

## 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

Influence of edge treatment of base steel plates on corrosion resistance of coated steel bridges

清水善行\*, 伊藤義人 \*\*, 金仁泰\*\*\*

Yoshiyuki SHIMIZU, Yoshito ITOH, In-Tae KIM,

\*名古屋大学大学院学生, 工学研究科社会基盤工学専攻, (〒464-8601 名古屋市千種区不老町)

\*\*工博, 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 (同上)

\*\*\*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 (同上) (現釜山大学助教授)

In steel bridges, the corrosion damage occurs easily at sharp free edges of bottom flange, bolts, nuts and so on, because securing desired thickness of coating films is difficult at such locations. This study examined an accelerated exposure test and measured the thickness of the coating films to investigate corrosion resistant at different types of edge shapes. Test specimens were exposed to the accelerated corrosion environment conforming to Japanese Industrial Standards K5621 for 200 days for metallic coating and 400 days for paint coating. From the corrosion occurred at edges and the thicknesses of coating, anticorrosive performance of various coating systems was discussed. The paint coating system at the round edge had good performance compared with other shapes of edge. The metallic coating system also had good performance for all types of edge shapes.

*Key Words: steel bridge anticorrosive performance, edge shape, accelerated exposure test, thickness of coating film*

キーワード: 鋼橋防食性能, 角部形状, 環境促進実験, 膜厚

## 1. はじめに

鋼橋の大半は塗装により防食処理が施されているが, その効果は恒久的なものではなく徐々に劣化する. そのとき鋼板エッジやボルト部の角部などから, 最初に発錆することが知られており, これらの場所は腐食に対して弱点部だと考えられている<sup>1)2)</sup>. 弱点部から発錆しやすい原因としては, 一般部のように平坦ではなく複雑な形状の場合が多く, 塗装膜厚の確保が難しいことが挙げられる. 角部から発生したさびは徐々に周辺に進行し, 構造物全体の美観や耐久性, 塗替え周期などに悪影響を与えて, 塗替え周期を決める大きな要因の一つとなる.

そのため, 角部においては面取り加工や, 曲面加工が推奨されているが<sup>1)</sup>, これらの面取り加工などが膜厚や防食性能に与える効果を定量的に評価している研究例は少ない. 角部からの発錆が鋼橋塗装系の塗替え周期や耐久性に対して大きな影響を与えることから, 角部形状が防食性能に与える影響を定量的に明らかにする必要がある.

塗装系の防食性能を実験的に評価する方法としては,

大きく分けて大気暴露実験と環境促進実験が挙げられる. 大気暴露実験では実際の腐食環境下で行えるというメリットがあるものの, 暴露地点の条件に大きく左右されデータの汎用性が低く, 実験に長期間が必要である. 一方, 環境促進試験槽を用いた促進実験により防食性能の評価を行なう方法では, 実験環境を模擬することにより一定条件のもとで早期に結果が得られる<sup>3)~5)</sup>.

そこで本研究では, 角部形状が鋼橋防食性能に与える影響を検討するために環境促進実験を行った. 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 種類の塗装系と, 近年実橋梁にも採用されている 2 種類の金属皮膜を施した. 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一般環境に適用される A 塗装系, 海岸地帯などの厳しい環境に適用される C 塗装系, A, C 塗装系との環境に適用される B 塗装系<sup>6)7)</sup>と, 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)で採用されている I 塗装系<sup>9)</sup>とし、金属皮膜は、溶融亜鉛めっきと亜鉛アルミ合金溶射<sup>9),10)</sup>とした。

環境促進実験条件は、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 K5621 に採用されている S6 サイクルとし、金属皮膜で 200 日間、塗装系で 400 日間の実験を行った。この日数は金ら<sup>11)</sup>により求められた実環境に対する促進倍率を用いて、海洋環境下を想定すると(促進倍率=19.3 倍)、約 10 年と約 20 年にそれぞれ相当する。また、環境促進実験を行うと同時に同一条件で製作した供試体を切断して断面の膜厚計測を行い、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

### 2.1 使用供試体

SM490A 鋼材を用いて、長さ 600mm×幅 32mm×厚さ 12mm の鋼板を作製、切断面にバリ取りを行った後、角部加工を行った。角部形状は、参考資料 7)で R=2mm 以上の曲面加工が推奨され、実橋梁では面取り加工が行な

