

無塗装耐候性鋼橋梁における腐食評価と 防食補修に関する研究

A study on corrosion evaluation maintenance and repair for
weathering steel bridges

2013 年 9 月

今井 篤実

山口大学大学院理工学研究科

学位論文の要旨

維持管理コスト軽減への期待から耐候性鋼橋梁の需要が増え、鋼橋の中に占める耐候性鋼橋梁の割合は2008年度には30%を占めるにいたっている。無塗装耐候性鋼材は、鋼材の表面に緻密なさび層を形成し、母材の腐食進行を無塗装で抑制できる鋼材である。無塗装耐候性鋼橋梁は、そのほとんどが良好な状態にある。その一方で、飛来塩分の多い海浜地区や多くの凍結防止剤が散布される内陸地区では局部的に異常さびが発生している状況もある。無塗装耐候性鋼橋梁の腐食評価は、裸使用とさび安定化補助処理に関わらず、外観評価が主体で、その腐食状態の評価は、評価者の経験に依存してしまう。また、無塗装耐候性鋼橋梁を補修塗装する場合の補修仕様は、ほとんど基準化が進んでないため、個々の補修事例で独自の補修設計が行われ、その設計に沿って補修塗装工事が実施されている。補修塗装後の塗膜の耐久性の検証もほとんど行われていないのが実状である。

本研究では、今後も建設数が増加すると見込まれる無塗装耐候性鋼橋梁について、腐食状態の評価法の高度化ならびに異常腐食した無塗装耐候性鋼橋梁の補修技術の開発を目的とする。

第1章では、本研究の背景と目的を述べ、既往の研究の現状とその課題を示し、本論文の内容と構成を記す。

第2章では、既存のイオン透過抵抗装置の改良を試み、さび安定化補助処理（P+T 処理材）の初期被膜が持つ高抵抗領域（最大 $20\text{G}\Omega$ ）が測定可能となり、現場適用性も大幅に向上した。改良後、被験者テストを実施し、熟練した評価者のさび外観評価とイオン透過抵抗法から得られるⅠ評点の領域区分の評価が良く一致することから、イオン透過抵抗法は裸使用の耐候性鋼材の評価法として有用であることを確認した。また、イオン透過抵抗法から得られるⅠ評点の領域区分と実橋梁のさびの状態が良く一致することから、イオン透過抵抗法が裸使用の耐候性鋼橋梁のさびの状態の評価法として有用であることを確認した。さらに、さび安定化補助処理を施した耐候性鋼材のイオン透過抵抗値は、被膜が劣化するとともに、イオン透過抵抗値が減少することから、被膜の防食機能の劣化の評価に有用であることを確認した。

第3章では、厳しい腐食環境に置かれたP+T処理材を施した耐候性鋼模擬橋梁試験体からコア材を採取し、P+T処理材の防食機能の劣化、腐食評価に関する基礎データ収集とイオン透過抵抗法で評価した結果、イオン透過抵抗法は、①熟練者の目視外観評価から得られ

た外観評点と、イオン透過抵抗法より得られたI 評点と良く対応し、P+T処理材の防食機能の劣化と腐食状態の評価が可能であることが明らかになった。②P+T処理材の防食機能の劣化と腐食過程は、塗装した鋼材の防食機能の劣化と腐食過程に類似していることを確認した。

第4章では、P+T処理材を用いた耐候性鋼橋梁にイオン透過抵抗法や外観評価を行う場合には、浮き被膜や塵埃等の堆積を除去する工程として刷毛処理が適していることを示した。また、国内のP+T処理材を用いた既存の耐候性鋼橋梁をイオン透過抵抗法で評価した。その結果、P+T処理材における防食の機能劣化と腐食の進行経路は、防食機能の劣化過程を経て保護性さびに至る経路と、防食機能の劣化過程を早期に通過し、要観察状態を示すさびや異常を示すさびに至る経路の2経路があることが解析できた。

第5章では、高塩分環境下で異常さびが生成した耐候性鋼材の各種簡易補修方法について塩水散布による加速試験を実施し、その効果の検証を行った。高圧水洗処理は、さびの生成を促進し、短期的にはグラインダー処理やグラインダー処理と高圧水洗処理のさび除去が有効であると考えた。

第6章では、補修塗装における素地調整処理については、強固さびを除去可能な研削工具、研削技術が必要であると考えた。そこで、市販の動力工具で駆動する曲面タイプのダイヤモンド工具を開発し、耐候性鋼材に生成した強固なさびの除去を試みた。この検証結果から、耐候性鋼材に生成した強固なさびは、孔食内のさび以外のさびを除去し、鋼材面を露出することができた。しかしながら、曲面タイプのダイヤモンド工具では、研削効率や高音の発生等の課題が生じた。研削効率の対策としては、その形状をフラット構造にするとともに、粒子を放射状に配置することで、研削力と耐久性の向上させることができた。高音対策としては、二層かつ空間構造とすることで改善された。改良したダイヤモンドツールは、市販されている他のダイヤモンド工具と耐久性、騒音発生などを比べ、補修用一次調整工具として有用であることを確認した。

第7章では、実際に異常さびが発生した無塗装耐候性鋼橋梁に対して補修塗装の実施例を示した。この事例を通じて、補修用一次素地調整で孔食内のさび以外を除去し、補修用二次素地調整のブラスト法で孔食内のさび除去が可能であることを確認した。さらに、本研究の成果を実用的にするために、無塗装耐候性鋼橋梁の異常さび部の補修塗装について実施可能な施工フローを示した。

第8章では、本研究で得られた知見を整理するとともに、今後の展望およびさらに解決すべき課題について述べている。

Abstract

Construction of weathering steel bridges is going to increase in the future. The importance of maintenance technology for weathering steel bridges will grow even more with increasing numbers of the bridges. The purpose of this study is to sophisticate the evaluation method of corrosion state for weathering steel bridges, and to develop the maintenance and repair techniques for the bridges.

There are two methods of weathering steel bridges. One is unpainted use and the other is supplemental rust controlling surface treatment use. As an evaluation method of corrosion state of unpainted weathering steel bridge, the ion transfer resistance measurement method is proposed. In the previous research, this method showed good performance evaluating of corrosion state for unpainted weathering steel bridges. However, when ready-made ion transfer resistance measurement tester was applied the weathering steel bridges with supplemental rust controlling surface treatment, we faced the problems that it can not measure a high resistance region of initial coating of surface treatment. Thus, the improvement of the tester was conducted to ensure the measurements of a high resistance region and the field applicability. In the verification process of the improved tester, it was founded that it is possible to evaluate the degradation process of the coating having a high resistance region. The improved tester is useful to evaluate the corrosion and/or coating state of not only unpainted weathering steel bridge, but also the weathering steel bridges with supplemental rust controlling surface treatment.

Minimizing the maintenance of weathering steel bridges, it is importance to accurately evaluate corrosion state. Since surfaces of the weathering steel bridges with supplemental rust controlling treatment show ununiformly-distributed weathering properties, it is difficult for inexpert engineers to judge its surface states only by known visual inspection method. In this study, the ion transfer resistance method is proposed as a quantitatively solution to solve this problem. Comparisons between the coating cross-section observation results and the ion transfer resistance measurement results were conducted in order to assess the credibility of this method. The ion transfer resistance method is a non-destructive testing. And, the coating cross-section observation is a destructive testing. Some core materials were collected from a weathering steel bridge body. From these results, it was confirmed that the deterioration of anticorrosion capability and the progression of corrosion can be evaluated quantitatively.

From the field survey of the weathering steel bridges with supplemental rust controlling surface

treatment, we recognized the need for pre-processing to accurately evaluate corrosion state. Although the need for pre-processing before the evaluation has not been discussed in the visual inspection, the effect of pre-processing should be discussed. We offered some method of pre-processing, and verified the appropriate method. In accordance with the result of the study, we are considered that pre-processing, as a step of removing deposits such as dust and/or removing flaking film, is required, and that the brush handle is the preferred method as pre-processing in this case. In addition, the anticorrosion capability of the existing weathering steel bridges with supplemental rust controlling surface treatment was evaluated by use of the ion transfer resistance measurement tester. From these results, it is analyzed that the degradation of anticorrosion capability follows two predicted path. One follows the route from initial high resistance region to protective rust and or coating region, the other follows the route from initial region to the region of observation stage in care or bad condition through protective rust and/or coating region quickly.

The development of simplified restrain technology of rust generation speed is necessary, although the anticorrosion for steel structures is ideally based on near-white blast cleaning, which remove the rust containing salt completely, and on paint. As the simplified method taking advantage of weathering steel materials, we approached the high-pressure water washing method and the rust removal process method. The verification of the effects on these methods was investigated by the acceleration test. We are considered that the rust removal process method, such as only grinder treatment or mix grinder and high-pressure water washing treatment, deliver superior performance compared with only high-pressure water washing method in the short term.

Extra hard rust is generated on the metal surface of the weathering steel bridges under extremely corrosive environment. We consider the efficiency technology, which exposed base metal, most importance in the repair work. Therefore, we developed new power tool by means of diamond, and verified practical effectiveness of developed power tool.

In accordance with the result of the study, a weathering steel bridge generating actually delamination repaired locally. Through this case, it is confirmed that the blast method is useful and that it is possible to repair the weathering steel bridges generating bad condition rust.

Finally, the present study is summarized that the ion transfer resistance measurement method is a powerful tool to evaluate the corrosion state of the weathering steel bridges quantitatively, and that the feasible construction flow is proposed for the repair of the weathering steel bridges generating bad condition rust.

目次

第1章 序論

1. 1 本研究の背景と目的	1
1. 2 既往の研究とその課題	6
1. 3 本論文の内容と構成	12
第1章の参考文献	16

第2章 無塗装耐候性鋼橋梁へのイオン透過抵抗法の適用

2. 1 概要	19
2. 2 イオン透過抵抗測定装置の改良	20
2. 3 裸使用の耐候性鋼橋梁へのイオン透過抵抗法の適用	26
2. 4 さび安定化補助処理の劣化過程とイオン透過抵抗値の関係	31
2. 5 第2章のまとめ	33
第2章の参考文献	35

第3章 さび安定化補助処理を施した耐候性鋼材へのイオン透過抵抗法の適用

3. 1 概要	37
3. 2 調査内容	38
3. 3 調査結果	43
3. 4 模擬橋梁試験体の防食機能の劣化, 腐食マップ	58
3. 5 第3章のまとめ	62
第3章の参考文献	63

第4章 さび安定化補助処理を施した耐候性鋼橋梁の表面状態とその評価

4. 1 概要	65
4. 2 表面状態の評価	66
4. 3 前処理, 測定方法の検討	69
4. 4 既設の耐候性鋼橋梁で得られた結果	76
4. 5 イオン透過抵抗法の評価結果の解釈	84
4. 6 第4章のまとめ	89
第4章の参考文献	90

第5章 無塗装耐候性鋼材の異常さび対処法に関する検討	
5. 1 概要	93
5. 2 試験内容	94
5. 3 試験結果	98
5. 4 第5章のまとめ	107
第5章の参考文献	108
第6章 無塗装耐候性鋼材に生成する異常さびの効率的な除去技術の検討	
6. 1 概要	111
6. 2 ダイヤモンド工具の開発	111
6. 3 ダイヤモンド工具の適用性検証	115
6. 4 ダイヤモンド工具の改良	117
6. 5 ダイヤモンドツールの有効性検証試験	119
6. 6 第6章のまとめ	125
第6章の参考文献	126
第7章 無塗装耐候性鋼橋梁の防食補修塗装法の実施例	
7. 1 概要	129
7. 2 対象橋梁	130
7. 3 補修塗装方法の検討	135
7. 4 山根橋への補修塗装の適用	141
7. 5 適用結果の考察	145
7. 6 施工後経年調査結果	146
7. 7 第7章のまとめ	149
第7章の参考文献	150
第8章 結論	
8. 1 本研究のまとめ	153
8. 2 今後の展望と課題	159

謝辞

第1章

序 論

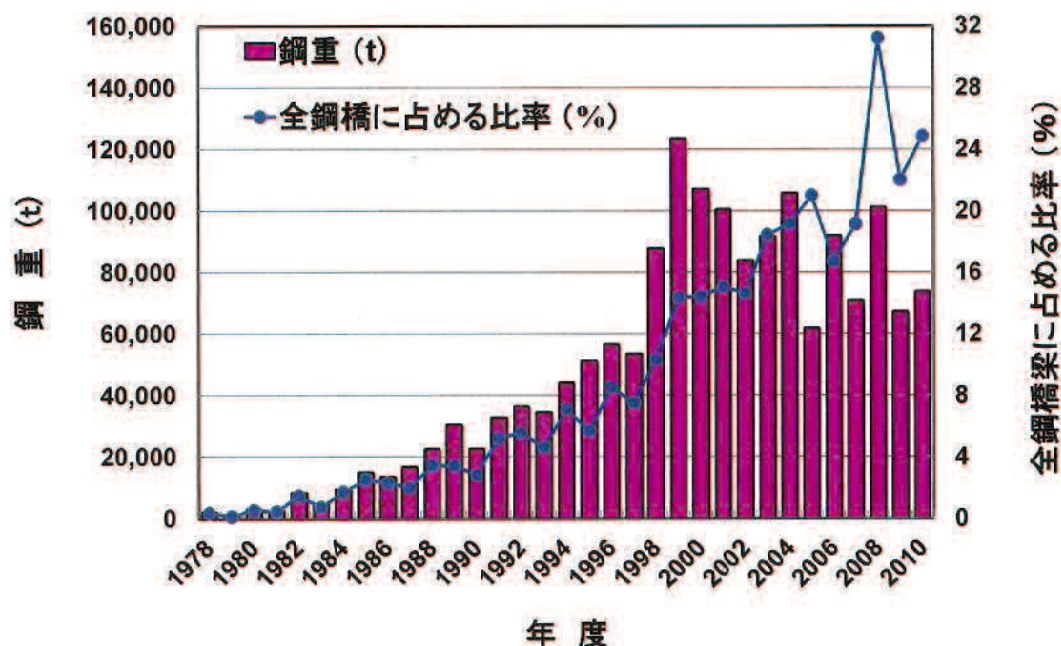
第1章 序論

1. 1 本研究の背景と目的

耐候性鋼材を無塗装（裸使用）で用いた橋梁は、1965年に米国デトロイトのEight Mile Road Highway Bridgeで初めて採用され、3年後の1968年に、知多2号橋や村中小橋に採用されたのが国内で最初である。その後、耐候性鋼橋梁の建設数は、拡大の一途をたどり、1973年から1978年にかけて建設された北海道室蘭新道においては約7,800トンもの耐候性鋼材が使用された¹⁾。その後も、耐候性鋼橋梁の建設数は、社会資本施設の整備拡充とともに、初期建設費の縮減と維持管理コスト軽減への期待から需要が増え、鋼橋の中に占める耐候性鋼橋梁の割合は、図-1.1に示すように2008年度には30%を超えるにいたっている²⁾。

