

耐候性鋼橋梁の維持管理に関する研究

Research on the maintenance management  
of weathering steel bridge

愛媛大学大学院理工学研究科博士後期課程生産環境工学専攻

古川 清司

2014年12月



# 目 次

第1章 序 論	1
1.1 研究の背景と目的	1
1.2 我が国における耐候性鋼橋梁の現状	2
1.3 耐候性鋼のメカニズム	5
1.4 既往の研究成果	6
1.4.1 研究経緯	6
1.4.2 四国の高速道路における追跡調査の概要	7
1.4.3 耐候性鋼橋梁維持管理マニュアルの概要	8
1.4.4 耐候性鋼橋梁維持管理マニュアルの改訂	9
1.5 本研究の構成	10
第2章 四国の高速道路における耐候性鋼橋梁の現状	12
2.1 四国の高速道路における耐候性鋼橋梁の採用状況	12
2.2 耐候性鋼橋梁の腐食環境	13
2.3 高知自動車道の概要	13
2.3.1 高知自動車道の路線状況	13
2.3.2 高知自動車道の現状	14
2.3.3 耐候性鋼橋梁の維持管理	14
2.4 I期線（2008年7月までの暫定供用）における損傷の発生状況と対策	17
2.4.1 床版上面・配水管からの漏水による損傷と対策	17
2.4.2 伸縮装置からの漏水による損傷と対策	19
2.5 II期線（2008年7月以降の完成4車供用）建設時の対応	20
2.6 環境条件に起因した損傷	21
2.7 予防保全への取り組み	24
2.7.1 凍結防止剤の除去	24
2.7.2 漏水対策後の検証	26
2.7.3 補修塗装の実施	27
2.7.4 点検の着眼点	28
2.8 まとめ	29
第3章 画像解析を援用した耐候性鋼材の外観評価判定手法の開発	31
3.1 既往の研究	31
3.2 研究目的	32
3.3 耐候性鋼材の腐食度評価	32
3.3.1 目視によるさび外観評価手法	32
3.3.2 画像標本	34
3.4 画像解析手法	35
3.4.1 解析概要	35

3.4.2	二値化によるさび影部の抽出	36
3.4.3	同時生起行列を用いたテクスチャ特徴量の算出	40
3.4.4	2次元フーリエ変換を用いたテクスチャ特徴量の算出	47
3.4.5	ロジスティック回帰分析を用いた評価式の導出	51
3.5	評価結果	54
3.5.1	標本予測精度	54
3.5.2	判別精度の比較及び検討	57
3.5.3	最適モデルの検討	73
3.6	まとめ	83
第4章	耐候性鋼橋梁の腐食損傷による耐荷力劣化の評価および将来予測	84
4.1	平瀬橋の車両載荷試験	84
4.1.1	平瀬橋の概要および外観目視点検結果	84
4.1.2	車両載荷試験	87
4.2	有限要素解析による残存耐荷性能評価・予測手法	91
4.2.1	有限要素モデルの概要	91
4.2.2	板厚減少による耐荷性能劣化機構	92
4.2.3	車両載荷試験を用いたモデルの妥当性の検証	95
4.3	耐荷性能の劣化予測評価手法	95
4.4	まとめ	99
第5章	耐候性鋼橋梁の補修塗装に関する研究	100
5.1	補修塗装工法の現状	100
5.2	試験の概要	101
5.3	試験結果	107
5.4	まとめ	110
第6章	結論	112
謝辞		115
参考文献		116
付録-1	： 第5章 耐候性鋼橋梁の補修塗装に関する研究：すべての試験結果	
付録-2	： 耐候性鋼橋梁維持管理要領	

# 第1章 序 論

## 1.1 研究の背景と目的

我が国の社会資本は、戦後から高度経済成長期を通じて現在に至るまで着実に整備が進められ、産業の発展、国民生活の安全や利便性の向上に貢献してきた。中でも高速道路は、全国的な自動車交通網を形成する高規格幹線道路網として約 14,000 k mの内、高速自動車道として約 11,520 k mが計画され、現在、約 8,331 k mが供用されており社会基盤整備の重要な一翼を担っている。

四国の高速自動車道も約 662 k mが計画され、1985 年（昭和 60 年）3 月 27 日に四国縦貫道の土居－三島川之江間（11.0km）が始めて開通し、現在、各県の県庁所在地を結ぶエクスハイウェイが完成しており、約 490 k mが供用されている<sup>1)</sup>。

このように、着実な高速道路の整備が進む中で、2011 年（平成 23 年）3 月 11 日に発生した東日本大震災では、我が国の観測史上最大規模の地震動と津波により、多くの社会資本が著しい被害を受けたが、高速道路はいち早く復旧し、被災地への緊急物資輸送などでその重要性が再認識された。

一方で、2012 年（平成 24 年）12 月 2 日に発生した中央自動車道笹子トンネル天井板崩落事故を契機に、道路構造物の老朽化問題が注目された。老朽化が進めばいずれ社会資本として求められる役割を果たせなくなり、突然その機能を失うことが明らかとなり、莫大な更新費用が必要となることから、供用期間中でも適切な維持管理や必要な補修を行っていくことが求められるようになった。

人口減少や少子高齢化等、我が国を取り巻く社会情勢は大きく変化しており、限られた財源のもとで適切な社会資本サービスを提供し続けていくことが求められているが、我が国の道路橋・トンネルなどの社会基盤施設は 1964 年（昭和 39 年）の東京オリンピックに象徴される高度経済成長期に一斉に整備が始められたものであり、当時建設された多くが耐用年数とされる 50 年を超え、補修・更新時期を迎えている。国土交通白書<sup>2)</sup>によれば、今後 20 年間で、建設後 50 年以上経過する施設の割合が、2013 年度と 2033 年度を比較すると、道路橋で約 18%から 67%へ、トンネルで約 20%から 50%へと加速度的に高くなる見込みを示し、老朽化に伴う事故が懸念される現実に直面するとされている。高速道路も例外ではなく、老朽化に伴う耐久性の低下や地震災害による交通機能の停止が懸念されている。

このような背景から、国土交通省では、道路ストックの総点検として、国民生活や経済の基盤であるインフラが的確に維持されるよう、2013年度を「社会資本のメンテナンス元年」とし、今後、3カ年にわたる当面講ずべき措置として、様々な施設の老朽化対策に総合的かつ重点的に取り組んで行くこととされた。

一方で、四国の高速道路は、今後、発生が予測されている東南海・南海地震に備え、防災対策・危機管理の面からもその役割が期待されており、供用後約30年と比較的新しい路線ではあることから、戦略的な維持管理・更新を行うことが求められている。四国の高速道路を管理する西日本高速道路(株)においても道路ストックの総点検として、今までに点検が不十分であった道路付属物を含めたすべてについて、漏れなく確実に3カ年で実施することとしており、その後は、定期点検として1回/5年の頻度で点検サイクルをまわすことになっている。

道路ストックの適切な維持管理として、1回/5年の頻度で行われる定期点検は、多くの構造物に有効な方法であるが、四国の高速道路の中でも高知自動車道に多く採用されている耐候性鋼橋梁は、建設当初から実施されてきた追跡調査の結果として、漏水等の影響により1~2年で急速に損傷が拡大することが確認されており、定期点検が求める頻度では急速な損傷の拡大が懸念されている。

このような現状から、本研究では耐候性鋼橋梁に着目して維持管理における問題点を整理し、効率的な点検手法や補修方法の最適化を提案することを目的として取り組んだものである。

## 1.2 我が国における耐候性鋼橋梁の現状

我が国の橋梁(15m以上)は約15万橋と言われ、その約40%が鋼橋(2,056万t)とされており、耐候性鋼橋梁は、鋼橋の中でも約9%であるが、現在、約6,700橋(175万t)が建設されていると言われている。1950年代後半にアメリカから導入された耐候性鋼は、国内での開発研究を得て1967年に道路橋(愛知県:知多2号橋)として無塗装橋梁が初めて施工され現在に至っており、受注重量は、1999年度がピークで、その後減少しているものの、2012年度は、約5万4千tとなっている。

年度別の建設推移は、耐候性鋼橋梁 実績資料集（第19版）<sup>3)</sup> でまとめられており、図1-1に示すとおりである。

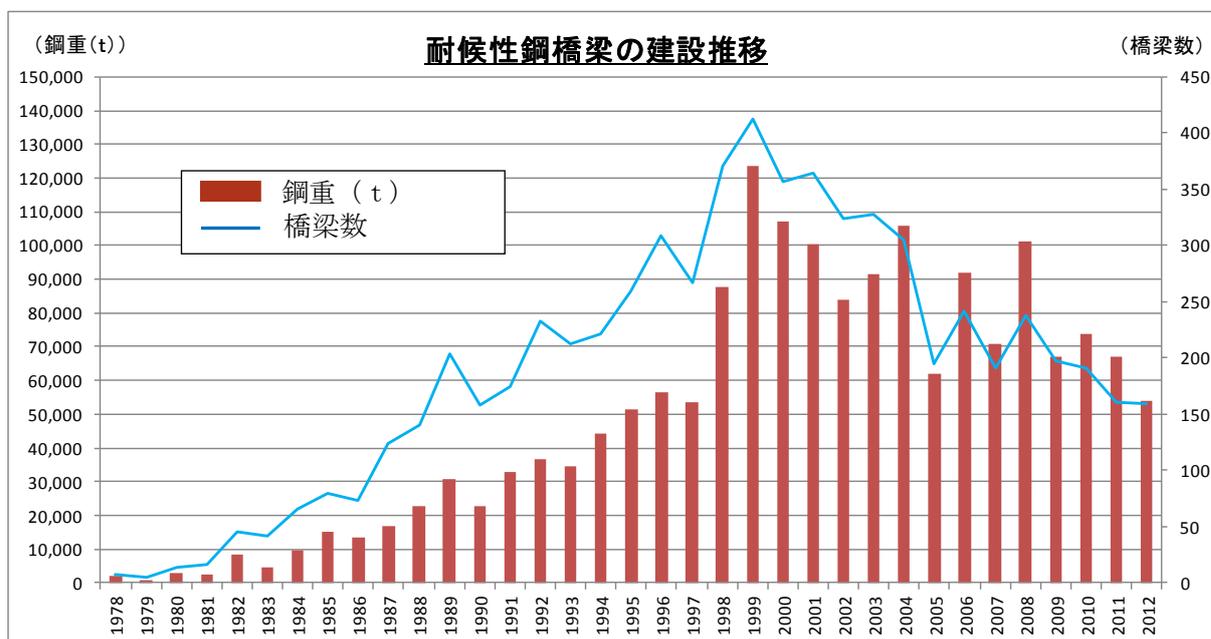


図1-1 耐候性鋼橋梁の年度別建設推移

建設状況を発注者別に見ると図1-2に示すように国土交通省や都道府県・市町村での採用が多く、耐候性鋼橋梁全体の約9割（約6,000橋）が建設され管理されている。また、図1-3には、地方別の建設状況を示すが、全体では北関東・甲信及び東海地方での建設が多いことがわかる。図1-4には、NEXCOでの採用件数を地方別に示しており、四国地方が28%と比較的多いという状況が分かる。

全国で約6,700橋が供用されている中で、特に、都道府県・市町村等では、点検技術者や予算の不足から十分な調査や対策が取られて来なかった現状がある。そこで、四国の高速道路で取組んできた追跡調査結果や補修対策の実施事例を把握し、維持管理に対する問題点等を整理することは、建設割合は高いが点検や維持管理への取組みが進んでいない都道府県・市町村等への参考資料とすることができ、効率的な点検手法や補修方法の最適化を目指す本研究の結果を示すことは、有意義であると言える。

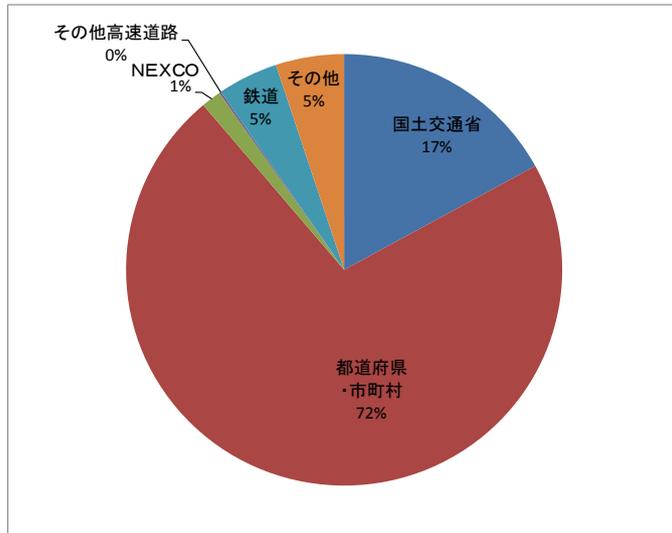


図 1-2 発注者別 耐候性鋼橋梁の建設割合

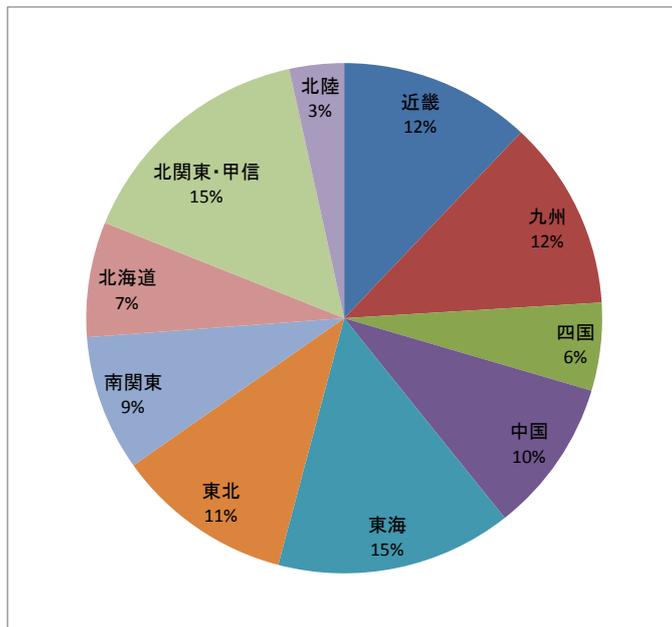


図 1-3 地方別建設状況

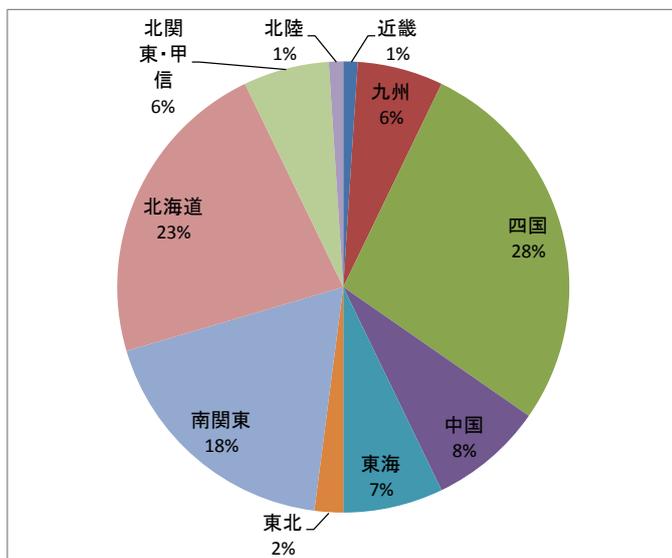


図 1-4 NEXCOでの地方別採用実績

### 1.3 耐候性鋼のメカニズム

ここで、耐候性鋼橋梁のメカニズムについて触れておく。耐候性鋼は大気中において乾湿を適切に繰り返すうち、その表面に緻密で密着性に優れたさびが形成されるものである。また、耐候性鋼は腐食速度が遅くなるため、無塗装でも使用できる「さびでもってさびを制する」鋼で、耐候性鋼特有のさびは「保護性さび」と呼ばれている。

図 1-5 は耐候性鋼材と普通鋼材のさび層の比較を模式的に示したもので、耐候性鋼材の保護性さびは普通鋼材のさび層と異なり、2層構造をとっている。2層構造の外側が外層さび、鋼材に近い内側が内層さびと呼ばれる。

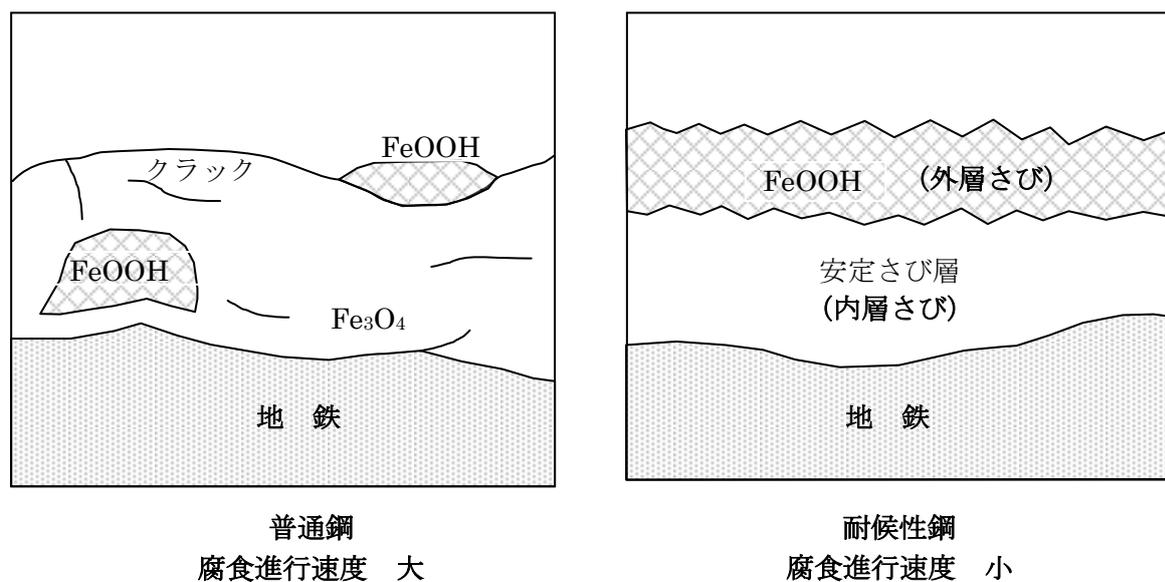


図 1-5 さびの構造模式図

耐候性鋼の「保護性さび」は、内層さびに特徴があり、内層さびは、耐候性鋼に少量添加されている Cu（銅）、Cr（クロム）、Ni（ニッケル）、P（りん）などの合金元素が濃縮して、緻密で微細なさび層を形成する。内層さびは、さびが非常に細かく安定さび層と呼ばれる。この安定さび層は、水や酸素を透過しにくいため、高い環境遮断機能を実現して、防食性を発揮し、図 1-6 に示すように普通鋼と比較しても耐食性が高いとされている。

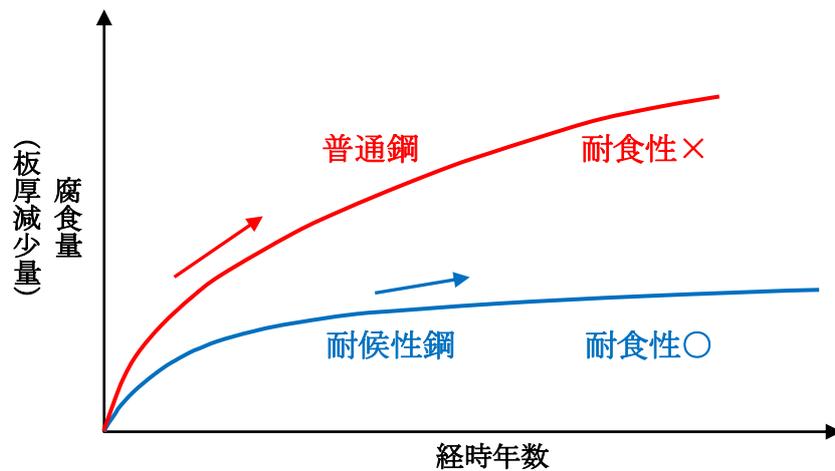


図 1-6 普通鋼と耐候性鋼の腐食量と経時年数の概念図

## 1.4 既往の研究成果

### 1.4.1 研究経緯

耐候性鋼橋梁は、鋼材表面に緻密な保護性さびの皮膜を形成させることにより鋼材腐食を抑制し、建設時の塗装および補修塗装費用の低減を図ることを目的に、高速道路でも、1985年に八戸自動車道の大鳥第二橋で採用され、以来、全国で採用されてきた。一方で耐候性鋼橋梁の維持管理に関する取り組みも、1985年に東北自動車道で積雪寒冷地における耐候性鋼材の適用に関する調査が行われ、その翌年から設計・施工要領（案）および追跡調査の手引き（案）など維持管理に関する基準類が作成され、本格的な維持管理についての検討が始められた。

耐候性鋼橋梁を多く抱える四国においても、普通鋼に Cu（銅）、Cr（クロム）、Ni（ニッケル）、P（リン）などの合金元素を添加することにより、大気中での適度な乾湿の繰返しで「保護性さび」と呼ばれる表面に緻密なさび層を形成し、鋼材表面を被覆することで溶接性などの所要特性を損なうことなく耐食性を向上させるものとして、維持管理費を含むトータルコストの削減を目的に採用されたものであり、I期線（2008年7月までの暫定供用区間）の建設当初から追跡調査が行われ、調査の方法・評価、補修の基本的考え、桁洗浄など維持管理に関する検討が行われてきた。



### 1.4.3 耐候性鋼橋梁維持管理マニュアル<sup>4)</sup>の概要

耐候性鋼橋梁は、適切な環境条件のもとで緻密なさびが鋼材表面を覆うことでやがて板厚減少速度は非常に小さいものとなるが、時間の経過とともに確実に鋼材の板厚減少が進行するとされている。板厚減少に問題が生じない状態にとどめるよう制御するためには、維持管理段階において適切な措置を行う必要があり、鈹桁橋については、設計供用期間を当面 100 年とし、板厚減少量は片面について 1mm 以下を目標として定期的な板厚調査を行うことが求められている。特に、四国管内の耐候性鋼橋梁では腐食に対する余裕代（しろ）が見込まれておらず、供用時に比べ性能低下した状態を許容した維持管理とならざるを得ないことから、一般の構造物にもまして適切な維持管理の必要性が指摘されている。

維持管理における問題として、凍結防止剤の影響が懸念されており、通過車両により巻き上げられた凍結防止剤が隣接する橋梁や自橋に飛散する場合と伸縮装置や排水装置の不具合で生じる漏水などにより鋼材表面に凍結防止剤が付着する場合の 2 種類があるとされ、凍結防止剤による影響が、道路構造物自身の経年劣化と相俟って、今後さらに板厚減少が進行する可能性を指摘している。

さらに、設置環境の異なる区間においては、板厚の減少傾向を調査把握することで、適切な維持管理を推進していく必要性が求められている。

また、試験施工として実施された桁の水洗い試験については、定期的な水洗いが必要であることを示唆する結果が得られており、冬季の雪氷期間が終了した段階で継続的に桁の水洗いを行うことが求められている。

補修については、損傷原因、損傷範囲等を十分に把握した上で補修するものとするが、床版のコンクリート打継ぎ目部からの漏水も多く確認されていることから、床版防水工の施工を原則とし、伸縮装置等からの漏水が原因である場合には、まず、漏水対策を講じることとしている。なお、漏水以外の地形等架設環境が原因とされる場合は塗装によるものとして、その施工範囲が示されている。

これらの結果を示し、Ⅱ期線施工に対する参考資料としての位置づけで 2009 年 8 月に「耐候性鋼橋梁維持管理マニュアル」<sup>4)</sup>が作成された。しかし、維持管理を行う上での新たな課題や問題点も生じており、今回、本研究の結果を反映した「耐候性鋼橋梁維持管理要領」としてまとめ、他機関でも点検や補修対策を立案する上で参考とできるように取りまとめた。

#### 1.4.4 耐候性鋼橋梁維持管理マニュアル<sup>4)</sup>の改訂

既存の耐候性鋼橋梁維持管理マニュアル<sup>4)</sup>の課題・問題点は以下のとおりであり、本研究の結果より改訂した点を合わせて示す。

- ① 既存マニュアルでは、定期点検サイクルを1回/5年としている。しかし、第2章の耐候性鋼橋梁の現状で示すとおり、漏水等に起因する桁の損傷は、1~2年で急激に進み、部材の取替えを余儀なくされることがある。そこで、日常点検など継続的な調査の必要性を明らかにし、漏水が確認された場合には、臨時点検により詳細を確認することとして維持管理フローを改訂した。
- ② 維持管理においても第2章から、凍結防止剤を散布する地域では、適切な時期に桁の水洗いを行うことが効果的であり、水洗いを数回繰返すことが良いことを明確に示した。また、地山との近接箇所では立ち木の処理を行うことで風通しを良くし、桁の乾燥を促す維持管理が重要であることを示した。
- ③ 外観調査において、目視判断のみでは点検技術者による評価差で、補修塗装範囲の過大評価が生じ、不経済となる可能性があることから、第3章で示す定量的・客観的なさび評価判定手法である画像解析・統計的解析を取り入れた調査を実施できるものとして改訂した。
- ④ 詳細調査の実施においては、今後の腐食損傷による耐荷力劣化の評価・将来予測手法として、第4章で示す有限要素解析を用いた現状評価と残存保有性能の評価・予測によりの確な橋梁の緊急補修や対策の必要性を判断する手法が有効であることを示した。
- ⑤ 補修においては、第5章に示すとおり、現在使用されている重防食塗装仕様の耐久性が素地調整程度によって保てない場合があることから、新たに開発されている環境遮断性を向上させた塗料の使用や素地調整が確実にできる場合は金属溶射を考慮するなど柔軟な対応が可能であることを示した。

以上の内容は、付録-2「耐候性鋼橋梁維持管理要領」に添付しており、改訂箇所をアンダーラインで示している。

## 1.5 本研究の構成

本研究の構成は、第1章の序論で研究に至る背景を述べ、本研究の必要性と目的を説明している。

背景からは、全国の耐候性鋼橋梁の建設推移から建設割合の高い都道府県・市町村において点検技術者や予算の不足から点検の実施が進んでいないことが想像できた。そこで、本研究の目的は、四国の高速道路で行われてきた追跡調査や維持管理に対する取組みを示すことで、耐候性鋼橋梁に対する維持管理の問題点を整理し、効率的な点検手法や桁の残存保有性能の評価・将来予測、補修方法の中でも有効な補修塗装工法を提案したものであり、それぞれの概要は下記に示すとおりである。

第2章では、四国の高速道路における耐候性鋼橋梁の維持管理の現状を紹介し、これまでの経験から得られた問題点を整理している。

第3章では、第2章で述べた点検の着眼点である腐食進行状況を把握するため、点検時における桁外観の損傷判定について、点検技術者の能力の如何を問わず、写真による画像解析と統計解析により定量的・客観的に評価する手法を示した。

第4章では、耐候性鋼橋梁のさび促進による板厚減少が橋梁に及ぼす影響について、実橋を用いたひずみ応力測定結果と第3章で得られた外観調査結果から推定される板厚減少を有限要素解析モデルに導入し、現在および将来的な残存保有性能を評価・予測する手法を示した。

第5章では、耐候性鋼橋梁の補修工法として、十分な素地調整を確保することが困難な桁端部等でも採用可能な補修工法を提案するため、数ある塗装工法の中から耐久性の高いといわれる塗装工法に着目して室内試験（温水 60℃浸せき試験）を行い、3種ケレン程度の素地調整でも十分な耐久性が確保できる塗装工法があることを示した。本工法は、第4章で示した損傷状態から残存保有性能を評価・予測し、的確に橋梁の緊急補修や対策を行う一工法として活用できる。

第6章は、結論として研究成果を取りまとめている。

本研究の構成は、次頁の「図 1-7 研究フロー」に示すとおりである。

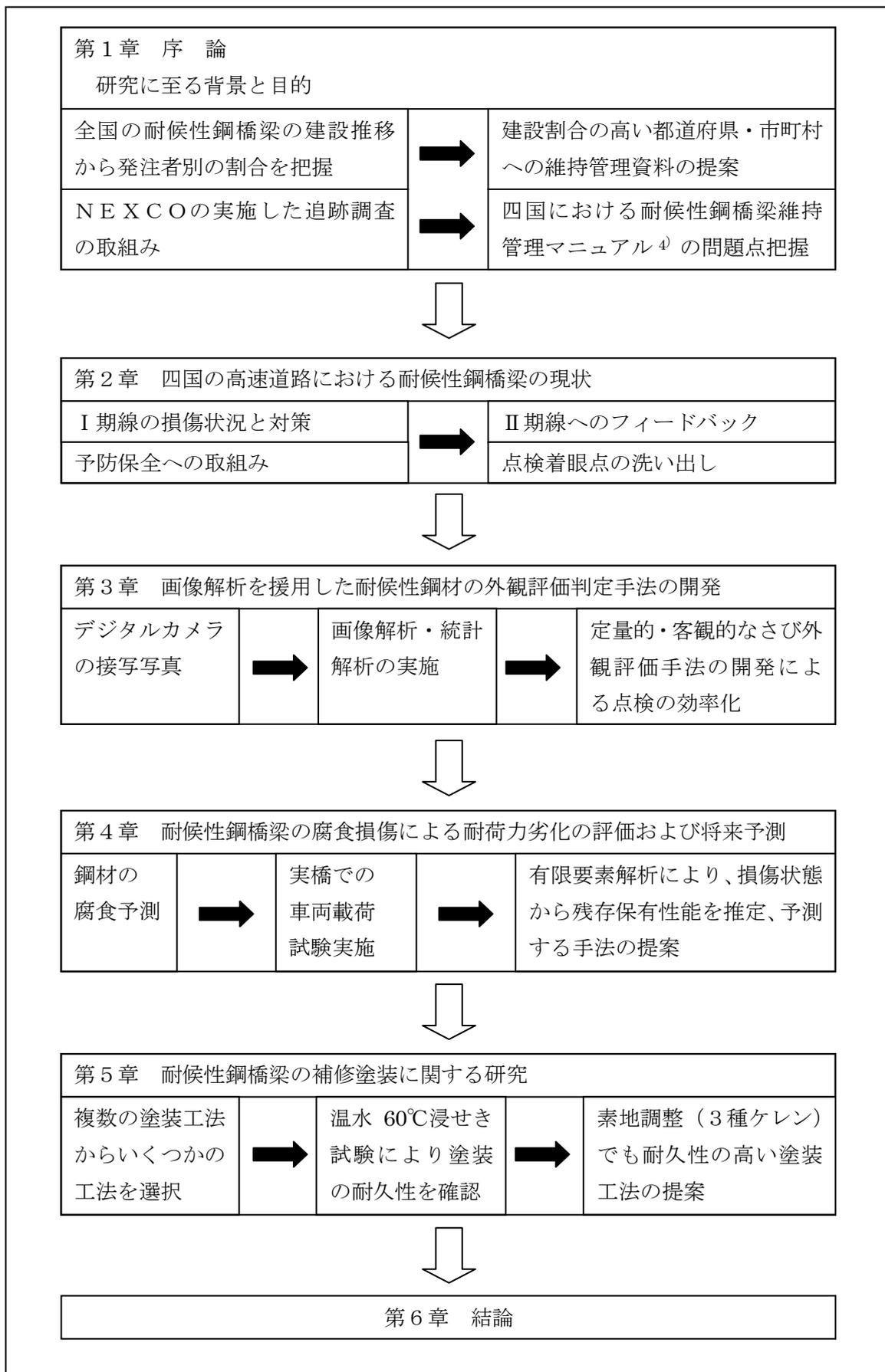


図 1-7 研究フロー

## 第2章 四国の高速道路における耐候性鋼橋梁の現状

### 2.1 四国の高速道路における耐候性鋼橋梁の採用状況

耐候性鋼は、普通鋼に Cu（銅）、Cr（クロム）、Ni（ニッケル）、P（リン）などの合金元素を添加することにより、大気中での適度な乾湿の繰り返しで「保護性さび」と呼ばれる表面に緻密なさび層を形成し、鋼材表面を被覆することで溶接性などの所要特性を損なうことなく、耐食性を向上させるものである。四国の高速道路においても、無塗装使用による耐候性鋼橋梁が数多く採用されており、中でも高知自動車道では 39 橋の耐候性鋼橋梁が採用されている（図 2-1）。これらの橋梁は、建設当初から追跡調査が実施されてきたことから、ここでは、高知自動車道の現状と問題点を中心に述べる。

耐候性鋼は、維持管理費を含むトータルコストの削減、およびメンテナンスフリー（現在ではミニマムメンテナンス）を目的に採用され当時は非常に注目された。しかし、その後の追跡調査等から部分的に異常さびの発生が見られ、高知自動車道の位置する環境条件から当初予想されていた期間（約 10 年）では保護性さびが形成されていないことが確認された。

高知自動車道は、四国の山岳を貫く路線で、冬季には降雪に伴う交通確保を図るため、大量の凍結防止剤が散布され、一部で飛散した塩分が鋼材に付着して桁に損傷を与えている。I 期線は架設後約 22 年、II 期線は約 5～9 年が経過しているが、現在においても保護性さびが形成されていない部位が認められ、部分的な補修により対応している。



図 2-1 四国の高速道路網と対象区間

## 2.2 耐候性鋼橋梁の腐食環境

耐候性鋼材の腐食環境を支配する主な要因は塩分と水分である。道路橋の場合は、塩分として海からの飛来塩分と塩化物系凍結防止剤があり、道路橋示方書<sup>5)</sup>では、海からの飛来塩分に対して0.05mddを超えない地域、あるいは海岸線からの距離で適応地域を定めている。また、鋼道路橋塗装・防食便覧<sup>6)7)</sup>では、凍結防止剤の塩分に対して他路線からの飛散や山と接近した位置、あるいは交差橋への適用を避けることを提案している。しかし、これらの箇所以外については、明確な適用基準がなく山間部に建設される道路橋では、凍結防止剤の散布により耐候性鋼の酸化被膜形成に何らかの影響を及ぼすことは予想されていたが、その影響度合いが不明確なまま建設されており、いくつかの橋梁で層状さびやうろこさびなどの異常さびが発生し、適切な保護性さびが形成されていないという問題がある。

## 2.3 高知自動車道の概要

### 2.3.1 高知自動車道の路線状況

高知自動車道は、図 2-1 に示した通り、愛媛県四国中央市の川之江 JCT から高知県高岡郡四万十町の四万十町中央 IC に至る、延長 118.8 km の高速道路であり、川之江 JCT から須崎東 IC までが西日本高速道路(株)の管理する有料道路である。中でも、耐候性鋼橋梁が多く架設された川之江東 JCT から大豊 IC 間は、四国山地を縦断する山岳道路であり 1992 年 1 月に暫定 2 車線で供用され、2008 年 7 月に全線 4 車線化が完成した。この区間は、毎年 12 月から翌年の 3 月末まで、雪氷期間に雪氷体制が組まれており、図 2-2 に示す高知県と愛媛県の県境に位置する標高 400m の笹ヶ峰トンネル付近では降雪量が多く、過去には日最大降雪量 41 cm (2007 年) を記録している。このような環境の中、塩化物系の凍結防止剤が使用され、毎年およそ 500t の塩が路面に散布されており、塩害とみられる鋼材等の腐食が発生し構造物の耐久性に問題が生じている。

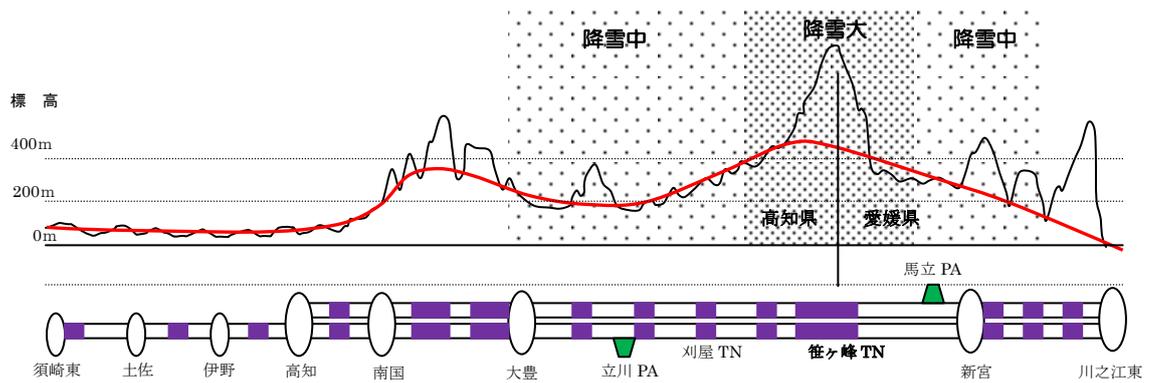


図 2-2 高知自動車道の路線概要

### 2.3.2 高知自動車道の現状

高知自動車道の耐候性鋼橋梁は、追跡調査の結果から、橋梁全体としてはゆるやかな安定さび化が進んでいると報告されている。しかし、局所的な漏水による損傷や近接施工・地山との離れ、凍結防止剤の散布などにより、Ⅰ期線側では漏水箇所以外にはあまり見られなかった「うろこさび」が外桁下フランジ上面に目立つようになった。下フランジ上面は、粉塵が堆積しやすく、このために濡れ時間が長くなり、結果として水中に含まれる塩分の影響を強く受けて異常さびとなったと考えられる。

Ⅱ期線側は、Ⅰ期線の状況を踏まえた配慮や橋梁設計思想の変化に伴い、さまざまな対策がとられたことから損傷箇所も少なくなっているものの、漏水箇所では急激に損傷程度が悪くなることから、定期的な維持管理の重要性が指摘されている。

### 2.3.3 耐候性鋼橋梁の維持管理

耐候性鋼橋梁のさびの進行度は、供用からの追跡調査結果<sup>8)</sup>、<sup>9)</sup>で腐食要因により異なっていることが分かっており、比較的ゆっくりと進行する架設環境によるものと急激に進行する漏水等によるものに大別されることから、その維持管理は、継続的な調査と計画的な漏水補修に区分して、図 2-3 に示すフローに従って実施することが基本とされた。架設環境の影響が特に顕著となるのは、桁が地山に近接している場合や上下線に高低差があり並列している場合である。また、漏水による影響を受ける部位としては、床版の打継ぎ目などひび割れ部からの漏水や伸縮装置の非排水樋、排水装置の劣

化・破損等によるものであり、漏水対策工として床版防水工や2重止水の伸縮装置取替え工等が計画的に実施されている。

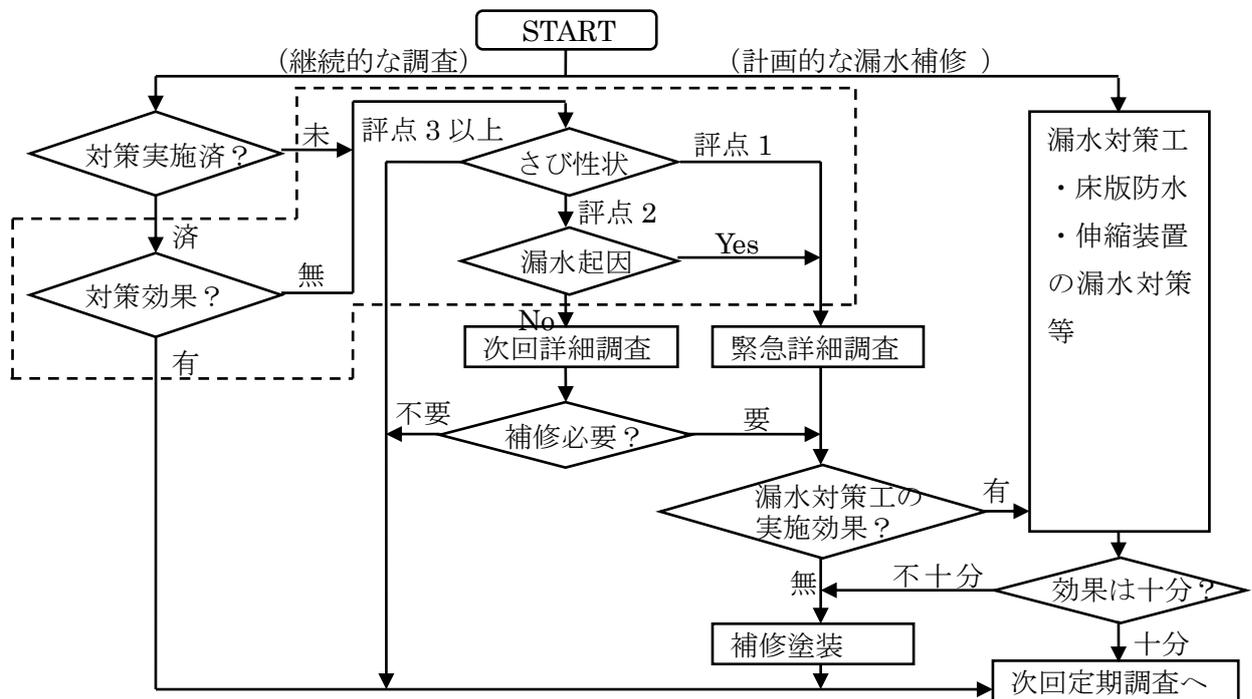


図 2-3 耐候性鋼橋梁維持管理フロー

なお、耐候性鋼材の腐食速度は、さびの性状・さび粒子の大きさや色調から定性的な評価を行うことができる。そこで、架設環境の悪い高知自動車道は、さびの状態が安定していないことから、腐食速度に着目した評価基準である、表 2-1 (社) 日本鋼構造協会：鋼橋の性能向上研究小委員会耐候性鋼橋梁部会、「鋼構造協会技術レポート 73」耐候性橋梁の可能性と新しい技術<sup>10)</sup>のさび外観の評価を適用し追跡調査が行われてきた。また、外観調査では、さび性状が分かる接写写真や架設環境の分かる状況写真を撮影して外観評点の判定を行っている。判定に使用している外観評価の見本写真を図 2-4 に示す。第 3 章では、画像解析を援用した耐候性鋼材の外観評価判定手法の開発として、点検時における桁外観の損傷判定を点検技術者の能力の如何を問わず、写真による画像解析と統計解析により定量的・客観的に評価する手法を研究している。

以下に高知自動車道で発生している損傷状況と対策事例を建設時期の異なる I 期線と II 期線で紹介する。

表 2-1 耐候性鋼材さび外観の評価（鋼構造協会技術レポート 73 のさび外観評価）

外観 評点	さびの状態 (表層さびの粒子の大きさと外観)	さび層 の厚さ
評点 5	1) 色調は全体に明るく黄褐色でまだら状である 2) ほとんど凹凸はなく、さび粒子は細かい 3) さびの量は少なく、最大粒径は 1mm 程度以下	200 $\mu$ m 程度 未満
評点 4	1) 色調は暗褐色で色むらは無い 2) ほとんど凹凸は無く、さび粒子は細かく均一 3) さびの量はやや多く、最大粒径は 1mm 程度以下	400 $\mu$ m 程度 未満
評点 3	1) 色調は暗褐色から褐色で色むらはなし 2) やや凹凸があり、さび粒子は粗く不均一 3) さびの量は多く、最大粒径は 1~5mm 程度	400 $\mu$ m 程度 未満
評点 2	1) 色調は暗褐色から褐色でやや色むらがある 2) 大きい凹凸があり、さび粒子は粗くうろこ状 3) さびの量は多く、最大粒径は 5~25mm 程度	800 $\mu$ m 程度 未満
評点 1	1) 局部的に様々な色調（激しい色むら）がある 2) 大きな凹凸があり、層状剥離（痕跡）がある	800 $\mu$ m 程度を 超える

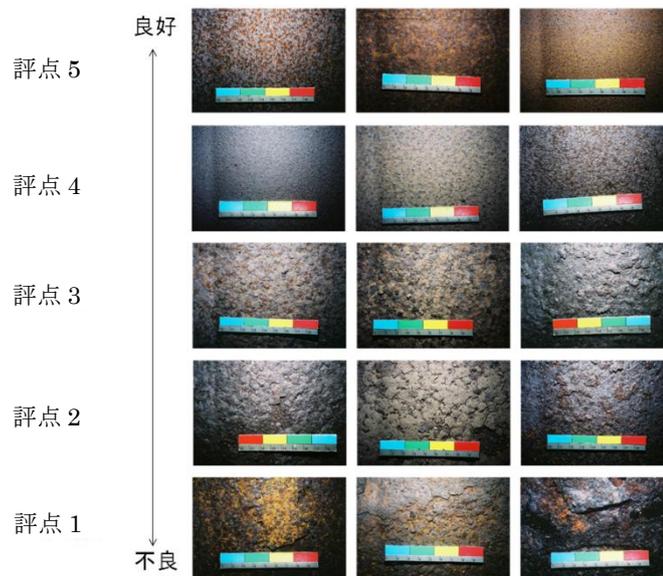


図 2-4 耐候性鋼材さび外観評点

## 2.4 I期線（2008年7月までの暫定供用）における損傷の発生状況と対策

耐候性鋼橋梁が多く架設された川之江東JCT～大豊IC間は、1992年1月に暫定2車線として供用され約22年が経過している。当時の施工では、耐候性鋼橋梁として特別な対策が取られていたわけではなく、橋面防水工も施工されておらず、床版の打継ぎ目や伸縮装置の非排水機能の劣化・損傷による漏水が桁に直接かかるという状況が多く見られ、異常さびの発生要因とされた。以下にその事例と対策を示す。

### 2.4.1 床版上面・配水管からの漏水による損傷と対策

#### (1) 損傷の発生状況

床版の打継ぎ目からの漏水による外・内桁上フランジ下面・ウェブ・下フランジ上面の損傷（写真-1、2）、および配水管取付部の漏水による損傷の発生状況（写真-3、4）を示す。特に、下フランジ上面は、乾燥しにくい場所でもあり層状剥離さびが急速に発達する状況が見て取れる。



写真-1 外桁上フランジ下面・ウェブの損傷状況



写真-2 外桁下フランジ上面の損傷状況

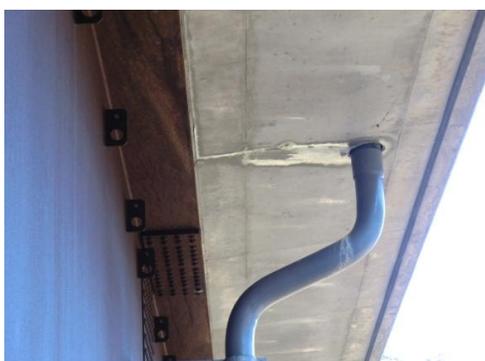


写真-3 配水管からの漏水による外桁上フランジ下面の損傷状況



写真-4 配水管直下の外桁下フランジ上面の損傷状況

(2) 対策

橋面舗装の打換えに合わせて橋面防水工（写真-5）や排水ます改良、床版排水孔の追加（写真-6、7）による漏水補修を実施し、対策効果を確認した上で補修塗装を実施した（写真-8、9）。その結果、耐候性鋼材に直接漏水がかかることもなくなり良好な状態を保つことができている。



写真-5 橋面防水工



写真-6 排水ますの改良（排水孔の追加）



写真-7 床版排水孔の追加



写真-8 外桁の補修塗装（損傷範囲全体の塗装）



写真-9 下フランジ上面と立上り部の補修塗装

## 2.4.2 伸縮装置からの漏水による損傷と対策

### (1) 損傷の発生状況

伸縮装置では、非排水機能の劣化・損傷や導水不良などによる漏水により、乾燥しづらく常時濡れた状況となり、桁・支承・下部工等にも損傷が発生している（写真-10）。特に、耐候性鋼材では、桁端部や伸縮装置本体に異常さびが発生し、伸縮装置の取替えが必要な状況になっている。



写真-10 伸縮装置の漏水による損傷状況

### (2) 対策

樋の設置や導水管の設置（写真-11、12）、伸縮装置の取替え等（写真-13）により、漏水が桁にかかることもなくなり、異常さびが徐々に改善されている。一方で、床版コンクリートの打ち継ぎ目部に水切り対策として樋を設置した箇所では、乾燥状態が悪く異常さびが改善されるどころまでは達しておらず、定期的な点検を必要とする箇所も見受けられる。



