

道路政策の質の向上に資する技術研究開発

【研究状況報告書（2年目の研究対象）】

①研究代表者	氏名（ふりがな）		所属		役職	
	麻生稔彦（あそうとしひこ）		山口大学大学院 創成科学研究科		教授	
②研究 テーマ	名称	耐候性鋼橋梁の診断・補修技術の高度化についての研究開発				
	政策 領域	[主領域]（※政策領域が複数の場合、 主領域と副領域を記入）	公募 タイプ	タイプⅣ		
③研究経費（単位：万円）	平成29年度	平成30年度	平成31年度	総合計		
	1,499	1,098	1,373	3,970		
※H29は精算額、H30は受託額、 H31は計画額を記入。端数切捨。						
④研究者氏名（研究代表者以外の主な研究者の氏名、所属・役職を記入。なお、記入欄が足りない場合は適宜追加下さい。）						
氏名		所属・役職				
大屋 誠		松江工業高等専門学校・教授				
武邊勝道		松江工業高等専門学校・准教授				
広瀬 望		松江工業高等専門学校・准教授				
田島啓司		山口大学大学院創成科学研究科・助教				
⑤研究の目的・目標（提案書に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入。）						
本研究は、耐候性鋼橋梁の長寿命化手法を確立する研究である。耐候性鋼橋梁を適切に維持管理し、長寿命化をはかるためには、橋梁がおかれている環境の評価手法、鋼材表面に生成するさびの評価手法、効果的な補修技術の確立が必要不可欠である。そのため、以下の事項を目標として研究を進める。						
(1) 耐候性鋼橋梁の腐食予測シミュレーション技術の開発						
(2) ICT技術を援用した腐食判定法の高度化						
(3) 腐食耐候性鋼材の補修効果の解明						
(4) 耐候性鋼材の腐食評価・補修フローの提案とマニュアル化						

⑥これまでの研究経過

1 耐候性鋼橋梁の腐食予測シミュレーション技術の開発

耐候性鋼橋梁において、耐候性鋼材の選定や防食法の選定を適切に行うためには、橋梁架橋地点周辺の地形、気象環境や構造形式などによる海塩粒子の飛来状況から耐候性鋼橋梁の腐食状況を予測する必要がある。本年度は、平成29年度の研究成果に基づき、3Dモデリング技術と環境評価シミュレーションを結合し、耐候性鋼橋梁の腐食状況がシミュレート可能なシステムの開発を行うことを目的とした（図-1.1参照）。本システムは、CIMで作成される3Dモデルをそのまま腐食予測に利用することを念頭にシステム開発を行っている。

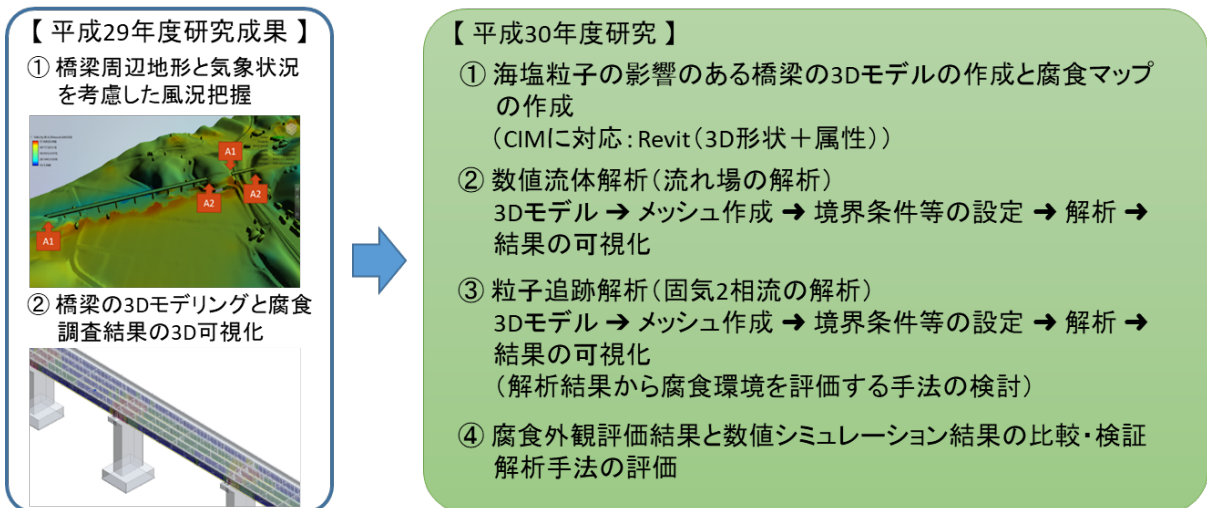


図-1.1 研究概要

システムの開発に当たり、凍結防止剤や漏水による腐食の影響を受けていない、小規模な耐候性鋼橋梁を対象橋梁として選定した。開発対象橋梁の概要と作成したモデルの概要を図-1.2に示す。

