

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研究

Corrosion degradation of painting and metallic coating systems with initial defects

金 仁泰*, 伊藤義人**
In-Tae KIM, Yoshito ITOH

*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)

This study examined to evaluate corrosion degradation of coatings systems for steel bridges. Three types of painting systems, which are called as A, C, and I painting systems, and four types of metallic coating systems, which are named as Zinc plating, Zinc-Aluminum alloy spraying by two methods and Aluminum spraying, were used in the test. After coating works, scribed circles reaching steel substrate were made in the coated surface of the specimens. The test specimens were corroded in an accelerated corrosion cyclic test condition conforming to JIS K 5621 during 300 or 400 days. From the test results, appearance change and rust propagation from the scribed circles were discussed. Based on the blistered area, degradation curves for the painting systems were also proposed.

Key Words: corrosion, accelerated corrosion test, painting, metallic coating, corrosion degradation, steel bridge

キーワード: 腐食, 腐食促進実験, 塗装, 金属皮膜, 腐食耐久性, 鋼橋

1. はじめに

近年, 鋼橋の分野においては, 初期建設コストに加え, 維持管理コストを含めたライフサイクルコストの低減が検討されている。その一環として, 長寿命防食法の導入や塗替え塗装などを中心とした適切な維持管理によるコスト削減が進められている。また, 鋼橋の防食に関する高精度の維持管理コスト評価を行うために, 様々な腐食環境下における鋼橋防食法の精度のよい劣化寿命予測が求められている。

鋼橋に用いられる防食法としては, 塗装が最も一般的であるが, めっきや溶射といった金属皮膜を用いる方法や耐候性鋼を用いる方法もある。¹⁾ 一般に, 鋼橋の設置場所の環境条件に応じて異なる防食仕様が用いられる。防食法の腐食耐久性は, 屋外暴露実験および実橋調査による腐食劣化状態に基づいて評価される。例えば, 藤原ら²⁾は, 実鋼橋の塗膜劣化調査結果を用いて, さび, はがれおよびびびわれの劣化面積により三つの腐食環境条件下(マイルド環境, 塩分飛来環境および高温多湿環境)における A 塗装系¹⁾の塗膜寿命予測曲線(二次曲線)を提案した。A 塗装系および亜鉛めっきのようにその使用実績が比較的多い防食法については, 数多くの暴露実験および実橋調査データがあり, その劣化寿命予測がある程度可能であると考えられる。しかしながら, 鋼橋防食法として, 比較的最近普及して

きた I 塗装系および金属溶射の場合には, これらに関する研究は少なく, 長期間の耐久性評価が不十分と考えられる。

そこで, 本研究では長期間(300 日および 400 日間)の複合サイクル腐食促進実験を行い, 鋼橋の防食法として用いられている塗装系(A, C, I 塗装系), 金属皮膜(溶融亜鉛めっき, 亜鉛アルミニウム合金溶射, 亜鉛アルミニウム擬合金溶射, アルミニウム溶射)の防食性能について検討した。本実験では, 各防食処理鋼板に素地鋼板まで達する寸法の異なる円形の素地露出部を設けて, 腐食促進実験条件下における素地露出部, 一般部や角部の侵食度を評価・比較した。また, 塗装供試体の円形素地露出部からの塗膜ふくれ面積を用いて, 塗膜劣化寿命予測曲線を求めた。さらに, 腐食促進実験の促進倍率を検討し, 実環境へ適用する方法についても検討した。

2. 実験方法

2.1 実験供試体の製作

本実験では, 下地鋼材として JIS G3106 溶接構造用圧延鋼材(SM490A)を用いた。実験供試体製作の各段階における具体的な製作工程を以下に示す。

- ① SM490A 鋼板から縦 150×横 70×板厚 9mm サイズの素地鋼板を 20 体製作した。
- ② 素地鋼板にプラスト素地調整を行った。

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-1 塗装	素地調整	-	ブラスト処理 SIS-Sa2.5	-	4
	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-2 塗装	素地調整	-	ブラスト処理 SIS-Sa2.5	-	2
	プライマー	-	無機ジंक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	-	無機ジंक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	
	中塗り	-	ポリウレタン樹脂塗料(中塗り)	30	
上塗り	-	ポリウレタン樹脂塗料(上塗り)	25		
I 薄膜形 重防食塗装 (ポリウレタン 樹脂上塗り)	素地調整	-	ブラスト処理 SIS-Sa2.5	-	2
	プライマー	JHS-P-23	機能性プライマー	17	
	2次素地調整	-	スーパブラスト SIS-Sa1	-	
	下塗り	JHS-P-06	有機ジंक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	
	上塗り	JHS-P-20	ポリウレタン樹脂塗料(上塗り)	25	
I 薄膜形 重防食塗装 (アクリル樹 脂上塗り)	素地調整	-	ブラスト処理 SIS-Sa2.5	-	2
	プライマー	JHS-P-23	機能性プライマー	17	
	2次素地調整	-	スーパブラスト SIS-Sa1	-	
	下塗り	JHS-P-06	有機ジंक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	
I 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	-	2
	プライマー	JHS-P-23	機能性プライマー	17	
	2次素地調整	-	スーパブラスト SIS-Sa1	-	
	下塗り	JHS-P-06	有機ジंक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	
溶融亜鉛め つき	前処理	JIS H8641			2
	めつき処理	JIS H8641	めつき槽温度:445±5°C(7~8分), 冷却槽温度:50~60°C(約10秒)	100(550g/m ²)	
亜鉛アルミ 合金溶射 (JIS 工法)	素地調整	-	ブラスト処理 SIS-Sa2.5	-	2
	プライマー	-	無機ジंकリッチプライマー	(15)	
	2次素地調整	-	ブラスト処理 SIS-Sa2.5	-	
	粗面化処理 溶射	-	亜鉛アルミ合金被覆	100	
	封孔処理	-	エポキシ樹脂溶射被覆封孔塗料	-	
亜鉛アルミ 擬合金溶射 (MS 工法)	素地調整	-	ブラスト処理 SIS-Sa2.5	-	2
	プライマー	-	無機ジंकリッチプライマー	(15)	
	2次素地調整	-	スーパブラスト SIS-Sa1	-	
	粗面化処理	-	低温溶射用塗布型粗面形成剤	-	
	常温溶射	-	亜鉛アルミ擬合金被覆	100	
	封孔処理	-	ブチラール樹脂系溶射被覆封孔塗料	-	
アルミ溶射	素地調整	-	ブラスト処理 SIS-Sa2.5	-	2
	プライマー	-	無機ジंकリッチプライマー	(15)	
	2次素地調整	-	ブラスト処理 SIS-Sa2.5	-	
	粗面化処理 溶射	-	アルミ被覆	100	
	封孔処理	-	エポキシ樹脂溶射被覆封孔塗料	-	

