

土 木 研 究 所 資 料

大規模橋梁の防錆技術に関する フイージビリティスタディ 報 告 書

平成元年12月

建設省土木研究所
地質化学部化学研究室

「Copyright © (1989) by P. W. R. I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P. W. R. I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。」

大規模橋梁の防錆技術に関する フィージビリティスタディ 報 告 書

化学研究室 室 長 片 脇 清

研究員 守 屋 進

要 旨

大規模橋梁の防錆技術である、塗装、めっき、ケーブルの防錆等の現状と今後の課題点について整理した。

キーワード：橋梁、防錆、塗装、フィージビリティスタディ

ま え が き

海上や海岸に架設された鋼道路橋は、飛来塩分の影響を受けて鋼材の腐食や塗膜の劣化が著しく、維持管理に苦慮しているのが現状である。今後、道路事業の進展により、このような苛酷な環境に架設される大規模橋梁が増加することが予想される。

このため、大規模橋梁の防錆技術の今後の在り方を探るためフィージビリティスタディを行った。

目 次

まえがき

1. フィージビリティスタディの目的	1
2. 鋼橋塗装技術の現状と課題	2
2. 1 防錆塗装技術の変遷	2
2. 2 現行の防錆塗装基準	5
2. 3 防錆塗装技術の現状と課題	10
2. 3. 1 新設時における塗装技術の現状と課題	10
(1) 塗装仕様の特徴	10
(2) 技術的諸問題と対処方法	12
(3) 今後の課題	27
2. 3. 2 点検および塗替え技術の現状と課題	29
(1) 点 検	29
(2) 塗替え技術	31
2. 3. 3 塗装材料の現状と課題	32
(1) 塗装材料の現状	32
(2) 塗装材料の課題	35
2. 3. 4 塗料品質試験方法および塗膜寿命予測技術の現状と課題	40
(1) 塗料の品質試験方法	40
(2) 塗膜寿命予測技術の現状と課題	44
3. 塗装以外の防錆技術の現状と課題	47
3. 1 耐候性鋼材の利用	47
3. 2 溶融亜鉛めっき鋼材の利用	49
(1) 溶融亜鉛めっき施工上の問題点	49
(2) 溶融亜鉛めっき面への塗装	51
3. 3 溶射の現状と課題	53
3. 4 耐食性金属材料の利用	55
(1) 利用の現状	55
(2) アルミニウム面への塗装	56

(3) ステンレス鋼面への塗装	56
3. 5 その他の防錆防食方法	59
3.5.1 ケーブル防錆技術の現状と課題	59
(1) ケーブルの種類と主な防錆方法	59
(2) 防錆方法の種類	61
(3) 防錆方法の複合化とその推移	61
(4) 防錆防食方法の組み合わせ	63
(5) ケーブル防錆の課題	63
4. 防錆を考慮した橋体構造について	65
5. まとめ	67
5. 1 新設時の塗装技術について	67
5. 2 点検および塗替え技術について	67
5. 3 塗装材料について	68
5. 4 塗料の品質試験法と塗膜寿命予測技術について	69
5. 5 塗装以外の防錆技術について	69
5. 6 防錆を考慮した橋体構造について	69
あとがき	70

1. フィージビリティスタディの目的

海上や海岸に架設された鋼道路橋は、飛来塩分の影響を受けて鋼材の腐食や塗膜の劣化が著しく、維持管理に苦慮しているのが現状である。今後、道路事業の進展により、このように苛酷な環境に架設される鋼道路橋がさらに増加することが予想される。

特に、海上や河口に架設される鋼道路橋は道路の性格や立地条件から、橋長、幅員ともに大きく、形式も吊り橋や斜張橋が採用されることが多く大規模かつ複雑な構造となる場合が多い等、内陸部のそれとは趣を異にしている。したがって、鋼部材が接する環境条件のみならず、点検や維持管理の面でも格段に厳しい条件下に置かれており、防錆面における技術水準の飛躍的な向上を図らない限り、塗り替え経費を始めとする維持管理経費の増大が懸念される。

維持管理経費を節減するためには、より耐久性の優れた防錆システムの開発や合理的かつ経済的な点検および維持管理システムの開発が急務となっている。

これらの技術的諸問題に対処するため、大規模橋梁の防錆技術の今後の在り方を探るためのフィージビリティスタディを行ったので、その結果を報告する。

なお、ここで言う大規模橋梁とは、橋梁の規模が大きいばかりでなく海上や臨海工業地帯など腐食性の厳しい環境に架設され、構造が複雑で防錆設計や点検ならびに維持管理に困難が予想される鋼道路橋を言う。

2. 鋼橋塗装技術の現状と課題

鋼道路橋の防錆には、塗装のほかに溶融亜鉛めっきが広く利用されており、鋼橋の主要部材への適用例も散見される。また、亜鉛やアルミニウムの溶射を鋼橋に適用した例も少数ながらみられる。耐候性鋼材の利用も広い意味では防錆方法の一種とみなされるが、その適用例は全国的に広がっている。

しかし、海上に架設された長大橋では、昭和37年に竣工した若戸大橋をはじめとして、昭和48年竣工の関門橋、昭和53年の大三島橋、それに引き続いて架設された因島大橋、大鳴門橋、瀬戸大橋に至るまで、防錆の主体は何れも塗装であり、亜鉛めっきや亜鉛溶射あるいはアルミニウム材等の利用は、高欄、グレーチング、移動検査車など、付帯設備に限定されており、この傾向は今後も続くものと考えられる。

このように塗装が防錆の主流となっているのは、他の防錆方法と比較して防錆効果や耐久性の点で特に優れているとは言えないにしても、任意に着色可能で美観上優れていること、どのような規模、構造の構造物に対しても施工可能であること、補修や更新が容易であること、仕様を変えることで種々の環境条件に対応できること等、種々の利点を有しているためである。

以上のことから、鋼橋の防錆方法としての「塗装」の優位性には今後も変化がなく、特に、大規模橋梁の主構造部分の防錆には今後も塗装が主役を務めることは確実と考えられることから、今回の調査研究においては、先ず、鋼橋の塗装技術を取り上げて検討した。

2.1 防錆塗装技術の変遷

塗装は、大型鋼構造物の防錆には最も有効な手段として適用されてきた。防錆塗装技術は、時代とともに変わってきたが、その目的は、主に海洋環境のような厳しい腐食環境における防錆性を如何に保持するかにあった。

海洋環境で鋼材の腐食が甚だしい最大の原因は海塩粒子の付着にある。鋼材への付着塩分量は、一般に海岸に近い程多く、鋼材の腐食量もそれに比例して多くなるが、昭和57年に実施された鋼橋の塗膜調査によると、全体の橋梁の25%が塗替えを要するまでの年数は、海岸環境では山間部のほぼ1/2であった。

海上橋の塗装実績から防錆塗装系の変遷を概説すると以下のようなものである。

昭和35年頃まではミルスケールの上に塗装することもあったが（銚子大橋）、ミルスケールの剝落による大きな劣化が生じるので、その後は鋼面をブラスト処理してから

塗装するようになった昭和30年代の終わり頃までは、油性さび止めペイントに長油性フタル酸樹脂塗料が塗装されていた。海上橋の塗装でもせいぜい塗装回数を増やすか（若戸大橋）上塗り塗料をアルミニウムペイントに変更する程度（天門橋）であった。昭和40年頃になると、ジンクリッチペイント、塩化ゴム系塗料、エポキシ樹脂塗料、ポリウレタン樹脂塗料などが鋼構造物の塗装に使用されるようになった。

これらの塗料は防錆性の良いことが認められ昭和45年頃になると海上橋の塗装に用いられるようになった（京浜大橋、城南大橋、広島大橋、荒川湾岸橋）。昭和45年以降には海上橋の建設が多くなり亜鉛溶射やMIO塗料の塗装も適用されるようになった（関門橋、港大橋）。主な海上橋の塗装実績を表-2.1に示す。

表-2.1 主な海上橋の塗装実績

橋梁名	完成	塗 装 シ ス テ ム	塗装回数
銚子大橋	昭35	油性さび止め／フタル酸樹脂塗料 （ミルスケール上に塗装）	4
若戸大橋	昭37	油性さび止め／フタル酸樹脂塗料	5
天門橋	昭41	油性さび止め／フタル酸樹脂塗料／ アルミニウムペイント	5
尾道大橋	昭43	油性さび止め／フタル酸樹脂塗料	4
京浜大橋	昭46	無機ジンクリッチペイント／エポキシ樹脂塗料／ ポリウレタン樹脂塗料	5
城南大橋	昭46	無機ジンクリッチペイント／エポキシ樹脂塗料／ ポリウレタン樹脂塗料	5
広島大橋	昭48	無機ジンクリッチペイント／塩化ゴム系塗料	5
関門橋	昭48	塔：油性さび止め／フタル酸樹脂塗料 補剛桁：亜鉛溶射／エッチングプライマー／ フェノールジクロ／フェノールMIO／ 塩化ゴム系塗料	5 5 5
荒川湾岸橋	昭49	エポキシジンクリッチペイント／塩化ゴム系塗料	5
港大橋	昭49	油性さび止め／フェノールMIO／塩化ゴム系塗料	5
大三島橋	昭53	厚膜型無機ジンクリッチペイント／ フェノールジクロ／フェノールMIO／ 塩化ゴム系塗料	6
因島大橋	昭57	厚膜型無機ジンクリッチペイント／ エポキシ樹脂塗料	5

この頃から、本州四国連絡橋の塗装系の研究が始められた。本州四国連絡橋の防錆塗装については、本州四国連絡橋公団の諮問により土木学会に設けられた委員会で検討された。この防錆塗装の性能目標は海上で10年以上の寿命を持つことであった。

昭和49年に委員会から答申された防錆塗装に関する基本方針は次のようであった。

- a) 亜鉛溶射、またはジンクリッチペイント塗装により、鋼面に75 μm の亜鉛層を設ける。
- b) その亜鉛層の上に約200 μm の厚膜塗装を行う。

この方針に従って昭和52年に制定され、昭和55年に改訂された本州四国連絡橋公団の鋼橋等塗装基準・同解説は、現在の我が国の海上大気部の塗装の基本のひとつとなっている。

信頼性の高い塗膜を得るためには施工方法の進歩や部分的に腐食しやすい箇所の塗装をいかに行うかも重要な課題になった。

施工にあたっては鋼材の塗装前処理程度が重要で、基準としては以前からSSPC (Steel Structures Painting Council)やSIS (Svensk Standard)の基準が用いられてきたが、さらに、実際の条件に近い状況を示す新しい基準(塗装前鋼材表面処理基準:SPSS)が作られた。

特殊箇所の塗装については腐食しやすい高力ボルト接合部の防錆のために昭和48年に完成した関門橋には、接合部に亜鉛/アルミ溶射したスプライスプレートとカドミウムめっきした高力ボルトが用いられ、その後、スプライスプレートにはすべり摩擦係数の大きい厚膜型無機ジンクリッチペイントを塗装し、高力ボルトには特殊な潤滑性プライマーを塗装する方法が開発されて現在実用化されている。また、鋼材端部の適切な処理と塗装の方法についても研究されている。

防錆性能の長期化に対応する、塗膜の色や光沢の長期耐久性についても研究され、防錆性能の長期化に見合った耐候性を得るための適当なバインダーと顔料および変色感の少ない色が選択されている。

防錆性能の評価方法についての研究も進められている。鋼構造物に塗装された塗膜のはがれ、ふくれ、われ、さびなどの劣化状態を見て、その劣化程度を判定する方法が日本国有鉄道で提案された。その後、鋼構造物の塗膜調査方法が昭和57年に日本鋼構造協会(JSSC)からマニュアルとして発表された。

研究室段階では、塗装鋼板の劣化機構の解明や劣化予測の研究が行われている。昭和

35年頃から塗膜の防錆性能を交流インピーダンスで評価する方法の研究が始められ、現場でも簡単に実施できるので広く普及している。昭和50年頃から塗膜下の分極特性によって塗膜の防錆性能を評価する報文が発表されている。この分極特性の測定のために、コロージョンレートメータ法やカレントインタラプタ法と呼ばれる方法が開発された。複雑な天然の腐食環境をシミュレートしようとする促進試験装置についても研究された。JSSCでは各種の試験機を組み合わせで試験した結果を報告し、建設省土木研究所では複合環境試験機を試作して研究している。その他、各試験機メーカーからも新規な装置が発表されている。

2.2 現行の防錆塗装基準

防錆塗装の方法は技術の進歩や要求性能によって変遷してきた。防錆塗装の基準は各官公庁や公団ごとに設置されていて、適用される環境区別に塗装仕様が決められるとともに、特殊な部分についても塗装仕様が決められている。環境の区分は基準により多少異なるが、最も厳しい環境としては海岸、海上、排気ガスの影響のある地区が挙げられている。各基準ごとの環境区分の内容と塗装仕様が決められている特殊な部分についての分類を表-2.2に示す。

表-2. 2 塗装系適用環境の分類

基準の種類	一般的な環境	やや厳しい環境	厳しい環境	特殊な環境	特殊な部分
日本道路協会 鋼道路橋塗装便覧 S.54.2	環境の腐食因子の強くない地域	海岸地域や重化学工業地域など環境の腐食因子の強い地域	海峡横断橋や跨線橋などのように点検や塗り替えが容易でない橋梁		現場継手部 内面用
東京都土木協会 土木工事施工管理基準 S.58.6	田園、山間および都市地の腐食が厳しくない環境	工場地帯および都市地の腐食の厳しい環境	海上および海岸		箱桁内面および上フランジ上面
北海道土木協会 土木工事共通仕様書 56 北海道開発局 道路・河川工事仕様書 S.57	腐食環境が良好な場合 一般環境	特殊環境			箱けたなどの内面 伸縮継手の内・外面 杓の外面 高力ボルトリベットの接合部 添接板外面 現場溶接部 鋼床版の上面、裏面、箱桁内面、 一般外面
日本道路公団 鋼橋塗装基準 S.54.8	田園、山間および都市地の腐食が厳しくない環境	工場地帯および都市地の腐食の厳しい環境	海上および海岸		箱桁内面および上フランジ上面 高力ボルトおよびリベット接合部 現場溶接部 支承の外面 伸縮継手
本州四国連絡橋公団 鋼橋等塗装基準・同解説 S.55.3			工場で上塗りまで塗装する場合の塗装系 現場で中・上塗りを塗装する場合の塗装系		支承の塗装系 継手部の塗装系
首都高速道路公団 塗装設計施工基準 S.56.6	一般市街地		海上・海岸・工業地帯および市街地の腐食が厳しい環境	塗装の塗り替え間隔を特に長くする場合	箱桁内外面の鋼床版裏面 箱桁内面、橋脚内面 鋼床版裏面の箱桁内面 現場継手部 特殊部
阪神高速道路公団 土木工事共通仕様書 S.58.5	一般市街地、山間		海上・海岸・排気ガス等の影響を受ける地区	塗り替えが困難な場合	鋼床版桁外面 箱桁内面および橋脚内面 鋼床版上面 高力ボルト接合部および現場溶接部 支承部
日本国有鉄道 鉄けた塗装工事設計施工指針案 S.56.3	田園、山間および都市地区のような環境の良いところ	工場2種、海岸2種地区	海岸1種、工場1種および大気汚染地区と海上および海浜工業地区	結露面	継手部の塗装

塗装仕様の内容は各官公庁や公団等のニーズの違いにより内容が多少異なっている。

塗装の前処理はブラスト処理により行われるが、厳しい環境に設置するものについては、鋼材の溶接や溶断による加工後の2次発錆部分を完全に処理するため、鋼材の加工後にブラスト処理を行ういわゆる製品ブラスト方式がとられている。

塗装方法は、工場ではスプレー塗装、現場でははけ塗り塗装が行われている。海上のように現場が塗装に適さない場合にはすべて工場塗装とすることもある。現在、一般に行われている塗装工程を表－2. 3に示す。

表－2. 3 塗 装 工 程

施工場所	工 程	1	2	3
製鋼工場	ブラスト処理	○	○ ※	○ ※
	↓	↓	↓	↓
	プライマー塗装	○	○	○
	↓	↓	↓	↓
製作工場	組み立て加工	○	○	○
	↓	↓	↓	↓
	パワーツール処理	○	↓	↓
	↓	↓	↓	↓
	ブラスト処理	↓	○	○
	↓	↓	↓	↓
	塗装	○／下塗り	○／下塗り	○／下・中・上
	↓	↓	↓	↓
架設現場	補修塗装	○	○	○
	↓	↓	↓	↓
	塗装	○／中・上塗り	○／中・上塗り	塗り

※ 製作工場でブラスト処理を行う場合も製鋼工場でブラスト処理を行う。

使用される塗装および塗装仕様は環境によって異なる。代表的な塗装仕様と各基準での採用状況（昭和62年現在）は表－2. 4の通りである。

表－2. 4 塗装仕様の採用状況

塗 装 仕 様 の 種 類	一般的な環境	やや厳しい環境	厳しい環境
エッチングプライマー 鉛系さび止めペイント 鉛系さび止めペイント 超長油性フタル酸樹脂塗料中塗り 長油性フタル酸樹脂塗料上塗り	日本道路協会 東京都 北海道 日本道路公団 日本国有鉄道	本四公団 日本国有鉄道	
エッチングプライマー 鉛系さび止めペイント 鉛系さび止めペイント フェノールM I O塗料 超長油性フタル酸樹脂塗料中塗り 長油性フタル酸樹脂塗料上塗り	日本道路協会 首都高速道路公団 阪神高速道路公団		
エッチングプライマー 鉛系さび止めペイント 鉛系さび止めペイント フェノールM I O塗料 塩化ゴム系塗料中塗り 塩化ゴム系塗料上塗り		日本道路協会 東京都 北海道 日本道路公団 本四公団 阪神高速道路公団	
ジンクリッチプライマー 塩化ゴム系塗料下塗り 塩化ゴム系塗料下塗り 塩化ゴム系塗料中塗り 塩化ゴム系塗料上塗り	北海道	日本道路協会 首都高速道路公団	東京都 日本道路公団
厚膜型ジンクリッチペイント 塩化ゴム系塗料下塗り 塩化ゴム系塗料下塗り 塩化ゴム系塗料中塗り 塩化ゴム系塗料上塗り			日本道路協会
厚膜型ジンクリッチペイント エッチングプライマー フェノールジンクロプライマー フェノールM I O塗料 塩化ゴム系塗料中塗り 塩化ゴム系塗料上塗り			日本道路協会 本四公団 日本国有鉄道
厚膜型ジンクリッチペイント 厚膜型エポキシ樹脂塗料下塗り 厚膜型エポキシ樹脂塗料下塗り ポリウレタン樹脂塗料用中塗り ポリウレタン樹脂塗料上塗り		首都高速道路公団	日本道路協会 本四公団 阪神高速道路公団 日本国有鉄道
亜鉛溶射 エッチングプライマー フェノールジンクロプライマー フェノールM I O塗料 塩化ゴム系塗料中塗り 塩化ゴム系塗料上塗り			本四公団

一般的な環境では、ほとんどの基準が鉛系さび止めペイントの上にフタル酸樹脂塗料を塗装する仕様を採用している。工場塗装と現場塗装の塗装間隔が長くなる恐れのある場合には、中塗り塗料にフェノールMIO塗料を使用することもある。寒冷地では乾燥の早い塩化ゴム系塗料を中塗りと上塗りに使用することもある。

やや厳しい腐食環境では塩化ゴム系塗料による塗装仕様が用いられている。塩化ゴム系塗料はフタル酸樹脂塗料に較べて遮断性が大きいので防錆性能がよいだけでなく、耐水性や耐薬品性も良いので環境の悪い地域での上塗りに適している。

厳しい腐食環境では第1層目にジンクリッチプライマーまたは厚膜型ジンクリッチペイントが塗装され、その上に塩化ゴム系塗料やエポキシ樹脂塗料とポリウレタン樹脂塗料による塗装が行われている。このうち、最も実績が多く性能の安定している塗装仕様は、厚膜型ジンクリッチペイントの上に厚膜型エポキシ樹脂塗料とポリウレタン樹脂塗料を塗装する仕様で本州四国連絡橋をはじめとする海上橋に多く使用されている。

