

重度腐食した耐候性鋼材の素地調整の課題と

画期的な素地調整工法（AWT 工法）について

○西谷朋晃¹⁾，豊田雄介¹⁾，池田龍哉²⁾，貝沼重信³⁾

1. はじめに

耐候性鋼材は緻密なさび層（保護性さび）を形成することで，腐食の進行性を抑制できる．しかし，飛来塩分や凍結防止剤の散布などの塩害環境では，塩類が雨洗されにくい部位に重度の腐食が生じることで，**図 1** に示すような異常さびが生成される．

耐候性鋼材の異常さびは，普通鋼のさびに比して緻密で硬質であるため，十分に除去することは困難である．特に，橋梁点検車やロープアクセスなどの点検の際には，使用機材や作業床などの制約により，除去することがさらに困難になる．また，耐候性鋼材に異常さびが生成されると，点検ハンマーによる打撃では，さび層深部の腐食の進行状況を正確に把握できない．そのため，補修工事に着手した時点で初めて部材の貫通や消失といった深刻な状態が発見される場合がある．

このように耐候性鋼材に重度腐食が生じており，その部位の塩害環境自体を改善するが困難な場合には，防食方法が無塗装から塗装に仕様変更する必要性が生じる．

ここで，鋼構造物における塗替え塗装後の塗膜の耐久・防食性能は，素地調整後の塩類を含むさびの残留度に依存する．そのため，手工具，動力工具，ブラスト処理やレーザー処理などの様々な素地調整法による除塩・除せい効果が検討されてきた^{1)，2)}．

ブラスト処理については，施工効率や鋼素地品質などの観点でメリットがあることから，鋼道路橋では比較的積極的に採用されている．耐候性鋼の重度腐食部に生じた硬質な異常さびや孔食深部の塩類を含むさびの除去については，**図 2** に示すように表面の粗さびをチップングにより除去したうえでブラスト処理と水洗いを複数回繰返す工法（以下，従来工法）を採用することが一般的である．

しかし，従来工法では全てのさびや塩類の除去は不十分であり，塗替塗装後の早期に**図 3** に示すように塗膜下で腐食が局部的に発生・進行し，部材の貫通や破断に至った事例も報告されている．



図 1 耐候性鋼材の異常さび



図 2 チップング処理



図 3 鋼素地の残留塩による塗膜下からの局部腐食の発生

1) 西日本高速道路株式会社 〒530-0003 大阪府大阪市北区堂島 1-6-20

2) 池田工業株式会社 〒049-0156 北海道北斗市中野道 218-3

3) 九州大学 〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744

NEXCO 西日本では、110 橋程度の耐候性鋼橋を管理しているが、その 1 割程度の橋梁で凍結防止剤等の塩害による重度腐食が生じており、その部位の耐荷性能の低下が懸念されている。重度腐食が生じた耐候性鋼橋を無塗装から塗装に仕様変更するにあたり、前述の課題を解決することを目的として、耐候性鋼の重度腐食部の塩類やさびを従来工法に比して飛躍的かつ高効率に極限除去する新技術 AWT 工法 (Abrasive Water-jet Treatment) を開発した³⁾。

本稿では、従来工法を採用して補修工事を実施した耐候性鋼橋の施工結果を踏まえて、重度腐食した耐候性鋼材の素地調整の課題を概説する。また、AWT 工法を採用して補修工事を実施した耐候性鋼橋の施工結果について報告する。

2. 従来工法の重度腐食した耐候性鋼材に対する素地調整の課題

従来工法の重度腐食した耐候性鋼材に対する素地調整の主な課題として、①品質および②補修工程・費用の 2 点が挙げられる。

2.1 品質に関する課題

耐候性鋼材の異常さびは普通鋼材に比して緻密で硬質といった特徴を有している。図 4 に示すように孔食底部には二次孔食が存在するため、従来工法で素地調整を行っても二次孔食部の塩類を含むさびが除去困難であり、残留しやすい。

