

## 腐食した鋼桁端部への Cold Spray 防食技術に関する実証

Verification test of Cold Spray corrosion protection technology for corroded steel bridge girder ends

日和裕介<sup>†</sup>, 下里哲弘\*, 加藤祐介\*\*, 小野秀一\*\*\*, 木村雅昭\*\*\*\*, 中野麻衣子\*\*\*\*\*  
Yusuke Hiwa, Tetsuhiro Simozato, Yusuke Kato, Shuichi Ono, Masaaki Kimura, Maiko Nakano<sup>†</sup>修 (工), 首都高技術株式会社, 構造管理部 (〒105-0001 東京都港区虎ノ門 3-10-11)

\*博 (工), 琉球大学教授, 工学部工学科 (〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町千原 1)

\*\*修 (工), 日本製鉄株式会社, 技術開発本部鉄鋼研究所 (〒660-0891 兵庫県尼崎市扶桑町 1-8)

\*\*\*博 (工), (一社) 日本建設機械施工協会 施工技術総合研究所 (〒417-0801 静岡県富士市大淵 3154)

\*\*\*\*東京ファブリック工業, 橋梁事業部 (〒163-0429 東京都新宿区西新宿 2-1-1)

\*\*\*\*\*修 (工), 株式会社横河ブリッジ, 営業本部 (〒541-0048 大阪市中央区瓦町 4-3-7)

Bridge girder ends were the major weak points against corrosion. Therefore, it is necessary to develop the anticorrosion technique for them. In this study, we focused on Cold Spray technique, which can form a metallic film, as a corrosion protection film-forming method. In this study, we applied the mixed particles of zinc particles and alumina particles to the corroded steel bridge girder ends in the Cold Spray method to verify the corrosion protection performance and field applicability. Cold Spray Corrosion protection technology was applied to the corroded steel bridge girder ends, and corrosion monitoring was performed to verify the effectiveness in a corrosive environment.

*Key Words: corrosion, cold spray, corrosion protection, metallic film*

キーワード: 腐食, コールドスプレー, 防食, 金属皮膜

## 1. はじめに

近年, 我が国では 1960 年代の高度経済成長期に膨大に建設された社会基盤施設の経年劣化が顕著になってきており, 持続可能な社会基盤施設の維持管理が重要な課題の一つとなっている。その社会基盤施設の一つである鋼橋の維持管理上の課題として腐食と防食がある。鋼橋の腐食は桁端部で早期に激しく発生しやすく, その理由は伸縮装置からの漏水や土砂堆積, 桁端部の閉塞空間の湿気や塩分付着などである<sup>1)2)</sup>。また, 桁端部では塗装補修後に早期の再腐食が生じやすい<sup>3)</sup>。その再腐食の原因は桁端部の構造的特徴にあり, 主桁, 端横桁及び支承部などの部材交差部が多数あり, 滞水, 塩分付着, 及び高湿度環境になりやすいためである。さらに, 主桁下フランジと支承部あるいは橋台との位置関係で狭隘な部位となりやすいため, さび除去作業や塗替え作業に対する施工困難な環境になっていることが主要因である。よって, 補修塗装後の残存さびを起点とする早期の再腐食が起こ

りやすく, 孔食や部材破断への進展が懸念され, 鋼橋の安全性に影響を及ぼす支点部の座屈やウェブのせん断座屈を引き起こすリスクがある<sup>4)-10)</sup>。したがって, 既設鋼橋を安全に長期間安心して使用するためには, 腐食した部位のさびを完全に除去する技術開発, あるいは, ある程度の残存さびを許容できる防食技術の開発が求められる。

以上の背景の下, 既設鋼橋の桁端部に対する防食技術の研究が活発に実施されている。例えば, 重度な局部腐食に対する素地調整方法の組み合わせによる防食性能向上の提案<sup>11)</sup>, アルミニウム・マグネシウム合金溶射技術<sup>12)-14)</sup>, アルミニウム・マグネシウムにカルシウムを添加した金属溶射合金<sup>15)</sup>の開発, 鋼材表面で生成されたさびを安定さびへ変換し防食層とする塗料<sup>16)</sup>, 塗料にセラミック粉末を入れ 3 種ケレンで超厚膜施工する防食技術<sup>17)</sup>などの研究開発が行われている。しかしながら, 鋼桁端部のように構造上の制約により様々な作業姿勢でのさびの除去や塗装の施工条件において, 残存さびを有する状態下でも有効な防食技術は未開発である。

筆者らは, 高速微粒子衝突による成膜技術で作動ガス

<sup>†</sup> 連絡著者 / Corresponding author

E-mail: hiwa@shutoko-eng.jp

温度が材料粒子の融点より低温で、強固な密着力を特徴とする金属皮膜の形成が可能な低温溶射技術 (Cold Spray 表面処理技術, 以下 CS) を鋼橋へ応用した防食技術の研究開発を行っている<sup>18)-20)</sup>。CS 技術は、作動ガス種類、ガス圧力により高圧型 (1MPa 以上) と低圧型 (1MPa 以下) に、ガス温度により高温型 (最大で 900°C 程度) と低温型 (最大で 400~600°C 程度) に分類され、その中で携帯型も含め大きく 6 つの形式に種別<sup>21)</sup>されている。本研究では、橋梁現場に携帯可能で、亜鉛 (融点 420°C) などの低融点金属を圧縮空気で噴出可能な低圧低温携帯型を採用した。既往研究<sup>18)</sup>では、赤外線サーモグラフィにより低圧低温携帯型 CS 使用時の基材側の温度計測を実施し、瞬間使用温度の最高温度が 400°C 以下であることが確認されている。本 CS では鋼の主成分である鉄の自然電位より卑な金属である亜鉛粒子とブラスト処理材に使用されるアルミナ粒子を混合した亜鉛アルミナ混合粉体を適用し、残存さびをある程度許容しながら防食性能を確保することを研究開発コンセプトとして実験的研究を行っている。さび鋼板面に対し混合粒子を用いた CS の狙いは、密着力の弱いさびはアルミナ粒子で除去し、固着しているさびは残存を許容し、緻密な亜鉛粒子の堆積による環境遮断と犠牲防食効果でさびの進展を抑制することである。図-1 に残存さび面上の CS 皮膜断面を示す。

既往研究<sup>19)</sup>では、亜鉛アルミナ混合粉体の配合比率に対する CS 皮膜の成膜性、密着力及びさび除去の関係性を検証している。検証では、配合比率を 10:90 から 10% ずつ変化させ、皮膜厚、密着力及びさび除去度の計測を行っており、大気暴露で発生させたさび厚約 100 $\mu$ m のさび面上で、さび除去が行われ、密着力が新材鋼板と同等値となる亜鉛アルミナの配合比率は、40:60, 50:50, 60:40 の 3 配合であり、その中で 60:40 が密着力、さび除去を保持しながら防食皮膜厚が最大となる最適配合比率と提案している。

また、既往研究<sup>20)</sup>では、大気暴露で発生させたさび鋼板に対し、2 種ケレン後に残存したさび厚約 100 $\mu$ m を有する鋼板面に亜鉛アルミナ混合粉体の配合比率 60:40 で 100 $\mu$ m 以上の皮膜厚が成膜された CS 施工鋼板を、乾湿繰り返し複合サイクルによる腐食促進試験と自然電位の経時変化による防食性能の評価を実施している。外観観察と SEM-EDX 断面分析により、残存さびの進展はないことが確認されている。また、自然電位経時変化の測定結果からも、CS 皮膜は、促進試験後も卑な電位を維持し、残存さびを有する状態でも十分な防食性能を発揮できることが確認されている。これらの結果より、鋼材の防食性の確保に必要な防食膜厚を 100 $\mu$ m 以上として、密着力とさび除去が満足できる配合を決定している。