耐候性鋼材は、鋼材の表面に緻密なさび層を形成し、母材の腐食進行を無塗装で抑制できる鋼材である。無塗装耐候性鋼材の種類は、図-1.2に示す通り裸使用と裸使用にさび安定化補助処理を施したさび安定化補助処理に分類される。裸使用は、図-1.3に示す通りほとんどの場合は初期さびから保護性さびにいたり良好な状態にある^{3),4)}。一方で、飛来塩分の多い海浜地区や凍結防止剤が多く散布される内陸地区を中心として、局部的にうろこ状さびや層状剥離さびが発生している状況もある⁵⁾。さび安定化補助処理は、裸使用にプライマー処理（P処理膜）を施したP処理材と裸使用にプライマー処理（P処理膜）とトップコート処理（T処理膜）を施したP+T処理材にさらに分類される。無塗装耐候性鋼橋梁の中に占めるさび安定化補助処理の適用割合は、裸使用が約30%に対して、さび安定化補助処理が約70%を占めている¹⁾。さび安定化補助処理を施した耐候性鋼橋梁のほとんどはP+T処理材である¹⁾。P+T処理材は、裸使用やP処理材と比較して腐食が発生するのに時間を要するのは、T処理膜が存在していることがその要因である。さび安定化補助処理（P+T処理材）は、図-1.3に示す通りほとんどの場合は被膜の劣化が徐々に生じ、被膜が風化・消失し、保護性さびに置き換わり良好な状態にある^{3),4)}。一方で、飛来塩分の多い海浜地区や凍結防止剤が多く散布される内陸地区を中心として、局部的にうろこ状さび、こぶ状さびあるいは層状剥離さびが発生している状況もある⁵⁾。

無塗装耐候性鋼橋梁に生じるうろこ状さび、こぶ状さびあるいは層状剥離さびなどの異常さびは、放置しておくと腐食が進行し橋梁部材の貫通穴、断面欠損あるいは耐荷力の低

図-1.1 鋼橋中に占める耐候性鋼橋梁の鋼重割合と比率²⁾

下につながるため、早期に対策（補修）を講ずる必要がある。異常さびは、早い時期に対策（補修）を講ずれば、補強や部材交換あるいは架け替えにいたることはない。このような事態にいたらないためには、無塗装耐候性鋼橋梁の定期的な腐食評価ならびに腐食した無塗装耐候性鋼橋梁に防食補修を施すことが重要である。

無塗装耐候性鋼橋梁の腐食評価は、外観評価が主体で行われているのが実状である。裸使用された耐候性鋼材を対象とした腐食評価は、表-1.1のさび外観評価^{1), 5)}が主流である。さび外観評価は、簡便で実用性が高い方法であり、さびの状態を大まかに捉えるのに適している。しかしながら、さび外観評価は、さび層の厚さが定量的に示されているものの評価者の経験により、評価にバラツキが生じる問題がある⁵⁾。一方、さび安定化補助処材の防食機能の劣化、腐食評価は、表-1.2に示す目視外観評価基準^{1), 6)}が主として用いられている。さび安定化補助処材の防食機能の劣化、腐食評価は、裸使用の耐候性鋼材の腐食評価に、劣化した被膜からのさび面積率が判定に加わったことで、評価者の経験による評価値のバラツキがより顕著となっている⁷⁾。そのため、無塗装耐候性鋼橋梁の腐食評価としては、裸使用とさび安定化補助処理に関わらず、評価者の経験に依存しない新たな手法が望まれている。

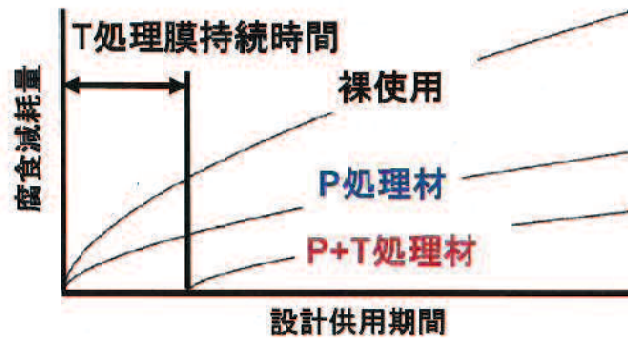
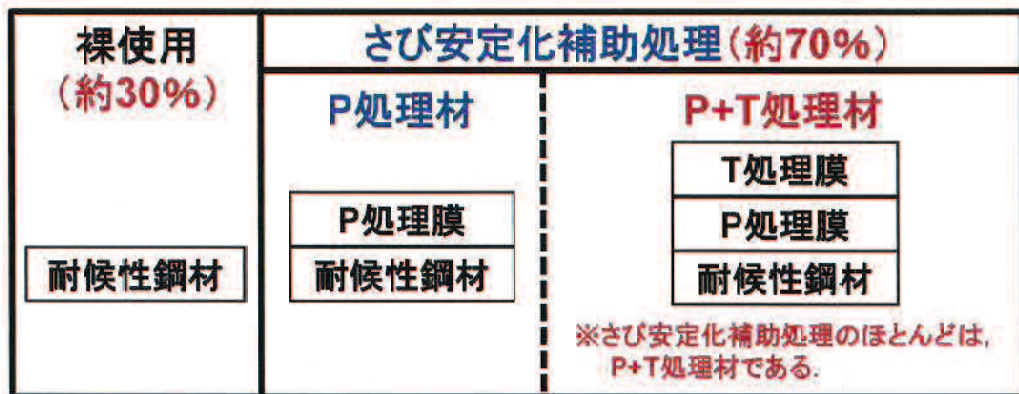


図-1.2 無塗装耐候性鋼材の種類¹⁾

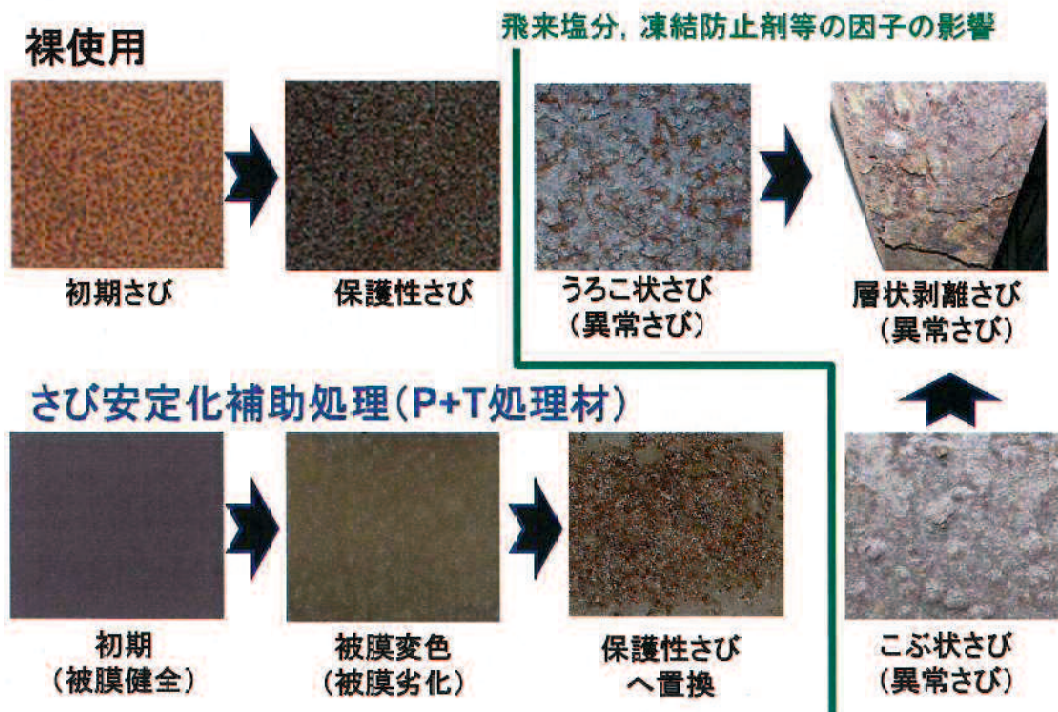


図-1.3 無塗装耐候性鋼材の外観変化

表-1.1 さび外観評価¹⁾

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
5	1) 色調は全体的に明るく黄褐色でまだら状である	200 μ m程度未満
	2) 殆ど凹凸はなく、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	
4	1) 色調は暗褐色で色むらはない	400 μ m程度未満
	2) 殆ど凹凸はなく、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	
3	1) 色調は暗褐色から褐色で色むらなし	400 μ m程度未満
	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	
2	1) 色調は暗褐色から褐色でやや色むらがある	800 μ m程度未満
	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	
1	1) 局部的に様々な色調(激しい色むら)がある	800 μ m程度を超える
	2) 大きい凹凸があり、層状剥離(痕跡)がある	

注1) さびの粒径は、単独さびの直径で判定し、さびが連続した長円形の場合は短径を最大径とする。

注2) 正常の判定は、さび発生後の経過期間が9年以上であることを前提とする。

表-1.2 さび安定化補助処理を施した耐候性鋼の目視外観評価基準^{1), 6)}

さび・被膜の外観(例)				被膜部のさび状況 (%:1m ² 程度範囲のさび面積率) ⁴			さび厚 ^{2,3} (μm)	
				被膜にさび が見られない、または、 被膜の下や 中に僅かな さびが見ら れる。	x	y		z
					<3%	<30%		>30%
被膜の 外観	正常	A	あきらかな変・退色なし	A				
		B	あきらかな変・退色あり	B				
さび部の 外観	正常 ⁵	5	腐食が進まず、薄いさび		5-x	5-y	5-z	<400
		4	微細で外観平均粒径1mm 程度の均一なさび		4-x	4-y	4-z	<600
		3	微細で外観平均粒径が5mm 程度のさび		3-x	3-y	3-z	
	要観察	2	外観粒径5～25mm 程度のうろこ状さび		2-x	2-y	2-z	<1000
			外観直径25mm 程度以下の小さなこぶ状さび ¹		2-x(b)	2-y(b)	2-z(b)	
	異常	1	層状さび		1-x	1-y	1-z	>1000
			外観直径25mm 程度を超える大きなこぶ状さび ¹		1-x(b)	1-y(b)	1-z(b)	

注) 1. (b)はこぶ状さび(bumpy rust)であることを示す。

2. さび厚は目安としての参考値である。

3. 被膜の残留も考慮して、裸使用材の目安に200 μ mを加算した。

4. 被膜が無くなり全面がさびに置換した後は、裸使用材の基準にて評価し、1～5の評点で記述する。

5. 正常の判定は、さび発生後の経過期間が9年以上であることを前提とする。

無塗装耐候性鋼橋梁の防食補修の実施例は、非常に少なく塗装橋梁の補修塗装のように定まった補修塗装仕様^{1), 5), 9)}は示されていない。防食補修の実状は、個々の補修において独自の判断による補修塗装が実施されており、その補修効果についても統一した知見は得られていない^{1), 5), 9)}。そこで、無塗装耐候性鋼橋梁の合理的な維持管理のためには、防食補修方法について何らかの基準を示す必要がある。その際、防食補修法の機能を長期間に渡って維持するためには、異常さび発生部分の素地調整品質の確保が必須となる。しかしながら、無塗装耐候性鋼橋梁の異常さびや異常さび中に存在する塩分を除去する素地調整法は、いまだ確立されていない⁸⁾。無塗装耐候性鋼橋梁は、これまでに多く建設されており、今後の建設数も増加すると考えられる。これらの無塗装耐候性鋼橋梁を有効に使用するためには、本来期待されているライフサイクルコストの削減を可能とする維持管理技術の確立が急務である。この課題は、早急に解決するすべき課題である。

本研究では、無塗装耐候性鋼橋梁について、腐食評価の高度化ならびに腐食した無塗装耐候性鋼材の防食補修法の開発を目的とする。

そこで本研究では、裸使用の耐候性鋼材に使用していたイオン透過抵抗法^{1), 5), 10), 14), 15)}に着目し、裸使用とさび安定化補助処理の双方に適用できる測定装置への改良と現場適用性の向上のため、室内仕様から現場仕様への改良を行う。また、改良したイオン透過抵抗測定装置を用いて、裸使用の耐候性鋼橋梁の腐食評価およびさび安定化補助処理の耐候性鋼橋梁の防食機能の劣化、腐食評価への適用性を検討する。さらに、イオン透過抵抗法を用いて国内のさび安定化補助処理が施された既設の耐候性鋼橋梁の表面状態について調査を実施する。

異常さびを生じた無塗装耐候性鋼材の防食補修法には、いくつかの段階が考えられる。本研究では、異常さびから塩分が除去できると推測される水洗処理^{1), 5), 8), 11), 12), 13), 23)}や異常さびを除去するグラインダー処理のような簡易補修と、長期的耐久性が期待できる防食補修塗装を選定する。これらの防食補修法の効果は、各種試験を実施して検証する。特に、防食補修塗装は、長期耐久性を実現するためには異常さびを完全に除去することが必須となる。そこで、耐候性鋼材に生成すると言われる強固な異常さびや異常さびに内在する塩分を除去可能な補修用の素地調整法を開発するとともに、異常さびを生じた無塗装耐候性鋼橋梁に対する防食補修法の確立を試みる。最後に、架設後 20 年経過し異常さびを生じた裸使用の耐候性鋼橋梁において部分的な防食補修塗装を実施し、防食補修塗装の補修用素地調整法の検証および最適防食補修塗装施工フローを提案する。

1. 2 既往の研究とその課題

1. 2. 1 裸使用の耐候性鋼橋梁の腐食評価法

裸使用の耐候性鋼橋梁の維持管理においては、さびの状態が「保護性さびが形成されている状態」または、「保護性さびが適切に形成されつつある過程にある状態」にあるか、あるいは、「保護性さびが形成されず腐食が進行する状態にあるのか」を判定する必要がある。現状のさび状態の代表的な指標と試験法を表-1.3 に示す⁵⁾。

外観は、さびの粒子や色相が指標になり、例示されたさび状態記述と外観写真見本から耐候性鋼材のさび状態の評価する方法である^{1), 5)}。

さび層の厚さは、地鉄が強磁性体であるが、さび層の主体は非強磁性体であるため、電磁膜厚計を用いて計測した値をさび層の厚さとすることができる⁵⁾。

さびの構造は、X線回折、ラマン分光、メスパウアー分光等を使用してさび層の組成そのものを分析する手法がある。この中でもX線回折によるさび構造分析が多く用いられている。X線回折は、 α -FeOOH（ゲーサイト）、 β -FeOOH（アカガネアイト）、 γ -FeOOH（レピドロサイト）、 Fe_3O_4 （マグネタイト）、X線的非晶質さびなどの重量比率が得られるものである。保護性さびが生成している場合は、 α -FeOOH や X 線的非晶質さびが観察され、 α -FeOOH や X 線的非晶質さびの重量比率と試験体の暴露年数から保護性さびの生成状態を知ることができる⁵⁾。

フェロキシル試験は、地鉄の腐食活性点が青色の斑点として検出される方法である。青色の斑点は、さび層のピンホールを通して試薬が地鉄と反応したことを表しており、青色斑点は小さく、密度が低いほどさび層が緻密であると考えられる⁵⁾。

さびの物性は、さび層のイオン透過抵抗測定や電位測定のように電気化学的特性から保護性さびの生成状態を推定する手法である^{4), 5)}。イオン透過抵抗測定は、電気化学的交流インピーダンス法を用いてさび層のイオン透過抵抗値を測定する手法である^{1), 5), 10), 14), 15)}。電位測定は、さび面上の参照電極と地鉄の電位差を測定する手法である^{1), 5), 10), 16), 17)}。

さびの状態の代表的な評価手法は、表-1.3 に示すように各手法があるが、維持管理においては、簡便で実用性が高い外観評価が主流である。この外観評価は、さびの状態を大まかに捉えるのに適している。しかし、さび層の厚さが定量的に示されているものの評価者の経験により、評価にバラツキが生じる問題がある⁵⁾。この評価手法の中から、外観評価より定量的でかつX線回折より簡便な手法としては、イオン透過抵抗と電位があげられる。