従来工法では二次孔食部の塩類を含むさびを除去するためには複数回ブラスト処理を実施するが、過去の施工では 4 回のブラスト処理と水洗い（粗さび除去のためのチップングを含めて 9 工程）を繰返し実施しても二次孔食底部のさびの除去は困難であった。

そのため、従来工法では多少のさびの残留は許容せざるを得ないのが現状である。これらの素地調整後、4 時間以内に戻りさびが発生しないことを確認した上で塗装しているが、残存さびを起点として塗装後の早期に塗膜下腐食が発生している。



図 4 重度腐食部の断面

2.2 工事工程・費用に関する課題

普通鋼材の素地調整ではブラスト処理に使用する研削材は約 40kg/m² が標準であるが、耐候性鋼材の重度腐食部では 150kg/m² 程度以上必要とされる。また、素地調整後、4 時間以内の塗装が求められるためブラスト処理の完了を塗装者が数時間待機せざるを得ず非効率な労務体制となる。雨天時はブラスト処理後の早期に戻りさびが生じるために素地調整自体ができない。

そのため、主要工程であるブラストの遅延により大幅な工期増となり、工程遅延による施工効率の低下や足場等の仮設設備の存置期間の増加などによる工事費の大幅な増額リスクが生じる。

3. AWT 工法 (Abrasive Water-Jet Treatment) の概要

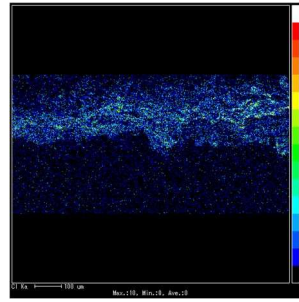
AWT 工法の開発に際しては、2. に示した各種課題を有する耐候性鋼橋の塩害による重度腐食部を対象とした。この素地調整は無塗装から塗装に仕様変更することを目的としている。対象とする耐候性鋼の重度腐食部（腐食深さ：3mm 程度以上、さび層の厚さ：10mm 以上）を図 5 に示す。

前述したように、耐候性鋼材のさび層は、普通鋼材に比して緻密かつ硬質であり、塩類をさび層に蓄積しやすい⁴⁾。EPMA で分析した普通鋼と耐候性鋼のさび層内の Cl マッピングを図 6 に示す⁴⁾。

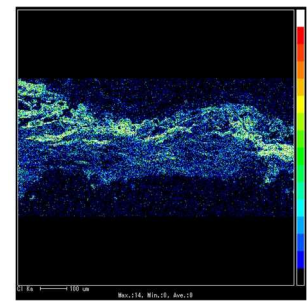
AWT 工法は、航空機の炭素繊維複合材料や超硬合金の切断に使用する技術 (Abrasive Water-jet 以下、AWJ 工法) を応用し、さび層内のクラックに 230MPa 程度の超高压水を噴入することで発生する水くさび作用や孔食内で生じる局所渦流作用などに着目して開発した工法である。



