

現場塗装時の外部環境と鋼構造物塗装の耐久性の検討

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 22～平 26

担当チーム：材料資源研究グループ（新材料）

研究担当者：西崎 到、富山 禎仁

【要旨】 鋼道路橋の現場塗装では、塗膜性能は塩分の影響を大きく受けることが経験的に明らかとなっている。そこで本研究では、現場塗装における耐久性向上策の提案を目的として、これに必要な詳細なデータ取得を行うこととした。まずはじめに、海岸部で橋梁模擬桁を用いた塗装試験を行い、各塗装工程で塗膜の中に取り込まれる塩分量を把握した。その上で、塗膜に取り込まれた塩分が塗膜性能に及ぼす影響について、促進耐久性試験等により明らかにした。また、素地調整時に除去しきれず鋼材表面に残存する塩分量を工法毎に明らかにするとともに、残存塩分が再塗装後の塗膜耐久性に及ぼす影響を暴露試験により検討した。素地調整時、および塗装時に塩分の影響を低減するための手法について検討した。

キーワード：鋼道路橋、現場塗装、塩分、塗膜性能、素地調整、耐久性

1. はじめに

道路橋は道路網を構成する主要な構造物の一つであり、国民の日常生活や経済活動、災害時の避難、輸送時等に重大な役割を果たしている。特にわが国では、急峻な地形や数多くの島しょで構成される特徴的な国土を有効に活用する観点からも、これらを適切に整備し、維持管理していくことが強く求められている。鋼製の上部構造や橋脚を持つ鋼道路橋は、架設・供用される道路橋のうち半数近くを占める。鋼材は環境の作用により容易に腐食するため、腐食による損傷を防止し耐久性を向上させるために多様な防食技術が提案され、鋼道路橋の建設や維持管理に活用されてきた。中でも塗装による防食法は長い歴史と実績を有しており、今日においても、鋼道路橋の主要な防食法として広く認知されている。

鋼道路橋の新設時に、部材が海岸地域で仮置きされたり海上輸送がなされたりすると、部材表面には多量の塩分が付着する可能性がある。一般に、被塗面に塩分が付着しているまま塗装をすると、所定の塗膜性能が得られず、早期に層間はく離や膨れ等の異状が生じるとされている。そのため、「鋼道路橋防食便覧（日本道路協会）」等では、塩分付着が懸念される部材表面や素地調整後の仕上がり面では、付着塩分量が 50 mg/m^2 以下となるよう管理することを推奨している¹⁾。

一方で、海岸部に位置する既設の塗装鋼道路橋においても、部材表面に多量の海塩粒子が付着し、これが徐々に塗膜の内部に浸透して塗膜劣化や腐食を促進させることがある。この様に塩分の影響を強く受けた構造物の塗替え塗装を行う場合、素地調整の工程で除去

しきれず被塗面に残存する塩分が塗替え後の塗膜性能に悪影響を及ぼし、早期に変状を引き起こすことが懸念される。また、現場での塗替え塗装工程の間にも、飛来し塗膜層内に取り込まれる海塩粒子について配慮すべきであるが、これらの塩分量や塩分による塗膜性能への影響の大きさについては十分に把握されておらず、実際の塗装工事において適切な管理がなされていないのが現状である。

そこで本研究では、鋼道路橋の現場塗装において、素地調整後に被塗面に残存する塩分や、塗装工程中に飛来し塗膜内に混入する塩分が塗膜性能に及ぼす影響を明らかにすると共に、その影響を排除する手法を確立することを最終的な目標とし、実大試験体を用いた試験塗装、促進劣化試験、屋外暴露試験などを行った。

2. 研究の概略

本研究では、以下の3つの項目について検討した。

- ①塩分飛来環境での施工試験
- ②付着塩分量と塗膜耐久性試験
- ③塩分飛来環境での施工対策の検討

3. 塩分飛来環境での施工試験

現場塗装の各工程で塗膜の中に取り込まれる塩分量を把握するために、鋼 I 桁橋を模擬した試験体の塗装試験を行い、工程毎、部位毎に表面塩分量を測定した。

3. 1 実験方法

3. 1. 1 試験体

塗装試験は、沖縄建設材料耐久性試験施設（沖縄県

国頭郡大宜味村)において、鋼I桁橋を模擬した試験体を用いて行った。この試験体は、桁高900mm、桁長6,500mmの2本の鋼I桁を3か所の対傾構でつないだ構造となっている。過去に、他の研究のために数種類の塗装系が工場で塗装されており、同施設において主桁のウェブ面が海岸線に対し平行となる向きに2体が設置され、平成6年より約17年間暴露されていた。塗替塗装試験前には全面的に塗膜の経年劣化が見られ、さびも随所に認められる状態であった。2体のうち、劣化が比較的小さい山側の試験体を今回の試験に供した。試験に際し、主桁のウェブ面が海岸線に対し垂直となるように試験体の向きを変え、設置し直した。塗替塗装前の試験体の外観写真を図3-1に示す。



図3-1 塗替塗装試験に用いた試験体

3. 1. 2 試験場所および試験期間

沖縄建設材料耐久性試験施設は沖縄県国頭郡大宜味村の国道58号沿いに位置している(図3-2)。試験体は、海面からの高さおよび海岸線からの距離がいずれも約10~20m程度の箇所に設置されており、台風等の荒天時には海水飛沫を直接受けることもある。塗替塗装試験は平成23年12月2日から平成23年12月17日にかけて実施した。参考として、この期間中における沖縄県名護市の主な気象データを図3-3および表3-1に示す。

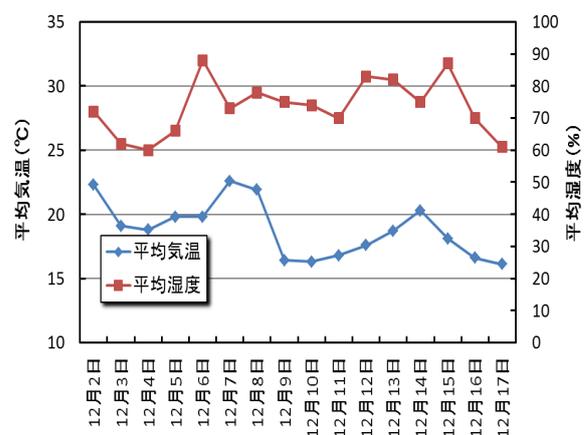
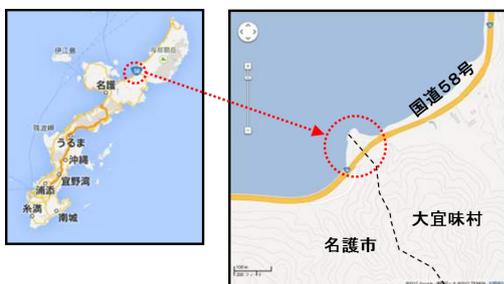
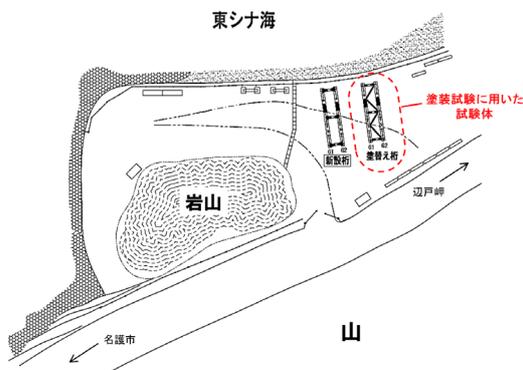


図3-3 試験期間中の気温・湿度の推移(気象庁HPより)



(a) 沖縄建設材料耐久性試験施設の位置



(b) 塗装試験に用いた試験体の位置と周囲の概略

図3-2 沖縄建設材料耐久性試験施設の位置と周囲の概略

表3-1 試験期間中の風向・風速(気象庁HPより)

月日	風向・風速(m/s)				
	平均風速	最大風速		最大瞬間風速	
		風速	風向	風速	風向
12月2日	3.5	7.9	北西	13.4	北西
12月3日	5.2	7.8	北	13.5	北
12月4日	3.1	7.2	北北東	10.9	北北東
12月5日	3.5	6.0	北北東	9.1	北東
12月6日	3.0	5.3	北東	8.5	北東
12月7日	3.3	6.5	南東	11.0	東南東
12月8日	6.4	9.0	北	15.3	西南西
12月9日	6.6	10.1	北	16.1	北北東
12月10日	4.5	7.3	北	12.1	北北東
12月11日	5.0	7.8	北北東	12.0	北北東
12月12日	4.1	7.8	北北東	12.1	北北東
12月13日	2.6	4.2	東北東	7.0	北東
12月14日	2.3	4.2	東	7.6	東南東
12月15日	4.0	8.2	北北東	12.3	北北東
12月16日	6.6	9.1	北	15.3	北
12月17日	4.7	7.7	北北東	12.2	北

3. 1. 3 供試塗装系

試験体のうち西側(試験体から見て海の方角が北)の主桁をG1、東側をG2とし、共に6つの区画に分けて、それぞれ異なる塗装系で塗替塗装を行った。G1とG2とは同じ塗装系を適用しているが、G2のみ素地調整の直前に桁全体を高圧洗浄機で水洗している点が異なる。主桁の塗り分け区分を図3-4に示す。本塗装

自体は別途の研究を目的としており、新規の塗装系を適用した。塗り分け区分のうち第3、第4区画（G1-3、4 および G2-3、4）は標準塗装系と位置づけ、それぞれ鋼道路橋防食便覧における Rc-III、Rc-I 塗装系をエアスプレー塗装した（表 3-2）。第3区画（G1-3、G2-3）を除きブラスト処理によって試験体全体の旧塗膜やさびを除去（素地調整程度1種）した後、塗装を行った。第3区画については、手工具および電動工具を用いてさびや劣化した塗膜を除去（素地調整程度3種）した後、塗装を行った。

