

鋼鉄道橋に対する種々の素地調整手法の適用性評価

○和田直樹¹⁾、佐藤和久¹⁾、中山太士²⁾、坂本達郎³⁾

1. はじめに

鋼鉄道橋の塗替え時の素地調整は、動力工具を標準に施工しており、健全と考えられる既存塗膜を残存させている¹⁾が、近年、周辺環境への配慮の観点から、都市部等の鋼鉄道橋においては騒音が生じない作業手法や、粉塵の発生量が少ない作業手法が求められている。また、既存の塗膜には鉛やクロムなどの人体に有害な物質が含まれる場合があり、作業者の安全性確保といった観点からも発生する粉塵量の低減が求められる状況にある。さらに、沿岸付近に架設されて腐食が進行した鋼鉄道橋では、動力工具による素地調整では固着したさびを十分に除去できず、塗装後早期に腐食する事例があり、これに対応可能な素地調整手法の導入が求められている。

上記の課題があるなか、現在、種々の素地調整手法が提案されており、これらの素地調整手法の鋼鉄道橋への適用性を検証しておくことは非常に重要である。

そこで、本稿では、実際に供用中の鋼鉄道橋を対象に、提案されている種々の素地調整手法を試験施工し、各素地調整手法の施工性や塗膜除去性等について検証した結果を報告する。

2. 対象橋りょう

2. 1 橋りょう概要

対象橋りょうは、**図 1** に示す山陰本線に位置する上路プレートガーダ（支間 12.9m、1928 年製作）である。この橋りょうは、日本海からの距離が約 300m であり、**図 2** より分かるように、桁下面の写真から主桁下フランジ下面がほぼ全面に渡り腐食し、桁側面の写真から腹板の一部にも腐食が生じている。



図 1 対象橋りょう（遠景）



(a) 桁側面



(b) 桁下面

図 2 対象橋りょうの腐食状況

2. 2 塗膜概要

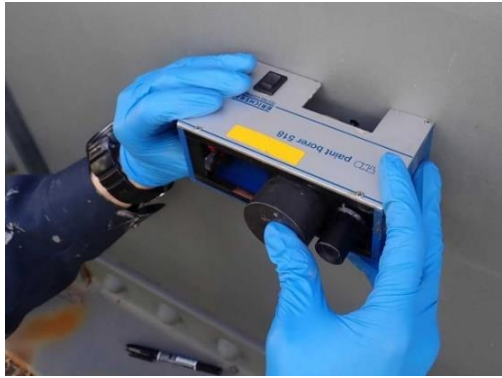
各素地調整手法の特性を把握するためには、事前に塗膜の履歴や膜厚といった塗膜特性について把握しておく必要がある。そこで対象橋りょうの海側および山側主桁の腹板と下フランジを対象とした塗膜調査を実施した。調査項目は塗膜履歴、膜厚の 2 項目とした。それぞれの調査状況を**図 3**に示す。

塗膜履歴は、カット式膜厚計を用いて円錐状に切削した箇所をマクロ撮影し、拡大観察から工場塗装を含む塗装系の塗装回数や適用された塗装系の履歴を推定した。膜厚は塗膜履歴調査の実施箇所の近傍にて、電磁式膜厚計を用いた膜厚測定を行った。測定回数は 5 回とし、それらの平均値を算出した。

