

道路政策の質の向上に資する技術研究開発

【研究終了報告書】

① 研究代表者	氏名 (ふりがな)		所属	役職
	しもきと 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
		[副領域]		
③ 研究経費 (単位:万円)	平成26年度	平成27年度	平成28年度	総合計
	986	946	894	2,826
④ 研究者氏名				
氏名		所属・役職 (※平成29年3月31日現在)		
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・目標を簡潔に記入下さい。)				
<p>本研究では厳しい腐食環境と施工条件を有する鋼桁端部を対象として、腐食した鋼桁端部に対して高耐久性を有する防食技術の開発を目的とし、ブラスト効果を持つアルミナと犠牲防食効果を発揮する亜鉛の混合粉体を用いた低温低圧型金属溶射「Cold Spray表面処理技術」(以下、CS)を適用し、その防食性能と現場適用性を検証する。また、腐食で部材破断した鋼桁端部に対し、防食下地にCSを適用した上に当板ボルト工法と炭素繊維接着工法の補修を施した際の耐荷力回復効果を実験的に検証する。以上より、鋼桁端部の腐食レベルに応じた耐食性および耐荷力を持つ性能回復技術の開発を目標とする。以下に研究内容を示す。</p>				
(1) 腐食鋼材面に対するCS工法の防食性能評価				
<p>鋼桁端部の防食補修は、狭隘な施工条件のため残存するさびに対する防食技術が要求される。本研究では、先ず残存さび面での亜鉛・アルミナ混合粉体の皮膜形成メカニズムの解明と最適配合比率を検討する。次に狭隘な施工条件に対応可能なCS装置を開発し、それらの防食性能を評価する。</p>				
(2) 腐食した実橋桁端部の防食性能回復を目的としたCS実証試験				
<p>腐食鋼材面に対するCS工法の防食性能実験と狭隘な施工条件に対応可能なCS装置の開発に基づき、CS施工要領を作成し、腐食した実橋桁端部の防食性能回復を目的としたCS実証試験を行う。</p>				
(3) 腐食凹凸面へのCS防食処理面上に当て板と炭素繊維工法を用いた際の耐荷力回復効果の評価				
<p>激しい腐食で部材破断した桁端部の耐荷力回復を目的に、腐食凹凸面にCS工法で防食下地を施した接合面に当板ボルトと炭素繊維を適用した場合のせん断耐荷力特性を実験的に検証する。</p>				

⑥これまでの研究経過・目的の達成状況

○研究の進捗や目的の達成状況

(1) 腐食鋼材面に対するCS工法の防食性能評価

大気暴露試験でさびた鋼板を用いて、亜鉛単独、アルミナ単独、亜鉛・アルミナ混合粉体別で実験を行い、さび面でのCS皮膜形成メカニズムを解明した。また、最適配合比率（亜鉛：アルミナ＝60：40）を提案した。

(2) 腐食した実橋桁端部の防食性能回復を目的としたCS実証試験

実装対象の国道管理の鋼桁橋における調査およびH27実証試験を踏まえ、桁端部の狭隘な施工条件に対応可能で防食性能のあるCS装置のエクステンションを開発した。また、CSノズルを増径（5→7mm）し施工能率を向上し、さらに高品質な防食皮膜を形成できる半自動施工装置を開発した。

さび鋼板面に対するCS工法の防食性能試験、狭隘な施工条件に対応可能なCS装置の改良等に基づき、CS施工要領を作成し、腐食した実橋桁端部（国道管理橋）で実証試験を行った。

(3) 腐食凹凸面にCS防食下地を用いた耐荷力回復効果の評価

実腐食凹凸を持つ鋼板に対して、CS防食下地処理を施した鋼板面に、当板ボルト接合および炭素繊維接着を施し、せん断耐荷力実験（1/3スケールと実大スケール）を行い、CS防食下地面と耐荷力回復効果との関係を実験的に検証した。

○各研究者の役割・責任分担・本研究への貢献等

- ・研究代表者（下里）は、研究計画、各種実験、現地調査、実証試験および評価を行った。
- ・共同研究者（有住）は、中型耐荷力実験およびFEM解析結果を評価し、共同研究者（小野）は中型耐荷力実験の評価および大型せん断耐荷力実験の実施と評価を行った。
- ・CS実証試験は、橋梁管理者の内閣府沖縄総合事務局開発建設部（道路管理課、南部国道事務所、嘉手納出張所）との連携で実施した。
- ・CS施工技術の開発は、(株)横河ブリッジ等の協力で実施した。中型試験体は金秀鉄工(株)（沖縄県）、大型試験体は川田工業(株)の協力で製作と試験体設置等を実施した。

⑦中間・FS評価で指摘を受けた事項への対応状況

（中間・FS評価における指摘事項を記載するとともに、その対応状況を簡潔に記入下さい。）

中間評価結果では、コールドスプレーについて各種試験などを精力的に実施しており、順調に研究が進捗しているとの評価を受け、以下2件の参考意見を頂いている。それらの対応状況を以下に示す。