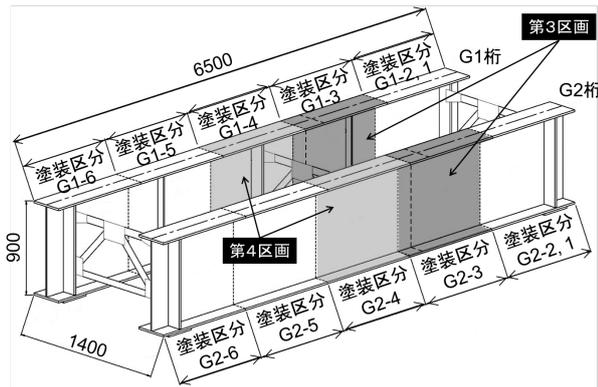


図 3-4 試験体の塗り分け区分

表 3-2 各区画における塗装系

(a) 第3区画

塗装系	Rc-III 塗装系	
工程	塗料名	使用量(g/m ²)
素地調整	(3種)	
下塗	弱溶剤形変性エポキシ樹脂塗料下塗(鋼板露出部)	(200)
下塗	弱溶剤形変性エポキシ樹脂塗料下塗	200
下塗	弱溶剤形変性エポキシ樹脂塗料下塗	200
中塗	弱溶剤形ふっ素樹脂塗料用中塗	140
上塗	弱溶剤形ふっ素樹脂塗料上塗	120

(b) 第4区画

塗装系	Rc-I 塗装系	
工程	塗料名	使用量(g/m ²)
素地調整	(1種)	
下塗	有機ジンクリッチペイント	600
下塗	弱溶剤形変性エポキシ樹脂塗料下塗	240
下塗	弱溶剤形変性エポキシ樹脂塗料下塗	240
中塗	弱溶剤形ふっ素樹脂塗料用中塗	170
上塗	弱溶剤形ふっ素樹脂塗料上塗	140

橋梁塗装工事における防護工には①シート張防護工と②板張防護工がある¹⁾。シート張防護工は、塗料の飛散防止のため、広く一般に用いられている方法である（図 3-5 (a)）。一方、板張防護工は従来、桁下に鉄道や道路等があり、第三者に危険を及ぼす恐れのある場合に用いられてきたが（図 3-5 (b)）、近年では現場でブ

ラスト作業を行う場合などに、粉じんの飛散防止や騒音対策のため、板張りシート張りとを併用した気密性の高い防護設備工が採用される事例も増えてきている²⁾。しかし、一般河川上や空地上にある橋梁で、粉じんや騒音に対し特別な配慮を必要としない場合においては、今日もなおシート養生のみ適用される場合が多い。シート養生の場合、地形や橋の構造によっては強風時に足場に大きな風圧がかかる危険性があり、そのような場合にはシートに代えて、さらに気密性の低い、細かい網目のメッシュシートを用いることもある（図 3-5 (c)）。今回の実験においても、海岸近くでの実施となり強風に煽られる危険が予測されたため、足場全体をメッシュシートで養生し、その上を雨除けのブルーシートで養生することとした（図 3-6）。



(a) シート張防護工



(b) 板張防護工



(c) メッシュシートによる防護

図 3-5 橋梁塗装工事で用いられる防護工



図 3-6 塗装時の防護工

3. 1. 3 塩分量の測定

塗装工程中に試験体に付着する塩分量は、工程毎、塗り分け区画毎、部位毎（桁の内外、ウェブの上部・中部・下部、フランジの上面・下面など）に、電導度法により測定した。第 3、第 4 区画における塗装および塩分測定の工程を表 3-3 に示す。

表 3-3 塗装および塩分測定の工程（第 3、4 区画）

第 3 区画	12/2	12/3	12/5	12/7	12/8	12/10	12/13
	塩分測定	素地調整	素地調整	塩分測定	下塗り①	塩分測定	下塗り②
第 4 区画	12/2	12/3	12/7	12/8	12/10	12/17	
	塩分測定	素地調整	素地調整	塩分測定	防食下地	塩分測定	下塗り①
	塩分測定	塩分測定	塩分測定	塩分測定	塩分測定	塩分測定	塩分測定
	塩分測定	塩分測定	塩分測定	塩分測定	塩分測定	塩分測定	塩分測定
	塩分測定	塩分測定	塩分測定	塩分測定	塩分測定	塩分測定	塩分測定
	塩分測定	塩分測定	塩分測定	塩分測定	塩分測定	塩分測定	塩分測定
	塩分測定	塩分測定	塩分測定	塩分測定	塩分測定	塩分測定	塩分測定

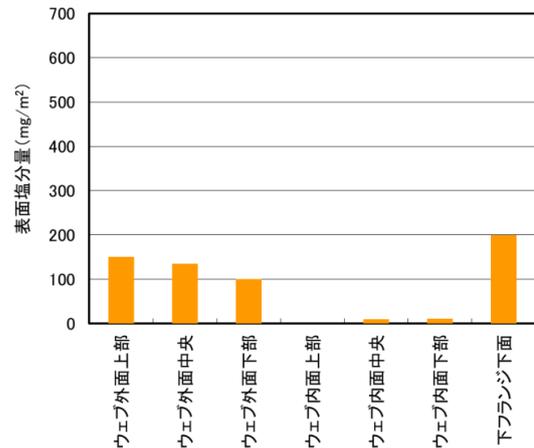
下塗り①～③：弱溶剤形変性エポキシ樹脂塗料下塗の塗装
 中塗り：弱溶剤形ふっ素樹脂塗料用中塗の塗装
 上塗り：弱溶剤形ふっ素樹脂塗料上塗の塗装
 防食下地：有機ジンクリッチペイントの塗装

素地調整前の試験体には随所にさびが発生しており、さび内部にも多量の塩分が蓄積されているものと考えられた。そこで、素地調整前の試験体からコブ状となっているさびを回収し、実験室で塩分の定量を行った。回収したさびを 6 mol/l の硝酸で煮沸して塩分を抽出した後、抽出液をろ過し、ろ液に含まれる塩化物イオン量を 0.005 mol/l の硝酸銀溶液を使った電位差滴定法により求めた。ろ過後に残ったろ滓については、塩分が抽出されなくなるまで硝酸煮沸→ろ過→滴定操作を繰り返した。得られた塩化物イオン量を塩化ナトリウム量に換算し、これをさびに含まれる塩分量とした。なお、ここで求めた塩分量には、さび表面にあらかじめ付着していた塩分量も含まれている。

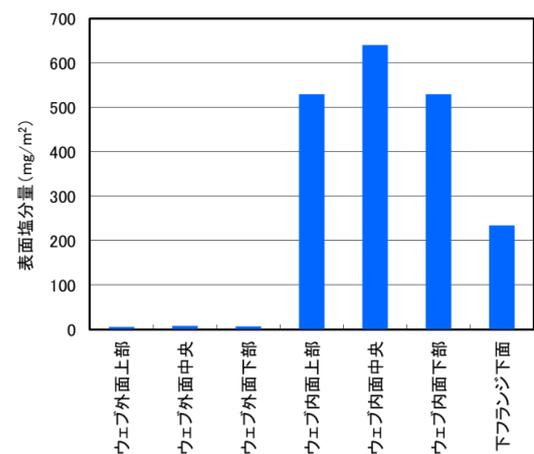
3. 2 実験結果

3. 2. 1 素地調整前後における表面塩分量

素地調整前に試験体表面に付着していた塩分量を図 3-7 に示す。結果は G1 桁、G2 桁の第 4 区画において測定した表面塩分量を示している。



(a) G1 桁の第 4 区画



(b) G2 桁の第 4 区画

図 3-7 素地調整前（水洗前）の表面塩分量

当初、G1 桁は山側に、G2 桁は海側に、それぞれウェブ面が海岸線と平行に暴露されていた。表面塩分量は G1、G2 ともに、部位によって大きく異なる結果となった。G1 桁では表面塩分量が最も多い下フランジ下面でおよそ 200 mg/m²であったのに対し、G2 桁ではウェブ内面の表面塩分量が 500～600 mg/m²と、著しく大きな値を示した。ここで、部材の表面塩分量は風雨の影響により、大きく変わるものと考えられるため、参考として足場防護工を設置する前の 7 日間の降水量と、風向・風速を表 3-4 に示した。

表 3-4 足場防護工設置前7日間の気象（気象庁 HP より）

月日	降水量 (mm)	風向・風速(m/s)				
		平均風速	最大風速		最大瞬間風速	
			風速	風向	風速	風向
11月24日	0	5.7	8.7	北	14.6	北
11月25日	0	3.1	6.5	北北東	11.2	北
11月26日	0	3.3	6.1	東北東	10	北東
11月27日	3	2.8	5.1	東	9.7	東
11月28日	16	4.2	9	東南東	15.6	東
11月29日	0.5	2.1	4	北東	6.4	東南東
11月30日	78.5	1.9	7.1	北北西	14.3	北

※足場防護工は12月1日に設置。

表 3-4 より、足場防護工を設置する4日前から雨となり、前日の11月30日には80mm程度のややまとまった雨が降ったことがわかる。また、7日間の風向きは北あるいは北東寄りが多く、特に足場防護工設置前日の11月30日には北からのやや強い風が吹いたことがわかる。

施工試験を行った沖縄建設材料耐久性試験施設では1996年から1999年にかけて、土研式塩分捕集器（図3-8）を用いて、1日あたりの飛来塩分量の測定を複数回にわたり行っている。この捕集器は東・西・南・北方向にそれぞれステンレスの塩分捕集板が取り付けられており、方位ごとに飛来塩分量が測定できる構造となっている。



図 3-8 土研式飛来塩分捕集器（沖縄建設材料耐久性試験施設）

表 3-5 に1日あたりの総飛来塩分量（東・西・南・北方向の測定値の合計）と、降水量および風向・風速をまとめた。降水量および風向・風速については気象庁のデータベースを参照し、沖縄建設材料耐久性試験施設に近い、沖縄県名護市における観測データを示している。最大風速時の風向に着目すると、ほぼ全ての測定日において、北寄り（北、北北東、北東）あるいは南寄り（南、南南東、南東）であることがわかる。そこで、飛来塩分の測定値を、測定日の最大風速時の