合計 20

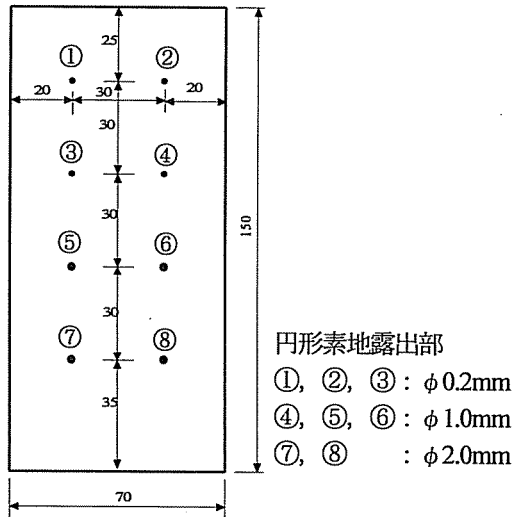


図-1 実験供試体の形状および寸法 (単位: mm)

- ③ 9種類の防食法を用いて各2体の防食処理供試体を製作した。ただし、A塗装供試体は4体製作した。
- ④ エンドミール機械加工によって素地鋼板まで達するφ0.2, 1.0, 2.0mmの円形の素地露出部をそれぞれ3箇所、3箇所および2箇所設けた。ただし、A塗装供試体の2体は素地露出部の機械加工をせずに塗装したままとした。

製作完了後の供試体の形状および寸法を図-1に示す。また、防食処理工程、目標膜厚、供試体の数を表-1に示す。素地鋼板の化学成分を表-2に示す。本研究では、塗膜および金属皮膜の初期欠陥および傷が入った場合や部材の角部などの皮膜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に、通常の塗装鋼板などの腐食実験で用いられるクロスカットの代わりに大きさが異なる3種類の円形の素地露出部を設けた。これは、塗膜の劣化程度評価によく用いられる塗膜評価標準図版³⁾の塗膜劣化部の形が円形か円に近い形であるためである。素地露出部の機械加工をせずに塗装したままの2体のA塗装供試体は、塗装一般部の塗膜劣化を検討するためである。

2.2 複合サイクル腐食促進実験の条件

本実験では、複合サイクル試験機(スガ試験機社製)を用いて、促進実験条件としては一般さび止めペイント(JIS K5621)に規定されている耐複合サイクル防食性の実験条件を用いた。この実験条件(通常のS6サイクル)は、5%濃度の塩化ナトリウム水溶液の噴霧(30分)、95%の湿潤(1時間30分)および温度が異なる2種類の乾燥(4時間)サイクルで構成されており、既存の研究^{4,5)}より暴露実験結果と高い相関性があると知られている。

実験供試体は、JISで規格化されている「鉛直線に対し $20 \pm 5^\circ$ (JIS Z2371)」に従って、鉛直方向から保持角15度で複合サイクル試験機の中に配置した。また、複合サイクル試験機内の供試体配置位置は、100サイクルまでは20サイクルごとに、その後には100サイクルごとにローテーションした。

表-2 実験鋼材の化学成分(%)

鋼種	C	Si	Mn	P	S
JIS G3106 SM490	0.16	0.37	1.44	0.01	0.001

表-3 初期皮膜厚の測定結果

供試体名	皮膜厚(μm)	
	平均	標準偏差
A塗装	152.3	6.0
C塗装	280.4	9.3
I-1塗装(ポリウレタン樹脂上塗り)	139.2	11.3
I-2塗装(アクリル樹脂上塗り)	142.9	22.7
I-3塗装(ふっ素樹脂上塗り)	125.4	11.8
溶融亜鉛めっき	100.3	13.4
亜鉛アルミ合金溶射	179.4	22.0
亜鉛アルミ擬合金溶射	166.9	10.6
アルミ合金溶射	155.2	22.0

腐食促進実験期間は、塗装供試体で400日間(1日4サイクルで合計1600サイクル)、金属皮膜供試体で300日間(1200サイクル)とした。

2.3 測定の流れ

実験前の供試体に対しては、膜厚測定、外観写真撮影および素地露出部周辺のレーザ深度計による表面形状測定を行った。実験前の供試体の表面11点から測定した初期膜厚測定結果を表-3に示す。膜厚測定では、電磁誘導/高周波渦電流式デュアルタイプ膜厚計(分解能:100μm未満で $\pm 0.1 \mu\text{m}$ 、100μm以上で $\pm 1.0 \mu\text{m}$)を使用した。

腐食促進実験中に、100サイクルごとに供試体を取り出し、外観の写真撮影を行った。また、塗膜のふくれが始めた400サイクルから1000サイクルまでには、100サイクルごとにレーザ深度計による塗装供試体の表面形状測定を行った。その後、1200, 1500, 1600サイクル時にも塗装供試体のレーザ深度測定を行った。

レーザ深度測定では、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変位計(測定範囲 $\pm 5\text{mm}$ 、レーザスポット径 $\phi 30 \mu\text{m}$ 、分解能力 $0.1 \mu\text{m}$)の設定基準値からの距離を測定した。本研究で対象にした供試体の円形素地露出部を有する表面(70×150mm)について、実験前は $0.1 \times 0.1\text{mm}$ 、腐食促進実験中は $0.25 \times 0.25\text{mm}$ の間隔で測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 外観の変化

(1) 塗装供試体

塗装供試体の実験前、400, 800, 1200, 1600サイクル時の外観写真を図-2に示す。また、 $\phi 1.0\text{mm}$ 素地露出部周辺の実験前と1600サイクル後の外観写真を図-3に示す。さらに、レーザ深度測定結果を用いてA塗装供試体の図-3(a)に示す断面A-Aの表面形状の経時変化を図-4に示す。