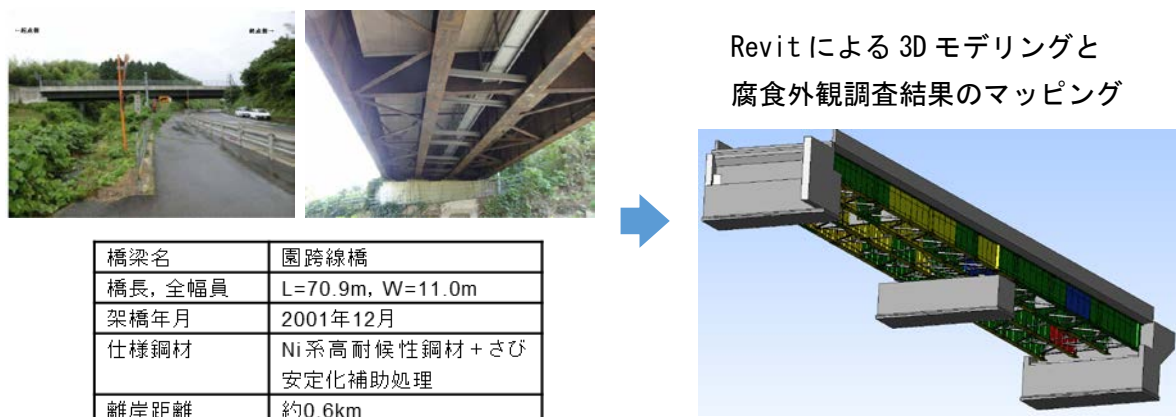
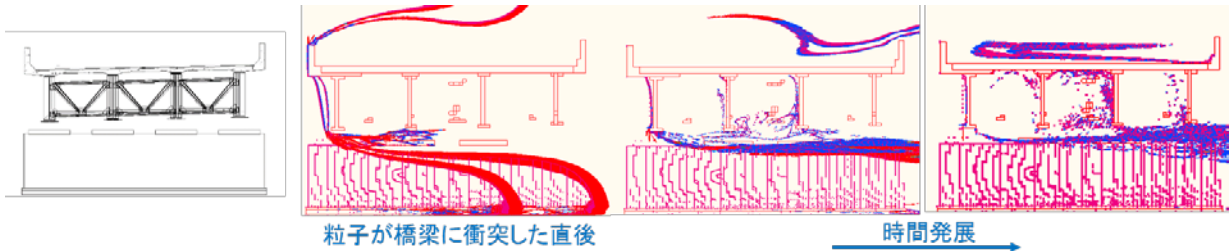


図-1.2 開発対象橋梁

Revit (IFC形式に対応, 3D形状と属性設定が可能) を用いて開発対象橋梁を各部材, 添接板, ガセットプレートまでモデル化した. 橋梁の3Dモデルをそのまま3Dメッシュに分割し, STREAMにより流体解析が可能か試みた. 次に, 橋梁の橋脚や橋台などが海塩粒子の桁内への流入にどのように影響するかを確認する目的で, STREAMを用いて固気二相流を対象とした粒子追跡法による解析を実施した. 解析では, 移流のみを考慮したニュートンの運動方程式を用い, 粒子は流体体積に影響を与えない程度に微小な球体と仮定した. 橋軸直角方向から粒子が一様に流入した場合の橋脚周辺の桁内への粒子輸送状況と桁中間部の桁内への粒子の流入状況の解析結果を図-1.3に示す. また, 粒子の桁内部の部位毎の付着の状況を図-1.4に示す. 調査結果と解析結果から橋梁の3Dモデルを用いた粒子追跡法で求めた桁内への海塩粒子の付着状況は, 腐食の特徴をある程度評価可能であることを確認した. なお, 図-1.4は, 橋脚近傍の付着状況を桁全体に表示したものである.

【 橋脚近傍の桁内の粒子輸送状況 】



【 桁中央部の桁内の粒子輸送状況 】

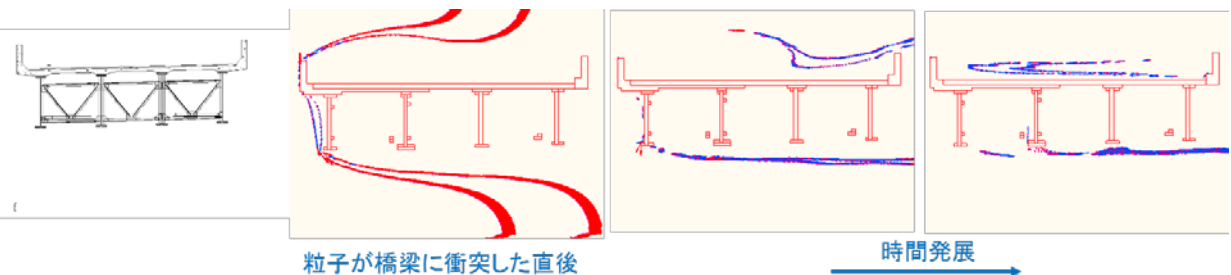


図-1.3 粒子追跡法による橋脚近傍と桁中央部の桁内への粒子輸送解析結果

部位	G1	G2	G3	G4
Web面	A 0.008	F 0.134	K 0.053	P 0.179
下Flg.上面	B 0.328	G 0.621	L 0.221	Q 0.208
下Flg.下面	C 0.434	H 0.062	M 0.006	R 0.057
下Flg.上面	D 0.070	I 0.104	N 0.235	S 0.087
Web面	E 0.321	J 1.000	O 0.701	T 0.211