風向により分類整理した。

図 3-9 は北寄りの風の日、南寄りの風の日、それぞれについて飛来塩分量の平均値を求めた結果を図示したものである。飛来塩分量については、方位別に示した。表 3-5 から、北寄りの風の日については平均風速および最大風速の平均値がそれぞれ 2.9 m/s、5.9 m/s であり、南寄りの風の日については 3.2 m/s、5.5 m/s であり、風速に大きな違いは無いことがわかる。にもかかわらず、図 3-9 では、北寄りの風の日はいずれの方位においても飛来塩分量が多く、南寄りの風の日のおよそ2倍程度の値が示されている。この結果は沖縄建設材料耐久性試験施設の周辺地形によるものと考えられる。すなわち、施設は図 3-2 に示した通り、北側、西側が海であり、南側、東側は山および道路であるため、北寄りの風の日には海上から海塩粒子が多く飛来し、同程度の風速においても、南寄りの風の日に比べ飛来塩分量が著しく多くなるものと考えられる。

表 3-5 飛来塩分量測定日の気象と総飛来塩分量※

年	月日	降水量 (mm)	風向・風速 (m/s)					総飛来塩分量 (mdd)
			平均風速	最大風速		最大瞬間風速		
				風速	風向	風速	風向	
1996年	3月3日	0	1.7	4.3	北	7	北	146.9
	1月3日	0	1.4	3.1	北	5.5	北東	95.4
	3月2日	0	4.9	6.9	北北東	10.5	北北東	110.2
1997年	4月1日	0	4	6.7	東南東	12.3	東南東	71.5
	5月1日	0	2.3	4.5	南南東	7.8	西	25.9
	7月1日	0	4.8	6.9	南	12.4	南南西	40.5
	12月31日	0	2.9	6.8	北	11.6	北	103.6
1998年	1月30日	0	2.1	4.4	北東	7	北北東	161.1
	3月2日	0	2.9	5.8	北北東	9.5	北東	34.4
	7月4日	0	2	4	南	6.5	南	11.4
	9月1日	67	2.3	5	北北東	8.3	北北東	8.1
	11月2日	15	4.8	8.7	北北東	13.3	北北東	78.1
	12月30日	0	2	5.1	北北東	8.4	北北東	106.5
	2月27日	1.5	5.6	10.6	北	20.5	北	238.9
1999年	5月5日	1	3.1	6.5	北北東	10.1	北	50.1
	5月31日	0	2.7	6	北北東	9.6	北東	18.3
	7月30日	0	3.9	6.3	南東	10.1	南東	21.1
	9月1日	0	1.7	4.1	北東	7.3	北東	48.2
	10月1日	3	3	5.6	南東	9.3	南東	112.0

※降水量および風向・風速は気象庁 HP を参照した。総飛来塩分量は東・西・南・北方向の測定値の合計を示している。

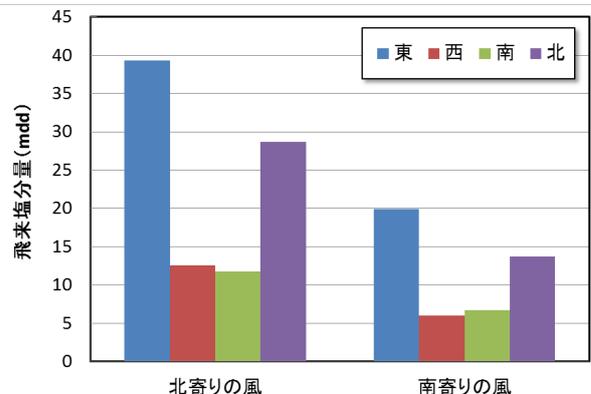
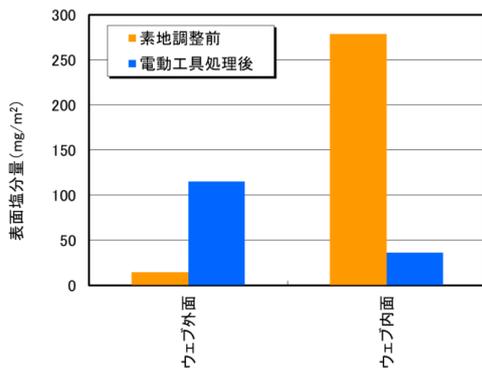


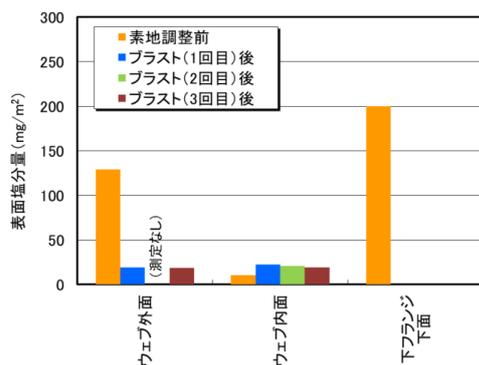
図 3-9 風向による飛来塩分量の違い（沖縄建設材料観測施設）

以上の結果を踏まえると、今回の施工試験において、足場防護工を設置する直前の11月30日は北からのや

や強い風が吹いており（表 3-4）、北向きである G1 桁のウェブ外面や G2 桁のウェブ内面には、風で運ばれた海塩粒子が付着し易い状況であったため、図 3-7 の測定結果に繋がったものと考えられる。測定日前の天候から、図 3-7 (a)でウェブ外面よりも下フランジ下面の表面塩分量が多かったのは、雨による洗浄効果でウェブ外面の塩分量が低下したこと、塩分を含んだ雨水が下フランジ下面に滞留したこと、などが理由として考えられる。一方で、図 3-7 (b)においてウェブ内面の表面塩分量が著しく高かったのは、G1 桁と G2 桁とが近接していることや、対傾構や補剛材等が障害物となり雨がかかりにくく、ウェブ内面に付着した塩分が洗い流されずに残留した結果であると推察される。これらのことから、部材の設置された位置がわずかに異なるだけでも、風雨により受ける影響が大きく異なることが示唆された。



(a) 素地調整程度 3 種 (G1-3)



(b) 素地調整程度 1 種 (G1-4)

図 3-10 素地調整前後の表面塩分量

素地調整後に試験体表面に付着していた塩分量を図 3-10 に示す。図 3-10 (a)は動力工具により素地調整程度 3 種 (ISO St3 相当) に仕上げた箇所 (G1 桁の第 3 区

画) の測定結果であり、図 3-10 (b)はブラスト処理により素地調整程度 1 種 (ISO Sa2 1/2 相当) に仕上げた箇所 (G1 桁の第 4 区画) の測定結果である。

G1-3 においては、ウェブ内面は素地調整により表面塩分が大幅に低減し 50 mg/m^2 以下の値となったが、ウェブ外面では素地調整前よりも後の方が表面塩分量が多い結果となった。表面塩分の測定は、孔食や著しい塗膜劣化の無い部位を選び、素地調整前の塗膜面と、素地調整によって露出した活膜面とで行っている。測定部位の周辺ではさびやふくれ、はがれ等の塗膜異状が認められなかったことから、高濃度の塩分が塗膜層内にあらかじめ蓄積されていたとは考えにくい。素地調整に用いた動力工具には、他の部位を処理した際に付着した塩分が高濃度に蓄積している可能性があり、これによりもともと塩分濃度が低かった箇所も汚染されている可能性が考えられる。また、作業中に飛来してくる海塩粒子が、素地調整後の処理面に付着した可能性も考えられる。表 3-1 から、素地調整を実施した 12 月 2~3 日には北寄りの風が吹いていたことがわかる。そこで、表 3-5 から同程度の風向・風速であった測定日を抽出し、その時の飛来塩分量を整理すると、G1-3 桁のウェブ外面が面する西向きに飛来塩分量は平均で 22.7 mdd であり、換算すると 1 時間あたり 95 mg/m^2 程度の塩分が飛来したことが推察される (表 3-6)。今回の実験ではメッシュシートやブルーシートによる防護工であったが、これらは飛来してくる海塩粒子を遮断するのに十分な気密性を持たないことが示唆される。

表 3-6 素地調整実施日と同程度の風速時における飛来塩分量

年月日	風向・風速(m/s)					飛来塩分量(mdd)				
	平均風速	最大風速		瞬間最大風速		東	西	南	北	合計
		風速	風向	風速	風向					
1997年3月2日	4.9	6.9	北北東	10.5	北北東	24.4	26.4	17.8	41.6	110.2
1999年11月2日	4.8	8.7	北北東	13.3	北北東	22.8	19.0	27.1	9.2	78.1
平均値	4.9	7.8		11.9		23.6	22.7	22.5	25.4	94.2

一方、G1-4 ではいずれの部位も、ブラスト処理により表面塩分量を 20 mg/m^2 程度まで低減させることができたが、下フランジ下面を除き、部材表面の付着塩分を完全に除去することはできなかった。上記と同様、作業中に飛来してくる塩分の影響か、あるいはブラスト処理時に、粉塵と共に一度除去された塩分が再び部材表面に付着した可能性が考えられる。しかしながら、ブラスト処理による素地調整は動力工具処理に比べて効率が良く、比較的短時間で作業を終えることができ

ることから、作業中に飛来してくる海塩粒子の付着は、動力工具処理に比べて少ないものと考えられる。

3. 2. 2 さび中に蓄積された塩分量

さび採取前の試験体の状況写真を図 3-11 に示す。ウェブの外面、内面ともに、上フランジ直下の部分にこぶ状のさびが多く見られた（図 3-11 (a)(b)）。一方、下フランジ下面では、内面側のエッジ部が著しく腐食していた（図 3-11 (c)）。この試験体には当初、G1-G2 桁間の上部に樹脂製の天板が設置されていた（図 3-12）が、平成 22 年秋季の台風により損壊し、その後撤去された。各部位におけるさびの程度から勘案すると、これらのさびは天板が設置されていた当初から進行していたものであり、当時に受けた環境からの影響が強く残されているものと推察される。



(a) ウェブ外面



(b) ウェブ内面



(c) 下フランジ下面

図 3-11 さび採取前の試験体の状況



図 3-12 天板が設置されている状況(平成 16 年 10 月)

