

環境促進実験による塗替え塗装鋼板の 腐食劣化特性に関する研究

伊藤 義人¹・坪内 佐織²・金 仁泰³

¹フェロー会員 名古屋大学大学院教授 附属図書館長 工学研究科社会基盤工学専攻
(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

E-mail: itoh@civil.nagoya-u.ac.jp

²正会員 名古屋大学大学院大学院生 工学研究科社会基盤工学専攻(同上)

³正会員 名古屋大学大学院助手 工学研究科社会基盤工学専攻(同上)

本研究では、塗替え塗装鋼板の腐食劣化特性を求めるため、実際に36年間供用された鋼橋の桁に3種類の素地調整及び4種類の塗装系を用いて塗替え塗装を施すことにより供試体を製作し、これらを用いて300日間の塩水噴霧複合サイクルの環境促進実験を行った。供試体は100日経過ごとに3体ずつ取出し、クロスカット部からのふくれ面積や光沢度保持率などを計測することにより劣化度を評価した。3種類の素地調整と4種類の塗装系を組み合わせて、それぞれを施した供試体の経時的な劣化特性を明らかにし、これらを比較検討することにより、素地調整の程度や塗装系による腐食劣化特性の違いを把握した。また、ふくれ面積を用いた劣化曲線を作成することによる塗替え時期の推定法を提案し、鋼橋塗装の合理的な維持管理計画に向けた基礎的データを提供した。

Key Words : repainting, corrosion, accelerated exposure test, surface preparation, steel bridge

1. はじめに

鋼橋の維持管理において、塗装の防食機能を維持するために行われる塗替えは最も重要な要素の一つである。鋼橋塗装のライフサイクルアナリシスを行う場合は、精度の良い塗替え時期の設定と、その後の劣化予測をすることが必要となる。

鋼道路橋塗装・防食便覧¹⁾に規定されていて採用歴の長いA塗装系に関しては、実橋調査により塗替え時期にある程度の目安がある。しかし、近年採用されるようになった、同便覧に規定されているC塗装系(平成2年適用)や、構造物施工管理要領²⁾に規定されているI塗装系(平成9年適用)は、使用されてからの経過年数がまだ短く、塗替え時期を統計的に把握できていない。林田ら³⁾は実橋調査を基に1990年版の鋼道路橋塗装便覧⁴⁾に規定されているA、B及びC塗装系の耐用年数を回帰分析により算出しているが、C塗装系の耐用年数の精度を上げるには、塗装経過年数が長期間におよび劣化が進行したデータを収集していく必要があることを示している⁵⁾。そのため、これまでに塗装鋼板を用いた大気暴露実験や環境促進実験が行われている^{6)~11)}。

また、一般に塗装の腐食劣化速度は、鋼橋新設時に工場で行われる新規塗装より、現場で行われる塗替え塗装の方が早いとも言われている。その原因として、現場塗替え塗装では、完全にさびを落とせないことや付着塩分を十分に除去できないことなどが挙げられている¹²⁾。すなわち、現場では十分な素地調整を行うことが困難であると言われている。

伊藤ら¹³⁾は、鋼板を環境促進実験槽で急速にさびさせた後、4種類の素地調整を行い塗装を施した鋼板を用いて251日間の環境促進実験を行い、塗替え塗装が新規塗装より寿命が約36%短くなることを実験的に明らかにしている。

同様の理由で、1回目の塗替えより2回目の塗替えの方が腐食劣化速度が速くなることも実橋調査により明らかにされている^{12), 14)}。

そこで、塗装の塗替え時期を精度良く予測するために、本研究では、実際に36年間使用された鋼橋から取り出した塗装鋼板を用いて、素地調整の程度を考慮した塗替え塗装鋼板の環境促進実験を行い、各種の塗替え塗装系の腐食劣化特性を比較検討した。

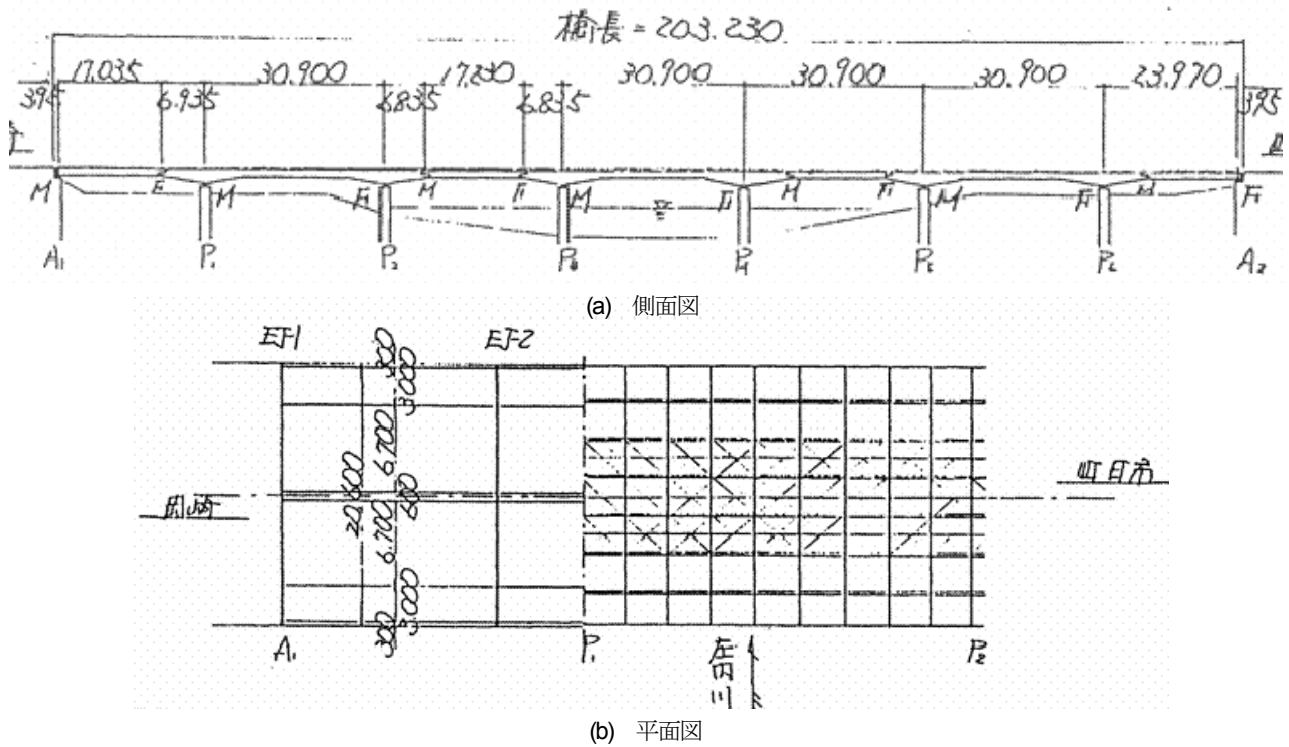


図-1 一色大橋一般図



図-2 撤去した鋼桁の外観と切り出して使用したウェブの表面状態と適用した素地調整

2. 実験対象橋梁の概要

本実験において供試体製作に使用した撤去された鋼橋の一般図を図-1に、また、その概要を以下に示す。

- 1) 橋梁名：一色大橋(愛知県名古屋市中川区、庄内川に架橋、海から約5km)
- 2) 構造形式：鋼ゲルバーI桁橋(6桁、橋長203.230m、幅員20.600m)
- 3) 適用示方書：大正5年
- 4) 架設年次：昭和43年
- 5) 防食処理：A塗装系
 - a) 1978年塗替え(詳細不明)
 - b) 1991年2月塗替え

下塗り：鉛系さび止めペイント1種

中塗り：長油性フタル酸樹脂中塗り塗料

上塗り：長油性フタル酸樹脂上塗り塗料

c) 2003年に撤去

供試体に用いた部材は、図-2に示す外桁(鋼種SM50A・B, SM41A, SS41, 桁高1.5m, フランジ厚12mm, ウェブ厚9mm)の腹板である。

3. 実験方法

(1) 対象塗装系

本実験で対象とした塗替え用の鋼橋用塗装系は、山間部などの一般環境で適用するA塗装系、海岸部などの厳しい腐食環境で適用するC塗装系、及びやや厳しい腐食

環境で適用するB塗装系とした。これらは1990年版の鋼道路橋塗装便覧⁴⁾に規定されているものである。また、A塗装系とC塗装系の中間的な防食性を持ち、コストはA塗装系よりI割程度高い、旧日本道路公団(現在の東中, 西日本高速道路株式会社)で規定されたI塗装系²⁾も対象とした。

(2) 供試体の作製

供試体作製の流れを図-3に示す。手順の詳細は以下のようである。

1. 36年間供用された鋼橋の桁からウェブを切り出し、図-4に示す150×70×9mmサイズの鋼板供試体を185体作製した。
2. 塗替え塗装を行う供試体144体と、塗替えを行わない供試体41体とに分けた。これは実橋において、塗替え塗装を行う場合と行わずにそのまま供用を続ける場合の二ケースを想定した。
3. 塗替えを行わない供試体は、目視で塗膜のはがれが目立つ比較的劣化の大きいものと、はがれがほとんどないものの二つに分け、それぞれから12体ずつを選び、劣化程度大の供試体、劣化程度小の供試体とした。残りは予備として、初期状態把握などに用いた。塗替えを行う場合、まず、一般に行

われる劣化状態に応じた表-1に示す素地調整を行う場合と、効果が最も優れていると言われている1種ケレンを行う場合とに分けた。各素地調整方法は表-2の方法により行った⁴⁾。ブラストは原板ブラ