われることが多い。そこで本研究では、図-1 に示すように、無加工のもの(以降, C0)、専用の面取り機により辺長 1mm で加工を行ったもの(以降, C1)、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 種類とし、加工後に長さ 150mm に切り出し、塗装および金属皮膜処理をそれぞれ行った。これ以降では、塗装および金属皮膜の両者をさして皮膜という言葉を用いる。塗装は参考資料 6), 7), 8)金属皮膜処理は参考資料 9),10)を参考に、一部省略した部分もあるが、実橋梁に近い方法で皮膜処理を行った。塗装系の供試体では上面および両側面の 3 面をスプレー塗りで塗装して、その他の部分はシール塗装とし、金属皮膜供試体では全面に対して防食皮膜を施した。

なお、環境促進実験時に 15°の傾斜で供試体を設置し、上を向く面を上面とする。皮膜の詳細を表-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て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 4 体となり、皮膜の種類(6)×角部形状(3)×4 で、全体で 72 体となった。表-1 には、下, 中, 上塗り膜厚と合計膜厚を示した。

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 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	フェノール樹脂 MIO 塗料			
		上塗り	塩化ゴム系塗料中塗り 塩化ゴム系塗料上塗り			
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)			
		上塗り	エポキシ樹脂塗料下塗り エポキシ樹脂塗料下塗り フッ素樹脂塗料中塗り フッ素樹脂塗料上塗り			
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			
		上塗り	ポリウレタン樹脂塗料用中塗り ポリウレタン樹脂塗料上塗り			
亜鉛アルミ合金溶射	合金	素地調整 溶射 封孔処理	ブラスト処理(SIS Sa2 1/2 Class) 亜鉛アルミ合金被膜(Zn15%合金) エポキシ樹脂溶射被覆封孔塗料	100 100	計 100	同上
溶融亜鉛めっき	めっき	前処理 めっき処理	酸洗い めっき条件:JIS H9124, 付着量(715g/m <sup>2</sup> )	100 100	計 100	同上
				(Unit: μm)	合計72体	

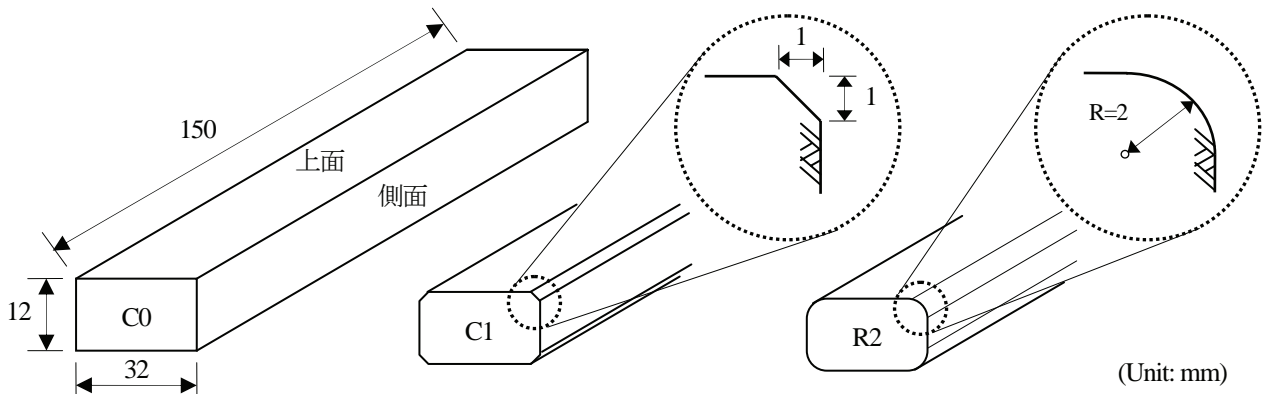


図-1 供試体形状及び寸法

## 2.2 膜厚の測定

通常、膜厚の測定は磁石式、電磁式および超音波式の膜厚測定器を用いて行われるが、これらの測定機器を用いた膜厚測定では、角部や凹部付近で機器の性質上、膜厚を過大に評価してしまう。

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り膜厚計による角部の膜厚計測は適さないと判断した。そこで、環境促進実験用供試体と同一の要領で作製した膜厚測定用供試体を用いて、切断面膜厚を計測した。

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(金属皮膜では 200 倍)で拡大して写真撮影し、その後、一般部では 1mm 間隔、角部では形状に併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、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と考えられたので、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 C0、R2 では 8 点、C1 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 点である。