採取したさびを 6 mol/l の硝酸で 2 回煮沸することにより、さび中に含まれる塩化物イオンをほぼ全て抽出することができた。図 3-13 に採取したさびから抽出された塩分量（さび 1 g に対する塩化ナトリウムの質量）を示す。

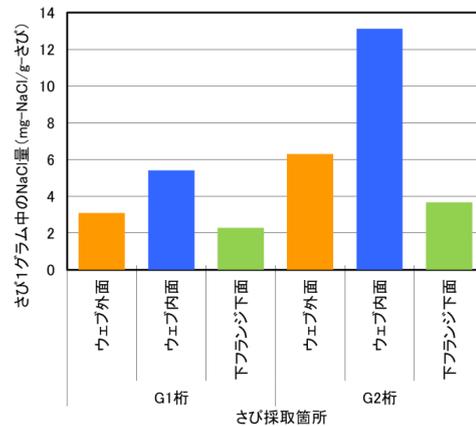


図 3-13 素地調整前の試験体から採取したさび中に含まれる塩分量

図 3-7 に示した表面塩分量の測定結果とは異なり、G1 桁、G2 桁共にウェブ内面>ウェブ外面>下フランジ下面の順に塩分量が少なくなる傾向が示された。試験体に天板が設置されていた当時はウェブ内面に雨が掛かることは無く、部材表面に付着した塩分は洗浄されずに蓄積され、高濃度となっていたものと推察される。ウェブ内面のさびに含まれる塩分量が他よりも多かったのは、このためと考えられる。一方、ウェブ外面は天板の影響を受けず、雨により付着塩分が洗い流され易いと考えられるが、さびを採取した上フランジ直下の部分はフランジの陰となって雨が掛かりにくく、その結果、比較的高い濃度の塩分がさび中に蓄積されたものと思われる。桁全体で比較すると、G1 桁よりも海に近い G2 桁の方が、より多くの塩分が蓄積されている結果となった。

3. 2. 3 塗装工程中に塗膜内に混入する塩分量

塗替塗装において、各工程の直前に部材表面に付着している塩分量の測定結果を図 3-14 に示す。これはすなわち、工程完了から次工程までの期間に飛来し、部材表面に付着した塩分の総量を示すものと考えることができる。

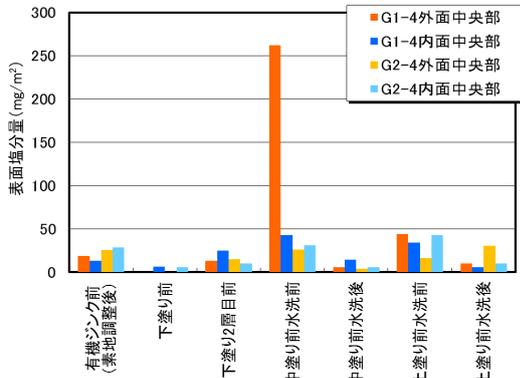


図 3-14 工程完了後から次工程までの間に部材表面に付着した塩分量



図 3-15 足場防護工の状況 (12月9日)

図 3-14 には G1 桁および G2 桁の第 4 区画での測定結果を示した。各工程の間隔は、天候の事情によりやむを得ず最長で 7 日間あけることとなった。その間に部材表面に付着する塩分量はおおむね 20~50 mg/m²であったが、一方で、G1 桁外面では下塗り 2 層目完了から中塗りまでのわずか 2 日間のインターバルでも、250 mg/m²を上回る塩分が付着した。表 3-1 で示したとおり、下塗り 2 層目を塗装した 12 月 8 日から、中塗りを塗装した 12 月 10 日までの 3 日間は、北寄りのやや強い風が吹いており、最大瞬間風速が 15 m/s を超える時間帯もあった。図 3-15 に示す通り、12 月 9 日は海も荒れていたことから、海塩粒子をふんだんに含んだ北風が試験体周辺に吹付けられていたものと思われる。さらに、強風に煽られて足場が倒壊する危険を回避するため、一時的に西側のブルーシートを取り外した時

間帯があったことから、西向きの G1 桁外面に多量の塩分が付着したものと考えられる。一般にメッシュシートによる養生は塗料の飛散防止に有効な手段であるとされているが、図 3-10 や図 3-14 の測定結果から、足場外から飛来してくる塩分に対しては十分な防護工ではないと考えられる。G1/G2 桁の違いや外面/内面の違いについては、明確な傾向は認められなかった。なお、中塗り塗料および上塗り塗料の塗付作業は、部材表面を水拭きして付着塩分量を低減させた後に行った。

各工程において測定した表面塩分量 (図 3-14) を、測定部位ごとに合計 (水洗前の測定値は除く) した結果を図 3-16 に示した。この塩分量は、素地調整完了後から上塗り塗装が完了するまでの間に、塗膜層間に取り込まれた塩分の総量と考えることができる。いずれの部位も、50 mg/m²程度を超える塩分が混入されたことが明らかとなった。塗装作業中や硬化・乾燥中に塗膜の中に混入する塩分は表面塩分量として把握することができず、図 3-16 の結果には含まれていない。これらも加えると、完成した塗膜の中にはさらに多くの塩分が混入しているものと推察される。

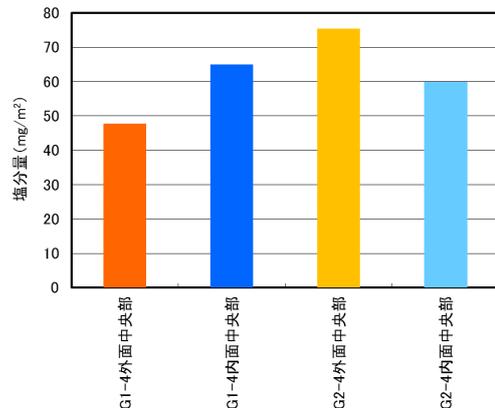


図 3-16 上塗り塗装完了までに塗膜層間に混入した塩分の総量

一般に、ブラスト処理により素地調整を行い、塗替え塗装をする場合には、素地調整により発生するさび、塗膜粉、研削材や、塗装作業中に発生する塗料の飛散・落下等により周辺環境が汚染されるのを防ぐために、足場に板材を取り付け、さらに養生シートを 2 重に張るなど、作業空間全体を覆う厳重な防護工が推奨されている。しかし、動力工具により素地調整を行う場合や物件の規模によっては、メッシュシートの様な軽微な防護工のみで塗装工事が行われる場合も多い。橋梁模擬試験体を用いた塗装試験の結果から、現場塗装に

において防護工が不十分であると、塗膜内部に多量の塩分が取り込まれる可能性があることが明らかとなった。

4. 付着塩分量と塗膜耐久性試験

現場塗装の工程中に飛来し塗膜内部に取り込まれる塩分が、塗膜性能へ及ぼす影響を把握するために、塗膜層内や塗膜層間に意図的に塩分を混入させた試験片を作製し、室内実験により性能を評価した。

4. 1 実験方法

4. 1. 1 試験片

試験片 (150×70×3.2 mm) の基材には、SS400 鋼板 (JIS G 3101) の表面をブラスト処理 (除せいで度 : ISO Sa2 1/2、表面粗さ : 50 μm Rz_{JIS} 相当) したものをを用いた。この鋼板に、「鋼道路橋防食便覧¹⁾」に示される標準的な塗替え塗装系である Rc-I 塗装系 (表 4-1) を、各層とも規定膜厚となるようにエアスプレーあるいは刷毛により塗装して試験片を作製した。上塗り塗料の色相は白 (マンセル値は N9.5 相当) とした。試験片作製の際、各塗膜層の塗付工程が完了するたびに、塗膜表面に所定量の塩分を付着させ、一昼夜放置した後に上層塗膜の塗付作業を行った。

表 4-1 供試塗装系 (Rc-I 塗装系)

塗装工程	塗料名	使用量 (g/m ²)
素地調整	(1種)	
下塗	有機ジンクリッチペイント	600
下塗	弱溶剤形変性エポキシ樹脂塗料下塗	240
下塗	弱溶剤形変性エポキシ樹脂塗料下塗	240
中塗	弱溶剤形ふっ素樹脂塗料用中塗	170
上塗	弱溶剤形ふっ素樹脂塗料上塗	140

塩分の付着には、複合サイクル試験機 (スガ試験機 : CYP-90) の塩水噴霧機能を用いた。複合サイクル試験機では塩水噴霧時間が短い場合、試験槽内の塩水ミストが均一な分布状態とならないため、予備試験によって試験機の塩水噴霧ノズルからの距離と、その位置に 200×200×2 mm のステンレス鋼板 (SUS 316) を設置した時に、一定時間に鋼板表面に付着する塩分量との相関を調べた。この結果、試験槽壁面から 20 cm 程度離して鋼板を設置した場合、最も効率よく、安定した付着塩分量が得られることを確認した。図 4-1 に、ステンレス鋼板を試験槽壁面から 20 cm 程度離れた位置に設置し、塩化ナトリウム水溶液を噴霧させた時の、噴霧時間と鋼板表面に付着した塩分量との関係を示す。

塩化ナトリウム水溶液の濃度は、JIS K 5600-7-9³⁾ のサイクル D に規定される試験液の濃度 (50±10 g/L) と同等の 5% とした。

図 4-1 から、複合サイクル試験機により試験片表面に付着する塩分量は、塩化ナトリウム水溶液の噴霧時間にはほぼ比例することがわかる。この比例関係は、試験機に補充する塩化ナトリウム水溶液の濃度を変えた場合においても、維持されることを確認している。これを利用し、複合サイクル試験機に補充する塩化ナトリウム水溶液の濃度 (5~30%) と、塩化ナトリウム水溶液の噴霧時間とを調整して、付着塩分量の異なる試験片を作製した。

