鋼橋の腐食弱点部と沖縄環境下で適用可能な防食技術の実装

琉球大学　下里　哲弘[1)]

１．はじめに

鋼橋の耐久性は，腐食と疲労の 2 大損傷への対策と新技術の研究開発が重要である．腐食は構造部位によっては早期に発生し進展するケースもあり，定期点検や適切な補修などの維持管理が求められる．塗装の塗り替えはライフサイクルコストの増加につながり，特に早期に再発する補修塗装は鋼橋の競争力強化を妨げる要因となっている．一方，鋼橋の腐食は，橋梁の全ての構造部位で発生するものではなく，部分的な構造部位および局部で発生と再発を繰り返すことは周知のことになっている．それに対しての技術研究開発が求められている．本稿では，鋼橋長寿命化の鍵となり，腐食が多発し再発する構造部位について，実橋データを基に作成された全方位可動型 3DCG 腐食マップ[1)] を用いて示すとともに，その腐食部位に対する防食技術の研究開発と実橋で実装された新防食法の効果検証を主に紹介する．また，腐食環境の厳しい沖縄環境下における鋼橋防食の取組みに関して紹介する．

２．鋼橋の腐食弱点部とその対策技術の研究

2.1　桁端部

2.1.1 腐食状態

図 1 に腐食した実橋の調査結果より作成した桁端部の 3DCG 腐食マップ[2)]を示す．同図は伸縮装置からの漏水による腐食部位と範囲を示している．これまでも非排水型伸縮装置などの技術開発が実施されているが，伸縮装置自体の寿命が長くないこと等で未だ開発途上である．桁端部は，伸縮装置からの漏水に加えて，主桁と橋台の 3 面を囲まれることで高い湿度環境になり易いこと，飛来塩分や土砂等の腐食生成物が堆積しやすいことで，特に支承部周り，下フランジ上面，および横構ガセット周辺等は早期発錆・進展・再発しやすい．その対策の一つに橋梁洗浄があるが，洗浄後に早期に元の状態に戻るなどの課題がある．また，鋼橋腐食の 50%超が桁端部（支承部含む）との分析結果[1)] が示されており，鋼橋は桁端部の腐食防食技術を開発により耐久性の向上に繋がり，新設の橋種選定の際に課題となる塗替えによるメンテナンスコストの低減となり，鋼橋の競争力の向上に寄与できる．

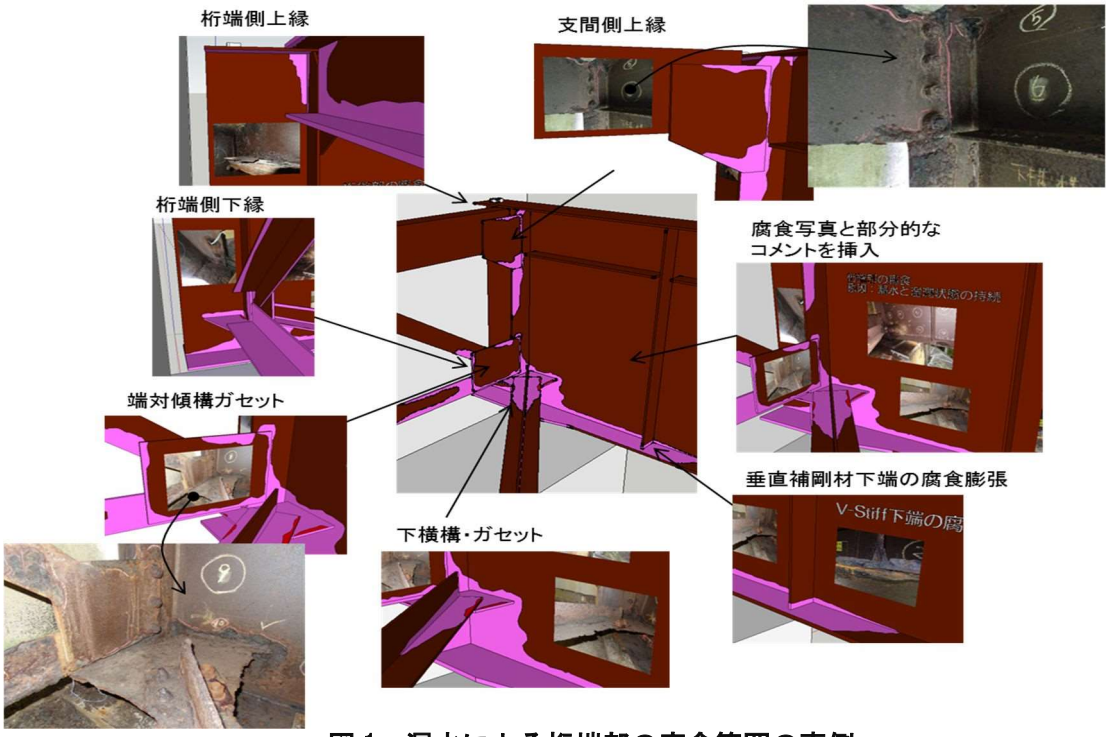


図 1　漏水による桁端部の腐食範囲の事例

1）琉球大学工学部工学科社会基盤デザインコース　〒903-0213　沖縄県西原町千原 1

2.1.2 対策技術の事例 ： Cold Spray 技術での検証事例

桁端部のような激しい腐食環境で且つ狭隘な補修作業環境の場合，さび除去が困難である．そのため残さび上でも防食効果のある補修技術が求められる．その一例として残さび上でも強固な密着力を有する防食皮膜を形成できる溶射技術の Cold Spray 工法（以下，CS）が期待されている[3)]．本研究の CS はアルミナと亜鉛の混合粒子を用いて超音速で吹き付ける低温低圧溶射技術であり，低温ゆえに純度の高い亜鉛のままで皮膜が形成できる点に特徴がある．本項では，先ず，沖縄沿岸地域の河川上に架かる既設鋼橋の桁端部への CS 工法の施工事例と施工後 8 年経過後の状況を述べる．なお，この研究は，道路政策の質の向上に資する技術研究開発（新道路技術）「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（研究代表者：琉大 下里哲弘）」にて実施したものである．