1) 西日本旅客鉄道株式会社 〒530-8341 大阪府大阪市北区芝田二丁目 4 番 24 号

2) 日綜産業株式会社 〒103-0014 東京都中央区日本橋蛸殻町 1-10-1

3) (公財) 鉄道総合技術研究所 〒185-8540 東京都国分寺市光町二丁目 8 番地 38



(a) カット式膜厚計



(b) 電磁式膜厚計

図 3 調査状況

2. 2. 1 塗膜履歴調査結果

カット式膜厚計による塗膜断面写真の一例を図 4 に示す。

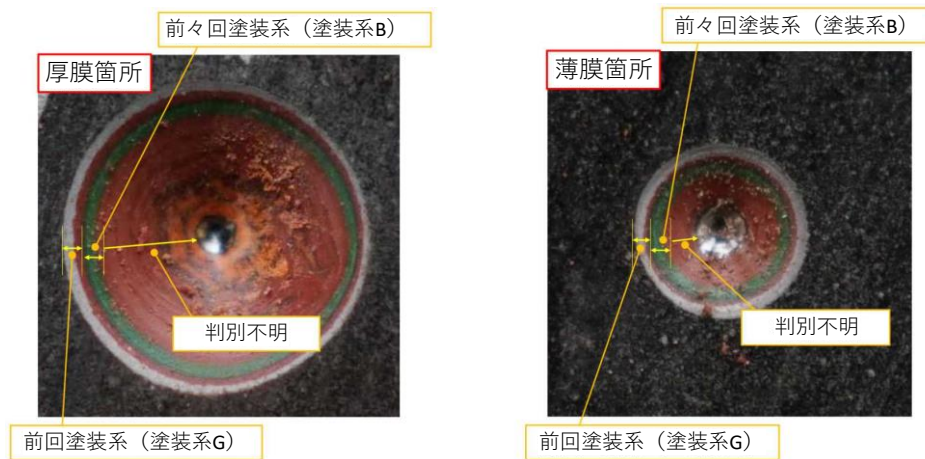


図 4 旧塗膜の状況

前述したように、鋼鉄道橋は健全な塗膜を残して塗替え塗装をすることから、塗膜が厚膜になっている箇所と薄膜になっている箇所がある。塗膜の総厚みや層数は測定箇所によって異なるが、表層からの各層の色相を比較した結果、薄膜箇所についてはいずれも前回および前々回の塗替え施工時の塗膜が存在することが確認された。厚膜箇所ではこれらの塗膜に加えて、層間が明瞭ではないさらに過去の塗膜が存在していた。このうち、鋼材近傍の最下層の塗膜は橙色の色相であった。これは新設塗装時に使用される鉛丹さび止めペイントと推定され、新設時からの塗装系が部分的に残存しているものと推定される。

2. 2. 2 塗膜調査結果

電磁式膜厚計による膜厚測定の結果、薄膜箇所の厚みは概ね $400\mu\text{m}$ 、厚膜箇所の厚みは概ね $800\mu\text{m}$ であった。なお、対象橋りょうの 90%以上の塗膜は厚膜であった。

3. 試験施工概要

3. 1 各素地調整手法の概要

試験施工した素地調整手法は動力工具、ブラスト、高周波誘導加熱、レーザーである。なお、高周波誘導加熱は塗膜を除去する技術であることから、塗膜を除去した後、動力工具による素地調整を実施した。レーザーについては後述するが、本試験施工では固着したさびの除去を目的としたため、動力工具で塗膜と浮きさびを除去した後、レーザーによる素地調整を施工した。

3. 1. 1 動力工具

動力工具は、図 5 に示すように平坦な腹板等についてはディスクグラインダを用い、リベット部に対してはカップワイヤを用いた。孔食箇所素地調整や固着したさびの除去にはエアチッパーを上記工具と併用して用いた。



(a) ディスクグラインダ



(b) カップワイヤ



(c) エアチッパー

図 5 各動力工具の施工状況

3. 1. 2 ブラスト

ブラストは粒子状の研削材を高圧で吹き付ける手法であり、対象物の表面形状によらず、塗膜やさびを破碎・除去することができる。ブラストに用いる機材および施工状況を図 6 に示す。本試験施工では、吐出圧を約 0.7MPa とし、研削材にはフェロニッケルスラグを使用した。また、乾式ブラストと湿式ブラスト（モイスチャーブラスト）の双方を用いた。