J点の結果を最大値1とした解析結果の部位毎の付着量の比率

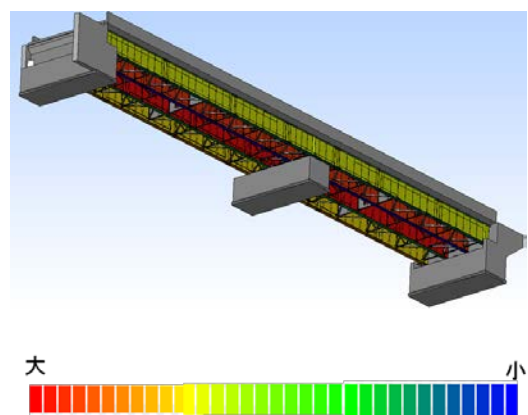


図-1.4 粒子追跡法による桁の部位毎の粒子付着量の比率と解析結果の3D分布図

2. ICT技術を援用した腐食判定法の高度化

耐候性鋼橋梁に生じたさびの性状評価には外観評点が用いられている。しかし、外観評点評価は評価者の経験・主観によるところが大きく、経験の浅い技術者は判定を誤る可能性がある。そこで、主観によらず定量的に判断できる手法およびそのためのツールの開発を行う。これまでの研究では、セロテープ試験で採取されたさびのデジタル画像より、さび粒子を同一面積を持つ円に置き換え、それぞれの円について円相当径を算出し、この円相当径の粒径加積曲線よりさび外観評点を算出する方法を提案している。粒径加積曲線の例を図-2.1に、昨年度の研究による判定基準（以下、判定基準 I とする）を表-2.1に示す。

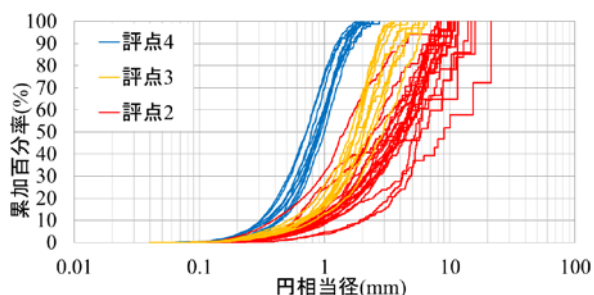


図-2.1 粒径加積曲線の例

表-2.1 判定基準 I

	円相当径	
	累加百分率40%時	累加百分率100%時
評点 4	1mm未満	
評点 3	1mm以上3mm未満	3mm以上8mm未満
評点 2	3mm以上	8mm以上

平成30年度はこの判定基準の精度向上を目指し、判定基準を実装した開発プログラムを技術者に提供し、試料および評価を収集した。表-2.2は技術者から収集した145試料について、判定基準 I により推定した推定評価と技術者評価を比較したものである。なお、本研究による評価では、さび外観評点5および1は対象としていない。これは、評点5は初期さびの段階であること、および評点1は層状剥離さびであり目視で容易に判定可能であるためである。そこで、表-2.2では技術者が評点5および評点4と判断したものは推定評価4として、技術者が評点2および評点1と判断したものは推定評価2として比較している。今回提供された145試料について比較したところ、技術者評価と推定評価が一致した試料は145試料中75試料で一致率は51.7%にとどまった。特に技術者が評点4あるいは5と判断したものの多くが、プログラムでは評点3と推定されている。これは判定基準 I の作成に用いた試料がある特定の技術者の判断によるものであったためと考えられる。このため、多くの技術者の評価を取り入れた試料による判定基準の再検討が必要である。

表-2.2 実務者評価

		推定評価		
		4	3	2
技術者評価	5.4	14(28%)	35(70%)	1(2%)
	3	1(2%)	34(64%)	18(34%)
	2.1	0	5(16%)	27(84%)

そこで、昨年度の試料（136試料）に加え、先の実務者による試料（145試料）および新たに収集した試料（59試料）の全340試料により判定基準を再検討する。再検討では、いくつかの判定基準を設定し比較を行うが、例として表-2.3および表-2.4に示す判定基準の場合を示す。表-2.3の判定基準Ⅱは判定基準Ⅰの閾値を多くの粒形加積曲線より修正したものである。また、表-2.4の判定基準Ⅲは判定基準Ⅰに準ずるものの閾値の幅を広く取っている。判定基準Ⅰ～Ⅲを用いて340試料の評価をおこなった結果を表-2.5～表-2.7に示す。全試料に対する一致率は判定基準Ⅱが最も高く71.8%となった。そこで今後は、この判定基準Ⅱを新たな閾値として使用する。

表-2.3 判定基準Ⅱ

	円相当径	
	累加百分率40%時	累加百分率100%時
評点 4	2mm未満	
評点 3	2mm以上4mm未満	3mm以上7mm未満
評点 2	4mm以上	7mm以上

表-2.4 判定基準Ⅲ

	円相当径	
	累加百分率40%時	累加百分率100%時
評点 4	1mm未満	
評点 3	1mm以上4mm未満	4mm以上10mm未満
評点 2	4mm以上	10mm以上

表-2.5 全試料比較（判定基準Ⅰ）

全体一致率 67.6%		推定評価		
		4	3	2
技術者評価	5.4	72(53%)	63(46%)	1(1%)
	3	4(4%)	71(68%)	30(29%)
	2.1	0	12(12%)	87(88%)

表-2.6 全試料比較（判定基準Ⅱ）

全体一致率 71.8%		推定評価		
		4	3	2
技術者評価	5.4	91(67%)	44(32%)	1(1%)
	3	7(7%)	65(62%)	33(31%)
	2.1	0	11(11%)	88(89%)

表-2.7 全試料比較（判定基準Ⅲ）

全体一致率 66.5%		推定評価		
		4	3	2
技術者評価	5.4	79(58%)	57(42%)	0
	3	8(8%)	90(86%)	7(7%)
	2.1	0	42(42%)	57(58%)

ここで、表-2.6を見ると技術者が評点3と評価したもののうち、今回の方法で評点3と推定した試料が62%、評点2と推定した試料が31%、評点4と推定した試料が7%となっている。今回の高度化手法は経験が少ない技術者も使える手法として開発しているため、実際より安全側に推定（評点3を評点2と推定）したとしても、スクリーニングという観点から問題は小さい。しかし、危険側に推定（評点3を評点4と推定）することは避けなければならない。そこで、評点3を評点4と推定した7試料と評点2を評点3と推定した11試料について、粒径加積曲線を図-2.2と図-2.3にそれぞれ示す。これらの図ではすべての試料において判定基準Ⅱの粒径を下回っていることがわかる。それぞれの試料の技術者評価は単一の技術者によっている。そのため、今後下図の試料については他の技術者による判断を仰ぎ検討する必要がある。