図 2 に示す対象橋梁は供用約 40 年経過した塗装鋼 I 桁橋（橋長：25m，幅員：15.6m，主桁数：17）で，離岸距離 300m，相対湿度 76.0%，濡れ時間割合 37.7%，飛来塩分量 0.15mdd，腐食速度 0.025mm/y の環境にある．CS は G1 と G4 桁端部（施工範囲：2.5m）を施工対象として実施した．桁端部の腐食状況は**図 2** に示すように，支承部周辺，下フランジ上面，下フランジ下面（コバ部），垂直補剛材・端部ウェブに著しい腐食劣化が生じていた．

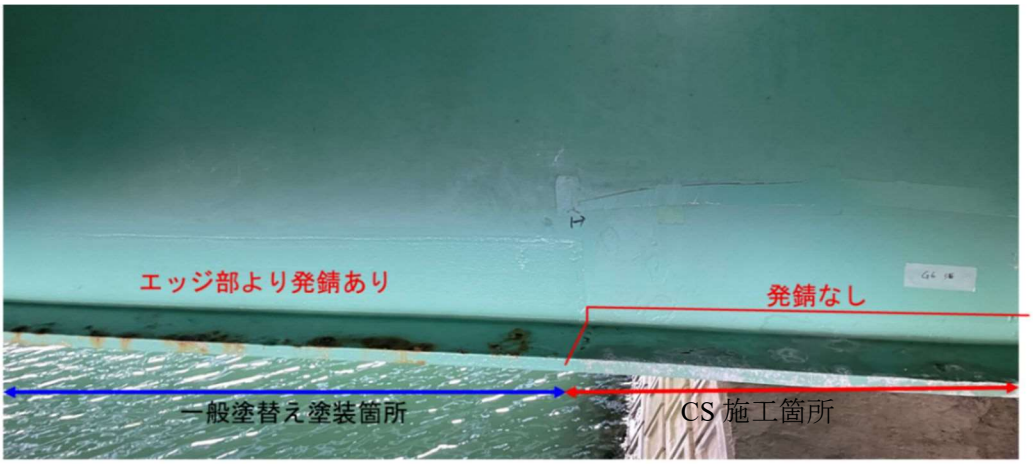
図 2　施工対象橋梁と腐食状況

CS 施工状況を**図 3** に示す．支承周りの下フランジ下面は非常に狭隘な構造空間であった．そのため狭隘部に対しては 90°エルボ+延長のエクステンションを適用し，施工面に対して溶射角度 90°を維持しながら施工した．また，垂直補剛材や支承部に関しても，複数の部材が近接するため狭隘構造となっていた．このような施工箇所に対しては 60°エルボや 60°エルボ+延長のエクステンションを用いて施工した．以上のように各種エクステンションを用いた施工を行うことで，桁端部特有の狭隘箇所に対しても CS 施工が十分適用可能であることが実証された．

（a）下フランジ上面　　（b）支承部　　（c）桁端部・下フランジ下面

図 3　CS 施工状況

図 4 に施工後 8 年経過時の状況を示す．図より，腐食した桁端部に施工した CS 施工範囲は，8 年経過後も再発は生じていない．なお，施工後 5 年経過時から白色析出物が確認されたが，この白色析出物を SEM-EDX の結果より酸化亜鉛であることを特定した．これは塗膜厚が薄い部位における CS 防食下地の防食反応であり，CS 亜鉛皮膜が全て反応するまでは錆の発生は起きないと考えている．



一般塗替え塗装箇所（沖縄地区鋼橋防食マニュアル）
2017年4月度施工（6年経過）
素地調整：2種ケレン
防食下地：有機ジンクリッチペイント
下塗り　：4層　弱溶剤形変性エポキシ樹脂塗料
（鋼道路橋防食便覧では2層）
中塗り　：1層　弱溶剤形ふっ素樹脂塗料
上塗り　：1層　弱溶剤形ふっ素樹脂塗料

CS補修箇所
2015年12月施工（8年経過）
素地調整+防食下地：CS皮膜
下塗り　：1層　弱溶剤形変性エポキシ樹脂塗料
中塗り　：1層　弱溶剤形ふっ素樹脂塗料
上塗り　：1層　弱溶剤形ふっ素樹脂塗料

図 4　施工後のモニタリング状況

一方，一般塗り替え塗装箇所では既に錆が発生していることから，腐食した桁端部への補修技術として CS の防食性能の高さが実証された事例である．なお，このモニタリングは JSSC 鋼橋の強靭化・長寿命化研究委員会　鋼橋の腐食・耐久性研究部会 [3] にて実施したものである．

上述のように腐食した桁端部に対して亜鉛アルミナ金属粉体型の CS の高い防食性が実証されたが，CS の防食メカニズムに関しては参考文献 [4)5)] を参照されたい．

2.2　高力ボルト連結部

写真 1 に示すように高力ボルト連結部は一般的に塗膜厚が薄くなりやすく，現場で十分な素地調整処理が難しいことから，早期に発錆し軸力低下や美観上の問題が生じる．**図 5** に示すように高力ボルト連結部では，高力ボルトのボルト頭及びナットの角部やボルト周辺の連結板，そして母板の連結板境界部に著しい減肉が生じることからこれらの部位に対する防食法の研究開発が求められている．本項では，先ず，腐食した高力ボルト連結部における各種素地調整技術に対する除錆状態を示す．その結果を踏まえ検討中のケレン VR シミュレーションの結果を示す．また，高いケレン技術が求めらる腐食した高力ボルトのメンテナンスとして交換時期をコントロールする診断法を示す．最後に，沖縄都市モノレールの高力ボルトに適用した亜鉛めっきを防食下地した塗装仕様について紹介する．

