

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き裂が顕在化し、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、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、塗膜劣化は化学的要因が主であるため表面付着物等の除去による延命化効果が高くなく、腐食抑制を目的とした対策が合理的であるとして桁洗浄機を開発し、その効果を検証した。また、現在提案している表面処理が施された耐候性鋼の目視評価基準を現況評価により合理的な評価基準へと改定し、事例を付属した点検マニュアルを作成した。さらに、鋼床版のデッキプレートに生じる疲労き裂の抑止対策として、ペースト状材料の塗布による進展遅延効果を確認し、有効性を実証した。

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縮減と品質を確保するには、その地域の条件にあった管理を行い、構造物の性能水準を維持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。

既設鋼橋の鋼部材の腐食損傷や疲労き裂が顕在化し、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、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. 鋼部材塗膜の延命化技術の開発

鋼部材にみられる腐食は酸化還元反応による進行性の劣化現象であり、長期に渡り徐々に性能を低下させる主要因である。これを防止または抑制するためには防錆防食対策が必要である。この対策工として塗装が一般的であるが、経年による塗膜の劣化も避けることのできない課題である。鋼部材の延命化に対して、塗装劣化の抑制または遅延が直結すると考えられることから、塗膜劣化の要因除去に関する技術について検討を行った。

2.1 鋼橋の劣化

2.1.1 塗装（塗膜）劣化のプロセス

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脆化。その結果として温湿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

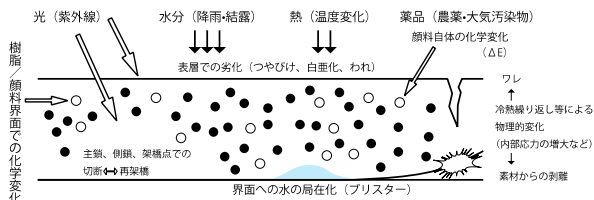


図-1 屋外暴露による塗膜劣化の概念図²⁾

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。

2.1.2 劣化促進と表面付着物

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。

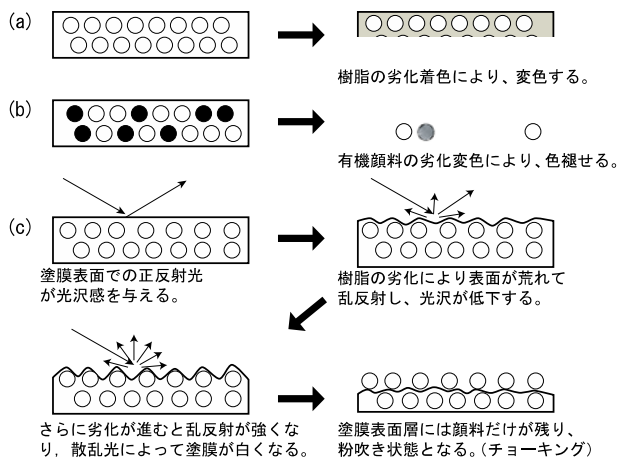


図-2 塗膜劣化の模式図³⁾

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	グレー	-	-	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 促進試験条件

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

(1) 劣化促進実験概要

対象とした塗装系は、既設鋼橋の維持管理を想定し、北海道の国道橋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。

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		500	3
10	仕様-4	1,000	3



写真-1 実験状況

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、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) 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後の試験片の外観を表-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。塗装劣化（表面からの劣化）の評価の対象とする試験片を抽出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、エッジ部の施工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できなかった。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

表-5 実験結果一覧（約1,500時間経過後）

塗料仕様	上塗り塩化コウム	中塗り塩化コウム	エポキシ	下塗り水性	実験前	塩化物イオン付着量(mg/m ²)		
						0	500	1000
1	30 μm	35 μm	100 μm	-				
2	-	35 μm	100 μm	-				
3	30 μm	17 μm	-	100 μm				
4	-	-	-	100 μm				

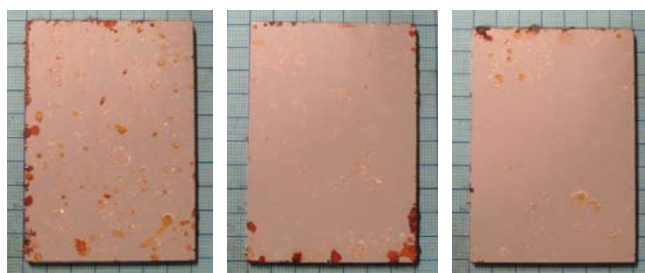
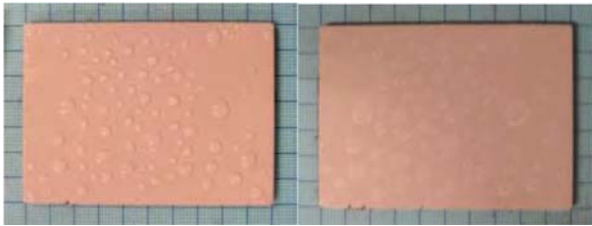