以上の既往研究より、残存さび鋼板面上の CS 皮膜は、亜鉛アルミナ混合粉体の配合比率が、皮膜厚さ、密着力及びさび除去の 3 つの特性に影響し、その 3 つの特性により高い防食性が発揮できる。したがって、CS 皮膜の性

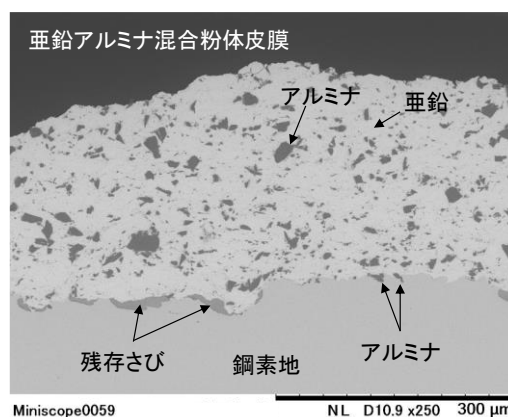


図-1 さび鋼板面での CS 皮膜断面の SEM 観察結果

能は、配合比率 (40:60, 50:50, 60:40) で 100 $\mu$ m~150 $\mu$ m の CS 皮膜が成膜されることで、密着性とさび除去効果の高い防食皮膜が形成できる。

しかしながら、既往研究では、CS 施工の制約条件のない室内試験で実施した結果である。そこで、本研究では、既設鋼橋の桁端部を対象として、現場施工条件を模擬した条件下で CS 防食技術の適用性の検証と実鋼橋への現場適用性を明らかにすることを目的とし、既設鋼橋の桁端部に特有な様々な施工角度や狭隘面の施工制約条件下での成膜性、密着力及びさび除去効果が得られる適用条件及び実鋼橋への試験施工による CS 技術の現場適用性の検証を行った。また、施工後の再腐食の有無や経時変化のモニタリングを行い、腐食環境下における防食技術の有効性の検証を行った。

## 2. 桁端部の施工条件に対する CS 技術の性能検証

桁端部は構造部材が近接する部位や垂直・水平部材が交差し、狭隘で複雑な構造空間となっている。そのような箇所は、CS 施工上の制約条件となっている。実鋼橋での施工に向けて、既往研究で得られた CS 皮膜性能を基準として、施工時の許容角度の検討や、狭隘部などの機器設置が困難箇所に対する開発品 (以下、エクステンション) を用いた場合の適用条件について検討を行った。また、実鋼橋での適用においては、施工能率も重要な指標であるため、施工能率の向上についても検討を行った。

### 2.1 施工効率化のためのノズル径の検証

CS のノズル口径は 5mm (以下、オリジナルノズル) と小口径である。よって本節では、先ず、CS 工法の単位施工面積を向上し施工効率の向上を図ることを目的に、ノズル口径を 7mm に拡張したノズル (以下、拡張ノズル) の性能を検証する。ノズル径を大きくすることで、噴射ガス流速の低下が生じるため、口径拡張による皮膜粒子の衝突速度に及ぼす影響について粒子速度測定によって検証した。その際の、CS 皮膜形成に及ぼす影響について膜厚計測と密着力測定によって検証した。

(1) 試験条件と性能評価方法

表-1に試験条件概要を示し、図-2にノズル口径5mmと7mmの外観状況を示す。試験に使用した鋼板はSS400の新材鋼板を用いた。粒子の速度測定は、ダイオードレーザーストロボ利用高速飛翔粒子解析装置を用いて実施した。本装置は、高感度CCDカメラとコンパクトダイオードレーザーの組合せにより、瞬時に飛翔粒子の速度及び粒子径を測定する解析装置である。CSのハンドガンには噴射ガスを加温するヒーターが内蔵されており、低温設定では500℃、高温設定では600℃で加熱される。噴射ガスの加熱効果の検証のため、それぞれのパラメータで粒子速度計測を行った。CS皮膜厚は、1μmの分解能を有する電磁誘導式膜厚計を使用した。膜厚測定は、1pass成膜時の成膜幅中央の最大膜厚（n=4の平均値）で評価した。密着力はアドヒージョンテスタ（引張速度1.0MPa/s）による垂直引張試験を行った。

(2) 試験結果及び考察

図-3に各ノズルの平均粒子速度を示す。(a)に示すように、オリジナルノズルを用いた噴射ガスの加熱効果の検証では、噴射ガスの加熱により、ガス体積が膨張し流量が増加することで流速が上昇し噴出している状況が確認できる。また、CS機器の低温（500℃）設定で加熱することで、音速以上の流速となっていることも確認できた。次に(b)に示すように、ガス温度が同一条件では、噴出する面積が広い拡張ノズルの粒子速度はオリジナルノズルに比べ低くなり、成膜時の粒子の衝突速度は低下している。

図-4に皮膜厚測定と密着力試験の結果を示す。オリジナルノズルのCS皮膜は防食性能の目標膜厚100μm以上成膜されている。密着力については、3測点中の1測点でドリーと接着剤の界面で剥離し、2測点でドリーが皮膜から剥がれる前にアドヒージョンテスタと離れてしまい密着力を計測できなかった。3測点ともにCS皮膜内や鋼材面での破壊はなく、鋼材とCS皮膜の密着力を示す値ではないが、27.0MPa以上と予測を行った。よって、既往の研究結果<sup>19)</sup>と同様に、鋼材面とCS皮膜の界面では高い密着力が生じていることが推定できる。拡張ノズルのCS皮膜厚は200μm以上成膜されている。口径の拡張により、オリジナルノズルと比較し約1.6倍厚く成膜され成膜効率が向上している。密着力については、接着剤界面破壊とCS皮膜内の凝集破壊の混合した破壊形態となっている。3測点ともに鋼材面での破壊はない。密着力がオリジナルノズル使用時より低下した理由としては、口径が拡張され成膜効率が向上しCS皮膜厚が厚くなり、皮膜内の凝集破壊が生じたと考えられる。しかし、既往研究<sup>19)</sup>で、密着力が著しく低下する状態は、鋼材面とCS皮膜の界面にさびが残存し、さび層の凝集破壊により剥離した場合であった。本試験結果からは、そのような低下現象ではなく鋼材面とCS皮膜の界面には高い密着力が生じていることがわかる。

表-1 試験条件概要

CS施工条件	垂鉛アルミナ混合粉体：配合比率60：40
	施工速度：5mm/s
	施工面との距離L：15mm
	施工面との角度θ：90°
	ヒーター温度：低温(500℃)、高温(600℃)