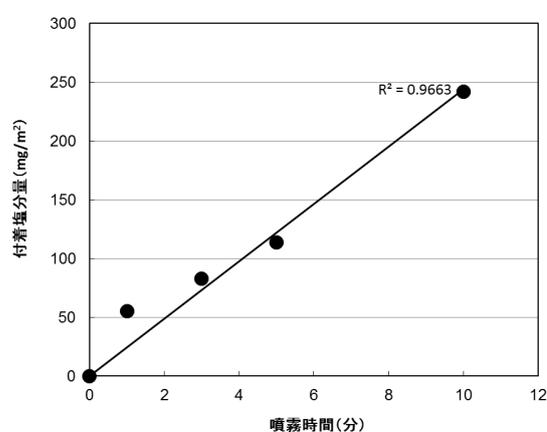


図 4-1 複合サイクル試験機による塩化ナトリウム水溶液の噴霧時間と付着塩分量との相関

4. 1. 2 付着力試験

塗装工程中に混入した塩分が塗膜の初期物性へ及ぼす影響については、塗膜の最も基本的な性能の一つである付着力^{4,5)}によって評価した。付着力の評価は JIS K 5600-5-7: 2008⁶⁾ に準拠し、付着性試験機 (Elcometer: 106) を用いたプルオフ法により行った。付着力試験は 1 枚の試験片につき、2 箇所で行った。

4. 1. 3 サイクル腐食試験

サイクル腐食試験は塩水噴霧、乾燥、湿潤などの環境条件をサイクルで組み合わせ、主に大気環境における金属材料の耐食性や塗膜の防食性を評価するための促進劣化試験方法の一種である。「4. 1. 1 試験片」で作製した試験片の塗膜に、鋼素地に達するキズ (長さ 50 mm) を入れ、図 4-2 に示す土木研究所式試験条件⁷⁾で促進的に劣化させた。所定の試験時間が経過した時点で試験片を取り出して、JIS K 5600-8:2008⁸⁾や塗膜の評価基準 ((財) 日本塗料検査協会)⁹⁾、鋼構造物

塗膜調査マニュアル ((社) 日本鋼構造協会)¹⁰⁾等を参考に、塗膜外観観察(さび、はがれ、割れ、膨れ、白亜化等)、キズ部からのさびや膨れ幅の計測、塗膜付着性の評価(プルオフ法)などを行い、塗膜の防食性を評価した(図4-3)。

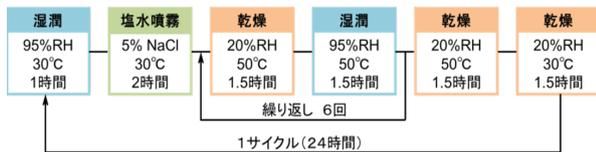


図4-2 サイクル腐食試験条件(土木研究所式)⁷⁾



図4-3 サイクル腐食試験における塗膜の劣化評価の例

4.2 実験結果

4.2.1 塗膜の初期付着力

試験片の塗装完了から10日間室温で養生した後に、塗膜の付着力試験を実施した結果を図4-4に示す。結果は4枚の試験片の平均値を示している。

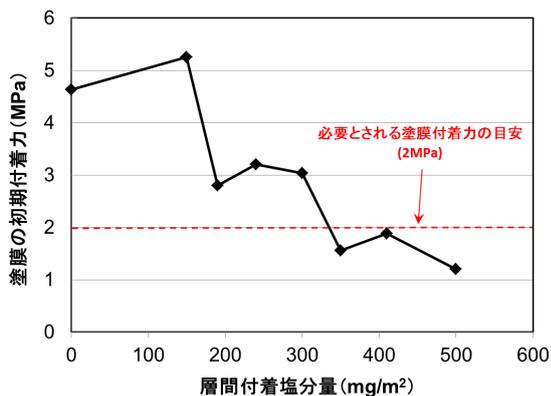


図4-4 塗膜層間に塩分が混入した時の塗膜の付着力

塩分を含まない試験片では、およそ4~5 MPaの塗膜付着力を示し、破壊形態は接着剤/上塗り塗膜層間での剥離破壊、あるいはジンクリッチペイント層内での凝集破壊であった。塗装工程中における塩分の混入を想定した試験片では、塗膜層間の塩分量が150 mg/m²程度では塗膜付着力への影響は認められなかつ

たが、190 mg/m²程度になると付着力はおよそ6割程度まで低下することが明らかとなった。

表4-2 付着試験で見られた典型的な剥離の形態

層間付着塩分量目標値 (mg/m ²)	付着力 (MPa)	破断箇所*と面積(%)	剥離面写真
0	4.5以上	接/上 100	
350	1.8	接/上 50 上/中 25 下2/下1 5 下1/ジンク 20	

* 接/上: 接着剤/上塗り界面, 上/中: 上塗り/中塗り界面, 下2/下1: 下塗り2層目/下塗り1層目界面, 下1/ジンク: 下塗り1層目/ジンクリッチペイント界面

塗膜層間に付着させる塩分量をさらに増加させると、およそ350 mg/m²より多い場合に塗膜付着力は2 MPaを下回った。塗膜付着力が低い試験片では、接着剤/上塗り塗膜層間での剥離破壊、ジンクリッチペイント層内での凝集破壊に加えて、下塗り~上塗りの塗膜層間で剥離しているケースが認められた(表4-2)。一般に、防食塗膜に必要な塗膜付着力の目安は2 MPaとされているが、本実験結果から、塗装工程中に塗膜層間に350 mg/m²程度の塩分が付着すると、十分な付着力が得られなくなる可能性があることが示唆された。この理由については、塩分の潮解性によってわずかな水分が塗膜層間に入り込み、付着が阻害されたことなどが考えられるが、今後さらに詳細な検討が必要である。

4.2.2 塗膜耐久性

サイクル腐食試験後の塗膜外観写真を図4-5に、塗膜外観の評価結果を表4-3に示す。塩分を含まない試験片では、150サイクル後においても一般部に塗膜異状は認められなかった。また、キズ部からのさびによる膨れ幅は最大で0.5mmであった。一方、塗膜層間に塩分を付着させた試験片では、190 mg/m²の仕様で100サイクル後より塗膜一般部に膨れが発生した。また、同仕様においては早い段階でキズ部からさびが成長し始め、150サイクル後には最大4.0mmに達した。塗膜層間に塩分を付着させた試験片では、塩分により塗膜層の内外に浸透圧が生じ、塗膜層内へ水(水蒸気)が浸透しやすくなることで膨れの発生につながった、ま

た、キズ部周辺では電解質である塩分がアノード／カソード間の腐食電流を助長することでさびの生成が促進されたことが推察される。実験の結果から、塗装工程中に $150\sim 190\text{ mg/m}^2$ 程度の塩分が塗膜層間に混入することにより、塗膜の防食性の低下や、早期の塗膜異状が引き起こされ易いことが明らかとなった。

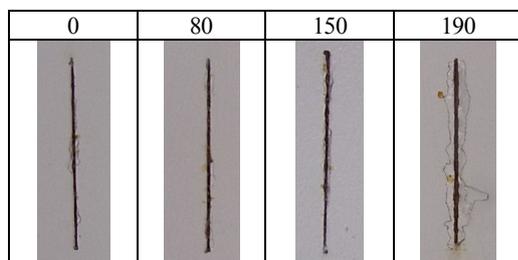


図 4-5 150 サイクル後の塗膜外観（キズ部拡大）

表 4-3 サイクル腐食試験後の塗膜外観評価結果

層間付着塩分量 (mg/m ²)	50 サイクル		100 サイクル		150 サイクル	
	一般部	キズ部からの膨れ幅 (mm)	一般部	キズ部からの膨れ幅 (mm)	一般部	キズ部からの膨れ幅 (mm)
0	異常なし	0	異常なし	0	異常なし	0.5
80	異常なし	0	異常なし	0	異常なし	0.5
150	異常なし	0	異常なし	0.5	異常なし	0.5
190	異常なし	1.5	膨れ 8F	3.0	膨れ 8MF	4.0

これまで、素地調整後の仕上がり面に残存する塩分の許容量については各機関において規定されており、たとえば「鋼道路橋防食便覧（日本道路協会）」では 50 mg/m^2 以下となるよう管理することが推奨されている¹⁾。再塗装の際に塗膜の付着力を確保し、鋼素地からの発せいを抑制するため、この値は低めに設定されているものと考えられる。一方、上記の実験結果から、塗膜層間に多少の塩分が混入したとしても、塗膜欠損部以外でさび、ふくれ、はがれ等の塗膜異状を早期に発生させる可能性は低いことが示唆された。これは、重防食塗装系に用いられる塗料は環境遮断性が高く、塗膜層間に混入した塩分が塗膜内に拡散浸透する速度が極めて遅いためであると推察される。以上の結果を踏まえると、重防食塗装系においては、塗膜層内に混入する塩分の許容量は 100 mg/m^2 程度に設定するのが妥当と考えられる。

5. 塩分飛来環境での施工対策の検討

一般に、塗替え塗装における素地調整では、工法により、残存する汚れや塩分量が異なることが経験的に知られている。そこで、屋外暴露試験により、素地調整工法と再塗装後の塗膜耐久性との相関について確認し、良好な塗膜耐久性を確保するための仕上がり程度について検討した。また、塗装工程中に飛来する塩分の影響を排除する手法について検討した。

5. 1 素地調整時の施工対策

海岸部に暴露して意図的に腐食劣化させた塗装鋼板を各種の物理的素地調整方法で処理し、素地調整後に鋼素地に残存している塩分量について調べた。素地調整後に再塗装をして屋外暴露試験を実施し、素地調整後の残存塩分と塗膜耐久性との相関について検討した。

5. 1. 1 実験内容

(1) 試験片の基材

試験片の基材には SS400 相当のグリットブラスト鋼板を用いた。試験片の寸法は、 $100\times 100\times 3.2\text{ mm}$ を素地調整後の残存塩分の定量用として用い、 $200\times 300\times 3.2\text{ mm}$ を暴露試験用として用いた。

