

凍結防止剤散布路線に位置する耐候性鋼橋梁の評価および

維持管理における留意事項の提案

大日本ダイヤコンサルタント(株) ○ 阿南 勇斗
大日本ダイヤコンサルタント(株) 堀口 武寛
大日本ダイヤコンサルタント(株) 大越 悠生
大日本ダイヤコンサルタント(株) 西村 治

論文要旨

耐候性鋼橋梁は、塗替え塗装工を不要とすることで普通鋼橋梁に比べて LCC の低減を図る特徴を有している。凍結防止材散布(塩害)路線では、塗膜層の防食機能を代替する保護性さびが架設直後から防食機能が低下して異常さび化し、約 10 年程度で大規模な補修工事を行うなど、想定外の補修対応が生じている。本稿では、耐候性鋼橋梁の本来の要求性能であるミニмумメンテナンスとの乖離の原因究明を行うことを目的として、耐候性鋼橋梁のさび生成状況評価のための調査を行い、調査結果から、耐候性鋼橋梁の構造細目改善のほか、耐候性鋼材の特徴に基づいた、補修判断の基準を考察・提案した。特に凍結防止剤由来の塩分を含む水掛かり・漏水部では、原因の排除、構造改良に加え、初期状態でも異常さび除去の必要性を考察した。

キーワード：耐候性鋼橋梁，凍結防止剤，塩害，維持管理

まえがき

耐候性鋼橋梁は、鋼材表面に形成された緻密なさび層(保護性さび)が塗膜層に代わって『防食機能』の役割を果たすため、鋼材の腐食速度を抑制する特性を持ち、基本的には塗装処理行わないで使用が出来ることから、LCC の低減、ミニмумメンテナンスを優位条件として採用されている。

保護性さびは、架設後において、計画・設計段階の想定より厳しい環境下や適切な維持管理が実施されなかった場合、防食機能が低下して悪性の層状剥離さびが発生するなど、本来の要求性能が確保できていない事例が報告されている。層状剥離さびの発生原因の一つに海からの飛来塩分が、もう一つには、凍結防止剤の影響があり¹⁾²⁾、兵庫県内の積雪寒冷地域では、冬期に凍結防止剤散布を行い、これにより、保護性さびの形成に悪影響を生じていると推測される橋梁が散見されている。

そこで本稿では、耐候性鋼橋梁のさび生成状況や塩分量に関する調査の結果、耐候性鋼部材の健全性や保護性さびの生

成状況、形成状況等を評価するとともに、対象橋梁を例に挙げた構造細目改善のほか、耐候性鋼材の特徴に基づいた維持管理方法について提案する。

1. 対象橋梁

対象橋梁は表-1 に示す 4 橋である。全て河川橋であり、無塗装の耐候性鋼材(裸仕様)、建設直後の流れさびの抑制や景観性の向上を目的とした表面被膜処理(さび安定化処理)は行われていない。表-1 より、3 橋は凍結防止剤散布路線に位置しているが、B 橋は凍結防止剤が散布されていないことが確認できる。また、D 橋は、自動車専用道路に架設されているが、海岸からの距離が比較的近いことから、耐塩性向上を目的とする『ニッケル系高耐久性鋼材』が採用されている。

表中の凍結防止剤散布量は、冬季に散布される路線ごとの凍結防止剤の総重量を 1km あたりで算出し、橋面積で除して換算した橋面積当たりの散布量を示している。

なお、対象橋の架橋地(兵庫県但馬)は、日本海に面する

表-1 対象の耐候性鋼橋梁

橋名	竣工年	使用鋼材	形式	表面仕様	海岸からの距離	凍結防止剤散布量	端部塗装	定期点検結果
A	2004 (H16)	JIS (SMA 鋼)	鉸桁	裸仕様	約 8 km	0.43 kg/m ³	内側のみ	II
B	2004 (H16)	JIS (SMA 鋼)	鉸桁	裸仕様	約 25 km	0 kg/m ³		II
C	2006 (H18)	JIS (SMA 鋼)	箱桁	裸仕様	約 18 km	0.89 kg/m ³	有	II
D	2005 (H17)	ニッケル系	鉸桁+箱桁	裸仕様	約 2 km	1.98 kg/m ³	有	II

