

ブラスト処理後における塩分低減剤の性能評価

○藤川祥汰¹⁾、水谷健人²⁾、鈴鹿健志³⁾、小寺健史⁴⁾

1. はじめに

近年、腐食環境におかれた塗替え塗装後の橋梁において、早期にさびが表面化する事例が報告されており、その原因の一つとして、ブラストによる素地調整後に残存する塩分が影響していると考えられている。¹⁾ 塩分は、さびと鋼材の界面に存在することが知られており、特に孔食が発生している箇所では塩分濃度が高く検出される傾向にある。また既存の塩分処理方法としては、ブラスト、水洗工が実施されており、ブラストでは塩分を除去できず、低減する効果しかないことから複数回の施工を繰り返すことになる。そのためブラストによる塩分処理では使用する研削材量が膨大化、産廃量も嵩み高コスト化するだけでなく、工期の延長が余儀なくされる。水洗工においては、高圧水洗やスチーム洗浄など種々検討されているが、どの方法においても足場内に処理水が散乱する。足場内の処理水は、次工程のブラストで発生する研削材回収時の障害となるため、ある程度回収する必要がある煩雑な作業となる。また、橋梁下に一級河川や住宅地が広がっている場合、そもそも水洗が実施できないケースもあることから、これらに代わる塩分処理方法が求められている。

以上の課題を抱えた塩分処理に新たな解決手段を提案すべく、筆者らは塩分低減剤を開発した。本報では、塩分低減剤の特徴紹介をはじめ、本材料の塩分の低減性評価や、塗装した塗膜に対する本材料の影響評価、ならびに本材料の施工性評価の際に得られた知見も併せて報告する。

2. 塩分低減剤の特徴

2. 1 塩分低減剤の配合特徴および塩分低減の原理

水洗工においては、吹付洗浄後に処理水が流れ落ちてしまうことが大きな欠点となっている。塩分低減剤はこれを解消するため、主成分である水に加えチキソ性の高い増粘剤を含んでおり、エアレス等で吹付してから鋼材表面に留まるため水洗の欠点を克服している。また、塩分低減剤は樹脂分を配合しており、水が蒸発すると被膜を形成する。一度水の中に溶け込んだ塩分は、水の蒸発に伴い被膜に移行し捕捉される (図 1)。さらにこの塩分を含んだ被膜は、鋼材表面から手で剥がすことが可能であるため、廃棄物量を抑制することが可能である。

塩分処理工程は、素地調整作業と並行して実施されることが多く、塩分低減剤のように被膜を形成してしまえば、素地調整時に発生する粉塵からの再汚染を防ぐ事が可能である。その他配合する添加剤も人体に対する危険有害性の少ないものとなっており、作業者の安全性にも考慮した設計となっている。

