

積雪寒冷地における鋼橋の延命化技術の開発

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 26

担当チーム：寒地構造チーム、寒地技術推進室

研究担当者：西 弘明、今野久志、岡田慎哉、佐藤 京、表 真也
澤松俊寿、横山博之、中村直久、高玉波夫、宮本修司

【要旨】

既設鋼橋の鋼部材の腐食損傷や疲労亀裂が顕在化し、海岸部では飛来塩分、積雪寒冷地では凍結防止剤の影響により耐荷力・耐久性が急激に低下することが危惧される。しかしながら、鋼材の防錆防食対策である塗膜の延命化技術や表面処理を施された耐候性鋼材の外観による健全度評価は研究されておらず、また、機能が低下した場合の健全化対策技術も提案されていない。本研究では、社会資本ストックの一つである鋼橋を適切に維持管理していくために必要な、鋼部材塗膜の延命化技術の開発、表面処理を施した耐候性鋼材の健全度評価法の提案、積雪および寒冷地に適した鋼部材の疲労き裂進展を抑制する工法の開発を目的とする。

鋼部材塗膜の延命化技術については、橋梁洗浄工法の開発を目的として、洗浄除去が可能である表面に付着した物質と塗膜劣化要因との関係について分析した。また、洗浄工に求められる機能を評価するため、プロトタイプ製の洗浄機器を用いたフィールド実験により工法適用に関する検討を実施した。

平成 25 年度においては、塗膜表面の付着物による塗膜劣化促進に関する実験を行った。また、表面処理を施した耐候性鋼材の健全度評価基準の最適化をはかるため、現地調査を行い基準の改定案を取りまとめた。

キーワード：鋼橋、延命化技術、塗装劣化、橋梁洗浄、耐候性鋼材、疲労き裂、疲労き裂進展抑制

1. はじめに

厳しい経済状況の下で公共事業の一層のコスト削減と品質を確保するには、その地域の条件にあった技術を用い、規格を適切に設定することが必要である。供用中の橋梁の多くは高度経済成長期に建設され、建設後数十年を経過していることから、今後維持管理費が急増することは明らかであり、これまで以上に効率的な維持管理が求められる。また、北海道は全国的にみて極めて特殊な気象特性をもつため、土木施設の維持管理を行う場合、積雪寒冷環境下に対応した特有の技術が求められる。

既設鋼橋の鋼部材の腐食損傷や疲労亀裂が顕在化し、海岸部では飛来塩分、積雪寒冷地では凍結防止剤の影響により耐荷力・耐久性が急激に低下することが危惧される。

しかしながら、鋼材の防錆防食対策である塗膜の延命化技術や表面処理を施された耐候性鋼材の外観による健全度評価法は研究されておらず、また、それらの対策技術も提案されていない。本研究では、社会資本ストックの一つである鋼橋を適切に維持管理していくために必要な、鋼部材塗膜の延命化技術の開発、表面

処理を施した耐候性鋼材の健全度評価法の提案、積雪および寒冷地に適した鋼部材の疲労き裂進展を抑制する工法の開発を目的とする。

2. 橋梁洗浄効果技術の開発

2.1 洗浄工に求められる機能の検討

鋼部材塗膜の延命化技術の一つとして橋梁洗浄工の要求機能を明確にするため、これまでに鋼部材の劣化損傷プロセスの検討、塗膜延命化の可能性について実験検討を実施した。さらに、効果的な洗浄工の活用について検討を実施した。

2.2 塗装劣化

塗装劣化の抑制または遅延化の可能性について検討するため、既往文献^{1),2)}より塗膜の劣化の区分を整理し、劣化のプロセスを明確にする。

塗膜の劣化とは、ポリマーを主成分とする塗膜が一般的環境下で熱、光、力、電気などの外的エネルギーを受けて変質することであり、表-1に示すように、その内容は塗膜の硬脆化による可とう性の低下と、塗膜分子の分解による表面からの劣化進行に分けて考えることができる。

