

道路政策の質の向上に資する技術研究開発

【研究終了報告書】

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		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]	公募 タイプ	タイプIV
		[副領域]		
③研究経費 (単位:万円)	平成29年度	平成30年度	令和元年度	総合計
※端数切り捨て。実際の研究期間に応じて記入欄を合わせる こと	1,749	1,098	1,307	4,154
④研究者氏名	(研究代表者以外の研究者の氏名、所属・役職を記入下さい。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 (※令和2年3月31日現在)			
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			
⑤研究の目的・目標	(提案書に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入下さい。)			
<p>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。</p> <p>(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</p>				

⑥これまでの研究経過・目的の達成状況

本研究開発は大きく4つのパートからなっている。

「耐候性鋼橋梁の腐食予測シミュレーション技術の開発」は大屋，広瀬，武邊が担当し，モデル橋における腐食状況がシミュレート可能なシステムを開発した。さらに，このシステムを別橋梁に適用する実証解析を実施し良好な結果を得たことから当初の目的は達成できたと考える。

「ICT技術を援用した腐食判定法の高度化」は麻生が担当し，セロテープ試験に画像処理技術を援用した評価法を構築した。この評価法は実務者による第3者評価も実施しており，客観的な評価が可能となったことから当初の目的は達成された。なお，評価アルゴリズムは研究者が構築し，プログラムの作成および改良は外注により実施した。

「腐食耐候性鋼材の補修効果の解明」は麻生と武邊が担当し，沖縄，山口，島根にて各種補修鋼材の曝露試験を実施した。曝露試験に供する試験体の製作取り付けおよび試験途中での評価は外注により実施した。この結果，腐食環境により適用可能な補修方法を示すことができた。しかし，腐食環境の定量的評価と補修方法の関連付けを明確にするまでには至らなかった。

「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」については，フローの概略を提案するとともに，各要素技術について実務者からの意見を聴取した。これまでにない成果が得られたものの，この提案により維持管理を実施するまでには至らなかった。

⑦中間・FS評価で指摘を受けた事項への対応状況

H29年度 中間評価指摘事項

- 1) 耐候性鋼材の利用と，高度なシミュレーションを組み合わせることの必要性を十分に説明できるようにしていただきたい。
→ 耐候性鋼橋梁の建設前の腐食環境評価や防食設計，既設橋梁の腐食対策に高度なシミュレーションが有効であること，また，耐候性鋼橋梁の長寿命化を合理的な実施の可能性を示した。
- 2) 5段階の評点付けの検討では，単に現状の基準に合わせるのではなく，むしろその改善版（熟練技術者なら個人差の出ない評価が可能なもの）を提示することを視野に入れていただきたい。
→ 今回は現状の評点付けに対して個人差の出ない方法を提案した。対象とした評点の良否については今後の検討課題となろう。
- 3) 腐食判定法では，熟練技術者の評価を正解としているが，熟練技術者でも評価が分かれる場合があることから，そのような場合の対応や適用性を明らかにしていただきたい。
→ 評価が分かれる場合も考慮した閾値を設定した。また，技術者評価と提案法による評価が

分かれる場合の特徴について検討した.

- 4) 風由来の塩分と凍結防止剤由来の塩分を区別できるのか、区別する必要があるのか、道路管理者等との情報交換等により明らかにして研究開発を実施することが必要である。
→ 風由来の塩分組成には特徴がありますが、現地観測や調査において、風由来の塩分と凍結防止剤由来の塩分を区別することは困難である。耐候性鋼橋梁の異常腐食には、漏水による局所的なものと、風由来の海塩粒子による橋梁全体に影響を与えるものに大別される。耐候性鋼橋梁の長期耐久性を考慮した設計には、風由来の塩分による影響を評価することが重要であるため、本研究では、腐食予測シミュレーションシステムの開発において、漏水がなく海塩由来の塩分により異常腐食が生じた橋梁を解析対象とした。
- 5) 成果の普及の観点からは、画像からの外観評点の評価は、最終的に学会基準等としても提案できるように整理することが望ましい。
→ 学会基準を目指し、理論的かつ適用範囲を明確にした.