●さび状態	●I 評点 評価区分	●対策
正常な状態	I-5 初期さび・未成長さび(A) I-4 保護性さび I-3 未成長さび(B)	定期点検の継続
観察が必要な状態	I-2 要観察状態を示すさび(A) I-2' 要観察状態を示すさび(B)	詳細調査或いは、 経過観察の実施
異常な状態	I-1 異常を示すさび	板厚調査実施後 原因の排除 + 経過観察 或いは、 補修塗装 或いは 補強+補修塗装

図-1 I 評点区分

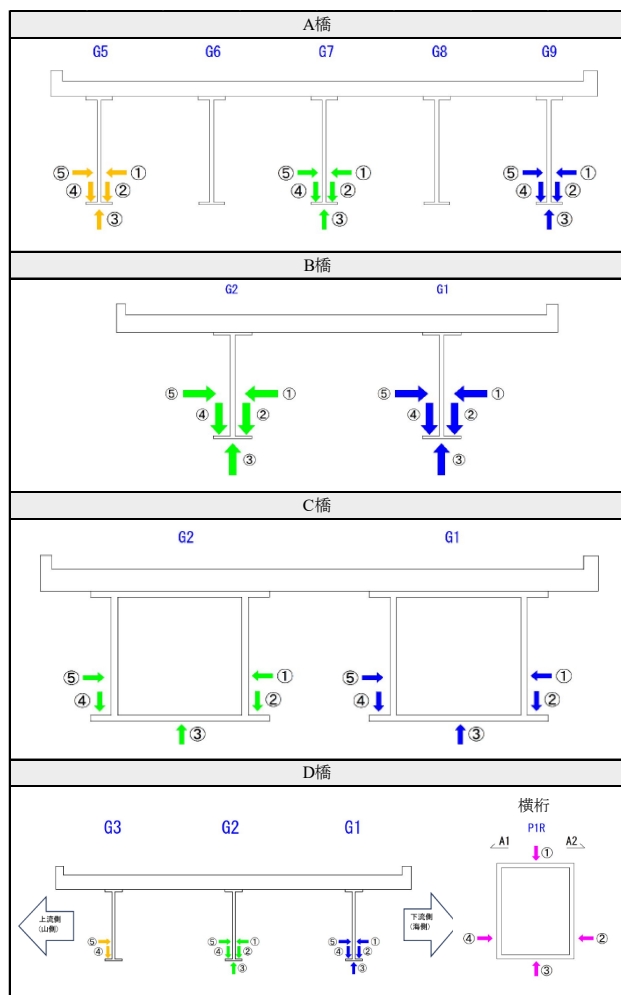


図-2 対象橋梁の調査測点

兵庫県北部の降雪地域で、冬季の平均気温は美方郡香住³⁾で1月:3.4度, 2月:6.4度, 相対湿度は年平均で70~85%程度と多湿であり、架橋計画段階において、耐候性鋼橋梁の適用に関して、十分な検討及び調査が行われたことを設計報告書等で確認している。

2. 調査項目

調査は、既往研究⁴⁾及び手引き¹⁾を参考に①外観観察, ②セロハンテープ試験, ③さび厚計測, ④付着塩分量計測, ⑤イオン透過抵抗試験を行った。

⑤のイオン透過抵抗試験で測定されるイオン透過抵抗値は鋼材表面を覆う物質のイオンの移動に対する抵抗値を示し、抵抗値が高いほど環境遮断性が高く、鋼材の腐食速度が遅い状態にあることを示す⁵⁾。文献5)では、このイオン透過抵抗値と③で得たさび厚の関係から、図-1に示すI評点で評価することで、耐候性鋼橋梁のさび状態に対して定量的かつ、客観的な評価、診断を行うことが可能であることが報告されている。

調査測点は、環境条件等の要因で、さびの状態が比較的悪いと想定される桁端部で計画し、各橋梁図-2に示す外桁/内桁のフランジ、ウェブに対して、①~⑤の調査を実施した。D橋では、他の橋梁と異なり、張り出し式の横桁を有していることから、横桁の位置でも調査を実施した。

3. 調査結果とさび生成に関する考察

イオン透過抵抗値とさび厚の関係及びI評点区分を図-3に示す。全橋において、概ねI-5, I-4の領域に位置していることから、橋梁全体としては『保護性さびの生成は比較的良好』と判定した。