1. コールドスプレーによる性能回復メカニズムを明確に説明するとともに、従来の補修工法と比較し、防食性能や施工性などの優劣について示していただきたい。
→大気暴露試験でさびた鋼板を用いて、亜鉛単独、アルミナ単独、亜鉛・アルミナ混合粉体別にCS施工を行った後、付着強度特性、皮膜厚特性およびSEM断面観察による詳細観察を行い、CS皮膜形成メカニズムを解明している。また、従来工法の金属溶射はブラスト処理面（ISO Sa2.5やSa3.0）では金属皮膜が形成できるが、2種ケレンやさび面には全く付着しないことを確認した。
2. コールドスプレーによる補修を実施する際の、現場条件に応じた留意事項をとりまとめたいただきたい。
→桁端部の狭隘な施工条件に対応できるCS装置のエクステンション（ボールジョイント、エルボ、延長パイプ等）を開発した。また、高品質な防食皮膜を形成できる半自動施工装置を開発した。

③研究成果

1. さび鋼板面上でのCS防食皮膜の特性

CS粒子は音速レベルの衝突エネルギーにより、基材面に強固に付着すると考えられているが、さび面への付着メカニズムの検証研究はない。本研究ではさび鋼板面に対する亜鉛・アルミナ混合粒子のCS皮膜の付着メカニズムと防食性を検証した。

検証試験には現場施工性の良い小型（重量20kg以下）の低圧低温型CS装置を適用した（写真1）。この低圧低温型CSは、粒子速度300m/s前後、圧縮ガス圧力0.5MPa、瞬間使用温度400℃程度であり、緻密で高い付着力の皮膜形成が特徴である。使用する亜鉛粒子はZn成分99%以上（粒径17 μ m・Hv硬度35）、アルミナ粒子はAl₂O₃成分99%以上（粒径45 μ m・Hv硬度1800）である。試験にはSM400材（Hv硬度120程度）を琉球大暴露場（相対湿度79.6%、飛来塩分量0.12mdd、腐食速度0.01mm/y、離岸距離約2.0km）で大気暴露したさび厚約100 μ mのさび鋼板を使用した。図1にさび鋼板面でのCS皮膜のSEM断面観察結果を示す。図より、アルミナによる除さびと亜鉛皮膜の形成が確認できる。また、鋼材面とCS皮膜間には、アルミナの目粗し状態も観察できる。

よって、さび鋼板面での亜鉛とアルミナ混合粒子のCS皮膜形成メカニズムは、音速での衝突下にて、鋼より硬いアルミナの除さび効果と鋼材面の目粗し効果が生じ、鋼より軟らかい亜鉛粒子の塑性変形による密着効果等で、さび鋼板面に強固に付着すると推定される。また、図1に確認できるように、一部残存さびがあり、その上に亜鉛皮膜が形成されている。この残存さび状態での防食性の検証として、恒温恒湿機による乾湿繰返しの腐食促進試験を行った。試験は2時間の湿潤状態（35℃、RH90%）と6時間の乾燥状態（40℃、

RH 50%）の計8時間を1サイクルとし、3サイクル毎に塩水(1%or5%)を表面に塗布した。126サイクル（1,008時間経過）後の腐食促進試験の結果、試験鋼板表面のさび発生はなかった。また、図2に示すCS皮膜のSEM断面観察と元素分析結果より、犠牲防食反応による白色の腐食生成物のみが確認された。このことより、残存さび面でのCS皮膜は強固な付着力による高い防食性が確認された。



写真1 低圧低温型CS機械と施工状況

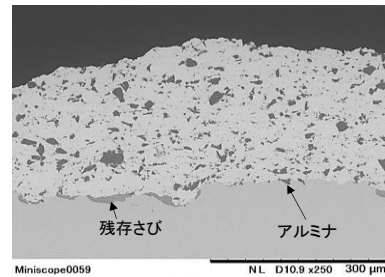


図1 さび面のCS皮膜（亜鉛 50:アルミナ 50）

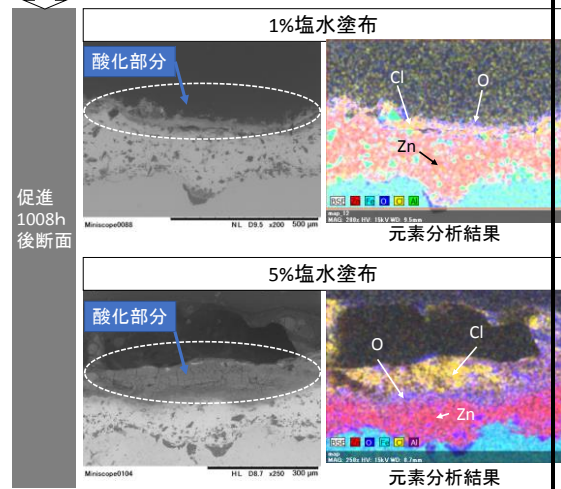
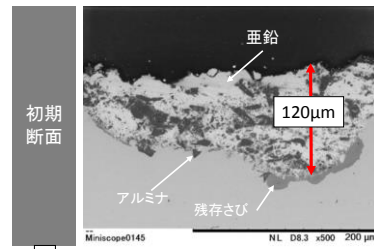