1) 大伸化学株式会社 技術部開発課 〒679-2215 兵庫県神崎郡福崎町西治字拝尾 860-26

2) 大伸化学株式会社 技術部開発課 〒343-0851 埼玉県越谷市七左町 4-316

3) オー・ジー株式会社 プロジェクト推進 〒105-0001 東京都中央区日本橋本町 2-8-7

4) 極東メタリコン工業株式会社 代表取締役専務 〒665-0811 兵庫県宝塚市南ひばりガ丘 2-14-22

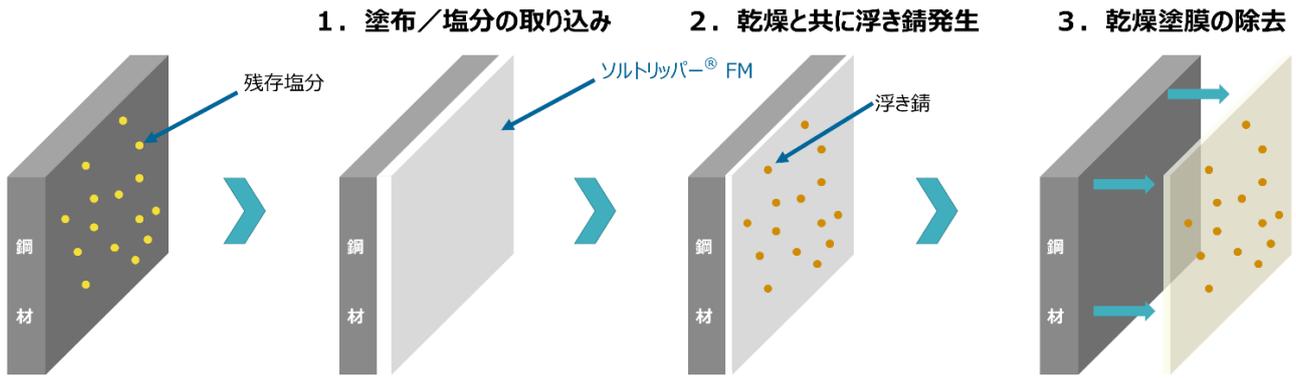
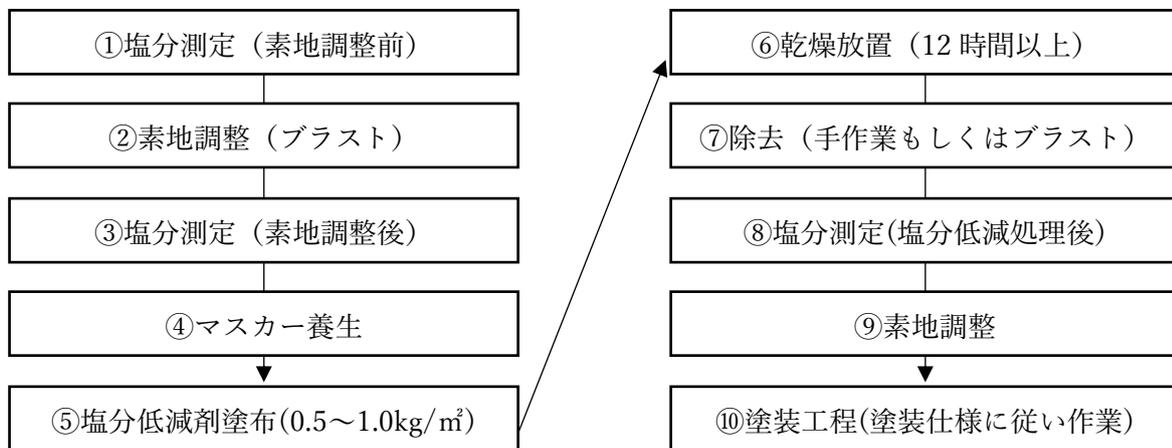


図 1 塩分低減剤のメカニズムのイメージ

2. 2 塩分低減剤の施工手順例

塩分低減剤を用いた塩分処理の施工手順例を表 1 に示す。

表 1 施工手順例のフローチャート



3. 塩分腐食試験片における塩分の低減性評価や塗装した塗膜への影響評価

腐食鋼板は、JIS G 3101「一般構造用圧延鋼材」に規定された熱間圧延鋼板（70×150×3.2mm、ブラスト処理済）に対して、JIS K 5600-7-1「塗料一般試験方法-第7部：塗膜の長期耐久性-第1節：耐中性塩水噴霧性」に規定された連続中性塩水噴霧条件によって腐食させたものとした。塩水濃度は1%とし、噴霧時間は約500時間とした。腐食鋼板の外観を写真1に示す。

3. 1 腐食鋼板の素地調整

腐食鋼板へのブラストは、塗替え工事で一般的に採用される乾式ブラストとし、ブラスト後の塩分低減手法は水洗または塩分低減剤の塗布とした。また、いずれも仕上げのブラストを最後に実施した。また、塩分低減剤は造膜後に手で剥離できる程度の強度を有する特徴を持つことから、塩分低減剤の剥離の有無を条件に加えた（写真2）。このように設定した4通りの条件を以下に述べる。なお、各条件の繰返し数は3とした。