## 2.3 環境促進実験

### (1) 実験条件

本研究では環境促進実験条件としては、既往の塗装耐久性試験の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>12)</sup>に基づいて、JIS K5621 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。

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、最大設置供試体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

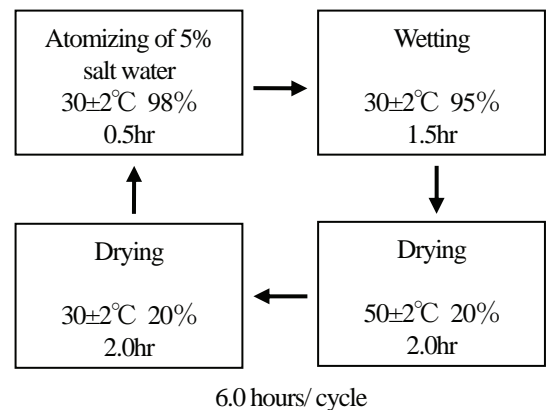


図-2 環境促進実験条件(S6 サイクル)

試験機(スガ試験機社製 CY-200S)を用いた。供試体は JIS Z2371 に規定されている「鉛直角に対し 20±5°」に準拠し、鉛直角から保持角 15°で配置した。さらに、約 25 日ごとに供試体設置位置を入れ替えるローテーションを行い、設置場所による実験条件の違いを最小化するように考えた<sup>3)</sup>。

### (2) 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、各供試体の写真撮影を行った。その際、角部付近の変化に特に着目するために供試体は 45°傾けた状態で写真撮影を行った。また、塗装系では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として、これを用いて防食性能の評価を行った。なお、塗装系の供試体長辺の端部など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、その他の部分に対しては、適宜、塗料および接着剤による補修を行うことにした。

金属皮膜は塗装系とは防食機構が大きく異なり、塗装系と同様な方法では防食性能の評価ができない。そこで実験終了後に、初期膜厚測定時と同様の切断加工をして残存膜厚を計測し、膜厚減少量から角部形状が防食性能に及ぼす影響を評価することとした。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 膜厚測定

膜厚計測用供試体を用いた断面観測から、角部形状ごとの角部膜厚、および一般部膜厚を得た。図-3には膜厚測定用供試体の一例として、A 塗装系の角部形状C0の一般部(上面部)と角部の写真を示すが、明らかに角部で膜厚が薄くなっていることが確認できた。

##### (1) 測定膜厚と目標膜厚

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。過剰な膜厚は乾燥不良や塗膜のわれの原因となるが、断面を観測する限りそのような現象は現れておらず、塗り直しなどの作業は行わないこととした。このため、この後検討することになる防食性能はより安全側に評価されることになる。

まず、A 塗装系の角部の膜厚は、R2では目標膜厚を満たしているものの、C0とC1では目標膜厚を大幅に下回り十分な膜厚が確保できていないことが分かる。

B, I 塗装系はA 塗装系と同様な傾向となっているが、C1において角部膜厚は、A 塗装系よりは目標膜厚に近い値になっている。C 塗装系では目標膜厚に対して実際の一般部の膜厚が大きいこともあり、全体的に膜厚は大きくなっており、角部においてもC0を除き目標膜厚を満たしている。

A, B, C, I 塗装系全てで、R2は目標膜厚を上回る値にはなっているが、A, C, I 塗装系では一般部の膜厚は目標膜厚の1.7~1.9倍程度の値となっている。

亜鉛アルミ合金溶射では、一般部及び角部形状によらず全ての角部膜厚で目標膜厚を上回っており、角部膜厚でも大きな違いはない。これに対して、溶融亜鉛めっきでは上面のC1, R2及び下面のR2を除く角部で目標膜厚を下回った。

##### (2) 一般部膜厚に対する角部膜厚の割合

図-4には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が、塗装系と金属皮膜系では傾向が異なっていることが分かる。塗装系では、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

