

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（重点研究）

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、三田村浩、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耐候性鋼材の安定化処理などの外観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現況評価法の提案、積雪および寒冷地に適用する疲労亀裂の進展抑制工法の開発を目的とする。

鋼橋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、塗膜劣化・損傷のプロセスに関する検討から洗浄工に求められる機能を検討するため、プロトタイプの洗浄機器の開発を行い、フィールド実験により工法の検討を実施した。

表面処理を施した耐候性鋼材の健全度評価法については、目視調査と詳細調査（断面分析、付着物等の調査）による状態評価の比較による健全度評価を実施し、目視評価による損傷ランク表の整理を実施した。

鋼材の疲労き裂の進展抑制工法については、オイルとアルミナ粒子の混合物をき裂に注入し、遅延効果の定量化とき裂遅延効果の耐用性に関する検証として、基礎的実験を実施した。

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耐候性鋼材の安定化処理などの外観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現況評価法の提案、積雪および寒冷地に適用する疲労亀裂の進展抑制工法の実施する。

2. 調査研究の手法

2. 1 橋梁洗浄技術の開発

2. 1. 1 洗浄工に求められる機能の検討

洗浄工に求められる性能を整理し効率的な洗浄を実施するための必要な機能を検討するために、鋼部材の劣化損傷プロセスを既往文献等より整理を行った。

2. 1. 2 洗浄効果原位置評価法の検討

文献より整理した劣化損傷の原因と要因に対して、現地で実施可能な調査法および施工管理法について、測定データを収集し、原位置調査の適用性可能性について整理した。

2. 1. 3 室内および実橋による洗浄工検討と検証

架設雰囲気異なるモデル橋梁に対して洗浄を実施し、施工前後における付着物調査を実施し、橋梁洗

浄を有効活用するための、実現可能な機能について現場検証的検討を実施する。

着目した付着物は、塗膜の防食機能が低下した際に母材の劣化損傷を促進させる、塩分と塵埃である。

2. 2 耐候性鋼材の外観評価法の提案

2. 2. 1 現況調査

現況調査は、既往研究で対象とした昭和 53 年から供用されているさび安定化処理が施された耐候性鋼材を用いた、室蘭新道を対象として目視外観調査を行うとともに、サビ及び被膜厚測定、外観写真撮影、コアサンプル採取を実施した。採取したコアサンプルとサビ・堆積物より、サビ断面観察（電子顕微鏡）、サビ断面評価（EPMA）、塩分分布計測を行った。

調査結果を表に示す健全度評価暫定案に従い、目視評価を実施した。

2. 2. 2 損傷ランクに関する検討

提案している目視評価表について、目視評価結果と詳細調査結果より比較検討を行い、健全度評価暫定案の妥当性を検討した。

2. 3 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（くさび効果）が知られている。この現象を強制的に発現させて、損傷を進行させない構造物の保全技術として有効に活用するための検討を実施した。

2. 3. 1 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-1 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。

実験は、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、き裂進展量を評価するために、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。

2. 3. 2 耐用性に関する実験的検討

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開始した。用いた試験片は、図-1 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。

