

環境促進実験を用いた鋼橋塗装系の腐食劣化評価

Accelerated corrosion tests for evaluating corrosion degradation of steel bridge painting systems

金 仁泰*, 伊藤義人**, 肥田達久***, 小山明久****, 忽那幸浩*****

In-Tae KIM, Yoshito ITOH, Tatsuhisa HIDA, Akihisa KOYAMA, Yukihiro KUTSUNA

*博(工), 名古屋大学大学院助手, 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)

**工博, 名古屋大学大学院教授, 工学研究科社会基盤工学専攻(同上)

***工修, (株)関西空港(〒598-0000 大阪府泉佐野市泉州空港北)(当時名古屋大学大学院学生)

****工修, (株)横河ブリッジ技術本部技術研究所(〒261-0002 千葉県千葉市美浜区)

*****日本道路公団中部支社(〒465-0045 名古屋市名東区姫若町57)

This study examined to evaluate the corrosion durability of painting systems for steel bridges. Accelerated corrosion cyclic tests conforming to JIS K5621 were carried out on three types of the painting systems, i.e. A-painting system for mild condition, C-painting system for severe corrosion condition, and a newly developed heavy duty I-painting system. Cross-scribed lines reaching the steel substrate were mechanically made in the painted surface, and uncoated region of 20×70 mm was also introduced in the lower part of the test specimens. The three types of painted specimens were exposed into the S6-cycle corrosion environments during 100, 200 and 400 days. Blistering area, tensile adhesion, glossiness, appearance and surface geometry of the paintings were measured at the exposure times of 0, 100, 200, 300 and 400 days. After removing painting films and corrosion productions by chemical treatment, the thickness loss of steel substrate was also measured. From the test results, the corrosion degradation degree of the three types of bridge painting systems was quantitatively evaluated.

Key Words: Steel bridge, corrosion, accelerated corrosion test, painting, corrosion degradation

キーワード: 鋼橋, 腐食, 腐食促進実験, 塗装, 腐食耐久性

1. はじめに

鋼橋の防食には、塗装が最も一般的であり、めっきや溶射といった金属皮膜や無塗装耐候性鋼材も用いられている¹⁾。鋼橋防食法の耐腐食性能は、実橋の劣化調査や大気暴露試験により求められ、劣化データを得るまでに多くの時間を必要とするという欠点があり、この手法は新しい防食法の開発、性能検証および実橋への適用は容易ではない。また、この手法は実橋の設置場所および大気暴露試験地の腐食環境条件に対してのみ劣化情報が得られるため、異なる環境へはすぐには適用できない。この手法を代替する実験方法として、材料の分野や自動車産業を中心として短い期間でその劣化データや相対的性能検証が可能な様々な環境促進実験法が開発されてきた^{2,3)}。

環境促進実験による鋼構造部材の劣化特性や性能の検討には、実環境下の劣化現象の再現性および同じ劣化度が得られるまでの環境促進実験期間と実環境下の露出期間との相関性が最も重要である。そこで、著者らは、塗装の環境促進実験法として JIS K5621 に規定されており、また、2ヶ月間の促進実験と3年間の大気暴露実験との相関性が

高い⁴⁾結果が得られている S6 サイクル促進実験条件を選択し、様々な構造部材の腐食劣化特性を検討してきた⁵⁻⁷⁾。

その中で、裸鋼板を用いた1,2,3,4,5ヶ月間の促進実験結果と1,3,5,7,9年間の屋外暴露実験結果⁸⁾(旧土木研究所)との相関性を検討し、飛来塩分量による S6 サイクルの促進倍率を求めた。全国を飛来塩分量で区分し、それぞれの環境下における板厚減少量が推測できることを提案した^{5,7)}。

本研究では、A, C, I 塗装系の鋼橋用塗装系3種類を対象とした100日間、200日間および400日間の S6 サイクル腐食促進実験を行った。本実験では、塗膜のふくれ面積(さび面積)、光沢度、付着力、インピーダンスの測定および外観観察を行い、塗膜の劣化の経時変化を検討した。また、これらの劣化度評価項目に基づいて、A, C, I 塗装系の劣化度評価や相対的な耐腐食性能を比較・検討した。さらに、本実験結果を実環境下に適用する方法についても検討した。

2. 実験手法

2.1 対象塗装系

本研究では、鋼橋用塗装系として、一般環境(田園、山間地帯)に適用する A 塗装系、厳しい腐食環境(海岸地帯)に適用する C 塗装系の塗装鋼板を用いて腐食促進実験を行った¹⁾。また、C 塗装系と比較して低コストながら A 塗装系に比べて高い耐久性を持っているといわれ、JH(日本道路公団)で用いられるようになった I 塗装系の促進実験も行った。I 塗装供試体では、中・上塗りが異なる 3 種類の I 塗装系を用いた。

2.2 実験供試体の製作

製作完了後の実験供試体(名古屋大学型ウェザロ供試体)⁹⁾の形状および寸法を図-1に示す。実験供試体の製作工程の各段階における具体的な内容を以下に示す。

- ① JIS G3106 溶接構造用圧延鋼材 (SM490A) から縦 150×横 70×板厚 9mm の鋼板を 3 種類の I 塗装系を含む 5 種類の塗装系に対して各 20 体ずつ合計 100 体を製作した。また、無塗装鋼板供試体用の 15 体も製作した。
- ② 鋼板をブラスト処理することで素地調整を行った。素地調整後の表面粗度(R_aJIS)は 53.5~107.8 μm であった。
- ③ A, C, I 塗装系を用いて塗装処理を実施した(各 20 体)。その工程を表-1 に示す。図-1に示した素地露出部