H30年度 中間評価指摘事項

- 1) 各研究開発項目について、相互の関係性とそれらを一体で進めなければならないことの必要性や効果について明確にした上で体系的に研究成果をとりまとめていただきたい。
- 2) 取り組みを予定している研究開発項目をパッケージングした成果の提案にこだわりすぎず、各要素技術について実用化につながる観点でさらに精度向上や改善についても努めていただきたい。

→ 上記2点の指摘について、研究全体を体系的にとりまとめるとともに、各要素技術について適用性や問題点を検討した.

⑧研究成果

本研究開発は大きく4つのパートからなっている。以下にそれぞれのパートにおける成果を述べる。

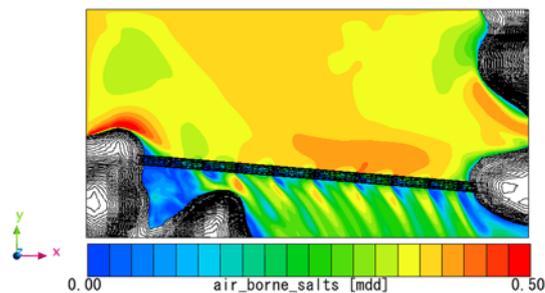
耐候性鋼橋梁の腐食予測シミュレーション技術の開発

耐候性鋼橋梁の腐食予測シミュレーション手法として、熱流体シミュレーションソフトウェアのSTREAMを基本として、3次元の地形データと橋梁モデルの連携を図った。地形モデルと橋梁モデルの連携には、STREAMと相性の良いRhinoのプラグインツールであるGrasshopperを用いた。地形モデルは、国土地理院の基盤情報システムよりダウンロードしたDEMデータ(点群データ)から、Grasshopperの機能を用いてサーフェス化、ソリッド化を自動的に行い、橋梁の3次元モデルを地形ソリッドモデルと容易に適切な位置に統合可能なシステムとした。

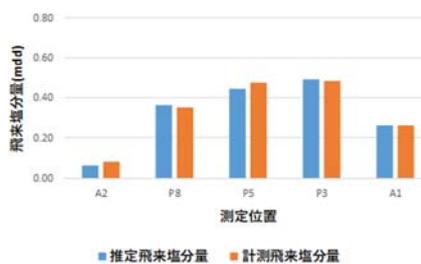
本研究において開発を行った耐候性鋼橋梁の腐食予測シミュレーションシステムの有効性を確認するために、(1)耐候性鋼橋梁の維持管理のための詳細調査が実施された園高架橋の腐食環境の評価に適用した。また、(2)供用年数34年の大型の圧延H形鋼を主桁に用いた合成鈹桁(H-BB-C)が部分的に異常腐食を生じており、補修工事に向けた詳細調査が実施された大畑橋の腐食マッピングの異常腐食の発生原因の検討に適用した。既設橋梁の適用において、園高架橋で観測された飛来塩分量の飛来状況をかかなりの精度でその傾向を評価可能であり、橋脚周辺の桁内への流入状況やその影響範囲と異常腐食を生じている範囲が良く一致していることを確認した。また、大畑橋の数値シミュレーションの結果から地形を考慮することにより、耐候性鋼橋梁の腐食状況と流れ場の状況が良く一致していることを確認した。

更に、園高架橋の腐食対策の一つとして、橋脚周辺の異常腐食が生じている部分に部分カバープレートを設置した場合の風の流れ状況の変化を本システムにより解析的に分析を行った。本検討結果より、防食に対する構造的な効果を検討する場合、本システムのように地形や構造の3次元モデルを活用することは有効であることが確認された。

本研究により、腐食予測シミュレーションシステムを構築する上での各種要素技術の開発を行い、数値シミュレーションの結果が既設耐候性鋼橋梁の腐食環境の調査結果を良い精度で評価可



(a) 地形を考慮した飛来塩分量の分布



(b) 飛来塩分量の観測値と推定値の比較

図-1 園高架橋の地形を考慮した飛来塩分量の解析結果と飛来塩分量

⑧研究成果（つづき）

能であることが確認できた。本システムは、耐候性鋼橋梁の建設時の調査、計画及び設計の際に、長寿命化を達成するための材料選定や構造の検討において有効なシステムと成り得ると思われる。また、既設橋梁の腐食環境を評価し、維持管理時の長寿命化対策を支援するツールとしても有効なシステムと成り得ると思われる。