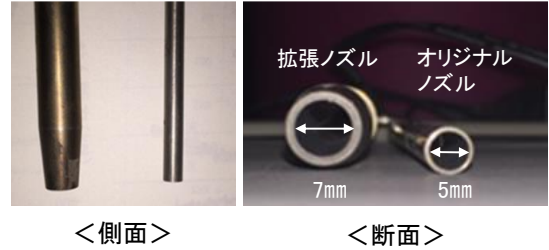


図-2 CSノズル外観

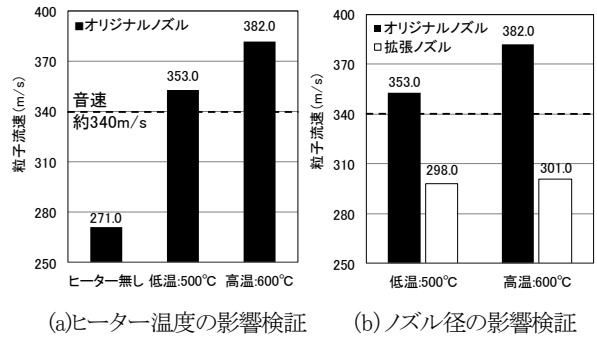


図-3 粒子速度の計測結果

ノズル種類	膜厚計測 (μm)		密着力試験 (MPa)		
	計測値	平均	1	2	3
オリジナルノズル	187	146.5	27.0	計測不可	計測不可
	134				
	142		接着剤界面破壊	ドリー破壊	ドリー破壊
	123				
拡張ノズル	174	227.8	19.0	27.0	21.4
	231				
	256		一部皮膜凝集破壊	一部皮膜凝集破壊	接着剤界面破壊
	250				

図-4 膜厚計測結果と密着力試験結果

以上のことより、CS皮膜形成は、皮膜に使用する材料によって臨界値以上の衝突速度（臨界速度）が必要であり、臨界値以下の粒子衝突では堆積が生じない特徴があるが、今回検証した拡張ノズルは、口径拡張で粒子速度が低下したが、垂鉛粒子の臨界速度は満足しCS皮膜が形成したと考えられる。また、口径拡張により金属粒子の噴出量が多くなったため厚膜の成膜が可能になった。一方で、密着力については若干の低下はみられたが、皮膜の剥離破壊形態から皮膜と鋼材面の密着性には問題がないと考えられる。したがって、拡張ノズルにおいても、

配合比率 60:40 において膜厚 100 $\mu\text{m}$  を満足することで、皮膜の性能が保証できることが確認された。

ノズル口径の拡張における施工効率化の評価として、CS 皮膜幅はノズル口径とおおよそ同一であるため、5 mm 幅から 7 mm 幅へ拡張されたと考えられる。CS 皮膜厚 100 $\mu\text{m}$  でノズル径 5 mm と 7 mm の施工能率を試算すると、ノズル径 5 mm は約 900 $\text{cm}^2/\text{h}$  であったのに対し、7 mm 幅は約 1,300 $\text{cm}^2/\text{h}$  と約 1.4 倍に施工能率の向上が想定される。さらに、口径拡張により 1 層が厚く成膜可能となったため、100 $\mu\text{m}$  以上の CS 皮膜面を形成する際の施工重ね部のラップ長を短く設定できることで有効施工面積がさらに向上し施工効率の向上が図れる。

なお、以降では本節で検証した拡張ノズルを用いて検証する。

## 2.2 スプレー角度の検証

CS 工法は、粉体を専用ノズルにより加速させて基材面に衝突させ皮膜を形成する。そのため、衝突エネルギーの損失を考慮すると基材面に対する粉体の衝突角度が重要になると考えられる。本節では、ノズル施工角度が CS 皮膜形成に及ぼす影響について膜厚測定とさび鋼板面のさび除去によって検証した。

### (1) 試験条件と性能評価方法

拡張ノズル先端と供試体との角度を 90°~45°まで変化させ、CS 施工を実施した。試験に使用したさび鋼板は、SM400 材を琉球大学大気暴露場（年間平均気温 23°C、相対湿度 79.6%、飛来塩分量 0.12mdd、腐食速度 0.01 $\text{mm}/\text{y}$ 、離岸距離約 2.0 $\text{km}$ ）で大気暴露したさび厚約 100 $\mu\text{m}$  の鋼板を使用した。CS 施工に用いた粉体は、既往研究<sup>19)</sup>で防食皮膜の目標膜厚 100 $\mu\text{m}$  以上を確保でき、さび除去率 90%以上で高密着となる配合条件であった亜鉛対アルミナの配合比率 40:60、50:50、60:40 の 3 配合を用いた。CS 施工後の各試験片に対して SEM 断面観察を実施し、断面観察により各施工角度条件の膜厚を計測と皮膜と鋼材面のさび除去を確認した。

### (2) 試験結果及び考察

図-5 に施工角度 90°時の最大膜厚を基準としたときの各施工角度における膜厚減少率の関係を示す。図中には各配合の近似曲線を示している。施工角度 90°を膜厚基準にすると、検証を実施した全ての配合において、角度が下がるにつれ、膜厚減少率の傾向が同程度となることが確認された。図-6 に施工角度 70°、60°の SEM 断面観察結果を示す。SEM 断面観察では、皮膜厚が 40%以下に減少した施工角度 70°、60°の場合においても、鋼材と皮膜の境界面では、初期さびが除去され亜鉛皮膜が鋼板素地上に密着し成膜されていることが観察できる。この関係は皮膜の配合比率を変えても同様であった。

上記の結果より、施工時のスプレー角度による衝突エネルギー損失は、亜鉛皮膜の成膜厚に与える影響が大きいと考えられる。さび除去については、スプレー角度の

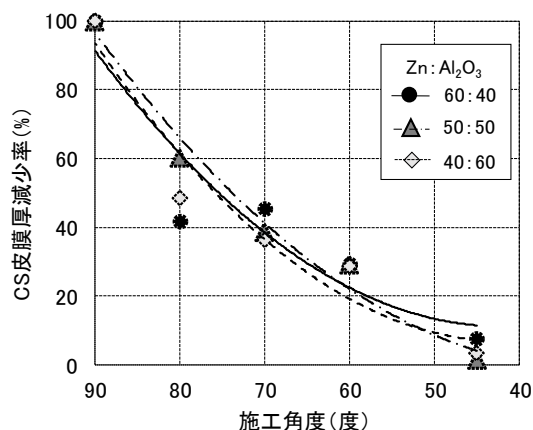
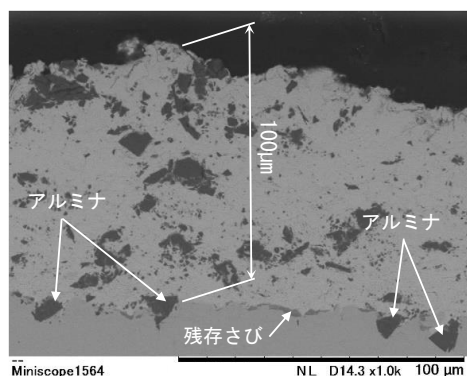
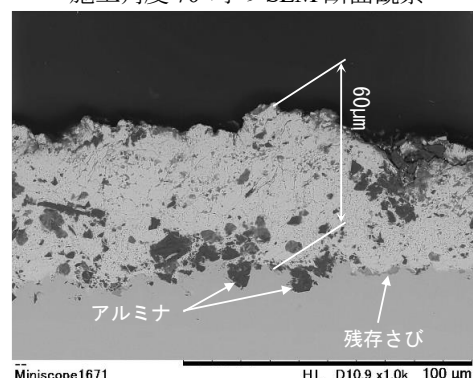