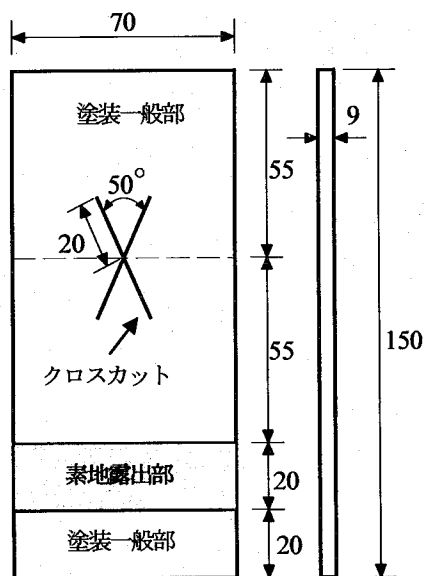


図-1 供試体の形状および寸法(単位: mm)
(名古屋大学型ウェザロ供試体)

は、塗装前にマスキングテープを貼って、塗装処理後テープを取り除くことによって供試体の下部に幅 20mm の素地露出部を設けた。

- ④ 供試体の上部中央部には、下地鋼板に到達する深さでエンドミル機械加工を行いクロスカット(線幅 1mm, 線長 40mm)を設けた。

クロスカット部は、塗膜に傷が入った場合やコバ部などの塗膜厚が薄いと予想される部位に対する腐食劣化進行状態を把握するためであり、通常の塗装鋼板などの腐食実験でよく用いられている。また、本研究では、図-1に示すように供試体の下部に、幅 20mm の素地鋼板を露出させた⁹⁾。これは、クロスカットで想定した傷より大きい塗膜の損傷が発生した場合や耐候性鋼材を使用した鋼橋において桁端部を部分的に塗装した場合の塗装部と無塗装部の境界部などを想定している。下地鋼板の化学成分を表-2に示す。

2.3 腐食促進実験条件

本研究では、腐食促進実験としては JIS に規定されていることや実環境との相関性が高いという既存の研究成果⁴⁾に基づいて、JIS K5621 に規定されている S6 サイクルの腐食促進実験条件を用いた。このサイクルは、図-2に示すよう 5%濃度の塩化ナトリウム水溶液の噴霧、95%の湿潤および温度が異なる 2 種類の乾燥サイクルで構成されている。

本実験では、実験槽内の寸法が幅 2,000×奥行 1,000×高さ 500mm であり、最大設置枚数がウェザロサイズ供試体(150×70×6mm)で 188 枚である大型複合サイクル試験機(スガ試験機社製 CY-200S)を用いた。実験供試体は、JIS で規格化されている「鉛直線に対し 20±5°(JIS Z 2371)」に従って、鉛直方向から保持角 15 度で、試験槽内で供試体の配置位置による腐食環境の誤差が 10%以内であると検証された範囲内に配置した。さらに、約 25 日ごとに設置位置をローテーションし、供試体の配置位置による環境条件の違いの最小化を考えた。

実験期間は、実験開始後 100 日間、200 日間および 400 日間としてそれぞれ 3 体、3 体および 4 体の供試体を用いた。また、実験前の初期測定にも各 3 体の供試体を用い、各 20 体の塗装鋼板中各 13 体を本実験で使用した。ただし、比較のための無塗装鋼板供試体の場合には、実験期間を実験開始後 100 日間、200 日間、300 日間および 400 日間とし、各 3 体を用いた。

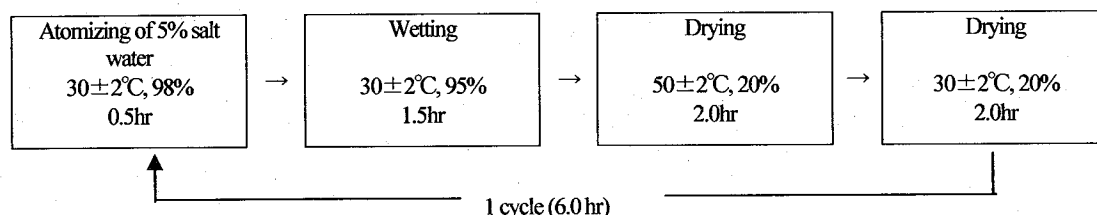


図-2 腐食促進実験の条件(S6 サイクル)

表-1 実験供試体の製作工程

防食法	防食処理	規格	塗料名	目標膜厚 (μm)	供試体数
A 塗装	素地調整	-	ブラスト処理 SIS-Sa2.5	-	20
	プライマー	JIS K5633 2種	長ばく形エッチングプライマー	15	
	2次素地調整	-	動力工具処理 SIS-st3	-	
	下塗り	JIS K5623~5 1種	鉛系さび止めペイント1種	35	
	〃	〃	〃	35	
	中塗り	JIS K5516 2種	長油系フタル酸樹脂塗料 (中塗り)	30	
	上塗り	〃	長油系フタル酸樹脂塗料 (上塗り)	25	
C 塗装	素地調整	-	ブラスト処理 SIS-Sa2.5	-	20
	プライマー	-	無機ジンクリッチプライマー	15	
	2次素地調整	-	ブラスト処理 SIS-Sa2.5	-	
	下塗り	-	無機ジンクリッチペイント	75	
	ミストコート	-	ミストコート	-	
	下塗り	-	エポキシ樹脂塗料 (下塗り)	60	
	〃	-	〃	60	
II 塗装: 薄膜形重防 食塗装 (ポリ ウレタン樹 脂上塗り)	中塗り	-	ポリウレタン樹脂塗料 (中塗り)	30	20
	上塗り	-	ポリウレタン樹脂塗料 (上塗り)	25	
	素地調整	-	ブラスト処理 SIS-Sa2.5	-	
	プライマー	JHS-P-23	機能性プライマー	17	
	2次素地調整	-	スリープブラスト SIS-Sa1	-	
	下塗り	JHS-P-06	有機ジンクリッチペイント	75	
	中塗り	JHS-P-20	ポリウレタン樹脂塗料 (中塗り)	30	
I2 塗装: 薄膜形重防 食塗装 (アク リル樹脂上 塗り)	上塗り	JHS-P-20	ポリウレタン樹脂塗料 (上塗り)	25	20
	素地調整	-	ブラスト処理 SIS-Sa2.5	-	
	プライマー	JHS-P-23	機能性プライマー	17	
	2次素地調整	-	スリープブラスト SIS-Sa1	-	
	下塗り	JHS-P-06	有機ジンクリッチペイント	75	
	中塗り	JHS-P-22	シリコン変性アクリル樹脂塗料 (中塗り)	30	
	上塗り	JHS-P-22	シリコン変性アクリル樹脂塗料 (上塗り)	25	
I3 塗装: 薄膜形重防 食塗装 (ふっ 素樹脂上塗 り)	素地調整	-	ブラスト処理 SIS-Sa2.5	-	20
	プライマー	JHS-P-23	機能性プライマー	17	
	2次素地調整	-	スリープブラスト SIS-Sa1	-	
	下塗り	JHS-P-06	有機ジンクリッチペイント	75	
	中塗り	JHS-P-21	ふっ素樹脂塗料 (中塗り)	30	
	上塗り	JHS-P-21	ふっ素樹脂塗料 (上塗り)	25	
裸鋼板	素地調整		ブラスト SIS-Sa2.5		15

