CMI 報告

鋼橋の防食技術に関する研究

新田　健太・小野　秀一

鋼橋の代表的な損傷である腐食と疲労の対策を検討することは維持管理上，重要である。これらの課題に対応すべく，施工技術総合研究所では，疲労については，各種の疲労試験機を用いた基礎的な疲労データの蓄積や実構造物の疲労挙動の解明や補修補強工法の検討などの疲労に関する研究を実施してきている。一方，腐食についても，防食皮膜の耐久性に関する研究，鋼橋の塗装塗替えにおける旧塗膜除去方法や素地調整の調査研究，実橋塗膜の剥離原因調査，腐食した部材の耐荷性能の解明などの腐食に関する研究を行ってきている。

本稿では，当研究所において取り組んでいる防食技術に関する研究のうち，亜熱帯海洋環境下における各種暴露試験と腐食環境調査，接着性シリコーンゴム製防錆材料の防錆性能評価，塩分を含むサビ鋼板上への適用を想定した低温低圧型金属溶射工法による防錆技術の検討事例について紹介する。

キーワード：土木，社会基盤施設，鋼橋，腐食，暴露試験

1. はじめに

多くの社会基盤施設は高齢化が進み，今後も年齢を重ねていくばかりではなく，維持管理すべき施設は増加していくことが予想されている。これら施設の維持管理の重要性はますます高まるものと考えられ，当研究所においても様々な維持管理に関連する検討課題における調査研究に取り組んでいる。

社会基盤施設のうちの鋼橋においては，疲労，腐食，遅れ破壊が代表的な損傷として挙げられる。一般に鋼橋における防食対策として，塗装による防食皮膜の施工が行われているものの，十分な塗膜厚を確保することが困難とされる部材の角部やボルトを含めた添接部，湿潤環境になりやすい桁端部，雨水等が滞水しやすいトラス格点部は，皮膜が早期に劣化し腐食が発生しやすい部位とされている[1)]。また，既設の鋼橋では一般に，定期的な塗装塗替えが行われており，特に腐食環境が厳しい地域については，重防食塗装系が採用されているが，先述の通り，腐食環境が厳しい部位においては，様々な要因から早期にサビが再発する事例も報告されている。

そこで，維持管理における腐食への対応として，関係機関では各種多様な技術が開発されており，たとえば，耐候性鋼材やクラッド鋼などの防食性のより高い鋼材の開発，高耐久塗装材料の開発，ブラスト工法をはじめとした旧塗膜の除去技術や素地調整技術の高度化，各種犠牲防食材料を用いた防食下地の高度化，サビ転換材などの開発などが挙げられる。

本稿では，当研究所が行っている耐発錆・防食に関する調査研究のうち，亜熱帯海洋環境下における各種暴露試験と腐食環境調査，接着性シリコーンゴム製防錆材料の防錆性能評価，塩分を含むサビ鋼板上への適用を想定した低温低圧型金属溶射工法による防錆技術の性能検討事例について紹介する。

2. 亜熱帯海洋環境下における暴露試験および腐食環境調査

大気環境における耐久性や防食性能の評価を目的として，塗装や防食下地等の防食材料が施工された試験体を大気暴露する暴露試験が行われる。当研究所では，暴露試験場として，**図―1**に示すように，日本南端に位置する，東海大学沖縄地域研究センターが管理している西表島網取桟橋を利用して各種の暴露試験を実施している。当暴露試験場は，飛来海塩粒子量が多く，高温多湿，紫外線も強い環境である。

暴露試験状況の一例を**写真―1**に示すが，沿岸部や桟橋部に防食塗装を施した鋼板や防食鉄筋などの試験体を暴露し，定期的に腐食状況を把握するための外観観察および電気的計測などを実施している。現在実施している暴露試験は，各関係機関から受託しているものを含めて 10 種類以上にのぼる。