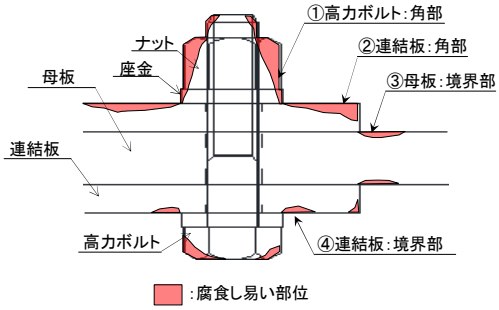


図 5　高力ボルト摩擦接合継手の腐食形態

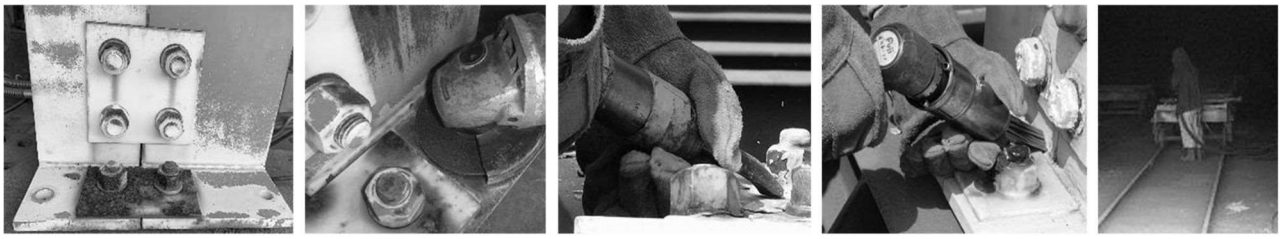
写真 1　実橋での高力ボルトの腐食

2.2.1 添接部供試体を用いた錆除去実験とケレン VR シミュレーション

ボルトや添接板周辺は角部が多く，錆除去や塗膜厚の確保がしづらい箇所であるため残存する錆を起点とする早期再腐食が起こりやすい．また，その残錆を起点に孔食や部材破断へ進展する事例もみられる．本節では，腐食したボルト添接板付近を模擬した供試体によって錆除去困難な局所部位の特定を

行い，その残存錆を除去できる技術的検討として VR 技術を用いたケレンシミュレーションを行った．

ボルト添接部の残存錆部位の特定を行うため，**図 6** に示すような L 型試験体を用いた．この L 型試験体は琉球大学暴露場（年平均気温 23.0℃，年平均相対湿度 79.6%，年平均飛来塩分量 0.22mdd，年平均腐食速度 0.01mm/y，離岸距離約 2km）で約 15 年間暴露してものであり，ボルト周りに塗装劣化と激しい腐食箇所が見られた．本実験では，除錆後に各試験体を分解し，錆の取り残しがある部位を目視で評価し，錆除去の弱点部位を特定した．



供試体外観　ディスクサンダー　エアーチッパー　ジェットタガネ　エアーブラスト

図 6　実験供試体外観とケレン方法

図 7 に 1 種ケレンであるブラスト処理後の状態と分解後の確認結果を示す．ブラストの施工は，工場内で熟練工がエアーブラストにて行った．施工後の L 型試験体を観察すると，全体的に錆が除去されている状態にみえたが，添接板を外し詳細に観察すると，残存錆が添接板と下フランジまたはウェブ面の隙間に存在し，ボルト頭部の側面や添接板側面にも残存錆が確認された．これは，ブラスト処理のノズルが物理的に届かないこと，座金側面のような接地面積が小さく研掃材が当たりにくい箇所であること，および作業者が目視できない箇所が要因と考えられる．

図 8 に 2 種ケレンである動力工具での処理後の状態と分解後の確認結果を示す．2 種ケレンは，橋梁塗装の熟練工が，ディスクサンダー，ジェットタガネ，エアチッパーなどの動力工具を用いて行った．施工後の観察結果より，連結板，狭隘部の板コバ面，座金などが残錆部位であった．添接板の側面，ボルトの側面や座金側面にも固着した錆が残存していた．1 種ケレンよりも残存さびの箇所が多い．このように 2 種ケレン工具では，部材と工具が接触できない箇所があること，作業員が目視しづらい箇所があることが除去できない要因と考えられる．以上より，実橋では 1 種ケレンを原則として，腐食程度に応じてディスクサンダーやエアーハンマー等の動力工具による素地調整を行ったうえで塗り替え塗装が行われるが，腐食再発の要因としては，狭隘な箇所での作業や動力工具が挿入できない箇所があることで，錆を完全に除去することができないと考えられる．そのため，素地調整前に除去困難箇所を把握しておくことや，狭隘部に対して十分な除錆性能を有するケレンツールの開発が求められる．

図 7　1 種ケレン後の供試体分解による残さび箇所の特定

図 8　2 種ケレン後の供試体分解による残さび箇所の特定

これらの課題に対して，溶接施工性を確認する際に使用されている VR システム（溶接シミュレーター）を応用し，VR 空間上でケレン作業をシミュレーションできるソフト開発を行っている．**図 9** に試験体モデルとケレン工具の 3D モデルを示す．試験体はボルト継手部として，ケレン工具は一般的に使用されるディスクグラインダーとバーブラインダーの 2 種類で検討を開始した．**図 9** のケレンシミュレーションより，ディスクグラインダーの場合，ボルト間で十分にケレンできない箇所が確認でき，実作業を再現できている．一方，バーグラインダを用いた場合，ボルト間なども赤色（ケレン OK）になっており，除錆が可能であると考えられるが，座金の際などのケレンできない．今後，本シミュレータの開発を進め，作業困難部位に適用可能なツール形状の開発などへの活用を目指している．