(a) ブラスト機器



(b) 施工状況

図 6 ブラスト工法の概要

3. 1. 3 高周波誘導加熱

高周波誘導加熱は、鋼材表面に高周波誘導コイルを当て、鋼材の極表層に流れる誘導電流によるジュール熱で、鋼材界面から塗膜を軟化膨張させて剥離し易くする工法である。

本試験施工に用いた装置および施工状況を図 7 に示す。コイルには表面温度センサーがあり、塗膜面の温度を確認しながら過加熱にならないように施工した。なお、電源は発動発電機 125kVA を使用した。



(a) 使用装置



(b) 施工状況

図 7 高周波誘導加熱の概要

3. 1. 4 レーザー

レーザー照射によって被照射面に付着する物質を熔融、蒸散、熱破壊させるアブレーション現象²⁾を利用したものである。本試験施工では、レーザー技術の中でも塗膜やさびの高い除去効果が期待される手法として、鋼材の表面上の一点に集光された高い強度のレーザービームを高速回転させながら円状に走査(スキャン)させ、表面にある塗膜やさび、金属を瞬間的に熔融、蒸散、熱破壊により除去する工法³⁾を採用した。本試験施工に用いた装置および施工状況を図8に示す。



(a) 使用装置

(b) 施工前の状況

(c) 施工状況

図8 レーザーの概要

なお、塗膜や厚い層状のさびをレーザーのみで完全に除去するには長時間を要することから、今回は作業性を考慮して、動力工具と手工具との併用によって塗膜と浮さびの除去作業を行った後にレーザー照射を実施した。

3. 2 各素地調整手法の適用箇所

主桁の両側面に設けられた垂直補剛材で区分された範囲を1パネルとし、各素地調整手法を適用した。図9に各素地調整手法を適用したパネルを示す。対象は、海側と山側の両主桁の腹板の両面と下フランジとしたが、レーザーは時間の都合上、海側主桁の海側腹板と下フランジとした。各パネルで施工する素地調整手法の替ケレン種別と除錆度を表1に示す。

← 終点方

起点方 →

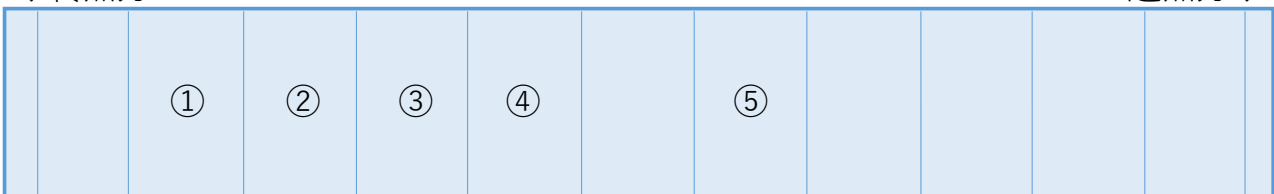


図9 試験施工区分

表1 各パネル番号で実施された素地調整手法の概要

パネル番号	素地調整手法	替ケレン種別	除錆度
①	湿式ブラスト	1	Sa2 1/2
②	乾式ブラスト	1	Sa2 1/2
③	動力工具	1	St3
④	動力工具・手工具+レーザー	1	St3
⑤	高周波誘導加熱+動力工具・手工具	1	St3

なお、表1に示す替ケレン種別とは、劣化した塗膜やさびを除去して鋼素地が露出する面積の目安を区分したものであり¹⁾、替ケレン1では鋼素地の露出面積が約70%以上となる。除錆度とは、腐食箇所

のさびの除去程度を示すものであり、本稿での表記は ISO8501-1 に規定されたグレードに基づく。除錆度 Sa2 1/2 はブラスト後にほとんどさびが残存しない程度、除錆度 St3 は動力工具でさびを完全に除去する程度である。パネル③および⑤は、可能な範囲で除錆度 St3 を目指して施工した。また、レーザーを適用するパネル④では完全にさびを除去することを目標としたが、レーザーによる除錆度を定義されたものが存在しないことから、除錆度 St3 を目標として施工した。

