

## 道路政策の質の向上に資する技術研究開発

## 【研究状況報告書（2年目の研究対象）】

①研究代表者	氏名（ふりがな）		所属		役職	
	しもさと てつひろ 下里 哲弘		琉球大学		准教授	
②研究 テーマ	名称	表面処理技術を応用した腐食鋼桁端部の性能回復技術に関する研究開発				
	政策 領域	[主領域]	道路資産の保全	公募 タイプ	タイプII	
		[副領域]				
③研究経費（単位：万円） ※H26は精算金額、H27は受託金額、 H28は計画額を記入。端数切り捨て。	平成26年度	平成27年度	平成28年度	総合計		
	986	950	1,114	3,050		
④研究者氏名（研究代表者以外の主な研究者の氏名、所属・役職を記入。なお、記入欄が足りない場合は適宜追加下さい。）						
氏名		所属・役職				
有住 康則		琉球大学・教授				
小野 秀一		（一社）日本建設機械施工協会 施工技術総合研究所・次長				
⑤研究の目的・目標（提案書に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入。）						
本研究では、腐食した鋼桁橋の桁端部において、高防食性と高耐久性を満足する表面処理技術の開発を目的として、特殊な表面処理技術（Cold Spray工法）を防食下地とし、腐食鋼桁端部に応用して、腐食面のブラスト処理、亜鉛粉末を付着した犠牲防食化および腐食面の凸凹面の平滑化を図り、腐食鋼桁端部に対する効果的かつ高耐久性を有する性能回復技術の提案を行うものである。以下に本研究内容を示す。						
(1) 腐食した鋼材に対するCold Spray表面処理技術の防食性能評価						
①腐食した鋼材に対するCold Spray工法の防食下地性能の検証、②Cold Spray面上の塗装仕様の検証として、腐食鋼板に対する亜鉛/アルミナ粉体の配合とスプレー方法によるCS皮膜の成膜性能と密着性への影響の検証及びふっ素樹脂塗装との密着性の検証を実施し、施工要領素案としてまとめる。						
(2) 腐食損傷を受けた実橋梁を用いた実証実験						
橋梁管理者である内閣府沖縄総合事務局と連携を図り、研究（1）防食性能評価にて定めた施工要領素案に基づき、実腐食損傷を受けた橋梁へのCold Spray表面処理技術を施工し、現場への適用性の実証実験を実施した。						
(3) 腐食損傷レベルに応じたCold Spray処理面の耐力回復効果の評価						
実橋梁から切り出した腐食片にCS処理後の引張強度回復特性及び、せん断耐荷力回復特性の検討を行う。また、腐食により断面欠損（破断等）した鋼桁のせん断耐荷力回復特性の検討として、高力ボルト接合を施したあて板補強に対するせん断実験を実施する。						

## ⑥これまでの研究経過

### (1) 腐食した鋼材に対するCold Spray表面処理技術の防食性能の検証 (研究全体方針)

図1に本研究の全体フローを示す。CS表面処理技術の適用性の検証のため、(A) CSの基本性能の確認、(B) 錆面でのCS性能の確認、(C) 施工条件による性能検証の確認、(D) 施工効率化の4つの性能検証項目を計画している。

今年度の研究は、平成26年度の研究で実施したCS工法による皮膜と腐食鋼板の付着力の検証、腐食促進試験による防食性能を検証を踏まえ、性能検証項目(A)～(C)の内容を網羅し、その結果を施工要領素案として取りまとめた。以下に、性能検証項目(A)から「①塗装との密着性」、(B)から「②CS配合比」と「③初期錆厚」、(C)から「④吹き付け角度」の検証結果を抜粋し記載する。