図―１　暴露試験場位置



沿岸部



桟橋部

写真―１　暴露試験状況

一方，暴露試験結果を適切に評価するためには，暴露試験場の環境，すなわち気温や湿度，飛来海塩粒子などの環境条件を把握しておくことが重要である[2)]。西表島網取桟橋においても，これまでに㈱高速道路総合技術研究所ら関係機関との共同研究においてワッペン式暴露試験を実施し，腐食量や腐食速度の算出を試みている。このうち当研究所では，**写真―２**に示すように，網取桟橋下面および上面に設置したSM490とSMA400AWの鋼材で板厚３mm，６mm，９mmの各試験片の断面観察やサビ組成調査を行い，鋼種や設置



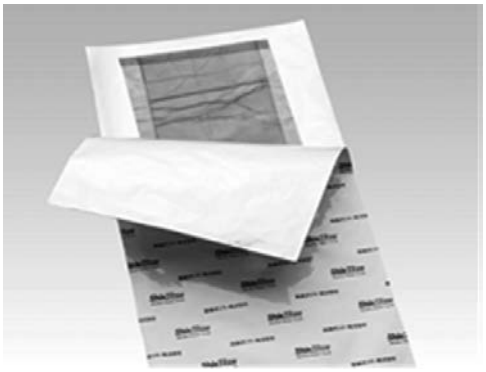
写真―２　ワッペン式暴露試験状況

位置によるワッペン式暴露試験方法の検討および評価を行っている。

3. 接着性シリコーンゴム製防錆材料の防錆効果性能確認試験

接着性シリコーンゴム製防錆材料は，硬化前は粘土状で柔らかく，自由に賦形することができ，大気に触れると水分と反応して硬化しながら対象物に強く密着した弾性的な厚膜を形成できる特長がある。１日で実用強度まで硬化接着し，約１週間で完全硬化する。

ここでは，**図―２**に示すように，施工を考慮して，厚さ２～３mmのシート状に加工した接着性シリコーンゴム製材料を貼付することで，鋼材の防食工法の一つとしての防錆性能を評価している。試験方法としては，亜熱帯海洋環境下での暴露試験および複合サイクル試験による腐食促進試験の２種類とした。暴露試験体としては，**写真―３**に示すボルト部を模擬したもので，C5塗装面，溶融亜鉛めっき面，防食下地なしの素地面に接着性シリコーンゴム製防錆材料を施工している。他方，複合サイクル試験体については，防食下地なしの鋼板に接着性シリコーンゴム製防錆材料を施工したものである。複合サイクル試験については，



図―２　シリコーンゴム製材料



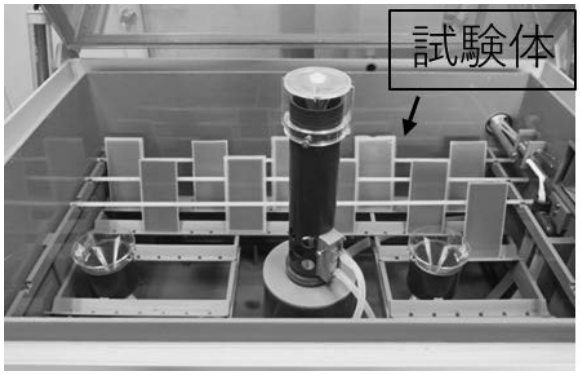
写真―３　ボルト模擬試験体暴露試験



写真―４　複合サイクル試験機

写真―４に示す複合サイクル試験機を用いて，JIS K 5600-7-9 に準じた負荷試験（サイクル A）に基づいて実施している。

暴露試験結果については，期間が約 750 日経過した時点でも C5 塗装面および溶融亜鉛めっき面に接着性シリコーンゴム製防錆材料を適用したボルトからサビの発生は確認されず，防食効果を保持していることが確認されている。また，複合サイクル試験については，**写真**―５に示すように 800 サイクル経過後もサビの発生は確認されておらず，防食性能を保持していることが確認されている。暴露試験については，引き続き継続する予定である。