表-1 塗膜劣化の区分

劣化区分	概要	劣化現象
可とう性の低下	塗膜分子の橋かけ進行や、低分子鎖の離脱などによる塗膜の硬化。その結果として温度変化時の内部応力増加。	割れ 剥がれ
表面からの劣化	紫外線や熱など外部エネルギーの作用による塗膜分子の変質・分解による色調変化および表面からの消失。	変退色 光沢低下 チョーキング

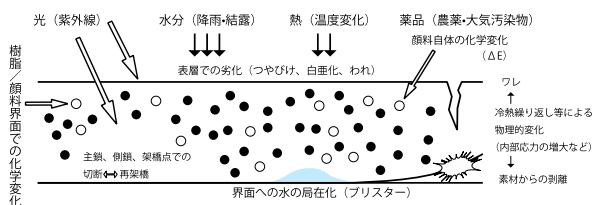


図-1 屋外暴露による塗膜劣化の概念図²⁾

屋外暴露による塗膜劣化は、図-1の概念図に示す外界からの影響による。塗膜は暴露中の紫外線、酸素、水分および熱の作用によりバインダー成分が酸化、重合あるいは分解し、また、溶剤や可塑剤が揮発あるいは溶失して硬く脆くなる。メカニズム的には、樹脂、顔料が紫外線の光エネルギーにより化学的結合が切断され分解劣化が進行する。また、水による加水分解および酸化などによる材料の変質により劣化が進行する。

さらに塗膜は、温度変化や乾湿繰り返しにより絶えず膨張と収縮を繰り返しており、硬脆化が進行した塗膜では、この際に発生する内部応力によって割れが発生する。

塗膜の構成成分の耐候劣化による塗膜外観の変化を模式的に図-2に示す。バインダーの樹脂自体が着色しやすく、経時や加熱硬化で変色する場合(図-2(a))や、有機系の着色顔料が耐候劣化によって吸収波長がシフトするなどして退色することで、塗膜構成成分の色相変化で塗膜自体が変色する場合(図-2(b))もある。また、いわゆるチョーキングによる白化として知られるような塗膜表面層の形状変化(荒れ)によって、塗膜の反射光が散乱し、塗装の色味が白化(変色)する場合(図-2(c))もある。

2.3 塗膜劣化と表面付着物

既往研究^{1), 2)}より、塗膜劣化は光エネルギーによる化学反応が引き金となって分解・消失するなど化学的作用によるものが主要因であることが確認できた。一方、母材腐食に影響を及ぼす付着塩分やぬれ時間を多くする塵埃などが、塗膜劣化に与える影響について論じられているものはない。本検討では、塗膜表面に塩化物イオンを付着させ、乾湿繰り返しによる塗膜劣化の促進実験を実施し、その影響を確認した。

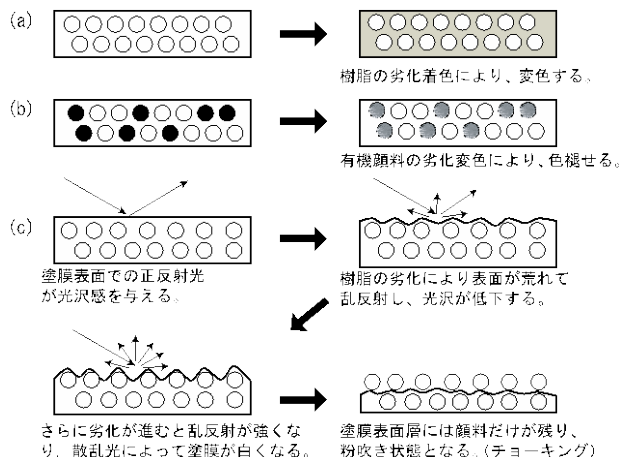


図-2 塗膜劣化の模式図³⁾

表-2 試験片の塗装仕様

区分	塗料		塗膜 (μm)				
	種類 (樹脂)	色調	仕様 -1	仕様 -2	仕様 -3	仕様 -4	
下塗り	1層目	エポキシ	アカサビ	50	50	-	-
		変性エポキシ	アカサビ	-	-	50	50
	2層目	エポキシ	グレー	50	50	-	-
		変性エポキシ	グレ	-	-	50	50
中塗り	塩化ゴム系	E19-80C 淡	35	35	17	-	
上塗り	塩化ゴム系	E19-80C	30	-	30	-	
試験片	材質		炭素鋼(SS400)				
	サイズ		70mm × 100mm t=4.5mm				
	素地調整		プラスト、ISO-Sa2 相当				