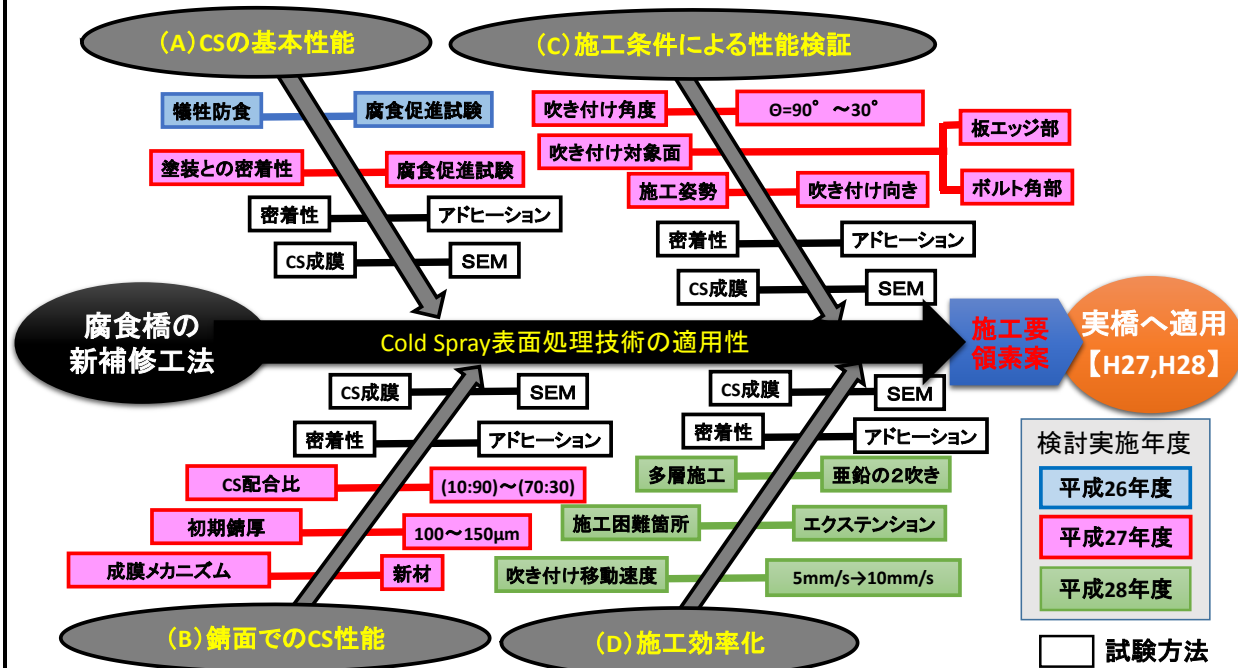


図1 研究全体フロー

### ① Cold Spray面上の塗装仕様の検証 (結果)

図2にCS皮膜上にふっ素樹脂塗装を施した供試体の密着力試験結果を示す。促進試験なし(塩水塗布なし)と2種の塩水塗布による促進試験後の結果は、促進試験の有無による密着力と剥離面に変化は無く、塗装との密着性が維持されていることが確認できる。

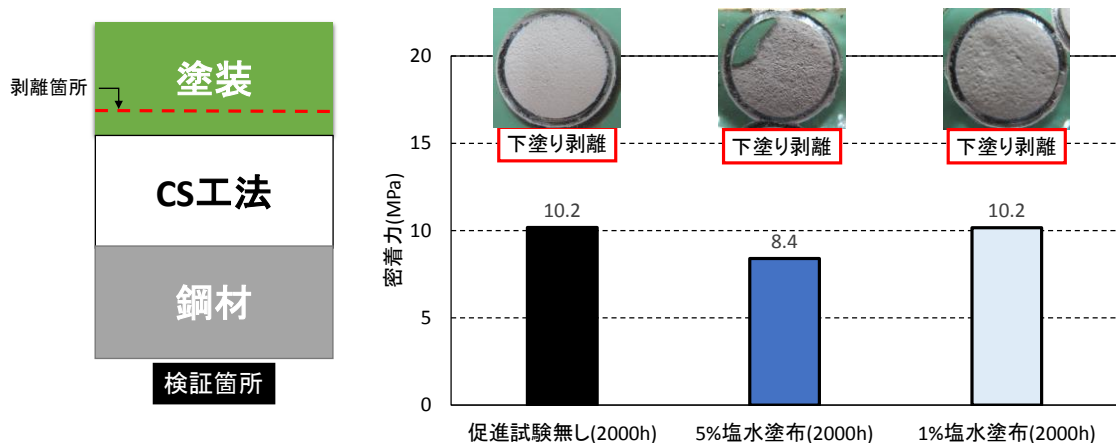


図2 塗装とCS皮膜の密着力及び剥離面

## ② 皮膜形成と除錆効果の配合比率の影響検証（結果）

防食皮膜である亜鉛層厚さは亜鉛パウダー量に、素地調整性能はアルミナパウダー量に依存する。そのため、両者の配合比率は成膜性能に大きく影響する。表1にCS工法の標準的な施工条件を示し、試験体作成の基本条件とした。図3に示すように、配合を検証するために、亜鉛とアルミナの比率を10：90～70：30の10%刻みと、一度アルミナのみ（0：100）で錆を除去後に50：50の施工を行う、8パターンの供試体を作成した。腐食鋼板は、平均錆厚100 $\mu$ mの一枚板で作成した。

図4に腐食鋼板に1ライン1層施工時（1pass施工）のSEMによるCS皮膜断面観察状況と図5に配合別の亜鉛層厚と錆除去率の結果を示す。亜鉛層の目標膜厚を一般外面の塗装使用の防食下地75 $\mu$ m以上の100 $\mu$ mに設定したとき、目標値を達成するためには亜鉛の配合比率が40%以上必要である。錆除去率については、同断面の初期錆厚からの除錆効果を示しており、アルミナの配合比率が低下するに従い、錆除去率が低下する傾向が見える。

図6に配合比率別の亜鉛層と腐食鋼板の密着力を示す。亜鉛・アルミナの配合比率が60:40までは、密着力が30MPa以上と非常に高い値を示すが、70:30になると密着力は半減し、15MPaまで下がる。以上より、亜鉛・アルミナ比率が60:40の配合が密着力も高く、防食層が厚く形成可能である配合である。