ICT技術を援用した腐食判定法の高度化

耐候性鋼橋梁に生成したさびを客観的に評価するために、従来用いられているセロテープ試験の高度化を目的とした。そのために、さび画像から個々のさび粒子を同じ面積を持つ円に置き換え、その円の直径である円相当径により粒径加積曲線(図-2)を求め、この粒径加積曲線の累加百分率40%、及び、100%の円相当径と、さび評点を関連付ける閾値(表-1)を示した。

本研究で設定した評価基準による画像解析評価では、技術者評価との一致率が、評価基準設定時に用いたセロテープ試験試料における74.0% (377試料中279試料が一致) となり、評点4以上、および、評点2以下はほぼ技術者評価と一致する結果となった。また、評価基準設定時とは別のセロテープ試験試料における技術者評価と本研究で設定した評価基準による画像解析評価の一致率は92.1% (表-2) となり、技術者評価とほぼ一致していることが明らかとなった。従って、本研究の画像解析評価法は、詳細調査前のスクリーニングへの使用を前提とすれば、実用に供せる精度を有する手法であろう。さらに、I評点評価と本研究による画像解析評価を比較し、本研究による画像解析評価は、実用に供せる精度を有し、技術者評価と同程度で、且つ、既往の研究による画像解析評価よりも定量的な評価が可能であることが明らかとなった。なお、本手法の実用に際しては、さび粒子の採取方法(セロテープ試験の実施方法)や画像データの読み込み方法に留意する必要があると考える。

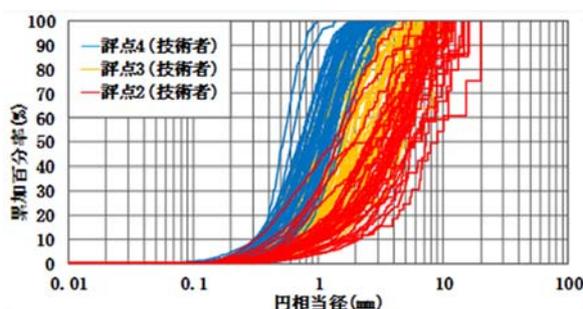


図-2 評点別粒径加積曲線

表-1 評点基準

	代表円相当径 (累加百分率40%)	最大円相当径 (累加百分率100%)
評点4以上	2mm未満	4mm未満
評点3	2mm以上4mm未満	4mm以上7mm未満
評点2以下	4mm以上	7mm以上

表-2 テストデータへの適用

		画像解析評価		
		評点4以上	評点3	評点2以下
技術者評価	評点4以上	90.0% (27/30)	10.0% (3/30)	0
	評点3	0	100.0% (3/3)	0
	評点2以下	0	0	100.0% (5/5)

⑧研究成果（つづき）

腐食耐候性鋼材の補修効果の解明

耐候性鋼橋梁の補修を実施するにあたり、多くの場合には部分補修塗装が適当と考える。その際、防食性能の確保の観点からは Rc-I 塗装系の適用が望ましいと考えるが、対象部位の状況によっては、ブラスト処理が必要な Rc-I 塗装系の適用が困難な場合もありうる。そこで本研究では、Rc-I 塗装系を含め種々の補修塗装を施した試験片を曝露することによりその補修効果を明らかにする。そのために、計 18 水準の試験片を製作し、腐食環境の異なる沖縄、島根、山口において曝露試験を継続実施した。このうち、山口では飛来塩分の影響を除くために、密封箱内曝露としている。これは、耐候性鋼橋梁の補修にあたっては腐食原因の排除が

まず実施されるため、腐食原因が排除されかつ塩分環境が穏やかな条件を再現するためである。

塗装試験片において、曝露開始 2 年後の外観観察評価を行った。さび安定化補助処理と有機ジンクリッチペイントは、沖縄、島根においてさびやふくれの発生が見られたが、同じ簡易塗装の変性エポキシ樹脂塗料は、良好な塗膜を維持していた。また、Rc-III 塗装系ではさびやふくれの発生が見られたが、Rc-II 塗装系は沖縄においても塗膜の異常はあまり見られず、有機ジンクリッチペイントが防食機能を発揮していると考えられる。