表-3 実験条件

工程	温度	相対湿度	時間
湿潤	50±1℃	95%以上	12hr
乾燥	60±1℃	20~30%	12hr

2.4 劣化促進実験

2.4.1 実験方法概要

対象とした塗装系は、既設鋼橋の維持管理を想定し、北海道の国道で実績が多い塩化ゴム系とし、表-2に示す試験片を作成した。

塗膜劣化の進行に着目した既往の検討では、塩化物が塗膜に与える影響に着目した例がなく、影響度を確認するための具体的な手法がないことから、複合サイクル試験等の既往腐食促進試験法を参考に実験を実施した。具体的には、JIS H 8502 で規定されている温度と相対湿度を参考に、表-3に示す促進試験条件を設定した。また、付着塩分が与える影響を検討するための条件は、遠藤ら⁴⁾の研究結果にある、塩害を受ける影響を付着塩分量で区分した評価基準を参考に付着塩分量を 500mg/m²と定め、さらに厳しい環境想定として 1,000mg/m²を設定した。表-4に全ケースを示す。

実験は、所定量の塩化物付着が得られるように、塩乾湿複合サイクル試験機により塩水噴霧を行ったのち、

表-4 実験ケースと数量

試験 ケース	塗装 仕様	塩化物イオン付着量 (mg/m ²)	試験片 枚数
1	仕様-1	0	1
2		500	1
3		1,000	1
4	仕様-2	0	3
5		500	3
6		1,000	3
7	仕様-3	500	3
8		1,000	3
9	仕様-4	500	3
10		1,000	3



写真-1 実験状況

恒温恒湿機にて乾湿繰り返し試験を実施した。実験中は、写真-1に示すように、付着塩分の流出が無いように塩化物付着面が上面となるよう配置した。

2.4.2 実験結果

実験前の試験片および初期の表面付着塩分量を変化させた塗装試験片の乾湿繰り返し試験の外観を表-5に示す。ここに示した結果は、塗料一般試験方法の長期耐久性試験と比較しても500時間ほど長い、約1,500時間後の結果である。本報告で対象とする塗装劣化(表面からの劣化)の評価に影響を与える試験片を確認するため発錆状況を観察した。

なお、エッジ部は塗装時に塗膜が薄くなり、欠陥が発生しやすいことが知られているため、本試験においてもエッジ部の腐食は、エッジ部の品質に起因したものと考え、これを評価しない。

ここには示していないが、促進720時間までは、どの試験片もエッジ部以外のさび発生は確認されず、また、促進約1,500時間においても表-5に示すように一部のケースを除き、塗膜の剥がれという現象は確認出来なかった。促進864時間において、仕様-4のケース10の3枚のうち1枚で、エッジ部以外に点さびが発生した。そのケースでは、促進約1,500時間までに表-5に示すように、さび発生箇所が増大、拡大している。また、同一ケースの残りの2枚は、写真-2にあるよう

表-5 実験結果一覧 (約1,500時間経過後)

