

製作・溶接・防食に関する研究 —製作小委員会における最近の活動報告—

製作小委員会

入部 孝夫 村上 貴紀 鈴木 克弥 前田 博

1. はじめに

製作小委員会は、製作部会、防食部会、耐候性鋼橋梁部会の3部会から構成されている。製作部会では溶接を主体とした製作に関する研究、防食部会では防食の観点からの鋼構造物の耐久性向上を目的とした研究、耐候性鋼橋梁部会では既設耐候性鋼橋梁のさびの評価方法に関する研究を行っている。

本稿では、製作小委員会3部会の研究の成果と途中経過の概略について報告する。

2. 製作部会の活動報告

2.1 最近の研究テーマ

製作部会では、過去に行った裏波ビードを有する片面横突合せ溶接継手の疲労強度や荷重伝達型十字すみ肉継手の静的強度の研究など、溶接を主体とした研究を行っており、昨年度からは（一社）日本溶接協会との共同研究として組立溶接の規定緩和に向けた研究を行っている。また、橋梁分野のi-Constructionであるi-Bridgeへの取り組みとして、（一社）日本鉄鋼連盟と共同で鋼材検査証明書（以下、ミルシートと呼ぶ）の電子化の検討を行っている。

2.2 組立溶接の規定緩和に向けた研究

(1) 研究の背景と目的

「道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋・鋼部材編」¹⁾（以下、道示と呼ぶ）では、T溶接継手にショートビードですみ肉溶接した時に生じるヒールクラック（図-2.1）を防止するために、組立溶接のすみ肉脚長は4mm以上、長さは80mm以上、ただし厚い方の板厚が12mm以下の場合または鋼材の溶接割れ感受性組成 P_{CM} が0.22%以下の場合には50mm以上とすることができると規定している。なお、道示の組立溶接の規定は文献2)を参考としており、文献2)では「CO₂溶接については被覆アーク溶接に比して低温割れ感受性は低く、ヒールクラックは発生せずウェブ側HAZ

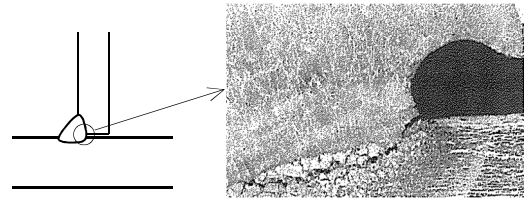


図-2.1 「溶接継手に生じるヒールクラックの例」²⁾

の微小な割れのみであった。今後の研究によりヒールクラックが発生しないことの明確な理由が明らかになれば、仮付け溶接長の制約を緩和できる可能性が高い。」としている。

鋼橋はすみ肉溶接継手が多く、組立溶接を含み最近ではCO₂溶接にて施工されている。このすみ肉溶接継手の指定脚長が4mmや6mmでは、組立溶接が4mm以上のため組立溶接位置のすみ肉溶接が凸形状となりやすく、溶接外観に影響することがある。また、フランジと補剛材とのすみ肉溶接継手などは継手長が短いために組立溶接が80mm以上確保できないことがあり、この場合は組立溶接で予熱が必要となる。道示では厚い方の板厚の P_{CM} が0.22%以下であれば50mm以上とできるとしているが、組立溶接のために予熱低減鋼など高性能鋼を採用することはコスト面で難しい。よって、組立溶接の脚長や長さの制約条件の緩和は生産性向上や溶接品質の確保に繋がると言える。

以上のことから、ヒールクラックの発生要因を明確にし、CO₂溶接における組立溶接の制約条件の緩和を目的として、文献2)と同じ形状の試験体にてヒールクラックの発生要因と考えられる鋼材の溶接割れ感受性組成 P_{CM} 、溶接部の拡散性水素量、そして脚長と溶接長さを変化させてヒールクラック試験を行った。

(2) 試験体

試験体の形状・寸法を図-2.2に示す。試験体の形状・寸法は文献2)の非拘束型とし、立板の端面を機

表-2.1 供試鋼板の化学成分と試験体の組合せ

目標 P _{CM} (%)	目標 Ceq (%)	材質	板厚 (mm)	適用	化学成分(%) ミルシート値												
					C × 100	Si × 100	Mn × 100	P × 1000	S × 1000	Cu × 100	Ni × 100	Cr × 100	Mo × 100	V × 1000	P _{CM}	Ceq	PN
0.28	0.43	SM520C	36	下板	17	46	134	6	3	10	10	3	7	48	0.27	0.44	0.34
		SM520C	9	立板	17	46	134	6	3	10	10	3	7	48	0.27	0.44	0.34
0.25	0.40	SM490YB	36	下板	16	34	135	12	3	1	1	3	0	35	0.25	0.41	0.33
		SM490YB	9	立板	16	37	141	11	3	1	1	3	0	2	0.25	0.42	0.34
0.22	0.36	SM490YB	36	下板	10	30	148	16	3	1	1	1	0	2	0.19	0.36	0.29
		SM490YB	9	立板	16	20	113	16	4	1	1	3	0	1	0.23	0.36	0.31

$P_{CM} = C + Mn/20 + Si/30 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + V/10 + Cu/20 + 5B$ (%)

$Ceq = C + Mn/6 + Si/24 + Ni/40 + Cr/5 + Mo/4 + V/14 + (Cu/13)$ (%)

ただし、() の項は $Cu \geq 0.5\%$ の場合に加える。

$PN = C + Si/20 + Mn/10 + 4P/3 + Cu/20 + Cr/30 + Mo/20$ (%)⁴⁾

机械加工して試験体のルートギャップを一定にする。
 なお、ルートギャップは道示におけるすみ肉溶接の材片の密着度の最大許容値である 1mm としている。
 試験溶接部のプライマーは、下板は組立前にグラインダーにて除去し、立板は除去しない。板厚は、プレートガーダー橋のフランジとウェブの T 溶接継手を想定し、さらにヒールクラックと板厚との関係から、下板（フランジを想定）は 36mm、立板（ウェブを想定）は 9mm としている²⁾。

供試鋼板は、ヒールクラックと溶接割れ感受性組成 P_{CM} の関係を確認するために、目標とする P_{CM} 値を 0.28% (Ceq0.43%)、0.25% (Ceq0.40%)、0.22% (Ceq0.36%) の 3 種類とし、試験体の下板と立板が同じ程度の P_{CM} 値となるようにしている。なお、材質は 490N/mm² 級鋼としたが、目標とする P_{CM} 値の鋼板入手を優先したため、目標 P_{CM} 0.28% の材質は SM520C である。供試鋼板の化学成分と試験体の組合せを表-2.1 に示す。各試験体の数量は、割れ試験 3 体、硬さ試験 1 体、計 4 体である。

(3) 溶接方法および溶接材料

試験溶接の溶接方法は、炭酸ガスアーク溶接（以下、CO₂ 溶接と呼ぶ）とし、溶接材料は組立溶接で一般に使用されている表-2.2 に示すソリッドワイヤとフラックス入りワイヤの 2 種類である。

(4) 脚長および溶接長さ

試験溶接の脚長および溶接長さは、組立溶接の脚長や長さの制約条件の緩和が可能か確認するために、道示の規定である脚長 4mm、溶接長さ 80mm の条件と、脚長 3mm、溶接長さ 40mm の条件も行う。試験体の P_{CM} 、溶接材料、脚長、溶接長さの組合せを表-2.3 に示す。