表1 試験体作成の基本条件

CS工法標準施工条件		
移動速度 (mm/s)	ノズル直径 (mm)	CS施工能率
5.0	5.0	900cm <sup>2</sup> /h

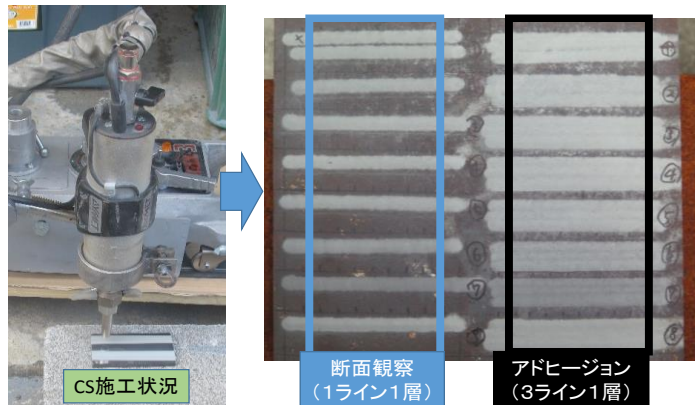


図3 供試体作成状況

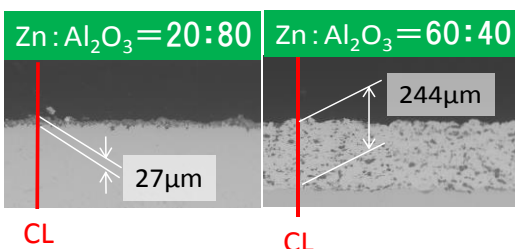


図4 SEMによる断面観察例

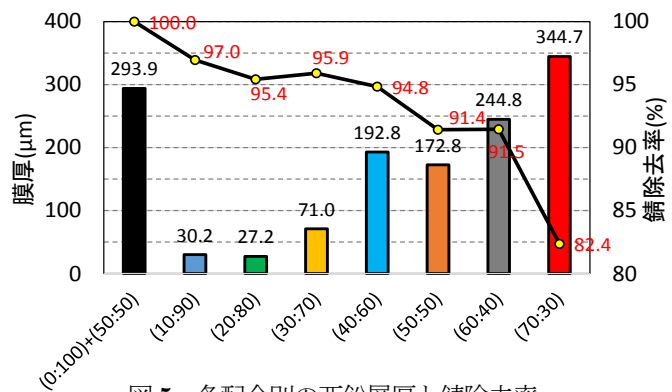


図5 各配合別の亜鉛層厚と錆除去率

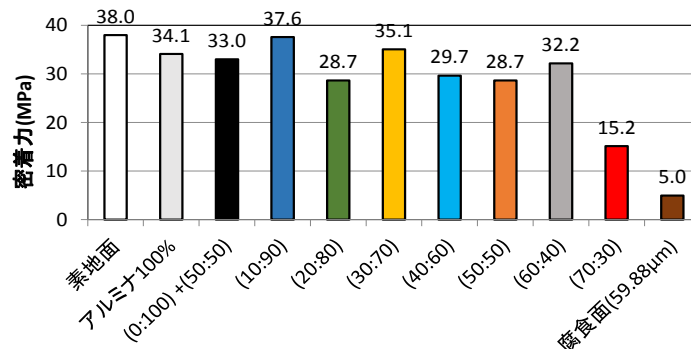


図6 各配合別の亜鉛層と腐食鋼板の密着力

### ③ 腐食鋼材の初期錆厚の影響検証 (結果)

CS工法の適用性の確認項目として、腐食鋼材の初期錆厚の影響について検証した。腐食鋼板は、平均錆厚が $150\mu\text{m}$ の一枚板を使用し、(b)の試験条件と同様に施工を行った。

図7に亜鉛層と腐食鋼板の密着力を示す。腐食鋼板への密着力は図5に示す初期錆厚 $100\mu\text{m}$ と比較して、約70~75%に低下する傾向が見られた。また、50:50と60:40の配合比率の剥離面には、一部錆層より剥離した状況が現れた。

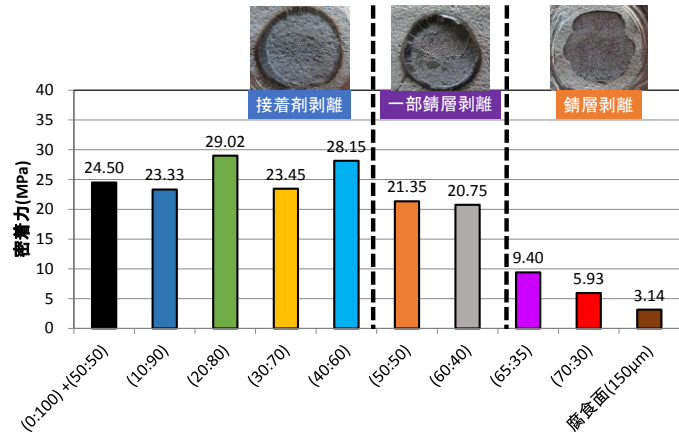


図7 初期錆  $150\mu\text{m}$  の亜鉛層と腐食鋼板の密着力

### ④ 施工時のスプレー方法 (施工角度) の影響検証 (結果)

図8に示すように施工姿勢の影響検討として、スプレーノズルと鋼板の施工角度の影響による皮膜厚減少率について検討した。施工角度(D)を、施工面に対し90度を基準値として、80度、70度、60度、45度の4種類の供試体を作成した。また、亜鉛とアルミナの配合比率の影響を検証するため、Zn:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>比率で60:40、50:50、40:60の3配合を実施した。図7に、施工角度と亜鉛膜厚の減少率の関係を示す。両者の関係は、Zn:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>配合比率によらず一定であった。施工角度が70度より小さい値になるとSZ膜厚は50%以下となり、45度では10%以下のSZ皮膜が形成されていない状態となっていることが分かる。