A塗装供試体の場合、図-2(a)に示すように素地

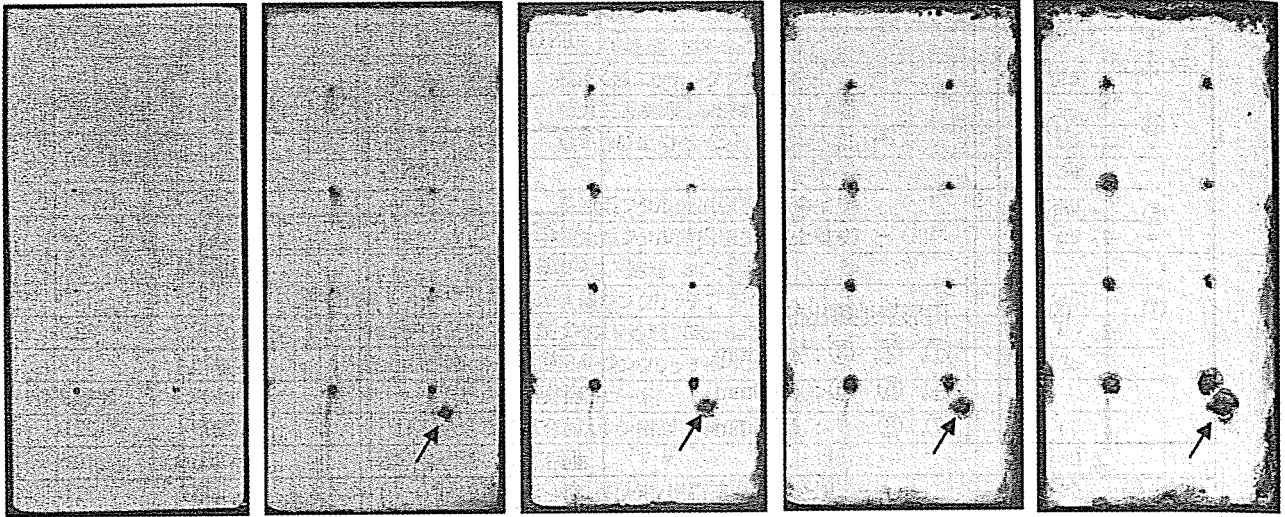
実験前

400

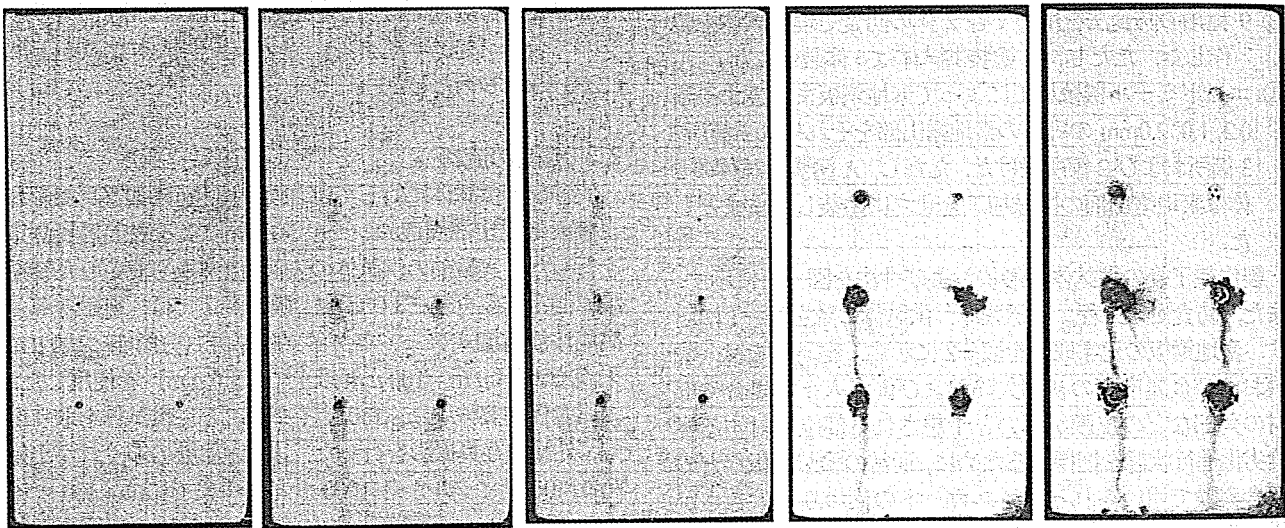
800

1200

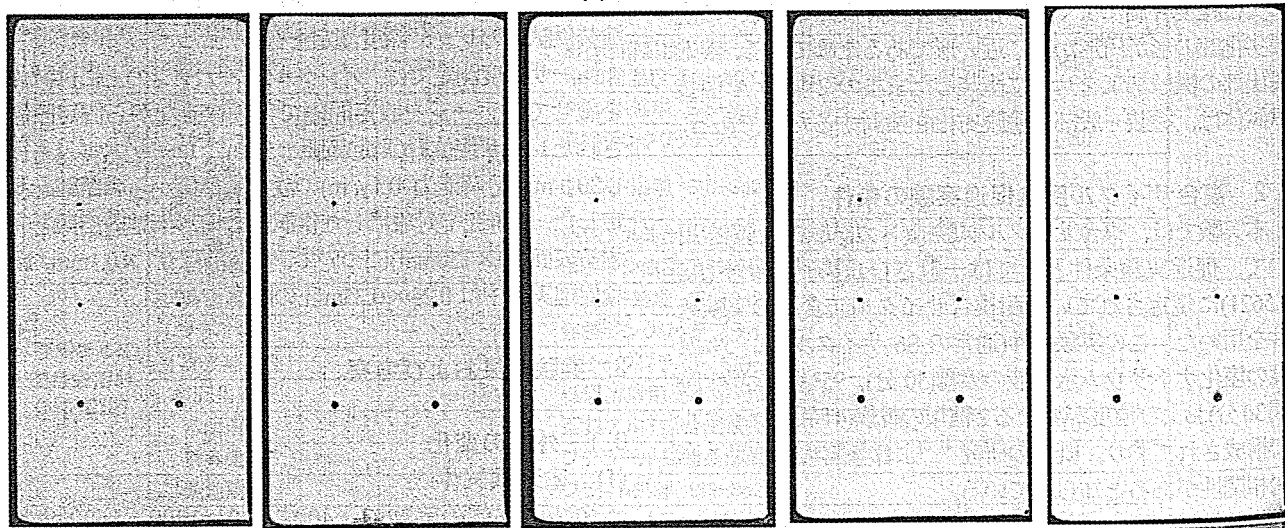
1600 サイクル



(a)A 塗装系



(b)I-3 塗装系



(c)C 塗装系

色見本

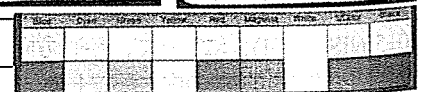


図-2 塗装系の外観の経時変化

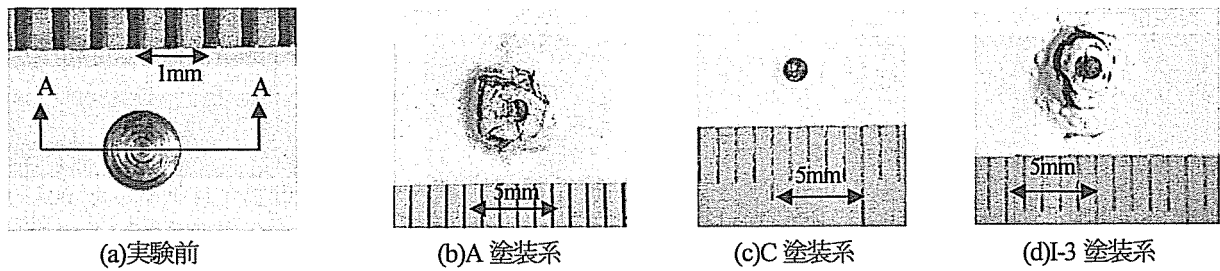


図-3 $\phi 1.0\text{mm}$ 素地露出部周辺のふくれ (1600 サイクル後)