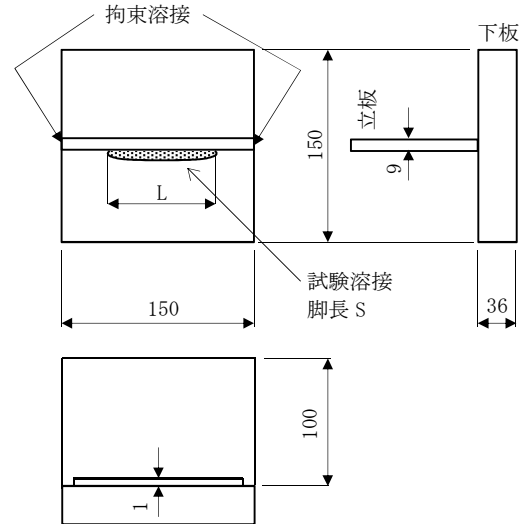


図-2.2 試験体形状

表-2.2 溶接材料

溶接方法	溶接材料の種類	JIS	径(mm)
CO ₂ 溶接	ソリッドワイヤ	JIS Z 3312 YGW12	1.2
	フラックス入りワイヤ	JIS Z 3313 T49J0T1-1CA-U	1.2

表-2.3 試験体の組合せ

溶接材料	P _{CM} (%)	脚長 (mm)	溶接長さ (mm)
ソリッドワイヤ	0.27	3	40
			80
		4	40
			80
	0.25	3	40
			80
		4	40
			80
	0.19	3	40
			80
		4	40
			80
フラックス入りワイヤ	0.27	3	40
			80
		4	40
			80
	0.25	3	40
			80
		4	40
			80
	0.19	3	40
			80
		4	40
			80

(5) 試験環境

試験溶接は恒温室とし、室温は道示の予熱の規定でウォームアップ加熱が不要となる 6℃とする。湿度は恒温室の室温の制御の都合上、50～70%である。

(6) 予熱

道示における予熱温度の標準を表-2.4 に、ヒールクラック感受性指数から算出する各試験体のヒールクラック防止予熱温度³⁾を表-2.5 に示す。P_{CM}0.27%の予熱温度は、表-2.4 では 50℃以上、表-2.5 では 34～114℃であり、道示の所定の予熱を行うとヒールクラックは発生しないと思われる。しかし、本研究はヒールクラックが発生しない理由を明らかにすることを目的としている。よって、P_{CM} 値によらず予熱は行わないことにした。

(7) 溶接条件および試験溶接

溶込み深さがヒールクラック発生に影響することが考えられるため、あらかじめソリッドワイヤとフラックス入りワイヤでの溶込み深さが同じ程度になるように溶接条件を調整した。なお、各試験体で脚長が同程度とするために、試験体ごとに速度を調整した自動走行台車による自動溶接にて行った。試験溶接状況を写真-2.1 に示す。

(8) 試験結果

ヒールクラック発生の有無の確認とヒールクラックの長さの測定を行う割れ検査は、立板を下板から 3mm の位置で鋸切断し、フライス盤にて下板の表面まで切削後、磁粉探傷試験にて行った。各試験体の溶接条件および割れ試験結果を表-2.6 に示す。いずれの試験体もヒールクラックは認められなかった。

硬さ試験は、試験溶接ビードの中央から試験片を採取し、試験溶接ビードの止端から 2mm の位置で行った。P_{CM} 値と下板側の最高硬さの関係を図-2.3 に示すが、いずれの試験体も熱影響部が最高硬さ位置である。P_{CM} が大きくなると熱影響部の硬さは大きくなり、最高硬さが約 430HV でもヒールクラックは生じていない。なお、一般に熱影響部の硬さは入熱量が小さくなると大きくなるが、脚長 3mm と 4mm では入熱量の差が小さいため、明確な差は認められない。

本研究では、ヒールクラックの試験と同じ環境で、

表-2.4 道示における予熱温度の標準

P _{CM} (%)	溶接方法	予熱温度		
		板厚区分		
		t≤25	25<t≤40	40<t≤100
0.21	SMAW	予熱なし	予熱なし	予熱なし
	GMAW, SAW	予熱なし	予熱なし	予熱なし
0.22	SMAW	予熱なし	予熱なし	予熱なし
	GMAW, SAW	予熱なし	予熱なし	予熱なし
0.23	SMAW	予熱なし	予熱なし	50
	GMAW, SAW	予熱なし	予熱なし	予熱なし
0.24	SMAW	予熱なし	予熱なし	50
	GMAW, SAW	予熱なし	予熱なし	予熱なし
0.25	SMAW	予熱なし	50	50
	GMAW, SAW	予熱なし	予熱なし	50
0.26	SMAW	予熱なし	50	80
	GMAW, SAW	予熱なし	予熱なし	50
0.27	SMAW	50	80	80
	GMAW, SAW	予熱なし	50	50
0.28	SMAW	50	80	100
	GMAW, SAW	50	50	80
0.29	SMAW	80	100	100
	GMAW, SAW	50	80	80

表-2.5 ヒールクラック防止予熱温度

P _{CM} (%)	材質	板厚 (mm)	PN (%)	ヒールクラック防止 予熱温度 (°C)
0.27	SM520C	36	0.34	74±40
0.25	SM490YB	36	0.33	55.5±40
0.19	SM490YB	36	0.29	-18.5±40

ヒールクラック防止予熱温度の算出式

$$T=1850PN-555\pm 40 \quad (^\circ\text{C})$$



写真-2.1 試験溶接状況

各溶接材料による溶接部の拡散性水素量をガスクロマトグラフ法にて計測している。その結果を表-2.7 に示すが、グリセリン置換法に換算した値も示す。なお、P_{CM} 値が 0.27% と非常に高い熱影響部の硬さにも関わらずヒールクラックが生じていないのは、拡散性水素量が少ないためと考えられる。

(9) まとめ

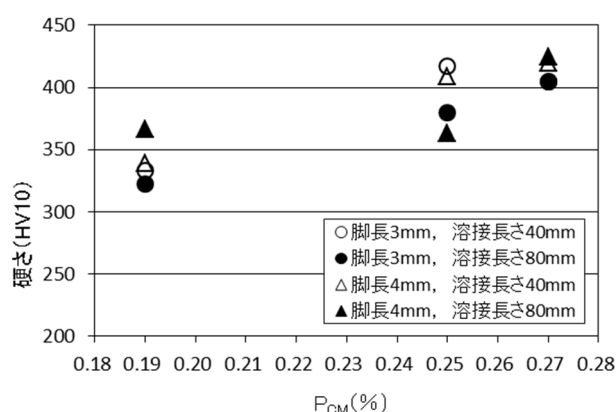
現時点では、CO₂ 溶接で脚長 3mm、溶接長さ 40mm の条件でもヒールクラックは発生しておらず、CO₂

