

# 複合サイクル環境促進実験を用いた異なる鋼板角部形状の塗装防食耐久性に関する研究

伊藤 義人<sup>1</sup>・清水 善行<sup>2</sup>・北根 安雄<sup>3</sup>

<sup>1</sup>フェロー会員 名古屋大学大学院教授 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

<sup>2</sup>正会員 名古屋市役所 (〒460-8508 名古屋市中区三の丸三丁目1番1号)

E-mail: zenko-everyday@gct-civil.sakura.ne.jp

<sup>3</sup>正会員 名古屋大学大学院助教 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: ykitane@civil.nagoya-u.ac.jp

本研究では、1050日間にわたる長期間の塩水噴霧複合サイクル環境促進実験を行い、国内で広く鋼橋に適用されているA, B, C, I塗装系の4種類の塗装防食に対して、弱点部とされる角部に着目し、角部加工なし(E0)、面取加工(E1)、曲面加工(R2)の3種類に鋼板角部を加工した供試体を用いることで、角部形状が角部の膜厚と防食耐久性に与える影響について明らかにした。その結果、各塗装系に対して角部の加工形状により角部の膜厚に大きな違いが生じることを定量的に示した。また、既存橋梁の多くに用いられているA塗装系ではE0に比べR2で大きく防食耐久性が向上した。C塗装系ではA塗装系とは異なり、E0においても十分な防食性能が確保されており、今回の条件ではE0とR2を比べても大きな違いは見られなかった。

**Key Words:** steel bridge, paint coating, corner chamfering, accelerated exposure test, salt water

## 1. はじめに

鋼橋の多くは塗装により防食されているが、塗装は徐々に劣化し、その寿命は鋼橋の供用期間よりも短いので適切な塗装の維持管理が必要となる。実際の橋梁において、維持管理費の中で塗り替え塗装のコストの割合は大きく、橋梁建設の段階で塗り替えなどの維持管理費を考慮したライフサイクルコストを計算する必要がある。

近年、公共工事費の削減が求められているが、高度経済成長期に一斉に建設された橋梁の性能劣化は大きな問題となっており、いかに効率よく、限られた予算の中で、維持管理を行っていくかが重要となってきている<sup>1)</sup>。

鋼橋の防食性能劣化は、一般に鋼板エッジの角部やボルト部などの膜厚の確保しにくい部位から発生することが知られている。また、そこから発生したさびはそれらの部位から徐々に広がり他の部位にも進展していく。

したがって、これらの部位からのさびの発生をできるだけ減らすことが防食性能を維持し、維持管理費を抑制することにつながる。

ボルト部については、既往の研究から、防錆キャップや防錆ボルトの利用が提案されている。角部についても、種々の既往の研究があるが<sup>2)-5)</sup>、角部の形状による防食

耐久性の違いを定性的に評価するに留まっている。また、現在供用中の橋梁で一般に利用されている塗装系を用いた研究事例は藤原らの貴重な研究成果<sup>6)-8)</sup>や第1著者らのもの<sup>9)-13)</sup>があるものの、角部に着目したものはほとんど見られない。角部形状が防食性能に及ぼす影響を定量的に評価することは重要な課題である<sup>4)</sup>。

そこで、本研究では、3種類の異なる角部形状を有する供試体を作製して、複合サイクル環境促進実験を行うことで、角部の形状の違いによる防食耐久性を評価する。

実験に用いた供試体は、SM490A 鋼材を用いて長さ150mm、幅32mm、厚さ12mmに切り出した鋼板に、3種類の角部形状を施し、それぞれ4種類の塗装系を施した。角部の形状としては、a) 無加工のもの、b) 辺長1mmで面取り加工を行ったもの、c) R=2mmで曲面加工を行ったもの、の3種類とした。また、塗装系は日本で鋼橋防食用塗装系として、a) 一般環境に用いられてきたA塗装系、b) 海岸地帯などの厳しい環境に適用されるC塗装系、c) AとC塗装系との環境に適用されるB塗装系<sup>14),15)</sup>と、d) C塗装系と比べ低コストながらA塗装系よりも高い耐久性を持ち、旧日本道路公団(現在の東、中、西日本高速道路株式会社)で採用されてきたI塗装系<sup>16)</sup>とした。

環境促進実験の条件は、既往の研究から実環境との相関性が高いことが示されており、また JIS K 5621 に採用されている S6 サイクルとし 1050 日間の実験を行った。この日数は伊藤ら<sup>17)</sup>により求められた実環境に対する促進倍率を用いると、海洋環境下を想定した場合は(促進倍率=19.3 倍)、約 55 年に相当する。また、環境促進実験を行った供試体と同一条件で作製した供試体を切断し、断面計測をすることで通常では計測できない角部の膜厚を精度良く計測した。これにより、環境促進実験と膜厚測定の結果から、角部形状とその膜厚が防食性能に与える影響について検討した。

## 2. 実験条件

### (1) 供試体

供試体の材料としては SM490A 鋼材を用いた。長さ 600mm×幅 32mm×厚さ 12mm の鋼板を作製し、切断面のバリ取りを行った後、角部形状の加工を行った。参考文献 15)によると、橋梁に用いる部材の角部では R=2mm 以上の曲面加工が推奨されている。また、最近の実橋梁では面取り加工が行なわれることが多いことから、本研究では、図-1 に示すように、無加工のもの(以降、E0)、専用の面取り機により辺長 1mm で加工を行ったもの(以降、E1)、R=2mm のバイトを用いてフライス加工機で曲面加工を行ったもの(以降、R2)、の 3 種類の角部形状を

表-1 供試体皮膜詳細

防食処理法	呼称	処理内容	塗料名等	目標膜厚	供試体数
A-1 塗装系	A 塗装系	素地調整	ブラスト処理(SIS Sa2 1/2 Class)	35 35 30 25	計 125
		下塗り	鉛系錆止めペイント 1 種		
		中塗り	鉛系錆止めペイント 1 種		
		上塗り	長油フタル酸樹脂塗料中塗り		
		上塗り	長油フタル酸樹脂塗料上塗り		
B-1 塗装系	B 塗装系	素地調整	ブラスト処理(SIS Sa2 1/2 Class)	35 35 45 35 30	計 180
		下塗り	鉛系錆止めペイント 1 種		
		中塗り	鉛系錆止めペイント 1 種		
		上塗り	フェノール樹脂 MIO 塗料		
		上塗り	塩化ゴム系塗料中塗り		
C-4 塗装系	C 塗装系	素地調整	ブラスト処理(SIS Sa2 1/2 Class)	75 60 60 30 25	計 250
		下塗り	無機ジンクリッチペイント		
		中塗り	エポキシ樹脂塗料(ミストコート)		
		中塗り	エポキシ樹脂塗料下塗り		
		上塗り	エポキシ樹脂塗料下塗り		
I 塗装系	I 塗装系	素地調整	ブラスト処理(SIS Sa2 1/2 Class)	75 30 25	計 130
		下塗り	有機ジンクリッチペイント		
		中塗り	ポリウレタン樹脂塗料用中塗り		
		上塗り	ポリウレタン樹脂塗料上塗り		
		上塗り	ポリウレタン樹脂塗料上塗り		
				(Unit: μm)	合計 48 体

