

# 塩害と台風環境下における鋼橋の高防食技術の開発

## 沖縄地区鋼橋防食マニュアルの実践的取り組み

下里 哲弘・玉城 喜章・山下 修平

本稿では、まず、沖縄防食マニュアルに規定している高力ボルトの防せい防食技術の開発研究について、沖縄の中でも過酷な塩害環境である著しく腐食した鋼桁橋の高力ボルト継手部を対象に、同マニュアルの解説で記述している各種防食補修技術を適用し、その防食性能検証モニタリングについて紹介する。次に、鋼桁面の腐食環境改善と5年1回の定期点検用の足場さらには桁下視点の景観性に配慮した多機能防食デッキの腐食環境改善効果の検証と台風常襲地域の沖縄における耐風性検証の取組みを紹介する。

キーワード：塩害、高力ボルト部、低温低圧型金属溶射、透明型ボルトキャップ、台風、多機能防食デッキ

### 1. はじめに

沖縄県内は、年間月平均気温が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(平成31年3月)<sup>1)</sup>(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、ライフサイクルコストの低減に向けて取り組んでいる。沖縄防食マニュアルでは、鋼道路橋防食便覧と比べ、下塗りを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継手部や支承部などの高い防せい防食に配慮した構造や仕様設計上の留意点を規定している。本稿では、沖縄防食マニュアルに規定している高力ボルトの防せい防食技術、桁内の腐食環境改善と効果的な維持管理ならびに景観に配慮した多機能防食デッキの効果検証に関する取組みを紹介する。

### 2. 高力ボルト部の防食技術

#### (1) 目的

高力ボルトは、ナット部やねじ部に角部が多い部材であるため、膜厚確保が難しく膜厚検査も困難である。さらに、確実な軸力導入のためにはナット部には締め痕(傷)が自然に生じ、その後、現場で行われる現行塗装仕様は、亜鉛系防食下地のないエポキシ樹脂・フッ素樹脂の塗装であり、鋼橋において唯一重防食塗装系でない部材となっている。よって、腐食速度の速

い沖縄では早期に腐食している事例が多い。そこで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工場ですみ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大気環境遮断効果が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架かっている鋼I桁側道橋(歩道専用)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検証について紹介する。

#### (2) 試験施工

試験施工対象の橋梁(以下、「試験橋」という)は、写真-1に示す2002年完成した単純下路式鋼床版2主桁橋である。試験橋は、年平均飛来塩分3mddが飛来する腐食環境が厳しい環境であり、写真-2に示すようにボルトの腐食は激しい状況にある。

試験施工箇所は、試験橋の主桁に設けられている高力ボルト摩擦接合継手部4箇所(2主桁×2箇所)を対象とした。1つの継手部のボルト本数としては、上フランジ16本、ウェブ56本、下フランジ16本の合計88本である。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。表-1 に，各防食技術の仕様を示す。

なお，コールドスプレー（以下，「CS」という）は，高い防食性能を有することから，下塗を省略した仕様も検証対象としている。

写真-3 に 3 種ケレン（エア工具：チップパー，カップワイヤーブラシ）を示し，写真-4 には CS 施工状況を示す。



写真-1 対象橋梁



写真-2 腐食したボルト



a) エア工具



b) カップワイヤーブラシ

写真-3 素地調整状況



写真-4 CS 施工状況

表-1 腐食した高力ボルト部に適用した防食仕様

a) 沖縄地区鋼橋塗装マニュアル：有機ジンク

工程	塗料または素地調整	標準膜厚 (μm)	
現場塗装	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	30
	下塗り第1層	弱溶剤型変性エポキシ樹脂塗料下塗	60
	下塗り第2層	弱溶剤型変性エポキシ樹脂塗料下塗	60
	下塗り第3層	弱溶剤型変性エポキシ樹脂塗料下塗	60
	中塗り	弱溶剤型ふっ素樹脂塗料用中塗	30
	上塗り	弱溶剤型ふっ素樹脂塗料用上塗	25

b) 防食下地：亜鉛皮膜（CS 工法） + 下塗 2 層

工程	塗料または素地調整	標準膜厚 (μm)	
現場塗装	素地調整	動力工具処理	—
	防食下地	亜鉛皮膜（コールドスプレー工法）	100
	下塗り第1層	弱溶剤型変性エポキシ樹脂塗料下塗	60
	下塗り第2層	弱溶剤型変性エポキシ樹脂塗料下塗	60
	中塗り	弱溶剤型ふっ素樹脂塗料用中塗	30
	上塗り	弱溶剤型ふっ素樹脂塗料用上塗	25

