

「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」

中島和俊、落合盛人、五島孝行、安波博道

1. はじめに

膨大なストックの道路橋に対して予防的かつ計画的な維持管理を実施していくため、鋼橋の塗替えにおいては耐久性に優れた重防食系の塗装仕様 Rc-I が積極的に採用されるようになった¹⁾²⁾。ところが、腐食環境が厳しい海岸近くの橋梁において、塗替え後わずか数ヶ月でさびが表面化するという事例が報じられた。このような早期にさびが再発する原因の一つとして、ブラストによる素地調整面に残存する塩分が考えられる。この残存する塩分の除去は容易ではないが、有効な手段として素地調整面を水洗する方法が適用されてきた。しかし、橋梁の下方や周辺の利用条件、あるいは橋梁の構造形式や施工対象部位によっては水洗の適用が困難な場合も多い。

そのような状況の中、著者らは水洗の適用を回避したい塗替え工事において、水洗に依らずブラストのみで塩分除去を行う手法を検討する機会を得た。本稿では、ブラストの本施工のために実施した試験施工の方法や、本施工における残存塩分に対する品質管理方法の事例について紹介するものである。

2. Rc - I の早期さび再発

2. 1 Rc-I の品質管理

Rc-I は高価であり、LCC の観点から見て少なくとも 30 年間の塗装寿命を期待される塗装仕様である。その耐久性を確保するためには、素地調整の品質が重要であり、一般にブラストによる素地調整における素地面の品質管理項目として、著者らは表-1 を提案してきた。

ここで、除錆度ならびに表面粗さの管理目標値は、鋼道路橋防食便覧³⁾（以下便覧と称する）においても同値が管理値として示され、それぞれ標準写真や粗さ見本板と素地面を目視により直接対比し合否を判断することとなっている。また、表面付着粉塵は、破碎した塗膜かすや錆が塵埃となって堆積していないことをセロテープの付着により確認する試験であり、便覧には特別な記述はないが一般的に必要な品質であると考えられるため管理項目とした。残存塩分量は、便覧の塗装編において塗替え塗装時に旧塗膜上面に付着した塩分量を 50mg/m²以下になるまで除去する必要があるとされているが、素地調整面における残存塩分量は定められていない。一方、耐候性鋼材編においては、素地調整後の残存塩分量が 50mg/m²以下となっていることを確認することを推奨している。このため、塩害による異常腐食が生じた場合には、塗装橋であっても同等の付着塩分量により管理する必要があると判断した。

表-1 素地面の品質管理項目と目標値

項目	規格	管理目標値
除錆度	JIS Z 0313:2004 (ISO 8501-1:2007)	Sa2 1/2 以上
表面粗さ	JIS B 0601:2001	80 μ mRz 以下
表面付着粉塵	JIS Z 0313:2004	塗膜かすやサビ、 塵埃などが付着 していないこと
残存塩分量	JIS Z 0313:2004	50mg/m ² 以下

2. 2 早期さび再発の事例

重防食系の Rc-I 塗装系によって塗替えられたにも拘らず、早期にさびが再発した事例を以下に示す。

(1) SO 橋、SM 橋

SO 橋、SM 橋は四国の室戸岬の周囲を通る国道 55 号線に架かる橋梁で、太平洋からの飛来塩分を直接受ける腐食環境が厳しい場所に立地している（写真-1）。いずれも鋼桁橋であり、平成 22 年度に Rc-I 塗装系による塗替え塗装が行われた。施工計画書には品質管理の項目や方法について明確に記載されていないが、施工記録によると、素地調整に関しては監督員が全数検査を行っていることが報告されていた。特に SO 橋では素地調整前に荒ケレンやフランジエッジ部の R 加工、素地調整後の清掃などが実施され、一般的には適切な施工品質が確保されていたと評価出来る施工であったが、1 年余りで腐食が再発した。SO 橋の施工前の状況を写真-2 に、SO 橋、SM 橋の施工後の状況を写真-3、4 に示す。