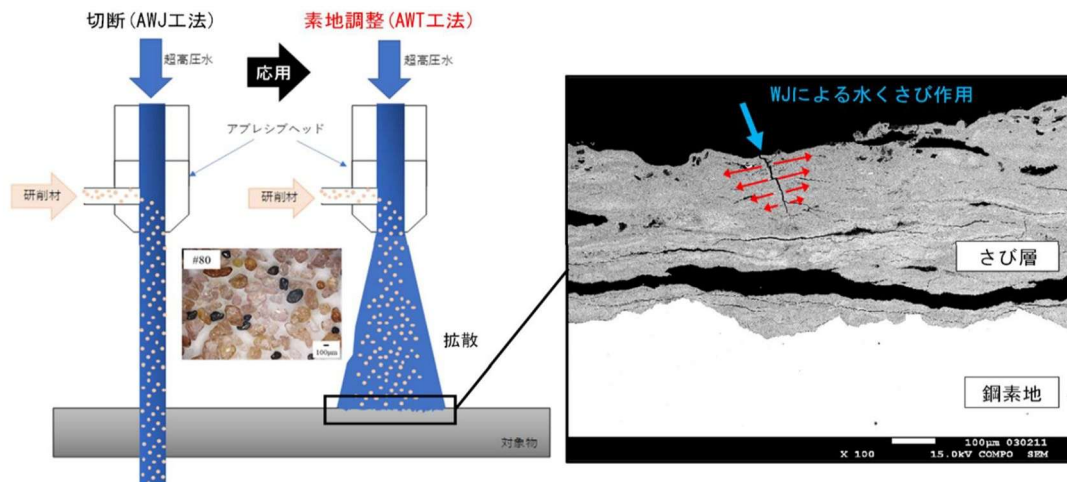
図 5 AWT で対象とした耐候性鋼の重度腐食部



(a) 普通鋼



(b) 耐候性鋼

図 6 さび層内の CI マッピング(EPMA)⁴⁾図 7 AWT 工法の概要図⁵⁾に加筆

これらの作用により、耐候性鋼材の塩類を含むさび層を超高速かつ極限除去できる（図 7）。孔食内で生じる局所渦流作用により、二次孔食にも填流が達することで、従来のブラスト等による素地調整では困難であった耐候性鋼材の孔食底部のさびや塩類を除去できる。さらに、補修塗装に必要な鋼素地の除せい度や表面粗さの品質規格も同時に達成できるなど、除塩・除せいの効果が従来工法に比して飛躍的に高く、複数工程が必要とされた従来工法を 1 工程のみに縮減できる画期的な工法である。

また、AWT 工法で用いる研削材の使用量は、ブラスト処理の 1/10 程度以下と著しく少なく、湿式工法であるため、作業中の粉塵も問題とならない。耐候性鋼橋で重度腐食した場合の従来工法と AWT 工法による素地調整の工程を図 8 に示す。

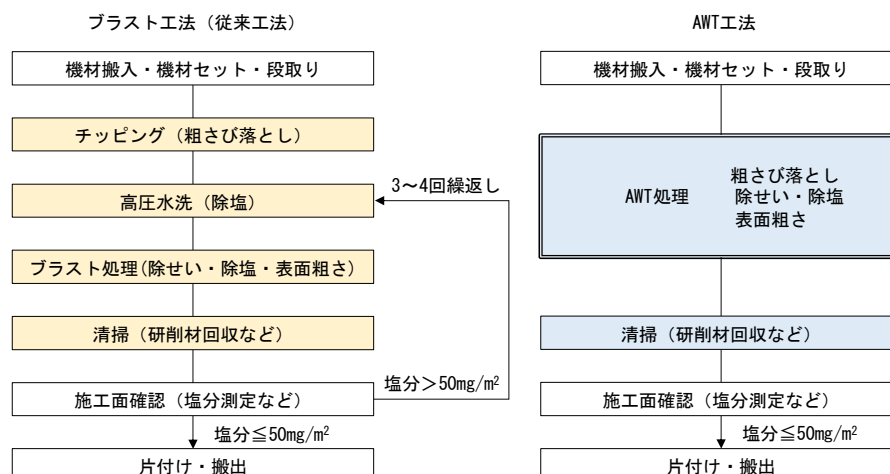


図 8 従来工法と AWT 工法による素地調整の工程

4. 対象橋梁

対象橋梁は、無塗装耐候性鋼材を用いた 3 径間連続非合成 4 主鈑桁橋（1992 年供用）である。当該橋梁の区間は冬季に凍結防止剤を散布し、2022 年時点でその散布量は年平均 16t/km（累積散布量 474t/km）となる。伸縮装置や床版打ち継ぎ目から浸入した凍結防止剤を含んだ漏水により **図 9** に示すような重度腐食が発生している。2015 年に桁端部の一部は塗装仕様に変更されているが、6 年後の 2021 年の点検では既に **図 10** に示す塗膜下腐食とみられる再劣化が確認されており、簡易の防錆処理により応急対策がなされた。また、重度腐食の進行を抑制するため 2020 年に高性能床版防水工が施工され床版漏水の対策は完了したが、既に部材に塩類が過剰に残留しており腐食の進行を抑えるには至っていない。