上塗 中塗
塩化イオン

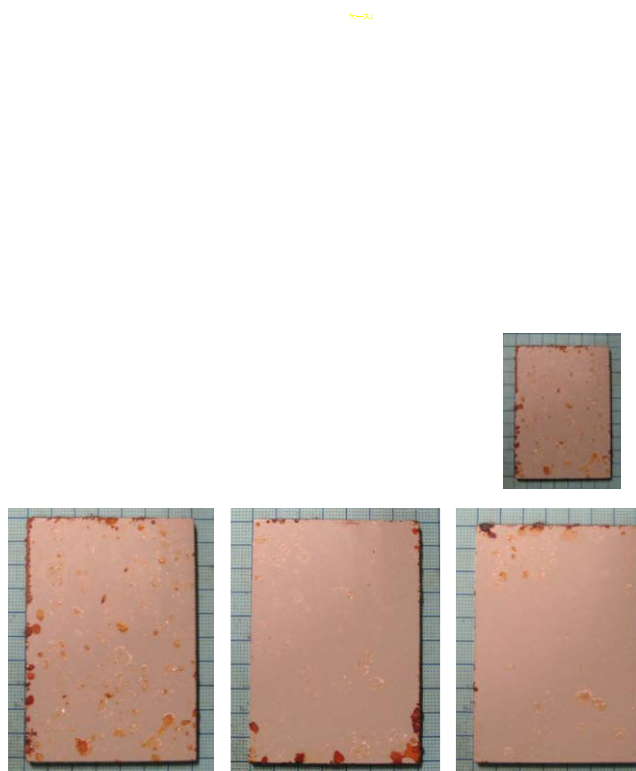
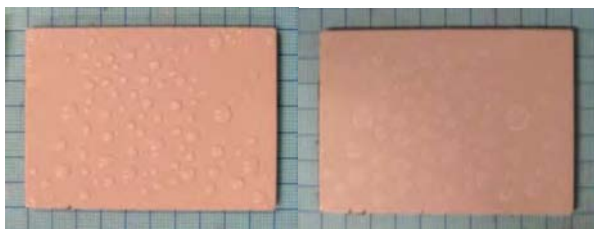


写真-2 ケース10の表面状態

に促進約1,500時間において、エッジ部以外のさび発生が認められた。しかしながら、ケース10での点さびの発生状況は、試験片によって程度が大きく異なっており、ピンホールなどにより局所的な腐食進行と考えられることから、全ケースを塗膜劣化評価の対象とする。なお、試験片は、精製水で表面洗浄を行ってから各種測定を実施した。

まず、目視による状況を示す。塩分を付着させた試験片では、写真-3(a)に示すように、湿潤サイクル直後においては塩の潮解作用により表面に水滴が発生し、写真-3(b)に示す、乾燥サイクル後には水滴の跡が明瞭に残存した。この水滴跡は写真-4に示すように、周辺と比較して表面が荒れた状態となっている。

次に、塗装表面の平滑性を評価する指標として用いられている60°で照射させた光の反射割合(%) (光沢度測定)と設定した基準色(ここでは白色)からの差(色差測定)を測定した。その結果を図-3および図-4に示す。同一仕様のケース間での相対比較によって、



(a) 湿潤サイクル後 (b) 乾燥サイクル後
写真-3 食塩付着試験片の外観



写真-4 塩付着試験片の表面凹凸

試験片表面の変化を確認する。

図-3 から、光沢度は塩を付着させることにより明らかに低下していることが確認できる。また、付着塩の量が多いほど低下する傾向が見られる。しかし、図-4 に示すように、色差測定では付着塩の有無や量による比較色（白色）との差は認められない。したがって、この光沢の低下は、塗料の分解劣化によるものではなく、写真-4 に示す表面の平滑性の低下によるものと考えられる。

塩の潮解作用により表面に水滴が発生した箇所で確認できる平滑性の低下した箇所（変状部）および表面が平滑な部分（不変部）について赤外吸収スペクトルを反射法（ATR 法）で測定した。そのスペクトル結果を図-5 に示す。不変部、変状部ともに C-Cl（炭素と塩素の結合部）伸縮振動に起因すると思われる約 600cm⁻¹ のスペクトル吸収以外、明瞭なスペクトルは得られず、その差スペクトルでは吸収が確認出来ないことから、不変部と変状部の樹脂組成に大きな差はなく、変状部の劣化はないものと考えられる。