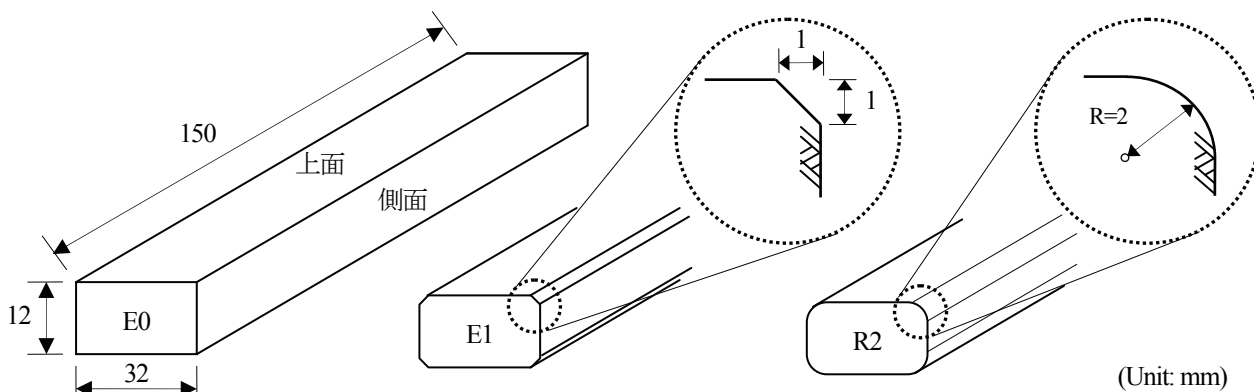


図-1 供試体形状

有する供試体を作製した。角部加工後に、長さ 150mm に切り出し、塗装をそれぞれ施した。塗装は参考文献 14)~16)を参考に、実橋梁に近い方法で塗装を行った。供有する供試体を作製した。角部加工後に、長さ 150mm 試体上面および両側面の 3 面はスプレー塗りで塗装し、その他の部分はシール塗装とした。なお、本論文では環境促進実験時に 15°の傾斜で供試体を試験槽の中に設置した際に上を向く面を上面と称する。

塗装の詳細を表-1 に、供試体の形状及び寸法を図-1 に示す。作製した供試体 4 体のうち、3 体を環境促進実験用とし、残りの 1 体を膜厚計測用供試体とした。膜厚計測用供試体は断面を観測できるように、10mm 長で 4 箇所切り出し、それぞれを樹脂で成型後、表面を研磨した。これにより膜厚測定用供試体は各塗装系で 4 体となり、皮膜の種類(4)×角部形状(3)×4 で、全体で 48 体となった。表-1 には、各塗装系の下、中、上塗り目標膜厚と合計目標膜厚を示す。

## (2) 膜厚の測定

本研究では、角部形状による角部膜厚の違い及び一般部との膜厚の違いを正確に評価する必要があるが、膜厚計による角部の膜厚計測は機器の性質上困難である。そこで、環境促進実験用供試体と同一の要領で作製した供試体から前述の要領で加工した膜厚測定用供試体を用いて膜厚を計測した。

膜厚計測の手順としては、金属顕微鏡 (OLYMPUS 製、落射専用 BX51M)を用いて倍率 100 倍に拡大して写真撮影し、その後、一般部では 1mm 間隔、角部では形状にあわせて膜厚が最も薄い部分の膜厚計測を行った。一般部の膜厚は、図-3 に示すように、角部近辺では角部に近づくにしたがって徐々に減少するので、全皮膜での傾向を確認した上、角部の影響を受けない範囲の膜厚を用いることとした。その結果、採用した膜厚計測点数は、膜厚測定用供試体 1 体につき、一般部で 20 点となった。なお、角部の計測点数は供試体ごとに E0 と R2 では 8 点、E1 では面取り加工により 2 箇所で膜厚が極小となったため 16 点となった。測定値のばらつきを明らかにするために、平均値だけでなく標準偏差も求めた。

## (3) 環境促進実験

### a) 実験条件

本研究での環境促進実験条件は、塗装耐久性試験と一般の実環境との相関性が高いという既往の研究結果<sup>7)</sup>に基づいて、JIS K 5621 に規定されている S6 サイクルの環境促進実験条件を用いた。この複合サイクルは図-2 に示すように、5%濃度の塩化ナトリウム水溶液の噴霧、相対湿度 95%の湿潤および温度が 30°C と 50°C の 2 種類の乾燥条件で構成されている。

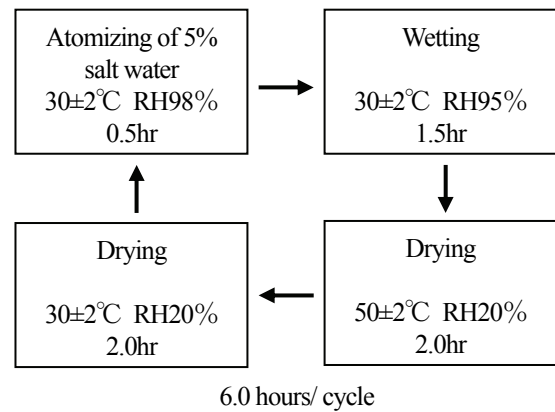


図-2 環境促進実験条件(S6 サイクル)

本実験では大型複合サイクル試験機(スガ試験機社製 CY-200S)を用い、文献 4)で示した方法と同様の方法で供試体を設置した。

### b) 実験経過中の計測

実験経過中の外観変化を評価するために、25 日(100 サイクル)毎に、各供試体を 45°傾けて写真撮影を行った。その写真をもとに、角部に沿ったさびの長さを計測し、供試体全体の長さに対するさびの長さの比を発錆率<sup>4)</sup>とした。また、角部に発生したさびの点数を測定し、さびの発生しやすさも評価した。なお、供試体長辺の端部等からさびが発生する可能性を考慮し、供試体長さ 150mm のうち中心 100mm を計測対象範囲とし、その外側の部分に対しては、適宜、塗料および接着剤による補修を行うことにした。