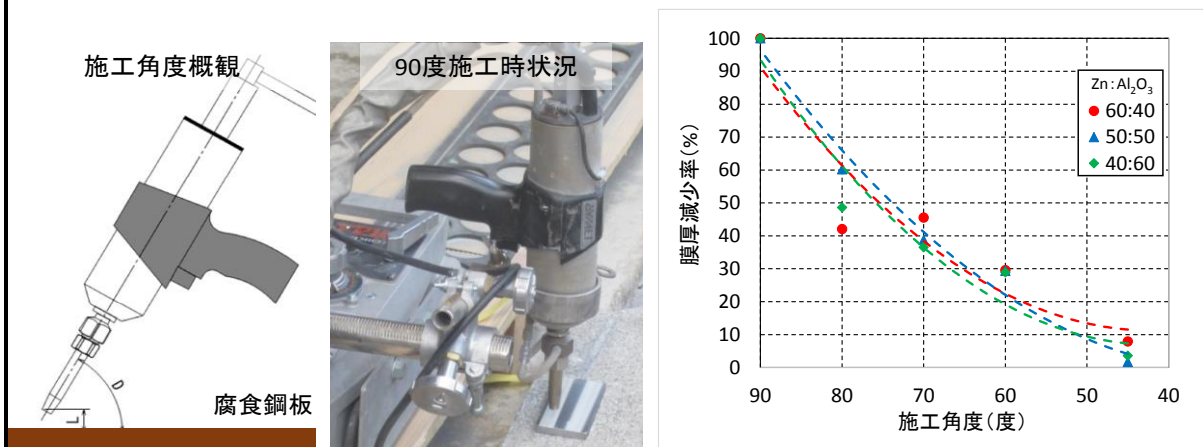


図8 皮膜形成の施工角度の影響検証

### ◎施工要領素案の作成

上記で得られた結果を総括し、施工要領素案としてまとめた。以下に現場実証実験時の施工ポイントを示す。

- ・ 亜鉛・アルミナ比率は60:40配合とする。
- ・ 腐食鋼材の初期錆厚は $100\mu\text{m}$ 程度となるように事前にケレンを行う。
- ・ 施工角度は、吹付け面に対し90度施工を基本とし、70度より小さくなる場所は別途手段を講じる。
- ・ CS面上に施工する塗装はふっ素系塗装とする

(2) 腐食損傷を受けた実橋を用いた実証実験 (平成27年度)

実橋梁での実証実験では、(1)で定めた施工要領素案に基づきCS工法による性能回復技術の現場適用性を検証することを目的とし、実腐食損傷に対する亜鉛皮膜の成膜性や除錆性能の確認を実施しながら施工した。

図9, 10に選定した研究協力者の内閣府沖縄総合事務局建設部の管理橋 (以下、管理橋とする) を示す。管理橋は鋼I桁橋で17主桁の橋梁である。施工範囲は、G4, G5, G6桁の下フランジの上面, 下面と下フランジからの立ち上がりウェブ100mmを対象とし、G4, G6桁は桁端部より支点上を除く施工区間②~⑤の範囲に、G5桁は支点上も含む全施工区間とする、約5㎡の中から腐食部のみを対象にCS工法を実施した。