写真-11 漏水対策として樋・導水管の設置



写真-12 水切り対策として樋を設置

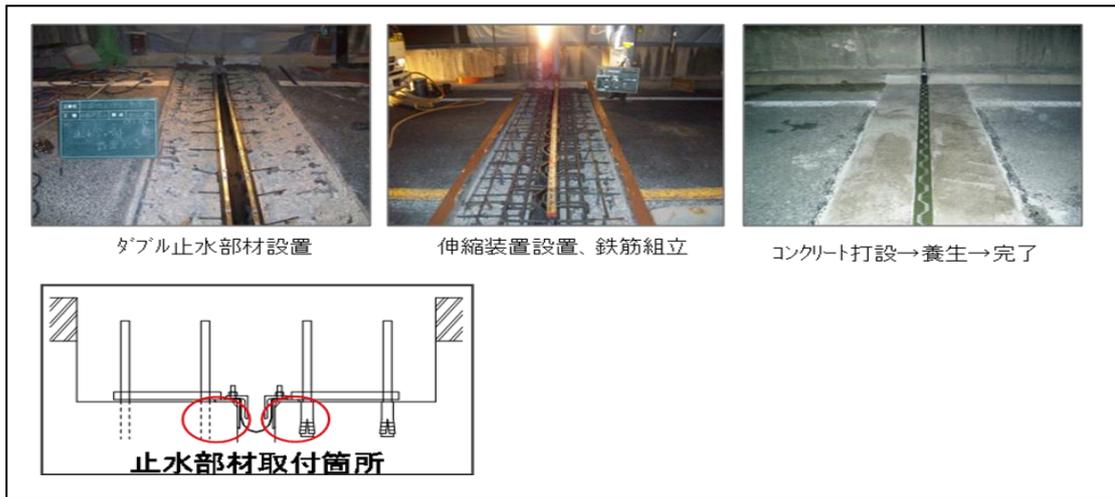


写真-13 伸縮装置（2重止水）の取替えによる漏水対策

## 2.5 II期線（2008年7月以降の完成4車供用）建設時の対応

### (1) II期線で構造上対処した施工事例

川之江東JCT～大豊IC間のII期線は、2008年7月に全線4車線化されたが、I期線の追跡調査結果を踏まえた環境上の配慮や橋梁設計思想の変化により、さまざまな構造上の対策がとられている。桁端部で地山に近接した箇所では、風通しが悪いため補修塗装を行い、下フランジの塗装範囲も結露対策として延伸させ、塗装境界には、伝い水対策として水切りを設置している。また、桁端部とパラペットとの遊間を広くし、桁に切りかきを入れて風通しを良くしており、その事例を写真-14に示す。



写真-14 桁端部の対応事例

また、I期線からの設計思想の変化もあるが、多主桁から少数主桁としたことにより、風通しを良くした例を写真-15に示す。



写真-15 多主桁から少数主桁とした事例

伸縮装置からの漏水により桁端部の損傷が多く見られたことから、延長床板工を採用することで漏水を排除した事例を写真-16に示す。これらにより、I期線で見られた損傷の発生がかなりの部分で低減された。



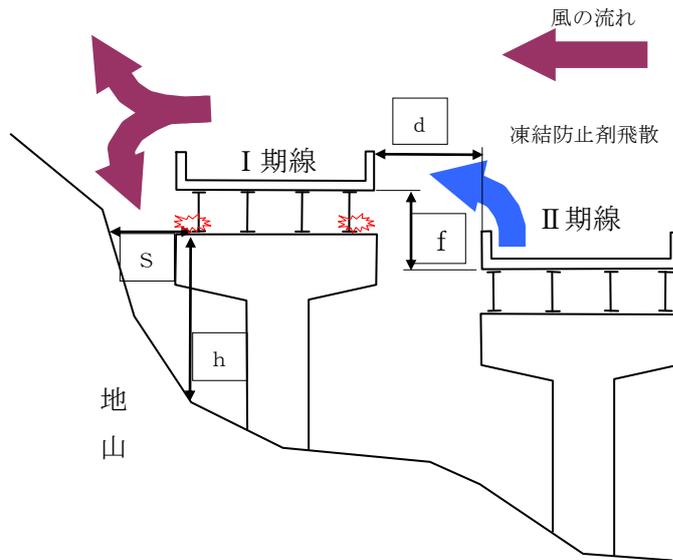
写真-16 II期線建設時の対応

## 2.6 環境条件に起因した損傷

既往調査の結果では、地山斜面との距離が近い場合、あるいは、近接施工された場合に風通しが悪くなることで桁が乾燥しにくく、濡れ時間が長くなることが分かっており、それが原因と考えられるうろこさび（評点2）や層状剥離さび（評点1）の発生が見られる。特に、図2-5に示す範囲では、風の流れや凍結防止剤の飛散により塗装を行っていない橋梁の下フランジ部で損傷が確認されている。

また、橋台付近において外桁に地山斜面が迫っている箇所では、程度の差はあるものの異常さびが発生している。他にも、配水管の横引きが影となり乾燥しにくい状況から異常さびとなる部位も見ら

れるなど、環境条件に起因した損傷にも留意すべきであり、計画的に補修塗装が進められている。



**塗装範囲**

- ① 地山斜面が近接
    - ・  $h < \text{約 } 2\text{m}$ 以内かつ  $S < \text{約 } 5\text{m}$ 以内の範囲に外桁（主に下フランジ、ウェブ）
  - ② 高低差のある橋梁の上下線が近接
    - ・  $f < 10\text{m}$ かつ  $d < \text{約 } 3\text{m}$ の高い側の橋梁（主に下フランジ、ウェブ）
- (鋼道路橋塗装・防食便覧日本道路協会 2005-12<sup>6)</sup>)

図 2-5 環境状況により損傷の発生しやすい部位と塗装範囲

地山斜面との距離が近い場合は、桁が乾燥しづらく湿った状態となり、下フランジ上面が損傷し、ほとんどの箇所であらびが発生している。その状況は、写真-17、18 に示すとおりである。



写真-17 地山斜面との近接状況  
(配水管の横引きが影となり損傷が発生)



写真-18 桁端部の下フランジ上面の損傷状況

また、近接施工で高低差のある橋梁においては、高い側の橋梁外桁下フランジの上面が損傷しており、その状況を写真-19、20に示す。高知自動車道での損傷箇所は、既往調査の結果で示された損傷部位とよく合致しており、定期点検時に確認を要する部位であることが示された。



写真-19 高低差のある橋梁の近接状況



写真-20 下フランジ上面の損傷状況

## 2.7 予防保全への取り組み

### 2.7.1 凍結防止剤の除去

異常さび発生とその対策については、今までに述べたとおりであるが、ここでは、雪氷作業により構造物に付着した凍結防止剤の除去に対する取り組みを述べる。

雪氷作業期間の終了と共に桁を洗浄することが予防保全に効果的であるとされ、2001年～2004年にかけて桁水洗試験が行われた。桁外側に試験施工区間を設け、洗浄水圧を2MPaと4MPaとし、水洗い時間5分間/10㎡で実施した。15分あけて再び洗浄する作業を3回繰返し、水洗い効果の継続性を確認した。結果として、洗浄水圧による違いは確認されず、さび組成の変化もほとんど確認できなかったが洗浄による塩分の洗い流し効果は確認された。この結果は、西日本高速道路(株)四国支社：耐候性橋梁維持管理マニュアル<sup>4)</sup>に示されている。結果を受けて、2006年度から桁端洗浄を行い、洗浄前後で「橋梁の付着塩分量測定方法」JHS408-1992（検知管を用いた塩分測定）により検証してきたが、洗浄前後の効果を十分に評価することができていなかった。

さびで凹凸のある耐候性鋼橋梁の塩分除去量の確認は、ガーゼによる拭取り法（検知管測定）では不向きであり、2012年度からは耐候性鋼橋梁を対象に電気伝導率法による洗浄前後の効果を確認している。

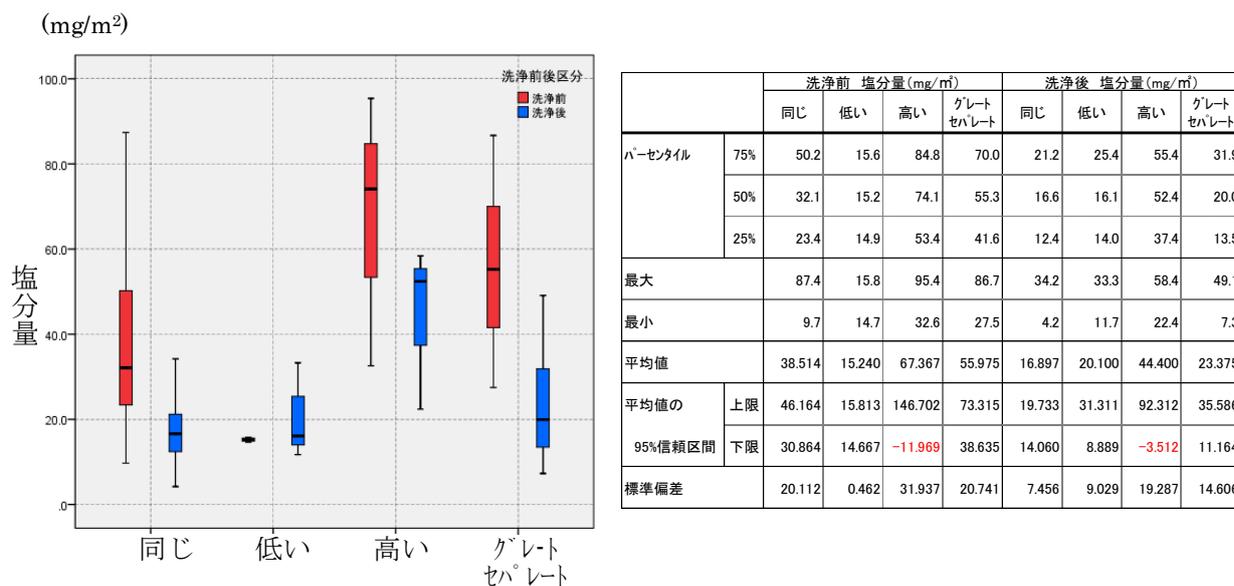


図 2-6 隣接橋との位置関係の違いによる桁洗浄前後の結果

図 2-6 は、高知自動車道の耐候性鋼橋梁 24 橋（45 箇所の外桁端部、ウェブ中間付近）を電気伝導率法で測定した結果であり、外れ値を除く塩分量を隣接橋との位置関係で整理したものである。

洗浄前後で付着塩分量が低下しており、一定の洗浄効果があったことを示している。近接施工で隣接橋の高低差が同じ、あるいは、低い側の橋梁においては、洗浄前の付着塩分量が低い傾向を示しているが、高低差が高い橋梁については、洗浄前の付着塩分量が平均  $50\text{mg}/\text{m}^2$  以上で、洗浄後も高低差がない橋梁より塩分量が高い傾向を示した。この結果は、「2.6 環境条件に起因した損傷」（図 2-5）で示した損傷の発生しやすい部位とよく合致しており、雪氷作業による凍結防止剤の飛散によって塩分が付着したものと考えられる。また、この部位では、ほとんどの橋梁で下フランジに損傷が発生しており、鋼材表面のうろこさび等の凹凸が洗浄効果を下げていると考えられる。

## 2.7.2 漏水対策後の検証

異常さびの発生した桁端部において、漏水対策を実施した後の追跡調査結果を示す。写真-21 は 2007 年度に確認された異常さび発生箇所であるが、写真-22 に示すように、約 4 年が経過した 2011 年には、緻密なさびに復元されており良好な状況にもどりつつあることが確認できた。このことは、異常さびの発生に伴い、すぐに補修塗装を行う必要がないことを示しており、確実な漏水対策を行うことが有効な対策であることを示すものである。従って、継続的な調査により、さびの性状を確認するとともに漏水に起因する損傷に対しては確実な補修を行うことが重要であり、凍結防止剤を散布する地域では、桁洗浄など適切な維持管理を行うことが長寿命化に結び付く有効な対策であることが確認できた。

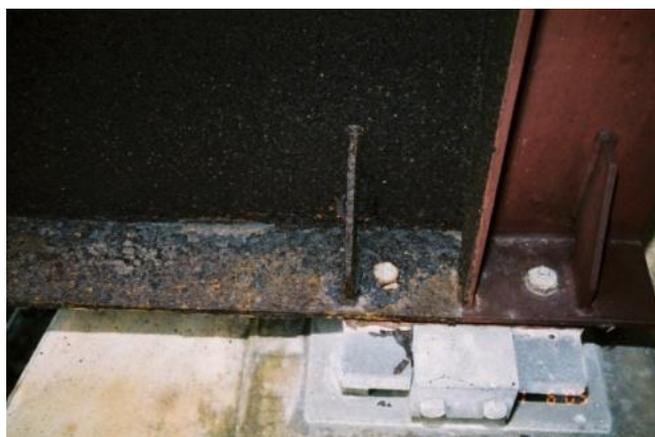


写真-21 2007年度の状況  
(うろこさびの発生)



写真-22 2011年度の状況

### 2.7.3 補修塗装の実施

高知自動車道では、漏水箇所や地山斜面が近接している部位、床版防水工の施行が間に合っていない床版打ち継ぎ目部の異常さびが発生した部位のみに補修塗装を実施している（写真-23）。やむを得ない措置ではあるが、補修塗装範囲を出来るだけ少なくするためにも、桁の損傷状況を的確に把握し、対策を施した場合は経過観察とするなど、日々の点検を重視することが求められる。

第5章では、耐候性鋼橋梁の補修塗装に関する研究として、十分な素地調整を確保することが困難な桁端部等でも採用可能な新たな補修塗装工法について研究し、3種ケレン程度の素地調整でも十分な耐久性が確保できる塗装工法を示している。



写真-23 補修塗装の現状

## 2.7.4 点検の着眼点

耐候性鋼橋梁維持管理マニュアル<sup>4)</sup>では、定期調査は詳細点検の一部として同時に行うこととし、その頻度は5年に1度を原則としている。漏水のない一般的な環境条件下では、さび性状の急激な変化はなく、数年程度の間隔で十分と考えられるが、漏水が発生している箇所では、3年程度で損傷のない状態から激しいはく離さびに進展する可能性も指摘されている。経年的な変化を見て行くために、ある程度、調査期間を限定して調査することも求められており、調査で確認すべき事項として下記の項目があげられている。

- ①架設環境による腐食進行状況の把握
- ②漏水等に起因した周辺と異なる腐食進行の激しい箇所の発生・進行状況等の把握
- ③上記①、②についての原因の把握、今後の進展を予測するために必要な現地状況の把握
- ④既の実施されている補修対策工の有効性の把握

なお、耐候性鋼橋梁に疲労亀裂が発生した場合、一般塗装鋼橋のようにさび汁等での確認ができないため、入念な観察が必要であるとされているが、一般の橋梁点検とは異なり、専門的な見方をしなければ損傷を見落としてしまう恐れがある。また、架設環境でも地山斜面との近接から、立木により湿潤な環境が生まれ、部材が異常さびへ進行することもあり、立木伐採を指示するなど普段からできる事は確実に実施する体制を構築することが重要である（写真-24、25）。



写真-24 立木の影響懸念箇所



写真-25 植生箇所の異常さび

漏水対策を行った箇所でも、十分な効果が発揮されず異常さびに進行した箇所や補修塗装を行った箇所でも数年とたたず塗装のはく離を起こしている箇所（写真-26）もある。今後は、補修対策工の有効性を把握するためにも調査箇所を限定した追跡調査が必要であり、効率的な点検方法や損傷の評価手法、ライフサイクルコストを考慮した補修工法の研究を進めていく必要がある。

本研究では、第4章の耐候性鋼橋梁の腐食損傷による耐荷力劣化の評価および将来予測で、さび促進による板厚減少が橋梁に及ぼす影響について、実橋を用いたひずみ応力測定結果と有限要素解析により、桁の損傷状況から残存保有性能を評価・予測する手法を研究し、橋梁の緊急補修や対策の必要性を判断する目安となることを報告している。



写真-26 補修塗装箇所のはく離

## 2.8 まとめ

四国の高速道路を中心に耐候性鋼橋梁に発生する異常さびの状況と補修の現状、I期線の施工を踏まえたII期線施工という、段階施工での取り組みと長寿命化を図るための維持管理の取り組みを示した。四国の中でも環境条件が厳しく、冬季には凍結防止剤を大量に散布する路線における維持管理は、継続的な調査・点検による損傷の把握はもちろんのこと、漏水箇所の素早い対応が重要となる。

その上で、凍結防止剤の除去を目的に桁洗浄を組み合わせた維持管理が有効であると確認できた。I期線建設後の追跡調査結果などからII期線建設に対する配慮が検討され、II期線では、風通しを良くする対策が取られている。しかし、地山との近接箇所では、地山の立木を処理することなどで風通しをよくし、桁の乾燥を促すことも重要な管理段階での対応であり、調査・点検と合わせて周辺環境

の把握を行うことが今後も必要である。

異常さびが発生した場所でも適切な対策を施せば緻密なさびに復元することも確認できており、今後の維持管理やライフサイクルコストを考えた上でも、塗装補修は必要最小限にとどめるべきである。

耐候性鋼橋梁維持管理マニュアル<sup>4)</sup>では、今後の調査・点検の内容や補修事例が示されているが、熟練した点検技術者によるさびの外観評価やさび粒子の大きさ・色調・さび層の厚さなどで評価することを求めており、補修方法についても漏水対策以外は補修塗装による対策と一般的な補強対策が示されているが、点検技術者が不足する今日において、誰もが判断できる最適な点検方法や補修・補強対策についての提案が求められている。今回の研究においては、第3章で点検に対する定量的・客観的なさび外観評価手法を提案し、第5章では、最適な補修塗装工法の検討を行い、耐候性鋼橋梁の長寿命化対策に向けた方向性を示した。

### 第3章 画像解析を援用した耐候性鋼材の外観評価判定手法の開発

現在行われている定期点検としては、日本鉄鋼連盟より、漏水・堆積物の有無調査、目視によるさびの外観調査が推奨されている<sup>11)</sup>。目視によるさびの外観調査は、さびの粒径の大きさ・厚み・色調を評価基準としており、観測者の高い専門性を必要としない簡便な調査法である。しかし、観測者の主観に基づいて行われるため定性的であり、観測者間で調査結果にばらつきが生じるため客観性に欠けてしまう。よって本研究ではデジタルカメラにより撮影された鋼材の接写写真に対して画像解析、統計的解析を行うことにより定量的・客観的な耐候性鋼材のさび外観評価手法を構築する。

#### 3.1 既往の研究

耐候性鋼材のさび評価は、目視点検、セロテープ試験、さび厚測定によって行われているが、これらの結果を総合的に評価する方法が確立されておらず、また、セロテープ試験・さび厚測定は近接点検が必要であるため、最も簡便な目視点検が用いられている。目視点検では、さびの粒径の大きさ・厚み・色調を評価基準とした5段階評価によって保護性さび・異常さびの判断、さびの腐食度に応じた大別を行う。目視点検は、高い専門性を必要としない簡便な方法として注目される一方で、観測者の主観に基づいた評価の特性上、結果にばらつきが生じてしまうため、定量性・客観性に欠けることが問題として挙げられる。定量性・客観性に優れた新たなさびの外観評価法の研究として、さびの特徴は鋼材の撮影写真からも読み取ることが可能な点を活かし、鋼材の撮影写真に対して画像解析・統計的解析・機械学習を行うことにより判別する方法が採用されている。これは複数の撮影画像に対して二値化やパターン認識などから画像の特徴量を算出し、得られた特徴量を基に多変量解析、教師学習を行うことにより得られた結果から新たな画像を評価する方法である。杉田ら<sup>12)</sup>は画像の濃度変化に注目し、異常さび部の面積を二値化手法、保護性さびの時間経過に伴う色調の変化を彩度・色相ヒストグラムを用いて得られた特徴量より判断する評価手法を提案している。また、河村ら<sup>13)</sup>は画像に対して画像のパターン認識で用いられる、フーリエ変換・ウェーブレット変換・同時生起行列によって得られた特徴量に対してニューラルネットワークによる機械学習を行うことで判断する評価手法の有効性を示している。しかし、さびの複雑な外観・表面形態、写真の撮影条件などから正確な

特徴量を算出することは難しく、また、すべての評点において高い判別精度を有さないことから実用化に至っていない。そこで本研究ではさび分類において有効とされる二値化・同時生起行列・2次元フーリエ変換を用いて画像特徴量を算出し、得られた特徴量に対して、統計的解析手法の一つであるロジスティック回帰分析を用いることで評価式を導出し、評価式を用いた定量的・客観的な画像判別手法を構築する。

## 3.2 研究目的

本研究では、平成13年実施の目視によるさび外観評価に対応する耐候性鋼材の接写写真156枚を標本とし、画像スケールを調整した上で、二値化・同時生起行列・2次元フーリエ変換を用いた画像解析によって画像特徴量を算出する。また、得られた画像特徴量に対して、ロジスティック回帰分析を用いた統計的多変量解析を行うことで評価式を導出する。交差検定法を用いることで、評価式の精度の検討を行い、定量的・客観的な耐候性鋼材のさび外観評価法の構築を目指すことを目的とする。

## 3.3 耐候性鋼材の腐食度評価

本研究では、耐候性鋼材の接写画像に対して画像解析、統計的解析を行う事により定量的・客観的な外観評価法を構築する。ここでは、現在用いられている目視によるさびの外観評価手法とその問題点、及び本研究で用いる標本画像について述べる。

### 3.3.1 目視によるさび外観評価手法

本項では現在行われている目視によるさび外観評価手法、診断結果を用いた将来予測、現在の評価手法の問題点について述べる。

(1) 現在の評価手法

耐候性鋼材の目視による外観評価では、さびの粒径の大きさ・厚み・色調を評価基準とした5段階評価で行われている。現在の目視による外観評価基準<sup>11)</sup>を表3-1に記す。

この評価基準により、異常さびが発生している部位は、腐食の進行によって3段階に分類されており、さび形状が粗くなった部位を評点3、うろこさびが見られる部位を評点2、さびの層状剥離が見られる部位を評点1としている。保護性さびが発生している部位は、保護性さびの経過年数によって評点4、5の2段階に分類される。

表3-1 現在の目視によるさび評価基準<sup>11)</sup>

評点	さびの種類	粒径の大きさ	厚さ	色調	点検の有無
1	層状剥離さび	25mm 以上	800 $\mu$ m 以上	ばらつきが生じる	必要
2	うろこ状さび	5mm 以上 25mm 未満	400 $\mu$ m 以上 800 $\mu$ m 未満		
3	初期の異常さび	1mm 以上 5mm 未満	400 $\mu$ m 未満		要経過観察
4	時間経過した 保護性さび	1mm 未満で 均一		暗い	不必要
5	初期の保護性 さび	1mm 未満	200 $\mu$ m 未満	明るい	

(2) 評価結果を用いた将来予測

現在までに、耐候性鋼材普及のために研究団体、鉄鋼メーカーらによって多くの研究がなされてきた。旧建設省土木研究所ら<sup>14)</sup>は、耐候性鋼材の適用可能な環境条件・設計・施工・維持管理上の留意点を明らかにするために、9箇年の計画で、昭和56年度より全国41地点において耐候性鋼材の暴露試験を行った。報告書では、各地点での50年後の腐食量を堀川ら<sup>15)</sup>が提唱した式(3.1)を用いて算

出している。

$$Y=A X^B \quad (3.1)$$

ここに  $X$  は暴露期間(年)、 $Y$  は平均板厚減少量(mm)、 $A$ 、 $B$  は環境・鋼種成分に依存する係数である。

腐食度予測結果では、保護性さびが形成された評点 4、5 では、50 年後の板厚減少量において、評点・地点間での板厚減少量は約 0.2mm、評点間の差は約 0.02mm であり、異常さびが発生した評点 1～3 ではさびの進行に伴い 50 年後の板厚減少量、評点・地点間での板厚減少量の差が増加することが示されている。

これまでの研究成果より得られた長期腐食度予測結果に基づいて、異常さびによる腐食度に応じた点検・処置法が示されており、外観評価により評点 1～3 と評価された場合には、さびの状態に応じて経過観察・板厚測定などの詳細点検を行う必要が生じる。詳細点検結果より、将来板厚減少による設計応力上の問題が発生すると予想される場合には補修が必要となる。補修方法の一つとして、日本橋梁・鋼構造物塗装技術協会はブラスト処理によって素地調整を行った後、下塗に変性エポキシ樹脂系塗料、上塗にポリウレタン系塗料を用いた塗装を行う方法を提案している<sup>16)</sup>。

### (3) 問題点

目視によるさび外観評価の問題点として観測者間の評価のばらつきが挙げられる。評価基準であるさび粒径・さび厚は観測者によって判断誤差が生まれ易く、例えば 2 人の観測者が一方はさび粒径、もう一方はさび厚に重点を置いて外観評価を行った場合、両者の判定には大きな差が生まれる。また、異常さびの外観、表面形態は多種多様であり、明確な判断基準を用いることが難しく、同じ観測者であっても外観評価基準に則った正確な外観評価を行うことは困難である。よって本研究では、画像解析を援用することにより、定量的・客観的なさび外観評価手法を構築する。

### 3.3.2 画像標本

本項では、本研究で標本として用いる耐候性鋼橋梁の接写写真及び標本について述べる。

## (1) 標本概要

西日本高速道路株式会社が管理する高知自動車道では多くの耐候性鋼橋梁が建設されており、維持管理のために定期点検が実施されている。本研究では平成 13 年度に耐候性鋼橋梁 30 橋を対象に実施された外観評価記録及び、評価記録に対応して撮影された鋼材表面の接写写真を標本とする。

## (2) スケールの調整

画像解析を行う上で複数の標本画像を用いる場合、有効な結果を算出するために標本画像のスケールを合わせる必要がある。提供された接写写真はスケールと共に撮影されており、標本を作成する上でスケールを基に画像の一辺が約 6cm となるように調整を行った。

本研究では、画像サイズ 800×800pixel(約 0.075mm/1Pixel)に調整を行った全評点合計 156 枚の接写写真を標本として用いる。各評点における標本数を表 3-2 に記す。

表 3-2 各評点における標本数

評点	1	2	3	4	5	合計
標本数	6	30	40	40	40	156

## 3.4 画像解析手法

本節では、本研究で構築した画像解析手法及びその手順について述べる。

### 3.4.1 解析概要

標本画像は 3.3 で述べたように、表 3-1 を基にして分類されており、評点に応じたさびの表面形態を読み取ることができる。本研究では、異常さびの腐食進行に伴うさび厚の増大により発生するさび

影部分及び、評点ごとのさびの表面形態に着目し、「二値化手法を用いたさび影部の抽出」、「同時生起行列を用いたテクスチャ解析」、「2次元フーリエ変換を用いたテクスチャ解析」を行うことによって画像特徴量を算出する。また、画像解析によって得られた特徴量に対して、統計的解析手法のひとつであるロジスティック回帰分析を用いることで評価式を導出する。図 3-1 に解析フローを示す。

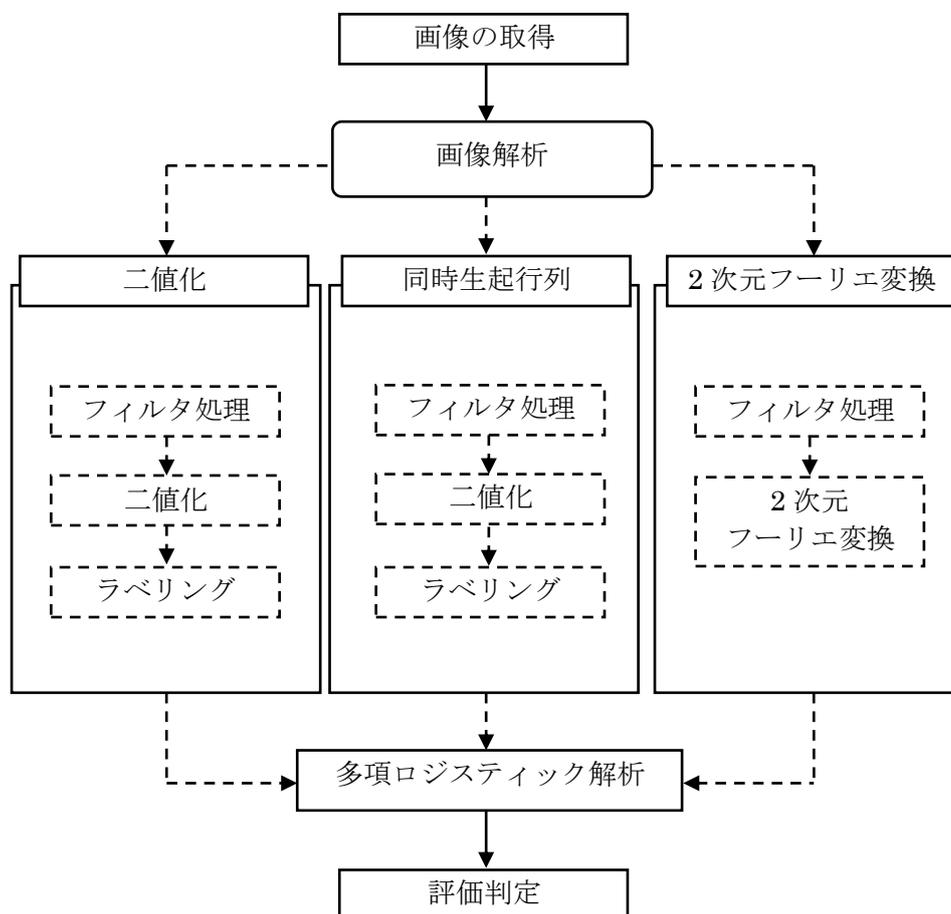


図 3-1 解析フロー

### 3.4.2 二値化によるさび影部の抽出

本項では、二値化手法を用いたさび影部の特徴量抽出法について述べる。

#### (1) 画像の前処理

本研究で用いる標本は同一条件で撮影されておらず、特にフラッシュによる影響が著しいため、評点ごとの二値化結果に大きなばらつきが生じる。本研究では、標本画像に対して光による影響を減ら

す際に用いられる一般的なフィルタ処理(3.2)式を施すことにより上記問題を解決する。

$$\text{Img}[i,j]=\frac{\text{Img0}[i,j]\times\text{Mean}}{\text{ImgM}[i,j]} \quad (3.2)$$

ここに、I、j は画素位置、Img はフィルタ処理後の画像、Img0 は元画像、Mean は画像全体の濃度平均値、ImgM は平滑化処理後の画像である。Mean、ImgM はそれぞれ(3.3)式、(3.4)式により算出される。

$$\text{Mean}=\frac{\sum_i^M \sum_j^N (\text{Img0}[i,j])}{M\times N} \quad (3.3)$$

$$\text{ImgM}[i,j]=\frac{\sum_{m=-\frac{w-1}{2}}^{\frac{w-1}{2}} \sum_{n=-\frac{w-1}{2}}^{\frac{w-1}{2}} \text{Img}[i+m,j+n]}{w^2} \quad (3.4)$$

ここに、M、N は横・縦方向の画素数、w はフィルタサイズである。(3.4)式は平均化フィルタ(MeanFilter)と呼ばれ、w の値が増加するほど平滑化効果が増大し、処理画像の濃淡変化が減少する。

フィルタ処理後の標本画像に対して二値化を行う場合、抽出されるさび影部の大きさは平均化フィルタサイズ w に依存し、w の値が増加するほど、より大きなさび影部を抽出できる。

本研究では、フィルタサイズ w=161、81、41 の3段階のフィルタ処理を行う。図 3-2 に標本画像におけるフィルタサイズ w=161、81、41 の二値化結果例を示す。

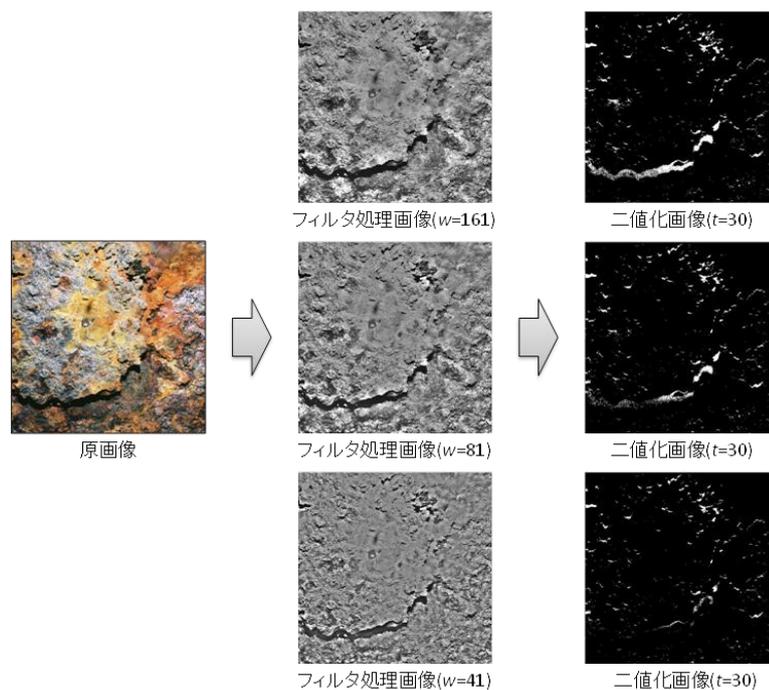


図 3-2 w の変化に対する二値化処理結果

## (2) 二値化

標本画像に対して、加重平均法(3.5)式を用いて 256 階調グレースケール画像に変換し、固定閾値  $t$  を用いた単純二値化を行った。

$$Y=0.299R+0.587G+0.114B \quad (3.5)$$

ここに、 $R$ 、 $G$ 、 $B$  はそれぞれ赤、緑、青の濃度値であり、 $Y$  値は小数第 1 位で四捨五入している。人間の視感度は色によって異なるため、加重平均法を用いることで違和感のない画像となる<sup>17)</sup>。

本研究では、北原らの手法<sup>18)</sup>を参考に閾値を変化させた結果、最も評点ごとの結果の整合性が高い $t=30$ を固定閾値として解析を行う。

## (3) ラベリング

繋がっている画素を連結成分といい、複数の連結成分が存在するとき、各連結成分に番号(ラベル)を付けることをラベリングという<sup>17)</sup>。ラベリングを行い、対象領域にラベルを付けることによって、特徴量算出が容易となる。図 3-3 にラベリングの処理過程を示す。ラベリングのアルゴリズムは以下のようなになる。

- ① 左上からラスタ走査し、境界上の未追跡の画素を探し、なければ終了する。あれば、その位置を始点として記録する。
- ② その画素の周囲を反時計回りに境界上画素を探し、新画素をマーク済み(境界点)とする。
- ③ その新画素が始点に一致しなければ、②に戻る。一致したならば①に戻り、新しい境界の始点を探す。
- ④ すべての境界のラベリングを終えたら、再度左上からラスタ走査し、まだラベリングされていない画素について左側画素のラベルでラベリングする。

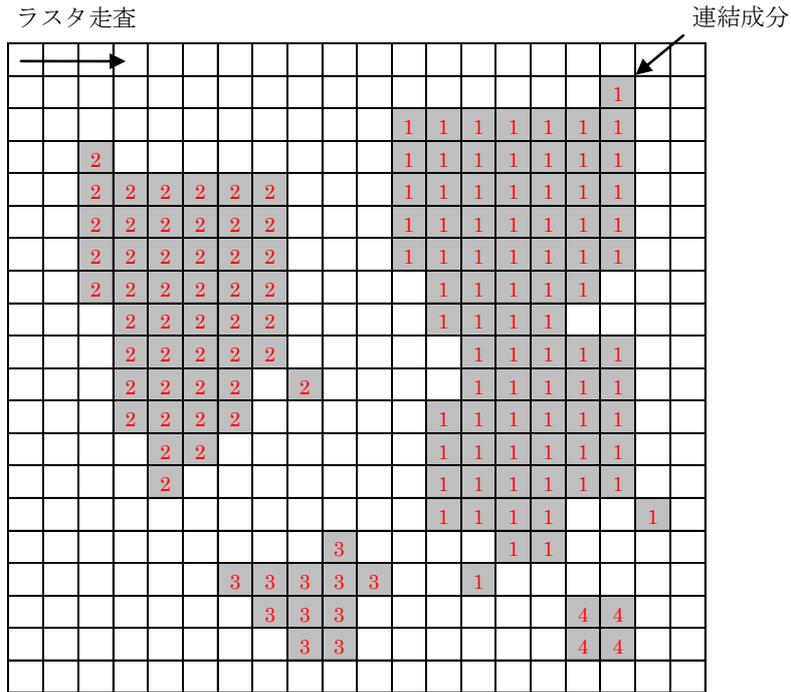


図 3-3 ラベリングの解析過程

二値化画像に対してラベリングを行うことにより、さび影部である濃度値 0 の連結成分の個数、面積を容易に算出することが可能となる。また、連結成分に対して最小結合面積を指定することにより、画像ノイズ、小さなさび影部を除去することができる。

本研究では、フィルタ処理(3.2)式の際に用いたフィルタサイズ  $w$  に対応した最小結合面積  $A'$  を指定することにより、計 6 個の特徴量の算出を行う。 $A'$  は  $w = 161$ 、 $81$ 、 $41$  に対してそれぞれ 320、160、80 とする。

以下、二値化による特徴量の総称を Binary、フィルタサイズ  $w=161$ 、 $81$ 、 $41$  に対応したさび影部の個数を  $BC_1$ 、 $BC_2$ 、 $BC_3$  さび影部の合計面積を  $BA_1$ 、 $BA_2$ 、 $BA_3$  とする。

### 3.4.3 同時生起行列を用いたテクスチャ特徴量の算出

本項では、同時生起行列を用いたテクスチャ特徴量算出方法について述べる。

#### (1) 画像の前処理

同時生起行列から算出されるテクスチャ特徴量は、画像撮影時の外部条件による濃度ヒストグラム分布の偏りの影響を強く受けるため、正確な結果を算出するには画像の濃度値を均等分布させる必要がある。本研究では、前処理として標本画像に対してヒストグラム平坦化を行う<sup>17)</sup>。以下に、ヒストグラム平坦化の手順を示す。

まず、画像の濃度ヒストグラムを調べ、それぞれのレベル（濃度値）について、どのレベルへ移動するかを決定する。ここに、平均画素を  $m$ 、レベル  $k$  の画素数を  $h_k$ 、レベル  $k_1$  からレベル  $k_2$  へ移動すべき画素数を  $n(k_1, k_2)$  とする。

#### ① $h_k \geq m$ の場合

画素数  $h_k$  には  $k$  より下のレベルから移動してきた画素数が含まれている。平均画素数  $m$  を超えた画素を一つ上のレベル  $k+1$  へ移動する場合、 $k+1$  に最も近いレベル  $k$  より画素を移動しなければならない。すなわち(3.6)式となるように画素を加えて行き、 $m$  を超えた画素分を  $k+1$  へ移動する。

$$n(0, k) + n(1, k) + \dots > m \quad (3.6)$$

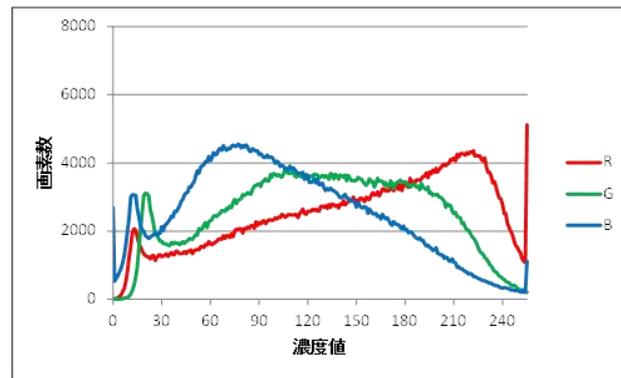
#### ② $h_k < m$ の場合

画素の不足分をレベル  $k+1$  から移動する。 $k+1$  の画素を全て移動しても不足がある場合さらに上のレベルより不足分を補う。

$k$  に対する移動元のレベルが複数存在する場合、濃度値の低い（または高い）画素から優先的に割り当てる。ヒストグラム平坦化による画像及び濃度ヒストグラムの変化を図 3-4 に示す。



平坦化前



平坦化後

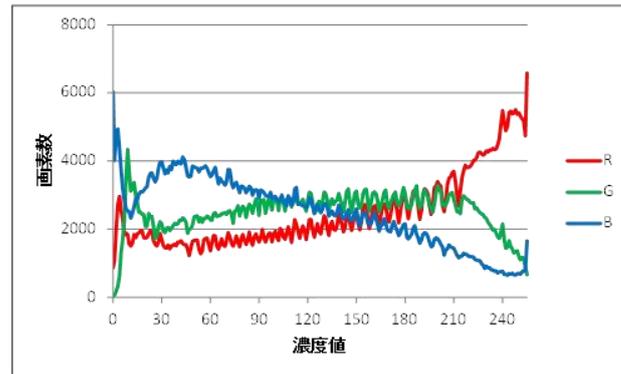


図 3-4 ヒストグラム平坦化による画像、濃度ヒストグラムの変化

## (2) 同時生起行列

同時生起行列 $P(i,j;d,\theta)$ は、標本画像 $f(x,y)$ において、図 3-5 に示すように、ある特定の相対的な位置関係 $(d,\theta)$ にある画素対 $(x_1,x_2)$ 、 $(x_2,x_2)$ において、その濃度対が $(i,j)$ となる $f(x_1,x_2)=i$ 、 $f(x_2,y_2)=j$ となる頻度を表したものである<sup>19), 20)</sup>。

ここに  $i, j$  は濃度値、 $d$  は画素対 $(x_1,x_2)$ 、 $(x_2,x_2)$ 間の距離であり、 $\theta$  は 2 つの画素 $(x_1,x_1)$ 、 $(x_2,x_2)$ を通る直線と水平線とのなす角であり、画像解析においては、図 3-6 に示すように、 $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $135^\circ$  の 4 レベルとなる。

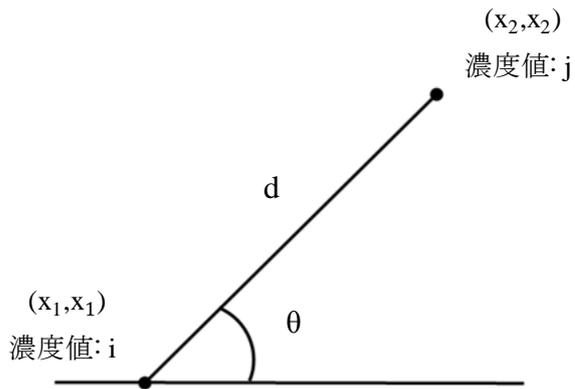


図 3-5 画素対

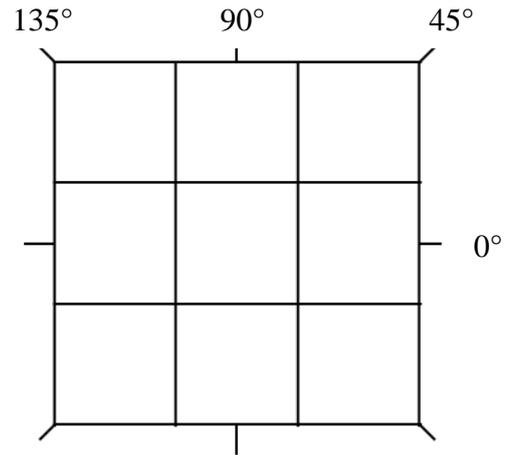


図 3-6 画像解析における  $\theta$  レベル

以下に、同時生起行列 $P(i,j;d,\theta)$ のアルゴリズムを記す。

- ① 左上よりラスタ走査を行い、画素 A と A からみて $\theta$ 方向に  $d$  だけ離れた画素 B を着目する画素対とする。
- ② A,B の濃度値を求める。求めた濃度値をそれぞれ  $i, j$  とする。なお、濃度対  $i, j$  は交換できるものとする。
- ③ 濃度値  $i, j$  を同時生起行列 $P(i,j;d,\theta)$ の  $i, j$  項、 $j, i$  項に累積する。
- ④ ラスタ走査が終了するまで(1)~(3)を繰り返す。走査が終了した場合、(3.7)式を用いて行列の正規化を行う。

$$P(i,j) = \frac{P(i,j)}{\sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{n-1} P(i,j)} \quad (3.7)$$

ここに  $n$  は画像の階調数である。

図 3-7 に二値化画像 $P_0$ に対する同時生起行列 $P(i,j;d,\theta)$ ( $d=1,\theta=0,45,90,135$ )の例を示す。

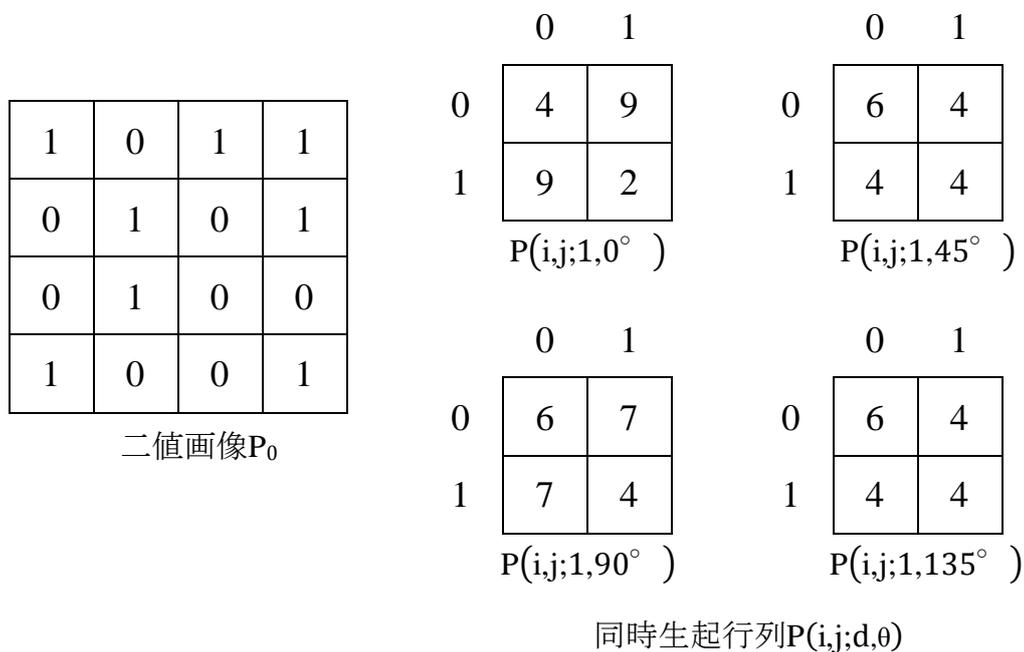


図 3-7 二値画像の同時生起行列 $P(i,j;d,\theta)$ ( $d=1,\theta=0,45,90,135$ )

標本画像より得られる同時生起行列 $P(i,j;d,\theta)$ は、 $n \times n$  の対称行列となる。また、1 つの標本画像より 4 方向の同時生起行列が求められるが、得られた 4 方向のテクスチャ特徴量にはほとんど変化が見られないことが判明している。よって各レベルの行列の要素を(3.8)式により合算し、(3.7)式を用いて行列の正規化を行う。

$$P(i,j) = \sum_{\theta=0,45,90,135} P(i,j;d,\theta) \quad (3.8)$$

同時生起行列 $P(i,j;d,\theta)$ は画素対間の距離  $d$  により情報が大きく変化する。また、統計的解析に有効とされる相関の高い特徴量を算出するには、画像の階調数を減らす量子化を行い、行列の情報量を減らす必要がある。

本研究では、画素の階調数を 128 とし、画素対間の距離を  $d=7, 14, 20$ (Pixel)の 3 段階に分けてテクスチャ特徴量を算出する。

### (3) テクスチャ特徴量

正規化を行った同時生起行列の行列要素の分布状態より、テクスチャの一様性、方向性、コントラストなどの性質を表した合計 14 種類の特徴量を算出することができる。しかし、これらの特徴量は 1 つの特徴量で複数のテクスチャの性質を表すもの、他の特徴量と同じテクスチャの性質を表すものなど、物理的な基準を持たないため、画像解析の際には特徴量の性質を考慮した上で、解析に有効な特徴量を選択する必要がある。

本研究では多くのさび外観評価手法で使用されている 4 種類のテクスチャ特徴量である角二次モーメント（以下 ASM）、コントラスト（以下 CON）、相関（以下 COR）、エントロピー（以下 ENT）を用いる。各特徴量はそれぞれ(3.9)、(3.10)、(3.11)、(3.12)式を用いて算出される<sup>19)</sup>。

$$ASM = \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{n-1} \{P(i,j)\}^2 \quad (3.9)$$

$$CON = \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{n-1} (i-j)^2 P(i,j) \quad (3.10)$$

$$COR = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{n-1} ijP(i,j) - \mu_x \mu_y}{\sigma_x \sigma_y} \quad (3.11)$$

$$ENT = - \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{n-1} P(i,j) \log\{P(i,j)\} \quad (3.12)$$

ここに、 $\mu_x$ 、 $\mu_y$  は各軸のヒストグラム平均値、 $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$  は各軸の分散である。 $\mu$ 、 $\sigma$  は濃度ヒストグラム  $P(i)$  を用いてそれぞれ(3.13)、(3.14)式で算出する。

$$\mu = \sum_{i=0}^{n-1} iP(i) \quad (3.13)$$

$$\sigma = \sum_{i=0}^{n-1} \sqrt{(i-\mu)^2 P(i)} \quad (3.14)$$

ASM、CON、COR はそれぞれ、画像全体の均一さ、局所変化、方向に対する相関といった視覚的なテクスチャの特徴、ENT は情報理論に基づいた情報量を算出する。図 3-8 に各特徴量と画像の関係を示す。