とに見るとC0で21~42%、C1で41~74%、そして、R2で78~114%となり、全ての塗装系において角部膜

表-2 目標膜厚および測定膜厚

皮膜	角部形状	膜厚 (標準偏差) (Unit: $\mu\text{m}$ )		
		目標	一般部	角部
A 塗装系	C0	125	213 (32.5)	44 (11.3)
	C1			87 (24.3)
	R2			165 (18.5)
B 塗装系	C0	180	223 (25.0)	81 (11.9)
	C1			167 (54.1)
	R2			256 (39.6)
C 塗装系	C0	250	484 (41.7)	208 (44.0)
	C1			282 (85.5)
	R2			417 (71.1)
I 塗装系	C0	130	254 (26.3)	79 (19.4)
	C1			130 (33.5)
	R2			204 (21.5)
合金	上面	C0	100	113 (11.0)
		C1		155 (31.6)
		R2		111 (23.2)
	下面	C0	100	159 (26.9)
		C1		94 (19.7)
		R2		100 (37.9)
めっき	上面	C0	100	76 (22.2)
		C1		98 (28.9)
		R2		103 (10.9)
	下面	C0	100	79 (27.0)
		C1		134 (14.5)
		R2		92 (25.5)
				105 (7.3)

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
合金	12	12×7=84	147	23.3
めっき	12	12×7=84	118	13.2

(Unit:  $\mu\text{m}$ )

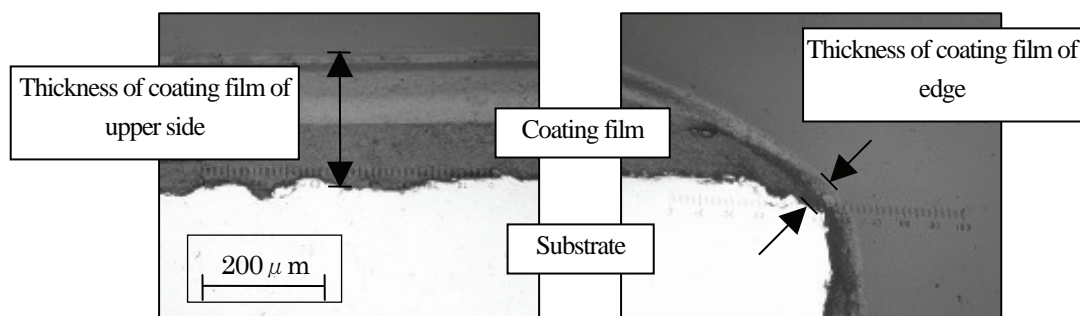


図-3 断面写真(A 塗装系:角部形状C0)

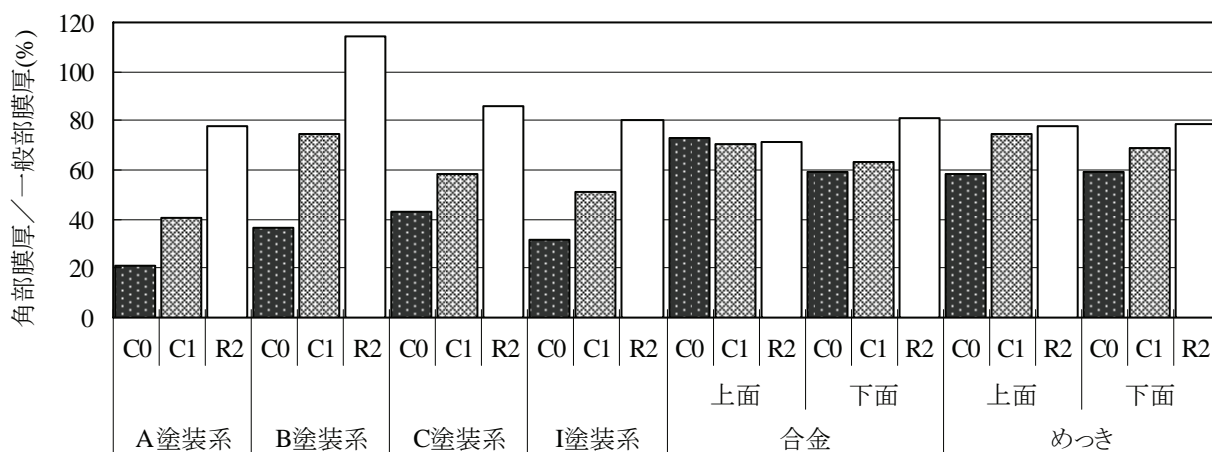


図-4 一般部膜厚に対する角部膜厚の割合

厚は  $C0 < C1 < R2$  となった。このことから、角部を無加工のまま、つまり角部形状  $C0$  のままで塗装を行なうと、角部の膜厚は一般部に対して A 塗装系では 21% しか確保できないことになり、防食性能に大きく影響する。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、それぞれ膜厚は 41%、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値であり、塗膜厚の確保が難しい角部であっても満たされるべきものである。ただし、必要以上の厚塗りにはタレや乾燥不良を起こす原因となるために避けなければならないとされている。従って、塗装系の膜厚の観点から言えば、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って角部の塗装を行うと良い。