写真-2 ケース10の表面状態（1,500時間経過後）

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る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、精製水で試験片の表面洗浄を行ってから各種測定を実施した。

まず、目視による外観調査を行った。塩分を付着させた試験片の外観を写真-3に示す。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、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。



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



写真-4 塩付着試験片の表面凹凸

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) と設定した基準色 (ここでは白色) からの差 (色差) 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、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。

表面の平滑性の低下した箇所 (変状部) および平滑な部分 (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。その結果を図-5 に示す。不変部、変状部ともに C-C1 (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できないことから、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。

2.2 鋼橋劣化損傷の現況

鋼橋の劣化損傷に関して整理された国総研資料第 294 号 (平成 18 年 1 月) 『鋼道路橋の局部腐食に関する調査研究』⁵⁾ の中で、「支間中央よりも支点部で腐食が卓越する傾向がある」という報告がある。この資料は直轄国道 (300 橋弱) の点検データをまとめた貴重

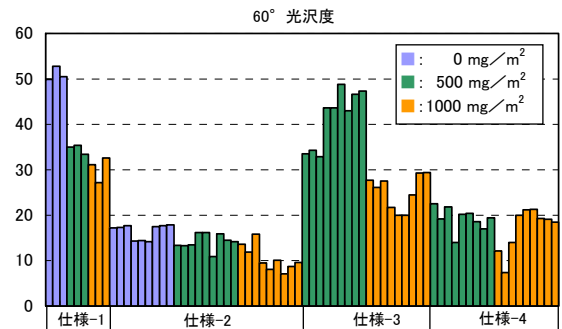


図-3 試験片 (約 1,500 時間後) の光沢度測定結果

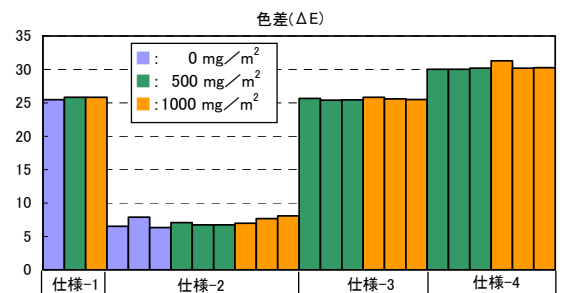
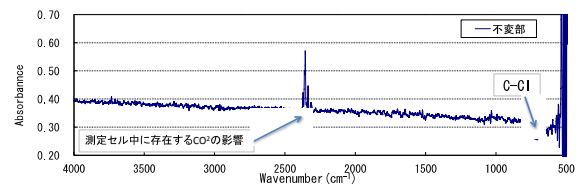
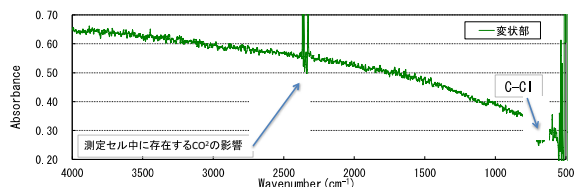


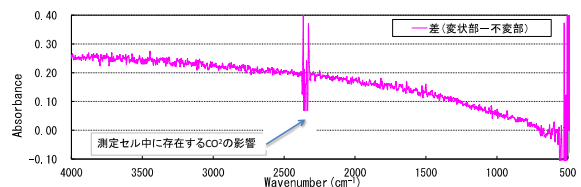
図-4 試験片 (約 1,500 時間後) の色差測定結果



(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

な結果であるが、北海道のような特殊な気候における特徴的な劣化損傷の有無について明確化することも重要である。そこで、北海道開発局管内の橋梁点検結果を用いて、北海道内の鋼橋の腐食状況について分析を

表-6 対象とした鋼橋の条件と部材種別

項目	条件
鋼橋の条件	1 コンクリート橋を含まないこと
	2 特殊な構造形式でないこと
	3 耐候性鋼ではなく塗装鋼であること
	4 歩道でないこと
部材種別	主桁、縦桁、横構、支承本体、伸縮装置