図-5 角度別膜厚減少率と SEM 断面観察結果



施工角度 70°時の SEM 断面観察



施工角度 60°時の SEM 断面観察

図-6 CS 皮膜の SEM 断面観察結果

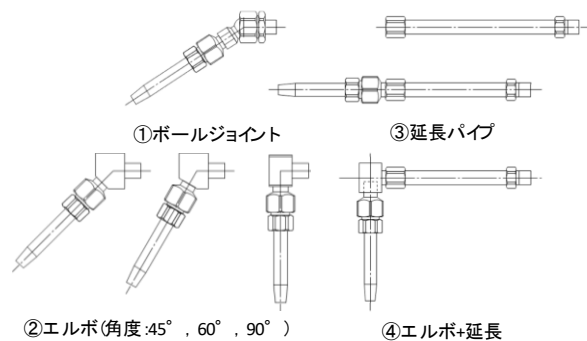


図-7 開発した各種エクステンション

変化による影響が小さいと考えられる。これは、アルミナ (Hv 硬度 1,800 程度) が鋼材 (Hv 硬度 120 程度) の 15 倍硬い材料であり、衝突角度の変化によるエネルギー損失が生じていてもさび除去には影響がない範囲であったと推察できる。

皮膜の厚さは、施工角度 70° で目標皮膜厚 100 $\mu$ m が確保できており、鋼材面のさび除去も良好に行われていることより、許容施工角度は 70° とした。

### 2.3 エクステンション使用時の検証

支承周りなどの狭隘な施工条件下での高耐久な CS 皮膜形成を目的に、ノズル角度や施工距離の変化が可能なエクステンションを開発した。図-7 に開発したエクステンションを示す。これらを組み合わせることで、スプレーノズルの適用範囲は格段に向上する。しかしながら、エクステンションを装着することで、ガス速度の低下、空気漏れによる圧力低下、エクステンション内部の圧力損失等の皮膜粒子の衝突速度の低下が懸念される。本節では、エクステンション装着の適用条件を CS 膜厚測定によって検証した。

#### (1) 試験条件と性能評価方法

表-2 に試験条件と試験パラメータを示す。本試験では、エクステンション種類を変化させ、同一の施工条件にて CS 施工を実施した。CS には、配合比率 60 : 40 の亜鉛アルミナ混合粉体を使用した。試験に使用した鋼板は SS400 の新材鋼板を用いた。CS 装置のハンドガンのヒーター温度は低温設定の 500 $^{\circ}$ C、高温設定の 600 $^{\circ}$ C とし、それぞれの設定温度にて施工を実施した。エルボタイプのエクステンションに関しては、最も厳しい成膜条件の角度 90 $^{\circ}$ エルボを対象に性能検証を実施した。各種エクステンションの基本性能の膜厚は、1 $\mu$ m の分解能を有する電磁誘導式膜厚計を使用した。図-8 に示すように、CS 皮膜面を形成する際は、1pass の最大膜厚と実際の CS 重ね部の膜厚はほぼ同じとなる。したがって、本試験における膜厚測定は、1pass 成膜時の成膜幅中央の最大膜厚 (n=3 の平均値) で評価した。CS 皮膜の目標膜厚は 100 $\mu$ m 以上とした。

#### (2) 試験結果及び考察

図-9 に各種エクステンション装着時の膜厚測定結果の平均値 (n=3) と測定値の標準偏差を示す。低温設定 (500 $^{\circ}$ C) 時では、全てのエクステンションで目標膜厚を下回り、測定値がばらつく傾向が確認された。高温設定 (600 $^{\circ}$ C) 時では、膜厚の向上が認められ、測定値の標準偏差が最大 45% となり、ばらつきも小さくなる傾向が確認された。よって、高温設定にすることでエクステンション装着によるガス速度低下、ガス圧力低下等のエネルギー損失が生じていても、CS 皮膜の成膜に必要な条件を満足できており、成膜性が安定していると考えられる。

各種エクステンションによる CS 皮膜厚について、延長パイプのエクステンションにおいて、目標膜厚 100 $\mu$ m

表-2 エクステンションの適用性検証の試験条件

ノズル	拡張ノズル (形状: 直線型, $\phi=7$ mm)
エクステンション	①ボールジョイント (最大角度 66 $^{\circ}$ ) ②90 $^{\circ}$ エルボ ③延長パイプ ④90 $^{\circ}$ エルボ+延長
CS施工条件	亜鉛アルミナ混合粉体: 配合比率 60 : 40 施工速度: 5mm/s 施工面との距離 L: 15mm 施工面との角度 $\theta$ : 90 $^{\circ}$ ヒーター温度: 低温 (500 $^{\circ}$ C), 高温 (600 $^{\circ}$ C)

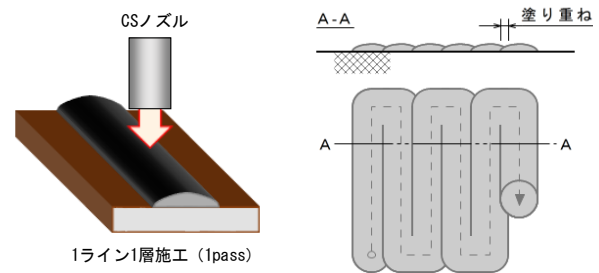


図-8 CS 皮膜面の施工方法

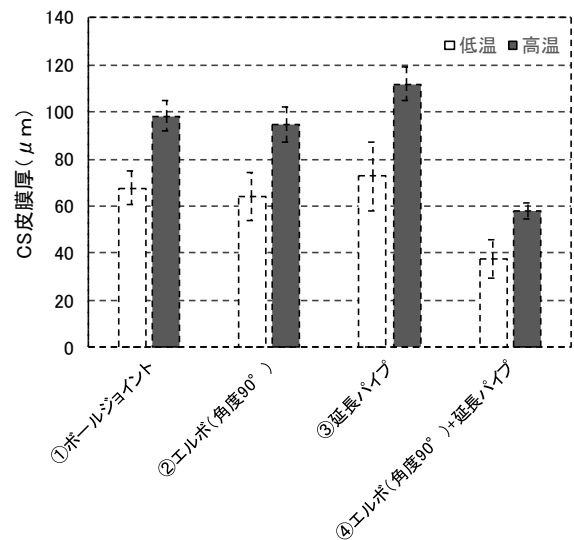


図-9 各エクステンション装着時の平均膜厚

を満足し、ボールジョイント及び90 $^{\circ}$ エルボにおいても、データのばらつきの範囲で 100 $\mu$ m を満足できていることを確認した。一方、90 $^{\circ}$ エルボ+延長パイプの組み合わせ使用時には、約 60 $\mu$ m の膜厚であり、目標膜厚を下回る結果となった。これは、複数のエネルギー損失による衝突速度低下に起因する亜鉛皮膜の成膜効率の低下によるものと考えられる。

90 $^{\circ}$ エルボ+延長パイプのエクステンション組み合わせ使用時は、そのエクステンションの構造上の特徴として、特に支承周りの下フランジ下面などの狭隘施工箇所への適用が見込まれる。本研究では、現場適用を見据えた施工効率化の観点で、1 層施工にて目標性能が確保できる施工条件の検証を実施している。しかし、狭隘施工箇所

は1層施工で皮膜厚の確保が難しい場合が想定される。そのような箇所では要求皮膜厚を得るためには、ノズル移動速度の低速化や重ね施工のような衝突エネルギー損失を補完する施工上の工夫手法が考えられる。

