

新設鋼道路橋に適用する重防食塗装系に関する研究

藤原博¹・田原芳雄²

¹正会員 日本道路公団 試験研究所 保全技術研究室 (〒194 東京都町田市忠生1丁目4番1)

²財団法人日本塗料検査協会 東支部 (〒251 神奈川県藤沢市宮前428)

本研究は、1988年から腐食環境の異なる4暴露場において行っている、塗装試験板約2000枚による屋外暴露試験6年目の結果から、主に重防食塗装系の新設仕様の比較検討を行った。その結果、4暴露場の腐食環境は飛来塩分量、気温・湿度によって大きく異なり、それに伴って鋼材の腐食量や腐食状態も異なることが判明した。また、塗装試験板は飛来塩分量や気温・湿度などの影響を強く受けるとともに、素地調整程度、塗料の種類、塗装仕様及び塗装方法などによって塗膜の防食性が大きく異なることが明らかになった。なお、ジンクリッチペイントを下塗りに用いた重防食塗装系が、防食性に優れていることを明らかにした。

Key Words : steel bridge, painting, actual exposure test, zinc rich paint, quality, specification specification, atmospheric corrosion, heavy duty anti-corrosive paints, sea salt particle.

1. ま え が き

塗装は鋼道路橋の防食法として広く一般的に用いられている。しかし、鋼道路橋の架設環境によって防食性が異なるために、環境に応じた塗装系¹⁾が用いられている。従来、田園・山間地域など比較的ソフトな環境では一般外面用塗装系にA塗装系(鉛系油性さび止めペイント/フタル酸樹脂塗料)が用いられ、都市・工業地帯などのやや厳しい環境ではB塗装系(鉛系油性さび止めペイント/フェノールMIO/塩化ゴム系塗料)、そして海岸地帯など飛来塩分量が多く、塗り替えが容易でない厳しい防食環境ではC塗装系(無機ジンクリッチプライマー/塩化ゴム系塗料)が用いられている。

これらの塗装系のうち、A塗装系が鋼橋全体の約63%を占めている²⁾が、松田らが行った全国533橋(63539箇所)の塗膜調査の結果³⁾では、A塗装系の平均塗り替え周期は約10年程度であることを報告している。このため、防食性を保持するためには塗り替えを繰り返す行なうことが必要となっている。

塗装の塗り替え工事は、足場工の設置や素地調整及び塗装作業などに多くの人手を要する労働集約的作業となっているため、労務費の高騰とともに維持管理費用は増加の一途をたどっている。さらには、交通車両の増加や環境問題などから、現場における

塗り替え作業では、工事時間や工事方法について制約を受けるなど、多くの課題が残されている。

一方、鋼橋用塗料の開発は日進月歩であり、特にジンクリッチペイントを下塗りに用いた重防食塗装系では、従来用いられているフタル酸樹脂系あるいは塩化ゴム系などの塗装系に比べて長期的な防食性を維持することが可能となってきた。また、これらの長期防食性に対応し得る長期耐候性上塗り塗料としてポリウレタン樹脂塗料、シリコン変性アクリル樹脂塗料及びふっ素樹脂塗料などの開発も進んできている。

1974年に「本州四国連絡橋鋼上部構造に関する調査研究報告書」⁴⁾に基づいて試験塗装を行った新両国橋(新設)の15年目の調査結果⁵⁾では、A及びB塗装系が7年経過時点で塗り替え塗装を行ったのに対して、ジンクリッチペイントを下塗りに用いた重防食塗装系では、塗膜欠陥は部分的であり全体的には良好な塗膜性能が確認されている。また、1985年に完成した泊大橋の10~12年目の調査結果⁶⁾でも、新両国橋と同様に、ジンクリッチペイントを下塗りに用いた重防食塗装系の長期防食性能が確認されている。

さらには、1989年に変性エポキシ樹脂塗料(下塗り)を主体として行われた西湘バイパス前川橋の塗り替え塗装3年目の調査結果⁷⁾でも、下塗りにジン

クリッチペイントを用いた重防食塗装系では、部分的な劣化は見られるものの全体的には良好な防食性能を示していた。

同様に、JR行合川橋梁⁹⁾や吾妻川橋梁⁹⁾など鉄道橋でも、道路橋と同じA塗装系では10年目で塗り替えを行っているが、ジंकリッチペイントを用いた重防食塗装系では15年以上の耐久性を示していた。

このように、鉛系油性さび止めペイント/フタル酸樹脂塗料の塗装仕様に比べて、ジंकリッチペイントあるいはエポキシ樹脂塗料を下塗りに用いた重防食塗装仕様の防食性が良いことが報告されている。しかし、これら重防食塗装系の調査結果は、いずれも限られた環境下における試験塗装橋梁の実績であるため、橋梁管理者の視野からは、塗装回数(塗膜厚)や塗装作業性など塗装コストに直接関わる問題点が残されており、塗膜寿命を考慮に入れた塗装仕様の決定や、従来の塗装系との架設(腐食)環境別の使用区分を明確にする必要性などが求められている。

また、従来は田園・山間地域、都市・工業地帯、海岸地帯によって環境区分をしているが、地域的な区分ではなく、大気環境の腐食因子である海塩粒子量、SO₂量、塗膜表面の濡れ時間さらには紫外線量などによって区分することも考えられる。

我々は、このような問題点を解決し腐食環境に適した重防食塗装仕様を開発するために、昭和63年度(1988)から腐食環境の異なる4暴露場において屋外暴露試験を実施し検討を進めてきた。本論文では、暴露開始後6年目の試験データを基に、重防食塗装系の新設鋼道路橋への適用性について述べる。

2. 屋外暴露試験の概要

(1) 暴露試験の概要

暴露場の設置場所(暴露場)は、日本道路公団(以下「JH」という)が管理する全国の鋼橋塗膜の劣化状態を勘案して、腐食環境の異なる東京、北陸及び沖縄内陸の3箇所を選定した。また、暴露試験と同時に行った促進腐食試験結果との相関性を検討するために、沖縄海岸部でも暴露試験を行った。各暴露場の環境は次のとおりである。

a) 東京(温暖・田園地域)

気候が温暖で、穏やかな腐食環境の代表地区として、JH試験研究所屋上(東京都町田市忠生1-4-1, 東経139°25'36", 北緯35°34'14")を選定した。

b) 北陸(海岸・積雪地域)