厚膜型ジンクリッチペイントは防錆性能に優れ万一塗膜が損傷してもさびが広がる傾向は小さい。エポキシ樹脂塗料は付着性と防錆性能に優れている。上塗りのポリウレタン樹脂塗料は耐候性に優れており、長期にわたって美観を保持する。この仕様は塗膜強度が大きい特徴を有しており、工場で上塗りまで塗装する工程に適している。

一般外面の他に、内面、鋼床版の上面および裏面、高力ボルト接合部などの塗装も重要である。内面は耐候性を必要としないので、厚膜に塗装できて耐水性と防錆性のよいタールエポキシ樹脂塗料が塗装されている。鋼床版の上面にはアスファルト舗装が施工されるが厳しい腐食環境では舗装されるまでの防錆のために無機ジンクリッチペイントが塗装される。

鋼床版の裏面はゲースアスファルト舗設時の熱に耐える塗装を行わなければならない。エッチングプライマー、鉛系さび止めペイントや塩化ゴム系塗料では熱に耐えられない。高力ボルト接合部は、高力ボルトと添接板とからなるが、接合効果を得るためにボルトの締め付け前に塗装することができず早期発錆の原因になっていたが、潤滑性ボルト用塗料を塗装したボルトと厚膜型ジンクリッチペイントを塗装した添接板の使用によって他の部分と同等の防錆性能が得られるようになった。

2.3 防錆塗装技術の現状と課題

2.3.1 新設時における塗装技術の現状と課題

本項で取り上げる塗装技術とは、塗装材料すなわち塗料に関するものを除く、鋼材の素地調整、塗装作業およびこれらに関連する諸作業についての技術である。また、対象は大規模橋梁であり、主として海上もしくは大河川の河口付近に架設されるため以下のような塗装上の特徴がある。

- ① 臨海地域のため海塩粒子などによる厳しい腐食環境にあり、かつ長大スパンのため維持管理が難しいことから長期防錆型塗装系が採用されることが多い。
- ② 架設のための海面占有時間を極力短縮するよう部材は大型となり、必然的に搬入は海上台船方式となる。
- ③ 高力ボルト接合部は摩擦接合面を含め、厚膜型無機ジンクリッチペイントを塗付（または亜鉛、アルミニウム、もしくはこれらの合金の溶射）して現場での発錆を防止し、ケレン作業を容易にする。

以上のことから、通常規模の橋梁とは異なる塗装作業またはこれに関連する技術的問題が生じて来る。ここでは、大規模橋梁の代表的な例として海上長大橋の塗装実施に当たっての具体的な経験からその課題と対処方法を記述した。

(1) 塗装仕様の特徴

海上に架設される鋼橋は、常に高濃度の海塩粒子を含む雰囲気の中に暴露される。したがって塗膜は腐食性の強い塩素イオンを遮断し、防水性が極めて大きいという特性が要求される。また長大橋であるため架設後の維持管理もできるだけ省けるような長期の耐久性、耐候性を必要とする。したがって、現在の塗料技術上、実用的には最高水準の塗装系が適用されている（本四橋の主な塗装系を表－2.5に示す）。

表-2. 5 本四橋主要塗装系

塗装工程 塗装系No.		1次素地調整	2次素地調整	第1層	塗装間隔	第2層	塗装間隔	第3層	塗装間隔	第4層	塗装間隔	第5層	塗装間隔	第6層	合計乾燥塗膜厚 (μm)
5 (1)	原板 ブラスト	HBSK5611 無機ジンクリッチプライマー 20 [200]	製品 ブラスト	HBSK5603 厚膜型無機ジンクリッチペイント 75[700]	2d ＼ 6m	ミストコートー [160]	2d 以内	HBSK5606 厚膜型エポキシ(下塗) 60 [320]	1d ＼ 3m	HBSK5606 厚膜型エポキシ(下塗) 60 [320]	1d ＼ 3m	HBSK5608 ポリウレタン用(中塗) 30 [170]	1d ＼ 7d	HBSK5608 ポリウレタン(上塗) 30 [140]	255
6															
8				HBSK5603 厚膜型無機ジンクリッチペイント 50[500]	2d ＼ 6m	ミストコートー [160]	2d 以内	HBSK5609 タールエポキシ 110 [330]	1d ＼ 10d	HBSK5609 タールエポキシ 110 [330]	1d ＼ 10d	HBSK5609 タールエポキシ 110 [330]			

(2) 技術的諸問題と対処方法

以上のように、従来からの塗装という概念に比べて、かなりハイレベルの品質が要求されるので、塗装工程の各段階において、それぞれ多様な課題の克服を迫られ、かつ一つ一つ解決して来たのであるが、これらのうち、特に重要なものでかつ今後も引き続き研究を必要とするようなテーマについて取り上げた。

なお塗膜の耐久性に及ぼす諸要因について図-2. 1に示す。また、塗装工程の概要を図-2. 2に、プラスト工程の概要を図-2. 3に示す。ただし、取り上げた課題の中には必ずしも塗膜品質と直接的に関係しない事柄もあるが、鋼橋の製作という総合的な見地から、その品質・コスト並びに納期に大きな影響を与えるものである。

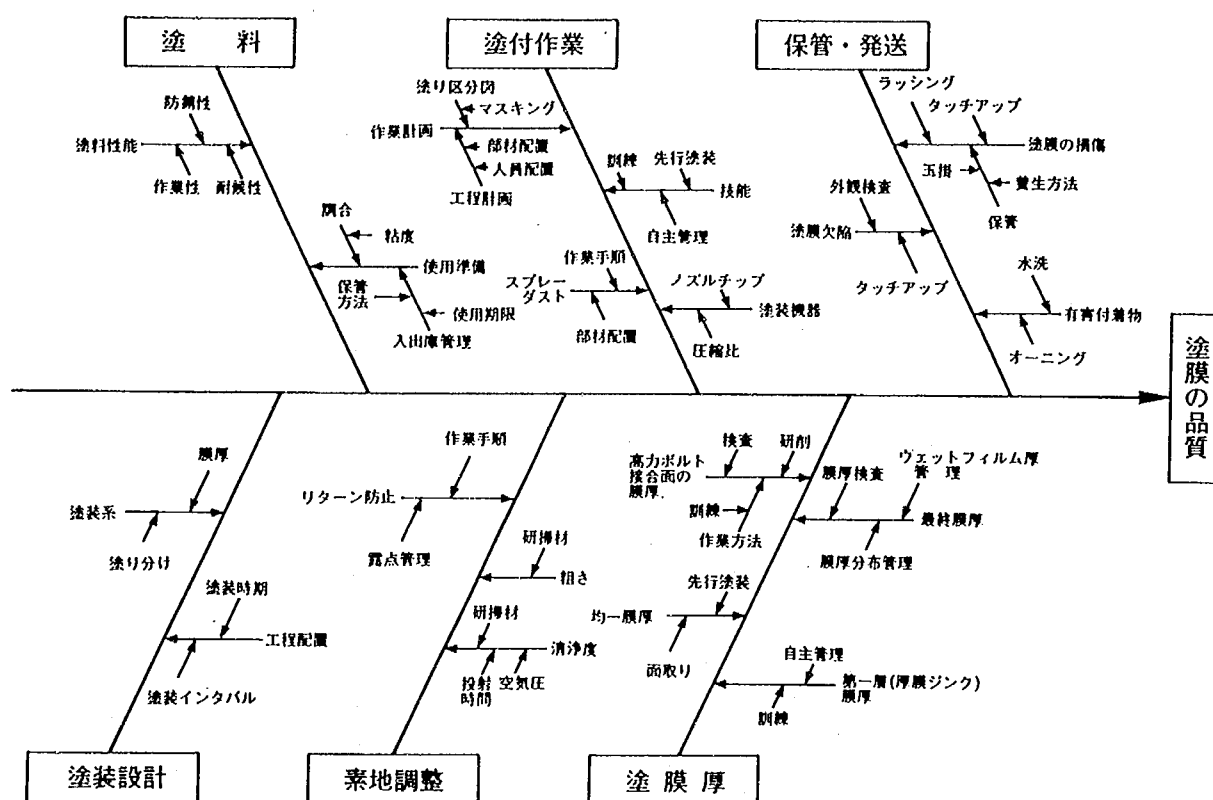


図-2. 1 塗膜品質に与える主な要因

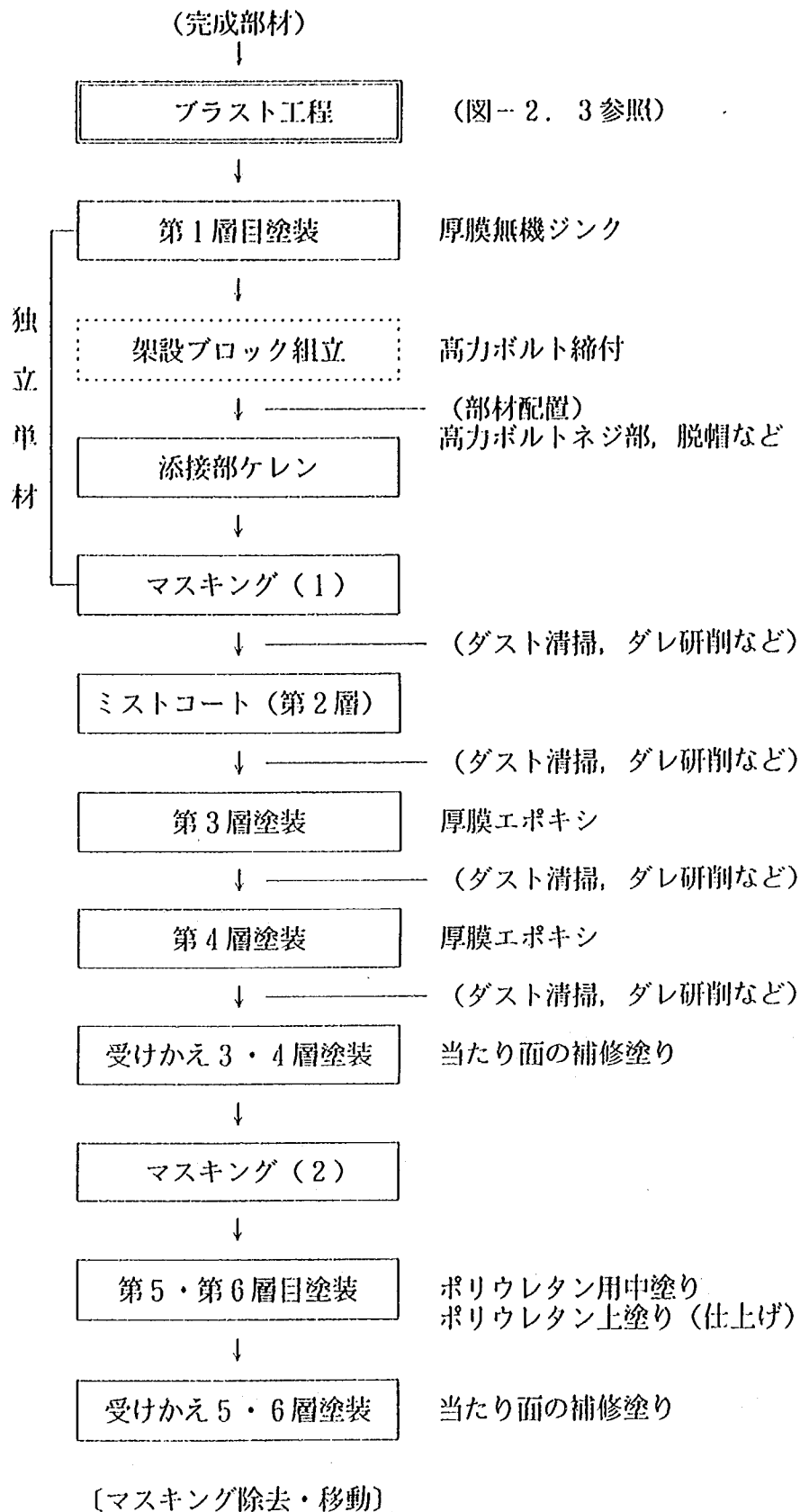
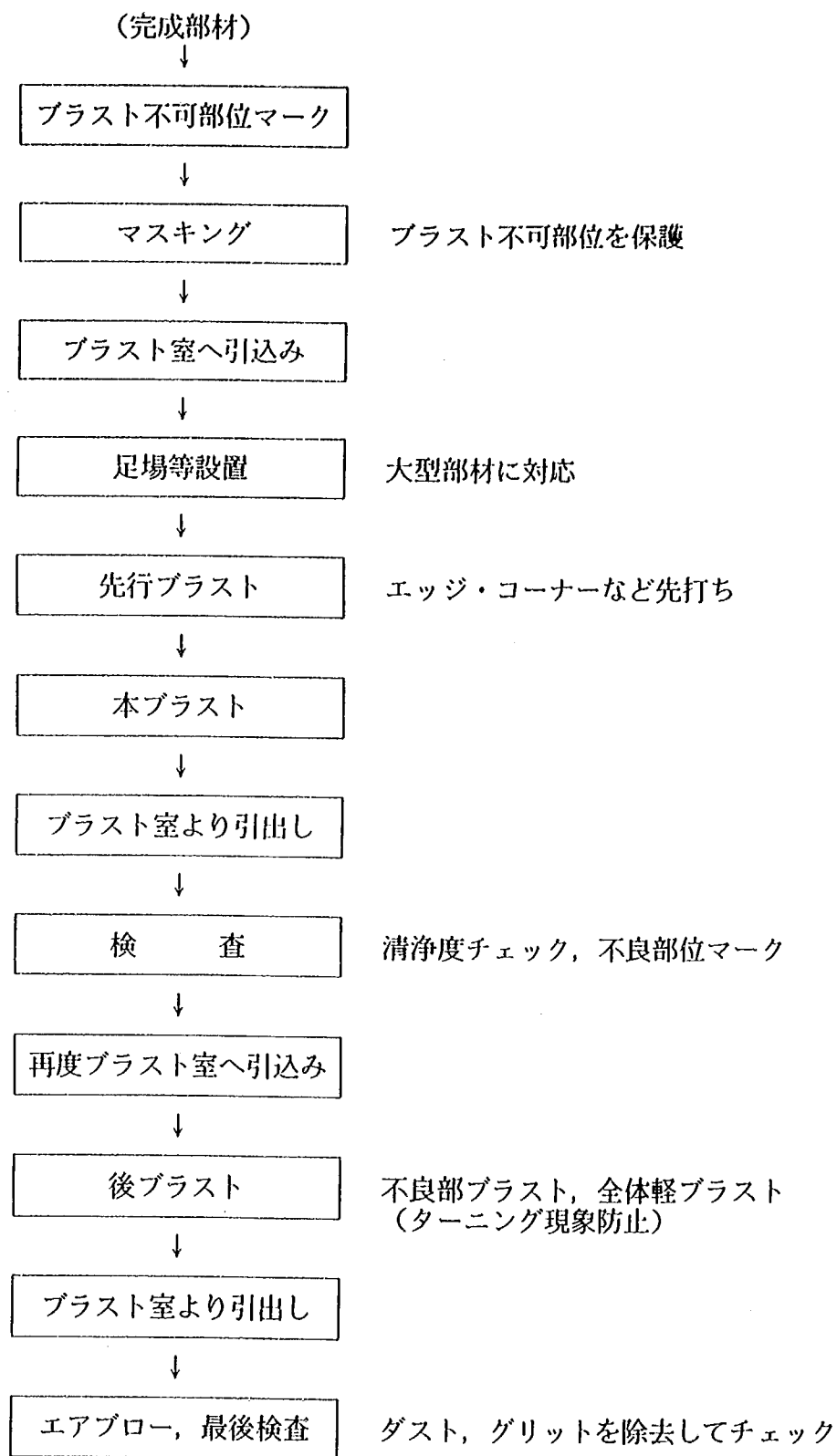


図-2.2 塗装工程概要



(第1層目塗装)

図-2.3 ブラスト工程概要

1) 素地調整から第1層塗装まで

素地調整の良否は塗膜品質に大きな影響を与える。ある説によれば、素地調整のグレード（除錆度と表面粗さの程度）の塗膜機能に与える寄与度は50%であるとさえ言われている。この説にはいささか疑問をもつが、重要な工程であることは言を待たない。

表－2. 6に各要因の塗装寿命に及ぼす影響を示す。

表－2. 6 各要因の塗膜寿命に及ぼす影響

要 因	寄与率 (%)
素地調整（AケレンとBケレンの差）	49.5
塗装回数（1回塗りと2回塗りの差）	19.1
塗料の種類	4.9
その他の因子	26.5

日本ペイントKK「さび止塗装とその管理」より

注）Aケレンとは1種ケレン，Bケレンとは2種ケレンをさす。

本例では鋼板を圧延直後ブラストし、無機ジンクリッチプライマーを塗付し加工して部材完成後に再度ブラスト（グレード 除錆度Sa2.5 表面粗さ70 μ Rz）し厚膜型無機ジンクリッチペイント（以下、厚膜無機ジンクと言う）を塗付する。これらの工程で特に留意するのは以下の点である。

- ① 一次プライマー塗付鋼板の切断と溶接
- ② 二次素地調整後の厚膜無機ジンク塗装間隔
- ③ 高力ボルト摩擦接合面の塗膜厚管理
- ④ 厚膜無機ジンク塗付時の湿度調整

(a) 一次プライマー塗付鋼板の切断と溶接

前述のように鋼板にはすべて無機質ジンクリッチプライマー（以下、無機ジンクと呼ぶ）がプレコートされているが、これが比較的厚膜（20～30 μ m）であること、鋼板が厚いこと（50mmアップもある）、材質が高級なこと（HT70～80など調質鋼が多い）、並びに切断面の要求品質が高いことなどの要因が相乗して、切断効率を著しく低下させる。このため特殊な塗布剤（ふっ化水素カリウム＋硼酸）を使用したり、あるいはベルトサンダーでプライマーを除去する必要がある。

また溶接継手部は特にすみ肉溶接のルートブローホール（とけ込み底部に発生する気

泡)を防止するため、すべてベルトサンダー等によりプライマーを完全に除去した後、組み立て溶接を行わねばならない。これらのことは塗膜の防錆機能には無関係だが、加工効率を著しく阻害する。写真-1にベルトサンダー作業を示す。

(b) 二次素地調整後の厚膜無機ジンク塗装間隔

一般に部材寸法が大きい、すなわち一部材の塗装面積が大きいためブラスト処理時間が長い。たとえば部材の処理に5時間以上を要するものもあり、一方ブラスト処理面は活性に富み、空气中ですぐに酸素や水分と反応し錆を形成する(ターニング現象)ので、直ちに塗装しなければならない(基準2時間以内)。無機ジンクは鋼地金に直接接触してこそ防錆効果があるので、錆上に塗ることを避けるため、全面処理完了後、再度ブラストハウスに入れ、今度は軽くスweepブラストして(10~20分)塗装を行っている。