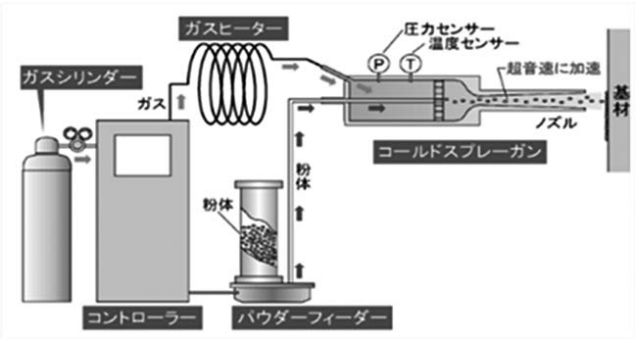
写真―５　複合サイクル試験状況

4. 低温低圧型金属溶射技術を適用した塩分残存サビ鋼板における防食性能確認試験

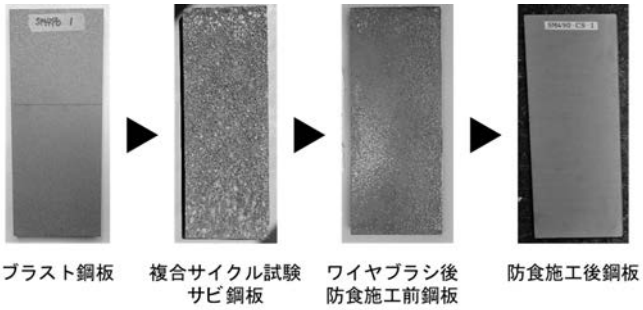
鋼橋では，新設や塗替え塗装において，一般的に塗装による表面被覆による防食工法が適用されている。このうち，塗替え塗装においては，旧塗膜の除去や素地調整の程度が，再塗装後の耐久性に影響を及ぼすことから，例えば再塗装面上の付着塩分量に規定値があり，その基準値以上の塩分が確認された場合，高圧水洗などによって塩分量を調整した後に塗替え塗装を行うこと[2]が規定されており，素地調整における品質確保が重要と考えられている。一方で，構造詳細が複雑な箇所や著しいサビの発生部では，再塗装面にサビや塩分が残存してしまっていることが早期のサビ再発に繋がっているとの指摘があり，このような部位への対応も重要な課題である。

このような課題に対して，**図**―３に示すように低温低圧型金属溶射技術[3]（Cold Spray 技術，以下 CS）に着目した防錆・防食技術の研究開発を，琉球大学をはじめとした関係機関と実施している。当技術は，亜鉛とアルミナの混合粉体を融点より低温かつ低圧で専用ノズルから超音速で鋼材面へ衝突させ，固相のまま密着させ，強固かつ緻密な皮膜層を形成する技術である。サビが残存する腐食鋼板面でも強固な密着力を有し緻密な金属皮膜の形成が期待できることが明らかになっており[4),5)]，今回は，塩分が残存するサビ鋼板への CS による成膜が防食性能の向上に及ぼす影響について，暴露試験により検証している。

試験体は，**表**―１に示す SM490，SM400，SMA400 の３種類の鋼板を用意し，**図**―４の手順に従い複合サイクル試験によって厚さ 50 μm 以上となるサビ層