表-2.6 溶接条件および割れ試験結果

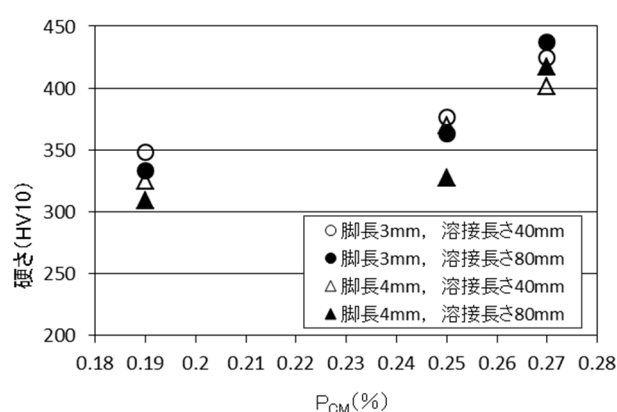
溶接材料	P _{CM} (%)	脚長 (mm)	溶接長 (mm)	試験体No.	溶接条件				割れ試験結果 割れの有無
					電流 (A)	電圧 (V)	速度 (mm/min)	入熱量 (J/mm)	
ソリッドワイヤ	0.27	3	40	YA34	160	23	500	442	なし
			80	YA38	160	23	500	442	なし
		4	40	YA44	160	23	400	552	なし
			80	YA48	160	23	400	552	なし
	0.25	3	40	YB34	160	23	500	442	なし
			80	YB38	160	23	500	442	なし
		4	40	YB44	160	23	400	552	なし
			80	YB48	160	23	400	552	なし
	0.19	3	40	YC34	160	23	500	442	なし
			80	YC38	160	23	500	442	なし
		4	40	YC44	160	23	400	552	なし
			80	YC48	160	23	400	552	なし
フラックス入りワイヤ	0.27	3	40	FA34	230	31	880	486	なし
			80	FA38	220	31	880	465	なし
		4	40	FA44	240	31	650	687	なし
			80	FA48	240	31	650	687	なし
	0.25	3	40	FB34	230	31	880	486	なし
			80	FB38	230	31	880	486	なし
		4	40	FB44	240	31	650	687	なし
			80	FB48	240	31	650	687	なし
	0.19	3	40	FC34	220	31	880	465	なし
			80	FC38	220	31	880	465	なし
		4	40	FC44	240	31	650	687	なし
			80	FC48	240	31	650	687	なし

表-2.7 溶接部の拡散性水素量測定結果

溶接材料	溶着金属当たりの水素量[H _{DM}] (mL/100g)	溶着金属当たりの水素量[H _{GL}] [H _{DM}]より換算 (mL/100g)
ソリッドワイヤ	0.8	—
フラックス入りワイヤ	2.7	0.4

H_{DM} : ガスクロマトグラフ法による水素量H_{GL} : グリセリン置換法による水素量H_{GL}=0.79H_{DM}-1.73

a) ソリッドワイヤ



b) フラックス入りワイヤ

図-2.3 硬さ試験結果

溶接でのヒールクラック発生要因が明確になっていない。ヒールクラックを発生させるために、さらに脚長や溶接長さを小さくして試験を行うことが考え

られるが、硬さ試験の結果から入熱量を小さくしても熱影響部の硬さは大きくなり、ヒールクラックが発生する可能性は小さいと考えられる。今後は、

実施工の条件とは異なるが、試験溶接箇所の塗装やシールドガスへの水素混入などで溶接部の拡散性水素量を大きくし、拡散性水素量の影響を確認する。

2.3 ミルシートの電子化の検討

鋼材のミルシートは、規格番号、鋼材の種類、溶鋼番号、鋼塊番号、インゴット番号、板番または整理番号、ロール番号、形状・寸法、化学成分、ならびに材料試験結果等が記されている⁴⁾。鋼材メーカーによって表示方法や内容が異なるが、鋼材自体にも製造業者名(記号)、鋼材の種類、整理番号、形状・寸法等が表示されている⁴⁾。鋼材メーカーにて鋼材を製造後、鋼橋製作工場またはシャーリング会社にて受入れ確認を行うが、ミルシートと現品との照合にて、規格、形状・寸法、整理番号および員数等を確認する。ミルシートは、工事の規模にもよるが大量の紙を鋼材メーカーにて作成し、鋼橋製作工場に送付して、鋼橋製作工場で保管している。また、鋼橋製作工場では施工時の品質管理のために、Ceq や P_{CM} 等を確認している。

このミルシートは、一部の造船メーカーで電子化されており、造船では大量のミルシートが作成されることから、ペーパーレスによる書類の簡素化、経費削減および保管スペース削減で効果が得られている。このことから、鋼橋においてもミルシートの電子化を検討しており、下記の効果が考えられる。

① 環境負荷低減

② 生産性向上

- ・ミルシートの閲覧・検索の簡略化
- ・書類作成省力化による業務の効率化
- ・CSV データを用いることによる品質管理業務の効率化

③ 維持管理への活用 (CIM モデルへの付与)

現時点では、ミルシートの電子化への課題があり、今後、課題解決に向けて、まずはミルシートの電子化から、順次、(一社)日本鉄鋼連盟と共同で取り組んでいく。

また、i-Bridge 推進活動として、各種検査帳票作成の効率化、タブレット、モバイル機器導入等による検査の適正化へも取り組んでおり、生産性の向上に繋がると考えている。

3. 防食部会の活動報告

3.1 最近の研究テーマ

防食部会では、鋼橋における各種防食仕様の耐久性等を確認するため、環境の異なる各地に試験体を設置し、長期間にわたる各種暴露試験を継続実施中である。本稿では、下記の2つの試験について報告する。

① 凍結防止剤散布環境における塗膜面洗浄の有効性確認

② 内面塗装仕様における部材角部の形状の違いによる塗料の付着状況および防せい性の確認

3.2 塗膜面洗浄効果

(1) 研究の背景と目的

塗膜の耐久性に悪影響を与える要因として塩分の付着が挙げられる。近年、冬季における凍結防止剤の散布量が増加し、海岸部以外においても塩分の影響を考慮する必要性が生じている。このことから、定期的な洗浄によって塗膜の耐久性がどの程度向上するのかを確認することとした。

(2) 試験概要

- 1) 試験場所：石川県金沢市北陸自動車道金沢東 IC 付近の高架橋下 (写真-3.1)
- 2) 暴露期間：2005 年 10 月～(12 年経過継続中)
- 3) 暴露環境：上方には北陸自動車道、両側は国道 8 号線金沢バイパスと凍結防止剤散布路線に囲まれた環境

(3) 試験体

試験体は、断面 H350×175×7×11、長さ 500mm で、端部 110mm の範囲にボルト連結部を再現し、塗装仕様ごとに 2 体製作した。

(4) 試験体の洗浄方法

試験体の洗浄方法を以下に示す。

- 1) 1 体は洗浄を行わない
- 2) もう 1 体については下記の条件で調査時に洗浄を行う。洗浄状況を写真-3.2 に示す。

水洗の頻度：1 回/年とし、洗浄回数は 1 回
水洗の時期：冬季の凍結防止剤散布が終了した時点

水洗の条件：水量 3.5～4.0 L/m²
水圧 6～8 MPa

水洗速度 50 cm/分

(5) 試験項目

試験項目は下記の3項目とする。

1) 塗膜外観観察

さび, はがれ, われ, ふくれなどを調査する。

評価方法は ASTM 塗膜評価基準に準拠する。

2) 塗膜カット部の評価

塗膜カット部からのさび, ふくれ幅を評価する。

3) 付着塩分量評価

電導度法で測定する。

(6) 塗装仕様

試験体の塗装仕様を下記に示す。なお, 洗浄効果を短期間で確認するため, A-1 塗装系の規定膜厚半分の試験体も製作した。

① 鋼道路橋塗装便覧 (平成2年改訂版) :

A-1 塗装系

② 鋼道路橋塗装便覧 (平成2年改訂版) :

A-1 塗装系 (塗装膜厚半分)

③ 日本道路公団 (現: 東・中・西日本高速道路株式会社) : I 塗装系

④ 鋼道路橋塗装便覧 (平成2年改訂版) :