3. 耐候性鋼材の外観評価法の提案

3. 1 現況調査概要

昨年度までに妥当性を評価した健全度評価基準暫定案（表-6）を用いて、環境や雰囲気異なる橋梁を対象として外観目視調査を行った。

表-6 に示す目視評価基準暫定案による外観目視評価基準暫定案は、やや複雑な表となっており、耐候性鋼、特に表面処理を施した耐候性鋼に関する専門家でない一般の点検者にとって必ずしも分かり易いものと

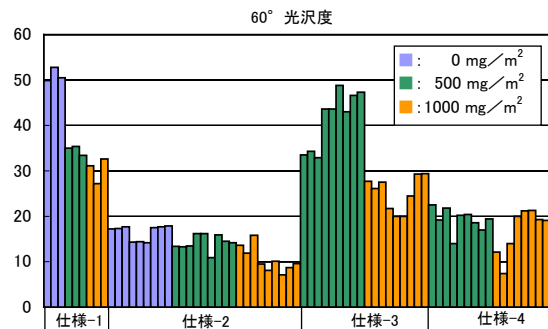


図-3 試験片（約 1,500 時間後）の光沢度測定結果

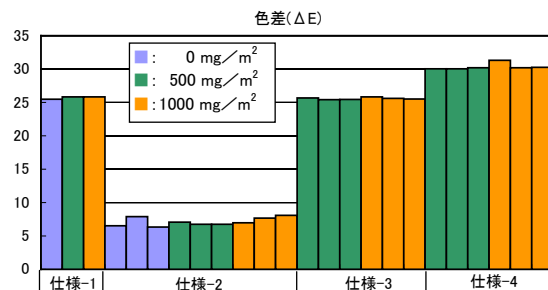
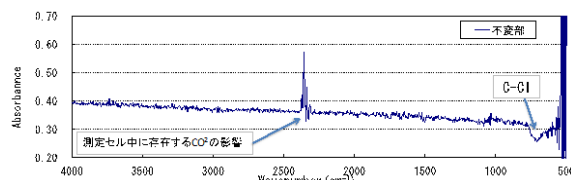
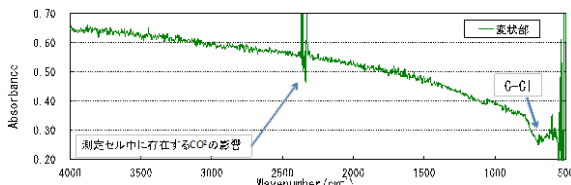


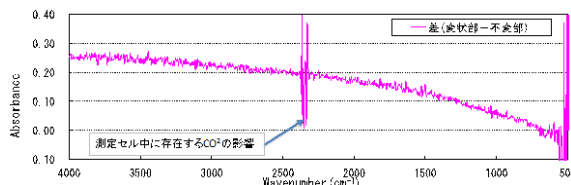
図-4 試験片（約 1,500 時間後）の色差測定結果



(a) 不変部



(b) 変状部



(c) 変状部と不変部の差

図-5 塩付着試験片の赤外吸収スペクトル

は言えない。そこで、より判断し易い基準に修正することを目的として、経過年数（6～37 年）や離岸距離（1～65km）が異なる安定化処理耐候性鋼橋梁（12 橋）の調査を行った。

耐候性鋼橋の腐食発生過程を考慮した点検評価項目を設定することに着目し、健全度評価基準暫定案の改訂について検討した。

表-6 健全度評価基準暫定案⁶⁾

さび・被膜の外観 (例)			処理被膜部のさび状況 (% : 1m ² 程度範囲のさび面積率)			さび厚 ^{2,3} (μm)
			被膜にさびが見られない。または、被膜の下や中に僅かなさびが見られる。	x	y	
被膜の外観	正常	A あきらかな変・退色なし	A			
		B あきらかな変・退色あり	B			
さび部の外観	正常	5 腐食が進まず、薄いさび	5-x	5-y	5-z	<400
		4 微細で外観平均粒径 1mm 程度の均一なさび	4-x	4-y	4-z	<600
		3 微細で外観平均粒径が 5mm 程度のさび	3-x	3-y	3-z	
	要観察	2 外観粒径 5~25mm 程度のうごさび	2-x	2-y	2-z	<1000
		2 外観直径 25mm 程度以下の小さなこぶ状さび ¹	2-x (b)	2-y (b)	2-z (b)	
	異常	1 層状さび	1-x	1-y	1-z	>1000
1 外観直径 25mm 程度を超える大きなこぶ状さび ¹		1-x (b)	1-y (b)	1-z (b)		