金属皮膜では一般部に対する角部膜厚は 58% から 81% の範囲に分布しており、塗装系に比べればつきが小さい。個別に見ると塗装系と同様に膜厚が角部形状によって  $C0 < C1 < R2$  となる傾向が、合金の下面および、めっきの上面、下面で見られるが、合金の上面では  $C1$  の膜厚が  $C0$  と  $R2$  よりも小さくなっており、すべての場合で一定の傾向を示してはいない。また、一般部に対する角部膜厚の割合の違いは  $C0$  と  $R2$  で比べても最大でもその差は 22% であり、塗装系で最も違いが小さい C 塗装系の 44% と比べても小さい。これらのことから、金属皮膜では角部形状が角部の膜厚に及ぼす影響は小さいと言える。実際に、角部を  $R=2\text{mm}$  で曲面状に加工することで一般部の 70% 以上の膜厚は確保できるが、無加工のまま皮膜処理を施したとしても 60% 程度の膜厚は確保できると言える。

### (3) 膜厚計による一般部の膜厚測定

3.1(1) で用いた切断した供試体を含む、全ての供試体の一般部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、標準偏差は小さな値であり、各皮膜の 12 体の供試体の中で、大きな違いはなかった。すなわち、膜厚測定用供試体と環境促進実験用供試体の間に膜厚の違いはなかったことが確認できた。ただし、膜厚計による測定結果と、表-2 に示した測定結果において A 塗装系で大きな差が出ている。これは A 塗装系では断面中心付近で小さな値が計測されているが、膜厚計による計測では中心を計測点としたために、膜厚を過小評価してしまったためと考えられる。

## 3.2 環境促進実験

環境促進試験機を用いて S6 サイクルによる実験を塗装系で 400 日間、金属皮膜で 200 日間行った。この結果を塗装系では外観観察と発錆率の観点から、金属皮膜では外観観察と膜厚減少量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。図に示すように、400 日間の環境促進実験で A 塗装系では大きな外観変化が生じた。しかし、それ以外の塗装系ではわずかししか発錆せず、外観の変化はほとんど観察されなかった。そこで、以降は主に A 塗装系と金属皮膜に関して定量的な評価を行う。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。

### (1) 外観観察

図-5 に示すように、A 塗装系では、200 日経過の時点で初期状態に比べ全体的に黄色く変色している。これは、図には示してはいないが 25 日経過の時点から見られており、また既往の研究<sup>3)</sup>でも確認されている。膜厚が一般部よりも薄いことが確認された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  $C0$  では 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、 $C1$  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

経過日数	C0	C1	R2
0			
200			
400			

(a) A 塗装系

経過日数	C0	C1	R2
0			
200			
400			

(b) B 塗装系

経過日数	C0	C1	R2
0			
200			
400			

(c) C 塗装系

経過日数	C0	C1	R2
0			
200			
400			

(d) I 塗装系

図-5 塗装系別の外観変化

	C0	C1	R2
合金			
めっき			

図-6 金属皮膜の外観状況(200日経過時)

らつきが大きかった。ここでは、角部形状ごとにすべての供試体の角部をつなぎ合わせた供試体を仮想し、一辺の角部に生じたさびとして取り扱うこととしたが、各辺を個別に扱った時のばらつきについても検討した。

B, C, I 塗装系では、供試体作製上弱点となってしまう、長辺端部及び下面からしか発錆しておらず、また、変色も見られなかった。

金属皮膜に関して、実験終了後、すなわち 200 日経過時の外観を図-6 に示す。亜鉛アルミ合金溶射では、ほぼ全面にわたって白さびが発生し、さらに皮膜の剥離が生じている。角部からの剥離が一般部からのものより多いということではなく、角部形状による違いも明らかな違いとしては現れていない。溶融亜鉛めっきでは白さびが全面で発生しており、赤さびの発生も一部見られる。角部からのさびに関しては亜鉛アルミ合金溶射と同様に、一般部との大きな違いは見られない。

## (2) 発錆率

2.3(2)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。図-7 に横軸に経過時間、縦軸に発錆率をとって発錆率の変化を示す。図中、■、◇、●はそれぞれ C0, C1, R2 の平均発錆率を表しており、M と S はそれぞれ平均値と標準偏差を表している。C0 では、200 日を経過するまでは発錆率は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小さくなり、400 日を経過した付近ではほぼ横ばい状態になった。

