹脂やポリウレタン樹脂などの合成樹脂に関する研究が大きく進んだ。これらの合成樹脂を用いた塗料・塗装技術が広く実用されたのは1970年代になってからであり、現在はこの種の塗装を長期防錆型塗装や重防食塗装と称している。

1.2 長期防錆型（重防食）塗装の用語について

用語としての長期防錆型塗装、重防食塗装の定義にあいまいさが残っている。用語の意味は、時代とともに変わってきているようにも思われる。塗装系の開発当初には、過酷な腐食性環境でも耐える（Heavy Duty）塗装との意味合いで使われていたようだ。その後、下地塗装にジンクリッチ（亜鉛末リッチ）塗料を用いているものとか、塗膜厚みが200 μm を超えるものとか様々な解釈もあったが、今日では従来からの汎用塗装より長期間の耐久（防錆）が期待できる塗装との意味合いが強いように思われる。

そこで、鋼橋等の陸上鋼構造物での塗膜耐久期間の目安について考えてみる。従来からの汎用塗装である鉛系さび止めペイントとフタル酸樹脂塗料を用いた塗装系では、最初に塗替え塗装が必要になるまでの塗装実績は、海岸等の環境で5~10年程度、その他の環境で10~20年程度（鉄道での全国平均15年）である。従って、15年以上の耐久（防錆）が期待できる塗装系は、汎用塗装より長期の耐久が期待でき、長期防錆型（重防食）塗装と言えることになる。これは世界共通の考え方ともいえる。すなわち、塗装系に関する国際規格 ISO 12944-1 “Paints and varnishes-Corrosion protection of steel structures by protective paint systems Part1; General introduction”でも塗装系の耐久性（Durability）の程度を、耐久年2~5年を低（Low）、5~15年を中（Medium）、15年以上を高（High）と3区分していることから伺える。

1.3 長期防錆型（重防食）塗装の研究の背景と流れ

長期防錆が期待できる塗料及び塗装の研究は、本州四国連絡橋（本四架橋）の計画・建設により大きく発展したことは周知のとおりである。そこで、本四架橋の歴史と防食塗装の研究について振り返ってみる。

本四架橋の必要性は明治時代から地元代議士などにより強く求められていたが、長い間具体化に至らなかった。しかし、1955年（昭和30年）5月11日の修学旅行中の小学生など死者168名を出した国鉄宇高連絡船「紫雲丸」の海難事故がきっかけで、本四架橋の構想が具体的に動き出した。1959年には、国鉄と建設省による調査で、明石・鳴門ルート（Aルート）、宇野・高松ルート（Bルート）、日比・高松ルート（Cルート）、児島・坂出ルート（Dルート）、尾道・今治ルート（Eルート）の5ルートが具体化の検討対象となった。

本四架橋はその大部分が海上橋となるため、鋼の防食が大きな技術課題の一つとして取り上げられた。そこで、1960年前後に国鉄鉄道技術研究所と建設省土木研究所とが、それぞれ個別に海上橋に適用できる防食性能に優れた塗料及び塗装系の研究を開始している。

その後、1969年には新全国総合開発計画に3ルート（A、D、Eルート）の建設が明記され、1970年1月31日閣議により、3ルートの設計調査を同時に着手する方針が決定された。これを受けて、1970年7月1日に本州四国連絡橋公団（本四公団）が設立された。それまでに国鉄と建設省とで個別に実施してきた防食塗装の研究は、本四公団に引き継がれ、これに国鉄鉄道技術研究所と建設省土木研究所が協力する形で進められることになった。

一方、1973年9月に工事に関する基本計画指示が出され、Aルートは新幹線と道路の併用橋（1985年に道路占用橋に変更）、Dルートは新幹線・在来線併設の道路との併用橋、Eルートは道路占用橋となった。同年10月26日には、工事実施計画が認可されている。1975年にEルートの大三島橋、1976年にAルートの大鳴門橋、1977年にEルートの因島大橋が着工された。しかし、1977年4月の閣議了承によりDルートの早期完成を図ることが示され、1978年にDルート全線の着工、1988年4月10日全面開通となった。

長期防錆型の塗料・塗装の研究は、本四公団に引き継がれるまで、国鉄鉄道技術研究所と建設省土木研究所がそれぞれで行っていた。両研究所とも現地での暴露試験等を通じて、防食塗装に関する同様の研究を実施していたと聞く。しかし、筆者は土木研究所で実施していた研究の情報に乏しいので、ここでは、鉄道技術研究所で行われてきた研究【章末の参考文献1）～4）】についてのみ、その概要を紹介する。