表-1.3 さびの状態の体系的な評価指標とその内容⁵⁾

項目	指標	方法例	指標の意味
外観	さび外観評点 ・さび粒子の大きさ ・さび粒子の均一性 ・さび層の質感 ・さび層の厚さ	目視 接写写真 セロファンテープ試験 色見本 電磁膜厚計	間接的に腐食速度や環境の適否を知ることができる
腐食量	板厚 さび層の厚さ 重量	超音波厚さ計 マイクロメーター 電磁膜厚計 試験片の重量測定	初期値との比較により累積の腐食量を知ることができる
さびの構造と物性	さび組成 イオン透過抵抗値 電位値 地鉄反応	X線回折 ラマン分光分析 メスbauer分光分析 交流インピーダンス測定 電位差計 フェロキシル試験	さびの環境遮断機能や、さびの疑似不導体化の程度をすることができる。

イオン透過抵抗と電位は、保護性さびの指標であり、現場的にも、他手法と比較して優れていると報告されている^{1), 5), 10), 14), 15), 16), 17)}。

電位は、対象構造物のさび層に回路を構成するため、何年もかかってできた保護性さびに傷を付けて導通をとる必要がある破壊試験である。測定時間は、対象部位に電解質を染み込ませ、約5～30分経過後の電位を電位差計で測定するものである^{10), 16), 17)}。

イオン透過抵抗は、プローブを2個用いて鋼材表面を間接交流電解するため、導通をとる必要がなく非破壊試験となる。測定時間は、対象部位にプローブを当て、対象部位に電解質を染み込ませ、約30秒～1分後の抵抗値をイオン透過抵抗測定装置で測定するものである^{10), 14), 15)}。

本研究では、裸使用の耐候性鋼橋梁の評価手法として、非破壊測定が可能でかつ裸使用の耐候性鋼材に適用されつつあるイオン透過抵抗法^{14), 15)}が有用であると考え、イオン透過抵抗法に着眼した。着眼したイオン透過抵抗法のさび外観評価との整合性を明らかにするとともに、実橋梁への適用性検討を行う。

1. 2. 2 さび安定化補助処理を施した耐候性鋼橋梁の劣化評価法

さび安定化補助処理に要求される機能としては、初期の流れさび発生を抑制し、周囲の着色を防いで景観性を調整する基本機能と、保護性さび形成を補助する働き、すなわち耐候性鋼材の腐食を抑制する付加機能がある。さび安定化補助処理は、腐食環境を緩和し保護性さびの生成を補助し、いずれ長期間かけて風化・消失し、保護性さびに置き換わるので、塗り替えを行わないのが原則であり、環境遮断による防食を目的とした通常の塗装とは異なる。さび安定化補助処理は、塗り替えを前提とする塗装橋梁に比べLCCを低減することができる¹⁾。

さび安定化補助処理を施した耐候性鋼橋梁の防食機能の劣化、腐食評価は、目視外観評価基準で評価が実施されている^{1), 6)}。この目視外観評価基準は、主流になりつつあるものの、被膜の風化消失過程で生ずる浮き被膜、さびの付着、塵埃の堆積がある中で、被膜評価部のさび面積率が判定に加わっていることが評価の難易度を上げている¹⁾。

松崎ら⁷⁾は、経験や人による評価の差をなるべく少なくする目的で、判定プロセスを2段階で行う方法を提案した。1段階としては、橋梁の全体条件である腐食環境条件と、さびの全体の状態から一次評価する。2段階としては、個別の橋梁部位ごとにさび厚値を考慮しつつ表面状態を判定する。この方法は、従来の目視外観評価基準と比較して、防食機能の劣化判定精度が向上したと考えられるが、評価過程が複雑であるとの課題が残る。

佐藤ら¹⁸⁾は、目視外観評価基準に、1978年に宮城県石巻市に建設されたさび安定化補助処理が施された日和大橋（旧石巻河口橋）1橋の結果を考慮し、修正を加え新たな目視外観評価基準を提案している。しかしながら、この方法は、データ数が少ない点や評価判定が複雑化しているなどの課題が残る。

境ら^{19), 20)}は、橋梁延長約2.1km、使用された耐候性鋼材約7,800tである室蘭新道を構成する道路橋の内、5つの橋梁（建設は1973年から1980年；30年以上が経過）を対象に調査を行った。その結果、従来の目視外観評価基準を以下のように変更し、室蘭新道における耐候性鋼橋梁の目視外観評価基準を提案している。①被膜部のさび面積率の評価x, y, zを評価から省いた。②評点5の中に、評点A（被膜にさびが見られない）と評点B（被膜中にわずかなさびが見られる）を含めた。この方法は、合理的な基準と思われるが、裸使用の評価基準と整合性がとり取りにくいなどの課題がある。

さび安定化補助処理の評価では、「さび安定化補助処理を施した耐候性鋼橋梁の外観評価基準」^{1), 6)}を用いるのが原則である。しかし、防食機能の劣化が進んだ場合、被膜の風化、

消失が不均一であるため、その表面の被膜劣化やさびの保護性を目視外観評価基準だけで判定するには、評価者が十分に熟練していることが求められる。熟練度の低い者が評価するとバラツキが生ずるので、より定量的な方法が望まれる。

本研究では、既存のイオン透過抵抗測定装置については、さび安定化補助処理被膜の初期被膜の高抵抗領域の測定を可能にする装置に改良し、被膜劣化とイオン透過抵抗値の関係を明らかにする。また、さび安定化補助処理の防食機能の劣化、腐食評価することで、さび・被膜厚とイオン透過抵抗値の新たな領域区分を提案し、その評価法の検証も行う。

1. 2. 3 無塗装耐候性鋼橋梁の補修法

無塗装耐候性鋼橋梁の中には、適用検討され建設、維持管理されたにもかかわらず、その後の大きな環境変化により、異常さびが生じた事例が存在している。しかし実際に補修された無塗装耐候性鋼橋梁の実施例は、非常に少なく、補修後の経年数も十分ではない。過去の実施例から無塗装耐候性鋼橋梁において選定すべき対処法は、今後の維持管理が容易に実施できることが前提となる。具体的な対処法は、次の順序で考えればよい^{1), 5)}。

- (a) 環境改善による腐食原因の排除
- (b) 構造改善による腐食原因の排除
- (c) 腐食環境を緩和する可能性が高いと思われる橋梁水洗適用の可否
- (d) 橋梁水洗では対応できない腐食環境の場合に適用される防食方法の変更

対処法としては、(a), (b)原因が排除できることが望ましいが、この原因が排除できない場合の対策として(c)橋梁水洗や(d)補修塗装などが実際に行われている。(c)橋梁水洗や(d)補修塗装を実施する場合のさび面、塗装面の残存塩分量の目標値は、塗装橋梁における塗り替え塗装時の付着塩分量 50mg/m^2 以下に準じ、設定している^{1), 5), 8), 21), 22)}。

(1) 橋梁水洗事例

米国における橋梁水洗は、1999年から橋梁の水洗と点検を組み合わせる本格的に導入が開始されている。対象の塗装橋梁は、橋梁部材に付着した砂や塩分などを除去するため、橋梁の予防保全に有効であるとされ、橋梁の長寿命化の手法として橋梁水洗を行っている。橋梁水洗の特徴は、橋梁点検と併用しあらかじめ砂、鳥の糞、鳥の巣などを除去することにより、点検者の健康に留意していることと、濁水に含まれている成分を自然界にある自然な物質とほぼ同様と判断して濁水を処理せずに河川などに流していること、さらには水洗効果を橋梁点検に基づいて評価しているところにある¹¹⁾。以上のことから、米国では橋梁水洗が普及したものと思われる。

国内における橋梁水洗は、付着塩分、堆積土砂を取り除くため、その水圧、水洗時間間隔、水洗の時期などに着目した試験が、特に凍結防止剤により影響を受けた橋梁桁で行われた。

磯ら²³⁾は、凍結防止剤散布が多い積雪寒冷地の塗装橋梁および無塗装耐候性鋼橋梁において、曝露試験材を用いて汚れや塩分などの付着性状の調査と除去実験、長寿命効果確認試験、および実橋における水洗試験を行った。さらに、橋梁水洗の現場作業のために開発した簡易移動吊足場や簡易水洗装置を用いて実橋を実際に水洗し、水洗方法、濁水の回収および処理方法について検討した。これらの検討結果から、塗装橋梁の長寿命化に効果があることが確認されている。一方、無塗装耐候性鋼橋梁では、さびのすき間に侵入した腐食因子であるCl⁻を完全には除去することが困難であることから、橋梁水洗は、無塗装耐候性鋼橋梁の長寿命化には効果が少ないことが報告されている。

(2) 補修塗装事例

耐候性鋼橋梁には、層状剥離さびが発生し、補修塗装を実施した事例はいくつか報告されているが、補修後の時間経過が短いことから補修塗装の防食機能の効果の検証が不十分であり、いまだ標準化されるにいたっていない^{1),5)}。

美浜大橋は、関東地方太平洋沿岸部で離岸距離約 0.1km に、1985 年に架設された耐候性鋼橋梁である。2003 年に実施された橋梁点検の結果、主桁のさびが進行しており、部分的にはかなり深刻な状況であり、この状況を放置すれば、数年後には板厚の減少により、耐荷力不足となる箇所があることが判明した。そこで、補修塗装仕様の選定としては、腐食進行が原因での耐候性鋼橋梁の補修塗装仕様に関しては知見がないことから、この当時の塗装仕様の中で、環境遮断性が最も高い C-3 塗装系⁹⁾が採用され、2006 年に補修塗装工事が実施された。この補修塗装工事からは、①異常さびが生成した耐候性鋼材の素地調整法にバキュームブラスト法を適用したが除さびに難航した。②素地調整品質が十分に確保できなかったため、有機ジンクリッチペイント塗布後 1 日で、塗布面からさびの発生が見られた。③補修塗装から 1 年後に、素地調整が十分に出来なかった箇所にさびの発生が確認された等の知見が得られている²⁴⁾。

延岡南道路門川橋は、宮崎県太平洋沿岸部の離岸距離約 1km に 1989 年に架設された裸使用の耐候性鋼橋梁で、架設 4 年後の 1993 年の詳細調査で全面的に層状剥離さびが確認された。この経年結果と、飛来塩分量が 0.4mdd と無塗装耐候性鋼橋梁の適用できる環境でないことから、塗装仕様に変える必要があるとの結論にいたった。3 種（ディスクサンダー＋シンナー拭き取り）と 1 種（ガーネットブラスト処理）の素地調整で補修塗装を行っている。防食

下地には有機ジンクリッチペイントを、上塗りにポリウレタン樹脂塗料を適用したC-2塗装系⁹⁾が採用され、現場施工が実施された²⁵⁾。補修塗装した門川橋は、約10年経過した実橋の追跡調査（2007年）を行っている。この調査は、3種と1種の素地調整の違いによる補修塗装の耐久性を確認することを目的に実施された。調査結果より、3種の素地調整での補修塗装では、塗膜下のさびの影響から、1種の素地調整での補修塗装を行う場合と比較し、耐久性の面でかなり劣ることが判る。無塗装耐候性鋼橋梁の補修塗装は残存するさびの影響を考え、塗装の防食性能を維持するために1種に相当する素地調整が必要であることが判り、耐候性鋼橋梁の適切なメンテナンスにおいて、部分的な補修塗装はこれまで以上に必要となると結論づけている²⁶⁾。

塗装以外の防食法（耐候性鋼、溶融亜鉛めっき、金属溶射）が異常腐食を起こした場合の補修方法を確立するため、土木研究所と民間6社とで「鋼橋防食工の補修方法に関する共同研究」が2006年～2011年の5年間実施された。この共同研究の中で無塗装耐候性鋼橋梁の補修方法についての合理的な劣化・不具合の判定方法と適切な補修方法が検討された。共同研究の結果から、耐候性鋼橋梁に生じる孔食内のさびや固着さびは、動力工具処理では除去できなく、ブラスト処理のみでも完全には除去ができないことが確認された⁸⁾。

本研究では、前述の結果を踏まえ、耐候性鋼橋梁に生じた強固なさびや孔食内に残存するさびを除去することにより、良好な素地調整品質を確保できる具体的な素地調整法を検討し、異常さびが生じた無塗装耐候性鋼橋梁における防食補修法の確立を目指す。

1. 3 本論文の内容と構成

本論文の内容と構成を図-1.4 に示す。本論文は8章で構成され、その概要は以下の通りである。

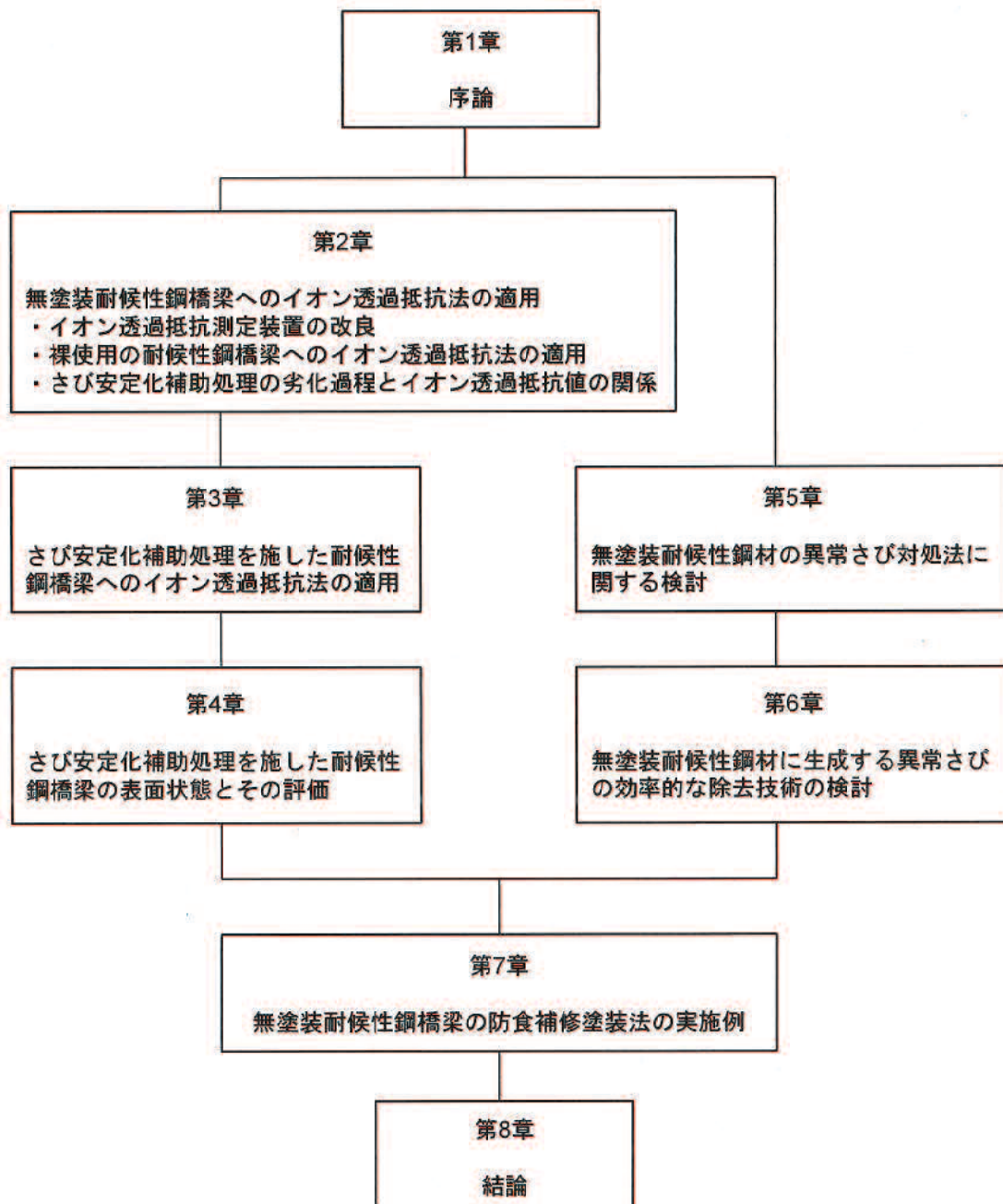


図-1.4 本論文の内容と構成

【第1章 序論】

本研究の背景と既往の研究の現状とその課題から本研究の目的を明確にするともに、論文の内容と構成を説明する。

【第2章 無塗装耐候性鋼橋梁へのイオン透過抵抗法の適用】

裸使用の耐候性鋼曝露材のさび状態を評価可能なイオン透過抵抗法に着眼した。しかしながら、既存のイオン透過抵抗測定装置の使用環境は、室内での使用が主体で、測定範囲も裸使用の耐候性鋼材のさび状態の評価が可能な抵抗領域までであった。そこでまず、測定範囲としては、P+T処理材の初期被膜が持つ高抵抗領域の抵抗測定を可能にするとともに、現場適用性の向上を実現するための改良を試みる。つぎに、改良したイオン透過抵抗装置を用いて、明らかになっていない裸使用の耐候性鋼材のイオン透過抵抗法とさび外観評価との整合性の確認を被検者テストという手法で検証する。また、既設の裸使用の耐候性鋼橋梁の評価を実際にイオン透過抵抗法から得られるI評点の領域区分で評価して、その有用性を検証する。さらに、さび安定化補助処理を施した耐候性鋼材の防食機能の劣化、腐食評価に、イオン透過抵抗測定が有用であるかも検証する。