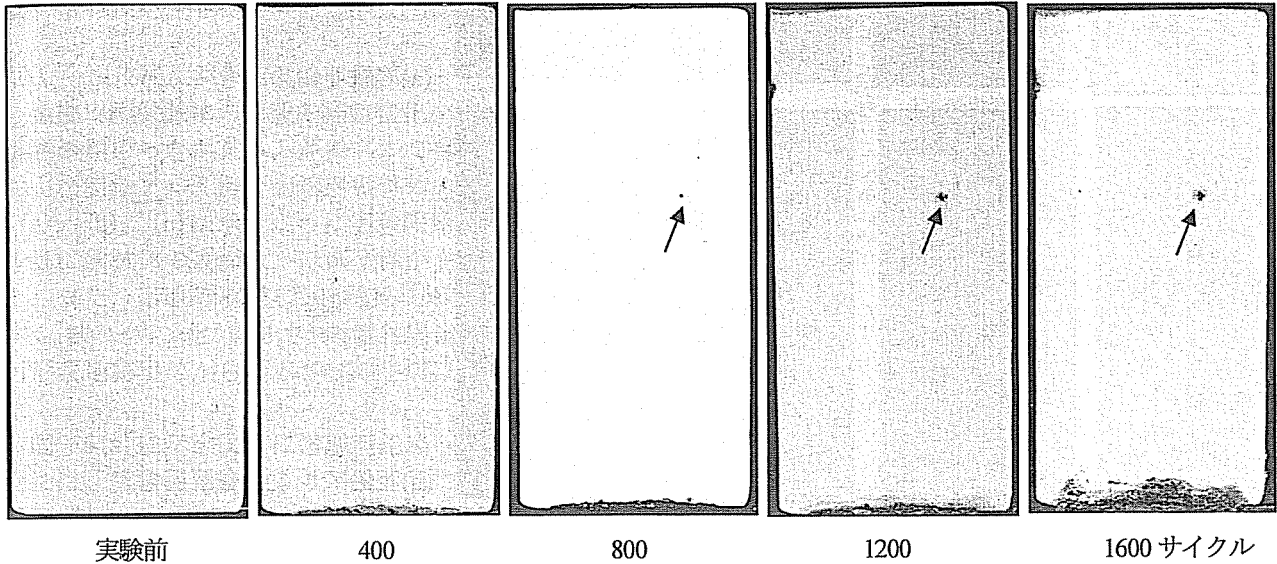


図-5 塗装一般部からのさびおよび塗膜ふくれの生成

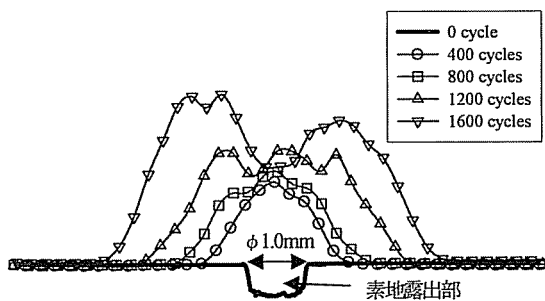


図-4 A 塗装系の塗膜ふくれの経時変化 (図-3(a)の断面 A-A)

露出部にさび層が形成された。その後、素地露出部周辺の塗膜下を侵食し、塗膜のふくれが形成された。400, 800, 1200, 1600 サイクルと実験期間の経過とともに塗膜のふくれは広がり、その面積が大きくなった。これは図-4 に示す表面形状の経時変化からも確認できる。実験前の $\phi 0.2\text{mm}$ 素地露出部は 400 サイクルになると、さびが生成・拡大して目視確認ができるまでに大きくなり、さらに実験期間の経過とともに大きくなった。実験前の塗膜の色は純白であったが、実験開始後変色し、薄い黄色になった。しかし、C, I 塗装供試体では、実験期間の経過に伴う塗膜の変色は見られなかった。図-2(a)内に矢印で示したものは、200 サイクル目の実験供試体のローテ

ーション中についた傷からのさびの生成およびその拡大したものである。これは後述するふくれ面積には含めない。

素地露出部の加工をせずに実験を行った A 塗装供試体の外観の経時変化を図-5 に示す。実験開始後 500 サイクル目に点状さびの生成が確認された。これは、図-2(a)に示した A 塗装供試体の素地露出部と同様に実験期間の経過とともにほぼ円形で大きくなった。これは、ホコリや素地調整後残った不純物の上に塗装したため、ピンホールのように素地まで達する初期欠陥が生じたことに起因すると思われる。このようなさびの生成および拡大は、1 体の供試体から見られ、もう 1 体の A 塗装供試体からは確認されなかった。

図-2(b)に I 塗装供試体の外観の経時変化を示す。図-2(a)に示す A 塗装供試体と同様に円形素地露出部からさびが生じ、実験期間の経過とともにふくれ面積が大きくなった。

C 塗装供試体の場合は、図-2(c)に示すように素地露出部からの塗膜のふくれは円形素地露出部近辺にとどまって、実験期間の経過によるふくれ面積の増加は見られなかった。1600 サイクル目の外観は実験前と同様に $\phi 0.2\text{mm}$ 素地露出部は、肉眼では見ることができなかった。また、図-3 に示す 1600 サイクル目の $\phi 1.0\text{mm}$ 素地露出部の外観を比較すると、