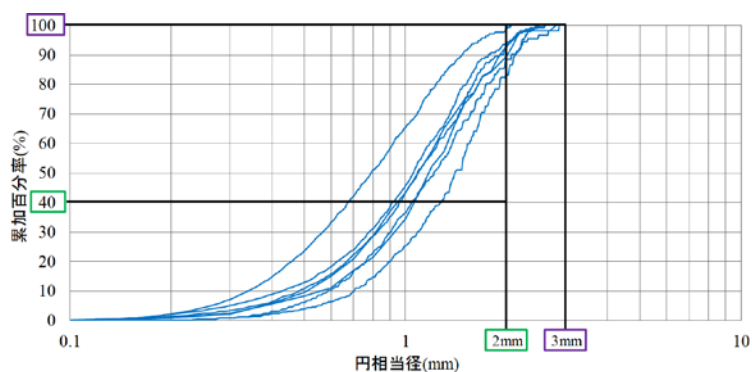


図-2.2 評点3を評点4と推定した試料の粒径加積曲線

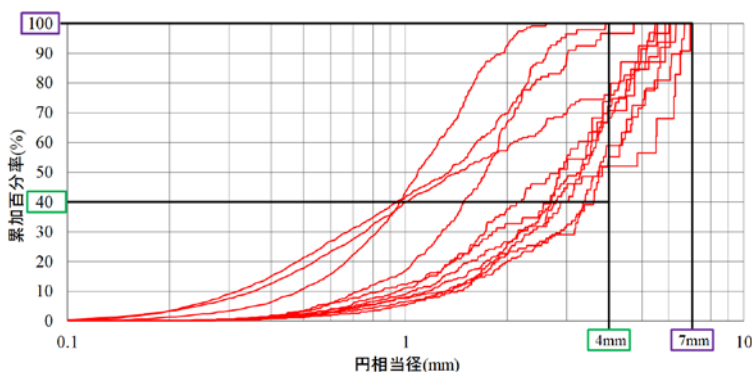


図-2.3 評点2を評点3と推定した試料の粒径加積曲線

3. 腐食耐候性鋼材の補修効果の解明

耐候性鋼材の環境・さび状態と補修方法の関係を明らかにするために、素地調整方法、塗装方法、塩分除去等のパラメーターを組み合わせた表-3.1に示す試験片による曝露試験を、表-3.2に示す腐食環境の異なる3地点で実施している。

表-3.1 曝露試験片

水準No.	水準名	素地調整			塗装					
		工程1	工程2	工程3	下層塗料			上層塗料		
1	評点5	-	-	-	-					
2	評点4	-	-	-	-					
3	評点3	-	-	-	-					
4	評点2	-	-	-	-					
5	評点1 (無処理)	-	-	-	-					
6	動力工具	動力工具 St 3	-	-	-					
7	動力工具+水洗	動力工具 St 3	高圧水洗 (5MPa以上)	-	-					
8	R c - III	動力工具 St 2	-	-	変性エポキシ	変性エポキシ	変性エポキシ	ふっ素樹脂	ふっ素樹脂	
9	R c - II	動力工具 St 3	-	-	有機ジンク	変性エポキシ	変性エポキシ	ふっ素樹脂	ふっ素樹脂	
10	ブラスト処理 [付着塩分量50mg/m ² 以下]	動力工具 St 3	ブラスト処理	-	-					
11	ブラスト処理 [付着塩分量100~150mg/m ² 程度]	動力工具 St 3	ブラスト処理	-	-					
12	ブラスト処理 [付着塩分量400~500mg/m ² 程度]	動力工具 St 3	ブラスト処理	-	-					
13	ブラスト処理+さび安定化補助処理	動力工具 St 3	ブラスト処理 Sa 2.5	-	さび安定化 補助処理	-	-	-	-	
14	ブラスト処理 +有機ジンクリッチペイント	動力工具 St 3	ブラスト処理 Sa 2.5	-	有機ジンク	-	-	-	-	
15	変性エポキシ樹脂塗料	動力工具 St 3	ブラスト処理 Sa 2.5	-	変性エポキシ	-	-	-	-	
16	R c - I	動力工具 St 3	ブラスト処理 Sa 2.5	-	有機ジンク	変性エポキシ	変性エポキシ	ふっ素樹脂	ふっ素樹脂	
17	R c - I (水洗工法)	動力工具 St 3	ブラスト処理→高圧水洗繰返し	ブラスト処理	有機ジンク	変性エポキシ	変性エポキシ	ふっ素樹脂	ふっ素樹脂	
18	R c - I (水洗レス工法)	動力工具 St 3	腐食抑制剤塗布	ブラスト処理 Sa 2.5	有機ジンク	変性エポキシ	変性エポキシ	ふっ素樹脂	ふっ素樹脂	

表-3.2 曝露試験実施場所

場所	試験方法	曝露開始日	年間平均気温 (°C)	年間平均湿度 RH (%)	年平均飛来塩分量 (mdd)
沖縄県糸満市	遮蔽曝露	2017年11月24日	24.0	76.9	0.324
島根県松江市	遮蔽曝露	2017年11月30日	14.9	75.4	0.735
山口県宇部市	密閉箱内曝露	2017年11月30日	17.3	69.8	-