今回の補修工事の対象範囲は、工事着手前に設置した吊り足場を利用し複数箇所の鋼材表面の塩類を表面付着塩類試験（JIS Z 0313）にて計測し決定した。その結果、施工範囲は高濃度の塩類が確認された箇所と将来的に塩類が付着する箇所として、両桁端部の全部材（二次部材含む）と、全主桁全スパンの下フランジ下面から 100mm 高さの立ち上げ範囲までとし、総施工面積は 605m² となった。また、AWT 工法の除塩効果を確認するため、施工前後の表面付着塩類量を計測した。施工前において全主桁を対象とし、桁端部は上フランジ下面、ウェブ両面、下フランジ上面、中央径間部では下フランジ上面、下フランジ下面、異常腐食部の計 104 地点とした。試験は表面塩分計を使用し、試料液の漏出が想定される重度腐食部は Bresle 法（攪拌時間 3 分）とした。施工後は代表地点の表面付着塩類量を Bresle 法（攪拌時間 10 分）で計測した。

試験の結果、施工前の桁端部においては下フランジ上面に 1,600mg/m²、中央径間部では下フランジ上面で 800mg/m²、下フランジ下面で 1,100mg/m²、重度腐食部では上フランジ下面に 1,000mg/m² 程度の塩類の存在を確認した。桁端部では伸縮装置からの漏水により下フランジ上面に塩類が供給・蓄積し、中央径間部では床版漏水と車両走行により巻き上げ飛来した凍結防止剤が堆積、構造上雨洗効果が働かず高濃度の塩類が蓄積したものと推定される。



図 9 床版漏水により上フランジに発生した重度腐食



(a) 補修塗装後の再劣化



(b) 点検時の応急補修

図 10 塗膜下腐食の状況（2021 年時点）

5. 施工結果

図 11 に AWT 処理前後の表面付着塩分量の一例、**表 1** に AWT 工法の施工条件、**図 12** に AWT 施工後の鋼素地の状況を示す。通常、塗替塗装における素地調整の品質管理は、表面付着塩分量を 50mg/m² 以下とする規定がある⁶⁾。AWT 施工後、重度腐食部を含む全箇所において表面塩分量は平均 30mg/m² 以下、除せいは Sa2 1/2（素地調整程度 1 種相当）となり規格を十分に満足した。ただし、現行の表面塩分測定法による品質管理では、鋼素地を限定的な測点で局所的に評価することになるため、素地調整した全領域に対する除塩の程度を評価できない。

素地に塩類が残留している場合、素地調整後の早期に **図 13** に示す塩由来の戻りさびが発生し⁷⁾、塗装下腐食発生要因となる。過去の試験施工⁸⁾では、AWT 工法により表面付着塩類を数 mg/m² 程度まで極限除去できれば、戻りさびが長期間発生しないことを確認している。そのため、除塩の確認は表面塩分量の確認に加え、素地調整後に塩由来の戻りさびが生じないことを指標として品質管理することが望ましい。なお、本施工に関しては AWT 処理後に仕上げブラストを実施し、現行の品質管理基準である素地調整後 4 時間以内に塗装着手する点は十分に満足している。