(2) 試験片の作製方法

試験片基材の片面に長油性フタル酸樹脂塗料上塗り（A 塗装系模擬）、あるいは塩化ゴム系塗料上塗り（B 塗装系模擬）をそれぞれ $25\sim 30\mu\text{m}$ 塗装し、これを試験面とした。試験面の反対面およびコバ面は、エポキシ樹脂塗料を塗装して封止した。暴露試験用試験片については、試験面（ $200\times 300\text{ mm}$ ）のうち 100 mm 四方をマスキングした状態で塗装して鋼材露出部を設け、この部分を疑似的な塗膜欠損部とした。

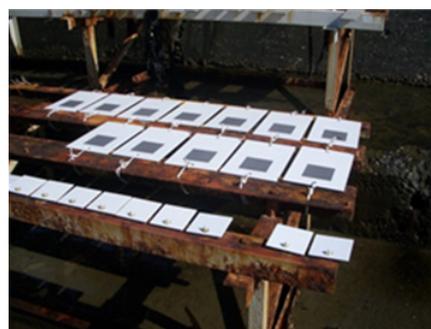


図 5-1 第一次暴露開始時の状況（千倉）

作製した塗装鋼板は、海岸部に位置する千葉県旭市飯岡あるいは千葉県南房総市千倉町で屋外暴露（第一次暴露）し、意図的に腐食劣化させた（図 5-1）。これらの暴露箇所は離岸距離が異なっており、千倉の方が

飯岡よりも塩分の影響を強く受ける。第一次暴露はほぼ1年間継続し、その後、全ての試験片を回収した。回収時の暴露試験用試験片の外観写真を図5-2に示す。塗膜部の発せいはB塗装系よりもA塗装系の方が進行しており、また、いずれの塗装系とも千倉に暴露した方が飯岡よりも劣化が著しかった。千倉に暴露した試験片の塗膜欠損部では、浮きさびも見られた。

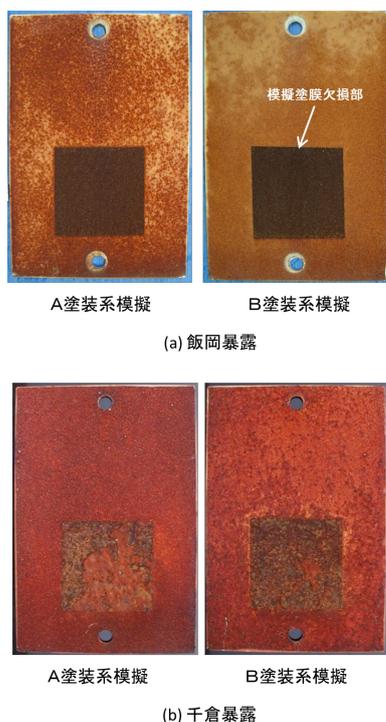


図5-2 第一次暴露後の暴露試験用試験片の外観



図5-3 素地調整時に使用した動力工具
(左: カップワイヤホイール、中: プラスト面形成動力工具、右: ディスクサンダー)

第一次暴露により腐食劣化させた試験片を、動力工具処理あるいはブラスト処理により素地調整し、さびや塗膜を全面的に除去した。動力工具処理にはディスクサンダー、カップワイヤホイール、プラスト面形成動

力工具のいずれかを用いた(図5-3)。また、ブラスト処理は専門の業者に委託して行い、除せいで度 ISO Sa2 1/2、表面粗さ $Rz_{JIS} 25 \mu m$ 程度を目安として仕上げた。研削材にはアルミナあるいはガーネットを用いた。

素地調整後の暴露試験用試験片外観写真の一部を図5-4に示す。ディスクサンダーおよびカップワイヤホイールで処理した試験片では、塗膜や弱く付着しているさびは十分に除去できたものの、孔食部分のさびは除去できずに残った。これは塗膜欠損部で特に著しく、また、カップワイヤホイールの方がより多く残った。ブラスト面形成動力工具で処理した試験片については、目視上では概ね塗膜やさびを除去できたが、一部の孔食部分にさびが残った。

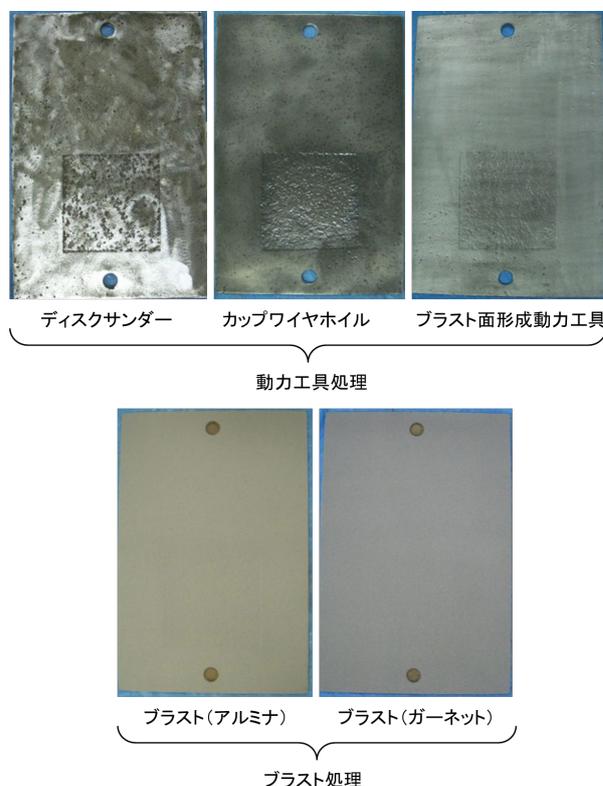


図5-4 素地調整後の暴露試験用試験片の外観の例
(A塗装系模擬/千倉暴露)

素地調整後の試験片は、鋼道路橋塗装・防食便覧に示される Rc-I 塗装系あるいは Rc-III 塗装系を試験面全面に塗装し、これらを第二次暴露に供した(表5-1)。ディスクサンダーおよびカップワイヤホイールで処理した試験片については Rc-III 塗装系を、ブラスト処理した試験片については Rc-I 塗装系を適用した。ブラスト面形成動力工具で処理した試験片のみ、Rc-I、Rc-III 塗装系を適用した2種類の塗装試験片を作製した。

表 5-1 第二次暴露に供試した塗装系（鋼道路橋塗装・防食便覧）

(a) Rc-I 塗装系

工程	Rc-I 塗装系	
	塗料名	使用量(g/m ²)
素地調整	(1種)	
下塗	有機ジンクリッチペイント	600
下塗	弱溶剤形変性エポキシ樹脂塗料下塗	240
下塗	弱溶剤形変性エポキシ樹脂塗料下塗	240
中塗	弱溶剤形ふっ素樹脂塗料用中塗	170
上塗	弱溶剤形ふっ素樹脂塗料上塗	140

(b) Rc-III 塗装系

工程	Rc-III 塗装系	
	塗料名	使用量(g/m ²)
素地調整	(3種)	
下塗	弱溶剤形変性エポキシ樹脂塗料下塗(鋼板露出部)	(200)
下塗	弱溶剤形変性エポキシ樹脂塗料下塗	200
下塗	弱溶剤形変性エポキシ樹脂塗料下塗	200
中塗	弱溶剤形ふっ素樹脂塗料用中塗	140
上塗	弱溶剤形ふっ素樹脂塗料上塗	120

(3) 素地調整後の残存塩分の定量

素地調整後の残存塩分の定量には、100×100×3.2 mm の試験片を用いた。「(2) 試験片の作製方法」によって各種の方法により素地調整を行った後に、試験片ごとに残存塩分量を調べた。方法は以下の通りである。①試験片を100℃の純水（約 500 ml）で 30 分間煮沸する。②煮沸した容器ごと超音波洗浄機にかける（5 分間）。③蒸留水で洗浄しつつ試験片を取り出す。④抽出液および洗液に蒸留水を加え、全量を 500 ml とする。⑤イオンクロマトグラフィーにより、④の液に含まれる塩化物イオン量を定量する。⑥⑤の塩化物イオンが全て塩化ナトリウム (NaCl) 由来のものとして換算し、試験片に残存している塩分量 (mg/m²) を求めた。

表 5-2 第二次暴露に供した試験片の仕様

一次暴露	塗替え前の塗装系	素地調整方法	塗替塗装系
飯岡/千倉 約12ヶ月	A塗装系模擬	ディスクサンダー	Rc-III
		カップワイヤホイール	
		ブラスト面形成動力工具	
		ブラスト面形成動力工具	Rc-I
		ブラスト(アルミナ)	
	ブラスト(ガーネット)		
	B塗装系模擬	ディスクサンダー	Rc-III
		カップワイヤホイール	
		ブラスト面形成動力工具	
		ブラスト面形成動力工具	Rc-I
ブラスト(アルミナ)			
ブラスト(ガーネット)			

(4) 第二次暴露

第二次暴露に供した試験片の仕様を整理し、表 5-2 に示す。Rc-I および Rc-III 塗装系で再塗装した試験片は、塗膜に鋼素地に達するキズ（長さ 100 mm）を入

れた上で、沖縄建設材料耐久性試験施設（沖縄県国頭郡大宜味村）に暴露し、塗膜劣化を追跡調査することとした。所定の暴露期間が経過した時点で、JIS K 5600-8:2008⁸⁾や塗膜の評価基準（(財)日本塗料検査協会⁹⁾、鋼構造物塗膜調査マニュアル（(社)日本鋼構造協会¹⁰⁾等を参考に塗膜外観観察（さび、はがれ、割れ、膨れ等）、キズ部からのさびや膨れ幅の計測、塗膜付着性の評価（プルオフ法）などを行い、素地調整方法による塗膜劣化程度の差異を調べた。

5. 1. 2 試験結果

(1) 素地調整方法と残存塩分量

素地調整後に試験片に残存した塩分は、1 回の実験操作では全量を抽出することができず、繰り返し行った。その結果、いずれの試験片においても 4～6 回の繰り返しにより、水中に溶出する塩化物イオン量はほぼゼロとなったため、この時点で抽出操作を終了した（図 5-5）。抽出された塩化物イオンの総量より、残存塩分量を求めた結果を図 5-7 に示す。いずれのケースにおいても、カップワイヤホイールで処理した試験片において、残存塩分量が最も多い結果となった。動力工具処理とブラスト処理とを比較すると、当初の予想とは異なり、両者に極端な差異は認められず、ブラスト処理後においても 40～50 mg/m² 程度の塩分が残存する可能性が示された。塩分の影響の強い千倉で暴露した方が、全体的に残存塩分は多い傾向となったが、塗装系による差異は明確ではなかった。