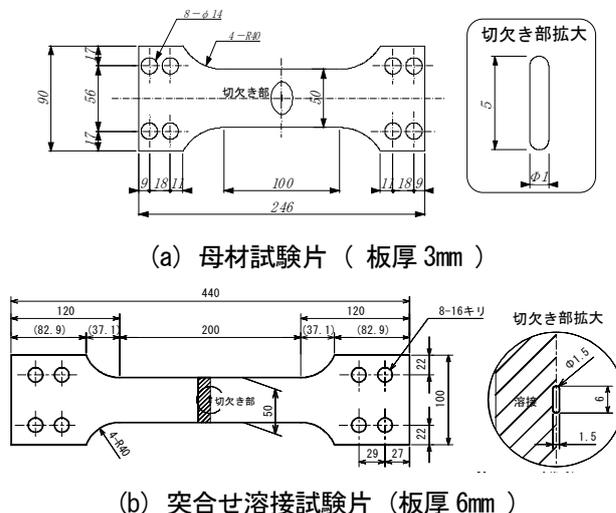


図-1 切欠きを有する試験片の形状（単位:mm）

3. 調査研究の成果

3. 1 橋梁洗浄技術の開発

3. 1. 1 洗浄工に求められる機能の検討

鋼部材の腐食劣化を対象として、劣化損傷プロセスに関する文献調査を実施した。対象は、塗膜を有する部材で、塗膜劣化のプロセスに着目した。

塗膜の劣化には、大きく 2 通りあることが分かった。第一に樹脂・顔料が紫外線の光エネルギーにより化学結合が切断され分解劣化する。第二に水分による加水分解および酸素による酸化が挙げられる。中には、塗膜に配合された白色顔料の酸化チタンの光触媒作用による分解もあることも調査により確認された。

文献調査より塗膜劣化プロセスを以下のように想定し、そのイメージを図-2 に示す。

- ① 塗膜は顔料粒子と樹脂層からなり、当初は樹脂が顔料を覆い、塗膜表面は平滑になっている。
- ② 劣化により樹脂の微妙なワレ・欠落による顔料の露出で塗膜表面に凸凹が発生する。
- ③ 更に樹脂劣化が進行すると、顔料の完全露出・樹脂層の粒子化により、塗膜表面は粉化状態になる。この時点で部分的にピンホールが発生し母材の露出も部分的に発生する。ピンホールに水分および塩分が浸透して母材の腐食による点錆が発生してくる。
- ④ 最終的に、樹脂の結合力低下による、塗膜自身

のワレ（クラック）及び接着力の低下による塗膜剥離・浮きが発生し、塗膜下の母材の腐食が進行する。

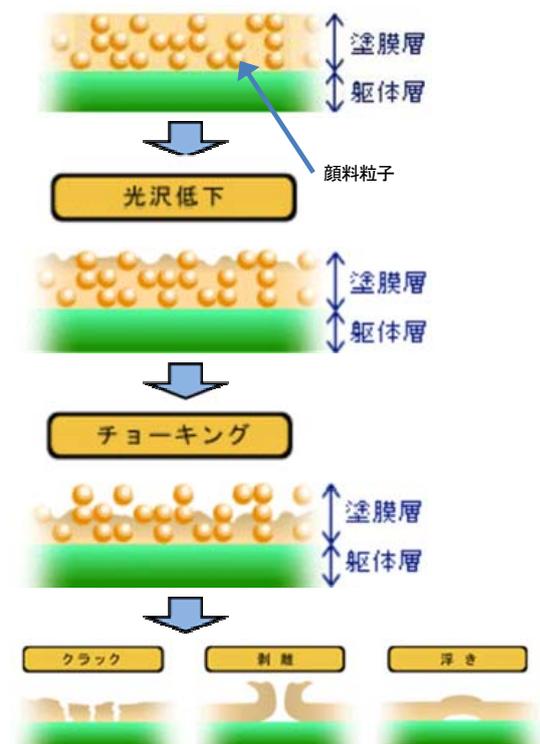


図-2 塗膜劣化プロセス

このプロセスより橋梁洗浄に要求される性能は、塗膜の白亜化（チョーキング）より前に、塗膜表面の劣化損傷要因となる、塩化物や汚れを除去し、母材劣化損傷を遅延させることであると考える。さらに母材が健全性を保ちつつ、塗装塗り替え時期を迎えた場合、既存塗装へのの上塗りによる防食機能回復も可能と考えられる。このためには、洗浄のみではなく、光沢回復といった対応として油脂分の噴霧が効果的であると考えられる。

3. 1. 2 洗浄効果原位置評価法の検討

文献調査結果を踏まえ、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。

測定機器と測定目的物の対応を表-1 に示す。また、対象機器の測定状況について写真-1 に示す。

本検討においては、直接的に計測する表面塩分計を

除き、他の2つは間接的に除去効果を計測する手法である。そのため、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、多少の手に間は差はある。しかし、ここで用いた測定方法は、洗浄後の効果管理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、いずれの測定方法も施工管理手法に有効なものといえる。

表-1 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-1 付着塩分計測状況

(左から、表面塩分計、光沢計、色彩色差計)

