

消雪用水を利用した橋梁洗浄の研究

梶村周平・宮本重信

福井平野の多くの橋には、冬の北風で飛来した海塩粒子が付着し、桁の下フランジが錆びての層状剥離、支承装置の機能低下を招き、多額の修繕費を要するに至っている。米国の事例や本県の新保橋でも雨かかりは全く腐食していないことから、福井県管理のほとんどの橋に設置されている消雪用装置からの井戸水の利用と専用散水装置の製作で桁洗浄を安価に実現し、維持管理費の縮減を目指す。その費用対効果を代替案と比較して明らかにする。

キーワード：腐食、飛来塩分、橋梁、洗浄、錆

1. はじめに

日本海側では、冬の季節風によって飛来する海塩粒子が鋼橋に付着し、腐食が促進されている。福井県九頭竜川河口の塗り替え後12年の新保橋では、桁のフランジ下面で層状剥離の錆が発生している（写真—1）。しかし、雨がかかるトラス部は錆が見られない（写真—2）。このように雨による洗浄が防錆に非常に効果を発揮している事例からも、橋梁の洗浄が極めて効果的なことが類推される。既に米国では、腐食対策として洗浄がなされ、効果が得られている¹⁾。このようなことから洗浄の防錆効果は明らかであるが、様々な洗浄方法に対しての費用対効果について実際に検証しようとする年数を要するなどなされていない。

筆者らは、洗浄装置を製作し、福井県管理のほとんどの橋に設置されている消雪装置からの井戸水を用いて2008年から2010年の春に河口から4.5 kmに位置



写真—1 河口部の橋桁の腐食



写真—2 写真—1と同じ橋の雨かかりの部分

する三国大橋（鋼橋、橋長542 m）の洗浄を行った。そこでの洗浄と費用対効果を中心に述べる。

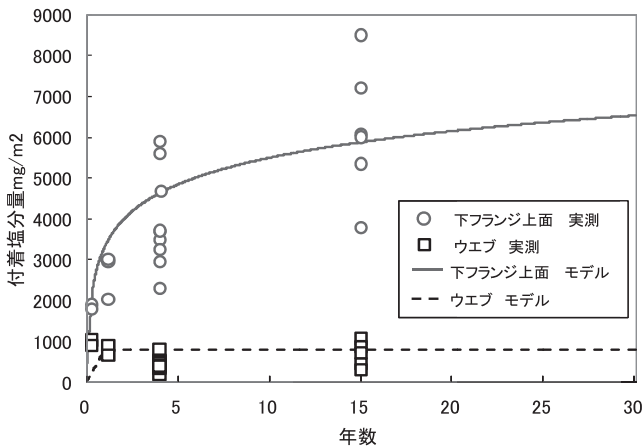
2. 対象橋の腐食の状況

洗浄の対象とした三国大橋で腐食の著しい箇所は、桁内側の主桁と横桁の下フランジ上下面、箱桁底天井、ボルトナットである（写真—3）。次に桁内側のウエブが著しい。桁外側の下フランジ上下面、ボルトナット、ウエブに飛来の塩分は降雨で洗浄され腐食は抑制されている。

この三国大橋では塗装の塗り替えを一度に行っていないので、桁内側の下フランジ上面、ウエブの付着塩分量を表面塩分計 SNA2000 で計測し、それを塗装後の年数経過を横軸に整理した（図—1）。図—1でウエブが1年で約 800 mg/m^2 で一定となるのは、冬期の塩分付着で臨界湿度が低下し頻繁に結露し、落水することで飛来塩分量とにバランスが生じることによる。そのウエブから流れた塩分は下フランジの上に



写真一三 ボルト，雨かきのない下フランジが錆びる（三国大橋）



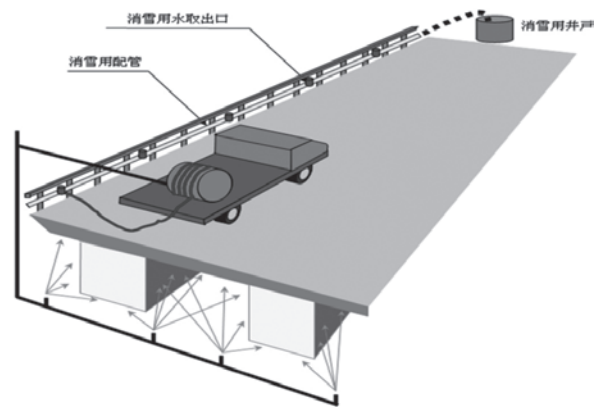
図一 ウェブと下フランジ上面の付着塩分量の変化

至り、元々上向きで多く蓄積した塩分量を更に増やす。塩分高濃度の下フランジ上面では頻りに結露し錆を促進し、その結露は端部より水滴となって落水する。ウェブに比べ蓄積量が多いので、この落水による塩分の減少とのバランスには年数を要し、平衡する付着塩分量も高い図一1のカーブとなっている。Uリブ下面でも結露が観測され、この水滴が乾燥するので付着塩分濃度はウェブに比べるとやや高い。しかし、蓄積しやすく貯留しやすい下フランジ上面に比べるとUリブは落水しやすいことから著しい腐食にはなっていない。