c) 防食下地：亜鉛皮膜（CS 工法） + 下塗省略

工程	塗料または素地調整	標準膜厚 (μm)	
現場塗装	素地調整	動力工具処理	—
	防食下地	亜鉛皮膜（コールドスプレー工法）	100
	中塗り	弱溶剤型ふっ素樹脂塗料用中塗	30
	上塗り	弱溶剤型ふっ素樹脂塗料用上塗	25

d) 防食下地なし：透明ボルトキャップ

工程	塗料または素地調整	標準膜厚 (μm)	
現場塗装	素地調整	2種ケレン	—
	下塗り第1層	弱溶剤型変性エポキシ樹脂塗料下塗	60
	下塗り第2層	弱溶剤型変性エポキシ樹脂塗料下塗	60
	下塗り第3層	弱溶剤型変性エポキシ樹脂塗料下塗	60
	中塗り	弱溶剤型ふっ素樹脂塗料用中塗	30
	上塗り	弱溶剤型ふっ素樹脂塗料用上塗	25

(3) モニタリング結果 (3年目)

モニタリング結果の概要を以下に示す。

- ・「CS工法+下塗省略」では、写真—5 a) に示すようにねじ頭に点さびが一部見られた。
- ・「CS工法+下塗2層」では、写真—5 b) に示すように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、写真—5 c) に示すように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ことが分かる。
- ・有機ジンクリッチペイントは、写真—5 d) に示すように特に角部から腐食が生じている。



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) 有機ジンクリッチペイント

写真—5 3年目のモニタリング結果

3. 多機能防食デッキの防食効果と耐風安定性に関する研究

沖縄防食マニュアルでは、鋼橋の新しい防食技術として多機能防食デッキが推奨されている。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そして、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<sup>2)</sup>、鋼橋の強靱化の観点から今後益々その適用が見込まれる。一方、近年地球温暖化に伴う自然災害が甚大化しており、鋼桁を覆い受風面積が増加する多機能防食デッキにおいては、巨大化する台風に対する安全性も担保する必要があり、これに対して実物大試験橋を用いた耐風安定性に関する研究を行って

いる<sup>3)</sup>。

本章では、維持管理性を高め且つ塗装の塗り替え費用の大幅削減により鋼橋の競争力を高めた多機能防食デッキの腐食環境改善効果の調査事例と実物大試験橋を用いた耐風安定性に関する研究を報告する。

(1) 多機能防食デッキの腐食環境改善効果

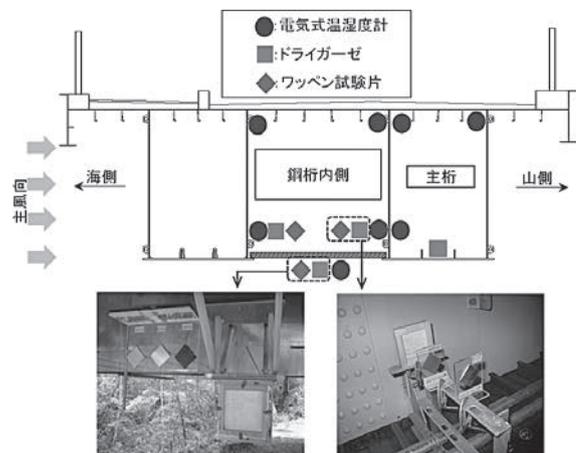
(a) 調査方法

多機能防食デッキの腐食環境改善効果は、既往調査により実証されてきた<sup>2)</sup>。ここでは、沖縄県内で初めて多機能防食デッキが採用された実橋にて行われた環境調査結果について報告する<sup>4)</sup>。

調査対象橋梁は、沖縄県中部の山間部に位置した橋梁60mの単純鋼床版箱桁である。本橋梁における多機能防食デッキは、腐食が進行し易いことが知られている鋼桁間<sup>5)</sup>の防食性能を改善することを目的としている。腐食環境調査は「電気式温湿度計を用いた温湿度調査」「ドライガーゼ法 (JIS Z 2382) による飛来塩分量調査」「ワッペン式暴露試験<sup>6)</sup>による腐食減耗量調査」を、架設完了後約1年間実施した。各調査の断面測定箇所と測定状況を図—1に示す。各測定機器は、多機能防食デッキの内側と外側と箱桁内側に設置した。