北陸から新潟、秋田にかけての海岸地帯は、日本海からの強い潮風が吹きつけ多量の高塩粒子が付着し、さらに冬期には積雪があり、道路に岩塩等融雪剤の散布が行われるため鋼構造物の腐食が著しく進行する。このような代表地区として、北陸自動車道親不知高架橋下(新潟県西頸城郡青海町, 東経137°43'54", 北緯36°98'91", 海岸からの距離は約50m)を選定した。

c) 沖縄内陸(亜熱帯地域・海塩粒子飛来地域)

沖縄は熱帯地域で高温多湿なうえ、周囲が海に囲まれており、海塩粒子の飛来は全島に及んでいる。このため鋼構造物の腐食が著しく、腐食環境の厳しい地区の代表として沖縄自動車道許田料金所構内(沖縄県名護市許田, 海岸からの距離約600m, 東経127°84'93", 北緯26°31'80")を選定した。

d) 沖縄海岸(亜熱帯地域・海塩粒子飛来地域)

沖縄自動車道許田高架橋下(沖縄県名護市手水, 東経127°86'64", 北緯26°32'27")の暴露場は、海岸からの距離が約10mと近いために飛来塩分量の付着が多く、かつ湿度が高いことから前項c)の沖縄内陸に比べて鋼構造物の腐食は著しく進行する。

(2) 暴露試験板の形状及び寸法

暴露試験板は平板(300×150×6mm)(図-1参照)を用いた。また、それぞれの腐食環境における腐食速度を測定するため、無塗装鋼板(150×70×6mm)(図-2参照)も暴露した。

(3) 暴露試験板の材質及び処理

暴露試験板は、一般構造用圧延鋼材(JIS G 3101, SS 400)に、表面粗さ約60μmのショットブラスト処理(Sa-2.1/2)を施した後、表-1に示す塗装仕様で塗装を行った。

(4) 暴露台

暴露台は、幅200cm×長さ132cmの鋼製で地面からの設置高さを75cmとした。なお試験板は水平暴露方式とした。暴露台の設置状況を図-3に示す。

(5) 使用塗料

試験に用いた塗料品種、規格及び本論文で使用した略称を表-2に示す。なお、これらの塗料は塗料メーカーの中からJHの鋼橋に使用実績の多い5社を選び、それぞれの塗料を試験目的に応じて単独あるいは組み合わせで使用した。

(6) 試験板の塗装系及び仕様

試験に用いた塗装系は、重防食塗装系を中心に59塗装系について合計 246枚の試験板を作成・暴露したが、本論文では以下に示す重防食系19仕様と、これらと比較するフタル酸系2仕様及び塩化ゴム系1仕様の24仕様のみを対象とした。

- ①重防食系仕様（19塗装系：21枚×3暴露場）
 - ②フタル酸系仕様（2塗装系：2枚×3暴露場）
 - ③塩化ゴム系仕様（1塗装系：1枚×3暴露場）
- 検討に用いた24仕様を表-1に示す。

なお塗膜には、すべて同一時期に鉄素地に達するカット傷を入れた。これは鋼橋の架設時における塗膜損傷を想定したことと、塗膜劣化を促進させるためである。なお、各試験板は下塗り塗装後に各暴露場で6カ月間屋外暴露を行い、中塗り塗装前に水洗いを行った試験板と、水洗いを行わなかった試験板とを作成し、1988年12月より暴露を開始した。

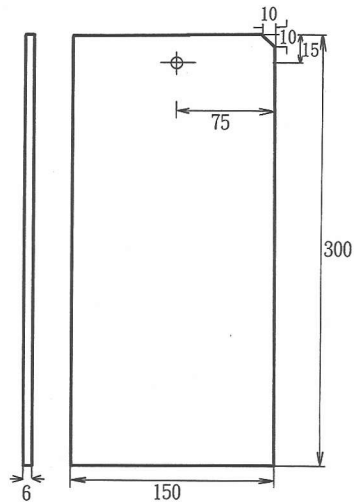


図-1 平板試験板

(7) 暴露試験板の調査及び評価方法

本試験は、重防食塗装系の長期防食性の評価を目的とした暴露試験であり、比較用として用いたフタル酸樹脂塗装系以外はいずれも10年以上の防食性を想定している。したがって、重防食塗装系の評価を行うためには10年以上の年月を必要とし、日々進歩する塗料の開発に対応することが難しくなる。

そこで、次の2点に着目し、国内外の文献でも報告例^{10)・11)}のある塗膜のカット部からのさび、ふくれ幅で防食性を評価することにした。

暴露試験板は、一般部のさび、ふくれ、われ、はがれの発生状態を調査するほか、塗膜カット部からのさび、ふくれの進入幅をノギスで測定した。またビード板は、溶接ビード部及びみぞ形鋼溶接部についても目視調査を行った。なお、評価はJIS規格に用いられている、財団法人日本塗料検査協会の「塗膜の評価基準」¹²⁾（以下「評価基準」という）によって行った。評価方法は次のとおりである。

a) 一般部の評価

- ①さび、ふくれ、われ、はがれの評価点は、評価基準の点数をそのまま用いて評価し、劣化が無い場合を10点満点で表した。
- ②塗膜の層間のはがれは、われと同様に、素地からののはがれは、さびと同様に評価基準の点数をそのまま用いて10満点で評価した。
- ③複数の劣化現象が混在する場合には、一番大きな劣化現象を基準にして、その他の劣化現象の（-：マイナス）点の1/2を基準点から引き算する（例：さび6点・ふくれ8点の場合は、 $6 - (10 - 8) / 2 = 5$ 点とする）。