なお鋼床版などは処理面積がさらに大きいため二分割処理も考慮する。ブラスト室を空調式にすれば、効果はあるが超大部材には対応し難い。

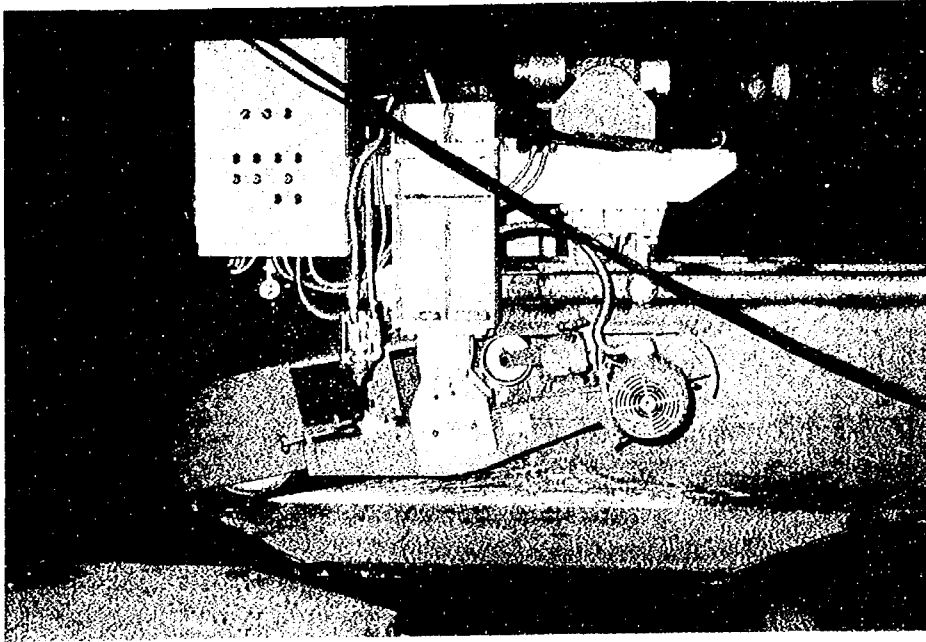


写真-1 鋼板のベルトサンダー作業

(c) 高力ボルト摩擦接合面の塗膜厚管理

高力ボルト摩擦接合面は必要なすべり耐力を得るため膜厚の上下限を管理しなければならない(55~110 μ m)。従来一般塗面では下限だけ押さえれば良い(厚ければ厚いほどよい)ので、この塗装は困難が予測される。そのため作業者にかなりの期間(2~3週間)訓練を施しても、それでも当初は不良(110 μ m超)が多発し、やむなくディスクサンダーで研削手直しを行った例がある。

・オン・ウェット塗装)を行うと合格率は約90%程度にはなるが、研削手直しを皆無とすることは困難である。今後の問題としては、高力ボルト摩擦接合面の塗膜厚を上下限值で管理しないと必要な性能が満たされないのかどうか、さらに研究を必要とする。

(d) 厚膜無機ジンク塗付時の湿度調整

無機ジンク系の塗料の特徴として、その乾燥硬化機構が他の塗料と相違し、硬化過程に水分を必要とするので極端な低湿度(50%RH未満)では塗装できない。たとえばエポキシ樹脂系塗料など多くの塗料は高湿度(80%超)では乾燥が進行し難いのと比べて対照的である。また大気湿度が50%RHを割ることも冬期ではしばしば起こるので注意を要する。これに対しては床面に散水することで湿度調節を行って塗装する。

写真-2に厚膜無機ジンクの塗装時の湿度管理の様子を示す。しかし同一塗装ラインの近傍で他の塗料の塗装作業が行われていることもあり、今後の問題である。

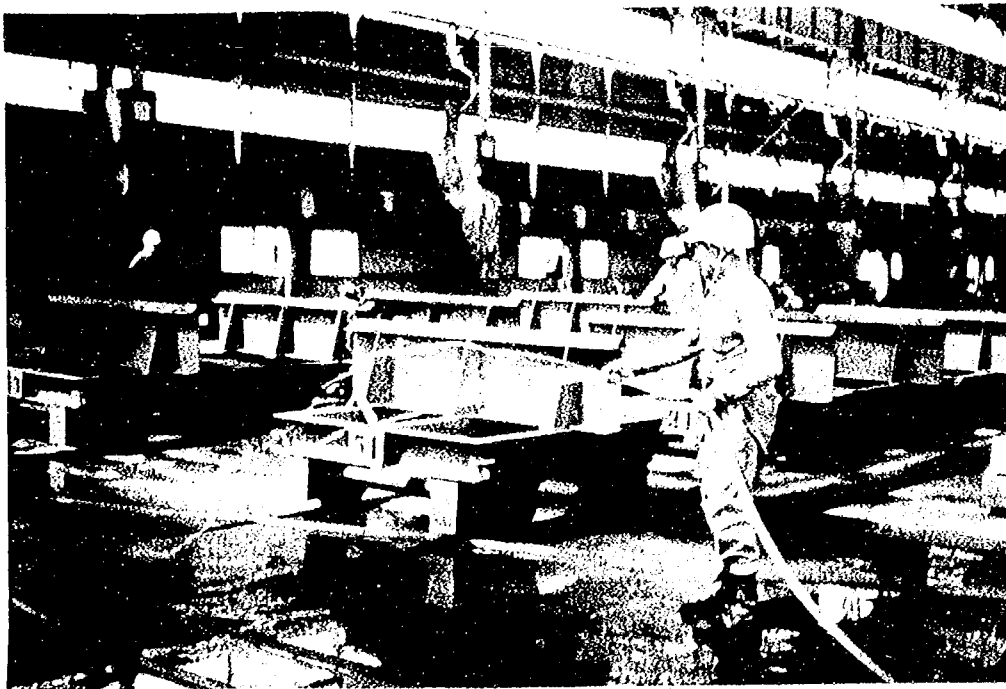


写真-2 厚膜無機ジンクの塗装(散水)

2) 第2層から最終塗装まで

この工程は塗装全工程の大半を占め、塗膜性能を左右する決め手の一つとも言える。前述のように塗装系が厚膜型エポキシ樹脂塗料とポリウレタン樹脂塗料とで構成されており、比較的近年に開発実用化された塗料という点でも塗装作業上問題はある。

さらに作業環境の制約や厚膜塗装のための使用機器や管理方法にも多々困難さを伴う。また主体はエポキシ〜ウレタン系ではあっても構造的な暴露条件の相違や部材相互の接

触面、あるいはハンガーケーブル定着部のような特殊部位など夫々異なる塗装系が採用されていることによる塗り分け管理にもかなり手数を要する。以下に重要な課題を列挙する。

- ① エポキシ樹脂塗料の塗装時の気象条件
- ② 塗り分け管理とマスキング作業
- ③ 塗料の入出庫と調合
- ④ スプレーダストの付着防止
- ⑤ 塗膜厚管理

(a) エポキシ樹脂塗料の塗装時の気象条件

エポキシ樹脂塗料は耐久性や防水性などに優れた塗料であるが、低温での硬化が著しく劣るという特徴がある。従って作業基準では10℃未満での塗装は禁止されている。冬期では外気温が10℃を下まわることがそう稀ではない。冬期の朝夕は気温が上がらず作業時間が著しく制約を受ける。もちろん完全な空調設備が望ましいが、密室作業の場合の作業環境の問題などがあり、技術的にも経済的にも今後の課題である。

(b) 塗り分け管理とマスキング作業

防錆防食という塗膜性能はもちろんその他の多様なニーズを満たす必要上、鋼橋の部材部位により塗り分けは避けられないものである。本例のように上塗りまで工場塗装の場合には塗り分けの種別が多くなりがちであり、塗料の誤使用を防止するための業務も極めて重要な意義がある。まず、どの部材のどの部位にどんな塗装を施すかを図示して管理・監督者に正しく作業指示できるように計画し、複雑な部材は単に工作図だけでは判断が難しいので透視図などを画しこれに塗り分けを記入する。また塗装に先立って、この区分図に従って、第一層塗面に粘着テープと不要図などを使ってマスキングを行い、他面への塗料の付着を防止する。なお粘着剤が下地に残ると、塗膜の付着性を損なうので、粘着テープの種類も厳選することが必要である。塗装区分の例を図-2、4に、マスキング作業の様子を写真-3に示す。

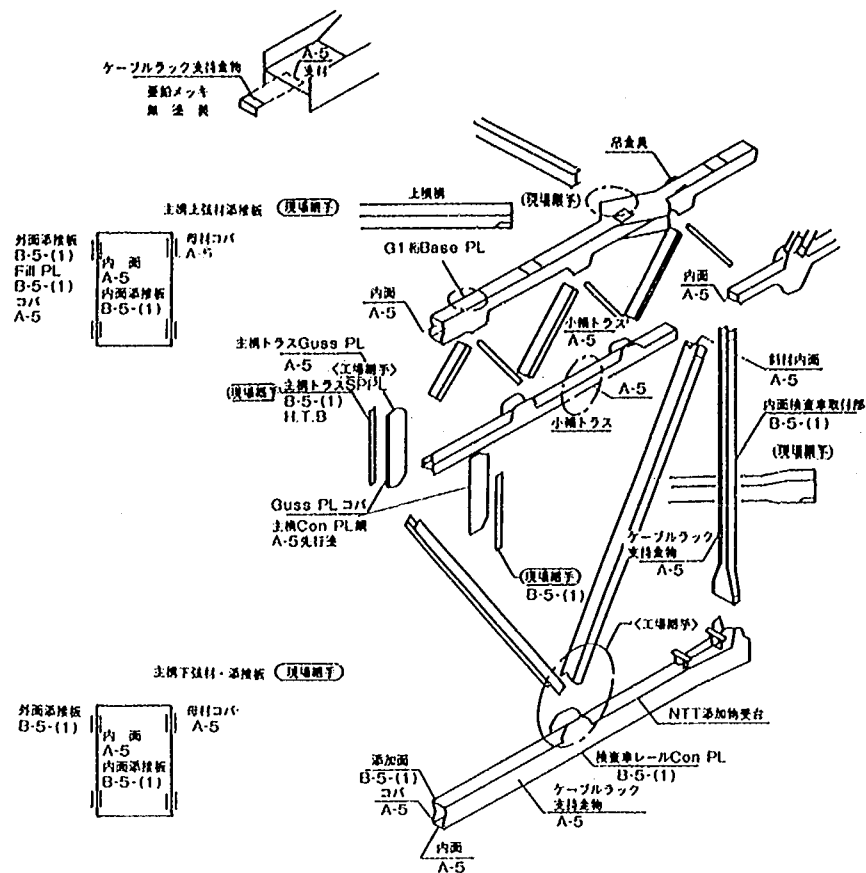


図-2. 4 塗装区分の一例（補剛桁横トラス）



写真-3 マスキング作業

(c) 塗料の入出庫と調合

塗料は製造から長期間経過したものは変質して、所定の性能が得られない場合がある。従って大型プロジェクトで塗装が長期間にわたる場合は使用時期と使用量に応じた購入管理を行う必要がある。これには詳細な日程計画を立て、かつ塗装系および塗装ロット毎の面積計画書を作成し、これに従って購入日程を立てることが重要である。この場合も詳細な塗装区分図が必要不可欠となる。

一方、塗料はその種類や塗装方法に応じて使用前に調合する必要がある（ほとんどの塗料は二液タイプである）。この場合混合してよく攪拌することと、調合後は可使用時間（ポットライフ）内に塗付作業を完了する必要がある。

(d) スプレーダストの付着防止

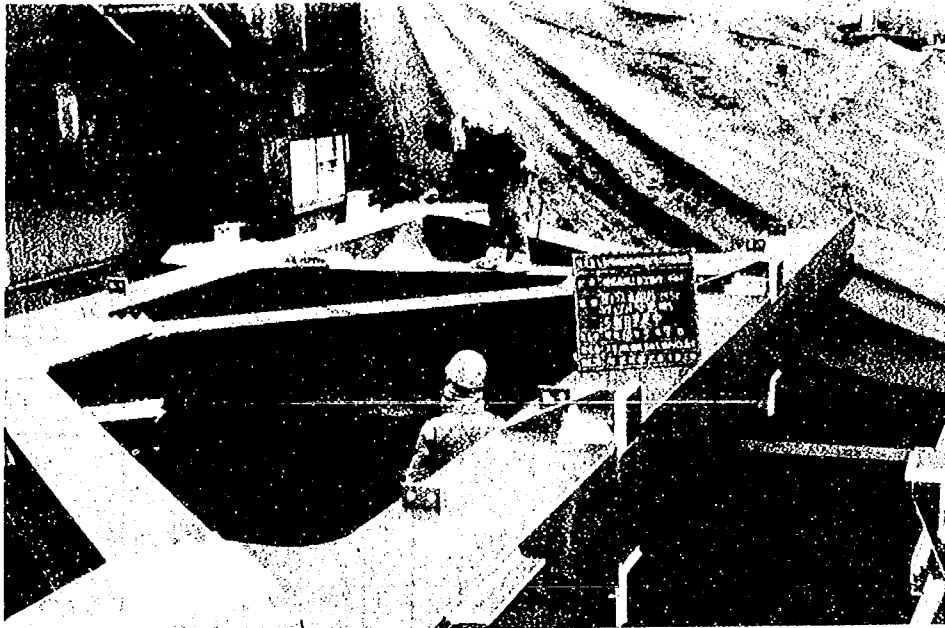
使用塗料は大概速乾性であり、エアレススプレー塗装ではダスト状となって付近に飛散し、他の部材の素地や未乾燥塗膜に付着する恐れがある。このスプレーダストによる汚染は塗膜面の平滑度を阻害し、塗膜性能を損なう。このため部材配置に留意し、かつ必要な場合ネットなどで仕切って作業することが必要となる。この点、塗装工場のレイアウトなどに工夫することが重要である。スプレーダスト防止養生の例を写真－４に示す。

(e) 塗膜厚管理

長期防錆という目的を達するためには塗料の性能自体もさることながら、塗膜厚を大きくすることが効果的である。従って、一般に総膜厚が 250μ をこえる仕様となっている。また第一層目の厚膜無機ジンの膜厚は防錆機能を大きく左右するので、総膜厚と別に管理すべきものと思われ、第一層目と最終膜厚の二段階管理を行うことが望ましい。

塗膜厚はその最低値も問題だが、バラつきにも注目する必要がある。すなわち、部材全面にできる限り均等に塗付されていなければならない。もちろん部材縁端部や狭隘部などは、スプレー塗りだけでは塗料の付着が充分でないので刷毛塗りによる先行塗装を行う必要がある。先行塗装の例を写真－５に示す。

従って塗膜厚は二段階それぞれに最低値、平均値および標準偏差値について管理する。このように膜厚管理については、その測定頻度がかなり膨大となり、専門の要員も数名常時配置する必要がある。代表的な仕様について塗膜厚管理の例を表－２、７、２、８および図－２、５、２、６に示す。



写真－４ ダスト防止養生



写真－５ 先行塗装

表-2. 7 塗膜厚測定の場合

構造区分	部材名称
	全部材

塗装系	$\Lambda-5$ (Z. R. P)
基準値	$75 \mu m$

構造区分	部材名称
	全部材

塗装系	$\Lambda-5$
基準値	$75 \mu m$

度数分布表

No.	クラス	区間の 中心値X	度数 マ-ク	度数 f	u	uf	u ² f
1	55~64	60		209	-2	-418	836
2	65~74	70		472	-1	-472	472
3	75~84	80		497	0	0	0
4	85~94	90		358	1	352	358
5	95~104	100		175	2	350	700
6	105~114	110		84	3	252	756
7	115~124	120		45	4	180	720
8	125~134	130		10	5	50	250
9	135~144	140		2	6	12	72
10							
11							
12							
13							
14							
15							
仮の平均値 $X_0 = 80$				1852	—	312	4164
区間の幅 $h = 10$							

度数分布表

No.	クラス	区間の 中心値X	度数 マ-ク	度数 f	u	uf	u ² f
1	190~209	200		55	-5	-275	1375
2	210~229	220		108	-4	-432	1728
3	230~249	240		186	-3	-558	1674
4	250~269	260		261	-2	-522	1044
5	270~289	280		305	-1	-305	305
6	290~309	300		334	0	0	0
7	310~329	320		276	1	276	276
8	330~349	340		155	2	310	620
9	350~369	360		97	3	291	873
10	370~389	380		55	4	220	880
11	390~409	400		29	5	145	725
12	410~429	420		5	6	30	180
13	430~449	440		0	7	0	0
14	450~469	460		2	8	16	128
15							
仮の平均値 $X_0 = 300$				1868		-804	9808
区間の幅 $h = 20$							

表-2. 8 塗膜厚測定結果と管理値の例

測定結果

測定点数(N)	1852点
平均値 (X)	81.7 μm
最小値(MIN)	55 μm
最高値(MAX)	140 μm
標準偏差(S)	14.9

平均値 (本四公団規格)	
平均値	67.5 μm 基準値 $\times$ 90%以上
最小値	52.5 μm 基準値 $\times$ 70%以上
最高値	μm
標準偏差	15 *測定平均値 $\times$ 20%以下

*但し平均値が基準値以上の場合は合格

測定結果

測定点数(N)	1868点
平均値 (X)	291.4 μm
最小値(MIN)	190 μm
最高値(MAX)	450 μm
標準偏差(S)	45.0

平均値 (本四公団規格)	
平均値	229.5 μm 基準値 $\times$ 90%以上
最小値	178.5 μm 基準値 $\times$ 70%以上
最高値	μm
標準偏差	51 *測定平均値 $\times$ 20%以下

*但し平均値が基準値以上の場合は合格

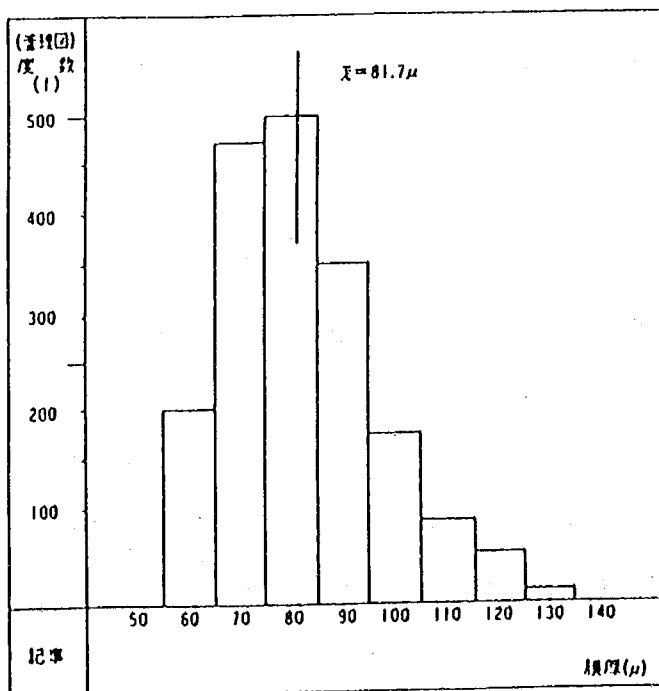


図-2.5 (第1層目厚膜無機ジンクまで)

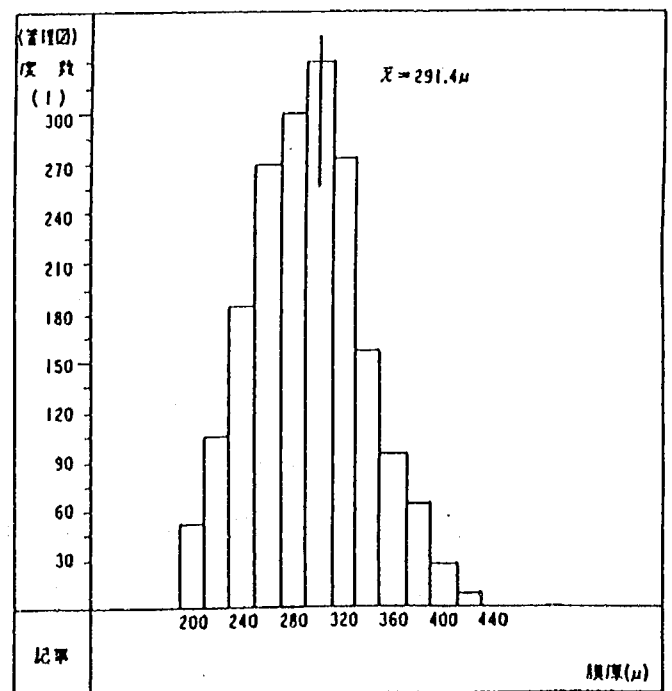


図-2.6 塗膜厚管理図 (仕上層まで)

3) 保管から発送まで

工場製作から現場架設までの仕掛品バッファーとして工場または岸壁付近での保管は避けられない。また海上架橋で海上占有時間を削減するため架設単位ブロックは巨大化し、海上を台船で現地まで輸送する。

一方、上塗り塗装まで工場施工のため、保管や輸送の際の荷扱い作業による塗膜の損傷を最小限にすること、保管中および海上輸送中の有害物の付着防止（特に海塩粒子の付着防止）には十分な注意を払う必要がある。以下にその主要事項を列挙する。