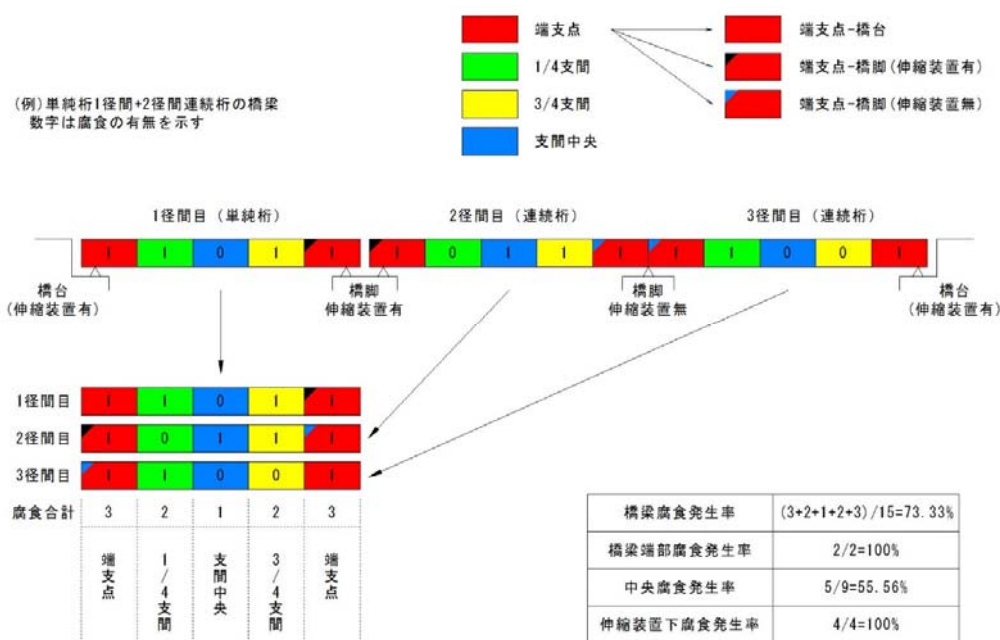


図-6 部材の分割と腐食の集計方法

行い、国総研データとの比較検討を行った。また、気象条件（腐食環境）の影響についても検討した。

2.2.1 分析調査概要

橋梁内の位置により雰囲気が異なり、劣化進行に違いがある。ここでは、国総研資料のとりまとめに合わせて、橋軸方向に1径間を「端支点、1/4支間、支間中央、3/4支間、端支点」の5区分に分割した。また、橋軸直角方向には「中桁・外桁」の2つに分類した。さらに、端支点が橋台または橋脚であるか、伸縮装置の有無にも着目した。

図-6 に部材の分割と集計方法を模式図で表す。図では中桁と外桁の区分については省略している。本調査で用いている各発生率は、以下の通りである。

- 腐食発生率=ある分割の全体の分割数に対する腐食の損傷がある分割の割合
- 橋梁腐食発生率=全体の腐食発生率
- 橋梁端部腐食発生率=橋台の腐食発生率
- 中央腐食発生率=1/4支間、支間中央、3/4支間の

腐食発生率

- 伸縮装置下腐食発生率=橋台と橋脚（伸縮装置有）の腐食発生率

分析対象とした橋梁は、北海道開発局が管理する橋梁のうち、平成18年度から25年度の定期点検を行った鋼橋である。なお、対象条件を表-6に示す。

2.2.2 腐食発生状況

(1) 腐食発生箇所の特徴

橋梁の1径間を5区分に分割した場合の、各区分における腐食発生率を図-7に示す。また、各橋梁での腐食発生形態を4つに区分して集約した結果を図-8に示す。

以下にその特徴を示す。

- 中桁に比べ、やや外桁の腐食が多いが、顕著な差とは言えない。
- 支間に比べ支点部での腐食発生が明らかに多い。
- 支間部のみ腐食している橋梁は極めて少なく全体の2%程度しかない。