合計 115

表-2 実験鋼材の化学成分(%)

鋼種	C	Si	Mn	P	S
JIS G3106 SM490A	0.16	0.37	1.44	0.01	0.001

2.4 測定項目および測定の流れ

本実験では、実験前、実験途中(100日、200日、300日)、実験終了後(400日)にクロスカット部と素地露出部を有する実験供試体の表面を対象として、外観観察(写真撮影)、塗膜厚、光沢度、インピーダンス、表面形状、付着力を測定した。また、100日間、200日間および400日間の実験終了後には、塗膜と塗膜下の腐食生成物を除去した後、下地鋼板の表面形状も測定した。

(1) 実験前の測定(初期測定)

実験前の供試体に対しては、塗膜厚、光沢度、インピーダンス、引張付着力、表面形状の測定や外観写真撮影を行った。塗膜厚測定には、(LZ-300C(株)ケツト製、分解度: 100μm未満±0.1μm, 100μm以上±1.0μm)を用いてクロスカット部および素地露出部から離れた供試体表面の

11箇所を測定した。光沢度測定には、GM-60の光沢計(ミノルタ社製)を用い、クロスカット上・下部の塗装一般部および素地露出部下部の塗装一般部の3箇所を3回ずつ測定した。塗装供試体の表面形状測定では、デジタル式ステージの上に供試体を載せてステージを設定間隔で移動させながら固定設置されたレーザ深度計((株)KEYENCE社製LE-4010、測定範囲±5mm、レーザスポット径φ30μm、分解能力0.1μm)の設定基準値からの距離を測定するレーザ深度計を用いた。測定範囲は、幅70×長さ150mmの供試体表面であり、0.3×0.3mmの間隔で測定した。塗膜の引張付着力測定にはアドヒージョンテスターCA-220(エルコメーター社製、測定レンジ: 0-22MPa)を用いた。

(2) 実験途中の測定

腐食促進実験中には、25日毎に供試体を取り出し、外

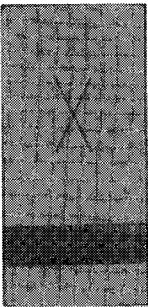
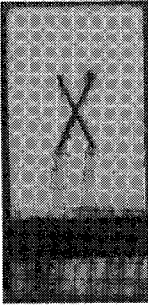
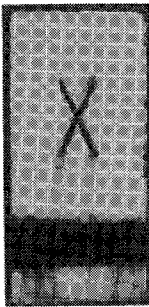
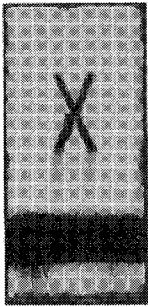
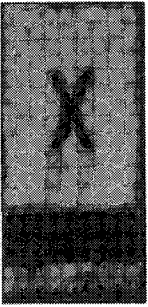
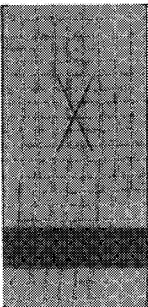
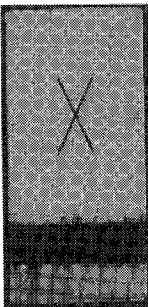
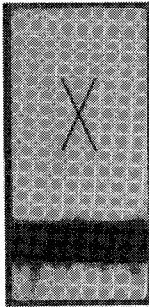
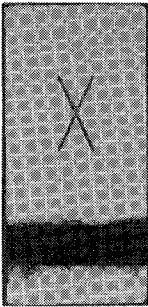
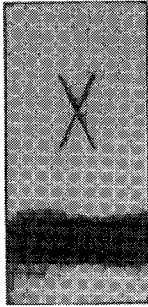
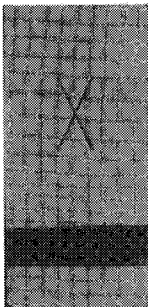
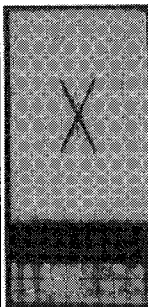
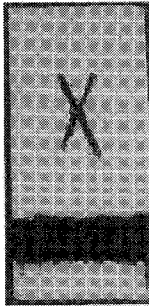
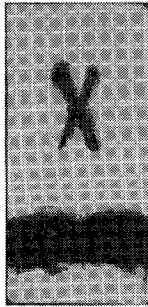
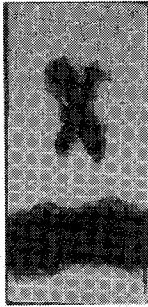
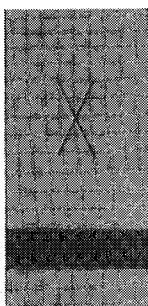
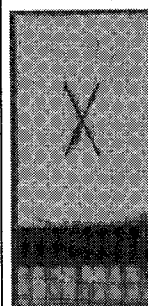
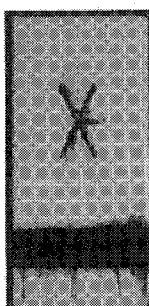
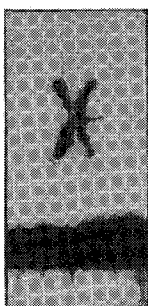
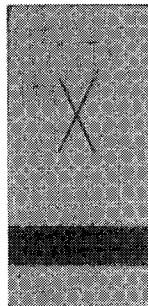
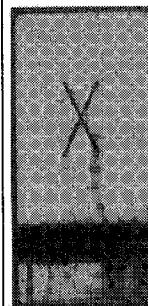
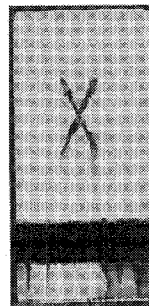
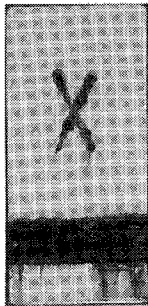
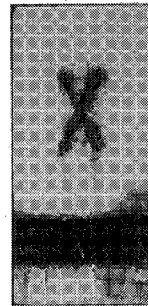
	実験前	100 日目	200 日目	300 日目	400 日目
(a) A 塗装					
(b) C 塗装					
(c) II 塗装(ポリウレタン)					
(d) II 塗装(アクリル)					
(e) I3 塗装(ふっ素)					