- ① 荷扱いによる損傷防止
- ② 水洗作業
- ③ オーニング

(a) 荷扱いによる損傷防止

塗装後保管場所への移動時はもちろん、塗装工程途中でもクレーンによるハンドリングは必要となる。鋼橋ではできる限り設計段階において吊り金具を部材に取り付ける工夫をしなければならない。通常工場内荷役の場合でも部材表面を損傷しないようワイヤと部材の間に「当て物」（ヤワラ）を挟んで養生しているが、塗装完了部材（または塗装中の部材）では、吊り金具を利用できる場合以外は鋼製ワイヤロープによる玉掛けは極力避け、ナイロンスリングを用いる。ただしナイロンスリングは吊り能力に限度があり、どうしてもワイヤを使用せざるを得ない時は、内側にゴム張りした特性棒型吊り治具を用いて荷役および反転などを行う必要がある。塗装部材のハンドリングの例を写真－6に示す。

(b) 水洗作業

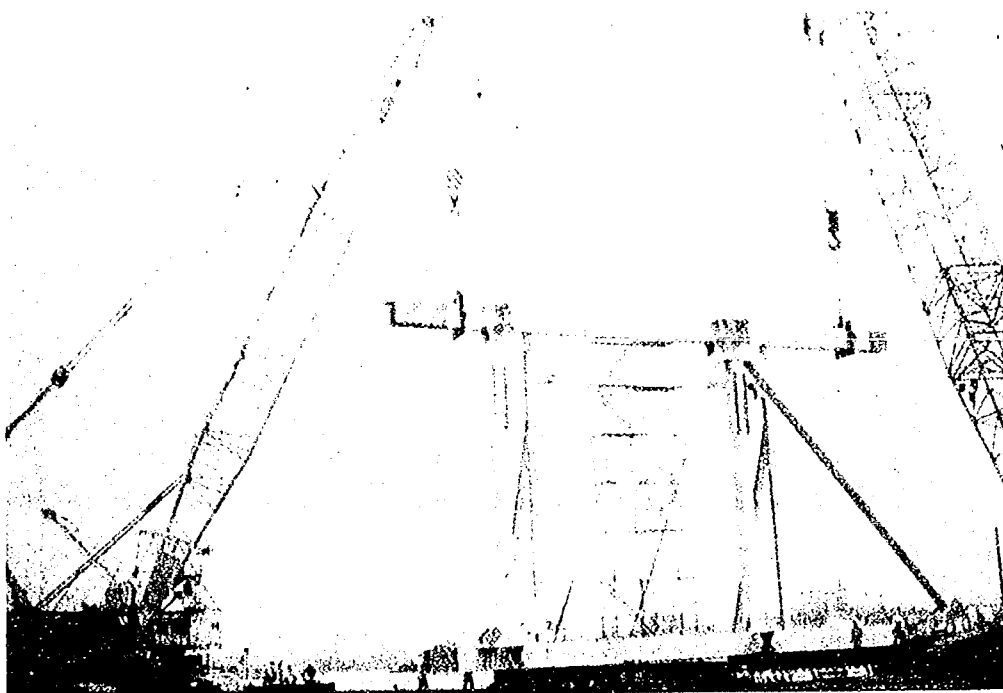
部材が大きいことと、海上輸送のため工場製作の最終工程である塗装は、海岸至近になりがちである。従って海塩粒子の付着が多くなり、塗膜機能を損なう恐れが多い。

海塩粒子の付着、その他の塵芥や大気浮遊物の付着も少なからず憂慮されるので、塗装中の部材の重ね塗り直前および発送直前においては、外観および塩分チェックなどを行い、高圧ジェットによる水洗などを行う。もちろんこのような処置は鋼橋塗装のいずれの場合にも必要である。水洗作業の例を写真－7に示す。

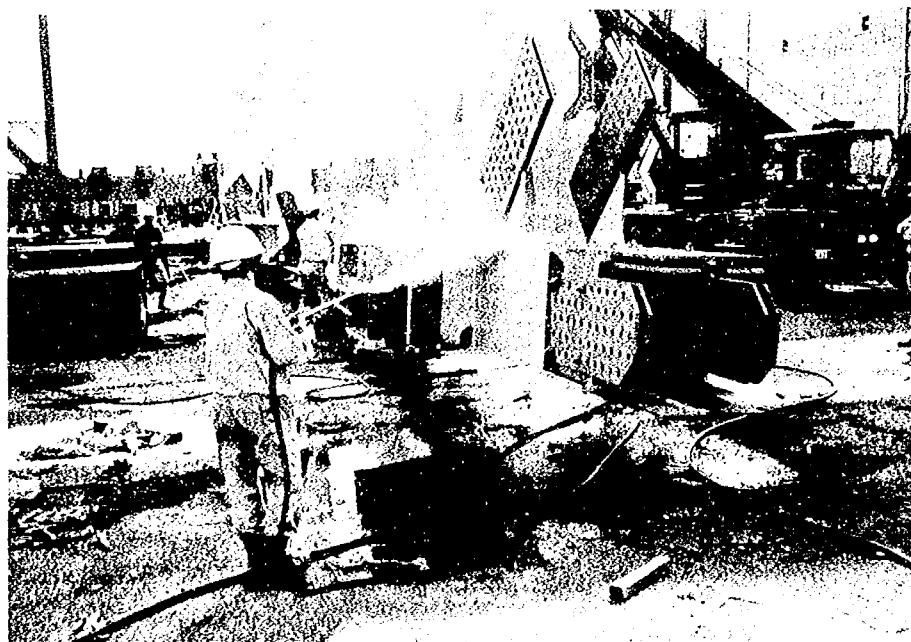
(c) オーニング

塩分はもちろん、塵芥や油分などを遮断するため保管中および台船上の部材に徹底したオーニングが必要である。特に現場添接部などの無機ジンク塗膜は塩分の影響を受け

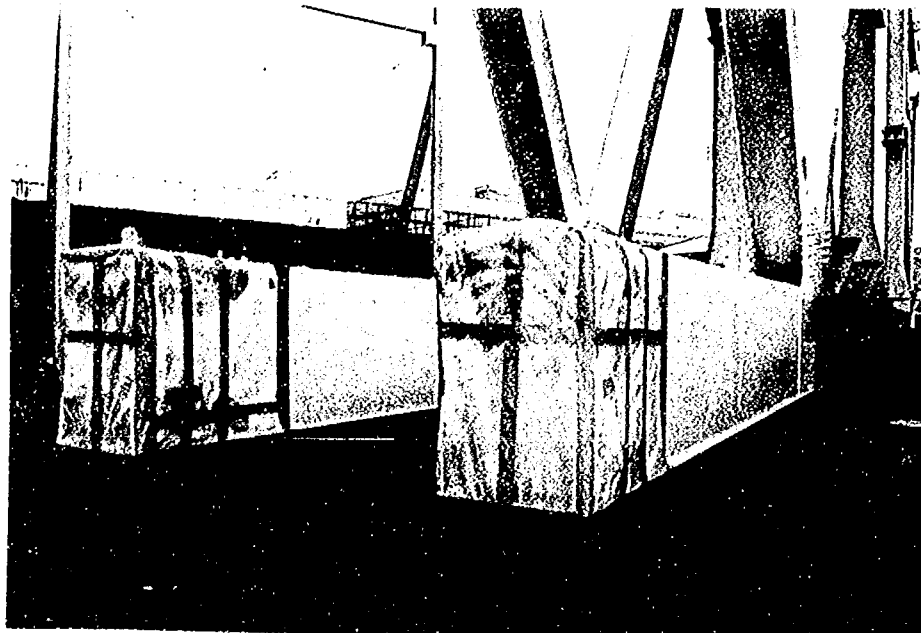
やすく、また表面が粗く有害物が付着しやすいので、完全にシートで密閉するよう荷作りを行い、さらに台船上で全体のシートカバーがけなどを実施することが望ましい。添接部の養生の例を写真－８に、台船上のオーニングの例を写真－９に示す。



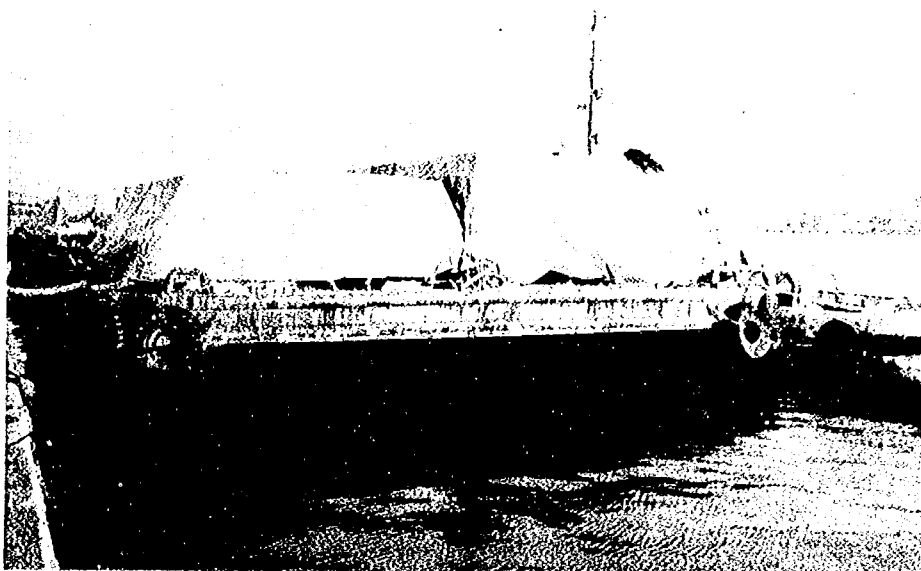
写真－６ 塗装部材のハンドリング



写真－７ 水洗作業



写真－8 添接部の養生



写真－9 台船上のオープニング

(3) 今後の課題

1) 原板ブラスト方式について

現在鋼橋製作では原板ブラスト方式が一般的である。すなわち、ミルメーカーでブラスト処理してプライマー塗装した鋼板を加工する方法である。しかしプレコートしたプライマー塗膜は前述のように加工性、特にガス切断性と溶接性を著しく損なう。本来鋼板の一次ブラストは表面の傷やへげ（圧延工程で生ずる欠陥）を圧延直後に発見して直ちに対処でき、かつ圧延工程へのフィードバックが敏速にできることと黒皮鋼板のブラスト能率が著しく悪いという理由からであった。しかし、切断と溶接に対するシビアな要求品質の場合は、むしろデメリットの方が大きい。黒皮鋼板か、もしくはブラストのままで加工する方式を採用した方が有利と考える。ただしブラストのままの場合は、赤さびの発生が著しいのでブラストと加工着手の期間を短縮するなど、発錆防止対策を考える必要がある。

2) 高力ボルト接合面の塗膜厚

高力ボルト摩擦接合面の厚膜無機ジンクは、防錆とすべり耐力の両者を一応満足させる意味ではメリットはある。但しあまり薄い（ $40\mu\text{m}$ 未満）とすべり耐力も劣るしあまり厚い（ $150\mu\text{m}$ 超）とボルト軸力の経時的低下が大きくなり、ひいてはすべり耐力を損なう。以上の理由により上下限の管理を要求される。いままでの経験による $55\sim 110\mu\text{m}$ という管理限界が妥当なものであるのかどうかの再検討が必要である。またエアレススプレーガンによる塗装（塗料供給は自動でガン操作は手動）では限界があり、今後自動塗装、あるいはロボット化なども考慮すべきである。

3) 塗装系の問題

近年における大規模橋梁の塗装技術は、長期防錆型塗装系の採用により、メンテナンスフリーという目標に一步近づいた観はあるが、まだまだ耐久性の面で十分とはいえず、高力ボルト接合部や鋼材の縁端部等、塗膜劣化を生じ易い箇所および構造上塗り替えができない箇所などの防錆にも検討すべき課題が残されている。このため、最近開発され実用化されつつある、厚塗り性と環境遮断性の優れたガラスフレーク系塗料や超厚膜型エポキシ樹脂塗料、耐候性の優れたふっ素樹脂塗料やシリコン樹脂塗料などの塗装系についてさらに研究を進める必要がある。

4) 塗装工場のレイアウト

ブラスト時の露点管理の必要性、あるいは塗装時の気温湿度の管理など、作業環境の

管理に厳しさが要求されるわけであるが、被塗物が巨大であるため、完全空調は極めて難しい。しかし、特別な大型部材は別として、主に一般的部材（トラス弦材など）は一応空調したコンパクトな塗装室を用意すべきであろう。もちろんこの場合、部材の移動方法も考慮に入れる必要がある。またブラストは主にエアブラストガンによる手動方法が主体となっているが、能力的に限界があり、インペラーによる自動製品ブラストシステムの採用も考慮する必要がある。

5) 部材の搬送方法

クレーンによる荷扱いは、仕上塗膜が損傷することが多い。また保管の範囲が広くなるとトラッククレーンも使用する。できれば装置付の専用台車なども備えることが望ましい。もちろんこの場合も塗膜損傷を考慮しなくてよいわけではないが、その機会は少なくできるのではなかろうか。製作工場の塗装作業のレイアウトに改善の余地がまだまだあると思われる。

6) 鋼板縁端部、高力ボルト部の問題

すでに架設、供用されている実橋の状態は、これらの調査を待つて解明されねばならない問題も多いが、橋体部材の縁端部や高力ボルト頭ナット部分の角部はすでに発錆している所が見受けられる。こういった角部は塗料の付着が不十分で薄膜となっており、現在の面取り量では不足のようである。今後、2～3mmのR仕上げをしたほうがよい。すでにこのための工具も開発されているが、まだその作業能率が問題のようである。また、ボルトやナットの角やネジ部は基本的にR加工することができないから、今後こういった鋭角部にも付着性のよい塗料の開発が望まれる。

7) 溶融亜鉛めっき面への塗装

主要橋体以外の添架構造部や、自動車防護柵などには、亜鉛めっき下地上に塗装した部分があるが、すでに剝離している所があり今後の課題となろう。剝離の要因は現在のところ断言は難しいが、古くから言われている亜鉛の水酸化反応による膨張によるものとの説が強い。現在のところ、ブラッシングによるめっきの目あらし、およびリン酸液処理などが効果的と思われる。

また、亜鉛めっき施工時の亜鉛純度、浸漬時間、めっき後のクロム酸処理などが関与すると言われているが詳しくは不明である。

8) ステンレス製部品

塗装が困難な部品や、局所的な腐食が起こりやすい部位にステンレスが使われること

がある。例えば亜鉛めっき部材の接合用ボルト、あるいはベアリング摺動部、排水装置、耐風安定装置（スタビライザー）などである。既に供用されている海上橋ではステンレス自身の発錆およびその周辺部分の発錆が観察されている。これらは、今後の詳細な調査を待つ必要があるが、加工時での鉄粉の付着による「貫いさび」およびこれに起因する腐食の進行、あるいは異種金属間の電位差による電気化学的腐食の進行などが憂慮される。

従って、通常の鉄構工場内での加工を避けること、異種金属間は電氣的に接触しないよう絶縁するなどの考慮が必要となる。

2.3.2 点検および塗替え技術の現状と課題

(1) 点 検

1) 点検の現状

鋼橋塗膜の維持管理を効果的に行うために、点検は極めて重要である。

各管理者は、予算の策定、塗替え工事発注の優先順位の決定、最適塗替え計画立案等のために、なんらかの形で塗膜の点検を行っている。

塗膜の点検基準は、管理者が独自で作成しているため、点検項目、点検方法、判定方法に多少の差異がみられるが、概ね下記の内容からなっている。

イ) 点検の目的

塗膜の劣化程度を把握して、塗替え計画立案の資料を得る。

ロ) 点検の種類および場所

橋上および橋下から目視または双眼鏡などにより行う日常点検と、足場等から塗膜に接近して行う定期点検がある。

ハ) 点検方法

さび、われ、ふくれ、はがれ、白亜化、変色等塗膜の劣化項目ごとに見本帳と対比して目視で観察する。

ニ) 総合判定

劣化項目や調査部材に重み付けをした上で、評価値を点数化し、加算することによって総合評価点を求め、塗替えの緊急性を判定する。

しかし、このような点検基準があるにもかかわらず、点検データがなかなか集積されてこないのが現状である。この原因として、点検基準に従って点検を行おうと考えて

も、点検者に塗装に関する知識と経験が十分ない場合、点検をうまく行えないことが挙げられる。すなわち、点検基準が実体に即していないことが考えられるので改善する必要がある。

2) 点検の課題

a) 点検方法の標準化

定期的に、回数多く、塗膜全体を接近して、定量的に点検することが望ましいことは言うまでもないが、実際には、点検の工数やコスト、点検者のレベル、点検環境などを考慮して、無理なく点検が行えて、目的にかなうデータが得られる点検方法を標準化する必要がある。

具体的には、環境、橋梁の大きさや構造、塗装後の経過年数、全体の点検結果等を入力すると点検箇所や点検方法が自動的に決まるような点検システムである。

b) 点検項目と点検要領

点検は、目視による外観観察を主体に行うことになるが、塗装についての知識や経験が十分ない橋梁管理者でも、迷い無く、偏りのないデータが容易に得られるような点検要領を作成する必要がある。このために、下記の作業や標準化が必要である。

- ① 点検項目毎には、実橋塗膜の劣化モードに合致した劣化度標準写真帳の作成。
- ② 点検のための調査道具の選定と、望ましくは、それらのパック化。
- ③ 点検データを記録する調査表のフォーマットの作成（前段階として、橋梁台帳のフォーマット化が必要）。

c) 劣化が進んでいる箇所の点検要領

塗膜の劣化は、橋梁構造や設置されている環境にもよるが、特定部位に集中して進行する傾向がある。劣化が進行しやすい下記の箇所や部位に生じる塗膜の劣化状況は、経験的に把握されているので、一般部位と違った点検方法を作成しておく必要がある。

例えば、漏水のある箇所、結露しやすい箇所、人為的な損傷を受けやすい鋼材端部、塗装しにくい箇所、および塗料の付きにくい接合部などである。

d) 点検データの処理

下記の判断や研究を行うためのデータ処理システムができて、はじめて点検データが生かされることになる。定性的なデータであっても、偏りのないデータが集積されてくれば、コンピュータを利用した統計処理でこれらのシステムを作り上げることは可能であろう。

- ① 塗替え時期の判断
- ② 塗替え優先順位の決定
- ③ 前回採用した塗装系の妥当性の吟味
- ④ 塗膜の劣化推移の予測→耐用年数の推定
- ⑤ 効果的な塗替え計画の立案

e) 点検の自動化

点検作業を自動化する努力も必要である。

イメージとしては、恒久的な足場（点検車）から、遠隔操作によってセンサーが自走して塗膜の欠陥や塗膜下の鋼板の腐食状態を自動記録するとともに、内蔵されているデータ処理システムによって瞬時に診断してくれるようなシステムである。

個々の単位技術は既に別の分野で開発されているものばかりなので、塗膜点検用に改良することと、これら単位技術の組み立てによって可能となると考えられる。

(2) 塗替え技術

1) 現 状

塗替え塗装工事は、足場を架設し、防護工を行い、電動工具で素地調整を行った後、はけで塗装する工法が一般的である。屋外の高所作業、交通規制、騒音や飛散防止等多くの制約条件のもとで行う工法として確立されているが、新設時の橋梁製作会社における塗装工事に比べると改善すべき点も多い。

また、塗替え塗装工事費は、足場と防塵工で45%、素地調整工で20%、塗装材料と塗装工で35%と言われており、この内訳比率の妥当性も吟味する必要がある。

2) 課 題

a) 足場の改善

塗替え工事費の中で大きな割合を占める足場架設の合理化は重要である。軽量で架設が容易なケーブル足場等について安全性を確かめた上で、積極的に採用を図るべきである。

また、負荷が小さい塗替え塗装用足場は建設足場と違った基準に変更したり、吊元のない橋梁には、塗替え時に吊元の取り付けを行うことも必要である。

b) 防護の改善

素地調整時に発生するダストや塗料の飛散を防止し、工具の落下や作業員の墜落を防ぐために、金網、板張、ネット等で防護している。これらの防護具については、自重、

取り付けの容易さ、コスト面から改善が必要であろう。

c) 素地調整法の改善

塗り替え塗装の耐久性を高めるためにはブラスト法で素地調整を行うことが望ましい。バキューム式ブラスト法は有力な工法であるが、実用化のために軽量化、効率化、騒音の低減等の改良が必要である。また、作業効率の良い素地調整（動力）工具の開発も必要である。