上記の結果より、エクステンションを現場適用する際には、単体のエクステンション使用時は、高温設定(600℃)で、目標皮膜厚100μmが確保できており、性能が確保されていることが確認できた。エクステンション組み合わせ使用時は、エネルギー損失の影響が成膜効率に影響を与えるため、ノズル移動速度の低速化や重ね施工のような施行上の工夫を行い、膜厚管理を行う必要があることを確認した。

## 2.4 施工時のノズル移動速度の向上による効率化の検証

CS工法は、ノズルの移動速度(以下、施工速度)が速くなり停滞時間が短くなると成膜性が低下する。これまでの実証実験では施工速度を5mm/sで目標膜厚100μmを十分満足する結果が得られている。しかし、施工速度を上げることで施工の効率化が図れることが期待できる。そこで本節では、施工速度をパラメータとして、CS膜厚測定と密着力で検証した。

### (1) 試験条件と性能評価方法

表-3に試験条件と試験パラメータを示す。本試験では、施工能率向上の検証を目的とするため、試験パラメータは施工速度5, 10, 15mm/sの3条件を選定した。施工速度は写真-1の半自動化施工装置により制御した。鋼板は、琉球大学暴露試験場で大気暴露したさび厚約100μmの鋼板を使用した。配合比率60:40の亜鉛アルミナ混合粉体を用いて各施工速度にてCS施工を実施し、その皮膜厚を測定した。膜厚測定は、1pass成膜時の皮膜幅中央の最大膜厚(n=3の平均値)で評価した。目標膜厚は100μm以上とした。密着力測定は、3点の平均値を密着力とした。

### (2) 試験結果及び考察

図-10に施工速度と皮膜厚さの関係を示す。施工速度5mm/sでは、CS施工による皮膜厚さが100μm以上と良好であった。一方、施工速度10mm/s以上では、皮膜厚さが低下する傾向が認められた。これは、施工速度が上がることで停滞時間が短くなり単位面積当たりの粉体供給量が低下するためであると考えられる。実験の結果、施工速度5mm/sは目標膜厚100μmを満足したが、10mm/sと15mm/sと速度を2倍3倍とあげると、膜厚100μmを満足しなかった。また、施工速度と膜厚は反比例関係にはなかった。その理由としては、CS機器のパウダー供給との関係があると考えており、今後、供給装置の改良を行う必要がある。よって、本研究での現場実証では5mm/sを適用する。

図-11に施工速度5mm/sと10mm/sの密着力試験結果を示す。平均密着力も施工速度が上がるとして低下傾向にあることが確認できる。試験後の剥離破壊形態

表-3 施工速度検証の試験条件

ノズル	拡張ノズル(形状:直線型, φ=7mm)
施工速度	① 5mm/s
	② 10mm/s
	③ 15mm/s
CS施工条件	亜鉛アルミナ混合粉体:配合比率60:40
	施工面との距離L:15mm
	施工面との角度θ:90°
	ヒーター温度:低温(500℃), 高温(600℃)

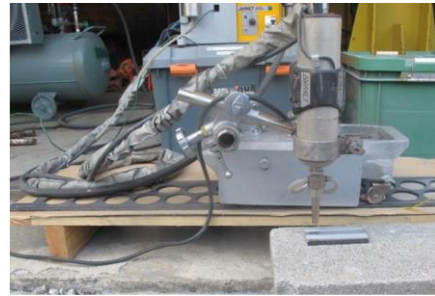


写真-1 半自動施工装置

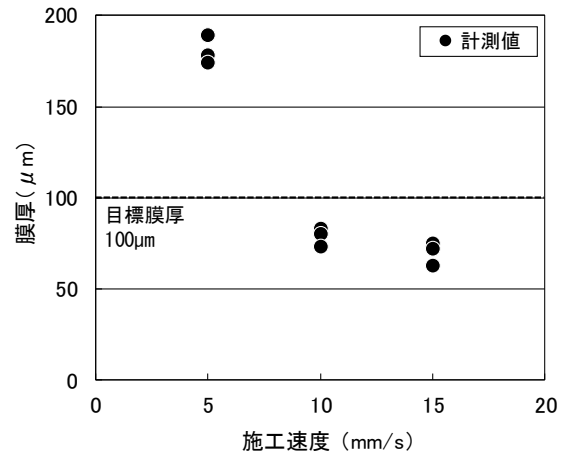


図-10 施工速度とCS皮膜厚の関係

施工速度	密着力試験結果			平均値
	36.7MPa	30.7MPa	29.2MPa	
5mm/s				32.2MPa
	接着剤界面破壊	皮膜内凝集破壊	皮膜内凝集破壊	
10mm/s	29.9MPa	25.6MPa	24.2MPa	26.6MPa
	皮膜内凝集破壊	皮膜内凝集破壊	皮膜内凝集破壊	

図-11 密着力試験の結果



G1桁 下フランジ上側・下側、支点上垂直補剛材



G1桁 赤枠部の近景



G4桁 支点上垂直補剛材  
下フランジ上側・下側



G4桁 塗装再劣化部



G5桁 下フランジ上側・下側



G6桁 下フランジ上側・下側

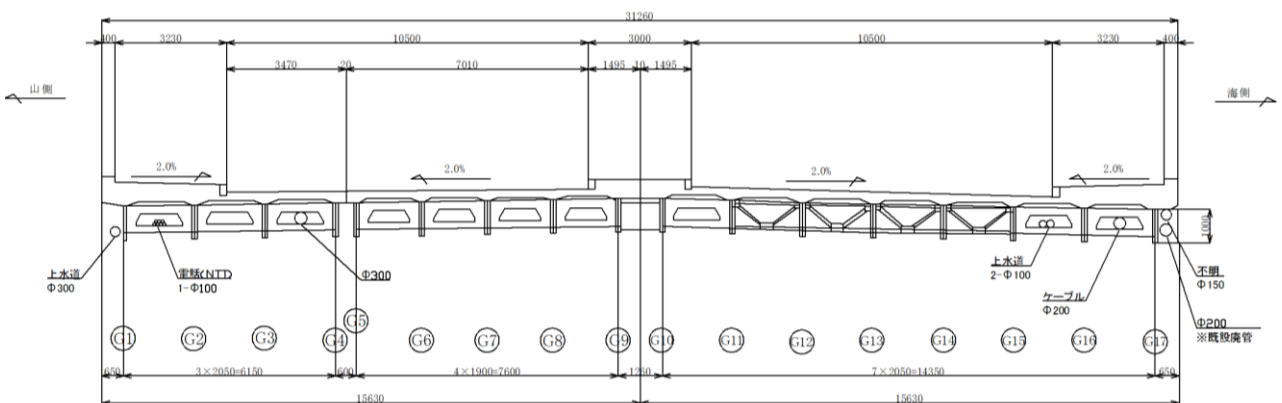


図-12 施工対象橋梁

も接着剤境界面の破壊形態から、皮膜内凝集破壊に移行している。しかし、鋼材面とCS皮膜の界面破壊ではない。施工速度5mm/sから10mm/sに変化するなかで、CS皮膜の成膜効率が低下し成膜性と密着性が低下する傾向が確認された。

上記の結果より、施工速度を上げることで成膜厚が小さくなり、密着力も低下することが分かった。腐食が厳しい環境下では、成膜性と防食性の確保の観点から、施工速度5mm/sが最も望ましい施工速度と考えられる。

