

# ウォータージェット工法の鉄道橋への適用

○安部 健<sup>1)</sup> 鳥居 伊和根<sup>2)</sup>  
鈴木 周一<sup>3)</sup>  
露木 寿<sup>4)</sup> 内藤 孝和<sup>5)</sup>

## 要旨

鉄道用途を含む鋼製橋梁の老朽化が急速に進展する中、塗替え塗装において素地調整の品質を上げることは塗膜の耐久性を向上する上での喫緊の課題です。本報告では、ウォータージェット工法による素地調整の塗膜耐久性に及ぼす影響について長期耐久試験を行い、その高い性能を確認しました。さらに、鉄道橋における施工を考慮した平滑部用の小型の素地調整ロボットを製作、実際の鉄道橋においてテスト施工を実施して、素地調整の品質や開発機器の施工性などについて評価を行いました。また隅角部の素地調整作業を行うための装置も開発し併せて評価しました。

**キーワード：**鋼製橋梁、ウォータージェット工法、塗膜剥離、素地調整

## 1 はじめに

鉄道用の鋼橋梁の歴史は古く、経年 100 年を超えるものも珍しくなくなっています。これらの老朽橋梁を維持管理する上で、最も懸念されるのが腐食による断面欠損であり、対策としては従来より塗替え塗装が実施されていますが、塗替え塗装に先立って行われる素地調整の工程においては、手工具や動力工具を用いた人力作業によって実施されているのが現状です。

本報告では作業員の労力軽減及び塗膜寿命の延命化を目的として、塗替え塗装行程の中で多くの労力・時間割合を占める素地調整作業について、高圧水による機械化（ウォータージェット工法：以下W J工法と記載）の検討を行うこととしました。

## 2 塗膜耐久性に関する素地調整方法の評価

W J工法による素地調整は、従来の手工具等による方法に比べ鋼面の錆などを除去する能力が高いことから、塗膜の耐久性能向上が期待されます。本研究では、実際にW J工法ならびに動力工具を使用して錆鋼板の素地調整を行った後に塗装を行い、その長期耐久性を定量的に検証することとしました。

### 2.1 長期耐久試験用鋼板の作成

本試験に用いた試験片の作成要領を次に示します。

- 
- 1) 東京ガス・エンジニアリング株式会社 企画部 〒144-8721 東京都大田区蒲田 5-37-1 ニッセイアロマスクエア 4F
  - 2) 東京ガス・エンジニアリング株式会社 建設部
  - 3) 建設塗装工業株式会社 技術部
  - 4, 5) 東日本旅客鉄道株式会社 研究開発センター

- ① 鋼板 (SS400 : 300×300mm) を用意し、グリットブラスト処理。
- ② 郊外環境 (千葉県鎌ヶ谷市) に約 8 か月間、大気暴露 (水平置き)。
- ③ その錆鋼板に W J 工法およびディスクサンダー (以下 D S と記載) による 2 種類の素地調整を実施。
- ④ その試験片③に対し、J R 東日本旅客鉄道 (株) の塗替えで適用されている T-7 塗装系 (表-2.1) にて各 3 枚ずつ塗装。塗膜厚は 30 点平均 260 μ m。
- ⑤ その後暴露台に設置、1 か月ばくろ後に塗膜引張り付着力を測定しました。

塗膜の付着力測定方法はプルオフ法 (JIS-K-5600-5-7) に準じました。付着強度は W J 素地調整および D S 素地調整とも平均 5 MPa 以上、最低でも 4 MPa 以上を示し、十分な付着性を示しました。W J 素地調整試験板については第 3 層の塗膜の凝集破壊が主でしたが、D S 素地調整試験板については素地の凹部に残存したさびの凝集破壊が主で、次いで第一層の凝集破壊が認められたなど、破断箇所は W J 試験板と異なることが大きな違いでした。

表-2.1 塗装系 T-7 注1) の仕様

工程	塗料	色	標準塗付量	目標膜厚
第 1 層	厚膜形変性エポキシ樹脂塗料	さび	200 g/m <sup>2</sup>	60 μ m
第 2 層	厚膜形変性エポキシ樹脂塗料	グレー	200 g/m <sup>2</sup>	60 μ m
第 3 層	厚膜形変性エポキシ樹脂塗料	さび	200 g/m <sup>2</sup>	60 μ m
第 4 層	厚膜形ポリウレタン樹脂塗料	N7.5 (グレー)	150 g/m <sup>2</sup>	50 μ m
裏面	厚膜形変性エポキシ樹脂塗料を 2 回塗り			