C-2 塗装系

(7) 10年後試験結果

1) 外観調査結果

外観調査結果を写真-3.3 および図-3.1 に示す。図

3.1 は, ASTM-D610-01 による 10 段階での評価結果である。A-1 塗装仕様および A-1 塗装仕様 (膜厚半分) では, 下フランジ両面で水洗の効果が確認できた。しかし, 上フランジ両面とウェブ両面では明確な効果は確認できなかった。なお, A-1 塗装仕様および A-1 塗装仕様 (膜厚半分) では発せい面積が大きく, A-1 塗装仕様よりも耐久性が高い I 塗装仕様および C-2 塗装仕様では, ほとんどの測定箇所でも異常が確認されなかった。

2) 付着塩分量調査結果

付着塩分量の多い部位は, 下フランジ下面と山側ウェブである。ウェブでは山側と海側で大きく差があり, 塩分の付着する傾向は設置環境や橋梁の部位によって異なることが確認できた。水洗効果が確認



a) 海側



b) 山側

写真-3.1 試験体設置状況



写真-3.2 洗浄状況

できなかった上フランジ上面と, 水洗効果が確認できた下フランジ下面で, 凍結防止剤散布前 (9 年目の 10 月) と散布後 (10 年目の 6 月) で付着塩分量を比較した (図-3.2)。上フランジ上面では, 散布前と散布後で水洗の有無による付着塩分量の差が小さいのに対して, 気象条件や設置環境などの影響を受け難い下フランジ下面では, 水洗により散布前と散布後の付着塩分量の差が大きくでている。

(8) まとめ

10 年の調査結果の範囲において, 凍結防止剤散布環境下での塗膜面洗浄の有効性について, 以下の知見が得られた。

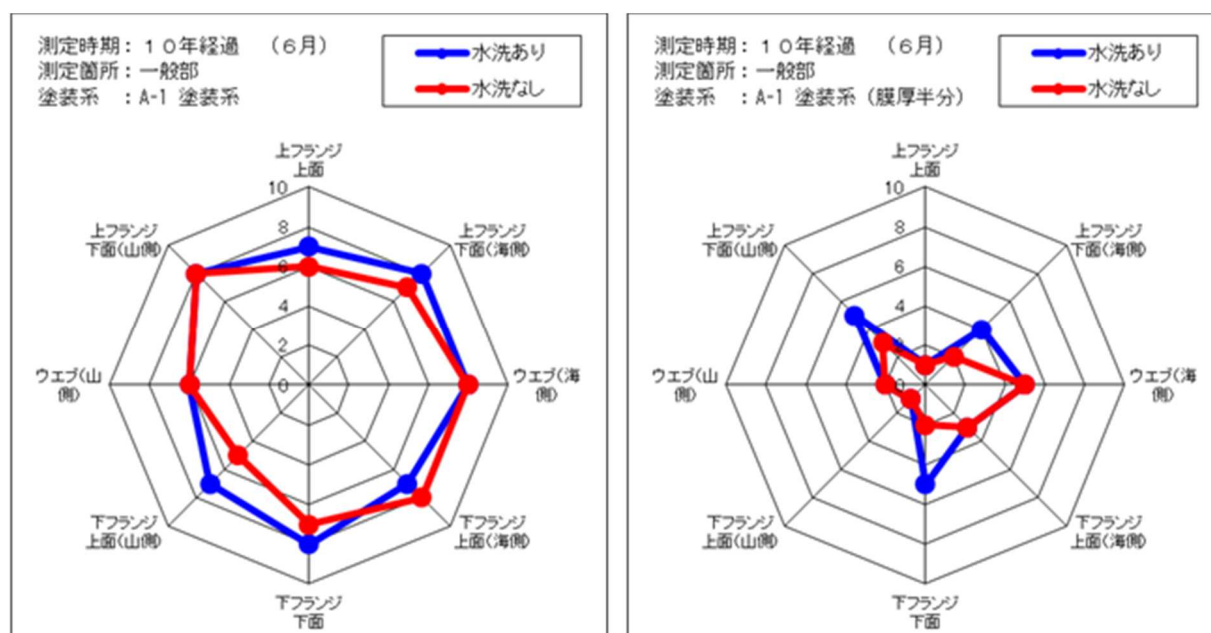
- 1) 耐久性の低い A 塗装系には洗浄による効果が確認できた。

- 2) 洗浄の有効な部位は下フランジ下面と下フランジ上面である。
- 3) 凍結防止剤散布期間終了後に洗浄を行うことで効果が発現する。
- 4) 付着塩分量は降雨や風向きなどの気象条件、および設置環境が大きく影響する。

今後は、塗膜カット部における発せい状況の確認を行い、塗膜の劣化した橋梁の延命化に対する洗浄の有効性を確認する予定である。また、I 塗装系およびC-2 塗装系に対する洗浄の効果についても確認するために調査を継続する。

部位	水洗なし	水洗あり
下フランジ 下面		
下フランジ 上面海側 及び ウェブ 海側		
下フランジ 上面山側 及び ウェブ 山側		

写真-3.3 水洗の有無による発せい状況の比較写真(A-1 塗装仕様(膜厚半分))