## 3. 実験結果および考察

### (1) 膜厚測定

一般部の膜厚に対する角部膜厚の割合は、角部形状や塗装系によって異なる、角部での表面張力や塗膜の乾燥時間に深く関わっていることが知られている<sup>18)</sup>。文献 4)で既に膜厚測定の結果を示し、A 塗装系については環境促進実験結果との比較を行ったが、今回示すその他の塗装系の実験結果と密接に関連するので、ここでは膜厚測定結果を再掲する。

#### a) 測定膜厚と目標膜厚

図-3 に膜厚測定用供試体の一例として、A 塗装系の角部形状 E0 の一般部(上面部)と角部の写真を示す。明らかに角部で膜厚が一般部より薄くなっていることが確認できた<sup>4)</sup>。表-2 に目標膜厚および測定膜厚を示す。塗装はウェット膜厚の測定により膜厚管理をしながら行ったが、全ての実験供試体で一般部膜厚は目標膜厚の 1.3 倍から 2.0 倍となった。

まず、A 塗装系の角部膜厚は、R2 では目標膜厚を満た

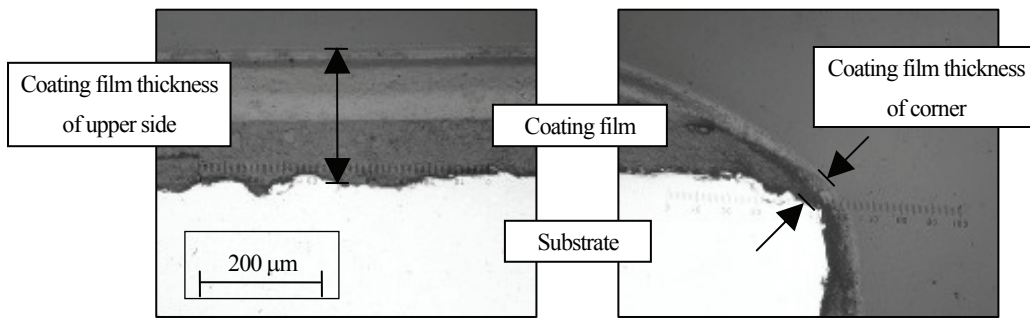


図-3 断面写真(A 塗装系：角部形状 E0)

しているものの、E0 と E1 では目標膜厚を下回り十分な膜厚が確保できていないことが分かる。

次に、B 塗装系の角部膜厚は、A 塗装系と同様に E0 では目標膜厚を大きく下回るが、E1 では目標膜厚の 9 割程度を確保している。C 塗装系では目標膜厚に対して一般部の膜厚が大きいこともあり、全体的に膜厚は大きな値が計測されており、角部においても E0 以外では目標膜厚を満たしている。A、B、C、I 塗装系の全てで、R2 は目標膜厚を上回る値になっており、角部形状を R2 とすることで、十分な膜厚を確保することが可能となる。

今回の計測で、A、C、I 塗装系では、一般部の膜厚は目標膜厚の 1.7~1.9 倍程度の値となった。膜厚が全体的に厚めに確保されていることが、実験結果に及ぼす影響が懸念されるものの、実橋梁における塗装でも目標膜厚を上回るように施工されることも多いことから、今回の実験結果で実橋梁の塗膜の劣化を評価できると考えた。

b) 一般部膜厚に対する角部膜厚の割合

図-4 に、本研究で得られた一般部膜厚に対する角部膜厚の割合を供試体の種類ごとに示す。角部形状により角部膜厚の割合は大きく異なり、角部形状ごとで比較すると E0 で 21~42%，E1 で 41~74%，R2 で 78~114% となり、全ての塗装系において角部膜厚は E0 < E1 < R2 となった。このことから全ての塗装系において、角部に面取り加工、さらに曲面加工を行うことで角部膜厚がどの程度大きくなるかを明らかにした。例えば、A 塗装系では、角部を無加工のまま、つまり角部形状 E0 のままで塗装を行なうと、角部の膜厚は一般部に対して 21%しか確保できないことになり、防食性能が大きく低下することが予想される。これに対し、角部に面取り加工や曲面加工を施すことにより、膜厚はそれぞれ 41%と 78%確保できることになり、一般部に比べればまだ小さいものの、無加工の角部よりも大きな膜厚を得ることができる。他の塗装系に関しても図-4 から同様のことが言える。

本来、塗装の目標膜厚は十分な防食性能を塗装系に保持させるための数値であるので、膜厚の確保が難しい角部等であってもその数値は満たされる必要がある。今回の結果を見る限り、R2 の角部膜厚は一般部膜厚の約 80%

表-2 目標膜厚および測定膜厚

塗装系	角部形状	膜厚 (標準偏差) (Unit: μm)		
		目標	一般部	角部
A 塗装系	E0	125	213 (32.5)	44 (11.3)
	E1			87 (24.3)
	R2			165 (18.5)
B 塗装系	E0	180	223 (25.0)	81 (11.9)
	E1			167 (54.1)
	R2			256 (39.6)
C 塗装系	E0	250	484 (41.7)	208 (44.0)
	E1			282 (85.5)
	R2			417 (71.1)
I 塗装系	E0	130	254 (26.3)	79 (19.4)
	E1			130 (33.5)
	R2			204 (21.5)

表-3 膜厚計による一般部膜厚計測結果

皮膜	供試体数	計測点数	平均値	標準偏差
A 塗装系	12	12×7=84	168	17.7
B 塗装系	12	12×7=84	205	9.5
C 塗装系	12	12×7=84	470	36.2
I 塗装系	12	12×7=84	250	19.4

(Unit: μm)

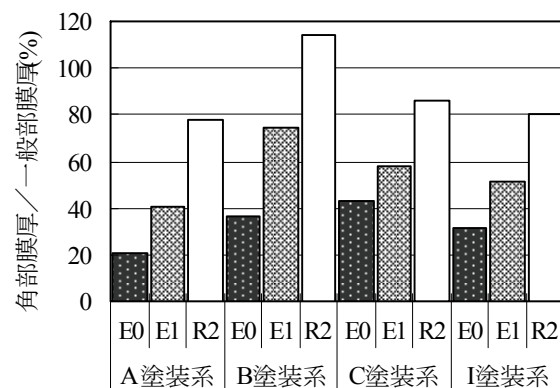


図-4 一般部膜厚に対する角部膜厚の割合

以上確保できており、角部形状を  $R=2\text{mm}$  で曲面状に加工した上で、目標膜厚の 1.2 倍程度の膜厚になるように狙い塗装を行うと、角部においても目標膜厚を確保できる可能性がある。