写真-1 SO 橋 架橋環境



写真-2 SO 橋 施工前



写真-3 SO 橋 施工後 1 年 2 ヶ月



写真-4 SM 橋 施工後 1 年 4 ヶ月

(2) CS 橋

CS 橋は千葉県外房の海岸線に沿って走る国道 128 号線に架かる橋梁で、太平洋からの飛来塩分を直接受ける腐食環境が厳しい場所に立地している。本橋は 12 径間の鋼桁橋からなり、平成 22 年度から複数期に分けて塗替え塗装が計画され、平成 22 年度には 2 径間を対象として Rc-I 塗装系による塗替え塗装が行われた。施工時には前述の品質管理項目の内、除錆度、表面粗さ、表面付着粉塵を管理していた。この結果、施工から約 3 ヶ月が経過した時点で元々腐食していた部分にさびが再発した。橋梁の架橋地点の状況を写真-5 に、塗替え塗装前ならびに塗替え塗装後 3 ヶ月を経過した時点の状況を写真-6、写真-7 に示す。



写真-5 CS 橋架橋環境



写真-6 施工前



写真-7 施工後 3 ヶ月

(3) 早期さび再発の原因考察

これらの橋が共通する点は、海岸に至近であること、部材エッジ部を中心に著しい腐食損傷が生じていたこと、前述の素地調整における品質管理項目の内、残存塩分に関する管理を行っていなかったことである。

なお、CS 橋では、上記のように早期の錆再発が見られたことから、残留塩分の除去に関する施工試験を追加で行い、早期さび再発を防止するための措置としてブラストと水洗の組合せた図-1 に示す施工要領を採用し、2 期以降の施工に取り入れている。本要領採用の結果、施工から 2 年が経過した時点でフランジのエッジ部の一部（クランプ部）において僅かにさびが再発したものの、全体としては健全な状態が維持できている。ただし、反省点として、大掛かりな水洗を採り入れることは水処理の手間と工期がかかること、および、クランプ部の適切な処理が必要であることがわかった。

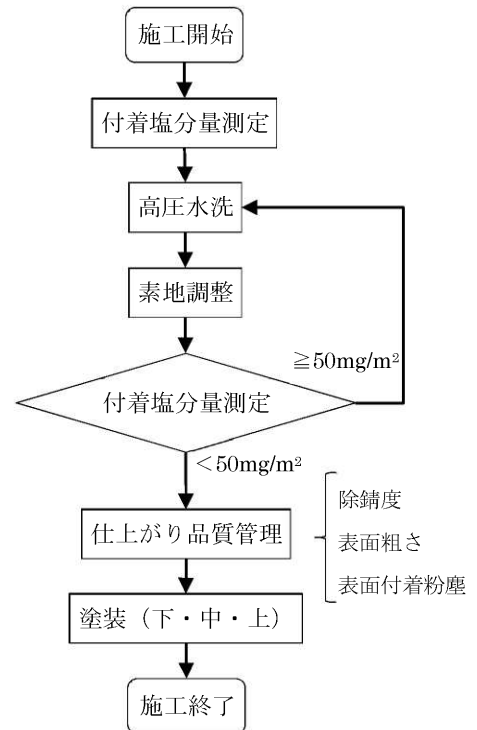


図-1 施工フロー

3. FS 橋における残存塩分除去対策

3. 1 経緯

(1) 橋梁概要

FS 橋は福岡県の玄界灘沿岸、国道 495 号に架かる 3 径間連続の鉸桁橋である。土研式タンク法により橋梁上で計測した 1 年間の飛来塩分量は平均 0.669mdd であり、非常に厳しい飛来塩分環境であった。本橋は 1967 年の竣工からこれまでに数度にわたる塗替えが行われ、直近では 2006 年に Rc-III 塗装系により塗替えられていた。しかし、2006 年の塗替え直後から点さびが現れ始め、約 3 年が経過した時点において全長にわたり主桁や横構、対傾構に著しい腐食損傷が発生した（写真-8）。そのため、平成 26 年度に橋梁全体を対象に Rc-I 塗装系による塗替えを行うこととなった。品質管理項目は、これまでの経緯と本橋の環境を踏まえ、除錆度、表面粗さ、表面付着粉塵に加えて、素地面の残留塩分を管理することとした。