しかし、A橋(図-3(a))に着目すると、最も外側のG-9桁下フランジ上面においては、I-1(異常を示すさび)に区分されており、局所的な異常さび(図-4, 外観評点:1)を確認した。この位置は橋梁の桁端部であり、遊間部からの漏水跡が確認された。

C橋(図-3(c))では、全ての測点においてさびの状態が良好であると判定できる。しかし、図-5に示す支間中央付近の垂れ流し式の排水管周辺では粗い異常さび(外観評点:3)が確認された。外観観察を実施した位置は河川と交差しており、寄り付きが困難であったことから、その他の調査は実施していない。

D橋(図-3(d))では、全ての測点でI-3~I-5の間に区分されており、未成長さびもしくは保護性さびであると評価できる。しかし、横桁下フランジ下面(P1-3)は表-2に示すように付着塩分量計測の結果、700mg/m²の塩分が付着しており、外観評点:3ではあるが、要経過観察とした。D橋はC橋と同様に垂れ流し式の排水管が採用されており、図-6に示すように排水管の突出長(L)が不足し、凍結防止剤由来と想定される塩分を含んだ排水が横風(架橋地の卓越風向)に流され横梁フランジ下面に付着したものと考えられる。調査時には表面の異常さび除去後に、緻密なさびを確認することができ、防食機能を有していると考えられる。しかし、表面の異常さびが放置された状態が継続されると塩分の蓄積により、内部の緻密なさび層も異常さびへ転換することが予想されるため、排水管の延長を行うことに加えて、表面のさびを除去する必要があると考えられる。