(b) 調査結果

図—2に飛来塩分の測定結果を示す。多機能防食デッキ外側では最大0.600 mdd、年平均でも0.215 mddの高い飛来塩分量が計測されており、架橋地点は飛来塩分量が多い地域であることが分かる。一方、多機能防食デッキ内は年間を通して0.003 mddと変動も小さく、箱桁内の飛来塩分量と同程度であることから多機能防食デッキは飛来塩分の遮断効果を十分に有していると言える。また、多機能防食デッキ内側に設置した1年後のワッペン試験片には点さび程度であり、100



図—1 腐食環境の計測状況

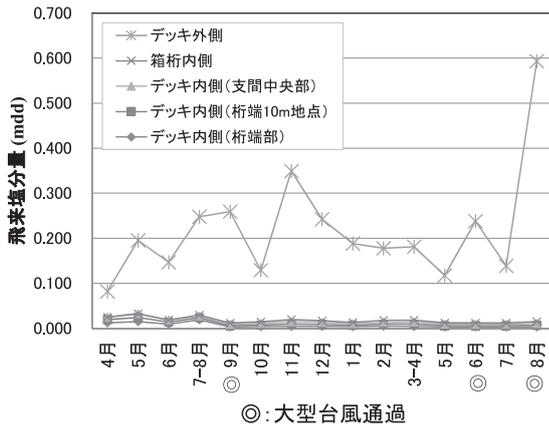


図-2 飛来塩分量の計測

年後の腐食減耗推定量は0.2 mm程度であった。一方、多機能防食デッキ外に設置したワッペン試験片の腐食減耗量は1.0 mm~2.5 mm程度であることより、デッキにより腐食環境が大幅に改善されている。

以上の環境調査結果から、多機能防食デッキで閉塞された鋼桁の腐食環境は、腐食促進因子である飛来塩分の遮断などの影響により大幅に改善される。

(2) 多機能防食デッキの耐風性

(a) 検証概要

多機能防食デッキに作用する巨大台風下の風圧特性の検証を目的として、2020年に琉球大学工学部附属地域創生研究センターに写真-6に示す実物大試験橋が建設された<sup>3)</sup>。その実物大試験橋は、橋長10.9 m、総幅員4.6 mの単純非合成2主桁であり、多機能防食デッキは鋼桁間の下フランジ面に敷設した。

(b) 風圧計測システム

多機能防食デッキに作用する風圧を計測するため、動的計測ロガー無線システムと風圧計測システムなどを用いて遠隔計測システムを構築した。写真-7に風圧センサー (MT-SP-8) と多機能防食デッキに設置した風圧計測孔ならびに風圧計測チューブを示す。風圧センサーは、最大5,000 Paの風圧を50 Hzで動的



写真-6 実物大実験橋

計測が可能である。風圧はデッキ孔に設けた計測孔と風圧センサーを計測チューブで接続し、多機能防食デッキ下面で計測される外圧と多機能防食デッキ内側の内圧の差圧として計測している。風圧計測は、桁中央部と桁端部の2ラインで行い、桁中央部と桁端部に各27箇所の計測孔を設けた。また、側圧を計測するため主桁ウェブ面にも計測孔を設けた。

(c) 風圧計測結果

図-3にデッキ下面と主桁ウェブ面で計測した桁中央部の風圧分布の例を示す。図より、風上側のデッキ端部には最大179 Paの負圧が生じ、風下側に推移するにつれて負圧は減少し風下側の端部では正圧が生じているのが分かる。これは、風が桁下を通過する際、主桁フランジの影響で風が剥離し負圧が生じるためであり、桁下を通過する風に対して多機能防食デッキに作用する特徴的な風圧分布が確認された。

図-4に同時刻における桁端部と桁中央部の風圧分布特性を比較した結果を示す。図より、桁中央部と桁端部ともに風上側で最大の負圧が生じ風下側に推移するにともない負圧が減少している傾向は同じであるが、桁中央部と比較して桁端部では約1.5倍の負圧