【第3章 さび安定化補助処理を施した耐候性鋼橋梁へのイオン透過抵抗法の適用】

P+T処理材が風化・消失して部位別に様々な劣化挙動を示すにいたった模擬橋梁試験体を用いてP+T処理材の防食機能の劣化、腐食評価に関する基礎データを集積することを試みた。実構造物に不具合が発生した場合の対応措置を適確に把握するために、イオン透過抵抗法を活用した非破壊評価法で、通常であれば破壊試験をしなければ得られない被膜劣化機構や被膜下での腐食機構までも推定可能にしようという試みである。P+T処理材は、長期的には風化・消失し、さびに置換し、保護性さびが形成するとされている。しかしながら、P+T処理材を塗布後の処理被膜の風化や紫外線による防食機能の劣化過程を経て保護性さびに置き換わる過程を系統的に観察した例は少ない。

本研究では、前述した破壊試験である被膜断面観察結果と非破壊試験であるイオン透過抵抗法との関係を明確にすることで、P+T処理材の防食機能の劣化、腐食状態の推定を可能とする。また併せて、被膜の表面外観と断面観察から、P+T処理材の防食機能の劣化から保護性さびへ置き換わる過程の検証も試みた。

【第4章 さび安定化補助処理を施した耐候性鋼橋梁の表面状態とその評価】

P+T 処理材の防食機能の劣化、腐食評価では、目視外観評価基準を用いるのが原則である。しかし、防食機能の劣化が進んだ場合、処理被膜の風化、消失が不均一であるため、その表面の被膜劣化やさびの保護性を目視外観評価基準だけで判定するには、評価者が十分に熟練していることが求められる。熟練度の低い者が評価するとバラツキが生ずるので、定量的な方法が望まれる。

本研究では、既に裸使用の耐候性鋼橋梁の詳細調査に適用しているイオン透過抵抗法やさび安定化補助処理への適用を検討する。併せて、現状のさび安定化補助処理の詳細調査における目視外観評価では、評価の前に行う前処理の実施の必要性が論じられていないことから、前処理の効果を検証し、適切な前処理方法について検討する。

【第5章 無塗装耐候性鋼材の異常さび対処法に関する検討】

鋼構造物の防食の基本は、ブラスト法により完全に塩分を含むさびを除去する素地調整を行い、塗装を施すことが理想ではあるが、簡易な方法でさびの生成速度を抑制する技術の開発も必要である。

本研究では、飛来塩分量や凍結防止剤の散布など、異常さびの原因が排除できない場合の塗装以外の対処法として、高圧水洗処理とさびの除去処理を取り上げる。まず、異常さびの対処法を検証するための試験材の生成方法について説明し、次に、原因が排除されていないことを想定し、塩水散布による加速試験により、各種の対処法および対処の組み合わせによる効果について検討する。

【第6章 無塗装耐候性鋼材に生成する異常さびの効率的な除去技術の検討】

従来から素地調整に用いられている動力工具では、耐候性鋼材に生じた異常さびが強固なため、容易に良質な素地調整品質は得られない。この原因は、さびの緻密性や密着性を高めるために耐候性鋼材に合金元素が添加されていることにある。

本研究では、補修塗装における素地調整処理については、強固さびを除去可能な研削工具、研削技術が必要であると考えた。そこで、市販の動力工具で高速回転が可能なダイヤモンド工具を開発し、耐候性鋼材に生成した強固なさびの除去を試みる。また、実工事でダイヤモンド工具の適用性の確認も合わせて行う。この適用試験の結果から得られた課題を考慮して、既存ダイヤモンド工具に改良を試みる。さらに、改良したダイヤモンド工具を他の市販ダイヤモンド工具と耐久性、表面粗さ、騒音を比較することで、補修用一次素

地調整工具としての有効性を検討する。

【第7章 無塗装耐候性鋼橋梁の防食補修塗装法の実施例】

異常さびが発見された場合の処置は、先ず発生原因を的確に把握し、その原因を排除することが基本であるが、原因の排除が困難な場合は、補修塗装を検討することになる。補修塗装については、現時点で耐久性が高いと推奨されているRc-I塗装系を準用し、塗装面の付着塩分量を $50\text{mg}/\text{m}^2$ 以下とすべきと提案されている。しかしながら、耐候性鋼材に生成した強固なさびの除去は容易ではなく、素地調整品質の確保の方策は確立されていない。また、素地調整後の付着塩分量を $50\text{mg}/\text{m}^2$ 以下にすることは、塗装面については、水洗やスチーム水洗による方法が示されているが、耐候性鋼材のさび面についての具体的方策は示されていない。

本研究では、無塗装耐候性鋼橋梁の補修塗装にRc-I塗装系を適用するための補修用素地調整とさび中に内在する塩分の除去方法を検討し、実橋梁へ適用可能な補修塗装の方策を提案する。

【第8章 結論】

本研究で得られた成果を統括し、今後の展望と課題を述べる。

第 1 章の参考文献

- 1) (社)日本鋼構造協会：テクニカルレポート No.73「耐候性鋼橋梁の可能性と新しい技術」，2006.
- 2) (社)日本橋梁建設協会：耐候性鋼橋梁実績資料第 18 版，2013.
- 3) 山口栄輝，中村聖三，廣門公二，森田千尋，園田佳巨，麻生稔彦，渡辺浩，山口浩平，岩坪要：九州・山口地区における耐候性鋼橋梁の実態調査，土木学会論文集 A，Vol. 62，No.2，pp.243-254，2006.
- 4) 三木千寿，市川筋司：現代の橋梁工学，理数工学社，2004.
- 5) (社)日本道路協会：鋼道路橋塗装・防食便覧，2005.
- 6) (独)北海道開発土木研究所，(社)日本橋梁建設協会，(社)日本鉄鋼連盟：無塗装耐候性鋼橋の劣化判定基準法に関する研究報告書，2004.
- 7) 松崎靖彦，大屋誠，安食正太，武邊勝道，麻生稔彦：さび安定化補助処理された耐候性鋼橋梁の腐食実態と評価に関する一考察，土木学会論文集 F，Vol.62，No.4，pp.581-591，2006.
- 8) (独)土木研究所：鋼橋防食工の補修方法に関する共同研究報告，第 414 号，2010.
- 9) (社)日本道路協会：鋼道路橋塗装便覧，1990.
- 10) (社)日本鋼構造協会：テクニカルレポート No.86「耐候性鋼橋梁の適用性評価と防食予防保全」，2009.
- 11) 磯光夫，勝俣盛，安江哲，三田村浩，池田憲二，藤野陽三：橋梁洗浄に関する北海道での取り組みと米国における実態調査，橋梁と基礎，Vol.38，pp.29-33，2004.
- 12) 原修一，三浦正純，佐久間智，倉本修：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 3) 一水洗によるさび性状の変化一，土木学会第 58 回年次学術講演会，CS1-024，pp.47-48，2003.
- 13) 原修一，三浦正純，内海靖，藤原俊明，山本雅貴：高圧水洗のさび性状及び腐食速度に及ぼす影響 一凍結防止剤の散布される耐候性鋼橋梁における桁水洗の腐食抑制効果(2)一，材料と環境，Vol.54，pp.344-349，2005.
- 14) 紀平寛，塩谷和彦，幸英昭，中山武典，竹村誠洋，渡辺祐一：耐候性鋼さび安定化評価技術の体系化，土木学会論文集，No. 745/1-65，pp.77-87，2003.
- 15) 紀平寛：耐候性鋼上の安定さび形成状況評価と診断，材料と環境，Vol.48，pp.697-700，1999.
- 16) 鹿島和幸，岸川浩史，幸英昭，原修一，神谷光昭：耐候性鋼さび層の安定化評価法とその実造物への適用，材料と環境 1999，A-107，pp.25-28，1999.

- 17) 鹿島和幸, 原修一, 岸川浩史, 幸英昭: 耐候性鋼さび層の電位による保護性評価, 材料と環境, Vol.49, pp.15-21, 2000.
- 18) 佐藤雅之, 中野正則, 安波博道, 市川和臣, 中島和俊: さび安定化補助処理が施された耐候性鋼橋梁の外観評価と腐食実態, 土木技術資料 53-7, pp.58-63, 2011.
- 19) 境昌宏, 長谷部 智久, 美馬 大樹, 西 弘明, 小室 雅人, 岸 徳光: 30 年以上経過した表面処理仕様耐候性鋼橋梁の腐食調査, 第 58 回材料と環境討論会, B-109, pp.109-112, 2011.
- 20) 境昌宏, 長谷部智久, 美馬大樹, 西弘明, 小室雅人, 岸徳光: 30 年以上経過した表面処理仕様耐候性鋼橋梁の腐食調査, 材料と環境, Vol.61, pp.161-165, 2012.
- 21) 国土交通省東北地方整備局: 東北地整耐候性橋梁の補修の手引き (案), 2011.
- 22) 阪神高速道路公司: 耐候性橋梁の腐食損傷補修要領, 2011.
- 23) 磯光夫, 勝俣膨, 越後滋, 菅原登志出, 安江哲, 藤野陽三: 橋梁の付着物調査と洗浄技術の実用化土木学会論文集 F, Vol. 66, No. 2, pp.220-236, 2010.
- 24) 湯山真一, 宮本太郎: 美浜大橋における耐候性鋼材の塗装による補修工事, 第 31 回鉄構塗装技術討論会発表予稿集, pp.119-126, 2008.
- 25) 奥野博敏: 延岡南道路門川橋の腐食対策劣化した耐候性鋼材の補修と無塗装仕様の今後の課題, ハイウェイ技術, No.12, pp.98-106, 1998.
- 26) 酒井修平, 中村和己, 浜崎智洋, 前川晶三, 西本悟: 耐候性鋼橋梁の補修塗装の実橋調査: 土木学会第 63 回年次学術講演会, 6-115, pp.229-230, 2008.

第2章

無塗装耐候性鋼橋梁への イオン透過抵抗法の適用

第2章

無塗装耐候性鋼橋梁へのイオン透過抵抗法の適用

2. 1 概要

イオン透過抵抗測定は、電気化学的交流インピーダンス法を用いてさび層のイオン透過抵抗値を測定する手法である¹⁾。紀平らは、イオン透過抵抗測定が、裸使用の耐候性鋼曝露材の保護性さびの生成状態の評価法として有用であるとの見解を報告している^{2), 3), 4)}。イオン透過抵抗法とは、横軸にさび厚値、縦軸にイオン透過抵抗値をとり、さびの状態を領域区分する方法である。この領域区分から得られる評点をⅠ評点と呼ぶ⁵⁾。しかしながら、これらの既往の研究では、イオン透過抵抗法とさび外観評価⁶⁾との関係の明確化やイオン透過抵抗法の実橋梁への適用性の検証には至っていない。また、無塗装耐候性鋼橋梁の約70%を占めるP+T処理材の防食機能の劣化、腐食評価にイオン透過抵抗測定を適用するには、P+T処理材の初期被膜が持つ高抵抗領域の抵抗測定が必須である。さらに、既存のイオン透過抵抗測定装置は、室内で使用するためのものであり、現場で適用するためには種々の課題を解決する必要があった。

本研究では、裸使用の耐候性鋼曝露材のさび状態を評価可能なイオン透過抵抗法に着眼した。しかしながら、既存のイオン透過抵抗測定装置の使用環境は、室内での使用が主体で、測定範囲も裸使用の耐候性鋼材のさび状態の評価が可能な抵抗領域までであった。そこでまず、測定範囲としては、P+T処理材の初期被膜が持つ高抵抗領域の抵抗測定を可能にするとともに、現場適用性の向上を実現するための改良を試みる。つぎに、改良したイオン透過抵抗装置を用いて、明らかになっていない裸使用の耐候性鋼材のイオン透過抵抗法とさび外観評価との整合性の確認を被検者テストという手法で検証する。また、既設の裸使用の耐候性鋼橋梁の評価を実際にイオン透過抵抗法から得られるⅠ評点の領域区分で評価して、その有用性を検証する。さらに、さび安定化補助処理を施した耐候性鋼材の防食機能の劣化、腐食評価に、イオン透過抵抗測定が有用であるかも検証する。

2.2 イオン透過抵抗測定装置の改良

既存のイオン透過抵抗測定装置は、 $200\text{M}\Omega$ までの測定が可能であるため、裸使用のさびの評価を行うには十分な測定範囲である⁷⁾。しかしながら、この装置では、P+T 処理材の被膜が健全な状態の高抵抗領域の抵抗測定することができない。そこで、既存のイオン透過抵抗測定装置は、P+T 処理材の初期被膜が持つ高抵抗領域（最大 $20\text{G}\Omega$ ）の抵抗測定を可能とする装置へ改善する必要がある⁸⁾。イオン透過抵抗測定装置は、 $1\text{G}\Omega$ 以上の高抵抗領域の抵抗測定となると、絶縁物の抵抗を測定するのに近い測定条件が要求される。そこで、イオン透過抵抗測定装置に生じる可能性が高い漏れ電流対策が必須となる。この具体的な対策としては、①エレクトロメーターを超高入力インピーダンス対応型に変更、②基板を超高入力インピーダンス対応型に変更を実施した。また、改良したイオン透過抵抗測定装置は、外部ノイズの影響が懸念されたが、実験室での簡易遮蔽ボックス装着の有無によるイオン透過抵抗値の変動水準の検証や、現場での実証測定などを経て、外部ノイズの影響は工学的に無視できることを確認した^{9) 10) 11)}。これらの改良の結果として、P+T 処理材の初期被膜の高抵抗領域（最大 $20\text{G}\Omega$ ）が測定できる装置となった。