ASTM-D610-01 による0～10段階評価であり、10がさびなしで、さびの面積率が大きくなるほど低い数値となる。

図-3.1 水洗の有無による外観調査結果の比較グラフ

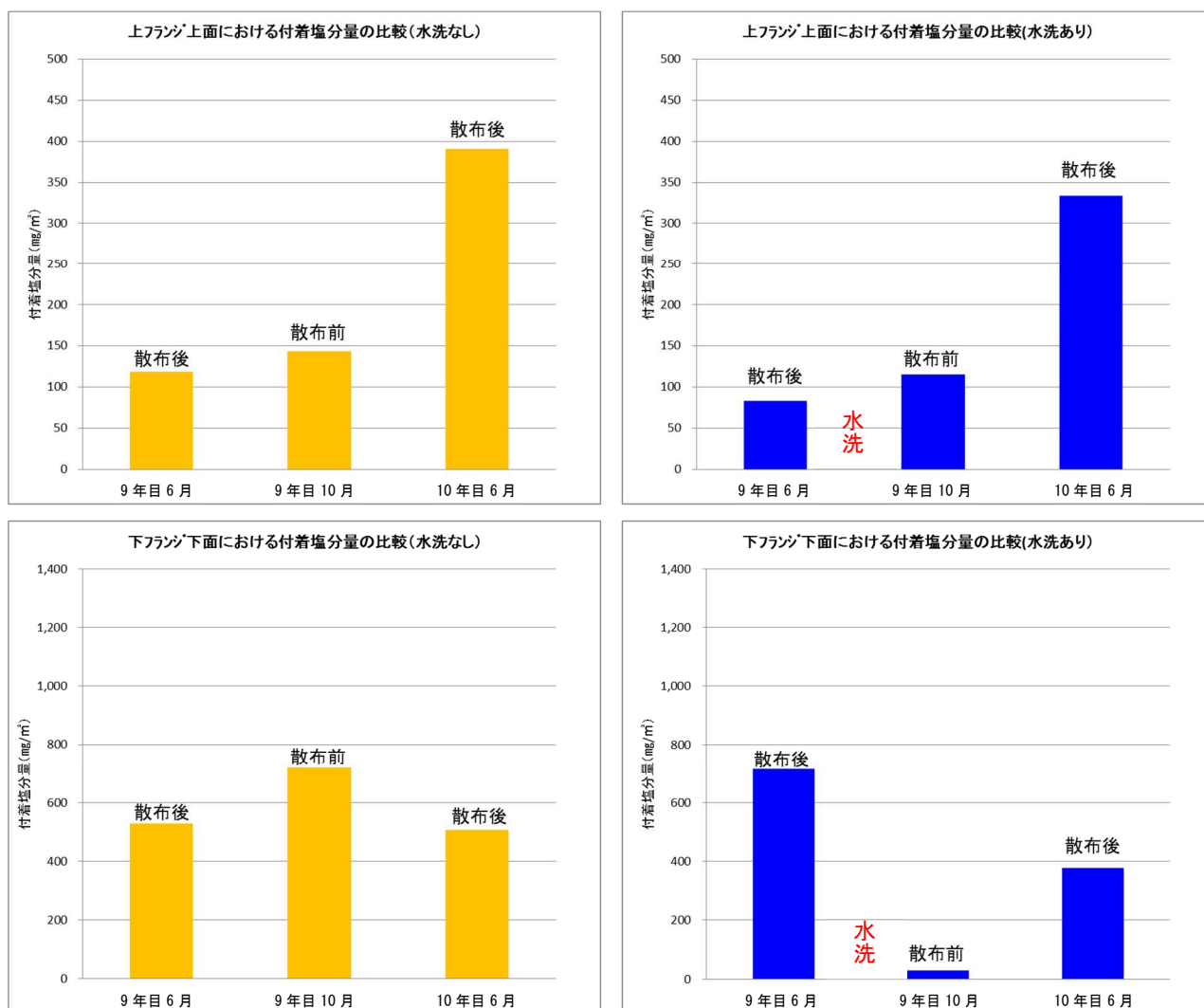


図-3.2 凍結防止剤散布期間と非散布期間の付着塩分量の比較グラフ

3.3 部材角部面取り確認

(1) 研究の背景と目的

防せい防食法が塗装の場合、部品を組み立てた後に自由縁となる部材角部は防せい上の弱点となるため、部材角部は曲面仕上げが望ましいとされている¹⁾。しかし、曲面仕上げとしなくても塗膜厚は確保されると考えられる。また、箱桁内面のように環境が悪くない場合は、部材角部でも腐食しないと考えられる。

以上のことから、内面仕様の塗装系にて、部材角部の面取り形状の違いによる塗膜の付着性及び防せい性を確認することとした。

(2) 試験概要

- 1) 試験場所：沖縄県浦添市 国道 58 号線 安謝高架橋 桁下および箱桁内
- 2) 暴露期間：2008 年 4 月～（11 年経過継続）

- 3) 暴露環境：箱桁内端部マンホール入り口付近の下フランジ上面に架台を置いて設置

付着塩分量(10 年間の合計(累積))

ウェブ・天井面：10～25mg/m²

床面：100mg/m²

(3) 試験体形状および面取り形状

試験体形状を図-3.3 に示す。面取り形状は 2R, 1C, 擬似 2R, 糸面取りの 4 種類とし、表-3.1 に面取り形状とその加工方法を示す。なお、擬似 2R とは角部をグラインダーにより 3 辺カットしたもので、図-3.4 にその詳細を示す。

(4) 塗装仕様

塗装仕様は D-5 (スプレー), F-6 (ハケ), F-12 (スプレー), F-12 (ハケ) の 4 種類とした。表-3.2 に塗装仕様を示す。

(5) 角部塗膜厚の測定

部材角部の防せい状況を確認するうえで角部の塗膜厚を把握しておくことが重要であるが、角部の塗膜厚を計測器にて直接測定することは困難である。そのため、別途準備した平板に暴露試験体と同じ角部処理と塗装を施したうえで角部断面マクロを採取し、その写真から角部の塗膜厚を測定した。図-3.5に角部塗膜厚の測定位置、写真-3.4に面取り部断面写真の一例を示す。

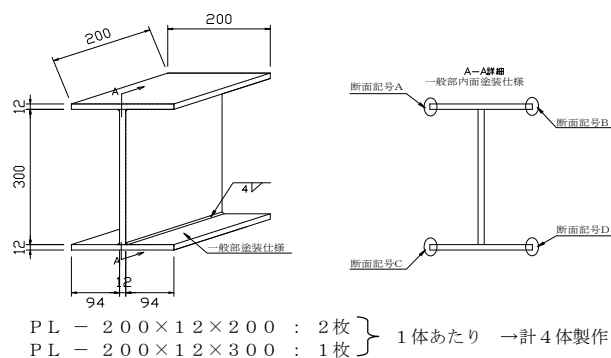


図-3.3 試験体形状

表-3.1 面取り加工方法

名称	2R	1C	疑似2R	糸面取り
面取り形状				
加工方法	面取り機による加工		グラインダーによる加工	

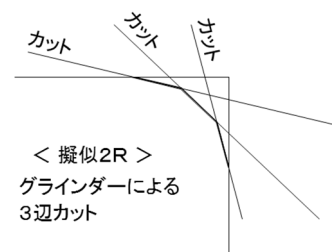


図-3.4 疑似 2R 詳細

(6) 調査結果

表-3.3に塗膜厚測定結果を、図-3.6に標準膜厚に対する角部膜厚の比（角部塗膜厚/標準塗膜厚）を示す。表-3.3および図-3.6より試験体角部の塗膜厚分布の高いほうからの順序は以下の通りとなり、角部の面取り形状との間には相関性は確認できなかった。

- ・D-5 塗装部（スプレー）

疑似 2R > 糸面取り > 2R > 1C

- ・F-6 塗装部（ハケ）

1C > 疑似 2R > 2R > 糸面取り

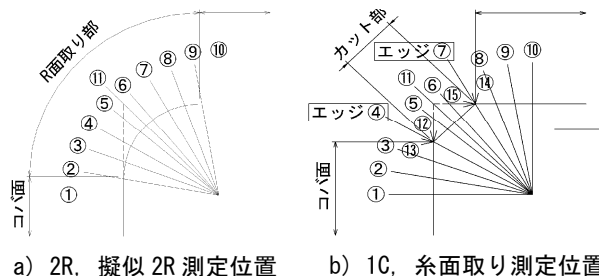
- ・F-12 塗装部（スプレー）

1C > 疑似 2R > 2R > 糸面取り

- ・F-12 塗装部（ハケ）

糸面取り > 1C > 疑似 2R > 2R

なお、標準膜厚に対する角部膜厚の比が1を下回るものがあるが、塗膜厚の管理基準値である「最小値が標準塗膜厚の70%以上」を満足していた。



a) 2R, 疑似 2R 測定位置 b) 1C, 糸面取り測定位置

図-3.5 角部塗膜厚の測定位置

表-3.2 塗装仕様

()内は目標膜厚を示す

D-5 一般内面塗装仕様(合計240μm)

前処理		工場塗装		
素地調整	プライマー	2次素地調整	第1層	第2層
ブラスト処理 Sa2 1/2	無機ジクロリッチ プライマー (15 μm)	動力工具処理 St3	変性エポキシ樹脂 塗料内面用 (120 μm)	変性エポキシ樹脂 塗料内面用 (120 μm)

F-6 内面塗装連結部塗装仕様(膜厚240μm)

鋼道路橋塗装便覧(平成2年版)仕様

現場塗装				
素地調整	下塗り	下塗り	下塗り	下塗り
動力工具処理 St3	変性エポキシ樹脂 塗料内面用 (60 μm)	変性エポキシ樹脂 塗料内面用 (60 μm)	変性エポキシ樹脂 塗料内面用 (60 μm)	変性エポキシ樹脂 塗料内面用 (60 μm)

F-12 内面塗装連結部塗装仕様(合計375μm)