長期防錆型塗装の研究では、試験室内での塗膜物性に関する研究以外に、現地での長期（1959年～1985年）に渡る複数の暴露試験が実施されている。第1次及び第2次暴露試験は海上環境における塗膜劣化の基礎特性評価や素地調整の影響などの評価が中心であった。長期防錆型塗装系については、第3次暴露試験で本格的な検討を行い、絞り込まれた塗装仕様について第4次暴露試験が実施されている。また、第3次及び第4次暴露試験は、試験途中で本四公団へ研究が引き継がれている。第4次暴露試験の途中で、実構造物への適用試験が計画され、五能線深浦駅近くの吾妻川橋梁（1976年）及び行合川橋梁（1977年）を用いた全工場塗装試験及び現場塗装試験が実施されている。第5次暴露試験は、構造物の運搬・架設時に生じた塗膜損傷個所の補修対策法検討のための試験である。次に、各暴露試験について概要を紹介する。

第1次暴露試験

暴露期間：1959年4月～1964年2月

暴露場所：鳴門市土佐浦及び淡路島松帆崎（Aルート想定）

各種塗料の組み合わせによる耐久性比較を目的とした暴露試験を実施した。塗装前処理としてのさび落としが必要であることが確認された。また、下塗りとしては油性系さび止め塗料、上塗りとしてはアルキッド樹脂系塗料（長油性フタル酸樹脂塗料もこの一種）が優れているとの結果を得た。なお、第1次暴露試験計画当時には、1957年に開発されたばかりの無機ジンクリッチペイントなどは採用されなかった。

第2次暴露試験

暴露期間：1964年4月～1970年4月

暴露場所：鳴門市土佐浦（Aルート想定）

主たる塗料を油性系さび止め塗料とアルキッド樹脂系上塗り塗料に限定し、素地調整法の違い（ショットブラスト、りん酸及び塩酸処理）、各種ショッププライマーの比較、さび止め塗料の顔料比較、塗り重ね間隔の影響、鋼種（各種高張力鋼、耐候性鋼）の違い等の影響を検討した。現地で上塗り塗装した試験片において、暴露初期に“はがれ”が観察され、海塩粒子付着の影響と想定された。暴露開始後2年程度で塗膜表面に“割れ”が観察されるようになり、5年経過後には全試験片に“割れ”が発生した。しかし、防食性の観点からは、約6年暴露後も異状は観察されなかった。一方で、亜鉛系下地に塗り重ねた塗膜の付着力が不十分との結果も得られた。

参考：研究成果を踏まえて、本四架橋鉄道桁の縦桁上フランジには耐候性鋼（塗装仕様）が採用されている。

第3次暴露試験

暴露期間：1965年4月～1982年

暴露場所：香川県高松港内のいかだ上（Dルート想定、1971年に児島市暴露架台付近に移動）

長期耐久性が期待できる塗料を選定し暴露試験を開始した。選定した塗装系を大別すると、ジンクリッチペイント（1957年開発）を下塗りとし、エポキシ樹脂（1964年開発）、タールエポキシ樹脂（1962年開発）、ビニル樹脂、アクリル樹脂等を上塗りとしたものと、厚膜型塗料のみを用いたものである。これらの塗料をサンドブラスト処理鋼板に表裏共に塗装し、上面と下面の耐久性の違いも評価対象とした。

暴露は、写真1に示す“いかだ”を用いたため、陸上暴露の第2次暴露試験に比較し厳しい腐食環境と推定される。暴露後4年で塗膜厚み200 μm 以下の塗装系に“さび”発生が観察された。また、タールエポキシ樹脂塗料に合成樹脂塗料を上塗した塗装系では、例外なく上塗り塗膜に“割れ”や“はがれ”が発生した。長期の暴露結果をまとめると、塗膜厚み250 μm 以上の塗装系には点さび発生率が低く、長期の耐久が期待できること、エポキシ樹脂系塗料の防食性が高いこと、亜鉛系被覆を下地として用いる場合には塗料の組み合わせにより劣化の進展が早い場合があることなどが明らかとなった。



写真1 高松港での海上暴露試験

第4次暴露試験

暴露期間：1967年9月～1982年

暴露場所：岡山県児島市（Dルート想定）

塗膜の層間“はがれ”と上塗り塗膜の“割れ”に影響する塗料の組成，金属溶射と塗装の併用，ジンクリッチペイントと厚膜型塗料の併用，現場で中，上塗りする際の塗装間隔の影響等について検討するための暴露試験を開始した。

5年経過時に一部の試験片に“割れ”が観察されたが概略良好な結果であった。10年経過後もなおほとんどの試験片が良好な防食状態を維持していた。

第5次暴露試験

暴露期間：1975年3月～1985年3月

暴露場所：岡山県児島市（Dルート想定）

橋梁部材の運搬や架設時に発生する塗膜損傷部の補修用塗料の防食性評価を目的に，塗り残し部を設けた試験片を暴露し，さび発生後に表面処理，塗装した試験片を再暴露した。

暴露後約4年で多くの試験片に“微小ふくれ”が観察された。その中でもエポキシ樹脂ジンクリッチペイントを下塗りに用いたエポキシ樹脂塗装系及びジクロメートさび止めペイント・フェノール樹脂系MIOを用いた塗装系で良好な結果が得られている。