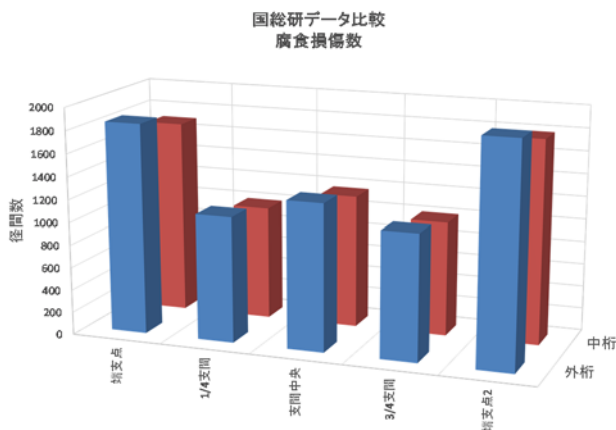


図-7 各区間における区分別腐食損傷度

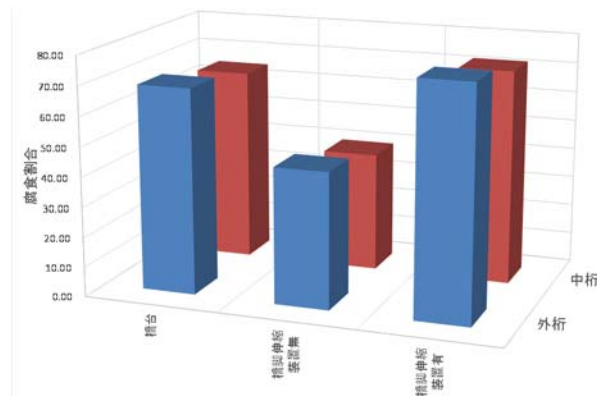


図-9 端支点の分類と腐食割合

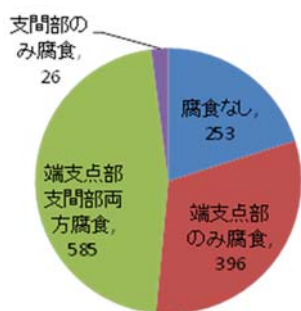


図-8 腐食発生形態別橋梁比率

- 支間部に腐食が発生している橋梁では基本的に端部も腐食している。すなわち、橋梁全体で腐食が発生していると言える。

これらの傾向は、国総研の報告データと一致しており、地域差のない鋼橋全体の特徴と判断できる。

(2) 端支点の分類と腐食発生率

端支点は橋台と橋脚に分類できる。また、橋脚は伸縮装置の有無で分類できる。この端支点を分類した箇所における腐食割合を図-9に示す。

伸縮装置無しの橋脚に比べ、伸縮装置有りの橋脚および橋台の腐食割合が高いことがわかる。これは伸縮装置の付近では腐食が進行しやすいことを意味しており、漏水の影響を受けているものと考えられる。

(3) 地域による影響

ここでは図を示していないが、端支点部のみ腐食は内陸部に多く、端支点部支間部両方が腐食している橋梁は海岸線近くに多いという傾向が見られる。海岸近くは飛来塩分の影響により、橋梁全体で腐食が顕在化しやすいと考えられるのに対し、内陸部では風通しの良い支間部の腐食は進行せず、湿潤環境となりやすい端支点部のみ腐食が顕在化する傾向にあるものと推定される。

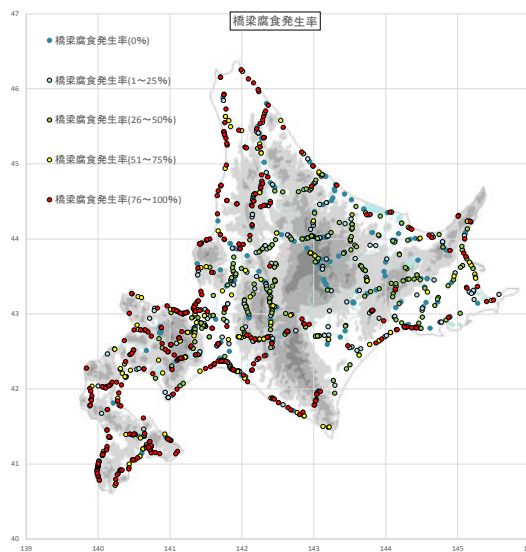


図-10 橋梁腐食発生率別分布

さらに橋梁別に雰囲気影響を確認するため、腐食発生率で区分し、地図上にプロットしたものを図-10に示す。橋梁腐食発生率が低い橋梁は内陸と道東に多いのに対し、橋梁腐食発生率が高い橋梁は沿岸部に多いことがわかる。

橋梁の支間部は海岸等の地域的環境に影響されやすいが、橋梁端支点部は環境に依らず腐食が進行するといえる。

2.3 鋼橋の延命化の対策手法

塗装橋では、塗装の劣化進行にともない防食機能が低下し母材の腐食が進行する。前述のように塗装劣化は、外的エネルギーが主要因であり、表面付着物の関わりは小さいため、それらを除去することによる塗装の延命化は難しい。しかしながら、腐食進行の抑制をすることで鋼橋の延命化は期待できる。橋梁点検において、支間部は海岸等の地域的環境に影響されやすいが、橋梁端部は環境に依らず腐食が進行する傾向が確

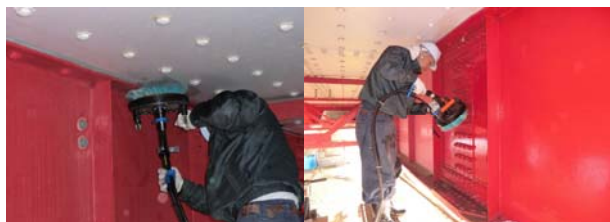


写真-5 モデル橋梁に対する洗浄
(左；上フランジ部、右；添接板部)

認できたことを参考に、腐食制御を目的とした対策工について検討を行った。

2.3.1 腐食制御の考え方

鋼表面を保護するだけが防食ではなく、期待した環境を維持することが防食の基本と言える。また、橋梁では全体的な防食性能低下よりも局所的な性能低下が支配的であり、低下をもたらした要因を解明し、除去することが最も重要である。

これまでの防食の考え方は、腐食させないための方策を講じるものであった。しかし、鋼橋への要求性能は耐力を維持することであり、腐食速度ゼロでなくても、期待耐用年数後に許容される板厚が担保できれば良い。適切な腐食速度に制御（抑制）する「腐食制御（制食）」という考え方に基づくことで、限られた予算に対する最適な維持管理が可能になるものと考えられる。