海岸に架設された橋梁では、下地処理前に付着塩分を除去する作業が必要になるので、高圧水洗法のような効率的な塩分除去法を確立し、基準化しておくことも大切である。

d) 塗装機の改良

塗替え塗装ははけ塗りが主体のため効率が悪い。塗装効率向上のためにはスプレー塗りの適用が望ましいが、飛散が少ないスプレー装置や塗料、飛散防止用ネットなどの開発を必要とする。

また、小面積を厚塗りできる塗装工具の開発も必要である。

e) 塗替え用塗料の開発

制約された環境下で塗装できる塗替え専用塗料の開発が必要である。

これらの塗料は、下記の性能のいくつかを備えていることが必要である。

- ① 厚塗性 …………… 塗装回数の削減
- ② 速乾性 …………… 工期短縮、冬期作業、乾燥過程での損傷防止
- ③ 低研掃面防錆性 …… 不十分な素地調整面での防錆性能の向上
- ④ 湿面塗装性 …………… 夜間作業、漏水箇所の塗装

f) 塗膜の劣化を均一化させる工夫

塗膜劣化は特定部位に集中し進行する。添接部やフランジ、鋼材端部のように塗膜欠陥が生じやすい箇所には、塗装回数を増やしたり、防錆性の良い塗料を塗装することによって補強する工法について研究する必要がある。

また、局部的に腐食が進行した箇所の局部補修用として、ライニング、パテ、接着剤などの分野技術を応用した材料開発も必要であろう。

2.3.3 塗装材料の現状と課題

(1) 現 状

鋼橋の塗装系は、一般的にその設置される場所や環境によりいくつかのシステムに分

けられている。

田園や山間地域など、比較的穏やかな腐食環境では、主に油性系下塗塗料とフタル酸樹脂上塗塗料の組み合わせが用いられており、厳しい腐食環境では上塗りとして塩化ゴム系塗料が用いられ、特に厳しい環境の海浜や海上に設置される鋼橋にはいわゆる長期防錆型塗装系が採用され、厚膜のジンクリッチペイントとエポキシ樹脂下塗塗料やポリウレタン樹脂上塗塗料などと組み合わされている。

橋梁に用いられている主な塗装系を表－ 2. 9 に示す

表－ 2. 9 鋼橋防錆塗装系の例

	一 般 塗 装 系			長期防錆型塗装系	
	I	II	III	IV	V
第 1 層	エッチングプライマー 長ばく型	エッチングプライマー 長ばく型	ジンクリッチ プライマー	厚膜型ジンクリ ッチペイント	厚膜型ジンクリ ッチペイント
第 2 層	油性系さび 止めペイン ト	油性系さび 止めペイン ト	塩化ゴム系塗 料下塗	エッチングプラ イマー 短ばく型	厚膜型エポキシ 樹脂塗料下塗
第 3 層	油性系さび 止めペイン ト	油性系さび 止めペイン ト	塩化ゴム系塗 料下塗	フェノールジン クロメートプラ イマー	厚膜型エポキシ 樹脂塗料下塗
第 4 層	長油性フタ ル酸樹脂塗 料中塗	フェノール 樹脂系M I O塗料	塩化ゴム系塗 料中塗	フェノール樹脂 系M I O塗料	ポリウレタン樹 脂塗料用中塗
第 5 層	長油性フタ ル酸樹脂塗 料上塗	塩化ゴム系 塗料中塗	塩化ゴム系塗 料上塗	フェノール樹脂 系M I O塗料	ポリウレタン樹 脂塗料上塗
第 6 層		塩化ゴム系 塗料上塗		塩化ゴム系塗料 中塗	
第 7 層				塩化ゴム系塗料 上塗	
環境区分	田園地区 山間地区	市街地 一般工業地 帯	市街地 一般工業地帯	重化学工業地帯 海浜地区	海浜・海上地区

表中の環境区分は一般的なものであり、Ⅰの塗装系が市街地や一般工業地帯に採用されることも多いが、その場合には田園、山間地区に比べ耐用年数が低下する。

また、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴの塗装系を田園、山間地区に用いれば耐用年数が延伸される。

現在、本四橋を始めとする大規模橋梁には、表のⅣまたはⅤのいわゆる長期防錆型塗装と呼ばれる塗装系が採用されている。特に海峡部に架設されるつり橋にはⅤの塗装系が多い。

Ⅴの塗装系は、防錆性能に特に優れている厚膜型ジンクリッチペイントとエポキシ樹脂塗料との組み合わせにより、長期にわたる防錆力を塗膜に付与し、耐候性に優れたポリウレタン樹脂塗料を上塗りに用いることにより、海峡部などの海上橋で十分期待に応える性能を示している。

以下に各塗装システムの各種環境における期待耐用年数を表-2.10に示すが、あくまでも目安であり、腐食環境の度合い等により多少異なる。

表-2.10 防錆を主に美観を加味しての期待耐用年数

塗装系	環 境	期 待 耐 用 年 数
Ⅰ	田園、山間 市街地、工場 海浜、海上	0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20
		_____ 7 ~ 8 年
		_____ 5 ~ 6 年
		_____ 3 ~ 4 年
Ⅱ	田園、山間 市街地、工場 海浜、海上	_____ 9 ~ 10 年
		_____ 8 ~ 9 年
		_____ 6 ~ 7 年
Ⅲ	田園、山間 市街地、工場 海浜、海上	_____ 9 ~ 10 年
		_____ 8 ~ 9 年
		_____ 7 ~ 8 年
Ⅳ	田園、山間 市街地、工場 海浜、海上	_____ 12 ~ 14 年
		_____ 10 ~ 12 年
		_____ 9 ~ 11 年
Ⅴ	田園、山間 市街地、工場 海浜、海上	_____ 16 ~ 18 年
		_____ 14 ~ 16 年
		_____ 13 ~ 15 年

現在、大規模橋梁に採用されている塗装系は、厚膜型ジンクリッチペイント（まれに亜鉛溶射の場合がある）により防食性を得、次にエポキシ樹脂下塗塗料により亜鉛の過剰な消耗を防ぎ、耐候性の良いポリウレタン樹脂塗料で長期にわたって美観を保持するというものである。

この塗装系は、採用されて既に10年以上を経過しており、大きな問題点は見られず全体的に見てバランスのとれた塗装系といえる。

しかしながら、このような塗装系を用いた橋梁を見ると、一般部はほぼ問題がないものの、桁端部、ボルト接合部には比較的早期に錆が発生することがある。

この原因は、端部、ボルト接合部は塗装が難しく十分な膜厚が得られないことなどによると思われる。

また、この塗装系は、一次プライマーを入れると6～7回、ときには8回塗りにも及ぶ。そのため、塗替えや補修塗装においても塗り回数が多いので、工期が著しく長くなることや工事中に異物の付着が多くなりやすいなどの問題点を解消することや、現行以上の防錆力を有する下塗塗料や、耐候性を有する上塗塗料の実用化を早期に実現することがこれらの課題の解決に必要である。

(2) 課 題

現在のいわゆる長期防錆型塗装系に使用される塗料は、多くの検討を重ねて大規模橋梁への適用を図ってきたところであるが、現在採用されているこれらの塗装系においてもいくつかの課題がある。

1) 耐久性の延長

一般的にも、供用開始後の塗替え作業の費用のうち大半が足場費用であることを考えると、塗替えの困難な海上高所に架設されるような大規模橋梁では、塗替え周期を現行以上に延伸させることができることの効果は非常に大きい。

現行に比べ数倍から10倍の膜厚を付与することにより、より長期の防錆性能を期待できるものとして、ガラスフレーク含有塗料や超厚膜型の無溶剤型塗料などがすでに紹介されている。これら塗料は、現行塗料に比べ組成的に統一されておらず、すみやかに統一規格を制定することが必要である。

2) 耐候性の延長

防錆防食性の向上とともに、より耐候性の良い上塗りを開発し、組み合わせることにより耐候性のさらに優れたシステムが可能となる。

ふっ素樹脂塗料やシリコン樹脂塗料がすでに紹介され、一部で橋梁に採用されているが、さらに実用化に向けての検討が必要である。

また、市街地や工場に近接した鋼橋などでは、排気ガスや煤煙などによる塗膜の汚れの問題がある。これら地区では、耐候性に加え汚れの少ない塗料が望まれている。

3) 劣化しやすい部位、部材の耐久性延長

過去多くの機関で鋼橋の塗膜調査がなされてきたが、特に目立つことは、一般部は比較的劣化が少なく外観的にも良好な状態を呈しているが、部位や部材によっては腐食が進行している例が見られる。フランジの下面、部材端部、接合部のボルトやナットの頭などは一般部に比べ劣化が早い。

フランジの下面は一般部に比べ結露時間が長く、部材端部やボルト、ナットの頭は鋭角であり塗料の付着が難しいことによる。このような部位、部材と一般部の劣化の程度が同じになるように塗料材料や塗装系などの塗装設計を検討することが必要である。

一例として、フランジ下面は一般部より塗装回数を多くしたり、より防錆力のある塗装系を採用するなどの方法が考えられる。また部材端部の鋭角部は、Rを大きくすることが有効である。ボルト、ナットの頭の防錆力向上には、防錆処理されたボルトやナットを使用することも大いに効果がある。

4) 小部材の耐久性延長

いわゆる小物と呼ばれる小部材は、現在主流のエアレス塗装では塗装が難しく、耐久性に問題がある。はけ塗りを採用しても、厚膜が得られにくく効率も悪い。

これら小部材は、効率がよくしかも高性能の得られる粉体塗料を静電塗装することにより耐久性の向上が期待される。

5) 塗替えに適した塗料、塗装系の開発

塗替え塗装においては、新設塗装に比べて下地の条件や作業上の環境が一定でなく複雑であること、また動力の確保や足場の状態あるいは周辺の影響などの制約条件も多い。このため、塗替え塗装された面は、一般に新設塗装面よりも防錆性に劣っている。

また、はけ塗りが主体なので塗装効率が低く経済性に劣る。塗装時の気象条件に左右されやすく、塗膜性能がばらつきやすい。

これら多くの課題に対して、塗装材料の面から橋梁に適用して大きな効果が得られると考えられる新材料がいくつか紹介されているが、特に大規模橋梁への適用が期待されるものを以下に示す。

- I) ガラスフレーク含有塗料
- II) 超厚膜型エラストマー塗料
- III) 超厚膜型エポキシ樹脂塗料
- IV) ふっ素樹脂塗料
- V) シリコン樹脂塗料

これら新材料は、より長期の防錆力、防食力を付与する（I，II，III），あるいはより長期の耐候性を付与する（IV，V）ことを目的に開発されたものである。

これらの新材料を以下の表に整理した。

I. ガラスフレーク含有塗料

項 目		内 容
1	樹脂系	1. ①不飽和ポリエステル樹脂 2. ②ビニルエステル樹脂 3. ③エポキシ樹脂
2	特 長	1. 厚膜が得られ、耐食性に優れる。 2. ガラスフレークの効果で、耐水性・耐薬品性・耐磨耗性に優れる。
3	実用化の課題	1. 樹脂系①および②は乾燥は早いが可使時間が短い。 2. 樹脂系③は冬期の乾燥は遅い。 3. ガラスフレークの量、粒径等による性能差の確認と標準化
4	期待される用途	1. 防錆層として用い、超耐候性塗料と組み合わせ外面に使用 2. 塗替え困難な部位の永久防食として使用

Ⅱ. 超厚膜型エラストマー塗料

項 目		内 容
1	樹脂系	1. 無溶剤型ポリウレタン樹脂塗料 2. 無溶剤型エポキシ樹脂塗料
2	特 長	1. 超厚膜が可能で、1回の塗装で数ミリの膜厚が得られる。 2. 厚膜にしても塗膜は可撓性に富むので物性がよい。
3	実用化の課題	1. 可使時間が短いので、専用の塗装機を必要とする。 2. 耐候性に乏しく、変色しやすい。
4	期待される用途	1. ボックス桁内面 2. 塗替えの困難な部位の永久防食として使用 3. 鋼脚の没水部

Ⅲ. 超厚膜型エポキシ樹脂塗料

項 目		内 容
1	樹脂系	1. 無溶剤型エポキシ樹脂
2	特 長	1. 超厚膜が可能で、1回の塗装で数ミリの膜厚が得られる。
3	実用化の課題	1. 非常に高粘度であり、特殊な塗装機を必要とする。
4	期待される用途	1. 鋼脚の没水部 2. 塗替えの困難な部位の永久防食として使用

IV. ふっ素樹脂塗料

項 目		内 容
1	樹脂系	1. イソシアネート硬化型ふっ素樹脂
2	特 長	1. 耐候性に非常に優れており上塗り塗料として最良である。
3	実用化の課題	1. 現行ポリウレタン樹脂塗料に比べ高価である。
4	期待される用途	1. 鋼橋外面

V. シリコン樹脂塗料

項 目		内 容
1	樹脂系	1. シリコン変性アクリル樹脂 2. シリコン変性ポリエステル樹脂
2	特 長	1. ふっ素樹脂塗料に次ぐ耐候性を有する。
3	実用化の課題	1. 塗り重ねる塗料に選択性がある。
4	期待される用途	1. 鋼橋外面

上記の新材料の特徴は、現行塗料に比べより厚膜が得られるので、工程の短縮を可能とするものや、耐候性により優れているので、美観が長期にわたって保持されることである。

これらの新塗料にはすでに橋梁に実績のあるものもあるが、多くは今後試験塗装を重ね実施工面でのデータを収集することが必要である。

また、これら塗料は開発されてから比較の日も浅く、塗料組成や性状性能もメーカーにより異なっている例が多く、実用化のためには統一された規格を作成することが必要である。

現在新材料として紹介されるものの多くは、現行塗料に比べより厚膜になっているが、厚膜にすることにより物性の低下の懸念がある。また施工も高度な技術を必要とすることや経済性も劣る。将来は、より薄膜でしかも性能の優れた塗装材料の開発が望まれる。

2.3.4 塗料品質試験方法および塗膜寿命予測技術の現状と課題

塗料の品質試験は、目的によって次の2つに分類される。

- 1) 製造品質の試験：塗装仕様が既に設計されていて、その実施に際して、使用する塗料の品質が設計通りであることを確認する。
- 2) 設計品質の試験：新たな要求に対して、設計した仕様が要求を満足することを確認する。

このうち塗料の製造品質の試験については、現在我が国で実施されている方法を塗料の品質試験方法として記し、塗料の設計品質の試験については、今後大規模橋梁の防錆において必要とされる塗膜寿命予測技術の現状と課題について記す。

(1) 塗料の品質試験方法

塗料の品質試験方法はJISや官公庁の規格で制定されている。民間企業でも使用する塗料の品質について規格を制定していることがあるが、その内容はJISや官公庁規格に類似している。

使用される塗料は、通常ロットごとにこの規格に合格していることが確認されるが、試験は製造会社で行い結果を試験成績表で報告する場合と、第3者機関で試験する場合とがある。

JISでは塗料について、JIS K 5400に塗料一般試験方法と68種類の塗料規格が制定されている他、JIS B に3種類の塗料、JIS G に2種類の塗料が規格化されている。

各官公庁は、必要に応じて塗料の規格を制定している。

規格の内容は、塗料の状態に関する項目、塗装および乾燥に関する項目、塗膜性能に関する項目、塗料の組成に関する項目に分類できる。

J I Sおよび主な官公庁規格で制定されている塗料の試験方法は、表-2.11に示すJ I S K 5400塗料一般試験方法に規定される。その概要は次のようである。

試験方法その1（塗料の物理性状に関する試験）

試験方法その2（塗料の実用性状に関する試験）

試験方法その3（塗膜の物理性状に関する試験）

試験方法その5（塗料の成分に関する試験）

試験方法その6（塗料および塗膜の長期性能に関する試験）

大規模橋梁の塗装に適用しようとする塗料の規格は、J I Sに制定されていないものが多い。したがって、各官公庁では必要に応じて独自の規格を作成すると同時に、試験方法についても作成している。

今後、塗装に対する要求がますます高度に多岐にわたることが予想される。このような要求に応じて塗料の品質を保証するためには、より信頼性の高い試験方法の開発が必要である。

試験の信頼性を高めようとする試験期間が長くなるので、塗料の認定のための試験とロットごとの納入試験を分離することも一つの方法であろう。

表-2.11 JIS K 5400塗料一般試験方法の内容

分 類	試 験 項 目	内 容
試験方法その1 (塗料の物理性状に関する試験)	色 数	ワニス類の色の明るさを調べる。
	動粘度	塗料の流動性を調べる。
	比 重	塗料の比重を調べる。
	つ ぶ	顔料の分散性を調べる。
試験方法その2 (塗料の実用性状に関する試験)	容器の中での状態	塗料が使用できる状態になるかどうか調べる。
	皮張り試験	塗料の表面に皮ができやすいかどうか調べる。
	透明性	透明な塗料の濁りを調べる。
	し み	シンナーの蒸発後の汚点を調べる。
	希釈性	シンナーの溶解性を調べる。
	ボイル油混和性	ワニスとボイル油の混合性を調べる。
	作業性	塗料が塗り作業に支障がないかどうか調べる。
	乾燥時間	塗料が固体の塗膜になるまでの時間を調べる。
試験方法その3 (塗膜の物理性状に関する試験)	塗膜の外観	塗膜の外観が正常であるかどうか調べる。
	隠ぺい力 隠ぺい率	塗膜が下地の色を蔽い隠す性能を調べる。
	色の安定性	塗膜が光にあたったときの色の変わりにくさを調べる。
	促進黄色度	白塗料の塗膜の色が暗くて湿度の高い状態で黄変する傾向を調べる。
	45度 0度拡散反射率	白塗料の塗膜の色の明るさを調べる。
	60度鏡面光沢度	塗膜の光沢を調べる。
	不粘着性	塗膜が湿度の高い状態で粘着する傾向を調べる。
	研磨容易性	塗膜の研磨が容易かどうか調べる。
	塗り重ね適合性	塗膜の上に同じ塗料を塗り重ねたとき支障がないかどうか調べる。
	上塗り適合性	塗膜の上に他の塗料を塗り重ねたとき支障がないかどうか調べる。
	にじみ	塗膜の上に白塗料を塗り重ねたときのにじみを調べる。
	耐衝撃性	塗膜の衝撃抵抗性を調べる。
	鉛筆引っかき試験	塗膜の引っかき抵抗性を調べる。

分 類	試 験 項 目	内 容
試験方法その 3 (塗膜の物理性状に関する試験)	碁盤目試験	塗膜のもろさや生地への付着性を調べる。
	耐屈曲性	塗膜の折り曲げ抵抗性を調べる。
	促進耐候試験	光と水による塗膜の劣化程度を調べる。自然の耐候試験と同じ効果は期待できない。
試験方法その 4 (塗膜の化学抵抗性に関する試験)	塗膜加熱試験	塗膜を加熱した場合の外観変化を調べる。
	耐水性	塗膜を水に浸した場合の変化を調べる。
	耐沸騰水性	塗膜を沸騰水に浸した場合の変化を調べる。
	耐アルカリ性	塗膜をアルカリ溶液に浸した場合の変化を調べる。
	耐酸性	塗膜を酸溶液に浸した場合の変化を調べる。
	耐塩水性	塗膜を塩水に浸した場合の変化を調べる。
	耐揮発油性	塗膜を揮発油に浸した場合の変化を調べる。
	塩水噴霧試験	塩水の霧の作用で塗膜に、さび、ふくれのできる状態を調べる。一般的なさび止め効果との相関は期待できない。
試験方法その 5 (塗膜の成分に関する試験) (一部省略)	加熱残分	揮発成分を除いた残分量を調べる。
	加熱減量	揮発成分の量を調べる。
	蒸留試験	揮発成分の留出温度と留分とを測定する。
	酸 価	ワニスやシンナーの酸成分の量を測定する。
	アルコール不溶物	ワニス等のアルコール不溶物を測定する。
	灰 分	加熱灰化して量を調べる。
	不けん化物	ワニスの中でけん化されないものの量を調べる。
	ボイル油のよう素価	ボイル油の不飽和の程度を調べる。
	溶剤不溶物	溶剤に溶けない固形物の量を調べる。
	溶剤可溶物中の無水フタル酸の定量	溶剤可溶物中の無水フタル酸の量を調べる。
	溶剤不溶物の定量 四三酸化鉛 鉛 酸化亜鉛 無水クロム酸 酸化鉄 二酸化チタン	
試験方法その 6 (塗料および塗膜の長期性能に関する試験)	貯蔵安定性	塗料を保存した後の変化の有無と程度を調べる
	長期浸漬試験	試験片を試験液に浸し、30日後と60日後とに変化を調べる。
	耐候試験	試験片を屋外にさらしたときの変化を調べる。