イオン透過抵抗測定装置の測定概念図を図-2.1 に、イオン透過抵抗測定装置のさび層あるいは被膜層の透過回路図を図-2.2 に示す¹²⁾。

イオン透過抵抗測定装置の室内仕様から現場仕様への改良内容を下記に示す。

(a) 小型化・軽量化

プリント基板を IC 基板に、ジュラルミンハードケースを革製のソフトケースに、電池サイズ・数量を単一電池 4 本から単三電池 4 本に変更するとともに、プローブの小型化を実現した。これらの改良の結果、総重量を従来の約 3.5kg から約 1.5kg へと小型化・軽量化を達成した（図-2.3）。

(b) イオン透過抵抗測定装置プローブの電解液染み出し程度の軽減と測定時間の短縮

電解液には、 $0.1\text{M-Na}_2\text{SO}_4$ 水溶液を用いており、電解液が水溶液であるため、漏れ易く、染み出し程度の調整が困難であった。そのためプローブ内に充填した電解液は、1 回の充填で約 10 測定点程度しか測定できず、充填ごとにゼロ点校正のためのキャリブレーションも必要であり、非効率な工程であった。

そこで、電解液を漏れ難くするための方策として、① $0.1\text{M-Na}_2\text{SO}_4$ 水溶液と吸水性高分子を混合することにより、水溶液より漏れにくい $0.1\text{M-Na}_2\text{SO}_4$ ゲル状電解液を考案した（図-2.4）。②プローブ先端部からの $0.1\text{M-Na}_2\text{SO}_4$ ゲル状電解液の漏れ防止

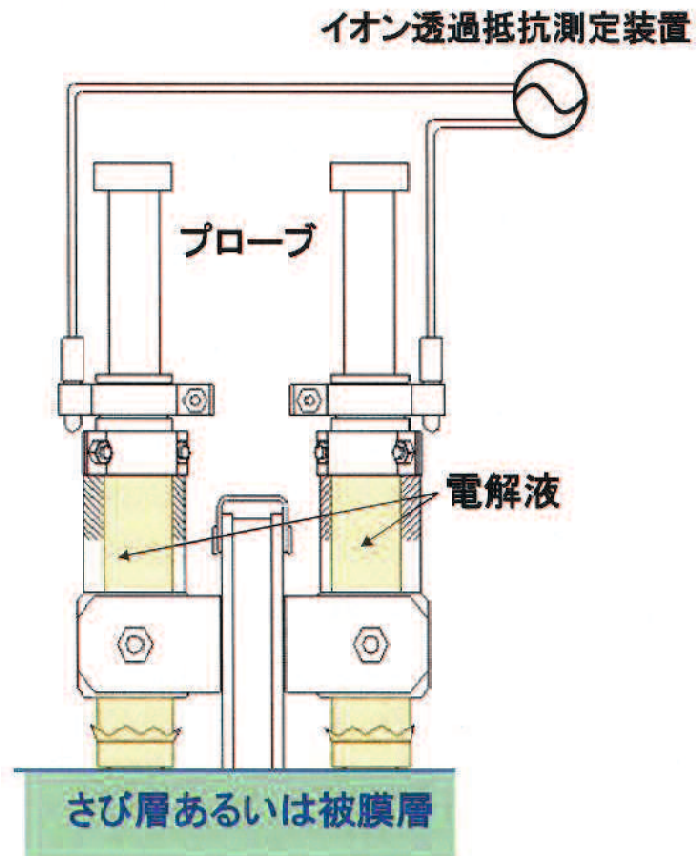


図-2.1 イオン透過抵抗測定装置の測定概念図

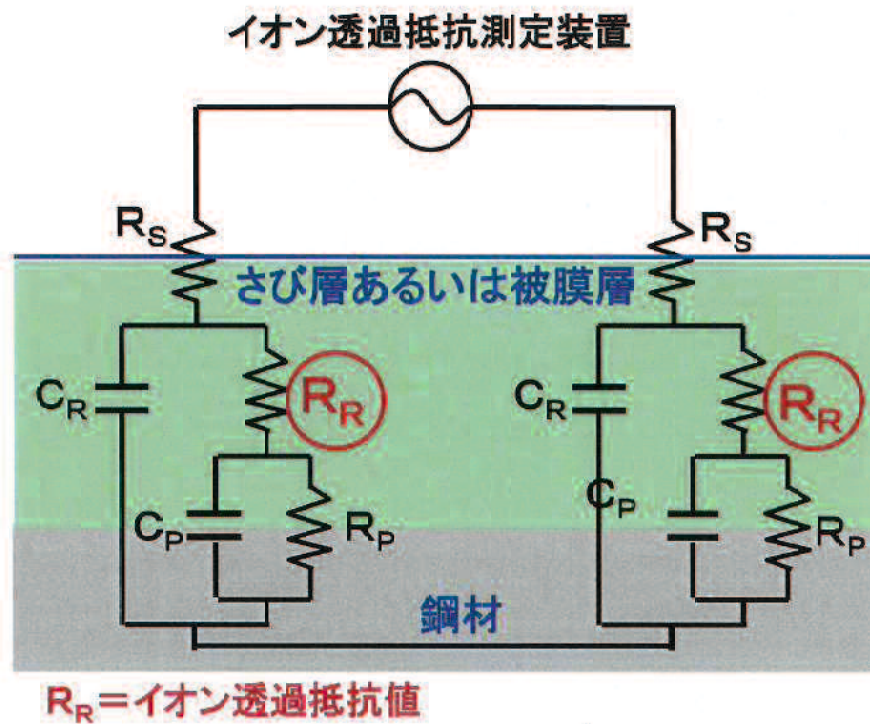


図-2.2 イオン透過抵抗測定装置のさび層あるいは被膜の透過回路図

として、漏れを調整できる最適ナイロンメッシュを選定することで、適度な電解質の漏れ出し程度を調整できた。電解液を 0.1M- Na_2SO_4 水溶液から 0.1M- Na_2SO_4 ゲル状電解液に変更した結果、1 回の充填で約 100 測定点の測定が可能となった。その結果、1 測定点あたりの作業時間は、改良前が約 210 秒かかっていたのに対し、改善後は約 50 秒で完了させることが可能になり、現場測定効率が、約 4 倍以上向上した(図-2.5)。

- (c) プローブ先端部にある電極材質（白金メッシュから金線）と先端構造（ガーゼからナイロンメッシュ）を変更することで、プローブ固有抵抗値を 1/10（約 $500\Omega \sim 900\Omega$ ）を約 $50\Omega \sim 90\Omega$ ）にした。その結果、低抵抗値の測定精度が向上した（図-2.6）。

改良したイオン透過抵抗測定装置と既存のイオン透過抵抗測定装置の測定値の整合性を、裸使用の曝露試験片と P+T 処理材の曝露試験片のイオン透過抵抗値を測定することで検証を行った。この検証結果は、図-2.7 に示す通り既存のイオン透過抵抗測定装置と改良したイオン透過抵抗測定装置のイオン透過測定値には一対一の正の相関がみられ、整合性があると確認した¹¹⁾。改良したイオン透過抵抗測定装置による測定状況外観を写真-2.1 に示す。