その後，多くの試験片に点さびが発生し，経過年とともに増大し，さび部の処理が重要であることが明らかとなった。この中で，エポキシ樹脂ジンクリッチペイントを用いた塗装系が他の塗装系に比較し，防食性が高いことが伺われた。

参考文献

- 1) 今井，住吉，吉田，大川，橋本：海峡連絡鉄道橋の塗装，鉄道技術研究報告，No.422（1964）
- 2) 佐藤，吉田，橋本，今井，大川：本州四国連絡鉄道橋塗装試験，鉄道技術研究所速報，No.67-32（1967）
- 3) 佐藤，吉田，橋本，大川，今井，菅谷，滝永：海洋環境の橋梁の防錆塗装，鉄道技術研究報告，No.771（1971）
- 4) 桐村，橋本，佐藤，大川：海洋環境における防食塗装，鉄道技術研究報告，No.1070（1978）

2. 長期防錆型（重防食）塗装の実用化

長期にわたる試験結果に基づき、道路分野、鉄道分野とも 1970 年代に現行の長期防錆型（重防食）塗装の基盤となる塗装仕様が規格化されている。当時の長期防錆を考慮した塗装仕様【参考文献 5）から抜粋】を表 1 に紹介する。

表 1 初期の長期防錆型（重防食）塗装仕様（外面用）

	時期	記号	仕様の概要	備考
鋼 道 路 橋 塗 装 便 覧	1971 年	C-2	前処理 : 1 種ケレン, ジンクリッチペイント 下 1 (工場): ジンクリッチペイント 中 1 (現場): エポキシ樹脂系プライマー 上 1, 2 (現場): エポキシ樹脂系上塗	腐食性の激しい個所
		C-4	前処理 : 1 種ケレン, ジンクリッチペイント 下 1 (工場): フェノール系ジンクロメートプライマー 下 2 (工場): MIO 系プライマー 中 1 (工場): MIO 系プライマー 上 1, 2 (現場): MIO 系上塗	長大橋又は海岸地区
	1979 年	C-1	前処理 : 原板プラスト, ジンクリッチプライマー 下 1 (工場): 厚膜形ジンクリッチペイント 下 2 (工場): ミストコート 下 3, 4 (工場): 塩化ゴム系下塗り塗料 中, 上 1 (現場): 塩化ゴム系中塗, 塩化ゴム系上塗	外面用
		C-2	前処理 : 原板プラスト, ジンクリッチプライマー 下 1 (工場): 厚膜形ジンクリッチペイント 下 2 (工場): ミストコート 下 3 (工場): エポキシ樹脂下塗り塗料 下 4 (工場): エポキシ MIO 塗料 中, 上 1 (現場): ポリウレタン樹脂塗料用中塗, ポリウレタン樹脂上塗	外面用
		C-3	前処理 : 原板プラスト, ジンクリッチプライマー 下 1 (工場): 厚膜形ジンクリッチペイント 下 2 (工場): 短ばく形エッチングプライマー 下 3 (工場): フェノールジンクロメート下塗り塗料 下 4 (工場): フェノール MIO 塗料 中, 上 1 (現場): 塩化ゴム系中塗, 塩化ゴム系上塗	外面用
	本 四 公 団 塗 装 暫 定 仕 様	1976 年	2 3	前処理 1 次: (2,3)原板プラスト, 無機ジンクリッチプライマー 前処理 2 次: (2,3)製品プラスト 下 1 : (2)厚膜形無機ジンクリッチペイント, (3)亜鉛溶射 下 2 : (2,3)短バク型エッチングプライマー-1 種 下 3 : (2,3) フェノールジンクロメートペイント 下 4, 5 : (2,3) フェノール MIO 塗料 中, 上 1 : (2,3)塩化ゴム系中塗, 塩化ゴム系上塗
5 6			前処理 1 次: (5,6)原板プラスト, 無機ジンクリッチプライマー 前処理 2 次: (5,6)製品プラスト 下 1 : (5)厚膜形無機ジンクリッチペイント, (6)亜鉛溶射 下 2 : (5)ミストコート, (6)短バク型エッチングプライマー-1 種 下 3, 4 : (5,6)厚膜形エポキシ又は厚膜形ポリウレタン 中, 上 1 : (5,6)ポリウレタン樹脂塗料用中塗, ポリウレタン樹脂塗料上塗	腐食の厳しい環境 全工場塗装 5 と 6 は構造で使分け
鉄 道 鋼 橋 暫 定 仕 様	1976 年	13A	前処理: 製品プラスト 下 1 : 無機ジンクリッチプライマー 下 2, 3 : 厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料 上 1 : 厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料上塗	腐食性環境 全工場塗装 景観不要
		14A-1 14A-2	前処理: 製品プラスト 下 1 : (14A-1)厚膜型無機ジンクリッチペイント, (14A-2)厚膜型エポキシジンクリッチペイント 下 2 : (14A-1)ミストコート, (14A-2)厚膜型エポキシ樹脂塗料 下 3 : (14A-1) 厚膜型エポキシ樹脂塗料, (14A-2)厚膜型エポキシ樹脂塗料 下 4 : (14A-1)厚膜型エポキシ樹脂塗料 中, 上 1 : ポリウレタン樹脂塗料用中塗, 非黄変型ポリウレタン樹脂塗料上塗	腐食性環境 全工場塗装 景観重視 14A-1 と-2 は構造, 架設工法で使分け