写真 1 腐食鋼板の状態

- ・条件 A：乾式ブラストのみ
- ・条件 B：乾式ブラスト+水洗+乾式ブラスト（仕上げ）
- ・条件 C：乾式ブラスト+塩分低減剤塗布+剥離作業+乾式ブラスト（仕上げ）
- ・条件 D：乾式ブラスト+塩分低減剤塗布+乾式ブラスト（仕上げ）



写真 2 塩分低減剤の剥離状況

ブラストに際し、研削材にはフェロニッケルスラグ系研削材を用いた。吐出圧は 0.7MPa とし、目標とする除せい度は ISO 8501-1 に規定される Sa 3 とした。塩分低減剤の塗布には、エアレススプレーに近い塗装方式の専用ガンを用いた（写真 3）。塗布量の目標値は 1000g/m² とした。剥離作業は、塗布してから約 24 時間後に実施した。水洗については、塩分低減剤の塗布に使用した専用ガンにイオン交換水を入れて、吐出量が 7000ml/m² となるように水を散布することで水洗を実施した（写真 4）。



写真 3 塩分低減剤の塗布状況



写真 4 水洗状況

3. 2 塩分低減剤の性能評価

塩分低減剤は鋼板表面に残留する塩分を吸着する性能を有することから、素地調整後の鋼板表面に残留する塩分量から塩分低減剤の性能を評価する。また、塩分低減剤を適用した際の塗装への影響程度も塩分低減剤の性能を図る上で重要であることから、3.1 で述べた各種の素地調整手法を適用した腐食鋼板に対して塗装を施し、塗膜の促進劣化試験として一般的に用いられる耐湿試験を実施した。

3. 2. 1 塩分測定

鋼材表面に残留する塩分には水との接触で容易に抽出できる塩分（以下、表面塩分とする）と、長時間水と接触しても抽出が困難な塩分（以下、内在塩分とする）が存在する²⁾。そこで、素地調整前後の鋼板表面における表面塩分量と内在塩分量から塩分低減剤の性能を評価した。表面塩分の測定には、汎用の測定機器であるポータブルタイプの表面塩分計を用いた。測定の際、鋼板表面に作用させるイオン交換水の容量は 10ml とし、攪拌時間は 60 秒間とした。内在塩分の測定²⁾は、表面塩分の測定後、鋼板表面を水洗

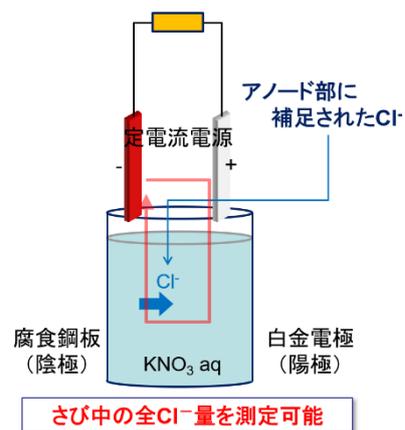


図 2 内在塩分の測定概要

した後に実施した。測定では、鋼板を 0.1mol/L 硝酸カリウム水溶液 1000ml に浸漬し、白金電極を正極、鋼板を負極として 1.0A の定電流を約 60 分間印加することで、内在塩分を溶出させた (図 2)。表面塩分量と内在塩分量の算出にあたっては、イオンクロマトグラフィーによって溶液中の塩化物イオン (Cl⁻) 濃度を測定し、単位面積あたりの塩化ナトリウム量 (mgNaCl/m²、以下 mg/m² とする) に換算した。なお、素地調整前の腐食鋼板の表面塩分量は約 130mg/m²、内在塩分量は約 4200mg/m² であった。

3. 2. 2 塗膜の耐久性評価 (耐湿試験)

各条件で処理した腐食鋼板に表 2 に記載する塗装を施した後、耐湿試験を行うことで塩分低減剤の塗膜への影響を評価した。

- ・ 塗装条件①：道路橋の塗装系 (Rc-I 塗装系)
- ・ 塗装条件②：鉄道橋の塗装系 (塗装系 J)
- ・ 塗装条件③：厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料 (塗装系 J の 2~3 層目に該当する塗料)
- ・ 塗装条件④：弱溶剤形有機ジンクリッチペイント (Rc-I 塗装系の 1 層目に該当する塗料)