表-1 塗膜の劣化程度と素地調整の種別⁴⁾

塗膜の劣化程度	素地調整の種別
発錆がはなはだしく塗膜のわれ、はがれについてもほぼ全面に発生している状態	1種
部分的に点さびおよび塗膜のわれ、ふくれ、はがれが発生しているが活膜も多くある状態	2種
さびの発生がほとんどなく塗膜が変色、白亜化した状態	3種
	4種

表-2 素地調整の種別⁴⁾

種別	作業内容	作業方法
1種	さび、塗膜を除去し、清浄な鋼材面とする。	ブラスト法
2種	さび、塗膜を除去し鋼材面を露出させる。ただし、くぼみ部分や狭あい部分にはさびや塗膜が残存する。	ディスクサンダー、ワイヤホイールなどの動力工具と手工具の併用
3種	さび、劣化塗膜を除去し鋼材面を露出させる。ただし、劣化していない塗膜(活膜)は残す。	
4種	粉化物および付着物を落とし、活膜を残す。	

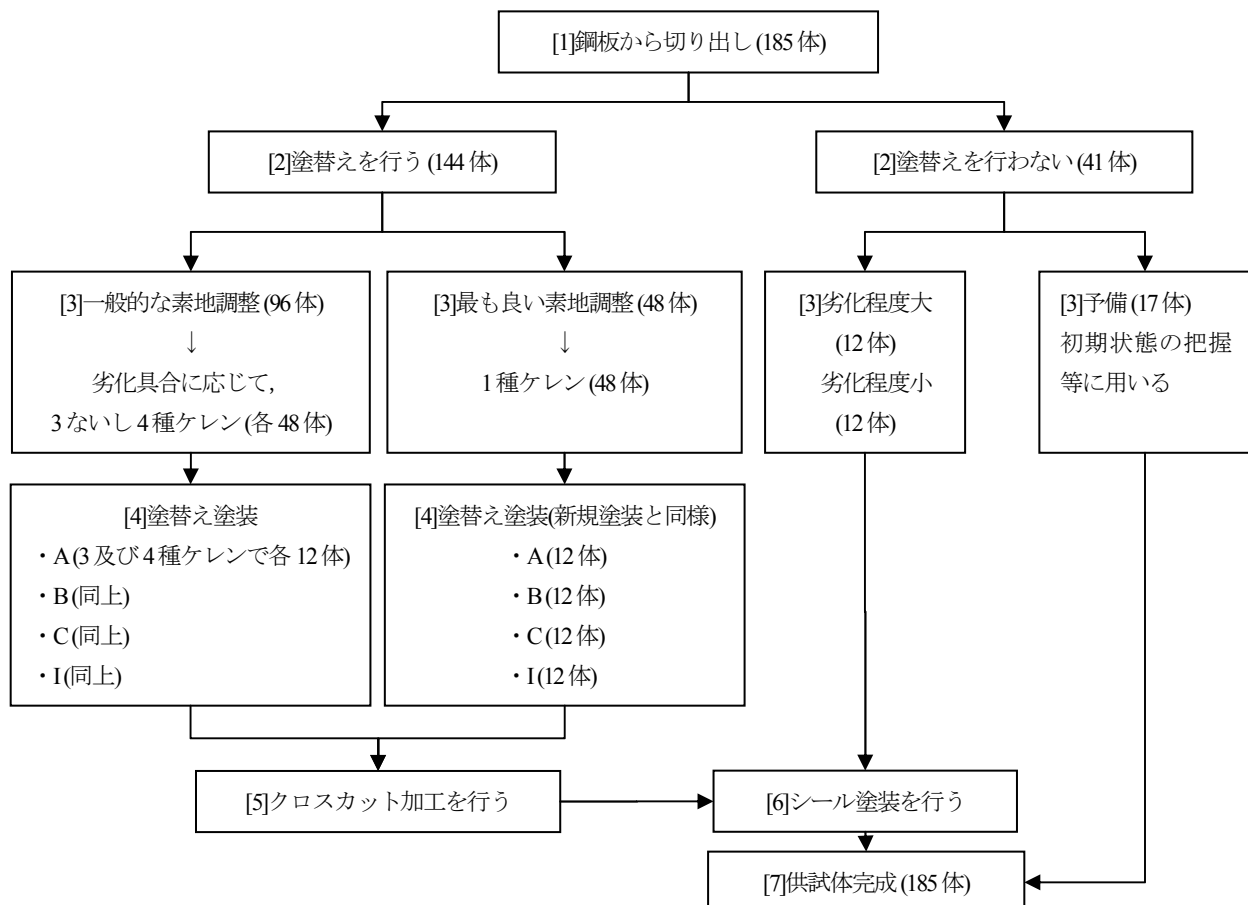


図-3 供試体作製の流れ

トに用いられるショットブラストを行った。塗膜面の塩分除去は特に行っていない。図-2に示したように、実橋から腹板の一部を切り出した。腹板の塗膜状態は位置により異なるため、適用する素地調整は、同図に示すように、劣化程度によって分けた。

4. 供試体下部にマスキングテープを貼り、その上から塗替え塗装を行うことにより、図-4に示すような幅20mmの旧塗膜露出部を設けた。塗替え塗装に用いた塗料を表-3に示す。塗膜と旧塗膜露出部の境界部は、ボルト継手部や隅角部において十分な防食処理が困難な場合を、1種ケレンを施した供試体では耐候性鋼材を使用した橋梁において桁端部を部分的に塗装する場合などを、それぞれ想定している。塗替え塗装系は、旧塗膜(切り出した実橋で用いられていた塗料)と同様の塗装系を塗った場合としてA塗装系を、旧塗膜より防錆性能が優れている塗装系を選らんだ場合としてB及びC塗装系を、塗

替え塗装系として便覧には規定されていないが、実験的にI塗装系を、それぞれ用いた。

5. 塗膜に傷が入った場合を想定して、下地鋼板に達する長さ40mmのクロスカットを幅約0.3mmのカッ

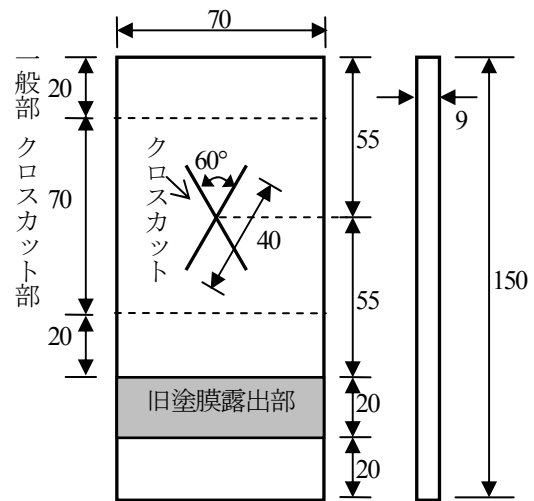


図-4 供試体寸法(単位: mm)

表-3 塗替え塗装に用いた塗料

塗装系	工程	塗料名	使用量 g/m ²	塗装系	工程	塗料名	使用量 g/m ²
a-1	素地調整 1種(新規)			c-3	素地調整 1種(新規)		
	下塗り	鉛系さび止めペイント 1種	170		下塗り	無機ジンクリッチペイント	700
	〃	〃	170		〃	ミスコート	160
	中塗り	長油系フタル酸樹脂塗料中塗	120		〃	エポキシ樹脂塗料下塗	300
	上塗り	長油系フタル酸樹脂塗料上塗	110		〃	〃	360
	素地調整 3種				中塗り	ふっ素樹脂塗料用中塗	140
	下塗り	鉛系さび止めペイント 1種 (鋼面露出部のみ)	(140)		上塗り	ふっ素樹脂塗料上塗	120
	〃	鉛系さび止めペイント 1種	140		素地調整 3種		
	中塗り	長油系フタル酸樹脂中塗塗料	120		下塗り	変性エポキシ樹脂塗料下塗 (鋼面露出部のみ)	(240)
	上塗り	長油系フタル酸樹脂上塗塗料	110		〃	変性エポキシ樹脂塗料下塗	240
	素地調整 4種				〃	〃	240
	下塗り	鉛系さび止めペイント 1種	140		中塗り	ふっ素樹脂塗料用中塗	140
中塗り	長油系フタル酸樹脂中塗塗料	120	上塗り	ふっ素樹脂塗料上塗	120		
上塗り	長油系フタル酸樹脂上塗塗料	110	素地調整 4種				
b-1	素地調整 1種(新規)			I	下塗り	変性エポキシ樹脂塗料下塗	240
	下塗り	鉛系さび止めペイント 1種	170		中塗り	ふっ素樹脂塗料用中塗	140
	〃	〃	170		上塗り	ふっ素樹脂塗料上塗	120
	〃	フェノール樹脂 MIO 塗料	300		素地調整 1種(新規)		
	中塗り	塩化ゴム系塗料中塗	170		下塗り	有機ジンクリッチペイント	700
	上塗り	塩化ゴム系塗料上塗	150		中塗り	ポリウレタン樹脂塗料用中塗	170
	素地調整 3種				上塗り	ポリウレタン樹脂塗料上塗	140
	下塗り	鉛系さび止めペイント 1種 (鋼面露出部のみ)	(140)		素地調整 3種		
	〃	鉛系さび止めペイント 1種	140		下塗り	変性エポキシ樹脂塗料下塗(鋼面 露出部のみ)	(240)
	〃	フェノール樹脂 MIO 塗料	250		〃	変性エポキシ樹脂塗料下塗	300
	中塗り	塩化ゴム系塗料中塗	170		中塗り	ポリウレタン樹脂塗料用中塗	140
	上塗り	塩化ゴム系塗料上塗	150		上塗り	ポリウレタン樹脂塗料上塗	120
素地調整 4種			素地調整 4種				
中塗り	塩化ゴム系塗料中塗	170	中塗り	ポリウレタン樹脂塗料用中塗	140		
上塗り	塩化ゴム系塗料上塗	150	上塗り	ポリウレタン樹脂塗料上塗	120		