注 1) 公益財団法人 鉄道総合技術研究所, 鋼構造物塗装設計施工指針, 2005

## 2.2 ばくろ試験

塗装完了から 1 か月間の室内養生を経て、は房総半島先端近くの太平洋側海岸に面する千倉曝露場に試験板を設置し、現在まで約 2 年間、観察・評価を続けています (図-2.1)。試験板にはばくろに先立ちプラスチックカッターナイフで鋼素地に達するスクラッチを入れ、外観観察と付着性試験およびスクラッチ部の変状観察を行っています。

### ① 外観観察

2 年間のばくろ結果では、いずれの試験板にも塗膜の変状は認められません。

### ② 付着力試験

付着強度の試験結果を図-2.2 に示します。W J 処理試験板の破壊箇所は治具-接着剤間が主で、次に第 3 層塗膜の凝集破壊でした。一方、D S 処理試験板の破壊は素地の錆の凝集破壊が主で、これに続き治具-接着剤間の破壊でした。この破壊箇所の傾向は概ね初期測定時と同様でした。



図-2.1 長期耐久試験  
(千倉曝露場 : 南面 35°)

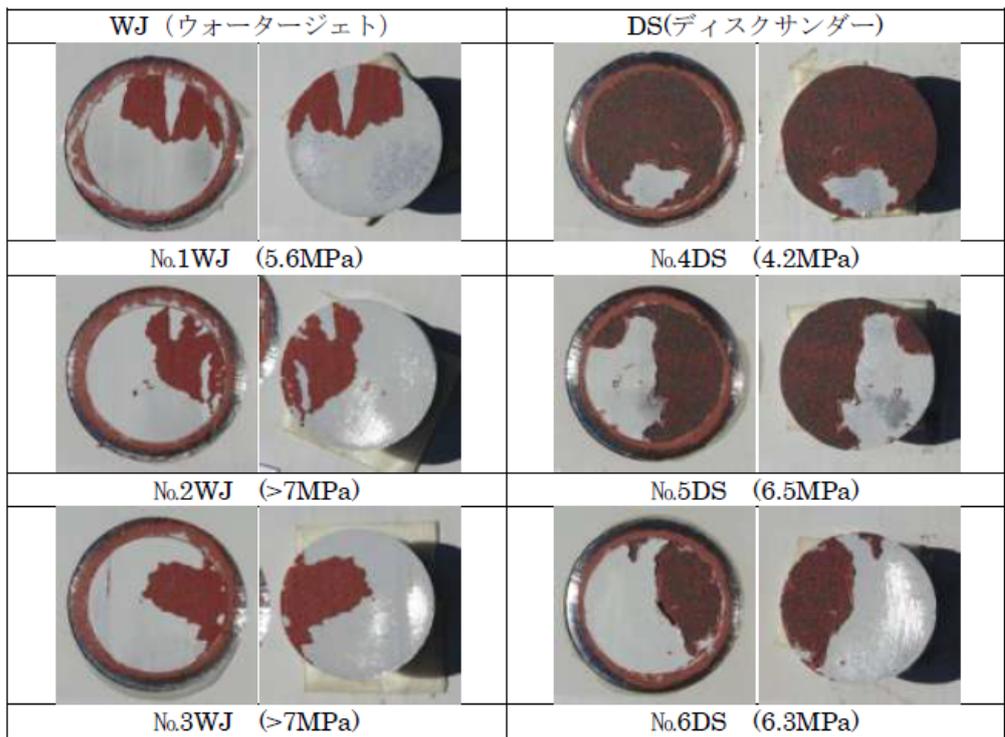


図-2.2 付着強度試験後の破断面の様子

素地調整種別ごとに平均した付着強度の経年変化を図-2.3 に示します。2年経過後の付着強度はどちらの素地調整方法も十分な付着強度を示し、平均値はW J 処理試験板が 7.0MPa 以上、D S 処理試験板は 5.7MPa でした。付着強度はW J 処理試験板は年上昇する傾向、D S 処理試験板はほぼ横ばいの傾向にあります。素地の錆の凝集破壊が引っ張り付着強度を支配するD S 処理は、付着強度に変化がない一方、塗膜および塗膜層間の凝集力が支配的なW J 処理では、塗膜の硬化の進展などの要因で付着強度が上昇したものと推察されます。