(2) 塗膜寿命予測技術の現状と課題

塗膜の劣化は、光学的現象、力学的現象、化学的現象に分類して考えることができる。

光学的現象は、主に太陽光の影響による塗膜の光沢低下、変退色、白亜化として見られる。

力学的現象は、塗膜のわれ、はがれ、ふくれなどの欠陥として見られる。

化学的現象は、水や酸素の作用で生じ、塗膜を非可逆的に変化させたり、塗膜を透過して素地鋼材を腐食させたりする。

塗膜の寿命はこれらの作用に対する総合的耐久性である。

塗装の目的は、構造物の保護と美観の付与にあるので、塗膜の寿命もこの2点で評価される。

美観の保持に関する塗膜寿命の予測は、紫外線部の光を強調した促進試験機を使用して行われることが多い。しかし、JIS K 5400 6.17 促進試験機に規定されるJIS B 7752 紫外線カーボンアーク燈式耐候性試験機を使用しても、天然暴露結果との時間的な対応が困難だけでなく、塗料の種類ごとに促進度が異なる。したがって、さらに天然の条件に近い促進試験機の開発が必要である。しかし、美観については天然暴露によれば比較的ばらつきのない結果が得られ、2～3倍程度の期間の予測は可能なので設計品質の試験には問題は少ない。

構造物の保護、すなわち鋼材の防錆に関する塗膜寿命の予測は、次のような理由から困難である。

- 1) 環境および構造物の部材位置により腐食の状態が著しく異なり条件が設定しにくい。
- 2) 塗装鋼材の腐食のメカニズムが明らかでない。

実構造物を調査して塗膜の防錆寿命を決めようとする方法は何回か試みられているが、表-2.12に示すように必ずしも同じ結論とはなっていない。

表-2.12 実構造物の塗膜調査例

調査例 \ 環境		田園環境 平地	山間環境 山地	市街地	工場地帯	海岸環境 海岸
さび発生から推定した平均適正 塗替え周期 国鉄鉄けた 270橋の調査結果		7.8年	6.9年		6.0年	3.9年
塗膜劣化度が塗替え 水準に達した橋梁が25 25%を越える年数 建設省鋼橋 254橋の調査結果	さび はがれ	5～6年 9～10年	8～9年 8～9年	7～8年 7～8年		3～4年 5～6年
劣化の平均点が塗替え 状態に達する年数 首都高速道路公団	桁、脚 桁下面			10年 6～12年		

試験片による暴露試験では構造物の調査結果より大きい耐久性を示す。

塗膜の防錆寿命を室内試験で推定するために、試験片に現場の腐食条件を促進して与える方法がある。このための方法としてはJIS Z 2371塩水噴霧試験や各種の浸漬試験、あるいは複数の方法を組み合わせた複合試験が行われ、塗装系の選択には効果を發揮しているが、寿命を予測できるような方法は見つかっていない。

一方塗膜の防錆機構から判断して、その寿命を推定しようとする試みもある。

Mengesは、塗膜の遮断性と付着性とから塗膜の寿命を次のように求めている。

$$L = \frac{I^2}{6D + \phi(P_s, \sigma_n)}$$

I : 塗膜厚, D : 拡散係数, ϕ : 定数, P_s : 下地界面での圧力

σ_n : 塗膜の付着応力

塗装初期におけるピンホールの数や、浸漬後の塩素イオンの侵入度、酸素の透過性から寿命を推定した報告もある。

塗膜は電気抵抗体として働き、局部アノードと局部カソードの間の腐食電流の流れを抑制することにより防錆することから、塗膜のインピーダンスによって防錆性を予測することもできる。この場合、簡易測定法で得た塗膜のインピーダンスが $\tan \delta$ が0.2以

下なら防錆性が保持されることが経験的に知られていて、塗料の規格試験にも応用されている。

$$\tan \delta = \frac{I_L}{I_C} = \frac{1}{2 \pi f C R}$$

I_L : 損失電流, I_C : 充電電流

f : 測定周波数, C : 電気容量, R : 電気抵抗

厚膜型のガラスフレーク塗料などの寿命をイオンが透過する孔を生ずるまでの時間とし、電解促進法で寿命を予測した例もある。

その他、塗膜下の鋼材の腐食反応を測定する装置も各種開発され、鋼材の腐食反応や塗膜の劣化状態はかなり正確に分かるようになっている。

大規模橋梁の塗装の課題と思われる、強腐食環境での長期防錆仕様の寿命予測は今後の重要な課題である。

この目的のために、駿河湾にある海洋技術総合研究施設では次のような試験が実施されており、課題の解決に役立つものと思われる。

腐食環境の測定

飛来塩分量と亜硫酸ガスの測定

気温とぬれ時間の測定

気象条件の測定

各種鋼材の腐食量

塗膜の劣化状態の測定

遮断性の変化の測定（酸素、水蒸気）

ビヒクルの化学的变化

表面状態の変化

膜厚の変化

塩素イオンの侵入度

塗膜インピーダンスの変化

素地鋼板の変化

試験片の暴露

これらの試験結果を総合判断して、塗膜の劣化機構の解明と、寿命予測技術の開発をしようとしている。

3. 塗装以外の防錆技術の現状と課題

3.1 耐候性鋼材の利用

近年、鋼橋の塗替え費用を軽減する目的で耐候性鋼材を用いた鋼橋の架設例が全国各地に見られる。

耐候性鋼材の特徴の1つは、素地のまま大気中に暴露した場合に添加されているCu, Cr等の合金元素の効果により3～5年で緻密なさび層（安定さび）を生成し、この安定さびが保護層となってそれ以後の鋼材の腐食を抑制するため、腐食がほとんど進まなくなる点にある。しかし、安定さびが生成するには鋼材表面が大気にさらされ降雨や日射、風の影響を受けて湿潤と乾燥を繰り返すことが必要であって、水中、土中のみならず大気中でも土砂や塵埃が堆積する箇所や通風が悪く湿気がこもり易い箇所、塩分の影響を受ける箇所などでは安定さびを形成し難い。

土木研究所が(株)鋼材倶楽部、(株)橋梁建設協会との共同研究により昭和56年から全国42箇所の種々な環境条件のところに架設された橋梁で試験片の暴露試験等を実施しているが、現在までに、海上や海岸など飛来塩分量の多い環境での適用には適さないことが明らかとなっている。

また、耐候性鋼材のもう1つの特徴として、普通鋼材に塗装した場合より耐候性鋼材に塗装した場合のほうが塗膜の寿命が長くなると言われている。図-3.1および図-3.2は、住友金属工業株式会社が行った実験結果で、SS41と比較して耐候性鋼材の塗膜寿命延長効果が認められる。しかし、この実験は、通常の塗装系を用いて、しかも、塗膜欠陥を作って試験したものであり、建設省土木研究所や鉄道技術研究所において、本四連絡橋の塗装系を検討する目的で行った塗膜欠陥のない塗装試験片を用いた暴露試験では、通常の塗装系においても鋼種による違いは認められていない。まして、長期耐久性を有し、塗膜損傷部からのさびの広がりが極めて小さい厚膜型ジンクリッチペイントを下地に用いた長期防錆型塗装系が適用される大規模橋梁においては、耐候性鋼材を使用する利点は全く無いといえよう。

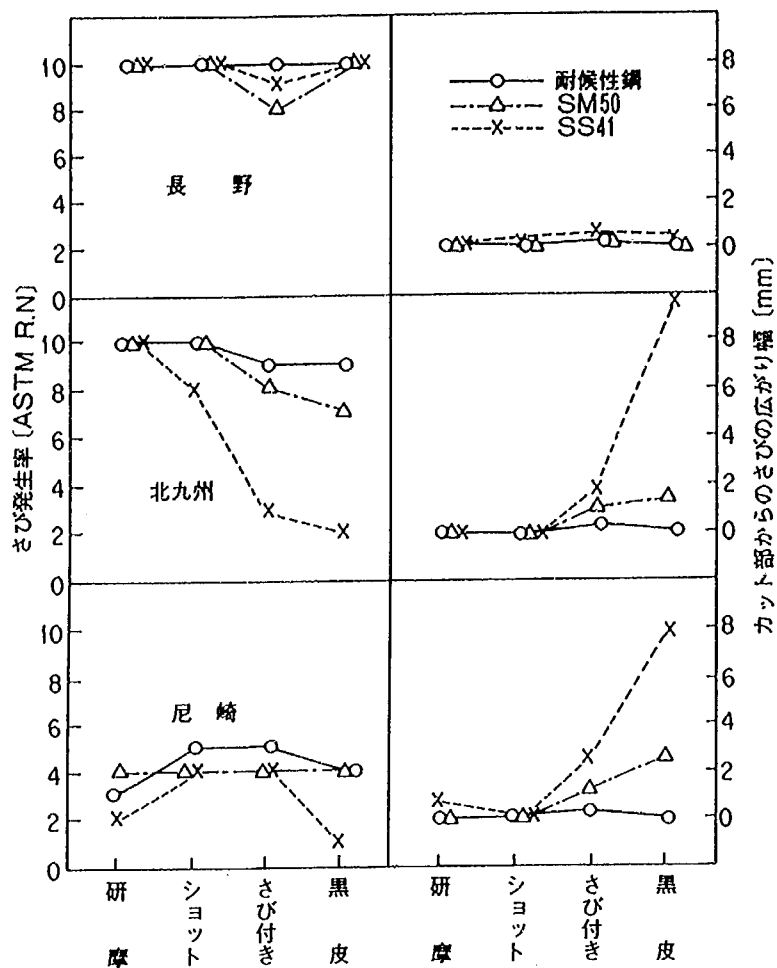


図-3.1 塗装鋼材の耐食性に及ぼす下地処理の影響
(鉛丹さび止め塗装 4年間暴露)

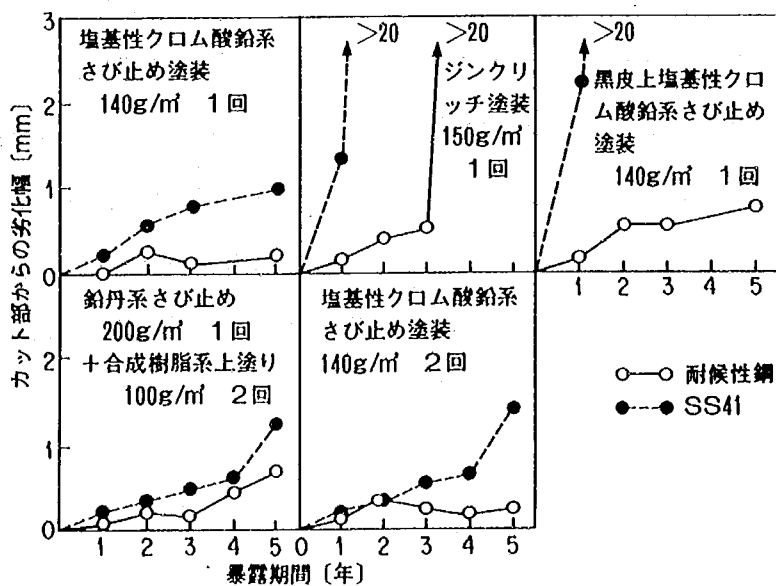


図-3.2 塗装鋼材のカットからの劣化幅の経年変化
(全国13箇所に暴露した平均値)

3.2 溶融亜鉛めっき鋼材の利用

大規模橋梁に対する防錆技術としては、橋体部材に亜鉛めっきを適用されることは少ない。大規模橋梁の暴露環境が海上もしくは臨海地域が多いため、亜鉛の消耗が激しく、長期防錆上好ましくないこと、部材が大型で亜鉛浴槽がないことなどがその理由と思われるが、これらの条件を除外し、かつ色彩の点を別にすれば、耐久性、防錆上で塗装法に十分拮抗しうる方法であろう。

また、橋体以外のブラスト処理の困難な付属構造物など亜鉛めっきを下地としてその上に塗装することも有効と思われ、実際に施工されている例がかなりある。ただし、前項でも言及したが亜鉛めっき面の塗装は、ジンクリッチプライマー上の場合に比べてどうしても剝離し易く、この点の留意が必要となる。すなわち、ブラッシングによる目あらし、あるいはりん酸溶液による表面処理などが有効と思われる。

以下に、橋梁部材の溶融亜鉛めっき施工上の問題点について概説する。

(1) 溶融亜鉛めっき施工上の問題点

1) 変形

高温（約450℃）の亜鉛めっき浴に浸漬するため、製作工程での溶接などの加工によって内蔵された残留応力が部分的に解放され変形となる。変形は完全に防止することはできないが、実用上支障のない程度に軽減するよう対処している。

2) 溶接部のわれ

プレートガーダーの補剛材の端部、まわし溶接部の止端部などからわれが発生することがまれにある。原因はあまり定かではないが、めっきによる変形に対する局部変形能、溶接止端部の不連続性、鋼の低温ぜい性、あるいは液体金属ぜい化など多くの要因の複合作用と考えられている。

3) めっきの不良

めっきの不良には多々あるが、防錆上重要なものについて記述する。

① 不めっき

亜鉛が鋼表面に付着せず、部分的に素地が露出されることがあり、防錆上極めて不具合となる。原因は、鋼表面に溶融亜鉛と鉄素地との接触を阻害する不純物が介在する時、溶融亜鉛が浸漬しにくいような構造物の時に生ずる。

② 白さび、やけ、ざらつき、かすびき、だれ、きず

上記の欠陥は、いずれもきわめて甚だしいもの以外は、防錆上問題とはならない

といわれているが、外観上、あるいはめっき後に塗装する場合などに支障となるものもあるので手直しされている。

4) 部材寸法の制限

橋梁部材の溶融亜鉛めっきの歴史はそれほど古くない。従って、このような大型材のめっき施工可能な能力をもつ工場は国内で数社しかない。かつ、これらの亜鉛槽によっても「幅1.5m×高さ2.5m×長さ15m」ぐらいが限度である。

5) 高力ボルト摩擦接合部

亜鉛めっき表面はかなり平滑で、そのままでは必要なすべり耐力が得られない。従って、スワイプブラスト処理あるいはワイヤブラッシングなどにより目あらしを行って接合する必要がある。ブラスト方法の場合は亜鉛層をある程度残存させ、かつ必要な粗さを確保すること、また、他の部分に研掃材が当たらないよう、マスキングを行うことなどが肝要である。

以下に、亜鉛めっき鋼材を設計、製作する上で配慮している事柄を表－3. 1に示す。
(対象はプレートガーダーとする。)

表－3. 1 亜鉛めっき鋼材の設計・製作時に配慮すべき事項

ステップ	配 慮 す べ き 事 項	目 的
設 計 工 程	・主桁ウェブ厚を1～2mm増とする。 (PL9 → PL10～11) ・主桁フランジ厚の急激な変化のない構造とする。 ・できるだけ対象的な断面とする。 ・垂直補剛材の間隔を若干狭くする。 ・垂直補剛材のスカルップを大きくする。 ・端補剛材にもスカルップを設ける。 ・溶接は連続とし、断続方式はやめる。 ・パイプなどは空気抜、湯抜穴を設ける。	ウェブのはらみ変形を 軽減 桁ねじれの軽減 曲がり、ねじれの軽減 ウェブ、ねじれの軽減 湯ぎれを良くして、 不めっき、だれな どを防ぐ。
製 作 工 程	・溶接入熱をできるだけ小さくする。 (溶接サイズを必要最小限に抑える。) ・溶接順序はできるだけ対象方法をとる。 ・水平補剛材端まわし、溶接止端部は平滑仕上げ	変形の防止 変形の防止 変形の防止
そ の 他	・高力ボルト接合部のブラスト処理 ・めっき上に塗装する場合のブラッシングおよびりん酸処理	摩擦係数の確保 塗膜の付着性確保

(2) 溶融亜鉛めっき面への塗装

溶融亜鉛めっきは、鉄鋼の防錆に対して非常に有効な手段であり、独立した防食方法として存在しているが、次のような場合には亜鉛めっき面に塗装を行っている。

- 1) 亜硫酸ガスなど亜鉛めっき面を浸食する成分を含む大気中に暴露される場合、また海塩粒子の多い海浜地区や海上に暴露された場合も亜鉛めっきが侵食されやすいことが知られている。
- 2) メンテナンスが困難なため、可能な限り長期の耐久性を与える場合。
- 3) 美観のため、あるいは国立公園など周囲との環境調和を必要とする場合。

大規模橋梁に採用される溶融亜鉛めっき部材は多岐にわたるが、上にあげた理由が単独であるいは組み合わされて塗装がなされている。

近年、海浜地区や汚染の進んだ工業地区などに、無塗装で暴露された亜鉛めっき構造物の寿命が期待された程ではないという報告も見受けられ、亜鉛めっき面上への塗装が増えつつある。

溶融亜鉛めっき面に塗装をする場合、特に重要なことは亜鉛面との付着性が良い塗料を塗装することである。

亜鉛めっき面は、鉄面が活性であるため、亜鉛めっき施工時の条件、塗装時の条件および塗料の性状によって、塗膜の付着力が低下し、時として塗膜が剥離を生じる例が認められる。

従来から、亜鉛めっきに対する塗膜の付着力の低下は、塗膜を透過してくる水や酸素の影響で、亜鉛と塗膜の界面でアルカリ性の水酸化亜鉛が生成され、塗膜中の脂肪酸や有機酸類と反応し、いわゆる亜鉛石鹼が生成し、この亜鉛石鹼は、塗膜や亜鉛などと比べて脆く、吸水性があるので付着力を低下させるといわれている。

また、塗膜の歪みも付着力を低下させるものであり、内部応力の大きい塗膜も長期にわたる付着性がよくない。

一般に、亜鉛めっき面の塗装には表－3、2の塗装系が適用されている。

表-3. 2 亜鉛めっき面用塗装系（常温乾燥型塗料による）

工 程	アルキド塗料仕上げ	塩化ゴム系塗料仕上げ	ポリウレタン塗料仕上げ
前処理	油脂類の付着は脱脂する。白さびや塵埃等の付着物は除去する。		
前処理	エッチングプライマー 1種	—	—
下 塗	ジクロメートさび止 めペイント J I S または 鉛酸カルシウムさび止 めペイント J I S	塩化ゴム系塗料下塗	エポキシ樹脂塗料下塗
中 塗	合成樹脂調合ペイント 中塗	塩化ゴム系塗料中塗	ポリウレタン樹脂塗料用 中塗
上 塗	合成樹脂調合ペイント 上塗	塩化ゴム系塗料上塗	ポリウレタン樹脂塗料上 塗
特徴・ 注意点	建築用途に実績多い。 長期の付着性に疑問。	亜鉛めっき面への付着 性の信頼性高い。 亜鉛が消耗し、鉄面が 露出した部位への適用 は不可。	エポキシ樹脂塗料下塗は 亜鉛めっき面への付着性 の良いものを使用する。

亜鉛めっき面への塗装システムは、確立されているとはいえず問題点も多い。海浜地区あるいは海上に架設される橋梁に使用される亜鉛めっきに塗装する場合は、事前に十分な調査が必要である。