ターを用いて図-4のように加工した。

6. 供試体側面にシール塗装を行った。これにより、切断面からの発錆を抑えている。
7. 塗替えを行う場合の供試体は、ケレン3種類(1, 3, 4種)×塗装系4種類(A, B, C, I)=12パターン設定し、それぞれ12体ずつ、合計144体作製した。

実験を行った結果、新規塗装において高い防錆性能を有すると知られているC塗装系のふくれ面積が非常に大きくなり、従来の知見と整合性がみられなかった。実験終了後に1種ケレンを施したC塗装系の下塗り塗装を調べたところ、本来無機ジンクリッチペイントを使用するはずが有機ジンクリッチペイントを塗っていたことが分かった。その対応として、図-3の[3]に示した予備の供試体17体のうち3体を用いて、1種ケレンを施して無機ジンクリッチペイントを使ったC塗装系の供試体を作製し、追加実験を行った。

(3) 実験装置及び実験条件

実験装置は複合サイクル試験機(スガ試験機社製)を用いた。実験槽内の寸法は、幅2000×奥行1000×高さ500mmであり、供試体の最大設置枚数は188枚である。複合サイクル条件は、JIS Z 2371で採用されているS6サイクルとした。図-5にS6サイクルの詳細を示す。この複合サイクル条件は、【1】実験槽内温度 $30\pm 2^{\circ}\text{C}$ 、5%濃度の塩水噴霧を0.5時間、【2】95%の湿潤を1.5時間、【3】 $50\pm 2^{\circ}\text{C}$ の熱風乾燥を2.0時間、【4】 $30\pm 2^{\circ}\text{C}$ の温風乾燥2.0時間、合計6時間を1サイクルとするものである。実験槽内における供試体の配置場所により実験条件が変化しないように、実験開始から1ヶ月は5日ごとに、その後は25日ごとに配置場所をローテーションさせた。供試体の配置角度は、JIS Z 2371に従って、鉛直方向から保持角15度で配置した。

4. 実験結果及び考察

外観変化、光沢度保持率、交流インピーダンス、付着

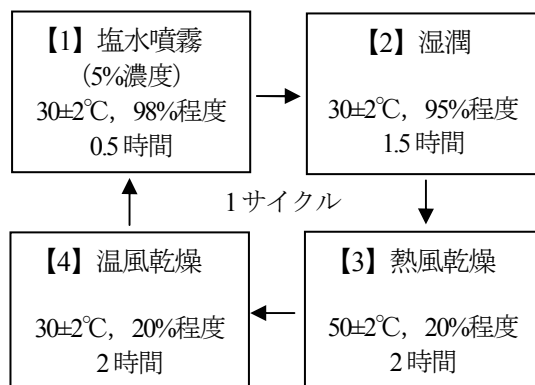


図-5 複合サイクル条件(S6サイクル)

力、クロスカット部からのふくれ面積などの測定結果を項目別に以下にまとめる。供試体は100日経過ごとに各種3体ずつ実験槽から取出して評価を行ったため、0日、100日、200日、300日の実験結果は異なる供試体によって得られている。なお、100日ごとの経過時以外にも、その間で300日用の供試体を一旦取り出して外観測定をした結果も示す。

光沢度に関しては紫外線等の劣化因子を考慮した実験を行っていないため顕著な劣化は生じないが、一般的な塗膜劣化評価項目であるため、参考として計測した。

C塗装系の追加実験は200日間行い、外観変化とふくれ面積を評価した。

(1) 外観変化

外観の経時変化を追うために、25日ごとに1体ずつ写真撮影を行った。そして、素地調整及び塗装系の違いによる特徴について示す。以下に4種、1種ケレン及び3種ケレンの順に外観変化について、図-4に示した旧塗膜露出部、供試体上端から20mmの一般部、20～90mmのクロスカット部の3つに分けて行う。

a) 4種ケレン

付着物を落とし活膜を残した4種ケレンを施した各塗装系の300日経過時の外観写真を図-6に示す。それぞれの図の下に示した平均膜厚は供試体作製後に計測した旧塗膜厚を含めた値である。どの塗装系においても、クロスカット部からさびが発生しているものの、さびの幅は1種及び3種ケレンと比して小さく、300日経過した時点でもよい防錆性能を示している。また、旧塗膜との境界部においてもはがれは確認されていない。4種ケレンは一般に、さびが発生する前に行われる素地調整であり、旧塗膜はほぼ活膜として残してその上に再塗装を行うため、鋼と塗替え塗膜は基本的に接触していない。クロスカット部からのさびは、旧塗膜を含めた塗膜全体を下から押し上げるようにして進展するため、クロスカット部の防錆性能は鋼に付着している塗料、すなわち旧塗膜の下塗り塗料の付着力などの防錆力に依存すると考えられる。各供試体の旧塗膜の塗装系は同一であり、かつ4種ケレン用に用いた供試体の旧塗膜は比較的健全に残存していたので、どの塗装系においても似たふくれ形状を示したと考えられる。

b) 1種ケレン

清浄な鋼材面を出した1種ケレンを施した各塗装系の外観写真を図-7に示す。塗装系の隣に実験経過日数を示す。C塗装系は追加実験の結果も示している。追加実験をしたC塗装系では発錆もなく、良好な防錆性能を示したが、他の塗装系では4種ケレンと比してクロスカット部からのさびの進展が大きいことが分かる。また、下塗りに鉛系錆止ペイントを採用しているA及びB塗


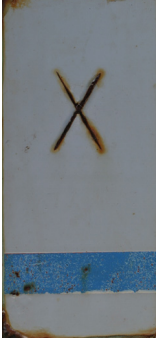



初期状態	A	B	C	I
				
平均膜厚(μm)	397	373	425	382

図-6 各塗装系4種ケレンの300日経過時外観写真







初期状態	A (300 日)	B (300 日)	C (300 日)	C(追加実験) (200 日)	I (300 日)
					
平均膜厚(μm)	134	194	252	287	108

図-7 各塗装系1種ケレンの外観写真

装系ではクロスカット部から塗膜がはがれるようにしてさびが進展しているのに対し、有機ジンクリッチペイントを塗ったC塗装系及びI塗装系では、さびがあまり露出せず塗膜下がふくれてさびが進展しているという特徴がある。

一般部からの発錆は、B、C及びI塗装系では確認されなかったが、A塗装系では300日経過した3体の供試体全てにおいてさびが発生した。これらのうち、2体は100日経過した時点で既に目視で確認できる程度のさびが発生していたが、残りの1体は225日経過時にさびが目視で確認できる大きさとなった。

素地露出部との境界部では、防錆効果は追加実験をしたC塗装系が比較的高いが、どの塗装系においても錆汁により外観は著しく損なわれている。よって、耐候性鋼材を使用した橋梁の桁端部を部分的に塗装する場合は注意を要する。

c) 3種ケレン

図-8に3種ケレンを行った各塗装系の外観経時変化を示す。3種ケレンでは、さびが発生している部分に対しては動力工具により鋼が露出するまでケレンを行い、さびの発生していない活膜部は4種ケレンと同様に表面を清浄する程度のケレンを行った。桁から切り出した後の各供試体の発錆状態は異なるため、素地調整後の各供試

体は、さびがあった部分は鋼が露出し、なかった部分は旧塗膜が残存している。よって素地調整後の状態が各供試体で異なり、初期条件が均一ではない。すなわち、今回の供試体は3種ケレンといえども、さびが発生していなかった部分は4種ケレンを行った供試体と同様の状態となっている。3種ケレンを行った供試体の防錆性能は素地調整程度の不均一性から、活膜部は4種ケレンのように良好であるが、鋼が露出している部分はふくれが著しく進展し、非常にばらついた結果となっている。

そこで、図-8は素地調整後すなわち再塗装前の状態も併せて示すことにより、初期状態の違いが分かるようにした。300日まで実験を行った供試体は3体ずつあるが、4種ケレンの外観変化との差を議論するために、クロスカット部付近に鋼露出部が多く存在する供試体を選んで図-8に示した。この中には鋼調整程度が4種ケレンに近い供試体もある。

まず、一般部からの発錆と旧塗膜露出部の境界部におけるはがれは、4種ケレンと同様に全ての塗装系で確認されなかった。しかし、旧塗膜露出部に鋼の露出が見られる供試体では、その部分がさびることによりふくれが境界部へと進展しているものもあった。

クロスカット部では、初期状態が鋼露出部である部分から先にふくれだし、経過日数とともに局部的に大きく

なる傾向がどの塗装系にも見られた。この傾向はA及びI 塗装系の外観写真を見ると分かりやすい。A塗装系では300日経過時点でクロスカット部の右下が局部的にふくれ、この部分は素地調整後の写真を見てみると鋼が露出している部分であることが分かる。

同様にI 塗装系では100日経過時点で鋼露出部が集中している右半分からさび汁が発生し、300日を経過するとクロスカット部全体が大きくふくれた。

一方、鋼露出部がクロスカットの下になかったC塗装系では、クロスカット部から均一にふくれが進展している。このふくれ方は4種ケレンと同様であるが、ふくれ幅は3種ケレンの方が大きい。それは、鋼が露出していなくても、下塗りが露出する程度まで素地調整を行っていることに起因すると考えられる。以上から、3種ケレンは塗装前の素地調整程度によりふくれの傾向が大きく