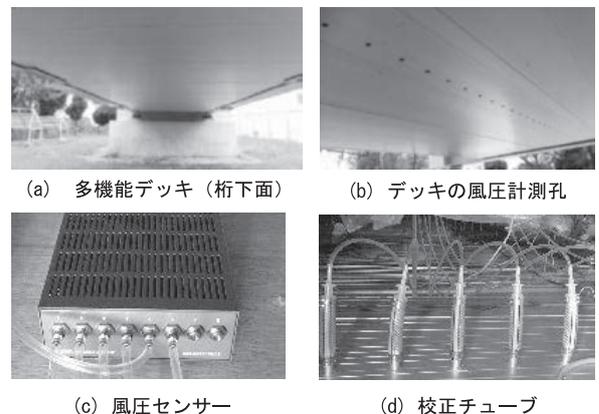


写真-7 風圧計測機器

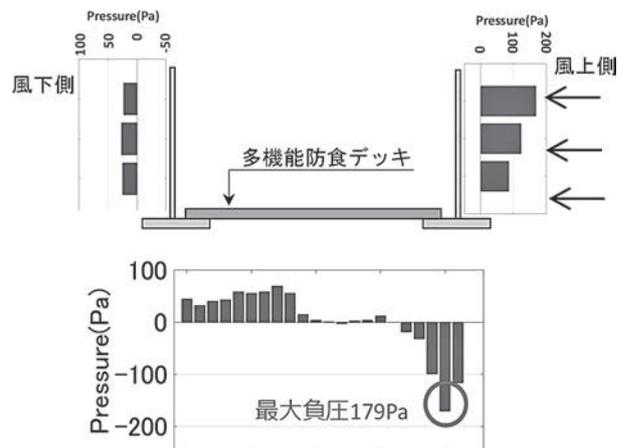


図-3 風圧計測結果

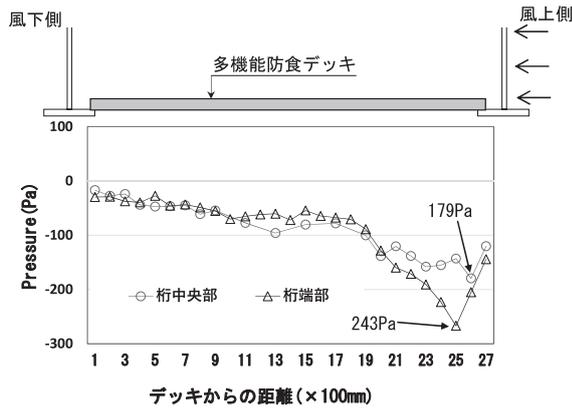


図-4 桁中央部と桁端部の風圧比較

が計測された。これは桁端部では橋台の影響でデッキ下側を通過する風が乱れる影響により、作用する負圧が大きくなったものと考えられる。

以上のように、鋼桁下面に設置する多機能防食デッキには負圧が生じる特徴的な風圧分布特性を示すとともに、橋軸方向位置においても桁中央部と桁端部で風圧特性が異なることが明らかとなった。

#### 4. おわりに

沖縄地区鋼橋防食マニュアル検討委員会（監修：沖縄総合事務局・沖縄県）では、今後、実橋で腐食したボルト部の防食法の新技術について技術公募を行う予定であり、著しい沖縄の腐食環境に適用できる新防食方法を引き続き検討していく。また、多機能防食デッキは、デッキ内部の鋼桁の腐食環境が改善されることが示されており、今後は、風圧計測を継続し、地球温暖化の伴う巨大台風下での多機能防食デッキの耐風安定

性について科学的・工学的に検証していく予定である。

J C M A

#### 《参考文献》

- 1) 沖縄総合事務局開発建設部・沖縄県土木建築部監修：沖縄地区鋼橋防食マニュアル，2019
- 2) (一社)日本鋼構造協会：鋼橋の腐食耐久性・維持管理性向上技術，JSSCテクニカルレポート No.116, 2018
- 3) 下里哲弘，田井政行，蓮池里菜，山下修平，玉城善章，長嶺由智：実物試験橋を用いた鋼道路橋の高耐久性と強靱化技術の研究 00 橋梁と基礎，vol.55, 2021
- 4) 山下修平，下里哲弘，玉城善章，淵脇秀見：橋梁メンテナンスの合理化を目的とした GFRP 多機能防食デッキの性能検証 00 土木構造・材料論文集，第 37 号，2021
- 5) 中西克佳，加藤真志，岩崎英治：風洞実験による橋梁断面の部位別付着塩分布評価手法に関する基礎的研究，土木学会論文集 A1, vol.67 No.2, 2001
- 6) (一社)日本鋼構造協会：耐候性橋梁の適用性評価と防食予防保全，テクニカルレポート，No.86, 2009

#### 【筆者紹介】



下里 哲弘 (しもごと てつひろ)  
 琉球大学 工学部 附属地域創生研究センター  
 (工学科社会基盤デザインコース)  
 教授



玉城 喜章 (たまき よしあき)  
 (一社) 沖縄しまたて協会 技術環境研究所  
 技術環境室長



山下 修平 (やました しゅうへい)  
 宮地エンジニアリング(株)  
 技術本部設計部  
 サブグループリーダー