写真-8 塗替え後 3 年経過時点

(Rc-III 塗装系)

(2) 高圧水洗の回避と残留塩分量の許容値

FS 橋の施工にあたっては、施工初期に電動工具による浮きさびの除去の後、橋梁全体に対して高圧水

洗を行ったが、以降の施工においては付着塩分の除去に水洗は行わないこと前提条件とした。これは、塗替え時期が冬場にかかり、鋼部材表面を短時間で乾燥させることが困難であると判断したためである。

ここで、FS 橋のように塩分によって腐食損傷が促進された場合、一般的なブラスト施工では $50\text{mg}/\text{m}^2$ 以下を確保することが困難であることが知られている。過去にはその対策としてブラスト施工面を高圧水等で洗浄する等が行われているが、本橋では高圧水洗を用いないため、その代案としてブラスト施工を入念に行うことを選択した。一方、素地調整面の残存塩分の許容値については、既往の研究報告³⁾によると、室内試験の結果から塗膜劣化抑止に対する許容値を $200\text{mg}/\text{m}^2$ とすればよいと報じられていることから、本橋では $50\text{mg}/\text{m}^2$ の確保が難しいようであれば、 $200\text{mg}/\text{m}^2$ とすることも念頭に置くこととした。

(3) クランプ跡の処理

3. 2 施工試験

ブラストの実際の施工に入る直前に、実際の施工と同一機材を用いて素地調整作業を行い、付着塩分の除去に関する検討を行った。施工試験の対象は中程度の腐食損傷を示すエリアを選定し、主桁の下フランジとウェブ下端の立上がり、桁の長さ 9m の範囲とした。施工面積は 5.8m^2 である。

まず 1 回目のブラスト施工として、対象部位の除錆度が所定値 (ISO Sa 2 1/2) となるよう仕上げた。施工時間は 1.5 時間を要した。その後、同じ試験対象部位に対して 1.0 時間ずつの 3 回のブラスト施工を行い、各施工回数ごとに主桁下フランジ下面の鋼材素地面に残留する付着塩分量を電導度法により 5 箇所ずつ計測した。各施工回数ごとの計測結果を図-2 に示す。