異なることが確認された。

(2) 光沢度保持率

JIS Z 8714に従い、光沢度を測定した。測定位置は、図-4の供試体図に示した一般部とし、この範囲内における3点平均を測定値とした。光沢度は実験前の光沢度に対する測定時の光沢度の割合(光沢度保持率(%))を算出し、評価した。光沢度保持率の測定は50日ごとに行った。

A塗装系の光沢度保持率経時変化を図-9に示す。図-9には光沢度保持率の平均値(M)と標準偏差(S)を示している。光沢度保持率は上塗り塗料の劣化により減少するが、どの素地調整においてもA塗装系の上塗り塗料は長油性フタル酸であるため、各素地調整の光沢度保持率は似たような経時変化を示した。他の塗装系においても同様の傾向であったため、全素地調整の平均を計算し、その経





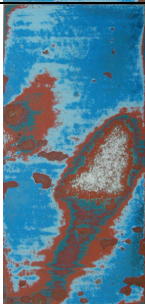
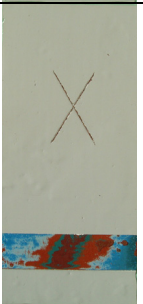




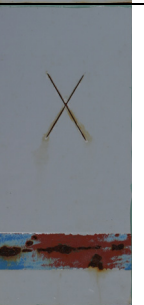

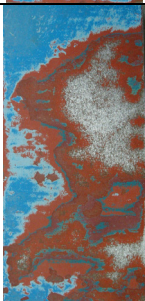
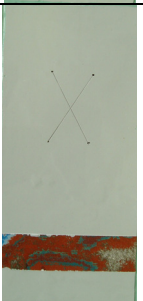

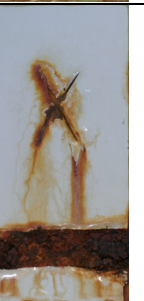
	塗装前	初期状態	100 日	300 日
A (平均膜厚 353μm)				
B (平均膜厚 370μm)				
C (平均膜厚 438μm)				
I (平均膜厚 401μm)				

図-8 各塗装系 3 種ケレンの外観経時変化

時変化を図-10に示す。

300日経過時点で比較すると、A塗装系が約40%と最も保持率が低く、次いでB塗装系が約50%、C塗装系とI塗装系が60%強となった。

(3) 交流インピーダンス

交流インピーダンスでは、塗膜を絶縁体とみなし、電極と鋼との間に形成されたコンデンサに微小交流電流を流し、その静電容量(C)、交流抵抗(R)及び絶縁体の性能を表す損失係数($D: \tan \delta$)を測定し、これらの周波数依存性を見て評価する。

計測時に用いた交流電流の周波数は0.2kHz、0.5kHz、1kHzであり、計測位置は図-4に示すようにクロスカットや端部の影響を受けないと考えられる一般部とした。

劣化度の評価は、Dに関しては文献15)を参考にして $0.2 \geq D$ は良好(O)、 $0.2 < D$ は不良(X)とし、C及びRに関しては電気事業連合会による評価基準¹⁶⁾を参考として、図-11及び表-4に従うこととした。計測は実験期間0日、100日、200日、250日、300日経過後に行った。

C、R及びDによる評価結果を表-5に示す。どの塗装系においても、3種及び4種ケレンについては全てA及び良好(O)となり、インピーダンスによる評価では劣化が確

認されなかった。

1種ケレンについては、B及びC塗装系はほぼ良好であり、劣化は確認されなかったが、A及びI塗装系に関しては、C及びDによる評価において劣化を示した。図-12にA塗装系及びI塗装系のCの経時変化を示す。A塗装系では計測位置にさびが生じていたため、この評価結果は妥当であると言える。しかし、I塗装系に関しては、目視で確認できるような劣化が無いのにも関わらず、Cの評価がB' となった。しかし、経時変化を見ると初期値とほぼ変わっていないため、一般部はほぼ劣化していないと判断できる。

(4) 付着力

付着力は定量的に評価するプルオフ法によりJIS K

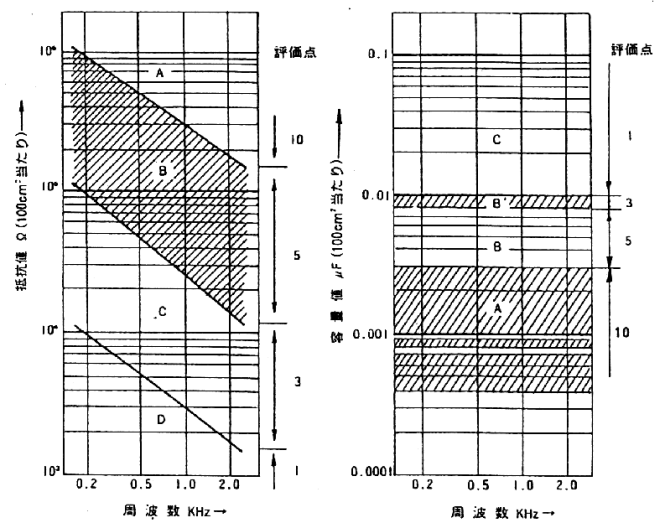


図-11 インピーダンス評価値¹⁶⁾

表-4 インピーダンスによる劣化度評価¹⁶⁾

劣化度	抵抗値	容量値	塗膜の状態
I	A・B	A	異常なし
II	C	B	塗膜が完全に固く付着し上塗りだけが劣化している
III	C	B'	塗膜に発錆・ふくれなど生じている
IV	D	C	塗膜の劣化が著しい

表-5 インピーダンスによる劣化度評価結果

塗装系	A			B		
	C	R	D	C	R	D
1種	C	B	×	B	A	○
3種	A	A	○	A	A	○
4種	A	A	○	A	A	○
塗装系	C			I		
	C	R	D	C	R	D
1種	A	A	○	B'	B	×
3種	A	A	○	A	A	○
4種	A	A	○	A	A	○

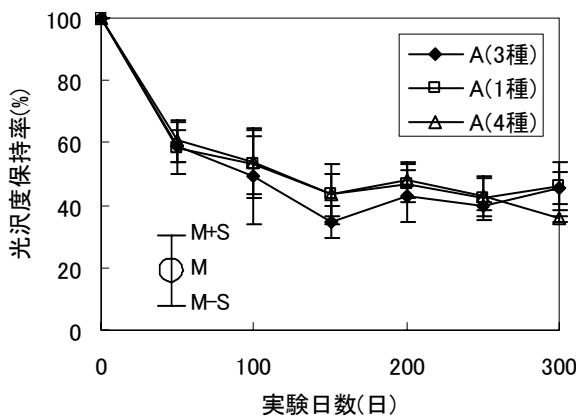


図-9 A 塗装系の光沢度保持率

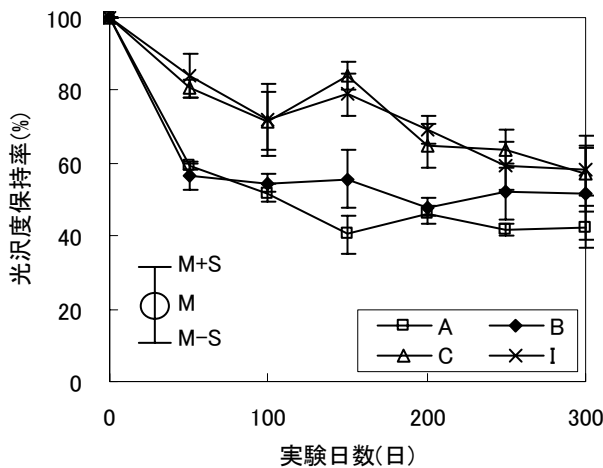


図-10 各塗装系の平均光沢度保持率

5600-5-7に従って計測した。計測器はエルコメーター社製アドヒージョンテスター(計測範囲: 5~22MPa, 精度: $\pm 15\%$)を用いた。測定位置は、図-4の供試体図に示した一般部とし、完全に接着剤から破断したデータを除いて求めた平均付着力 T (MPa)と、300日経過後の劣化度(RN値)を表-6に示す。接着剤から破断したためデータが得られなかった部分は「—」としている。劣化度の評価は、文献17)を参考にして $2.0\text{MPa} \leq T$ はRN値を0, $1.0\text{MPa} \leq T < 2.0\text{MPa}$ はRN値を1, $0.0\text{MPa} \leq T < 1.0\text{MPa}$ はRN値を2, $T=0$ はRN値を3とした。

表-6から、I塗装系4種ケレンの300日経過後の付着力が1.5MPaとなり、RN値が1となったが、それ以外の付着力は全て2.0MPa以上となり、劣化は確認されなかった。また、接着剤からはがれたデータも2.0MPa以上で破断しており、付着力は良好に保持されていたと推定できる。

(5) クロスカット部からのふくれ面積

クロスカット部から進展したさびによるふくれ面積を計測した。レーザー深度計により計測したふくれと目視によるふくれの範囲を比較したものを図-13に示す。1種ケレンを施した供試体のふくれ面積をレーザー深度計と目視とで計測した結果、差は約5%と少ないため、今回は目視によるふくれ面積の計測結果を用いることとした。計測は実験期間0日、100日、200日、250日、300