3. 3 対象橋梁

3. 3. 1 作業性

各素地調整手法で用いる工具や機器によって作業時間が異なることから、その作業性を把握するため、各パネルにおける素地調整時間を測定した。対象とする部材の形状や面方向によっても作業時間が異なることが推定されたため、測定範囲を図 10 に示すように、腹板および下フランジ、補剛材とした。なお、補剛材については、対象とするパネルを向いている面を対象とした。

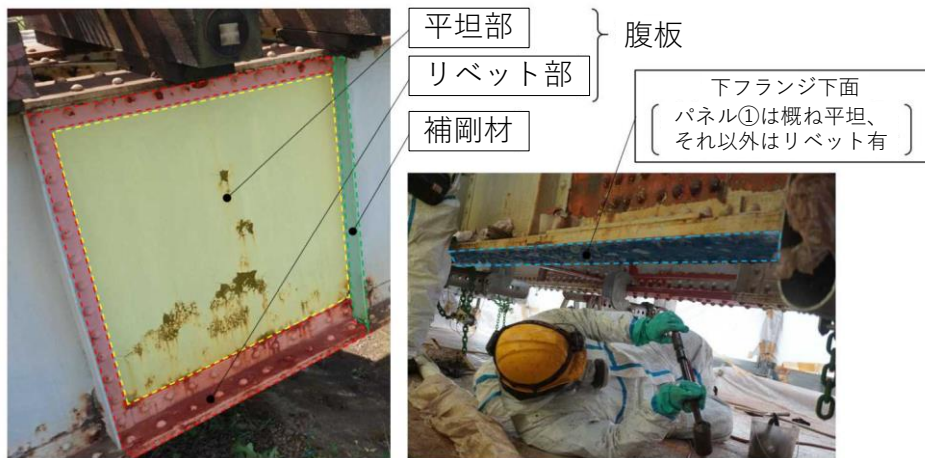


図 10 素地調整時間の測定範囲について

3. 3. 2 騒音

最適な素地調整を検討していくうえでは、周辺環境への配慮が重要であることから、施工時の騒音を計測した。測定機器および測定状況を図 11 に示す。騒音測定は鉄道騒音測定の標準測定位置に合わせ、施工箇所から 12.5m 離れた高さ 1.2m の位置で測定した。



(a) 騒音測定器

(b) 騒音測定状況

図 11 騒音測定

3. 3. 3 鋼材温度および変形

高周波誘導加熱およびレーザーでは、鋼材が高温になることが懸念される。そこで、施工時の安全性を確認するために、サーモグラフィによる鋼材の温度計測をした。図 12 に温度計測状況を示す。また、高温に伴う部材の変形も懸念されたことから、図 13 に示すように、補剛材間に水糸を張り、これを基

準として腹板までの距離を測定し、施工時の腹板の変形を測定した。



図 12 鋼材温度測定状況



図 13 腹板の変形測定状況

4. 調査結果

4. 1 各素地調整手法の作業性

各素地調整手法の作業性測定結果を表 2 に示す。ここでは各パネルの腹板と補剛材、下フランジ下面に対して、表 1 に示す機器または工具を使用した際の作業時間と作業速度を示している。なお、動力工具については種々の工具の総使用時間としている。

表 2 各素地調整手法の作業速度

パネル番号	素地調整手法	作業時間 (時間 分 秒)	作業面積 (m ²)	作業速度 (m ² /h)
①	湿式ブラスト	1:59:18	8.4	4.2
②	乾式ブラスト	2:03:34	9.0	4.4
③	動力工具	7:50:28	9.0	1.1
④	動力工具・手工具+レーザー	7:53:40	5.3	0.7
⑤	高周波誘導加熱+動力工具	5:02:28	9.0	1.8

