

## 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（1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 てっひろ 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II
		[副領域]	タイプ	
③研究経費（単位：万円） ※H26は受託金額，H27以降は 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	1,150	914	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	（社）日本建設機械化協会 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。）			
	<p>本研究では，腐食損傷を受けた鋼桁端部の性能回復を目的に，現場施工性と高い防食性および十分な耐久性を有する表面処理技術を開発し，腐食減厚および断面欠損した桁端部の性能回復技術の開発を目標とする。本研究で開発対象の表面処理技術のCold Spray工法（以下，CSとする）は，ブラスト効果を持つアルミナ粉体と犠牲防食効果を持つ亜鉛（Zn）粉体を腐食鋼材面に音速以上で強力で密着させ，防錆と高防食化を図るものである。また，ある強度を持つアルミ（Al）粉体を用いて腐食凹凸面を整形（肉盛り）することで，断面減厚の強度回復と断面欠損に対する当板工法などの確実な耐力回復が期待できる。したがって，本研究はCS工法の適用によって腐食損傷レベルに応じた補修効果性・高耐久性・経済的合理性を有する性能回復技術の開発を図るものである。以下に本研究内容を示す。</p> <p>(1)腐食凹凸面の小さい実腐食鋼板にCS（Zn等）を適用し，その防食性能を腐食促進試験で評価する。また，CS鋼板の強度特性と疲労耐久性を検証する。</p> <p>(2)腐食凹凸面の大きい実腐食鋼板にCS（Al等）を適用し，その腐食凹凸面を平滑処理した後に当て板ボルト工法または鋼板／炭素繊維接着工法を適用し，耐荷力性能の回復効果を実験で確認する。</p>			

## ⑥これまでの研究経過

### (1) Cold Spray表面処理技術の開発 (防食性能の検証)

写真1に示す腐食凹凸面の小さい実腐食鋼板に対して、写真2に示すCS (Zn) を適用し、その防食性能の検証として以下の実験を行っている。

#### 1) アドヒージョンテスト

写真3に示す密着力測定器を使い、直径20mmドリリーを用いて1.0MPa/sの引張速度で試験した。試験の結果、平均密着力13.2MPa (膜厚190 $\mu$ m)であった。別途新材に実施したエポキシ系塗料の平均密着力は5.9MPa (膜厚159.2 $\mu$ m)であり、CSの方の密着力は2倍以上高い。

#### 2) 複合サイクル試験

温度35 $^{\circ}$ C、湿度90%を2時間、40 $^{\circ}$ C・50%を6時間で1サイクルとし、塩水濃度0.5、1.0、5.0%の複合サイクル試験を実施した。複合サイクル試験前のCSを行った腐食鋼板のSEM像を写真4に示す。写真より、母材とCSとの境界部に錆が一部残存していた。写真5に複合サイクル500時間後のSEM像を示す。同写真より、亜鉛の白錆がみられることから、CSの犠牲防食効果が確認できた。また、試験鋼板の表面には錆の発生は確認できない。なお、本試験は1500時間経過後も発錆は確認されていない。

#### 3) 今後の研究計画

実施工への適用を考慮して、CS工法のブラスト効果と犠牲防食効果の評価を目的に、最適なアルミナと亜鉛粉体の配合を検討し、下図に示すパラメータで腐食鋼板へCS施工し、その上にふっ素系のC5塗装を施した試験体を作成した。今後、この試験体の防食性能の評価、密着力試験を行う。また、クロスカット導入の大気暴露試験、複合サイクル促進試験を実施する。

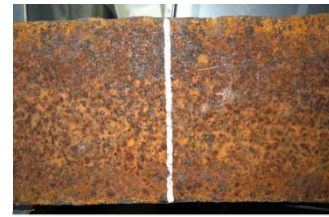
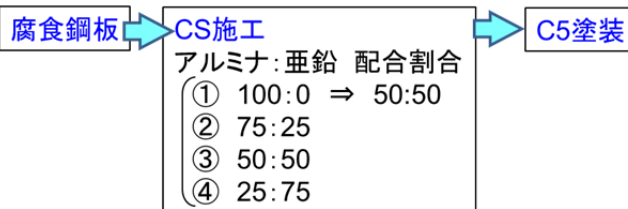