	大		小		特徴
ASM					値が大きいほど、画像の均一性が高い。
	評点4	評点5	評点3	評点3	
CON					値が大きいほど、濃淡が異なる画素が多く局所変化が大きい。
	評点2	評点3	評点1	評点5	
COR					値が大きいほど、2つの濃淡値が比例し、縞状・線状パターンが強くなる。
	評点4	評点5	評点3	評点3	
ENT					値が大きいほど、濃度値対が同じように存在し、乱雑となる。
	評点2	評点3	評点4	評点5	

図 3-8 各特徴量と画像の関係

#### (4) 画像の分割化

3.1 で述べたように、画像解析によるさび外観評価が実用化されていない理由として、さびの複雑な外観・表面形態、写真の撮影条件などから正確な特徴量の算出が難しい点が挙げられる。同時生起行列を用いたテクスチャ特徴量についても、表 3-3 に記すように各評点における変動係数に差が生じていることが分かる。本研究では、原画像の分割を行い、分割画像に対してテクスチャ特徴量を算出し、得られた結果を(3.15)式を用いて平均化することで新たな特徴量を算出する。

$$M\text{Texture} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \text{Texture}(i) \quad (3.15)$$

ここに、 $M\text{Texture}$  は画像平均特徴量、 $\text{Texture}$  は分割画像より算出した各特徴量、 $N$  は分割数である。

表 3-3 各評点における特徴量の変動係数. (d=14 の場合)

特徴量	評点 1	評点 2	評点 3	評点 4	評点 5
ASM	0.155	0.070	0.048	0.050	0.168
CON	0.043	0.015	0.019	0.023	0.030
COR	0.223	0.089	0.094	0.119	0.179
ENT	0.010	0.004	0.003	0.003	0.009

画像の分割例を図 3-9 に示す。



図 3-9 画像分割イメージ

本研究では、N=4、16、64 で分割を行い、計 12 個の平均画像特徴量を算出し、統計的解析の共変量を増やすことで、判別精度の向上を目指す。

以下、距離  $d$ 、分割数  $N$  に対応する画像平均特徴量の総称を  $\text{Texture}_N^d$ 、画像平均特徴量をそれぞれ  $\text{ASM}_N^d$ 、 $\text{CON}_N^d$ 、 $\text{COR}_N^d$ 、 $\text{ENT}_N^d$  とする。

### 3.4.4 2次元フーリエ変換を用いたテクスチャ特徴量の算出

本項では、2次元フーリエ変換を用いたテクスチャ特徴量算出方法を述べる。

#### (1) 画像の前処理

特徴量の精度を向上するため、標本画像を(3.5)式を用いて256階調グレースケール画像に変換し、以下に述べる大津の方法<sup>21)</sup>を用いて二値化画像に変換した。なお、大津の方法とは単純二値化とは異なり、グレースケール画像の輝度値ヒストグラムにおいて、ある輝度値を閾値としたときに分けられる二つのクラスのクラス間分散を計算し、それが最大となる輝度値を最適な閾値とする判別分析を用いた方法である。以下に、大津の方法の手順を示す。

図3-10に示すように、輝度値ヒストグラムを閾値 $t$ で二値化したとき、閾値よりも輝度が小さい側(黒クラス)の画素数を $\omega_1$ 、平均を $m_1$ 、分散を $\sigma_1^2$ 、輝度値の大きい側(白クラス)の画素数を $\omega_2$ 、平均を $m_2$ 、分散を $\sigma_2^2$ 、画像全体の画素数を $\omega_t$ 、平均を $m_t$ 、分散を $\sigma_t^2$ としたときクラス内分散 $\sigma_w^2$ は(3.16)式

$$\sigma_w^2 = \frac{\omega_1 \sigma_1^2 + \omega_2 \sigma_2^2}{\omega_1 + \omega_2} \quad (3.16)$$

となる。一方、クラス間分散 $\sigma_b^2$ は(3.17)式

$$\begin{aligned} \sigma_b^2 &= \frac{\omega_1 (m_1 - m_t)^2 + \omega_2 (m_2 - m_t)^2}{\omega_1 + \omega_2} \\ &= \frac{\omega_1 \omega_2 (m_1 - m_2)^2}{(\omega_1 + \omega_2)^2} \end{aligned} \quad (3.17)$$

として求められる。全分散 $\sigma_t^2$ はこれらの和として(3.18)式のように求められる。

$$\sigma_t^2 = \sigma_b^2 + \sigma_w^2 \quad (3.18)$$

また、分離度は(3.19)式

$$\frac{\sigma_b^2}{\sigma_w^2} = \frac{\sigma_b^2}{\sigma_t^2 + \sigma_b^2} \quad (3.19)$$

となる。この分離度が最大となる $t$ を閾値として決定する。

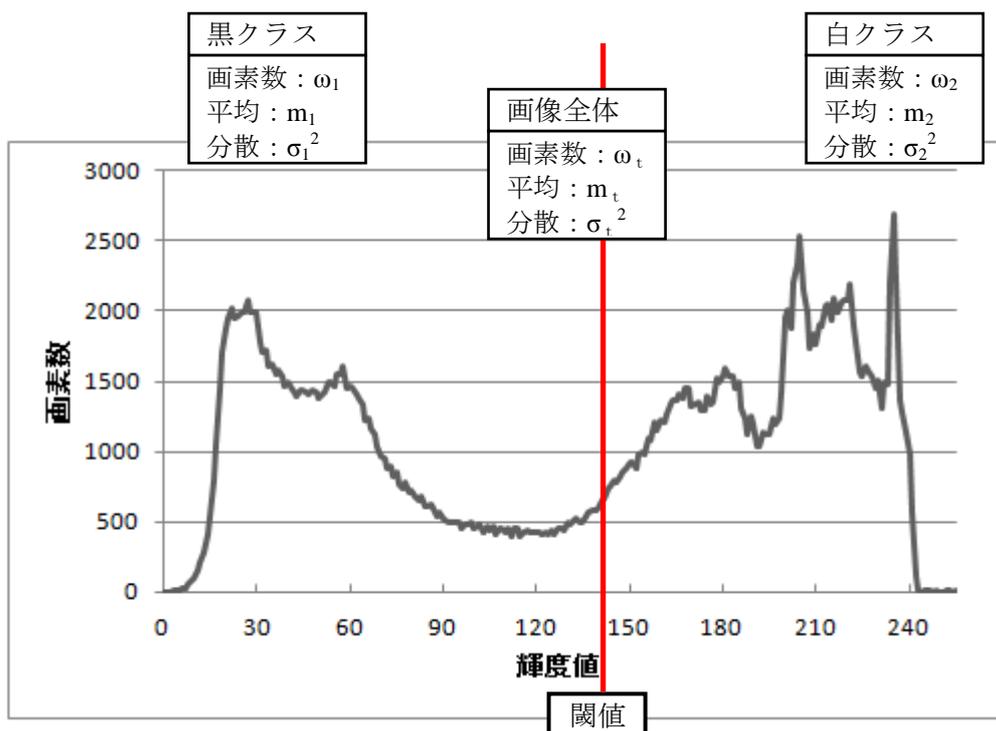


図 3-10 輝度値ヒストグラム

(2) フーリエ変換

フーリエ変換は、ある周期波形 $f(t)$ を正弦波に分解し、角周波数ごとの正弦波の振幅、位相を求めることであり、主に周波数解析で用いられる<sup>17)</sup>。周期 $T$ をもつすべての波形 $f(t)$ は、直流分、基本角周波数 $\omega = 2\pi/T$ 、及びその整数倍の角周波数をもつ正弦波の和で表すことができる。これを実フーリエ級数展開と呼び、(3.20)式で表す。

$$f(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \{a_k \cos k\omega t + b_k \sin k\omega t\} \quad (3.20)$$

ここで、 $a_0$ は直流分・平均値を表す定数、 $a_k$ 、 $b_k$ は波成分の定数である。

(3.20)式の係数はフーリエ係数と呼ばれ、三角関数の直交性を用いると(3.21)式で表される。

$$\left. \begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) dt \\ a_k &= \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cos k\omega t dt \\ b_k &= \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \sin k\omega t dt \end{aligned} \right\} \quad (3.21)$$

デジタル波形の場合、 $f(t)$ は離散的な波形をとり、図 3-11 に示すように、サンプリング周期 $\tau$ でサンプリングしたデジタル信号値を $f_i$  ( $i=0,1,\dots,N-1$ )としたとき、データ個数は $N=T/\tau$ 個となる。この時、フーリエ係数を  $N$  個求めることができ、離散フーリエ変換（以下 DFT）は(3.22)式となる。

$$C_k = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} f_i e^{j\frac{2\pi}{N}ki} \quad (k=0,1,\dots,N-1) \quad (3.22)$$

ここに、 $j$  は虚数単位である。

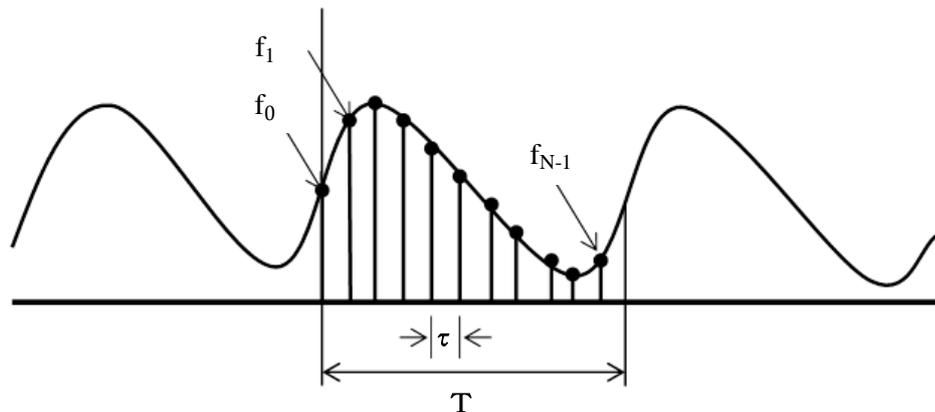


図 3-11 DFT のためのサンプリングデータ

### (3) 2次元フーリエ変換

2次元のデジタル画像の場合、時間波形と同様に空間周波数が定義され、スペクトル $f_{m,n}$ として(3.23)式で表される。

$$f_{m,n} = 0.5 + A \sin \left( k \frac{2\pi}{M} m + l \frac{2\pi}{N} n \right) \quad (3.23)$$

ここに、 $A$  は振幅、 $M$ 、 $N$  は横・縦方向の画素数、 $k$ 、 $l$  は横・縦方向空間周波数である。

(3.23)式に対してフーリエ変換を行う場合、DFT(3.22)式を2次元に拡張する必要があり、(3.24)式で与えられる。

$$F_{k,l} = \frac{1}{MN} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} f_{m,n} W_1^{km} W_2^{ln} \quad (3.24)$$

ただし、 $W_1$ 、 $W_2$ は(3.25)式である。

$$\begin{aligned} W_1 &= e^{-j\frac{2\pi}{M}} \\ W_2 &= e^{-j\frac{2\pi}{N}} \end{aligned} \quad (3.25)$$

(3.24)式は(3.26)式、(3.27)式のように分解可能であり、

$$\hat{F}_{k,n} = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} f_{m,n} W_1^{km} \quad (3.26)$$

$$F_{k,l} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \hat{F}_{k,n} W_2^{ln} \quad (3.27)$$

各行( $n=0,1,\dots,N-1$ )について(3.26)式の1次元DFTを行い、得られた結果 $\hat{F}_{k,n}$ に対して、各列( $k=0,1,\dots,M-1$ )について(3.27)式の1次元DFTを行うことにより、2次元DFTを算出できる。2次元DFTは、1次元DFTよりも広範囲に亘る周波数解析が可能のため、画像に用いた場合、特徴量算出、フィルタリング、復元・再構成などを行うことができる<sup>20)</sup>。

2次元DFTのプロセスを図3-12に示す。

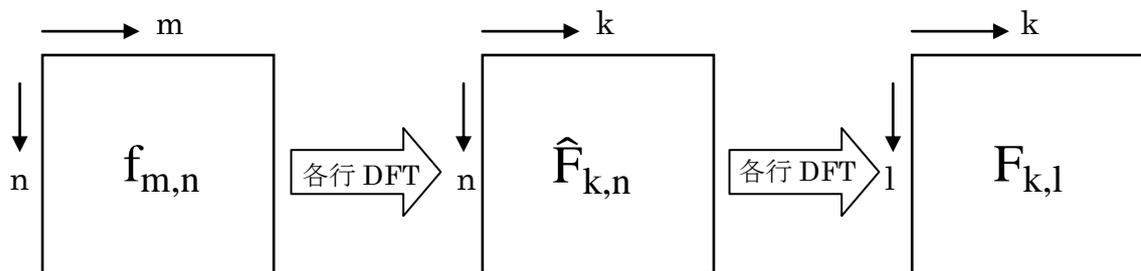


図 3-12 2次元 DFT プロセス

本研究では、2次元DFT結果の最大値、最小値、平均値、中央値、下側四分位数、上側四分位数を特徴量として用いる。以下、2次元DFT結果の総称をDFT、最大値をMax、最小値をMin、平均値をMean、中央値をMed、下側四分位数を $D_1$ 、上側四分位数を $D_2$ とする。

### 3.4.5 ロジスティック回帰分析を用いた評価式の導出

本項では、統計的解析の一つである、ロジスティック回帰分析について述べる。

#### (1) 重回帰分析

重回帰分析とは、1つの予測項目（従属変数）を複数の共変量（独立変数）から予測・説明する際に用いる統計的手法である。重回帰分析において、予測項目  $y$  と共変量  $x_1, x_2, \dots, x_k$  の間には(3.28)式が成り立ち、重回帰分析を行うことで定数項  $\beta_0$ 、偏回帰係数  $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$  を決定する。

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k \quad (3.28)$$

回帰分析は、データ分布に正規性を仮定するため、分析を行う場合、予測項目・共変量が正規分布に従う量的変数である必要がある。

#### (2) ロジスティック回帰分析

ロジスティック回帰分析は、予測項目が量的変数でなく、カテゴリ（種類）のような質的変数として表される場合に用いられる<sup>22),23)</sup>。質的変数は、ダミー変数と呼ばれるカテゴリ情報を0や1といった数値的表現に変換された上で分析が行われ、生起確率が求められる。

生起確率（予測項目）  $y$  と共変量  $x_1, x_2, \dots, x_k$  の間には(3.29)式が成り立ち、

$$y = \frac{1}{1 + e^{-(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k)}} \quad (3.29)$$

展開すると(3.30)式

$$\ln\left(\frac{y}{1-y}\right) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k \quad (3.30)$$

となる。 $y/1-y$ の部分をオッズと呼び、回帰式の左辺をオッズの対数を取ったロジットとすることで予測項目の範囲が $[-\infty, +\infty]$ となり、離散的な質的変数の場合でも、連続的な量的変数と同等の分析が可能となる。

通常の回帰分析の場合、偏回帰係数 $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 、…、 $\beta_k$ は、他の変数を条件づけたもとの、当該変数が1単位増加したときの予測変化の差を表すが、同条件におけるロジスティック回帰分析の偏回帰係数は確率変化の比を表す。このときの確率変化の比をオッズ比と呼ぶ。オッズ比は予測変化の差と異なり、値に重みづけがされているため比の大小を比較した影響度の判定ができない。そのため影響度の判定はWald統計量Z、尤度比検定量Lなどを用いて行う。

Wald統計量Zは、推定値 $\hat{\beta}_i$ と標準誤差 $\text{Var}(\hat{\beta}_i)$ を用いて(3.31)式で表される。

$$Z = \frac{\hat{\beta}_i}{\sqrt{\text{Var}(\hat{\beta}_i)}} \quad (3.31)$$

ここで、推定値 $\hat{\beta}_i$ は正規分布 $\hat{\beta}_i \sim N(\beta_i, \text{Var}(\hat{\beta}_i))$ に従うものとする。統計量Zを二乗したものはカイ2乗分布に従い、有意確率を求める際に用いる。

尤度比検定量Lは、ある共変量を含まない場合 $L_0$ と、含んだ場合 $L_1$ を用いて(3.32)式で表される。

$$L = -2 \ln L_0 - (-2 \ln L_1) = -2 \ln \left( \frac{L_0}{L_1} \right) \quad (3.32)$$

検定量Lは自由度1のカイ二乗分布に従う。

ロジスティック回帰分析の生起確率はダミー変数の小さい項目が対象となり、カテゴリ数が3以上の場合は複数の評価式が導出される。本研究では、質的変数である評点1~5をダミー変数1~5に変換し、1と5、2と5、3と5、4と5の4種類の予測式を導出する。また、評価結果は全式の生起確率が5割未満の場合は評点5、それ以外の場合は最も確率の高い値をとった式の評点とする。

### (3) 共変量

本研究では、判別精度の高い特徴量の組み合わせを検証するため、画像解析より算出された特徴量より9つの解析モデルを作成し、モデルごとの精度の検証を行う。表3-4に解析に用いる解析モデルの一覧を記す。モデル1~3は共変量としてBinaryと距離別のTextureを用いており、距離別の判定精度の比較を行うことができる。モデル4~6はモデル1~3のTexture<sub>64</sub><sup>d</sup>をDFTとしたもの、モデル7~9はモデル1~3にDFTを加えたものであり、DFTを用いた場合の精度の検証を行うことができる。

表 3-4 解析モデル一覧

モデル	共変量	合計
1	Binary, Texture <sub>4</sub> <sup>7</sup> , Texture <sub>16</sub> <sup>7</sup> , Texture <sub>64</sub> <sup>7</sup>	18
2	Binary, Texture <sub>4</sub> <sup>14</sup> , Texture <sub>16</sub> <sup>14</sup> , Texture <sub>64</sub> <sup>14</sup>	18
3	Binary, Texture <sub>4</sub> <sup>20</sup> , Texture <sub>16</sub> <sup>20</sup> , Texture <sub>64</sub> <sup>20</sup>	18
4	Binary, Texture <sub>4</sub> <sup>7</sup> , Texture <sub>16</sub> <sup>7</sup> , DFT	20
5	Binary, Texture <sub>4</sub> <sup>14</sup> , Texture <sub>16</sub> <sup>14</sup> , DFT	20
6	Binary, Texture <sub>4</sub> <sup>20</sup> , Texture <sub>16</sub> <sup>20</sup> , DFT	20
7	Binary, Texture <sub>4</sub> <sup>7</sup> , Texture <sub>16</sub> <sup>7</sup> , Texture <sub>64</sub> <sup>7</sup> , DFT	24
8	Binary, Texture <sub>4</sub> <sup>14</sup> , Texture <sub>16</sub> <sup>14</sup> , Texture <sub>64</sub> <sup>14</sup> , DFT	24
9	Binary, Texture <sub>4</sub> <sup>20</sup> , Texture <sub>16</sub> <sup>20</sup> , Texture <sub>64</sub> <sup>20</sup> , DFT	24

### 3.5 評価結果

本節では、本研究で構築した画像解析手法の精度を検証するため、標本を用いた予測精度の検証及び、交差検証と呼ばれる標本外の画像を用いた判別精度の検証を行う。そして、得られた予測精度、判別精度の比較、検討を行い、外観評価に最も有効なモデルを作成した。

#### 3.5.1 標本予測精度

予測精度は、ロジスティック回帰分析によって得られた判別式を用いて個々の標本を判別することで求めることができる。表 3-5 に各特徴量単独での予測精度結果、表 3-6 に各モデルの予測精度結果を記す。

表 3-5 各特徴量予測精度結果

特徴名	評点 1(%)	評点 2(%)	評点 3(%)	評点 4(%)	評点 5(%)	全体(%)
Binary	50.0	86.7	95.0	65.0	87.5	82.1
Texture <sub>4</sub> <sup>7</sup>	50.0	63.3	60.0	45.0	67.5	58.3
Texture <sub>16</sub> <sup>7</sup>	50.0	66.7	52.5	37.5	62.5	53.8
Texture <sub>64</sub> <sup>7</sup>	50.0	63.3	45.0	52.5	57.5	53.8
Texture <sub>4</sub> <sup>14</sup>	50.0	56.7	40.0	52.5	62.5	52.6
Texture <sub>16</sub> <sup>14</sup>	50.0	66.7	40.0	57.5	57.5	54.5
Texture <sub>64</sub> <sup>14</sup>	50.0	60.0	40.0	50.0	57.5	51.3
Texture <sub>4</sub> <sup>20</sup>	50.0	46.7	40.0	47.5	72.5	51.9
Texture <sub>16</sub> <sup>20</sup>	50.0	60.0	37.5	50.0	67.5	53.2
Texture <sub>64</sub> <sup>20</sup>	50.0	40.0	40.0	40.0	72.5	48.7
DFT	66.7	30.0	47.5	27.5	60.0	42.9

表 3-6 各モデル予測精度結果

モデル	評点 1(%)	評点 2(%)	評点 3(%)	評点 4(%)	評点 5(%)	全体(%)
1	100.0	100.0	100.0	85.0	85.0	92.3
2	100.0	96.7	100.0	85.0	85.0	91.7
3	100.0	96.7	97.5	85.0	92.5	92.9
4	83.3	96.7	100.0	82.5	82.5	89.7
5	83.3	90.0	100.0	80.0	77.5	86.5
6	100.0	100.0	100.0	82.5	82.5	91.0
7	100.0	100.0	100.0	85.0	85.0	92.3
8	100.0	93.3	100.0	82.5	85.0	90.4
9	100.0	96.7	95.0	85.0	90.0	91.7

特徴量における予測精度を見ると、Binary が最も優れた特徴量と確認できる。Texture を見ると、Texture<sub>4</sub><sup>7</sup>が全体精度において最も優れていることが分かる。また、距離別で見ると d=7 の予測精度が他の距離と比較して高いことが確認できる。特徴的傾向として距離、分割数による全体予測精度の差が小さいこと、評点 3、評点 4 の予測精度が低いことが挙げられる。DFT を見ると、評点 1 の予測精度が他の特徴量を上回る一方で、評点 2、4 の予測精度の低さが顕著に表れている。他の特徴量と比較して予測精度が低い理由として、大津の二値化を用いた量子化では、評点ごとのフーリエ特徴をうまく表現できなかったことが考えられる。

各モデルを見ると、評点 4、評点 5 の予測精度が低いことが分かる。これは、本手法では評点 4、5 間の判別が十分に行えないことを意味している。例として表 3-7 にモデル 1 の分類表を記す。評点 4、5 の予測精度低下の要因が評点 4、5 間の誤判定だと分かる。理由として、表 3-1 に示すように、評点 4、5 の場合、最も明確な判断基準であるさびの色調を扱う特徴量が存在しないことが挙げられる。予測結果より、本研究で用いた画像解析手法では評点 4、5 を完全に判別するに至らないことが分かる。しかし、3.3 で述べたように、評点 4、5 は保護性さびであり、長期腐食量予測においても両者の板厚減少量の差が 50 年で 0.02mm 程度であるため、両者間の誤判別がもたらす本手法への影響は小さいと考える。

表 3-7 予測精度におけるモデル 1 の判別分類表

評点	予測値					判別率(%)
	1	2	3	4	5	
1	40	0	0	0	0	100.0
2	0	40	0	0	0	100.0
3	0	0	40	0	0	100.0
4	0	0	0	34	6	85.0
5	0	0	0	7	33	82.5
全体(%)	20.0	20.0	20.0	20.5	19.5	93.5

全モデルを比較すると、DFT を含まないモデル 1~3 の方が DFT を含む 4~9 と比較して全体予測精度が高いことが確認できる。モデル 4~6 の予測精度が低下した理由として、DFT が Texture<sub>64</sub><sup>d</sup> よりも全体予測精度が低いためと考えられる。また、モデル 7~9 より、モデル 1~3 に DFT を加えた場合でも全体予測精度が低下することが分かる。理由として、解析に用いる共変量の予測精度が低い場合、モデル全体の解析精度に悪影響を及ぼすためと考えられる。共変量の予測精度と解析結果の関係性の検証を行うため、特徴量における全体の予測精度の上位 4 種、下位 4 種を用いた 2 つのモデルを作成した。表 3-8 にモデルの共変量、表 3-9 に予測精度結果を記す。結果より、特徴量とモデルの予測精度に比例関係が確認できた。

表 3-8 対比モデル

モデル	共変量	合計
10	Binary, Texture <sub>4</sub> <sup>7</sup> , Texture <sub>64</sub> <sup>7</sup> , Texture <sub>16</sub> <sup>14</sup>	18
11	Texture <sub>64</sub> <sup>14</sup> , Texture <sub>4</sub> <sup>20</sup> , Texture <sub>64</sub> <sup>20</sup> , DFT	18

表 3-9 対比モデル予測精度結果

モデル	評点 1(%)	評点 2(%)	評点 3(%)	評点 4(%)	評点 5(%)	全体(%)
10	100.0	100.0	100.0	85.0	90.0	93.6
11	100.0	86.7	70.0	65.0	85.0	76.9

モデル 1~3 を比較すると、Texture 内で最も全体予測精度の低いTexture<sub>N</sub><sup>20</sup>を含むモデル 3 が最良の結果を示している。これはモデル 4~6 の結果でも同様である。理由として、評点別で見た場合に、Texture<sub>N</sub><sup>20</sup>の精度が他の Texture と比較して評点 4、5 が高く、評点 2、3 が低いこと、同モデル内の Binary の精度を見ると、評点 2、3 が高く、評点 4 が低いことから、互いに精度の補完を行ったために、モデル全体の精度が向上したと考えられる。また、各モデルの評点 5、全体の予測精度には比例関係が見られる。理由として、多項ロジスティック回帰分析の特性上、得られる評価式が評点 5 を基準とした各評点の判別であるため、基準となる評点 5 の予測精度が高いほど各評点の判別力が上昇すると考えられる。

モデル 1~3、6、10 については予測精度が 9 割を超えており、特にモデル 1、6、10 については外観評価において処置の必要が生じる評点 1~3 を完全に識別できているため、十分な予測精度を有するといえる。

### 3.5.2 判別精度の比較及び検討

3.5.1 項で精度検証のために用いた予測精度は、すべての標本画像を用いて評価式を作成し、その評価式より各標本画像の判別を行うため、その特性上、判別精度が過剰評価されている可能性が高い。そこで、より有効な精度検証の方法として交差検証法が提案されている<sup>23)</sup>。本項では交差検証法を用いた判別精度の比較及び検討を行う。

#### (1) 交差検証法

交差検証法とは、標本データを分割し、データの一部を用いて解析、残りのデータで検証を行うことにより、解析自身の妥当性を検証する手法であり、本研究では K-fold 法<sup>23)</sup>を用いて判別精度の検証を行う。

K-fold 法のプロセスを以下に示す。

- ① 標本データを無作為に K 個分割する。分割データを K' とする。
- ② 分割データ K' 内の 1 つを検証用データ群とし、残りの K-1 個を用いて判別式を導出する。

③ 得られた判別式を用いて  $K'$  の各ケースを判別する。

④ ②～③を繰り返し、合計  $K$  回の検証を行う。

検証精度は  $K$  回の判別精度の平均とする。

## (2) 判別精度検証及び考察

判別精度の検証として、モデル 1～6、10、11 に対して分割数  $K=10$  で  $K$ -fold 法を行う。交差検証を行うにあたり、各評点における標本が同数になるように標本 1,2 において標本数の調整を行った。

図 3-13 に評点 1、2 の標本情報及び標本抽出法を示す。なお、評点 3～5 は上記プロセス通りに行うものとする。なお、標本数の調整に当たり、標本調整後に再び予測精度の検証を行った。表 3-10 に標本調整後の各モデル予測精度、表 3-11 に各モデル判別精度結果、表 3-12 に精度の変化率を記す。また、各モデルの予測精度と判別精度の比較を図 3-14～図 3-21 に示す。ここで評点 1 については、元の標本数が 6 と少ないため、残りのデータ群 5 つ（検証時 39）では評価式に偏りが生じてしまい、十分な判別が行えないと考える。よって、評点 1 についてのみ検証用データ群に 1 つだけ検証用標本を含むものとする。

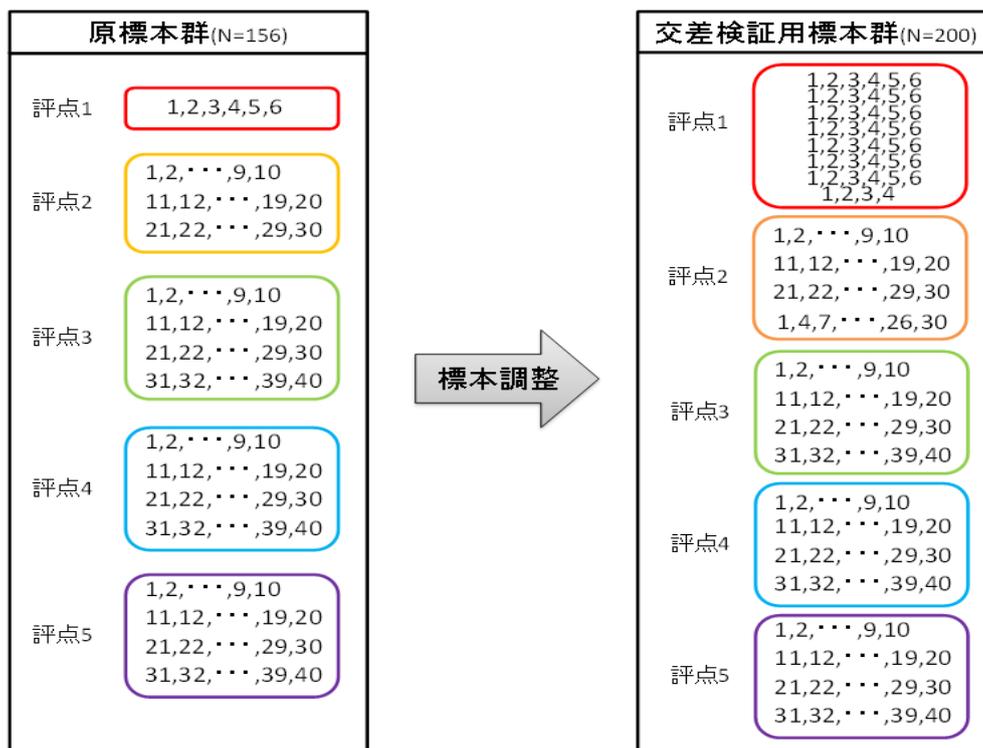


図 3-13 標本例

表 3-10 標本補正後の各モデル予測精度

モデル	評点 1(%)	評点 2(%)	評点 3(%)	評点 4(%)	評点 5(%)	全体(%)
1	100.0	100.0	100.0	85.0	82.5	93.5
2	100.0	97.5	100	85.0	82.5	93.0
3	100.0	97.5	97.5	85.0	92.5	94.5
4	100.0	100.0	100.0	82.5	77.5	92.0
5	100.0	100.0	97.5	80.0	80.0	91.5
6	100.0	100.0	100.0	82.5	87.5	94.0
10	100.0	100.0	100.0	85.0	87.5	94.5
11	100.0	90.0	72.5	65.0	82.5	82.0

表 3-11 各モデル判別精度

モデル	評点 1(%)	評点 2(%)	評点 3(%)	評点 4(%)	評点 5(%)	全体(%)
1	100.0	76.7	87.5	52.5	77.5	75.0
2	100.0	76.7	75.0	65.0	77.5	75.0
3	100.0	76.7	80.0	72.5	90.0	81.3
4	100.0	73.3	70.0	60.0	72.5	70.6
5	100.0	73.3	75.0	67.5	72.5	73.8
6	100.0	70.0	75.0	62.5	67.5	70.6
10	100.0	76.7	75.0	77.5	80.0	78.8
11	100.0	70.0	52.5	55.0	55.0	60.0

表 3-12 各モデル精度変化率

モデル	評点 1(%)	評点 2(%)	評点 3(%)	評点 4(%)	評点 5(%)	全体(%)
1	0.0	23.3	12.5	32.5	5.0	18.5
2	0.0	20.8	25.0	20.0	5.0	18.0
3	0.0	20.8	17.5	12.5	2.5	13.2
4	0.0	26.7	30.0	22.5	5.0	21.4
5	0.0	26.7	22.5	12.5	7.5	17.7
6	0.0	30.0	25.0	20.0	20.0	23.4
10	0.0	23.3	25.0	7.5	7.5	15.7
11	0.0	20.0	20.0	10.0	27.5	22.0

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
予想	評点1	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
	評点2	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	94.4%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
	評点3	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
	評点4	77.8%	77.8%	72.2%	77.8%	75.0%	75.0%	77.8%	77.8%	69.4%	77.8%
	評点5	89.1%	89.1%	90.9%	94.5%	89.1%	89.1%	90.9%	90.9%	92.7%	89.1%
	全体	93.0%	93.0%	92.5%	94.5%	92.5%	91.5%	93.5%	93.5%	92.5%	93.0%
判別	評点1	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
	評点2	66.7%	66.7%	100.0%	66.7%	100.0%	66.7%	100.0%	66.7%	100.0%	33.3%
	評点3	75.0%	100.0%	100.0%	75.0%	75.0%	75.0%	100.0%	100.0%	75.0%	100.0%
	評点4	25.0%	50.0%	50.0%	50.0%	100.0%	25.0%	25.0%	50.0%	75.0%	75.0%
	評点5	50.0%	75.0%	75.0%	100.0%	75.0%	75.0%	100.0%	75.0%	75.0%	75.0%
	全体	56.3%	75.0%	81.3%	75.0%	87.5%	62.5%	81.3%	75.0%	81.3%	75.0%

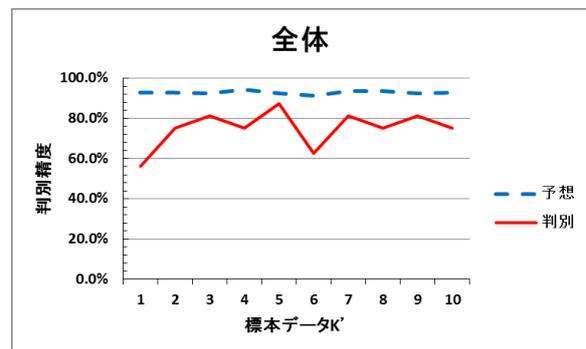
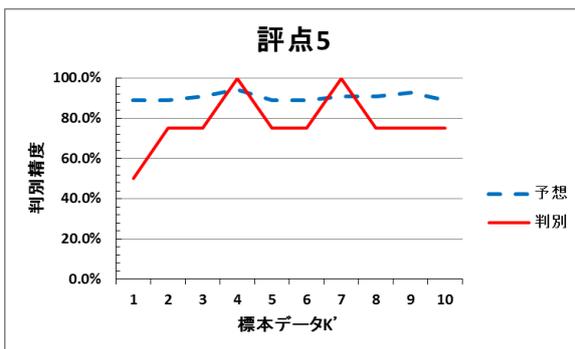
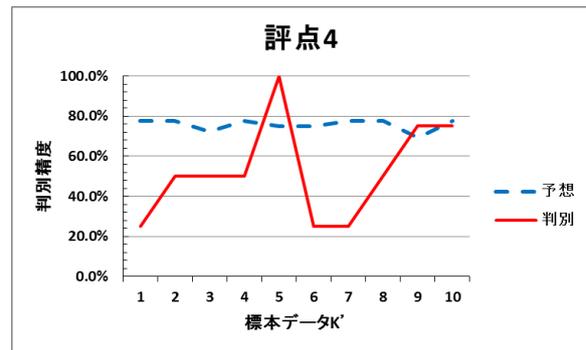
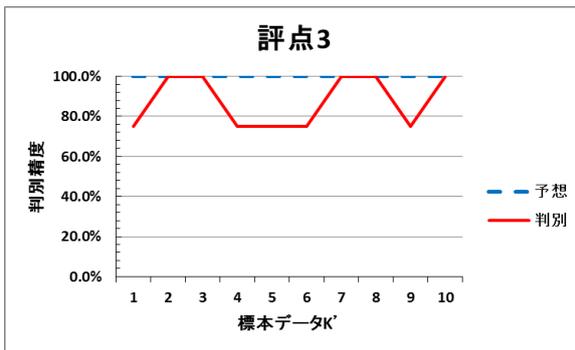
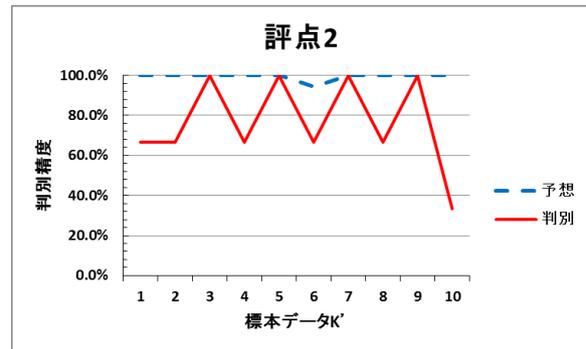
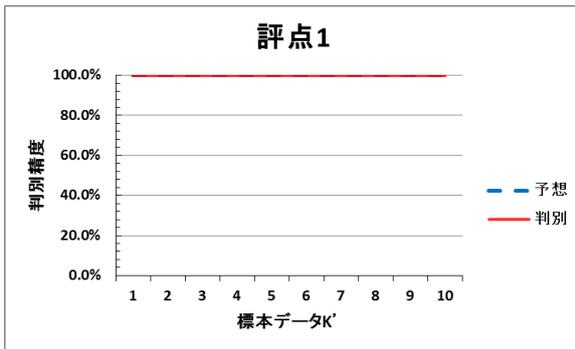


図 3-14 モデル 1 の精度比較

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
予想	評点1	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
	評点2	100.0%	100.0%	97.2%	97.2%	94.4%	100.0%	94.4%	94.4%	94.4%	97.2%
	評点3	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	97.2%	100.0%	100.0%
	評点4	86.1%	86.1%	83.3%	88.9%	88.9%	86.1%	83.3%	86.1%	80.6%	80.6%
	評点5	83.3%	83.3%	80.6%	83.3%	83.3%	88.9%	80.6%	88.9%	80.6%	86.1%
	全体	93.9%	93.9%	92.2%	93.9%	93.3%	95.0%	91.7%	93.3%	91.1%	92.8%
判別	評点1	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
	評点2	66.7%	66.7%	66.7%	66.7%	100.0%	33.3%	100.0%	100.0%	100.0%	66.7%
	評点3	50.0%	75.0%	100.0%	50.0%	100.0%	50.0%	100.0%	50.0%	75.0%	100.0%
	評点4	50.0%	75.0%	50.0%	50.0%	100.0%	25.0%	75.0%	50.0%	75.0%	100.0%
	評点5	100.0%	75.0%	75.0%	75.0%	75.0%	75.0%	100.0%	50.0%	75.0%	75.0%
	全体	68.8%	75.0%	75.0%	62.5%	93.8%	50.0%	93.8%	62.5%	81.3%	87.5%

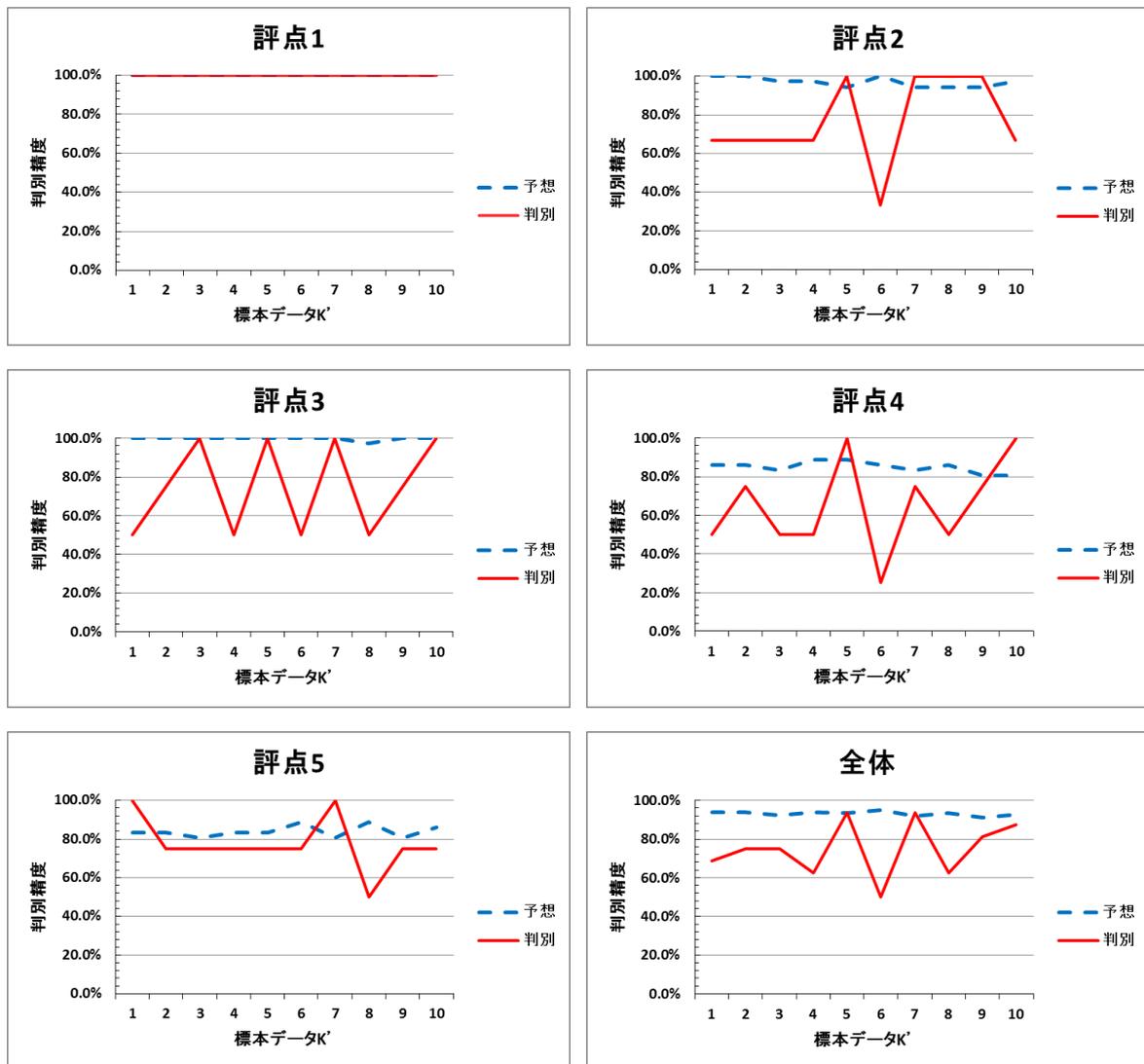


図 3-15 モデル 2 の精度比較

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
予想	評点1	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
	評点2	100.0%	100.0%	97.2%	97.2%	100.0%	100.0%	97.2%	100.0%	97.2%	97.2%
	評点3	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	97.2%	100.0%	97.2%	97.2%	100.0%	100.0%
	評点4	86.1%	83.3%	80.6%	80.6%	80.6%	83.3%	83.3%	83.3%	80.6%	80.6%
	評点5	94.5%	92.7%	94.5%	92.7%	94.5%	96.4%	94.5%	96.4%	94.5%	96.4%
全体	96.0%	95.0%	94.5%	94.0%	94.5%	96.0%	94.5%	95.5%	95.5%	94.5%	95.0%
判別	評点1	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
	評点2	66.7%	66.7%	66.7%	66.7%	66.7%	66.7%	100.0%	100.0%	100.0%	66.7%
	評点3	75.0%	75.0%	100.0%	50.0%	75.0%	50.0%	100.0%	100.0%	75.0%	100.0%
	評点4	25.0%	75.0%	75.0%	50.0%	100.0%	50.0%	75.0%	75.0%	100.0%	100.0%
	評点5	100.0%	100.0%	100.0%	75.0%	75.0%	75.0%	100.0%	100.0%	100.0%	75.0%
全体	68.8%	81.3%	87.5%	62.5%	81.3%	62.5%	93.8%	93.8%	93.8%	87.5%	

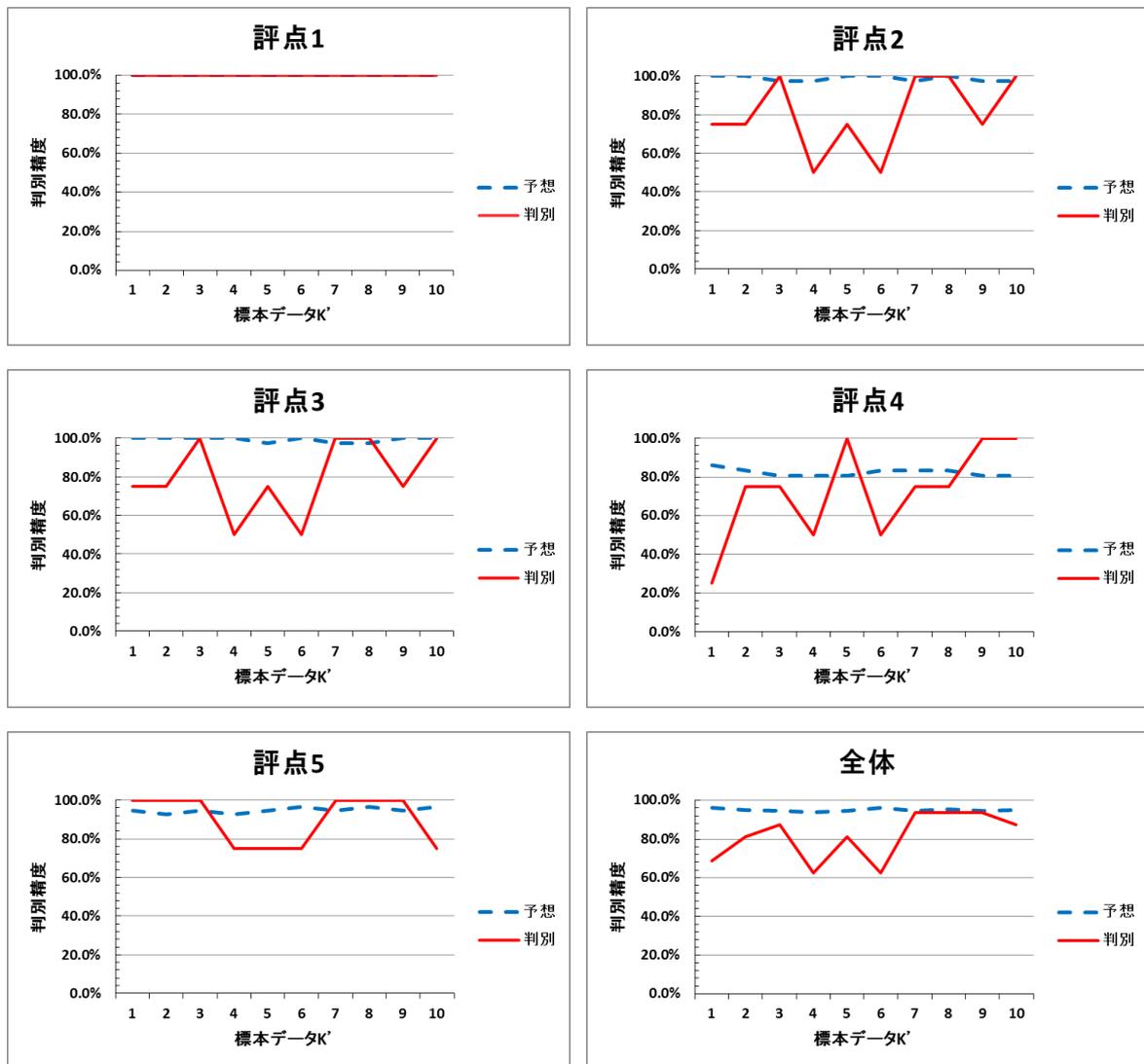


図 3-16 モデル3 の精度比較

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
予想	評点1	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
	評点2	100.0%	97.2%	97.2%	97.2%	97.2%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	94.4%
	評点3	100.0%	97.2%	97.2%	97.2%	97.2%	100.0%	97.2%	100.0%	100.0%	97.2%
	評点4	86.1%	83.3%	80.6%	83.3%	80.6%	86.1%	80.6%	86.1%	77.8%	83.3%
	評点5	80.6%	77.8%	80.6%	77.8%	77.8%	88.9%	80.6%	88.9%	80.6%	75.0%
	全体	93.3%	91.1%	91.1%	91.1%	90.6%	95.0%	91.7%	95.0%	91.7%	90.0%
判別	評点1	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
	評点2	66.7%	66.7%	100.0%	66.7%	100.0%	33.3%	100.0%	66.7%	66.7%	66.7%
	評点3	50.0%	75.0%	75.0%	75.0%	100.0%	75.0%	50.0%	50.0%	75.0%	75.0%
	評点4	75.0%	75.0%	75.0%	75.0%	75.0%	0.0%	50.0%	50.0%	50.0%	75.0%
	評点5	75.0%	100.0%	75.0%	75.0%	75.0%	50.0%	75.0%	25.0%	100.0%	75.0%
		全体	68.8%	81.3%	81.3%	75.0%	87.5%	43.8%	68.8%	50.0%	75.0%