図2 促進試験後のSEM断面観察と元素分析

2. 防食効果の高いCS配合比率の検討

混合粒子を用いたCSは亜鉛粒子の配合比率が皮膜厚に影響し、アルミナ粒子の配合比率が除さび度と付着性に影響すると考えられる。よって、亜鉛粒子とアルミナ粒子の配合比率を(10:90, 20:80, 30:70, 40:60, 50:50, 60:40, 70:30)に変化させ、皮膜厚、除さび度及び付着性の評価を行った。使用したさび鋼板は2種ケレン後に残存することを想定したさび厚約100 μm の鋼板を使用した。図3にSEM断面を用いて実施したCS皮膜厚と残存さび厚の算定方法を示す。

図4に亜鉛とアルミナの配合比率別のCS皮膜厚の計測結果を示す。計測は写真2の電磁膜厚計を用いた。計測結果より、亜鉛40%：アルミナ60%で目標皮膜厚100 μm 以上を確保できた。また、皮膜厚は亜鉛配合比率が多くなるほど厚くなることを確認した。

図5に新材鋼板およびさび鋼板に対して配合比率を変化させた場合の付着力(棒グラフ)およびさび除去率(折れ線グラフ)の関係を示す。ここで、さび除去率は、初期さび厚(約100 μm)に対するCS施工後の残存さび厚の割合である。図より、アルミナ配合比率40%以上で新材鋼板上の亜鉛単体皮膜の付着力と同程度であることを確認した。さび除去率とはアルミナ配合比率100%~40%まではさび除去率90%以上を有しているが、30%配合比率では、さび除去率が急激に低下した。付着力とさび除去率の関係より、アルミナ比率が30%以下では除さび処理能力が小さくなり、付着力が低下したと考えられる。

以上のことより、2種ケレン後に残存することを想定した約100 μm 厚のさび面上に適用可能な亜鉛とアルミナの配合比率は、40:60, 50:50, 60:40の3配合であり、60:40が付着力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考えられる。

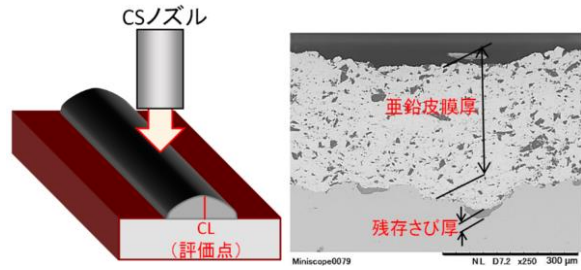


図3 CS皮膜厚の計測方法 (SEM断面)

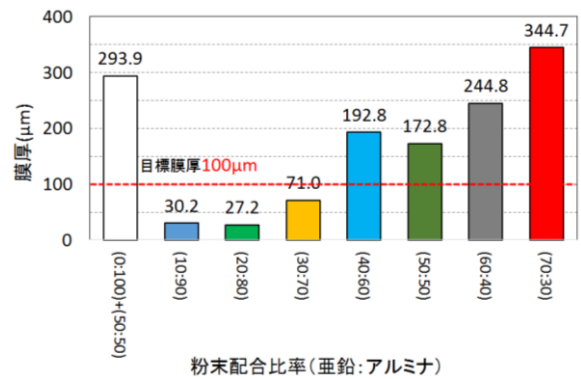


図4 さび面上に形成されたCS皮膜厚特性



写真2 電磁膜厚計

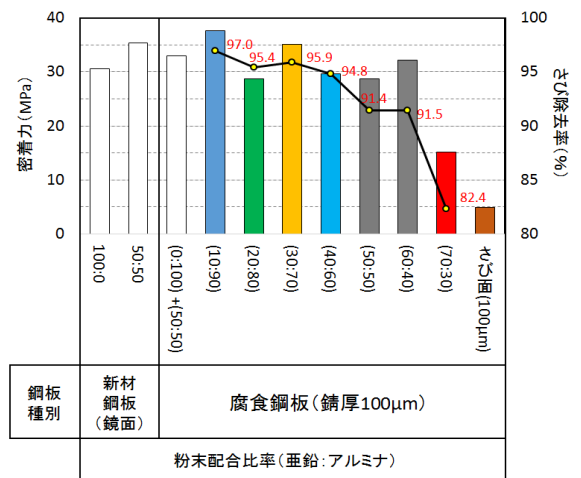


図5 さび面上に形成されたCS皮膜の付着性

3. 狭隘な施工条件に対するCS施工技術の検討

(a) エクステンションの開発

支承周りなどの狭隘な施工条件下の高耐食性の確保を目的に、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、その防食性能を検証した。図6に開発したエクステンションを示す。各エクステンションの膜厚測定結果より、ボールジョイント、90°エルボは要求膜厚100 μ mを満足した。一方、90°エルボ+延長パイプは要求膜厚を下回った。これは長いノズル内でエネルギーロスが生じたためと考えられる。