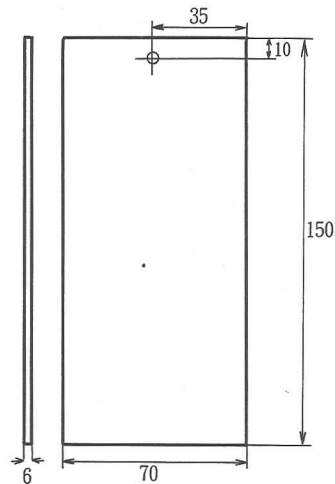


図-2 腐食速度測定用無塗装鋼板

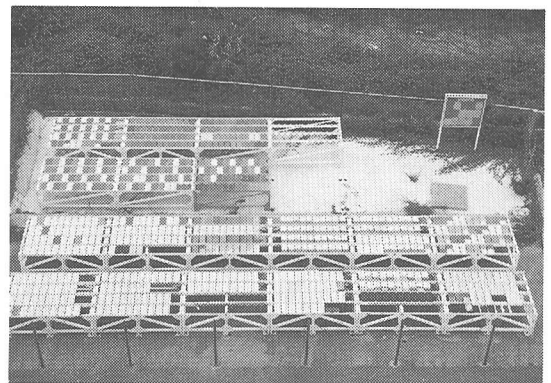


図-3 暴露台の設置状況（沖縄内陸）

表-1 新設重防食塗装仕様

TP No	塗 装 系	合計膜厚(μ)	備 考 注4)
1	鉛系さび止め×2+アルキド(中・上塗)	125	参考文献 1) の外面用塗装系A①(比較用)
2	鉛系さび止め×2+シリコンアルキド(中・上塗)	125	同じく外面用塗装系A③(比較用)
3	鉛系さび止め×2+フェノールMIO+塩ゴム(中・上塗)	180	同じく外面用塗装系B①(比較用)
4	無機ジンク+エポキシ下塗×2+ウレタン(中・上塗)	255	同じく外面用塗装系C①
5	無機ジンク+エポキシ下塗×2+エポキシMIO+ウレタン(中・上塗)	305	同じく外面用塗装系C②
6	無機ジンク(7肋リリカト)+エポキシ下塗×2+ウレタン(中・上塗)	255	
7	有機ジンク+エポキシ下塗×2+ウレタン(中・上塗)	255	
8	有機ジンク+エポキシ下塗×2+エポキシMIO+ウレタン(中・上塗)	305	
9	無機ジンク+エポキシ下塗×2+ふっ素(中・上塗)	255	
10	無機ジンク+エポキシ下塗×2+シリコンアクリル(中・上塗)	255	
11	無機ジンク(30)+エポキシガラスフレーク+ウレタン(中・上塗)	390	
12	無機ジンク(30)+ポリエステルガラスフレーク+ウレタン(中・上塗)	390	
13	無機ジンク(30)+ビニルエステルガラスフレーク+ウレタン(中・上塗)	390	
14	有機ジンク(30)+エポキシガラスフレーク+ウレタン(中・上塗)	390	
15	有機ジンク(30)+ポリエステルガラスフレーク+ウレタン(中・上塗)	390	
16	有機ジンク(30)+ビニルエステルガラスフレーク+ウレタン(中・上塗)	390	
17	無機ジンク(30)+エポキシガラスフレーク×2+ふっ素(中・上塗)	690	
18	無機ジンク(30)+ポリエステルガラスフレーク×2+ふっ素(中・上塗)	690	
19	無機ジンク(30)+ビニルエステルガラスフレーク×2+ふっ素(中・上塗)	690	
20	有機ジンク(30)+エポキシガラスフレーク×2+ふっ素(中・上塗)	690	
21	有機ジンク(30)+ポリエステルガラスフレーク×2+ふっ素(中・上塗)	690	
22	有機ジンク(30)+ビニルエステルガラスフレーク×2+ふっ素(中・上塗)	690	
23	無機ジンク+エポキシ下塗×2+ウレタン(中・上塗)	255	工場塗装
24	無機ジンク+エポキシ下塗×2+エポキシMIO+ウレタン(中・上塗)	305	工場塗装

注 1) ショッププライマーの品種は、No.1, No.2 及びNo.3 はエッチングプライマー、その他はジンクリッチプライマーである。

注 2) ショッププライマーを塗装した鋼板を1カ月間暴露した後の2次素地調整程度は、No.1, No.2 及びNo.3 はSt-3、その他はSa-2・1/2である。

注 3) 「×2」は2層塗りを、その他は1層塗りを意味する。塗料名の後の()内の数字は、表-2の膜厚に関わらず、()内の数字を膜厚とした。

注 4) No.23及びNo.24の工場塗装仕様の試験板は1日1工程で塗装した。それ以外の試験板は現場塗装を想定し、各下塗り塗料またはMIO塗料までを塗装し、各暴露場で6ヶ月間暴露した後に中・上塗り塗料を塗装した。

④流れさびは評価の対象としない。

b) 塗膜カット部の評価

塗膜カット部の評価は、カット線からの進入幅により評価基準に示す「総合評価点数換算表」¹²⁾を用いて10点満点で評価した。ただし、本試験では、「総合評価点数換算表」に示すカット部のみで評価した。カット部劣化の点数換算表を表-3に示す。

なお、上塗塗料の耐候性の評価は、それぞれのJIS規格による白亜化度、60度鏡面光沢度及び色差によって行った。

(8) 飛来塩分量の測定

各暴露地の腐食環境を調べるために、1988年12月(沖縄海岸では1989年9月)から1991年2月にかけて東京、北陸、沖縄内陸及び沖縄海岸の各暴露場において飛来塩分量の測定を行った。測定は、JIS Z 2381「屋外暴露試験方法通則」に従って行い、3ヶ月毎に暴露したガーゼを回収し飛来塩分量の測定を行った。

表-2 試験に使用した塗料の品種、規格及び略称

区分	略称	品 種	膜 厚 (μm)	該 当 規 格
研 磨	サウダレン プラスト	サウダレン処理 (垂鉛めっき面はZEPT-3) サウダレン処理 (垂鉛めっきの場合はZFSD-2に相当)	- -	SIS(St), ZEPT SIS(Sa), ZFSD-2
エッチング プライマー	エッチングプライマー エッチングプライマー	エッチングプライマー 2種 (比較用) 無機ジंकリッチプライマー	15 15	JIS K 5633 2種 NDK (2)(b)
下塗塗料	鉛系さび止め 無機ジंक (アルカリ) 無機ジंक 有機ジंक エポキシ下塗	シアナミド鉛さび止めペイント 1種 (比較用) 厚膜形無機ジंकリッチペイント (アルカリシリケート) 厚膜形無機ジंकリッチペイント (エチルシリケート) 厚膜形有機ジंकリッチペイント エポキシ樹脂塗料下塗	35 75 75 75 60	JIS K 5625 1種 HBS K 5603 HBS K 5605 NDK (2)(c)
中塗塗料	フェノールMIO エポキシMIO エポキシ ガラスフレーク ポリエステル ガラスフレーク ビニルエステル ガラスフレーク アルキド中塗 ウレタン中塗 ふっ素中塗 シリコンアルキド 中塗 シリコンアクリル 中塗	フェノールM, I, O塗料 エポキシM, I, O塗料 ガラスフレーク塗料 (エポキシ) ガラスフレーク塗料 (ポリエステル) ガラスフレーク塗料 (ビニルエステル) フタル酸系 (合成樹脂調合ペイント 2種中塗) (比較用) ポリウレタン樹脂塗料用中塗 ふっ素樹脂塗料用中塗 シリコン変性アルキド樹脂塗料用中塗 (比較用) シリコン変性アクリル樹脂塗料用中塗	45 50 300 300 300 30 30 30 25 30	NDK (2)(d) HBS K 5615 JIS K 5516 2種 HBS K 5608
上塗塗料	アルキド ウレタン ふっ素 シリコンアルキド シリコンアクリル	フタル酸系 (合成樹脂調合ペイント上塗) (比較用) ポリウレタン樹脂塗料上塗 ふっ素樹脂塗料上塗 シリコン変性アルキド樹脂塗料上塗 (比較用) シリコン変性アクリル樹脂塗料上塗	25 30 30 25 30	JIS K 5516 2種 HBS K 5608