3. 洗浄の方法

福井の橋梁のほとんどには井戸水利用の消雪装置が設置されているので、橋脚毎のバルブからその地下水を得て洗浄した。図二に全体の概念を、写真四に今回開発の洗浄装置の稼働状況を示す。この地下水は塩水化が進行し、0.7%塩化ナトリウム水であった。

河川上の洗浄を考慮した洗浄機を製作した。この洗浄機をユニック車にて搬入し、橋面の1車線上で組み立てて、橋面車道を1橋脚（延長60m）走行し、その後1橋脚を後進し、再度前進して橋脚に至る。次に洗浄機は軸回転して橋脚を避けて次のスパンに至る。



図二 橋梁洗浄の概念図



写真四 橋梁洗浄の状況

ここで、1度後退させて再度洗浄するという合計3回の洗浄を行ったのは、(1)一度洗浄で塗らして時間を経過してからの方が最初の洗浄後にできる塩分濃度の高い滴を流すこと、(2)塗膜下の塩分が塗装表面に浮き上がり、それが再度の洗浄で流されることへの期待、(3)ノズルからの散水が水道管や電話線などの管路に当たりUリブに達しないことがあり、3回の洗浄によって走行線のずれで斑のない洗浄に寄与する、(4)ユニック車の走行を低速度で運転することは難しいことの4点の理由による。

この橋面洗浄は、通勤時間帯を避け朝9時から夕方4時半まで片側交互通行規制で行った。9時からの橋面路面上での洗浄機の組み立てに4時間を要し、実際の洗浄は4時30分まで実施し、その後組み立てた洗浄機の下側を外して陸上に下ろす。洗浄機の解体は下側を切り離して、片側交互通行規制時間を少なくした。翌日は、下側の組み立てが不要なので洗浄作業は約2時間後には開始できた。

なお、今回の洗浄機は、三国大橋以外の類似の橋梁に適用できるように、ノズルと洗浄機自体の高欄との距離はシフトできる構造とした。但し走行上側の路側に容易に撤去できない照明ポール等があると、洗浄機走行の妨げとなる。

既往の橋梁洗浄の研究では、水量を増やしても塩分の除去量は増えなくて6~8L/m²で良いこと、高圧より低圧でゆっくり噴霧角度も広角度にした方が良いことが示されている¹⁾。このことを参考にして、橋長当たり塗装面積32m²/mに7/3L/回の散水を3回行うことで、3回合計で塗装面積当たり7L/m²の散水とした。散水の全流量は約800L/min(2009年)、717L/min(2010年)で、約9.6~10.7L/minの走行速度となり、橋長542mの3往復は2.5~2.8時間で終了する。橋脚での停止や反転、軸回転での時間ロスも考慮しても4時間で済む。実際には組み立て解体と搬入で1日を要して、2日間の作業となる。組立解体が素早くできるよう機械が改良されれば、作業はより短時間になる。

また、腐食の著しい横桁下フランジ上面へはノズルを進行方向に傾けて対処した。この傾斜したノズルは、橋脚の際で長く停止して散水することで、橋座の洗浄にも効果的であった。

なお2008年の洗浄では、消雪の分岐バルブからのコルゲートホースの径50mmが小さくて水圧が不足し床版下のUリブに散水が届かないことが生じたので、加圧ポンプと発電機をユニック車に搭載しホース径も65mmと大きくした。

洗浄の時期は、九頭竜側河口16kmの明治橋での計測結果(図-3)が示すように冬の季節風による海塩粒子の飛来が他の季節の10倍以上になることから、4月上旬がよいと考えられる。しかし予算上の制約などで2008年は5月15日~17日、2009年は3月4日~5日、2010年は3月4日~6日に洗浄を行った。