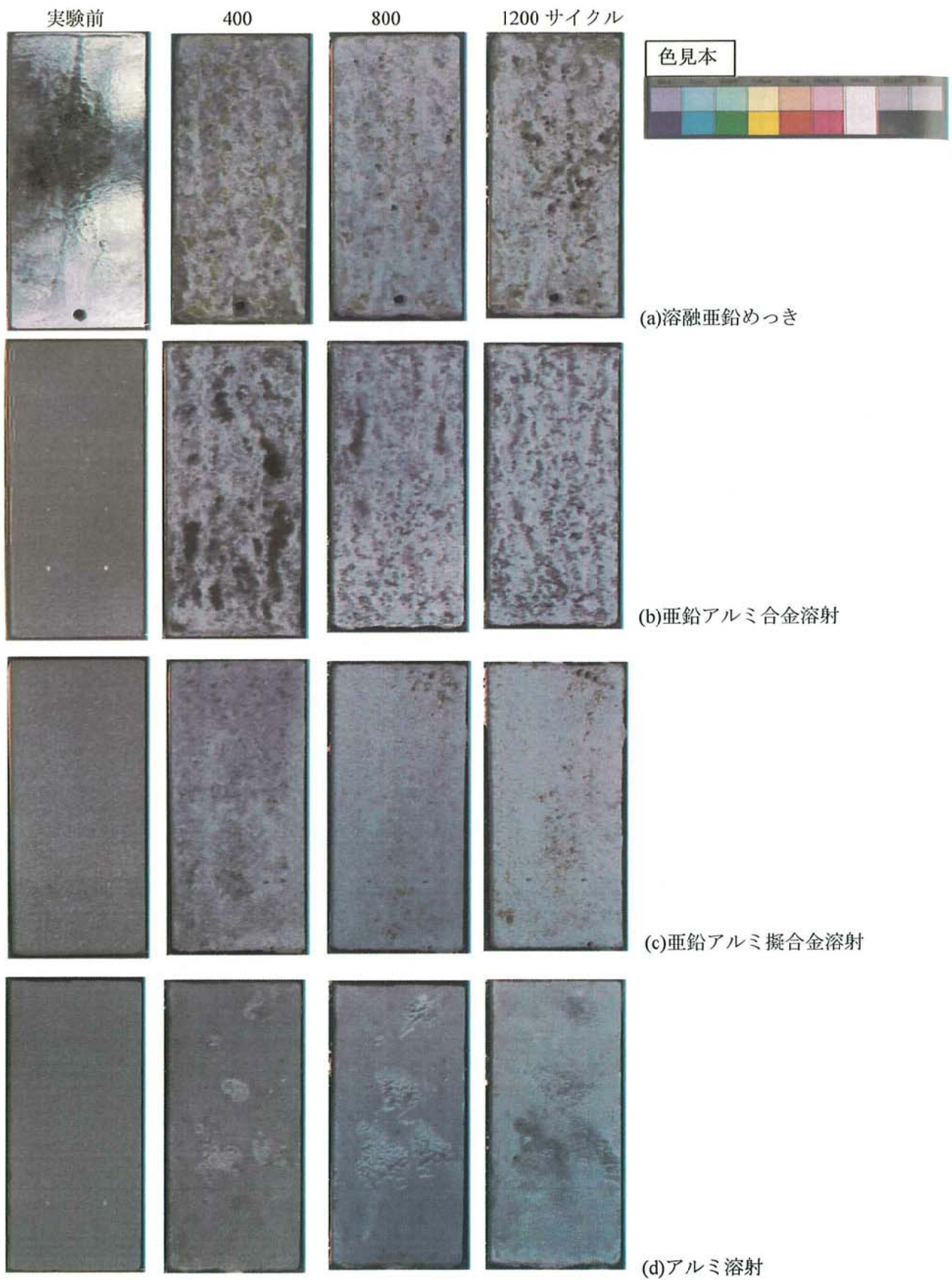


図-6 金属皮膜供試体の外観の経時変化

素地露出部周辺のふくれ面積は、A, I 塗装供試体に比べて非常に小さいことがわかる。

本研究で着目した素地露出部以外に、一部の塗装供試体の角部においてさびの生成が確認された。A 塗装供試体からは 400 サイクル目で、I 塗装供試体からは 800 サイクル目で確認された。その後、A 塗装供試体のさびは角部に沿って広がり、新たに生成した隣り合うさびと合体した。これに対して、C 塗装供試体からは 1600 サイクルの実験終了まで角部のさびは確認されなかった。

(2) 金属皮膜供試体

金属皮膜供試体の外観の経時変化を図-6 に示す。溶融亜鉛めっき供試体、亜鉛アルミ合金溶射供試体および亜鉛アルミ擬合金溶射供試体の場合は、図-6(a), (b), (c) に示すように実験開始後 300 サイクル目に供試体の表面は、ほぼ全面が白さびで覆われた。また、素地鋼材の鉄より亜鉛の方がイオン化されやすく、鉄のイオン化が防止される犠牲陽極作用によって、円形素地露出部からの赤さびの生成は見られなかった。

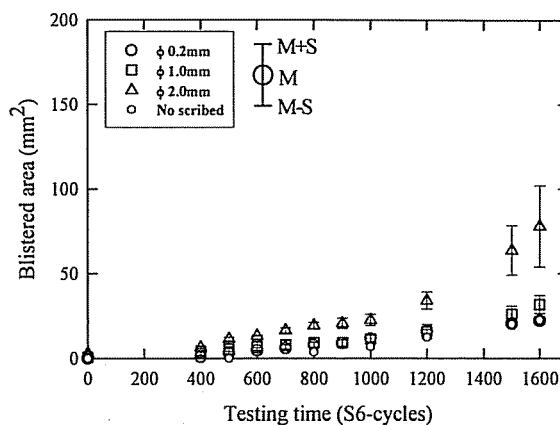
図-6(a) に示すように溶融亜鉛めっき供試体の表面には、実験開始後 400 サイクル目に部分的に赤さびが見られ、500 サイクル目には円形素地露出部以外の金属皮膜から点状の赤さびが見られた。その後、実験期間の経過とともに新たな点状の赤さびが生成され、1200 サイクル目には全面にわたって数多くの点状の赤さびが確認された。

亜鉛アルミ合金溶射供試体の場合には、図-6(b) に示すように 500 サイクルになると白さび層がふくれ始めた。その後、1200 サイクルになると白さび層が剥がれ、部分的に素地鋼板の腐食による赤さびが見られた。

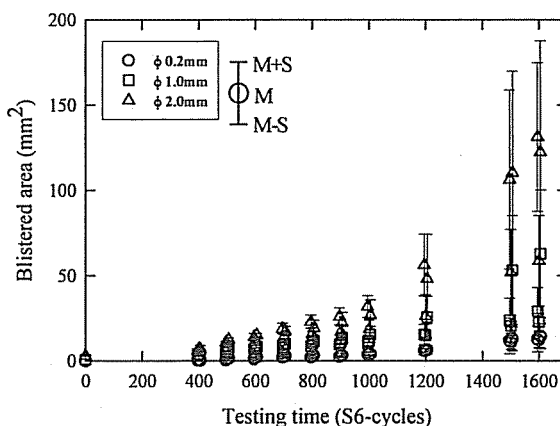
図-6(c) に示す亜鉛アルミ擬合金溶射供試体は、600 サイクル目に初期素地露出以外の部分から、下地鋼板の露出によって赤さびが生成された。その後、新たな赤さびが生成するとともに赤さび生成面積は徐々に広がった。

図-6(d) に示すアルミ溶射供試体の場合には、部分的に白い腐食生成物が見られたが、素地露出部からの赤さびの生成もなく、初期と 1200 サイクル後の外観の大きな変化は見られなかった。

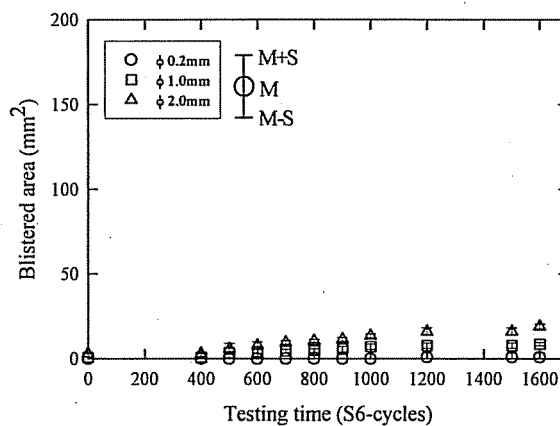
以上の金属皮膜供試体の外観の経時変化から、部分的に金属皮膜がなくなって金属皮膜に赤さびが生成するまでの実験期間を比較すると、溶融亜鉛めっき供試体で 400 サイクル、亜鉛アルミ擬合金溶射供試体で 600 サイクル、亜鉛アルミ合金溶射供試体で 1200 サイクルの順に大きくなった。これらに対して、アルミ溶射供試体は実験終了(1200 サイクル)まで赤さびの生成は確認されなかった。また、外観の変化もほとんどないため、本研究で用いた金属皮膜防食法の中で最もよい耐腐食性能を示した。なお、金属