(b) 施工効率化のための検証

ノズル径を拡張し、皮膜厚を増加して施工効率化を図ることを目的として、写真3に示す径5mm（オリジナルノズル）と径7mm（TFノズル）を比較検討した。評価する粒子速度は高感度CCDカメラとレーザーを用いて測定した。図7の測定結果より、拡張径7mmの粒子速度は径5mmに比べて遅くなった。一方、両ノズル径の付着力測定結果より、両者は同程度であった。よって、7mm径の粒子速度は付着力に影響していないことが確認され、CS施工に適用可能と判断した。

次に施工能率化の検討として、写真4の半自動装置を用いてノズル移動速度を5, 10, 15mm/secの3種類で試験した。図8の移動速度と膜厚の関係より、速度5mm/sでは皮膜厚100 μ m以上確保できたが、速度10mm/s以上では皮膜厚が低下した。これは速度増加によりパウダー供給量が低下するためと考えられる。これより現地施工においては、ノズル移動速度5mm/sを基本とする。

(c) 施工要領の作成

上記検討結果より、以下のCS施工要領を作成した。

- 1) 亜鉛とアルミナ配合比率は60：40を基本とする。
- 2) 施工前のさび厚は100 μ m以内までケレン処理する。
- 3) 施工角度は施工面に対して90°を基本とする。
- 4) ノズルはTFノズル（径：7mm）を基本とする。
- 5) ノズル移動速度は5mm/sとする。
- 6) エクステンションは施工条件に応じてボールジョイント、90°エルボを適用する。

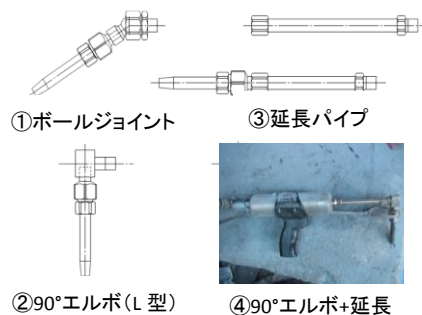


図6 各種エクステンション



写真3 検討したノズルの外観

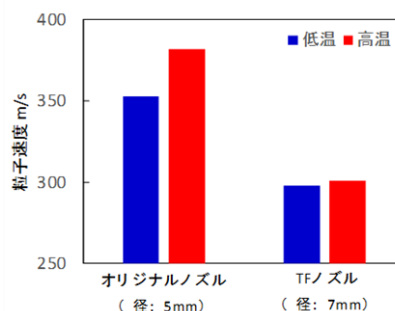


図7 各ノズルの平均粒子速度



写真4 半自動施工装置

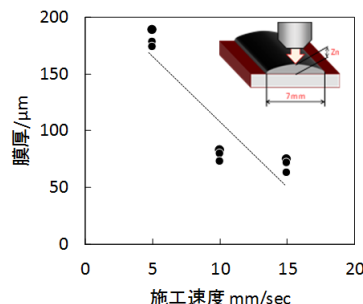


図8 移動速度と膜厚の関係

4. 腐食した鋼桁端部におけるCS実証試験

腐食した実橋桁端部に対して施工要領に基づき実証試験を行った。平成27年度は比較的良好な施工条件の下フランジ上面に対して実施した。平成28年度は桁端部の狭隘な施工条件に対して実施した。また、半自動化施工装置を用いた施工効率化の検証も実施した。

(a) CS実証試験方法

対象橋梁は沖縄県北谷町に位置する供用約40年経過した塗装鋼桁橋（橋長：25m，幅員：15.6m，主桁数：17）である。本橋梁は離岸距離300mに位置し，河川上に架かっており，腐食減耗量 $0.09\text{mm}/\text{年}$ ，飛来塩分量 0.09mdd （支承上・桁内面）の環境である。写真5に示すとおり，施工対象桁の桁端部は支承部周辺，下フランジ上下面のコバ部および支点補剛材に著しい腐食劣化が生じていた。施工後は，CS皮膜の品質確認のために，外観観察，膜厚測定，付着力測定を実施し，品質確認後にCS皮膜上に塗装を施した。