参考文献

- 5) (社) 日本鋼構造協会: 「鋼橋塗装ライフサイクル調査研究最終報告」, JSSC テクニカルレポート, No.30 (1994)

3. 最近実用の長期防錆型（重防食）塗装系の特徴

最近に実用されている代表的な長期防錆型（重防食）塗装系（外面用）の道路仕様（塗装系 C-4, 塗装系 C-5）及び鉄道仕様（塗装系 L-2, 塗装系 J-2）を表 2 に示し、次いで、各塗膜の特徴や期待する性能などについて概説する。

表 2 代表的な長期防錆型（重防食）塗装系（新設時 外面用）

素地調整	処理	除錆度・表面あらさ	備考	
1 次	原板ブラスト	除錆度：ISO Sa 2 1/2 あらさ：80 μ mRz JIS 以下	相対湿度 80%以上は、ブラスト禁止 ブラスト後直ちに無機ジंकリッチプライマー 製鋼工場で圧延後行う処理、俗称：ショップ鋼板	
2 次	製品ブラスト	除錆度：ISO Sa 2 1/2 あらさ：50 μ mRz JIS 以下	相対湿度 80%以上は、ブラスト禁止 橋梁製作工場で、仮組立後に塗装に先立ち（3 時間以内）行う。表面あらさは、鋼材疲労強度を考慮	
塗装系	工程	仕様塗料	目標膜厚	備考
C-4	1 層目	無機ジंकリッチペイント	75 μ m	相対湿度 50%以下 塗装禁止
	2 層目	ミストコート	期待せず	3 層目の高希釈塗料
	3 層目	エポキシ樹脂塗料下塗	60 μ m	相対湿度 85%以上 塗装禁止
	4 層目	エポキシ樹脂塗料下塗	60 μ m	
	5 層目	ふっ素樹脂塗料用中塗	30 μ m	
	6 層目	ふっ素樹脂塗料上塗	25 μ m	
C-5	1 層目	無機ジंकリッチペイント	75 μ m	相対湿度 50%以下 塗装禁止
	2 層目	ミストコート	期待せず	3 層目の高希釈塗料
	3 層目	厚膜型エポキシ樹脂塗料下塗	120 μ m	相対湿度 85%以上 塗装禁止
	4 層目	ふっ素樹脂塗料用中塗	30 μ m	
	5 層目	ふっ素樹脂塗料上塗	25 μ m	
L-2	1 層目	無機ジंकリッチプライマー	20 μ m	相対湿度 50%以下 塗装禁止
	2 層目	厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料	90 μ m	相対湿度 85%以上 塗装禁止
	3 層目	厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料	90 μ m	
	4 層目	厚膜型ポリウレタン樹脂塗料上塗	50 μ m	
J-2	1 層目	厚膜型エポキシ樹脂ジंकリッチペイント	75 μ m	相対湿度 85%以上 塗装禁止
	2 層目	厚膜型エポキシ樹脂系塗料下塗	60 μ m	
	3 層目	厚膜型エポキシ樹脂系塗料下塗	60 μ m	
	4 層目	ポリウレタン樹脂塗料用中塗	30 μ m	
	5 層目	ポリウレタン樹脂塗料上塗	30 μ m	

3.1 素地調整について

素地調整は、鉄鋼メーカー等で行う 1 次素地調整と橋梁製作工場で行う 2 次素地調整がある。いずれにも共通する施工条件として、相対湿度 80%以上でのブラスト作業禁止がある。これは、相対湿度 80%を超えると鋼材表面に水膜が形成（1 μ m 以下の極薄の水膜）し、実用上に影響する程度の鋼腐食が生じるためである。また、表面あらさの上限を規定している。これは、摩擦接合への影響（粗いほうが良い）、鋼材の疲労強度への影響（ある粗さ以上で強度が低下）、塗り付けた塗膜の防食性能（塗膜均一性には細かいほうが良い、付着性には粗いほうが良い）への影響及び施工性（研掃材の種類と処理速度）などの検討結果を踏まえたものである。