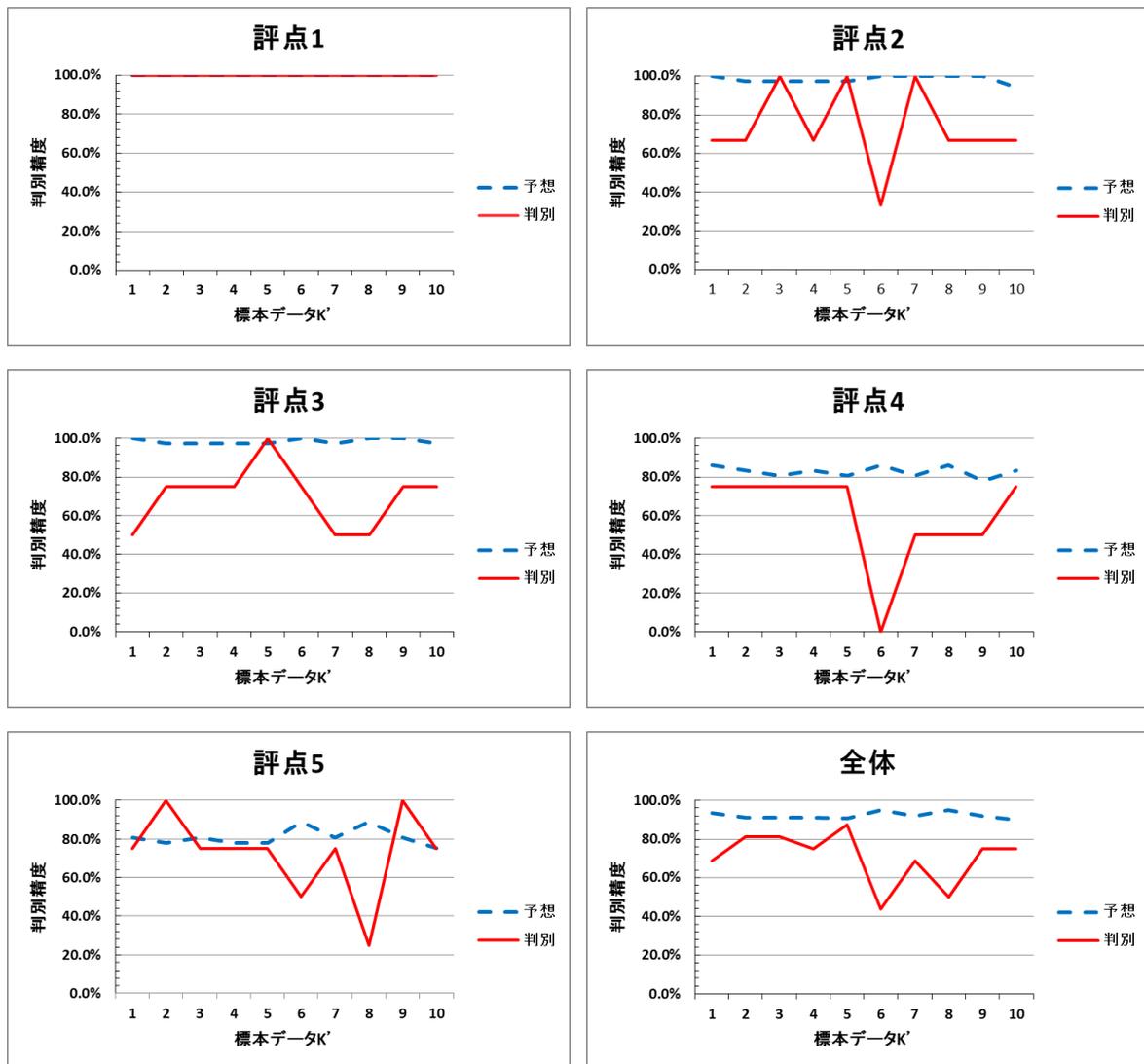


図 3-17 モデル 4 の精度比較

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
予想	評点1	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
	評点2	100.0%	100.0%	97.2%	97.2%	97.2%	100.0%	100.0%	100.0%	97.2%	97.2%
	評点3	97.2%	100.0%	97.2%	97.2%	97.2%	97.2%	97.2%	94.4%	100.0%	97.2%
	評点4	80.6%	83.3%	80.6%	77.8%	77.8%	83.3%	77.8%	83.3%	83.3%	80.6%
	評点5	77.8%	80.6%	80.6%	83.3%	80.6%	91.7%	77.8%	83.3%	77.8%	80.6%
全体	91.1%	92.8%	91.1%	91.1%	90.6%	94.4%	90.6%	92.2%	91.7%	91.1%	
判別	評点1	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
	評点2	66.7%	66.7%	100.0%	66.7%	100.0%	33.3%	100.0%	66.7%	66.7%	66.7%
	評点3	75.0%	75.0%	100.0%	75.0%	100.0%	75.0%	50.0%	50.0%	75.0%	75.0%
	評点4	100.0%	75.0%	75.0%	75.0%	75.0%	25.0%	50.0%	50.0%	75.0%	75.0%
	評点5	75.0%	100.0%	75.0%	75.0%	75.0%	50.0%	75.0%	50.0%	75.0%	75.0%
全体	81.3%	81.3%	87.5%	75.0%	87.5%	50.0%	68.8%	56.3%	75.0%	75.0%	

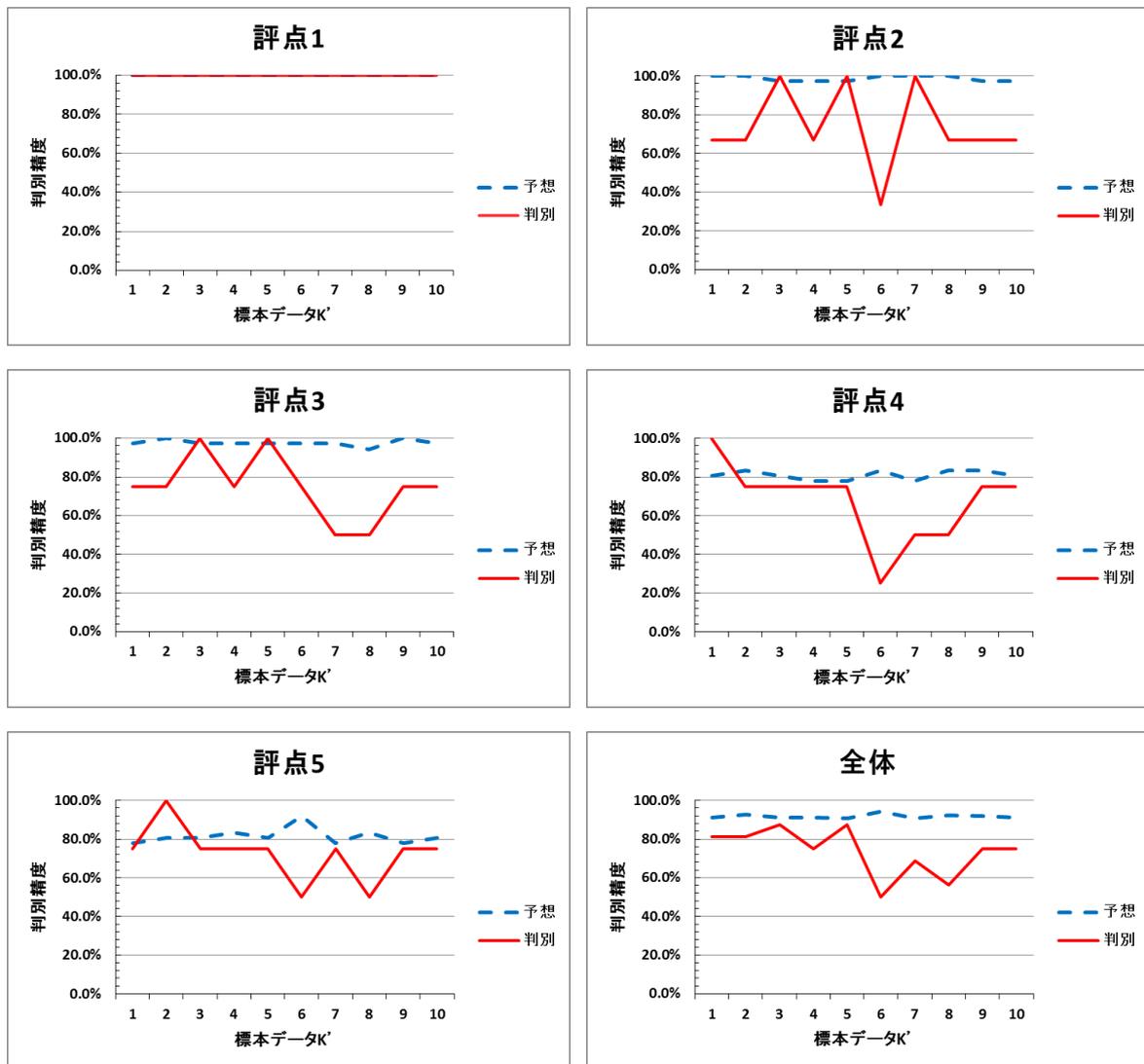


図 3-18 モデル 5 の精度比較

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
予想	評点1	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
	評点2	100.0%	100.0%	97.2%	97.2%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	97.2%	97.2%
	評点3	97.2%	100.0%	97.2%	97.2%	97.2%	100.0%	97.2%	94.4%	100.0%	97.2%
	評点4	77.8%	83.3%	83.3%	80.6%	80.6%	83.3%	80.6%	86.1%	86.1%	80.6%
	評点5	80.6%	86.1%	83.3%	83.3%	83.3%	94.4%	86.1%	88.9%	80.6%	88.9%
	全体	91.1%	93.9%	92.2%	91.7%	92.2%	95.6%	92.8%	93.9%	92.8%	92.8%
判別	評点1	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
	評点2	66.7%	66.7%	66.7%	66.7%	100.0%	33.3%	100.0%	66.7%	66.7%	66.7%
	評点3	100.0%	75.0%	100.0%	75.0%	75.0%	75.0%	50.0%	50.0%	75.0%	75.0%
	評点4	50.0%	75.0%	75.0%	75.0%	75.0%	25.0%	50.0%	25.0%	75.0%	100.0%
	評点5	75.0%	100.0%	75.0%	75.0%	75.0%	50.0%	75.0%	25.0%	50.0%	75.0%
	全体	75.0%	81.3%	81.3%	75.0%	81.3%	50.0%	68.8%	43.8%	68.8%	81.3%

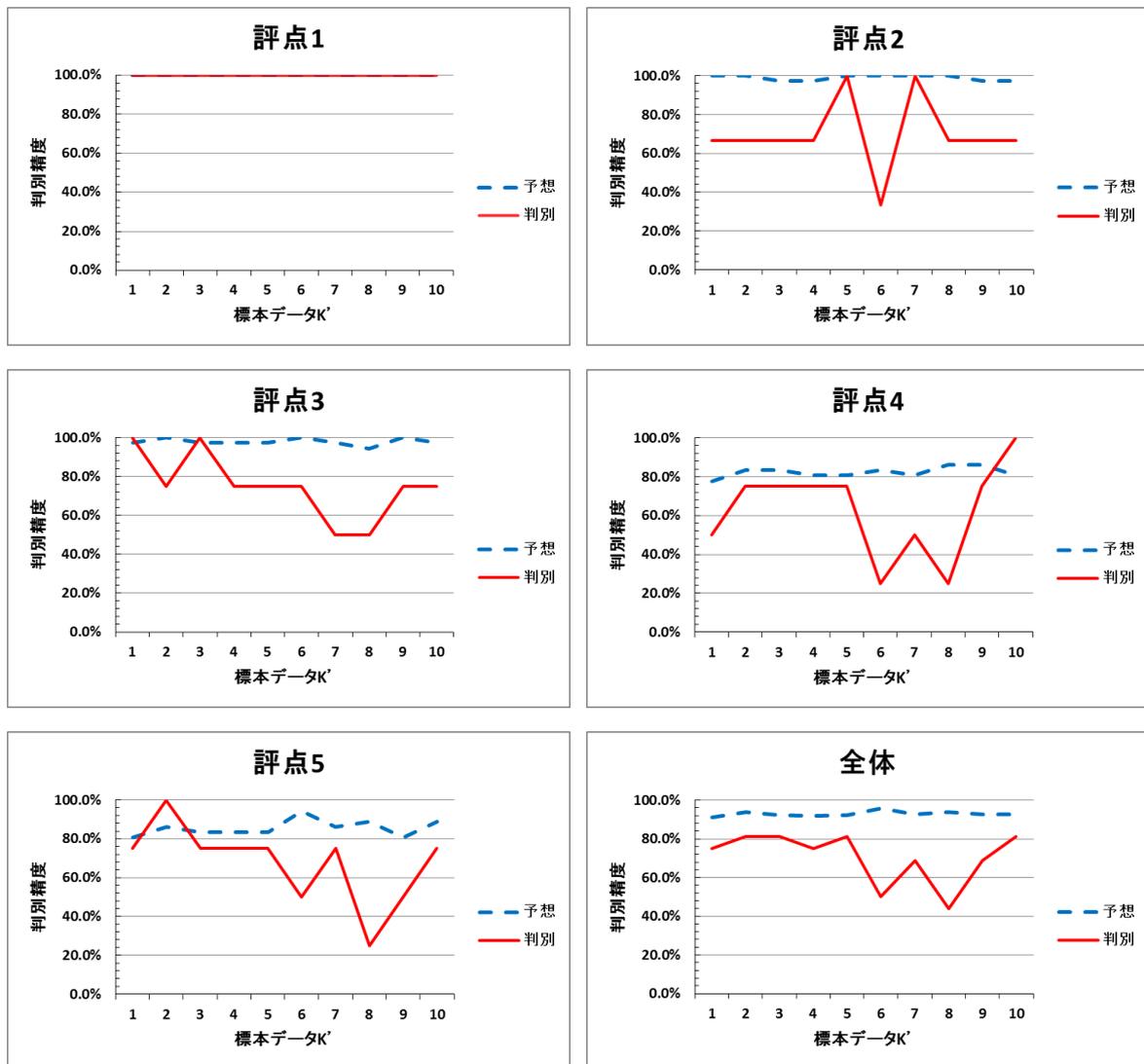


図 3-19 モデル 6 の精度比較

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
予想	評点1	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
	評点2	86.1%	88.9%	88.9%	94.4%	86.1%	91.7%	91.7%	86.1%	86.1%	88.9%
	評点3	66.7%	72.2%	69.4%	77.8%	72.2%	80.6%	72.2%	63.9%	72.2%	66.7%
	評点4	66.7%	63.9%	66.7%	66.7%	69.4%	63.9%	66.7%	69.4%	66.7%	63.9%
	評点5	80.6%	86.1%	83.3%	86.1%	86.1%	86.1%	83.3%	88.9%	86.1%	77.8%
	全体	80.0%	82.2%	81.7%	85.0%	82.8%	84.4%	82.8%	81.7%	82.2%	79.4%
判別	評点1	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
	評点2	66.7%	66.7%	100.0%	66.7%	100.0%	33.3%	66.7%	100.0%	0.0%	100.0%
	評点3	75.0%	50.0%	100.0%	25.0%	0.0%	50.0%	75.0%	75.0%	50.0%	25.0%
	評点4	75.0%	75.0%	75.0%	25.0%	25.0%	50.0%	50.0%	50.0%	50.0%	75.0%
	評点5	50.0%	75.0%	50.0%	75.0%	50.0%	75.0%	25.0%	25.0%	50.0%	75.0%
	全体	68.8%	68.8%	81.3%	50.0%	43.8%	56.3%	56.3%	62.5%	43.8%	68.8%

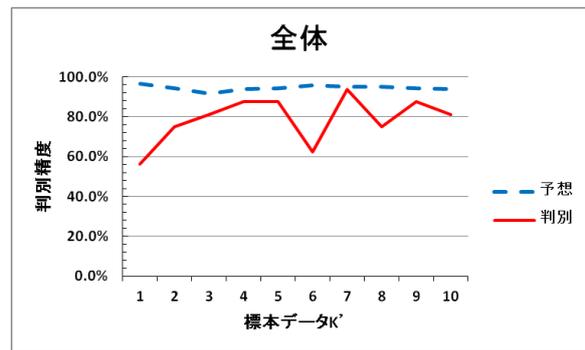
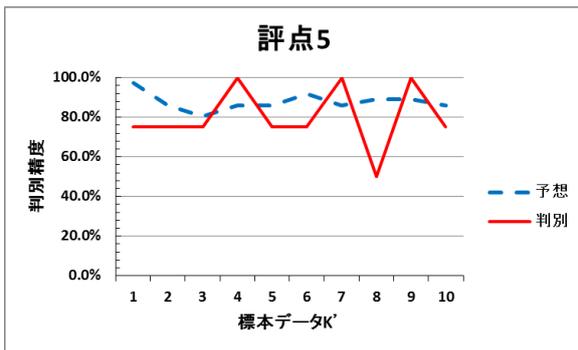
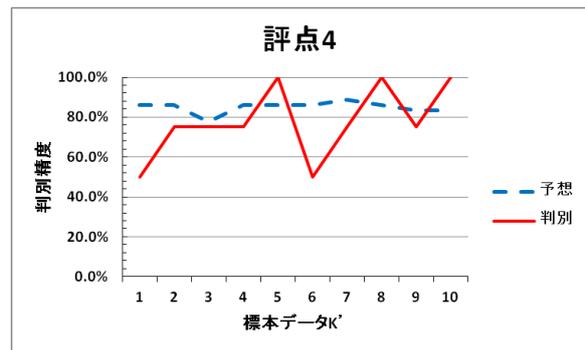
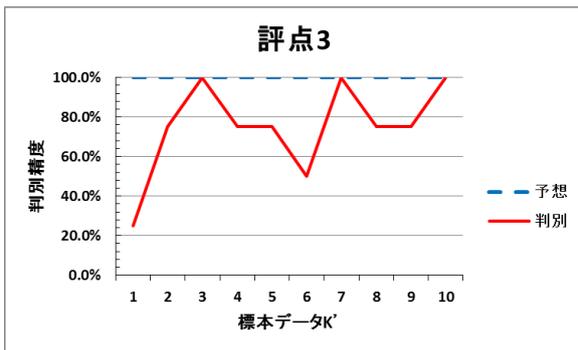
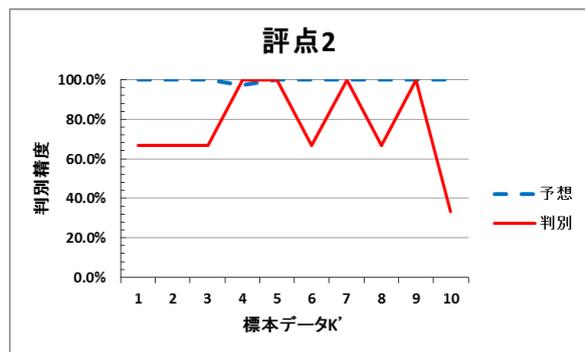
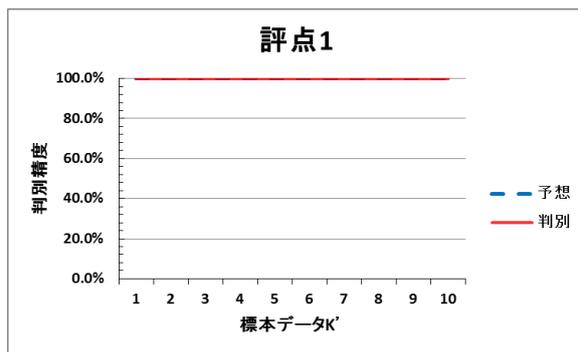


図 3-20 モデル 10 の精度比較

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
予想	評点1	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
	評点2	86.1%	88.9%	88.9%	94.4%	86.1%	91.7%	91.7%	86.1%	86.1%	88.9%
	評点3	66.7%	72.2%	69.4%	77.8%	72.2%	80.6%	72.2%	63.9%	72.2%	66.7%
	評点4	66.7%	63.9%	66.7%	66.7%	69.4%	63.9%	66.7%	69.4%	66.7%	63.9%
	全体	80.0%	82.2%	81.7%	85.0%	82.8%	84.4%	82.8%	81.7%	82.2%	79.4%
判別	評点1	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
	評点2	66.7%	66.7%	100.0%	66.7%	100.0%	33.3%	66.7%	100.0%	0.0%	100.0%
	評点3	75.0%	50.0%	100.0%	25.0%	0.0%	50.0%	75.0%	75.0%	50.0%	25.0%
	評点4	75.0%	75.0%	75.0%	25.0%	25.0%	50.0%	50.0%	50.0%	50.0%	75.0%
	全体	68.8%	68.8%	81.3%	50.0%	43.8%	56.3%	56.3%	62.5%	43.8%	68.8%

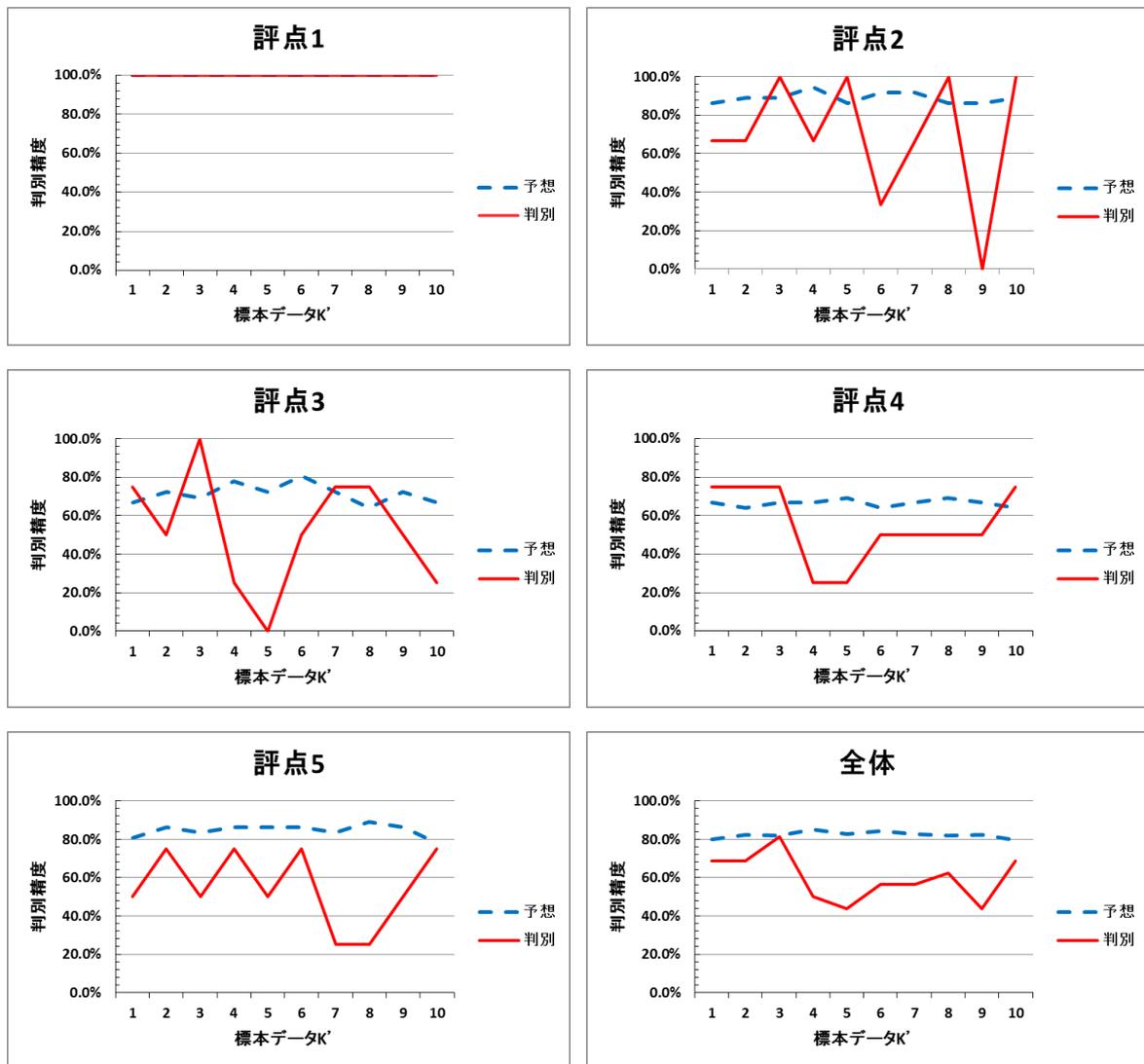


図 3-21 モデル 11 の精度比較

これらの結果より、すべてのモデルにおいて予測精度と比較して、判別精度の低下が見られる。評点1の判別精度のみ100%である要因として、検証用データ群に検証用標本を含んでいるためと考えられる。また、予測精度と同様に評点4の判別精度が低い。一例として表3-13にモデル1の分類表を記す。評点4、5を見ると、相互の誤判定が90%以上を占める。原因として、本手法では、両者の判別が十分に行えないためと考える。また、誤判定の大半が隣り合う評点に行われている。大半の画像において隣接する両者の生起確率の差は5%以下であることから、誤判定した画像の大半が誤判定した評点の外観評価基準に近い画像と言える。図3-22に誤判別した画像の一例を示す。図3-14～図3-21を見ると、すべてのモデルにおいて標本データ  $K'=6$  の場合に判別精度の低下が確認できる。理由として同標本内に検証用データ群では判別できないデータが多いためと考えられる。

表 3-13 判別精度におけるモデル1の判別分類表

評点	予測値					判別率(%)
	1	2	3	4	5	
1	6	0	0	0	0	100.0
2	2	23	5	0	0	76.7
3	0	4	35	1	0	87.5
4	0	0	2	21	17	52.5
5	0	0	0	9	31	77.5
全体(%)	3.8	14.7	22.4	13.5	19.9	74.3

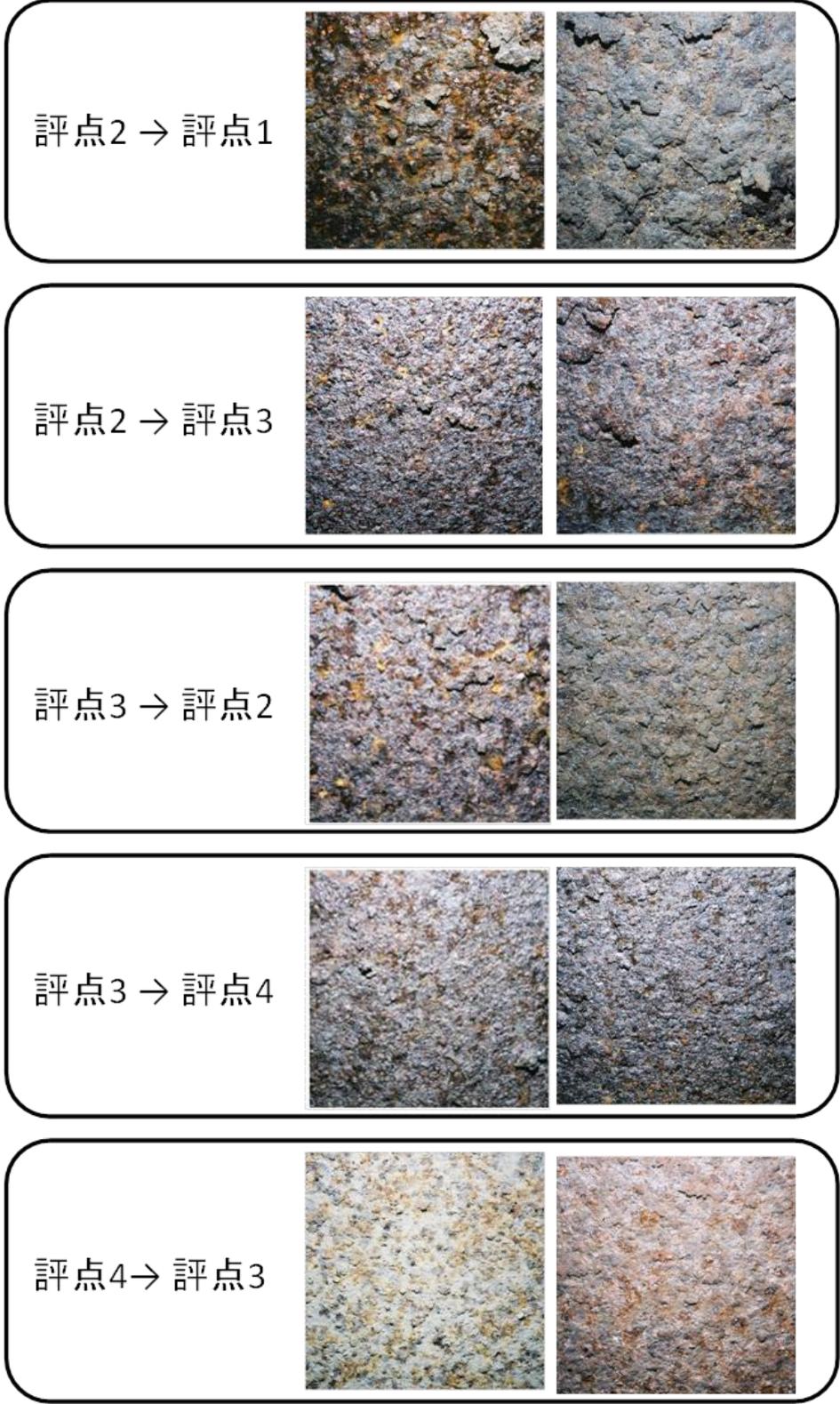


図 3-22 誤判別画像一例

そこで、モデル1の標本データ  $K'=6$  に対して、交差検証法の1つである Leave-One-Out 法<sup>23)</sup>を用いた場合の判別精度の検証を行った。Leave-One-Out 法は標本データ内の1つを検証用データとし、残りのデータを用いて判別式を導出し、検証用データの判別を行う方法である。表3-14に K-fold 法、Leave-One-Out 法の判別結果を記す。結果より、標本データ  $K'=6$  において3つのデータが検証用データ群では判別できないことが確認できる。

表 3-14 交差検証法判定比較

データ	目視判定	K-fold	Leave-One-Out
1	1	1	1
2	2	2	2
3	2	2	3
4	2	3	3
5	3	2	3
6	3	3	2
7	3	3	3
8	3	3	3
9	4	4	4
10	4	5	5
11	4	3	4
12	4	5	4
13	5	4	4
14	5	5	5
15	5	5	5
16	5	5	5
判別精度(%)		62.5	68.8

各検証用データにおいて、全体予測精度と全体判別精度の間に反比例の関係が確認できる。理由として、上記のような判別が難しいデータが少ないほど評点間の特徴量を捉え易くなるためと考えられる。

全てのモデルにおいて判別精度が低下した要因として、多重共線性が挙げられる。多重共線性とは、重回帰分析において共変量（独立変数）間に高い相関があることを言い、回帰式の精度を低下させる原因とされる<sup>24)</sup>。ロジスティック回帰分析は一般の重回帰分析と比較して多重共線性が発生しにくいと考えられているが、複数の条件が重なる場合、相関係数 0.775 でも多重共線性が発生する<sup>23)</sup>。本手法では、1つの画像解析より複数の特徴量を算出するため、特徴量間での相関が 0.8 以上と非常に高い点、判別精度が 10%以上低下している点より、すべてのモデルにおいて多重共線性が発生していると考えられる。

各モデルでみると、モデル 1~3 では予測精度と判別精度に比例関係が見られたが、モデル 4~6 については同様の関係が見られなかった。理由として、表 3-5 の Texture を見ると、評点 4 の判別において、Texture<sub>4</sub><sup>14</sup>、Texture<sub>16</sub><sup>14</sup> の予測精度が Texture<sub>4</sub><sup>7</sup>、Texture<sub>16</sub><sup>7</sup>、Texture<sub>4</sub><sup>20</sup>、Texture<sub>16</sub><sup>20</sup> よりも高いためと考えられる。

予測精度と同様に標点 5 と全体の判別精度に比例関係が見られる。全体予測精度においてモデル 3 とモデル 10 は等価であったが、全体判別精度ではモデル 3 の方が優れた結果となった。このことから、多項ロジスティック回帰分析を用いる場合、共変量において評価の基準となる評点の精度が高いほど優れた判別結果が得られると考えられる。

本手法の有効性を確かめるために、本手法と既往の手法との精度比較を行う。なお、同条件での精度検証を行うため、本手法では、モデル 11、既往の手法では、河村ら<sup>13)</sup>の手法における同時生起行列と 2次元 DFT を特徴量としてニューラルネットワークを行った場合の各精度結果を用いる。表 3-15 に河村らの手法を用いた場合の予測精度、表 3-16 に河村らの手法を用いた場合の判別精度を記す。結果より、本手法と比較して河村らの手法は、全体予測精度・全体判別精度共に 3 割程度下回る結果となった。よって、河村らの手法よりも本手法の有効性の方が高いと言える。

表 3-15 河村<sup>13)</sup>らの手法を用いた場合の予測精度

評点	予測値(%)				
	1	2	3	4	5
1	38.6	15.9	6.8	13.6	25.0
2	1.2	38.6	22.9	18.7	18.7
3	0.9	11.9	33.2	27.0	27.0
4	0.4	9.0	16.0	49.6	25.0
5	3.8	7.7	11.2	21.5	55.8
全体(%)					44.9

表 3-16 河村<sup>13)</sup>らの手法を用いた場合の判別精度

評点	予測値(%)				
	1	2	3	4	5
1	0.0	14.3	42.9	14.3	28.6
2	1.8	16.1	37.5	19.6	25.0
3	1.9	19.2	21.2	30.8	26.9
4	5.4	5.4	19.6	30.4	39.3
5	8.5	8.5	10.2	22.0	50.8
全体(%)					29.1

### 3.5.3 最適モデルの検討

モデル3は、画像判別において最も優れた結果を有する一方で、モデル1よりも評点4、5の判別精度が高い一方で評点1～3の判別精度が低い。3.3で述べたように、維持管理の観点から見れば、評点4、5の誤判別による影響よりも評点1～3の誤判別の影響の方が大きいことは明白である。

モデル1よりも、モデル3の評点1～3の判別精度が低下した理由として解析に使用した特徴量の評点2、3の予測精度が低いことが挙げられる。表3-17に各モデルの特徴量平均予測精度を記す。

表 3-17 特徴量平均予測精度

モデル	評点 1(%)	評点 2(%)	評点 3(%)	評点 4(%)	評点 5(%)	全体(%)
1	50.0	70.0	63.1	50.0	68.8	62.0
2	50.0	67.5	53.8	56.3	66.3	60.1
3	50.0	58.4	53.1	50.6	75.0	59.0
4	54.2	61.7	63.8	43.8	69.4	59.3
5	54.2	60.0	55.6	50.6	66.9	58.0
6	54.2	55.9	55.0	47.5	71.9	57.5
10	50.0	70.0	60.0	55.0	67.5	62.2
11	54.2	44.2	41.9	41.3	65.6	48.7

モデル3はモデル1よりも評点4、5の平均予測精度が高い一方で、評点2、3の平均予測精度が低いことが分かる。そこで、モデル3に対して、評点2、3、5の精度が高い特徴量を追加することにより、モデル1よりも評点1～3の判別に優れたモデルを作成できると考えた。表3-5より、最も条件に適合する特徴量がTexture<sub>4</sub><sup>7</sup>であることから、モデル3にTexture<sub>4</sub><sup>7</sup>を加えた新たなモデルの作成を行った。表3-18に検討モデルの共変量、表3-19に予測精度及び判別精度を記す。図3-23に検討モデルの精度比較を示す。結果より、モデル1よりも評点1～3の判別精度が高いことが確認できる。表3-20に検討モデルの分類表を記す。モデル3よりも評点4、5間の誤認識が増加したため、全体の判別精度が5%低下している。原因としてTexture<sub>4</sub><sup>7</sup>の評点4の予測精度が特徴量平均予測精度よりも低いと考えられる。図3-24に検討モデルにおいて誤判定した画像を示す。誤判定のうち、4つは誤判定に近い特徴を持つ画像であった。残りは、他のモデルでも判別できなかった画像であることから、検証用データ群では判別できない特徴を持つ画像であると考えられる。図3-25に誤判定画像の照査結果を記す。

表 3-18 検討モデル共変量

共変量	合計
Binary, Texture <sub>4</sub> <sup>7</sup> , Texture <sub>4</sub> <sup>20</sup> , Texture <sub>16</sub> <sup>20</sup> , Texture <sub>64</sub> <sup>20</sup>	22

表 3-19 検討モデル各精度結果

	評点 1	評点 2	評点 3	評点 4	評点 5	全体
予測精度 (%)	100.0	100.0	100.0	85.0	90.0	95.0
判別精度 (%)	100.0	80.0	90.0	67.5	62.5	76.3

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
予想	評点1	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
	評点2	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
	評点3	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	97.2%	100.0%	100.0%
	評点4	97.2%	83.3%	83.3%	86.1%	83.3%	86.1%	88.9%	86.1%	86.1%	86.1%
	評点5	97.2%	94.4%	91.7%	94.4%	86.1%	94.4%	88.9%	88.9%	88.9%	91.7%
	全体	98.9%	95.6%	95.0%	96.1%	93.9%	96.1%	95.6%	94.4%	95.0%	95.6%
判別	評点1	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
	評点2	66.7%	100.0%	66.7%	100.0%	100.0%	66.7%	100.0%	100.0%	66.7%	33.3%
	評点3	75.0%	100.0%	100.0%	75.0%	100.0%	100.0%	100.0%	75.0%	75.0%	100.0%
	評点4	0.0%	100.0%	100.0%	50.0%	75.0%	25.0%	75.0%	75.0%	75.0%	100.0%
	評点5	75.0%	50.0%	75.0%	75.0%	75.0%	50.0%	50.0%	75.0%	50.0%	50.0%
		全体	56.3%	87.5%	87.5%	75.0%	87.5%	62.5%	81.3%	81.3%	68.8%

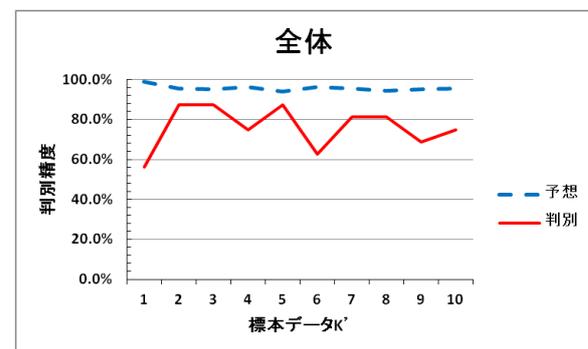
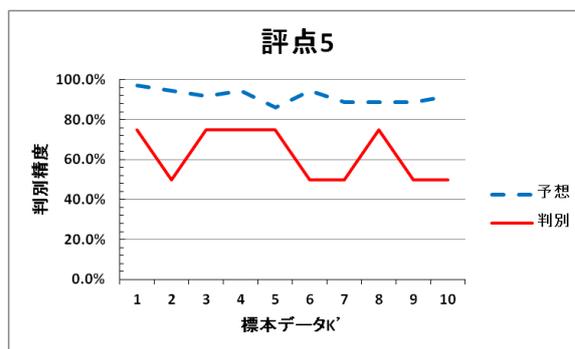
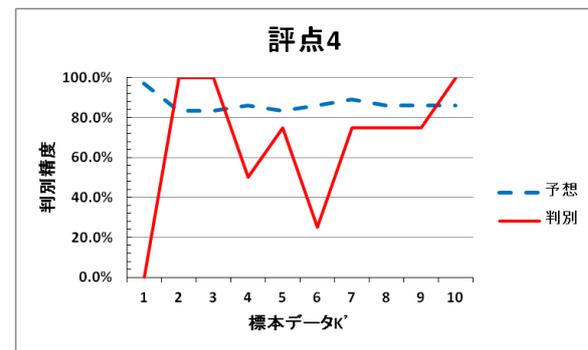
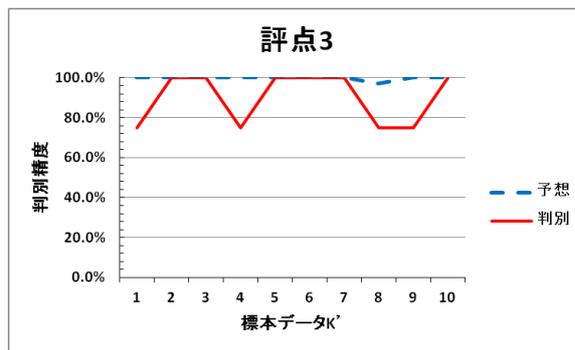
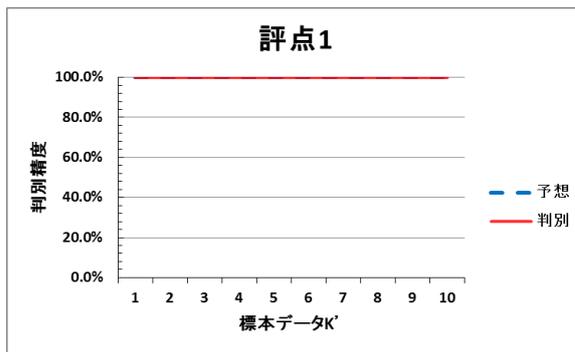


図 3-23 検討モデルの精度比較

表 3-20 判別精度における検討モデルの判別分類表

評点	予測値					判別率(%)
	1	2	3	4	5	
1	6	0	0	0	0	100.0
2	1	24	5	0	0	80.0
3	0	2	36	2	0	90.0
4	0	0	0	27	13	67.5
5	0	0	0	15	25	62.5
全体(%)	3.8	15.4	23.1	17.3	16.0	75.6



図 3-24 検討モデル誤判定一覧

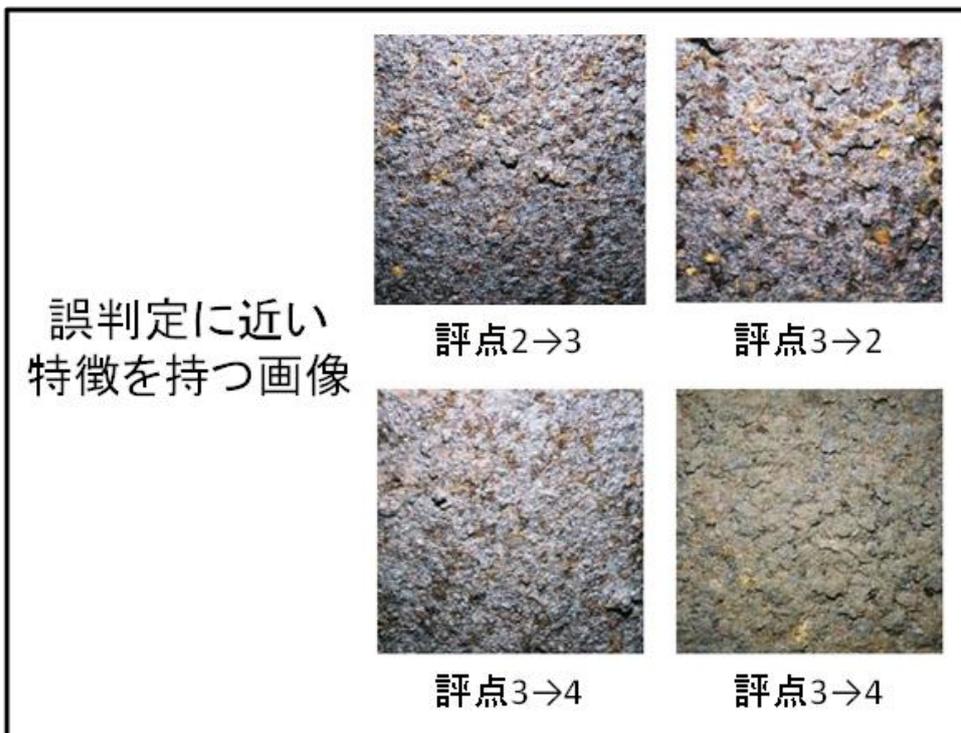
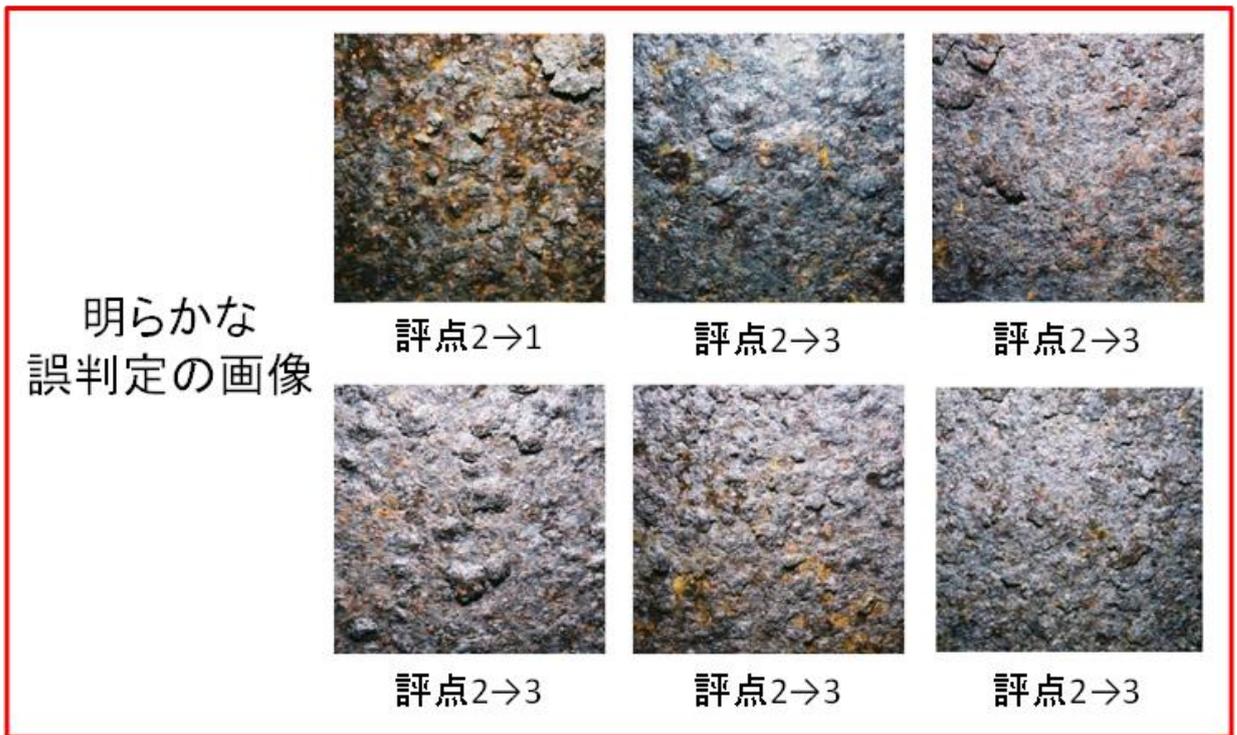


図 3-25 検討モデル誤判定画像照査結果

3.5.2 で述べたように、判別精度における誤判定の大半が評点 4、5 間の相互誤判定である。評点 4、5 間の誤判定が与える長期腐食度予測への影響が小さいことから、将来の耐荷力への影響も小さいと考えられる。そこで、高知自動車道内の耐候性橋梁の一つである平瀬橋の桁断面に対して、外観評価 4、5 それぞれの場合における 50 年後耐荷力減少率を求めた。なお、50 年後板厚減少量は評点 4 の場合 0.20mm、評点 5 の場合 0.18mm とし、均一に板厚減少するものとする。図 3-26 に平瀬橋桁断面を示す。結果、耐荷力減少率は評点 4 の場合 2.13%、評点 5 の場合 1.92% となり、評点 4、5 間の誤判定による 50 年後耐荷力への影響は 0.21% と非常に小さい事が確認できた。

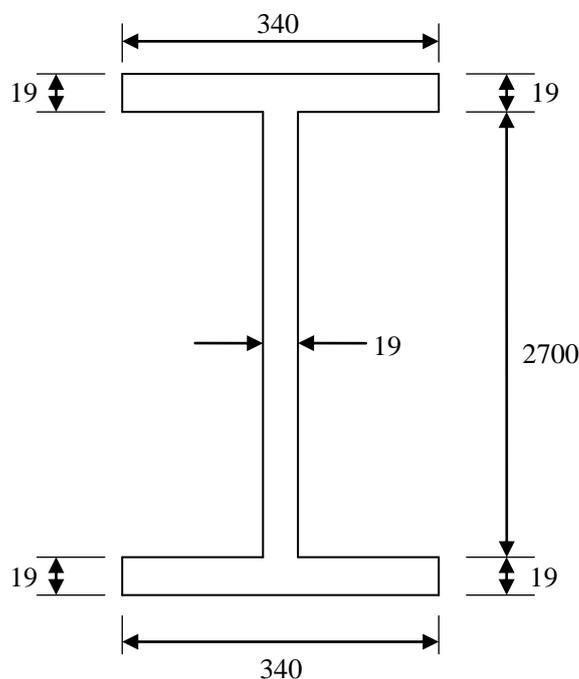


図 3-26 平瀬橋桁断面図

評点 4、5 間の相互誤判定による長期腐食度予測及び耐荷力への影響が小さい事から、評点 4、5 を一括りにした 4 段階判定でも維持・管理において有効な結果を示すと考える。そこで、検討モデルに対して、4 段階評価での解析を行う場合と、5 段階評価後に評点 4、5 を一括りとする 4 段階評価に再評価した場合の精度比較を行う。表 3-21 に 4 段階評価を用いた場合の予測精度、判別精度結果、表 3-22 に分類表、表 3-23 に 5 段階評価後、4 段階評価に再評価を行った場合の予測精度、判別精度結果、表 3-24 に分類表を記す。4 段階評価で解析を行う場合、評点 3 の誤判定が増加しており、5 段階評価後、4 段階評価に再評価を行う場合の方が判別に優れることが分かる。表 3-25 に特徴量単独での予測精度を記す。評点 3 の予測精度に著しい低下が見られることから、本手法において 4 段階評