それぞれの補修方法の効果をイオン透過抵抗法により評価する。イオン透過抵抗法では鋼材表面のさびのイオン透過抵抗を測定し、さび厚とイオン透過抵抗のプロットよりさび性状を評価するものである。図-3.1にイオン透過抵抗法によるさび評価の判定図に無処理である

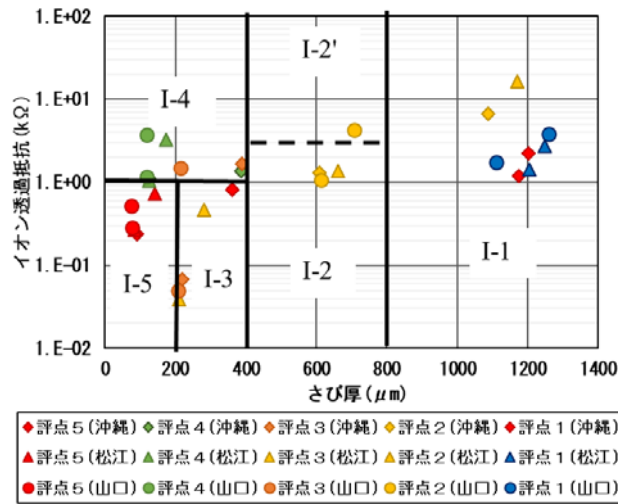


図-3.1 I評点判定図

水準1～5のプロットを示す．判定図はI-5～I-1に区分されており，それぞれがさび外観評点の5～1に対応している．すなわち，I-5は未成長さび，I-4とI-3は保護性のさび，I-2はうろこ状のさび，I-1は層状剥離さびの目安である．試験水準ごとのプロットを図-3.2～図-3.4に示し．腐食の進行を検討する．なお，プロットに使用するさび厚とイオン透過抵抗は試験片製作時および曝露開始1年後に測定したものをを用いている．

図-3.2は腐食鋼材に処理を施さない場合である．水準によらず沖縄と松江では腐食が進行している．一方，飛来塩分の影響を受けない山口においても評点2および評点1では腐食が進行しさび厚が増加している．これはさびの生成過程でさび内部に取り込まれた塩分の影響と考えられ，補修にあたっては評点1や2の厚いさびを除去する必要があることがわかる．