4. 1. 1 各素地調整手法の作業速度について

表 2 より、パネル全体の作業速度で比較すると、速度が速い順に以下の通りとなった。

パネル②(乾式ブラスト) > パネル①(湿式ブラスト) > パネル⑤(高周波誘導加熱+動力工具) > パネル③(動力工具: 替ケレン 1) > パネル④(動力工具・手工具+レーザー)

4. 1. 2 各素地調整手法のさびの除去程度について

パネル③(動力工具)とパネル④(動力工具・手工具+レーザー)ではさびを完全に除去する(除錆度 St3)ことを目標とした。平滑部等ではさびを除去できていたが、下フランジ下面等、施工姿勢が困難な箇所では図 14 に示すようにさび(赤茶色部)が残存するなど、除錆が困難であった。



(a) パネル③(動力工具)



(b) パネル④(動力工具・手工具+レーザー)

図 14 パネル③とパネル④におけるさび残存箇所

また、パネル⑤（高周波誘導加熱+動力工具）については、パネル③と同様にさびの除去が困難な箇所が存在した。また、塗膜を除去可能と考えられる温度である 150℃程度まで鋼材を加熱してさびの除去を試みたが、さびを除去することはできなかった。一方、パネル①（湿式ブラスト）とパネル②（乾式ブラスト）では、いずれも所定の除錆度を達成し、さびが除去されたことが確認された。

4. 1. 3 各素地調整手法の塗膜の除去程度について

さびの除去程度は各素地調整手法によって異なったが、塗膜についてはいずれの素地調整手法についてもほぼ完全に除去できることが確認された。

4. 2 騒音測定結果について

騒音測定結果を表 3 に示す。この表に示す値は最大値である。この表より、騒音は動力工具が最も大きく、周辺への影響を考慮すると高周波誘導加熱が最も有利となることが確認された。なお、高周波誘導加熱は作業に使用する発電機の音量であった。

表 3 騒音測定結果

工法	騒音 (dB)
動力工具	80.0
乾式ブラスト	76.2
湿式ブラスト	75.9
高周波誘導加熱	61.9
レーザー	67.8

4. 3 鋼材温度の測定結果について

サーモグラフィによる鋼材温度測定の結果、高周波誘導加熱施工時の最高温度は 301℃、レーザー施工時の最高温度は 270℃で、高周波誘導加熱の方がレーザーよりも高かった。その他特徴として、高周波誘導加熱は温度が広範囲に高くなるがレーザーは狭い範囲で高くなること、また、高周波誘導加熱に比べてレーザーは短時間で高温になることが確認された。

最高温度が 300℃程度であり、鋼材の変態点を超えるような温度になっていないことから、高周波誘導加熱およびレーザー施工による鋼材の材質変化への影響はないと考えられる。