条件①の Rc-I 塗装系とは、鋼・道路橋防食便覧³⁾に規定された塗装仕様である。また、条件②の塗装系 J とは鋼構造物塗装設計施工指針⁴⁾に規定された塗装仕様である。各塗装系ともブラスト工法を適用した場合に適用されることから本試験で採用した。各塗装系の塗装工程を表 2 に示す。

また、各塗装系は非常に高い耐久性を有しており、塗膜の変状程度から塩分低減剤の性能を評価するには長期間を要する可能性がある。このため、比較として 1 層塗りの仕様も採用した。使用した塗料は、塗装系 J の 2~3 層目に用いた厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料 (条件③) と、Rc-I 塗装系の 1 層目に使用される弱溶剤形有機ジンクリッチペイント (条件④) とした。いずれの塗料においても塗装方法はエアスプレーとし、塗料の希釈率はメーカー指定のものとした。また、各塗料の塗装間隔は 1 日とした。

表 2 Rc-I 塗装系と塗装系 J の塗装工程

工程	Rc-I 塗装系		塗装系 J	
	塗料名	使用量 (g/m ²)	塗料名	使用量 (g/m ²)
1 層目	弱溶剤形有機ジンクリッチペイント	600	厚膜型エポキシ樹脂ジンクリッチペイント	700
2 層目	弱溶剤形変性エポキシ樹脂塗料下塗	240	厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料	300
3 層目	弱溶剤形変性エポキシ樹脂塗料下塗	240	厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料	300
4 層目	弱溶剤形ふっ素樹脂塗料用中塗	170	ポリウレタン樹脂塗料用中塗	160
5 層目	弱溶剤形ふっ素樹脂塗料上塗	140	ポリウレタン樹脂塗料用上塗	140

被塗面に塩分が存在する場合、浸透圧の作用によって大気中の水分が塗膜を通じて塗膜/被塗面の界面に到達し、比較的付着力の低い箇所で水膜を形成することで膨れなどの塗膜変状が発生することが知られている⁵⁾。このような塗膜変状の発生を促進させるには、電解質が含まれない水分を塗膜に対して供給することが望ましい。そこで、塗膜の付着性評価試験として一般的な試験方法である耐湿試験を実施した。

耐湿試験は、JIS K 5600-7-2 「塗料一般試験方法-第 7 部：塗膜の長期耐久性- 第 2 節：耐湿性 (連続結露法)」に準じて実施した。試験時間は 1500 時間とし、約 200~400 時間毎に試験体を回収し、膨れなどの塗膜変状の発生程度から塗膜の耐久性を評価した。なお、本試験では一般的な塗膜の付着性評価試験

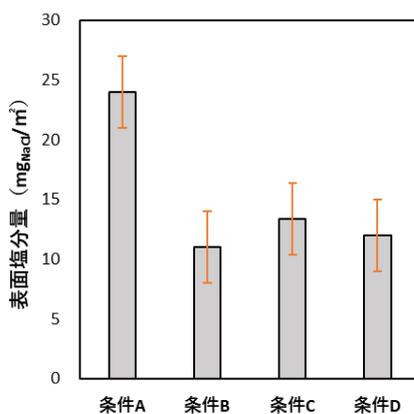
である基盤目試験やアドヒジョン試験を実施していない。これは、ブラスト後の鋼材表面に残留する研削材は外観上極めてわずかであり、両試験のように一定面積の塗膜特性を評価する方法では、試験結果に大きな差異を生じないと考えたためである。

3. 3 試験結果と考察

3. 3. 1 塩分測定について

表面塩分測定結果を図 3 に示す。条件 A の乾式ブラストのみでは $24\text{mg}/\text{m}^2$ であるのに対して、条件 B の水洗を追加した場合には $11\text{mg}/\text{m}^2$ 、条件 C、D の塩分低減剤を追加した場合には $12\sim 13\text{mg}/\text{m}^2$ となり、水洗または塩分低減剤を追加することで表面塩分量が低減する傾向にあった。