C1 では 100 日を経過する辺りまでは発錆率の増加は少ないが、その後は C0 に比べれば傾きは小さいもののおおむね経過時間に比例して増加しているといえる。また、C0 で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と比べると小さく、これらのことから考えて、発錆率の増加の傾向として、角部形状により時期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経過時間と比例するように増加し、ある程度の値に達した後はさびがつながることによって、発錆率の増加割合が減少していくと考えられる。

R2 に関しては、発錆率が 400 日を経過しても 10%未滿とさびの進行が遅いので、この傾向を確認することは出来ていないが、今後、発錆率が増加していくにつれ、同様な傾向が現れてくると考えられる。

400 日経過の段階で発錆率は C0, C1, R2 でそれぞれ、99, 28, 6%となっており、大きな違いが出ている。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、その効果を定量的に捉えることができた。

## (3) 膜厚減少量

金属皮膜は防食機構が塗装系とは異なるために、塗装系とは異なる方法で角部形状が防食性能に与える影響を評価する必要がある。ここでは、環境促進実験終了後の供試体を初期状態の膜厚計測時に作製した膜厚計測用供試

体と同じように切断加工し、顕微鏡を用いて膜厚測定することで膜厚減少量を測定することとした。亜鉛アルミ合金溶射や溶融亜鉛めっきに含まれる亜鉛は、亜鉛皮膜自体が消耗される犠牲防食作用により防食効果を発揮するものであり、膜厚減少量の大小が劣化の程度を評価する指標となる。

まず、初期膜厚と残存膜厚の平均値から膜厚減少量を算出しようと試みたが、残存膜厚のばらつきが大きく適切に評価できなかつた。そこで、次に、計測された膜厚を 5 $\mu$ m ごとに区切り、膜厚の計測頻度から角部形状による防食性能の違いを評価することにした。図-8 に横軸に計測膜厚、縦軸に計測頻度をとって、亜鉛アルミ合金溶射の上面の一般部、C0, C1, R2 それぞれの角部の初期膜厚と残存膜厚を示す。図-8 には、初期膜厚と残存膜厚の平均値(M)および標準偏差(S)も示してある。計測点数は上面で 80 点、C0, R2 で 8 点、C1 で 16 点となっている。

平均値で評価すると、膜厚減少量は一般部、R2, C1, C0 の順で小さくなっており、一般部で最も防食性能が低いと評価される。また、角部においても曲面加工を行なった R2 が最も低い防食性能を持つという結果が得られた。これはばらつきが大きいことと、皮膜が剥離してしまっていた部分があり膜厚が 0~5 $\mu$ m と計測された点が他の値に比べて多くなったためと考えられ、平均値で評価するのは不適當であることが分かった。

平均値ではなく膜厚計測頻度の分布で評価すると、一般部では初期膜厚が大きいこともあり、残存膜厚も大きな値から分布しているが、角部では、初期膜厚が大きく計測された R2 で、残存膜厚でも大きい値が計測されており、全体的にみれば大きな違いはない。また、3.1(2)で示したが、金属皮膜では角部形状が初期膜厚に与える影響は小さく、これらを考慮すれば、膜厚減少量を基にした防食性能の面からも角部を加工するメリットは塗装系に比べて小さいと考えられる。なお、ここでは示していないが、亜鉛アルミ合金溶射の下面部および溶融亜鉛めっきの上面と下面で同様の傾向を示した。