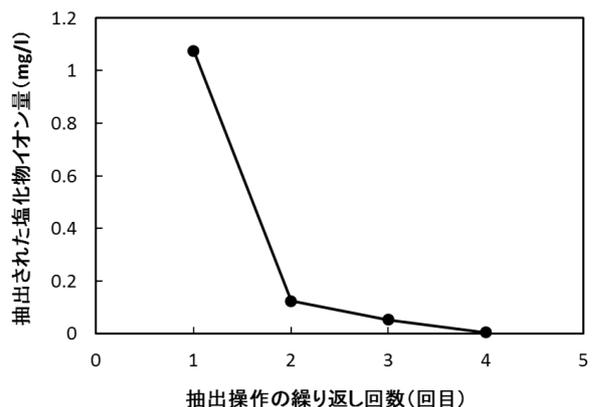


図 5-5 抽出される塩化物イオン量の推移の例

(A 塗装系模擬/千倉暴露/カップワイヤホイール処理)

(2) 素地調整方法と塗膜耐久性

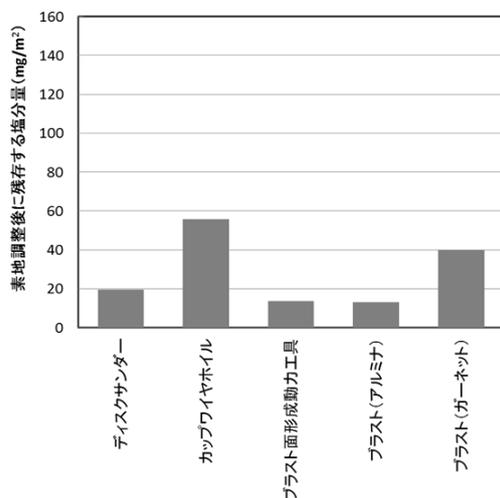
第二次暴露 3 年目における塗膜外観の例を図 5-6 に示す。Rc-III 塗装系の試験片では、全般的にキズ部から

の腐食が大きく進行していた。これは塗装系にジンクリッチ塗料を適用していないことも要因の一つとして考えられるが、一方で、ブラスト面形成動力工具処理の試験片では塗膜欠損部の膨れが比較的少ないこと、カップワイヤホイール処理の試験片では一般部にも膨れが発生したケースがあることなどから、素地調整程度も塗膜耐久性を大きく左右しているものと考えられる(表 5-3)。防食下地にジンクリッチ塗料を用いた Rc-I 塗装系では、防食下地なしの Rc-III 塗装系に比べてキズ部からの腐食の進行が大幅に小さいが、ブラスト面形成動力工具処理の結果から、Rc-I 塗装系においても素地調整程度が不十分である場合には、キズ部を起点として腐食が広がりやすい傾向があることが示唆された。暴露 3 年目までの結果からは、一般部の塗膜付着力には明確な傾向は見られず、塗膜の防食性の低下が懸念される付着力異常は認められなかった(図 5-8)。

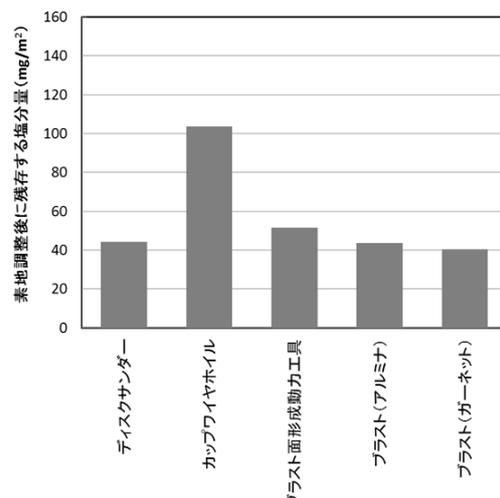


(a)カップワイヤホイール処理+Rc-III塗装系 (b)ブラスト面形成動力工具+Rc-I塗装系

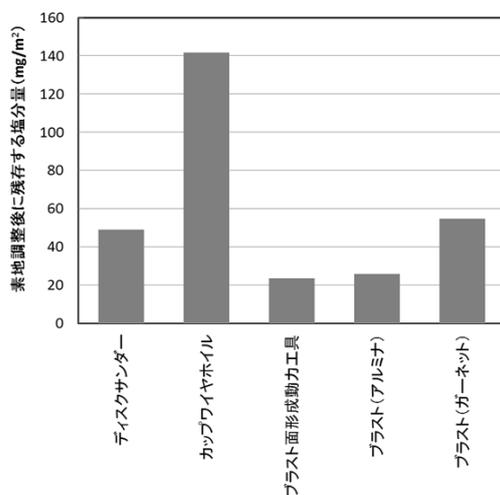
図 5-6 二次暴露 3 年目の塗膜外観の例
(A 塗装系模擬/千倉暴露)



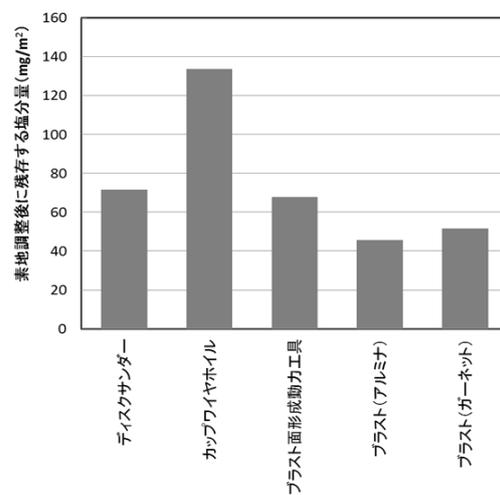
(a) A 塗装系模擬/飯岡暴露



(b) A 塗装系模擬/千倉暴露

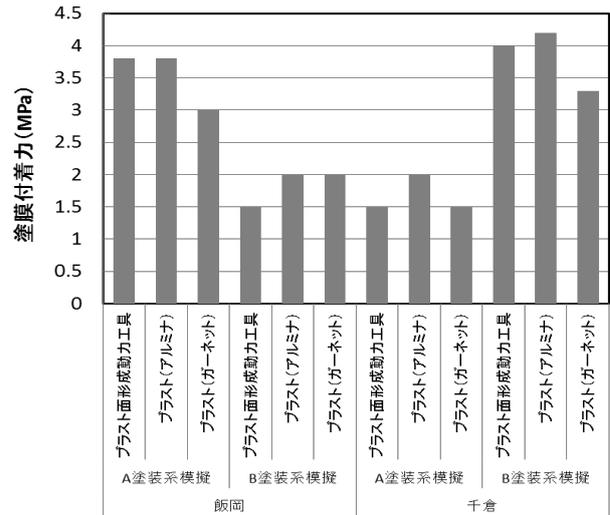
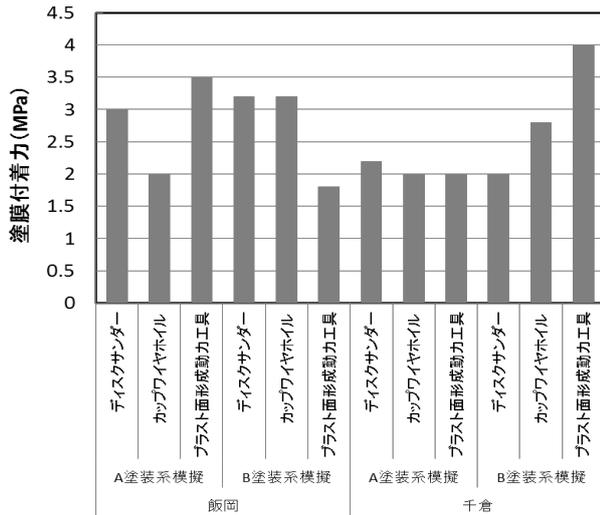


(c) B 塗装系模擬/飯岡暴露



(d) B 塗装系模擬/千倉暴露

図 5-7 素地調整後に残存する塩分量 (塩化ナトリウム量に換算)



(a) Rc-III 塗装系

(b) Rc-I 塗装系

図 5-8 プルオフ試験による塗膜付着力 (第二次暴露3年目)

表 5-3 塗膜外観の評価結果 (第二次暴露3年目)

一次暴露	試験片			一般部		塗膜欠損部	
	塗替え前の塗装系	素地調整方法	塗替え塗装系	塗膜外観	キズからの片側最大膨れ幅 (mm)	塗膜外観	キズからの片側最大膨れ幅 (mm)
飯岡	A 塗装系 模擬	ディスクサンダー	Rc-III	○	37	ふくれ 8M	28
		カップワイヤホイル		○	16	ふくれ 6MD	20
		ブラスト面形成動力工具		○	32	○	20
		ブラスト面形成動力工具	Rc-I	○	2.5	○	3
		ブラスト(アルミナ)		○	0.5	○	0.5
		ブラスト(ガーネット)		○	0	○	0
	B 塗装系 模擬	ディスクサンダー	Rc-III	○	28	ふくれ 8M	43
		カップワイヤホイル		○	30	ふくれ 4MD	14
		ブラスト面形成動力工具		○	30	○	24
		ブラスト面形成動力工具	Rc-I	○	4	ふくれ 2箇所 (0.5/1.0 mm)	4
		ブラスト(アルミナ)		○	0	○	0
		ブラスト(ガーネット)		○	0	○	0.5
千倉	A 塗装系 模擬	ディスクサンダー	Rc-III	○	38	ふくれ 8MD	27
		カップワイヤホイル		ふくれ 8VF	20	ふくれ 6MD	18
		ブラスト面形成動力工具		○	26	8F	21
		ブラスト面形成動力工具	Rc-I	○	3	○	3
		ブラスト(アルミナ)		○	1	○	1
		ブラスト(ガーネット)		○	0	○	0
	B 塗装系 模擬	ディスクサンダー	Rc-III	○	32	ふくれ 8M	33
		カップワイヤホイル		ふくれ 8VF	20	ふくれ 6MD	14
		ブラスト面形成動力工具		○	29	ふくれ 8M	16
		ブラスト面形成動力工具	Rc-I	○	2.5	○	8
		ブラスト(アルミナ)		○	0	○	0.5
		ブラスト(ガーネット)		○	0	○	0