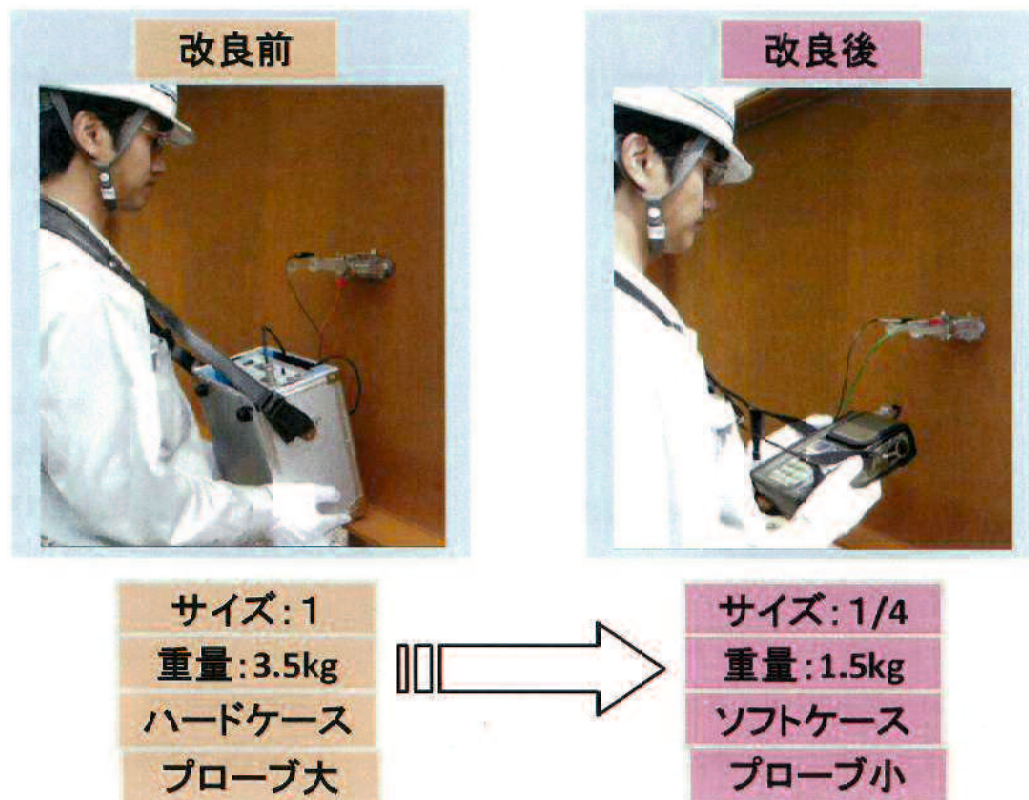


図-2.3 イオン透過抵抗測定装置の小型化と軽量化

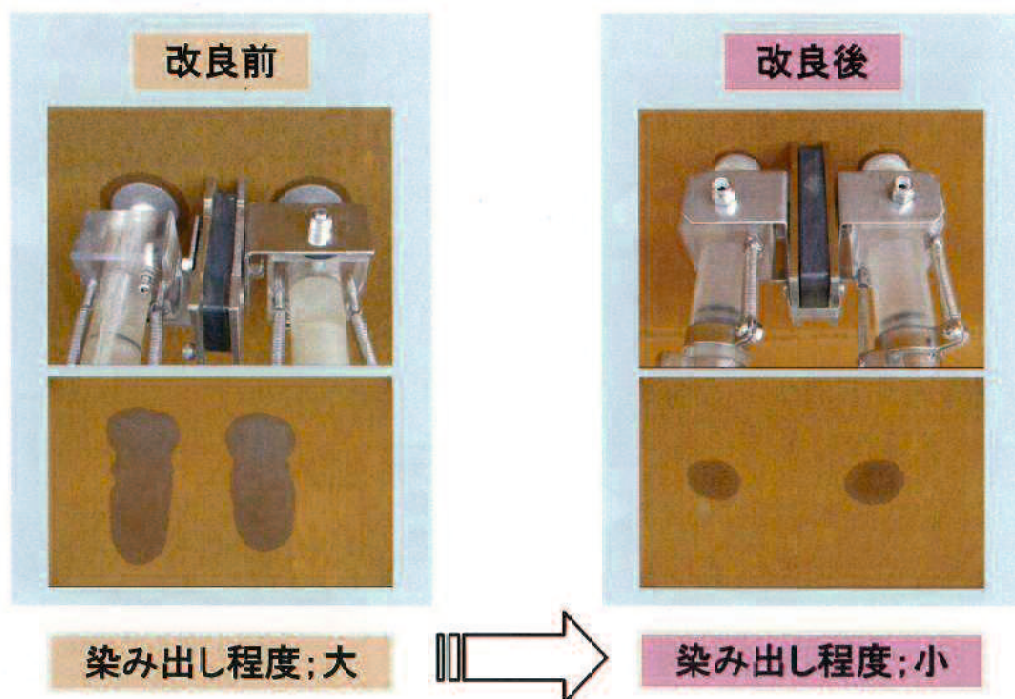


図-2.4 イオン透過抵抗測定装置の電解液の染み出し程度の改良

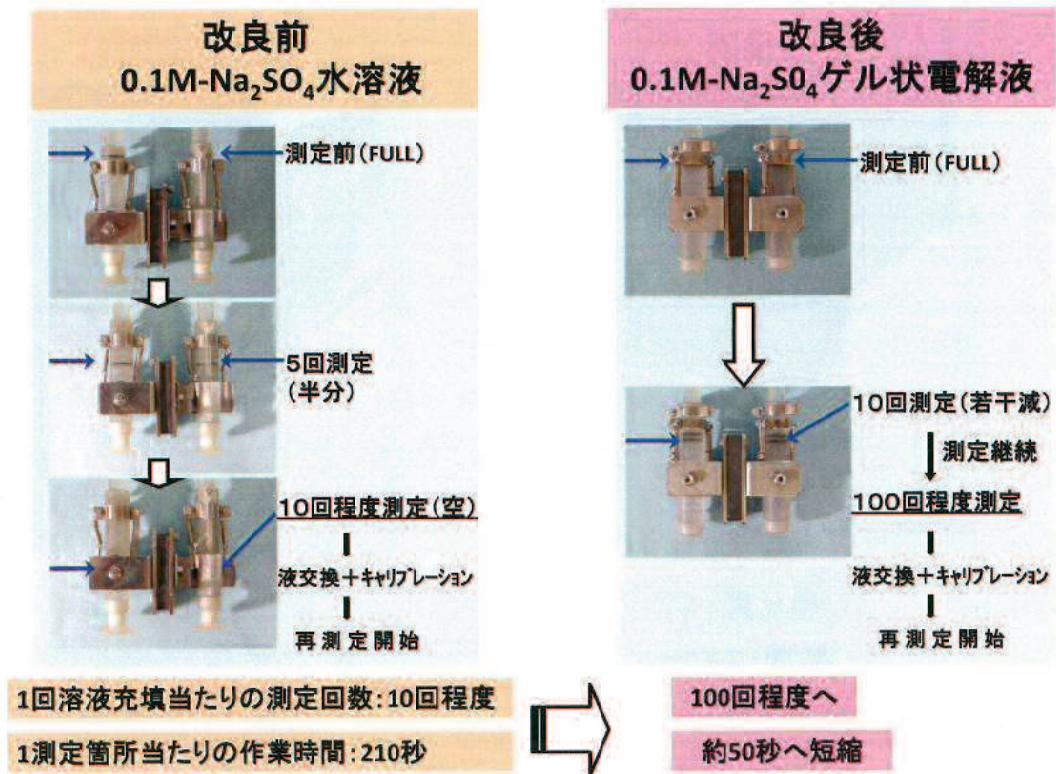


図-2.5 イオン透過抵抗装置の現場測定時間の短縮

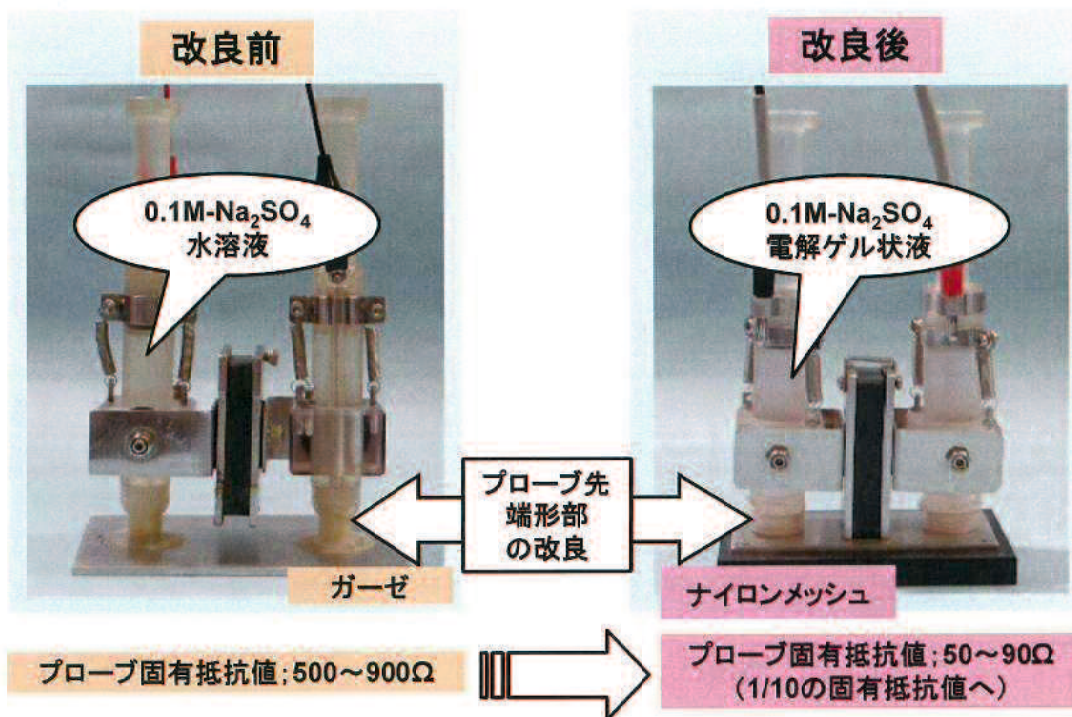


図-2.6 イオン透過抵抗装置のプローブ固有抵抗値の低減

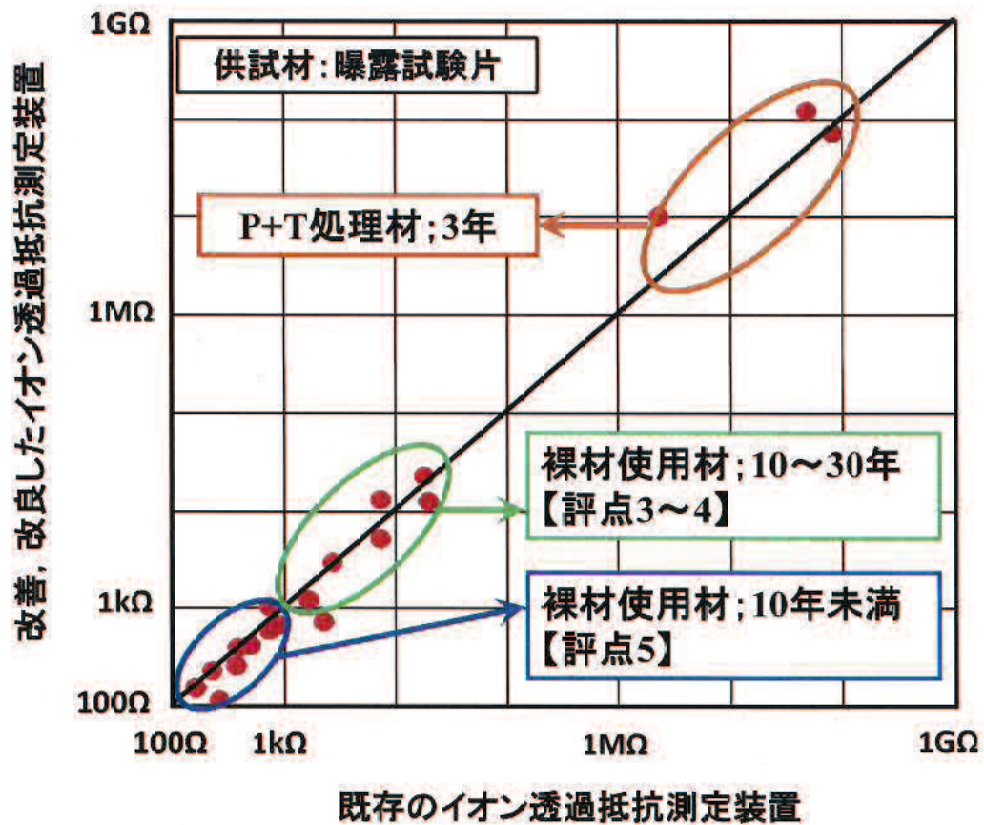


図-2.7 既存のイオン透過抵抗装置と改良したイオン透過抵抗測定装置の整合性



写真-2.1 改良したイオン透過抵抗測定装置による測定状況外観

2.3 裸使用の耐候性鋼橋梁へのイオン透過抵抗法の適用

2.3.1 被験者テスト

イオン透過抵抗法⁵⁾とさび外観評価⁶⁾との整合性の確認は、被験者テストを用いて行った。被験者テストとは、経験年数の異なる5名の評価者に、各種曝露試験片のさび外観評価から評点付を行う試験である。具体的には、①同一試験片のイオン透過抵抗値とさび厚測定値からI評点を求めた。②各試験片について評価者ごとにさび外観評点とイオン透過抵抗法から得られるI評点とのズレを求め、③その合計点を表-2.1の被験者テスト結果の下段にまとめた。

被験者テストの結果より、イオン透過抵抗法から得られるI評点からのズレ合計点は、経験年数に比例して小さくなる。このことにより、さび外観評価するには経験と訓練が必要であることが再確認された。また、熟練した評価者のさび外観評価とイオン透過抵抗法から得られるI評点の領域区分の評価は、ほぼ一致することことからイオン透過抵抗法は、裸使用の耐候性鋼材の評価法として有用であることが確認できた¹³⁾。ここで、被験者テストでI評点からのズレが大きかった事例についてその原因も含め、解析した結果を示す。ズレの合計が12と最も大きかったのは、写真-2.2(a)に示す事例(8)で、この事例はさびの色調とさび形状でズレを生じたものである。写真-2.2(b)に示す事例(2)は、さびの形状でズレを生じたものである。写真-2.2(c)に示す事例(5)は、さび色調でズレを生じたものである。

以上の結果から、さび外観評価は、官能検査の一つであることを鑑みると、人間感性やことばの解釈の差異に起因して、評点に大きな差異が生じてしまう。熟練した評価者は、機器を用いなくても正しい評点をつけられる。経験の浅い評価者の場合はそうもいかない。誤った評点付けに起因して、誤った維持管理がなされないよう、定量的なイオン透過抵抗法による評価が必要と考えている。

表-2.1 被験者テスト結果

曝露試験片評価事例	経験年数別さび外観評点付結果					さび外観評点とI 評点とのズレ合計 【事例毎の比較】	イオン透過抵抗測定法 によるI 評点
	A氏 (10年)	B氏 (5年)	C氏 (2年)	D氏 (1年)	E氏 (0年)		
事例(1)	5	5	4	4	4	4	5
事例(2)※)	3	2	3	3	3	4	2
事例(3)※)	2	1	1	2	1	3	2
事例(4)	5	5	5	4	4	2	5
事例(5)	5	5	4	4	4	3	5
事例(6)	4	4	4	3	4	1	4
事例(7)	5	4	5	5	4	2	5
事例(8)	4	3	2	2	2	12	5
さび外観評点と I 評点とのズレ合計点	2	4	7	8	10		

※) 事例(2), (3)のみ塩水散布試験【他事例は大気曝露試験】

【事例(8)】最もズレが大きかった事例(差異:12)



- ・I 評点 : I-5
- ・さび外観評点:
(A氏 : 4) ...さび色調(黒色)で4とした。
(B氏 : 3) ...まだらな色に惑わされて3とした。
(C, D, E氏 : 2) ...まだらな色をうろこ状さびと思い2とした。

(原因)さび色調+さび形状によるズレ

(a) 事例(8)の外観写真

【事例(2)】ズレが大きかった事例(差異:4)



- ・I 評点 : I-2
- ・さび外観評点:
(B氏 : 2) ...一致。
(A, C, D, E氏 : 3) ...うろこ状に剥離していないので3としてしまった。

(原因)さび形状によるズレ

(b) 事例(2)の外観写真

【事例(5)】ズレが大きかった事例(差異:3)



- ・I 評点 : I-5
- ・さび外観評点:
(A氏, B氏 : 5) ...一致。
(A, D, E氏 : 4) ...黒っぽいさび色調をしていたので4としてしまった。

(原因)さび色調によるズレ

(c) 事例(5)の外観写真

写真-2.2 被験者テストの代表事例の外観写真

2. 3. 2 裸使用の耐候性鋼橋梁へのイオン透過抵抗法の適用

裸使用の耐候性鋼橋梁へのイオン透過抵抗法の適用性検討は、国内山間部に位置する供用後 18 年経過した裸使用の耐候性鋼橋梁の腐食評価を行い検証した。この耐候性鋼橋梁の測定箇所は、図-2.8 に示す桁断面模式図に①～⑫まで記号を付けて表している。イオン透過抵抗法による評価結果は、図-2.9 に示した。評価結果としては、図-2.9 より、外桁下フランジ上面の②、③および⑪は、I-4 領域にあり、顕著な保護性さびが生成されていると判定され、これは写真-2.3(a)の外桁写真からも明らかである。この部位に、特に良い保護性さびが生成した理由としては、雨水による洗浄効果によるものと考えられる。また、内桁の④、⑤（写真-2.3(b)）と外桁の⑩、⑫も I-4 領域にあり、保護性さびが生成されていると判定された。①、⑥、⑦および⑨は、I-5 領域にあり、さび厚が 18 年経過しても 200 μm 以下であることから未成長さび(A)と判定される。外桁下フランジ下面の③は、唯一 I-3 領域にあるが、18 年経過してさび厚も 250 μm と厚くないことから、すぐに要観察状態を示すさびに移行することは考えにくく、未成長さび(B)と判定した。18 年経過した裸使用の耐候性鋼橋梁をイオン透過抵抗法で判定した結果は、良好なさびが生成され、健全な状態にあると判定できた。

以上の結果から、イオン透過抵抗法から得られる I 評点の領域区分と実橋梁のさびの状態が良く一致していることがわかり、イオン透過抵抗法から得られる I 評点の領域区分が、裸使用の耐候性鋼橋梁のさびの状態の評価に有用であることが確認された。

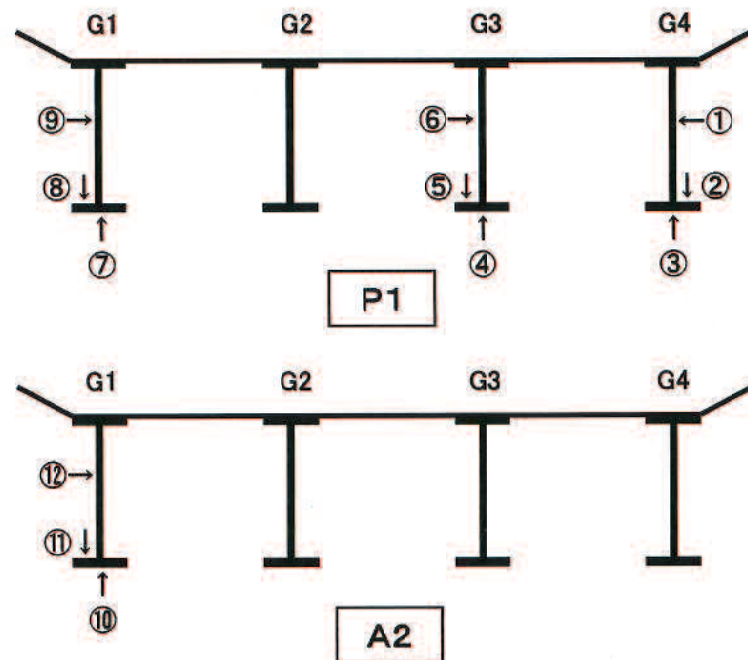


図-2.8 供用後18年経過した裸使用の耐候性鋼橋梁における測定箇所

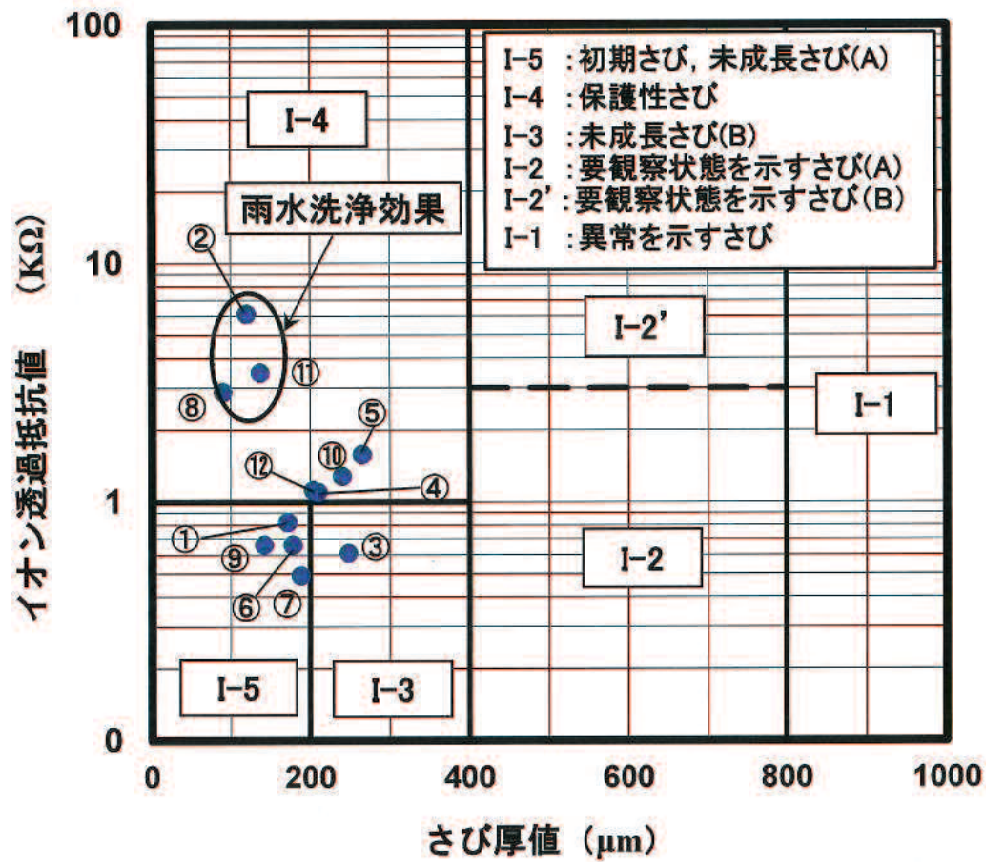


図-2.9 供用後18年経過した裸使用の耐候性鋼橋梁におけるイオン透過抵抗法評価結果



(a) 外桁⑧下フランジ上面, ⑨ウェブ面
の外観



(b) 内桁⑤下フランジ上面, ⑥ウェブ面
の外観

写真-2.3 供用後 18 年経過した裸使用の耐候性鋼橋梁の外観

2. 4 さび安定化補助処理の劣化過程とイオン透過抵抗値の関係

供試材は、新潟県糸魚川市青海町（飛来塩分量 0.244mdd）にて水平開放条件で最長 5 年間曝露したさび安定化補助処理を施した耐候性鋼材である。さび安定化補助処理の種類は、P 処理材（A 材、B 材）と P+T 処理材（C 材）である。さび安定化補助処理材を施した耐候性鋼材のイオン透過抵抗値の経年変化を図-2.10 に示す。また、さび安定化補助処理を施した耐候性鋼材の曝露 5 年目の外観を図-2.11 に示す。