(a) A 塗装供試体



(b) B 塗装供試体



(c) C 塗装供試体

図-7 A, C, I 塗装系のふくれ面積

皮膜の腐食耐久性は腐食環境および初期金属皮膜厚に依存するため、本実験結果は本研究で用いた腐食促進実験条件および初期皮膜厚に限ることに注意する必要がある。

3.2 塗装供試体の塗膜ふくれ

(1) 塗膜ふくれ面積の経時変化

レーザ深度計の測定結果を用いて、φ 0.2, 1.0, 2.0mm の円形素地露出部からの塗膜ふくれ面積を算出した。供試体 2 体の φ 0.2mm(6 個)、φ 1.0mm(6 個)、φ 2.0mm(4 個)からのふくれ面積の平均値(M)とその

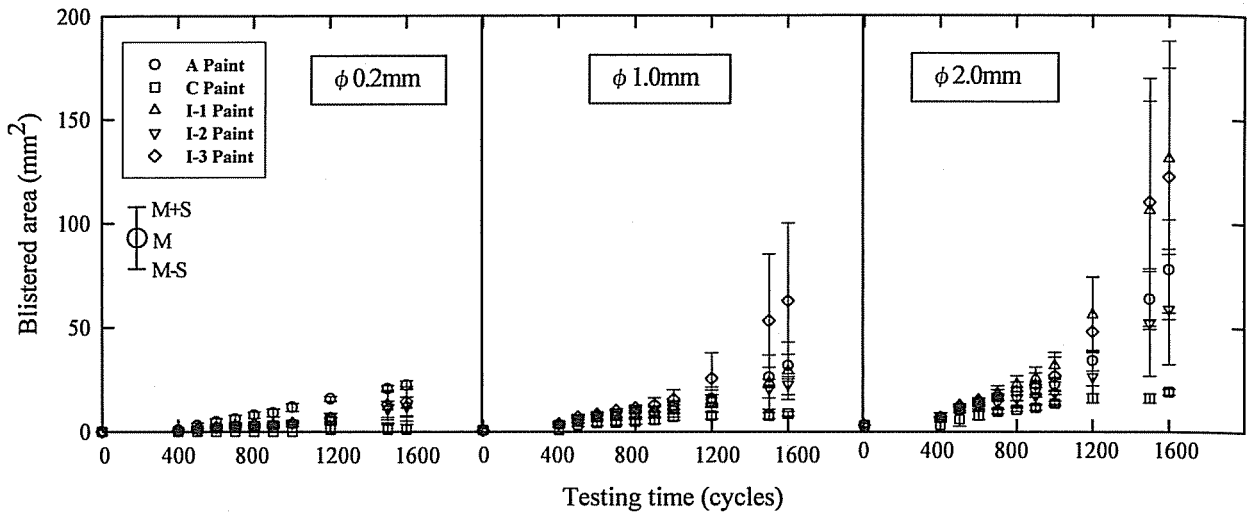


図-8 塗装系によるふくれ面積の比較

標準偏差(S)を求め、塗装系別に分けて図-7に示す。

A 塗装供試体の場合、図-7(a)に示すように実験期間の経過とともにふくれ面積は大きくなった。1000 サイクルまではほぼ線形的に増加したが、その後増加量が大きくなる傾向が見られた。φ 0.2 と 1.0mm からのふくれ面積はほぼ同じであり、初期素地露出部の大きさの違いによる差はほとんど見られなかった。素地露出部を設けなかった A 塗装供試体から 500 サイクル目に確認されたさびの生成によるふくれ面積も図-7(a)に示した。500 サイクル目には、φ 0.2mm のふくれ面積より小さいが、実験期間の経過とともにほぼ同じ大きさとなった。

図-7(b)に示す I 塗装供試体は、φ 1.0mm からのふくれ面積は I-3 塗装供試体が、φ 2.0mm からでは I-2 塗装供試体のみが、他に比べて大きい。これら以外の I 塗装供試体はほぼ同じであった。A 塗装供試体と同様に 1000 サイクルまでのふくれ面積は線形的に増加したが、その後はふくれ面積の増加量が 2 次関数的に急激に大きくなる傾向が見られる。

C 塗装供試体は、図-7(c)に示すように φ 0.2mm 素地露出部からの塗膜ふくれの生成および増加はごくわずかである。φ 1.0 および 2.0mm からのふくれ面積は、1200 サイクルまでは実験期間の増加とともにほぼ線形的に増加する。ただし、A および I 塗装供試体に比べて、ふくれ面積は非常に小さい。

(2) 塗装系の違いによる比較

初期素地露出部の大きさによるふくれ面積の違いを φ 0.2, 1.0, 2.0mm の円形素地露出部ごとに図-8に示す。φ 0.2mm 素地露出部からのふくれ面積は、C, I, A 塗装供試体の順に大きくなった。これに対して、φ 1.0, 2.0mm 素地露出部からのふくれ面積は、A 塗装供試体のデータは I 塗装供試体のデータのばらつき内に分布しており、A と I 塗装供試体の大きな違いは得られなかった。これに対して、C 塗装供試体のふくれ面積は、A, I 塗装供試体に比べて小

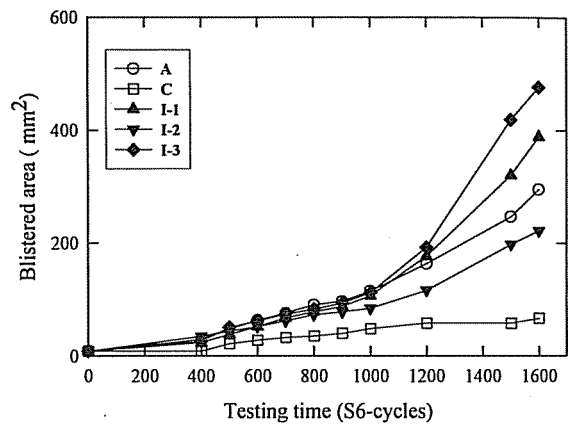


図-9 全ふくれ面積の平均値

い。初期素地露出部の大きさにより、ふくれ面積の増加量を比較すると、φ 0.2, 1.0, 2.0mm と素地露出部が大きくなるにしたがって、ふくれ面積の経時変化は 1000 サイクルまでは線形的に、その後は 2 次関数的に急激に増加する傾向が見られる。これに対して、C 塗装供試体の場合には、初期素地露出部の大きさによらず、ほぼ線形的に増加した。