価は適さないことが分かる。

更なる全体判別精度の向上には評点 4、5 間の判別に優れた特徴量が必要であるが、本手法ではその条件を満たすものが存在しない。また、5 段階評価の方が、評点 4、5 を一括りにした 4 段階評価よりも評点 1～3 の判別において優れた能力を有しており、5 段階評価後、4 段階評価に再評価を行う場合、93.6%の精度で判別することができる。以上より、本手法において最も評点 1～3 の判別に優れていること、評点 4、5 間の誤判定が与える長期腐食度予測への影響が小さいことから、本研究では検討モデルを採択し、研究結果とする。

表 3-21 4 段階評価を用いた検討モデル各精度結果

	評点 1	評点 2	評点 3	評点 4	全体
予測精度 (%)	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
判別精度 (%)	100.0	83.3	80.0	96.3	90.0

表 3-22 4 段階評価を用いた検討モデル判別分類表

評点	予測値				判別率 (%)
	1	2	3	4	
1	6	0	0	0	100.0
2	1	25	4	0	83.3
3	0	3	32	5	80.0
4	0	0	3	77	96.3
全体 (%)	3.8	16.0	20.5	49.4	89.7

表 3-23 4 段階評価に再評価を行った検討モデル各精度結果

	評点 1	評点 2	評点 3	評点 4	全体
予測精度 (%)	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
判別精度 (%)	100.0	80.0	90.0	100	93.8

表 3-24 4段階評価に再評価を行った検討モデル判別分類表

評点	予測値				判別率(%)
	1	2	3	4	
1	6	0	0	0	100.0
2	1	24	5	0	80.0
3	0	2	36	2	90.0
4	0	0	0	80	100.0
全体(%)	3.8	15.4	23.1	51.3	93.6

表 3-25 4段階評価における各特徴量予測精度結果

特徴名	評点 1(%)	評点 2(%)	評点 3(%)	評点 4(%)	全体(%)
Binary	66.7	86.7	95.0	97.5	93.6
Texture <sub>4</sub> <sup>7</sup>	50.0	63.3	37.5	86.2	67.9
Texture <sub>4</sub> <sup>20</sup>	50.0	40.0	30.0	87.5	62.2
Texture <sub>16</sub> <sup>20</sup>	50.0	50.0	25.0	85.0	61.5
Texture <sub>64</sub> <sup>20</sup>	50.0	36.7	20.0	85.0	57.7

### 3.6 まとめ

本研究では、画像解析を援用した耐候性鋼材の外観評価法策定のため、現在の耐候性鋼材のさび外観評価基準により分類された複数の耐候性鋼橋の鋼材表面接写写真に対して画像解析を行うことにより画像特徴量を算出した。また、評点を予測項目、画像特徴量を共変量とした多項ロジスティック回帰分析より外観評価式を導出した。そして、標本画像の判別、交差検証法を用いて外観評価式の予想精度、判別精度の検証を行った。モデルを比較することで、各特徴量の予想精度がモデルの予想精度、判別精度に与える影響の検討を行った。本研究で得られた成果を以下に示す。

- (1) 複数の画像解析法及びロジスティック回帰分析を用いた耐候性鋼材のさび外観評価法を構築し、評価式の有効性を示した。
- (2) 判別式より、点検・処置が必要である評点 1～3 と、正常な評点 4、5 の大別が行えた。
- (3) 86.9%の精度で評点 1～3 の判別を行える手法を構築した。また、誤判定した 10 枚の画像について照査した結果、4 枚が誤判定に近い特徴を持っており、明らかな誤判定は 6 枚のみであり、それらを考慮した場合、92.5%の精度が得られた。
- (4) 本手法において、評点 4、5 を一括りとした 4 段階評価よりも 5 段階評価の方が評点 1～3 の判別に優れることを示し、5 段階評価後、4 段階評価に再評価を行う場合 93.6%の精度が得られた。

## 第4章 耐候性鋼橋梁の腐食損傷による耐荷力劣化の評価および将来予測

高知自動車道は四国の山岳を貫く路線で、冬季には降雪に伴う交通確保を図るため大量の凍結防止剤が散布され、一部で飛散した塩分が鋼材に付着して桁に損傷を与えている。その中のいくつかの橋梁でうろこさびなどの異常さびが発生し、適切に保護性さびが形成されていないという問題がある。このような状態になると腐食減耗速度が速くなり、また、それは部材としての強度や剛性の低下を引き起こし、耐候性鋼橋としての残存保有性能を低下させる<sup>25)</sup>。現在はこういった腐食に対して、例えば外観目視による5段階の損傷評価を行い、その結果を基に維持管理および補修を行っている。その一方で残存保有性能評価についてはほとんど行われていない。しかし、補修などの対策の必要性や緊急性を判定し、計画的に補修を行うためには、そういった残存保有性能の現状評価および将来予測を行うことが重要である。そこで本論文では、損傷評価結果から残存保有性能を評価する手法の提案を行う。そして、その中でも特に耐荷力に焦点を絞り、下フランジ上面にうろこさびが確認される高知自動車道の平瀬橋を例として耐候性鋼橋の耐荷性能の低下の評価、予測を行ったので報告する。

### 4.1 平瀬橋の車両載荷試験

#### 4.1.1 平瀬橋の概要および外観目視点検結果

本論文で対象とする平瀬橋は、高知自動車道の新宮—大豊間に架かる、橋長179.75m、4主桁を有する4径間連続の非合成耐候性鋼橋梁である。図4-1に橋梁の概要図を、図4-2に断面図を示す。なお、赤丸で囲った部分については図4-5の外観目視評価結果と外観撮影画像の位置を示している。

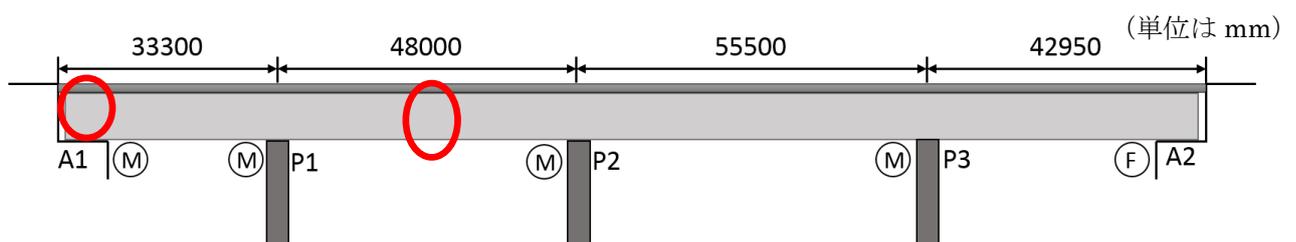


図4-1 平瀬橋の側面からの概略図

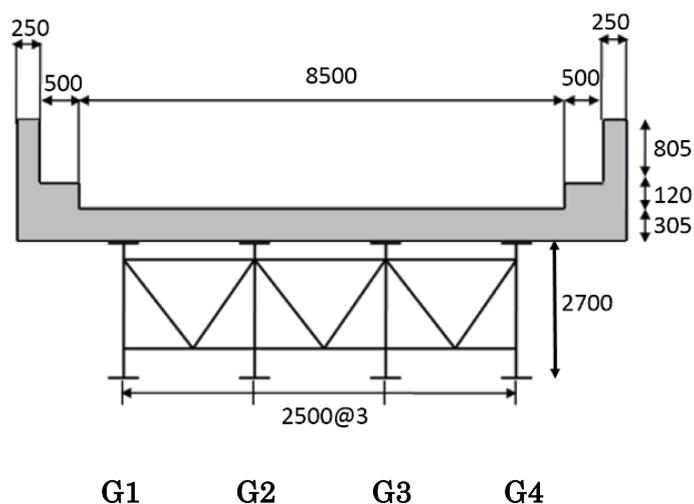


図 4-2 平瀬橋の断面図 (単位は mm)



図 4-3 平瀬橋の全景写真

平瀬橋は大豊 IC に近く標高 200m に位置し、図 4-3、図 4-4 に示すとおり上下線が分離し、高低差を有する橋梁である。冬季には路面凍結を防ぐため大量の凍結防止剤が散布され、I 期線（下り線）の右側の桁（G4 桁）は II 期線で散布された凍結防止剤が谷風の影響を受けて飛散し高い側の橋梁の外側下フランジに損傷を与えている。また、G1 桁は、地山に近接する箇所立木の影響から湿潤状態になりやすく、風の巻き込みにより凍結防止剤が付着しやすい環境となり外側の下フランジ上面に損傷を与えている。

そのため、平瀬橋の損傷状態を明らかにすることを目的として、腐食速度に着目した評価基準<sup>10)</sup>である表 4-1 のさび外観の評価に基づいた外観調査を 2012 年に行った。その結果、特に伸縮装置の

非排水機能の劣化・損傷による漏水の影響を受けた桁端部およびもっとも凍結防止剤の影響を受けやすい G4 桁の外側の下フランジで評点 2 のさびが確認されている。例えば、図 4-1 で赤丸で囲った部分の評価結果、および外観撮影画像を図 4-5 に示す。

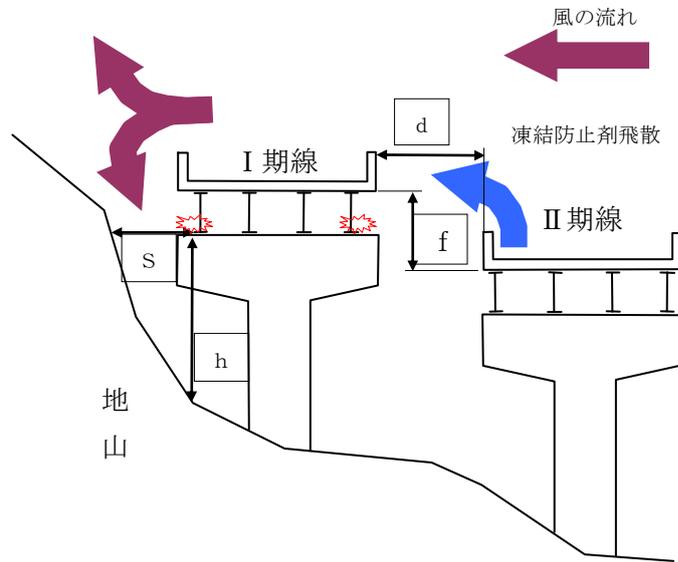
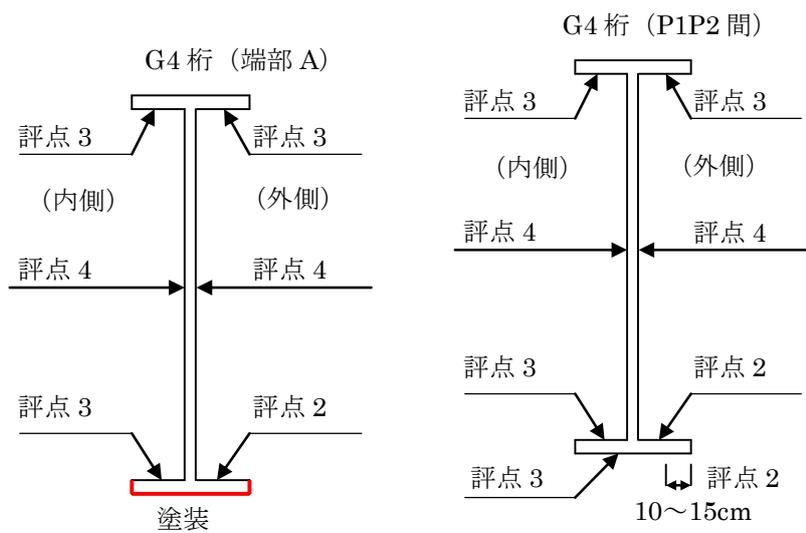


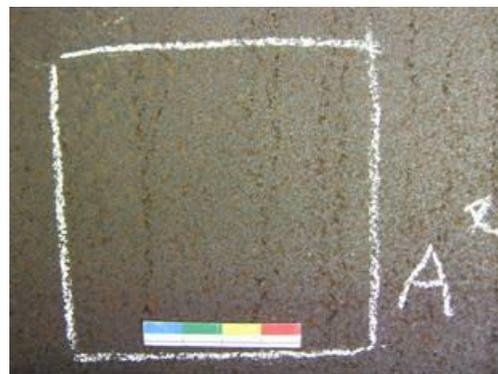
図 4-4 平瀬橋の上下線配置図

表 4-1 耐候性鋼材さび外観の評価<sup>10)</sup>

外観 評点	さびの状態 (表層さびの粒子の大きさ と外観)	さび層の厚さ
評点 5	色調は全体に明るく黄褐色で まだら状である ほとんど凹凸はなく、さび 粒子は細かい さびの量は少なく、最大粒 径は 1mm 程度以下	200 $\mu$ m 程度未満
評点 4	色調は暗褐色で色むらは無 い ほとんど凹凸は無く、さび 粒子は細かく均一 さびの量はやや多く、最大 粒径は 1mm 程度以下	400 $\mu$ m 程度未満
評点 3	色調は暗褐色から褐色で色 むらはなし やや凹凸があり、さび粒子 は粗く不均一 さびの量は多く、最大粒径 は 1~5mm 程度	400 $\mu$ m 程度未満
評点 2	色調は暗褐色から褐色でや や色むらがある 大きい凹凸があり、さび粒 子は粗くうろこ状さびの 量は多く、最大粒径は 5~ 25mm 程度	800 $\mu$ m 程度未満
評点 1	局部的に様々な色調(激しい 色むら)がある 大きな凹凸があり、層状剥 離(痕跡)がある	800 $\mu$ m 程度を超える



評点 2 下フランジ上面 (外側)



評点 4 ウェブ (外側)

図 4-5 評価結果と外観撮影画像

#### 4.1.2 車両載荷試験

平瀬橋において、夜間の車両通行量の少ない時間に載荷試験を行った。ここでの結果は、4.2 以下で構築する有限要素モデルの妥当性の検証に用いた。

本試験で用いた車両は、図 4-6 に示すタンクを満水状態にした散水車で、総重量 190kN、前輪輪距 2050mm、後輪輪距 1840mm である。また、G4 桁がもっとも凍結防止剤の影響を受けているということを鑑み、G4 桁に図 4-7 のようにひずみゲージを設置した。そして、散水車を G4 桁の直上に右輪が来るように A1 から A2 方向に複数回走行させた。その中で、動的な影響を排除するために 15km/h 前後の低速で走行した 3 回の計測結果をここでは用いる。なお、P1-P2 径間を走行中は、他の車両は

走行していなかった。ひずみ計測結果を次ページの図 4-8 に示す。ここでは紙面の都合上、P1 から P2 方向に 8m の位置の下フランジ外側上面の直ひずみ、ウェブ中央の最大主ひずみ、および中央部の下フランジ外側上面の直ひずみのみの結果を示す。速度にややばらつきがあったので、ビデオ撮影結果などを基に全て車両前輪と橋脚 P1 との距離で横軸は整理してある。振動の影響は低速で走行したおかげで小さく、また、3回の試験でほぼ同様の結果が得られている様子が見える。この結果は次節において有限要素解析モデルの妥当性の検証のために用いた。

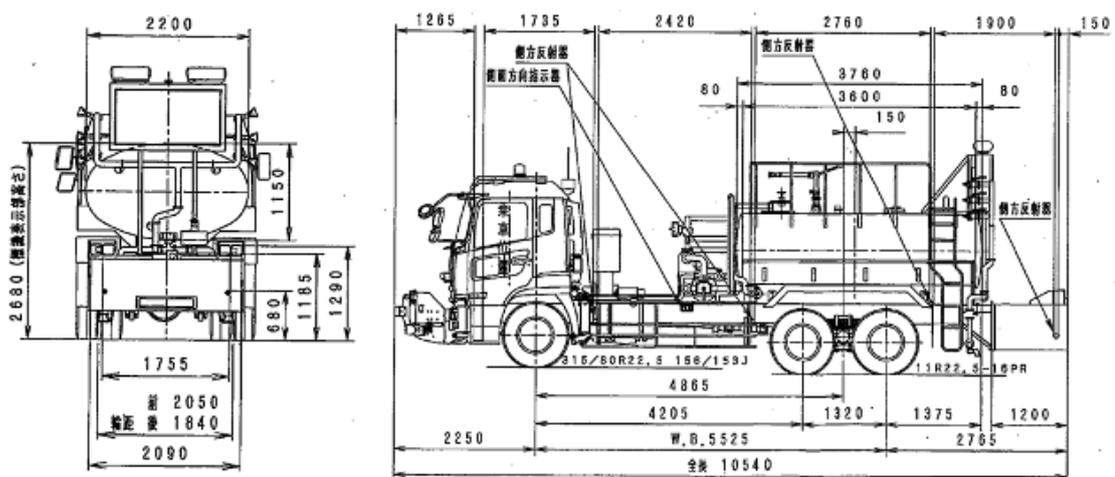
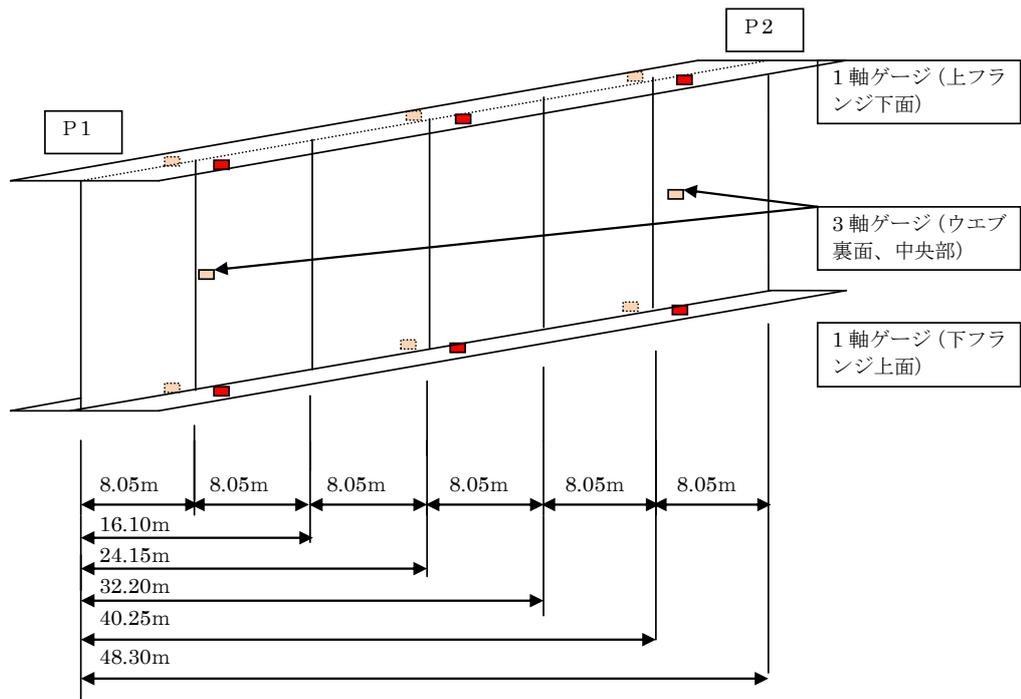
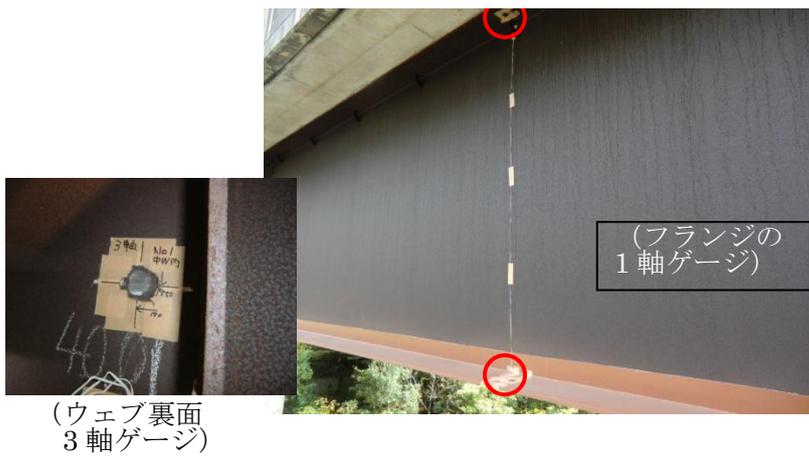


図 4-6 試験に用いた散水車の外観図と写真

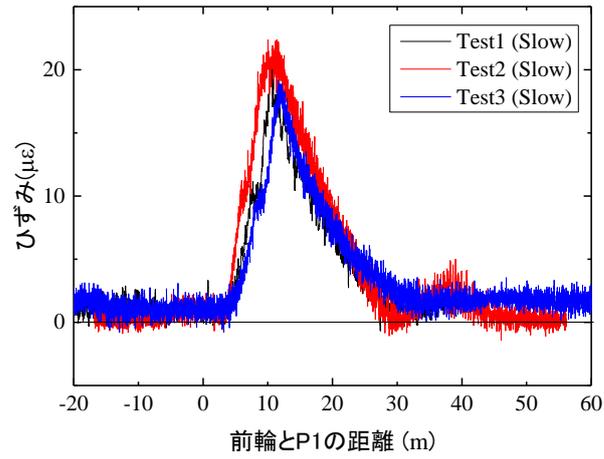


(a) ひずみゲージ貼り付け位置図

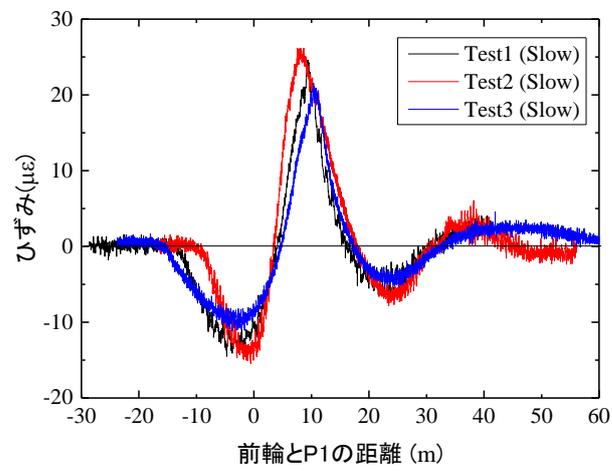


(b) 貼り付け状況写真

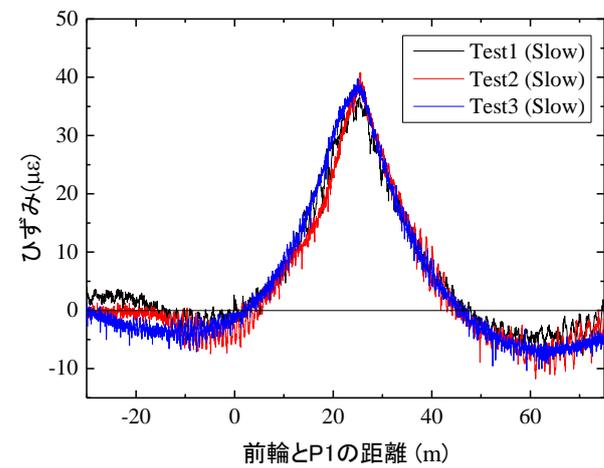
図 4-7 ひずみゲージ貼り付け位置と状況写真



(a) P1 から P2 方向に 8m 位置 : 下フランジ外側上面



(b) P1 から P2 方向に 8m 位置 : ウェブ中央



(c) P1-P2 の中央位置 : 下フランジ中央

図 4-8 ひずみ計測結果

## 4.2 有限要素解析による残存耐荷性能評価・予測手法

#### 4.2.1 有限要素モデルの概要

本研究では、前章で述べた平瀬橋の有限要素モデルを図 4-9 のように構築し、腐食損傷による耐荷力の低下を数値的に評価した。解析には商用有限要素パッケージ Abaqus/standard を用い、床版には 3 次元 8 節点要素 C3D8 を、主桁や対傾構などの鋼材については 4 節点 3 次元低減積分シェル要素 S4R を用いた。それぞれの部材を複数の領域に区切って評価し、それぞれの部材の評点を基に予測される減耗後の板厚量を解析モデルのシェル要素の板厚として与え解析した。材料定数については設計値を用いており、表 4-2 にまとめてある。節点数および要素数はそれぞれ 46580、27171 である。本橋梁は、非合成であり、有限要素解析モデルにおいても接触はさせているが結合はさせていない。また、荷重については図 4-6 に従って与えた静的な荷重を、A1-P1 径間から P3-A2 径間の方向へ移動させて順次解析を行った。

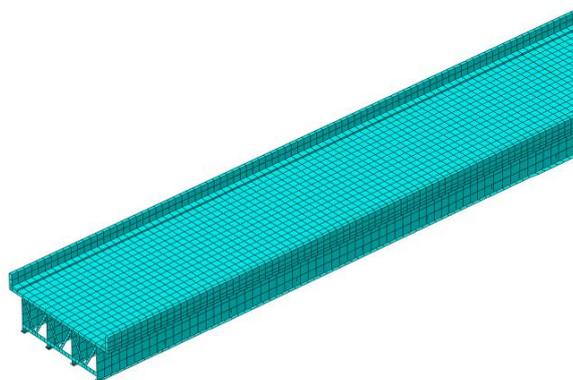


図 4-9 主に A1P1 間の有限要素解析モデルの俯瞰図

表 4-2 有限要素モデルで用いた材料定数

	弾性係数	ポアソン比
コンクリート	25GPa	0.17
耐候性鋼	200GPa	0.3

#### 4.2.2 板厚減少による耐荷性能劣化機構

耐候性鋼橋の腐食損傷による耐荷力の低下は、主に腐食が進展することによる板厚減少に起因すると考えられる。土木研究所、鋼材倶楽部（現 日本鉄鋼連盟）、日本橋梁建設協会は様々な環境下、劣化状況の全国 41 橋梁において小型の暴露試験片を設置し、外観や板厚減少量の経年変化などの調査を行った<sup>26)27)</sup>。その結果、飛来塩分量と板厚減少量の間には高い相関関係があることが明らかとなった。また、それらの計測結果から、供用 X 年目の板厚減少量 Y は以下の式(4.1)がよく一致することがわかっている。

$$Y = A X^B \quad (4.1)$$

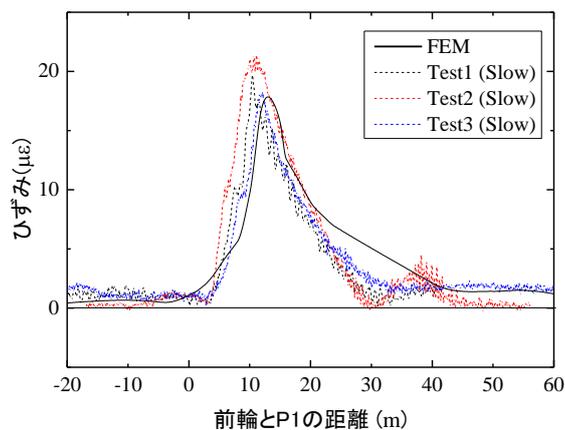
文献(26)では上述の全国で調査を行った 41 橋梁について、暴露試験後 1 年目、3 年目、5 年目、7 年目、9 年目の計測結果から式(4.1)中の係数 A、B を回帰分析により求めている。また、それぞれについて外観調査の評点も記載されている。これらを参考に、外観調査の評点ごとに、41 橋の中でもっとも腐食が早いパターン、平均的な腐食パターン、そしてもっとも腐食が遅いパターンを抽出した結果を表 4-4 にまとめる。本論文で扱う平瀬橋はそれぞれの部材について外観評点が点検によって既にわかっており、その結果は表 4-3 に示すとおりである。それぞれの部材の板厚減少を表 4-4 の係数を用いた式に従って有限要素モデルに反映することで、腐食損傷による耐荷性能の低下を表現した。両者は良好な一致を見せていることがわかる。

表 4-3 平瀬橋の部材毎の外観評価結果

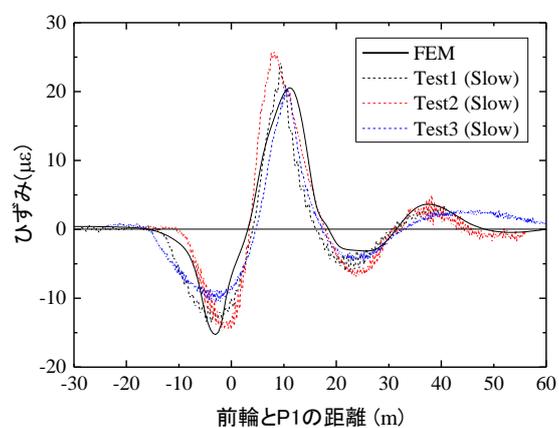
部材		径間	A1-P1	P1-P2	P2-P3	P3-A2
G1	上フランジ下面 (外側・内側)	評点3	評点3	評点3	評点3	評点3
	ウェブ (外側・内側)	評点4	評点4	評点4	評点4	評点4
	下フランジ上面 (外側・内側)	評点3	評点3	評点3	評点3	評点3
	下フランジ下面	評点4	評点4	評点4	評点4	評点4
G2	上フランジ下面 (外側・内側)	評点4	評点4	評点4	評点4	評点4
	ウェブ (外側・内側)	評点4	評点4	評点4	評点4	評点4
	下フランジ上面 (外側・内側)	評点3	評点3	評点3	評点3	評点3
	下フランジ下面	評点4	評点4	評点4	評点4	評点4
G3	上フランジ下面 (外側・内側)	評点4	評点4	評点4	評点4	評点4
	ウェブ (外側・内側)	評点4	評点4	評点4	評点4	評点4
	下フランジ上面 (外側・内側)	評点3	評点3	評点3	評点3	評点3
	下フランジ下面	評点4	評点4	評点4	評点4	評点4
G4	上フランジ下面 (外側)	評点3	評点3	評点3	評点3	評点3
	上フランジ下面 (内側)	評点3	評点3	評点3	評点3	評点4
	ウェブ (外側)	評点4	評点4	評点4	評点4	評点4
	ウェブ (内側)	評点4	評点4	評点4	評点4	評点4
	下フランジ上面 (外側)	評点2	評点2	評点2	評点2	評点2
	下フランジ上面 (内側)	評点3	評点3	評点3	評点3	評点3
	下フランジ下面	塗装	評点2, 3	評点2, 3	評点2, 3	評点2, 3

表 4-4 耐候性鋼材の片面板厚減耗予測式の外観評点ごとの係数

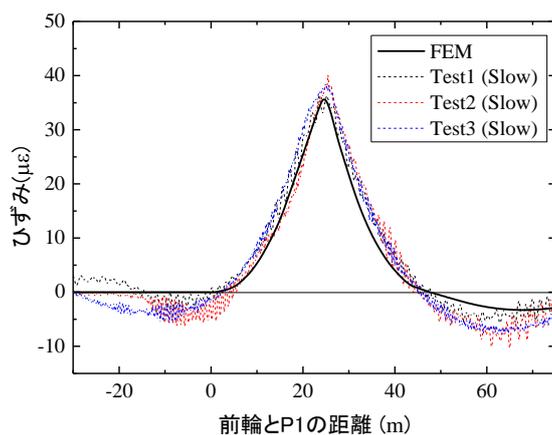
外観 評点	平均		最大		最小	
	A	B	A	B	A	B
5	0.010	0.645	0.010	0.645	0.010	0.645
4	0.012	0.736	0.017	0.736	0.013	0.532
3	0.024	0.668	0.007	1.122	0.043	0.302
2	0.029	1.033	0.011	1.630	0.016	0.738
1	0.075	0.953	0.059	1.610	0.040	0.538



(a) P1 から P2 方向に 8m位置：下フランジ外側上面



(b) P1 から P2 方向に 8m位置：ウェブ中央



(c) P1-P2 の中央位置：下フランジ中央

図 4-10 有限要素解析結果と計測結果の比較

### 4.2.3 車両載荷試験を用いたモデルの妥当性の検証

ここでは、構築した有限要素モデルの妥当性を検証するため、4.1.2 で述べた車両載荷試験を有限要素モデル上で再現し、結果の比較を行った。車両載荷試験では 15km/h 前後という低速で車両を通行させており、動的な影響は無視できると考え、有限要素解析では車両荷重を車両走行位置に静的に与えた。

また、平瀬橋が供用 24 年目の橋梁であるということを鑑み、表 4-3 および表 4-4 から予測される平均的な板厚減少をモデルに与え、解析を行った。実際の計測結果との比較を図 4-10 に示す。ただし、実計測で見られる振動をそのままプロットすると見づらくなり有限要素解析結果との比較が難しくなるため、ここでは平滑化して表示してある。図よりわかるように両者の曲線は違う径間に車両を移動した時も含め、形状は大まかに再現できており、また、ひずみ最大値の計測値の平均と FEM との誤差が  $3\mu\epsilon$  程度に収まっており、一定の精度、妥当性が確認され、本研究で構築した有限要素モデルは適切に腐食劣化を表現できていることがわかる。このモデルを用いて、次章において腐食により耐荷性能がどう劣化していくか予測を行う。

## 4.3 耐荷性能の劣化予測評価手法

ここでは表 4-4 の予測式に従い、将来的な板厚減少による耐荷力の低下を前章で構築した手法に準じてモデル化し、設計荷重と比較することでその安全性について検討を行うための手法を提案し、例として平瀬橋に適用する。本論文では死荷重および活荷重のみを考えることとするが、その他の荷重が入った組み合わせ等についても同様に適用可能である。

ここでは特に、腐食が非常に進行している P1P2 支間中央部の下フランジに着目し、この部分の引張応力が最大になるような設計荷重を考えた。本橋梁は支間長 15m 以上の高速道路橋であるので、活荷重としては B 活荷重 (L 荷重) を用いた。そして、P1P2 支間の中央部の曲げモーメントを最大とするために、図 4-11 のように P1P2 支間と P3A2 支間にのみ載荷し、A1P1 支間と P2P3 支間には載荷しなかった。そして、P1P2 支間中央部の下フランジの応力が経年劣化によりどのように上昇していくかを解析した。その結果を図 4-12 に示す。図 4-12 に示す点線は、許容応力度である 140MPa を

意味している。図よりわかるように、腐食による減肉が平均的なケース、あるいは最も遅いケースでは、死荷重と活荷重のみを考えている範囲ではほとんど曲げ引張応力は増加しない。これは、実質的に腐食が激しいのは G4 桁のみであり、G1 桁から G3 桁はほとんど腐食しておらず、それらが対傾構により繋がっていることで合成効果を発揮し、断面全体の断面二次モーメントが余り低下していないことなどが原因として挙げられる。

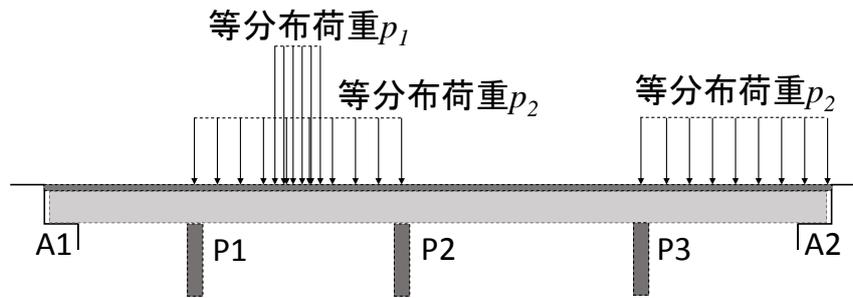


図 4-11 曲げモーメントを最大にするための荷重方法

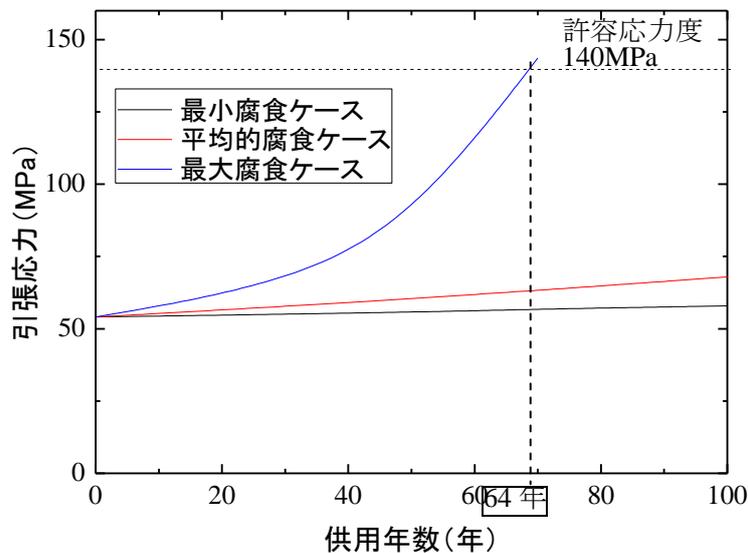


図 4-12 引張応力の経年変化

一方で、腐食による減肉が最も速いケースでは、供用 64 年目に許容応力度を超えている。これは、該当部位が初期板厚 25mm であったのが 2.6mm まで大きく減少するのが原因である。このような危険性があるため、ここで着目した P1P2 支間中央部の下フランジはなるべく早く対策を講ずる必要がある。

この図 4-12 のように求められた結果を用いて、実橋においては供用途中で載荷試験を行うことや暴露試験を実施して板厚減耗予測式を構築することで、現状でどの腐食ケースに近いかを判断でき、それを基に劣化予測を行うことが可能となると考えられる。ここでは、平瀬橋の下に設置した暴露試験片（評点 2）をその判断材料とする。暴露試験片の設置状況を図 4-13 に示す。これらの試験片は G4 桁の下フランジと同様に、下側の橋梁から凍結防止剤の飛散を受ける環境条件下にある。



図 4-13 暴露試験片の設置状況

この試験片のうちの 1 体から図 4-14 のようにさびを丁寧に除去し、板厚を 100 点測定した。この暴露試験片の初期板厚は 7mm であったが、さび除去後の板厚計測の平均値は 6.5mm となっており、0.5mm 減肉している。これは、評点 2 の最小腐食ケースの減肉量(0.16mm)と平均的腐食ケースの減肉量(0.71mm)の間の値であり、図 4-12 の赤線と黒線の間中間的な劣化推移となると予測できる。

しかし、これらはいくまでも試験片を用いた予測であり、さらには評点 1 に推移してしまう可能性もあり、その場合は引張応力が早々に許容応力度を超えてしまう可能性も高いため、計画的に早い段階で補修塗装などの根本的な対策を講じて腐食減肉を止める必要があり、実際にそのような対策を行っている（図 4-15）。



図 4-14 さび除去後の暴露試験片



図 4-15 補修塗装後の状況写真

## 4.4 まとめ

本章では腐食損傷を受ける耐候性鋼橋梁について、外観調査結果から推定される板厚減少を有限要素解析モデルに導入し、現在および将来的な残存保有性能を推定・予測する手法を提案した。それを凍結防止剤の影響で腐食損傷が見られる高知自動車道の平瀬橋に適用した。

まず、車両載荷試験により計測した結果と、腐食状態を反映した有限要素解析の結果を比較し、適切に腐食を表現し載荷試験を再現できていることを確認した。

そして、将来の最悪の状態、平均的な状態、最良の状態を予測する手法を提案し、板厚計測により現状評価を行うことで将来的にどのように性能が劣化する可能性が高いかという評価も行った。現在の耐候性鋼橋の点検では損傷状態の評価に偏っており、性能評価が余り行われてこなかった。本手法は損傷状態から残存保有性能を評価、予測するものであり、的確に橋梁の緊急補修や対策の必要性を判断する目安とできるものである。

本章で取り扱った例では死荷重および活荷重による引張応力しか検討を行わなかったが、本来は地震荷重や雪荷重、風荷重などの様々な設計荷重の組み合わせを考慮する必要がある。しかし、本章の目的は損傷状態から残存保有性能を評価、予測する手法の提案であり、それについては達成できた。

また、本章でのモデル化では、評点と同じであれば一様に減肉するとしたが、本来は腐食鋼材の表面形状は凹凸を持つものであり、その影響が考察できていない。これを解決するには、平均減肉量だけでなくその標準偏差などについても求め、その確率分布に従いランダムに腐食面を生成して有限要素モデルに反映するなどの方法がある。

## 第5章 耐候性鋼橋梁の補修塗装に関する研究

耐候性鋼材のさびは、普通鋼材のそれと異なり非常に固いため、ブラストでも十分な素地調整程度を得ることが難しいという研究成果<sup>28)</sup>があるように、確実なさびの除去が困難なことや素地調整から下塗までの塗装間隔が十分に確保できず、戻りさびなどにより早い段階で塗膜に劣化・損傷が現れ再塗装せざるを得ないことが確認されている。

西日本高速道路(株)が採用している耐候性鋼橋梁の塗装仕様<sup>29)</sup>においても劣化・損傷が見られることから、最近開発されている複数の塗装工法から塗装構成の異なるいくつかの工法を選択し、素地調整が不十分な場合や多少の戻りさびが発生した状態でも耐久性が高く、ライフサイクルコストでも有利な工法を見つけ出すために室内試験を実施した結果をまとめたものであり、今後の補修塗装工法の一つとして提案できる結果が得られたので報告するものである。

### 5.1 補修塗装工法の現状

四国の高速道路の維持管理を例に耐候性鋼橋梁の補修塗装の現状を見ると詳細点検の結果から伸縮装置や床板打ち継ぎ目からの漏水等により短期間で異常さびとなった部分を中心に補修塗装が行われてきた<sup>4) 6) 7)</sup>。2009年以前に補修塗装が行われた橋梁では、素地調整を3種とし、変性エポキシ樹脂で下塗を行い、ポリウレタン樹脂により中塗・上塗が行われていたが、漏水処理が不十分であった橋梁では、施工後数年で写真(図5-1)に示すような塗装のはく離が確認された。



図5-1 補修塗装のはく離状況

西日本高速道路(株)では、補修塗装の基本仕様を 2009 年から下表のとおりとし、従来のポリウレタン樹脂塗料よりも耐久性が高いと言われるふっ素樹脂塗料に変更しており、漏水などの劣化要因を除去した後に施工すると規定している。また、補修塗装の範囲も、使用条件や環境条件から適切な保護性さびの形成や維持が阻害される範囲を対象とすることとしている<sup>29)</sup>。しかし、これらの塗装が行われた橋梁でも部分的に塗装のはがれやさびが見られることから、より高い耐久性が求められている。

表 5-1 耐候性鋼橋梁の補修塗装仕様 (c-3 塗装)

塗装工程	塗料名	使用量 (g/m <sup>2</sup> )	標準膜厚 (μm)	塗装間隔
素地調整	1種	—		4時間以内
下塗 第1層	有機ジンクリッチペイント	スプレー600	75	1～10日
下塗 第2層	(弱溶剤形) 変性エポキシ樹脂塗料下塗	スプレー480	120	1～10日
中塗	(弱溶剤形) ふっ素樹脂塗料用中塗	スプレー170	30	1～10日
上塗	(弱溶剤形) ふっ素樹脂塗料上塗	スプレー140	25	1～10日

最近では、補修塗装に変わり、耐久性の高い金属溶射を採用しようとする考えもあるが、金属溶射の素地調整ではブラスト処理(1種)が求められており、桁端部などの狭隘な箇所は施工が困難である。従って、従来よりも高い耐久性のある補修塗装工法を見つけ出すことは非常に意味のあることである。

## 5.2 試験の概要

本試験では、耐候性鋼橋梁の補修塗装として、現在使用されている塗装仕様で素地調整程度の違いによる耐久性と補修塗装工法として有効と考えられる数種類の工法を同様に比較することで塗装の耐久性等性能の確認を行った。

試験は、耐候性鋼材 JIS G3114 SMA490BW 板厚 22 mm の鋼材を図 5-2 のように加工した試験片を用いた。塗装を行う前に塩水噴霧促進試験によるさびの促進を行い、240 時間、480 時間、720 時間、960 時間、2400 時間で取り出した試験片を使用した。その中から素地調整を 3 種ケレンと 1 種ケレンに区分し、選択した補修塗装工法を実施した。

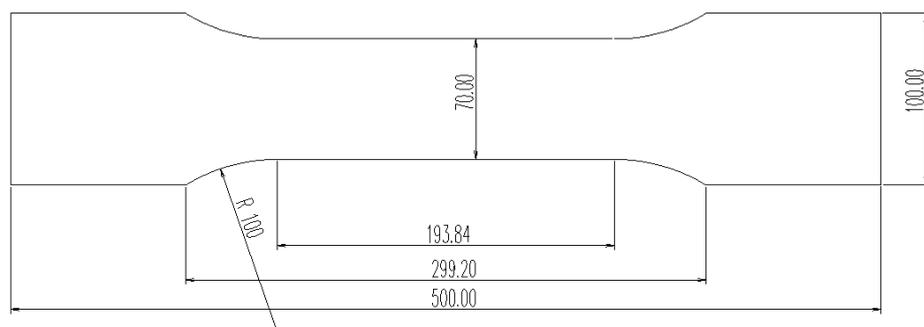


図 5-2 使用した耐候性鋼材の試験片

試験片に塗装した補修塗装工法の種別は表 5-2 に示すとおりであり、試験片番号 (以下番号とする) 1・2 は、表 5-1 に示した従来の補修塗装工法である。番号 3・4 は、地鉄を保護するさび層を生成させる目的で開発されたものであり、下塗にブチラル樹脂 (30 $\mu$ m) を行い、中塗に変性エポキシ樹脂 (30 $\mu$ m)、上塗にふっ素樹脂 (25 $\mu$ m) を行ったものであり、耐食性を向上させた塗装工法 A タイプとした。番号 5・6・7 は、地鉄を保護する層を生成する目的で開発されたもので、下塗に亜鉛含有のエポキシ樹脂 (70 $\mu$ m) を行い、中塗に変性エポキシ樹脂 (30 $\mu$ m)、上塗にふっ素樹脂 (25 $\mu$ m) を行ったものであり、耐食性を向上させた塗装工法 B タイプとした。番号 6 は、下塗のみとしたものである。番号 8・9 は、下塗のブチラル樹脂を厚塗り (100 $\mu$ m) としたもので、中塗を省略したものであり、耐食性を向上させた塗装工法 C タイプとした。番号 11・12 は、従来タイプの経済型として、下塗に変性エポキシ樹脂 (120 $\mu$ m)、上塗に含有量 5% のふっ素樹脂 (55 $\mu$ m) を行ったものである。番号 13・14 は、ふっ素樹脂系よりも耐候性を向上させる目的で開発されたものであり、下塗に変性エポキシ樹脂 (120 $\mu$ m) を、上塗にシリコン変性エポキシ樹脂 (55 $\mu$ m) を行ったものである。番号 15・16 は、環境遮断性を向上させる目的で開発されたものであり、下塗りに応力緩和高密度エポキシ樹脂 (50 $\mu$ m)、上塗りにガラスフレーク入りのエポキシ樹脂 (175 $\mu$ m) を行ったものである。なお、1 種ケレンのみを対象としたが、番号 10 として金属溶射 (アルミ (85) - 亜鉛 (15) 合金) を加えて試験を実施した。

表 5-2 補修塗装工法の種別

試験片 番号	塗 装 工 法	素地調整
1	従来の補修塗装工法(ふっ素含有量17%)	1種ケレン
2	従来の補修塗装工法(ふっ素含有量17%)	3種ケレン
3	耐食性を向上させる塗装工法 Aタイプ	1種ケレン
4	耐食性を向上させる塗装工法 Aタイプ	3種ケレン
5	耐食性を向上させる塗装工法 Bタイプ	1種ケレン
6	耐食性を向上させる塗装工法 Bタイプ(中塗・上塗なし)	1種ケレン
7	耐食性を向上させる塗装工法 Bタイプ	3種ケレン
8	耐食性を向上させる塗装工法 Cタイプ	1種ケレン
9	耐食性を向上させる塗装工法 Cタイプ	3種ケレン
10	金属溶射	1種ケレン
11	従来工法の経済型(ふっ素含有量5%)	1種ケレン
12	従来工法の経済型(ふっ素含有量5%)	3種ケレン
13	耐候性を向上させた塗装工法	1種ケレン
14	耐候性を向上させた塗装工法	3種ケレン
15	環境遮断性を向上させた塗装工法	1種ケレン
16	環境遮断性を向上させた塗装工法	3種ケレン