今後の課題として、良好な施工環境でマイルドな腐食環境の下フランジ上面やウェブ面などは、CS皮膜厚を現行の100μmからの薄膜化を研究し、施工速度10mm/s及び15mm/sの適用性を検証していく。

### 3. 腐食した鋼桁端部におけるCSの実証試験

前章の各検証結果を踏まえ、既設鋼橋の桁端部における現場適用性の検証を目的に、実際に桁端部に腐食損傷を受けた実鋼橋に対してCS防食技術の実証試験を実施した。

#### 3.1 施工対象鋼橋及び施工範囲

図-12に対象橋梁を示す。対象橋梁は供用約40年経過した鋼I桁橋(橋長:25m,幅員:15.6m,主桁数:17)

表-4 実証試験の施工条件

項目	施工条件
使用CS機械、作動ガス	低圧型CS装置、圧縮空気
ガス圧力	0.50MPa~0.80MPa
皮膜粉体	垂鉛アルミナ混合粉体、配合比率60:40
ヒーター温度	低温:500℃(エクステンション使用時 高温:600℃)
使用ノズル	拡張ノズル(φ7mm), 90°エルボ, 60°エルボ, 延長パイプ
施工速度	5mm/s
CS目標膜厚	100μm以上
CS面塗装	Rc-IV(ふっ素樹脂塗装)

である。本橋梁は、離岸距離300mに位置し、河川上に架橋されており通常の塗装が施工されている。腐食環境調査は、2014年11月から2015年10月の1年間で実施した。その結果より、平均年間気温23.7℃、平均相対湿度76.0%、平均濡れ時間割合37.7%、平均飛来塩分量0.15mdd、平均腐食速度0.025mm/yの環境にあった。なお、海と対象橋梁の間には障害物は少なく、潮風の影響を直接受けるため厳しい腐食環境に位置している。

本施工では、A2橋台側の鋼桁端部を施工対象とし、山側から順に桁番号をG1とし、最も海側の桁をG17とする。G4、G5の間に縦ジョイントによる継ぎ目があり、雨天時には漏水が確認されている。CS施工範囲は、G1、



図-13 実証試験施工フロー

G4, G5, G6 桁の桁端より 2.5mの範囲の下フランジ上面・下面と下フランジからの立ち上がり 100 mm 範囲のウェブ面を対象とした。G4, G5, G6 桁については施工範囲内に健全な塗膜箇所も確認されたため、腐食部のみ対象としてCS施工を実施した。G1, G4 桁に対しては、垂直補剛材についてもCS施工を実施した。

### 3.2 実証試験方法

本施工は、表-4 に示す施工条件を基に実施した。CS装置は、前章と同様に低圧低温携帯型CS装置 (DYMET412k) を用いた。本CS施工では、ノズルの移動速度は 5mm/s、スプレーと施工面との距離は 5mm ~ 15mm とした。離隔距離の管理は、CS技術に対する知識と経験を十分に有する施工監督者が現場立ち合いを行い、適宜スケールを用いて目視で確認した。亜鉛アルミナ混合粉体は、配合比率 60 : 40 を用いた。

図-13 に全体の試験施工フローを示す。まず、浮きさび等の除去を目的とした一次ケレンを実施し、施工対象部の初期さび厚などの腐食調査を実施した。フランジ上面、下面において施工空間に障害のない箇所 (以下、施工一般部) の初期さび厚は、G4, G5, G6 桁の下フランジ上面全体で平均 192 $\mu$ m (標準偏差 144 $\mu$ m, 最大さび厚 770 $\mu$ m, 最小さび厚 16 $\mu$ m) であった。橋梁添架物の干渉部や支承近傍の橋台と下フランジの取り付け部のような施工空間が狭隘となる箇所 (以下、施工障害部) の初期さび厚は、G1 桁下フランジ上面全体で平均 123 $\mu$ m (標準偏差 200 $\mu$ m, 最大さび厚 1253 $\mu$ m, 最小さび厚 8 $\mu$ m), G1, G4 桁支点上垂直補剛材全体で平均 43 $\mu$ m (標準偏差 53 $\mu$ m, 最大さび厚 414 $\mu$ m, 最小さび厚 7 $\mu$ m) であった。

CS施工は、施工一般部は拡張ノズル (φ7mm) のみで施工し、施工障害部は施工角度や延長を変化させることが可能なエクステンションと拡張ノズルの組み合わせで



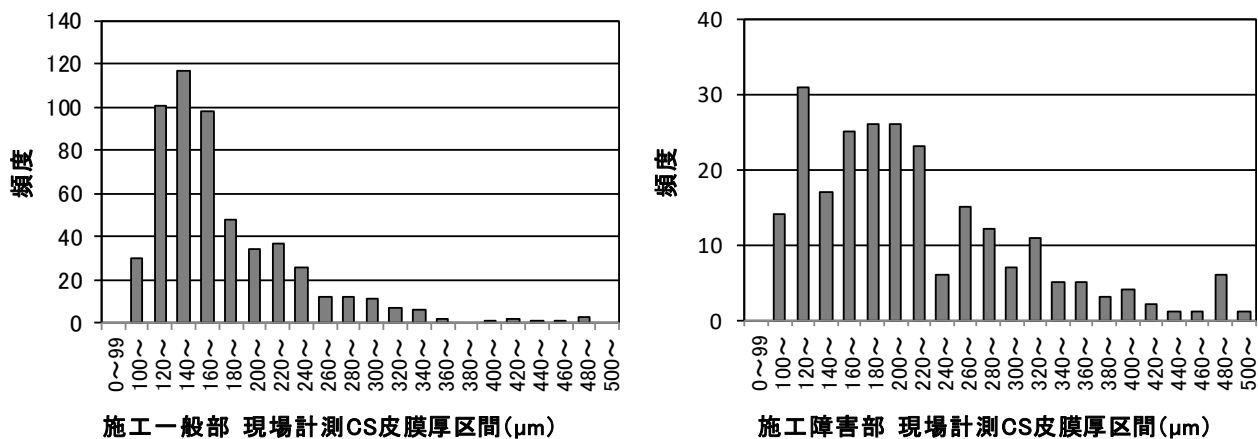


図-14 CS 皮膜厚の計測結果

CS施工	試験対象部	各膜厚(μm)			平均値(μm)	各密着力(MPa)			平均値(MPa)	破壊形態	ドリ側表面外観	母材側表面外観
		n1	n2	n3		n1	n2	n3				
施工一般部	G4桁下フランジ上面	174	157	115	149	28.9	28.9	27.9	28.6	接着剤界面破壊		
	G5桁下フランジ上面	185	135	127	149	13.5	20.7	19.3	17.8	一部皮膜凝集破壊		
	G6桁下フランジ上面	139	141	158	146	22.6	20.3	20.9	21.3	接着剤界面破壊		
施工障害部	90° エルボ+延長パイプ施工部	192	194	174	187	13.0	13.0	16.5	14.2	皮膜凝集破壊		
	60° エルボ施工部	174	124	101	133	35.5	29.8	35.0	33.4	接着剤界面破壊		
	60° エルボ+延長パイプ施工部	145	179	166	163	25.4	23.1	17.0	21.8	皮膜凝集破壊		