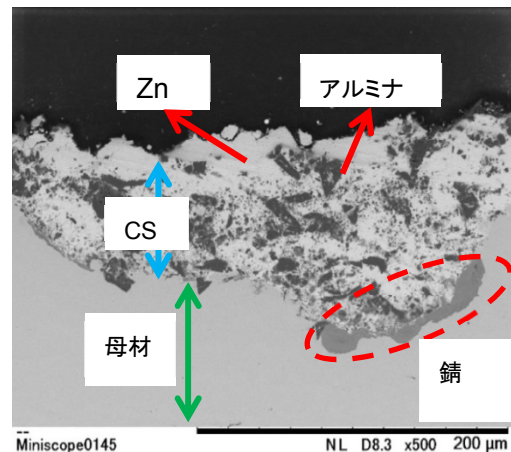
写真1 実腐食鋼板 (辺野喜橋より)



写真2 CS工法



写真3 アドヒージョン



(CS厚: 190 $\mu$ m, 密着力 13Mpa)

写真4 CS鋼板 ( $\times$ 500SEM) <試験前>

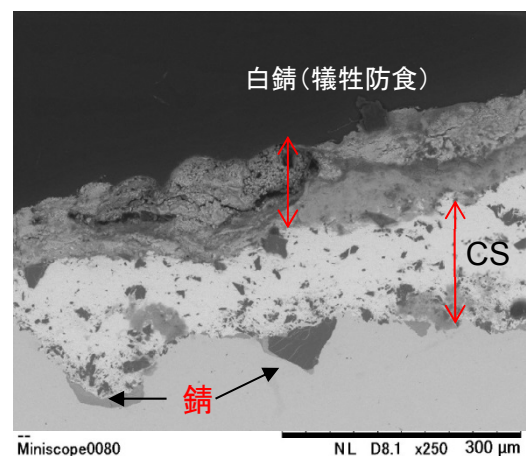


写真5 複合サイクル 500h 試験後

## (2) 腐食損傷の分類と補修鋼板の引張特性

CS工法を施した試験鋼板に対して、静的引張試験および疲労試験を行い、付着性および強度回復効果の検証を行う。現在、上述実験用の腐食鋼板を作成し、腐食損傷レベル分類のためのレーザー計測を行っている。以下に研究進捗状況を示す。

### 1) 実腐食鋼板の腐食損傷の分類

実腐食凹凸面の分類を目的に、実腐食鋼板から採取した腐食鋼板を1号試験片サイズに切断し、写真6に示すレーザー変位計で計測した。対象の腐食試験鋼板は75体である。図1に計測結果を示す。縦軸は平均腐食深さ、横軸は腐食深さの標準偏差である。図より、平均腐食深さと標準偏差には強い正の相関関係があることがわかる。よって、腐食損傷レベルの分類として、平均腐食深さと標準偏差の関係を用いる。分類は、標準偏差が0以上0.5未満のものをグループ1(均一腐食)、0.5以上1.0未満のものをグループ2、1.0以上1.5未満のものをグループ3、それ以上をグループ4として、腐食凹凸面のレベルに応じた補修工法の適用性を評価する。

### 2) 補修材を接着した腐食鋼板の引張特性

腐食凹凸面の状態に応じて適切な補修方法を選定方法の検討として、図1に示す実腐食凹凸を有する鋼板試験体を用いて、鋼板または炭素繊維を接着し、その補修効果を検証する。補修材には新材を用いた既往研究にて有効であった薄鋼板(板厚2.3mm)と高強度型の炭素繊維を使用し、エポキシ系接着剤を用いる。

### 3) 当て板ボルト工法の引張特性

摩擦面の腐食凹凸形状を有する試験体を用いてボルト継手の引張試験を行う。試験体は写真8に示すように片面が腐食面、もう片面が新材面として、ボルト2本の片面摩擦とする。