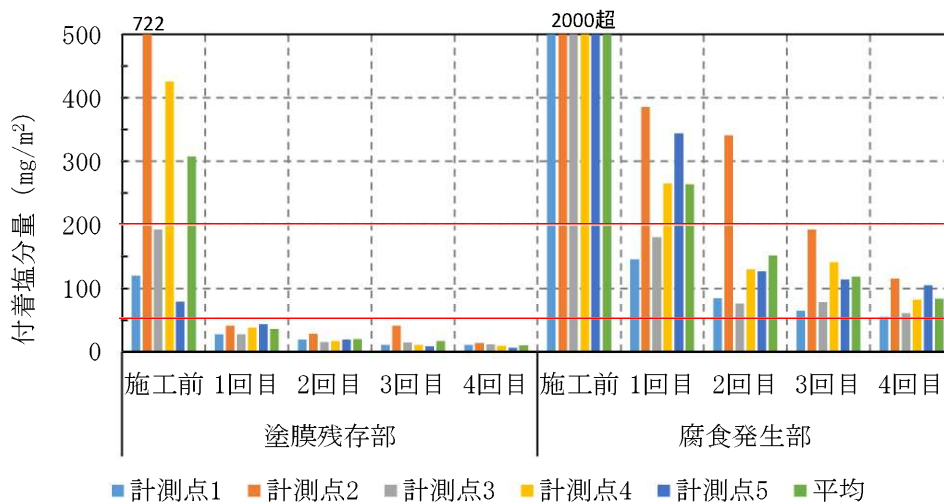


図-2 ブラスト施工による付着塩分量の推移

塗膜残存部は、施工前に平均で $300\text{mg}/\text{m}^2$ であったものが、1 回目の施工で全て目標上限値の $50\text{mg}/\text{m}^2$ を下回った。一方、腐食発生部については、施工前には $2,000\text{mg}/\text{m}^2$ を超え、1 回目の施工により錆とともに塩分も一気に減少したが、平均で $260\text{mg}/\text{m}^2$ は残存することとなった。その後も回数を重ねるごとに徐々に減少したが、4 回目の施工後においても $50\text{mg}/\text{m}^2$ を下回るものはなかった。しかし、3 回目では 5 箇所すべてが $200\text{mg}/\text{m}^2$ 以下となる結果が得られ、4 回目では平均で $84\text{mg}/\text{m}^2$ となった。この結果から、ブラストを入念に行えば $200\text{mg}/\text{m}^2$ 以下は安定して確保できるところ、ブラスト施工の施工回数を重ねても塩分量低減の効果が薄れ、また工期や施工コストを考慮すると 4 回程度が限度であること、さらに既往の研究報告を考慮し、本工事における素地面の残留塩分量の管理目標として、塗膜残存部は $50\text{mg}/\text{m}^2$ 、腐食部については $200\text{mg}/\text{m}^2$ とした。本来、腐食発生部の要求性能としては塗膜残存部と同

等、あるいはより厳しくすべきであるが、現時点ではやむを得ないと考えている。この管理値を採用するにあたって、妥当性検証のため、ブラストとウェス水拭きにより残留塩分量を $50\text{mg}/\text{m}^2$ 以下とした施工部を設け、経過観察を行っている。

3. 3 実施工とその後の経過

(1) ブラスト施工と品質管理

実施工にあたっては、ブラストの施工回数や時間を規定するのではなく、素地調整の仕上がり状態における検査によって品質管理を行うこととした。検査の対象は施工範囲全面を基本としており、ブラスト施工日に毎回行うものとした。検査対象については、主桁、下横構、対傾構の腐食損傷部において任意に 5 箇所を選定し、すべての付着塩分量の計測値が $200\text{mg}/\text{m}^2$ 以下であれば合格とした。一方、1 箇所でも $200\text{mg}/\text{m}^2$ を超える場合は不合格とし、当日の施工範囲はすべて再度ブラスト施工を行い、再検査することとした。

上記要領にて実施工の品質管理を行った結果、初動時の試行以降は全数検査ですべて合格であった。立会検査を行った 21 日分の付着塩分量データのヒストグラムを図-3 に示す。最大値 $183\text{mg}/\text{m}^2$ 、平均値 $110\text{mg}/\text{m}^2$ であった。

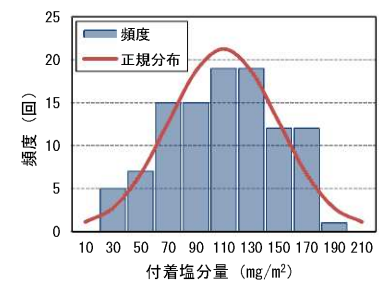


図-3 残留した付着塩分量の頻度

このような付着塩分除去を行った結果、FS 橋全体のブラスト施工の実績については次の通りであった。全施工面積 $1,016\text{m}^2$ に対し、ブラスト実働日数は 44 日、研削材使用量 68ton であり、施工能率の単純平均値として $23\text{m}^2/\text{日}$ 、単位面積あたりの研削材使用量は $67\text{kg}/\text{m}^2$ と計算される。これは、オープンブラストの標準的な施工能率²⁾ ($60\text{m}^2/\text{日}$)、研削材使用量 ($40\text{kg}/\text{m}^2$) に比べ、約 2.6 倍の施工日数を要し、約 1.7 倍の研削材を使用したこととなる。



写真-9 足場クランプ部

(2) クランプ部の処理

本橋の塗装足場は、一般的なパイプ吊り足場が採用された。吊り足場は足場荷重を橋体で支持するため、主桁下フランジに吊りチェーン金具（クランプ）が取り付けられる。このクランプが取り付けられた部分（クランプ部と呼ぶ）は、クランプを外さない限り塗装ができないため、一般的には足場を解体する時点でクランプ部は局部的にタッチアップにて補修される。しかし、本橋ではクランプ部にも著しい腐食損傷が生じている（写真-9）ことから、これまでの方法では早期さび再発の起点になることが容易に想像された。そこで、本橋では塗装工程の途中でクランプを盛替え、写真-10 に示す小型ブラスト機により素地調整を行い、クランプ部に対しても他の一般部と同等の耐久性を確保する施工を行った。