図-3 外観変化

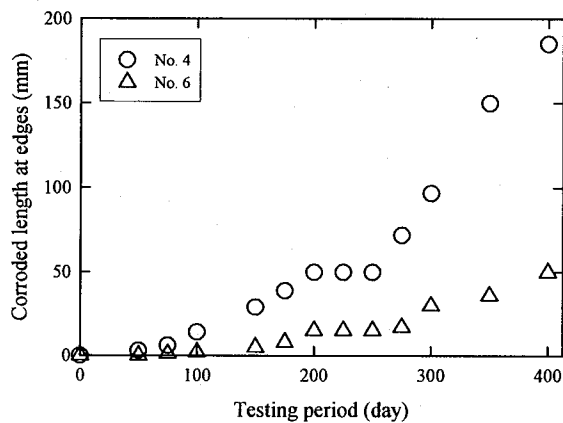


図-4 供試体の角部からの発錆長さ(A 塗装供試体)

視観察および写真撮影を行った。また、実験開始後 300 日目には、400 日間実験用の供試体 4 体を取り出し、塗膜厚、光沢度および表面形状を測定した。

(3) 実験終了後の測定

実験開始後、100 日目(各 3 体)、200 日目(各 3 体)、400 日目(各 4 体)にそれぞれの実験を終了し、実験供試体を取り出して、表面の付着塩分を除去した後、実験前と同様に塗装の塗膜厚、光沢度、インピーダンス、表面形状、引張付着力の測定および写真撮影を行った。また、塗膜と塗膜下の腐食生成物を除去後、下地鋼板の表面形状を測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 外観観察

実験終了期間に関係なく、25 日(100 サイクル)ごとに供試体を取り出して外観観察および写真撮影を行った。ここでは、その写真を用いて S6 サイクル腐食促進実験条件下における A, C, I 塗装鋼板の外観の経時変化を比較・検討する。各供試体の実験前、100 日、200 日、300 日および 400 日経過後の外観を図-3 に示す。

実験開始後 100 日目になるとクロスカット部や素地露出部の下地鋼板の露出部からさびが発生し、塗膜下を侵食することで塗膜のふくれが形成された。また、実験期間の経過とともに、塗膜下侵食が進み、塗膜ふくれ面積が大きくなった。A, C, I 塗装供試体のふくれ面積を比較すると、図-3(b) に示す C 塗装供試体のふくれ面積が最も小さいことが確認された。

実験前の上塗り塗装の色は、純白であったが、すべての A 塗装供試体からは薄い黄色に変色していくのが確認された。また、図-3(a) に示すように、A 塗装供試体中の 2 体(400 日間実験用の 4 体中 2 体(No.4 番と 6 番))においては、角部からさびが発生した。個別に発生さびは、図-4 に示すように供試体によって差があるが、角部に沿って進行し、隣り合うさびと合体しながら成長していった。これに対して、C および I 塗装供試体からは実験終了の 400 日目までに変色および角部のさび発生は確認されな

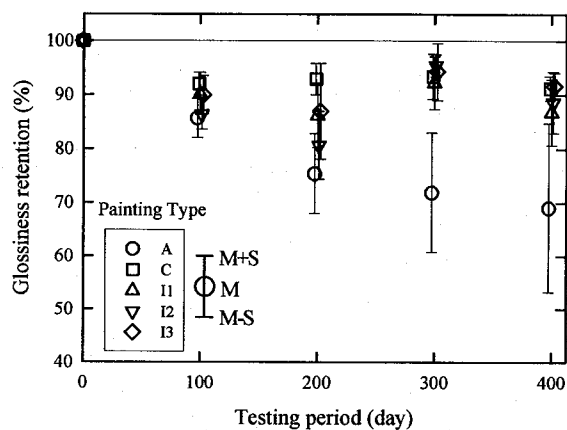
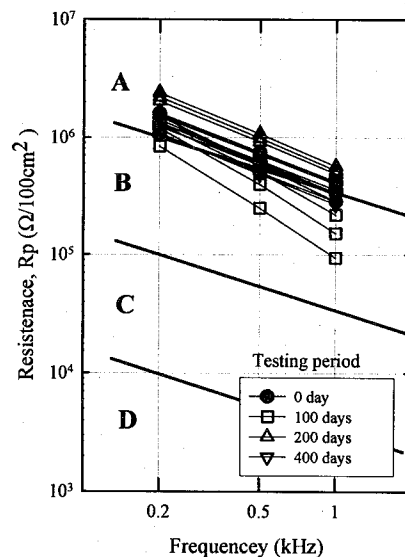
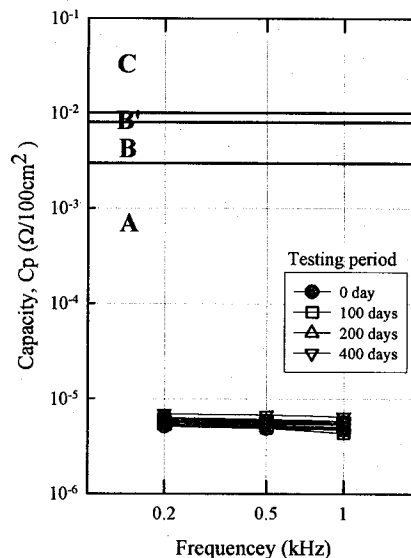