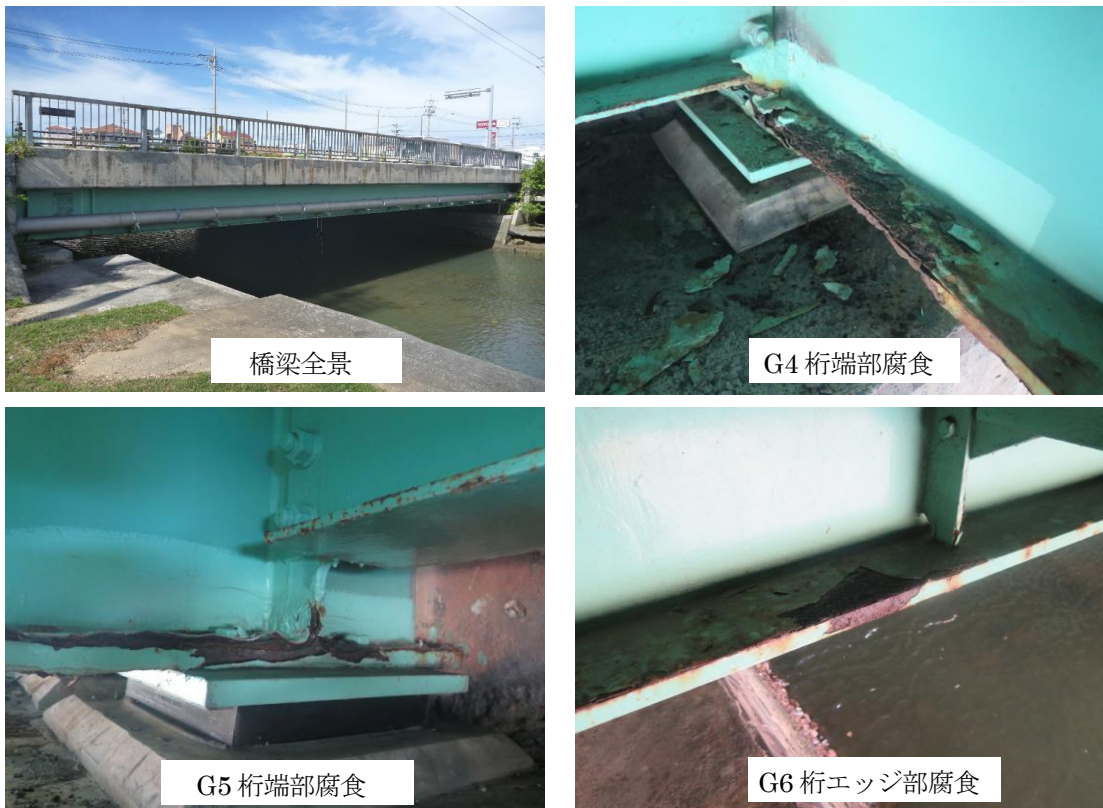


図9 実証実験に選定した鋼桁橋

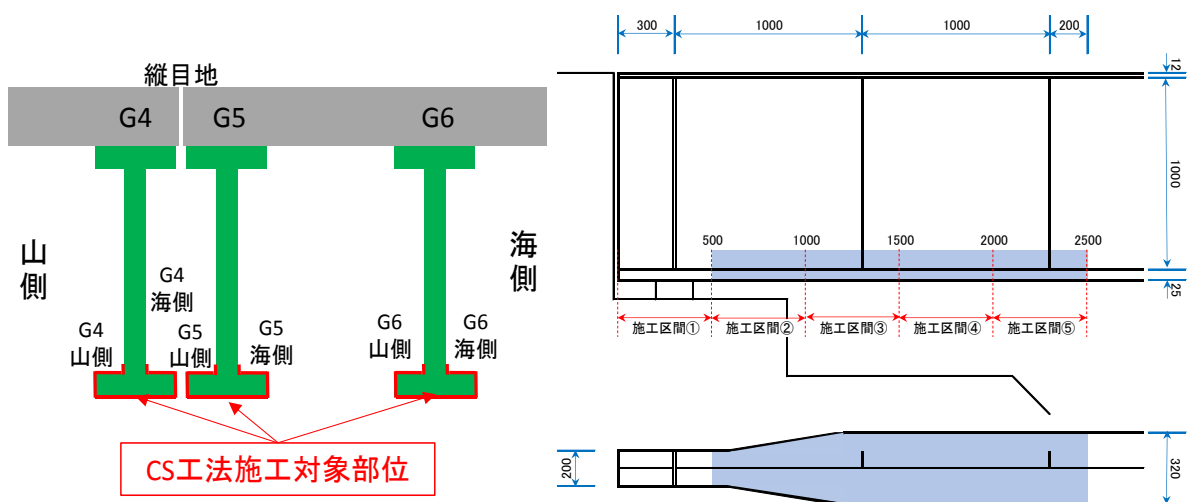


図10 施工範囲図

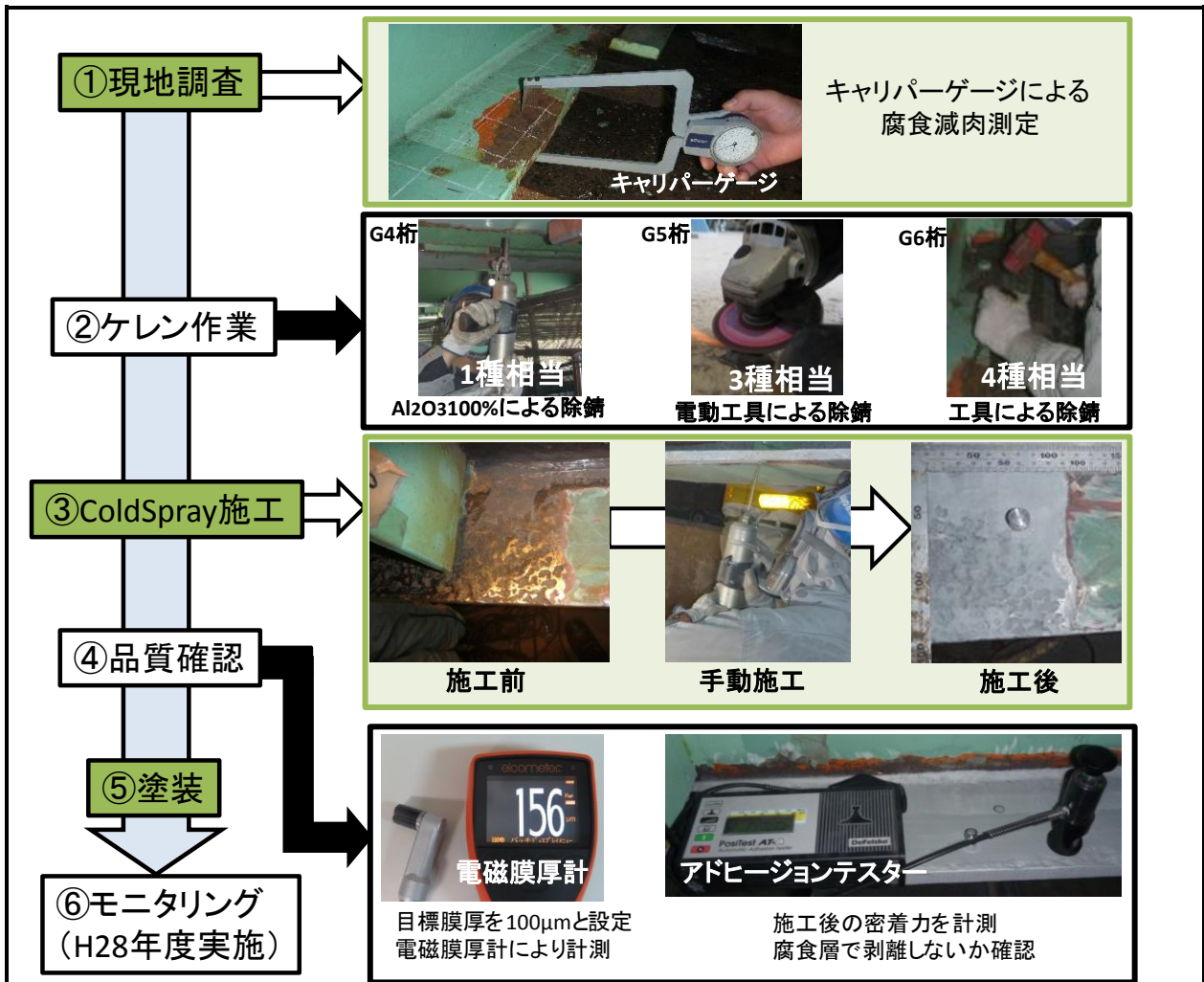


図11 実橋における実証実験施工フロー

図11にCS施工フローを示す。①現地調査として、橋梁の腐食状態を把握するため、目視・写真撮影によるマッピング化とキャリパーゲージによる残存板厚調査を実施した。②ケレン作業として、実腐食における除錆度の影響を検証するため、桁ごとに除錆方法を変え検証した。除錆は、目標100 $\mu$ m程度となるよう実施した。③CS施工は手動で施工した。④CS工法実施後の亜鉛膜厚は、目標膜厚100 $\mu$ mをおおむね超える膜厚が確保されている。表2に示す、実橋梁CS施工後の密着力試験結果は、平均で20MPa程度確認され、除錆が十分に行われた事を確認した。

次年度は、施工後のモニタリングを実施し経過を観察するとともに、狭隘部施工方法の確立や施工能率の向上やについて検討する。



図12 施工後の下フランジ状況

表2 密着力計測結果

対象桁	密着力 (MPa)			平均 (MPa)
	1箇所目	2箇所目	3箇所目	
G4山側	28.90	28.93	27.90	28.6
G4海側	13.51	20.71	19.25	17.8
G5山側	22.60	20.30	20.87	21.3

### (3) 腐食損傷レベルに応じたCS処理面の耐力回復効果の評価

実橋梁から切り出した腐食片にCS処理後の引張強度回復特性及び、せん断耐荷力回復特性の検討を行う。また、腐食により断面欠損（破断等）した鋼板のせん断耐荷力回復特性の検討として、高力ボルト接合を施したあて板補強に対するせん断実験を実施する。

CS工法による腐食減肉した鋼材の引張強度回復特性検討として、両面腐食した鋼材を高力ボルト接合した試験体の引張試験を実施した。添接板は、SS400材とSM570材で、摩擦接合面へCS工法により防錆処理と表面凹凸の形成を施した実験を実施した。試験体形状を図13、試験状況を図14に示す。