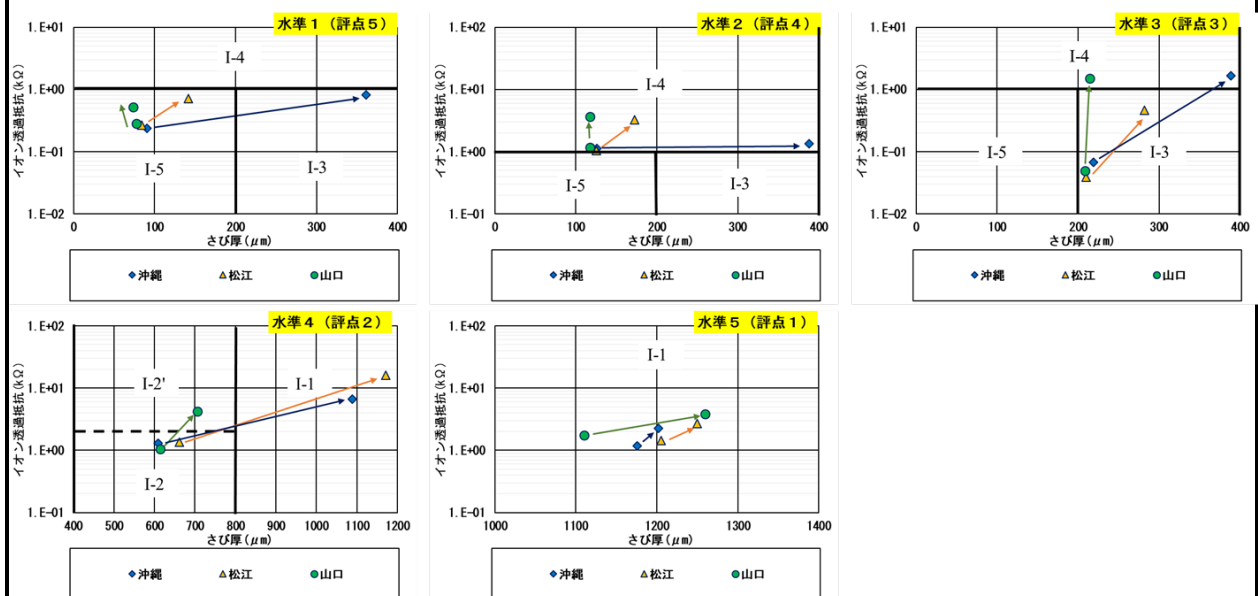


図-3.2 無処理試験片

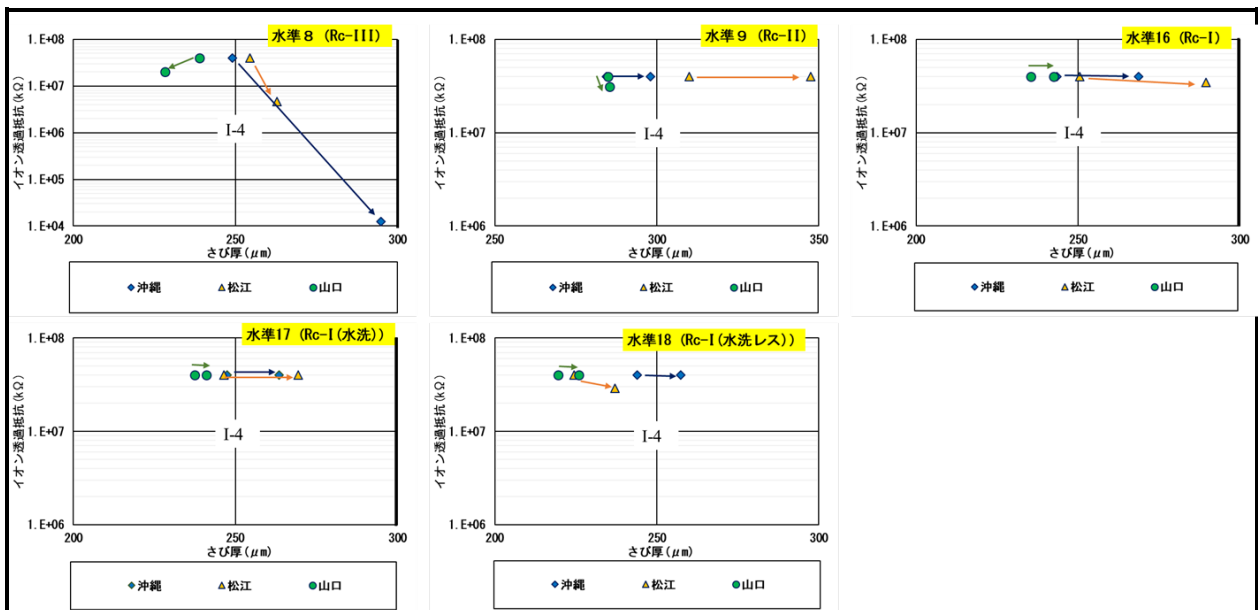


図-3.3 重防食塗装試験片

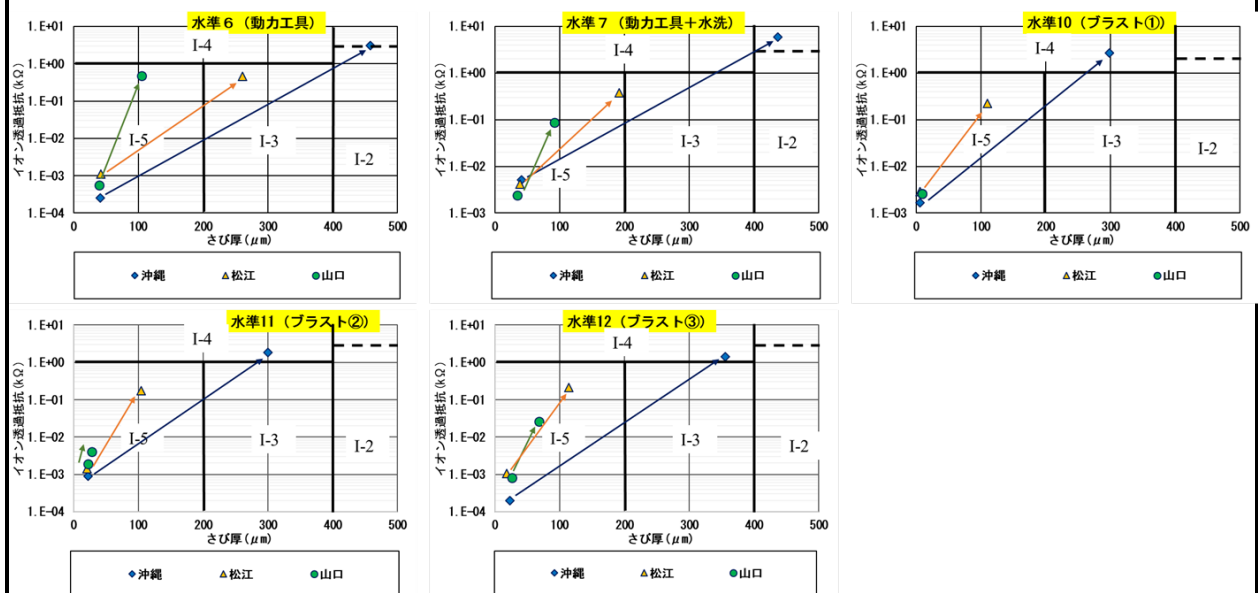


図-3.4 無塗装試験片

一方、図-3.3は重防食塗装系により補修塗装を施した試験片である。このうち、Rc-III塗装系では沖縄、松江においてイオン透過抵抗の低下が現れており防食性能が劣化している。しかし、Rc-IIとRc-Iでは防食性能の劣化は認められず、塗膜は健全な状態を維持している。図-3.4は鋼材表面のさびを各種の方法で除去したのみの試験片である。図-3.4の試験水準ではいずれについてもさび除去により評点I-5まで回復している。しかし、沖縄では全ての水準において早い再腐食が認められ、評点I-2へ進行している。一方、飛来塩分の影響を受けない山口においては、さびの除去方法に関わらず表面さびの除去により再腐食は抑制され、

保護性さびである評点I-4に向かっている。松江においては動力工具によるさび除去では再腐食の傾向があるものの、ブラストを施せば再腐食の傾向が抑制されている。これらの事より、飛来塩分の影響が少なくかつ直接的な腐食要因が無い場合には、表面さびを除去する表面補修も防食機能の維持の観点から有効になりうると考えられる。図-3.5は重防食塗装ではなく、簡易な皮膜形成により補修する場合である。これらの簡易塗装では、塗膜の劣化に伴い、イオン透過抵抗は低下する。ブラスト後にさび安定化補助処理剤を塗布した場合には3地点ともイオン透過抵抗値は低下傾向にある。これに対して、ブラスト後に変性エポキシのみを塗布した場合は、地点によらずイオン透過抵抗の減少は見られない。また有機ジンの塗布は飛来塩分量が多くない地域では劣化が少ないことが明らかとなった。