4. 4 鋼材の変形測定結果について

高周波誘導加熱およびレーザー施工時の主桁腹板の変形測定位置を図 15 に示す。

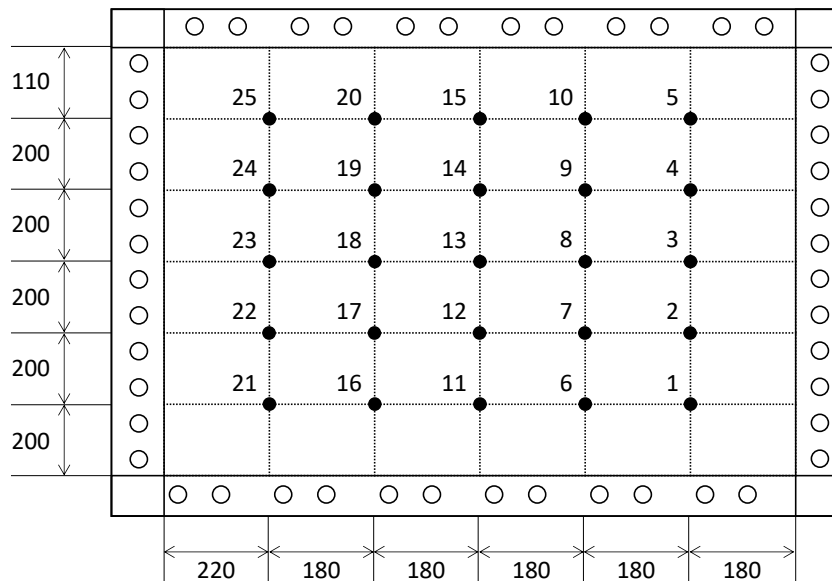


図 15 鋼材の変形測定位置

腹板の 25 点に関して、施工前後の変形量の測定を実施した。施工時の変形は高周波誘導加熱で最大 10mm、レーザーで最大 5mm であり、鋼鉄道橋の腹板の制作誤差 4.4mm (腹板高さ/250)⁴⁾ を超えていたが、施工後は徐々に変形が戻り、施工 2 時間後には高周波誘導加熱で最大 5mm、レーザーで最大 2mm となり、最終的には腹板製作誤差以内に戻った。以上のことより、高周波誘導加熱およびレーザーによる塗膜除去方法は施工時に変形が生じるものの、施工後には戻ることから施工に問題はないと考えられる。

5. まとめ

本稿では、供用している鋼鉄道橋を対象に、提案されている種々の素地調整手法を試験施工し、各素地調整手法の施工性や塗膜除去性等について検証した。得られた成果を要約すると以下のとおりである。

- (1) 各素地調整手法の作業性を比較した結果、速い方から順に、乾式ブラスト、湿式ブラスト、高周波誘導加熱+動力工具、動力工具、動力工具・手工具+レーザーとなった。
- (2) 湿式ブラストと乾式ブラストでは目標の除錆度でさびが除去できたが、動力工具やレーザー、高周波誘導加熱では一部の箇所では目標の除錆度には達しなかった。
- (3) さびの除去程度は各素地調整手法によって異なったが、塗膜についてはいずれの素地調整手法についてもほぼ完全に除去できた。
- (4) 騒音測定結果から、騒音は動力工具が最も大きく、乾式ブラスト、湿式ブラスト、レーザー、高周波誘導加熱の順となった。周辺への騒音では高周波誘導加熱が最も有利になることが分かった。
- (5) 鋼材温度の測定結果から、最高温度は高周波誘導加熱の方がレーザーよりも高く、特徴として高周波誘導加熱は温度が広範囲に、レーザーは狭い範囲で高くなることが分かった。また、いずれの工法も最高温度が 300°C 程度であり、高周波誘導加熱およびレーザーの施工による鋼材の材質変化への影響は小さいことが確認された。
- (6) 鋼桁の変形測定結果より、施工時の変形はレーザーで最大 5 mm、高周波誘導加熱で最大 10 mm であり、施工後は徐々に変形が戻ることが確認された。
- (7) 以上の結果から、ブラストは作業速度や除錆度の観点から有効であること、また、高周波誘導加熱は騒音が小さいことから、環境等周辺への配慮が必要な箇所では有効であることが確認された。一方で、レーザーは実用面では厳しいものの、今後の開発次第では実橋りょうで適用できる可能性が示唆された。

謝辞

本施工に際し、極東メタリコン工業株式会社様、ジェミックス株式会社様、株式会社トヨコー様には多大なるご協力を賜りました。ここに謝意を申し上げます。

参考文献

- 1) (公財)鉄道総合技術研究所：鋼構造物塗装設計施工指針、2013
- 2) 大脇桂：レーザクリーニング装置の適用 -レーザクリア紹介-、溶接技術 No.62 pp.61-64、2014
- 3) 藤田和久、豊澤一晃、沖原伸一郎、前橋伸光、高原和弘、秋吉徹明：レーザクリーニングによる鋼構造物のメンテナンス、レーザー研究 Vol.45、No.7 pp.418-422、2017
- 4) (公財)鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 鋼・合成構造物、2009.7