(1) 1 次素地調整

鉄鋼メーカー等の鋼板製造工場で、橋梁等に用いる一般構造用圧延鋼材（SS 材）や溶接構造用圧

延鋼材（SM 材）表面のミルスケール（いわゆる黒皮）除去等を目的とし、ブラスト処理（ショットやグリットが主流）を行う。ブラスト処理後直ちに（3 時間以内）にプライマーを約 15 μ m の厚みで塗装する。この鋼板をショップ鋼板と称する。

昭和 30 年代以前は、ミルスケールを除去せずに橋梁を製作していた。当時の製作方法は、部材を切断し、リベットで接合していた。昭和 30 年代後半からは、溶接や高力ボルトによる接合に製造方法に移行してきた。高力ボルト接合は、接合面の摩擦力による接合のため、鋼表面のミルスケールやさびの除去が必要不可欠になる。

ブラスト処理された鋼材表面は、活性が高く、早期に腐食する。このため、鋼材加工中の防食や次に示す 2 次素地調整後のターニング現象（さびが浮く現象）の軽減を目的に、ブラスト処理後直ちにプライマーを塗装するようになった。当初は金属前処理塗料と称するエッチングプライマーを用いていたが、長期防錆が期待できるジンクリッチペイントを用いる塗装系では、無機ジンクリッチプライマーを用いたショップ鋼板を用いるのが定位となった。

(2) 2 次素地調整

橋梁製作工場では鋼板の加工、溶接などを行い、仮組み立て後の塗装前に鋼材表面の汚れ・さびや残存プライマー除去を目的にブラスト（製品ブラスト）を行ってから塗装を行う必要がある。また、溶接部も溶接方法に応じた処理を行った後に、溶接線の部分ブラストが別途必要である。塗装は、1 次素地調整と同様の理由で、ブラスト処理後 3 時間以内に行うことを原則としている。

3.2 防食下地（第 1 層目）

塗装系 C-4、C-5 では無機ジンクリッチペイント（塗膜厚み約 75 μ m）、塗装系 L-2 では無機ジンクリッチプライマー（塗膜厚み約 20 μ m）、塗装系 J-2 では厚膜型エポキシ樹脂ジンクリッチペイント（塗膜厚み約 75 μ m）を用いている。何れの塗装系も亜鉛末リッチな塗料を用いている共通点がある。

亜鉛末リッチな塗料の防食原理は、塗膜が素地に達する損傷を受けた場合に、亜鉛が鋼に優先して腐食することで防食する、いわゆる犠牲防食作用によると考えられている。この機能を発揮するためには亜鉛末含有量が多い必要がある。

長期防錆型（重防食）塗装に用いる防食下地塗料の特徴を比較すると表 3 のようになる。

表 3 亜鉛末リッチ塗料の特徴

塗料	無機ジンクリッチペイント	無機ジンクリッチプライマー	厚膜型エポキシ樹脂ジンクリッチペイント
亜鉛含有量	75%以上	80%以上	75%以上
硬化機構	大気中の水（湿気）によるアルキルシリケートの加水分解縮合		エポキシ樹脂と硬化剤の混合による反応硬化
犠牲防食性能	良好	やや劣る（亜鉛末の総量が少）	劣る
付着性	低い（凝集破壊しやすい）	やや良好（薄膜のため）	良好
耐衝撃性	低い	良好（表面粗さに対し薄膜のため）	良好
塗装間隔	標準より長いほうが望ましい	速乾性で薄膜のため標準で可	
施工時の制約	相対湿度許容範囲が狭い（50～80%）、過膜厚で割れやすい（ペイントタイプ 150 μ m 以上、プライマータイプ 50 μ m 以上）		エポキシ樹脂塗料とほぼ同じ
下塗り	ミストコート必須	ミストコートは多くの場合不要（空隙が少ない）	

3.3 下塗り塗料（エポキシ樹脂塗料下塗り，厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料など）

下塗り塗料はすべての塗装系で，酸素や水の透過性が低く，耐薬品性が高く，強い付着性の期待できるエポキシ樹脂又は変性エポキシ樹脂を用い，防錆顔料を配合した塗料が用いられている．また，すべての塗装系で下塗り塗膜の厚みが 120 μm 以上となるように設計されている．すなわち，環境遮断性の向上を目的とした配合となっている．

3.4 中塗り塗料

塗装系 C-4, C-5 ではふっ素樹脂塗料用中塗が，塗装系 J-2 ではポリウレタン樹脂塗料用中塗が用いられている．名称の・・・塗料用中塗とは，・・・上塗り塗料を用いるための中塗り塗料という意味で，使用している樹脂がポリウレタン樹脂やふっ素樹脂とは限らないことを示す．一般には，下塗り塗料であるエポキシ樹脂との付着性確保を目的に，エポキシ樹脂系の材料を用いた塗料設計がなされている．従って，防錆顔料を配合していないが，耐薬品性や環境遮断性に優れたエポキシ樹脂を用いているので，防食性能向上を少しは期待できる．