### c) 膜厚計による一般部の膜厚測定

3.(1)a)で用いた切断した供試体を含む、全ての供試体の一般部の膜厚をデュアルタイプ膜厚計(Kett 製 LZ-300C)によって計測した。表-3 に膜厚計による計測結果を示す。膜厚計による一般部膜厚の測定結果では、標準偏差は小さく、それぞれ 12 体の供試体の中での膜厚の違いは小さかった。このことから、膜厚測定に用いた供試体と環境促進実験に用いた供試体との間に膜厚の差はなかったことが概ね確認できた。

A 塗装系では、表-3 に示した膜厚計による測定結果と、表-2 に示した断面計測結果に、他の塗装系に比べて多少大きな違いが生じた。これは、断面を観測した際に A 塗装系では中央部で膜厚が小さく計測される傾向が確認された。表-3 に示した膜厚計による計測では中央部を計測箇所としたが、表-2 に示した膜厚は切断した断面の一般部全体について計測しており、そのため、A 塗装系の表-2 の膜厚は表-3 の膜厚に比べて多少大きくなり、標準偏差も大きくなったと考えられる。

## (2) 環境促進実験

1050 日間にわたる S6 サイクルによる環境促進実験結果を、外観観察と発錆率の観点からまとめる。

塗装系の外観経時変化の例を図-5 に示す。1050 日間の環境促進実験で、A 塗装系と B 塗装系では大きな外観変化が生じた。また、I 塗装系でも A、B 塗装系ほどではないが、角部や端部からのさびの発生が確認された。これに対し、C 塗装系では、供試体の両端部からのさびの発生は見られたものの、角部から劣化が進行した事例は見られなかった。なお、長辺端部および裏側の面から一部発錆が見られるのは、シール塗装の防食性能が不十分であったためである。

### a) 外観観察

図-5 に示すように、A 塗装系では、300 日経過時で塗装が全体的に黄色く変色している。これは、25 日経過の時点から見られており、また既往の研究<sup>11)</sup>でも同様なことが確認されている。膜厚が薄い角部から最初に発錆し、図に示した供試体においては、角部形状 E0 で 200 日を経過した段階で角部全体にさびが生じている。これに対し、E1 では 40%程度、R2 では 10%程度の発錆となっている。また、発錆は供試体によるばらつきが大きかった。

B 塗装系では角部形状 E0 の供試体においては、300 日経過した時点で発錆が確認された。その後の経過に伴い徐々にさびは進行し、1050 日経過時では角部の全体にさびが広がった。角部形状 E1 では、600 日経過の供試体で

さびの発生が確認された。角部形状 R2 の供試体では 1050 日経過時で角部においてさびが確認できるが、これは、経時的に撮影した外観写真から判定して、供試体端部および裏側から発生したものが進展したものであり、角部から発生したものではなかった。

C 塗装系では、全ての角部形状で 1050 日経過した段階でも角部におけるさびの発生は確認されなかった。

I 塗装系では、ほとんどの供試体で 600 日経過時までは角部からのさびの発生はなかった。その後、さびの発生と進行が始まり、700 日経過した段階で角部形状 E0 の全ての供試体でさびが確認された。角部形状 E1 と R2 では 1050 日経過した段階でもほとんどの供試体でさびが確認されなかった。

### b) 角部形状による発錆率の違い

2.(3)b)で定義した発錆率を用いて、角部形状の違いが塗装系の防食性能に及ぼす影響について検討する。

3.(2)a)で述べたように、角部におけるさびの発生状況は供試体によって大きなばらつきがあり、ここでは、角部形状ごとに全ての供試体の角部をつなぎ合わせた供試体を想定し、一辺の角部に生じたさびとして取り扱うこととした。また、各辺を個別に扱った時のばらつきについても標準偏差を用いて考慮した。

図-6 に、横軸に経過時間、縦軸に発錆率をとって角部形状による発錆率の違いを示す。図中、■、◇、●はそれぞれ E0、E1、R2 の発錆率を表しており、M と S はそれぞれ発錆率の平均値と標準偏差を表している。A 塗装系の E0 では、200 日を経過するまでの発錆率は概ね経過時間に比例して増加したが、その後は時間の経過に対して増加量が徐々に少なくなり、400 日を経過した付近では、ほぼ横ばい状態になった。また、475 日を経過した段階で発錆率が 100%となったため、供試体は試験機から取り出した。E1 では E0 ほど顕著ではないが、発錆率の変化率が増減する傾向が見られ、100 日以降はそれ以前に比べ増加率が大きくなり、その後 1000 日から 1050 日へかけて増加率は小さくなっている。

R2 では 600 日を経過するまでは、さびはゆるやかに進展していたが、その後、増加率が大きくなり、900 日経過までの 300 日の間だけで、600 日経過時の 13%の約 3.5 倍の 49%まで急激に発錆率が増加した。発錆率の増加傾向としては、E0 においても最初の計測時点である 25 日経過時までの増加の割合は、その後に比べると小さいことから考えて、角部形状により経過時間の違いはあるものの、初期段階ではゆるやかに増加し、その後変化量が大きくなり、ある程度の値に達した後はさびが相互につながることによって、発錆率の増加割合が減少していったと考えられる。このように、発錆率は S 字曲線を描くように増加する傾向があることが分かった。1050 日経過の段階での発錆率は E0、E1、R2 でそれぞれ 100、86、