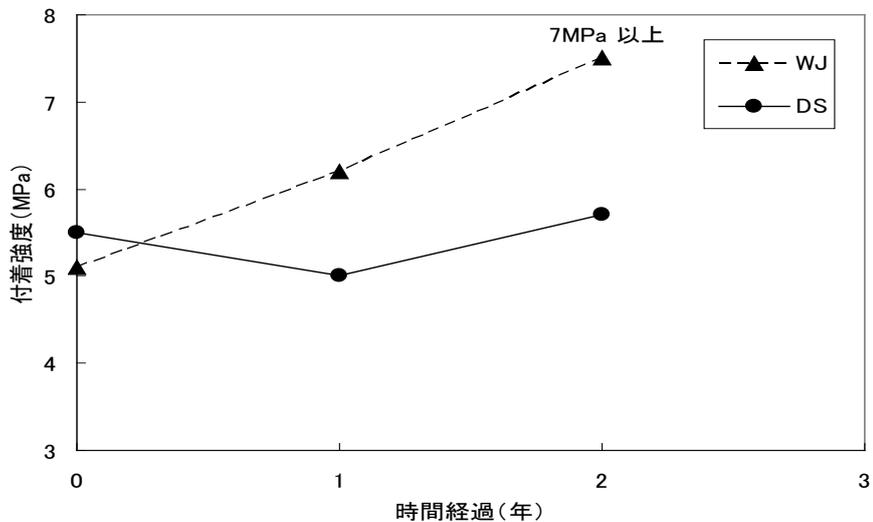


図-2.3 塗膜付着力の経時変化

③ スクラッチ部の変状観察

スクラッチの上下にみられる膨れの数と侵入幅を測定しました。図-2.4 に各試験片の膨れの様子を示します。膨れの侵入幅は、いずれも平均 1.3mm 程度と僅かで、WJ 処理、DS 処理の方式による差異は殆ど見られなかったものの、膨れの総数については WJ 方式の方が少ない傾向が見られました (図-2.5)。この膨れの総数の違いは、スクラッチ傷部に残存した錆が影響しているものと思われます。

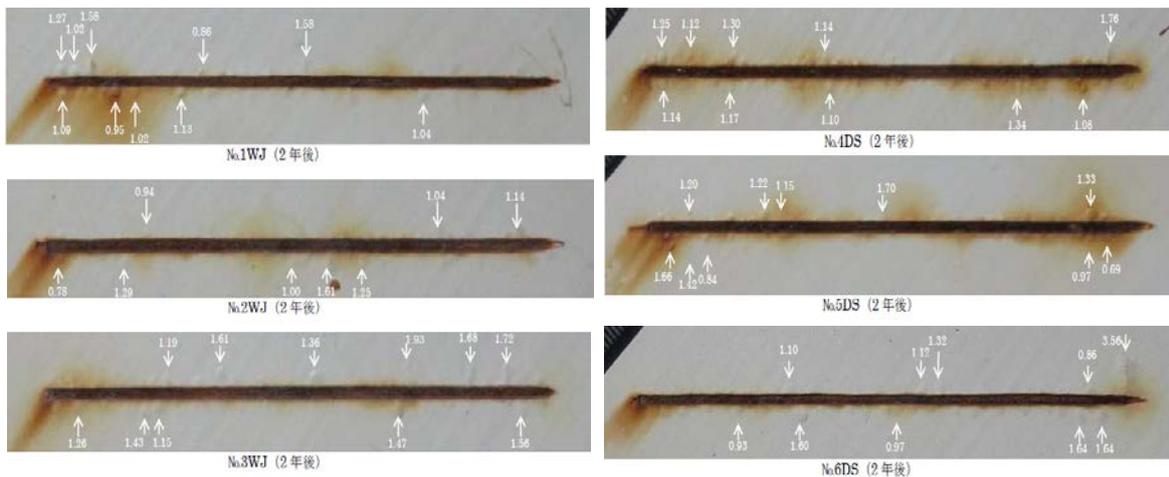


図-2.4 スクラッチ部の膨れの様子 (数字は膨れの侵入幅 mm)