(b) CS実証試験1【平成27年度のCS施工】

桁端部の3本の主桁下フランジを対象に，CS施工を実施した。さび除去は，1種ケレン，2種ケレン（ $100\mu\text{m}$ 以内の残存さび），塗装活膜を残した3種ケレンの3パターンとした（写真6左）。適用したCSの配合比は $\text{Zn}:\text{Al}_2\text{O}_3=60:40$ とし，ノズルは全てTFノズル（7mm径）で手動施工した（写真6右）。図9にCS施工前後の状況を示す。施工後の外観目視観察では，CS施工面で発さびは確認されず，目標膜厚 $100\mu\text{m}$ 以上を満足した。また全施工箇所で付着力 20MPa 以上を確保できた。

(c) CS実証試験2【平成28年度のCS施工】

1) 狭隘な施工箇所でのCS施工（写真7）

桁端部の2本の主桁下フランジを対象に，狭隘な施工条件でCS施工を行った。実証試験では，排水管の干渉するG1桁外面の下フランジおよび支点補剛材，狭隘な桁端部の下フランジ下面や支承部周り等それぞれの施工条件に応じて各種エクステンションを適用した。実証試験の結果，桁端部の狭隘箇所においても所定のCS皮膜を施工することができ，CS施工後の付着力も満足する結果となった。



写真5 実証試験対象の桁端部の腐食状況



写真6 左：2種ケレン状況，右：CS施工



図9 CS施工前後状況



写真7 (a) 下フランジ上面（通常） (b) 排水管干渉



写真7 (c) 支点補剛材 (d) 支承部

写真7 施工条件別のCS施工

2) CS施工効率化の実証試験

下フランジ上面を対象として、専用レール・治具を設置した半自動化施工を実施した（写真8）。施工にはTFノズル（7mm径）を用いて、ノズル移動速度は5mm/secで施工した。実証試験の結果、半自動化施工は手動施工と比べて、作業負担の軽減で施工性が向上し、CS皮膜厚を安定して形成できた。

3) 付着力特性

表1に各実証試験での付着力測定結果を示す。表より、一般的に塗装に必要な付着力目安は2MPa以上とされているが、CS皮膜はいずれのケースにおいても高い付着力を有することが確認できた。

(d) 実証試験後のモニタリング調査

平成27年度と平成28年度に実証試験を行った施工箇所に対して、外観モニタリング調査を実施した。なお、平成27年度施工箇所は約1.5年経過時、平成28年度施工箇所は約0.5年経過時のモニタリングである。

図10に平成27年度に残存さび上からCS施工した下フランジ面の1.5年経過後の状況を示す。接近外観目視の結果、さび発生や塗膜劣化は確認されず、良好状態を維持していた。

図11、図12に平成28年度にCS施工した桁端部エッジ部と支点補剛材部の0.5年経過後の状況を示す。両箇所とも施工前には著しい腐食損傷が発生しており、狭隘な施工条件のため各種エクステンションノズルを適用し、CS施工を実施した。施工後0.5年経過の接近外観目視の結果、さび発生や塗膜劣化は確認されず、外観上良好状態を維持していた。このことから、狭隘部施工に対しても、本工法が高い耐食性を有することが確認できる。



写真8 半自動化施工状況

表.1 付着力測定結果

使用したノズル	平均MPa	破壊形態	ドリ側表面外観	母材側表面外観
直線型ノズル	24.5	凝集破壊		
90°エルボ+延長	14.2	凝集破壊		
60°エルボ	33.4	破壊無し		
60°エルボ+延長	21.8	凝集破壊		



図10 1.5年経過後の状況

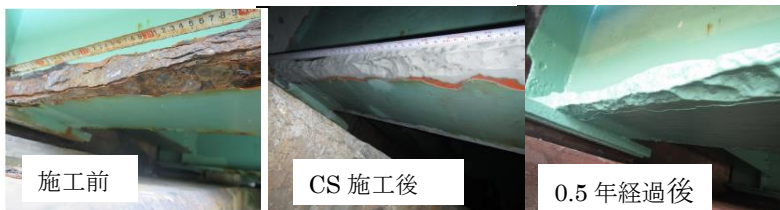


図11 桁端部 下フランジのエッジ部

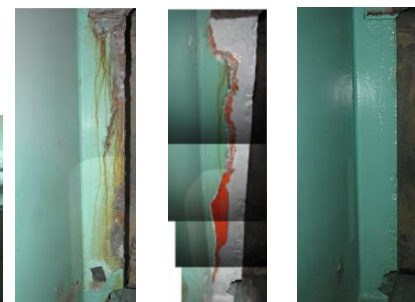


図12 支点補剛材部

施工前 CS施工後 0.5年経過

5. CS防食を用いた桁端部の耐荷力回復効果の評価

桁端部は狭隘な構造環境のため、十分なさび除去が困難なため早期再劣化が生じる可能性がある。本研究では残存さび上で防食性能を有するCold Sprayを施し、それが一般的な工法の当板ボルトおよび炭素繊維接着の耐荷力回復効果に及ぼす影響を検討した。