試験は、より多くのデータを取得して評価することを考え、図 5-3 のとおりの試験片と補修塗装工法の組合せとし、塗装後約 1 ヶ月の養生期間を設けた後に性能評価試験を実施した。

3種ケレン用	1種ケレン用		
試験片番号③	2   4   7	試験片番号①	10
試験片番号⑤	2   4   7	試験片番号②	10
試験片番号⑥	2   4   7	試験片番号④	10
試験片番号⑩	9   12   14	試験片番号⑦	1   3   5
試験片番号⑬	9   12   16	試験片番号⑧	1   3   5
試験片番号⑰	9   14   16	試験片番号⑨	6   11   13
試験片番号⑱	12   14   16	試験片番号⑪	6   11   15
		試験片番号⑫	6   8   11
		試験片番号⑭	1   3   5
		試験片番号⑮	8   13   15
		試験片番号⑯	8   13   15
<div style="border: 1px dashed black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;">           ※ 試験片に記入した番号は、塗装工法の番号である         </div>			

図 5-3 試験片と補修塗装工法の組合せ

塗装の性能評価方法には、JIS K-5600 で規定されたいくつかの試験方法があるが、耐久性をより促進させる方法として、JIS K-5600-6-2 耐液体性（水浸せき法）を準用し、温水 60℃に浸せきする促進方法（図 5-4）を採用した。浸せき時間は 330 時間、1170 時間、2000 時間として、各々の時点での塗装外観の確認と付着力を測定した。

塗装の外観評価は ASTM 規格のさび判定（図 5-5）およびふくれ判定（図 5-6）により評価し、付着力試験は、JIS K-5600-5-7（プルオフ法）に準拠したデジタルアドヒージョンテスター（デフォルコス社製）で実施した。試験機の構成を図 5-7、塗装面への試験円筒（ドリー）の接着状況を図 5-8、試験状況を図 5-9 に示す。



図 5-4 温水 60°C浸せき試験実施状況

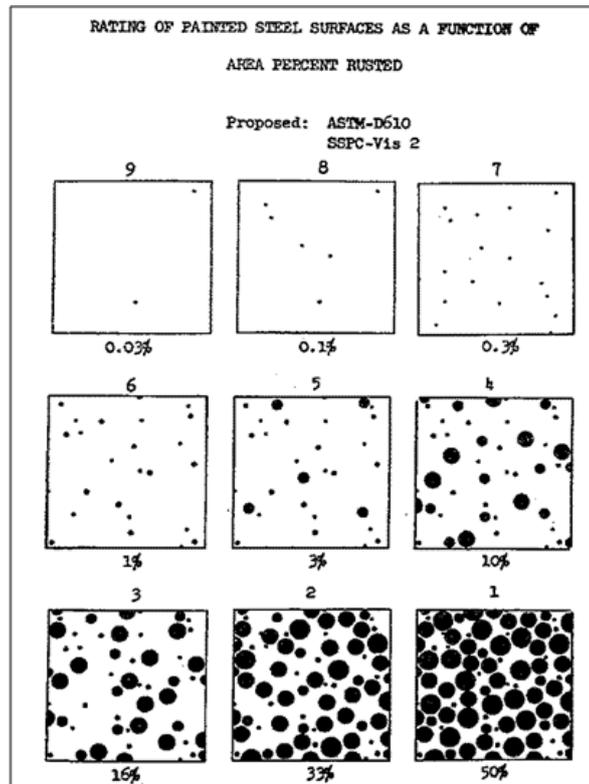


図 5-5 さび判定図 (ASTM-D610)

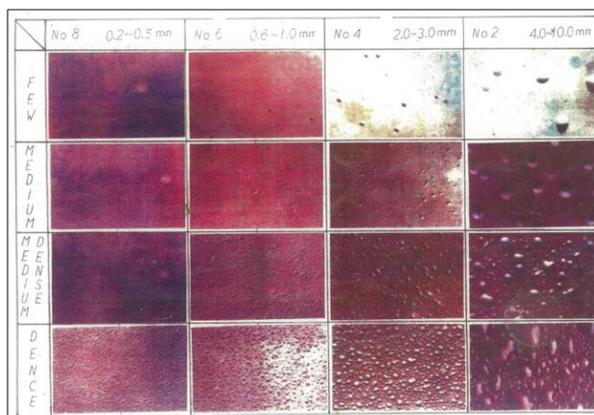


図 5-6 塗装のふくれ判定図 (ASTM-D714)



図 5-7 デジタルアドヒージョンテスター（デフォルコス社製）



図 5-8 塗装面へのドリリー接着状況



図 5-9 付着力試験の実施状況

### 5.3 試験結果

浸せき時間ごとに実施した試験結果を塗装の外観（ふくれ・さび）と付着力試験結果として巻末の付録-1 に示す。ここでは、図 5-10 および図 5-11 として、素地調整（3 種ケレン）の従来の補修塗装工法と環境遮断性を向上させた塗装工法の一例を示す。

図 5-10 に示す従来の補修塗装工法では経過時間 330 時間で塗装のふくれが全体に見られるようになり、付着力試験が継続できない状態になっており、素地からのさびも若干確認できた。環境遮断性を向上させた塗装工法でも 330 時間経過時にふくれが見られるものの素地にさびは見られず、その後にふくれは大きくなったが 2000 時間経過後でも比較的状态のよい結果が得られている。なお、図 5-10 の写真にある○は付着力試験の跡であり周辺の塗装に見られるふくれに若干の影響を与えた可能性はある。

図 5-11 の付着力試験の結果では、従来の補修塗装工法で試験のできた試験片③-2 で、素地からの付着破壊を起こし付着力も 2Mpa 程度で素地全体に黒さびが付着している状況が分かる。環境遮断性を向上させた塗装工法では、試験片によって付着力に差が見られるが素地からの付着破壊は見られず凝集破壊を起こしており、試験片⑬-16 では 2000 時間経過後にも十分な付着強度を保っていることが分かる。素地から付着破壊が起きているのは、黒さびが付着していたことから分かるように外部から腐食性因子が浸透したことによると考えられ、塗装の耐久性からは好ましい状態であるとは言えない。一方、素地と下塗の凝集破壊があるのは、外部からの腐食性因子をある程度抑えている結果と考えられる。なお、試験片によってバラツキが見られるのはさびの促進過程での経過時間に関係があるものとも考えられるが、他の試験結果では明確なバラツキが見られていない。

試験片番号	素地調整	試験前		330時間経過		1170時間経過		2000時間経過		試験片のさび促進時間	
		表面	裏面	表面	裏面	表面	裏面	表面	裏面		
従来の補修塗装工法	③-2 ふくれさび記事	3種ケレン									2400時間
			—	—	2M	2MD	—	—	—	—	
			—	—	10点	9点	—	—	—	—	
	⑤-2 ふくれさび記事	3種ケレン									480時間
			—	—	1D	2MD	—	—	—	—	
			—	—	10点	8点	—	—	—	—	
	⑥-2 ふくれさび記事	3種ケレン									960時間
			—	—	1D	1D	—	—	—	—	
			—	—	9点	9点	—	—	—	—	
環境遮断性を向上させた塗装工法	⑬-16 ふくれさび記事	3種ケレン									240時間
			—	—	4F	2F	4F~4M	2M~1F	4F~2F	2M~2MD	
			—	—	10点	10点	10点	10点	9点	10点	
	⑰-16 ふくれさび記事	3種ケレン									960時間
			—	—	3M	2M	4M	2M	2F	2M~2D	
			—	—	10点	10点	10~9点	9~8点	10~9点	9~8点	
	⑱-16 ふくれさび記事	3種ケレン									2400時間
			—	—	2F	2M	無	1M	無	1M~1MD	
			—	—	10~9点	10点	10点	8点	10点	8点	
						φ 9.0mm1個		φ 9.5mm1個			

図 5-10 試験結果のまとめ（塗装の外観）

※ 従来の補修塗装工法では、ふくれが広がり付着力に期待が持てない状態となったため中止した。

試験番号	素地調整	初期値				330時間				1170時間				2000時間				
		付着力 (MPa)	はく離箇所	はく離状況写真		付着力 (MPa)	はく離箇所	はく離状況写真		付着力 (MPa)	はく離箇所	はく離状況写真		付着力 (MPa)	はく離箇所	はく離状況写真		
				試験体側	試験治具側			試験体側	試験治具側			試験体側	試験治具側			試験体側	試験治具側	
従来 の補修 塗装工法	③-2 3種ケレン	7.33	接着剤95%/ ⑦上塗5% (擬集破壊)			1.93	素地100% (付着破壊) ※終了			-	-	-	-	-	-	-	-	
		7.86	接着剤85%/ ⑦上塗10%/ ④下塗5% (擬集破壊)			2.30	素地100% (付着破壊) ※終了			-	-	-	-	-	-	-	-	-
	⑤-2 3種ケレン	4.99	接着剤90%/ ⑦上塗10% (擬集破壊)			NG	測定不能※終了	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		6.29	接着剤90%/ ⑦上塗5%/ ④下塗5% (擬集破壊)			NG	測定不能※終了	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	⑥-2 3種ケレン	6.30	接着剤75%/ ⑦上塗25% (擬集破壊)			NG	測定不能※終了	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		7.17	接着剤80%/ ⑦上塗15%/ ④下塗5% (擬集破壊)			NG	測定不能※終了	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
環境遮断性を向上させた塗装工法	⑬-16 3種ケレン	12.54	③上塗5%/ ②下塗95% (擬集破壊)			11.41	②下塗100% (付着破壊)			7.00	②下塗85%/ 素地15% (擬集破壊)			6.08	②下塗75%/ 素地25% (擬集破壊)			
		10.16	接着剤15%/ ③上塗10%/ ②下塗75% (擬集破壊)			11.76	接着剤1%/ ②下塗99% (擬集破壊)			8.95	②下塗90%/ 素地10% (擬集破壊)			7.59	②下塗90%/ 素地10% (擬集破壊)			
	⑰-16 3種ケレン	10.38	②下塗90%/ 素地10% (擬集破壊)			4.04	③上塗5%/ 素地95% (擬集破壊)			2.27	②下塗30%/ 素地70% (擬集破壊)			2.98	②下塗50%/ 素地50% (擬集破壊)			
		10.36	②下塗85%/ 素地15% (擬集破壊)			3.75	③上塗5%/ 素地95% (擬集破壊)			3.48	②下塗50%/ 素地50% (擬集破壊)			3.10	②下塗50%/ 素地50% (擬集破壊)			
	⑱-16 3種ケレン	8.03	接着剤20%/ ③上塗75%/ ②下塗5% (擬集破壊)			3.38	③上塗20%/ 素地80% (擬集破壊)			1.97	③上塗30%/ 素地70% (擬集破壊)			NG	測定不能※終了	-	-	-
		6.97	接着剤30%/ ③上塗60%/ ②下塗10% (擬集破壊)			4.55	③上塗20%/ 素地80% (擬集破壊)			2.77	③上塗30%/ 素地70% (擬集破壊)			NG	測定不能※終了	-	-	-

図 5-11 試験結果のまとめ (付着力試験)

※ 付着力の欄の NG は、外観評価でふくれが広がり付着力試験ができない状況になったことを示している。

今回試験した全ての塗装工法で得られた結果を図 5-12 に示す。上段は素地調整を 1 種ケレンとした場合の付着力の結果を示し、下段は 3 種ケレンとした場合の結果であり、それぞれで外観観察の結果を示した。今回実施した温水 60℃浸せき試験では、素地調整が 1 種ケレンの場合でも早い段階からふくれやさびが確認されており、塗装にとっては過酷な試験であることが分かる。その中でも素地調整を 3 種ケレンとした試験片 16 (環境遮断性を向上させた塗装工法) は、耐久性の高い塗装であることが確認できた。

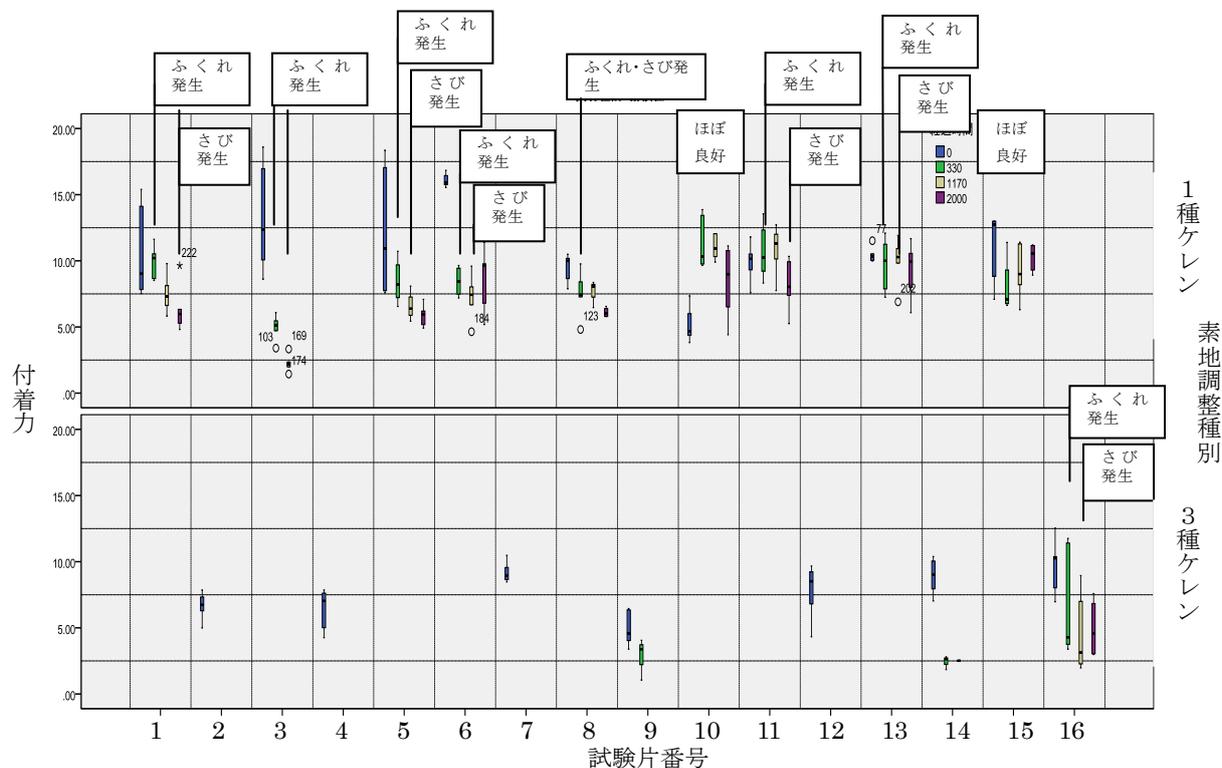


図 5-12 付着力試験結果および塗装の外観観察結果

## 5.4 まとめ

今回の試験は、複数ある塗装工法の中から普通鋼材よりも素地調整が難しいと言われている耐候性鋼材の補修塗装工法として、3種ケレン程度のさびが鋼材に残っていた場合でも耐久性が確保できる塗装を見つけ出すことを目的に実施した試験である。得られた結果では、環境遮断性を向上させた塗装工法が優位であることが分かり、十分な素地調整ができない桁端部などの狭隘部の塗装工法として使用できる可能性を見出すことができた。

ここで、試験した環境遮断性を向上させた塗装工法とは、試験の概要に示したとおり、下塗りに応力緩和型高密度エポキシ樹脂塗料 (50 $\mu\text{m}$ ) を採用することで、塗膜の収縮歪の緩和を図り、上塗りにガラスフレーク入りのエポキシ樹脂塗料 (175 $\mu\text{m}$ ) を採用することで、ガラスフレークによる迷路効果によって外部からの水・酸素・腐食性イオン等の浸透を阻止する塗装工法である。従来の補修塗装工法の耐久年数は、10年～15年とされているが、この塗装工法は30年以上とされており、塗膜厚を厚くすることでさらに耐久性が高くなるとされている。図 5-13 に素地調整を1種とした場合のライフサイクルコストを示す。ここで示す積算コストとは、足場費を含めた工事費であり、1 $\text{m}^2$ 当りの

単価として比較している。また、金属溶射（亜鉛アルミ溶射（60年）＋フッ素樹脂塗装（30年）の合計で耐用年数90年）を比較対象としたのは、十分な素地調整が可能な箇所では、金属溶射も検討する必要があることを示すためであり、補修塗装工法を部位によって使い分けることを検討すべきである。

積算コスト (円)

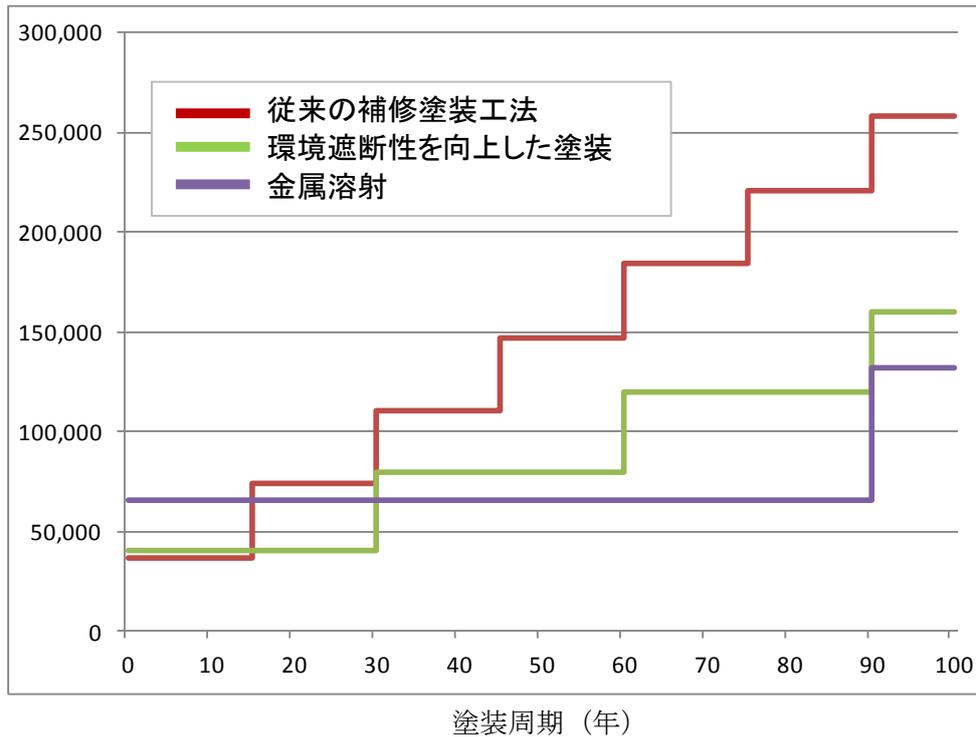


図 5-13 塗装のライフサイクルコスト試算比較

今回の試験は、温水 60℃浸せき試験という塗装にとっては過酷な条件での試験結果であり、さび促進過程が試験片によって異なっていたことも影響した可能性がある。現在、今回の試験結果を確かなものとするため、さび促進過程を同じとして、素地調整によりさび厚を調整した試験片に塗装を行い、温水 60℃浸せき試験に加え塩水噴霧試験と複合サイクル試験を取り入れて研究を進めている。

。

## 第6章 結論

本研究は、四国の高速道路で供用している耐候性鋼橋梁の維持管理に着目して、維持管理の現状から捉えた問題点を抽出し、画像解析による点検の精度向上と効率化、有限要素解析を用いた腐食損傷による耐荷力劣化の評価・将来予測について研究することで、新たな手法を提案することができた。また、損傷箇所の補修塗装工法として、従来よりも耐久性の高い塗装工法を見つけ出すために数種類の塗料に対する促進試験（温水 60℃浸せき試験）を行い、外観調査や付着力試験によって、従来よりも耐久性のある有効な補修塗装工法を見出すことができた。詳細については、各章によることとするが、取組んだ内容と得られた知見を以下に示す。

第1章では、我が国における耐候性鋼橋梁の現状を調べ、建設の割合は高いが点検や維持管理への取組みが遅れている都道府県・市町村などにも提案できる維持管理要領の必要性を示した。そこで、四国の高速道路においては、耐候性鋼橋梁が比較的多く建設され、建設当初から追跡調査が行われており、架設環境や凍結防止剤散布に伴う問題点も整理されてきた。これらの取組みは、Ⅱ期線建設にもフィードバックされたものであり、他機関においても参考となる取組みであることを示した。

第2章では、四国の高速道路の耐候性鋼橋梁の現状を維持管理の取組みや損傷箇所の発生状況と対策として紹介し、予防保全への取組みを報告している。結果として、5年に1度の一般的な橋梁の定期点検では、漏水等による短期間での腐食進行が確認できず、維持管理費の増大につながる可能性を指摘するとともに、日常点検の重要性と普段の維持管理による対応（凍結防止剤散布地域での桁洗浄の有効性や地山近接箇所での立木伐採による濡れ時間の短縮等）により予防保全が橋梁の長寿命化につながることを示した。

第3章では、点検精度の向上として、デジタルカメラにより撮影された鋼材の接写写真に対して画像解析、統計的解析を行なうことで定量的・客観的な耐候性鋼材のさび外観評価を行なう手法を提案した。このことにより点検者間で調査結果のバラツキが生じることを防ぎ、補修塗装を行なう場合の補修範囲の過大評価を防止し、維持管理費削減が期待できる評価手法であることを示した。しかし、

今回の方法では、近接点検の域を出ないものであり、画像スケールの影響が小さい画像解析法を検討する必要があり、ステレオカメラによる3次元測定を併用するなど、さらに高精度な外観評価判定を行なえるように研究を進める必要がある。

第4章では、腐食損傷を受ける耐候性鋼橋梁について、外観調査結果から推定される板厚減少を有限要素解析モデルに導入し、現在および将来的な残存保有性能を推定・予測する手法を提案した。それを凍結防止剤の影響で腐食損傷が見られる高知自動車道の平瀬橋に適用し、実橋による車両載荷試験で計測した結果と、腐食状態を反映した有限要素解析の結果を比較し、有限要素解析モデルが適切に腐食を表現し、載荷試験が再現できていることを確認した。そして、将来の最悪の状態、平均的な状態、最良の状態を予測する手法を提案し、板厚計測により現状評価を行うことで将来的にどのような性能が劣化する可能性が高いかという評価を行った。この手法は、損傷状態から残存保有性能を評価、予測するものであり、的確に橋梁の緊急補修や対策の必要性を判断する目安とできるものである。

第5章では、耐候性鋼橋梁の補修塗装に関する研究結果を示した。現在使用されている重防食塗装は、塗膜の耐久性が素地調整により左右され、期待される供用年数を確保できない場合があることが指摘されており、NEXCOでは、金属溶射で対応しようという方向である。しかし、金属溶射の素地調整もブラスト処理（1種）が求められており、桁端部などの狭隘部や素地調整後の戻りさびなどによりすべてに対応することは難しいと考えられる。本研究では、多少のさびが残った状態でも付着力があり、耐久性が確保できる塗装工法を見つけ出すため、新たに開発された塗装工法の中から数種類の工法に対して促進試験（温水 60℃浸せき試験）を行い評価したものである。結果として、環境遮断性を向上させた塗装工法が有効であり、十分な素地調整ができない箇所での塗装工法として使用できる可能性を見出すことができた。

今回の研究で得られた結果は、点検や維持管理への取組みが遅れている他機関においても参考となる『耐候性鋼橋梁維持管理要領』として、NEXCO四国支社で作成された『耐候性鋼橋梁維持管理マニュアル』<sup>4)</sup>を補完し、修正版として取りまとめた。補完したのは次頁の点である。

- ① 漏水は、急激な損傷を招く要因であり、継続的な調査として日常点検や必要に応じた臨時点検で漏水箇所の確認を行う必要があること。
- ② 凍結防止剤を散布する地域では、適切な時期に桁の水洗いをを行うことが効果的であること。
- ③ 地山との近接箇所は、桁の乾燥を促すため、立ち木の処理を行い、風通しを良くしておくこと。
- ④ 桁の外観調査では、本研究で取組んだ定量的・客観的なさび評価手法である画像解析・統計的解析を取り入れた調査が有効であること。
- ⑤ 本研究で示した、今後の腐食損傷による耐荷力の劣化進行は、有限要素解析を用いた現状評価と残存保有性能の評価・予測により、的確な橋梁の緊急補修や対策の必要性を判断することができ有効であること。
- ⑥ 耐候性鋼橋梁の補修塗装では、本研究で明らかとなった環境遮断性を向上させた塗料等の使用も考慮するなど、柔軟な対応ができるようにすること。

『耐候性鋼橋梁維持管理要領』は、付録-2として添付した。

最後に、本研究で明らかになった耐候性鋼橋梁の維持管理上の問題点、さび外観評価判定手法、将来の耐荷力予測手法、新たな補修塗装工法について、更なる改良と継続的な研究を進め、日本国内に建設されている耐候性鋼橋梁の延命化と維持管理の効率化を図るため、現場に則した維持管理要領を構築し、現場技術者の指導にも役立つものにしたい。

## 謝 辞

本研究の実施ならびに本論文をまとめる機会を賜った愛媛大学大学院理工学研究科 生産環境工学専攻教授 大賀 水田生先生、助教 全 邦釘先生には、本当にご多忙な中、研究全般にわたり懇切丁寧なご指導ならびに多くのご助言を承ったこと深く感謝し、厚くお礼申し上げます。

本論文のテーマである『耐候性鋼橋梁の維持管理に関する研究』として、さびの外観評価判定手法の開発については、現場で調査された貴重なさびの状況写真を集めるため、四電技術コンサルタント株式会社の三浦氏を始め多くの方から写真の提供を受け、全先生、船谷氏のご協力を得てデジタルカメラを用いた定性的なさびの外観評価法の方向性を示すことができました。

また、腐食損傷による耐候性鋼橋梁の耐荷力劣化の評価および将来予測については、西日本高速道路株式会社のご協力を得て、実際の高速道路橋でひずみを測定するなど、多くの方のご協力を得てデータを取得し、有限要素解析モデルを用いた現在及び将来的な桁の残存保有性能を推定・予測することで、橋梁の緊急補修や対策の必要性を判断する目安として研究成果を提案することができました。

さらに、補修塗装に関する研究では、普通鋼材と耐候性鋼材との腐食進行の違いを高知工業高等専門学校にある促進試験機をお借りすることにより確認し、その試験片を用いて数種類の塗装工法の中から特に耐候性鋼材のように硬いさびで素地調整が難しい鋼材でも耐久性に優れた塗装工法を見つけ出すことができました。高知工業高等専門学校の横井先生には、お忙しい中でも、快く促進試験機をお貸しいただき、促進状況の管理までをお願いいたしましたことは、本当に申し訳なく感謝しているところです。また、補修塗装工法の評価・判定につきましては、株式会社四国総合研究所の西森氏、大捕氏から試験方法に関する適切なお助言をいただき、お忙しい中で愛媛大学にお越しいただき試験のご指導まで頂きました。研究室の学生諸氏にも塗装の外観調査及び付着力試験で協力をいただき、素地調整が十分にできない狭隘部にも3種ケレン程度で耐久性の高い塗膜となる補修塗装工法を見つけ出すことができました。

なお、補修塗装工法については、今も一般的な促進試験方法を含めた確認試験を実施中であり、得られた成果を取りまとめた後に発表する予定です。

私が本研究を成し遂げられたのも、このように多くの方々のご支援があったからこそであり、再度感謝の意を記し本論文の謝辞といたします。

## 参考文献

- 1) 高速道路便覧（平成24年度） 全国高速道路建設協議会、2012.
- 2) 平成25年度 国土交通白書 国土交通省
- 3) (社) 日本橋梁建設協会：耐候性鋼橋梁 実績資料集 第19版（2012年度受注まで）、2014-1
- 4) 耐候性鋼橋梁維持管理マニュアル 西日本高速道路(株)四国支社、2009-8
- 5) (社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説、Ⅱ鋼橋編、2002-3
- 6) (社) 日本道路協会：鋼道路橋塗装・防食便覧、2005-12
- 7) (社) 日本道路協会：鋼道路橋塗装・防食便覧資料集、2010-9
- 8) 樺山好幸、嵯峨正信、藤田尚、広岡秀司、三浦正純：高知自動車道における無塗装耐候性橋梁の現状と課題、橋梁と基礎、Vol.34、pp.19-24、2000-5
- 9) 三浦正純、川村文人、吉田幸信、藤原俊明、山本雅貴：凍結防止剤が散布される無塗装耐候性橋梁の現状と対策(その1) 架設後10年経過した橋梁の現状、土木学会第58回年次学術講演会、2003-9
- 10) (社) 日本鋼構造協会：鋼橋の性能向上研究小委員会耐候性鋼橋梁部会、「鋼構造協会技術レポート73」 耐候性橋梁の可能性と新しい技術、2006-10
- 11) (社) 日本鉄鋼連盟、(社) 日本橋梁建設協会：耐候性鋼の橋梁への適用、2010.
- 12) 杉田尚男、野中陳旭、野添裕輔：画像処理による耐候性鋼材のさび外観評価レベルの判別方法に関する研究、八戸工業高等専門学校紀要第45号、2010.
- 13) 河村圭、荒瀬陽平、後藤悟史、宮本文穂：画像処理とニューラルネットワークを利用した耐候性鋼材のさび外観評価、第24回ファジィシステムシンポジウムTB4-1、pp.472-477、2008.
- 14) 建設省土木研究所、(社) 鋼材倶楽部、(社) 日本橋梁建設協会：耐候性鋼材の橋梁への適用に関する共同研究報告書(XV)、整理番号第71号、1992.
- 15) 堀川和男、瀧口周一郎、石津善雄、金指元計：各種金属材料および防錆被服の大気腐食に関する研究(第5報) 金属素材類暴露5ヵ年の結果、防食技術、vol.16、No.4、pp.153-158、1967.
- 16) (社) 日本鋼橋塗装専門会、耐候性鋼材塗装研究分科会：劣化した耐候性鋼の塗装使用の作成、1998.

- 17) 酒井幸市：画像処理とパターン認識入門 基礎から VC#/VC++.NET によるプロジェクト作成まで，森北出版，2006.
- 18) 北原武嗣，田中賢太郎：画像処理と NN を用いた耐候性鋼橋梁の腐食状況評価に関する検討，土木情報利用技術論文集，No.18，pp.243-248，2009.
- 19) R.M.Haralick, K.Shanmugam, I.Dinstein：“Textural Features for Image Classification”，IEEE Trans, SMC-3, No.6, pp.813-827, 1973.
- 20) デジタル画像処理編集委員会：デジタル画像処理，画像情報教育振興協会，2004.
- 21) 谷口慶治：画像処理工学 基本編，共立出版，1996.
- 22) 浜島信之：多変量解析による臨床研究，名古屋大学出版会，1990.
- 23) 内田治：SPSS によるロジスティック回帰分析，オーム社，2011.
- 24) 栗原信一：入門統計学 検定から多変量解析・実験計画法まで，オーム社，2011.
- 25) 三木 千尋、市川 篤司：現代の橋梁工学 塗装しない鋼と橋の技術最前線、数理工学社、2004.
- 26) 建設省土木研究所、(社) 鋼材倶楽部、(社) 日本橋梁建設協会：耐候性鋼材の橋梁への適用に関する共同研究報告書(XV)、1992.
- 27) 建設省土木研究所、(社) 鋼材倶楽部、(社) 日本橋梁建設協会：耐候性鋼材の橋梁への適用に関する共同研究報告書(XX)、1993.
- 28) 土木研究所 鋼橋防食工の補修に関する研究 2006-2010
- 29) 西日本高速道路(株)：設計要領 第二集 橋梁保全編 2013-7



**付録-1 (第 5 章 耐候性鋼橋梁の補修塗装に関する研究：すべての試験結果)**

1～8 耐候性鋼材試験片の外観評価結果

9～16 耐候性鋼材試験片の付着力試験結果

**付録-2 耐候性鋼橋梁維持管理要領**



## 第 5 章 耐候性鋼橋梁の補修塗装に関する研究

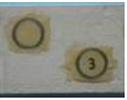
### すべての試験結果



外観評価(耐候性鋼材試験片)  
 試験方法 : 60℃ 熱水浸漬試験  
 外観観察取りまとめ(1)

試験片番号	素地調整	試験前		330時間経過		1170時間経過		2000時間経過		試験片のさび促進時間
		表面	裏面	表面	裏面	表面	裏面	表面	裏面	
⑦-1	1種ケレン									2400時間
ふくれ		—	—	無	5F	無	5F	無	4MD	
さび		—	—	10~9点	10点	10~9点	10点	10~9点	9点	
記事	—	—			φ2.0mm1個			φ2.0mm2個		
⑧-1	1種ケレン									240時間
ふくれ		—	—	5M	5M	無	無	無	無	
さび		—	—	10点	10点	10点	10点	10~9点	10点	
記事	—	—			φ0.8mm1個					
⑭-1	1種ケレン									720時間
ふくれ		—	—	8D	6M	無	6F	無	無	
さび		—	—	10点	10点	10~9点	9~8点	9点	8点	
記事	—	—			φ1.4mm1個					
③-2	3種ケレン									2400時間
ふくれ		—	—	2M	2MD	—	—	—	—	
さび		—	—	10点	9点	—	—	—	—	
記事	—	—			—	—	—	—		
⑤-2	3種ケレン									480時間
ふくれ		—	—	1D	2MD	—	—	—	—	
さび		—	—	10点	8点	—	—	—	—	
記事	—	—			—	—	—	—		
⑥-2	3種ケレン									960時間
ふくれ		—	—	1D	1D	—	—	—	—	
さび		—	—	9点	9点	—	—	—	—	
記事	—	—			—	—	—	—		

外観観察取りまとめ(2)

試験片番号	素地調整	試験前		330時間経過		1170時間経過		2000時間経過		試験片のさび促進時間
		表面	裏面	表面	裏面	表面	裏面	表面	裏面	
⑦-3	1種ケレン									2400時間
ふくれ		—	—	5MD	5D	3D	3D	3D	3D	
さび記事		—	—	10点	10点	10~9点	10~9点	8点	8点	
⑧-3	1種ケレン									240時間
ふくれ		—	—	6D	6D	4D	4D	4D	4D	
さび記事		—	—	10~9点	10点	9点	10~9点	9点	7点	
⑭-3	1種ケレン									720時間
ふくれ		—	—	7D	6D	4MD~4D	4D	4D	4D	
さび記事		—	—	10点	10点	9点	8~7点	9~8点	7点	
③-4	3種ケレン									2400時間
ふくれ		—	—	2F~4MD	1D	—	—	—	—	
さび記事		—	—	10点	10点	—	—	—	—	
⑤-4	3種ケレン									480時間
ふくれ		—	—	2M	1MD	—	—	—	—	
さび記事		—	—	10点	10点	—	—	—	—	
⑥-4	3種ケレン									960時間
ふくれ		—	—	2MD	1MD	—	—	—	—	
さび記事		—	—	10点	10点	—	—	—	—	

外観観察取りまとめ(3)

試験片番号	素地調整	試験前		330時間経過		1170時間経過		2000時間経過		試験片のさび促進時間
		表面	裏面	表面	裏面	表面	裏面	表面	裏面	
⑦-5	1種ケレン									2400時間
ふくれ		—	—	8MD	5D~4F	6MD	5D~2F	8MD	5M	
さび記事		—	—	10~9点	10点	9点	9点	9点	9点	
⑧-5	1種ケレン									240時間
ふくれ		—	—	1D	8D	無	無	無	無	
さび記事		—	—	10~9点	10~9点	10~9点	9点	10~9点	10~9点	
⑭-5	1種ケレン									720時間
ふくれ		—	—	8D	8D	無	8M~4F	無	8M~5F	
さび記事		—	—	10点	10~9点	10~9点	10~9点	9点	7~6点	
⑨-6	1種ケレン									2400時間
ふくれ		—	—	6M~6MD	6MD	4MD	5MD~5D	6MD	5MD~5D	
さび記事		—	—	10~9点	10~9点	10~9点	10~9点	9~8点	9~8点	
⑪-6	1種ケレン									480時間
ふくれ		—	—	6M~6MD	5MD	5M~5MD	5M~5MD	5MD	5M~5MD	
さび記事		—	—	10点	10点	9点	7~6点	9~8点	6点	
⑫-6	1種ケレン									960時間
ふくれ		—	—	6M	6M~6MD	5M	5M~5MD	5M~5MD	5M~5MD	
さび記事		—	—	10~9点	10~9点	8点	8~7点	8点	8~7点	

外観観察取りまとめ(4)

試験片番号	素地調整	試験前		330時間経過		1170時間経過		2000時間経過		試験片のさび促進時間
		表面	裏面	表面	裏面	表面	裏面	表面	裏面	
③-7	3種ケレン									2400時間
ふくれ		—	—	2MD	2D	—	—	—	—	
さび		—	—	9点	5点	—	—	—	—	
記事		—	—			—	—	—	—	
⑤-7	3種ケレン									480時間
ふくれ		—	—	2M	2MD	—	—	—	—	
さび		—	—	10~9点	8点	—	—	—	—	
記事		—	—			—	—	—	—	
⑥-7	3種ケレン									960時間
ふくれ		—	—	2M	2MD	—	—	—	—	
さび		—	—	9点	9点	—	—	—	—	
記事		—	—			—	—	—	—	
⑫-8	1種ケレン									960時間
ふくれ		—	—	5F~5M	5M	4M	4MD	4MD	4MD~4D	
さび		—	—	10~9点	10点	9点	10~9点	9点	8~7点	
記事		—	—							
⑮-8	1種ケレン									2400時間
ふくれ		—	—	5MD	5M~5MD	2MD~2D	5MD~5D	2D	5MD~5D	
さび		—	—	10~9点	10~9点	10点	6点	9~8点	6点	
記事		—	—							
⑯-8	1種ケレン									480時間
ふくれ		—	—	5M	4F	5M	無	5MD	4F~4M	
さび		—	—	10~9点	10点	9点	9点	9点	9点	
記事		—	—							

φ 2.0mm, 3.0mm1個

外観観察取りまとめ(5)

試験片番号	素地調整	試験前		330時間経過		1170時間経過		2000時間経過		試験片のさび促進時間
		表面	裏面	表面	裏面	表面	裏面	表面	裏面	
⑩-9	3種ケレン									720時間
ふくれ		—	—	2M	2M	—	—	—	—	
さび		—	—	9~8点	6~5点	—	—	—	—	
記事	—	—			—	—	—	—	—	
⑬-9	3種ケレン									240時間
ふくれ		—	—	5MD~4F	4MD~2F	2D	4D~1M	2D	4D~1M	
さび		—	—	10~9点	10~9点	6点	9点	6点	7~6点	
記事	—	—								
⑰-9	3種ケレン									960時間
ふくれ		—	—	2M	2M~2MD	2MD	1M~3MD	1D	1MD	
さび		—	—	8点	7点	5点	4点	4~3点	4~3点	
記事	—	—			φ15.5mm1個					
①-10	1種ケレン									240時間
ふくれ		—	—	5F	—	4F	6F	4F	6F	
さび		—	—	10~9点	—	10~9点	10~9点	9点	10~9点	
記事	—	—								
②-10	1種ケレン									720時間
ふくれ		—	—	無	—	無	無	8F	無	
さび		—	—	10点	—	10点	10点	9点	10点	
記事	—	—			φ1.0mm1個					
④-10	1種ケレン									960時間
ふくれ		—	—	無	—	無	無	無	無	
さび		—	—	10点	—	10点	10点	10点	10点	
記事	—	—								

外観観察取りまとめ(6)

試験片番号	素地調整	試験前		330時間経過		1170時間経過		2000時間経過		試験片のさび促進時間
		表面	裏面	表面	裏面	表面	裏面	表面	裏面	
⑨-11	1種ケレン									2400時間
ふくれ		—	—	5M	5MD~5D	3M	4MD~4D	3M	4MD~4D	
さび記事		—	—	10点	10点	10点	10点	10点	9点	
⑪-11	1種ケレン									480時間
ふくれ		—	—	5F	無	無	無	無	無	
さび記事		—	—	10~9点	10点	9点	10点	9点	9点	
					φ 1.0mm2個	φ 1.7mm1個	φ 1.0mm2個	φ 1.0mm2個	φ 1.0mm1個	
⑫-11	1種ケレン									960時間
ふくれ		—	—	無	無	無	無	無	無	
さび記事		—	—	10~9点	10~9点	10~9点	10~9点	9点	9~8点	
							φ 0.5mm1個		φ 1.0mm1個	
⑩-12	3種ケレン									720時間
ふくれ		—	—	2MD	2MD	—	—	—	—	
さび記事		—	—	7点	10~9点	—	—	—	—	
⑬-12	3種ケレン									240時間
ふくれ		—	—	1M	1M	—	—	—	—	
さび記事		—	—	10~9点	9点	—	—	—	—	
⑱-12	3種ケレン									2400時間
ふくれ		—	—	2D	2MD	2D	2D	1D	2D	
さび記事		—	—	8点	7点	8点	6点	6~5点	6~5点	

外観観察取りまとめ(7)

試験片番号	素地調整	試験前		330時間経過		1170時間経過		2000時間経過		試験片のさび促進時間
		表面	裏面	表面	裏面	表面	裏面	表面	裏面	
⑨-13	1種ケレン									2400時間
ふくれ		—	—	4M	5M	3F~3M	4M	3F~3M	5M	
さび記事		—	—	10~9点	10点	10~9点	10~9点	9点	9点	
⑮-13	1種ケレン									2400時間
ふくれ		—	—	5F	4F	8F	4F	8F	4F	
さび記事		—	—	10点	10~9点	9点	9点	9~8点	8点	
⑯-13	1種ケレン									480時間
ふくれ		—	—	無	8F	6F	6F	5F	8F~8M	
さび記事		—	—	10~9点	10点	10点	9点	10点	9点	
⑩-14	3種ケレン									720時間
ふくれ		—	—	2M	2M	—	—	—	—	
さび記事		—	—	9点	10~9点	—	—	—	—	
⑰-14	3種ケレン									960時間
ふくれ		—	—	3M	1F	2M	2M	2M 6M~6MD	1D	
さび記事		—	—	9~8点	8点	7~6点	9点	6点	3点	
⑱-14	3種ケレン									2400時間
ふくれ		—	—	1F	2MD	2D~1M	2MD~2D	1D	1D	
さび記事		—	—	7点	7点	7~6点	7点	6~5点	6点	

外観観察取りまとめ(8)

試験片番号	素地調整	試験前		330時間経過		1170時間経過		2000時間経過		試験片のさび促進時間
		表面	裏面	表面	裏面	表面	裏面	表面	裏面	
⑪-15	1種ケレン									480時間
ふくれ		—	—	無	無	無	無	無	無	
さび記事		—	—	10点	10点	10点	10~9点	10点	8点	
							φ1.6mm1個			
⑮-15	1種ケレン									2400時間
ふくれ		—	—	無	3F	無	2F	無	2F	
さび記事		—	—	10点	10点	10点	10点	10~9点	10点	
⑯-15	1種ケレン									480時間
ふくれ		—	—	無	無	無	無	無	無	
さび記事		—	—	10点	10点	10点	10点	10点	10点	
⑬-16	3種ケレン									240時間
ふくれ		—	—	4F	2F	4F~4M	2M~1F	4F~2F	2M~2MD	
さび記事		—	—	10点	10点	10点	10点	9点	10点	
⑰-16	3種ケレン									960時間
ふくれ		—	—	3M	2M	4M	2M	2F	2M~2D	
さび記事		—	—	10点	10点	10~9点	9~8点	10~9点	9~8点	
						φ7.0mm1個				
⑱-16	3種ケレン									2400時間
ふくれ		—	—	2F	2M	無	1M	無	1M~1MD	
さび記事		—	—	10~9点	10点	10点	8点	10点	8点	
						φ9.0mm1個		φ9.5mm1個		

試験結果取りまとめ(1)

耐候性鋼材試験片		初期値				330時間				1170時間				2000時間				
試験番号	素地調整	塗装仕様	付着力 (MPa)	はく離箇所	はく離状況写真		付着力 (MPa)	はく離箇所	はく離状況写真		付着力 (MPa)	はく離箇所	はく離状況写真		付着力 (MPa)	はく離箇所	はく離状況写真	
					試験体側	試験器具側			試験体側	試験器具側			試験体側	試験器具側			試験体側	試験器具側
⑦-1	1種ケレン	①素地調整(1種ケレン サンドブラスト施工) ②第一層下塗塗装(有機ジンクリットペイント 1回) ③第二層下塗塗装(有機ジンクリットペイント 1回) ④第三層下塗塗装(弱溶剤形変性エポキシ樹脂 1回) ⑤第四層下塗塗装(弱溶剤形変性エポキシ樹脂 1回) ⑥第五層中塗塗装(弱溶剤形エポキシ樹脂中塗 1回) ⑦第六層上塗塗装(弱溶剤形フッ素樹脂上塗 1回)	3.53(14.12)	接着剤100%(付着破壊)			8.66	④下塗100%(付着破壊)			5.82	⑥中塗5%/④下塗95%(擬集破壊)			5.99	④下塗100%(付着破壊)		
			3.85(15.4)	接着剤100%(付着破壊)			8.51	④下塗100%(付着破壊)			7.61	④下塗100%(付着破壊)			5.98	④下塗100%(付着破壊)		
⑧-1	1種ケレン	①素地調整(1種ケレン サンドブラスト施工) ②第一層下塗塗装(有機ジンクリットペイント 1回) ③第二層下塗塗装(有機ジンクリットペイント 1回) ④第三層下塗塗装(弱溶剤形変性エポキシ樹脂 1回) ⑤第四層下塗塗装(弱溶剤形変性エポキシ樹脂 1回) ⑥第五層中塗塗装(弱溶剤形エポキシ樹脂中塗 1回) ⑦第六層上塗塗装(弱溶剤形フッ素樹脂上塗 1回)	8.86	接着剤50%/⑦上塗40%/⑤下塗10%(擬集破壊)			10.53	④下塗100%(付着破壊)			8.13	④下塗100%(付着破壊)			9.64	④下塗90%/③下塗10%(擬集破壊)		
			7.83	接着剤60%/⑦上塗40%(擬集破壊)			11.63	接着剤30%/④下塗70%(擬集破壊)			9.79	⑦上塗15%/④下塗70%/②下塗15%(擬集破壊)			6.33	④下塗100%(付着破壊)		
⑭-1	1種ケレン	①素地調整(1種ケレン サンドブラスト施工) ②第一層下塗塗装(有機ジンクリットペイント 1回) ③第二層下塗塗装(有機ジンクリットペイント 1回) ④第三層下塗塗装(弱溶剤形変性エポキシ樹脂 1回) ⑤第四層下塗塗装(弱溶剤形変性エポキシ樹脂 1回) ⑥第五層中塗塗装(弱溶剤形エポキシ樹脂中塗 1回) ⑦第六層上塗塗装(弱溶剤形フッ素樹脂上塗 1回)	7.52	接着剤60%/⑦上塗40%(擬集破壊)			10.46	④下塗100%(付着破壊)			6.98	④下塗100%(付着破壊)			5.28	④下塗100%(付着破壊)		
			9.18	接着剤90%/⑦上塗10%(擬集破壊)			9.96	⑥中塗10%/④下塗90%(擬集破壊)			6.63	④下塗100%(付着破壊)			4.81	④下塗100%(付着破壊)		
③-2	3種ケレン	①素地調整(3種ケレンB) ②第一層下塗塗装(有機ジンクリットペイント 1回) ③第二層下塗塗装(有機ジンクリットペイント 1回) ④第三層下塗塗装(弱溶剤形変性エポキシ樹脂 1回) ⑤第四層下塗塗装(弱溶剤形変性エポキシ樹脂 1回) ⑥第五層中塗塗装(弱溶剤形エポキシ樹脂中塗 1回) ⑦第六層上塗塗装(弱溶剤形フッ素樹脂上塗 1回)	7.33	接着剤95%/⑦上塗5%(擬集破壊)			1.93	素地100%(付着破壊) ※終了			-	-	-	-	-	-	-	-
			7.86	接着剤85%/⑦上塗10%/④下塗5%(擬集破壊)			2.30	素地100%(付着破壊) ※終了			-	-	-	-	-	-	-	-
⑤-2	3種ケレン	①素地調整(3種ケレンB) ②第一層下塗塗装(有機ジンクリットペイント 1回) ③第二層下塗塗装(有機ジンクリットペイント 1回) ④第三層下塗塗装(弱溶剤形変性エポキシ樹脂 1回) ⑤第四層下塗塗装(弱溶剤形変性エポキシ樹脂 1回) ⑥第五層中塗塗装(弱溶剤形エポキシ樹脂中塗 1回) ⑦第六層上塗塗装(弱溶剤形フッ素樹脂上塗 1回)	4.99	接着剤90%/⑦上塗10%(擬集破壊)			NG	測定不能※終了	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			6.29	接着剤90%/⑦上塗5%/④下塗5%(擬集破壊)			NG	測定不能※終了	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
⑥-2	3種ケレン	①素地調整(3種ケレンB) ②第一層下塗塗装(有機ジンクリットペイント 1回) ③第二層下塗塗装(有機ジンクリットペイント 1回) ④第三層下塗塗装(弱溶剤形変性エポキシ樹脂 1回) ⑤第四層下塗塗装(弱溶剤形変性エポキシ樹脂 1回) ⑥第五層中塗塗装(弱溶剤形エポキシ樹脂中塗 1回) ⑦第六層上塗塗装(弱溶剤形フッ素樹脂上塗 1回)	6.30	接着剤75%/⑦上塗25%(擬集破壊)			NG	測定不能※終了	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			7.17	接着剤80%/⑦上塗15%/④下塗5%(擬集破壊)			NG	測定不能※終了	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