また、曝露開始 2 年後のさび厚およびイオン透過抵抗から、補修効果を検討した（表-3）。従来使用されている Rc-I 塗装系は腐食環境によらず防食効果を発揮している。また、下地処理が電動工具ながら防食下地を塗布する Rc-II も同様に防食効果は高い。さらに、変性エポキシ樹脂塗料を用いた補修方法でも、沖縄、島根においても腐食進行はほとんど見られず防食効果が期待できる。一方、さびを除去するのみの無塗装鋼材では、飛来塩分の影響を受けない場合には効果が期待できるものの、島根では曝露試験の継続実施により判断する必要がある。

以上の結果より、補修実施のための留意点を検討した。腐食環境を踏まえた各補修方法の適用性を分類した。飛来塩分の影響を受ける地域では、Rc-II 塗装系、Rc-I 塗装系（水洗レス工法含む）、また、応急延命的措置として有機ジンクリッチペイントと変性エポキシ樹脂塗料が適用可能であると判断した。飛来塩分の影響を受けない地域では、Rc-II 塗装系、Rc-I 塗装系（水洗レス工法含む）、簡易塗装、さらに腐食要因が完全に排除された場合には無塗装による補修も有効であると考えられる。

表-3 補修効果総括

処理	水準	補修方法	沖縄	島根	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+さび安定化補助処理	×	×	○
	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	ブラスト処理① (付着塩分量 50mg/m ² 以下)	×	△	○
	水準11	ブラスト処理② (付着塩分量 100~150mg/m ² 程度)	×	△	○
	水準12	ブラスト処理③ (付着塩分量 400~500mg/m ² 程度)	×	△	○

⑧研究成果（つづき）

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

本研究の成果を診断補修マニュアルとして一般に普及する観点から、(1)腐食予測シミュレーション技術、(2)腐食判定法、(3)補修手順についてフローを提案した。

耐候性鋼橋梁の腐食判定は点検時に実施することとなる。そこで、まず点検の流れを図-3 に示す。通常の点検（定期点検）では、部材の健全性の把握が必要となる。耐候性鋼橋梁の場合、部材の健全性とさび性状は密接に関係する。そのため、定期点検においては従来の目視点検に加えて腐食判定を行うことが必要となる。さらに、腐食についてはその速度が問題となる。すなわち、点検時点で腐食が進んでいる状態であってもその腐食が現に進行しているのか、あるいは過去に進行し点検時には腐食の進行が抑制されているのかの判断が必要である。点検において腐食の進展が認められ、その腐食の評価を行う際の腐食原因の推定において、腐食予測シミュレーションが必要となる。腐食原因推定の流れを図-4 に示す。腐食原因については、対象橋梁の構造、腐食環境の調査を実施し、原因の推定を行う。原因推定の際に、腐食予測シミュレーションを用いると、定量的な評価を行うことが可能である。腐食予測シミュレーションシステムのためには、周辺地形モデル、橋梁モデル、外部風条件や対象橋梁周辺の飛来塩分量、または空气中塩分濃度の腐食環境条件が必要である。

腐食判定により異常さびの進展が認められた場合には、評価のフェイズとなる。評価フェイズの流れを図-5 に示す。評価フェイズにあたって、既に板厚減少等により緊急に補修が必要な状態となっていれば、補修フェイズに移る。緊急補修が必要でない場合には、まず腐食原因を解明する。その際、漏水等の原因が特定される場合と、原因が容易には解明できない場合が考えられる。腐食原因が容易に判明しない場合には、第2章で示した腐食シミュレーションおよび腐食環境調査により原因を推定することとなる。腐食原因が特定あるいは推定されれば、次に腐食速度を評価する。これには前回の点検結果が有効である。腐食速度が速く今後の腐食の進展が見込まれ早期の補修が必要と判断されれば補修フェイズに進む。一方、腐食速度が遅い場合には経過観察とし、点検間隔を設定する。特に問題がなければ定期点検の5年として良いが、特段考慮する事情があれば適宜短い期間を設定する。