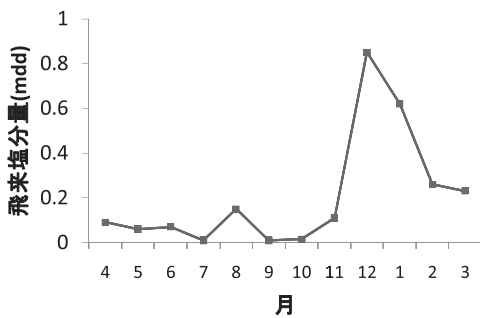


図-3 飛来塩分量の季節変化

4. 洗浄の結果

2008年5月にやや能力不足ながら洗浄したこの橋を2009年3月4日~5日、2010年3月4日~6日に洗浄した。この2009年と2010年の洗浄前後の付着塩分量を表面塩分計SNA2000で計測した平均値を図-4に示す。腐食の著しい雨の当たらない箇所の下フラ

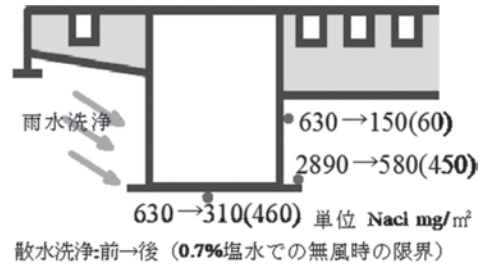


図-4 洗浄前後の付着塩分量の違い

ンジ上面では2,890mg/m²が580mg/m²に、ウェブでは630mg/m²が150mg/m²に、箱桁外底面では630/m²が310mg/m²に削減された。

既往の洗浄研究例では、2,000mg/m²以上であったものが平均25.8mg/m²に、平均1,221mg/m²が平均1.2mg/m²に削減された²⁾ことからすると今回の洗浄後の値は大きく、費用面では安価であるが、洗浄の効果は相当に劣っている。これは既往研究とは異なり、0.7%もの塩水を使用していることによると思われる。

5. 洗浄による防錆効果の推測

洗浄の抑制効果を次の3方法で推測した。

(1) ACM センサからの防錆効果の推定

箱桁内側の塗装表面に表面高さを一致させて裸鋼の腐食を計測できるACMセンサを取り付け、そのL型模型鋼板を2008年12月3日に腐食箱桁内側に取り付けた。腐食の著しい下フランジ上面のACMセンサが示す洗浄前と洗浄後の約25日間の平均腐食速度は19.9mm/yが、6.3mm/y(図-5)と洗浄により約3倍延命されている。

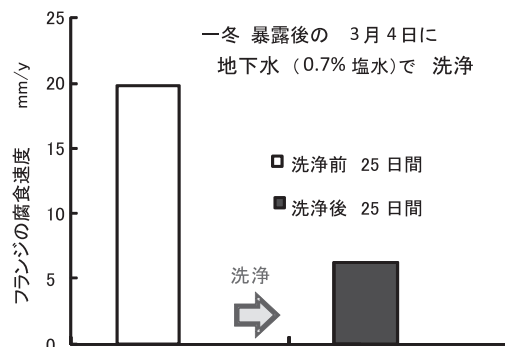


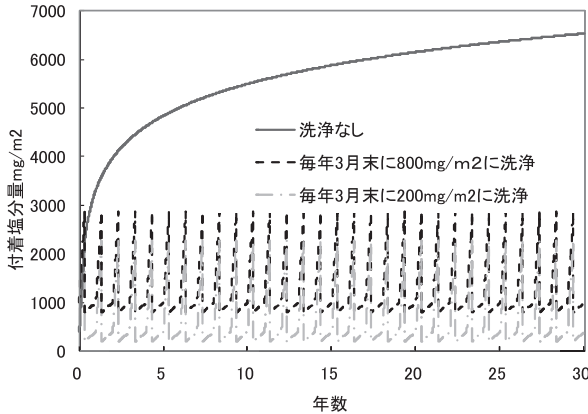
図-5 洗浄前後のACMセンサの変化

(2) 気象と付着塩分量からの防錆効果の推測

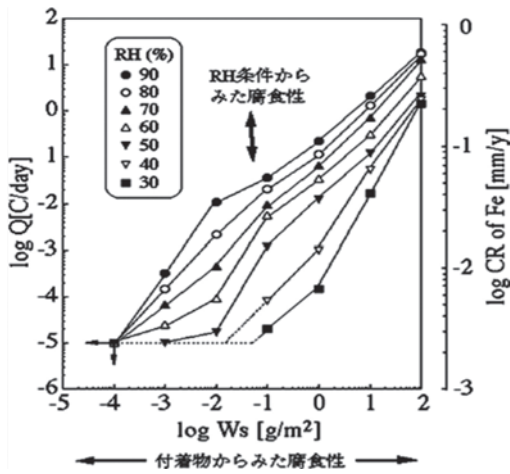
次に下フランジ上面について、洗浄なし、毎年3月末に800mg/m²に、毎年3月末に200mg/m²に洗浄という3ケースで腐食量を見積もった。塩分付着量の推移は塩分飛来が冬期に集中していることを考慮し図