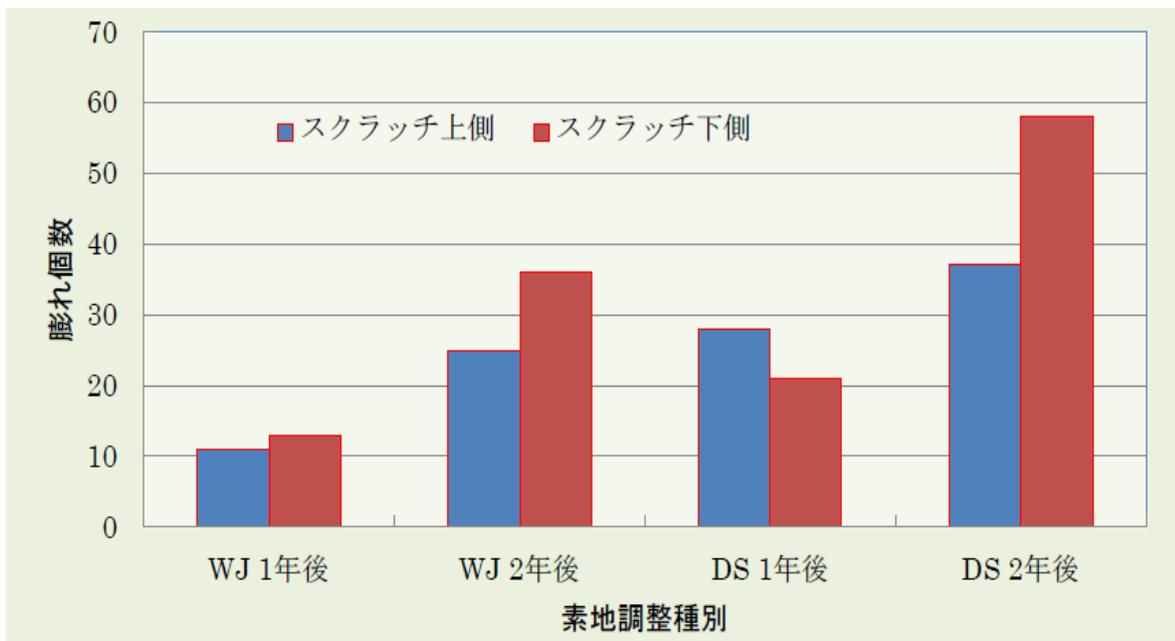


図-2.5 スクラッチ部の確認可能な膨れの総数

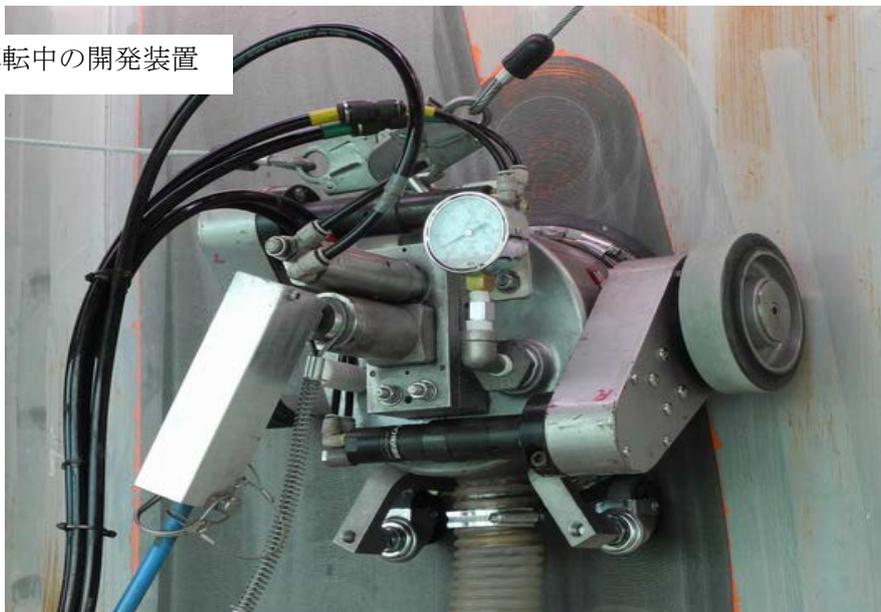
### 3 鉄道橋へのウォータージェット工法の適用

#### 3.1 試験装置

##### ① 自動走行式素地調整装置

鉄道橋では、鉄道車両が橋梁上を通過する状況下、極めて限られた場所で作業を行う必要があり、できるだけ小型でハンドリングの容易な素地調整装置が必要となる一方で、単位時間当たりの処理量を大きくすることも要求されます。開発した素地調整装置は、複数のノズルをアームに装備し、空気圧によりそのアームを回転しながら素地調整を行うものです。使用した水圧は200MPa、水量は10L/分としました。アームを覆う形のアルミ容器内は真空装置によって陰圧に保たれており、噴射された水ならびに剥離塗膜は直ちに回収され、別置したフィルターによって水と塗膜に分離される構造です。陰圧容器の外周には、外部への水の飛散防止ならびに陰圧を保つためのゴムシールが設置されています。機器の運転に関しては、剥離部の両側に空気圧駆動の車輪を2組配置、別の2組の補助キャスターによってバランスを取っています。