(注) SIS(Sa) : SVENSK STANDARD (スウェーデン), NDK : 旧 J H 塗料規格, HBS : 本州四国連絡橋公団塗料規格

表-3 カット部劣化の点数換算表 ((財)日本塗料検査協会)¹²⁾

劣化幅 (mm)	0~0.3	0.4~0.8	0.9~2.2	2.3~3.2	3.3~5.6
評価点	10	9	8	7	6
劣化幅 (mm)	5.7~7.5	7.6~9.5	9.6~14.0	14.1~18.0	18.1~30.0
評価点	5	4	3	2	1

(9) 腐食速度の測定と生成さびの分析

鋼材が腐食してさびが進行する速度は環境によって異なることから、1990年3月から1993年6月までの毎年、東京、北陸、沖縄内陸及び沖縄海岸の4暴露場において無塗装鋼板による腐食速度を測定した。

なお、無塗装鋼板は3ヶ月毎に回収し、塩酸とプロパルギルアルコールを用いてさびを溶解し、暴露前の試験板重量と溶解後の試験板重量から腐食速度 ($\text{mg}/\text{d m}^2/\text{日}$) を求めた。

3. 試験結果と考察

(1) 飛来塩分量の測定結果

各暴露地の腐食環境を調べるために行った、飛来塩分量の測定結果は図-4に示すとおりであった。なお参考に、各暴露場の平均気温と平均湿度を図-5に示す。また、次で求める無塗装鋼板の腐食速度との相関性を調べるため、1年を4期(春, 夏, 秋, 冬)に分けてまとめたものを表-4に示す。

①図-4及び表-4によると、飛来塩分量は年間を通じて北陸がもっとも多く、北陸>沖縄海岸>沖縄内陸>東京の順であった。

- ②東京の飛来塩分量は極めて少なく、年間を通して大きな季節変化は見られなかった。
- ③北陸では秋期の飛来塩分量が著しく多くなっており、日本海側特有の季節風が影響しているものと思われる。また、沖縄内陸及び沖縄海岸では、夏期に飛来塩分量が多くなる傾向が認められた。

(2)腐食速度の測定

腐食速度の測定結果は次のとおりであった。無塗装鋼板の腐食量を図-6に、また、特に傾向が顕著であった北陸及び沖縄海岸における、無塗装鋼板の上面及び下面それぞれの腐食量を図-7に示す。

また、年間の季節毎の腐食速度について、表-4と同時期でまとめたものを表-5に示す。さらに飛来塩量と、気象年鑑より求めた同時期の気温及び湿度と腐食速度との相関性を調べたものを表-6に示す。

①図-6によると、各暴露場における鋼板の腐食量は北陸がもっとも多く、北陸>沖縄海岸>沖縄内陸>東京の順であった。鋼板の腐食量は前項(1)で述べたように、飛来塩分量の多さの順で一致しており、飛来塩分量が大きく影響するものと考えられるが、表-6に示すように沖縄海岸を除いては、ほとんど相関性を認められなかった。

②表-5によると、東京暴露場では年間を通して飛来塩分量が少なく、夏期の腐食速度は冬期の約1.8倍となっている。また、表-6によると腐食速度と気温及び湿度とは高い相関性を示していることから、東京のような穏やかな環境での腐食因子としては、主に温度(気温)と湿度の影響が大きいものと考えられる。ちなみに腐食速度測定期間の東京の平均気温は夏期が26℃、冬期が8℃であった。

③表-5によると、北陸暴露場では飛来塩分量が最も多く、秋期から冬期にかけて腐食量が多くなっている。これは前項(1)、③でも述べたように、秋から冬にかけての日本海からの季節風による飛来塩分量の増加と、降雪・降雨による高湿度下での腐食促進が原因と考えられる。

また図-6によると、北陸における暴露1.5年後(1991年6月)の腐食量(27g/d㎡)は、暴露1.2後(1991年12月)の腐食量(10g/d㎡)の約3倍であった。気象年鑑¹⁵⁾によると、腐食速度の測定を行った1990年は全国的に空梅雨で、7~8月は5年ぶりの高気温を記録した。しかし9月から11月にかけては記録的な暖秋・多雨を記録している。また翌年1991年の梅雨期に、北陸では平年の2倍近い降雨量を記録するとともに、秋には台風19号が襲来している。このように、1990年か

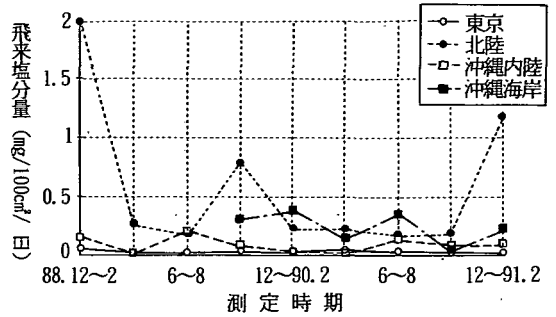


図-4 各暴露場の飛来塩分量

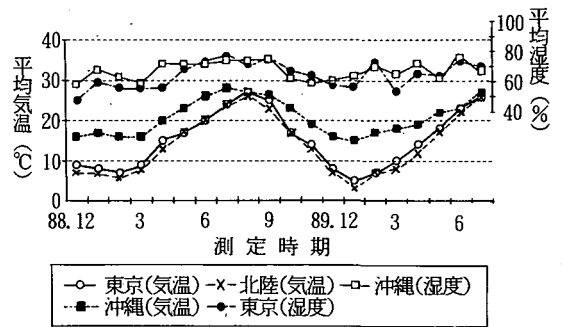


図-5 各暴露場の平均気温・平均湿度

表-4 季節毎の飛来塩分量(1990.3~1991.2)