腐食制御（抑制）方法としては以下のようなものが考えられる。ただし、ここで挙げた方法は、実用化されているものだけではなく、現時点では研究段階のものも含まれている。

- a) 腐食（促進）要因の排除（積極的な腐食抑制）
 - ・漏水防止対策
 - ・飛来塩分の鉸桁間への吹き込み防止
- b) 環境改善による腐食速度の抑制（間接的な腐食抑制）
 - ・構造的な配慮による濡れ時間抑制
 - ・送風など強制的な濡れ時間の抑制
 - ・定期的な清掃による腐食速度の抑制
- c) 被覆等による腐食速度の抑制（鋼に対する直接的な腐食抑制）
 - ・腐食抑制剤の塗布による速度抑制
 - ・定期的な洗浄による腐食速度促進因子の低減

2.3.2 定期的な桁洗浄による腐食抑制

前述のように、鋼橋での防食性能の低下は、局所的に進行する事例が圧倒的に多い。特に桁端部に多く発生している。桁端部では漏水や土砂堆積などの影響に

表-7 塩分測定（比較基準値）

対象橋梁	A 橋	B 橋
計測パネル番号	No. 1	No. 2
洗浄状況	手洗い洗浄後	手洗い洗浄後
付着塩分量 (mg/m ²)	①	77.8
	②	94.6
試験 No.	③	58.1

表-8 塩分測定（機械洗浄）

対象橋梁	A 橋		B 橋	
計測パネル番号	No. 2		No. 2	
洗浄状況	機械 洗浄前	機械 洗浄後	機械 洗浄前	機械 洗浄後
付着塩分量 (mg/m ²)	①	481.0	286.0	37.1
	②	770.0	474.0	46.9
試験 No.	③	749.0	657.0	49.3

より湿潤環境に陥りやすいことが起因している。これらへの対策工には、バリア機能の高い上塗り材を追加し高機能とする以外には、環境改善対策に関する手法が考えられる。その中で、桁洗浄について着目した。

桁洗浄は堆積物を除去することにより、堆積物中の塩分が除去されるだけでなく、桁の濡れ時間が低減され、腐食速度の低減が期待できる。

鋼表面に付着した粉塵や腐食生成物を除去することで、粉塵等の付着物質中に存在する腐食促進因子（塩分等）の桁への付着量が減少し、腐食速度が減少する。また、付着物そのものが除去されることにより濡れ時間が減少し、結果として腐食速度の低減が期待できる。塗装橋では、局所的に発生した腐食の進行速度が洗浄により抑制されることで、塗り替え周期の延伸が期待できる。

塗膜の劣化メカニズムから見ると、劣化をもたらす要因は熱、光、応力などであり、これら外的エネルギーを受けて割れの発生や、分解により表面から消失する。腐食促進物質として広く知られている塩分は、塗膜劣化に対しては直接的に作用するものではない。すなわち、塗装橋に対する洗浄は、塗膜の劣化を抑制するためのものではなく、塗膜劣化に伴い発生している腐食の進行速度を抑制するためのものである。

(1) 室内および実橋による洗浄工検討と検証

桁洗浄による環境改善では、表面や影響が想定される周囲より塵埃、塩分等の堆積物を除去することを主たる目的とする。ここでは、プロトタイプ洗浄機を製作し、その作業性と洗浄効果に関する確認として、写真-5 に示すようなモデル橋梁による洗浄作業を実施した。

表-9 計測対象と計測機器

計測器	計測項目	備考
表面塩分計	塗膜表面に付着した塩分量	直接的に目的物を計測
光沢計	塗膜光沢度	間接的に表面の回復度を計測
色彩色差計	塗膜表面色	間接的に表面の回復度を計測



写真-6 各種計測状況
(左から、表面塩分計、光沢計、色彩色差計)

表-10 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} (μ m)	
			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		z
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 程度のうろこ状さび	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、表面処理無しの目安に 200 μ m 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。

その結果として、補剛材やボルトといった突起物のある面に対しては、狭隘部専用のヘッドを用いることで作業が実施できたが、突起物の出現によるヘッド交換回数の増加より、作業効率が低下することが確認できた。洗浄効果について、表面付着塩分量を代表ケースとして表-7、-8 に結果を示す。スチームを利用して洗浄するプロトタイプの洗浄機で洗浄したケースと手洗いを比較して、洗浄機による塩分除去効果が同等または高いことが確認できた。また、同様に光沢度も洗浄液や電解質溶液を利用して手洗いしたものと洗浄機で実施したものが同程度の値となり、表面付着物が除去されて、光沢が回復した結果となり、スチームと回転ヘッドを利用した橋梁洗浄機の洗浄効果を確認することができた。