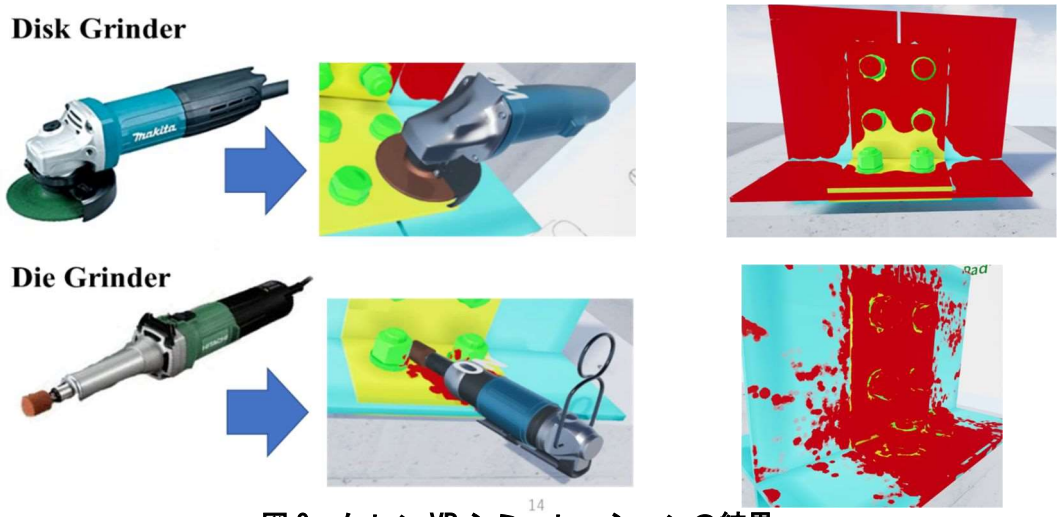


図 9　ケレン VR シミュレーションの結果

2.2.2 腐食ボルトの軸力診断とメンテナンス

高力ボルトの診断は，塗膜劣化や軽微なさびのみであれば当然ながら塗り替え補修となるが，腐食進行した高力ボルトは，ケレンによるさび除去が難しい角部やねじ部などにさびが残ることから補修塗装後の早期再発が起きやすい．また，高力ボルトの交換実績が豊富であることを踏まえて，腐食したボルトはボルト交換時期をコントロールする方法を基本とした診断法を研究中である．これは定期点検時の外観目視結果のみで診断できる方法を目指しており，定期点検時の腐食ボルトの外観写真を用いて，「腐食小」「腐食中」「腐食大」の 3 つに区分し，残存軸力を推定する方法である．その残存軸力の推定は，**図 10** に示す残存軸力値との相関曲線の下限値を用いる．例えば「腐食小＝残存軸力下限値 80%」「腐食中＝残存軸力下限値 60%」「腐食大＝残存軸力下限値 40%」である．その推定された残存軸力を用いて，腐食ボルトの本数と位置に応じた継手の構造照査を行うこともでき，適切なボルト交換時期をコントロールすることができる．今後，この方法の信頼性を高めていく．

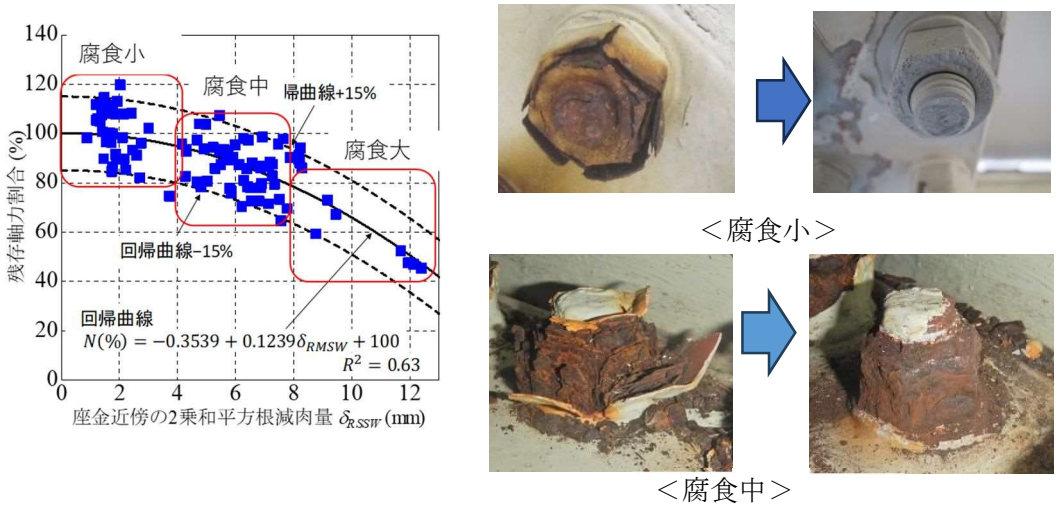


図 10　残存軸力診断と高力ボルトの腐食度

2.2.3 防食下地に亜鉛めっき＋防錆コーティング＋C5 塗装の事例

厳しい腐食環境下にある沖縄都市モノレールの鋼軌道桁の 1 期開通区間（那覇空港－首里駅）では，防錆処理ボルトを使用していたものの，**写真 2** のように腐食が早期発生した．早期腐食の要因は締結時についた傷に対して多湿と飛来塩の影響で発生したと推察された．ボルト自体は現場塗装でエポキシとふっ素樹脂塗装を行う仕様であるが，防食下地に亜鉛系塗料を塗布した重防食仕様ではないことが大きな要因である．これらの防食対策として，モノレール 2 期区間（首里駅―てだこ浦西駅）では溶融亜鉛めっきを高力ボルトの防食下地とし，その上に亜鉛の酸化防止と潤滑機能も有した防錆コーティングを工場で施し，現場で軸力導入後，現場にて C5 系塗装を施工する仕様を採用している．以降に，採用決定までの検証試験として実施したリラクセーション試験，塩水噴霧試験および付着力試験の結果を概説する．