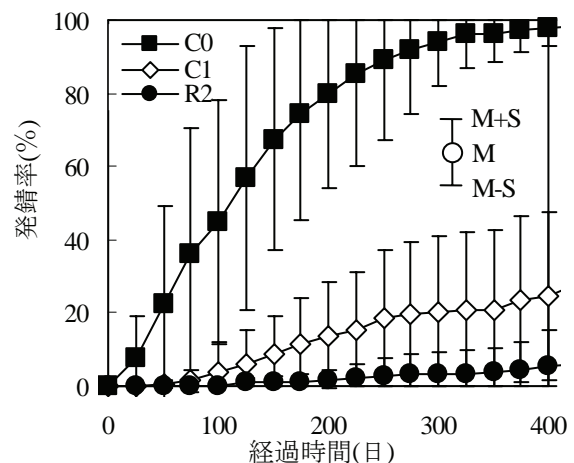


図-7 発錆率の推移

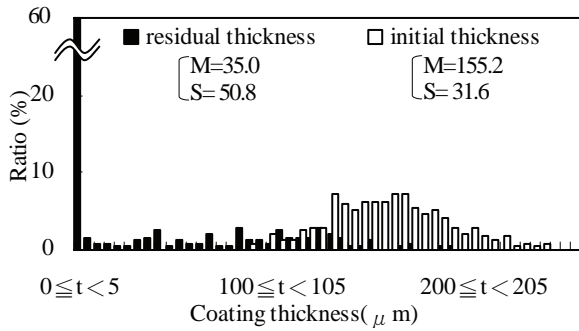
#### 4. 膜厚と防食性能の関係

これまでに、角部形状と膜厚の関係、角部形状と防食性能の関係について検討してきたが、さらに角部の膜厚と防食性能の関係に着目したい。金属皮膜に関しては、角部形状が膜厚に与える影響および角部形状が防食性能に与える影響は小さいことを既に示し、膜厚と防食性能との間にも有意な関係は見出せないことを示した。

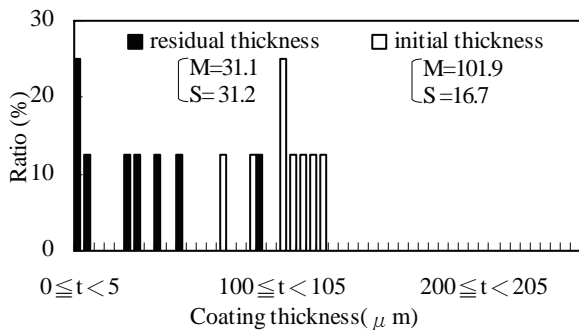
横軸に膜厚、縦軸に発錆率をとって、A 塗装系での膜厚と発錆率の関係の推移を図-9に示す。図-9には、それぞれ100日、200日、300日、400日経過時の値が示されている。

今回の実験で用いたA 塗装系の平均計測膜厚はC0で44 $\mu\text{m}$ 、C1で87 $\mu\text{m}$ 、R2で169 $\mu\text{m}$ の3点であり、この3点から得られたものだけですべての膜厚に関して確実な結論を得るのは困難である。しかし、3点の関係から全体の大きな傾向を把握することはできると考える。

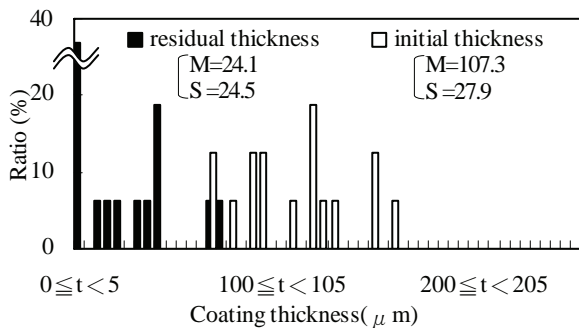
まず図-9より、すべての計測時で膜厚が44 $\mu\text{m}$ では87 $\mu\text{m}$ の場合に比べ発錆率が急激に増加しており、この間のある膜厚よりも膜厚が薄い場合に、防食性能が急激に低下することが分かる。次に、実験日数が200、300、400日と経過すると、どの膜厚でも発錆率が増加していくが、その増加量は膜厚が薄い場合に顕著であることも分かる。なお、膜厚が44 $\mu\text{m}$ の場合、300、400日経過時でそれぞれ増加量が少ないが、これは発錆率が100%に近くなり、新たにさびが発生する場所が限られてきたためだと考えられる。また、400日経過時の発錆率に引いた累乗近似曲線を見ると、200 $\mu\text{m}$ 程度の膜厚あれば防食性能が他の塗装系に比べて劣るA 塗装系であっても、十分な耐久性が得られると予測される。これは既往の研究<sup>13)</sup>で、膜厚が200 $\mu\text{m}$ を上回ると、海洋環境でも長期にわたり良好な防食性能を保持すると示されているのと良く符合する。