注)

- (b)はこぶ状さび(bumpy rust)であることを示す
- さび厚は目安としての参考値である。
- 被膜の残留も考慮して、表面処理無しの場合に 200 μm を加算した。
- 正常の判定は、さび発生後の経過期間が 9 年以上であることを前提とする。

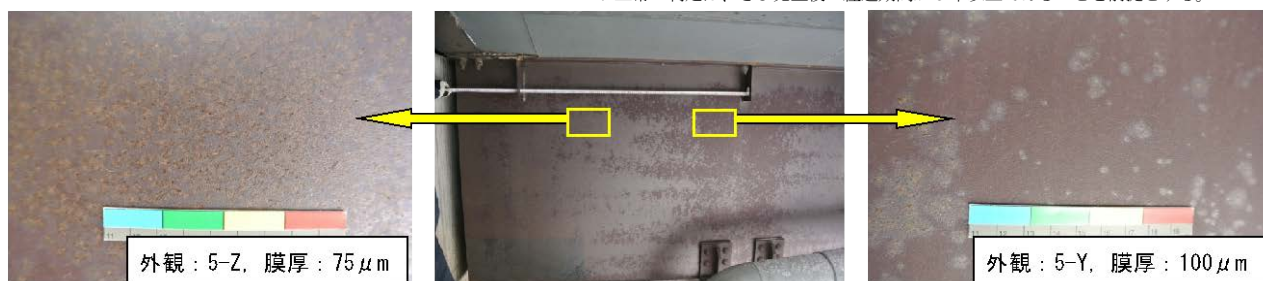


図-6 さびむら個所の外観と膜厚 (経過 20 年)



図-7 こぶ状さび
(経過 28 年, 離岸 5km)



図-8 円錐形のさび
(経過 37 年, 離岸 1km)

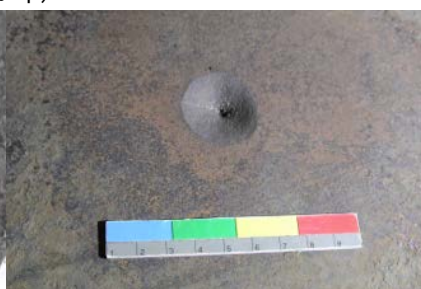


図-9 円錐形さび下の減肉状況

3. 2 さびむら (さび面積率) の評価

安定化処理された耐候性鋼橋梁では、初期は被膜で覆われているため腐食はほとんど進行しない。経年と共に被膜下で腐食が徐々に進行し、被膜表面にさびが出現するようになる。この際、さびは均一に発生するのではなく必ず「むら」がある。この「むら」の原因としては被膜厚さのばらつき、被膜欠陥の存在、局所環境の違いなど複数の要因が想定できる。

本調査で確認された「さびむら」の一例を図-6 (中央) に示す。被膜下からのさびが発生している個所 (図-6 左) のほうが、近傍の発生していない個所 (図-6 右) よりも膜厚 (さび厚) が薄いという結果となって

いる。これは、初期の膜厚が薄い個所は厚い個所に比べて腐食進行が速いため、早期にさびが目立つようになったものと考えられる。このような施工時のむらに起因した「さびむら」は他にも多数確認された。

飛来塩分環境が厳しいと思われる橋梁の内桁では、こぶ状に盛り上がったさびの発生が認められた (図-7)。腐食部の周辺は健全な被膜が残存しており、被膜の存在がマクロセルを形成したものと思われる。