なお、塩分低減剤の剥離の有無による大きな影響は見られなかった。



注：n=3 の平均値であり、エラーバーは測定値の最大と最小と示す。

図 3 表面塩分量の測定結果

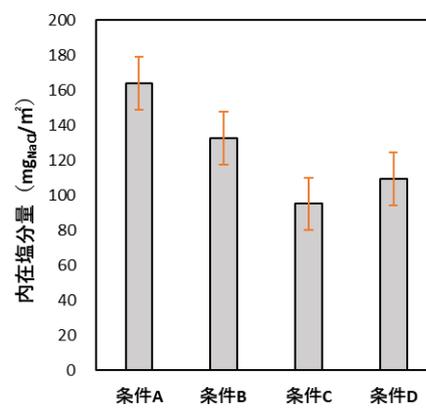


図 4 内在塩分量の測定結果

内在塩分測定結果を図 4 に示す。条件 A の乾式ブラストのみでは $164\text{mg}/\text{m}^2$ であるのに対して、条件 B の水洗を追加した場合には $156\text{mg}/\text{m}^2$ であり、水洗による大きな影響は見られなかった。これは、内在塩分が水を接触させても抽出困難であることを支持する結果である。一方、条件 C、D の塩分低減剤を追加した場合には $95\sim 106\text{mg}/\text{m}^2$ となり、表面塩分量のみならず内在塩分量も低減する傾向にあった。なお、条件 C の塩分低減剤を剥離して仕上げのブラストを実施した場合には $95\text{mg}/\text{m}^2$ 、条件 D の塩分低減剤を剥離せずに仕上げのブラストを実施した場合には $109\text{mg}/\text{m}^2$ となり、塩分低減剤を剥離してから仕上げのブラストを実施する方が内在塩分量を低減できる傾向にあった。塩分低減剤の主成分は水であるため、塩分低減剤を塗布すると鋼板表面には水が接触した状態となる。塩分低減剤が造膜するには約 1 日を要したことから、水の接触状態は長時間続いたと推定される。これにより、ブラストした鋼材の表面に残留する表面塩分量、一部の内在塩分が塩分低減剤の被膜へ移行したと推定される。

3. 3. 2 塗膜の耐久性評価について

塗装条件④（弱溶剤形有機ジンクリッチペイント 1 層のみ）の試験体では、塗料中の亜鉛粒子の腐食に起因する白さびが耐湿試験の経過とともに点状に発生し、それ以外の塗装条件①～③の試験体では塗膜の膨れが発生した。そこで、JIS K 5600-8-2「塗料一般試験方法—第 8 部：塗膜劣化の評価—第 2 節：膨れの等級」に準じて、発生した白さびおよび膨れの大きさと密度を 2～5 の 4 段階で区分した。なお、