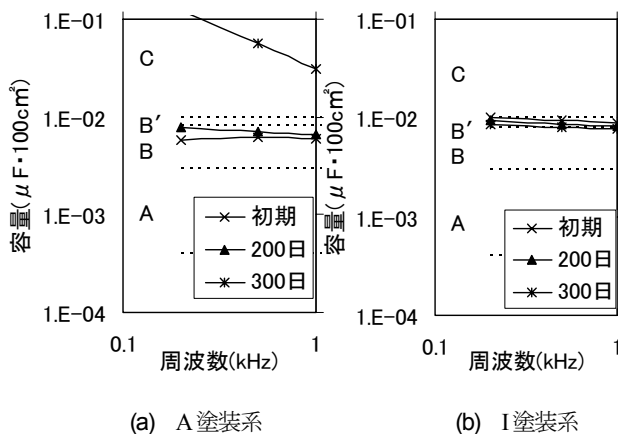


図-12 1種ケレンの静電容量(C)の経時変化

表-6 付着力による劣化度評価結果(MPa)

	A			B		
	0日	300日	RN	0日	300日	RN
1種	5.1	5.1	0	—	—	—
3種	3.4	2.8	0	1.4	4.7	0
4種	4.7	3.3	0	—	3.3	0
	C			I		
	0日	300日	RN	0日	300日	RN
1種	12	9.5	0	—	7.5	0
3種	1.9	3.3	0	2.8	4.2	0
4種	3.9	4.3	0	3.6	1.5	1

日経過後に行った。カット部からのふくれ幅による劣化度評価基準はいくつか規定されているが、ふくれ面積による基準は現在定められていない。そこで今回は日本鋼構造協会¹⁸⁾により規定されているふくれ幅による劣化度評価基準をふくれ面積に変換することにより劣化度評価を行った。すなわち、表-7に示すように、規定されている各劣化度のふくれ幅の範囲にクロスカット長(40mm×2本=80mm)を乗ずることにより、ふくれ面積に変換して用いた。

ふくれ面積の経時変化を図-14に、劣化度評価結果を表-8に示す。C塗装系に関しては、追加実験の結果も併せて示す。図-14は見やすいように実験日数をわずかにずらして平均値(M)と標準偏差(S)を示している。

表-8に評価結果をまとめたが、RN値が2の範囲は広く、この評価結果だけを見てどれも同程度の劣化を示したとはいえない。よって、表-8の評価結果は一般的な劣化程度との比較評価として考え、以後は図-14の経時変化を用いて劣化程度を考察することとする。

図-14から、素地調整別に平均ふくれ面積を見てみると、1種ケレンでは追加実験 $C < I < A < C$, Bの順に、3種ケレンでは $A < B$, $C < I$ の順に、4種ケレンでは $B < I < A < C$ の順にふくれ面積が大きくなった。図-15に示す本研究室で過去に行ったC-2塗装系新規塗装のふくれ面積の実験結果と今回追加実験をしたC塗装系の結果を比較すると、よく整合していることが分かる。よって、有機ジンクリッチペイントを塗ったC塗装系ではふくれ面積が非常に大きくなったが、無機ジンクリッチペイントを使用したC塗装系では従来の知見通り高い防錆性能を示したことが確認できた。稲葉・糟谷²⁰⁾による重防食塗装系の暴露試験では、数十種類の塗装系を用いた供試体を製作している。そのうちの、有機ジンクリ

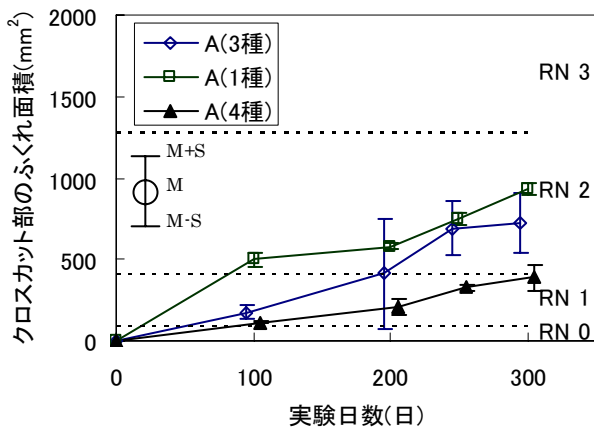


(a) レーザー深度計 (b) 目視

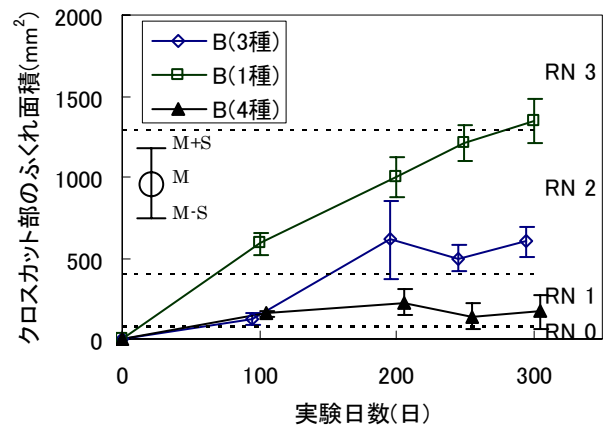
図-13 レーザー深度計と目視によるふくれの範囲

表-7 ふくれ面積による劣化度評価

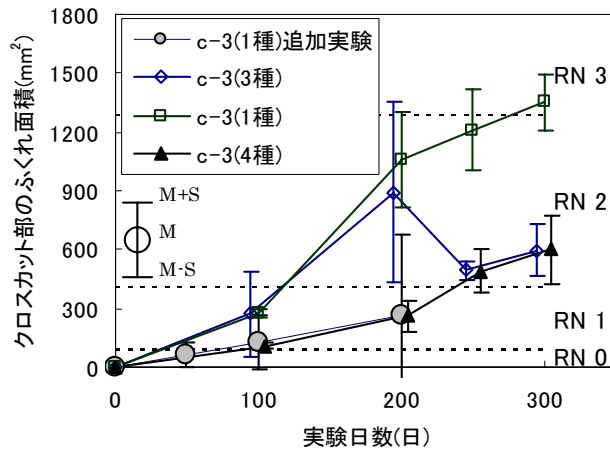
評価点 (RN)	ふくれ幅 W (mm)	ふくれ面積 A (mm ²) $W \times 80\text{mm}$
3	$W \leq 1.0$	$A \leq 80$
2	$1.0 < W \leq 5.0$	$80 < A \leq 400$
1	$5.0 < W \leq 16.0$	$400 < A \leq 1280$
0	$16.0 < W$	$1280 < A$



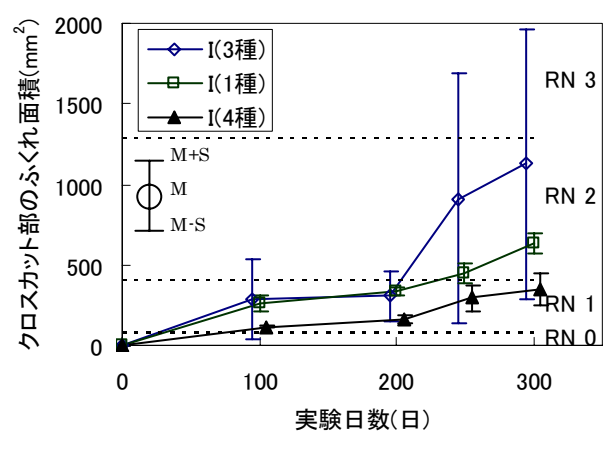
(a) A 塗装系



(b) B 塗装系



(c) C 塗装系

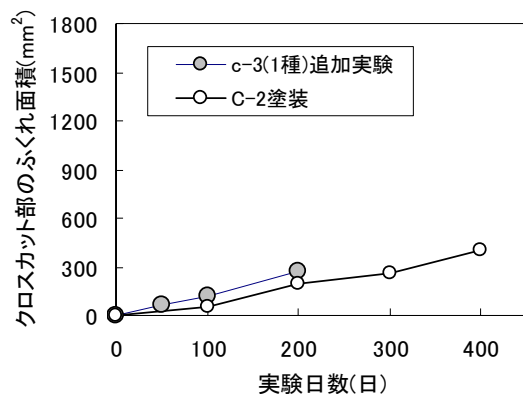


(d) I 塗装系

図-14 クロスカット部のふくれ面積

表-8 ふくれ面積評価結果

	A	B	C	I
1種	2	3	3, 1 (追加実験)	2
3種	2	2	2	2
4種	1	1	2	1


図-15 過去の実験結果¹⁹⁾

ッチペイントを施した供試体と無機ジンクリッチペイントを施した供試体の暴露試験 10 年後の発錆面積を比較すると、有機ジンクが約 1.5 倍となる結果を得ている。この傾向は本研究の結果と一致しており、今回の実験結

果が特殊な例ではないことが分かる。

一般に、橋梁新設時に行われる新規塗装の防錆性能は A 塗装系<B 塗装系、及び A 塗装系<I 塗装系<C 塗装系となる。維持管理時に行われる塗替え塗装では、素地調整が劣化程度により異なり、その素地調整状態に対する塗料防錆性能の敏感度は下塗り塗料により異なることが知られている²¹⁾。素地調整程度により塗料の相性が異なるため、新規塗装と塗替え塗装の防錆性能は別物であると考えるべきである。塗替え塗装を想定した今回の実験では、ふくれ面積により劣化度を評価すると、3 種ケレンでは I 塗装系が、4 種ケレンでは C 塗装系が若干高い劣化度となった。また、A 及び B 塗装系では、3 種ケレンより 1 種ケレンの劣化度が高くなった。よって、C 及び I 塗装系については塗替え塗装の防錆性能は新規塗装より若干劣る可能性があること、A 及び B 塗装系については、発錆量が多く 1 種ケレンを施した供試体より、残存活膜が多く塗替え後の膜厚が大きくなる 3 種ケレンや 4 種ケレンを施した供試体のほうが低い劣化度となることがあることが分かった。