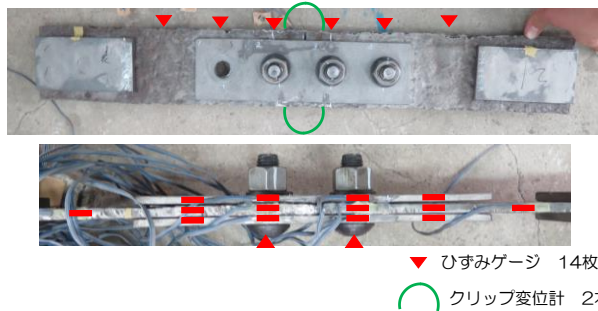


図13 試験体形状



図14 引張試験状況

ウェブ下端が断面欠損（破断）した桁にあて板高力ボルト接合で補強した中型せん断試験体を用いて、せん断耐荷力実験を実施した。中型せん断試験体は、図15に示す、1体目；ウェブ片面腐食した試験体（Co.01），2体目；ウェブ片面腐食+下フランジ上面腐食した試験体（Co.02）の2体を用いた。試験状況を図16に示す。図17に試験結果を示し、Co.01試験体は腐食減厚後の平均4.4mmであり、当板ボルトでの補強により、健全タイプ4.5mmと同等の耐荷力を示す。また、下フランジ腐食のCo.02試験体においても、一様減厚タイプ3.2mmと同等の耐荷力を示す。この結果を受け、腐食鋼材にCS処理を施した中型せん断試験体による実験を実施した。

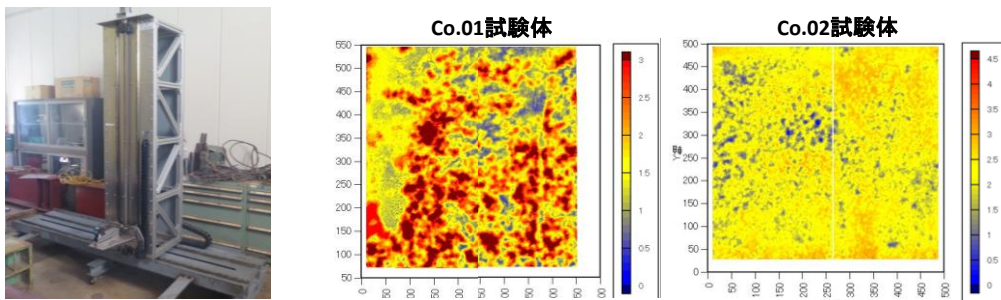


図15 腐食コンターと大型レーザー計測システム

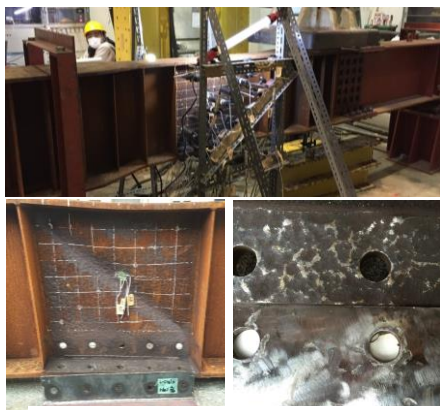


図16 せん断試験状況および結果

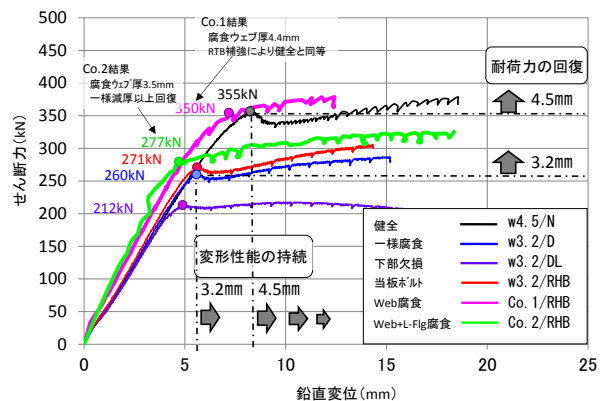


図17 せん断試験のせん断力 - 鉛直変位図

## ⑦研究成果の発表状況

### 【平成27年度学会等での発表】

- 1) 山城慶，日和裕介，下里哲弘，有住康則ほか：腐食面に対するSmartZIC工法の適用性に関する研究（その1：SZ工法の基本性能検証），第5回土木学会西部支部沖縄会技術研究発表会，2016.1
- 2) 日和裕介，下里哲弘，有住康則ほか：腐食面に対するSmartZIC工法の適用性に関する研究（その2：腐食面での成膜検討），第5回土木学会西部支部沖縄会技術研究発表会，2016.1
- 3) 山城慶，日和裕介，下里哲弘，有住康則，小野秀一ほか：コールドスプレー工法を用いた鋼橋桁端部の腐食面に対する防食処理技術の実証実験，平成27年度土木学会西部支部研究発表会，2016.3（投稿済）
- 4) 日和裕介，下里哲弘，有住康則ほか：コールドスプレー工法を用いた腐食高力ボルトの防食処理技術開発に関する基礎的研究，平成27年度土木学会西部支部研究発表会，2016.3（投稿済）
- 5) 下里哲弘，長坂康史，有住康則ほか：腐食鋼桁端部の性能回復技術に関する基礎的研究，土木学会構造工学論文集Vol.62，2016.3（査読中）