数字が大きいほど膨れは大きく、密度も大きくなる。この考え方に基づき、耐湿試験の経過時間に対する各試験体の塗膜変状程度を整理した結果を表 3 に示す。

表 3 耐湿試験の経過時間に対する各試験体の塗膜変状程度

素地調整条件		試験時間 (h)	塗装条件①	塗装条件②	塗装条件③	塗装条件④
記号	概要					
—	浮きさび除去	0	—	—	—	—
		260	S2 D2	S5 D2	S3 D2	S5 D2
		480	S2 D3	S5 D2	S3 D3	S5 D3
		840	S3 D2	S5 D2	S3 D3	S5 D4
		1150	S3 D3	S5 D3	S3 D3	S5 D5
		1500	S4 D3	S5 D3	S3 D3	S5 D5
A	乾式ブラストのみ	0	—	—	—	—
		260	—	—	—	S2 D3
		480	—	—	—	S2 D4
		840	—	—	—	S2 D4
		1150	S2 D2	—	—	S3 D5
		1500	S2 D4	—	—	S3 D5
B	乾式ブラスト+水洗+ 乾式ブラスト (仕上げ)	0	—	—	—	—
		260	—	—	—	—
		480	—	—	—	S2 D3
		840	—	—	—	S2 D4
		1150	—	—	—	S2 D4
		1500	S2 D3	—	—	S3 D4
C	乾式ブラスト+塩分低減剤塗布+ 剥離作業+乾式ブラスト (仕上げ)	0	—	—	—	—
		260	—	—	—	—
		480	—	—	—	S2 D3
		840	—	—	—	S2 D4
		1150	—	—	—	S2 D5
		1500	S2 D2	—	—	S2 D5
D	乾式ブラスト+塩分低減剤塗布+ 乾式ブラスト (仕上げ)	0	—	—	—	—
		260	—	—	—	—
		480	—	—	—	S2 D3
		840	—	—	—	S2 D5
		1150	—	—	—	S2 D5
		1500	S2 D3	—	—	S2 D5

注 1：赤の網掛けは、機材の腐食が点状に確認されたことを示す。

注 2：赤文字は白さびの発生程度を評価し、黒文字は膨れの発生程度を評価したことを示す。各々の評価は JIS K 5600-8-2 に準拠し、S は大きさ、D は密度を示し、2～5 の 4 段階で区分している。

浮きさびのみを除去して塗装した場合、いずれの試験体でも膨れまたは白さびが発生し、1 層塗りの試験体である塗装条件③、④については基材のさびも点状に発生した。塗装系を施した塗装条件①、②でも膨れが顕著に発生し、1500 時間経過時点で膨れの大きさは塗装条件①で 4、塗装条件②で 5 に達した。ブラスト等を適用した試験体については、塗装条件②と塗装条件③の試験体では膨れやさびの発生は確認されず、塗膜の耐久性に大きな違いはなく、塩分低減剤は適用した塗装系に対して悪影響を及ぼしていないことを確認した。その一方で、塗装条件①の試験体では膨れが発生し、塗装条件④の試験体では白さびが発生した。そこで、塗装条件①および④の試験体の塗膜耐久性について、以下に考察する。

(1) 塗装条件① (Rc-I 塗装系) の試験体の塗膜耐久性について

耐湿試験の経過とともに生じた膨れの大きさはいずれも 2 であった。1500 時間経過時点では、ブラストのみを実施した条件で最も膨れの密度が大きくなり、塩分低減剤を剥離して適用した条件では最も密度が小さくなった。

(2) 塗装条件④ (弱溶剤形有機ジンクリッチペイント 1 層のみ) の試験体の塗膜耐久性について

耐湿試験の経過とともに生じた白さびの大きさは、ブラストのみを実施した条件と水洗を追加した条

件で大きさが 2 から 3 へ拡大する一方で、塩分低減剤を追加した場合に白さびの大きさが 2 のままで拡大しない傾向にあった。また、塩分低減剤を追加した場合には白さびの密度が比較的大きくなり、1500 時間経過時点では密度が 5 に達した (図 5)。このような現象が起きた要因の一つに、塩分低減剤の適用によって塩分の分布状態が変化したことが挙げられる。亜鉛粒子の腐食は塩分によって促進されることが経験的に知られており、鋼材表面に水が長時間接触することで局所的に分布していた塩分が散在することで、発生する白さびの大きさや密度が変化すると推定される。なお、(1) で述べたように塩分低減剤を適用した条件は塗装系の耐久性向上に寄与する可能性があることが示されたことから、鋼板表面に残留する塩分を散在させることで、塗装系の耐久性向上に寄与したことが推定される。