(2) 洗浄効果原位置評価法の検討

洗浄効果の確認を行う原位置評価について検討を行った。鋼部材の劣化損傷を遅延化する技術は、要因を表面から除去することにある。このため、表面付着物の直接的測定法や間接的測定法が考えられる。

ここで着目したものは、塩化物イオンの影響を排除した物理的量を測定する方法と塗装の色や光沢の回復

表-11 調査部材と試験項目一覧

橋梁名		A 橋		B 橋
調査部位		A1~P1 間	P1 上	P1~P2 間
		G3 桁ウェブ (G2 桁側)	G2 桁ウェブ (G1 桁側)	G3 桁ウェブ (G2 桁側)
	表面処理	ウェザーコート	ウェザーアクト	ウェザーコート
コア試験	断面観察	コア断面の光学顕微鏡、および、偏光顕微鏡観察		
さび分析	含有塩分量	採取したさびに含まれる可溶性成分分析		
	X線回折分析	さびを構成している化合物の定性、定量分析		

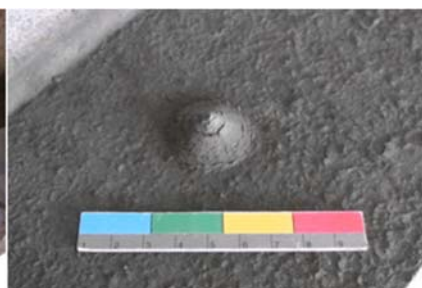
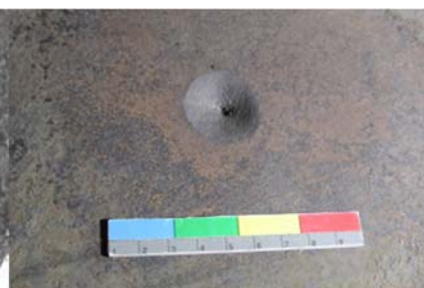
度を測定する方法であり、試験測定を実施し、その作業性を確認した。

計測機器と計測目的物の対応を表-9 に示す。また、対象機器による計測状況について写真-6 に示す。

表面塩分計を用いて直接的に計測する手法以外の 2 つは間接的に除去効果を計測する手法である。間接的手法では、初期値の保存管理、または、現況状況基準値の設定が必要となり、その値との差分により塗装表面の洗浄効果を確認することとなるため、結果を確認するまでの時間に差はある。しかし、ここで用いた計測方法は、洗浄後の効果確認に要する時間は少なく、機器の大きさも片手で操作できる程度であることから、いずれの計測方法も施工管理に有効なものといえる。



図-11 さびむら個所の外観と膜厚（経過 20 年）

図-12 こぶ状さび
（経過 28 年, 離岸 5km）図-13 円錐形のさび
（経過 37 年, 離岸 1km）図-14 円錐形さび下の減肉状況
（経過 37 年, 離岸 1km）

3. 耐候性鋼材の外観評価法の提案

耐候性鋼は、一般鋼に比べ進行速度の遅い錆層が形成されるため表面に防食機能を追加することなく長期間放置して使用できるということから、維持補修に対する経済性の観点で大きな利点がある。このため酸化還元反応を助長するような雰囲気以外においては、適用される例が多いと思われる。ただし、腐食初期においては普通鋼と同様な腐食が進行し、流出したさび汁により美観を損ねる場合があることから、その対策として表面処理(さび安定化補助処理、以下、安定化処理)が行われることも多い。

安定化処理を施した耐候性鋼の健全性を目視評価するには、化成処理に関する知識などが必要であり、特に進行速度の速い腐食の発生などの判断をすることは専門家でも困難な事例があるとされている。このことを受け、平成 14 年度から平成 16 年度までの 3 年間で、日本橋梁建設協会と日本鉄鋼連盟、北海道開発土木研究所（現、寒地土木研究所）の 3 者で行った共同研究において無塗装耐候性鋼橋の劣化判定基準⁶⁾を作成した。表-10 に示すように評価基準は、精度向上のためのデータの収集も含んでいたことから現地評価に対しては複雑なものになっていた。そこで、合理的に精度良く評価するための基準を目指し、評価基準の見直しを実施した。

3. 1 現況調査概要

表-10 に示す健全度評価基準暫定案の妥当性評価を

行うことを目的に実橋梁調査を実施した。調査は、環境や雰囲気の異なる橋梁を対象として外観目視調査を行うとともに、目視評価の精度確認のためサビおよび被膜厚測定、外観写真撮影、コアサンプル採取を実施した。調査部材と試験項目一覧を表-11 に示す。

さらに、表-10 の健全度評価基準暫定案を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 ~ 65 km) が異なる安定化処理耐候性鋼橋梁 (12 橋) の調査も行った。改訂検討にあたっては、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た。

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-11 (中央) に示す。被膜下からのさびが発生している個所 (図-11 左) のほうが、近傍の発生していない個所 (図-11 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