非常に稀な事例であるが、直径 30mm 程度の円錐形のこぶ状さび (図-8) が認められた。さびを除去すると図-4 に示すように減肉状況もきれいな円錐形であり、何らかの理由で腐食起点が形成され、顕著なマクロセル腐食が進行したものと推定される。

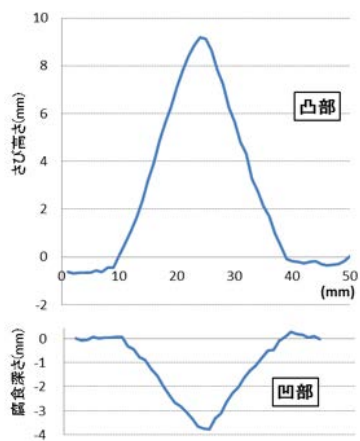


図-10 円錐形さびの断面形状

この円錐形さびの3次元形状をセイコーウェーブ製3D Toolbox (eVox-LCG) を用いて測定した。断面形状を図-5に示す。こぶ状さびの高さ約9mmに対し腐食深さは約4mmと、佐藤らの報告⁷⁾に比べて非常に大きな減肉であった。これは、こぶの形状の違いによるものと思われ、図-7に示すような、いびつなこぶ状さびの場合の減肉状況を確認することが必要である。

3. 2. 2 損傷ランクに関する検討

施工時に被膜厚さを完全に一定にすることは不可能であり、安定化処理における「さびむら」は、程度の差はあるが必ず発生する事象であることから、腐食速度という観点からの健全性評価においては、表-6のさび発生面積率(さびむら)は考慮する必要はないと言える。安定化処理の場合も裸仕様の場合と同じ考え方で、発生しているさびの形状から健全性を評価するのが適切と思われる。

こぶ状さびは安定化処理特有のものであり、評価基準に記載しておくことが必須であるが、現行(表-6)では直径25mmで区分して評価している。しかし、直径と腐食減肉との関係は明確とはなっておらず、直径での区分が適切とは言い難い。また、こぶ状さびの周囲は全く減肉しておらず、耐荷力をどのように評価するか課題があり、層状さびのように直ちに問題ありとは言えない。従って、こぶ状さびは径に関係なく要観察(評点2)と位置付け、こぶの形状や腐食深さを記録したうえで経過観察、状況に応じて詳細検討を行うのが良いと思われる。

4. まとめ

4.1 洗浄工に求められる機能の検討

表-7 修正評価基準(案)

評価項目	区分	特徴	評価
被膜の状態 (さびむらの状態)	X	さび発生は全くない、あるいは、ほとんどなく、被膜がほぼ残存(97%以上)している状態	-
	Y	さび発生が認められが、それほど顕著ではなく、被膜の大部分(70%以上)は残存している状態	
	Z	被膜下からのさび発生が顕著に認められ、さびむらが著しい状態	
さびの状態	5	さび粒子は非常に細かく(1mm未満)均一な状態	問題なし
	4	さび粒子は細かい(1mm程度)。斑点状に発生する場合もある。	
	3	さび粒子はやや大きい(5mm未満程度)。斑点状に発生する場合もある。	
	2	大きなうご状のさび(5mm以上)が形成されている。この状態であれば、被膜はほとんど残存していない。	要観察
	2d	こぶ状のさびが形成されている。	
	1	複数の層からなる厚いさびが形成されている。被膜は消失している。	

本技術資料では、塗装鋼橋の塗装劣化について、主要因に関する調査とともに、塗膜に求められる防食機能の劣化・損傷について、表面付着塩分が劣化に与える影響に関する室内試験を行い、以下の結果を得た。

・塗膜劣化は、割れや剥がれといった現象により確認される可とう性の低下、変退色、光沢低下やチョーキングという現象で確認される表面からの劣化に区分され、いずれの区分でも紫外線、酸素、水分等に反応した化学的作用によるものが主要因である。