経過日数	E0	E1	R2
0			
300			
600	400 日で供試体取り出し		
1050			

(a) A 塗装系

経過日数	E0	E1	R2
0			
300			
600			
1050			

(b) B 塗装系

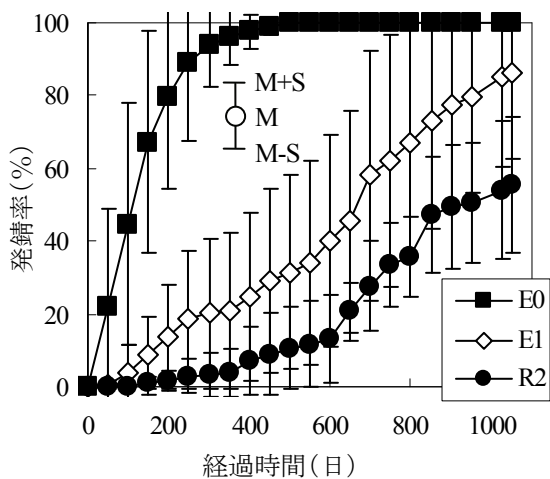
経過日数	E0	E1	R2
0			
300			
600			
1050			

(c) C 塗装系

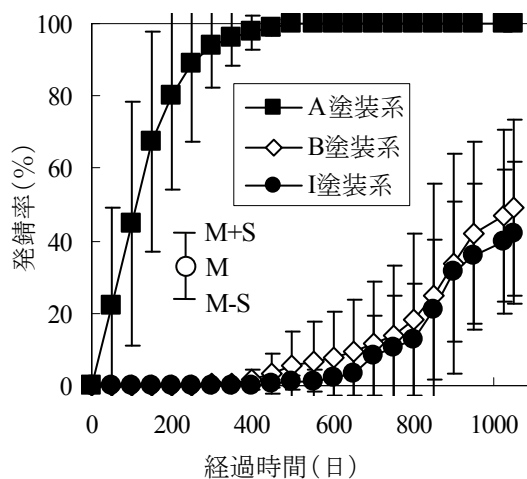
経過日数	E0	E1	R2
0			
300			
600			
1050			

(d) I 塗装系

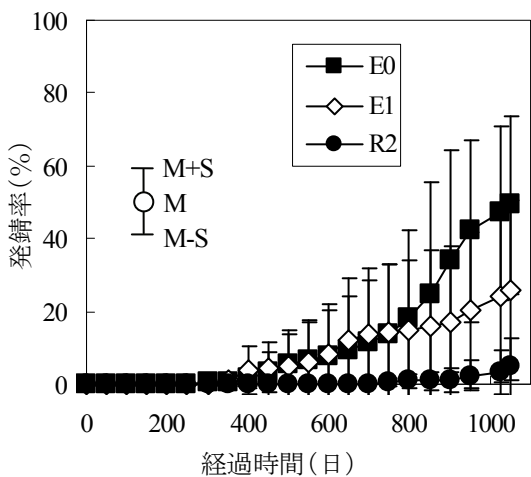
図-5 塗装系別の外観変化



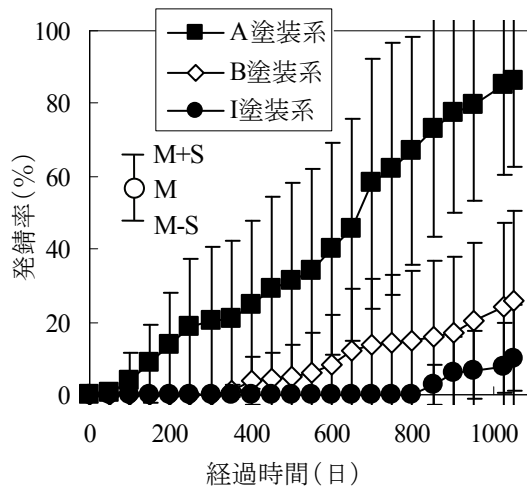
(a) A 塗装系



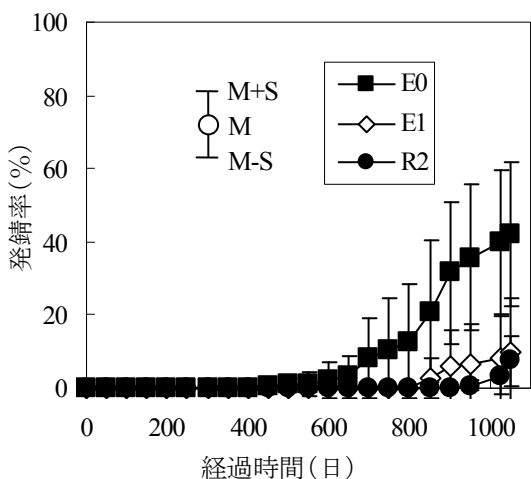
(a) 角部形状 E0



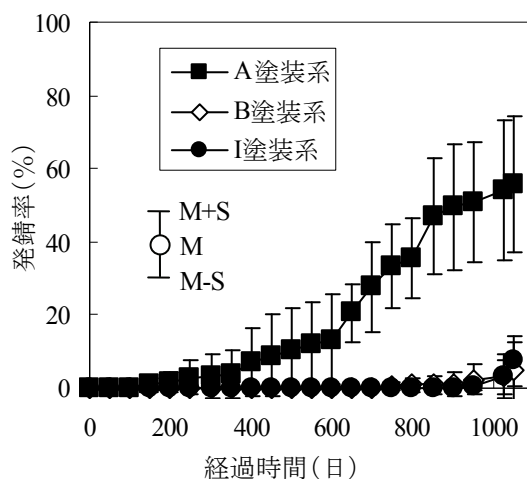
(b) B 塗装系



(b) 角部形状 E1



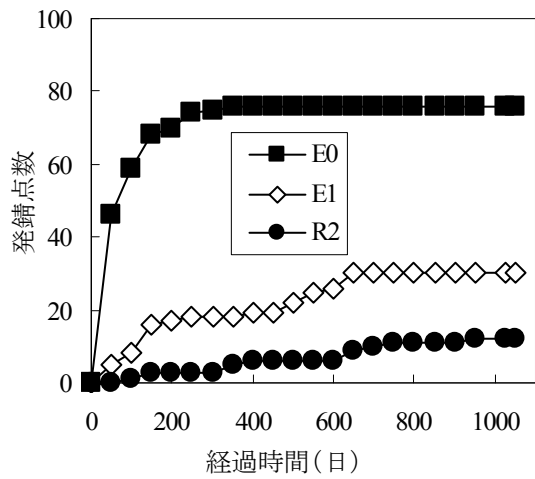
(c) I 塗装系



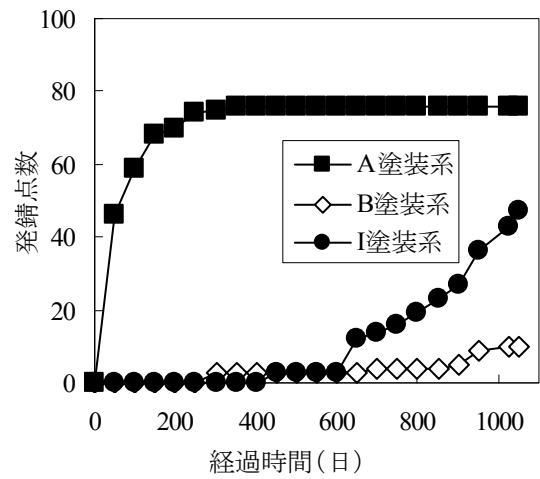
(c) 角部形状 R2

図-6 角部形状による発錆率の違い

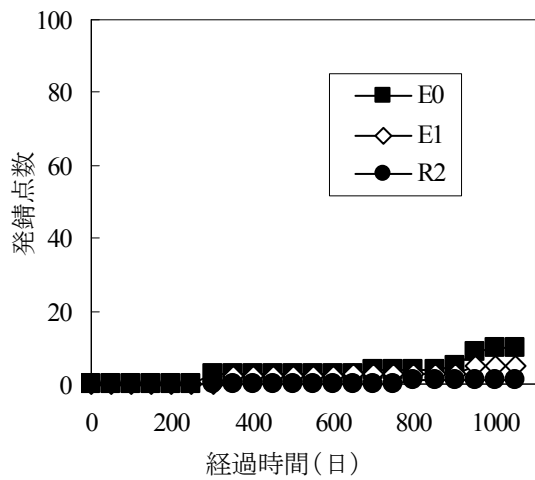
図-7 塗装系による発錆率の違い



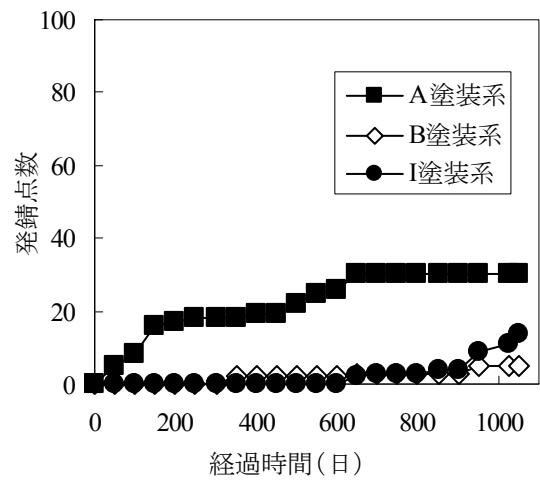
(a) A 塗装系



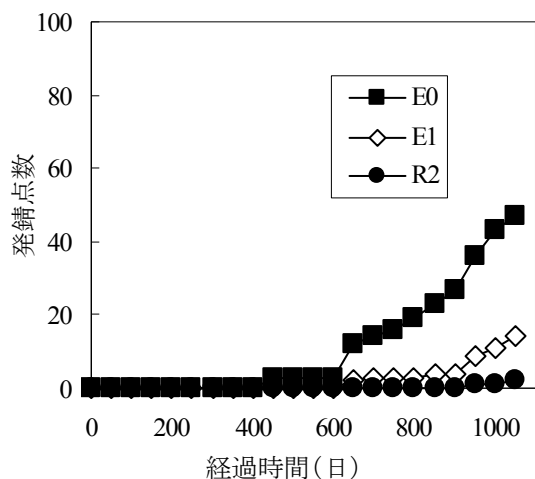
(a) 角部形状 E0



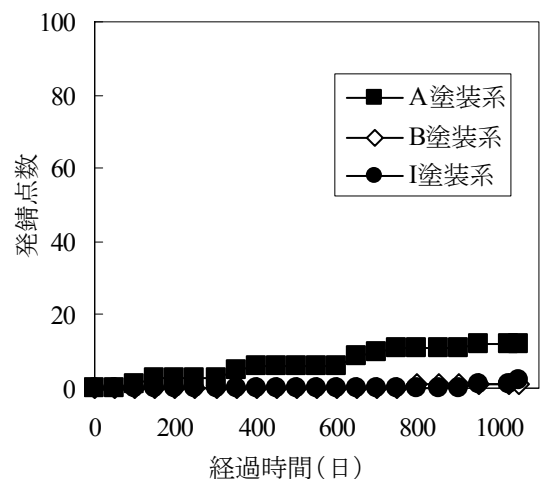
(b) B 塗装系



(b) 角部形状 E1



(c) I 塗装系



(c) 角部形状 R2

図-8 角部形状による発錆点数の違い

図-9 塗装系による発錆点数の違い