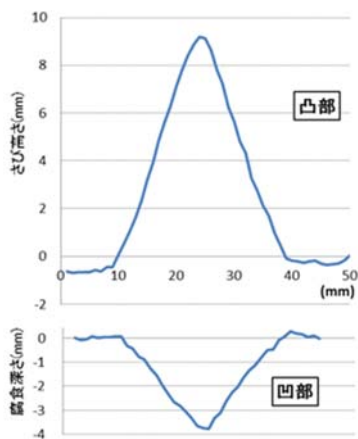


図-15 円錐形さびの断面形状

表-13 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	大きなうろこ状のさび（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。	

起因するものと考えられる「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-12）。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-13）が認められた。さびを除去すると図-14 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。

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-15 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-12 に示す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一定にすることは非常に困難であり、安定化処理における「さびむら」は、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-10 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、現行基準（表-10）において直径 25mm で区分して評価していること

は、直径と腐食減肉との関係が明確ではないなど、維持管理に対する健全度評価基準として適切な設定とは言い難い。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。

提案する修正評価基準（案）を表-13 に示す。

4. 疲労き裂進展抑制による鋼部材の延命化

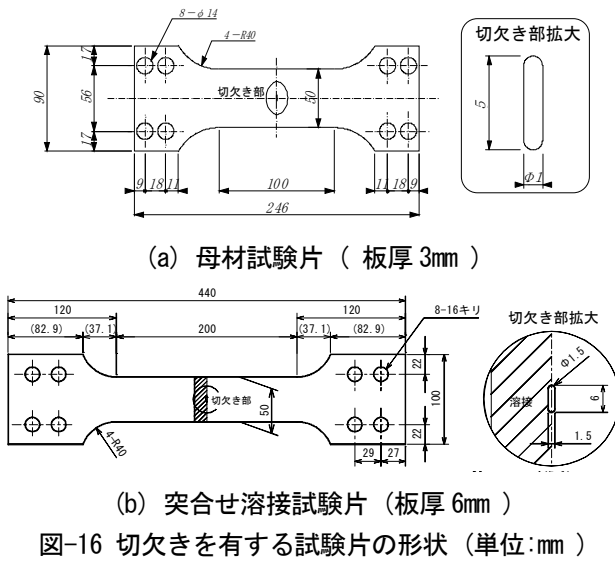
4.1 鋼部材の疲労き裂の進展遅延に関する技術開発

疲労き裂の進展が遅くなる現象として、き裂内に堆積したフレッチング酸化物がき裂開口を妨げること（くさび効果⁸⁾）が知られている。損傷を進行させないことによる構造物の保全技術として、この現象を有効に活用するための検討を実施した。

4.2 き裂進展遅延効果の定量化

き裂進展速度低下の定量化を図るために、要素試験を実施した。試験片は、母材 (SS400、降伏応力 332N/mm²) と突合せ溶接継手 (SM490A、降伏応力 387N/mm²) の 2種類とした。図-16 に、それぞれの試験片形状を示す。板状試験片の中央に、疲労き裂の発生の起点となる切欠きを有する。

本試験のまえに、各試験片に所定の疲労負荷を与えて切欠きから全長 8~10mm の予き裂を発生させた状態とし、き裂の進展遅延効果を評価するために、オイルとアルミナ粒子混合物（以下、微細粒ペースト）を塗布した試験片、無塗布の試験片で疲労き裂進展試験を