### 4) 今後の研究計画

現在、腐食鋼板を用いた各補修試験体の予備実験が終了し、腐食損傷レベル別の試験体を製作し、引張試験を準備中である。

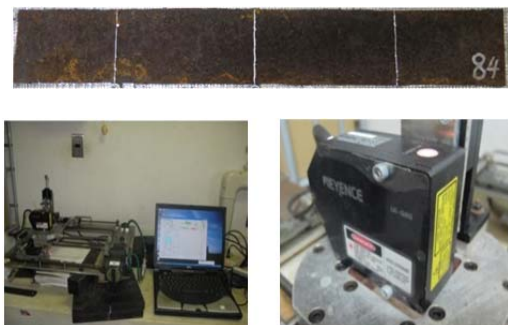


写真6 レーザー計測システム

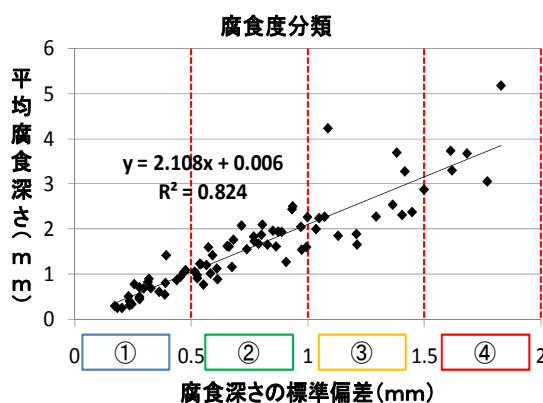


図1 腐食損傷の分類



写真7 補修材接着工法の試験状況



写真8 当て板ボルト工法の試験状況

(3) 腐食鋼桁のせん断耐力回復技術の開発 (実腐食鋼板を用いたせん断耐荷力試験体)

写真9に示す中型せん断試験体に対して、写真11のように着目ウェブパネルに腐食鋼板を用いて、Cold Spray工法で腐食面を処理し、鋼板接着または炭素繊維接着の各回復技術を適用したせん断耐力実験を行い、耐力回復技術の検証を行う。また、断面欠損した鋼桁モデルに対して、Cold Spray工法+当て板接着または摩擦ボルト工法を適用し、中型せん断試験体に対してせん断耐荷力実験を行う。腐食桁の製作状況として、ウェブ腐食試験体3体が製作完了であり、ウェブと下フランジ腐食試験体3体と腐食ウェブと下フランジ破断試験体3体は製作中である。今後、レーザー変位計測の継続、せん断実験の実施およびFEM解析を実施していく。なお、図2には新材を用いた際の補修技術の回復効果を示す。

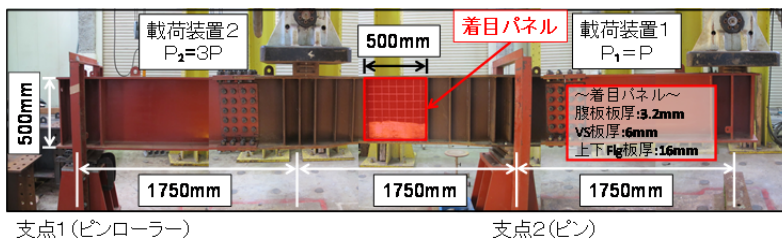


写真9 せん断試験装置

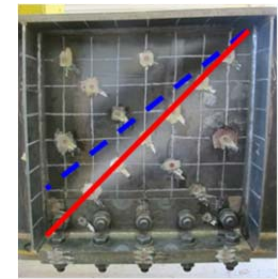


写真10 試験後のせん断座屈

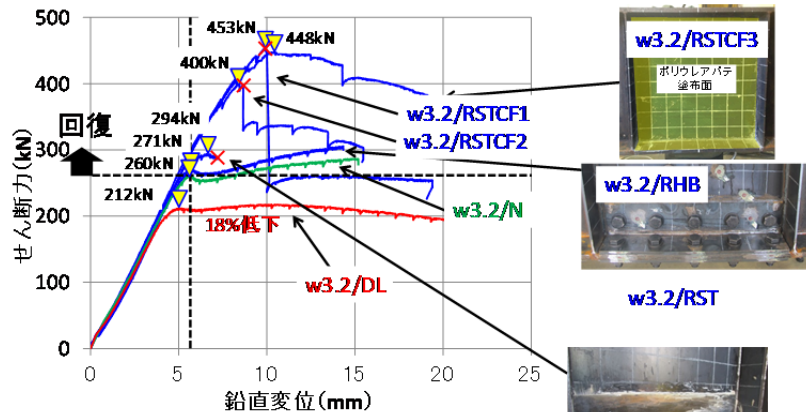


図2 各補修工法の性能回復 (新材: 既往研究)