### 【社会への情報発信】

- 1) 土木施工 vol.55No.11 pp111-114「亜熱帯島嶼海洋環境下における鋼橋の防食」にてCS工法の事例紹介，発行：オフィス・スペース 2014.11
- 2) 橋梁と基礎 2015vol.49 pp16-23「沖縄における鋼橋の腐食と紫外線劣化に対する新防食技術開発の取り組み」にてCS工法の事例紹介，発行：株式会社建設図書 2015.10
- 3) 横河ブリッジホールディングス公開実験見学会「特別講演」での公演，参加者：約150名，場所：横河ブリッジホールディングス総合技術研究所，日時：平成27年10月23日，主催：横河ブリッジホールディングス・横河ブリッジ・横河住金ブリッジ
- 4) 海洋・港湾構造物維持管理士会 第9回講演会（沖縄）での公演，参加者：約100名，場所：沖縄県市町村自治会館，日時：平成27年12月2日，主催：海洋・港湾構造物維持管理士会
- 5) 平成27年度 橋梁マネジメント現場支援講習会での公演，参加者：約50名，場所：沖縄総合事務局，日時：平成27年12月2日，主催：沖縄総合事務局 開発建設部
- 6) 平成27年度鋼構造物の耐久耐候研究会での公演，参加者：約70名，場所：四国地方整備局，日時：平成27年12月17日，主催：四国地方整備局・中国地区耐候性鋼橋梁研究会・鋼構造物の耐候耐久研究会
- 7) 日本溶射学会 2015年（第2回）コールドスプレー研究分科会での公演，参加者：約30名，場所：琉球大学，日時：平成27年12月12日，主催：（一社）日本溶射学会コールドスプレー研究分科会
- 8) 第622回建設技術講習会での公演，参加者：約300名，場所：パレット市民劇場，日時：平成28年2月18日，主催：一般社団法人全日本建設技術協会

## ⑧研究成果の活用方策

### ○現場施工による高防食・高耐久性な性能回復工法への展開

CS表面処理による防食工法は、錆面上から防食下地施工が可能であり、浮き錆や層状錆がある場合でも3種ケレン相当の素地調整で防食下地施工が可能であり現場施工性に優れている。本技術は、桁端部の支承周り狭隘部や、鋼材のエッジ部、高力ボルトの角部のような鋼橋の腐食の弱点部に対し、高防食皮膜が形成可能であるため、鋼橋の長寿命化対策へ活用できる。今後は、能率向上を図ることで、より施工性を向上させる。

### ○防食便覧，マニュアル等への組み込み

本研究成果を展開するためには、防食工法として、塗装・金属溶射と並ぶ工法として確立し、便覧や各団体で発行しているマニュアル等に盛り込まれることにより、防食工法として適用しやすくなると考えられる。そのためには、適用範囲の設定や施工管理方法の規定を十分に議論する必要があると考えられる。

現在、内閣府沖縄総合事務局開発建設部・沖縄県土木建築部監修の「沖縄地区鋼橋塗装マニュアル」が平成28年度（予定）の部分改訂で、CS工法を用いた防食対策が盛り込まれる予定となっている。



## ⑨特記事項

(本研究から得られた知見、学内外等へのインパクト等、特記すべき事項があれば記入。また、研究の目的・目標からみた、研究成果の見通しや進捗の達成度についての自己評価も記入。)

### 【本研究から得られた知見、学内外等へのインパクト等、特記すべき事項】

#### ○橋梁の維持管理への貢献

本研究で開発を目指している表面処理技術は、錆・腐食の除去（ブラスト効果）を行いながら、防食性の高い亜鉛粉体を厚く鋼材面に付着させる（重防食）ものであり、さらには腐食凹凸面の不陸整形も期待できることから補修部材との密着性も向上でき、確実な耐力回復が期待できる。よって、腐食損傷を受けた鋼橋の増加が顕著になっている我が国にとって、道路資産の安全性の確保と対策後の耐久性の確保に大きく貢献できる。また、鋼橋の弱点である腐食損傷に対して、腐食減厚分を回復しつつ、犠牲陽極効果により十分な腐食耐久性を確保することにより、補修塗装などの維持管理費を大幅に縮減できる効果が見込まれる。

○本研究で開発された回復技術を実橋で実証実験を行う予定であり、実証実験後もその性能回復効果の検証を継続的にモニタリングする。その実証実験および継続モニタリングの結果によっては、他の腐食鋼桁の性能回復方法として展開できる体制にある。

### 【研究の見通しや進捗についての自己評価】

腐食損傷を受けた鋼材に対するCS工法による防食性能回復技術として、防食の基本性能、ブラスト効果、防食層成膜性、施工条件の影響、腐食面の影響、塗装との相性などを基礎実験により検証し施工要領素案としてまとめた。その成果により、腐食損傷を受けた実橋梁へ試験施工を実施し、本工法の発展に向けた新たな課題点を見出すことができた。また、腐食した鋼材の耐力の回復工法としてCS工法を適用した供試体を作成し、引張試験によるすべり耐力やせん断試験によるせん断耐力の性能回復効果の実験を実施した。この成果は、土木学会や維持管理に関する講演会などの発表会で発表している。

今後は、今回の実橋梁試験結果を踏まえ、施工箇所のモニタリングを実施するとともに、支承周りやクリアランスの無い狭隘部に対する施工方法検討や一般部などの施工状況が良い場所における施工能率向上検証を実施する。