亜鉛めっき表面をリン酸等で化成処理することは、塗料の付着を改良する上で最も有効な方法であるが、大型構造物の場合は設備等の制約上行えない場合もある。

小物部品であれば、化成処理を行った後、粉体塗料などを焼き付け塗装する方法が効率も含め優れた方法である。

3.3 溶射の現状と課題

線状または粉末状の亜鉛，または亜鉛／アルミニウム合金またはアルミニウムをガスで溶融しながら溶射専用ガンで被塗面に吹き付けて被膜を得る方法を金属溶射（Metal Spray）と呼んでいる。

溶射被膜は，亜鉛めっき被膜やジンクリッチペイント被膜と同じように，鋼素地に対して犠牲陽極として働くので，鋼構造物の防錆の目的で使用する事ができる。

使用例は関門橋（昭和47年）がある。また，本四公団では塗装系No.6としてあるが，桁や塔本体に使用した例はない。

亜鉛溶射被膜の性質を，溶融亜鉛めっきや無機ジンクリッチペイント被膜と対比して表－3. 3に示した。

溶射の欠点は，①鋭角な表面形状を持つ清浄な被塗面が必要である，②作業効率が低く，③施工時に亜鉛のヒュームを発生する，④防錆下地として使用する場合には，被膜が多孔質で活性が強すぎるために封孔処理を施すことが必要である，⑤適合する上塗塗料が限定される（特に，多湿環境下）ことである。

これらの欠点は溶射の本質に起因しているので，根本的な改良は極めて困難である。

無機ジンクリッチペイントが種々改良を重ねて信頼性の高いものになった現在，橋梁などの大型構造物に溶射を適用するメリットは極めて小さいものと考えられる。

ただし，比較的容易に施工できるので，物理化学的に類似している溶融亜鉛めっきの損傷部の補修用や，摩擦係数が大きい特徴を生かして検査車のレールなど，付属設備への適用は考えられる。

参考として，関門橋補剛桁外面に採用された塗装系と，本四公団の塗装系No.6を表－3. 4に示した。

表-3. 3 亜鉛溶射の性能比較表

項 目	亜 鉛 溶 射	溶融亜鉛 めっき	無機ジンクリッチ ペイント
橋梁への適用性	◎	△	◎
素地調整の方法	グリットブラスト	酸 洗	製品ブラスト
素地調整の程度	△	○	○
作業効率	△	◎	○
乾燥性	◎	◎	○
白さびの発生	△	△	○
防錆性	◎	◎	◎
付着性	△	○	○
被膜強度	◎	◎	○
塗料適合性	○	△	○

注) ◎ ○ △ ×
← 良好, または好ましい性質

表-3. 4 金属溶射を使用した塗装系の例

工 程	関 門 橋 補 剛 桁 外 面	本四公団塗装系No. 6
素地調整	グリットブラスト	製品ブラスト
溶 射	亜鉛溶射 (1)	亜鉛溶射 (1)
プライマー	エッチングプライマー (1)	ミストコート (1)
下 塗	フェノールジクロプライマー (1)	厚膜型エポキシ (2)
中 塗 (1)	フェノールMIO (2)	—
中 塗 (2)	塩化ゴム中塗 (1)	ポリウレタン用中塗 (1)
上 塗	塩化ゴム上塗 (1)	ポリウレタン上塗 (1)

注) [] 内は塗装回数

3.4 耐食性金属材料の利用

(1) 利用の現状

橋体主構造に使用されている鋼材は、通常 JIS G 3101, JIS G 3106, JIS G 3114, 並びに稀ではあるが HT70, HT80 などの調質鋼などであり、いずれも低炭素・低合金鋼に類するもので、耐さび性について著しい差異のないものである。ただし、このうち JIS G 3114 に属する鋼材は、耐候性鋼材と称され、大気暴露によって安定さびを生成し、腐食の進展を防ぐという機能がある。

しかしながら、大規模橋梁は海上もしくは臨海地域に架設されるもので、海塩粒子に常にさらされることから、安定さびの生成が期待できないので、耐候性鋼材の裸使用は適さない。

一方、耐さび性の優れたステンレス、あるいはアルミニウム合金などを橋体に使用することも、コストあるいは耐力などの点で著しく劣るため、その例は極めて稀である。

しかしながら、橋梁のある部分で特に耐食性を必要とする部位あるいは塗装や他の防錆処理の困難な部位などには、上記のような構造用鋼以外のステンレス、アルミニウム合金などの高耐食性金属が使用されている。

以下、その事例を列挙する。

1) 高欄、自動車防護柵など

通常、耐食アルミニウム合金押出型材および同ダイキャスト材を使用し、大抵の場合、表面にアクリル樹脂塗装もしくはアルマイト処理などがほどこされている。

2) 支承（シュー）の摺動部、ローラー部、軸受部など

これらの部分は、耐食性以外に特殊な機械的性質を要求される部分で、高合金鋼、特殊ステンレス鋼（マルテンサイト、フェライト系を含む）、黄銅、磷青銅などが使用されている。

3) 排水装置（伸縮装置用ガッター）

一般には、鋼管もしくは塩化ビニル管が広く使用されているが、維持管理の困難な伸縮装置の内部排水用として、SUS304 (18Cr-8Ni オーステナイト系) を使用することもある。ただし、最近はこれでも溝内に泥がつまることが多いため、非排水型伸縮装置が採用されることが多くなり、ガッターの必要は少なくなっている。

4) 耐風安定板

これは極めて特殊な例で、長大吊橋の海上吹上げ風に対する補剛桁の安定度を保つ

役目を持つもので、構造的には飛行機の翼のようなものを、SUS304で主としてボルト接合で組み立てられている。現在すでに供用中であるが、部分的に錆が発生している例がある。これについては、今後の調査に待つ所が多いが、SUS304は塩素イオンに対する腐食に弱いことから考えて、ステンレスでも海洋上では必ずしも安全ではないと言える。

以上のように、橋桁に炭素鋼以外の合金が使われるのは極めて一部に限られており、それも用途として特殊な機能を要求される部分である。今後、橋桁の主要構造に特殊合金が使われるようになるとすれば、高耐候性合金鋼、高力アルミニウム合金などであろうが、まだその経済性、耐食・耐さび性、接合性などは研究開発にかなりの時間がかかるものと思われる。

また、ステンレスクラッド鋼板、アルミニウム溶射鋼板なども特殊な部材部位に使われる例はあっても、橋体に使われることはないと思われる。

(2) アルミニウム面への塗装

アルミニウム面は、亜鉛と同様表面が酸化されやすく、酸化アルミニウムとなっている。

酸化アルミニウム面は比較的安定であるが、腐食環境におかれたり、長期の耐用年数が必要な場合には塗装により腐食を防止する必要がある。

塗装に際しては、アルミニウム面は塗料との付着性がよいが、処理後はなるべく短時間に塗装しないと付着性が低下する。

化成処理ができない場合には、ブラスト処理（板厚が厚い場合）や動力工具あるいは研磨紙などによる目荒らしを行う。

エッチングプライマーによる素地調整も行われることが多いが、付着力が不安定であり、長期の耐久性を必要とする場合は避けたほうがよい。

素地調整が完了したアルミニウム面には、通常の防食塗料は安定した付着性を示すが、エポキシ樹脂塗料は特に安定した付着性を示す。水や酸、アルカリなどに浸漬される場合は、ステンレス鋼と同様注意が必要である。

代表的なアルミニウム面用塗装系を表-3、5に示す。

表－ 3. 5 アルミニウム面用塗装系

工 程	アルキド塗料仕上げ	塩化ゴム系塗料仕上げ	ポリウレタン塗料仕上げ
前処理	油脂類の付着は脱脂する。		
	—	クロム酸またはリン酸等による化成皮膜処理を行う。または表面の目荒らしを行う。	
前処理	エッチングプライマー	—	—
下 塗	—	エポキシ樹脂塗料下塗	エポキシ樹脂塗料下塗
中 塗	合成樹脂調合ペイント 中塗	塩化ゴム系塗料中塗	ポリウレタン樹脂塗料用 中塗
上 塗	合成樹脂調合ペイント 上塗	塩化ゴム系塗料上塗	ポリウレタン樹脂塗料上 塗
特徴・ 注意点	長期の付着性に疑問。	耐熱用途には不適。	アルミニウム面用としての 標準仕様。

(3) ステンレス鋼面への塗装

ステンレス鋼は、鉄、クロム、ニッケルの組成からなる合金であり、不銹鋼と呼ばれるように、それ自身に防錆力があるため無塗装で使用されるが、着色を必要とする場合には塗装する。

ステンレス鋼の表面は不動態膜に覆われているので安定であり、亜鉛めっきのように表面が変質して塗膜の付着力を低下させることは少ない。

しかしながら、ステンレス鋼は炭素鋼に比べ塗膜との付着力が小さいので、塗装を行う場合は注意が必要である。

特に素地調整はていねいに行い、いわゆる鏡面仕上げの面には塗装してはならない。

ブラスト処理が最も望ましく、採用できない場合には動力工具または手工具による目荒らしが必須である。エッチングプライマーを塗装して付着力を増すことも採られているが、長期にわたる付着力が不安定である。

素地調整が完了した面には通常の塗装系でよいが、被塗物のおかれる環境により塗料を選択する。

一般にはエポキシ樹脂塗料がステンレス鋼面には安定した付着性を示すが、水や酸、アルカリなどに浸漬される場合には注意が必要である。

代表的なステンレス鋼面用塗装系を表－3. 6に示す。

表－3. 6 ステンレス鋼面用塗装系（常温乾燥型塗料による）

工 程	アルキド塗料仕上げ	塩化ゴム系塗料仕上げ	ポリウレタン塗料仕上げ
前処理	油脂類の付着は脱脂する。 ブラスト、動力工具、研磨紙等により表面を目荒らしする。		
前処理	エッチングプライマー	—	—
下 塗	—	エポキシ樹脂塗料下塗	エポキシ樹脂塗料下塗
中 塗	合成樹脂調合ペイント 中塗	塩化ゴム系塗料中塗	ポリウレタン樹脂塗料用 中塗
上 塗	合成樹脂調合ペイント 上塗	塩化ゴム系塗料上塗	ポリウレタン樹脂塗料上 塗
特徴・ 注意点	長期の付着性に疑問。	耐熱性を必要とする用途には不適。	ステンレス鋼面用の標準仕様。

3.5 その他の防錆防錆方法

3.5.1 ケーブル防錆技術の現状と課題

橋梁上部構造物の防錆方法として、塗装による方法が一般化されているが、近時、塗装のほか被覆による防錆方法も使用されている。

現在では、ポリエチレンを主体とした被覆材が、主として斜張橋のケーブルの防錆用として使われている。

ケーブルは、その性質上、常に引張り、たわみ、ねじれ等の応力を受けているので、一般鋼材以上に防錆の面が重視されており、ポリエチレンを主体とした被覆材の単一使用でなく、2～3の防錆方法を組み合わせた複合防錆型となっている。

(1) ケーブルの種類と主な防錆方法

ケーブルに使用される鋼線は次のものがある。

- ① ストランドロープ
- ② スパイラルロープ
- ③ ロックドコイルロープ (LCR)
- ④ パラレルワイヤストランド (PWS)
- ⑤ アンカーケーブル (Hi Am)
- ⑥ PC鋼線・PC鋼より線

これらのケーブルは、それぞれ異なった断面をとるので、防錆方法も種々異なってくる。

ストランドロープ、スパイラルロープは、主として吊り橋のケーブルに使用されることが多く、それらの防錆方法は、主にケーブルの表面をラッピングワイヤで被覆し、その外面を塗装する例（大鳴門橋）がある。

斜張橋に使用される鋼線は、LCR、PWS、Hi Amが多用されている。これらの防錆方法には、数種の組み合わせによる複合防錆型がとられている。

現在実用されている防錆方法の例を表－3.7に示す。

表-3.7 防錆工法の例

防 錆 工 法	主な施工例	特 質	備 考
(1) 鋼線そのものに防錆を施すだけのもの。 ① 塗 装 ② 亜鉛めっき	尾道大橋 Kohlbrand	ロックドコイルのケーブル防錆に多い。 最近②の亜鉛めっき工法を採用するものが多い。	Kohlbrand の場合 ①から②に補修工事を行っている。
(2) ケーブルを防錆材料で直接破覆するもの。(ラッピング工法) ① ワイヤラッピング ② プラスチックカバリング	大和川橋	鋼線の亜鉛メッキと併用する場合が多く、(1)の工法よりも防錆効果は期待できる。 問題点としては、架設中の雨水を含んだまま密閉することがあること。又、破覆工事およびその点検のため総足場が必要となること。	ワイヤラッピング工法は、吊橋に施工実績が多いが斜張橋では、実績がない。
(3) ケーブルを外管で覆い、その間をグラウト材にて充填するもの。(グラウト工法) ① Hi Am工法	Mississippi Luling Pasco Kenrewick Intercity 目の浦橋	平行素線のケーブル防錆に多く、比較的歴史が浅い。問題点としては、外管およびグラウト材の材質が、ケーブルの防錆効果に大きく影響するが、適切な材料選定が難しい。又、施工性も材料選定の大きな要因となる。 ① 裸線+PE管(ポリエチレン管)+セメントミルクの組合せで、防錆効果を図った工法。 Leonhardt 教授考案の特許工法でPE管が可換性が大きく、工場でHi Amアンカー、ケーブルと組立て、現場に搬入できるので、施工性が良い。 問題点としては、PE管の耐久性の実績が少ないことと、セメントグラウトの伸びの応答性が悪いので、クラック発生時の防水性に対する不安、あるいは施工高が高い場合、グラウト作業時のブリージング防止、流動性の向上を図る必要がある。	グラウト方式では最も実績が多い。
② Hi Am工法を紫線の亜鉛めっき化で、さらに補強した工法(その1)	魚釣り公園橋 (尼ヶ崎市)	② 亜鉛めっき+PE管+ポリマーセメントミルクの組合せで、セメントグラウトの防水性の不安に対して鋼線の亜鉛メッキ化で補強している。 問題点は、①と同様であるが、施工例が少ないことと、ポリマーの量によりグラウト材の性能が異なるので、均一攪拌、グラウト時の流動性などの施工性について検討する必要がある。	
③ Hi Am工法を紫線の亜鉛めっき化で、さらに補強した工法。(その2)		③ 亜鉛めっき線+ポリエステル焼付け+PE管+セメントミルクの組合せで、基本的には②と同じであるが、鋼線の水素脆性発生防止のため亜鉛めっき線の表面にポリエステル焼付け(120℃)を施したものである。 施工実績はない。	
④ 外管を銅管で補強した工法。	Brotonne	④ 裸線+銅管+セメントミルクの組合せでHi Am工法のPE管を銅管に置換えたもので、外管の防水性、耐久性は著しく向上するが、施工性、銅管の塗装などの維持管理の作業が生じる。	BrotonneはPC斜張橋であり、アンカーはフレシネー工法を採用している。

(2) 防錆方法の種類

ケーブルの防錆には、上述したように複合防錆化が行われるケースが多いが、それぞれ単一防錆手法を示すと次のとおりである。

- ① 亜鉛めっき：鋼線そのものに施す。
- ② 防錆材で直接被覆：塗装、ワイヤラッピング、樹脂カバーリング、防錆テープ
- ③ PE被覆：ポリエチレンを溶着させる。
- ④ PE管：ポリエチレンのパイプを外管として、管内に鋼線を入れる。
- ⑤ 鋼管：外管として使用する。

(注) ④および⑤の外管を使用する場合、鋼線と外管との間に空隙が生ずるので、別に充填材を使用する。充填材には各種ある。また、充填材（注入材）の化学的性質に対応して、鋼線に亜鉛めっきを施す場合と、めっきをしない場合とに分かれる。

(3) 防錆方法の複合化とその推移

吊り橋のケーブルの防錆方法は、主として、鋼線に亜鉛めっきを施し塗装を行う方法がとられており、さらにこれに加えて、ワイヤラッピングを加えたもの（大鳴門橋）、防錆テープを巻いたもの、あるいは部分的に樹脂カバーをしたものがある。

斜張橋にあっては、初期は吊り橋と同様に、LCR鋼線に亜鉛めっきを施し塗装を行う方法がとられていた（尾道大橋、摩耶橋）。

その後、LCR鋼線から単線束ね鋼線（平行型、ねじり型）の時代となり、PWSおよびHiAmタイプとなるに従い、塗装方式から樹脂カバー、特にポリエチレンを主材とした外管被覆方式に移行してきた。

外管方式を採用するとなると、鋼線と外管との間の空隙を充填することとなるため、注入材としてセメントモルタルまたは高分子材料によるグラウトを使用することとなる。

この場合、セメントモルタルを使用する場合は、水素せい性の問題が生じ、亜鉛めっきが不適切となりめっきしない組み合わせとなる。またさらに、セメントモルタルと亜鉛めっきとの間を遮断する目的で、めっき鋼線をさらにその表面を熱硬化性超高分子オイルフリーポリエステル樹脂を原料としたものを1回被覆、1回焼付（1コート1ベーク）し、現場でグラウトされるセメントミルクの水分とめっきの亜鉛とを遮断しようとする方法（名港西大橋）もとられている（この場合の膜厚は $10\mu\text{m}$ となっている）。

高分子材料によるグラウトは、最近の本四架橋（岩黒島橋、櫃石島橋）に使用されて

いる。

このように、最近ではP E管による外管被覆法をメインにする防錆方法が主に使用されるようになった。

P E管を使用する場合でも、さらに長寿命化を図るため2重構造のP E管を使用し、従来の10m程度の短管を熱圧接した一重管に代えて、継目のない長尺P E管により万一外管が紫外線によって劣化してクラックが生じてても、内管に伝播せず、内管の紫外線遮断効果が残る、より長寿命化を期待するという方法がとられるようになった（本四連絡橋の場合）。

この場合のP E管の肉厚は3 mm、2～3 %のカーボンブラックを混入した高密度ポリエチレンを主材としている。

P E管と防錆材、鋼線の組み合わせイメージを図-3. 3に示す。

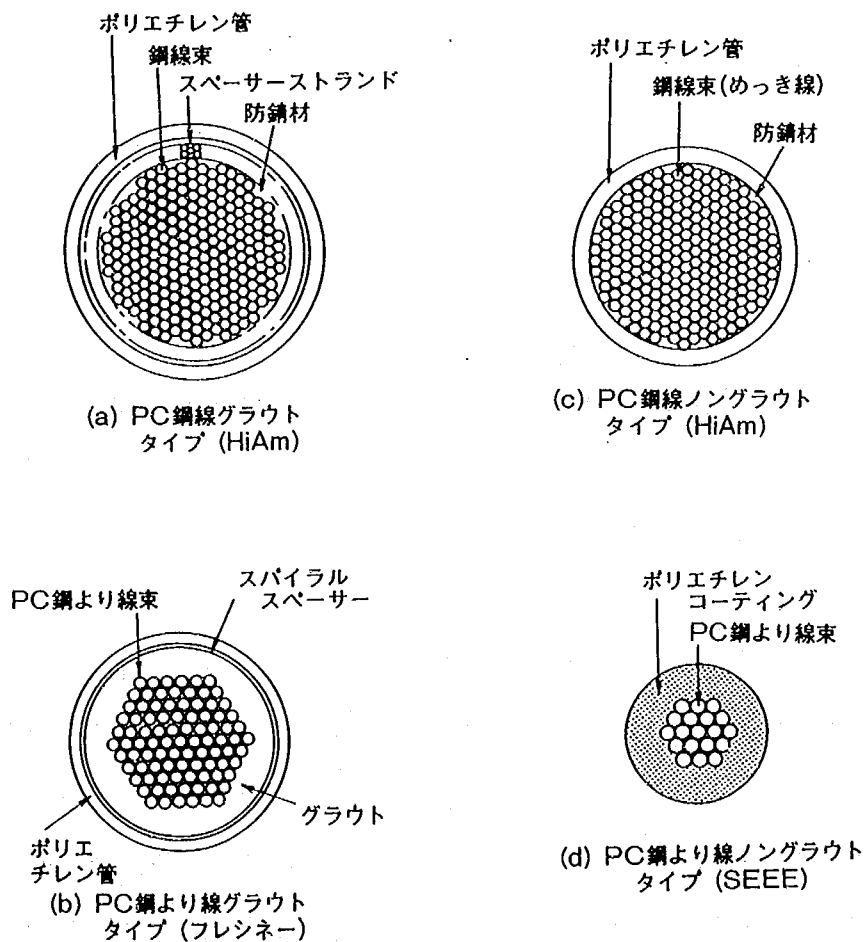


図-3. 3 P E管のイメージ

(4) 防錆防食の組み合わせ

橋梁用ケーブルの防錆方法は、上述したように、鋼線の作製方法の変化と防錆技術の進歩との相互関係を保ちながら、今日のPE管による被覆へと移ってきた。

PE管は、その厚みが3mm程度であるので、防錆領域からむしろ防食領域に及んできつつあるということができよう。

防錆防食材料は、各方面の技術開発によって、より高性能な、より新しい材料が提供されるので、逐次、新しい防錆防食方法が生み出されており、ケーブルの防錆技術もその例外ではない。