写真11 腐食試験桁

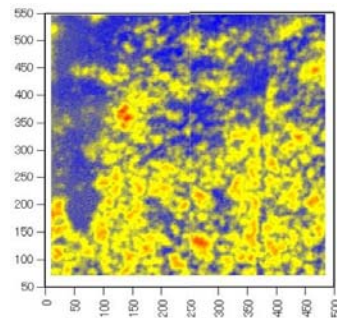


写真12 腐食コンターと大型レーザー計測システム

#### (4) 腐食損傷を受けた実橋を用いた実証実験

本研究では、腐食損傷を受けた鋼桁端部の性能回復技術の提案を目的として、腐食減厚および断面欠損した桁端部の耐荷力回復を図り、現場施工性、高い防食性および十分な耐久性を有する回復技術法の開発を行う。その目的を達成するためには、実腐食した桁端部の腐食状況とその腐食発生原因を特定することが重要である。腐食損傷を受けた実橋を用いた検証実験に適用する鋼桁橋として、研究協力者の内閣府沖縄総合事務局開発建設部の管理橋を選定した。

##### 1) 本橋の概要と腐食状況

対象となる鋼桁橋は写真13に示すように離岸距離約300mに位置し、河川上に架かっている。海と対象橋梁との間に障害物は少なく、潮風の影響を直接受ける。現在、写真16に示すように、飛来塩分量計測用のガーゼ、濡れ時間計測用の温湿度計、腐食速度計測用のワッペン鋼板を桁端部に設置し腐食環境を計測中である。また、対象橋梁の特徴としては、写真14と15に示すように、桁支承部付近と桁端部の塗装塗り替えの痕跡が有り、補修歴がある。現在の状況として補修塗装箇所が腐食している。

##### 2) 今後の研究計画

- ① 腐食環境調査として、飛来塩分量、濡れ時間、腐食速度の計測を継続して実施する。
- ② Cold Spray工法の現場施工性の検討として、CS施工姿勢に応じたノズルの開発を行う。
- ③ 腐食による断面欠損に対する回復技術法の実橋試験施工として、2年目（平成27年度）に部分的な適用を行う。3年目（平成28年度）には実橋において腐食により断面欠損した部位に対して、Cold Spray工法を適用し、摩擦面処理を行い、鋼板や炭素繊維の接着工法または当板ボルト工法を適用し、補修効果の検証を行う。



写真 13 検証実験に選定された鋼橋



写真 15 下フランジ部の腐食（再発）



写真 14 支承部 腐食状態（再発）



写真 16 腐食環境調査の状況  
（塩分、濡れ、腐食速度）

## ⑦特記事項

【研究で得られた知見，成果，学内外等へのインパクト，研究としての新規性，アピールポイント】

### ○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（肉盛り）も，断面減厚の回復も図ることから，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は，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】

CS工法のブラスト効果および防食効果の検証，腐食レベルの分類とそれに対応する補修方法の検討，各種補修方法を適用した新材試験体を作成し，せん断耐荷力の性能回復効果を確認した。その成果は，査読論文へ投稿し，さらに土木学会年次講演会や支部発表会などで発表している。

今後，CS防食性能評価では，より防錆効果が得られる最適な配合の検討，実施工へ向けた表面処理施工の防錆性能の検証を行う。CS鋼板の強度特性および疲労耐久性の評価，耐荷力性能回復効果では，腐食レベルに応じたCS施工及び表面処理を腐食鋼板に施し，引張試験により強度特性および疲労耐久性の評価を行い，せん断試験によりせん断耐荷力の性能回復効果の検証を行う。各種補修方法の実橋梁への適用性の検証を行い，腐食損傷を受けた橋梁への新しい性能回復技術の適用性を検討する。