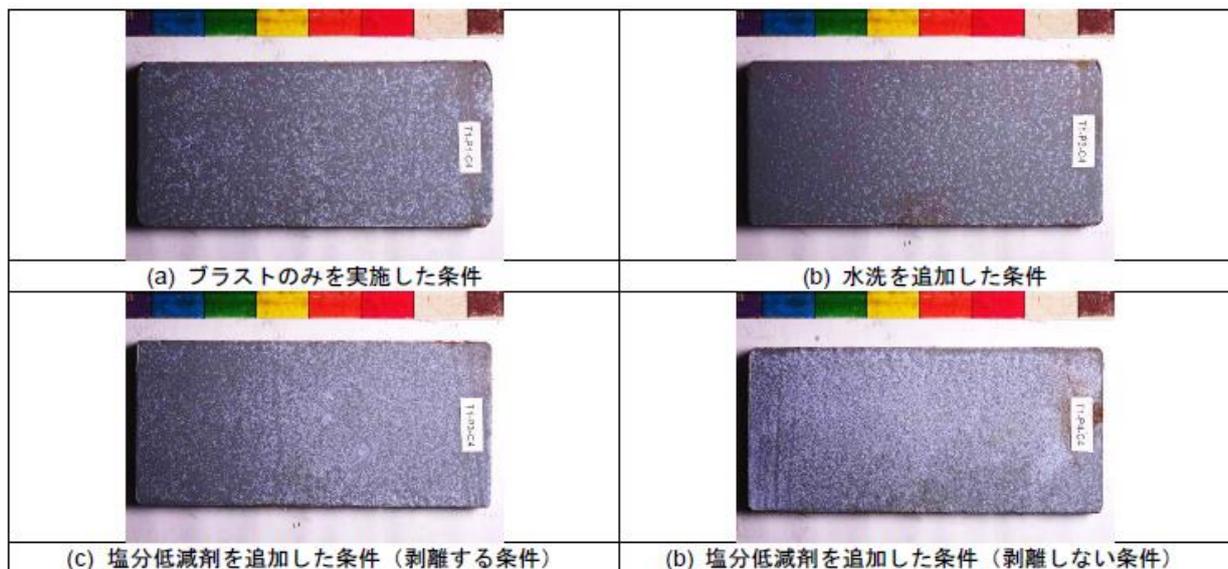


図 5 1500 時間経過時点の弱溶剤型有機ジンクリッチペイント 1 層のみの試験体の外観

4. 実現場における施工性評価

4. 1 試験環境

試験は太平洋側の海から、1 km 程の距離にある道路橋 A 橋で実施した。A 橋は、海からの飛来塩分および融雪剤の影響を受ける腐食環境に晒されており、下フランジの上下面等は著しい腐食状況となっていた。試験は、橋梁補修工事の水系塗膜剥離剤による塗膜除去工が終了した区画を一部ご提供頂き実施した。

4. 2 塩分低減剤の塗布条件

塩分低減剤は、ブラストによる素地調整後に塗布して効果を発揮する材料である。ただし、今回は試験的に、素地調整をせず塗膜やさびが残存した面およびブラスト面形成動力工具 (写真 5) によって素地調整した面の 2 パターンで検証を行った (図 6)。また施工箇所は WEB 面、下フランジ上面、下フランジ下面の 3 か所とし、塩分低減剤の塗布量は一律 $1000\text{g}/\text{m}^2$ とした。

また、塩分低減剤は造膜後に手で剥離できる程度の強度を有する特長を持つことから、24 時間程度乾燥させた後、手作業で塗膜を剥離した。当試験で設定した 6 通りの条件を表 4 に示す。



写真5 動力工具による素地調整状況



写真6 塩分測定状況

表 4 塗布条件

条件	試験箇所	素地調整の有無
A	WEB 面	なし
B	WEB 面	あり
C	下フランジ上面	なし
D	下フランジ上面	あり
E	下フランジ下面	なし
F	下フランジ下面	あり

4. 3 塩分低減剤の性能評価

塩分低減剤の処理前後の鋼材表面における表面塩分量から塩分低減剤の性能を評価した。表面塩分の測定には、汎用の測定器であるポータブルタイプの表面塩分計を用いた（写真 6）。測定の際、鋼材表面に作用させるイオン交換水の容量は 10ml とし、攪拌時間は 60 秒間とした。表面塩分量の算出にあたっては、回収した表面塩分計の測定液の塩化物イオン (Cl⁻) 濃度をイオンクロマトグラフィーによって測定し、単位面積当りの塩化ナトリウム量 (mgNaCl/m²、以下 mg/m² とする) に換算した。