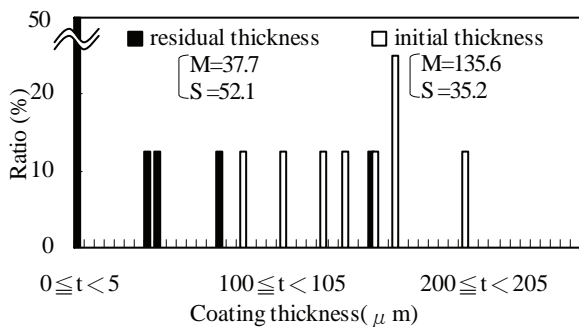
(a) 一般部



(b) 角部形状 C0



(c) 角部形状 C1



(d) 角部形状 R2

図-8 初期及び残存膜厚の分布  
(亜鉛アルミ合金溶射上面)

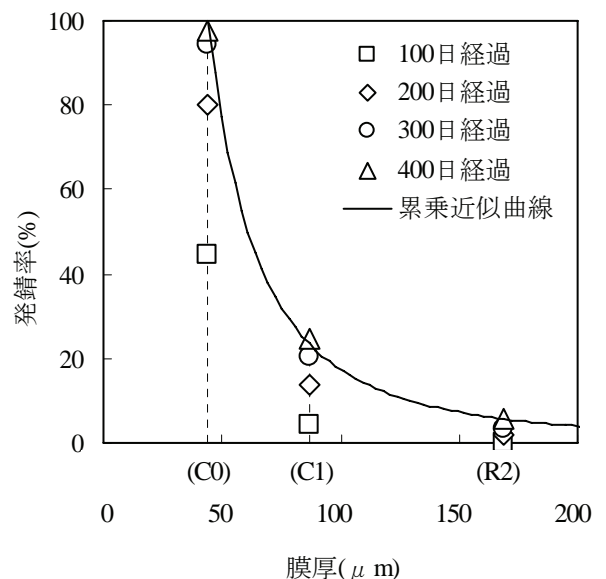


図-9 膜厚と発錆率の関係(A 塗装系)



## 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。以下に本基礎的研究から得られた主な知見をまとめる。

1. 膜厚測定の結果から、本実験では、角部の膜厚は、一般部膜厚に対して塗装系ではC0で21~42%、C1で41~74%、R2で78~114%となった。また、金属皮膜では角部形状による違いはほとんどないことも分かった。
2. 防食性能を維持するために目標膜厚を確保し、またタレや乾燥不良を生じさせる過剰膜厚を避けるため、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倍程度を狙って塗装するのが最も良いことが分かった。
3. 環境促進実験から、A塗装系において400日経過時で発錆率はC0、C1、R2でそれぞれ、99、28、6%となり、角部加工形状により、さびの発生に大きな違いがあることを定量的に示した。また、金属皮膜では、角部形状による違いはほとんど見られず、角部加工によって得られるメリットは塗装系に比べて小さいことが分かった。
4. A塗装系の膜厚と発錆率の関係から、膜厚が44 $\mu\text{m}$ では87 $\mu\text{m}$ の場合に比べ発錆率が急激に増加しており、この間のある膜厚よりも膜厚が薄い場合に、塗膜の劣化が急激に進行する可能性があることが分かった。
5. A塗装系では、実験日数が200、300、400日と経過すると、どの膜厚でも発錆率が増加していくが、その増加量は膜厚が薄い場合に顕著であることが分かった。
6. 本環境促進実験結果から、A塗装系でも膜厚が200 $\mu\text{m}$ 程度ある場合、長期間に渡ってさびの発生を抑制できる可能性があることを示した。

環境促進実験が400日を経過した段階でも、B、C、I塗装系では、A塗装系のように目立ったさびが発生していない。現在も環境促進実験を継続しており、今後定量的評価が可能になるものと考えられる。

## 謝辞

本研究の一部は、日本鉄鋼連盟による構造研究・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) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 社団法人日本道路橋会：鋼道路橋塗装便覧, 1990.
- 7) 社団法人日本道路協会：鋼道路橋塗装・防食便覧, 2005.
- 8) 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.
- 9) 社団法人日本橋梁建設協会：亜鉛・アルミニウム溶射マニュアル(改訂版), 2003.
- 10) 社団法人日本橋梁建設協会, 社団法人日本溶融亜鉛鍍金協会：溶融亜鉛めっき橋ガイドブック, 1998.
- 11) 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研究, 構造工学論文集, Vol.51A, pp.1069-1079, 2005.
- 12) 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.
- 13) 桐村勝也, 橋本達知, 佐藤靖, 大川敏夫：海洋環境における防食塗装, 鉄道総研報告, No.1070, 1978.
- 14) 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.

(2006年9月10日 受付)