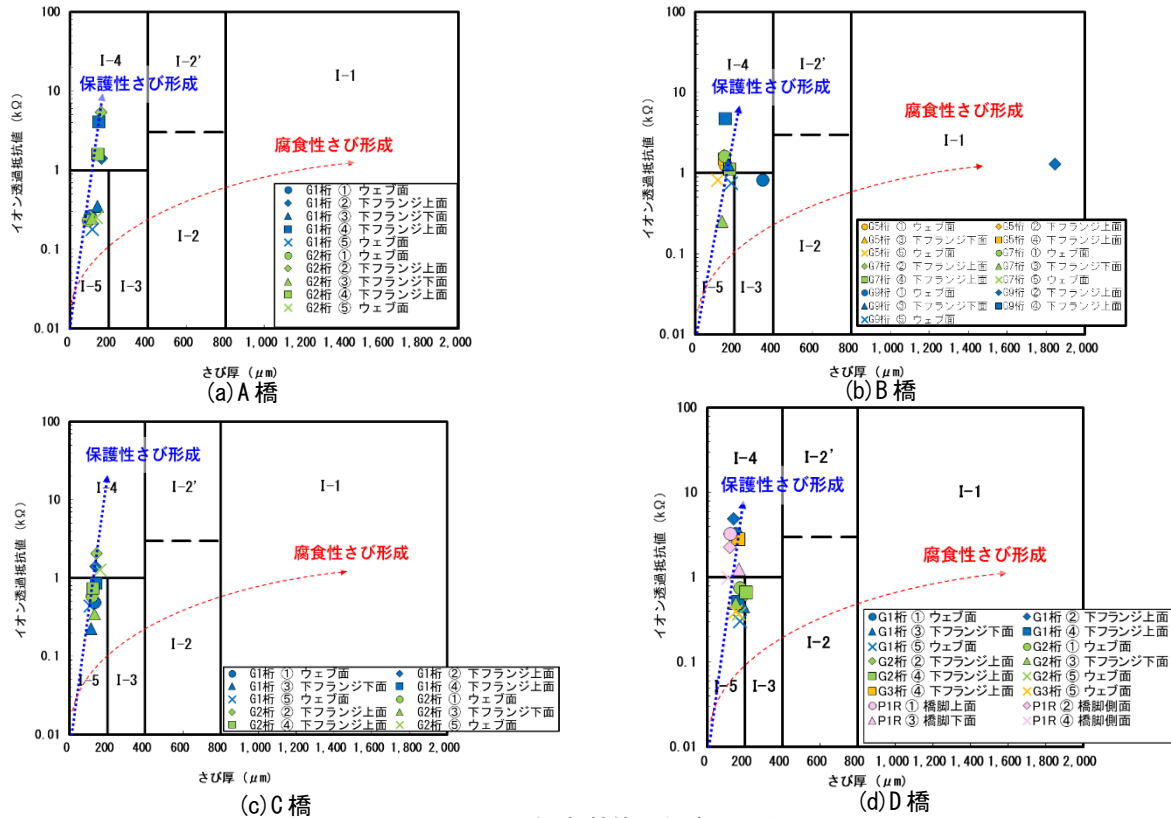


図-3 イオン透過抵抗値とさび厚の関係



図-4 A橋のさび生成状況



図-5 C橋の排水管周辺のさび生成状況

表-2 D橋横桁下フランジの調査結果

PIR ③	
検仕様(ニッケル系)	
外観写真	
外観評点	3
セロハンテープ試験	評点 3
さび厚(平均)	169 μm
イオン透過抵抗値	1.3k Ω
I評点区分	I-4
付着塩分量	700 mg/m ²
考察	○保護性さびに至っている。 ⇒正常な状態



図-6 D橋の排水管状況

一方で、凍結防止剤不散布のB橋は、図-7に示すように桁端部の漏水を確認したが表-3の通り、保護性さびが形成されていた。B橋で確認された漏水の電気伝導度を測定した結果、水道水の1/5程度の値(塩分が含まれていない純水に近い状態)であり、文献6)では、一般的に耐候性鋼材に、水道水程度の塩分が含有されていても異常さびに至らないことが報告されていることから、本橋では、保護性さびが形成されたと考えられる。

表-3 B橋漏水箇所の調査結果

第2測線 G9桁 ②	
検仕様(SMA鋼)	
外観写真	
外観評点	1
セロハンテープ試験	評点 5
さび厚(平均)	1.846 μm
イオン透過抵抗値	1.3k Ω
I評点区分	I-1
付着塩分量	44 (mg/m ²)
考察	○異常を示すさびに至っている。 (定点の内、2/3は保護性さびであった) ⇒異常な状態

図-7 B橋漏水箇所

本調査における4橋の結果から、耐候性鋼材に水と塩分の両方が供給された時に異常さびが生じる傾向にあった。

4. 調査結果に基づいた構造細目の改善

(1) 排水管の突出長(L)の確保

C橋、D橋の結果より、排水管から塩分を含んだ排水が桁に付着することが確認されたため、排水管突出長(L)の確保及び現場状況に応じて排水管を延長する対策が考えられる。また、図-6に示す通り、排水管突出長(L)は設計段階(2次元図面)での把握は見逃しリスクが高く、横風影響の事前把握には限界があるため、施工時や初回点検での再確認、改良が望ましい。また、今後はBIM/CIM等3次元図や流水、風のシミュレーションに基づいた水掛かり状況等から、排水管突出長も含めた部分的な細部モデルでの事前確認が可能となると予測できる。

(2) 排水管接続部における細部構造の改善

排水管構造が異常さびの発生要因となる事例として、合成床版形式の橋梁において、VP管との接合部が耐候性鋼材(図-8)であることが挙げられる。本構造では、VP管と突出管との接合部隙間から、塩分を含む“排水のしみ上がり”が生じることで、排水管周辺に異常さびが発生するものと考えられ、マニュアルや便覧等での留意事項に該当するが、未対応である構造はまれに見られ、この場合は排水管全体を含めて見直す必要がある。

改善策(案)は、排水桝は別構造、鋳物等とし、接合部に“防水”と“マクロセル腐食対策(絶縁等)”を目的とした『シール材設置』構造とすることで、異常さび抑制が可能になると考える。

(3) 伸縮装置の早期改善

A橋では橋梁伸縮装置部からの漏水が発生していることを現地で確認し、漏水位置で異常さびが確認されている。また、現地状況及び、点検調査よりシール材の欠損が確認されていることから、軽微な損傷に対しても早期に対応する必要があると考えられる。

5. 耐候性鋼橋梁の補修判断

(1) 耐候性鋼橋梁の補修判断

橋梁定期点検要領(H31.3)では、耐候性鋼材の『健全性診断:III(早期措置段階)』区分評価は、“さびの層状剥離がある”と規定されている。しかし、耐候性鋼材の異常さび除去作業は普通鋼材に比べ、特殊工具で約3倍の時間と手間を要することに加えて、切削面凹部に『異常さび、水、塩分』が残留し、補修後の塗膜下で異常さびが生成した再劣化事例が多数確認され、耐候性鋼橋梁特有の課題がある。一部の異常さびにより、加速度的に板厚が減肉する可能性があり、構造安全性低下のほか、耐候性鋼部材の大規模補修工法が未だ開発