図-5 光沢保持率



(a) 交流抵抗値(R_p)



(b) 電気容量値(C_p)

図-6 A 塗装供試体のインピーダンス測定結果

った。

実験前後の一般部の塗膜厚の比較からは、塗膜厚の変化はすべての供試体で見られなかった。

3.2 塗膜の光沢保持率

光沢度および光沢保持率の低下は、塗膜表面の劣化が進むにつれて平滑度合いが失われることを表す一つの劣化指標である。本実験では、実験開始後 100 日目、200 日目、300 日目および 400 日目に塗膜の光沢度を測定した。測定光沢度から算出した光沢保持率(残存光沢度/初期光沢度×100%)の平均値(M)および標準偏差(S)を図-5 に示す。

A 塗装供試体の光沢保持率は、実験期間の経過とともに徐々に低下した。C 塗装供試体の場合、実験開始後 100 日目までは低下したが、その後若干増加してほぼ一定となった。I 塗装供試体では、200 日目までには低下して光沢保持率が最も小さくなるが、300 日目になると増加して 400 日目にはさらに若干低下した。C および I 塗装供試体に見られる光沢度保持率の低下後の増加は、塗膜表面の温度や湿度の変化などにより、表面の荒れた状態が融合して平滑性が回復するために生じるものと考えられている⁹⁾。実験開始後 400 日目の光沢保持率を比較すると、A 塗装供試体では 70%まで低下したが、C および I 塗装鋼板の場合には約 90%と大きな低下は見られなかった。

3.3 塗膜のインピーダンス

塗膜のインピーダンス測定は、塗膜の劣化度を定量的に評価する一項目として各周波数(通常、0.2, 0.5, 1.0kHz)に対する交流抵抗値(R_p)と電気容量値(C_p)の経時変化から、塗膜の劣化度を評価するものである⁹⁾。

本実験では、実験前、100 日目、200 日目および 400 日目の 0.2, 0.5, 1.0kHz に対する交流抵抗値(R_p)と電気容量値(C_p)を測定した。測定結果の例として図-6 に示す A 塗装供試体の測定結果からは、交流抵抗値(R_p)と電気容量値(C_p)ともに実験期間による大きな経時変化は得られなかった。C および I 塗装供試体からも A 塗装供試体と同様に実験前後の経時変化は得られなかった。つまり、400 日間の S6 サイクル腐食促進実験による A, C, I 塗装系の塗装一般部の劣化はないことが確認された。

図-6 中に示したインピーダンスの劣化等級 A, B, B', C, D は、後記の塗装鋼板の劣化度評価で用いる。

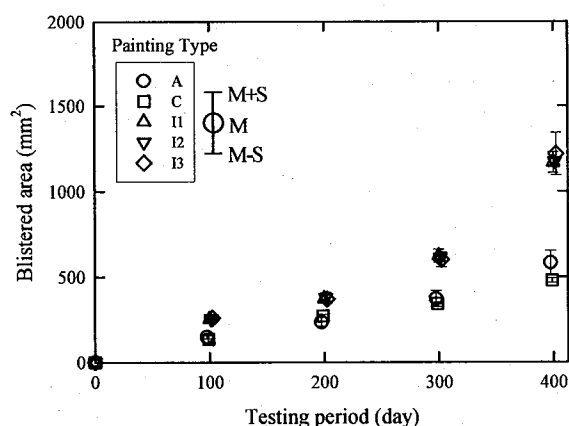
3.4 塗膜の引張付着力

塗膜の下地鋼板への付着性および塗膜の層間付着性を評価するために、垂直引張力のみによる付着力テスト(アドヒージョンテスト)を塗装一般部で行った。測定では、実験供試体ごとに 3 点を測定して、接着剤から破断したデータを除いて求めた平均付着力を表-3 に示す。A 塗装供試体の場合は、付着力テスト後に下塗り塗膜が残存しており、下塗り層間あるいは下塗りと中塗り塗膜の間から破断したと推測される。また、C および I 塗装供試体では、下地鋼板が見られ、塗膜と下地鋼板の間で破壊が生じたことが確認された。

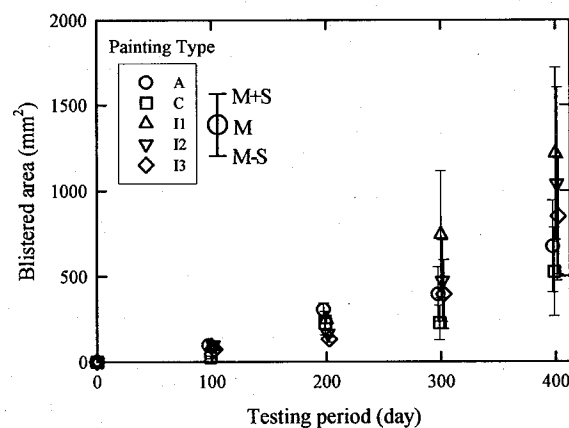
実験前後の付着力を比較すると、付着力の変化は見られなかった。C 塗装供試体では 3.3~4.6MPa と一番小さく、次に A 塗装供試体で 4.0~5.0MPa、I 塗装供試体で実験前の I2 塗装系の付着力(10.5MPa)を除いて約 14~17MPa の順に