図-15 試験施工部の CS 皮膜厚さと密着力試験結果

施工した。

CS 施工後の性能評価として、電磁膜厚計による膜厚測定を行い、CS 施工部を 50mm×50mm、垂直補剛材を 100mm×100mm のメッシュに分割し、その中で無作為に 3 点計測した平均値をメッシュ内の皮膜厚とした。また、アドヒージョンテスタによる密着力も測定した。計測箇所は、施工一般部は各行にて各 3 回測定し、エクステンションを用いた施工障害部は、使用したノズルが異なる領域にて各 3 回測定した。

膜厚測定結果を受けて、エルボ+延長パイプのエクステンションの組み合わせ使用箇所では膜厚が 100μm に満たない箇所に対して、さらに 1 層の重ね施工

を実施し、最終的に目標皮膜厚さ 100μm を確保した。その全ての性能評価後に、CS 皮膜の上から Rc-IV 塗装系<sup>4)</sup>を施した。

### 3.3 実証試験結果

図-14 に CS 皮膜厚計測結果のヒストグラムを示す。施工一般部は、550 箇所のメッシュ内の膜厚計測値の頻度分布を示しており、施工障害部は 243 箇所のメッシュ内の膜厚計測値の頻度分布を示している。CS 皮膜厚は、すべての箇所でも 100μm 以上有していることを確認した。施工一般部の膜厚平均値が 165.2μm、標準偏差が 64.9μm であった。施工障害部は、膜厚平均値が 214.1μm、標準

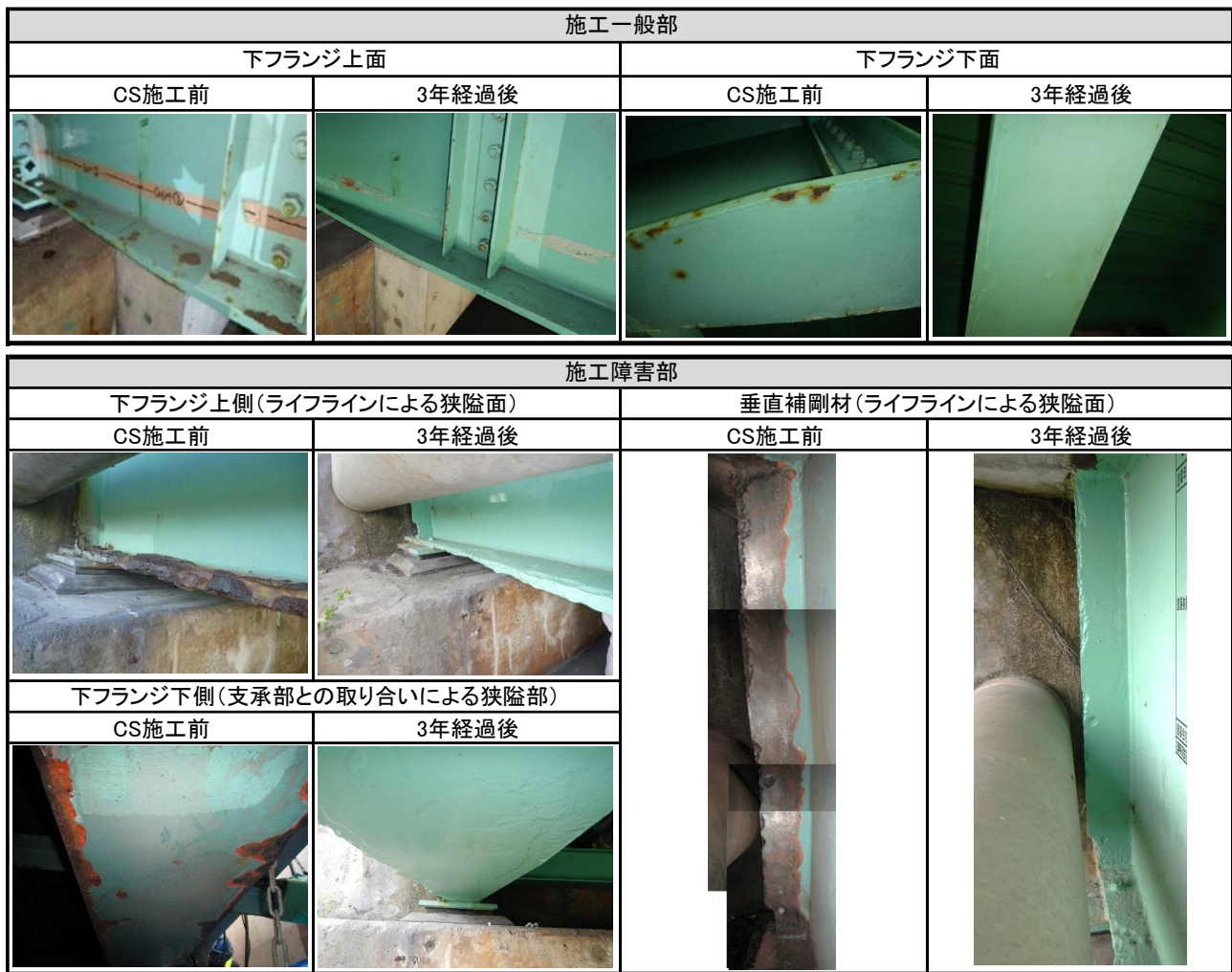


図-16 腐食外観モニタリング結果

偏差が 100.6 $\mu\text{m}$ であった。施工障害部のほうが、施工一般部と比較し厚膜でばらつき大きい傾向であった。膜厚が 300 $\mu\text{m}$ 以上となる箇所について集計すると、施工一般部では全体の 6%であるが、施工障害部は全体の 20%であった。これは、エクステンション使用時の重ね施工の影響と考えられる。

図-15に現地施工における密着力の確認として、皮膜厚及び密着力の状態を示す。施工一般部の皮膜厚さと密着力試験結果は、皮膜厚さ 146~149 $\mu\text{m}$ で成膜され、G4、G6 桁の密着力は CS 皮膜とドリーの接着面で破壊し、G5 桁は一部皮膜内の凝集破壊の形態であり、室内試験で検証した結果通りの良好な CS 皮膜が成膜されていることが確認できた。施工障害部の皮膜厚さと密着力試験結果として、ライフラインの干渉のある下フランジ上面部において 90°エルボ+延長パイプの組み合わせを使用した施工部は、重ね施工にて膜厚が 187 $\mu\text{m}$ 成膜され、密着力は施工一般部と比較し低下傾向を示し、ドリーの全体面で凝集破壊の形態であった。同じく 60°エルボ単体のエクステンションを用いて施工した施工部は、133 $\mu\text{m}$ 成膜され、密着力は皮膜とドリーの接着剤面での破壊形態であった。ライフラインの干渉のある支点上垂直補剛材に

おいて、60°エルボ+延長パイプの組み合わせを使用した施工部は、重ね施工にて膜厚が 163 $\mu\text{m}$ 成膜され、密着力はドリーの全体面で凝集破壊の形態であった。3 測点ともに鋼材面での破壊はない。したがって、実橋梁での試験施工においても室内試験で検証した配合比率の亜鉛アルミナ混合粉体による CS 皮膜によって、100 $\mu\text{m}$ 以上に成膜されることで、高密着力な皮膜が施工されることが実証された。