写真-10 小型ブラスト

(3) 施工後の状況

塗替え塗装の施工から約 8 ヶ月が経過した時点において、経過観察を行った。目視により変状の有無を確認したところ、部材のエッジ部の面取り R 加工を行わなかった横構のごく一部で点錆が見られ



写真-11 モニタリングポイント外観
(施工後 8 ヶ月)

たが、主桁を含めて全体的に良好な外観を呈していた。主桁の一部では、素地調整後の残留塩分量を 50mg/m^2 以下に管理した部位を設けモニタリングポイントとしたが、経過観察時点では、その他の部位との差はみられていない（写真-11）。また、クランプ部は橋梁全体で約 540 箇所あったが、経過観察時点ではそのうち 3~4 箇所に点錆が見られた程度の変状に留まっていた。

4. AC橋における残存塩分除去対策

4. 1 経緯

AC 橋は青森県が管理する耐候性材を使用した 4 径間連続鋼床版箱桁橋である。路面上の排水柵が箱桁直上に位置し、排水管が箱桁を貫通する構造であった。1986 年の建設から 25 年が経過した 2011 年に箱桁内部を調査したところ、箱桁内部の排水柵や排水管の継ぎ手部から漏水が見られ、箱桁内部に著しい腐食が発生していた（写真-12）。東北地方の鋼床版橋であるため、凍結防止剤が多量に使用され、箱桁内部も高濃度の付着塩分が検出された。塗膜欠陥が生じやすい溶接部を中心に著しい腐食が生じ、最大数 mm のオーダーでの断面欠損が生じていた。



写真-12 箱桁内部の腐食

4. 2 施工試験

AC 橋のように橋長の長い箱桁では水洗による排水処理が困難であることから、水を使わずに付着塩分を除去する手法として、機械工具による 2 種ケレン（青森県の標準仕様）とバキュームブラストの 2 つの素地調整方法を用いた試験施工を行った。代表的な腐食損傷を示す部位を対象に、所定の除錆度に達した時点を 1 回目の施工とし、残留塩分量を計測した（図-4）。1 種ケレンでは 1 回目の施工（写真-13）で概ね 50mg/m^2 の付着塩分量に低下する結果を得た。一方、2 種ケレンでは、1 回目の施工でほとんどのさびが除去されたものの、さび内部に侵入していた塩分が表出したことにより、場所によってはケレン前よりも高い付着塩分量が検出される結果となった。2 回目（写真-14）は凹部を選択的に施工したが、依然として $100\sim 200\text{mg/m}^2$ 程度残存していた。3 回目は現実的な施工ではないが、グラインダによって凹部のさびとともに周辺鋼材を切削する施工を行い、 50mg/m^2 程度の付着塩分に低下することを確認した。

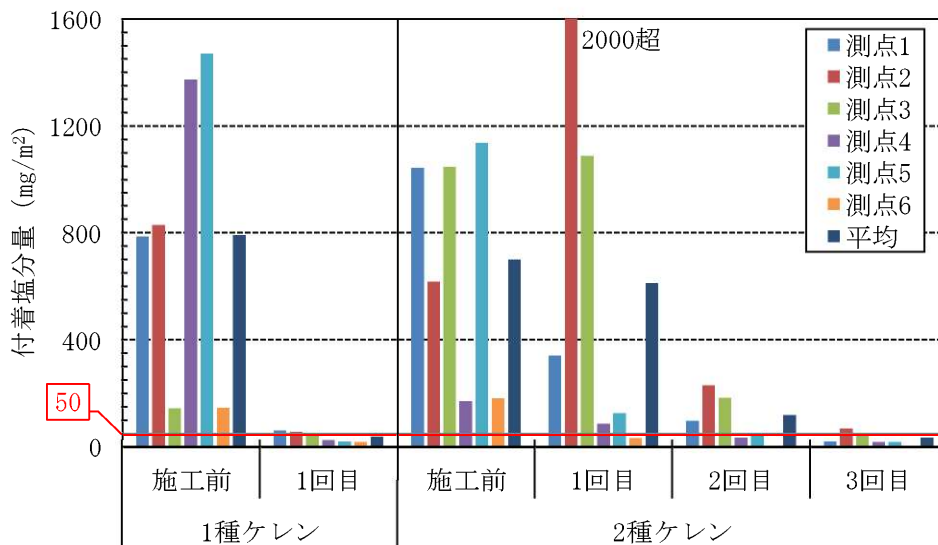


図-4 素地調整種別の施工回数毎の残留塩分量



写真-13 1種ケレンの仕上がり状態 (1回目)