表-3 引張付着力テスト結果

塗装系	付着力(MPa)			
	実験前	100 日目	200 日目	400 日目
A	4.0	4.8	4.3	5.0
C	3.9	4.6	3.3	3.8
I1	14.5	14.1	14.8	14.5
I2	10.5	16.3	15.7	15.7
I3	15.7	16.7	15.5	17.0



(a) クロスカット部からのふくれ面積



(b) 素地露出部からのふくれ面積

図-7 ふくれ面積の測定結果

大きくなった。ただし、この付着力は、塗膜のふくれが見られなかった塗装一般部のものであることに注意する必要がある。

3.5 塗膜のふくれ面積

傷や塗膜劣化などによる素地露出部からのさびの広がり評価するために、実験開始後 100 日目、200 日目、300 日目および 400 日目に供試体の表面形状を測定した。測定データを用いてクロスカット部および素地露出部からの塗膜ふくれ面積を算出し、それぞれの平均値(M)とその標準偏差(S)を図-7(a)および 7(b) に示した。

まず、図-7(a)に示すクロスカット部からのふくれ面積は、A, C 塗装供試体がほぼ同程度であり、線形的に増加する。これに対して、I 塗装供試体の場合には、中・上塗

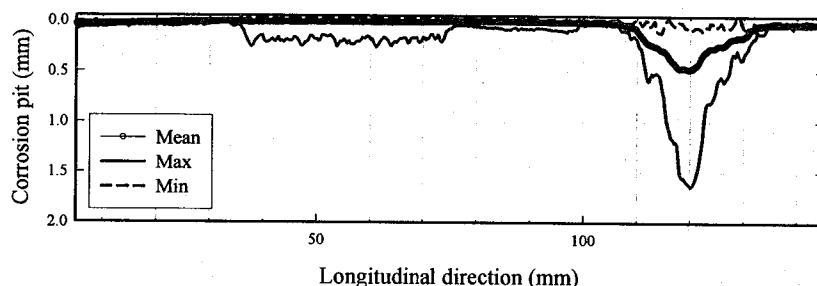


図-8 板幅方向の平均板厚減少量

りの違いによらずほぼ同じで、300 日目までは線形的に増加して、その後大きく増加する傾向が見られる。

図-7(b)に示す素地露出部からの塗膜のふくれ面積(素地露出上・下部の塗膜のふくれ面積)は、実験期間とともに徐々に増加する。塗装系によるふくれ面積の違いを比較すると、C, A, B, I2, I1 の順に大きくなる傾向が見られた。

3.6 塗膜および腐食生成物除去後の下地鋼板の表面形状

傷や塗膜劣化などによる下地露出部からのさびの発生およびその進展による下地鋼板の表面形状変化や板厚減少量を定量的に評価するために、100 日間(3 体)、200 日間(3 体)、400 日間(4 体)の促進実験終了後の供試体の塗膜および腐食生成物を除去した。その後、下地鋼板の表面形状をレーザ深度計で測定し、板厚減少量を算出した。比較供試体として用いた無塗装鋼板供試体の場合には、実験開始後 100 日目、200 日目、300 日目、400 日目にそれぞれ 3 体の供試体の実験終了後に腐食生成物を除去後の重量減少量を測定して換算板厚減少量⁹⁾を求めた。

図-8 には、400 日間の実験終了後の A 塗装供試体中で、素地露出部の腐食度が最も大きかった供試体において、長手 150mm 方向に対して板幅 70mm 方向の平均板厚減少量を示した。図中には、長手 150mm 方向に対する板幅方向の最大・最小板厚減少量も示した。図-9 には、A, C, I 塗装供試体のクロスカット部と素地露出部の平均板厚減少量を示す。なお、クロスカット部のデータは色抜きシンボルで、素地露出部のデータは塗りつぶしシンボルで示す。また、比較のために無塗装鋼板の換算板厚減少量も図-9 に示した。

図-8 に示すように、実験供試体においてクロスカット部と素地露出部からの腐食による下地鋼板の板厚減少が見られた。その平均板厚減少量は、素地露出部の中央部で最大になり、平均板厚減少量に比べて 3 倍以上であった。これらの結果は、C および I 塗装供試体からも得られた。

図-9 に示す実験期間ごとのクロスカット部および素地露出部の平均板厚減少量を比較すると、100 日目から 400 日目までの板厚減少量はほぼ線形的に増加していることと塗装系による板厚減少量の大きな違いはほとんど見られないことがわかった。塗装供試体の下地鋼板と無塗装供試体の板厚減少量を比較すると、塗装供試体のクロスカット部の板厚減少量は、無塗装供試体とほぼ同じであった。これに対して、塗装供試体の素地露出部における下地鋼板

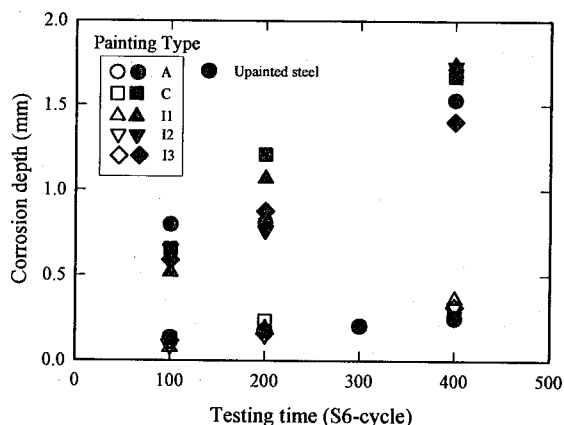


図-9 クロスカット部と素地露出部の板厚減少量

の板厚減少量は、塗装供試体のクロスカット部および無塗装供試体に比べて大きく実験開始後 400 日目で 5 倍以上であった。したがって、大きな塗膜の傷が存在する場合や部分塗装により塗装と無塗装の境界部が存在する場合、下地鋼板が腐食すると、全面無塗装裸鋼板に比べて、板厚減少量は局部的に大きくなり、板厚減少や応力集中発生などによる損傷の可能性が高くなることが推測される。