ここまでは、ふくれ面積の平均値を用いて議論したが、図-14 より 3 種ケレンの結果が非常にばらつくことは明らかである。これは外観変化の考察において述べたよう

に、素地調整程度のばらつきに起因している。このばらつきを定量的に評価するために、素地調整後の鋼露出面積とふくれ面積の関係を確認した。鋼露出面積を検討する範囲は、図-4 に示したクロスカット部(70×70mm)と図-16 に示す 20×34mm の範囲の 2 パターンを行った。しかし、どちらの測定範囲においてもふくれ面積と鋼露出面積の相関性は低かった。

次に、図-16 の測定範囲において、鋼露出部に加え、鋼に接している最下層の下塗り塗料が露出している面積も含めた面積を対象とし、これとふくれ面積との関係を見た。その結果を図-17 に示す。図-17(a)は全塗装系の 100 日、200 日、250 日、300 日経過時のふくれ面積と各供試体の塗装前の鋼露出部面積と下塗り露出面積を足し合わせた面積(以後、露出面積と称す)をプロットしている。この図から、クロスカット下の局所的な範囲に露出面積が多く存在すると、ふくれ面積が増加し、その傾向は実験日数が長くなるにつれ大きくなることが分かった。

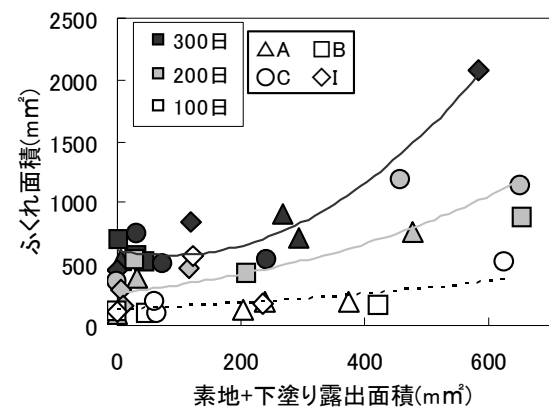
3 種ケレンでは下塗りとして、A 及び B 塗装系では鉛系錆止ペイント 1 種を、C 及び I 塗装系では変性エポキシ樹脂塗料をそれぞれ採用している。鋼露出部に塗られる下塗り塗料の種類で分けて、図-17(b)及び図-17(c)に示す。この図から、鉛系錆止ペイント 1 種はふくれ面積の露出面積に対する依存性は低い、変性エポキシ樹脂塗料は依存性が高いという特徴が得られた。以上から、変性エポキシ樹脂塗料は露出面積が大きい部分に傷が入ると特に劣化速度が速くなることが分かった。

さらに素地調整後の膜厚を確認することにより、これらの関係を詳しく調べた。膜厚の測定は塗替え塗装を行う前に(素地調整を施した後)、図-18に示す12点において行った。今回は12点のうち[1]～[9]の平均膜厚と、クロスカットの真下である[5]の膜厚を用いて、これらとふくれ面積の関係を確認した。その結果を図-19に示す。この結果、図-19(a)に示した[1]～[9]の平均膜厚とふくれ面積にも若干相関性が見られるが、図-19(b)に示した[5]

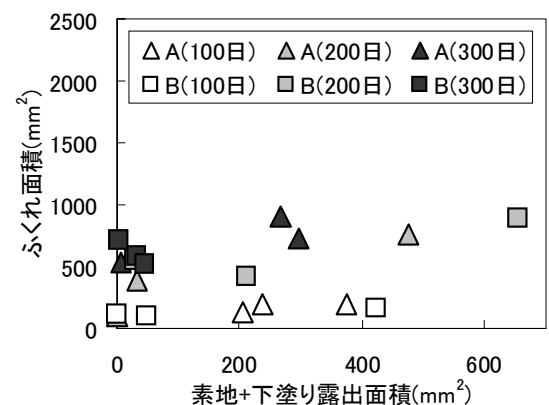
の膜厚ではより明確な相関性が見られた。このことから、ふくれ面積は傷が入った部分の膜厚がどの程度残存しているのかに依存し、この膜厚のばらつきが3種ケレンのふくれ面積のばらつきの大さきの原因となっていることが分かった。さらに、鋼が露出した部分に傷が入るとふくれが広がりやすく、特にC及びI塗装系のような下塗りに変性エポキシ樹脂を採用している塗装系では塗膜の劣化速度が著しく早くなることが分かった。

(6) 塗替えを行わない供試体の実験結果

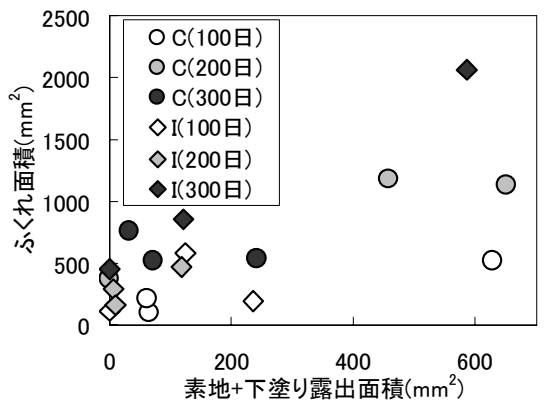
塗替えを行わずにそのまま供用し続けた場合を想定し



(a) 全塗装系



(b) A 及び B 塗装系



(c) C 及び I 塗装系

図-17 ふくれ面積と鋼露出+下塗り露出面積の関係

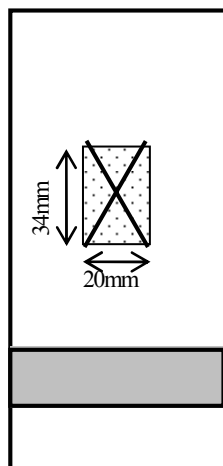


図-16 面積測定範囲

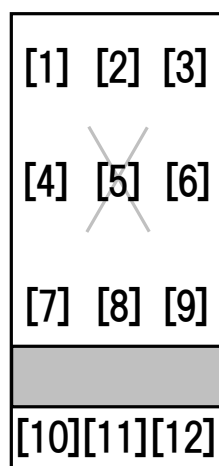


図-18 膜厚測定位置

た供試体の外観変化を、図-20に示す。図-20(a), (b)は劣化度が大きい部分と小さい部分から切り出した供試体である。このように、下塗りが露出している部分からさびが発生するが、図-20(b)において、初期状態では健全と見られる部分からもさびが進展している。

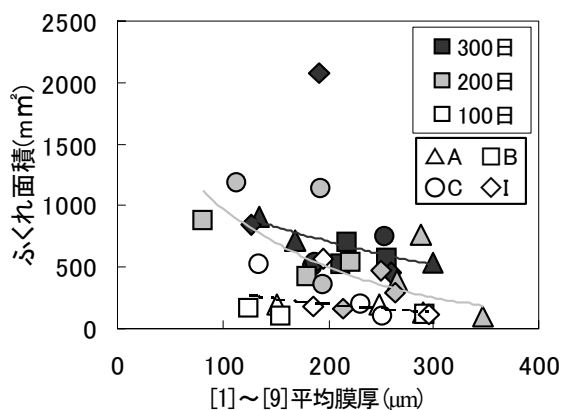
無塗替え供試体全6体のふくれ面積の経時変化を図-21に示す。ふくれ面積の進行具合は、初期の発錆状態に依存するが、ふくれ面積の増加は供試体により差がある。初期状態でふくれ面積が10%を超えているものは、200日を越えるとふくれ面積は約10%以上増加している。初期状態でふくれ面積がほとんど無い供試体の場合、200日を越えてもほとんどふくれ面積が増加しない供試体もあったが、多くは通常の塗替え限界の5%を超えた。

5. 塗替え時期の推定

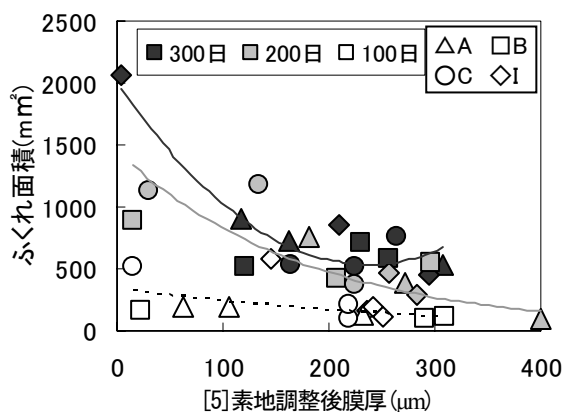
4.で得られた塗替え塗装鋼板の腐食劣化特性を考慮して、異なる素地調整程度と塗替え塗装系を考慮した塗替え時期の推定方法を検討する。

(1) 劣化曲線の作成

鋼道路橋塗装・防食便覧¹⁾では塗替え時期の判定を、



(a) [1]~[9]の平均膜厚



(b) [5]の膜厚

図-19 ふくれ面積と膜厚の関係

さびとはがれの4段階評価に基づいて行うこととしているが、評価の基準に関する定量的な記述はされておらず、現状では鋼橋の維持管理を行う事業主体ごとに基準を定めている²⁾。塗膜の劣化には、さびやはがれの他に光沢度の低下、ふくれ、われ、変退色、汚れ、付着力の低下などがあり、実際の鋼橋ではこれらが複合したかたちで劣化が進行する。よって、これらの劣化を全て点検調査し塗替え時期を判定することが望ましいが、点検作業が複雑になるなどの問題点もあり、困難であるのが実状である。