移動速度はおよそ20mm/sで、作業員はコントローラによる遠隔操縦を行い、高圧水の噴射はフットバルブによりON・OFFを行うことができます（**図-3.1・図-3.2**）。

運転中の開発装置



リモコン装置



フットスイッチ



図-3.1 開発した剥離装置

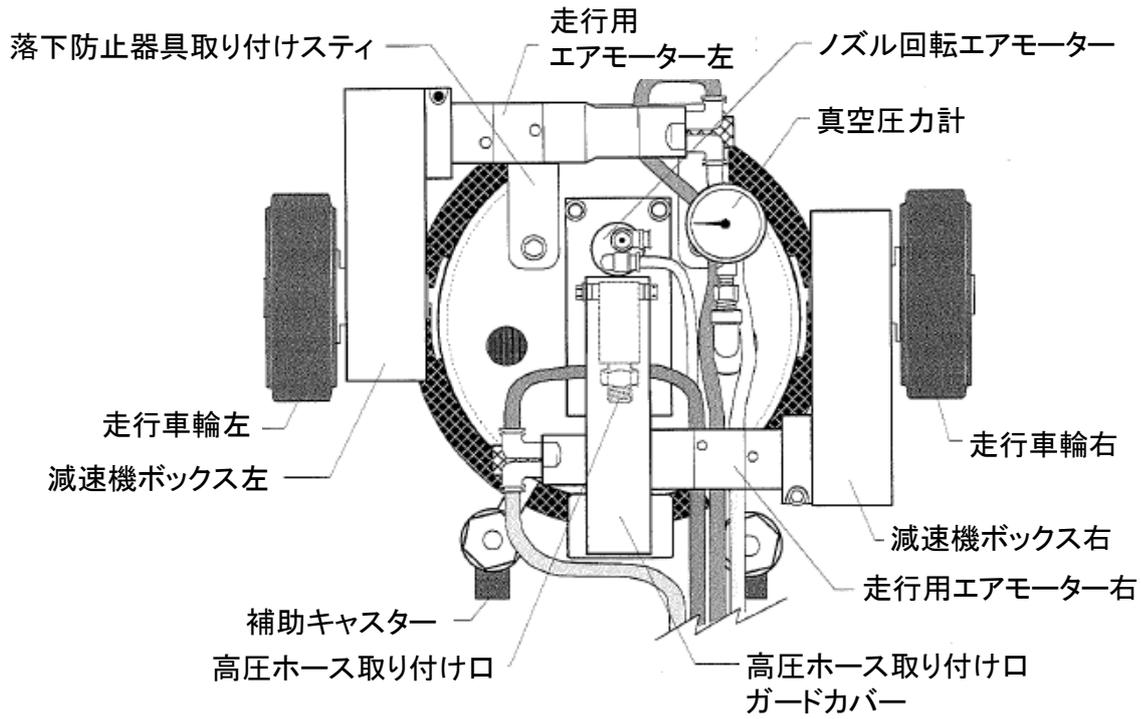


図-3.2 開発した剥離装置各部の名称

②隅角部アダプター

前述の自動走行式素地調整装置では、橋りょうの隅角部に素地調整が困難な部分が出てくるため、作業員 1 名で操作できる W J ハンドガンを用いて隅角部の塗膜剥離を行い、剥離塗膜および剥離濁水を回収できるアダプターを製作しました。一般的な W J 素地調整ロボットでは、ジェットを噴射する部分とそれを覆う部分は一体化してある場合が殆どですが、装置の移動などを考えると、シールの維持など困難な問題に直面します。そこで今回は発想を転換し、水の回収を行う部分と剥離装置部分を分離して施工を行うこととし、複雑な形状の鉄橋桁に対応するため、橋梁の形状ごとにタイプの異なるいくつかのアダプターを開発しました (図-3.3)。