図-2.10 と図-2.11 より、さび安定化補助処理を施した曝露試験片のイオン透過抵抗値は、P 処理材（A 材：13 μm ）では、曝露年数が経過するに従って P 処理材の被膜が劣化（外観評点：5-y）し、イオン透過抵抗値が低下することがわかった。P 処理材（B 材：20 μm ）でも、曝露年数が経過するに従って P 処理材の被膜が劣化（外観評点：5-x）し、イオン透過抵抗値が低下することがわかった。これらに対して、P+T 処理材（C 材：157 μm ）では、曝露年数が経過しても P+T 処理材の被膜には劣化が見られず（外観評点：A）、初期から 5 年経過してもイオン透過抵抗値に変化は見られなかった。

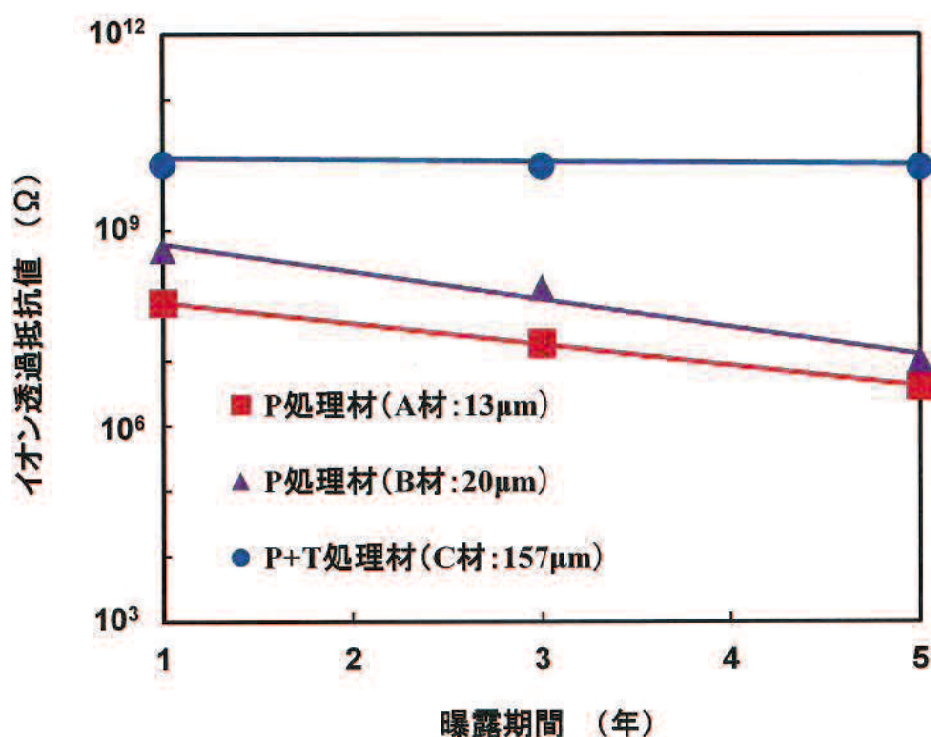


図-2.10 さび安定化補助処理を施した耐候性鋼材のイオン透過抵抗値の経年変化

P処理材 (A材: 13μm)	外観評点: 5-y
P処理材 (B材: 20μm)	外観評点: 5-x
P+T処理材 (C材: 157μm)	外観評点: A

図-2.11 さび安定化補助処理を施した耐候性鋼材の暴露5年目の外観

以上のことから、さび安定化補助処理を施した耐候性鋼材のイオン透過抵抗値は、被膜が劣化するとともに、イオン透過抵抗値が減少することから、被膜の防食機能の劣化、腐食評価にイオン透過抵抗測定が有用であることが確認できた。

2. 5 第2章のまとめ

裸使用の耐候性鋼曝露材のさび状態を評価可能なイオン透過抵抗法に着眼した。しかしながら、既存のイオン透過抵抗測定装置の使用環境は、室内での使用が主体で、測定範囲も裸使用の耐候性鋼材のさび状態の評価が可能な抵抗領域までであった。そこでまず、測定範囲としては、P+T 処理材の初期被膜が持つ高抵抗領域の抵抗測定を可能にするとともに、現場適用性の向上を実現するための改良を試みた。つぎに、改良したイオン透過抵抗装置を用いて、明らかになっていない裸使用の耐候性鋼材のイオン透過抵抗法とさび外観評価との整合性の確認を被検者テストという手法で検証した。また、既設の裸使用の耐候性鋼橋梁の評価を実際にイオン透過抵抗法から得られる I 評点の領域区分で評価して、その有用性を検証した。さらに、さび安定化補助処理を施した耐候性鋼材の防食機能の劣化、腐食評価に、イオン透過抵抗測定が有用であるかも検証した。

以上の検討した結果から得られた知見を下記に示す。

- (a) 既存のイオン透過抵抗測定装置は、改良によって、P+T 処理材の初期被膜が持つ高抵抗領域（最大 20GΩ）が測定できる装置となり、現場適用性も大幅に向上した。
- (b) 被験者テストから、熟練した評価者のさび外観評価とイオン透過抵抗法から得られる I 評点の領域区分の評価は、ほぼ一致することから、イオン透過抵抗法は裸使用の耐候性鋼材の評価法として有用であることが確認できた。
- (c) 熟練した評価者は、機器を用いなくても正しい評点をつけられるが、経験の浅い評価者の場合はそうも行かない。誤った評点付けに起因して、誤った維持管理がなされないよう、定量的なイオン透過抵抗法による腐食評価が必要と考えている。
- (d) 実橋梁の腐食評価結果より、イオン透過抵抗法から得られる I 評点の領域区分と実橋梁のさびの状態が良く一致していることがわかり、イオン透過抵抗法が裸使用の耐候性鋼橋梁のさびの状態の評価に有用であることが確認された。

- (e) さび安定化補助処理を施した耐候性鋼材のイオン透過抵抗値は、被膜が劣化するとともに、イオン透過抵抗値が減少することから、被膜の防食機能の劣化、腐食評価にイオン透過抵抗測定が有用であることが確認できた。

第2章の参考文献

- 1) Kihira, Ito, Murata : Quantitative Classification of Patina Conditions For Weathering Steel using a Recently Developed Instrument, Corrosion, Vol.45, pp.347-352, 1989.
- 2) 紀平寛：腐食計測法による耐候性鋼さび安定度診断, 溶接学会誌, Vol.63, No.6, pp.435-440, 1994.
- 3) 紀平寛：耐候性鋼上の安定化さび形成状況評価と診断, 材料と環境, Vol.48, pp.697-700, 1999.
- 4) 紀平寛, 宇佐見明：安定さびの工学的定義と耐候性鋼橋超長期耐久化への展開, 材料と環境, Vol.49, pp.10-14, 2000.
- 5) 紀平寛, 塩谷和彦, 幸英昭, 中山武典, 竹村誠洋, 渡辺祐一：耐候性鋼さび安定化評価技術の体系化, 土木学会論文集, No. 745/I-65, pp.77-87, 2003.
- 6) (社)日本鋼構造協会：テクニカルレポート No.73「耐候性鋼橋梁の可能性と新しい技術」, 2006.
- 7) 今井篤実, 立花仁, 紀平寛：耐候性鋼のさび環境遮断性能診断装置を用いた診断事例, 第24回防錆防食技術発表大会講演予稿集, 210, pp.107-110, 2004.
- 8) 今井篤実, 立花仁, 紀平寛：イオン透過抵抗測定法を用いた鋼構造物の診断(2)ー塗装鋼構造物への適用検討ー, 第28回鉄構塗装技術討論会予稿集, pp.89-90, 2005.
- 9) 今井篤実, 立花仁, 紀平寛：イオン透過抵抗測定法を用いた鋼構造物の診断(3)ー塗装劣化診断への適用検討ー, 第26回防錆防食技術発表大会講演予稿集, pp.133-136, 2006.
- 10) 今井篤実, 立花仁, 松本洋明, 紀平寛：鋼構造物の腐食診断と新しい補修塗装工法の提案(1)ーイオン透過抵抗法を用いた鋼橋の劣化診断ー, 第29回鉄構塗装技術討論会予稿集, pp.1-6, 2006.
- 11) 今井篤実, 立花仁, 松本洋明, 紀平寛：鋼構造物の腐食診断にむけたイオン透過抵抗法の適用, 防錆管理, Vol.51, No.5, pp.216-221, 2007.
- 12) 小島靖弘, 伊澤寛之, 今井篤実, 相賀武英：イオン透過抵抗測定法による鋼構造設備の腐食診断技術の開発, 平成24年度日本設備管理学会秋季研究大会論文集, C-1.3, pp.77-87, 2012.
- 13) 今井篤実, 立花仁, 相賀武英, 紀平寛：イオン透過抵抗測定法を用いた鋼構造物の診断(1)ーさび外観評点における問題点と本測定法による改善ー, 材料と環境講演集, pp.205-206, 2005.

第3章

さび安定化補助処理を施した耐候性鋼材への
イオン透過抵抗法の適用

第3章

さび安定化補助処理を施した耐候性鋼材への イオン透過抵抗法の適用

3. 1 概要

裸使用の耐候性鋼橋梁の維持管理においてさびの状態評価を行うにあたり、さび外観評価^{1), 2)}にあわせ、定量的に評価できるイオン透過抵抗法^{3), 4), 5)}を適用している。イオン透過抵抗法とは、イオン透過抵抗値とさび厚値の関係からさびの状態を定量的に区分評価する方法である。本研究では、このイオン透過抵抗法をさび安定化補助処理が施された耐候性鋼橋梁の防食機能の劣化、腐食評価に適用を可能にするのを目的とする。

さび安定化補助処理のほとんどを占めるP+T処理材の評価は、さび安定化補助処理の目視外観評価基準^{2), 3)}を用いるのが主流であるが、P+T処理材の防食機能の劣化が進んだ場合、処理被膜の風化、消失が不均一なため、正しい判定をするには、評価者に十分な熟練が求められる⁷⁾。そのため、裸使用の耐候性鋼橋梁の詳細調査に適用しているイオン透過抵抗法を、P+T処理材の防食機能の劣化、腐食評価へと応用展開し、裸使用と同等の判定精度を求めている。ただし、実橋梁で補修の可否を決めるための劣化評価を支えるバックデータが少ないのが実情である。

本研究では、P+T処理材が風化、消失して部位別に様々な劣化挙動を示すに至った模擬橋梁試験体を用いてP+T処理材の防食機能の劣化、腐食評価に関する基礎データを集積することを試みた。実構造物に不具合が発生した場合の対応措置を適確に把握するために、イオン透過抵抗法を活用した非破壊評価法で、通常であれば破壊試験をしなければ得られない被膜劣化機構や被膜下での腐食機構までも推定可能にしようという試みである。

P+T処理材は、長期的には風化、消失し、さびに置換し、保護性さびが形成するとされている。しかしながら、さび安定化補助処理を塗布後の処理被膜の風化や紫外線による防食機能の劣化過程を経て保護性さびに置き換わる過程を系統的に観察した例は少ない。

本研究では、処理被膜の表面外観と断面観察から、P+T処理材の防食機能の劣化から保護性さびへ置き換わる過程の検証も試みた。また、前述した破壊試験である被膜断面観察結果と非破壊試験であるイオン透過抵抗法との関係を明確にし、P+T処理材の防食機能の劣化、腐食状態の推定を可能とする。

3. 2 調査内容

3. 2. 1 模擬橋梁試験体

P+T処理材の防食機能の劣化、腐食評価に関する基礎データを作成するため、沖縄県内の海岸地帯に曝露されたP+T処理材を施した模擬橋梁試験体の調査を行った。模擬橋梁試験体は、複数種の耐候性鋼材で構成され、比較のための裸使用部分もある。今回は、JIS-SMA材部分のうち、裸使用およびP+T処理材の部分を調査対象とした。模擬橋梁試験体の概要を表-3.1に示す。この表より、当該の模擬橋梁試験体は、曝露年数14年、P処理膜にはブチラル樹脂、T処理膜にアクリル樹脂を施したP+T処理材であり、標準被膜厚は55 μm である。架設環境は、ISO9223大気環境の腐食性分類C5⁶⁾相当、低炭素鋼1年間の腐食減耗量が80 μm ～200 μm と厳しい腐食環境となっている。模擬橋梁試験体の外観は、写真-3.1 (a) に示すように、外桁にはさびの発生があるものの、P+T処理材被膜はかなり残存していた。この外桁での付着塩分量は6mg/m²～222mg/m²であった。これに対し写真-3.1(b)に示す内桁には、P+T処理材被膜も残存しているが、ウェブ面にはこぶ状さびの発生が多く見られ、特に下フランジ上面には、層状剥離さびの発生が観察された。降雨による水洗が期待できない内桁では、付着塩分量も522mg/m²～2,000mg/m²以上と高く、P+T処理材被膜の防食機能の劣化や腐食の進行が速いことが確認された。

3. 2 調査内容

表-3.1 模擬橋梁試験体の概要

橋梁名	模擬橋梁試験体
架設場所	沖縄県海岸地帯
架設年	平成10年(1998年)
曝露(試験)年数	14年
橋長	5.5m
橋梁形式	2主桁単純合成鉄桁
使用鋼材	JIS耐候性鋼, 高耐候性鋼
さび安定化補助処理材	ブチラール樹脂(P処理膜)／アクリル樹脂(T処理膜)複層型 (標準被膜厚=55μm)
架設環境	ISO9223大気環境の腐食性分類C5 ⁸⁾ 相当

表-3.2 調査項目と方法

項目	方法
外観観察	外観写真 さび外観評点(裸使用) 目視外観評価基準(さび安定化補助処理)
さび・被膜厚測定	電磁膜厚計による計測
イオン透過抵抗測定	イオン透過抵抗測定装置による計測
付着塩分測定	表面塩分計による計測
板厚測定	両球面マイクロメーターと超音波厚さ計による計測
コア材外観観察	外観写真
コア材断面偏光顕微鏡観察	金属顕微鏡による断面偏光顕微鏡写真
コア材断面EPMA面分析	X線マイクロアナライザによるFe, O, P, Si, Cl分析
こぶ状さび観察	デジタルノギスによるこぶ状さび寸法, 深さ計測

表-3.3 さび安定化補助処理を施した耐候性鋼橋梁の目視外観評価基準^{2), 6)}

さび・被膜の外観(例)				被膜部のさび状況 (%:1㎡程度範囲のさび面積率) ⁴			さび厚 ^{2,3)} (μm)	
				被膜にさびが見られない、または、被膜の下や中に僅かなさびが見られる。	x	y		z
					<3%	<30%		>30%
被膜の外観	正常	A	あきらかな変・退色なし	A				
		B	あきらかな変・退色あり	B				
さび部の外観	正常 ⁵⁾	5	腐食が進まず、薄いさび		5-x	5-y	5-z	<400
		4	微細で外観平均粒径1mm程度の均一なさび		4-x	4-y	4-z	<600
		3	微細で外観平均粒径が5mm程度のさび		3-x	3-y	3-z	
	要観察	2	外観粒径5～25mm程度のうろこ状さび		2-x	2-y	2-z	<1000
			外観直径25mm程度以下の小さなこぶ状さび ¹⁾		2-x(b)	2-y(b)	2-z(b)	
	異常	1	層状さび		1-x	1-y	1-z	>1000
			外観直径25mm程度を超える大きなこぶ状さび ¹⁾		1-x(b)	1-y(b)	1-z(b)	