—6と仮定した。種々の相対湿度条件下での付着塩分量と腐食速度との関係は図—7³⁾で与えられることから、福井県三国の標準気象データを用いて30年間シミュレーションした。その結果を図—8に示す。

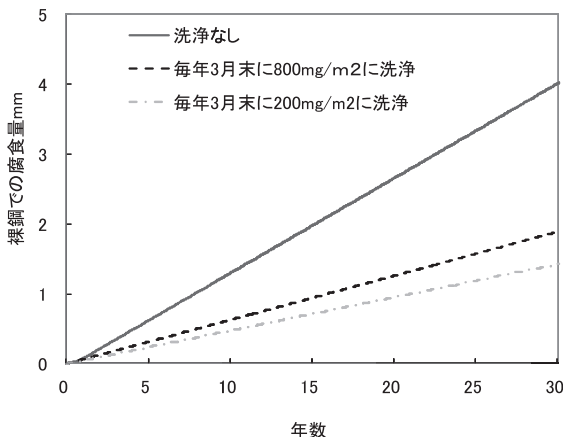
毎年3月末に800 mg/m²にまで洗浄するという今回の方法は、洗浄無しに比べて約2倍延命となった。また、0.7%の塩分を含む地下水を水道水等に替えて毎年200 mg/m²にまで洗浄できたとしても、約25%の縮減効果に止まった。



図—6 付着塩分量の変化 (下フランジ上面)



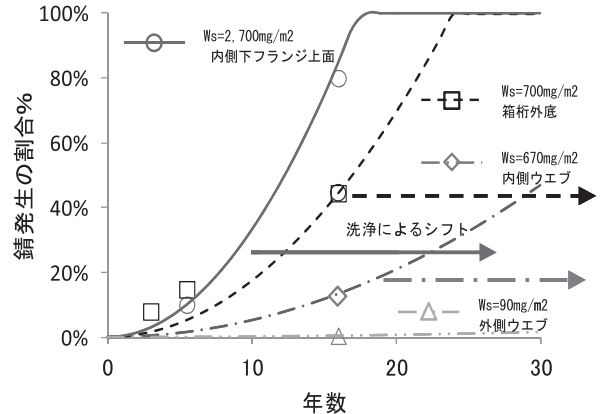
図—7 塩分量、腐食速度と相対湿度



図—8 洗浄による腐食量の違い (下フランジ上面)

(3) 現場の錆からの防錆効果の推測

この橋の塗装の塗り替えは、全区間一斉にはされてこなかったことから、塗装塗り替え後3年、5年、16年経過の設置位置毎の錆色発生率（表面錆着色の全体での比率）を腐食の著しいボルトについて調べた。その設置部位と経過年数毎の平均結果を塗装塗り替えからの経過年数を横軸に、錆色発生率を縦軸にして、ボルトの位置（16年経過での付着塩分量も記載）毎に図—9に示した。



図—9 部位ごとの錆発生率の経年変化

既往研究で「海岸地域のような厳しい腐食環境においては、塗膜表面に発生している顕在劣化面積率で塗装下腐食を推定した方が現実的である」とされ、また塗膜劣化曲線を二次放物線で与えていることから⁴⁾、図—9では同じ部位での経過年数—錆色発生率の点を基に錆色進行カーブを二次放物線で作成した。

図—9から内側下フランジ上面（付着塩分量 2,700 mg/m²）では急激に錆色発生率は高まり、16年で80%に至っている。但し、ボルトの付着塩分量は部位が狭くて精度良く測りにくいので、付着塩分量はボルト周囲の鋼板面と同じであると考えて、その計測値を用いている。箱桁底の外表面（付着塩分量 700 mg/m²）では、内側下フランジ上面の約70%の錆色発生率となっている。また、3年と5年経過した箱桁底外面の点は、16年経過から推定した二次放物線に比べて、早い錆色発生となっている。これは16年経過に比べて塗装塗り替え回数が1回多い点で、塗り替え回数が増えると早く腐食することが示唆される。内側ウェブでは付着塩分量が670 mg/m²と箱桁底の外表面付着塩分700 mg/m²とほぼ同じであるにも拘わらず、錆色発生率が半分以下と少ない。この原因は、結露で塩分を多く含む滴が底面のボルトにはウェブのボルトより多く集まり、その滴が落下せず乾燥し、周囲の鋼板面の700 mg/m²とは異なり実際にはより高濃度の塩