鋼線の種類に対応した防錆方法の組み合わせとその内容の実績を表-3. 8に示す。

(5) ケーブル防錆（特にPE管を中心とした）の課題

表-3. 8に示したように、斜長橋のケーブルの防錆は、ポリエチレンを主材とした外管による方式がメインとなっているが、現時点では最良と考えられているこの方法も、完成された防錆方法であるとはいえない。

それは、各材料ともそれぞれ長所短所をもっており、用法によって長所をいかし短所をカバーする技法を考慮しなければならないからである。

はじめに述べたように、ケーブルは、引張り、たわみ、ねじれ等の応力により、鋼材にそれぞれの物理的変化が発生する。

したがって、これらの変化に対応できるような防錆材料を組み合わせる必要がある。

表-3. 8に示した防錆実施例は多岐にわたっているが、このように多くの防錆方法がとられているということは、とりまなおさず、完成された唯一の防錆方法がないことにあるといっても過言ではない。

PE管を中心とした今後の課題を列挙する。

- ① ポリエチレンの品質規格の設定（高密度、低密度、架橋形か否か等）
- ② ポリエチレンの耐用期限の表現法と試験法
- ③ 外管の構造標準と製造・施工可能性
- ④ 充填材（注入材）の開発（特に可撓性注入材）
- ⑤ クラックの補修方法の確立（低応力）
- ⑥ 防錆防食側からみたケーブル材のあり方
- ⑦ 現場施工をなくし、工場施工とするためのシステム開発（材料開発を含む）

表3.8 橋梁用ケーブルの防錆防食実績表(国内)

橋梁形式	鋼線の種類	定着具又はケーブル名称	亜鉛メッキ		防錆材で直接被覆				PE被覆		PE管			鋼管		備考	
			有 ①	無 ②	塗装のみ ③	ワイヤーラッピング ④	樹脂カバリング ⑤	防錆テープ ⑥	付着型 ⑦	非付着型 ⑧	セメントグラウト ⑨	ポリマーセメントグラウト ⑩	高分子材料グラウト ⑪	セメントグラウト ⑫	充填無し ⑬	組合せ	橋梁名
吊橋	単線束ね(主索)	ソケット止め 〔A〕	◎		○	◎	◎									①+③+④	大鳴門、関門橋etc.
	ワイヤーロープ(吊索)	ソケット止め 〔B〕	◎		◎			○								①+③	大鳴門、関門橋etc.
斜張橋	ロックドコイルロープ	ソケット止め 〔C〕	◎		◎											①+③+④	摩耶大橋 尾道大橋 川崎橋
	単線束ね	PWS 〔D〕	◎		○		◎									①+③+④	大和川橋等
		New PWS 〔E〕	○							○						①+⑧	最近開発された歩道橋、ニールセン橋
		HiAm 〔F〕	○	◎						△ (カタログのみ)	⑨ ◎ ⑩	⑩ ○	⑩ ○			⑧+⑩	実績多い
	PC鋼より線	HiAm 〔H〕	○	○					⑨ ◎ ⑩	△ (カタログのみ)					⑧+⑩ ○		
		SEEE 〔I〕	△	◎					◎					⑧ ○		△計画あり	
		他 〔J〕	○	○				⑨ ○		⑩ ○	⑩ ○			⑩ ○			
	PC鋼棒	ディビダー 〔K〕		○							○						新円波大橋
備考	概要	単線 ≥300g/m ² PC鋼より線 ≥250g/m ²				φ3~4 亜鉛メッキ鋼線の巻きつけ	2工法あり (ハンドレイ アップ プレハブセ グメント)	ベトロム 系テープ	防錆油 入り	フィラメント テープ巻き etc.	⑨ポリ エステル焼付 (水・ ぜい性 防止)	グラウトのク ラック 防止	ポリブタジ エン系ポリ ウレタン注 入	SUS管 〔I〕 ガス管 〔J〕	アルミ半 ●カバー	○：使用実績有り ◎：使用実績多い ○：使用 △：カタログ記載又は計画中	
	橋梁名							〔J〕 名港西 大橋 (弾性 荷束 ケーブル)	〔H〕 新門司 2号橋 呼子大橋	〔J〕 宇部カン トリート 道橋 (クリス ト入り アンド)	〔F〕 名港西 大橋 〔J〕 堀越学 園	〔F〕 淀川橋	〔F〕 岩黒島橋 横石島橋 (本四架橋)	〔I〕 量後橋 〔J〕 錦ヶ原 第3跨 道橋	〔H〕 高梨大橋		

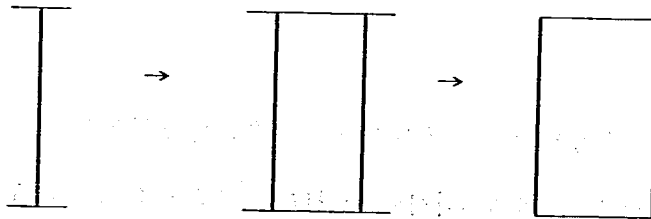
4. 防錆を考慮した橋体構造について

橋梁の塗膜の耐久性あるいは耐さび性は、表面での水分の挙動が大きく影響している。これに塩分などが付着・溶解することによって、さらにその影響が加速されるものと思われる。したがって、橋体表面の結露や滞水の履歴を知ることによって、発錆しやすい構造部位が予知できるし、また、さびにくい構造詳細にも理論的にアプローチできると考えられるが、現在のところ、こういった研究はほとんど行われていないし、実橋の発錆腐食の調査結果を統計的に処理して設計段階にフィードバックするというようなことも系統的にはされていない。したがって、ここでは経験的に次の事項を念頭にして「さびにくい構造」を考えてみた。

- ① なるべく滞水しない、水はけのよい構造
- ② 塗装しやすく、塗膜厚を充分確保しやすい構造

なお、塗装以外の耐候性鋼材の無塗装仕様や溶融亜鉛めっきの場合も、概ね同様と考えてよい。

- 1) 全般的にシンプルで凹凸の少ない構造という意味で、なるべくI桁よりも箱桁で、さらにフランジ縁が出ないものがよい。



- 2) 現場接合部は、高力ボルト継手よりも溶接継手とする。

現在、高力ボルト部が速く発錆することが多い。溶接の場合は、技術的に多々問題はあるが、外観上シンプルで表面積が少なく水はけもよい。ただし、溶接ビードはできるだけ滑らかな形状が望ましい。

- 3) 支承部

橋台または橋脚上は、概ね湿潤で橋体を支える支承は最も腐食しやすい環境におかれ、トラブルの対象となりやすい。これは橋台自身の構造も問題であるが、支承が複雑化していることにも原因がある。したがって、現在のメタル支承を思い切ってゴム支承などに替えた方がよいのではという意見もあり研究がなされている。

- 4) 伸縮装置

伸縮装置自身よりも、これからの漏水により橋体や支承などを腐食されることが多い。

非排水型が最近多く採用されるようになったが、腐食ではなく、路面としての機能の問題も含めて未だ研究の余地がある。

5) 端補剛材下端の構造

桁に反りがつけられており、水はフランジ上面を中央部から端部に流れ支点付近で滞水するので、図-4. 1に示すような水抜きをつける。ただし、支点上で支圧面積が不足する可能性がある。

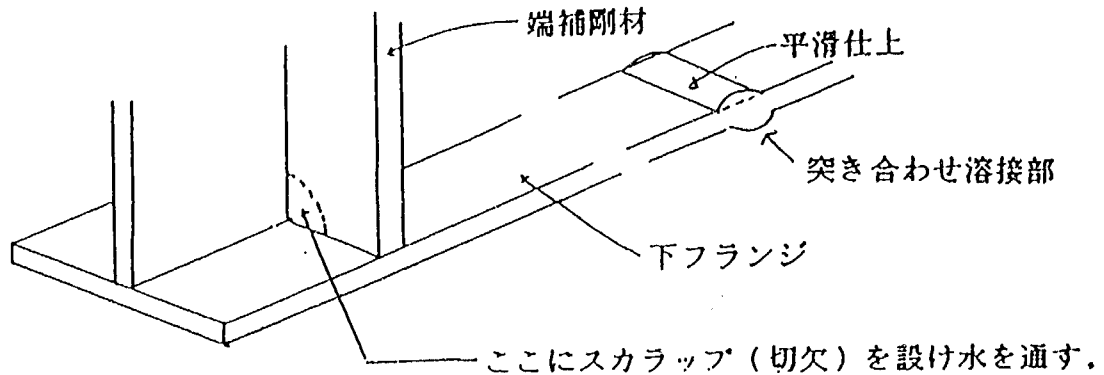


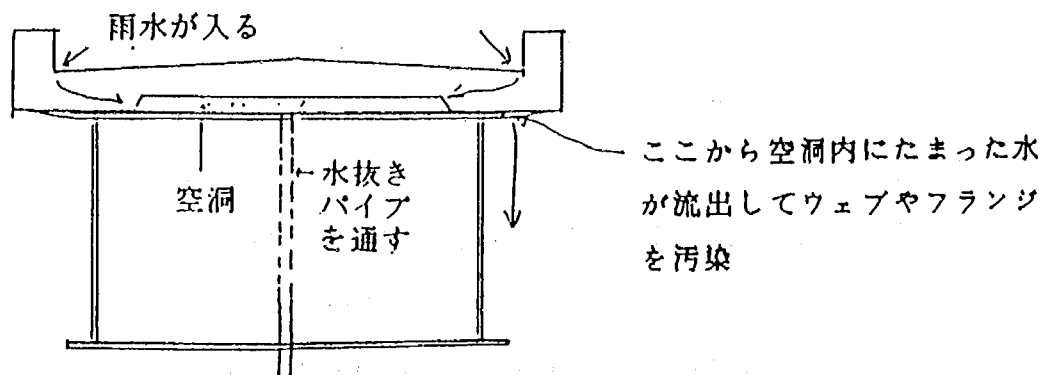
図-4. 1 端補剛材下端の構造

6) 下フランジ突合わせ溶接部の余盛削成仕上

前頁図参照

7) RC床版と排水

全般的に床版からの漏水により橋体をセメント汁で汚染して塗膜劣化を起こしている例が見られる。床版施工時のクラックや形枠撤去忘れなどによるものもあるが、排水設計にも問題があることもある。一例を図-4. 2に示す。



床版の防水を完全に行なうと共に空洞内の水抜きパイプを設ける。

図-4. 2 RC床版の防水

8) 角のR仕上を行う。

5. まとめ

調査結果のまとめとして、特に重要と考えられる事項について結果を要約すると以下のようである。

5.1 新設時の塗装技術について

- (1) 現在広く行われているプレコート鋼版を溶断、溶接して橋梁部材を製作する方法は、切断と溶接に対して高度な品質が要求される場合にはデメリットの方が大きく、黒皮鋼またはブラストしたままで加工する方式を採用した方が有利な場合があり、ブラスト面の発錆を極力抑制できるよう、ブラストや加工を行う期間を短縮するなど、発錆防止を考えた施工法を検討する必要がある。
- (2) 長期防錆形塗装系を適用した高力ボルト接合部は、すべり摩擦係数の確保と防錆上の配慮から、厚膜形無機ジンクリッチペイント55～110 μ mが管理限界とされているが、それが妥当であるか否かの検討とともに塗装の自動化、ロボット化の検討が必要である。
- (3) 新設時に適用する塗装系は、長期防錆型塗装系の採用により、メンテナンスフリーに一步近づいているが、さらに塗替え経費の軽減を含む維持管理の合理化を考えれば、より耐久性が大きく、かつ、塗装回数の少ない塗装システムの開発が望まれる。特に、部材の縁端部や高力ボルトの頭とナット部分の塗装が問題であり、縁端部に対する2～3mmのR仕上げの実施およびR加工の出来ないボルト、ナット部の塗装に適した塗装材料の開発が望まれる。
- (4) 長期防錆型塗装系をはじめ今後に適用が予想される高性能塗装系は、塗装時の温度、湿度の管理等、作業環境に著しい厳しさが要求されるため、空調設備の整った塗装室を準備するとともに、ブラスト処理の自動化に適した塗装工場のレイアウトを考える必要がある。また、工場内での部材の移動に際して生じる塗膜損傷の防止や移動費用の節減を図るため、リフト装置付き専用台車設備の導入に適した工場のレイアウトを考える必要がある。

5.2 点検および塗替え技術について

- (1) 塗装に関する知識や経験が十分でない橋梁管理者でも、迷いなく、見落としなく、偏りのないデータが容易に得られるような点検要領を作成する必要がある。点検項目ごとに塗膜の劣化モードに合った劣化度標準写真の作成が当面の課題である。また、将来的な課題として、遠隔操作によるセンサー技術を応用した塗膜劣化状態の自動記録と、内蔵されているデータ処理システムによる診断からなる点検の自動化についての検討を

げることができる。

- (2) 塗替えのための足場架設を合理化するため、軽量で架設が容易で経費の節減も図れるケーブル足場やルール足場について実験的に検討し、安全性や機能性が確認され次第積極的に導入を図る必要がある。この場合、移動検査車をキーステーションとして上記の簡易足場と有機的に結びつけることを検討すべきである。
- (3) 塗替え塗膜の耐久性を向上させるには、塗替え塗装システムの改善とともに素地調整程度の向上が必要であって、ケレンダストの発生や騒音の低減等、公害対策の面からもバキュームブラスト法が有効と考えられるが、軽量化と効率化に問題が残されており改善の努力が必要である。また、海洋環境では、被塗面の付着塩分の除去が塗膜の耐久性向上に極めて効果があるので、高圧水洗法のように効率的な塩分除去法を確立し、標準化する必要がある。
- (4) 塗替えは、はけ塗りにより行われることが多いが、効率が悪いと吹付け塗りの採用が望まれる。しかし、そのためには塗料飛散の少ないスプレー装置の開発や塗料飛散防止用ネットの改良・開発が必要である。また、今後盛んになると予想される部分塗り替えに備えて、小面積の厚塗りに適した塗装工具の開発も併せて必要である。
- (5) 低温時塗装、結露面やさび残存面への塗装等、悪条件のもとでも十分に防錆性を発揮できる塗り替え専用塗料の開発が必要である。また、局部的に腐食が進行した箇所の塗り替え用として、パテや接着剤、テープ等の他分野の技術を応用した材料および利用技術の開発も必要である。

5.3 塗装材料について

塗替え費用に占める足場費が大きいことから、塗替えの困難な大規模橋梁では、塗替え周期を延長することの経済的効果は極めて大きい。したがって、ガラスフレーク塗料や超厚膜型の無溶剤型塗料など、環境遮断効果の優れた塗料や、常温硬化型ふっ素樹脂塗料やシリコン樹脂塗料など耐候性の極めて優れた塗料を上塗りに用いる塗装システムに関する研究が必要である。

そのためには、例えばガラスフレーク塗料については、ガラスフレークの粒径と含有率および展色剤の種類と塗膜性能の関係を明らかにして規格化を図る必要があり、他の塗料についても同様である。しかし、塗膜の厚膜化は環境遮断性能を向上させる反面、塗膜の物性や機械的性質の低下などをもたらす恐れがあるので、そのような問題のない薄膜でも高性能を有する新しい塗装材料についても研究する必要がある。

5.4 塗料の品質試験法と塗膜寿命予測技術について

- (1) 今後、塗装に対する要求は益々多岐にわたり、かつ高度化することが予想されるので、より信頼性の高い塗料の品質試験方法を開発する必要がある。
- (2) 大規模橋梁を腐食から守り、長期間経済的に維持管理していくためには、新しく開発された塗料や塗装システムの耐久性を促進的に短期間で評価し実用化を早める必要がある。そのためには、極めて耐久性の大きい塗膜でも短期間に性能を評価できるように、塗装膜の劣化機構の解明と寿命予測技術の開発が必要である。

5.5 塗装以外の防錆技術について

- (1) 塗装以外の防錆技術で何等かの形で大規模橋梁にも適用されるものは、溶融亜鉛めっき、アルミニウム材やステンレス鋼材の利用などであるが、何れも着色の必要から塗装する場合に塗膜の密着性が悪いことが欠点であり、密着性向上に役立つ表面処理方法の標準化と塗装システムの標準化が今後の課題である。
- (2) ケーブル類の防錆には、塗装以外に種々の方法が採用されているが、一長一短あり、防錆性、耐久性、経済性の各面において問題の無い方法はまだ見出されていないが、その中でポリエチレンを被覆する方法は、長期にわたる防錆性と耐久性が予測されることから最も有望視されているが、①使用するポリエチレンの品質と耐久性試験方法、②目的に合った注入材の開発（特に可能性）、③クラックの補修方法の確立、④現場施工を無くすための技術開発等が今後の課題である。

5.6 防錆を考慮した橋体構造について

大規模橋梁の防錆が今後も主として塗装により行われることを前提として考えれば、塗膜の耐久性向上を図るうえで極めて重要な橋体構造について留意すべきである。すなわち、塗膜の耐久性に大きな影響を与える水分、塩分の滞留、付着をできるだけ少なくするよう、水はけの良い構造とし、必要に応じて適宜水抜きパイプを設ける。また、塗装しやすい構造とし、塗膜厚を均一化できるよう鋭角部を少なくするため、高力ボルト継ぎ手を極力少なくして溶接継ぎ手に変えるとともに、鋼材端部のR加工を徹底することが大切である。さらに、塗膜の点検・塗り替えをより経済的に行えるよう、検査車、グレーチング、吊り金具等の整備と改良を考える必要がある。

あ と が き

大規模橋梁の防錆に関する技術的課題について要点をとりまとめたが、今後、本報告書がこれらの技術的課題の解決に少しでも役立てば幸いである。

なお、大規模橋梁の防錆技術に関するフィージビリティスタディを行うに当たっては、(財)土木研究センター内に研究委員会を設置した。調査研究を実施した委員会の構成メンバーは下記の通りである。御多忙中にもかかわらず御協力を賜った各委員に深甚なる謝意を表する次第である。

(50音順 敬称略)

笠谷 典弘	(株)宮地鉄鋼所
栗山 寛	関西ペイント(株)
田中柳之助	(財)土木研究センター
野村 繚一	大日本塗料(株)
福島 稔	日本ペイント(株)
牟田 正行	日本ペイント(株)
森 芳徳	(財)土木研究センター

大規模橋梁の防錆技術に関するフィージ
ビリティスタディ報告書

I S S N 0386 - 5878
土木研究所資料第 2810 号
平成元年 3 月 (1989)
片脇 清, 守屋 進

要 旨

大規模橋梁の防錆技術である、塗装、めっき、ケーブルの防錆等の
現状と今後の課題点について整理した。

キーワード：橋梁、防錆、塗装、フィージビリティスタディ

郵便はがき

3 0 5 - □ □

41円切手
をはって
下さい。

茨城県つくば市旭一番地

建設省土木研究所
地質化学部化学研究室 御中

No. 58

No. 58

配布先氏名

配布先住所

土木研究所資料第 2810 号「大規模
橋梁の防錆技術に関するフイー
ビリティスタディ報告書』 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住 所)

氏 名