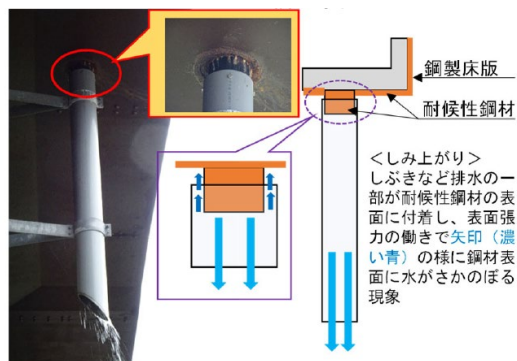


図-8 排水管接続部における異常さび発生事例



図-9 A橋における伸縮装置からの漏水事例

段階であるため、補修の手間/費用が高額になることが想定される。

これらの調査結果および再劣化事例に基づき、耐候性鋼橋梁の『ミニマムメンテナンス橋』としての維持管理性能を発揮させるためには、積極的な予防対応への方針転換が必要と考えられ、確認された異常さび発生の要因(計画/想定外の水掛かり、伸縮装置からの漏水等)は、速やかに改善/補修(異常さびの初期除去、水掛かり/漏水原因の排除)を行うといった“丁寧な維持管理の実施/継続”が、LCC低減に効果的であるとする。また、本稿における対象橋梁の定期点検結果(健全度判定)は表-1より、橋梁全体:IIであり、補修対象外(III未満)となるが、LCC低減の目的から“初期損傷でも補修”が可能となる診断基準の見直し等が望ましいと考えられる。

(2) 耐候性鋼橋梁の防食対策

耐候性鋼橋梁の防食対策⁷⁾として、異常さびの発生原因の特定及び原因の排除を実施した後、ハンマーケレンやダイヤモンド工具を用いた異常さびの除去⁸⁾及び水洗工法⁹⁾による付着塩分の除去を確実にを行い、初期の環境状態で供用することで、正常なさびが生成させる環境を整えることが有用と考える。一方で、原因の特定・排除が困難な場合は、塗装による防食対策が実施される。耐候性鋼橋梁に塗装を行った場合、一部で、原因を完全には排除することができず塗装の剥離や塗装内部で異常さびの発生など、再劣化した事例も報告されている。塗装後の再劣化を予防するために、異常さびの進行や発生範囲を把握した上で塗装を行う必要があるため、応急的な補修かつ、経過観察を行うことが可能になると確実な

補修(塗装)を行うことが可能になると考えられる。応急的な補修時は、施工が容易であることが求められる。

以上のことから、透明な材料で内部状況が把握することが可能であり、施工が容易な接着性シリコンシートによる被覆が効果的であると考えられる。本稿では接着性シリコンシートで被覆した外観評点:1の耐候性鋼材に対して、環境試験(複合サイクル試験 JIS K 5600-7-9 サイクルD)を試験的に実施した。なお、使用した接着性シリコンシートは信越ポリマー(株)製ポリマエース⁸⁾である。本製品はシート状で小規模であるため、施工には足場の設置が不要であり、高所作業車等を利用して施工を行うことが可能であるため施工が容易である。また、広い温度領域でもゴム弾性を有しており、紫外線の耐性にも優れ、風雨の影響を受けても物性はほとんど変化しないため、長期間に渡り性能を維持することが可能であることから、屋外やさびが発生しやすい箇所へ適用されている製品である。

現在も試験中であるが、5年経過相当の結果を示したものを図-10に示す。シートで被覆していない箇所は腐食の進行及び板厚の減少が確認されたが、被覆箇所においては板厚の減少は認められなかった。また、境界部から一部シートの剥離が認められたが、シートと耐候性鋼材の境界部で異常さびが発生し、シートが剥離したものと考えられる。この結果から、シートの剥離を通して、異常さびの発生、範囲、進行を早期に把握することが可能になると考えられる。