暴露場	飛来塩分量 (mg/100cm ² /日)			
	春 期	夏 期	秋 期	冬 期
東 京	0.031	0.025	0.018	0.018
北 陸	0.218	0.174	0.184	1.172
沖縄内陸	0.010	0.125	0.074	0.090
沖縄海岸	0.138	0.342	0.038	0.216

春期(3~5月), 夏期(6~8月), 秋期(9~11月), 冬期(12~2月)

ら1991年にかけての北陸は、腐食環境としては平年に比べて非常に厳しいものとなったことから、図-6に示すように腐食量が急激に増加したものと考えられる。なお表-6によると、北陸では腐食速度と各因子との相関性は見られなかった。

④表-5によると、沖縄内陸暴露場では秋期の腐食量が多く、その他の季節は秋期に比べて少なく、かつ季節変動は見られなかった。沖縄では、飛来塩

分量が多く高気温の夏期から秋期にかけて腐食が促進され、他の季節よりは腐食量が多くなる傾向にある。気象年鑑によると1980年8～10月は全国的に高気温・多雨を記録している。このことが平年に比べて秋期の腐食量が著しく増加した原因になったものと考えられる。

表-6によると、沖縄内陸では腐食速度と各因子との相関性は見られなかった。

⑤表-5によると、沖縄海岸暴露場では沖縄内陸と同様に秋期に腐食量が多く、他の季節では変動が見られなかった。沖縄内陸に比べて飛来塩分量が多いのにも関わらず、冬期以外は腐食速度が小さくなっている。これは、沖縄海岸の暴露台は高架橋下に設置してあるために直射日光の照射時間が比較的短く、日中における鋼板の表面温度がほぼ外気温と同程度に抑制されたために、沖縄内陸に比べて腐食が促進されなかったものと考えられる。ちなみに、直射日光に曝された鋼板の表面温度は、外気温が30℃の時で57℃（1990年7月20日、12時に測定）であった。なお表-6によると、沖縄海岸では腐食速度と飛来塩分量との間に高い相関性が認められた。

⑥図-7によると、北陸及び沖縄海岸では鋼板の上面よりも下面の方が腐食量が多くなっていた。また腐食の状態を見ると、鋼板下面には著しい孔食が生じていた。これは実橋で下フランジ下面の方が上面よりもさびが発生しやすい³⁾ことと一致している。

この理由として尾間ら¹³⁾は、下面への大気汚染物質の付着持続性が上面に比べて大きいために結露、降雨などによる鋼板面の濡れ時間が長くなり、腐食反応が促進されるとしている。

⑦また、飛来塩分量と風向及び風速との相関関係を調べたが、東京では風速と相関係数0.94、北陸では風速と0.95と高い相関性を示していたものの、特定の風向による飛来塩分量との関係は認められなかった。

(3) 屋外暴露試験結果

a) 新設塗装仕様の防食性評価

屋外暴露試験6年目における新設塗装仕様の暴露試験結果を表-7に示す。

i) フタル酸系、塩化ゴム系及び重防食塗装系の防食性の比較

図-8～図-10に、各暴露場における塗装系別の経年変化を示す。図-8によると、フタル酸系(No.1)の防食性は暴露2年目で急激に低下し、その後の劣化は見掛け上進んでいなかった。これは暴露2年目

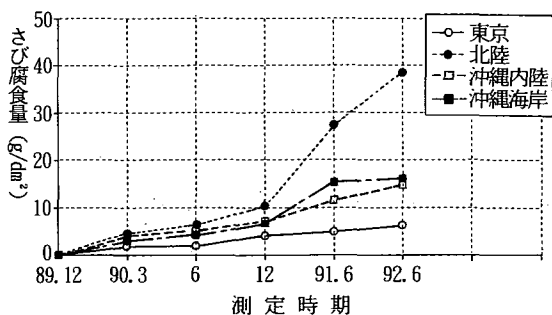


図-6 無塗装鋼板の腐食量

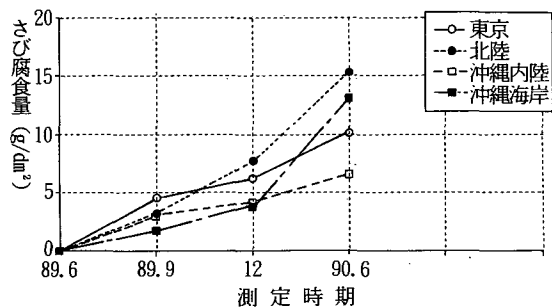


図-7 腐食量(上面, 下面)の比較

表-5 各暴露場での腐食速度(1990.3～1991.2)

暴露場	腐食速度 (mg/dm ² /日)			
	春 期	夏 期	秋 期	冬 期
東 京	1.59	2.28	2.64	1.28
北 陸	3.46	1.51	4.73	3.96
沖縄内陸	2.14	2.18	9.25	2.01
沖縄海岸	1.50	1.46	4.28	2.19

春期(3～5月), 夏期(6～8月), 秋期(9～11月), 冬期(12～2月)

表-6 腐食速度に影響を及ぼす因子との相関係数

暴露場	飛来塩分量	気 温	湿 度
東 京	0.20	0.87	0.95
北 陸	0.26	0.50	0.11
沖縄内陸	0.01	0.34	0.08
沖縄海岸	0.76	0.15	0.19

表-7 新設重防食塗装仕様の暴露試験結果（6年目の防食性：平板）

TP No	合計 膜厚 (μm)	評 価 点 注1), 注2)								平均 評価
		東 京		北 陸		沖 縄 内 陸		平 均		
		洗無	洗有	洗無	洗有	洗無	洗有	洗無	洗有	
1	125	9.0	9.0	4.0	6.0	5.0	5.0	6.0	6.7	6.3
2	125	9.0	9.0	4.8	6.5	8.0	8.0	7.6	7.8	7.6
3	180	9.0	9.5	7.5	8.5	7.0	8.5	7.8	8.8	8.6
4	255	9.5	9.5	9.5	10.0	9.0	9.0	9.3	9.5	9.4
5	305	10.0	10.0	9.0	9.0	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5
6	255	10.0	10.0	9.0	9.0	10.0	10.0	9.7	9.7	9.7
7	255	8.5	8.5	8.5	8.0	9.0	9.0	8.8	8.5	8.6
8	305	8.0	9.0	7.5	8.0	8.0	8.5	7.5	8.5	8.2
9	255	9.0	9.0	9.0	9.0	10.0	10.0	9.3	9.3	9.3
10	255	9.5	9.5	9.0	9.0	9.0	9.0	9.2	9.2	9.2
11	390	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0
12	390	9.0	9.0	9.0	9.0	9.5	9.5	9.2	9.2	9.2
13	390	10.0	10.0	5.5	5.5	9.5	9.5	8.3	8.3	8.3
14	390	8.0	7.5	5.5	5.5	7.0	6.5	6.8	6.5	6.6
15	390	8.0	7.5	6.0	6.5	9.0	8.0	7.7	7.3	7.5
16	390	6.5	6.5	4.5	4.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5
17	690	9.0	9.0	8.5	9.0	9.0	9.0	8.8	9.0	8.9
18	690	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
19	690	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
20	690	7.5	7.5	5.5	5.0	9.0	9.0	7.3	7.2	7.2
21	690	7.0	7.0	5.5	6.5	10.0	10.0	7.5	7.8	7.6
22	690	9.0	8.0	5.0	5.0	6.5	10.0	6.8	7.2	7.0
23	255	9.5		9.5		9.0		9.3		9.3
24	305	9.5		10.0		10.0		9.8		9.8
平均		9.0	9.0	7.8	8.0	8.8	8.9	8.6	8.6	8.6