3. 1. 3 室内および実橋による洗浄工検討と検証

本年度は、スチームと回転ブラシを用いたプロトタイプ洗浄機の作業性に関する確認として、写真-2 に示すようなモデル橋梁による洗浄作業を実施した。

その結果として、平板面に対する作業と補剛材やボルトといった突起物のある面に対する作業においては、狭隘部専用のヘッドを用いることで作業が実施出来ることが確認できたが、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。



写真-2 モデル橋梁に対する洗浄

(左；上フランジ部、右；添接板部)

洗浄効果においては、表面付着塩分量を代表ケースとして表-2 に結果を示す。なお、表-3 は、中性洗剤を用いた手洗いによる洗浄結果で、機械洗浄の比較基準値である。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と比較して、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と同程度の値となり、表面付着物が除去され、現況の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出来た。

表-2 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	17.1	286.0	37.1
	② 770.0	16.9	474.0	46.9
試験 No.	③ 749.0	22.3	657.0	49.3

表-3 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 5.2	77.8		
	② 10.8	94.6		
試験 No.	③	58.1		

3. 2 耐候性鋼材の外観評価法の提案

3. 2. 1 現況調査

表-4に示す目視評価基準（案）による外観目視評価結果の他、保護性錆の形成を確認するためにイオン透過抵抗測定や室内試験による錆断面の元素分布状態等を調査するためにコアサンプルを実施した。

表-4 健全度評価基準 H16年度提案案

錆び・被膜の外観 (例)	処理被膜のさび状況 (注1)		処理被膜のさび状況 (注1)			さび厚 ²⁾ (μm)
	A	B	x	y	z	
被膜の外観	正常	異常	<3%	<30%	>30%	<400
さび部の外観	正常 ⁴⁾	異常	5-x	5-y	5-z	<600
	異常 ⁴⁾	異常	4-x	4-y	4-z	<600
	異常 ⁴⁾	異常	3-x	3-y	3-z	<1000
	異常 ⁴⁾	異常	2-x (a)	2-y (b)	2-z (b)	>1000
異常 ⁴⁾	異常	1-x	1-y	1-z	>1000	
異常 ⁴⁾	異常	1-x (b)	1-y (b)	1-z (b)	>1000	

注) 1. (a)はこぶ状さび(bumpy rust)であることを示す。
2. さび厚は目安としての参考値である。
3. 被膜の厚さも考慮して、探使用の目盛に200μmを加算した。
4. 被膜がなくなり全面がさびに浸透した後は、探使用の基準にて評価し、1~5の観点で判定する。
5. 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。

3. 2. 2 損傷ランクに関する検討

現地調査結果より設定した目視評価による健全度と詳細調査による健全度について、調査箇所別に表-5に整理する。表に示しているように、調査対象橋梁においては、目視調査結果と詳細調査結果の健全度ランクは合致しており、提案している評価表を用いることで、健全度を設定できることが確認できた。