塗装供試体の φ 0.2, 1.0, 2.0mm 素地露出部からの全ふくれ面積の平均値を図-9に示す。1000 サイクルまでは、A と I 塗装系がほぼ同じであるが、その後、I-3, I-1, A, I-2 塗装供試体の順に増加量が大きくなり、その差が大きくなった。これらに比べて、C 塗装供試体の全ふくれ面積は最も小さく、ほぼ線形的に増加した。したがって、初期欠陥や傷が入った A, C, I 塗装系の場合、腐食促進環境下におけるさびの拡がり(侵食度)は、A と I 塗装系がほぼ同じであり、C 塗装系が最も小さいと推定される。

4. 塗装系の腐食劣化評価

4.1 塗膜の劣化評価および劣化予測曲線

塗膜の劣化程度の調査方法および判定基準は、各

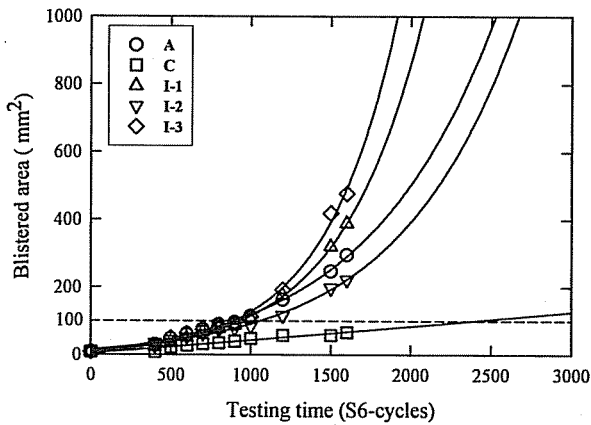


図-10 塗装供試体の塗膜劣化寿命予測曲線

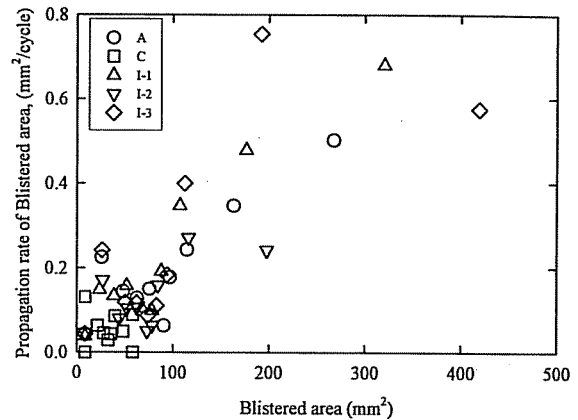


図-11 ふくれ面積の拡大速度

機関によって異なるが、さび発生面積、塗膜のふくれ、われ、はがれ、光沢度、色の差などの劣化項目による評価がよく用いられている⁶⁾。例えば、前述したように、藤原ら²⁾は実鋼橋の塗膜劣化程度をさび、はがれおよびびびわれの劣化面積で評価し、A塗装系の劣化評価および塗膜寿命予測曲線(二次曲線)を提案した。また、西村ら⁷⁾は、塗膜のさび面積とゴンペルツ式を用いて初期あるいは中期の塗膜劣化の追跡から劣化限界に達して全面が腐食する時期の推定法を理論的に検討した。

本研究では、円形素地露出部からのふくれ面積をさび面積としてゴンペルツ式⁷⁾から求めた式(1)の修正指数曲線を用いて、A, C, I 塗装系の塗膜劣化寿命予測曲線を検討する。

$$y = k + a \cdot b^t \quad (1)$$

ここで、 y : 腐食面積、 t : 時間、 k , a , b は定数である。

4.2 A, C, I 塗装系の塗膜劣化寿命予測曲線

図-9 に示した A, C, I 塗装系のふくれ面積を図-10 に示す。また、式(1)で求めたそれぞれの回帰曲線も示す。実験期間(サイクル数)に対するふくれ面積の変化量から求めたふくれ面積の拡大速度(mm^2/cycle)とふくれ面積との関係を図-11 に示す。

図-11 に示すようにふくれ面積が 100mm^2 以下では、ふくれ面積の拡大速度は $0.2\text{mm}^2/\text{cycle}$ 以下では多少ばらついて分布しているが、その後は明確に大きくなる傾向が見られる。そこで、本研究ではふくれ面積が急速に大きくなる 100mm^2 を塗替え塗装時点と仮定する。

初期ふくれ面積 8.72mm^2 から 100mm^2 までふくれ面積が大きくなるまでの A, C, I 塗装系の実験期間を求めると、図-10 に示すように A 塗装供試体は 890 サイクル(約 223 日)、I 塗装系は 890~1060 サイクル(約 223 日~265 日)、C 塗装系は 2380 サイクル(595 日)となる。つまり、A 塗装供試体を基準とする

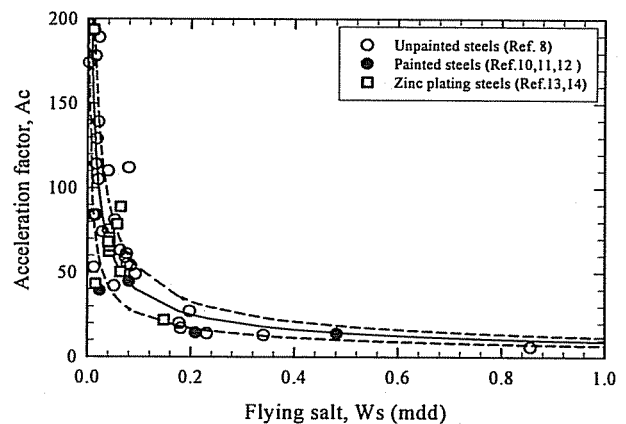


図-12 腐食促進実験条件の促進倍率

と、実験期間は I 塗装供試体で 1~1.2 倍、C 塗装系で約 2.7 倍と長くなる。

4.3 実環境への適用

本研究で得られた金属皮膜供試体および塗装供試体の実験結果を用いて実環境下におけるそれぞれの劣化程度を推定するためには、本研究で用いた腐食促進実験条件(S6 サイクル)と実環境との相関性を求める必要がある。伊藤ら⁸⁾は、無塗装鋼板を用いた 5 ヶ月間の S6 サイクル腐食促進実験を行い、その結果と 9 年間の屋外暴露実験結果⁹⁾(旧土木研究所)との相関性を飛来塩分量で求めた。つまり、図-12 に示す S6 サイクル実験条件の促進倍率 Ac と飛来塩分量 $Ws(\text{mdd})$ との関係を式(2)で表せることを示した。

$$Ac = 9.14 \cdot Ws^{-0.62} \quad (2)$$

図-12 に藤原ら¹⁰⁾⁻¹²⁾により提案された塗装鋼板を用いた S6 サイクルの促進倍率(3 年間の暴露実験結果と 2 ヶ月の促進実験結果)、および亜鉛めっきの 5 年間の屋外暴露実験結果¹³⁾と 200 日間の S6 サイクル促進実験結果¹⁴⁾から得られた促進倍率と飛来塩分量の関係を示す。図-12 に示すように塗装鋼板およ