写真 2　高力ボルトの腐食（モノレールの例）

写真 3 に示すボルト軸力導入とリラクセーションの検証の結果，軸力保持率は 85%程度であり，これは溶融亜鉛めっきボルトの軸力低下 15%程度と同程度であることから，防錆コーティングが亜鉛めっきボルトの軸力低下への影響はないと判断された．また，溶融亜鉛めっき上に施した防錆コーティングの防食性と付着力試験を実施した．試験体は M22-60（溶融後 F8T 相当）のめっきボルトで締結後，実際の現場でのボルト締結から塗装期間を考慮して，複合サイクル試験（温度・湿度 S6 サイクル 35℃・90%×2h　40℃・50%×6h を 1 サイクルとし 5%NaCl 水溶液を 3 サイクル毎に塗布）を 7 日間実施した．その後，防錆コーティング上に C5 塗装を施した．**写真 4** に示すアドヒージョン試験の結果より，付着力は 3～7MPa の強度を得た．これは．塗装の付着力の目安の閾値 2MPa を満足していた．

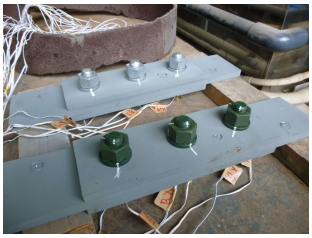


写真 3 リラクセーション試験

写真 4 アドヒージョン試験

以上より，亜鉛めっきボルト＋防錆コーティング＋C5 塗装仕様は，十分な防食性能を有している．また，防錆コーティングは潤滑機能を有し，安定した軸力導入を確認できたが，座金にはナットの共回り防止策も施した．上記の知見が得られたことを踏まえて，沖縄都市モノレールの延長区間の鋼軌道桁では，溶融亜鉛めっきボルト上に防錆コーティングを施した高力ボルトが採用された．そのボルト締結後に，C5 塗装が施され，高力ボルト部の重防食化がなされた．**写真 5** は 2019 年 10 月の供用後から約 4 年経過後の状況であり，ボルト接合部のさびは発生しておらず，良好な状態を保っている．

写真 5　亜鉛めっき＋C5 塗装

2.3　板エッジ部

鋼部材の角部は腐食の起点に成り易いことが知られており，既存の対策として角部の曲面仕上げによる塗膜厚の確保が行われているが，2R または 3R 仕上げでも板エッジ部の塗膜厚の確保は十分ではなく，**図 11** に示すように角部を起点に早期に発錆する．ここでは，下フランジの板コバ部の防食性に着目し，下塗り 1 層増しの厚い塗膜厚規定となっている沖縄仕様（**表 1a)**）と全国仕様の鋼道路橋防食便覧（**表 1b)**），および全国仕様の下塗りにステンレスフレーク（SUS-flake）を含有した塗装仕様（**表 2)** での暴露結果を述べる．**図**

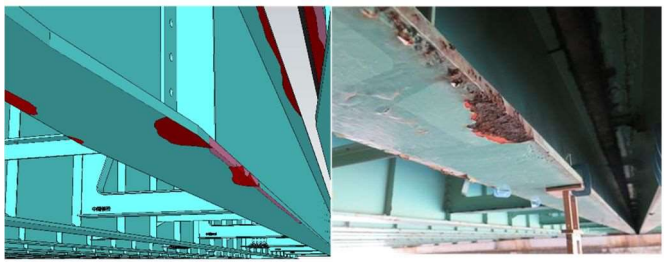


図 11　部材角部の腐食

12 に SUS-flake の断面観察写真を示す．SUS-flake は厚さ 0.3μm，30μmの円盤状の形状であり，塗膜内に層状に配列された SUS-flake が塗膜硬化時の収縮に抵抗して膜厚の確保できる特徴があること，塗膜内に腐食生成物の侵入を防ぐ環境遮断効果が高いこと，紫外線による樹脂の劣化防止効果などが確認されている．**図 13** に琉大暴露場に建設された実物試験橋での外観目視の結果を示す．全国仕様は 1 年半で板コバの下側のほぼ全線で発錆，沖縄仕様は 2 年半後に同部位に発錆，SUS-flake 含有塗装仕様は局部での錆発生である．その要因分析のために下フランジからコア抜きした断面観察結果より，全国仕様はエッジ部の膜厚不足箇所が腐食の起点，沖縄仕様はエッジ部の膜厚が標準膜厚 200μm に対して約 50μm と膜厚が小さくなったことが発錆原因である．一方，SUS-flake 含有塗装は下塗りの標準膜厚 120μm に対して約 90μm を確保できており，全国仕様や沖縄仕様に比べて，膜厚確保に優れている．

表 1　沖縄仕様と全国仕様の塗装系

a）沖縄地区鋼橋防食マニュアル

工程		塗料または素地調整	標準使用量 (g/㎡)	塗装間隔 (気温20℃の場合)	標準膜厚 (μm)
前処理	素地調整	ブラスト処理 ISO Sa2 1/2	—	2hr以内	—
	プライマー	無機ジンクリッチプライマー	スプレー 160	6ヶ月以内	15
工場塗装	2次素地調整	ブラスト処理 ISO Sa2 1/2	—	2hr以内	—
	防食下地	無機ジンクリッチペイント	スプレー 600	2～10日	75
	ミストコート	ミストコート	スプレー 160	1～10日	—
	下塗り	エポキシ樹脂塗料下塗	スプレー 450	1～10日	100
	下塗り	エポキシ樹脂塗料下塗	スプレー 450	1～10日	100
	中塗り	ふっ素樹脂塗料用中塗	スプレー 170	1～10日	30
	上塗り	ふっ素樹脂塗料上塗	スプレー 140	1～10日	25

b）鋼道路橋防食便覧

工程		塗料または素地調整	標準使用量 (g/㎡)	塗装間隔 (気温20℃の場合)	標準膜厚 (μm)
前処理	素地調整	ブラスト処理 ISO Sa2 1/2	—	2hr以内	—
	プライマー	無機ジンクリッチプライマー	スプレー 160	6ヶ月以内	15
工場塗装	2次素地調整	ブラスト処理 ISO Sa2 1/2	—	2hr以内	—
	防食下地	無機ジンクリッチペイント	スプレー 600	2～10日	75
	ミストコート	ミストコート	スプレー 160	1～10日	—
	下塗り	エポキシ樹脂塗料下塗	スプレー 540	1～10日	120
	中塗り	ふっ素樹脂塗料用中塗	スプレー 170	1～10日	30
	上塗り	ふっ素樹脂塗料上塗	スプレー 140		25