試験結果取りまとめ(2)

耐候性鋼材試験片		初期値				330時間				1170時間				2000時間				
試験番号	素地調整	塗装仕様	付着力 (MPa)	はく離箇所	はく離状況写真		付着力 (MPa)	はく離箇所	はく離状況写真		付着力 (MPa)	はく離箇所	はく離状況写真		付着力 (MPa)	はく離箇所	はく離状況写真	
					試験体側	試験治具側			試験体側	試験治具側			試験体側	試験治具側			試験体側	試験治具側
⑦-3	1種ケレン	①素地調整(1種ケレン サンドブラスト施工) ②第一層下塗塗装(鉄鋼材料耐食性向上表面処理剤 F 1回)15μm ③第二層下塗塗装(鉄鋼材料耐食性向上表面処理剤 F 1回)15μm ④第三層中塗塗装(弱溶剤形エポキシ樹脂中塗 1回) ⑤第四層上塗塗装(弱溶剤形フッ素樹脂上塗 1回)	4.24(16.96)	接着剤100%(付着破壊)			3.40	④中塗50%/②下塗50%(擬集破壊)			3.33	⑤上塗5%/素地95%(擬集破壊)			—	—	—	—
			4.65(18.6)	接着剤100%(付着破壊)			4.72	④中塗60%/②下塗40%(擬集破壊)			2.35	⑤上塗5%/素地95%(擬集破壊)			—	—	—	—
⑧-3	1種ケレン	①素地調整(1種ケレン サンドブラスト施工) ②第一層下塗塗装(鉄鋼材料耐食性向上表面処理剤 F 1回)15μm ③第二層下塗塗装(鉄鋼材料耐食性向上表面処理剤 F 1回)15μm ④第三層中塗塗装(弱溶剤形エポキシ樹脂中塗 1回) ⑤第四層上塗塗装(弱溶剤形フッ素樹脂上塗 1回)	13.40	接着剤85%/⑤上塗5%/③下塗10%(擬集破壊)			5.01	④中塗5%/②下塗95%(擬集破壊)			2.25	⑤上塗2%/素地98%(擬集破壊)			—	—	—	—
			11.31	接着剤65%/⑤上塗35%(擬集破壊)			6.09	④中塗15%/②下塗85%(擬集破壊)			1.99	⑤上塗5%/素地95%(擬集破壊)			—	—	—	—
⑭-3	1種ケレン	①素地調整(1種ケレン サンドブラスト施工) ②第一層下塗塗装(鉄鋼材料耐食性向上表面処理剤 F 1回)15μm ③第二層下塗塗装(鉄鋼材料耐食性向上表面処理剤 F 1回)15μm ④第三層中塗塗装(弱溶剤形エポキシ樹脂中塗 1回) ⑤第四層上塗塗装(弱溶剤形フッ素樹脂上塗 1回)	10.07	接着剤80%/⑤上塗20%(擬集破壊)			5.47	④中塗5%/素地95%(擬集破壊)			2.13	④中塗10%/素地90%(擬集破壊)			—	—	—	—
			8.61	接着剤95%/⑤上塗5%(擬集破壊)			5.24	④中塗10%/素地90%(擬集破壊)			1.44	④中塗10%/素地90%(擬集破壊)			—	—	—	—
③-4	3種ケレン	①素地調整(3種ケレンB) ②第一層下塗塗装(鉄鋼材料耐食性向上表面処理剤 F 1回)15μm ③第二層下塗塗装(鉄鋼材料耐食性向上表面処理剤 F 1回)15μm ④第三層中塗塗装(弱溶剤形エポキシ樹脂中塗 1回) ⑤第四層上塗塗装(弱溶剤形フッ素樹脂上塗 1回)	7.62	④中塗5%/③下塗95%(擬集破壊)			NG	素地100%(付着破壊)※終了			—	—	—	—	—	—	—	—
			6.61	④中塗5%/③下塗95%(擬集破壊)			NG	素地100%(付着破壊)※終了			—	—	—	—	—	—	—	—
⑤-4	3種ケレン	①素地調整(3種ケレンB) ②第一層下塗塗装(鉄鋼材料耐食性向上表面処理剤 F 1回)15μm ③第二層下塗塗装(鉄鋼材料耐食性向上表面処理剤 F 1回)15μm ④第三層中塗塗装(弱溶剤形エポキシ樹脂中塗 1回) ⑤第四層上塗塗装(弱溶剤形フッ素樹脂上塗 1回)	4.25	接着剤25%/③下塗75%(擬集破壊)			NG	測定不能※終了	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
			5.01	接着剤5%/③下塗95%(擬集破壊)			2.56	素地100%(付着破壊)※終了			—	—	—	—	—	—	—	—
⑥-4	3種ケレン	①素地調整(3種ケレンB) ②第一層下塗塗装(鉄鋼材料耐食性向上表面処理剤 F 1回)15μm ③第二層下塗塗装(鉄鋼材料耐食性向上表面処理剤 F 1回)15μm ④第三層中塗塗装(弱溶剤形エポキシ樹脂中塗 1回) ⑤第四層上塗塗装(弱溶剤形フッ素樹脂上塗 1回)	7.86	接着剤85%/⑤上塗5%/③下塗10%(擬集破壊)			NG	測定不能※終了	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
			7.45	接着剤10%/⑤上塗5%/③下塗85%(擬集破壊)			NG	測定不能※終了	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

試験結果取りまとめ(3)

耐候性鋼材試験片		初期値				330時間				1170時間				2000時間				
試験番号	素地調整	塗装仕様	付着力 (MPa)	はく離箇所	はく離状況写真		付着力 (MPa)	はく離箇所	はく離状況写真		付着力 (MPa)	はく離箇所	はく離状況写真		付着力 (MPa)	はく離箇所	はく離状況写真	
					試験体側	試験治具側			試験体側	試験治具側			試験体側	試験治具側			試験体側	試験治具側
⑦-5	1種ケレン	①素地調整(1種ケレン サンドブラスト施工) ②第一層下塗塗装(鉄鋼材料耐食性向上表面処理剤 G 1回)35μm ③第二層下塗塗装(鉄鋼材料耐食性向上表面処理剤 G 1回)35μm ④第三層中塗塗装(弱溶剤形エポキシ樹脂中塗 1回) ⑤第四層上塗塗装(弱溶剤形フッ素樹脂上塗 1回)	4.59(18.36)	接着剤100%(付着破壊)			6.55	接着剤2%/④中塗98%(擬集破壊)			—	—	—	—	4.91	④中塗50%/③下塗40%/素地10%(擬集破壊)		
			4.26(17.04)	接着剤100%(付着破壊)			7.22	接着剤5%/④中塗95%(擬集破壊)			—	—	—	—	5.18	④中塗40%/③下塗30%/素地30%(擬集破壊)		
⑧-5	1種ケレン	①素地調整(1種ケレン サンドブラスト施工) ②第一層下塗塗装(鉄鋼材料耐食性向上表面処理剤 G 1回)35μm ③第二層下塗塗装(鉄鋼材料耐食性向上表面処理剤 G 1回)35μm ④第三層中塗塗装(弱溶剤形エポキシ樹脂中塗 1回) ⑤第四層上塗塗装(弱溶剤形フッ素樹脂上塗 1回)	11.23	接着剤80%/⑤上塗20%(擬集破壊)			7.26	④中塗100%(付着破壊)			5.44	④中塗5%/⑤上塗95%(擬集破壊)			6.20	④中塗100%(付着破壊)		
			10.66	接着剤90%/⑤上塗10%(擬集破壊)			9.19	④中塗100%(付着破壊)			8.09	⑤上塗100%(付着破壊)			7.09	④中塗100%(付着破壊)		
⑭-5	1種ケレン	①素地調整(1種ケレン サンドブラスト施工) ②第一層下塗塗装(鉄鋼材料耐食性向上表面処理剤 G 1回)35μm ③第二層下塗塗装(鉄鋼材料耐食性向上表面処理剤 G 1回)35μm ④第三層中塗塗装(弱溶剤形エポキシ樹脂中塗 1回) ⑤第四層上塗塗装(弱溶剤形フッ素樹脂上塗 1回)	7.75	接着剤80%/⑤上塗20%(擬集破壊)			10.72	④中塗100%(付着破壊)			6.32	④中塗100%(付着破壊)			6.18	④中塗100%(付着破壊)		
			7.57	接着剤95%/⑤上塗5%(擬集破壊)			9.69	接着剤5%/④中塗95%(擬集破壊)			6.44	④中塗100%(付着破壊)			5.72	④中塗70%/③下塗30%(擬集破壊)		
⑨-6	1種ケレン	①素地調整(1種ケレン サンドブラスト施工) ②第一層下塗塗装(鉄鋼材料耐食性向上表面処理剤 G 1回)35μm ③第二層下塗塗装(鉄鋼材料耐食性向上表面処理剤 G 1回)35μm	15.78	③下塗100%(付着破壊)			9.44	接着剤10%/②下塗90%(擬集破壊)			6.68	②下塗5%/素地95%(擬集破壊)			11.41	②下塗100%(付着破壊)		
			16.44	接着剤40%/③下塗60%(擬集破壊)			7.19	接着剤20%/②下塗80%(擬集破壊)			8.03	②下塗5%/素地95%(擬集破壊)			6.81	②下塗90%/③下塗10%(擬集破壊)		
⑪-6	1種ケレン	①素地調整(1種ケレン サンドブラスト施工) ②第一層下塗塗装(鉄鋼材料耐食性向上表面処理剤 G 1回)35μm ③第二層下塗塗装(鉄鋼材料耐食性向上表面処理剤 G 1回)35μm	15.76	接着剤10%/③下塗90%(擬集破壊)			9.65	素地100%(付着破壊)			9.60	接着剤2%/素地98%(擬集破壊)			9.62	②下塗2%/素地98%(擬集破壊)		
			16.06	接着剤20%/③下塗80%(擬集破壊)			8.59	素地100%(付着破壊)			7.87	③下塗5%/素地95%(擬集破壊)			—	素地100%(付着破壊)		
⑫-6	1種ケレン	①素地調整(1種ケレン サンドブラスト施工) ②第一層下塗塗装(鉄鋼材料耐食性向上表面処理剤 G 1回)35μm ③第二層下塗塗装(鉄鋼材料耐食性向上表面処理剤 G 1回)35μm	15.54	接着剤10%/③下塗90%(擬集破壊)			8.31	接着剤2%/素地98%(擬集破壊)			6.99	②下塗10%/素地90%(擬集破壊)			9.77	②下塗10%/素地90%(擬集破壊)		
			16.84	接着剤15%/③下塗85%(擬集破壊)			7.48	素地100%(付着破壊)			4.64	接着剤10%/②下塗5%/素地85%(擬集破壊)			5.18	②下塗10%/素地90%(擬集破壊)		

試験結果取りまとめ(4)

耐候性鋼材試験片		初期値				330時間				1170時間				2000時間				
試験番号	素地調整	塗装仕様	付着力 (MPa)	はく離箇所	はく離状況写真		付着力 (MPa)	はく離箇所	はく離状況写真		付着力 (MPa)	はく離箇所	はく離状況写真		付着力 (MPa)	はく離箇所	はく離状況写真	
					試験体側	試験器具側			試験体側	試験器具側			試験体側	試験器具側			試験体側	試験器具側
③-7	3種ケレン	①素地調整(3種ケレンB) ②第一層下塗塗装(鉄鋼材料耐食性向上表面処理剤 G 1回)35μm ③第二層下塗塗装(鉄鋼材料耐食性向上表面処理剤 G 1回)35μm ④第三層中塗塗装(弱溶剤形エポキシ樹脂中塗 1回) ⑤第四層上塗塗装(弱溶剤形フッ素樹脂上塗 1回)	10.48	接着剤20%/⑤上塗15%/③下塗65%(擬集破壊)			NG	測定不能※終了	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
			8.47	接着剤60%/⑤上塗10%/③下塗30%(擬集破壊)			NG	測定不能※終了	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
⑤-7	3種ケレン	①素地調整(3種ケレンB) ②第一層下塗塗装(鉄鋼材料耐食性向上表面処理剤 G 1回)35μm ③第二層下塗塗装(鉄鋼材料耐食性向上表面処理剤 G 1回)35μm ④第三層中塗塗装(弱溶剤形エポキシ樹脂中塗 1回) ⑤第四層上塗塗装(弱溶剤形フッ素樹脂上塗 1回)	9.12	接着剤100%(付着破壊)			8.36	②下塗90%/素地10%(擬集破壊)※終了			—	—	—	—	—	—	—	—
			8.65	接着剤95%/⑤上塗5%(擬集破壊)			NG	測定不能※終了	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
⑥-7	3種ケレン	①素地調整(3種ケレンB) ②第一層下塗塗装(鉄鋼材料耐食性向上表面処理剤 G 1回)35μm ③第二層下塗塗装(鉄鋼材料耐食性向上表面処理剤 G 1回)35μm ④第三層中塗塗装(弱溶剤形エポキシ樹脂中塗 1回) ⑤第四層上塗塗装(弱溶剤形フッ素樹脂上塗 1回)	9.56	接着剤85%/⑤上塗15%(擬集破壊)			NG	測定不能※終了	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
			8.80	接着剤60%/⑤上塗35%/③下塗5%(擬集破壊)			NG	測定不能※終了	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
⑫-8	1種ケレン	①素地調整(1種ケレン サンドブラスト施工) ②第一層下塗塗装(鉄鋼材料耐食性向上表面処理剤 C 1回) ③第二層下塗塗装(鉄鋼材料耐食性向上表面処理剤 C 1回) ④第三層上塗塗装(弱溶剤形フッ素樹脂 1回)	10.18	接着剤80%/④上塗20%(擬集破壊)			8.41	接着剤50%/②下塗20%/素地30%(擬集破壊)			8.05	②下塗30%/素地70%(擬集破壊)			5.79	②下塗5%/素地95%(擬集破壊)		
			10.14	接着剤80%/④上塗20%(擬集破壊)			7.28	②下塗50%/素地50%(擬集破壊)			8.07	②下塗30%/素地70%(擬集破壊)			5.81	②下塗10%/素地90%(擬集破壊)		
⑮-8	1種ケレン	①素地調整(1種ケレン サンドブラスト施工) ②第一層下塗塗装(鉄鋼材料耐食性向上表面処理剤 C 1回) ③第二層下塗塗装(鉄鋼材料耐食性向上表面処理剤 C 1回) ④第三層上塗塗装(弱溶剤形フッ素樹脂 1回)	7.88	接着剤95%/④上塗5%(擬集破壊)			4.81	接着剤5%/②下塗10%/素地85%(擬集破壊)			NG	測定不可※終了	—	—	—	—	—	—
			8.66	接着剤50%/④上塗50%(擬集破壊)			7.37	②下塗20%/素地80%(擬集破壊)			NG	測定不可※終了	—	—	—	—	—	—
⑯-8	1種ケレン	①素地調整(1種ケレン サンドブラスト施工) ②第一層下塗塗装(Patina-Lock Cタイプ 1回) ③第二層下塗塗装(Patina-Lock Cタイプ 1回) ④第三層上塗塗装(フッ素樹脂上塗 1回)	9.85	接着剤75%/④上塗25%(擬集破壊)			7.50	②下塗50%/素地50%(擬集破壊)			6.46	②下塗30%/素地70%(擬集破壊)			6.56	②下塗10%/素地90%(擬集破壊)		
			10.50	接着剤60%/④上塗40%(擬集破壊)			9.77	②下塗50%/素地50%(擬集破壊)			8.37	②下塗25%/素地75%(擬集破壊)			6.23	②下塗15%/素地85%(擬集破壊)		

試験結果取りまとめ(5)

耐候性鋼材試験片		初期値				330時間				1170時間				2000時間				
試験番号	素地調整	塗装仕様	付着力 (MPa)	はく離箇所	はく離状況写真		付着力 (MPa)	はく離箇所	はく離状況写真		付着力 (MPa)	はく離箇所	はく離状況写真		付着力 (MPa)	はく離箇所	はく離状況写真	
					試験体側	試験治具側			試験体側	試験治具側			試験体側	試験治具側			試験体側	試験治具側
⑩-9	3種ケレン	①素地調整(3種ケレンB) ②第一層下塗塗装(鉄鋼材料耐食性向上表面処理剤 C 1回) ③第二層下塗塗装(鉄鋼材料耐食性向上表面処理剤 C 1回) ④第三層上塗塗装(弱溶剤形フッ素樹脂 1回)	6.46	④上塗80%/③下塗20%(擬集破壊)			0.46	素地100%(付着破壊)※終了			—	—	—	—	—	—	—	—
			6.36	④上塗85%/③下塗15%(擬集破壊)			0.72	素地100%(付着破壊)※終了			—	—	—	—	—	—	—	—
⑬-9	3種ケレン	①素地調整(3種ケレンB) ②第一層下塗塗装(鉄鋼材料耐食性向上表面処理剤 C 1回) ③第二層下塗塗装(鉄鋼材料耐食性向上表面処理剤 C 1回) ④第三層上塗塗装(弱溶剤形フッ素樹脂 1回)	4.04	接着剤100%(付着破壊)			4.06	④上塗50%/素地50%(擬集破壊)			NG	測定不能※終了	—	—	—	—	—	—
			3.39	接着剤90%/④上塗10%(擬集破壊)			3.39	④上塗50%/素地50%(擬集破壊)			NG	測定不能※終了	—	—	—	—	—	—
⑰-9	3種ケレン	①素地調整(3種ケレンB) ②第一層下塗塗装(鉄鋼材料耐食性向上表面処理剤 C 1回) ③第二層下塗塗装(鉄鋼材料耐食性向上表面処理剤 C 1回) ④第三層上塗塗装(弱溶剤形フッ素樹脂 1回)	4.46	接着剤90%/④上塗5%/③下塗5%(擬集破壊)			1.05	素地100%(付着破壊)			NG	測定不能※終了	—	—	—	—	—	—
			4.66	接着剤75%/④上塗10%/③下塗15%(擬集破壊)			NG	測定不能※終了	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
①-10	1種ケレン	①素地調整(1種ケレン サンドブラスト施工) ②第一層金属溶射(アルミ&亜鉛合金)(85&15) ③第二層封孔処理(変性エポキシ樹脂 1回) ④第三層封孔処理(変性エポキシ樹脂 1回) ⑤第四層中塗塗装(弱溶剤形変性エポキシ樹脂 1回) ⑥第五層中塗塗装(弱溶剤形エポキシ樹脂中塗 1回) ⑦第六層上塗塗装(弱溶剤形フッ素樹脂上塗 1回)	6.01	接着剤25%/④封孔処理5%/②金属溶射70%(擬集破壊)			9.76	⑥中塗5%/素地95%(擬集破壊)			10.92	⑥中塗5%/③封孔処理10%/素地85%(擬集破壊)			10.77	⑥中塗75%/④封孔処理25%(擬集破壊)		
			7.36	接着剤50%/⑥中塗5%/④封孔処理5%/②金属溶射40%(擬集破壊)			9.65	⑥中塗10%/素地90%(擬集破壊)			9.90	⑥中塗5%/素地95%(擬集破壊)			9.09	⑥中塗90%/④封孔処理10%(擬集破壊)		
			—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	8.99	⑥中塗40%/④封孔処理60%(擬集破壊)	
②-10	1種ケレン	①素地調整(1種ケレン サンドブラスト施工) ②第一層金属溶射(アルミ&亜鉛合金)(85&15) ③第二層封孔処理(変性エポキシ樹脂 1回) ④第三層封孔処理(変性エポキシ樹脂 1回) ⑤第四層中塗塗装(弱溶剤形変性エポキシ樹脂 1回) ⑥第五層中塗塗装(弱溶剤形エポキシ樹脂中塗 1回) ⑦第六層上塗塗装(弱溶剤形フッ素樹脂上塗 1回)	4.79	接着剤70%/⑥中塗5%/④封孔処理5%/②金属溶射20%(擬集破壊)			10.63	⑥中塗5%/素地95%(擬集破壊)			10.32	③封孔処理15%/素地85%(擬集破壊)			6.51	⑥中塗100%(付着破壊)		
			4.37	接着剤70%/⑥中塗5%/④封孔処理5%/②金属溶射20%(擬集破壊)			10.01	⑥中塗10%/③封孔5%/素地85%(擬集破壊)			10.96	③封孔処理25%/素地75%(擬集破壊)			5.92	⑥中塗98%/④封孔処理2%(擬集破壊)		
			—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4.41	⑥中塗95%/④封孔処理5%(擬集破壊)		
④-10	1種ケレン	①素地調整(1種ケレン サンドブラスト施工) ②第一層金属溶射(アルミ&亜鉛合金)(85&15) ③第二層封孔処理(変性エポキシ樹脂 1回) ④第三層封孔処理(変性エポキシ樹脂 1回) ⑤第四層中塗塗装(弱溶剤形変性エポキシ樹脂 1回) ⑥第五層中塗塗装(弱溶剤形エポキシ樹脂中塗 1回) ⑦第六層上塗塗装(弱溶剤形フッ素樹脂上塗 1回)	3.82	接着剤100%(付着破壊)			13.87	接着剤25%/⑥中塗10%/③下塗65%(擬集破壊)			12.05	③下塗80%/②下塗20%(擬集破壊)			11.13	⑥中塗5%/④封孔処理95%(擬集破壊)		
			4.59	接着剤95%/⑥中塗5%(擬集破壊)			13.43	⑤中塗5%/③下塗90%/素地5%(擬集破壊)			12.05	③下塗70%/②下塗30%(擬集破壊)			10.82	⑥中塗3%/④封孔処理97%(擬集破壊)		
			—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	7.75	⑥中塗95%/④封孔処理5%(擬集破壊)		

試験結果取りまとめ(6)

耐候性鋼材試験片		初期値				330時間				1170時間				2000時間				
試験番号	素地調整	塗装仕様	付着力 (MPa)	はく離箇所	はく離状況写真		付着力 (MPa)	はく離箇所	はく離状況写真		付着力 (MPa)	はく離箇所	はく離状況写真		付着力 (MPa)	はく離箇所	はく離状況写真	
					試験体側	試験器具側			試験体側	試験器具側			試験体側	試験器具側			試験体側	試験器具側
⑨-11	1種ケレン	①素地調整(1種ケレン サンドブラスト施工) ②第一層下塗塗装(有機ジンクリットペイント 1回) ③第二層下塗塗装(有機ジンクリットペイント 1回) ④第三層下塗塗装(弱溶剤形変性エポキシ樹脂 1回) ⑤第四層中塗塗装(弱溶剤形フッ素樹脂 1回)	10.43	接着剤50%/⑤中塗50%(擬集破壊)			8.32	接着剤100%(付着破壊)			7.75	⑤中塗60%/②下塗20%/素地20%(擬集破壊)			7.66	⑤中塗100%(付着破壊)		
			10.51	接着剤50%/⑤中塗50%(擬集破壊)			9.83	接着剤95%/⑤中塗5%(擬集破壊)			10.14	⑤中塗90%/②下塗10%(擬集破壊)			5.25	⑤中塗90%/④下塗10%(擬集破壊)		
⑪-11	1種ケレン	①素地調整(1種ケレン サンドブラスト施工) ②第一層下塗塗装(有機ジンクリットペイント 1回) ③第二層下塗塗装(有機ジンクリットペイント 1回) ④第三層下塗塗装(弱溶剤形変性エポキシ樹脂 1回) ⑤第四層中塗塗装(弱溶剤形フッ素樹脂 1回)	9.32	接着剤50%/⑤中塗50%(擬集破壊)			9.22	接着剤40%/④下塗15%/素地45%(擬集破壊)			10.99	接着剤95%/⑤中塗5%(擬集破壊)			8.40	④下塗100%(付着破壊)		
			11.81	接着剤40%/⑤中塗60%(擬集破壊)			10.65	接着剤100%(付着破壊)			12.01	接着剤90%/⑤中塗2%/④下塗8%(擬集破壊)			10.34	④下塗100%(付着破壊)		
⑫-11	1種ケレン	①素地調整(1種ケレン サンドブラスト施工) ②第一層下塗塗装(有機ジンクリットペイント 1回) ③第二層下塗塗装(有機ジンクリットペイント 1回) ④第三層下塗塗装(弱溶剤形変性エポキシ樹脂 1回) ⑤第四層中塗塗装(弱溶剤形フッ素樹脂 1回)	9.86	接着剤70%/⑤中塗30%(擬集破壊)			12.33	接着剤90%/⑤中塗10%(擬集破壊)			12.72	⑤中塗25%/④下塗65%/素地10%(擬集破壊)			9.93	④下塗100%(付着破壊)		
			7.58	接着剤50%/⑤中塗50%(擬集破壊)			13.55	接着剤80%/⑤中塗20%(擬集破壊)			11.65	⑤中塗15%/④下塗55%/素地30%(擬集破壊)			7.39	④下塗100%(付着破壊)		
⑩-12	3種ケレン	①素地調整(3種ケレンB) ②第一層下塗塗装(有機ジンクリットペイント 1回) ③第三層下塗塗装(弱溶剤形変性エポキシ樹脂 1回) ④第四層中塗塗装(弱溶剤形フッ素樹脂 1回)	9.67	接着剤50%/④中塗50%(擬集破壊)			NG	測定不能※終了	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
			8.74	接着剤40%/④中塗60%(擬集破壊)			2.42	素地100%(付着破壊)※終了			—	—	—	—	—	—	—	—
⑬-12	3種ケレン	①素地調整(3種ケレンB) ②第一層下塗塗装(有機ジンクリットペイント 1回) ③第三層下塗塗装(弱溶剤形変性エポキシ樹脂 1回) ④第四層中塗塗装(弱溶剤形フッ素樹脂 1回)	8.30	接着剤70%/④中塗30%(擬集破壊)			NG	測定不能※終了	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
			9.23	接着剤60%/④中塗40%(擬集破壊)			NG	測定不能※終了	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
⑱-12	3種ケレン	①素地調整(3種ケレンB) ②第一層下塗塗装(有機ジンクリットペイント 1回) ③第三層下塗塗装(弱溶剤形変性エポキシ樹脂 1回) ④第四層中塗塗装(弱溶剤形フッ素樹脂 1回)	6.81	接着剤70%/④中塗30%(擬集破壊)			NG	測定不能※終了	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
			4.32	接着剤40%/④中塗60%(擬集破壊)			NG	測定不能※終了	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

試験結果取りまとめ(7)

耐候性鋼材試験片		初期値				330時間				1170時間				2000時間				
試験番号	素地調整	塗装仕様	付着力 (MPa)	はく離箇所	はく離状況写真		付着力 (MPa)	はく離箇所	はく離状況写真		付着力 (MPa)	はく離箇所	はく離状況写真		付着力 (MPa)	はく離箇所	はく離状況写真	
					試験体側	試験治具側			試験体側	試験治具側			試験体側	試験治具側			試験体側	試験治具側
⑨-13	1種ケレン	①素地調整(1種ケレン サンドブラスト施工) ②第一層下塗塗装(有機ジクロリットペイント 1回) ③第二層下塗塗装(有機ジクロリットペイント 1回) ④第三層下塗塗装(弱溶剤形変性エポキシ樹脂 1回) ⑤第四層中塗塗装(弱溶剤形シリコン変性エポキシ樹脂系 1回)	10.03	接着剤50%/⑤中塗50%(擬集破壊)			7.88	接着剤60%/④下塗40%(擬集破壊)			9.87	⑤中塗60%/④下塗40%(擬集破壊)			8.00	⑤中塗60%/④下塗40%(擬集破壊)		
			10.52	接着剤40%/⑤中塗60%(擬集破壊)			7.24	接着剤30%/⑤中塗70%(擬集破壊)			6.90	⑤中塗5%/④下塗95%(擬集破壊)			6.08	⑤中塗90%/④下塗10%(擬集破壊)		
⑮-13	1種ケレン	①素地調整(1種ケレン サンドブラスト施工) ②第一層下塗塗装(有機ジクロリットペイント 1回) ③第二層下塗塗装(有機ジクロリットペイント 1回) ④第三層下塗塗装(弱溶剤形変性エポキシ樹脂 1回) ⑤第四層中塗塗装(弱溶剤形シリコン変性エポキシ樹脂系 1回)	10.30	接着剤50%/⑤中塗40%/④下塗10%(擬集破壊)			9.75	接着剤20%/⑤中塗60%/素地20%(擬集破壊)			10.92	⑤中塗45%/④下塗5%/②下塗50%(擬集破壊)			10.56	②下塗98%/素地2%(擬集破壊)		
			9.98	接着剤50%/⑤中塗40%/④下塗10%(擬集破壊)			10.24	接着剤80%/⑤中塗20%(擬集破壊)			10.70	⑤中塗50%/④下塗5%/②下塗45%(擬集破壊)			11.68	⑤中塗10%/④下塗40%/②下塗50%(擬集破壊)		
⑯-13	1種ケレン	①素地調整(1種ケレン サンドブラスト施工) ②第一層下塗塗装(有機ジクロリットペイント 1回) ③第二層下塗塗装(有機ジクロリットペイント 1回) ④第三層下塗塗装(弱溶剤形変性エポキシ樹脂 1回) ⑤第四層中塗塗装(弱溶剤形シリコン変性エポキシ樹脂系 1回)	11.52	接着剤40%/⑤中塗30%/④下塗30%(擬集破壊)			11.25	接着剤65%/⑤中塗30%/④下塗5%(擬集破壊)			11.92	⑤中塗15%/②下塗75%/素地10%(擬集破壊)			9.99	接着剤100%(付着破壊)		
			10.36	接着剤50%/⑤中塗20%/④下塗30%(擬集破壊)			12.10	接着剤70%/⑤中塗15%/④下塗15%(擬集破壊)			9.83	⑤中塗10%/②下塗60%/素地30%(擬集破壊)			9.87	接着剤98%/④下塗2%(擬集破壊)		
⑩-14	3種ケレン	①素地調整(3種ケレンB) ②第一層下塗塗装(有機ジクロリットペイント 1回) ③第三層下塗塗装(弱溶剤形変性エポキシ樹脂 1回) ④第四層中塗塗装(弱溶剤形シリコン変性エポキシ樹脂系 1回)	10.39	接着剤60%/④中塗40%(擬集破壊)			NG	測定不能※終了	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
			9.49	接着剤90%/④中塗10%(擬集破壊)			2.44	素地100%(付着破壊)※終了			—	—	—	—	—	—	—	—
⑰-14	3種ケレン	①素地調整(3種ケレンB) ②第一層下塗塗装(有機ジクロリットペイント 1回) ③第三層下塗塗装(弱溶剤形変性エポキシ樹脂 1回) ④第四層中塗塗装(弱溶剤形シリコン変性エポキシ樹脂系 1回)	10.05	接着剤50%/④中塗30%/③下塗20%(擬集破壊)			2.81	素地100%(付着破壊)			2.51	素地100%(付着破壊)			—	—	—	—
			8.53	接着剤75%/④中塗15%/③下塗10%(擬集破壊)			2.64	②下塗5%/素地95%(擬集破壊)			NG	測定不能※終了	—	—	—	—	—	—
⑱-14	3種ケレン	①素地調整(3種ケレンB) ②第一層下塗塗装(有機ジクロリットペイント 1回) ③第三層下塗塗装(弱溶剤形変性エポキシ樹脂 1回) ④第四層中塗塗装(弱溶剤形シリコン変性エポキシ樹脂系 1回)	7.03	接着剤70%/④中塗30%(擬集破壊)			NG	測定不能※終了	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
			7.95	接着剤80%/④中塗20%(擬集破壊)			1.84	接着剤5%/素地95%(擬集破壊)			—	—	—	—	—	—	—	—

試験結果取りまとめ(8)

耐候性鋼材試験片		初期値				330時間				1170時間				2000時間				
試験番号	素地調整	塗装仕様	付着力 (MPa)	はく離箇所	はく離状況写真		付着力 (MPa)	はく離箇所	はく離状況写真		付着力 (MPa)	はく離箇所	はく離状況写真		付着力 (MPa)	はく離箇所	はく離状況写真	
					試験体側	試験器具側			試験体側	試験器具側			試験体側	試験器具側			試験体側	試験器具側
⑪-15	1種ケレン	①素地調整(1種ケレン サンドブラスト施工) ②エポキシ樹脂ジンクリットペイント ③応力緩和と高密着エポキシ樹脂塗料 ④超厚膜形エポキシ樹脂塗料	12.63	④上塗10%/③下塗90%(擬集破壊)			11.39	④上塗5%/③下塗40%/素地55%(擬集破壊)			9.33	④上塗5%/素地95%(擬集破壊)			9.30	④上塗100%(付着破壊)		
			13.01	④上塗10%/③下塗90%(擬集破壊)			6.77	接着剤60%/③下塗15%/素地25%(擬集破壊)			8.67	④上塗10%/③下塗5%/素地85%(擬集破壊)			8.92	④上塗100%(付着破壊)		
⑮-15	1種ケレン	①素地調整(1種ケレン サンドブラスト施工) ②エポキシ樹脂ジンクリットペイント ③応力緩和と高密着エポキシ樹脂塗料 ④超厚膜形エポキシガラスフレーク樹脂塗料	12.99	④上塗15%/③下塗85%(擬集破壊)			6.99	②下塗5%/素地95%(擬集破壊)			6.30	接着剤10%/④上塗30%/素地60%(擬集破壊)			11.20	③下塗5%/②下塗95%(擬集破壊)		
			8.83	接着剤15%/④上塗5%/③下塗80%(擬集破壊)			7.17	②下塗2%/素地98%(擬集破壊)			8.20	④上塗10%/素地90%(擬集破壊)			10.10	③下塗2%/②下塗98%(擬集破壊)		
⑯-15	1種ケレン	①素地調整(1種ケレン サンドブラスト施工) ②エポキシ樹脂ジンクリットペイント ③応力緩和と高密着エポキシ樹脂塗料 ④超厚膜形エポキシ樹脂塗料	7.09	接着剤40%/④上塗20%/③下塗40%(擬集破壊)			9.30	素地100%(付着破壊)			11.41	④上塗5%/③下塗25%/素地70%(擬集破壊)			11.01	④上塗2%/③下塗48%/素地50%(擬集破壊)		
			12.87	③下塗100%(付着破壊)			6.63	④上塗3%/素地97%(擬集破壊)			11.28	④上塗15%/③下塗65%/素地20%(擬集破壊)			11.15	③下塗40%/素地60%(擬集破壊)		
⑬-16	3種ケレン	①素地調整(3種ケレンB) ②応力緩和と高密着エポキシ樹脂塗料 ③超厚膜形エポキシ樹脂塗料	12.54	③上塗5%/②下塗95%(擬集破壊)			11.41	②下塗100%(付着破壊)			7.00	②下塗85%/素地15%(擬集破壊)			6.08	②下塗75%/素地25%(擬集破壊)		
			10.16	接着剤15%/③上塗10%/②下塗75%(擬集破壊)			11.76	接着剤1%/②下塗99%(擬集破壊)			8.95	②下塗90%/素地10%(擬集破壊)			7.59	②下塗90%/素地10%(擬集破壊)		
⑰-16	3種ケレン	①素地調整(3種ケレンB) ②応力緩和と高密着エポキシ樹脂塗料 ③超厚膜形エポキシ樹脂塗料	10.38	②下塗90%/素地10%(擬集破壊)			4.04	③上塗5%/素地95%(擬集破壊)			2.27	②下塗30%/素地70%(擬集破壊)			2.98	②下塗50%/素地50%(擬集破壊)		
			10.36	②下塗85%/素地15%(擬集破壊)			3.75	③上塗5%/素地95%(擬集破壊)			3.48	②下塗50%/素地50%(擬集破壊)			3.10	②下塗50%/素地50%(擬集破壊)		
⑱-16	3種ケレン	①素地調整(3種ケレンB) ②応力緩和と高密着エポキシ樹脂塗料 ③超厚膜形エポキシ樹脂塗料	8.03	接着剤20%/③上塗75%/②下塗5%(擬集破壊)			3.38	③上塗20%/素地80%(擬集破壊)			1.97	③上塗30%/素地70%(擬集破壊)			NG	測定不能※終了	—	—
			6.97	接着剤30%/③上塗60%/②下塗10%(擬集破壊)			4.55	③上塗20%/素地80%(擬集破壊)			2.77	③上塗30%/素地70%(擬集破壊)			NG	測定不能※終了	—	—

## 耐候性鋼橋梁維持管理要領

平成 26 年 12 月



## はじめに

本研究で参考とした既存の『耐候性鋼橋梁維持管理マニュアル』平成 21 年 8 月 西日本高速道路株式会社四国支社作成<sup>4)</sup> をベースとして、他機関でも点検や補修対策を立案する上で参考とできる維持管理要領を「耐候性鋼橋梁維持管理要領」としてまとめた。

まとめる上で、本研究から得られた知見を追加記載しているが、研究途中のものもあり、今後研究成果が整った段階でさらなる追加・改訂を行なう予定である。

主な見直し・改訂箇所を以下に示し、全文をあわせて添付する。

- ① 3.維持管理の (P-3-) 維持管理フローにおいて、継続的な調査として日常点検で漏水箇所の確認を行なうものとし、漏水が確認された場合には、臨時点検を行なうこととした。耐候性鋼材にとって、漏水は急激な損傷を招く要因であり、1 回/5 年の定期点検の間で損傷評点が著しく低下する可能性があるためである。
- ② 3.維持管理の (P-5-) において、凍結防止剤を散布する地域では、適切な時期に水洗いを行なうことが効果的であることを追加し、地山との近接箇所では立ち木の処理をすることで風通しをよくし、桁の乾燥を促すことを追加した。橋梁の延命化を図るためにも常からの維持管理が重要であることを示している。
- ③ 4-3 定期調査の (P-6-) において、外観調査では、目視判断のみでは技術者による評価差が生じ、たとえば補修塗装範囲を過大に評価することで不経済になることもあることから定量的・客観的なさび評価手法である画像解析を取り入れた調査を実施できるものとした。
- ④ 4-4 詳細調査の (P-8-) においては、今後の進行予測で腐食損傷による耐荷力劣化の評価・将来予測手法として、有限要素解析を用いた現状評価と残存保有性能の評価・予測によりの確な橋梁の緊急補修や対策の必要性を判断する手法が有効であることを追加記載した。
- ⑤ 5-3 補修塗装等 (P-24-) においては、現在使用されている重防食塗装仕様の耐久性が素地調整程度によって保てない場合があることから、新たに開発されている環境遮断性を向上させた塗料の使用や素地調整が確実にできる場合は金属溶射を考慮することなど柔軟に対応できるように変更した。

なお、改訂箇所は、本文中にアンダーラインで表示している。



## 目次

1. 適用範囲	1
2. 用語の定義	1
3. 維持管理	3
4. 調査	6
4-1 基本的な考え方	6
4-2 調査の種別	6
4-3 定期調査	6
4-4 詳細調査	7
4-5 調査頻度	8
4-6 外観調査	8
(1) 外観調査 (外観評点調査)	8
(2) 外観調査 (異常腐食調査)	11
(3) さび性状調査	12
(4) 既往対策工の有効調査	13
(5) 板厚調査	14
4-7 点検結果の評価	15
4-8 点検結果の記録	16
5. 補修	17
5-1 基本的な考え方	17
5-2 漏水補修対策	18
(1) 一般	18
(2) 床版上面側からの漏水対策	19
(3) 伸縮装置部からの漏水対策	21
(4) 排水装置からの漏水対策	22
(5) その他の漏水対策	22
5-3 補修塗装等	23
5-4 その他の補修	25
5-5 補強	25
5-6 施工一般	25
5-7 効果検証調査の実施	25
5-8 補修等記録の保存	25



## 1. 適用範囲

本要領は、耐候性鋼橋梁の維持管理に適用する。

本要領は、耐候性鋼橋梁の点検、補修等維持管理について定めたもので、耐候性鋼橋梁のうち、耐候性鋼材の維持管理を適切に実施するために留意すべき事項を取りまとめたものである。

## 2. 用語の定義

本要領では、次のように用語の定義を行う。

### ① 耐候性鋼材

JIS G 3114「溶接構造用耐候性熱間圧延鋼材」に示す鋼材をいう。

### ② 保護性さび

適切な環境のもとで、耐候性鋼材表面に形成される緻密なさび層をいう。特別な維持管理を要さない程度に腐食速度が十分低下していると判断できる状態をさび安定化という。

### ③ うろこさび

鋼材の表面に生成される魚の鱗状のさびをいう。保護性さびのような緻密さは無いが、層状剥離さびほど大きな腐食速度の進行は無い状態である。ただ、状況によって層状剥離さびに移行する可能性もある。

### ④ 層状剥離さび

鋼材の表面から複数の層を成してはがれるさびをいう。腐食速度の低減が見られず、さびの成長速度が速い状態を意味する。

耐候性鋼材は、JIS G 3114「溶接構造用耐候性熱間圧延鋼材」によると、図-1のように分類される。



図-1 耐候性鋼材の区分

無塗装仕様（W材）の安定化処理仕様とは、保護性さびの形成を補助し、流れさび（初期にコンクリートに流れ出し、景観的に好ましくないさび）等を防止するため、鋼材表面に表面処理皮膜を行ったものである。

さびの一例を下図の図-2、3、4に示す。



図-2 保護性さび（例）

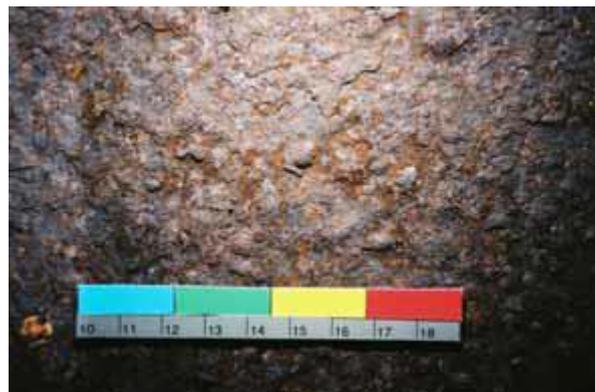


図-3 うろこさび（例）



図-4 層状剥離さび（例）

耐候性鋼材は、普通鋼材に適量の Cu（銅）、Ni（ニッケル）、Cr（クロム）などの合金元素を添加することにより、鋼材表面に緻密なさび層（保護性さび）を形成させ、これが鋼材表面を被覆することで水、酸素などの劣化因子等の浸入、さびの進展が抑制され、腐食速度が普通鋼材に比べ低下するとされている。

耐候性鋼橋梁を良好に保つためには、適切なさびの状態が維持されるよう管理することが重要である。

ただし、腐食環境が適当であれば保護性さびが形成されるがその状態は安定的なものではなく、環境条件が変化するとさびも変化し、環境遮断性も失われてしまう。その面で、適切な維持管理は重要である。

### 3. 維持管理

耐候性鋼橋梁の維持管理は、これまでの調査結果等をもとに、基本的には下記のとおりとする。

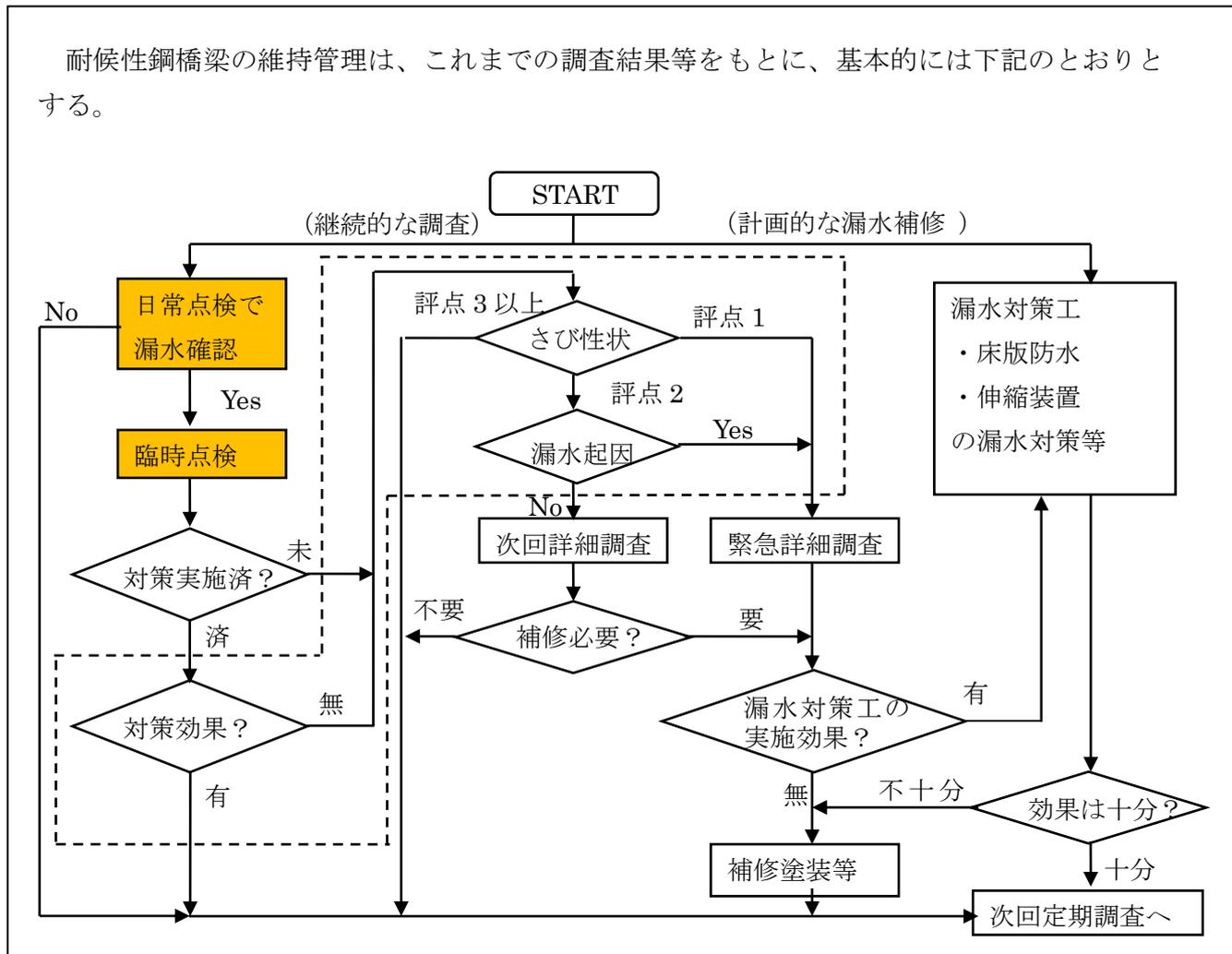


図-5 維持管理フロー

耐候性鋼材のさびの状態は、一般に、外観評点で評点1～5に区分して評価されている。

#### さびの程度



図-6 さび外観評点

さびの進行度は、腐食要因によって異なる。腐食要因としては、比較的ゆっくり進行する架設環境と急激に進行する場合が多い湧水の二つがある。

架設環境の影響が特に顕著なものとしては、図-7 に示すとおり、桁が地山に近接している場合と上下線の橋梁がわずかの高低差で並列している場合がある。

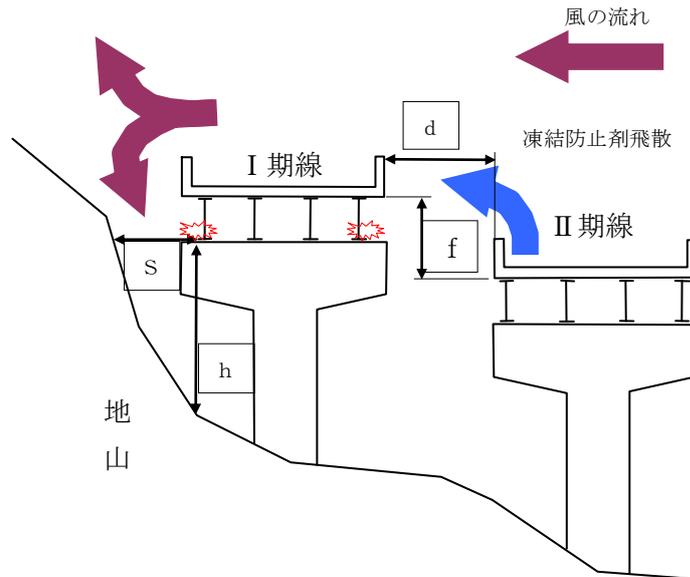


図-7 架設環境の影響を受ける場合の模式図

また、漏水による影響を受けている場合として、床版の打継ぎ目などのひびわれ部からの漏水、伸縮装置の非排水樋、排水装置の劣化、破損等による漏水がある。漏水による腐食は、架設環境要因による場合に比べて進行が早い。