以上の結果から、試験に用いたシートは透明であるため、シート内部の耐候性鋼材の状況を確認することができ、腐食の進行状況を把握することが可能である。さらに、製品が小規模であるため施工の制限が少なく、容易であることから、実際の補修を行うまでの応急的な補修材料として期待できると考える。本製品の継続した試験や今後の実橋への適用及び適用後の経過観察により、確実な補修効果を実証することで、恒久的な補修材料となることが期待できる。

あ と が き

- (1) 桁端部及び排水管周りは、局部的に異常さび(うろこ状さび/層状剥離さび)が発生することを確認した。結果、板厚減少が加速度的に生じ、構造安全性低下に加え、補修時の手間/費用も高むため、初期段階で異常さび除去と要因の排除/改善等が重要である。
- (2) 本調査により、耐候性鋼材に水と塩分の両方が供給された時に異常さびが生じる傾向にあり、類似条件の他橋との比較等、継続調査が必要である。
- (3) 耐候性鋼橋梁のLCC低減には、伸縮装置や排水管の切回し/取合など、細部構造に配慮し、BIM/CIMの活用も含めた設計時・施工時確認だけでなく、架橋直後の構造改善も必要である。

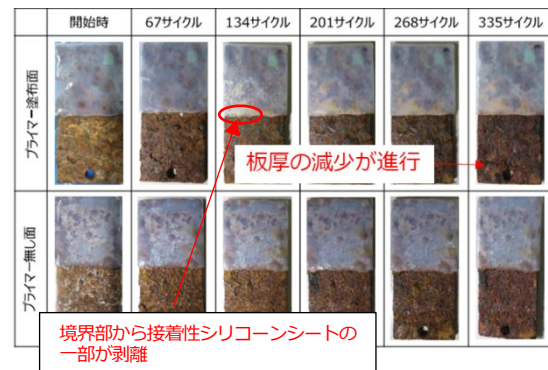


図-10 環境試験後の接着性シリコンシートの状況

- (4) B橋の水掛かり部(純水、塩分無し)は、異常さびが未発生(健全)であったことから、純水と異常さび生成条件との関係について、類似する他橋との比較検討、継続調査等が必要である。
- (5) 対象橋の定期点検結果(健全度判定)は主桁:II、橋梁全体:IIであり、補修対象外(III未満)となるため、LCC低減の目的から“初期損傷でも補修”が可能となる診断基準の見直し等が望ましい。

本調査は、兵庫県 道路街路課及び新温泉土木事務所発注の耐候性鋼橋の分析を目的とする業務内で実施し、対象橋梁や凍結防止剤散布状況に関する情報を提供いただきました。関係者の皆様方に感謝の意を表します。

参考文献

- (1) (社)日本橋梁建設協会:耐候性鋼橋の手引き(改訂4版),2021.11
- (2) 国土交通省国土技術総合研究所 他:耐候性鋼橋の適用環境評価手法の高度化に関する研究(II)-凍結防止剤散布の影響に関する検討,国土技術政策総合研究所資料, No.788, 2014.1
- (3) 兵庫県:統計書 令和3年(2021)
- (4) 今井篤実ら:鋼構造物の腐食診断にむけたイオン透過抵抗法の適用,防食管理, Vol.51, No.5, pp.1-6, 2007年5月
- (5) 西川和廣ら:イオン透過抵抗法による耐候性鋼橋梁の異常さびの早期検出~定期点検における健全度判定の信頼性向上を目指して~,土木技術資料 59-4(2017)
- (6) 麻生稔彦ら:耐候性鋼材のさび生成に関する基礎的実験,鋼構造年次論文報告集,第18巻, pp.617-624, 2010, 11.
- (7) 日本道路協会:鋼道路橋防食便覧, 2014.
- (8) 今井篤実ら:耐候性鋼橋梁の防食補修塗装法の実施に関する一考察,土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.68, No.2, pp.347-355, 2012年.
- (9) 落部圭史ら:耐候性鋼橋梁の維持管理に関する補修工法の開発,構造工学論文集, Vol.66A, pp.411-418, 2020年3月.
- (10) 信越ポリマー株式会社:シリコン接着シートポリマエース総合カタログ,
<https://www.shinpoly.co.jp/ja/product/product/construct/maintenance/acc.html>, 閲覧日 2024/08/07.