前処理		工場塗装		現場塗装		
素地調整	プライマー	2次素地調整	下塗り	素地調整	ミストコート	下塗り
ブラスト処理 Sa2 1/2	無機ジクロリッチ プライマー (15 μm)	ブラスト処理 Sa2 1/2	無機ジクロリッチ ペイント (75 μm)	動力工具処理 St3	変性エポキシ樹脂 塗料下塗り	超厚膜形エポキシ 樹脂塗料 (300 μm)

9年間の暴露調査において、全ての試験体について角部からさび発生などの変化は確認されず、良好な状態であった。

(7) まとめ

防せい性に大きな影響を与える塗膜厚に関して角部の塗膜厚を確認した結果、角部の面取り形状に関わらず塗膜厚が確保されていた。9年間の暴露調査の結果、試験体の面取り部に防せいなどの変状は確認されず、すべて良好な状態であった。

以上より、箱桁等の内面において塗装されるエポキシ樹脂系塗料等の場合、規定の膜厚を確保することにより、角部の面取り形状の違いが防せい性に与える影響は少なく、2R面取りよりも工場製作での加工性がよい1C面取りでも問題ないとする。

4. 耐候性鋼橋梁部会の活動報告

4.1 最近の研究テーマ

耐候性鋼橋梁は昭和40年代にはじめて日本で採用され、JIS規格が制定されて以降、鋼橋の分野において使用実績を伸ばしてきた。当部会では塗装とは異なる防食機能を有する耐候性鋼材について、鋼橋への採用にあたって最適な環境と構造を目指し、様々な検討および調査を行ってきた。本稿では、昨今の部会活動について、下記の2例を報告する。

① 定期点検におけるさびの外観を評価するにあたって、容易で実効性の高い評価手法および予防保全の提案。

② 沖縄で行っている暴露試験によって得られた知見。

4.2 点検手法および予防保全に関する一提案

(1) 研究の背景と目的

橋梁の5年ごとの定期点検が義務化され、点検の重要性が高まっているなか、耐候性鋼材の損傷については、点検手法や対処法が確立されておらず、現場での判断に迷うケースが多いとの声が聞かれている。また、鋼橋の点検は本体構造だけでなく、床版や排水・伸縮装置といった付属物も同時に点検するため、耐候性鋼材の保護性さびの生成状況の良否の判断だけに費用や時間を費やすことはできない。

そのため、簡単で実効性が高く、かつ点検者によ

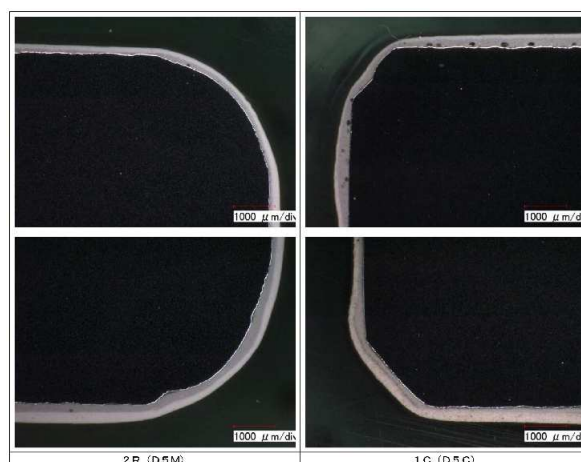


写真-3.4 面取り部断面写真例

表-3.3 塗膜厚測定結果

単位: μm (①～⑩の平均)

塗装仕様 標準膜厚	塗装 方法	測定部位 (面取り部)		2R	1C	擬似 2R	糸面 取り
D-5	スﾌﾟﾚｰ	角部	上側	225	215	333	266
下側			361	275	360	343	
平均			293	245	347	305	
240		標準膜厚との比		1.22	1.02	1.44	1.27
F-6	ﾊﾞｸﾞ	角部	上側	278	524	380	292
下側			335	501	315	205	
平均			307	513	348	249	
240		標準膜厚との比		1.28	2.14	1.45	1.04
F-12	スﾌﾟﾚｰ	角部	上側	365	437	472	373
下側			315	411	326	291	
平均			340	424	399	332	
375		標準膜厚との比		0.91	1.13	1.06	0.89
F-12	ﾊﾞｸﾞ	角部	上側	305	390	269	391
下側			276	359	325	366	
平均			291	375	297	379	
375		標準膜厚との比		0.78	1.00	0.79	1.01

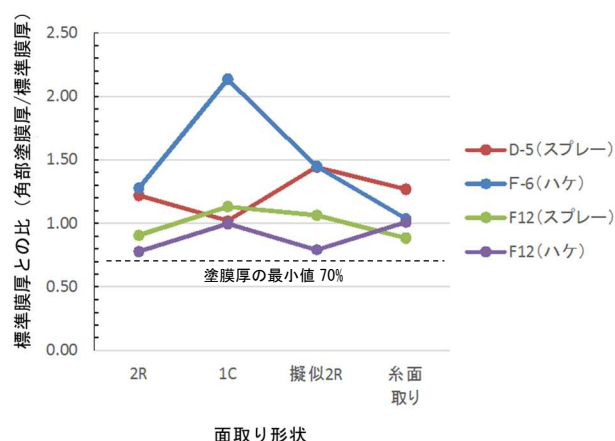


図-3.6 標準膜厚に対する角部塗膜厚の比

るばらつきがない点検手法や評価したさびの状態に応じた明確な対処方法の確立が求められる。

(2) 点検手法に関する一提案

1) 現状の点検における課題

耐候性鋼材のさびの状態は、従来から図-4.1の外観評点で評価している。さびの状態は評点1~5で定

義されており、さび厚やさびの大きさなどが各評点で異なる。点検時にさびの外観を各評点に分類することは、前述したように限られた点検時間の中で行うのは難しい。また、細かく分類することは点検者によってその評価に対するばらつきを生みやすくなる。よって、写真-4.1に示すクラックスケールやプラスト表面粗さ比較板のように、目視や触診によって評価を行うような簡便な点検方法が求められている。

2) 提案する点検時のさびの判定方法について

表-4.1のように、補修が必要と判断されるのは評点1のさび、経過観察が必要と判断されるのは評点2のさびであり、評点3～5については正常と判断できる。なお、評点5については、保護性さびが生成されていないため要観察が必要と判断されているケースがあるが、さびが進行していない、すなわち環境が非常にマイルドと判断できるため、点検時の評価としては正常と考えて問題ない。よって、従来のようにさびの状態を計測して細かく分類するのではなく、評点1～2と評点3～5を分けることができれば、点検の際の耐候性鋼材のさびの良否を判断できると考えた。

3) 提案する点検時のさびの判定方法について

当協会では、前述の境目を明確にするために評点3と評点2の中間のサンプル(境界サンプル、写真-4.2)を作成した。このサンプルは、当協会で行った実橋調査の際に評点3と評点2の中間程度のさびの状態の箇所を3Dスキャナーで測定し、3Dプリンターで作成したものである。点検時は、このサンプルと実際のさびの状態を目視および触診により比較し、境界サンプルよりさびが細かいか粗いかを判断する。なお、色を付けると実橋と見比べる際に凹凸よりも