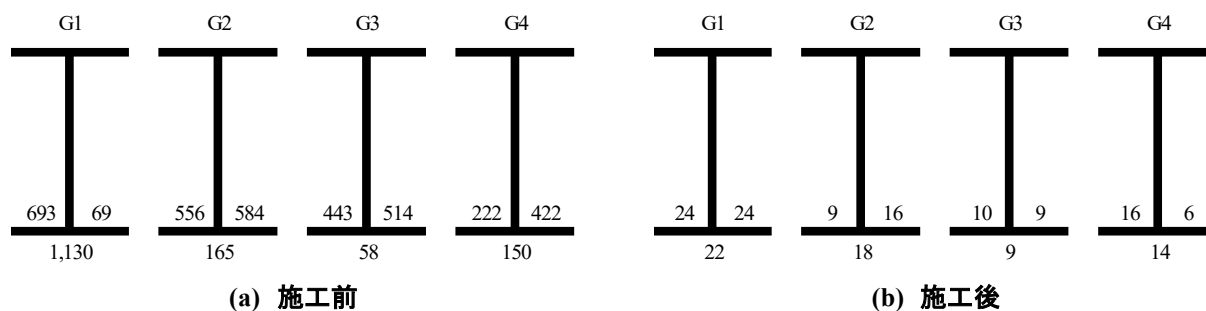
図 11 AWT 施工前後の表面付着塩分量の一例 (P2～A2 支間部) (単位: mg/m²)

表1. AWT工法の施工条件

Nozzle type	AWT nozzle (Divergent)
Nozzle Diameter (mm)	2
Abrasive Materials	Garnet #80
Stand-off Distance (mm)	300
Abrasive Supply (g/min)	600
Pressure (Mpa)	230
Water flow (L/min)	11.9

図 12 AWT 処理後の鋼素地の状況
(Sa2 1/2)図 13 戻りさびの発生状況
(ブラスト処理 30 分後) 7)

6. まとめ

本稿では従来工法を採用して補修工事を実施した耐候性鋼橋の施工結果を踏まえて、重度腐食した耐候性鋼材の素地調整の課題を概説した。また、AWT 工法を採用して補修工事を実施した耐候性鋼橋の施工結果から、従来工法では困難であった表面付着塩分量の規格値を容易に達成し、かつ適切な除せい度が得られた。一方、施工にあたり水処理などの諸課題も確認されたため、引き続き耐候性鋼橋の補修工事を継続実施し、AWT 工法の施工実績を増やすことで工法の高度化を目指す。また、素地調整の新たな品質管理手法の確立に向けて、戻りさびと付着塩分量の相関性について検討する予定である。

参考文献

- 1) 伊藤義人, 金仁泰, 貝沼重信, 門田佳久: 素地調整が異なる塗装鋼板の腐食劣化特性および腐食耐久性, 土木学会論文集 No. 766/I-68, pp. 291-307 (2004)
- 2) Q. Wang, S. Kainuma, S. Zhuang, K. Shimizu and M. Haraguchi : Laser Cleaning on Severely Corroded Steel Members: Engineering Attempt and Cleanliness Assessment, Journal of Cleaner Production, Vol. 376, 134224 (2022)
- 3) S. H. Park, S. Kainuma, T. Ikeda, Y. Toyota and Y. Morita : Effect of Surface Characteristics of Abrasive Water-jet Treatment on Corrosion Behavior of Carbon Steel, Zairyo-to-Kankyo, Vol. 72, No. 5, pp. 169-178 (2023)
- 4) 貝沼重信, 小林淳二, 山本悠哉: 飛来塩環境における無塗装鋼材の水洗浄による腐食遅延効果, 鋼構造年次論文報告集 Vol. 22, pp. 917-923 (2014)
- 5) 貝沼重信, 山本悠哉, 伊藤義浩, 宇都宮一浩, 押川渡: 腐食生成物層の厚さを用いた無塗装普通鋼材の腐食深さとその経時性の評価方法, 材料と環境, Vol. 61, No. 12, pp. 535-540, 2012.
- 6) 日本道路協会: 鋼道路橋防食便覧 pp. II-145, 2014.
- 7) 土木学会: 鋼構造シリーズ 30 大気環境における鋼構造物の防食性能の回復の課題と対策, pp. 233, 2019.
- 8) 豊田雄介, 貝沼重信, 池田龍哉, 荒川武彦, 小山朋: 重度腐食した耐候性鋼材に対するアブレジブウォータージェットの適用性, 令和 4 年度土木学会全国大会第 77 回年次学術講演会, 2022.