以上の結果より、現場施工でも室内試験同様に密着性の高い安定した皮膜が形成されており、本 CS 工法が鋼桁端部への補修工法として適用可能であると実証された。

### 3.4 モニタリング結果

本節では、CS の実環境における防食性能を検証することを目的に腐食外観モニタリング調査を実施した。

図-16に CS 施工した箇所の腐食外観モニタリング結果を示す。施工前には著しい腐食損傷が発生していたが、全ての CS 施工箇所において、施工直後から 3 年経過後においても、さび発生や塗膜ふくれ、割れ等は確認されず、外観良好状態を維持していた。特に G4 桁は伸縮装置からの漏水もあり、腐食環境がもっとも過酷な環境で

あるが、CS 施工箇所において防食性が発揮されていた。

今回の実橋桁端部での実証試験を踏まえ、今後の課題として、現場施工時のノズル移動速度（パウダー供給装置の改良等）、ノズルの離隔管理などの施工管理手法、一次ケレンにて初期さびが 100 $\mu$ m を大幅に超えた箇所の処理方法と経過観察が抽出された。

#### 4. まとめ

本研究では、CS 防食技術を実鋼橋桁端部へ適用する際の実構造物特有の施工条件下での CS 皮膜性能の検証を行った。また、実橋の鋼桁端部へ CS 施工後の再腐食の有無や経時変化のモニタリングを行い、腐食環境下における防食技術の有効性を検証した。本研究で得られた主な結果を以下に示す。

- (1) 拡張ノズル（径：7mm）はオリジナルノズル（径：5mm）に比して粒子速度が遅くなるが、密着性の低下は認められず口径拡張により金属粒子の噴出量が多くなり厚く成膜が可能となった。
- (2) 施工角度が90°から角度が下がるほど成膜性は低下した。よって、施工角度は、施工面に対して90°を基本とし、70°までを許容角度とした。
- (3) 各種エクステンションを適用しても、CS工法により成膜形成が可能である。ただし、エクステンションを組み合わせて装着した場合、膜厚が薄くなる傾向にあるため、重ね施工や移動速度の低速化などの施工上の工夫が必要となる。
- (4) 施工時の移動速度が速いほど、皮膜厚が低下する傾向が認められた。腐食弱点部である桁端部の防食技術としては成膜性・効率性・防食性の確保の観点から、施工速度5mm/sでの施工が最適であると考えられる。
- (5) 実鋼橋の桁端部において、施工一般部へのCS施工では、 $\phi$ 7mmの拡張ノズルを適用し、施工障害部へのCS施工では、エクステンションを適用することで、鋼材にさびが残存した状態においても強固な密着力を有する亜鉛皮膜の形成が可能である。

#### 謝辞

本研究は、新道路技術会議の研究課題で国土技術政策総合研究所から委託研究として実施したものである。また、施工後の腐食モニタリングは、JSSC 鋼橋の強靱化・長寿命化研究委員会「鋼橋の腐食・耐久性研究部会」の活動として実施したものである。

#### 参考文献

- 1) 玉越隆史，中洲啓太，石尾真理，武田達也，水津紀陽：鋼道路橋の局部腐食に関する調査研究，国土技術政策総合研究所資料，第 294 号，2006。
- 2) 名取暢，西川和廣，村越潤，大野崇：鋼橋の腐

食事例調査とその分析，土木学会論文集，No.668/I-54，pp.299-311,2001。

- 3) 日本道路協会，鋼道路橋防食便覧，2014。
- 4) 下里哲弘，村越潤，玉城喜章，高橋実：腐食により崩落に至った鋼橋の変状モニタリングの概要と崩落過程，橋梁と基礎，Vol.43，pp.55-60，2009。
- 5) VoThamHung，佐々木栄一，市川篤司，三木千壽：腐食を模擬した模型桁のせん断耐力に関する実験及び解析，構造工学論文集，Vol.48A，2002。
- 6) VoThamHung，永澤洋，佐々木栄一，市川篤司，名取暢：腐食が原因で取り替えられた実鋼橋支点部の載荷実験および解析，土木学会論文集，No.710/I-60，pp.141-15，2002。
- 7) 海田辰将，藤井堅，原孝志，中村秀治，上野谷実：腐食鋼板のせん断耐力とその評価法，構造工学論文集，Vol.50A，pp.121-130，2004。
- 8) 海田辰将，藤井堅，宮下雅史，上野谷実，中村秀治：腐食したプレートガーダーの残存曲げ強度に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.51A，pp.139-148，2005。
- 9) 中山太士，木村元哉，石川敏之，松井繁之：ウェブ孔食を持つ鋼桁のせん断耐荷力，構造工学論文集，Vol.52A，pp.49-56，2006。
- 10) 下里哲弘，玉城喜章，有住康則，矢吹哲哉，小野秀一，三木千壽：実腐食減厚分布を有する鋼プレートガーダー腹板のせん断強度特性に関する実験的研究，土木学会論文集 A1，Vol.70，No.3，359-376，2014。
- 11) 大気環境における鋼構造物の防食性能回復の課題と対策，土木学会 鋼構造シリーズ 30，2019。
- 12) 松井隆行，元井邦彦，武藤和好：鋼橋桁端部に施したアルミニウムマグネシウム合金溶射の追跡調査報告，土木学会第 70 回年次学術講演会，2015。
- 13) 武藤和好，村山康雄，入江政信，福永靖雄：既設鋼橋桁端部の防食に着目した金属溶射機器の開発，土木学会第 69 回年次学術講演会，2014。
- 14) 武藤和好，入江政信，井上靖：アルミニウム・マグネシウム合金溶射による既設鋼橋桁端部の長寿命化技術の開発と現地施工，高速道路と自動車，第 58 巻，第 11 号，pp.27-32，2015。
- 15) 東健司ら：鋼構造物の腐食による劣化損傷の新溶射材による補修技術の研究開発，SIP 戦略的イノベーション創造プログラム，鋼構造物の腐食による劣化損傷に対する補修技術の研究開発
- 16) 山下正人ら：反応性塗料を塗布した発錆炭素鋼に生成するさび層の構造と防食性，材料と環境，66，pp93-98，2017。
- 17) 石橋正博，田中誠，政門哲夫：省工程防食材料の比較検証試験，(社)日本橋梁・鋼構造物塗装技術協会，第 19 回技術発表大会予稿集，pp25-35
- 18) 清川昇悟，井口進，木村雅昭，下里哲弘：コールドスプレー技術で生成する金属皮膜を適用した高力ボルトの防食性能と機械的性質，日本鋼構造協会，鋼構造論文集，第 24 巻(第 93 号)，pp.65-72，2017。
- 19) 下里哲弘，日和裕介，有住康則，山城慶：さび

- 鋼板面に対するコールドスプレー法の防食皮膜形成に関する実験的研究, 日本鋼構造協会, 鋼構造論文集, 第 22 卷(第 85 号), pp.133-141, 2015.
- 20) 加藤祐介, 下里哲弘, 田井政行, 押川渡, 日和裕介: 亜鉛アルミナ混合粉体を用いた ColdSpray 工法で成膜された鋼板面上の防食皮膜の電気化学特性, 日本鋼構造協会, 鋼構造論文集, 第 26 卷

(第 102 号), pp.33-41, 2019.

- 21) 榊和彦: コールドスプレーの概要と最新動向, 溶射, vol.47, No.3, pp.113-119, 2010.

(2019 年 9 月 20 日受付)

(2020 年 2 月 1 日受理)