分付着となっていることが考えられる。なお、雨かかりの外側ウェブ（付着塩分量 90 mg/m^2 ）では錆色の発生はほとんど生じていない。

次に図-9 から洗浄の効果を推定する。付着塩分濃度が高く錆色発生率の高い内側下フランジ上面の錆色進行カーブは、洗浄で図-4 の 580 mg/m^2 にダウンすると見込まれるので、ほぼ同じ付着量 670 mg/m^2 の内側ウェブの錆色進行カーブにシフトすると推測される。そのシフトであれば、同じ錆色率発生までの年数は約 2.5 倍になる。次に、箱桁外底面の 700 mg/m^2 は図-4 の 310 mg/m^2 に、内側ウェブの 670 mg/m^2 は同様に 150 mg/m^2 にダウンすると見込まれるので、両者の錆色進行カーブは、大きく外側ウェブのカーブの方へシフトすると考えられ、同じ錆色までの年数も大幅に延びると推測される。

(4) 推測のまとめ

以上の3つの推測の最初の2つの推測は裸の鋼を対象にしたもので、最後の推測は現場の塗装に即したものである。いずれからとも、概ねの効果としては同じ錆に達するまでの年数が約 2 倍に延びる。

6. 洗浄によるコスト縮減効果

三国大橋（塗装面積 $17,500 \text{ m}^2$ ）を Ra-III, Rc-III, Rc-I の塗装で行い、各々の耐久年を 8 年, 12 年, 30 年として、その塗り替え年数が洗浄で 2 倍に延びると

表-1 洗浄による塗装費用縮減効果

三国大橋 17,500 m ²		
Ra-III	8年塗替え	毎年洗浄費 + 16年塗替え
	¥660/m ² /年	¥390/m ² /年
Rc-III	12年塗替え	毎年洗浄費 + 24年塗替え
	¥558/m ² /年	¥339/m ² /年
Rc-I	30年塗替え	毎年洗浄費 + 60年塗替え
	¥429/m ² /年	¥275/m ² /年

三国大橋での洗浄費内訳：90万円/回（2日作業 1日の作業編成：電工1人、発電機100kVA 1台、世話役1人、特殊作業員3人、発電機30kVA 1台、高所作業車1台、特殊運転手1人、交通誘導員3人、ユニック車1台）+ 損料15万円/回（洗浄機500万円を3橋利用で1/3、橋蛇口工事60万円の合計の15年償還）

した場合の面積当たりの年間費用を試算した。その結果が表-1で、維持費は洗浄によって約36～41%が縮減されるとなった。なお、洗浄費用の内訳は表-1下欄に記した。

7. おわりに

以上の研究開発をまとめると

1. 消雪用井戸水で洗浄しながら、上路橋を洗浄させる技術を開発した。
2. 洗浄前後の ACM センサの値、湿度・付着塩分量と鋼板腐食進行速度を明らかにした既往研究からの当該橋現場の気象データを用いた数値シミュレーション、現場の付着塩分量と腐食からの推定という3つの推定手法から塩分濃度0.7%の地下水を用いた洗浄でも、塗装の塗り替えを約2倍に延ばせると推定できた。
3. その結果と洗浄費用の積算から、この橋梁では維持費用を約4割削減できると見込まれた。

謝辞

本研究に際して福井県三国土木事務所、福井鐵鋼株式会社の奥村茂氏にはご協力頂いた。記して感謝の意とする。

J C M A

《参考文献》

- 1) 磯光男, 三田村浩, 勝俣盛ほか: 橋梁洗浄に関する北海道での取り組みと米国における実態調査, 橋梁と基礎, pp.29-33, 2004.6
- 2) 三田村浩, 佐々木聡, 勝俣盛ほか: 橋梁に付着した塩分の除去実験, 土木学会第56回年次学術講演会 CS6-043, 2001.9
- 3) 篠原正, 元田慎一, 押川渡: ACM センサによる環境腐食性評価, 材料と環境, 54, pp.375-382, 2005
- 4) 藤原博: 鋼橋塗膜の劣化度評価と寿命予測に関する研究, 東京大学学位論文, pp.114-143, 2000.6

【筆者紹介】

梶村 周平（かじむら しゅうへい）
福井県
建設技術研究センター
主任研究員



宮本 重信（みやもと しげのぶ）
地中熱・融雪技術士事務所
代表