図―３　低温低圧型金属溶射技術



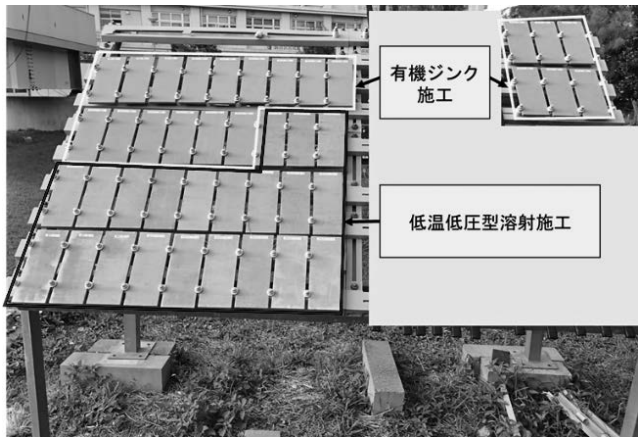
図―４　試験体作成手順

表―１　試験体パラメータ

防食技術	鋼材	試験体数	施工前サビ厚	残存塩分	防食膜厚
低温低圧型金属溶射	SM490	各3体	50μm以上	150mg/m^2	75～100μm
	SM400				
	SMA400				
	SM490	各3体		500mg/m^2	
	SM400				
	SMA400				
	SM490	3体	新材	-	



写真―６　低温低圧型金属溶射技術による成膜



図―５　暴露試験状況（琉球大学構内暴露試験場）

を生成させ，そのサビ層に塩分が約 150 mg/m^2，約 500 mg/m^2 が残存するように調製している。その後，作製した塩分を含むサビ鋼板試験体に対して，**写真―6** に示すように CS を適用して膜厚 75 μm ～ 100 μm で防食皮膜を成膜している。

作製した CS 施工試験体については，**図―５** に示すように，亜熱帯環境下にある琉球大学構内の屋外暴露試験場（年平均気温 23℃，年平均相対湿度 79.6％，年平均飛来塩分量 0.22 mdd，年平均腐食速度 0.001 mm/year，離岸距離約 2 km の大気環境）で南向きに設置し，暴露試験を実施している。現在は，暴露開始から１年が経過した段階であるが，サビの発生は確認されず，塩分を含むサビ鋼板においても防食効果が保持されているものと考えている。なお，比較対象として有機ジンクリッチペイントを塗布した試験鋼板についても暴露試験を併行して実施している。引き続き，暴露試験を継続する予定である。

5. おわりに

鋼橋における代表的な腐食損傷における防食技術に対して，より厳しい腐食環境である亜熱帯海洋地域で実施している屋外暴露試験や室内での腐食促進実験の事例について紹介した。今後は，亜熱帯海洋環境や複合サイクル試験の厳しい腐食促進条件の評価を引き続き実施することで防食評価方法の高度化を図り，新たに検討されている様々な防食技術に対して，それぞれが想定する腐食環境や耐用年数に応じた防錆・防食性

能の評価が行えるように鋭意研究を進めていきたいと考えている。また，これらの性能評価や研究の成果が，鋼橋ひいては鋼構造物の維持管理においてより良い防食技術の提案や情報提供に繋がり，持続可能な社会基盤の維持に貢献できれば幸いであると考えている。

JCMA

《参考文献》

1）腐食した鋼構造物の耐久性照査マニュアル，土木学会，鋼構造シリーズ 18，2009
2）左藤眞市：大気暴露試験，大阪府立産業技術総合研究所 Technical Sheet，No.07015，2008.2
3）榊和彦：コールドスプレーの概要と最新動向，溶射，vol.47，No.3，pp.113-119，2010.
4）新田健太，下里哲弘，日和裕介：低温低圧型溶射技術を用いた除去困難な残存さびに対する防食下地処理に関する研究，日本鋼構造協会鋼構造年次論文報告集，Vol.30，pp.443 ～ 448，2022
5）Hiwa.Y，Shimozato.T，Tamaki.Y:Denseness and Adhesion of Low-Pressure Cold Spray Coating to Corroded Steel Bridges, International Journal of Steel Structures, Vol.24 No.1, pp109-117, 2024.（DOI:https://doi.org/10.1007/s13296-023-00803-6）

［筆者紹介］



新田　健太（にった　けんた）
（一社）日本建設機械施工協会
施工技術総合研究所　研究第二部
研究員



小野　秀一（おの　しゅういち）
（一社）日本建設機械施工協会
施工技術総合研究所　研究第二部
部長