補修フェイズの流れを図-6 に示す。補修の実施にあたって、腐食原因が特定され将来腐食の進展がない場合には、塩分環境の良否により表面補修（無塗装）で実施する場合と、部分補修塗



図-3 点検の流れ



図-4 シミュレーションの流れ

⑧研究成果（つづき）

装を施す場合が想定される。ここで、表面補修とは鋼材表面のさびを除去することを言い、部分補修塗装とは何らかの塗膜を形成することを言う。補修にあたっては補修範囲を確定する必要がある。そのため、腐食マップを作成する。腐食した耐候性鋼橋梁の補修にあたっては、原因の排除を第1に考えなければならない。腐食範囲の広狭によらず、腐食原因が排除可能な場合には排除する。しかし、腐食が橋梁の広範囲に渡り、原因の排除が困難な場合には防食方法の変更も必要である。防食方法の変更にあたっては、耐候性鋼橋梁のさびを除去することは現実的でない。そのため、桁を覆うカバープレートのようなものを設置し、腐食環境を変更する方法が現実的であろう。また、腐食範囲が局部的でかつ原因の排除ができない、あるいは原因を排除しても早期に腐食が再現されると想定される場合には、重防食塗装による部分補修塗装が良い。原因の排除が可能となった場合には、無塗装での使用が継続可能であることもある。その場合にはさびおよび表面塩分を除去する表面補修を施したのち、裸で使用を続ける。しかし、裸での継続使用に懸念が持たれる場合には、簡易な補修塗装を施すこともあろう。

本研究において対象としたシミュレーション技術、さび評価技術、補修技術について、管理者に意見聴取をおこなった。聴取した意見を踏まえ、本研究で開発した技術の適用について整理した。腐食予測シミュレーションに対してはシミュレーションの有用性は認識しながらも、コスト面についての疑念が示された。また、腐食判定法については管理者としては発生しているさびが保護性さびなのか、異常さびなのかの判断が重要であるとの認識である。ここで、異常さびを外観評点2または1と考えれば、本研究により開発したシステムによる判別も可能である。この点で、本研究で開発した腐食判定システムは実務において有用であると考えられる。さらに異常腐食した耐候性鋼橋梁の補修について、管理者が効率的な補修工法の選定に苦慮している実態が明らかとなった。特に補修工法選択の際にコストと耐用年数の設定に苦慮するとの意見があった。本研究で目的とした各種補修工法の効果解明は、このような管理者ニーズに応えるものである。本研究により、部分的な異常さびの補修方法を提示することができた。