(a) 中型せん断耐荷力試験

実橋桁端部の1/3モデルの中型試験体を製作し、当て板ボルト工法及び炭素繊維接着工法を適用したせん断耐荷力試験を行った。

図13に実腐食橋梁より採取した腐食鋼板200枚に対するレーザー計測により算出した平均腐食深さと平均腐食深さの標準偏差の関係を示す。図より、中型せん断試験体の着目ウェブに用いる腐食鋼板は、平均腐食深さ0.7-1.7mm程度であり、実腐食レベルは中程度の腐食凹凸状態を有する試験体である。写真9に試験体状況を示す。また、本試験体は当板設置面と炭素繊維接着面へはCS（亜鉛：アルミナ=60：40）を皮膜厚100 μ mで施工している。また、実桁端部の腐食損傷を参考として、下フランジとウェブとの溶接接合部を人工的に切断し、垂直補剛材境界部を切上げしている。その破断損傷に対して当板ボルト及び炭素繊維を接合して耐荷力を回復する設計である（写真10）。

図14のせん断力と鉛直変位の関係より、腐食レベル中程度の接合面にCS処理して状態での耐荷力は健全同等に回復しており、最大せん断耐荷力以降も十分な変形性能を有していた。図15の炭素繊維接着のせん断力-鉛直変位関係より、同工法でも下地処理のCS皮膜が耐荷力回復効果に影響はないことが確認できる。

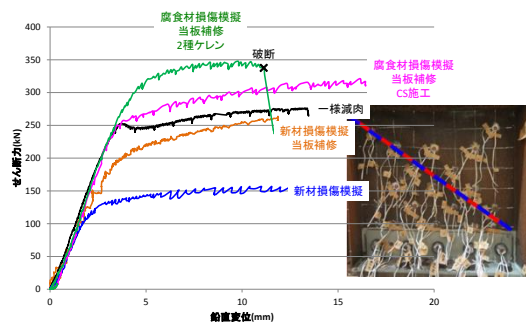


図14 せん断力-鉛直変位（当板ボルト工法）

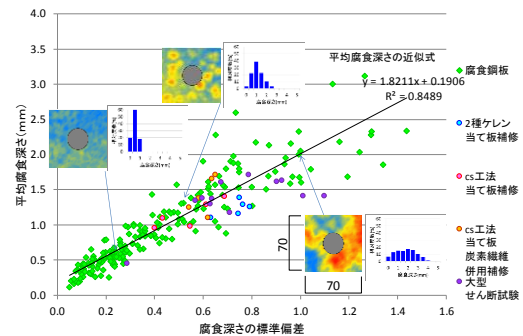


図13 レーザー計測による腐食深さ

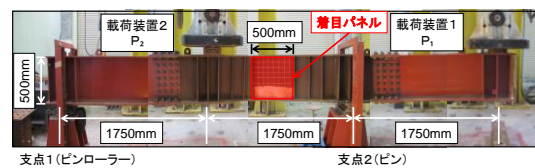


写真9 中型せん断耐荷力の試験体

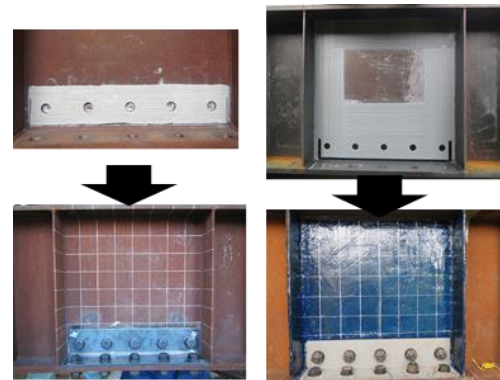


写真10 当板ボルトと炭素繊維接着工

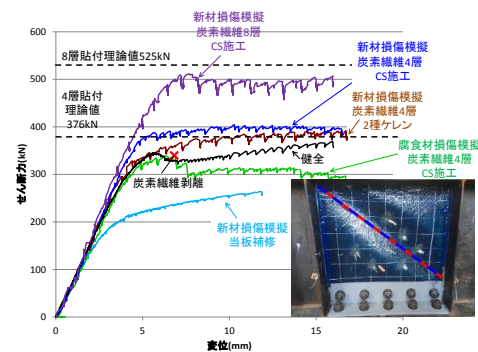


図15 せん断力-鉛直変位（炭素繊維接着）

(b)大型せん断耐荷力試験

実大スケールの大型せん断耐荷力試験により, 当板ボルトおよび炭素繊維接着工法の耐荷力回復効果の最終検証を行った. 大型試験体のウェブに用いる腐食鋼板は, 図13より平均腐食深さ0.6-1.1mm程度と中程度レベルの腐食凹凸状態である. 試験体には中型せん断試験体と同様に, 当て板設置面および炭素繊維接着面にCS工法を適用し (写真11左), ウェブと下フランジ境界部に腐食破断を人工的に導入した. 荷重は6000kNの大型試験機を使用した (写真11右). 図16, 図17に大型試験体の寸法と当板ボルト及び炭素繊維接着の設計概要図を示し, 写真12には各試験体の状況を示す.