55%となっており、大きな違いが生じている。

B 塗装系では 300 日経過までは、全ての角部形状において発錆が確認できなかった。その後、E0 と E1 では 750 日経過までは、ほぼ同じ値となったが、800 日経過以降急激に E0 の発錆率が大きくなり、実験終了時の 1050 日経過時では、E1 で 26%なのに対し、E0 では 49%と約 2 倍程度の値となった。R2 では、750 日経過後から発錆が確認されたが、最終的に 5%と非常に小さな値となった。

I 塗装系では、450 日を経過するまでは全ての角部形状で発錆率は 0%となった。E0 では 600 日経過後から発錆率の増加量が徐々に大きくなり、A 塗装系と同様に S 字を描くように発錆率が推移した。また、1050 日経過時では 42%となった。E1 と R2 では 800 日経過までは 0%で、850 日以降は E1 が大きな値となったが、実験終了時には 8%程度とほぼ同じ値となった。

全ての塗装系において、実験終了時の発錆率の大きさは、E0, E1, R2 の順となった。B 塗装系では、一時的に E1 の発錆率が E0 を上回り、I 塗装系では、最終的に E1 と R2 で大きな違いは見られないなど、一部、A 塗装系ほどの明らかな違いは出なかった部分もあるが、これらの原因は、実験のばらつきか、物理的に説明ができるか明確ではない。しかし、角部を加工することで塗装系の防食性能が向上するのは明らかである。

#### c) 塗装系による発錆率の違い

図-7 に横軸に経過時間、縦軸に発錆率をとって塗装系種別による発錆率の違いを示す。図中、■、◇、●は、それぞれ A, B, I 塗装系の発錆率を表しており、M と S は、それぞれ発錆率の平均値と標準偏差を表している。

全ての角部形状において、A 塗装系の発錆率が B 塗装系と I 塗装系に比べて大きくなっており、同じ角部形状であれば、A 塗装系の防食性能が劣ることは明らかである。A 塗装系は最も標準的に鋼橋塗装として用いられてきた塗装系であり、他の塗装系は、より厳しい環境に使用されることを考えれば、同一環境において A 塗装系が他の塗装系に比べて性能が劣ることは当然と言える。