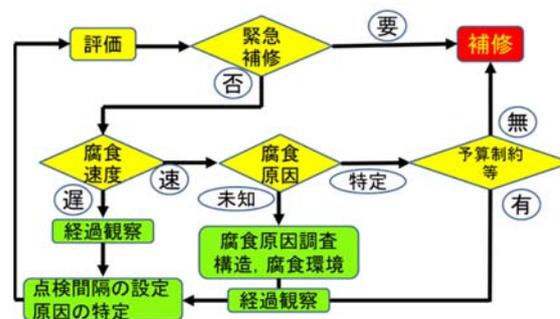


図-5 評価の流れ

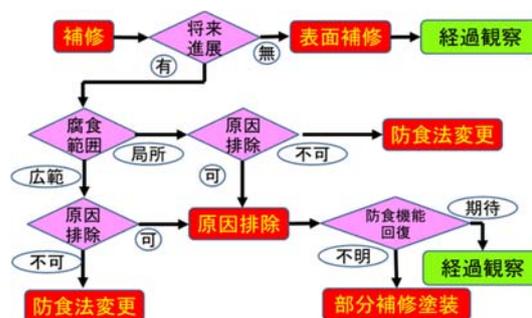


図-6 補修の流れ

研究成果の発表状況

- 1) T. Aso, Y. Tokieda, K. Tajima, Y. Nakamura, K. Sakamoto, Rust Rating System using Image Analysis for Weathering Steel Bridges , Proceeding of Bridge Engineering Institute Conference, pp.88 – 92, 2019.
- 2) 時枝祐仁, 田島 啓司, 麻生稔彦, 中村保則, 坂元一雄, セロテープ試験による耐候性鋼材上のさび評価の高度化に関する検討, 土木学会第 74 回年次学術講演会, 2019.
- 3) 杉山裕夏, 麻生 稔彦, 田島 啓司, 腐食した耐候性鋼材の補修塗装に関する検討, 第 71 回土木学会中国支部研究発表会, 2019.
- 4) 広瀬 望, 大屋 誠, 武邊勝道, 麻生稔彦, 田中健太郎, 地形を考慮した耐候性鋼橋梁の腐食環境評価, 土木学会第 75 回年次学術講演会, 2020.

⑩研究成果の社会への情報発信

論文発表, 講演の他は特になし

⑪研究の今後の課題・展望等

本研究が目指した開発については概ね達成できたと考える。しかし、本研究に関連して今後解決すべき課題もいくつかある。以下に今後の課題・展望を列挙する。

防食に対する構造的な効果や周辺環境の影響を検討する場合、本研究で用いたシステムのように地形や構造の3次元モデルを活用することは有効であり、点検時の容易さや手法の検討、腐食部位やその程度を設計時に検討することが可能であるため、鋼橋の長寿命化に有効な手法と成ることを確認した。数値解析を用いた橋梁の腐食評価には、解析領域の大きさ、モデルの詳細度、要素サイズ、適切な境界条件の設定や風の高塩粒子の影響だけでなく温度、湿度、風による乾燥効果などの環境条件の設定など検討課題はあるが、鋼構造物の長寿命化を考慮した設計の高度化向け、さらなる研究を行いたい。

AIを援用したさび判定においては、概ね技術者と同一評価が可能となるシステムが構築できた。一方、教師データの信頼性（技術者間の相違）は常に問題となる。本研究では技術者によらない定量的評価手法との比較も行い良好な結果を得ているものの、中間評価での指摘にもあるように現行の評価レベル自体に関する検討を実施したい。

曝露試験により補修方法と腐食環境の定性的な関係を明らかにできた。今後はこの成果をもとに実橋梁に対する試験補修を実施、曝露試験との比較検討により補修方法のさらなる信頼性の向上に努めたい。

⑫研究成果の道路行政への反映

耐候性鋼橋梁は無塗装で使用できることからLCCの観点から有利となるため、近年多くの橋梁が架設された。本研究の成果はこれらの橋梁の維持管理に適用でき、耐候性鋼橋梁の長寿命化に貢献できる成果である。すなわち、耐候性鋼橋梁に予期せぬ腐食が発生した場合に、腐食原因を推定するためのシミュレーション、腐食状態の評価、長寿命化のための補修を一連の流れとして捉えた研究である。

本研究の成果は国土交通省倉吉河川国道事務所管内の園高架橋の補修検討において適用されている。園高架橋はシミュレーションモデルの構築対象橋梁であり、本研究で開発したシミュレーション技術により、腐食と飛来塩分量との関係を検討した。また、補修にあたっては、本研究で実施した補修方法のいくつかを試験施工することとなっている。

また、本研究の成果は広い範囲の橋梁管理者、点検業者、施工業者により実施可能であり、道路政策の質の向上に大いに資する成果と考える。

⑬自己評価

耐候性鋼橋梁について、耐候性鋼橋梁の腐食予測シミュレーション技術の開発、ICT技術を援用した腐食判定法の高度化、腐食耐候性鋼材の補修効果の解明に関する各技術の開発をおこない、耐候性鋼橋梁の合理的な維持管理と長寿命化に資することができる成果を挙げられたと考えている。特に耐候性鋼橋梁の維持管理を一連の流れとしてとらえ、これに資する技術を提供できたことは実務での適用を想定した場合には有用な成果である。研究費は暴露試験の実施と評価、さび評価プログラムの作成と改良に多く投資したが、これまでにない補修した耐候性鋼材の再腐食の継時変化データが得られたこと、セロテープ試験結果の自動判定システムが構築できたことなど、その投資にみあう成果が得られている。