注1) 「洗有」は下塗り塗装後に各暴露場で6カ月間屋外暴露を行い、中塗り塗装前に水洗いを行って付着塩分量を $50\text{mg}/\text{m}^2$ 以下にしたもの。「洗無」は水洗いなしでウェス拭きで表面を清掃したもので、付着塩分量は $223\text{mg}/\text{m}^2$ であった。

注2) 評価点は一般部とカット部の平均値を示す。

に、中塗り前に下塗り表面を水洗しなかった部分の劣化が著しく進み、このことが影響したものである。また、塩化ゴム系 (No.3) の防食性は経年とともに徐々に低下していたが、フタル酸に比べて程度は大きくはなかった。なお重防食系 (No.4, No.7) は、下塗りが無機ジンクリッチペイント及び有機ジンクリッチペイントに関わらず優れた防食性を示していた。特に無機ジンクリッチペイント (No.4) では、暴露6年目でも防食性の低下はほとんど見られなかった。

①各暴露場に共通してジンクリッチペイントを下塗りに用いた塗装系の防食性の良さが認められた。この理由はジンクリッチペイントの防食機構にあ

ると考えられる。ジンクリッチペイントは、塗料中に高濃度に配合された亜鉛末の電気防食効果によって防食性を発揮する。中でも、無機が有機より優れた防食性を示したのは、エポキシ樹脂をビヒクルにした有機ジンクリッチペイントより無機ジンクリッチペイントの方が、金属亜鉛の鉄素地面への接触性に優れているためであると考えられる。

②各暴露場ともに、フタル酸系の防食性が著しく低下したのは、上塗りに用いたフタル酸樹脂塗料の耐水性が、塩化ゴム系塗料やウレタン系塗料に比べて劣るためと考えられる。特に、北陸でフタル

酸系の防食性が著しく低下したのは、飛来塩分が塗膜表面に付着・吸水し潮解することによって、水分とともに塗膜内に浸透したことが原因と考えられる。

③ 図-10 によると、北陸ほどではないが、沖縄内陸でも他の塗装系に比べてフタル酸系の防食性の低下が認められた。沖縄内陸でフタル酸系の防食性が低下したのは、沖縄が高温多湿な環境条件であるために、前項②と同じ理由で、耐水性に劣る塗膜から水分とともに腐食因子が塗膜内に浸透したためと考えられる。

以上の結果から、フタル酸系は北陸及び沖縄内陸など、飛来塩分量の多い海浜や高温・高湿度の環境には適さず、特に塗膜に傷があれば腐食の進行は著しく速くなることが分かった。このような厳しい環境下では無機ジंकリッチペイントを下塗りに用いた重防食系が望ましいことが、本試験結果は裏付けている。

一方、東京のような一般環境では、長期的な防食性確保のためには重防食系が望ましいが、付着塩分量が少ないのでフタル酸系でもある程度の防食性が期待できると考えられる。

ii) ガラスフレークの種類による防食性の比較

ガラスフレーク塗料は、ビヒクルにエポキシ樹脂、ポリエステル樹脂、ビニルエステル樹脂を用い、これに鱗片状のガラスフレークを多量に混入したものであり、腐食成分の透過阻止性に優れ機械的強度の大きい塗膜を形成する。本試験では、以下の3タイプのガラスフレーク塗料を用いた防食性について調べた。

- ① アミン硬化形エポキシ樹脂 (GF-EP)
- ② ビスフェノールA不飽和ポリエステル樹脂 (GF-PE)
- ③ ビニルエステル樹脂 (GF-VE)

④ 図-11 に、下塗りに無機ジंकリッチペイントと有機ジंकリッチペイントを用い、ポリウレタン樹脂塗料で仕上げた場合の防食性の比較を示した。

図-11 によると、いずれの暴露場でも、下塗りに無機ジंकリッチペイントを用いた試験板は、下塗りに有機ジंकリッチペイントを用いた試験板よりも防食性は高かった。また、カット部からのさびあるいはふくれの発生に対して、有機ジंकリッチペイント (30 μ m) を使用した塗装系では腐食の広がりを抑制することはできないと考えられる。

⑤ 図-12 は、同様にふっ素樹脂塗料を上塗りにした場合の防食性の比較を示した。各暴露場ともに下塗りに無機ジंकリッチペイントを用いた試験板

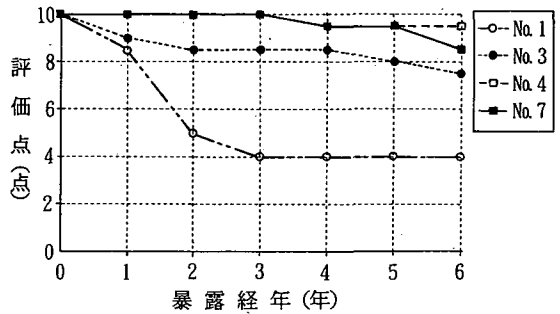


図-8 塗装系別経年劣化 (北陸)

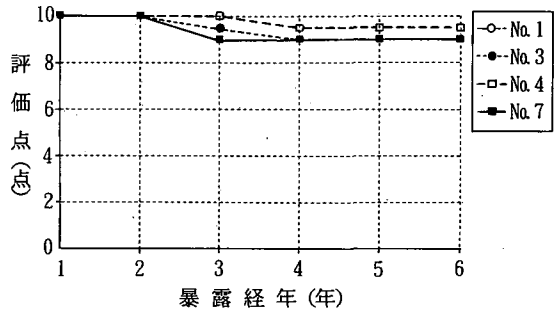


図-9 塗装系別経年劣化 (東京)