文献 23)では、これらを考慮して、塗替えの判定基準はさびの発生程度を主体に考え、塗替えの目的に応じてその他の劣化程度を加味することにより判定を行うことが合理的であるとしている。国土交通省においても、防錆面を重視した判定基準はさびの発生率を基本的な目安としている²⁾。また、日本道路公団ではさび面積率がおよそ3%に達した時点を塗替え時期と判断して塗替え工事を行っている⁹⁾。鋼構造物塗膜調査マニュアル¹⁷⁾では、表-9に示すように錆の発生面積により評価点を具体的に示している。ここで述べた「さびの発生面積率」は、塗膜上から確認できる見かけのさび面積である。

以上を踏まえて、本研究では劣化曲線をふくれ面積の経時変化により作成した。数式モデルは、西村・島田²⁴⁾により鋼構造物鋼構造物塗膜の長期劣化挙動評価への適用性について理論的に検証され、初期段階の塗膜劣化面

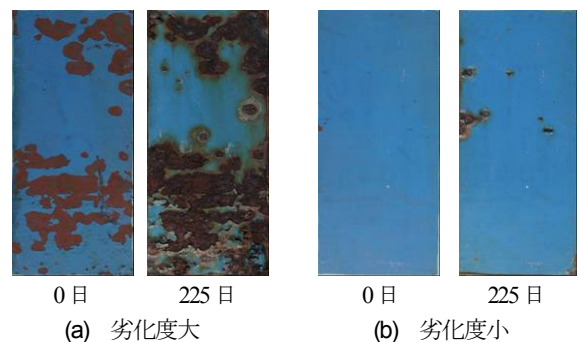


図-20 無塗替え供試体の外観変化

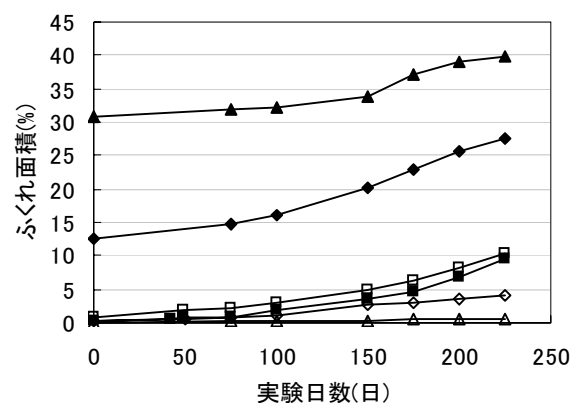


図-21 無塗替え供試体のふくれ面積の経時変化

表-9 鋼構造物塗膜調査マニュアル JSS IV03-2006 のさび評価基準

評価点 (RN)	発生状態	
	発生面積(%)	外観状態
0	$X < 0.05$	さびが認められず、塗膜は健全な状態。
1	$0.05 \leq X < 0.5$	さびがわずかに認められるが、塗膜は防食機能を維持している状態。
2	$0.5 \leq X < 8.0$	さびが顕在化し、塗膜は一部防食機能が損なわれている状態。
3	$8.0 \leq X$	さびが進行し、塗膜は防食機能が失われている状態。

積率から長期間の劣化を推定することが可能であるとされている Gompertz 曲線を用いた。Gompertz 曲線は次式により表される。

$$y_t = K \cdot a^{b^t} \quad (1)$$

ここで、 y_t は劣化面積、 t は経過日数、 K は全面劣化時の面積であり、定数 a 、 b は $0 < (a, b) < 1$ とする。本研究では、 K を図-4 に示したクロスカット部の面積($70 \times 70\text{mm}$)と仮定した。

4. において述べたように、3 種ケレンのふくれ面積は塗替え前の素地調整程度に依存するため、ばらつきが非常に大きい。そこで、より精度の高い劣化曲線を作成するために、3 種ケレンの結果を素地調整後の膜厚により 2 つに分ける作業を行った。

まず、4 種ケレンのふくれ面積と素地調整後の膜厚との関係を図-22 に示す。ここでの膜厚は、ふくれ面積と相関性の高かった図-18 に示す測点[5]の値である。この図から、4 種ケレンではクロスカット下における素地調整後の膜厚が $250\mu\text{m}$ 以上で分布していることが分かる。そこで 3 種ケレンにおいても、図-23 に示すように、クロスカット下の素地調整後の膜厚が $250\mu\text{m}$ 以上確保できている供試体に関しては 4 種ケレンとみなし、膜厚 $250\mu\text{m}$ を境として、これ以上のデータを 4 種ケレンに含めてふくれ面積の経時変化を再度プロットして、劣化曲線を求めた。作成した各塗装系の素地調整別劣化曲線を図-24 に示す。

(2) 塗替え時期の推定方法

伊藤ら²⁹⁾により、裸鋼板の腐食による板厚減少量に基づいて、S6 サイクルを条件とした環境促進実験と国内 31 箇所で行われた屋外暴露試験との相関性、すなわち環境促進実験と実環境との相関性に関して、式(2)の促進倍率 A_c で表すことを提案している。実験日数に促進倍率 A_c を掛けると実環境における日数が算出される。

$$A_c = 9.14 W_s^{-0.62} \quad (2)$$

ここで、 W_s は暴露試験地の飛来塩分量(mdd)である。また、金・伊藤²⁰⁾により、塗装鋼板においても式(2)が適用できることも示されている。本実験においても S6 サイ

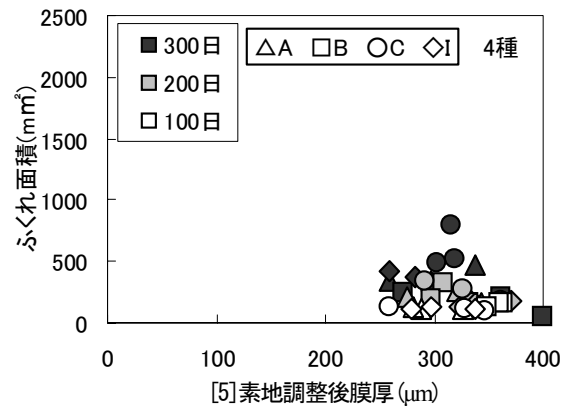


図-22 4 種ケレンのふくれ面積と膜厚の関係

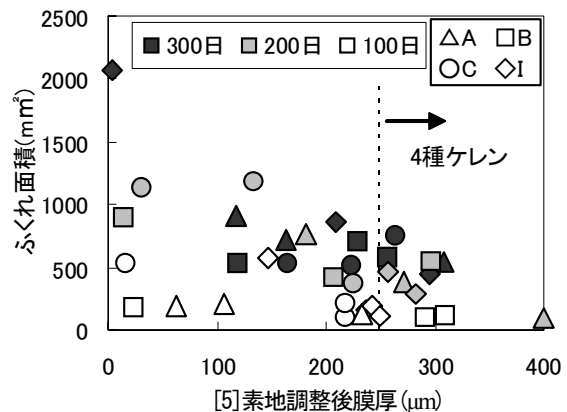


図-23 3 種ケレンの膜厚による分類

クル条件を採用して環境促進実験を行っているため、式(2)に鋼橋建設地の飛来塩分量を代入することにより促進倍率 A_c を求める。

塗替え時期の推定は図-25 に示す流れで行うことができる。図-25 に示すように、劣化曲線を用いて塗替え時期を推定するには、何%の発錆率で塗替えを行うかを決める必要がある。塗替え時期の発錆率は各機関ごとに目安を定めているが、a) 発錆率を算出する際の基準面積をどう仮定するか、b) クロスカット部からのさびで評価すると条件が厳しい可能性がある、などの問題があり、実際に塗替え時期を推定するには更なる検討が必要である。

6. 結論

本研究では、実際に36年間使用された鋼橋から取り出した塗装鋼板を用いて、素地調整の程度を考慮した塗替え塗装鋼板の環境促進実験を行い、各種の塗替え塗装系の腐食劣化特性を比較検討した。そして、ふくれ面積により各々の腐食劣化曲線を求め、塗替え時期の推定法を提案した。