塗装系 L-2 では，上塗り塗料に変性エポキシ樹脂との付着性に優れたものを用いていること，下塗り塗膜の厚みが 180 μm と他の塗装系より厚膜の設計になっていること，高い景観性能を求めない構造物への適用を想定していることなどから，あえて中塗り塗料を用いない塗装仕様になっている．

3.5 上塗り塗料

防食塗装系の設計では，防食性能を上塗り塗膜に期待しないのが基本である．上塗り塗料に求める機能は美観（光沢，色）維持性能である．美観維持には，俗に言う耐候性，具体的には耐紫外線性が求められる．屋外に直接暴露すると，有機化合物は紫外線と水などの影響（顔料の影響も含む）で，塗膜表層を構成する分子が徐々に分解する．この現象で，塗膜表面の光沢低下，色変化，白亜化（チョーキング）に至る．

塗装系 C-4, C-5 ではふっ素樹脂塗料が，塗装系 J-2 ではポリウレタン樹脂塗料が，塗装系 L-2 では厚膜型ポリウレタン樹脂塗料が上塗り塗料として用いられている．それぞれ名称は異なるが，塗膜形成がポリオールとイソシアネートの縮合反応（ウレタン反応）で硬化する同種の材料であり，ISO12944-5 では 2 液形ポリウレタン樹脂塗料（Polyurethane 2-pack paints）に分類される．

ポリウレタン樹脂に使用するポリオール樹脂とイソシアネート樹脂には多種あるが，塗料に用いる樹脂は耐黄変性に優れるなど耐紫外線性が高いものが選択されている．また，耐候性向上を目的に，紫外線吸収剤，酸化防止剤，ラジカル補足剤などを添加したものもある．

上塗り塗膜の耐候性は，使用する樹脂種に影響されるが，添加する顔料の影響も大きい．一般に，淡彩色の顔料を用いると，光沢低下や白亜化は，濃彩色の顔料を用いた場合より早期に発生することが多い．ふっ素樹脂塗料でも顔料との組み合わせが悪いと 10 年程度で白亜化した事例もある．また，色変化は樹脂種よりむしろ着色顔料の耐候性の影響が非常に大きい．従って，景観重視の構造物では，耐候性の高い樹脂と着色顔料及び樹脂に悪影響を与えない顔料の最適組み合わせが必要となる．具体的には，光沢低下を許容するなど景観性能を重視せず，30 年程度の耐減耗性を期待するのであれば，汎用のポリウレタン樹脂塗料で十分といえる．しかし，長期の光沢や色の維持を期待するのであれば，耐紫外線性の高いふっ素樹脂と耐候性の高い顔料を用いる必要があり，塗料単価として，選択する色にもよるが 5 倍以上の差が生じることもある．

4. 実構造物へ適用された長期防錆型（重防食）塗膜の現状

表 1 の長期防錆型（重防食）塗装系が実用されてから既に 30 年以上経過している。本格的な塗替え塗装が必要なほどに防食機能の劣化事例は少なく、大多数の構造物では所期の性能が発揮されている。しかし、一部には、塗装系開発時の想定を超える塗膜劣化に至っている事例もある。そこで、長期防錆型（重防食）塗装の発展や塗替え塗装時の対策に寄与するため、主な劣化事例を次に紹介する。

4.1 構造物健全性への影響は小さいが、変状として認識される塗膜劣化事例

構造物の健全性には大きく影響せず、塗膜の防食性能が維持されているため、対策をあわせて検討する必要はないが、目視で明らかに認識できる塗膜変状のため、初めて経験した維持管理担当者にとっては、その対処に戸惑うと考えられる塗膜劣化事例を紹介する。

(1) 現場補修塗り塗膜と工場塗り塗膜とに外観差が表れた事例

全工場塗装とは、橋梁製作工場で上塗り塗膜まで塗装することであるが、添接部や橋梁の輸送・架設工事で損傷した部位は、橋梁架設後に現場での補修塗りとなる。このため、写真 2 に示すように、20 年以上経過した場合には、工場で塗装した上塗り塗膜と現場で塗装した部位（添接部や補修塗り箇所）の塗膜外観に差が生じる。これは、工場と現場で使用した上塗り塗料の僅かの配合等の違いが長い年月を経て大きな外観差になってしまったことによる。

同じ塗料種で同じ色指定の上塗り塗料であっても、製造メーカーの違い、製造ロットの違いなどで、塗料配合の微妙な違いが生じる。このため、長期経過で目視判別可能なほどの光沢や色の違いに至ることは、ごく普通の現象である。