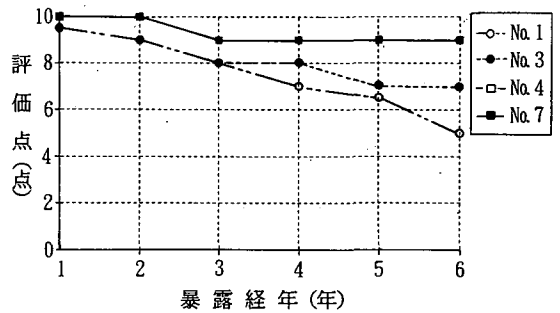


図-10 塗装系別経年劣化 (沖縄内陸)

では防食性の低下は見られなかった。有機ジंकリッチペイントを下塗りにした試験板は、前項①と同様に防食性の低下が見られたが、北陸を除いてポリウレタンで仕上げた場合よりも防食性の低下は少なかった。上塗り塗料の種類に関わらず防食性が低下したのは、前記3. (3), a), i), ①にも述べたように、有機、無機ジंकリッチペイントの防食性能の違いによるものと考えられる。

③以上より、東京を除いての防食性はポリエステルガラスフレークが最も優れていた。なお、ビニルエステルガラスフレークの評価が北陸で低いのは、主にガラスフレーク塗膜と中塗りの間でのカット部及びエッジ部からのはがれによるものであり、東京及び沖縄ではこのような現象は生じなかった。本試験で使用した塗料は、塗料メーカー5社の製品であり、塗装系によっては数社の塗料が塗り重ねられている。したがって、他のメーカーとの組み合わせで同じ結果が得られるとは限らないが、本試験では腐食環境の厳しい北陸及び沖縄ではポリエステルガラスフレーク、東京ではビニルエステルガラスフレークが最も優れた成績を示した。

iii) 水洗いの有無による防食性の比較

①図-13 に、中塗り前の水洗いの有無による防食性の差を示した。図によると、フタル酸系 (No. 1, No. 2) の場合、北陸において水洗いの差による防食性の違いが顕著に現れた。これはフタル酸樹脂塗料の耐水性が他の樹脂に比べて劣るため、塗膜を浸透した水分が鉄素地を腐食させるとともに、橋梁の架設段階でさび止めペイント表面に付着した塩分が、吸水し潮解することによる塗膜の剥がれと思われ、水洗効果が顕著に現れた結果と考えられる。

②塩化ゴム系 (No. 3) の場合には、フタル酸系ほどではないものの、いずれの暴露場でも水洗いによる防食性の向上が見られた。

③重防食系 (No. 4, No. 7) では、北陸で一部に水洗いによる防食性の向上が見られたが、東京と沖縄内陸では水洗いによる防食性の向上はほとんど見られず、劣化はフタル酸系や塩化ゴム系に比べて顕著ではなかった。東京と沖縄内陸では水洗いによる防食性の向上がほとんど見られなかったのは、東京ではもともと飛来塩分の影響がほとんどなく、沖縄内陸も海岸からの距離が約 500m離れた樹木に囲まれた場所にあるため、飛来塩分量が北陸ほど多くなかったためと考えられる。

④以上から、北陸のように飛来塩分量の多い環境で中・上塗りを現場塗装する場合には、十分な水洗いを行い、付着塩分量を 50mg/m²以下にすることが塗膜の防食性を向上させるためには必要と考えられる。

iv) 上塗り塗料の種類による防食性の比較

①図-14 に、上塗りにポリウレタン (No. 4) , ふっ素 (No. 9) 及びシリコン変性アクリル (No.10) の各樹脂塗料を用いた場合の防食性の差を示した。図-14 によると、沖縄内陸で耐候性の優れたふっ

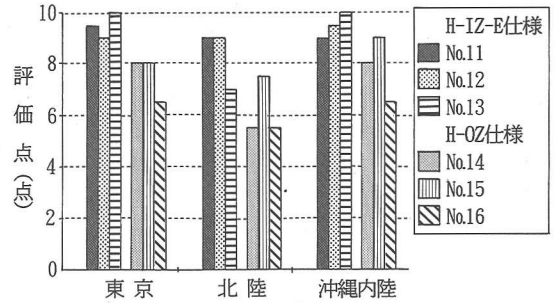


図-11 下塗り塗料の違いによる防食性の比較 (上塗り：ポリウレタン樹脂塗料)

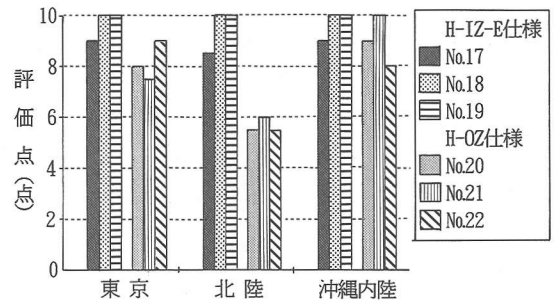


図-12 下塗り塗料の違いによる防食性の比較 (上塗り：ふっ素樹脂塗料)

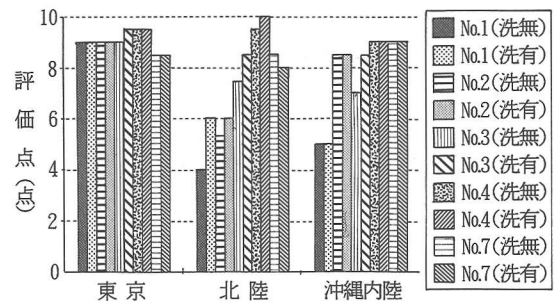


図-13 水洗による防食性の比較

素が良好な防食性を示したものの、全暴露場を通しては、上塗りの違いによる防食性の差は明確に認められなかった。

②図-15 に、北陸における上塗り塗料の違いによる付着塩分量を示す。図-15 によると、塗膜への付着塩分量は防食性のもっとも劣るフタル酸系が少なく、塩化ゴム系、ポリウレタン樹脂の順に増加していた。特に、耐候性に優れたふっ素樹脂への付

着塩分は非常に多くなっていた。この理由は明確ではないが、ふっ素樹脂塗膜は水に対する接触角が大きいため、塗面に溜まった水滴が薄膜になって流れ落ちずに濃縮するため、水滴中の塩分が塗装面に累積される傾向があるのではないかと考えられる。したがって、上塗りにふっ素樹脂塗料を用いた塗装系の塗り替えあるいは補修塗りの場合には、塗り重ね前には十分な水洗いを行う必要があることを示唆していると考えられる。