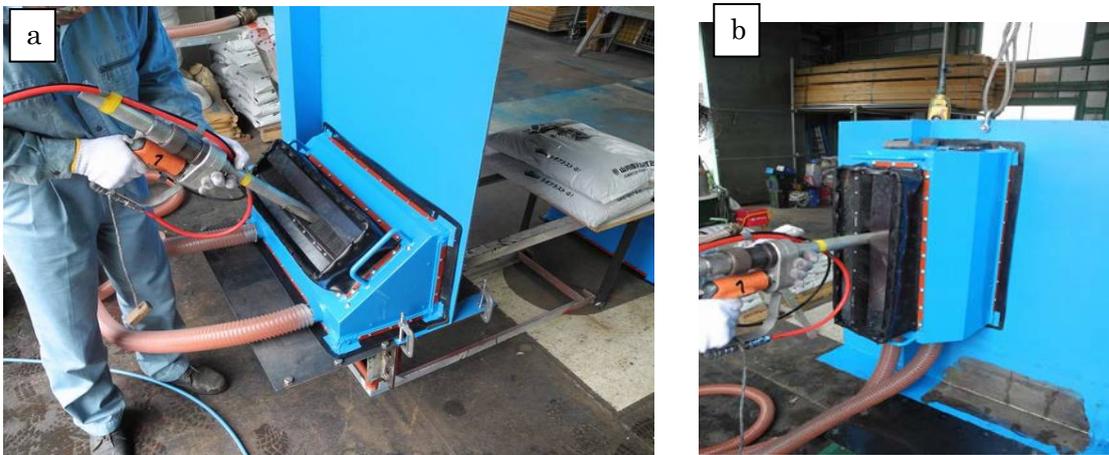


図-3.3 隅角部アダプター (a: フランジ部用 b: 垂直補剛材部用)

本アダプターは、真空装置によって橋梁に吸引吸着する空間と、ハンドガンから噴出される高圧水ならびに剥離塗膜粉を吸引する空間からなります。後者には上部にハンドガンを挿入する開口部があるため圧力は殆ど低下しませんが、排水を行うには十分な能力を有しています。試験においては、オープン式のウォータージェット（表-3.1）を使用しました。

表-3.1 実験に使用したオープン式WJ装置

名称	バルカンストリッパー ロータリーガン
使用圧力	200MPa
使用水量	5.4 L/毎分
ノズル径&数量	0.35 φ × 2P

### 3.2 鉄道橋梁におけるテスト施工

#### ① フィールドの概要



図-3.4 テスト施工を行った鉄道橋

テスト施工を行った東日本旅客鉄道(株)の橋梁（図-3.4）は、1969年に建設された上路プレートガーダー形式の溶接構造で、1988年（建設から19年後）に一度塗替塗装が実施されています。図-3.5に当該橋梁の塗膜の様子を示しますが、塗膜厚は $200\mu\text{m}$ 程度で、主桁腹板の内外とも全体的に刷毛スジに沿って、塗膜表面から素地に達する微細な塗膜割れが生じていました。塗膜割れの表面には錆汁が認められますが、塗膜膨れや塗膜剥がれには至っていない状況です。塗膜割れと錆汁の発生状況は内側腹板では上部と下部に、外側腹板では下部に多く認められました。全般に塗装後長期間が経過しているため、脆化が進行した状況であるといえます。