表 2　SUS-flake 含有塗料の塗装系

工程		塗料または素地調整	標準使用量 (g/㎡)	塗装間隔 (気温20℃の場合)	標準膜厚 (μm)
前処理	素地調整	ブラスト処理 ISO Sa2 1/2	—	2hr以内	—
	プライマー	無機ジンクリッチプライマー	スプレー 160	6ヶ月以内	15
工場塗装	2次素地調整	ブラスト処理 ISO Sa2 1/2	—	2hr以内	—
	防食下地	無機ジンクリッチペイント	スプレー 600	2～10日	75
	ミストコート	ミストコート	スプレー 160	1～10日	—
	下塗り	厚膜型エポキシ樹脂塗料 (SUS-flake含有塗料)	スプレー 500	1～10日	120
	中塗り	ふっ素樹脂塗料用中塗	スプレー 170	1～10日	30
	上塗り	ふっ素樹脂塗料上塗	スプレー 140		25

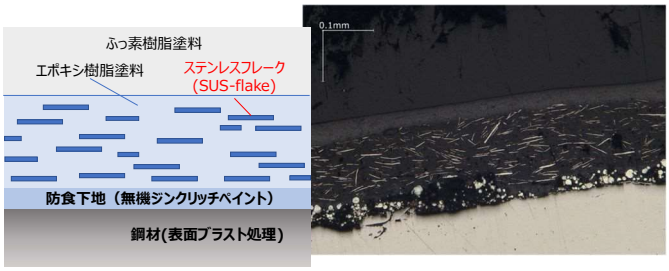


図 12　SUS-flake 断面観察

(a)　鋼道路橋防食便覧　　(b)　沖縄防食マニュアル　　(c)　SUS-flake 含有塗装系

図 13　２年 6 か月経過後の下フランジエッジ部の断面観察結果

３．沖縄環境下における防食技術の開発（沖縄地区鋼橋防食マニュアルの推奨技術）

沖縄は，年間の月平均気温が 15℃以下にならず，湿度が年間を通して高く，さらに台風常襲地域であることから，他府県より厳しい塩害環境下にある．このため，沖縄総合事務局・沖縄県では，沖縄地区鋼橋防食マニュアル [6]（以下「沖縄防食マニュアル」という）を策定し，鋼橋の塗装寿命の延命化を図り最適なライフサイクルコストとなる新技術開発と実装に取り組んでいる．沖縄防食マニュアルは，鋼道路橋防食便覧と比べ，下塗りが 1 層多くし，塗膜総厚を大きくした塗装仕様（一般部）の規定のほか，鋼橋の腐食弱点部である高力ボルト接手部や支承部に対して防食性能を規定している．本稿では，沖縄防食マニュアルに規定している多機能防食デッキ，高力ボルトの防食技術に関する取組みを紹介する．

3.1 多機能防食デッキ

図 14 に桁内外面の腐食状況を示す．図より，桁外側面よりも桁内側面の方が下フランジ付近の腐食は著しく，腐食速度は桁内外でかなり異なる状況が確認できる．要因の一つは降雨の影響を直接受けない桁内側面と外側面の付着塩分と考えられる．これに対して沖縄防食マニュアルでは,「鋼桁下面には，飛来塩分対策として多機能防食デッキを設置することが望ましい」と規定している．**図 15** に示す鋼桁間や鋼桁全面に設置した多機能防食デッキを示し，**写真 6** には多機能防食デッキの内面および外面の設置状況を示す．多機能防食デッキは，鋼橋を腐食耐久性のある素材で覆い腐食環境改善を図ることで防食効果を期待する技術である．また，同デッキは恒久的な点検足場としても使用可能であり，さらに景観性も向上することから，多機能を有する防食技術である．多機能防食デッキには，腐食耐久性と耐荷性を有するアルミやチタンやステンレス，非金属の GFRP が用いられており，いずれの素材を用いた場合でも一定の腐食環境改善効果が報告されており ，今後益々その適用が見込まれる．