表-5 劣化度評価比較

橋梁	H23年度 室内試験結果		H23年度 原位調査 (目視調査) 結果		整合性	H16年度 調査結果 ^{注3)}	
	評価点 ^{注1)}	劣化状況	評価点	劣化状況		評価点	劣化状況
日の出 踏道橋 調査箇所: G2 桁外側 ウツリ面	4	全体的に黄・赤・黒褐色のさびが分散し、表面は比較的滑らかで、初期の表面処理状態が維持している部分もあり、さび・被膜の程度から評価点4とした。	4-z	表面に表面処理被膜が残るが、腐食が比較的進んでいない状況で、被膜厚は146μm程度であった。さび・被膜の程度と範囲から評価点4とした。	○	5-z	さび層が比較的均一に全体的に生成している。さび層を貫通する被膜はあまり残られていないため、さび・被膜の程度と範囲から、評価点5-zとなっている。
母恋高架橋 調査箇所: G6 桁外側 ウツリ面 (海側)	4	全体的に黄・赤・黒褐色のさびが分散し、表面は比較的滑らかで、初期の表面処理状態が維持している部分もあり、さび・被膜の程度から評価点4とした。	4-z	4mm程度の均一なさびが発生しており、さび厚は241μm程度であった。さび・被膜の程度と範囲から評価点4とした。	○	5-z	外観に現れているさびは点状で、表面処理被膜が多量に剥離されており、少しクラックが入っている程度である。腐食減耗の進行度が低く、と判断され、さび・被膜の程度と範囲から、評価点5-zとなっている。
御崎高架橋 調査箇所: G1 桁外側と内側 ウツリ面 ^{注2)}	5 (外側)	表面は、全体的に黒褐色の表面処理層で覆われている。裏面は局部的にさび腐食下の茶褐色の粒状のさび腐食が出現し、裏面はさび腐食がかなり進行しているが確認される。よって、さび・被膜の程度から外側は評価点5、内側は評価点2とした。	5-z (外側)	・外側は表面に表面処理被膜が残るが、腐食が点状程度で比較的進んでいない。被膜厚は119μm程度であった。さび・被膜の程度と範囲から評価点5-zとした。 ・内側は5~15mm程度のさびが露れ、一部うろこ状のさびも確認され、さび厚は平均389μm程度（最大さび厚は551μm）とさび・被膜の程度と範囲から評価点2-zとした。	○	5-z (外側)	・G1桁外側（山側）の外観に現れているさびは点状で、表面処理被膜が多く剥離されており、さび・被膜の程度と範囲から、評価点5-zとなっている。 ・G1桁内側は、さび、被膜剥離からみるとさび腐食が進行しており、裏面に取り込んでいた状態と判断され、さび・被膜の程度と範囲から、評価点2-zとなっている。
	2 (内側)		2-z (内側)		○	2-z (内側)	
仲町高架橋 調査箇所: G6 桁外側 ウツリ面 (海側)	3	全体的に表面の黒褐色の表面処理層は剥離し、下地には茶褐色の厚いさびが成長していることから、さび・被膜の程度から評価点3とした。	3-z	表面処理被膜は消失し、20mm程度のうろこ状さびで覆われており、さび厚は537μm程度であった。さび・被膜の程度と範囲から評価点3-zとした。	○	3-z	表面処理被膜のふくれ、外側とさび発生部が混在し、全体的に厚めのさびが生成しており、コア断面を見るとさび層はクラックが多量に判別され、さび・被膜の程度と範囲から、評価点3-zとなっている。

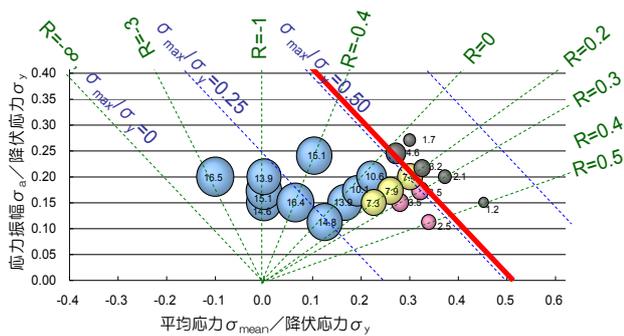
注1) H23年度室内試験結果からの評価点については、コア断面から評価しているため、さびの広がり評価(x, y, z)は確認出来ないため、さび劣化区分のみの評価点とした。
注2) 御崎高架橋の劣化評価点については、室内試験の結果から、採取したコアのさび状態が G1 桁外側と内側で劣化度が大きく違うことが確認された(外側-評価点5、内側-評価点2)ため、外側と内側の両方の評価点を比較した。
注3) H16年度の調査結果は、「平成16年3月、無塗装耐候性鋼橋の劣化判定基準法に関する研究報告書」を参考とした。

3. 3 鋼部材の疲労き裂の進展遅延に関する技術開発

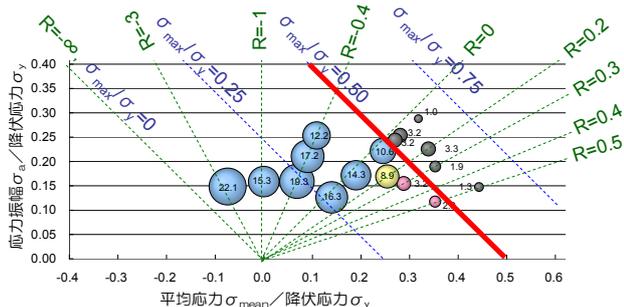
3. 3. 1 遅延効果の定量化

疲労限界線図¹⁾の表記を参考に、図-3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、ともに供試材の降伏応力 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のようなになる。