・塩化物イオンの影響による塗膜そのものの劣化促進については確認されなかった。

・塗膜の劣化促進に対して表面付着塩分が与える影響度は小さい。

鋼橋の延命化対策には、防食機能の保全があげられる。特に塗装の劣化・損傷を抑制する対策として、付着塩分を除去しても高い効果を得ることは難しいという結果となった。ただし、塗装損傷箇所に着着する塩分は、母材腐食の促進要因となり、塗装損傷の拡大を抑制するには、付着塩分の除去は必要である。塗装損傷は、箇所および部材が限定的である⁵⁾ことから、局所的な防食機能の低下を抑制することが、鋼橋の延命化対策になると考えられる。今後は、劣化損傷を抑制するための効果的な対策工として、腐食環境改善を目的とした桁端部における洗浄技術の活用を検討する予定である。

4. 2 耐候性鋼材の外観評価法の提案

目視評価基準暫定案による外観目視評価基準暫定案は、やや複雑な表となっており、耐候性鋼、特に表面処理を施した耐候性鋼に関する専門家でない一般の点検者にとって必ずしも分かり易いものとは言えない

ことから、改訂のための現地調査等を行ってきた。本年度は、より判断し易い基準に修正することを目的として、経過年数（6～37年）や離岸距離（1～65km）が異なる安定化処理耐候性鋼橋梁（12橋）の調査を行った。その結果、さびむらの評価やこぶ状さびの評価に着目し、整理を行って表-7に示す改訂案を整理した。

今後は、現地調査を継続し事例収集を行って、その改訂案の評価を行うとともに、成果が広く活用されるように、評価基準に合わせた対策手法のとりまとめを実施する。

参考文献

- 1) 矢部政実, 田桐澤根, 岡本好広: 各種耐候性試験による塗膜の劣化メカニズムの解析, 塗料の研究, No. 146, 2006.
- 2) 松田健: 塗膜の耐候性評価, ウェザリング技術研究成果発表会テキスト(平成24年11月), PP. 55-65, 2012.
- 3) 赤堀雅彦: 塗料の変色防止、劣化メカニズムと耐候性試験, 塗装工学, Vol. 42, No. 9, PP. 286-294, 2007.
- 4) 遠藤雅司, 小山田佳夫, 木村陽子: 鋼道路橋の凍結抑制剤散布による付着塩分量について, 平成25年度東北地方整備局管内業務発表会 (<http://www.thr.mlit.go.jp>), 2013. (平成26年3月26日閲覧)
- 5) 玉越隆史, 中洲啓太, 石尾真理, 武田達也, 水津紀陽: 鋼道路橋の局部腐食に関する調査研究, 国土技術政策総合研究所資料, No. 294, 2006.
- 6) (独)北海道開発土木研究所, 他: 無塗装耐候性鋼橋梁の劣化判定基準法に関する研究報告書, H16.3
- 7) 佐藤ら: さび安定化補助処理が施された耐候性鋼橋梁の外観評価と腐食実態, 土木技術資料, 53-7(2011)

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY OF LIFE PROLONGATION OF STEEL BRIDGE IN COLD, SNOWY REGIONS

Budget : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2011-2014

Research Team : Structure Research Team,
Cold Region Technology Promotion Division

Author : NISHI Hiroaki, KONNO Hisashi
MITAMURA Hiroshi, SATO Takashi
SAWAMATSU Toshikazu
YOKOYAMA Hiroyuki, NAOHISA
Nakamura, NAMIO Takadama, SYUJI
Miyamoto

Abstract: In steel members of existing steel bridges, corrosion damage and fatigue crack have been discovered, and it is thought that environmental action; chloride ion attack due to airborne salt in seashore regions and antifreeze in snowy, cold regions, causes the reduction of load carrying capacity and durability. However, appearance evaluation method such as prolongation method of life coating film to prevent corrosion of steel members and stabilizing treatment of weathering steel has not been studied. Also, the countermeasure technique against environmental actions has not been proposed. Therefore, this research examines the following 3 matters, each aims to prolong life of steel bridges under snowy, cold regions as ultimate objective.

Key words: steel bridge, prolongation of life technology, coating deterioration, weathering steel, fatigue crack, fatigue crack growth brake