そこで、維持管理の一つの柱として、床版防水工、伸縮装置の漏水対策等を計画的に実施していくこととした。

また、もう一つの柱として定期的な調査を実施してことに加えて、日常点検で漏水箇所の確認を行うことであり、漏水箇所が確認された場合は、臨時点検として詳細な調査を検討する。詳細調査は、設計供用期間中の板厚減少の進行があるかどうかを確認することを主な目的とする。板厚減少の進行要因には斜面近接など架設環境により比較的広い範囲に及ぶものと漏水等局所的に進行するものがある。また、補修対策を実施済みである場合と未対策の場合の2パターンがあるので、調査においてはそれぞれの観点で実施していく必要がある。

調査の一つの観点は、既の実施されている漏水等対策工について、その有効性評価を行うことにより確認することである。この場合、腐食原因である漏水に対して実施された対策工の漏水防止等効果が確認されれば、板厚の減少（腐食進行）が抑制または停止した状態であると判断できる。

もう一つの観点は、対策が未実施等の場合で耐候性鋼材の腐食の進行状況を調査するものであり、全体を把握する定期的なさび性状に関する調査と、問題ある箇所を対象に行う詳細調査に分けて実施する。定期調査におけるさび性状の調査は、外観評点1、2、3以上の3段階で調査結果の評価を行い、腐食要因を勘案して、基本的には次のように対応する。

- ① 評点3以上の場合、そのままの状態では、板厚減少量がほとんど無いのでOKとする。
- ② 評点2の場合、環境因子であれば、急速な腐食の進行は無いものの、状況によっては板厚減少量が大きくなる可能性があるため、次回調査時に詳細調査を行う。詳細調査では、まず、さび状況の評価、板厚減少量の予測等を行い、補修の可否を判断する。補修が必

要な場合は、漏水対策工の実施効果があるかどうかを検討し、効果等があると見込まれる時は漏水対策工を実施する。漏水対策では効果が期待できない場合は、補修塗装等を実施する。なお、漏水が起因の場合は、次定期点検までの間に評点1への移行が十分に想定されるので、下記の評点1に準じて対応する。

- ③ 評点1の場合は、腐食の進行が早いので、速やかに詳細調査により損傷原因の推定、さび状況の評価、板厚減少量の確認・予測等を行い、補修方法を検討、実施する。補修については、まず、漏水対策工の実施効果があるかどうかを検討する（漏水対策だけでさび性状の改善ができる場合もある）。

また、漏水対策では効果が期待できない場合は、補修塗装等を実施する。

なお、補修塗装を行う場合でも、漏水対策に多少とも効果があると見込まれる時は必ず漏水対策工を先行実施したうえで補修塗装等を行うものとする（補修塗装の耐久性の面でも漏水対策は重要）。

腐食による板厚減少が著しく、耐荷性能を脅かす恐れが想定されるような場合には、補強等必要な対策を検討、実施するものとする。

なお、凍結防止剤を散布する地域では桁洗浄も有効な手段と考えられるため、適切な時期に実施することが求められるが、周辺状況を十分に確認した上で数回の繰返し水洗いを行うことが良い。また、既存の調査結果からも風通しをよくし、桁の乾燥を促すことが重要であることが分かっており、地山との近接箇所等では立ち木を処理するなど風通しを良くする対策を実施するものとする。

## 4. 調査

### 4-1 基本的な考え方

耐候性鋼橋梁の調査は、補修対策と組み合わせて実施することにより、耐候性鋼橋梁の健全性が維持されるよう実施する。

これまでの調査結果から、調査において確認すべき事項としては次のものがあげられる。

- ① 架設環境による腐食の進行状況の把握（特に変化の有無）
- ② 漏水等に起因した周辺と異なる腐食進行の激しい箇所の発生、進行状況等の把握
- ③ 上記①、②についての原因の把握、今後の進展を予測するために必要な現地状況等の把握
- ④ 既に実施されている補修対策工の有効性の把握

### 4-2 調査の種別

調査は、日常点検で漏水が確認された場合に臨時点検として状況把握を行なうものとし、さび性状によって、定期調査と詳細調査に区分して実施する。

定期調査は、架設環境の変化等によるさび性状に変化（悪化）がないか、漏水による腐食の有無など、経年的に安定したさび状態でないものがないかを把握するために実施する。

詳細調査は、定期調査でさび性状が不良もしくは不良の恐れがある場合に、その評価を行い、補修要否の判断、補修が必要な場合における対策工を検討するために実施する。

調査は 2 段階に分けて行う。詳細調査は、定期調査の結果、必要がある場合に実施するもので、定期調査でさび性状に問題が無いことが確認できれば不要である。

### 4-3 定期調査

定期調査は、次に示す調査を基本とする。

#### ①外観調査

1)外観評点調査 耐候性鋼橋梁の架設環境によるさび外観評点を目視および写真で調査する。

2)異常腐食調査 漏水等によりさび性状が不良となっている箇所、その状況等を調査する。

②さび性状調査 耐候性鋼材の浮きさびの厚さ、径を調査する。

③既対策の有効性調査 既に実施されている漏水等補修対策の有効性を調査する。

外観調査では、架設環境の変化などによるさび性状に変化（悪化）がないかという観点と、通常の点検と同じように、漏水等による腐食がないかという観点の 2 通りの調査が必要である。

特に漏水は激しい腐食を引き起こす。漏水による腐食では、さび外観が周囲と著しく異なることが多い。定期調査では、このような腐食に進展する可能性の有無を確認することも重要である。

さび性状調査は、外観調査の外観評点調査における外観評点の判断の参考とするために行うものである。目視判断のみでは技術者による評価差も生じるため、写真を用いた画像解析手法を取り入れることも考慮するものとする。

また、補修対策については、一部試行錯誤の段階に有るものもあり、また、それ自体も経年劣

化するものであることから、その有効性も併せて把握することが必要である。

#### 4-4 詳細調査

詳細調査は、次に示す調査を基本とする。

##### ①板厚調査

耐候性鋼材の板厚を調査する。板厚調査には次の2つの目的があり、状況に応じて実施する。

- 1)基準となる板厚と対比することにより、板厚減少（腐食進行）の進行を把握する。
- 2)漏水等により板厚減少を生じている箇所について、設計板厚との対比、橋梁の健全度評価のために残存板厚を把握する。

##### ②外観調査

耐候性鋼材のさび外観を目視および写真により調査する。

##### ③さび性状調査

耐候性鋼材の浮きさびの厚さ、径、さび層厚など、さび性状に応じてその評価に必要な事項を調査する。

また、必要に応じて、損傷原因の推定、今後の進行予測、補修実施等のための調査を実施する。

詳細調査は、定期調査で評点1または2と判定された場合に実施する。詳細調査では、まず、鋼材の腐食の現況あるいは今後の進展があるかどうかを判断することが必要である。

評点1は、層状剥離さびが見られる状態で、腐食の進行が激しい。速やかにその原因を究明して、ただちに対策を講じることが必要であり、補修の実施に必要な調査を併せて行っておく必要がある。

評点2は、うろこさびが顕著な状態で、架設環境要因（桁が地山に近接、上下線が近接など漏水以外の要因）による腐食の進行は比較的緩やかであり、ただちに詳細調査を実施する必要は無いが、想定を超える腐食に進展する恐れがある状態であるので、補修の要否が判断できるよう計画することが必要である。

このように、詳細調査はさびの状態が評点1か評点2かで調査の内容が異なってくるがあるので状況に応じた調査内容の設定が必要である。

表-1 外観評点と想定される詳細調査項目

区分	主な調査項目	備考
評点1	<ul style="list-style-type: none"> <li>・板厚調査（残存板厚）</li> <li>・原因推定、補修実施のための調査</li> </ul>	
評点2（漏水要因）	<ul style="list-style-type: none"> <li>・板厚調査（残存板厚）</li> <li>・原因推定、補修実施のための調査</li> </ul>	
評点2（環境要因）	<ul style="list-style-type: none"> <li>・外観調査</li> <li>・さび性状調査</li> <li>・板厚調査（板厚減少）</li> <li>・（今後の腐食進行予測のための調査）</li> <li>・（原因推定、補修実施のための調査）</li> </ul>	

また、特に評点 2 については、評点 3 に近いほとんど問題が無い状態から評点 1 に近く早期に補修が必要な状態まで維持管理対応の幅が広い状態であり、さび性状等を適切に判断することが必要である。

今後の腐食損傷による耐荷力劣化の評価・将来予測は、車両載荷試験などによる結果をもとにした有限要素解析を行い、鋼材の腐食減耗量から現状評価と残存保有性能を評価・予測することができ、的確に橋梁の緊急補修や対策の必要性を判断する目安とすることができるため有効な手段である。

#### 4-5 調査頻度

定期調査は詳細点検の一部として同時に行うこととし、その頻度は 5 年に 1 度を原則とする。詳細調査は、定期調査により調査が必要と判断された場合に行うものとし、評点 1 と判定される場合は速やかに、評点 2 と評価される場合は次回定期調査時に実施するものとする。なお、調査については、経年的な変化を見ていくため、ある程度実施時期を限定して行うものとする。

調査頻度については、これまでの調査結果から、漏水の無い一般的な環境条件（斜面近接等地形などの要因のみの場合）では、さび性状の急激な変化は無く、数年程度の間隔で十分と考えられる。一方、漏水が発生している箇所の腐食進行については、進行が急激な一方、場所が限定的であることから別途追跡調査等も考えられるが、このような著しい腐食は、今後も発生し、経年的に増加することが十分想定されるものであり、比較的早期に補修を行うことは避けられないものであることから、補修による対処を基本とすることが適当と考えられる。

#### 4-6 外観調査

##### (1) 外観調査（外観評点調査）

外観調査（外観評点調査）の方法を次に示す。

さび外観の評価は、鋼構造物協会技術レポート 73 に従い、次の 3 段階区分を行う。評点 2 と 3 の区分は、さび性状調査の結果を参考に行うものとする。

- ・ 評点 1
- ・ 評点 2
- ・ 評点 3 以上

外観調査箇所は、さび性状が分かる接写写真及び架設環境が分かる状況写真を撮影するものとする。接写写真は、さび粒子の大きさ、凹凸状況、色調などが判別できるよう撮影するものとし、撮影に際しては、色見本及びスケールを合わせて写し込むものとする。

耐候性鋼表面に形成されるさびの性状は、その腐食環境によって異なっており、さび粒子の大きさや色調から腐食速度の定性的な評価を行うことができる。

鋼構造物協会技術レポート 73（「耐候性橋梁の可能性と新しい技術」（社）日本鋼構造協会鋼橋の性能向上研究小委員会耐候性鋼橋梁部会）のさび外観の評価は、表-2 の 5 段階評価である。

表-2 鋼構造物協会技術レポート 73 のさび外観の評価

外観 評点	さびの状態 (表層さびの粒子の大きさと外観)	さび層の厚さ
評点 5	1) 色調は全体に明るく黄褐色でまだら状である 2) ほとんど凹凸はなく、さび粒子は細かい 3) さびの量は少なく、最大粒径は 1mm 程度以下	200 $\mu$ m 程度未満
評点 4	1) 色調は暗褐色で色むらは無い 2) ほとんど凹凸はなく、さび粒子は細かく均一 3) さびの量はやや多く、最大粒径は 1mm 程度以下	400 $\mu$ m 程度未満
評点 3	1) 色調は暗褐色から褐色で色むらはなし 2) やや凹凸があり、さび粒子は粗く不均一 3) さびの量は多く、最大粒径は 1~5mm 程度	400 $\mu$ m 程度未満
評点 2	1) 色調は暗褐色から褐色でやや色むらがある 2) 大きい凹凸があり、さび粒子は粗くうろこ状 3) さびの量は多く、最大粒径は 5~25mm 程度	800 $\mu$ m 程度未満
評点 1	1) 局所的に様々な色調 (激しい色むら) がある 2) 大きな凹凸があり、層状剥離 (痕跡) がある	800 $\mu$ m 程度を超える

注) さびの粒径は、単独さびの直径、さびが連続した長円形の場合は短径を最大径とする。

また、外観評価の写真見本は図-8 のとおりである。

なお、鋼構造物協会技術レポート 73 では、さび外観からの腐食速度推定は、10 年程度以上経過したさびに対してのみ適用できるとしている。これは、架設環境による腐食の場合、10 年程度経過しないとさびの状態が安定せず、供用開始後早期にうろこさびが発生する時には、将来層状剥離さびに進展するケースがあることが報告されていることによる。

評点 5



さびの量は少なく、比較的明るい色調を呈する。

評点 3



さびの大きさは1~5mm程度で粗い。

評点 1



さびは層状の剥離がある。

評点 4



さびの大きさは1mm程度以下で細かく均一である。

評点 2



さびの大きさは5~25mm程度のうろこ状である。

写真の縮尺 50mm



※ 写真は建設省土木研究所／耐候性鋼材の橋梁への適用に関する共同研究報告書（X V II）より引用

図-8 さび外観評価見本写真

## (2) 外観調査（異常腐食調査）

外観調査（異常腐食調査）の方法を次に示す。

異常腐食調査は、漏水等により周辺と異なる腐食進行の大きい箇所について、一般の構造物点検に準じて、腐食状況、腐食原因等を調査する。

異常腐食のさび外観評点の評価は、外観評点調査に準じて、3段階区分で行う。

異常腐食調査は、一般の構造物における損傷調査と同様の位置付けのものである。

これまでの調査で確認された異常腐食（周辺と異なる進行の大きい腐食）の漏水原因として、次のものがあげられる。

- ① 床版上面側からの漏水
  - ・ 床版ひびわれ、打継ぎ目からの漏水
  - ・ 床版コンクリートを浸透した漏水
  - ・ 床版コンクリートと排水管の間からの漏水
- ② 伸縮装置からの漏水
  - ・ 非排水構造になっていない地覆・高欄側からの漏水
  - ・ フィンガージョイント下面の伝い水
  - ・ 非排水構造の劣化による漏水（シール材の劣化、排水桶の詰まり）
- ③ 排水装置からの漏水等
  - ・ 下部工排水マスでの飛散
  - ・ 排水管接続部の漏水

また、これまでの調査で、異常腐食として着目してきた損傷形態には次のようなものがある。

層状剥離さび：評点 1 相当

うろこさび：程度によって、評点 2 または 3 に相当

変色：外観評点としては評点 5 相当

異常腐食は漏水等により生じるもので、点検時には耐候性鋼材の変色など軽微なものであっても、急激に腐食が進行することがあるので、このような徴候を示している箇所を適切に把握する必要がある。

調査は、近接目視を基本とする。近接が困難な場合は、双眼鏡を用いるなど、さびの外観性状が判断できるような方法を用いる。

また、漏水等については、コンクリート床版の点検の際に遊離石灰の発生などとしても損傷記録がまとめられているが、耐候性鋼材の異常腐食損傷についてもこれらとの関連が分かるような記録方法が望まれる。

### (3) さび性状調査

定期調査におけるさび性状調査は、浮きさびの径、厚さの調査を行う。

浮きさび径、厚さ調査の方法を次に示す。

セロファンテープ試験の要領で、鋼材表面に透明粘着テープを貼り付けて剥がすことで、表面の浮きさびを採取し、さび粒子の径、厚さをノギスで測定する。

なお、セロファンテープで採取した浮きさびは写真に記録するものとする。撮影に際しては、スケールを合わせて写し込むものとする。

鋼構造物協会技術レポート73に示されているセロファンテープ試験は次のとおりである。

鋼材表面に生成された浮きさびをセロファンテープに付着させて回収し、さびの状態を評価する試験。

試験方法は次のとおり。

- ① 外観観察（接写写真撮影）箇所と同一箇所を対象として測定を行う。
- ② 測定箇所の鋼板表面のほこり等を軽く清掃する。  
水平上面等で堆積した土埃等のみが採取された場合は測定をやり直す。
- ③ 幅 50mm の市販の透明粘着テープ（必要に応じて幅 24mm のものを使用しても良い）を測定箇所の鋼板表面に軽く貼り付ける。  
テープの長さは必要に応じて設定する。
- ④ ゴムローラ等（指でもよい）を用いて均等に圧着させた後、透明粘着テープを剥がす。
- ⑤ 剥がした透明粘着テープは透明プラスチックシートなどに貼り付け保存する。さらにこれを複写して保存データとするとよい。



図-9 セロファンテープで採取された浮きさび（例）

浮きさびの径、厚さは、セロファンテープ試験の要領で採取された浮きさびのさび粒子の径および厚さをノギスで測定する。セロファンテープに付着したさび粒子は様々な大きさのものがあるがいくつかのサイズ群に区分できるので、そのうち最も大きなサイズ群のなかで平均的な大きさを「さび径」とする。

また、評点2以上を区分するだけであれば、複数個を測定し平均化をすることまでは必要ない。また、慣れれば、測定まで行わず、目視の判断でも良い。

浮きさびの径が 5mm 以下であれば良好とする。これは、外観評点 3,4,5 に相当するが、あえて区分する必要はない。評点 2 以下か評点 3 以上かを判断すれば良い。

浮きさびの径が 5mm 以上と判断した場合、浮きさびの厚さを測定する。

浮きさびの厚さが 1mm を超えている場合には詳細調査を行うなど、次のステップの調査を計

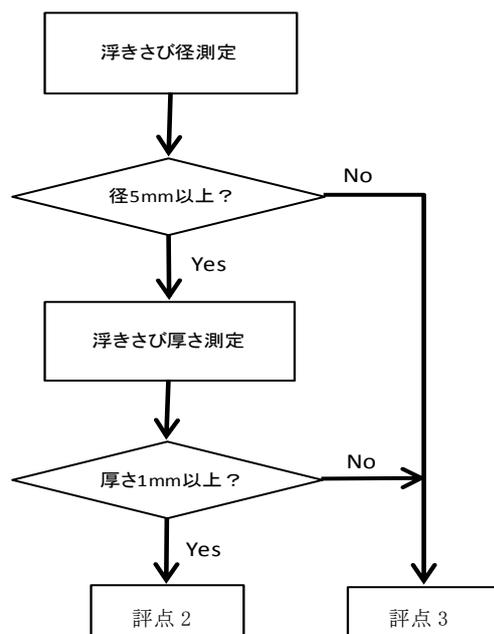


図-10 浮きさび調査と判定フロー

画する。

ただし、評点 1（層状剥離さび）でなければ、急激な変化はないことから、緊急な調査までは必要ない。1mm 以内の場合は、記録に残すに留め、次回の点検時に詳細調査を行い、変化の有無に注意して再評価を行う。

なお、浮きさびは脱落と成長を繰り返すので、調査を行う場合には、浮きさびが脱落した後の状態でないかどうかを確認（浮きさび脱落後の鋼材表面は凹凸が大きい。）したうえで、上記調査を行う必要がある。また、調査に際しては、評点 1 の見本写真と対比確認を行えば、評価のリスクを低減することができる。

#### （4）既往対策工の有効調査

既往対策工の有効性調査の方法を次に示す。

対策工の施工目的に応じて、その有効性が発揮されているかどうかを調査する。

既往対策工としては、次のようなものがある。それぞれの目的に合わせ調査する必要がある。なお、補修計画に適切に反映させるため、現状における効果とともに、今後の効果の持続性等についても併せて調査を行うものとする。

表－3 既往対策事例と確認項目

対策区分	対策工	対策目的	主な確認項目	備考
伸縮装置漏水対策	導水樋	伸縮装置からの漏水の伝播の防止	<ul style="list-style-type: none"> <li>・漏水（痕跡）の有無</li> <li>・漏水経路の変化（新たな水道の有無等）</li> <li>・漏水による腐食進行の有無（外桁外側については、さび性状改善の有無）</li> </ul>	
床版ひびわれ漏水対策	導水樋	床版からの漏水の拡散防止	<ul style="list-style-type: none"> <li>・漏水（痕跡）の有無</li> <li>・漏水経路の変化（新たな水道の有無等）</li> <li>・漏水による腐食進行の有無（外桁外側については、さび性状改善の有無）</li> </ul>	水抜きパイプ先端からの飛散影響の有無の確認を含む
床版漏水対策	水抜きパイプ延長	床版からの漏水の拡散防止	<ul style="list-style-type: none"> <li>・漏水飛散による腐食進行の有無</li> </ul>	
中分漏水対策	中分閉塞	上下線並列橋の中分開口部からの雨水流入の防止	<ul style="list-style-type: none"> <li>・漏水による腐食進行の有無</li> </ul>	

## (5) 板厚調査

板厚調査は、その目的に応じて、次のように実施する。

### ① 板厚減少量を調査する場合

腐食の進行が早い下フランジ上面を対象として調査を行う。

桁端部付近の下フランジを対象として、「上下両面を塗装している部分」「下面のみ塗装されている部分」の2箇所では板厚を測定する。その差（既に基準とする板厚が測定されている場合は、これと「下面のみ塗装されている部分」の差）を板厚減少量とする。

### ② 残存板厚を調査する場合

調査したい場所の板厚を測定する。

板厚調査の方法を次に示す。

① 塗装されている部分については、事前処理として、研磨器具で測定箇所（下フランジ上下面または下面）約10cm×10cmの塗膜を除去する。

② 無塗装部分については、測定範囲の素地地鉄が露出する程度までさび層を除去する。その際、電動工具でさび層を研削する場合は地鉄を削り過ぎないように注意する。

③ 板厚の測定は、超音波板厚計（最小目盛り0.01mm）を用いて、研磨面内で25ポイント測定し、平均値を求める。

④ 板厚の測定後、塗装されていた部分は将来のモニターポイントとして利用できるよう、測定後、研磨面をエポキシ樹脂などで被覆する。また、無塗装部については、調査区画のマーキングを行っておくものとする。

なお、調査ポイントについては、事前処理及び測定の前に区画設定を行って、接写写真撮影を行っておくものとする。

さびは、鋼材表面に水と酸素が供給されることにより生じる。従って、同一の架設環境でも、この水と接する時間（濡れ時間）と錆の加速要因である塩化物イオン（凍結防止剤）の飛散程度は部位によって異なり、錆の進行も異なっている。

#### 4-7 点検結果の評価

点検結果の評価は、次のとおりとする。

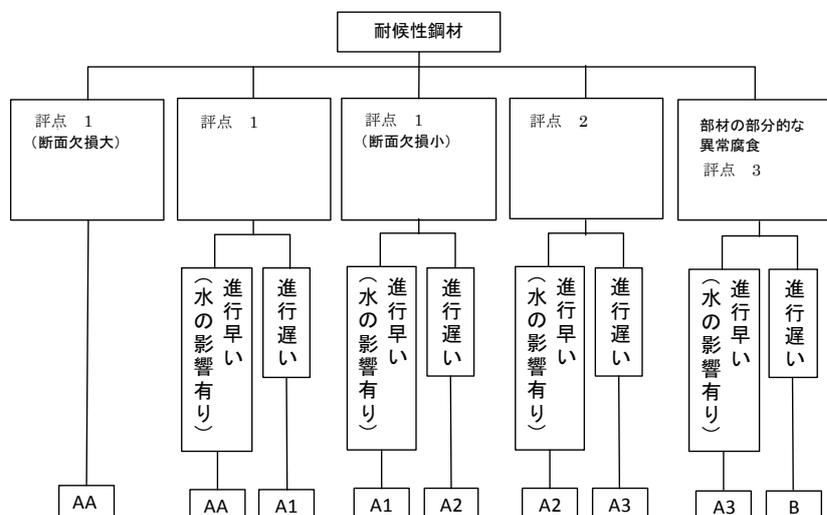
表-4 点検評価区分

点検部位	損傷の種類	AA 損傷・変状：有（著しい） 機能低下：有 緊急補修：必要 適時な補修：必要	A1～A3 損傷・変状：有 機能低下：有 緊急補修：不要	B 損傷・変状：有 機能低下：無 緊急補修：不要
主部材 二次部材	腐食	評点 1（層状剥離さびが発生）	評点 1 評点 2（顕著なうろこさびが発生）	評点 2 評点 3 以上

なお、評点 1、2 の場合の具体的な損傷ランクの区分については、腐食進行の程度、進行状況により区分する。

環境要因を対象とした板厚減少量調査の結果から、耐候性鋼材の外観評点（5段階評価）と補修との関係は、概ね次のように想定される。

- ・ 評点 1 比較的早期（又は速やか）に補修が必要→AA、A1、A2
- ・ 評点 2（不良） 遠からず補修が必要→A2 供用期間中の板厚減少量(推定)1mm 以上
- ・ 評点 2（良） 経過観察により補修判断→A3 供用期間中の板厚減少量(推定)1mm 以下
- ・ 評点 3 以上 損傷無し→B



- AA：速やかな補修が必要
- A1：概ね 2 年以内に補修が必要
- A2：概ね 5 年以内に補修が必要
- A3：今後 5 年以降もしくは継続的な観察により適時補修判断
- B：継続的に観察

図-11 定期調査における耐候性鋼材の判定フロー

評点 2 については、腐食の状態が評点 1 に近いものから評点 3 に近いものまで幅が広く、問題の無い状態も含まれている。従って、詳細調査の結果によっては、「B」判定も有りうる。

なお、耐候性鋼材の異常腐食は漏水等に起因するものであるが、塗膜保護が無く、点検時には二次部材のみの損傷であっても主部材への損傷拡大が容易に想定されることから、主部材と二次部材とで損傷の評価における重み付けを変えることはしないこととする。

点検の結果、当初計画以上に腐食減耗量が大きい場合、適切な方法で応力検証等により、構造物の耐荷力を把握して構造物の健全性を評価し、補強を実施する等する必要がある。

4-8 点検結果の記録

点検結果の記録は、定期点検に準じて行うものとする。

外観調査（異常腐食調査）、既対策の有効性評価については、従来から行われている定期点検の記録によればよい。また、外観調査（外観評点調査）、浮きさび径・厚さ調査、板厚調査については、これまでの調査事例（図-12 参照）を参考にとりまとめる。

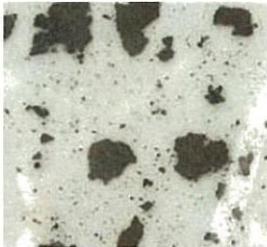
		柿の下橋	P7	G4		外側	下フランジ	上面				
外観評点	2							さび厚	平均 (μm)	803		
									1169			
696												
820												
714												
577												
817												
1301												
582												
307												
1047												
浮きさび	径 (mm)	7	厚み (mm)	1.09	片面塗装部板厚	平均(mm)	13.84	13.72	13.44	13.36	13.48	板厚減少量 (mm)
		13.33	13.36	13.39		13.22	13.37					
		13.52	13.47	13.29	13.19	13.45						
		13.47	13.38	13.36	13.46	13.37						
		13.50	13.45	13.51	13.29	13.28						
	両面塗装部板厚	平均(mm)	13.73	13.71	13.72	13.72	13.74					
		13.75	13.74	13.74	13.74	13.76						
	13.76	13.75	13.75	13.75	13.77							
	13.76	13.76	13.76	13.76	13.79							
	13.78	13.78	13.77	13.78	13.81							
0.34												
浮きさび除去後		さび厚 (除去後)	平均 (μm)	284								
			281									
			102									
			195									
			110									
			127									
			317									
			478									
			432									
			540									
259												

図-12 外観評点等記録の例

## 5. 補修

### 5-1 基本的な考え方

耐候性鋼橋梁の腐食損傷対策にあたっては、損傷原因、損傷範囲等を十分把握したうえで、補修を行うものとする。

伸縮装置等からの漏水が原因である場合には、まず漏水対策を講じるものとする。

漏水対策を講じても十分な効果が得られない場合、また、漏水以外の地形等架設環境が原因である場合の補修は、塗装等によるものとする。なお、塗装補修等を行う場合にあっても、漏水が生じている時には、その影響低減を図るため、必ず漏水対策を先行実施するものとする。

また、腐食による板厚減少が著しい場合は、その状況をよく確認のうえ補強等必要な対策を検討、実施するものとする。

耐候性鋼材の腐食劣化促進の主な要因は、水と酸素及び塩化物である。塩化物に対しては海からの飛来塩分による影響を受ける橋梁と凍結防止剤の散布による影響を受ける橋梁がある。

凍結防止剤が直接的に飛散して影響する場合としては、桁が地山に近接している場合、上下線がわずかの高低差で並列している場合がある。また、漏水による影響を受けている場合としては、床版の打継ぎ目などひびわれ部からの漏水、伸縮装置の非排水樋、排水装置の劣化、破損等による漏水がある。

これら漏水が生じている箇所での腐食進行は急激に進展するものも多く、維持管理上の大きな課題となっている。このため、伸縮装置部の漏水や排水管の損傷などが原因の場合、まず、伸縮装置の止水構造の補修や排水装置の補修など漏水対策を考えることとした。

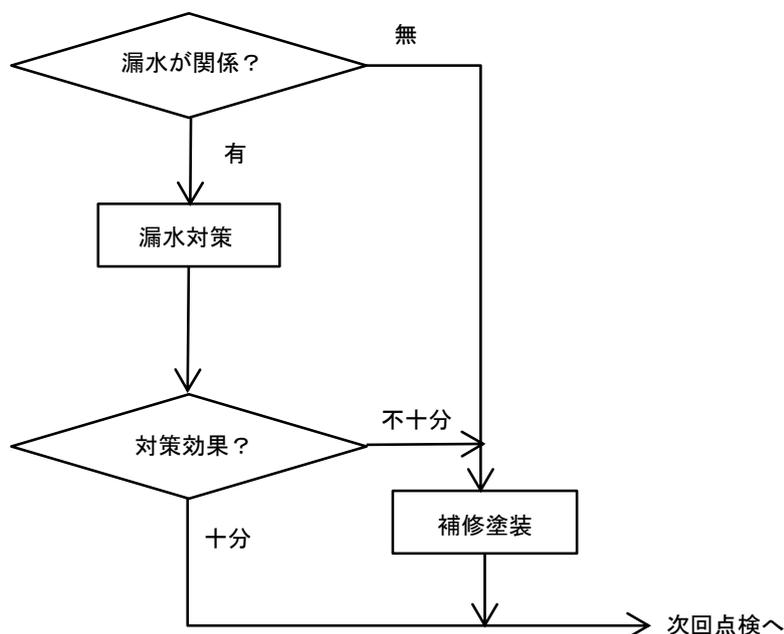


図-13 補修に関する基本的な対応フロー

漏水パターンとこれまで実施されてきた主な漏水対策工（応急処置であるものを含む）は表-5のとおりである。

表-5 漏水パターンと漏水対策工事例

漏水パターン	漏水対策工	備考
伸縮装置からの漏水	伸縮装置導水工	
床版（特に打継ぎ目等）からの漏水	床版防水工 床版水抜き工 床版漏水導水工	
排水管の漏水	排水管補修	
排水マス（下部工）と桁の近接	上下部排水管の連結	
床版水抜きからの漏水の飛散	床版水抜きパイプの延長	

耐候性鋼材の健全性の確保は、コンクリート床版の健全性に負うところも多い。床版の劣化損傷には床版面への雨水の浸透が影響し、床版のひびわれに水分が浸透している場合は、乾燥状態に比べ疲労強度も 1/10～1/100 に低下するといわれており、現在では床版防水工が標準的に採用されている。

## 5-2 漏水補修対策

### (1) 一般

漏水に起因した腐食の場合には、原則として、漏水対策を先行して実施しなければならない。耐候性鋼材の著しい腐食のうち、その程度が著しいものは、漏水によるものがほとんどである。

また、既往事例から、漏水対策を講じること無しに塗装補修を行っても、その効果は短命で持続性は十分ではない。従って、漏水起因の補修を行う場合には、必ず漏水対策を先行して実施しなければならない。

なお、漏水対策を行う場合、

- ・ 100%の止水を図る方法
- ・ 恒久的に止水できる漏水対策工が確立されておらず漏水範囲を低減したり、漏水量を低減するなど一定以上の効果があれば可とする方法

の 2 通りが考えられるが、漏水による腐食は、限度を超える漏水量（凍結防止材の供給量）の多さが原因であり、その量が抑えられることで腐食の進行、影響範囲の低減が可能な場合も想定される（海からの塩分を対象に調査された土研他の三者共同研究でも、飛来塩分量が 0.05mdd（1日、10cm 四方への飛来塩分の重量 mg）以下であれば、耐候性鋼材への影響はほとんど無いとされている）。止水については 100%措置することが難しいことが多いが、所期の効果、その持続性が発揮されるよう計画し実施する必要がある。

漏水対策が的確であれば、新たな漏水、塩分の供給も停止し、著しい腐食の進行が停止することもある。この場合、腐食箇所の補強等が必要でなければ、経過観察を行ってその効果を確認することで、塗装補修を行うことは不要である。

ただ、この腐食箇所が桁の内側のような場合であると、新たな凍結防止剤の供給は停止されるものの、さび層に含まれた塩分は雨で洗い流されることも無く残り続ける。さび層は湿気を吸収しやすく、吸収した水分が滞留しやすい。結露や他からの漏水などで水分が供給されると腐食が再度進行することになり、長期に水分が停滞するので、その影響も大きくなる。また、さび層が残ったままであると、対策工の効果（さび性状の改善）の的確な判断にも支障をきたす恐れもある。従って、漏水対策を行う際には、その施工時に併せて、このようなさび層は除去することが

望まれる。

## (2) 床版上面側からの漏水対策

床版上面からの漏水対策としては、床版防水工の設置を基本に考える。

なお、床版防水工の施工まで時間が空く場合には、応急対策として導水樋の設置を行うなどして、著しい腐食の進行、腐食範囲の拡大防止を図るものとする。

床版上面側からの漏水には次のようなパターンがある。

- 1) 床版の打継ぎ目等のひびわれを浸透した漏水（図－14 参照）
- 2) 床版コンクリート内を浸透した漏水（明確に見えるひびわれ以外の部分を浸透した漏水）（図－15 参照）
- 3) 床版コンクリートと排水管の隙間を浸透した漏水（図－16 参照）

橋面上の舗装はレベリング層と表層で構成されるが、いずれも不透水ではない。また、舗装が劣化すると、舗装の密実性が低下するとともに舗装と他覆との密着性が失われ水道（ミズミチ）となることもある。このように、床版面への水分の供給は避けられず、経年劣化とともにその危険性は増大していく。床版上面からの漏水はひびわれ部など相対的に密実性に欠ける部分に集中的に作用する。このため、急速に腐食が進行する場合があります、このような漏水の対策としては、床版防水工の設置を基本に考える。



図－14 床版ひびわれからの漏水による腐食



図－15 床版を浸透した漏水による腐食



図－16 床版コンクリートと排水管の間からの漏水による腐食

また、既往の事例から、コンクリート縁石部からの浸透が確認されているケースもある（図－17、18 参照）。舗装補修で床版防水工を施工する場合には、縁石の撤去についても、併せて実施

するよう計画する。



図-17 縁石部の滞水

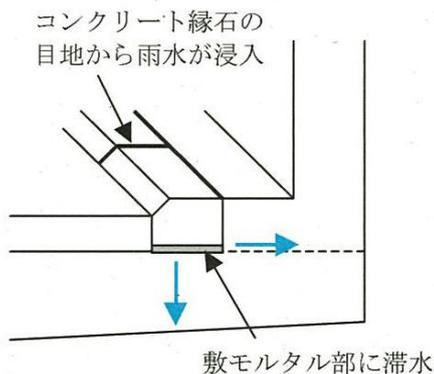


図-18 縁石部からの水の浸入

また、床版防水工が機能するという事は、床版防水上面に浸透水が滞水することであり、滞水すれば、床版防水工自体の劣化進行の激化も予想される。従って、床版防水工を施工する際には、床版水抜きを併せて施工する必要がある。床版水抜きの施工事例を次に示す。

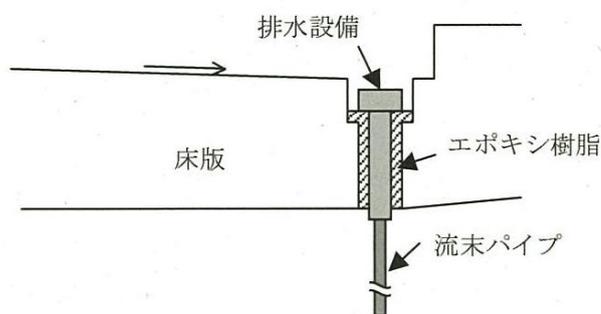


図-19 床版水抜き工 (例)



図-20 床版水抜き (設置例)

応急対策としての導水樋、排水パイプの延長は、これまでいくつかの施工例がある。持続的に機能する床版防水工の設置が第一ではあるが、それが速やかに対応できない場合、これらの対策でも、的確に状況を判断し腐食原因に合致した施工を行えば、相応程度の効果が得られるものである。



図-21 床版からの漏水に導水樋を設置した事例

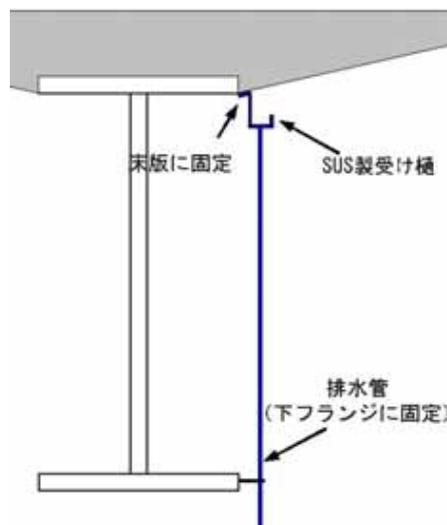


図-22 導水樋の施工図 (例)

床版下面まで浸透した漏水を導水樋で集めることにより、桁への拡散を防止するものである。ただ、上フランジ上面側に直接浸透していく漏水には対処できない。

導水樋は床版のひびわれ等が進展すると床版内の浸透経路が変わり、効果が一時的となる場合もある（経過観察が重要である）。また、床版漏水に対する導水樋は、漏水量が少ない場合、効果が確認できない（効果が発揮されない）ので注意が必要である。

### (3) 伸縮装置部からの漏水対策

伸縮装置からの漏水が有る場合は、導水樋の設置など漏水対策を講じるものとする。

耐候性鋼橋梁で設置されている伸縮装置は、基本的に下面側には非排水構造を設けているものの、その構造はさまざま、場所によっては非排水構造そのものが劣化してその機能を失っているものもある。伸縮装置は本体の取替が行われることがほとんど無いため応急的な対策も含め対策を講じることと、漏水の影響が桁等に及ばないように措置することが重要である。

応急対策の事例を図 23 に示す。

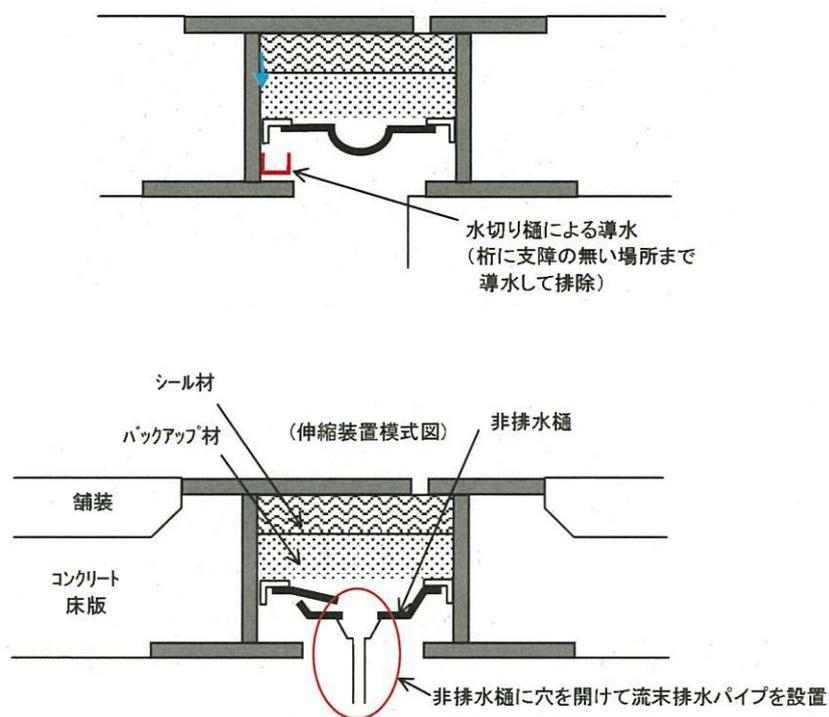


図-23 非排水部の漏水対策事例

#### (4) 排水装置からの漏水対策

排水装置からの漏水等により腐食を生じている場合には、排水装置の補修等対策を講じるものとする。

排水装置が関係する腐食は、主に次の2種類である。

上部工排水を受ける下部工排水マスが桁に近接している場合、排水マスに落ちる水が跳ねて桁を腐食させることがある。このような場合の対策としては、排水管を連結させる方法がある。

排水管接続部が漏水している場合、損傷を確認した場合は、速やかな補修が必要である。

#### (5) その他の漏水対策

その他の漏水要因により腐食を生じている場合については、損傷原因に対応した補修等の対策を講じるものとする。

##### ① 床版張出部に水切りがない場合

水切りが設置されていない場合には、上部工からの伝い水が切れず、桁を腐食させる事例があるため、水切りを設置することが望ましい。

##### ② 高欄目地部からの漏水

フィンガージョイント部の高欄目地から桁側への路面水の飛散を低減するため、図-24のような対策もある。ただし、フィンガージョイントが地覆部まで非排水構造でないと地覆部から桁下側に漏水することになるため、図-25のように地覆高欄を覆う方法も考える必要がある。実施に当たっては、処理後の水の経路がどうなるかを考えて実施する必要がある。



図-24 高欄目地部を塞いだ事例

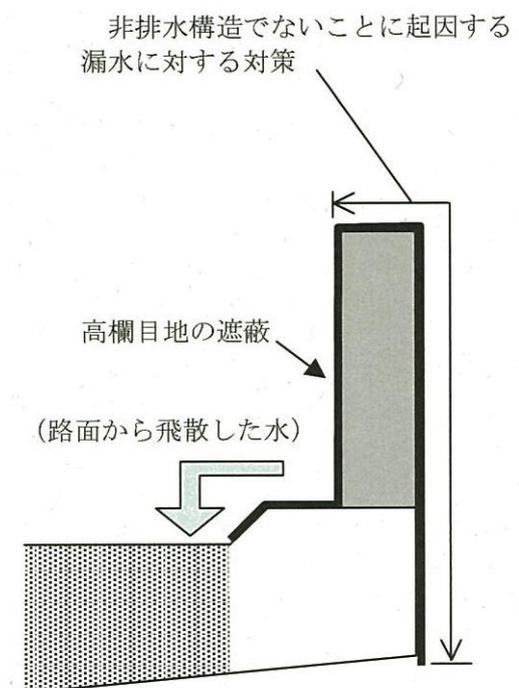


図-25 高欄目地遮蔽構造

### 5-3 補修塗装等

耐候性鋼橋梁の塗装による補修は補修面積が小さい等で、ブラストによる素地調整が適当でない場合は、別途、既往試験結果等を参考に、補修塗装の仕様を検討のうえ、実施することができるものとする。

NEXCO では特別な検討がない限り表-6 の仕様を基本としている。この塗装材料の組合せは、本四高速の瀬戸大橋で行なわれている塗替塗装とも同様である。

表-6 (参考) NEXCO 設計要領の塗装仕様 (2009 年以降)

塗装工程	塗装名	使用量 (g/m <sup>2</sup> )	標準膜厚 (μm)	塗装間隔
素地調整	1 種	—	—	4 時間以内
下塗 第 1 層	有機ジンクリッチペイント	スプレー 600	75	
下塗 第 2 層	(弱溶剤型) 変性エポキシ樹脂塗料下塗	スプレー 480	120	1~10 日
中塗	(弱溶剤型) ふっ素樹脂塗料用中塗	スプレー 170	30	1~10 日
上塗	(弱溶剤型) ふっ素樹脂塗料用上塗	スプレー 140	25	1~10 日
				1~10 日

しかし、同一塗装仕様でも、素地調整方法により、その耐久性は大きく異なっている。当然のことながら、その耐久性は、素地調整の施工の良否にも大いに関係する。素地調整には十分注意して施工する必要がある。

また、ブラストやディスクサンダーだけでは、さび層に浸透していた塩分を完全に除去することはできない。水洗いを行うなどして素地調整した鋼材面に、極力塩分が残留しないようにすることが重要である。ちなみに、鋼構造物協会技術レポート 73 では、付着塩分量を 50mg/m<sup>2</sup>以下になるよう素地調整を行うことが望ましいとしている。

補修面積が小さい等でブラストによる素地調整が適当でない場合は、ディスクサンダーによる素地調整になると想定される。しかし、ディスクサンダーであれば、耐久性能の低下は避けられないところである。さび、塩分の除去を徹底することが補修塗装の耐久性向上には不可欠であり、できる限りブラストによって素地調整を行うことが望まれる。

また、補修塗装を行った部分については、一般の鋼橋塗装に準じて管理するものとする。

耐候性鋼橋梁の補修塗装については、部分塗装となることが想定されるが、塗装部と無塗装部(耐候性鋼材をそのまま暴露する部分)の境界部が弱点となりやすいため施工には十分注意する必要がある。

また、塗装を行うと、表面が平滑になって水が流れやすくなり、未塗装部分(耐候性鋼材そのままの部分)の腐食を促進することがある。このようなことが想定される外桁下フランジ等については、水切りの設置を併せて行っておくことが良い。



図-26 塗装端部に水切りを設置した事例

その他の補修塗装としては、金属溶射や新たに開発された塗装工法などがあり、現在の重防食塗装よりも耐久性が高い塗装工法を採用することでライフサイクルコスト考えたものとすることが望ましい。ただし、金属溶射の素地調整はブラスト処理（1種）が求められており、普通鋼材よりも非常に固いと言われている耐候性鋼材のさびを完全に除去することが難しく、桁端部などの狭隘部については、耐久性の高い新たな塗装工法を採用するなど補修塗装部位によって使い分けることも検討する必要がある。ここでいう耐久性の高い新たな塗装工法とは、環境遮断性を向上させた塗装工法のことであり、例としては、下塗りに応力緩和高密度エポキシ樹脂、上塗りにガラスフレーク入りのエポキシ樹脂を行なったもので、素地調整で多少のさびが残存していても外部からの水・酸素・腐食性イオン等の浸透を阻止する塗装工法である。

#### 5-4 その他の補修

架設環境を変えることで、腐食状況を改善できる場合があるので、これらについても検討すると良い。

桁と地山の近接により腐食が促進されるのは、その空間が狭いことにより、飛散した凍結防止剤が拡散されにくいことが原因であるが、場所によっては樹木が繁茂しているためにその拡散が抑えられている状況も見受けられる。桁近くの伐採等を行えば、腐食状況の改善が期待できる。

#### 5-5 補強

腐食による部材板厚の減少が著しく耐荷性能に支障を生じる恐れがある場合は、当て板補強を標準として示している。

基本的には一般鋼橋と同様であるが、漏水などによる腐食の場合、板厚減少が急激に進行することが想定されるので、対応が遅れることのないよう注意する必要がある。

#### 5-6 施工一般

補修を実施するにあたっては、周辺環境、交通規制、既設橋への影響等を十分勘案して施工計画を立案しなければならない。また、漏水起因の腐食に対する補修を行う場合には、補修対策の実施順序等も十分検討して計画を立案する必要がある。

耐候性鋼材橋梁の補修は、本線交通や交差道路、側道などの交通規制が必要であったり、限られた空間における作業となるなど、種々の制約を受ける場合がある。このため、補修を行うにあたっては、交通状況、利用状況、路下条件等を十分に勘案し、施工計画を立案する必要がある。

また、漏水起因の腐食に対する補修を行う場合には、補修対策の実施順序等も十分検討して計画を立案する必要がある。

#### 5-7 効果検証調査の実施

伸縮装置の漏水対策、導水樋など、機能発現についての評価が確立されていない補修対策を実施した場合、また、損傷の進行に伴い発現機能の変化が想定される場合は、所期の目的が達成されているか、効果検証調査を行うものとする。

先に示した導水樋などの対策事例は試行錯誤のものである。また、床版ひびわれからの漏水などにあつては、ひびわれ損傷の進行によっては漏水経路が変化することもある。

従って、このような効果や確認が確認されていない対策、効果の変動する恐れのある対策を講じる場合は、追跡調査等効果検証調査を行って有効性を評価し、以後の維持管理に反映させる必要がある。

なお、同一目的、同一工法で対象箇所が多い場合は、代表ポイントを設定して検証を行い、異常があれば対象箇所すべてを再確認する方法も考えられる。

#### 5-8 補修等記録の保存

補修を実施した施工等の記録は、整理し保存しなければならない。

補修対策の施工、効果検証調査の結果等の記録は、橋梁の状態を表す重要な資料であるとともに、実施した補修の有効性などを評価するうえで重要な資料となる。そのため、一元的に集約保管する。