- (1) 発生最大公称応力 σ_{max}/σ_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。



(a) 母材試験片



(b) 突合せ溶接試験片

図-3 疲労き裂進展試験の結果
(き裂遅延効果の応力場依存性)

3. 3. 2 耐用性に関する実験的検討

平成 23 年度の整理においては、曝露 1 ヶ月と 2.5 ヶ月までの試験を行った。図-4 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。

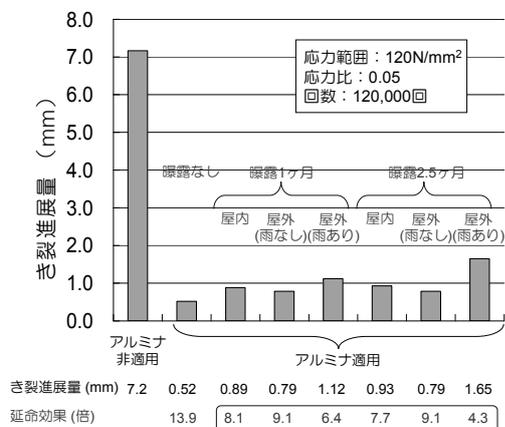


図 4 疲労き裂進展試験の結果
(き裂遅延効果の長期耐用性)

4. まとめ

4. 1 橋梁洗浄技術の開発

塗膜劣化プロセスが明確化でき、母材保全のための必要な洗浄性能が整理できた。今後は、塗膜塗り替えと洗浄工の関係について LCC を考慮しながら、どのタイミングでどのような工法を選択すべきかについて検討が必要であると考えられる。また、洗浄工を実施することによる、塗膜劣化の遅延化技術について検討し、洗浄工の効果的な活用を検討する。

4. 2 耐候性鋼材の外観評価法の提案

室蘭新道は耐候性鋼材表面に錆安定化处理(ウェザークーコート法)を行っており、表面处理皮膜は架設後徐々に剥離するのが一般的であるが、現状では皮膜が剥離する前や剥離途中などの場合もあり、表面处理被膜が所々残存している箇所において、裸使用の耐候性鋼材と外観が異なり、専門技術者でも劣化判定区分に迷いが生じたケースがあった。

今後は、これらの課題を踏まえた上で、耐候性鋼材を採用した橋梁に関する外観目視による「劣化判定基準案」の適用性拡大のため、耐候性鋼材を採用した他の鋼橋で、本検討で実施した調査を行い、既存の判定基準案の精度向上を図る。

4. 3 鋼部材の疲労き裂の進展遅延に関する技術開発

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について、その効果の定量性について調査した。しかしながら、定性的評価にとどまっており、今後は積雪および寒冷環境下での適用性を考慮した定量化を行うため、微細粒ペーストの劣化や雰囲気温度の影響による性能の確認を実施する。さらに、き裂を有する鋼構造物を対象として、フィールド試験を通じて実環境での効果検証を行う必要があり、実験的に効果検証を試みる。また、長期耐用性を検証するために、最長 1 年間をメドとして、定期的に試験片を回収して、環境-曝露期間-遅延効果の関係を明らかにしていく。

参考文献

1) 日本材料学会, X 線材料強度学, p.108, 養賢堂, 1981

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

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, NAKAMURA
Naohisa, TAKADAMA Namio, MIYAMOTO
Syuji

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. First is to develop bridge washing method to prolong the life of coating film of steel bridges. Here, washing equipment was manufactured by way of trial, and field experiment was carried out to examine the washing method and required performance. Second is to propose the soundness evaluation method of weathering steel with surface treatment. In this paper, visual inspection and detail investigation (analysis of cross section and attaching substances) were conducted, and damage ranking chart was arranged based on visual inspection. Third is to develop the method to prevent fatigue crack growth of steel members. Here, the effect of the blend of oil and alumina particle injection into crack on the delay of fatigue crack growth was evaluated by fundamental experiment.

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