図18の当て板ボルト工法のせん断力 V と鉛直変位 δ の関係より, 実大試験体においても当て板ボルト工法により十分な補修効果が得られ, 当て板設置面の下地処理としたCS皮膜は耐荷力回復効果に影響を及ぼさないことが確認された. 図19の炭素繊維接着工法のせん断力 V と鉛直変位 δ の関係より, 炭素繊維接着工法の下地処理として, 当て板ボルト工法の場合と同様に, CS皮膜が耐荷力の回復効果に影響しないことが確認できる. 写真13に実験後のせん断座屈状況を示す.

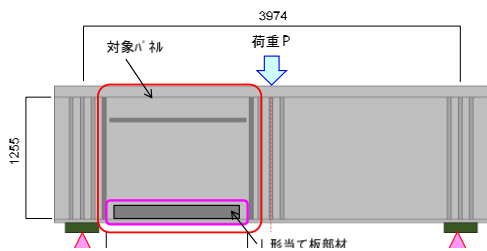


図16 大型試験体 (当板ボルト)

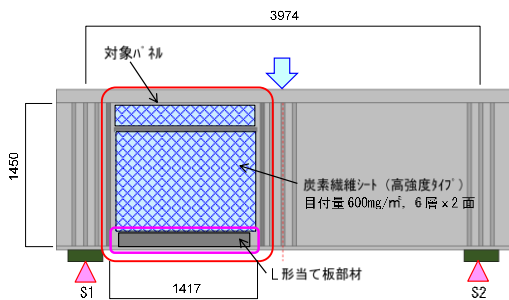


図17 大型試験体 (炭素繊維)



写真11 CS施工(左)と大型試験装置(右)



写真12 試験体 (左: 当板, 右: 炭素繊維)

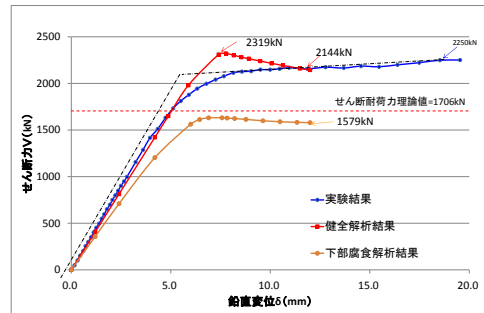


図17 せん断力-鉛直変位 (当板ボルト)

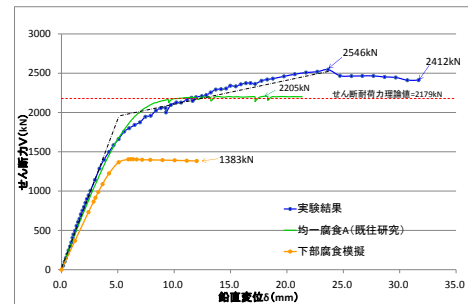


図19 せん断力-鉛直変位 (炭素繊維)



写真13 実験後のせん断座屈状況 (左: 当板, 右: 炭素繊維)

⑨研究成果の発表状況

(本研究の成果について、これまでに発表した代表的な論文、著書(教科書、学会抄録、講演要旨は除く)、国際会議、学会等における発表状況を記入下さい。なお、学術誌へ投稿中の論文については、掲載が決定しているものに限ります。)

【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(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(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, 土木学会西部支部研究発表会, 2016. 3
- 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
- 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
- 6) 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、鋼構造論文集、Vol.24, No.93, 2017.3
- 7) 加藤祐介, 下里哲弘, 田井政行, 有住康則, 押川渡: 鋼材さび面に対するCold Spray工法の防食性能に関する電気化学的考察, 土木学会, 第72回年次学術講演会(2017年9月発表)
- 8) 加藤祐介, 下里哲弘: 腐食損傷を受けた実橋鋼桁端部への低温低圧型溶射工法(Cold Spray工法)の実証試験, 平成29年度沖縄ブロック国土交通研究会, 2017.7
- 9) 高橋鴻, 下里哲弘: 腐食鋼桁端部の損傷レベルに応じたせん断耐荷力回復工法の検討, 平成29年度沖縄ブロック国土交通研究会, 2017.7

⑩研究成果の社会への情報発信

(ウェブ、マスメディア、公開イベント等による研究成果の情報発信について記入下さい。ウェブについてはURL、新聞掲載は新聞名、掲載日等、公開イベントは実施日、テーマ、参加者数等を記入下さい。)

- 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

⑪研究の今後の課題・展望等

(研究目的の達成状況や得られた研究成果を踏まえ、研究の更なる発展や道路政策の質の向上への貢献等に向けた、研究の今後の課題・展望等を具体的に記入下さい。)