○：異常なし

5. 2 塗装時の施工対策

「3. 飛来塩分環境での施工試験」と同じ試験体を用い、素地調整および高圧洗浄機を用いた水洗による表面塩分量の低減効果、ウエスを用いた部材の水拭きによる表面塩分量の低減効果について検討した。各工法で処理する前後の部材表面の塩分量を、電気伝導度

法により計測した結果を表 5-4 に示す。また、各工法における塩分除去率（処理前の表面塩分量に対する除去された塩分量の割合）を図 5-9 に示す。高圧水洗とブラスト処理との組み合わせ、ブラスト処理および動力工具（ディスクサンダー）処理については、それぞれ 6 回の測定における平均値を示しており、水拭きによる

については24回の測定の前平均値を示している。

表 5-4 処理方法による残存表面塩分量の違い

処理方法		表面塩分量 (mg/m ²)	
		処理前	処理後
塗装前	高圧水洗後にブラスト処理	566.7	28.5
	ブラスト処理	135.7	18.5
	動力工具処理	225.0	115.1
塗装中	水拭き	76.6	16.4

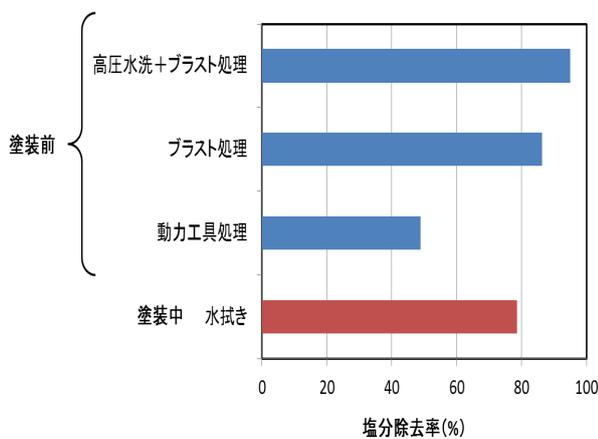


図 5-9 処理方法による付着塩分除去効果の違い



図 5-10 高圧洗浄機による部材の水洗

塗装前（塗料の塗付前）の処理では、高圧洗浄機による水洗とブラスト処理との組み合わせあるいはブラスト処理単独での効果が高く、それぞれ20~30 mg/m²程度まで表面塩分量が低減した。高圧水洗（図 5-10）では、10 MPaを上回る十分な吐出圧力の時に特に効果が高く、水洗後にブラスト処理を行う事で、95%程度の部材表面塩分を除去することができた。一方で、動

力工具処理で素地調整した場合、処理後においても115 mg/m²程度もの塩分が残存した。「3. 塩分飛来環境での施工試験」においても記述した通り、動力工具処理の場合には、塩分濃度の高い腐食箇所等の処理の際に工具に付着した塩分が、もともとの塩分濃度が低い他の箇所にまで拡散してしまっている可能性が考えられる。動力工具処理前の高圧水洗についても検討したが、事前の水洗による十分な効果は得られなかった。

塗料の塗付工程中においては、塗膜への悪影響が懸念されるため部材の水洗ができない。そこで、ウエスによる水拭きの効果について検証した。桁の内面、外面のそれぞれ12箇所について水拭き処理を行い、その前後の部材表面塩分量を測定した。水拭き処理は塗料の塗付作業が1層完了後、24時間養生し、塗膜の硬化乾燥状態を確認した上で実施した。ウエスには市販の綿布を用い、これを清浄な水道水で濯ぎ、十分に水を絞った後に、対象部材の表面を軽い力で拭き上げた。約1 m²程度処理する毎に、ウエスを清浄な水道水で濯いだ。1名の作業員が1 m²を処理する速度は、おおむね2~3分程度であった。次工程の直前にこの作業を行うことにより、塗膜層間に混入する塩分量を20 mg/m²未満まで低減できることが明らかとなった。

6. 現場塗装マニュアル（案）

以上の調査、実験結果を取りまとめ、「現場塗装マニュアル（案）」を作成中である。その構成を表 6-1 に示す。主な内容について、下記に示す。

表 6-1 「現場塗装マニュアル（案）」の構成

第1章	総則
第2章	既存塗膜における塩分の測定
第3章	現場塗装作業における防護設備工
第4章	素地調整工程における塩分量の管理と塩分除去方法
第5章	塗料塗付工程における塩分量の管理と塩分除去方法
付属資料	各種塩分測定方法

第1章「総則」では本マニュアルの目的や、適用範囲等、本マニュアルに関する一般的な内容についてまとめる。

第2章「既存塗膜における塩分の測定」では、既設橋梁における表面塩分の測定方法や測定箇所、塗膜やさび中に含まれる塩分の定量のためのサンプリング方法等についてまとめ、塗替え塗装の際の素地調整方法

の選定や既存塗膜の維持管理において参考となる情報を示す。

第3章「現場塗装作業における防護設備工」では、各種防護設備工の特徴を整理し、塩分飛来環境における現場塗装作業において求められる防護設備工について記述する。

第4章「素地調整工程における塩分量の管理と塩分除去方法」では、素地調整工程における表面塩分測定箇所や測定方法、測定のタイミング等について記述する。また、塩分除去のために有効な方法について示す。

第5章「塗料塗付工程における塩分量の管理と塩分除去方法」では、素地調整後、塗料を塗付する工程において、次工程までの間に部材表面に付着した塩分測定方法や測定箇所等について示す。また、塩分除去のために有効な方法について示す。

表面塩分の各種測定方法や、塗膜、さび中に含まれる塩分の各種分析方法等については、付属資料にとりまとめる予定である。

7. まとめ

本研究では、鋼道路橋の現場塗装において、素地調整後に被塗面に残存する塩分や、塗装工程中に飛来し塗膜内に混入する塩分が塗膜性能に及ぼす影響を明らかにすると共に、その影響を排除する手法を確立することを目的として検討を行った。主な結果をまとめると、下記の通りである。

(1) 塩分飛来環境で塗装工事を行う際の防護工はメッシュシートのような軽微な養生では飛来してくる海塩粒子を遮断することができず、次工程までの短い養生期間においても、被塗面に 250 mg/m^2 を上回るほどの多量の塩分が付着する恐れがあることが明らかとなった。塩分飛来環境での現場塗装作業においては、従来、現場においてブラスト作業やスプレー塗装作業を行う場合のみ適用されている、板張りシート張りなどを併用した気密性の高い防護工が必要であると考えられる。

(2) 塗装時に塗膜層間に塩分が混入すると、塗膜の付着力が低下することを確認した。塗膜付着力は塗膜層間の塩分量が 150 mg/m^2 程度になるとおよそ6割程

度まで低下し、さらに 350 mg/m^2 より塩分量が多くなると、塗膜付着力は 2 MPa を下回り、十分な付着力が得られなくなる可能性が示唆された。一方で、塗膜の防食性に関する実験結果では、塗膜層間に混入する塩分量が $150 \sim 190 \text{ mg/m}^2$ になると、早期に塗膜異状が引き起こされやすいことが示された。これらの実験結果を踏まえると、塗膜層間に混入する塩分量については、 100 mg/m^2 未満に抑えることが望ましいと考えられる。

(3) 塩分飛来環境での施工対策としては、よりグレードの高い素地調整が重要であること、さらに、工程間の綿密な付着塩分管理と工程前の部材の水洗（あるいは水拭き）が有効であることを定量的に明らかにした。

以上の調査、実験結果をもとに、現場における部材の塩分濃度の測定方法や、塩分の除去方法等について取りまとめ「現場塗装マニュアル（案）」を作成し、普及に努めたい。

参考文献

- 1) 社団法人日本道路協会: 鋼道路橋防食便覧, 丸善, 2014.
- 2) 社団法人日本道路協会: 鋼道路橋塗装・防食便覧資料集, 丸善, 2010
- 3) JIS K 5600-7-9: 2006 塗料一般試験方法—第7部: 塗膜の長期耐久性—第9節: サイクル腐食試験方法—塩水噴霧/乾燥/湿潤
- 4) 佐藤弘三: 塗膜の付着, 理工出版, 1981.
- 5) 南 誠佑: 塗膜の付着性試験方法の現状, 色材協会誌, 第45巻, 第7号, pp. 370-376, 1972.
- 6) JIS K 5600-5-7: 2008 塗料一般試験方法—第5部: 塗膜の機械的性質—第7節: 付着性 (プルオフ法)
- 7) 斉藤 誠, 守屋 進: 暴露試験と相関性の良い腐食促進試験方法に関する検討, 防錆管理, 第46巻, 第11号, pp.1-7, 2002
- 8) JIS K 5600-8: 2008 塗料一般試験方法—第8部: 塗膜劣化の評価
- 9) 財団法人日本塗料検査協会: 塗膜の評価基準, 2003
- 10) 社団法人日本鋼構造協会: 鋼構造物塗膜調査マニュアル, 2006

Effect of chloride on film performance with on-site painting of steel road bridges

Budget: Grants for operating expenses

Research Period: FY2006-2010

Advanced Materials Research Team

Nishizaki, I. and Tomiyama, T.

Summary The aim of this study is to figure out an effect of chloride on film performance with on-site painting of steel road bridges. A trial painting of an actual-size steel girder was conducted under high-salinity environment in order to investigate the amount of deposited chloride on the coated surface between the painting processes. In addition, we examined delamination strength and durability of the coating system which was intentionally-attached chloride between the film layers in laboratory experiments. As the results, it was shown that more than 150-200 mg/m² of chloride can reduce the interlayer adhesion strength and deteriorate early protective performance of the coating system.

Key Words: chloride, on-site painting, film performance, steel road bridge