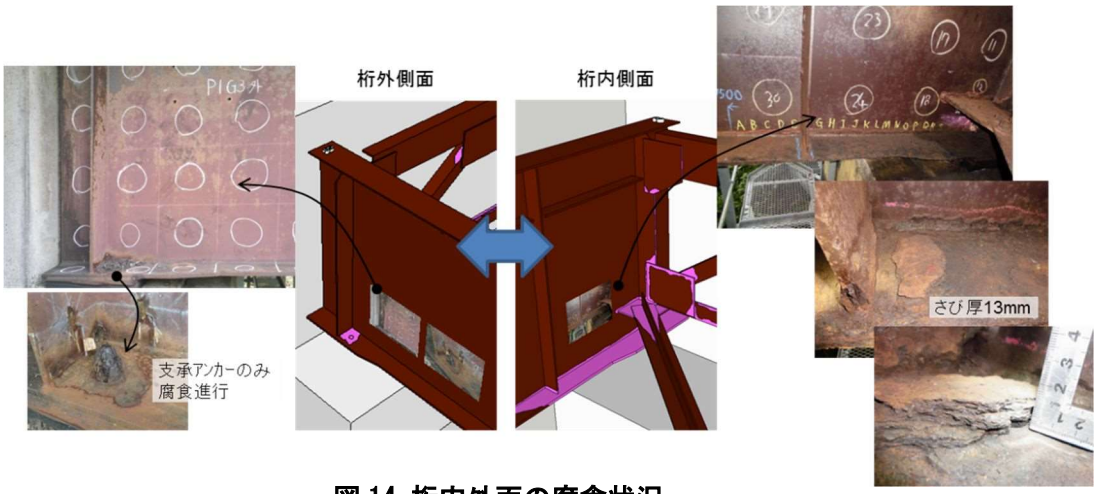


図 14 桁内外面の腐食状況

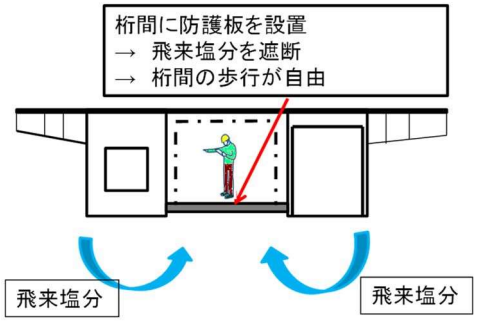


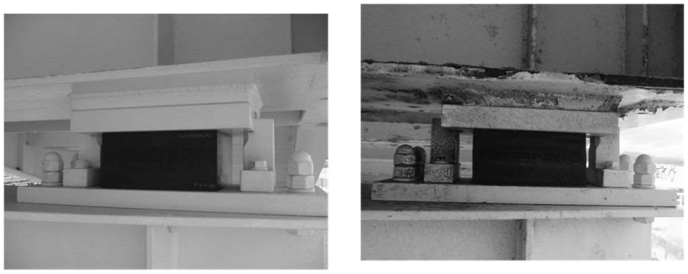
図 15　多機能防食デッキ

a）デッキ内面　　b）デッキ外面

写真 6 多機能防食デッキ設置状況

3.2 支承部の塗装仕様

沖縄防食マニュアルでは,「支承は十分な腐食耐久性を有した材料の使用や防食構造を採用することが望ましい.」と規定し，溶融亜鉛アルミニウム合金めっきとナイロン 12 粉体塗装を推奨技術の一例としている. **写真 7** は，海岸沿いに設置された歩道橋において， 溶融亜鉛アルミニウム合金めっきとナイロン 12 粉体塗装の 12 年経過後の状況を示す. 周辺の桁は腐食が生じ始めているが，支承部に腐食などの変状は見られない.



a）設置時　　b）12 年後

写真 7　高耐久性塗装を施した支承の耐食性

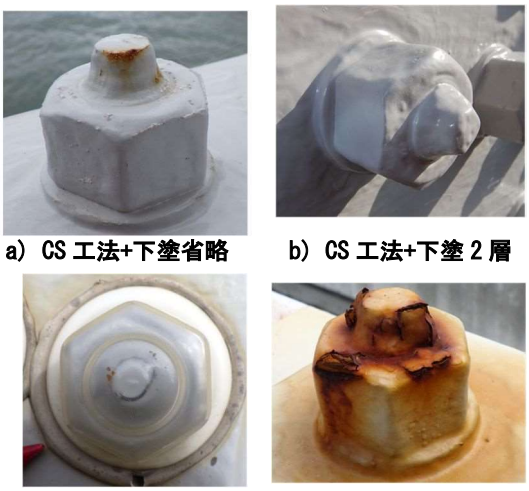
3.3 高力ボルトの防食方法

沖縄防食マニュアルでは，高力ボルト防食への要求性能として，「腐食による機能の低下を防ぐため，防せい防食について維持管理の確実性及び容易さを含めて検討すること」としている．また，同マニュアルの解説において，その要求性能を期待できる防食下地処理として，①現場施工可能な有機ジンクリッチペイント，②工場で予め処理する溶融亜鉛めっき，③簡易な素地調整で十分な密着力と防食性を期待できる低温低圧型金属亜鉛溶射（コールドスプレー技術：以下，CS），④大気環境遮断効果の高く維持管理可能な透明型防せいキャップを挙げている．本稿では，沖縄の中でも過酷な塩害環境である沖縄県国頭村辺野喜にある鋼 I 桁側道橋の高力ボルト継手部において，上記解説の各種防食補修技術を適用し，施工性および施工後の防食性能を検証した．

試験施工対象の橋梁は，**写真 8** に示す 2002 年完成した単純下路式鋼床版 2 主鈑桁橋であり，年平均飛来塩分 3mdd が飛来する腐食環境が厳しい環境下にあり，**写真 8** に示すようにボルトの腐食は激しい．試験箇所は高力ボルト摩擦接合継手部 4 箇所とした．適用した防食補修技術は，a)有機ジンクリッチペイントと，b)CS 技術（下塗 2 層版），c)CS 技術（下塗り省略），d)C5 塗装＋透明型防せいキャップとした．ケレンはチッパー，ニードルスケーラーを適用した．**写真 9** に CS 施工状況を示す．モニタリング結果を**写真 10** に示す．得られた知見としては，「CS 工法+下塗省略」ではねじ頭に点さびが一部見られたが，「CS 工法+下塗 2 層」ではナット部及びねじ頭にさび発生は見られない．透明ボルトキャップはねじ頭に塗膜の割れが生じているにも拘らず，腐食進行が抑制されている．有機ジンクリッチペイントは角部の腐食が 1 年目から生じ，3 年経過後には激しい腐食状態である．