防食性能の観点からは、塗替え塗装の必要はないが、景観性能を重視する場合には、適当な時期に、化粧塗りを目的とした中・上塗り塗料の塗替え塗装を検討する。



写真 2 全工場塗装と現場塗装の塗膜外観変化
都市環境，1984 年塗装，ポリウレタン樹脂塗膜

(2) 経年による光沢等の塗膜表面変化

塗膜の光沢低下及び白亜化は、上塗り塗膜の樹脂が自然環境の紫外線、水などの影響で劣化することで生じる。その劣化程度は、エポキシ樹脂>ポリウレタン樹脂>ふっ素樹脂の順に大きいと考えられている。

写真 3 に変性エポキシ樹脂系塗料を上塗り塗膜として用いた塗装仕様（表 1 の塗装系 13A など）の 30 年後の外観を示す。日照を受け、水の影響を受ける箇所（漏水箇所）の上塗り塗膜が消耗（減耗という）し、中



写真 3 上塗り塗膜の消耗（30 年後の外観）
都市環境，1977 年塗装，エポキシ樹脂塗膜

塗り、下塗り塗膜が露出している。塗装試験片を用いた暴露試験などから、塗膜の減耗速度として、エポキシ樹脂塗膜で $8\mu\text{m}/\text{年}$ 程度、ポリウレタン樹脂塗膜で $2\mu\text{m}/\text{年}$ 程度、ふっ素樹脂塗膜で $1\mu\text{m}/\text{年}$ 以下との数値が提案されている例がある。塗装系の防食性能は下塗り塗膜の健全性により維持されると考えられるので、上塗り塗膜にエポキシ樹脂を用いた場合でも、下塗り塗膜の減耗に至らない期間（写真 3 の例で 30 年程度）は、防食性能上の問題は少ない。しかし、写真の例の状況では、露出した下塗り塗膜の減耗による防食性能低下が予測されるので、今後の適当な時期に塗替え塗装を計画するべきである。この場合に、局所的な塗膜減耗であるので、部分的な塗替え塗装でも十分である。さらに、将来の塗替え塗装周期延伸を図る場合には、上塗り塗膜にポリウレタン樹脂塗膜を用いるなどの塗装系変更も考慮するのが望ましい。

これまでに、ポリウレタン樹脂塗膜の減耗で下塗り塗膜が露出した事例の報告はないが、あえてこの期間を推定すると、前出の提案されている減耗速度のエポキシ樹脂とポリウレタン樹脂の差（約 4 倍）、写真 3 の事例でエポキシ樹脂系塗料上塗りが 30 年程度で減耗している事実、及び上塗り塗膜の厚みの違い（ポリウレタン樹脂塗膜はエポキシ樹脂塗膜の約 1/2）とから、ポリウレタン樹脂塗膜上塗の塗装系では、実構造物で下塗り塗膜が露出するまでは 50 年程度期待できるものと考えられる。

4.2 構造物健全性に影響する塗膜劣化事例

鋼材の腐食、すなわち鋼板の板厚減少により構造物健全性低下の原因となりうる塗膜変状事例を示す。

(1) 溶接線からの塗膜はがれ事例

溶接線は、工場や現場で用いた溶接方法に適した処理を行い、部分ブラスト実施後に塗装することが規定されている。しかし、写真 4 に示すように、15 年程度で、溶接線に沿った塗膜はがれに至る場合もある。（原因については不明）

腐食性環境の場合には、この部位で局部的、選択的に腐食が進行し、鋼板の板厚減少いたるため、危険な塗膜変状と考えられる。鋼腐食に至る前の程度が軽微な状態のうちに部分塗替え塗装を行うのが望ましい。腐食性環境で鋼腐食にまで至ると、さび層と鋼との界面に塩化物イオンネストが形成され、塗替え塗膜の早期劣化の原因となる。従って、はがれ個所のジンクリッチ塗膜の亜鉛末が犠牲防食作用で完全に消耗する前に塗装するのが望ましい。



写真 4 全工場塗装の溶接線に沿ったはがれ都市環境、1983 年塗装、ポリウレタン樹脂塗膜

(2) 無機ジンクリッチ塗膜の凝集破壊による“塗膜はがれ”

無機ジンクリッチ塗膜は、2.2 項で示したように、他の塗料に比較して施工時の制約が多い。塗膜が十分に乾燥（硬化）するためには、施工時及び養生時の相対湿度範囲が 50% から 80% と狭い。また、塗膜厚みも $150\mu\text{m}$ を超えると凝集破壊を起しやすいため、膜厚の許容範囲も狭い。

写真5は、施工後15年ほどで発生した塗膜はがれの事例である。他の事例などからも、塗膜はがれの傾向として、施工後10年以上経過した時点で発見されることが多い。また、はがれた塗膜の分析結果によると、亜鉛末表面が酸化しているとの報告が多い。