- (1) 本研究で実証したCS防食技術は、ケレン後の残存さび面上でも高耐久性が期待できる。今後の展開としては、海塩粒子の飛来する沿岸地域や凍結防止剤の散布地域など様々な腐食環境の実橋に対してCS防食技術を適用し、その防食効果を検証することが求められる。
- (2) 本研究では、狭隘な桁端部や支承部とその周辺部材に対するCSの防食性を実証した。今後の展開としては、鋼橋の腐食弱点部である鋼材のエッジ部や高力ボルトの角部のような局部でも十分な防食皮膜の形成が可能な技術への発展が求められる。
- (3) 本研究で、狭隘な施工条件に対応可能なエクステンション（ボールジョイント、エルボ等）を開発した。また、施工能率の向上策として、ノズル径の拡大とノズル移動速度の検討を行い、音速下で粉体粒子速度が強固な付着に不可欠であることが判明した。今後の課題として、更なる施工能率の向上を図れる機器開発等を進めていく必要がある。
- (4) 現行基準では、当て板接触面や炭素繊維接着面はさび除去や腐食凹凸の不陸処理が求められる。本研究では、それらの補修面の防食下地としたCS皮膜が、耐荷力回復効果に及ぼす影響はないことを実験的に実証した。また、本研究の当て板試験体等に用いた腐食凹凸程度であれば、腐食凹凸面の不陸処理なしでも十分な耐荷力回復効果が期待できることを示した。今後は、各腐食凹凸に対する当て板ボルト工法等の実験データを積み重ね、適用範囲を明確にする必要がある。

⑫研究成果の道路行政への反映

(本研究で得られた研究成果の実務への反映等、道路政策の質の向上への貢献について具体的かつ明確に記入下さい。)

○鋼橋の長寿命化と低LCCメンテナンスへの寄与

鋼橋の腐食は桁端部で最も早く発生しやすく、鋼橋のメンテナンスコストの増大の主要原因となっている。また、桁端部の補修塗装の寿命は短く、場合によっては数年で再発するケースもある。原因としては、狭隘な施工環境で部材数も多い桁端部では、十分なケレンが行えないことが挙げられ、残存さびの状態でも早期さび発生となりやすい。本CS工法はケレン後の残存さびのある状態でも、ブラスト効果を持つアルミナと犠牲防食効果を持つ亜鉛の混合粉体を音速でさび鋼板面に衝突させることで、さびの除去効果、高い付着特性および防食性の高い亜鉛皮膜を形成でき、腐食した鋼桁端部の高耐久化を図る技術として期待できる。今後、様々な環境や構造形式を有する実桁端部でのCS実証例を増やし、信頼性の高い防食技術への発展し、実用されることが期待される。

○防食便覧、マニュアル等への組み込み

本研究成果のCS工法を一般的に適用されている塗装・金属溶射と並ぶ防食工法として、便覧や各団体に発行しているマニュアル等に盛り込まれることが必要である。そのためには、実績に基づき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。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」に本CS工法を用いた防食対策が盛り込まれる見込みであり、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ものと考えている。

⑬自己評価

(1)腐食鋼材面に対するCS工法の防食性能

琉球大学暴露試験でさびた鋼板を用いて、亜鉛、アルミナ、亜鉛・アルミナ混合粉体別で防食性能（皮膜形成と付着特性）を検証し、さび面上でのCS皮膜形成メカニズムを解明した。また、最適配合比率（亜鉛：アルミナ＝60：40）を設定できた、十分な研究成果を挙げられた。

(2)腐食した実桁端部の防食性能回復を目的としたCS実証試験

桁端部の狭隘な施工条件に対応可能で防食性能のあるCS装置のエクステンション（ボールジョイント、エルボパイプ）を開発した。また、CSノズル径を増厚（5mm→7mm）して施工能率を向上し、さらに高品質な防食皮膜を形成できる半自動施工装置を開発した。

以上のさび鋼板面に対するCS工法の防食性能実験、狭隘な施工条件に対応可能なCS装置の開発等の研究成果に基づき、CS施工要領を作成した。また、橋梁管理者と連携して、腐食した実橋桁端部で実証試験を行った。現在、追跡調査（モニタリング）を行っており、現時点でさびは生じていない。よって、鋼橋の弱点である補修しづらい桁端部に対して、犠牲陽防食効果により十分な耐久性を確保により、補修塗装サイクルタイムの長期化などの維持管理費縮減へ貢献できるものと考えている。

(3)CS処理面上の当板及び炭素繊維技術の耐荷力回復効果

実腐食凹凸を持つ鋼板に対して、CS防食下地処理を施した鋼板面に当板ボルト接合および炭素繊維接着を施し、せん断耐荷力実験（1/3スケールと実大スケール）を行い、CS防食面と耐荷力回復効果との関係を実験的に検証した。