4. 塗装鋼板の劣化度評価

本研究では、3. で記述したように実験前、実験開始後 100 日目、200 日目、400 日目の①外観観察、②塗膜の光沢度、③インピーダンス、④引張付着力、⑤ふくれ幅、⑥角部のさび発生率の 6 つの劣化評価項目に基づいて A, C, I 塗装系の経時劣化について検討した。また、実験開始後 300 日目の劣化についても、外観観察、塗膜の光沢度、ふくれ幅や角部のさび発生について検討した。ここでは、鋼橋塗膜調査マニュアル¹⁰⁾、塗膜の評価基準¹¹⁾を用いて、A, C, I 塗装供試体の劣化度を評価・比較する。

本実験結果から得られた実験開始後 100 日目、200 日目、300 日目および 400 日目の外観観察、光沢度、インピーダンス、引張付着力、ふくれ面積、角部のさび面積の実験結果を 4 ランクの劣化度に分類し、それぞれの評価基準と評価点とともに表-4~表-9 に示す。

この内、光沢度、クロスカット部からのふくれ面積および角部発錆長さに対する評価基準はないため、表-5 に示す光沢保持率の評価では、80%以上

表-4 変退色の評価点¹⁰⁾

評価点(RN)	変退色の程度	塗装系				
		A	C	I1	I2	I3
3	初期と比べてほとんど変化なし		◎	◎	◎	◎
2	初期と比べて変化している	①,②				
1	初期と比べて著しく変化している	③,④				
0	初期の色をほとんどとどめていない					

*表-4～表-9内に示した①,②,③,④はそれぞれ100日目, 200日目, 300日目, 400日目の劣化ランクを示す。また, ◎は①,②,③,④を示し, すべて同じランクであることを示す。

表-5 光沢度の評価点

評価点 (RN)	光沢保持率 G (%)	塗装系				
		A	C	I1	I2	I3
3	$80 \leq G$	①	◎	◎	◎	◎
2	$60 \leq G < 80$	②,③,④				
1	$40 \leq G < 60$					
0	$G < 40$					

表-6 インピーダンスの評価点¹⁰⁾ (図-6 参照)

評価点 (RN)	インピーダンス測定値		塗膜の状態	塗装系				
	R_p	C_p		A	C	I1	I2	I3
3	A, B	A	異常なし	◎	◎	◎	◎	◎
2	C	B	塗膜が固く付着し上塗りだけが劣化している					
1	C	B'	塗膜にさび, ふくれなどを生じる。					
0	D	C	塗膜の劣化著しい					

表-7 引張付着力の評価点¹⁰⁾

評価点 (RN)	引張付着力 T (MPa)	塗装系				
		A	C	I1	I2	I3
3	$2.0 \leq T$	◎	◎	◎	◎	◎
2	$1.0 \leq T < 2.0$					
1	$0.0 \leq T < 1.0$					
0	$T = 0$					

表-8 クロスカット部からのふくれ幅の評価点¹⁰⁾

評価点 (RN)	クロスカットからのふくれ幅 W(mm)	塗装系				
		A	C	I1	I2	I3
3	$W \leq 1.0$	①	①			
2	$1.0 < W \leq 5.0$	②,③	②,③	①,②	①,②	①,②
1	$5.0 \leq W < 16.0$	④	④	③,④	③,④	③,④
0	$16.0 < W$					

表-9 角部の発錆長さの評価点

評価点 (RN)	角部発錆率 L(%)	塗装系				
		A	C	I1	I2	I3
3	$L \leq 0.03$		◎	◎	◎	◎
2	$0.03 \leq L < 0.3$					
1	$0.3 \leq L < 5.0$	①				
0	$5.0 < L$	②,③,④				

表-10 A, C, I 塗装供試体の総合評価点

塗装系	劣化評価点の合計				
	実験前	100日目	200日目	300日目	400日目
A	18 (100)	15 (83)	12 (66)	12 (66)	10 (55)
C	18 (100)	18 (100)	17 (94)	17 (94)	17 (94)
I1					
I2	18 (100)	17 (94)	17 (94)	16 (88)	16 (88)
I3					

*()内の数値は実験前の合計評価点に対する割合 (%) である。

を評価点3とし、20%低下ごとに評価点を1点ずつ下げることにした。また、表-8に示すクロスカット部からのふくれ面積の評価では、40mmの二つの線が交差するクロスカットを一つの80mm線カットと見なして評価した。つまり、クロスカット部からのふくれ幅は、クロスカット部からのふくれ面積をクロスカット長さ80mmで割って求め、これを一つの線カット部からのふくれ幅として評価した。

表-9に示す角部発錆長の評価では、平面塗膜部のさび発生面積(%)に対する評価基準に基づいて劣化度を評価した。ここで、角部発錆長は、供試体の片面のエッジ長さ150mm×2と幅70mmの合計角部長さに対する角部発錆長さ(%)とした。ただし、設置台と接触してS6サイクルとは異なる環境にあった供試体下部の幅70mmは角部の合計長さから除いた。これらの3項目以外の劣化項目については、鋼橋塗膜劣化調査マニュアルの評価基準¹⁰⁾に基づいて評価した。ただし、実験開始後300日目に対する劣化評価では、インピーダンスおよび引張付着力の測定データはないが、それぞれの実験前後の評価ランクが同じく、評価点は3点であるため、300日目の評価点も3点と評価した。