本研究により得られた主な結果を以下に示す。

- 1) 外観変化を経時的に評価した結果、クロスカット部の防錆性能は鋼に接触している下塗り塗料の防錆能

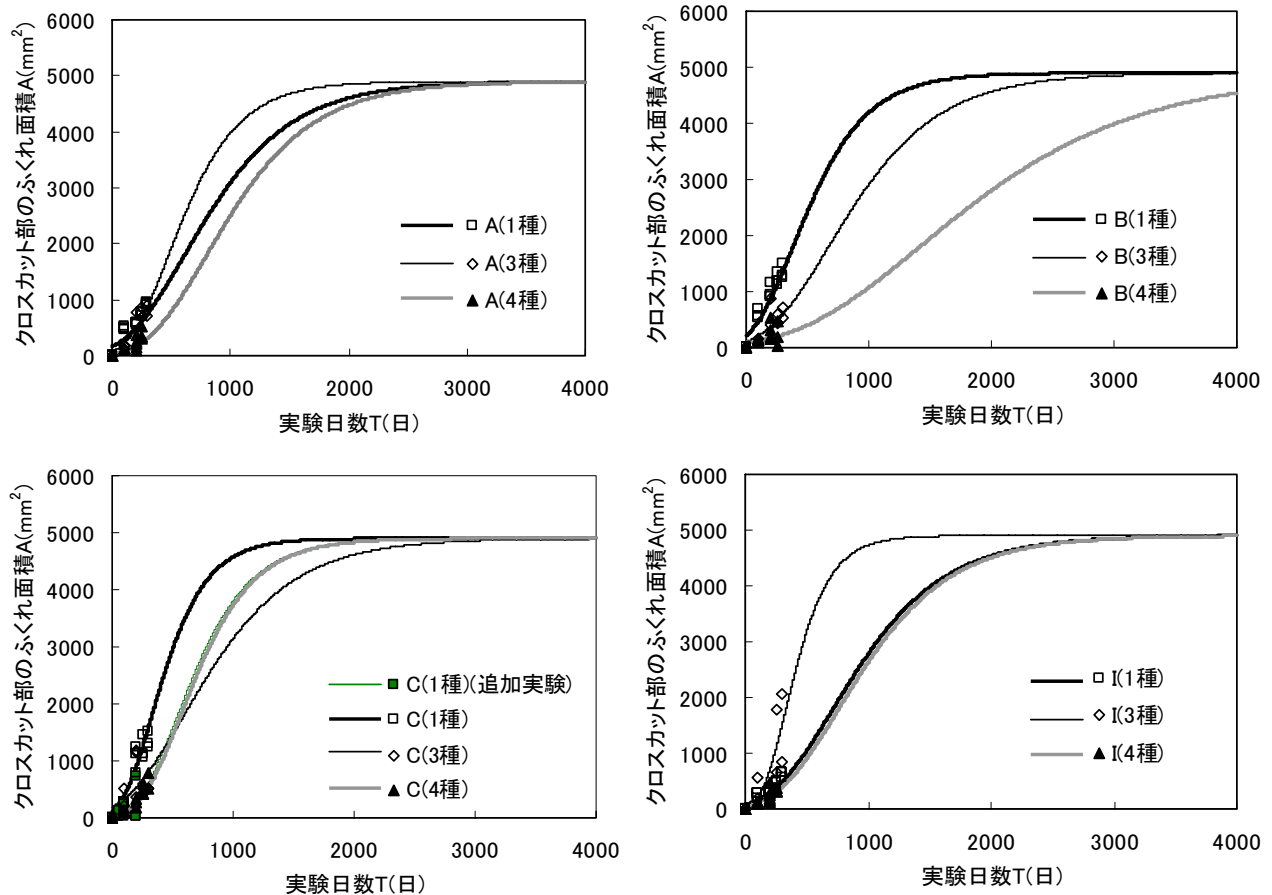


図-24 劣化曲線(塗替え前膜厚 250 μ m以上を4種とした場合)

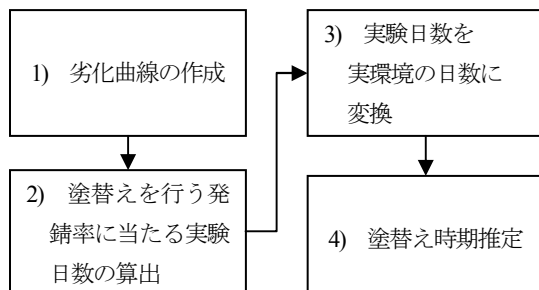


図-25 塗替え時期推定の流れ

に依存する傾向にあることを明らかにした。特に、3種ケレンでは塗装前の素地調整程度によりクロスカット部からのふくれの広がり方が異なることを示した。

- 2) 光沢度保持率を経時的に評価した結果、 $A < B < C, I$ 塗装系の順に高い保持率を示したが、どの供試体においてもほぼ良好であった。
- 3) 交流インピーダンスにより劣化度を評価した結果、1種ケレンを行ったA及びI塗装系で劣化を示した。しかし、I塗装系に関しては初期値とほとんど変わっていないため、一般部はほとんど劣化していないと評価した。
- 4) クロスカット部からのふくれ面積では、C及びI塗装

系については塗替え塗装の防錆性能は新規塗装より若干劣る可能性があること、A及びB塗装系については、発錆量が多く1種ケレンを施した供試体より、残存活膜が多く塗替え後の膜厚が大きくなる3種ケレンや4種ケレンを施した供試体のほうが低い劣化度となることがあることが分かった。

- 5) クロスカットからのふくれ面積とクロスカットを入れた部分の残存塗膜厚との相関性が高いことを明らかにした。
- 6) ふくれ面積の経時変化を用いて3種類の素地調整と4種類の塗装系を組み合わせた12通りの劣化曲線を作成し、これらを用いてそれぞれの塗替え時期を定量的に推定する方法を検討した。

謝辞：本研究を行うにあたり、資料提供や有用なアドバイスを頂きました。関西ペイント、トピー工業の技術者の方々に深くお礼申し上げます。なお、本研究の一部は、平成17年度文部科学省科学研究費補助金・基礎研究(B)(2)(研究代表者：伊藤義人、課題番号：1560237)として研究補助を受けて行ったものである。また、(社)鉄鋼連盟からの研究補助も受けた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本道路協会：鋼道路橋塗装・防食便覧，2005.
- 2) 日本道路公団：構造物施工管理要領，1997.
- 3) 林田 宏，田口史雄，嶋田久俊：鋼橋塗装の耐用年数及びライフサイクルコストに関する研究，北海道開発土木研究所月報，No.629，pp.18-26，2005.
- 4) 日本道路協会：鋼道路橋塗装便覧，1990.
- 5) 守屋 進：道路橋塗装の耐久性向上に関する研究，名古屋大学大学院博士論文，2006.
- 6) 神谷 誠，藤原 博，三宅 将：鋼橋塗装の長期防食性能の評価に関する研究，日本道路公団試験研究所報告，Vol.31，pp.65-97，1994.
- 7) 藤原 博，菅野照造：鋼橋の塗膜劣化と塗膜下の相関性に関する研究，土木学会論文集，No.537/I-35，pp.167-181，1996.
- 8) 藤原 博，田原芳雄：新設鋼道路橋に適用する重防食塗装系に関する研究，土木学会論文集，No.563/I-39，pp.23-34，1997.
- 9) 藤原 博，三宅 将：鋼橋塗膜の劣化度評価と寿命予測に関する研究，土木学会論文集，No.696/I-58，pp.111-123，2002.
- 10) Cleveland Society for Coatings Technology Technical Committee: Correlation of accelerated exposure testing and exterior exposure site, *Journal of Coatings Technology*, Vol.66, No.837, pp.49-67, 1993.
- 11) Funke, W.: Problems and progress in organic coatings science and technology, *Progress in Organic coatings*, Vol.31, pp.5-9, 1997.
- 12) 片脇清士：橋と塗装，社団法人日本鋼橋塗装専門会，1996.
- 13) 伊藤義人，金 仁泰，貝沼重信，門田佳久：素地調整が異なる塗装鋼板の腐食劣化に関する基礎的研究，土木学会論文集，No.766/I-68，pp.291-307，2004.
- 14) 日本鋼構造協会：鋼橋塗膜の評価技術(その 2. 塗膜劣化の経時変化モデルと寿命予測の検討)，1998.
- 15) (株)関西ペイント：KHD システムガイドブック(プラント塗装)，2002.
- 16) 電気事業連合会：水門鉄管塗替指針，1969.
- 17) 日本鋼構造協会：鋼構造物塗膜調査マニュアル JSS IV-03，2006.
- 18) 日本鋼構造協会：鋼橋塗膜調査マニュアル JSS IV-03，1993.
- 19) 金 仁泰，伊藤義人，肥田達久，小山明久，忽那幸浩：環境促進実験を用いた鋼橋塗装系の腐食劣化評価，構造工学論文集，Vol.52A，pp.803-812，2006.
- 20) 稲葉泰一，糟谷 誠：亜熱帯における重防食塗装系の暴露防食性試験，防錆管理，Vol.34，No.2，pp.56-64，1990.
- 21) (株)大日本塗料：塗装による重防食への手引き，1994.
- 22) 佐々木慎一，田口史雄，嶋田久俊：鋼橋塗装の塗膜劣化に関する調査，北海道開発土木研究所月報，No.594，pp.13-23，2002.
- 23) (株)関西ペイント：KHD システムガイドブック(橋梁塗装塗替え編)，2002.
- 24) 西村 昭，島田喜十郎：鋼構造物塗膜の長期劣化挙動の理論解析，橋梁と基礎，No.5，pp.17-21，1985.
- 25) 伊藤義人，岩田厚司，貝沼重信：鋼材の腐食耐久性評価のための促進実験とその促進倍率に関する基礎的研究，構造工学論文集，Vol.48A，pp.1021-1029，2002.
- 26) 金 仁泰，伊藤義人：円形素地露出部を持つ腐食鋼板の腐食劣化評価に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.51A，pp.1069-1079，2005.

(2007. 1. 9 受付)

CORROSION DETERIORATION CHARACTERISTICS OF VARIOUS REPAINTED STEELS CONSIDERING ACCELERATED EXPOSURE TEST RESULTS

Yoshito ITOH, Saori TSUBOUCHI and In-Tae KIM

This study performed an accelerated exposure test for 300 days to obtain the steel bridge repainting cycles quantitatively and examined corrosion characteristics of various repainted steel with different surface preparations. Test specimens used in this study were cut out from the bridge girder used 36 years, and applied 3 types of surface preparation and 4 kinds of repainting systems. Each 3 specimens were taken out from the facility every 100 days, and evaluated the deterioration level by measuring brightness retention rate, blistering area and so on. By comparing the deterioration level of three types of surface preparation and 4 kinds of repainting systems, the repainting cycles of different patterns of specimen were obtained.