び溶融亜鉛めっき鋼板のデータを無塗装鋼板のデータと比較すると、大きな差は見られない。したがって、塗装鋼板と溶融亜鉛めっき鋼板の促進倍率は近似的に式(2)で表されると考えられる。

例えば、海浜・海岸地域に相当する飛来塩分量 W_f が 0.3mdd の場合は、その促進倍率は式(2)より 19.3 倍となり、S6 サイクル数 1000 サイクルにおける大気暴露期間を推定すると、約 13.2 年になる。また、本実験の実験期間の 1200 サイクル(金属皮膜供試体)および 1600 サイクル(塗装供試体)は、それぞれ大気暴露期間の約 15.9 年および約 21.2 年と推定される。

図-10 に示した S6 サイクル実験条件下における A, C, I 塗装系の塗膜劣化寿命予測曲線は、式(2)から得られた飛来塩分量に対する促進倍率を用いることで、飛来塩分量が異なる実腐食環境下への適用が可能である。例えば、4.2 において求めた A, C, I 塗装系の寿命は、飛来塩分量 0.3mdd の腐食環境下においては、A 塗装系で 11.8 年、I 塗装系で 11.8～14.2 年、C 塗装系で 31.9 年と推定される。

本研究では、初期素地露出部を設けて初期欠陥や初期傷が存在する場合を想定し、初期点状さびからの侵食による A, C, I 塗装系の劣化寿命を推定した。前述したように A と I 塗装供試体の角部からさびが確認された実験期間はそれぞれ 400 と 800 サイクルと異なる。また、C 塗装供試体は実験終了(1600 サイクル)までさびは確認されなかったことから、A, C, I 塗装系において点状さびが生成するまでの寿命はそれぞれ異なると思われる。ただし、海岸線に架設され、厳しい腐食環境下にあった鋼橋の塗膜劣化調査から、2 年で C 塗装系の塗膜から点状さび(さび面積率約 0.1%)が確認されたという報告もある¹⁵⁾。今後、実鋼橋の塗膜劣化調査を行い、点状さびの発生寿命やそのパターンについて定量化し、A, C, I 塗装系の劣化寿命予測曲線の適用範囲を広げる必要があると考えられる。

5. 金属皮膜の腐食劣化評価

前述したように金属皮膜供試体において初期素地露出部からの赤さびの生成およびその広がりは見られず、それ以外の金属皮膜の一般部において赤さびが生成された。したがって、塗装供試体とは異なり、小さな傷などの初期欠陥による金属皮膜の腐食劣化特性への影響は少ないと思われる。

塗装供試体と同様に飛来塩分 0.3mdd に対する推定大気暴露期間を算出する。金属皮膜が部分的になくなり、赤さびが生成するまでの実験期間は、溶融亜鉛めっき供試体で 400 サイクル、亜鉛アルミ擬合金供試体で 600 サイクル、亜鉛アルミ合金供試体で 1200 サイクルであり、それぞれの推定大気暴露期間は 5.3 年、7.9 年、15.9 年となる。1200 サイクルまで赤さびが確認されなかったアルミ溶射供試体では

15.9 年以上と推定される。

本研究で示した塗装系および金属皮膜系の推定年数は、それぞれ塗膜のふくれ面積および赤さびが確認されるまでの期間を用いた場合であることに注意する必要がある。

6. まとめ

本研究では鋼橋の防食法として用いられる 3 種類の塗装系(A, C, I 塗装系)および 4 種類の金属皮膜(溶融亜鉛めっき、亜鉛アルミ合金溶射、亜鉛アルミ擬合金溶射、アルミ溶射)を用いて、それぞれ 400 日間と 300 日間の長期間の複合サイクル腐食促進実験を行い、腐食環境下における劣化特性を明らかにした。また、 $\phi 0.2, 1.0, 2.0\text{mm}$ の円形素地露出部を防食皮膜に設けることで、防食皮膜の初期欠陥や傷がある場合の腐食劣化特性の経年変化も明らかにした。以下に本研究で得られた主な結果を示す。

- (1) 腐食促進実験環境下における溶融亜鉛めっき、亜鉛アルミ合金溶射、亜鉛アルミ擬合金溶射、アルミ溶射の金属皮膜防食法における白さびの生成、点状赤さびの生成、金属皮膜のはくりなどの表面形状の劣化特性を明らかにした。すべての金属皮膜供試体からは、皮膜に設けた円形素地露出部における赤さびの生成は見られなかった。4 種類の金属皮膜処理法の内、アルミ溶射供試体は腐食促進環境下において外観の変化がほとんどなく、最も高い耐腐食性能が得られた。
- (2) 塗装系供試体の円形素地露出部からの侵食度を定量的に評価し、A, C, I 塗装系の中では C 塗装系の侵食度が最も小さく、A と I 塗装系ではほぼ同じであることを示した。
- (3) 円形素地露出部からの侵食度(ふくれ面積)を用いて A, C, I 塗装系の塗膜劣化寿命予測曲線を提案した。
- (4) 従来の研究成果に基づいて、S6 サイクル腐食促進実験の促進倍率を飛来塩分量で整理し、腐食促進実験の結果を実環境下における塗装系および金属皮膜系の腐食耐久性評価へ適用する方法を示した。

謝辞

供試体の製作などにおいて、日本道路公団中部支部の忽那幸造氏、横河ブリッジの寺尾圭史氏および小山明久氏よりご協力を頂いた。なお、本研究の一部は、平成 14、15、16 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) 藤原博, 三宅将: 鋼橋塗膜の劣化程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.
- 3) 財団法人 日本塗料検査協会: 塗膜の評価基準, 2003.
- 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) 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.
- 6) 社団法人 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), JSSC テクニカルレポート No.45, 1998.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) (社)日本溶融亜鉛鍍金協会: 溶融亜鉛めっき鋼材の耐食性, 鉛と亜鉛, 第213号, pp.27-35, 2000.
- 14) 伊藤義人, 肥田達久, 金仁泰, 忽那幸造, 小山明久: 鋼橋に用いられる金属防食皮膜の腐食耐久性に関する基礎的研究, 土木学会第59回年次学術講演会, I-095, 2004.
- 15) 佐々木真一, 田口史雄, 嶋田久俊: 北海道におけるC塗装系の鋼橋塗膜劣化調査, 土木学会第59回年次学術講演会, I-096, 2004.
- 16) 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.
- 17) 栗山寛: 防食塗膜の寿命予測に関する一つの試み, 防錆管理, pp.182-186, 1990.
- 18) 土木学会鋼構造委員会鋼橋の余寿命評価小委員会: 鋼橋の劣化現象と損傷の評価, 土木学会論文集, No.501/I-29, pp.21-36, 1994.
- 19) 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.
- 20) 伊藤義人, 金仁泰, 太田洋, 貝沼重信: 鋼材の腐食耐久性評価のための環境促進実験に関する基礎的研究, 構造工学論文集, Vol.49A, pp.707-715, 2003.

(2004年9月17日受付)