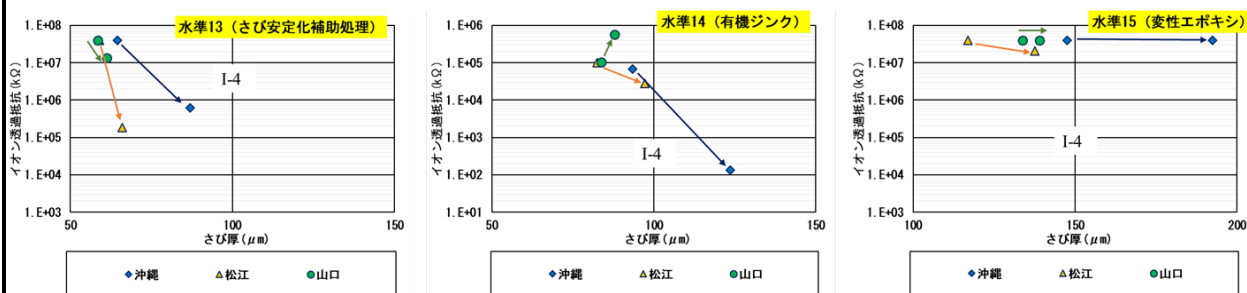


図-3.5 簡易塗装試験片

以上より、曝露開始から1年後における補修効果を表-3.3にまとめて示す。表中、「○」は補修効果が認められるもの、「×」は補修効果が認められないもの、「△」は補修効果が無いとは言い切れないものを示している。収集した補修事例において多く使用されているRc-Iは地域によらず補修効果が認められる。その他の補修方法には地域（腐食環境）により補修効果が異なるものもあり、今後の経過観察が必要である。

表-3.3 補修効果の比較

処理	水準	仕様	沖繩	松江	山口
重防食塗装	水準8	Rc-III	×	×	○
	水準9	Rc-II	○	○	○
	水準16	Rc-I	○	○	○
	水準17	Rc-I (水洗工法)	○	○	○
	水準18	Rc-I (水洗レス工法)	○	○	○
簡易塗装	水準13	ブラスト処理+さび安定化処理	×	×	△
	水準14	ブラスト処理+有機ジンク	×	△	○
	水準15	ブラスト処理+変性エポキシ	○	○	○
無塗装	水準6	動力工具	×	△	○
	水準7	動力工具+水洗	×	△	○
	水準10	ブラスト① (付着塩分量 50mg/m ² 以下)	×	○	○
	水準11	ブラスト② (付着塩分量 100~150mg/m ² 程度)	×	○	○
	水準12	ブラスト③ (付着塩分量400~500mg/m ² 程度)	×	○	○

4. 耐候性鋼材の腐食評価・補修フローの提案

耐候性鋼橋梁の長寿命化を図るためには、耐候性鋼材の腐食を正しく評価し、補修を含む維持管理を適切に実施する必要がある。しかし耐候性橋梁は無塗装で使用するため管理者と点検診断者ともに知識の不足は否めない。そのため、本研究で開発要素技術とともに、点検（腐食評価）・補修フローを提案する。

図-4.1は点検フェイズのフロー案である。点検時には腐食の進展の有無を確認することが重要である。そのためにはさび性状の評価が不可欠であり、本研究で実施している腐食判定法の高度化が活用できる。腐食の進展が認められた場合には、次の評価フェイズに移る。腐食の進展が認められない場合には、滞水・保水の原因となるような箇所を清掃し、次回の点検となる。

図-4.2は評価フェイズのフロー案である。まず、腐食の進展が認められた場合は、橋梁の安全性確保の見地から緊急補修の要否を判断し、必要であれば直ちに補修フェイズに移行する。緊急の補修が必要でない場合には腐食原因を調査し、腐食原因が特定されれば腐食速度を評価する。ここで、腐食原因が容易に判明しない場合には橋梁調査とともに本研究で開発する腐食シミュレーションを実施し腐食環境を推定する。腐食速度が速いと判断されれば補修フェイズに進むが、遅い場合には点検間隔を設定した上で経過観察とする。なお経過観察中にも腐食判定を随時行う。