B 塗装系と A 塗装系では、塗料の構成としては下塗り塗料が同じ鉛系錆止めペイントなので、B 塗装系と A 塗装系で発錆率が大きく異なっているのは、中塗りと上塗りが大きく影響していることになる。中塗りは、上塗りと同様に下塗りの密着性を確保する役割を主とするので、さびを抑制するためには、上塗り、つまりさびの発生要因の侵入を防ぐことがまず重要と考えられる。

I 塗装系では、下塗り塗料に A, B 塗装系に比して、大きな犠牲防食作用を持つ有機ジンクリッチペイントを採用しているが、角部形状 E0 での発錆率は B 塗装系とほとんど変わらない値となっている。これは、有機ジンクリッチペイントが犠牲防食作用を持つために、腐食環境下では徐々に消耗されるが、膜厚の確保が難しい E0 で

は、塗装系として高い防食性能を維持することができないことが原因と考えられる。また、角部形状 E1 では、B 塗装系に比べて発錆率が小さな値となっており、膜厚の確保ができれば、犠牲防食作用によってある程度の膜厚が減少しても、さびの発生を抑制できることが分かる。

これらのことから、I 塗装系のように犠牲防食作用を持つ下塗りを構成に有する塗装系では、膜厚の確保が難しい弱点部において、十分な防食性能を長期間維持できない場合があることが分かる。

#### d) 発錆点数の増加

発錆率による評価では、角部における防食性能全体を評価したが、発錆点数の増加傾向を確認することで、特にさびの発生しやすさを評価する。なお、ここでは発錆率で対象とした部位の写真をもとに、角部における発錆点を数え、それぞれの供試体グループにつき 3 体の発錆点数の合計を計算した。

図-8 に、横軸に経過時間、縦軸に発錆点数をとって角部形状による発錆点数の違いを示す。また、図-9 には、横軸に経過時間、縦軸に発錆点数をとって塗装系種別による発錆点数の違いを示す。図中、図-8 では■、◇、●は、それぞれ E0, E1, R2 の発錆点数を表しており、図-9 では■、◇、●は、それぞれ A, B, I 塗装系の発錆点数を表している。

A 塗装系の E0 では最初の計測時である 25 日経過時で 32 点が計測され、その後 350 日経過時で最大の 76 点となり、発錆率よりも早い段階で最大の値となった。さびが拡がりやすいことは発錆率の検討で明らかになったが、同様にさびが発生しやすいこともわかった。E1, R2 では経過時間が長くなるにつれて、さびの点数は徐々に増加していったが、その増加割合は発錆率に比べると小さく、600 日を経過したあたりから大きな変化は現れなかった。このことから、今回の実験で採用した塗装系の中で最も一般的な環境に採用される A 塗装系において、膜厚を確保することで、さびの発生自体はある程度は抑制できるものの、一度さびが発生してしまうと、そのさびを発生点として劣化が急速に進んでいくことが分かる。なお、実験中に最初に発錆が確認された日数は E0, E1, R2 でそれぞれ、9 日、50 日、50 日となった。

B 塗装系の最大発錆点数は E0 の 10 点となり、A 塗装系と比べて大きく値が減少した。A 塗装系の R2 の実験終了時の発錆点数は 12 点となっていたが、これは B 塗装系の E0 の値と同等である。また、発錆率についても同程度の値であったことから、今回の実験では A 塗装系の R2 と B 塗装系の E0 の防食性能は同程度と評価することができる。最初の発錆は E0, E1, R2 で、275 日、325 日、800 日でそれぞれ観測された。

I 塗装系では 400 日経過までは発錆が確認されず、C 塗装系を除いた 3 種類の塗装系の中では、最も発錆が遅

かった。これにより、実験初期段階の防食性能は高いことが分かったが、その後発錆点数は増加し、特に急激な変化が 600 日経過後あたりから現れた E0 では、実験終了時には、今回実験を行った供試体の中で 2 番目に大きな 47 点となった。B 塗装系と比べると、発錆率は同等かやや小さな値だったが、実験終了時の発錆点数は全ての角部形状で 2 倍以上となっており、さびが発生しやすいことがわかった。また、他の塗装系と比べて、発錆点数が多いのにも拘らず発錆率が小さいことから、I 塗装系ではさびは発生しやすいが、さびの拡がりが遅いこともわかった。E0 では、650 日経過時から急速に発錆点数が大きくなったが、E1 でも 950 日経過時から値が急に大きくなり始めており、今回の実験では確認できなかったものの、R2 でも同様の傾向を示す可能性が考えられる。

発錆点数の増加速度に着目し、角部形状ごとの発錆点数を示した図-9 を見ると、発錆率が 100%に達した A 塗装系の E0 を除くと、ほとんどの供試体で増加速度に変化の少ないなだらかな増加になっているのに対し、I 塗装系では、一定時間経過後に増加速度が急激に増加していることがわかる。現時点でこの原因は特定できていないが、図-7 から分かるように、発錆点数が増加しても I 塗装系の発錆点からのさびはなかなか進展せず、発錆点数は少ないが発錆率が大きくなっている B 塗装系と比べ、角部防食性能の劣化傾向の違いがみられる。

#### 4. 角部形状を考慮した鋼橋の防食塗装の塗り替え

これまで示してきたように、角部形状はさびの発錆およびその進行に大きな影響を与える。本実験では、C 塗装系では角部からのさびの発生は観測されなかったものの、それ以外の A, B, I 塗装系では無加工のものに比べ、面取り加工や曲面加工を施すことでさびの発生を抑制することが明らかになった。従来、A 塗装系は国内の一般環境で広く用いられてきており、既存橋梁の約 7 割を占めるというデータもある。A 塗装系の腐食環境下における耐久性は、より厳しい環境を想定して開発されてきた B, I 塗装系に比べれば当然低く、角部に曲面加工を施すことで、今回の実験では、それらの塗装系に近い値まで発錆率は低下した。塗装便覧<sup>15)</sup>では、厳しい環境下で供用する橋梁については角部に曲面加工を施すことを原則としているが、角部の加工によって、より高い防食性能を発揮できることは明らかで、全ての環境下において角部形状の加工を行うことが望ましいと言える。なお、橋梁製作時の工場における面取り加工と曲面加工では、一般に機械を使用するので、作業労力に大きな違いはないというヒアリング結果を得たので、より防食性能への効