行った。試験の前後では、き裂長さの測定を行って進展量を評価した。

4.3 耐用性に関する試験的検討

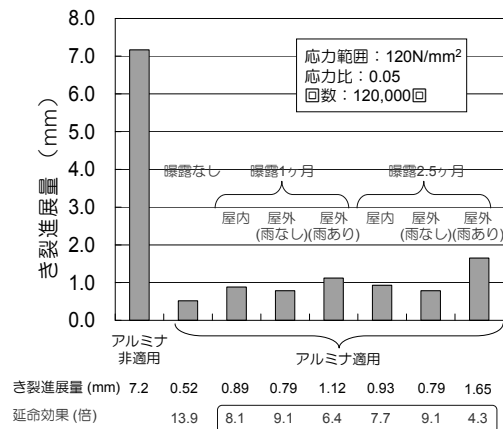
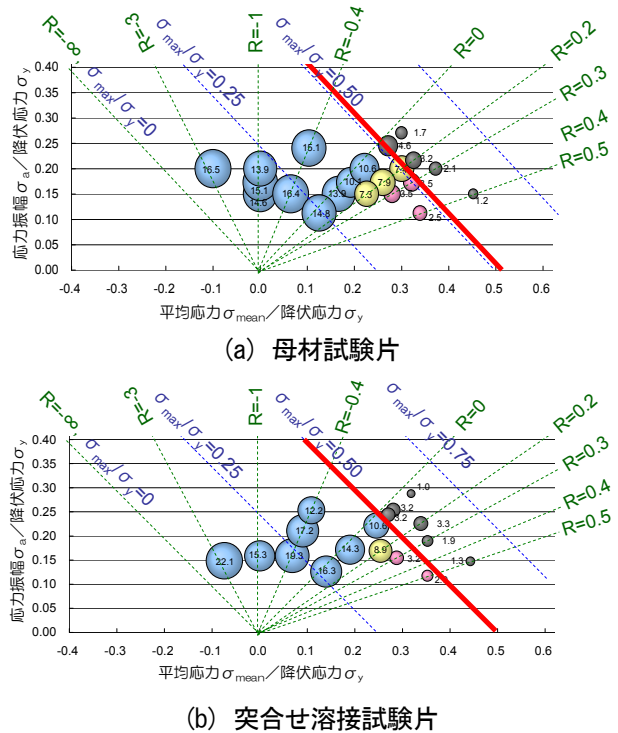
微細粒ペーストの長期耐用性を検証するために、曝露試験による効果検証を実施した。用いた試験片は、図-16の母材試験片と同一のものであり、切欠きから疲労き裂を発生させた後に、微細粒ペーストを塗布して曝露に供した。曝露後には疲労試験を行い、き裂の進展量を比較した。曝露環境は、屋内、屋外(雨なし)、屋外(雨あり)の3環境とした。

4.4 試験検討による結果

4.4.1 き裂進展遅延効果の定量化

疲労限界線図の表記を参考に、図-17に結果を示す。横軸に平均公称応力 σ_{mean} 、縦軸に公称応力振幅 σ_a を、ともに供試体の降伏応力 σ_y で除した値で整理した。図中には、微細粒ペーストを適用したことによるき裂進展量の低下割合として、ペースト無塗布のき裂進展量をペースト塗布のき裂進展量で除した値を示すとともに、き裂進展遅延効果の大きさをマーカーの大小で示した。母材と溶接継手ともに、結果をまとめると以下ようになる。

- (1) 発生最大公称応力 $\sigma_{max}/\sigma_y > 約 0.5$: き裂の遅延効果は小さく、き裂進展量は2倍程度以下しか変化しなかった。き裂先端が大きく開口するため、本技術ではき裂進展を抑制しにくいものと考えられる。
- (2) $\sigma_{max}/\sigma_y \leq 約 0.5$: き裂の遅延効果は応力比に依存する。応力比 $R=0.5$ で2倍程度であるが、 $R=0.3$ で3倍、 $R=0.2$ で7倍、 $R \leq 0.05$ では10倍以上である。この範囲であればき裂遅延効果は最大応力に依存しない。また、



溶接継手では引張残留応力が導入された本試験においても、母材と溶接継手での試験結果に有意な差異はないと考えられる。

4.4.2 耐用性に関する試験的検討

耐用性の整理においては、曝露1ヶ月と2.5ヶ月までの試験を行った。図-18に結果を示す。屋外(雨あり)の条件ではき裂の遅延効果が低下した。塗布直後:13.9倍、曝露1ヶ月:6.4倍、曝露2.5ヶ月:4.3倍である。雨がかかる環境では効果が持続しにくいいため、シールするなどの対応が必要と考えられる。一方、屋内と屋

外(雨なし)では高い長期耐用性を有する。塗布直後では10倍以上の遅延効果があったのに対し、若干低減したものの7.7~9.1倍を維持した。

5. まとめ

5.1 鋼部材塗膜の延命化技術の開発

鋼部材の塗膜劣化について、主要因に関する調査とともに、表面付着塩分が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、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。
- ・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。

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ることから、付着塩分の除去は必要である。一般に塗装損傷は、箇所および部材が限定的であることから、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、表面付着物除去に対する洗浄効果の高い桁洗浄機を開発し、その効果の検証をした。

5.2 耐候性鋼材の外観評価法の提案

既往の目視評価基準暫定案による外観目視評価基準暫定案について、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、改訂のための検討を行った。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)の評価より、さびむらやこぶ状さび等の評価に着目した改訂案を整理した。

5.3 疲労き裂進展抑制による鋼部材の延命化

鋼構造物に発生した疲労き裂の遅延化技術として

有効と考えられる微細粒ペースト注入について、その効果と施工技術に関する試験検討を行った。その結果、鋼床版のデッキプレートとUリブ間に発生する溶接部のビード貫通き裂に対して、き裂進展遅延効果を確認するとともに、高度な専門性を要しない施工方法を確立した。

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)
- 8) 城野政弘, 宋智浩: 疲労き裂 pp17-18, 大阪大学出版会, 2005.

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY OF LIFE PROLONGATION OF STEEL BRIDGE

Budgeted : 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, deterioration of painting, bridge washing, weathering steel, fatigue crack, restraint of fatigue crack propagation