写真 8 対象橋梁と腐食したボルト

写真 9　CS 施工状況



a）CS 工法+下塗省略　b）CS 工法+下塗 2 層

c）透明ボルトキャップ　d）有機ジンク

写真 10　3 年目のモニタリング結果

3.4　高力ボルト連結部の防食技術と技術公募

現在進行中の鋼橋連結部高力ボルトの耐久性向上技術に関する公募に関して示す．連結部高力ボルトは，既設橋梁の塗替えによる塗装寿命が，新設橋梁の塗装寿命に比べて短い．それは，補修時に，ウェブなど一般部に比べて高力ボルト部の素地調整が難しいため，残存さびが生じやすいためである．一般部の塗替え寿命は 20 年程度であるが，連結部高力ボルトの塗装寿命は 10 年程度またはそれ以下になる場合がある．この高力ボルトの塗装寿命をウェブなどの一般部と同じ塗替えサイクルにすることで鋼橋の効率的な維持管理に繋がる．沖縄防食マニュアルでは，高力ボルト連結部の要求性能として，補修後の防食寿命を 20 年間として，鋼橋連結部高力ボルトの耐久性向上技術に関する公募を行った．**図 16** に公募の流れを示す．令和 5 年 5 月より 2 か月間公募を行い，多数の応募があり，現在審査中である．事前審査における試験は，膜厚，付着試験，複合サイクル試験，暴露試験である．膜厚は補修材料が所定の防食機能を発揮するために最も必要であり，ボルト角部の塗装膜厚の確保が重要である．付着試験は腐食した高力ボルトに対する素地調整後でも残存さびが生じやすく，補修後の早期塗装割れや剥がれが生

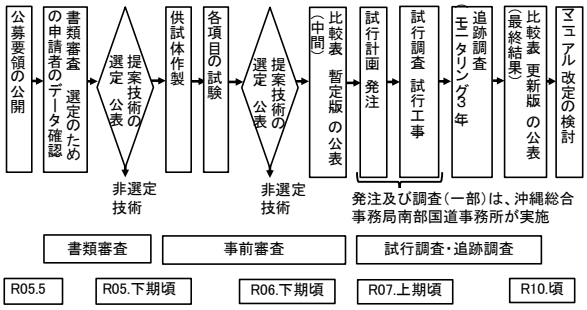


図 16 技術公募の流れ

じないように，被覆材，残存さび，鋼材が一体となって強固に付着していることが重要である．複合サイクル試験では腐食した連結部高力ボルトの模擬試験体に対して，提案技術を適用した場合の耐久性を促進試験により確認し，暴露試験では腐食した連結部高力ボルトの模擬試験体に対して，提案技術を適用した場合の耐久性を沖縄地区の厳しい腐食環境における防食性を確認するものあり，低い防食性能では１年以内に錆が再発する．書類審査及び事前審査をクリアした提案技術は，実橋での試験施工を行い，その後，試行調査と追跡調査を経て，沖縄防食マニュアル委員会で承認された提案技術は沖縄防食マニュアルに記載されることになる．

４．今後の塗装技術の展望

図 17 に沖縄防食マニュアルで求めている鋼橋の新防食技術テーマを示す．本稿でも述べたが，鋼橋の腐食弱点部である桁端部と高力ボルト継手部の新防食技術を開発できれば，鋼橋の耐久性とメンテナンスコストは飛躍的の向上できる．その開発アプローチとしては，素地調整技術の開発，防食下地処理材の開発，残存さびの進行を抑制または抑止できる防食技術などが挙げられる。例えば，沖縄モノレール軌道桁で適用した亜鉛めっきボルトに研究開発のヒントがある．防食メカニズムは犠牲防食と大気遮断であり，工場施工品であることである．鋼道路橋や鉄道橋へ溶融亜鉛めっき下地の高力ボルトを適用する場合，現道路橋示方書に記載されている F14T ボルトを溶融亜鉛処理した F12T 級の亜鉛めっきボルトの技術開発が待たれる．また，本四架橋の際に開発された防食処理ボルトの開発コンセプトに基づき，ボルト軸力導入力に耐える強固な薄膜で防食効果のある塗装技術が求められる．桁端部においては，**図 17** にも示されているが，高耐食材のステンレス鋼を**図 18** に示すように桁端部のみ適用するハイブリッド案がある．また，その部位に高コストの高耐食性塗料等を適用する案も考えられる．なお，本稿では紹介できなかったが，**図 17** 中にある金属溶射を防食下地とした鋼橋は，宮古島の伊良部大橋主航路部で採用し，その後も沖縄県内の沿岸部の鋼橋へ採用されている．このような沖縄の環境で長期耐食性を有する防食技術は，腐食で悩まされている日本の塩害地域の防食技術となり得るものと考えている．また，東南アジアの島嶼海洋地域のインフラの耐食性向上へも貢献できると思われる．今後も沖縄防食スペックを「研究→現場実装」へ展開し，鋼インフラの長寿命化へ貢献していく所存である．

図 17 鋼橋における防食技術開発のテーマ

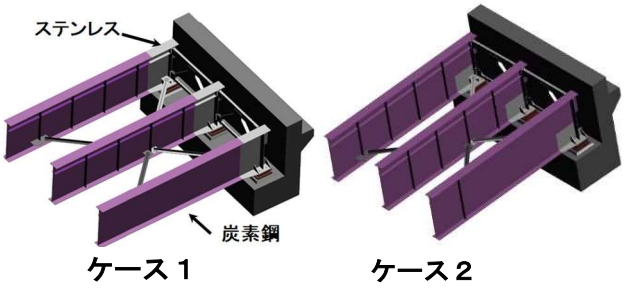


図 18　桁端部への高食材料や防食技術の適用

参考文献

1)　日本鋼構造協会(2018)：鋼橋の腐食耐久性・維持管理性向上技術，テクニカルレポート No.116
2)　長坂康史，下里哲弘，田井政行，玉城喜章，日和裕介(2019)：3DCG による可視化技術を利用した鋼橋の腐食点検学習システムの開発，土木学会論文集 H（教育），Vol.75 No.1，pp.35-47.
3)　日本鋼構造協会(2020)：鋼橋の腐食耐久性・維持管理技術の高度化，テクニカルレポート No.121
4)　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 24 巻(第 93 号)，pp.65-72，2017.3.
5)　日和裕介，下里哲弘，加藤祐介，小野秀一，木村雅昭，中野麻衣子：腐食した鋼桁端部への Cold Spray 防食技術に関する実証，構造工学論文集 Vol. 66A，pp.388-399，2020.3
6)　沖縄総合事務局開発建設部・沖縄県土木建築部監修(2019)：沖縄地区鋼橋防食マニュアル