4. 結論

本研究は、腐食環境の異なる3暴露場に設置した約2000枚の塗装試験板の追跡調査結果から、主に重防食塗装系の新設仕様について防食性を比較検討し、より腐食環境に適した塗装系を見出そうとしたものである。

この試みに当たって、素地調整程度、塗料の種類、塗装仕様及び塗装方法などを変えて、それぞれが塗膜の防食性に与える影響を分析した結果、次のような結論が得られた。

- ①フタル酸系は北陸及び沖縄内陸など、腐食環境の厳しい地域には適さないことが明らかになった。しかし、マイルドな腐食環境ではフタル酸系の防食性程度でも十分に期待できることが分かった。
- ②北陸や沖縄など厳しい環境下での新設橋梁の塗装系として、無機ジンクリッチペイントを下塗りに、中・上塗りにポリウレタン樹脂塗料あるいはふっ素樹脂塗料など耐候性に優れた塗料を用いた重防食塗装系の、防食性能が優れていることを明らかにした。
- ③上塗りが高耐候性塗料になるほど付着塩分量が多いという結果が得られたが、このことは、高耐候性上塗り塗料を用いた塗装系の補修には、水洗などを行って付着塩分を除去することが重要であるという示唆を得ることができた。
- ④ガラスフレーク塗料を用いた場合、いずれの種類でもカットの入っていない一般部は、防食上全く問題はなかったが、塗膜に鉄素地面に達する傷が生じた場合、この部分からの塗膜劣化の広がり著しく、下塗り塗膜の防食性の優劣によって、塗膜性能が左右されることが分かった。このことは、この塗料の特性はあくまでも遮断性による防食という本来の性能に従って用いるべきであるから、この塗料を適用する場合は、橋梁架設時等の塗膜の保護や傷が生じた場合のタッチアップに留意する必要があることを明らかにした。

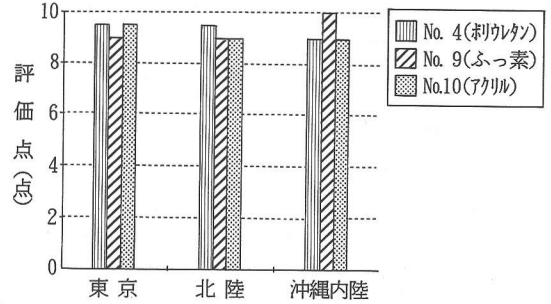


図-14 上塗り塗料の種類による防食性比較

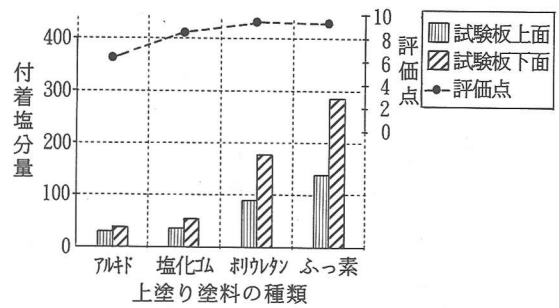


図-15 上塗り塗料の違いによる付着塩分量測定結果 (北陸)

参考文献

- 1) 社団法人日本道路協会：鋼道路橋塗装便覧，1990年6月。
- 2) 片脇清士：道路橋の塗装の歴史と展開，鋼橋塗装，Vol.23，No.1，pp.51-63，1996。
- 3) 松田哲夫，藤原博，佐久間智：鋼橋塗装の実態調査－全国の塗膜劣化データの統計処理の評価－，日本道路公団試験所報告，Vol.28，pp.97-106，1991.10。
- 4) 社団法人土木学会：本州四国連絡橋鋼上部構造に関する調査研究報告書，1973。
- 5) 稲葉泰一：長期防錆塗装5年経過塗膜の調査報告，鋼橋塗装，Vol.18，No.4，pp.14-20，1990。
- 6) 岩上淳一，宮井真一郎，栗田一昭，尾崎幸男，福手勤：泊大橋における鋼橋部現況調査および試験塗装，鋼橋塗装，Vol.23，No.2，pp.3-11，1995。
- 7) 渋谷正則，亀倉寛：海浜部における鋼橋の長期防錆について－実橋塗装試験報告－，鋼橋塗装，Vol.21，No.4，pp.48-53，1992。
- 8) 町田洋人，江成孝文，桐村勝也：実橋における長期防錆型塗装系の耐久性－行合川橋りょう（現場中・上塗り塗装5年間調査結果）－，第5回鉄構塗装技術討論会発表予稿集，社団法人日本鋼構造協会，pp.7-12，1991。

- 9) 桐村勝也, 町田洋人, 村田介司: 実橋における長期防錆型塗装系の耐久性—吾妻川橋りょう15年間調査結果, 防錆管理, pp.12-16, 1992-7.
- 10) Benjamin S. Fultz: Performance of Topcoated Inorganic Zinc coatings Exposed to Weather, *Journal of Protective Coating & Linings*, December 1988.
- 11) 久野忠一, 今津司, 縦山巖, 栗山寛: 海洋環境における鋼材の各種防食塗装システムの性能, 川崎製鉄技報別刷, Vol.13, No.2, pp.43-63, 1981.
- 12) 財団法人日本塗料検査協会: 塗膜の評価基準, 1970.
- 13) 尾間一彦, 菅野照造, 平井陽一: 国内の気象要素と鉄鋼の大気腐食に関する研究(第3報) 暴露角度の影響について, 防錆技術, Vol.15, No.5, pp.200-203, 1963.
- 14) 日本造船研究協会編: 塗装前鋼材表面処理基準, 1984.
- 15) 気象年鑑, 1990, 1991, 1992.

(1995. 8. 24 受付)

RESEARCH ON HEAVY DUTY ANTI-CORROSIVE PAINTING APPLIED TO NEWLY-BUILT STEEL BRIDGE OF EXPRESSWAYS

Hiroshi FUJIWARA and Yoshio TAHARA

In this research, about 2000 painted specimens have been exposed at 4 different corrosive areas since 1988. From the result of this exposure test for 6 years, performances of heavy duty anti-corrosive paintings for newly-built steel bridges were mainly investigated. As a result, corrosion rates of 4 exposure areas were found to differ greatly each other mainly caused by the differences of environments. Appearances of corrosion such as areas, average depths and steel weight reductions were also found to differ greatly in each exposure area. In addition, performances of paintings against corrosion were also found to be influenced strongly by the kind of paint system in addition to the difference of the climate.