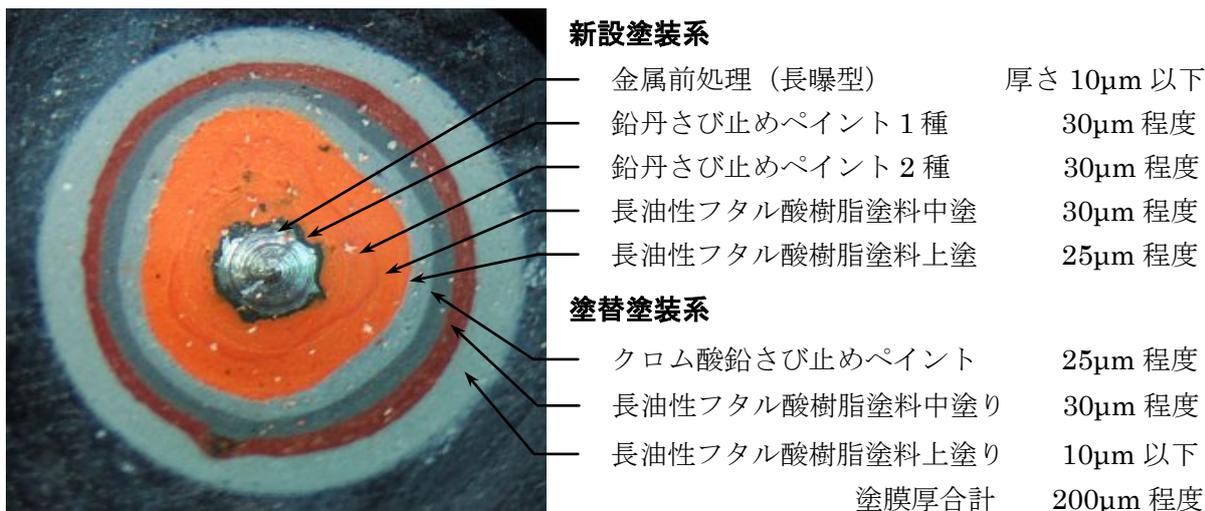


図-3.5 テスト施工を行った橋梁の塗膜状況

② 使用機材

前節で記述した剥離機材の他に表-3.2 に示す補機を使用しました。これらの機器は、桁下の空き地に設置し、試験時は高圧・吸引ホースを橋梁に引き上げて施工を行いました。

表-3.2 試験に使用した補機類の概要

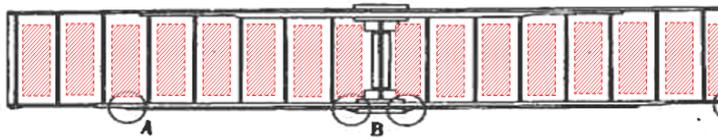
使用機械名	規格・性能	数量	摘要
<b>(塗膜除去)</b>			
超高压ポンプ	230MPa・18ℓ/min	1 台	高圧水製造
コンプレッサー	50HP	1 台	自動剥離機操作
<b>(給水)</b>			
散水車	4 t 車	1 台	水運搬
濾過機	SMC 社製	1 台	水清掃
水中ポンプ	2 吋オート	2 台	水送水
<b>(廃水処理)</b>			
バキューム車	4 t 車 (2.8 m <sup>3</sup> )	1 台	廃水集水
水槽	5 m <sup>3</sup>	1 台	排水貯水
発電機	200V、45kVA	1 台	廃水集水
排水処理器	廃水量 1200ℓ/h	1 台	廃水処理
原水タンク	1000×1500×1500mm	1 台	廃水処理

③ 施工状況

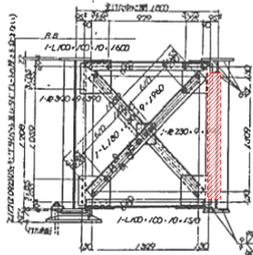
図-3.6 に示すように、橋梁の右主桁の平滑部を対象として、自動走行式素地調整装置を用いて素地調整を行い、右主桁の隅角部の一部を対象に隅角部アダプターを用いて素地調整しました。

図-3.7 に施工の様子を示します。装置は鋼面に真空装置により吸着しており、作動中には作業員が保持する必要はありません。なお、万が一の落下事故を想定して装置はワイヤーで懸垂保持します。隅角アダプターを用いたW Jハンドガンを用いた施工についても、橋梁一部の隅角部に適用してその性能を評価しました。

(桁側面) ---右主桁の基準面を素地調整予定



(桁断面)



※赤色の斜線箇所が施工範囲

(1.1m×1.4m)×(16区画×2(表裏))  
≒ 49m<sup>2</sup>

施工図(未剥離部)