6項目による評価点の合計を表-10に示す。これらの合計劣化評価点によると、A塗装供試体の合計評価点は実験前の18点に対して、実験開始後100日目で15点、200日目で12点、300日目で12点、400日目で10点であった。C塗装供試体の場合には、実験前の評価点の18点に比べて、200日目で1点低下したが、その後の300日目および400日目の低下はなかった。I塗装供試体では、実験前に比べて100日目に1点、300日目に2点低下した。400日目の劣化度は、実験前に比べてA塗装供試体で55%と最も大きく、CおよびI塗装供試体ではそれぞれ94%と88%とその劣化度は小さかった。

5. 実環境への適用

文献5)では、裸鋼板の板厚減少量に基づいて、S6サイクル試験と国内31箇所の暴露試験地の屋外暴露試験との相関性が式(1)の促進倍率 A_c で表せることが示された。

$$A_c = 9.14 \cdot W_s^{-0.62} \quad (1)$$

ここで、 $W_s(mdd)$ は暴露試験地の飛来塩分量である。また、文献7)では、藤原ら^{4), 12), 13)}の研究成果を用いて塗装鋼板の劣化評価にも式(1)が適用可能であることも示された。これらの結果により、暴露試験地やそれ以外の場所における測定飛来塩分量を式(1)に代入するとS6サイクル試験の促進倍率が求められ、短期間のS6サイクル試験を用いて、飛来塩分量が腐食の主因子である実環境下における裸鋼板の板

厚減少量および塗装鋼板の劣化度を予測することが可能となる。例えば、海浜・海岸地域の場合、その場所の飛来塩分量 W_s を0.3mddと仮定すると、その促進倍率は式(1)より約20倍となり、100日間のS6サイクル試験は海浜・海岸地域(0.3mdd)下における約5年間の大気暴露に相当する。

この手法により、本実験から得られた実験開始後100日目、200日目、300日目および400日目の劣化度に基づいて、飛来塩分量を測定した任意の実環境下における劣化度を推測できる可能性がある。例えば、前述したA塗装供試体の実験開始後400日目の劣化度(初期評価点の55%)は、飛来塩分量0.3mddの実環境下において約21年間暴露された劣化度に相当することになる。この手法により、各塗装系の寿命予測することが可能となる。

今後、暴露実験結果や実橋の劣化調査データを収集し、本手法の適用範囲の検証や飛来塩分以外の環境因子を考慮した短期予測法についてさらに検討する必要がある。

6. まとめ

本研究では、鋼橋用A、C、I塗装鋼板を用いて、100日間、200日間、400日間のS6サイクル腐食促進実験を行った。その結果、塗膜の劣化や下地鋼板の腐食劣化について検討した。また、外観観察、光沢度、インピーダンス、引張付着力、ふくれ面積、角部のさび発生率を用いて、その劣化度も評価した。以下に本実験から得られた主な結果を示す。

1. A塗装系からは、塗膜の変色および角部のさび発生が確認された。しかし、CおよびI塗装供試体からは、実験終了400日まで変色および角部発錆は見られなかった。
2. 6つの劣化評価項目の合計評価点は、A塗装系が一番低く、I塗装、C塗装系の順に高かった。例えば、実験前に比べて実験開始後400日目の劣化度は、A塗装系で実験前の55%、I塗装系で88%、C塗装系で94%であった。
3. 塗装供試体のクロスカット部における下地鋼板の板厚減少量は、無塗装鋼板の板厚減少量とほぼ同じであった。しかし、素地露出部における板厚減少量は、クロスカット部および無塗装鋼板に比べて大きく、実験開始後400日目では5倍以上であった。
4. S6サイクル促進実験の促進倍率(式(1))と飛来塩分量測定により、本研究から得られた結果を実環境下へ適用し、その劣化寿命を定量的に評価することが可能であることを示した。

謝辞

実験供試体の製作においては(株)横河ブリッジのご協力を頂いた。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。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：鋼道路橋塗装便覧，1990.
- 2) 高橋定明，守屋進：塗膜の複合環境促進試験条件の検討，防錆管理，pp.343-349，2003.
- 3) 黒沢勝登志，伊藤哲司，外川靖人，紀平寛，梅原博行：鉄鋼の大気腐食速度が相対評価可能な複合腐食試験方法の一提案，防錆管理，pp.1-7，2002.
- 4) 藤原博，田原芳雄：鋼橋塗装の長期防食性能の評価に関する研究，土木学会論文集，No.570/I-40，pp.129-140，1997.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 金仁泰，伊藤義人：円形素地露出部を持つ防食鋼板の腐食劣化評価に関する実験的に研究，構造工学論文集，Vol.51A，pp.1069-1079，2005.
- 8) 建設省土木研究所：耐候性鋼の橋梁への適用に関する共同研究報告(XV)，1992.
- 9) (社)日本橋梁建設協会：橋梁技術者のための塗装ガイドブック，2000.
- 10) (社)日本鋼構造協会：鋼橋塗膜調査マニュアル，JSS IV-03，1993.
- 11) (財)日本塗料検査協会：塗膜の評価基準，2003.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 防錆・防食技術総覧編集委員会：防錆・防食技術総覧，pp.637-654，(株)新協，2000.
- 15) Almedia, E. and Morcillo, W.: Lap-joint corrosion of automotive coated materials in chloride media. Part I - Electro galvanized steel, Surface and Coating Technology, Vol. 124, pp.169-179, 2000.
- 16) Cleveland Society for Coating Technology Technical Committee: Correlation of Accelerated Exposure testing and Exterior Exposure Site, Journal of Coating Technology, Vol. 66, No. 837, pp.49-67, 1994.

(2005 年 9 月 10 日受付)