4. 4 試験結果と考察

表面塩分測定結果を図 6 に示す。剥離後の塗膜および処理後の鋼材面の状態を写真 7 に示す。

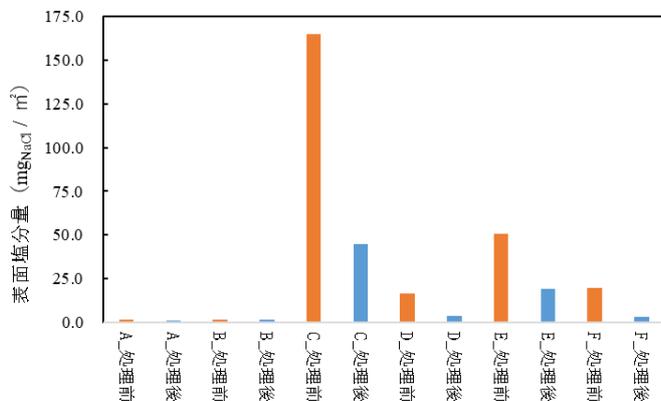


図 6 表面塩分測定結果



写真7 剥離後の塗膜および処理後の鋼材面

条件 A、B の WEB 面においては、処理前の塩分が低く塩分低減剤の効果を確認する事ができなかった。素地調整をしていない条件 C においては、処理前の塩分が高く（150mg/m²以上）なっていたが、処理後は 50mg/m²を下回る値になっていた。同じく素地調整をしていない条件 E においても、処理後は 20 mg/m²以下となった。素地調整を行った条件 D、F においても処理前の塩分量は高くはなかったが、処理後は 5mg/m²以下となった。

以上の結果から、塩分低減剤はさびの上からでも、塩分低減できることがわかった。ただし、さび面から塗膜を手剥がしする場合、素地調整面より剥離作業に負荷がかかる傾向にあった。また、塩分低減剤を塗布してから、乾燥するまでに塗膜上に浮きさびが生じる傾向があることがわかった（写真 7）。処理した鋼材面と剥離後の塗膜を見比べると、孔食によって凹凸のある個所で浮きさびが発生している傾向であった。

5. 今後の展望

今後の展望としては、実現場での検証をより深く行うことである。塩分低減剤の塗布量や、塩分低減剤の乾燥にかかる時間によって塩分低減効果にどのような差が生じるか、また、塩分低減剤は乾燥後に手で剥がせる塗膜を形成するが、ブラストなどの動力工具でも除去することが可能である。動力工具で塗膜除去を行えば、最終工程の素地調整まで一挙に作業が可能であるため効率の向上が期待される。ただし、こちらに関しても現場レベルでの検証に至っていない為、塗膜除去時のブラスト作業への負荷（作業時間、使用する研削材量および粉塵量の変動）について調査を進め、より良い形で発注者、施工者へ提案できるよう検証を進める。

6. おわりに

現状、鋼構造物における塩分処理に関連する報告はブラストや水洗に関してのものが多かった。今回の塩分低減剤の開発を機に、塩分処理における検討がより活発になることを期待している。

謝辞

塩分低減剤の性能評価のため、ご協力頂きました（公財）鉄道総合技術研究所様の関係者の方々へ厚く御礼申し上げます。

<参考文献>

- 1) 「ブラスト素地調整における残存塩分除去対策の事例紹介」、(一社)日本橋梁・鋼構造物塗装技術協会 第 19 回技術発表大会予稿集 (2016)
- 2) 田中誠：腐食鋼板の脱塩処理法の検討、材料と環境講演集、Vol. 2003、pp. 191-194、2003
- 3) (公社)日本道路協会：鋼道路橋防食便覧、2014
- 4) (公財)鉄道総合技術研究所：鋼構造物塗装設計施工指針、2013
- 5) 増子昇：塗膜下腐食の発生と進行、防食技術、Vol. 30、pp. 699-704、1981