写真-14 2種ケレンの仕上がり状態 (2回目)

今回のバキュームブラストによる試験施工では、継ぎ手部を含めた施工時間は 7.60m²/日程度となり、オープンプラストの標準的な施工能率 (60m²/日) に比べて施工能率が大幅に劣る結果となった。一方、同一の環境での直接比較ではないものの、前述の FS 橋でのオープンプラストによる塩分除去効果の試験結果に比べ、バキュームブラストによる塩分除去は高い効率を示した。これはバキュームブラストの研削材投射角度が素地に対してほぼ直角であるのに対し、オープンプラストでは研削材の跳ね返りを躲かすために、60~70 度程度の投射角を有することによるものと推察される。

4. 3 実施工

平成 26 年度には箱桁内部の塗替え塗装の実施工が行われた。塗替え範囲は下フランジ上面やウェブの立上り 20cm 等の腐食損傷が生じた限定的な範囲に留めた。塗替え塗装仕様は便覧に示される Rd-III の素地調整を 1 種ケレンに変更した塗装系 (仮に Rd-I と呼称, 表-2) を用いた。箱桁内での塗替え塗装となるため、ブラストによる素地調整を行っているが、有機溶剤を用いるジンクリッチペイントは使用していない。施工状況並びに完成状況を写真-15、写真-16 に示す。

表-1 Rd-I 塗装系 (1種ケレン, ジンクなし)

塗装工程	塗料名	使用量(g/m ²)	塗装間隔
素地調整	1 種		4 時間以内
第 1 層	無溶剤形変性エポキシ樹脂塗料	300	
第 2 層	無溶剤形変性エポキシ樹脂塗料	300	2 日~10 日



写真-15 ブラスト施工状況



写真-16 塗装完了

5. まとめ

本稿では著者らが関与した案件について、30年間の期待に応える技術であるかの見極めを行うためには経過観察が必要であるものの、早期さび再発を防止するための付着塩分除去の事例について紹介した。一連の施工実績から得られた知見と今後の課題について以下に列記する。

<得られた知見>

- ① ブラストによる鋼材素地面の付着塩分量を制御することが塗替え後の耐久性向上に効果がある。
- ② 腐食損傷が生じた橋梁の塗替えにおいては腐食発生部の塩分除去を入念に行うことが肝要であり、付着塩分量の品質管理にあたっては、腐食発生部に着目した管理を行う必要がある。
- ③ 腐食発生部における付着塩分の除去方法として、ブラスト施工と水洗の組合せにより50mg/m²は実現できるが、一般的な乾式ブラストのみでは100~150mg/m²が限界である。なお、バキュームブラストを用いれば効率的に50mg/m²を達成できる可能性がある。
- ④ いずれにしても塩分除去には手間がかかる。品質管理目標を具体化し、目標達成に必要な工種と工数を積算に採り入れる必要がある。
- ⑤ 1例ではあるが、足場クランプの処理方法についての成功事例が得られた。

また、より効率的な技術を創出するためには更なる検討が必要であり、以下に今後の技術課題をあげる。

<今後の課題>

- ① 付着塩分量の許容限界の究明。
- ② 塩分除去に必要な手間を積算に上げる。
- ③ バキュームブラストの効果を確認する。
- ④ 足場クランプの盛替えを標準化する。

<参考文献>

- 1) 鋼道路橋防食便覧：日本道路協会，2014.3
- 2) 鋼道路橋塗装・防食便覧資料集：日本道路協会，2010.9
- 3) 鋼橋等の塗替え塗装における素地調整の研究：石松豊，土木技術資料 49-6，2007.6