はがれの原因究明はまだであるが、すべての構造物で発生していない現状では、施工時の環境条件差や使用した亜鉛末の性状差が影響していると考えるのが妥当である。

少なくとも、現時点では、部分的でも“塗膜はがれ”が観察された場合には、同一の施工環境や材料を用いた他の部位もほどなく同様の状態に至ると考えて、対策を検討する必要がある。従って、塗り替え塗装では、塗膜はがれた個所以外の密着塗膜も“活膜”とは考えず、全面剥離を計画する必要がある。



写真5 無機ジンクリッチ塗膜凝集破壊による大面積塗膜はがれ (1991年塗装)

(3) 腐食性がさほど高くない環境での局所的な腐食事例

写真6は、太平洋から約500m離れた河川上の下路トラス（コンクリート床版）で、表2の塗装系J-2を1976年に全工場塗装した橋梁である。観察時（2007年）は、31年経過しているが、橋梁全体として健全な塗膜状況を呈していた。しかし、写真6の囲み部に示すように、面積的には極わずか（0.3%以下）であるが、直径数cmの局部的“さびはがれ”や一部のボルト頭に“さび”が観察された。観察された変状は、コンクリート床版より下の部材でしかも下面に多かった。当該橋梁が河川上に位置することを考慮すると、濡れ時間が長いことの影響が想定される。



写真6 塗装系J-2の31年後
1976年塗装, 太平洋からの離岸距離約500m, 河川上

写真7は、運河上の23年経過したコンクリート床版下のボックス桁（全工場塗装の塗装系J-2）の塗膜外観である。点々と局部的に“さびはがれ”が観察される。

当該環境は、写真6の事例より腐食性の低い環境であるが、同様の腐食状況、すなわち腐食個所は点在しているが、特定の部材・部位に偏在して

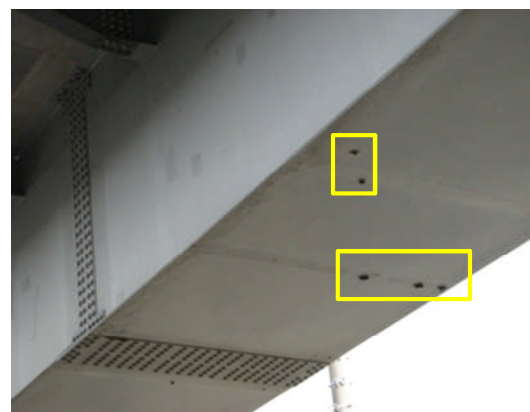


写真7 塗装系J-2の23年後
1984年塗装, 運河上, 離岸距離約1000m

おり、塗膜全体の防食性能が低下したために発生したというより、工場での施工時や運搬時の影響で発生した初期塗膜欠陥部で早期に腐食が発生したと考えるのが妥当な状況であった。

以上の事例から、第1層目に亜鉛末塗料を用いる長期防錆型（重防食）塗装系では、塗膜面積の99%以上が健全であっても、何らかの原因で発生した塗膜欠陥部が比較的早い時期に腐食する。防食塗膜に亜鉛末塗料を用いる長期防錆型（重防食）塗膜に、この種の腐食が発生しても、その数の増加や腐食面積のはやい拡大が観察されないなどの特徴がある。

(4) 腐食性の高い環境での局所的な腐食例

写真8の橋梁は、日本海からの離岸距離約50mで海水面からの高さ約5mと著しく腐食性の高い環境に表2の塗装仕様(13A, 14A-1, 14A-2)などを1976年に全工場塗装した橋梁である。

架設後30年後の腐食事例を写真9と写真10に示す。(3)の腐食性のさほど高くない環境での事例と同様に、局所的腐食進行は、30年経過後も大きく拡大しないという、長期防錆型（重防食）塗装の特徴を示している。

腐食箇所数の増加や面方向への塗膜変状拡大が小さいことを考えると、これまでのように、塗膜変状面積が大きくなってから塗替え塗装を行う考え方を続けると、鋼板に穴が開くことになる。

構造物健全性維持のためには、鋼板の局所的厚み減少抑制を図る必要がある。従って、変状の面積比率は小さくとも塗替え塗装を計画することが必要になる。

この際に、腐食個所以外の塗膜の健全性は今後も長期維持されると想定されるので、活膜として残し、腐食個所の部分塗装が望ましい。ただし、飛来海塩粒子の影響を受けている場合は、鋼とさび層の界面に塩化物イオンネストを形成しているため、腐食個所の除錆には部分ブラストを採用するなど、完璧なさび落としが必要である。通常の作業で用いる動力工具等のケレンでは、如何なる塗料を持ってしても10年未満に同一箇所での腐食に至ることが確認されている。

以上



写真8 塗装系13A, 14Aの試験施工箇所
1976年全工場塗装, 日本海から約50m



写真9 ガセット部の30年後



写真10 部材下面の30年後