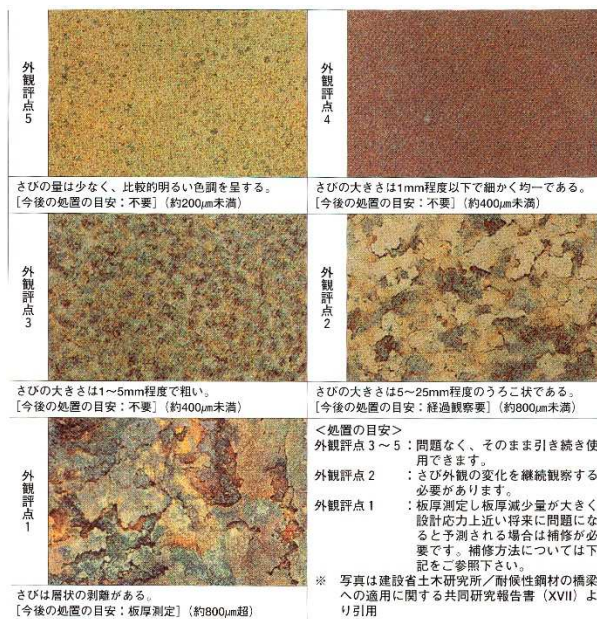


図-4.1 さび外観評点

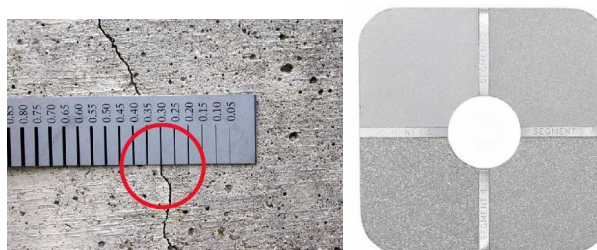


写真-4.1 クラックスケール、プラスト表面粗さ比較板



写真-4.2 境界サンプル

表-4.1 さびの評価方法

従来の方法			今回提案の方法	
分類	具体的な評価	良否の判断	新しい分類	
評点1	層状剥離さびが発生しており、補修が必要なレベル	異常	要処置さび	
評点2	うろこ状さびが発生しており、経過観察が必要なレベル	異常		
				境界サンプル
評点3	さび粒子は比較的粗いが、問題の無いレベル	正常	正常さび	
評点4	さび粒子は緻密で、問題の無いレベル	正常		
評点5	さびの進行が進んでおらず、現時点では問題の無いレベル	正常		
さびの粗さや、さび厚、さびの色等を総合的に判断して分類する			さびの粗さをさびサンプルと比較する	

色に意識がいつてしまうため、あえて単色で着色している。

(3) 予防保全に関する一提案

点検時は、境界サンプルと実際のさびの粗さを比較することにより、要処置さびと正常さびの境界線を明確にする。この作業を正確に行うことができれば、要処置さび範囲を塗装橋の「防食機能が喪失」、正常さび範囲を塗装橋の「防食機能の損傷なし」として扱うことが可能となり、以後の評価は塗装橋と同様の考えで行うことが可能となる。

しかし、耐候性鋼橋梁は塗装橋のように数年ごとに行われる塗装の塗替え作業がないため、予防保全を考慮して塗装橋とは異なる対処方法が必要と考えられる。

これらのことより、点検において処置が必要なさびが確認された時の、その発生箇所と範囲ごとの対処方法を提案する。

1) 要処置さびの範囲が桁端のみの場合

桁端は湿潤状態になりやすいうえに、伸縮装置に損傷が生じるとさびの状態は確実に悪くなる。これらを踏まえ、新設橋では桁端は部分塗装を施すことが標準となっており、既設の橋梁に関してもさびの悪化が見られる場合は桁端塗装を施す必要があると考える。また、その際に桁端からの漏水が伝わらないように、下フランジに水切り板を設置することも必要である。

2) 要処置さびの範囲が排水や床版水抜ききの漏水部付近の場合

排水装置の損傷や床版水抜ききの不具合により、桁に水がかかりさびの状態が悪い場合は、まずは漏水個所の補修や導水管の設置をすることが必要である（写真-4.3）。そのうえで部分塗装を行うか、板厚減少が少ない場合は浮きさびを除去して経過観察する方法も考えられる。

3) 要処置さびの範囲が広範囲にみられる場合

広範囲にわたってさびの状態が悪い場合は、環境が耐候性鋼材の使用に適していないと判断すべきであり、さびの悪い範囲を他の防食法（基本的には Rc-I 塗装）に変更する必要があると考える。

補修工事は一般的に非常に規模が小さく、作業効



写真-4.3 導水管設置状況

率や工事費を考えると、1橋ごとではなく複数の橋の工事をまとめて行うのが望ましい。そこで、点検で桁端塗装が必要と判断された橋梁が確認された場合に、その周辺に架設されている耐候性鋼橋梁で桁端が未塗装の橋の予防保全として桁端塗装を同時に行うことができれば、複数の橋をまとめて施工することで1橋ごとに行う場合より工事費を低く抑えることができる。また、工程的にも施工を急がない予防保全と組み合わせることにより自由度が高くなり、さらに、将来発生する補修費の低減ができ、LCC を低減することが可能である。

4.3 暴露試験によって得られた知見

(1) 研究の背景と目的

耐候性鋼橋梁の施工直後のさび汁による下部工や周辺構造物への着色を防ぐことを目的として耐候性鋼用表面処理剤（以下、処理剤と呼ぶ）が採用され、古いものでは約50年が経過している橋梁もある。一方で処理剤は現在販売されているものだけでも5種類程度あり、さび汁防止や保護性さび形成補助の機能は同じであるが、それぞれの仕様は成分もさまざま、保護性さび形成のプロセスも異なっている。そのような状況のなかで橋梁の点検時には処理剤が残存している状態での変状を評価する必要があるが、仕様の違いによる表面上の経年変化の違いは明らかになっていない。

そこで、処理剤の仕様の違いによる経年変化の違いを明らかにする目的で、比較的厳しい環境にて5種類の処理剤を施した仕様A～Dの試験片を同一条件にて暴露試験を実施することとした。

なお、この暴露試験を行うにあたって、供用後30年が経過し保護性さびが形成されている耐候性鋼材

から切り出した試験片(以下, 30Y と呼ぶ)と裸仕様(JIS 耐候性鋼にブラスト処理のみ施した仕様)の試験片(以下, SMA と呼ぶ)も併せて設置した。これは, SMA は処理剤との経年変化の対比を行うために, 30Y は保護性さびが形成された状態での環境の変化が形成済みの保護性さびに対してどのような影響を与えるか確認するためである。

(2) 暴露試験の概要について

暴露試験は厳しい環境を有する沖縄本島の琉球大学内(以下, 琉大と呼ぶ), 牧港試験場(以下, 牧港と

呼ぶ), 辺野喜試験場(以下, 辺野喜と呼ぶ)の3箇所にて実施した。各試験場における飛来塩分量と濡れ時間割合の平均値の観測結果を表-4.2に, 試験状況を写真-4.4~写真-4.6に, 試験場の位置を図-4.2に示す。なお, 濡れ時間割合とはIS09223にある気温0℃以上, 湿度80%以上の時間(濡れ時間)を計測時間で除したものである。耐候性鋼材の適用規定には飛来塩分量が0.05mdd以下とあり, 各試験場ともに適用にあたっては極めて厳しい環境にあることがわかる。

(3) 経時変化

処理剤の個々の試験片について, 外観と平均さび厚(処理剤厚)を図-4.3および図-4.4に示す。

2年後の試験片に着目した場合, 琉大では仕様A, B, C はほぼ全面が細かいさびに覆われつつあるのに対し, 仕様D, E は処理剤がほぼ残存しており, 平均さび厚は各処理剤とも100μm以下であった。

辺野喜では仕様によるばらつきが大きく, 表面が完全にさびに覆われているものから処理剤がかなり残存しているものもあり, 平均さび厚も160~444μmと仕様間で差が大きい。なお, 仕様Dを例にとると, 琉大での2年目と辺野喜の1年目がほぼ同程度