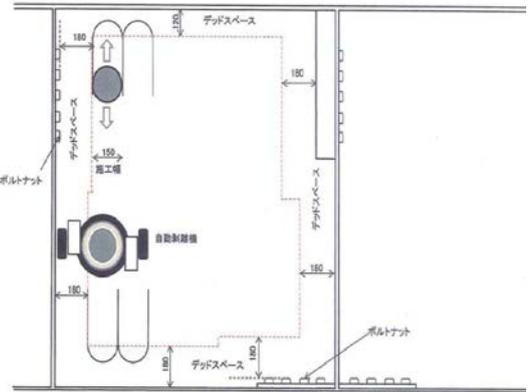


図-3.6 素地調整の試験対象範囲およびロボットによる施工図



図-3.7 橋梁における素地調整作業の状況

④ 素地調整結果

W J 自動走行式素地調整装置による施工面の清浄程度は工場塗装の鉛丹さび止めペイントまで完全に除去され、塗装下地として良好な仕上がりでした。施工後の表面は乾燥しており、翌日でもターニング（戻りさびによる変色）は見られません（**図-3.8**）。

W J 水流束で直接衝撃を受けた箇所は工場塗装時のショットブラスト面の鋼素地がきれいに露出し、前出の鋼構造物塗装設計施工指針（本稿 **2.1 表-2.1 注-1**）に規定する新設時の十点平均粗さ  $70 \mu\text{m} R_z \text{ JIS}$  以下および塗替え時の除錆度 3 を十分に満足する結果が得られました（**図-3.9**）。

なお、塗膜最下層の暗緑色のエッチングプライマーは、ジェット水流束の直撃を受けていない部分が薄く線状に残存している部分も認められましたが、W J が 2 回通過した箇所は完全に除去されます。

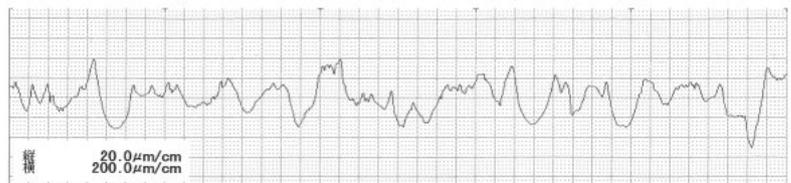
腹板と下フランジとの溶接界面はきれいに塗膜が除去されており隅角部の仕上がり状態も良好でした

（**図-3.10**）。しかしながらジェット水流束が施工面に対して垂直に当たらない部分においては、エッチングプライマーの残存が見られました。特に角度が浅くなる補鋼材面には鉛丹さび止めペイント層の残存が見られました。



**図-3.8 自動走行式素地調整装置による素地調整結果の一例**

エッチングプライマーの残存量が自動走行式素地調整装置と比較して多いのは、施工後の鋼材の濡れ状況から推定して、施工中に鋼材表面に存在する水膜が厚かったため、これが施工効率に影響している可能性が考えられました。



**図-3.9 素地調整後の表面状態ならびに表面粗さプロフィール**



図-3.10 隅角アダプターによる施工結果の一例

⑤施工効率

今回の試験で行った素地調整作業の平均施工速度は 7.47 m<sup>2</sup>/h でした（隅角部施工を除く）。この数値をもとに、準備や装置を懸垂する機器の付け替えなどの時間を考慮した一日あたりの施工量を算出した結果を（表-3.3）に示します。作業の熟練度の向上や施工速度の改善などを図ればさらに施工量を増加させることも可能であると思われます。

表-3.3 施工効率の検討

項目	数量	適用
一日あたりの作業時間	420 分	7 時間
準備・調整時間	- 70 分	
保安用懸垂装置の付け替え	- 35 分	5 分×7 回/日
正味素地調整時間	315 分	5.25 時間
素地調整面積	39 m <sup>2</sup> /日	7.47 m <sup>2</sup> /h×5.25h/日

4 結論

W J 工法および動力工具による素地調整の品質に関して塗膜のばくろ耐久試験を継続的に行い、W J 工法による素地調整を行った塗膜品質の優位性を定量的に示しました。さらに、実際の鉄道橋において、開発した小型のW J 素地調整装置によって施工を行い、その高い素地調整性能を確認すると同時に、飛散や漏洩水がなく非常に衛生的な作業環境が確認することができました。今後の実用化に向けて、橋梁のライフサイクルコストを勘案しつつ補機類の小型化や更なる効率の向上などを検討していく予定です。