果が高い曲面加工を施す方が良いと思われる。ただし、現場における手作業の場合はこの限りではない。

既存の A 塗装系を施した橋梁の塗り替えは順次必要となってくるが、今後の塗り替えは C 塗装系に準じた塗り替え塗装系が用いられることになる<sup>15)</sup>。供用中の橋梁の塗り替えは、都市部では交通支障や騒音・悪臭などが生じ、また、山間部ではその設置環境から塗り替えコストが多くなる場合が多い。今回の実験では C 塗装系では角部無加工の供試体でもさびの発生がなかったものの、他の塗装系の実験結果から、やはり曲面加工を施した角部の防食性能が高いと考えられるので、塗り替え時に、耐久性の観点からは角部加工を施すのが望ましい。しかし、現場でのグラインダーによる加工は時間とコストが必要であるので、角部加工に要するコストと長期的に見た場合の塗り替えによって生じる社会的コストをも勘案し、ライフサイクルアナリシスを行っていく必要がある。

#### 5. まとめ

本研究では、角部形状が鋼橋の防食性能に与える影響に着目し、膜厚の測定と、環境促進実験による防食性能の評価から、角部形状と膜厚の関係、角部形状と防食性能の関係などについて検討した。以下に本研究から得られた主な知見をまとめる。

1. 膜厚測定結果から、本実験による角部の膜厚は、一般部膜厚に対し、角部無加工(E0)で 21~42%、面取加工(E1)で 41~74%、曲面加工(R2)で 78~114%となった。
2. 膜厚の観点から言えば、角部形状を R=2mm で加工した上で目標膜厚の 1.2 倍程度を狙って角部を塗装することによって、角部でも目標膜厚を確保できる可能性が高い。
3. 環境促進実験から、1050 日経過時の角部形状 E0, E1, R2 のそれぞれの発錆率は、A 塗装系では、100, 86, 55%、B 塗装系では、49, 26, 5%、I 塗装系では 42, 8, 8%となり、角部を加工することで防食性能が向上することを定量的に示した。
4. C 塗装系では、E0 においても十分な防食性能が確保されており、今回の条件では E0 と R2 を比べても大きな違いは見られなかった。
5. 発錆点数に着目すると、A 塗装系では 600 日経過後あたりからほぼ増加しなかったが、I 塗装系では 650 日経過後から急激な増加がみられ、一定期間経過後にさびが発生する傾向を示した。
6. I 塗装系では、発生点数の増加に比較して、発錆率の増加は小さく、さびは発生しやすいものの、その拡がりが抑制される傾向が明らかになった。これは下

塗り塗料に採用されている、有機ジンクリッチペイントの犠牲防食作用がさびの進展を抑制しているためと考えられる。

7. 防食性能に与える角部形状の影響は大きく、既存橋梁の約7割に用いられているA塗装系の塗り替えの際には、角部加工をした上での塗り替えも含めたライフサイクルアナリシスが必要となる。

**謝辞:** 本研究の一部は、日本鉄鋼連盟による鋼構造研究・教育助成事業(平成18年度)を受けて行なわれた。また、供試体の加工には(株)トピー工業のご協力を頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 坪内佐織, 伊藤義人, 金仁泰, 守屋進: 塗装に着目した鋼橋のライフサイクルアナリシス, 構造工学論文集, Vol.52A, pp.1305-1315, 2006.
- 2) 今枝久: 塗り替え塗装における下フランジのエッジ処理について, 防錆管理, pp.323-327, 1990.
- 3) 蒔田實: 鋼材端部の断面形状が塗膜の耐久性に及ぼす影響に関する試験, 土木技術資料, Vol.27, No.4, pp.175-180, 1985.
- 4) 清水善行, 伊藤義人, 金仁泰: 角部形状が鋼橋防食性能に与える影響に関する基礎的研究, 構造工学論文集, Vol.53A, pp.825-833, 2007.
- 5) National Steel Bridge Alliance: *Edge/Corner Preparation of Steel Members and its Effect on Zinc Rich Primer Performance*, 2000.
- 6) 藤原博, 菅野照造: 鋼橋の塗膜劣化と塗膜下腐食と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.
- 7) 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.
- 8) 藤原博, 三宅政: 鋼橋塗装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.
- 9) 伊藤義人, 金仁泰, 大田洋, 貝沼重信: 鋼材の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.697-706, 2003.
- 10) 伊藤義人, 金仁泰, 肥田達久, 坪内佐織, 忽那幸浩: 鋼橋防食に用いられる金属皮膜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.1059-1067, 2005.
- 11) 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.
- 12) 伊藤義人, 清水善行, 小山明久: 酸性雨噴霧および塩水噴霧複合サイクル環境促進実験による鋼橋塗装の耐久性に関する研究, 土木学会論文集 A, Vol.63, No.3, pp.506-517, 2007.
- 13) Kim, I.T. and Itoh, Y.: Accelerated exposure tests as evaluation tool for estimating life of organic coatings on steel bridges, *Corrosion Engineering, Science and Technology*, Vol. 42, No. 3, pp. 242-252, 2007.
- 14) 社団法人日本道路橋会: 鋼道路橋塗装便覧, 1990.
- 15) 社団法人日本道路協会: 鋼道路橋塗装・防食便覧, 2005.
- 16) 関西ペイント株式会社: 橋梁塗装システムガイドブック, 2002.
- 17) 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環境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.
- 18) Weidner, D.E., Schwartz, L.W., and Eley, R.R.: Role of surface tension gradients in correcting coating defects in corners, *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 179, pp. 66-75, 1996.

(2009.3.4 受付)

## CORROSION RESISTANCE OF PAINTED STEEL PLATE EDGES PREPARED WITH DIFFERENT CORNER GEOMETRIES EXAMINED BY COMBINED CYCLIC CORROSION TEST

Yoshito ITOH, Yoshiyuki SHIMIZU and Yasuo KITANE

A combined cyclic corrosion test was performed in this study to examine corrosion resistance of painted steel plate edges prepared with different corner geometries. Test specimens were coated with A, B, C, and I-paint systems, which are common paint coating systems for steel bridges in Japan, and they were prepared with three different corner geometries: a square corner (E0), a 45-degree beveled corner with 1 mm long sides (E1), and a rounded corner with a radius of 2 mm (R2). Coating film thicknesses at corners were measured to show that the corner geometry had a significant effect on the coating film thickness at a corner and that R2 resulted in the largest thickness among the three corner geometries. The combined cyclic corrosion test showed that R2 specimens had much larger corrosion resistance than E0 specimens for the A-paint system. However, for the C-paint system, E0 specimens performed as well as R2 specimens in the corrosion environments examined in this study.