表-4.2 飛来塩分量と濡れ時間割合の平均

	濡れ時間割合 %	飛来塩分量 mdd
琉大	55.7	0.225
牧港	45.2	0.216
辺野喜	56.7	3.473



写真-4.4 琉大試験場



写真-4.5 辺野喜試験場



写真-4.6 牧港試験場



図-4.2 試験場位置図

の外観、さび厚となっており、ほかの仕様でも同様な傾向が見受けられた。

30Y と SMA については、初期および 1 年後の試験片の外観写真を図-4.5 に、各試験場での試験片のさび厚の平均値を図-4.6 に示す。図-4.1 による外観評点は、30Y、SMA とともに辺野喜は評点 2、牧港、琉大は評点 3 であった。辺野喜では初期段階では 30Y のさびの進展速度は SMA よりも遅いが、1 年経過時にはほぼ同じさび厚となった。牧港および琉大は辺野喜に比べると穏やかにさびが進行している。

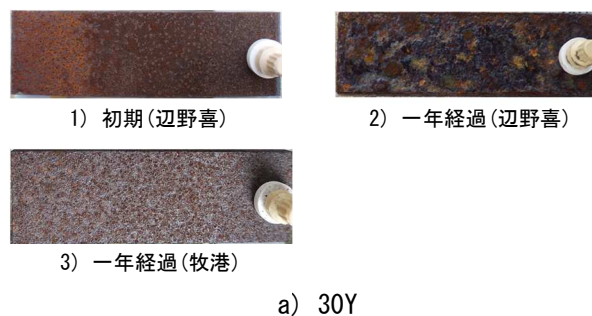
また、さびの進行速度に着目するため、もっとも

		初期状態	1年後	2年後
裸仕様	外観			
	平均さび厚	29.7 μm	150.2 μm	181.9 μm
仕様A	外観			
	平均さび厚	54.1 μm	83.6 μm	98.7 μm
仕様B	外観			
	平均さび厚	41.9 μm	47.4 μm	56.9 μm
仕様C	外観			
	平均さび厚	47.1 μm	63.8 μm	76.2 μm
仕様D	外観			
	平均さび厚	56.0 μm	60.6 μm	59.7 μm
仕様E	外観			
	平均さび厚	51.7 μm	57.7 μm	54.9 μm

図-4.3 さび外観の経年変化とさび厚(琉大)

		初期状態	1年後	2年後
裸仕様	外観			
	平均さび厚	28.7 μm	792 μm	1186.2 μm
仕様A	外観			
	平均さび厚	53.6 μm	112.4 μm	200.1 μm
仕様B	外観			
	平均さび厚	39.6 μm	76.6 μm	260.7 μm
仕様C	外観			
	平均さび厚	51.5 μm	86.4 μm	444.3 μm
仕様D	外観			
	平均さび厚	52.3 μm	53.0 μm	160.0 μm
仕様E	外観			
	平均さび厚	56.1 μm	56.1 μm	169.6 μm

図-4.4 さび外観の経年変化とさび厚(辺野喜)



環境が厳しく、さびの進行が早い辺野喜の計測時期ごとのさび厚の変化を図-4.7 に示す。SMA は計測時期で線形的にさび厚が増加する傾向にあるが、30Y は6ヶ月まではSMA より緩やかな増加傾向であるが、それ以降は SMA とほぼ同程度の増加速度となっている。

(4) 得られた知見

処理剤については、今回の試験により経年変化は環境と仕様の違いによりかなりばらつきがあることがわかった。また、環境が著しく異なっても経過年数によっては同じような状態になるものもあるため、

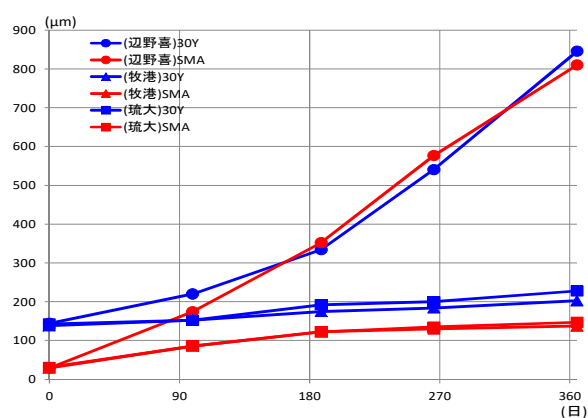


図-4.6 平均さび厚の変化

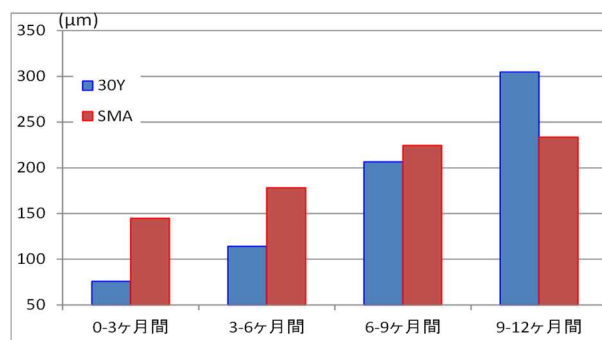


図-4.7 計測時期ごとの平均さび厚の変化(辺野喜)

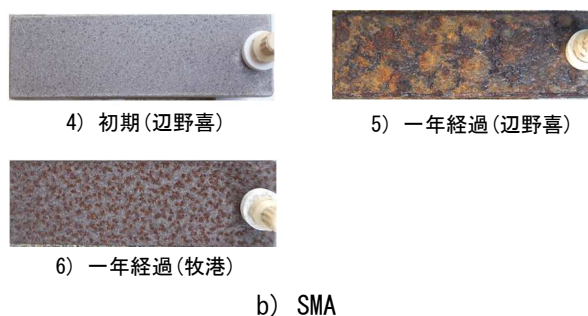


図-4.5 暴露試験片の外観写真

特定の時期の外観やさび厚だけでは腐食環境の把握や将来の進展の推測が難しいことがわかる。今後は各種分析を行うことによって、その状態が保護性さびへの置換なのか、環境が厳しいことによる劣化なのか明らかにすることで点検時の処理剤を施した場合の橋梁の評価に繋げていきたい。

30Y, SMA については、保護性さびが生成された場合でも、周辺環境が何らかの原因で悪化した場合、初期段階では保護性さびによる遮断効果もあって、さびの進行速度は抑えられるが、時間の経過とともに遮断効果がなくなり、さびの進展が進んでしまうことが実証された。そのため橋梁本体の維持だけでなく、周辺環境も良好な状態に保つことが大切であることがわかった。

5. おわりに

製作小委員会の今回の報告は、研究の途中経過がほとんどであるが、溶接施工試験、防食および耐候性鋼の暴露試験などについては、それぞれの現段階の結果の事実をまとめたものである。

最終的な結論の出たテーマについては、今後、協会の何らかの広報手段を用いて対外発表することを考えている。

参考文献

<2 章>

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋・鋼部材編，pp. 533～544，2017.
- 2) 三木千住寿，中村勝樹，遠藤秀臣，等農克巳：仮付け溶接の長さとしール・クラックの発生について，土木学会論文集，No. 404-I-11，pp. 259～265，1989.
- 3) 田中甚吉，北田富文：すみ肉溶接割れに関する研究，溶接学会誌，Vol. 41，No. 8，pp. 915～924，1972.
- 4) 日本道路協会：鋼道路橋施工便覧，p. 136, p. 138，2015.

<3 章>

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋・鋼部材編，p. 518，2017.