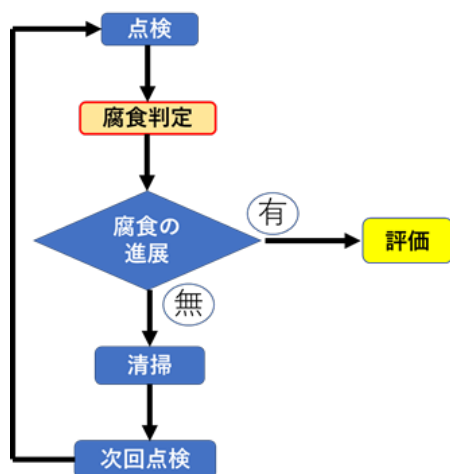


図-4.1 点検フェイズフロー案

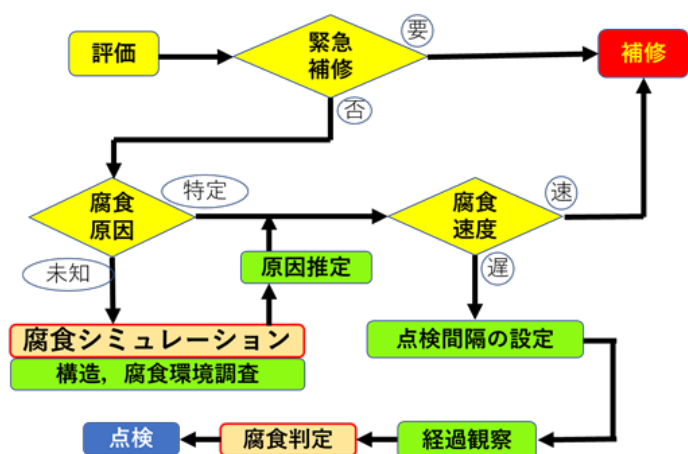


図-4.2 評価フェイズフロー案

図-4.3は補修フェイズのフロー案である。補修方法の判断にあたっては、対象としている腐食が将来的に進展するか否かの判断が必要である。すなわち過去に進行した腐食か現在も進行している腐食かを見極める。将来的な進展が無いと判断されれば、腐食部位のさびを除去する表面補修を実施すればよい。ただし、塩分環境によっては新たな腐食の進展が懸念されるため部分補修塗装を施す。将来的な進展が予想される場合、腐食範囲を調査する。その結果、腐食が広範囲に発生しておりさらに腐食原因の排除が困難な場合には防食方法の変更を検討することが望ましい。一方、腐食範囲に関わらず腐食原因が排除可能である場合には、この原因を排除する。腐食原因が完全に排除され、さらに同じ腐食原因が再現することが無いと予想される場合には、表面補修を施したうえで無塗装のままの継続使用とできる。なお、腐食範囲が局所的でも原因の排除が不可能な場合や、原因を排除しても同じ腐食原因が再現すると予想される場合には重防食塗装による部分補修塗装が必要である。

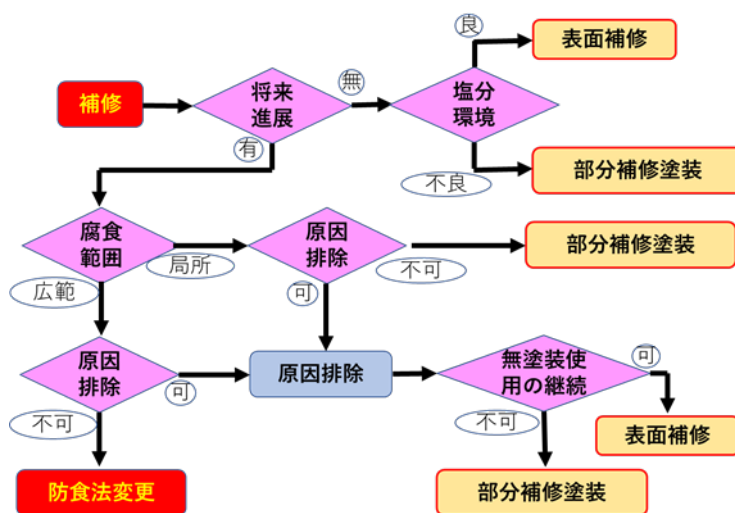


図-4.3 補修フェイズフロー案

以上のように、本年度は腐食評価・補修フローを提案した。今後、表面補修や部分補修塗装の仕様と環境条件の環境を、本研究で実施している曝露試験の結果より整理し、より具体的な方法を示す。また、これらのフロー案について実務者および管理者からの意見を聴取する予定である。

⑦研究成果の発表状況

(本研究から得られた研究成果について、学術誌等に発表した論文及び国際会議、学会等における発表等があれば記入。)

平成30年度はなし

⑧研究成果の活用方策

(本研究から得られた研究成果について、実務への適用に向けた活用方法・手段・今後の展開等を記入。また、研究期間終了後における、研究の継続性や成果活用の展開等をどのように確保するのかについて記述。)

本研究で得られた成果は広く社会への還元を目指す。腐食シミュレーションは平成31年度に実証試験を実施しその有効性を確認した後、環境の異なる橋梁へと適用しその成果を公表する。腐食評価に関する閾値等は学会発表・論文を通じて公表する。これを用いることにより活用可能となる。また、補修効果の解明に関する曝露試験結果も学会発表・論文を通じて公表するとともに、維持管理マニュアル案としてまとめる。補修方法まで踏み込んだマニュアルはこれまで無いため、橋梁管理者へ有益な情報を提供できる。

本研究開発期間終了後も、引き続き耐候性鋼橋梁の長寿命化の研究を継続する。特に、本研究開発の成果による試験施工と有効性の実証に注力する。また、橋梁管理者との協働により、腐食評価・補修マニュアルのスパイラルアップを目指す。

申請者らは中国地方整備局の橋梁保全アドバイザーをはじめとして橋梁管理者と密接な関係にあり、研究の継続および成果の活用は十分実施可能である。

⑨特記事項

(本研究から得られた知見，学内外等へのインパクト等，特記すべき事項があれば記入．また，研究の目的・目標からみた，研究成果の見通しや進捗の達成度についての自己評価も記入．)

- ① 橋梁の3Dモデルと風況シミュレーションを一体化することで，腐食原因の把握が可能となった．
- ② 耐候性鋼橋梁のさびを定量的に評価する手法およびそのためのツールを提案できた．これにより，従来の経験に左右される評価ではなく多くの技術者による評価が可能となり，耐候性鋼橋梁の点検における生産性の向上に寄与できる．
- ③ 異なる腐食環境下において，補修塗装の効果を確認する曝露試験を行った．曝露試験の結果が明らかになるにはなお時間が必要であるが，腐食環境により補修効果に差があることが示され，これまでにない成果が期待できる．
- ④ 耐候性鋼橋梁の補修フロー案を示した．今後，このフロー案の実用化を進めるが，補修方法まで示すこれまでにないマニュアルとなる．

以上より，本研究は計画通りに進捗していると判断できる．