注) 1. (b)はこぶ状さび(bumpy rust)であることを示す。

2. さび厚は目安としての参考値である。

3. 被膜の残留も考慮して、裸使用材の目安に200μmを加算した。

4. 被膜が無くなり全面がさびに置換した後は、裸使用材の基準にて評価し、1~5の評点で記述する。

5. 正常の判定は、さび発生後の経過期間が9年以上であることを前提とする。

3. 2. 2 調査項目と方法

模擬橋梁試験体を用いて実施した調査項目と方法を表-3.2に示す。P+T処理材の目視外観評価基準ごと、裸使用のさび外観評点ごとに、模擬橋梁試験体からコア抜きサンプル(以下、コア材)を採取した。写真-3.2に示す軟鋼用穴あけ機(LO-3000)を用い、できるだけさび・被膜が振動等で剥離しないように留意して、φ21mmのコア材を採取した。コア材は、外観写真撮影後に埋め込み研磨を行い、コア材断面の通常光および偏光顕微鏡観察、さらにコア材断面については、EPMA面分析を実施した。EPMA面分析の分析元素としては、Fe、O、P、Si、Crに、環境因子の影響を考慮してClを加えた6元素を選定した。また、これらコア材分析結果との比較のため、コア材採取近傍において、外観観察、さび・被膜厚測定、イオン透過抵抗測定、付着塩分測定、板厚測定を実施した。裸使用の外観観察は、さび外観評価¹⁾で5段階のさび評点付けを行い、P+T処理材の外観観察は、表-3.3に示す「さび安定化補助処理を施した耐候性鋼橋梁の目視外観評価基準^{2), 6)}」で評点付け



(a) 外観



(b) 内観

写真-3.1 模擬橋梁試験体の外観



写真-3.2 コア材採取状況



写真-3.3 こぶ状さび生成状況

を実施した。ここで、実施した外観観察、さび・被膜厚測定、イオン透過抵抗値は、測定の障害や誤診の原因となる浮き被膜、浮きさびおよび塵埃の堆積を除去する刷毛処理⁹⁾を実施してから測定を行った。表-3.3にこぶ状さび(b)なる記述がある。P+T処理材が塗布された一部の橋梁の箱桁下面や外桁の下フランジ上面にこぶ状さびが生じていたとの報告が

あるので^{10), 11)}, その評価を共通認識化するための分類枠である。こぶ状さびの生成条件等はまだ解明されていない。

今回調査対象とした P+T 処理材が施された模擬橋梁試験体に写真-3.3 に示すこぶ状さびが多数存在していたので、その性質を知るべく、こぶ状さびの寸法と腐食生成物除去後の腐食深さをデジタルノギスで計測した。

3. 3 調査結果

3. 3. 1 コア材とコア材近傍の調査結果

採取したコア材の断面偏光顕微鏡写真とコア採取箇所近傍の外観写真、さび・被膜厚、イオン透過抵抗値、イオン透過抵抗法から得られるI 評点、および14年間の板厚減少量の測定結果を表-3.4、表-3.5にまとめた。表-3.4には、裸使用の調査結果を、表-3.5には、P+T 処理材の調査結果を示した。

熟練者による外観評点とイオン透過抵抗法で判定したI 評点との整合性を確認するため、コア採取箇所近傍の裸使用におけるイオン透過抵抗法の評価結果を図-3.1(a)に、P+T 処理材におけるイオン透過抵抗法の評価結果を図-3.1(b)に示す。

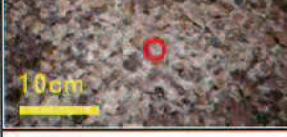
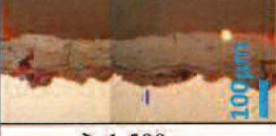
外観評点5の部位では、さび厚 $54\mu\text{m}$ 、イオン透過抵抗値 $0.14\text{k}\Omega$ でI 評点がI-5、板厚減少量は 0.00mm 、断面偏光顕微鏡観察ではさび層のほとんどが偏光層となっていることから、初期・未成長さび(A)と判定できた。

外観評点4の部位では、さび厚 $141\mu\text{m}$ 、イオン透過抵抗値 $7.1\text{k}\Omega$ でI 評点がI-4、板厚減少量 0.03mm となり、断面偏光顕微鏡観察から地鉄界面に連続的な消光層が観察されたので、保護性さびと判定できた。

外観評点3の部位では、さび厚 $243\mu\text{m}$ 、イオン透過抵抗値 $0.67\text{k}\Omega$ でI 評点がI-3、板厚減少量 0.10mm となり、断面偏光顕微鏡観察から明瞭な消光層は存在しないため未成長さび(B)と判定できた。

外観評点2の部位では、さび厚 $650\mu\text{m}$ 、イオン透過抵抗値 $1.2\text{k}\Omega$ でI 評点がI-2、板厚減少量 0.34mm となり、断面偏光顕微鏡観察から明瞭な消光層は存在しておらず、縦横にクラックが見られるので、要観察状態を示すさび(A) (うろこ状さび) と判定できた。断面偏光顕微鏡観察写真で確認できるさび厚は、約 $150\mu\text{m}$ とコア近傍部のさび厚 $650\mu\text{m}$ と比較して薄い、これはうろこ状さびが、断面偏光顕微鏡観察にいたる過程に剥離したことによる。

表-3.4 裸使用コア材およびコア材近傍の調査結果

評点	コア材近傍外観	偏光顕微鏡観察
5		
	I-5 ¹	54μm ³
	0.00mm ²	0.14kΩ ⁴
4		
	I-4	141μm
	0.03mm	7.1kΩ
3		
	I-3	243μm
	0.10mm	0.67kΩ
2		
	I-2	650μm
	0.34mm	1.2kΩ
1		
	I-1	>1,500μm
	4.40mm	0.10kΩ

注) 1. コア材近傍のイオン透過抵抗法を用いたI評点

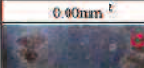
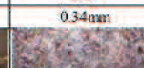
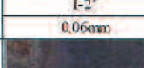
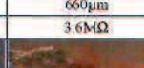
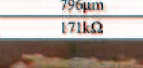
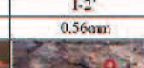
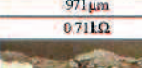
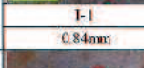
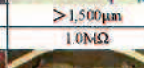
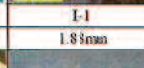
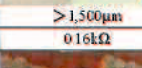
2. コア材近傍の板厚減少量

3. コア材近傍のさび厚測定結果

4. コア材近傍のイオン透過抵抗値

3. 3 調査結果

表-3.5 P-T 処理コア材およびコア材近傍の調査結果

評点	被膜部の劣化状況					
	コア材近傍外観	偏光顕微鏡観察				
A						
	I-4 ¹ 0.00mm ²	135μm ³ 8.6GΩ ⁴				
B						
	I-4 0.00mm	116μm 0.51GΩ				
評点	被膜部のさび状況（%:1m ² 程度範囲のさび面積率）					
	X < 3%		Y < 30%		Z > 30%	
	コア材近傍外観	偏光顕微鏡観察	コア材近傍外観	偏光顕微鏡観察	コア材近傍外観	偏光顕微鏡観察
5						
	I-4 ¹ 0.00mm ²	126μm ³ 10.9MΩ ⁴	I-4 0.00mm ²	183μm 0.86MΩ	I-4 0.00mm	197μm 0.30MΩ
4						
	I-4 0.00mm	216μm 5.1MΩ	I-4 0.00mm ²	193μm 0.58MΩ	I-4 0.02mm	120μm 0.18MΩ
3	No Data					
2						
	I-2' ¹ 0.05mm	626μm 4.3MΩ	I-2' ¹ 0.09mm	813μm 73.7kΩ	I-2' ¹ 0.34mm	940μm 0.691Ω
2(b)						
	I-2' ¹ 0.06mm	660μm 3.6MΩ	I-2' ¹ 0.25mm	796μm 171kΩ	I-2' ¹ 0.56mm	971μm 0.711Ω
1						
	I-1 0.84mm	>1,500μm 1.0MΩ	I-1 1.83mm	>1,500μm 0.52kΩ	I-1 4.60mm	>1,500μm 0.16kΩ
1(b)						
	I-1 0.34mm	>1,500μm 0.4MΩ	I-1 2.04mm	>1,500μm 0.66kΩ	I-1 0.38~6.70mm	>1,500μm 0.18kΩ

注) 1. コア材近傍のイオン透過抵抗法を用いた1 評点

2. コア材近傍の板厚減少量

3. コア材近傍のさび厚測定結果

4. コア材近傍のイオン透過抵抗値

外観評点1の部位では、さび厚1,500μm以上、イオン透過抵抗値0.10kΩで1 評点がI-1、板厚減少量4.40mm、断面偏光顕微鏡観察から明瞭な消光層は存在せず、縦横にクラックが見られ、外観からさびが剥離した痕跡が見られるので、異常を示すさび（層状剥離さび）と

判定できた、この部位の板厚減少量は、14年間で4.40mm、すなわち腐食速度に換算すると0.31mm/yと、局所ではあるが、海洋構造物における飛沫帯に相当するレベルに至っている。

P+T処理材の調査結果から、外観評点Aの部位では、さび・被膜厚135 μ m、イオン透過抵抗値8.6G Ω で、I 評点がI-4、板厚減少量0.00mm、被膜に変退色がないことや、断面偏光顕微鏡観察からP+T処理材には防食機能の劣化は見られないので、評価としては、保護性さび・被膜とした。

外観評点Bの部位では、さび・被膜厚116 μ m、イオン透過抵抗値0.51G Ω 、I 評点がI-4、板厚減少量0.00mmとなり、断面偏光顕微鏡観察からP+T処理材のT処理膜の減耗の痕跡が見られたものの、高い環境遮断機能を保持していると考えられるので、評価としては保護性さび・被膜とした。

外観評点5-x, 5-y, 5-zの部位では、さび・被膜厚126 μ m～183 μ m、イオン透過抵抗値0.30M Ω ～10.9M Ω 、I 評点がI-4、板厚減少量は、全て0.00mmとなり、断面偏光顕微鏡観察からP+T処理材のT処理膜、P処理膜に防食機能の劣化が進み、地鉄界面には部分的に保護性さびの形成がみられることから、評価としては保護性さび・被膜とした。

外観評点4-x, 4-y, 4-zの部位では、さび・被膜厚120 μ m～216 μ m、イオン透過抵抗値0.18M Ω ～5.10M Ω で、I 評点がI-4、板厚減少量は、0.00mm～0.02mmとなり、断面偏光顕微鏡観察からP+T処理材のT処理膜、P処理膜に防食機能の劣化が進み、両被膜の残存量は減少し、地鉄界面には保護性さびが形成されてきているので、評価としては保護性さび・被膜とした。

外観評点3-x, 3-y, 3-zの部位では、今回対象とした模擬橋梁試験体に存在しなかった。実橋梁においても、外観評点3-x, 3-y, 3-zと評価された例は少ない^{2), 7)}。

外観評点2-x, 2-y, 2-zの部位では、さび面積率が増える（被膜残存面積が小さくなる）とともに、さび・被膜厚は、626 μ m, 813 μ m, 940 μ mと厚くなり、イオン透過抵抗値は、4.3M Ω , 73.7k Ω , 0.69k Ω と低くなる。板厚減少量は、0.05mm, 0.09mm, 0.34mmと増加した。I 評点は、さび面積率が30%以上（被膜残存面積が小さい）と大きい外観評点2-zではI 評点をI-2とし、外観評点2-zよりさび面積率が30%未満（被膜残存面積が大きい）と小さい外観評点2-x, 2-yではI 評点をI-2'とした。断面偏光顕微鏡観察から、被膜は外観評点2-x, 2-yでは残存しているが、外観評点2-zでは、ほとんど消失していることが確認された。

外観評点2-x(b), 2-y(b), 2-z(b)の部位では、さび面積率が増えるとともに、さび・被膜厚は、660 μ m, 796 μ m, 971 μ mと厚くなり、イオン透過抵抗値は、3.6M Ω , 171k Ω , 0.71k Ω と低くなった。板厚減少量は、0.06mm, 0.25mm, 0.56mmと増加した。I 評点は、さび面積

率が30%以上（被膜残存面積が小さい）と大きい外観評点2-z(b)ではI 評点を1-2とし、外観評点2-z(b)よりさび面積率が30%未満（被膜残存面積が大きい）と小さい外観評点2-x(b), 2-y(b)ではI 評点を1-2'とした。断面偏光顕微鏡観察から、被膜は外観評点2-x(b), 2-y(b)では残存しているが、外観評点2-z(b)では、ほとんど消失しており、被膜、さび剥離の痕跡が確認された。

外観評点1-x, 1-y, 1-zの部位では、さび面積率（被膜残存面積）に関係なく、さび・被膜厚は、全て1,500 μ m以上となり、イオン透過抵抗値は、1.0M Ω , 0.52k Ω , 0.16k Ω とさび面積率の増加に伴って低くなり、板厚減少量は0.84mm, 1.88mm, 4.60mmと増加した。外観評点は、被膜残存面積率により外観評点1-x, 1-y, 1-zとなり、I 評点は、いずれもI-1とした。断面偏光顕微鏡観察から、被膜は外観評点1-xでは残存しているが、外観評点1-y, 1-zでは、消失しており、被膜、さび剥離の痕跡が確認された。

外観評点1-x(b), 1-y(b), 1-z(b)の部位は、さび面積率（被膜残存面積）に関係なく、さび・被膜厚は全て1,500 μ m以上となり、イオン透過抵抗値は、0.4M Ω , 0.66k Ω , 0.18k Ω とさび面積率の増大に伴って低くなり、板厚減少量は0.34mm, 2.04mm, 0.38mm～6.70mmと増加した。外観評点は、被膜残存面積率により外観評点1-x(b), 1-y(b), 1-z(b)となり、I 評点は、いずれもI-1とした。断面偏光顕微鏡観察から、被膜は外観評点1-x(b)では残存しているが、外観評点1-y(b), 1-z(b)では、消失しており、被膜、さび剥離の痕跡が確認された。

表-3.4の結果と図-3.1(a)のコア採取箇所近傍の裸使用の耐候性鋼材におけるイオン透過抵抗法の腐食評価の結果より、熟練者による外観評点とイオン透過抵抗法で判定したI 評点との整合性を確認することができた。この結果より、外観評点とイオン透過抵抗法から得られたI 評点とは、ほぼ一致する³⁾ことが再認識された。すなわち、外観評点5とI 評点I-5, 外観評点4とI 評点I-4, 外観評点3とI 評点I-3, 外観評点2とI 評点I-2, I-2', 外観評点1とI 評点I-1とがよく一致したのは、評価者が熟練者であったことによる。評価者が非熟練者の場合、定量的なイオン透過抵抗法を適用するのが望ましい。

表-3.5の結果と図-3.1(b)のP+T処理の耐候性鋼材におけるイオン透過抵抗法の防食機能の劣化と腐食評価の結果より、外観評点Aの健全な被膜のイオン透過抵抗値は、8.6G Ω と高抵抗値を示している。この健全な状態から紫外線等の影響によりT処理被膜の減耗、すなわち防食機能の劣化が生じた外観評点Bの被膜のイオン透過抵抗値は、0.51G Ω と減少している。これは、P+T処理材の防食機能の劣化の定量評価に、イオン透過抵抗測定は有用であることを示していると考えられる。

外観評点Aから外観評点Bへの被膜の防食機能の劣化より、さらに被膜の劣化が進行する

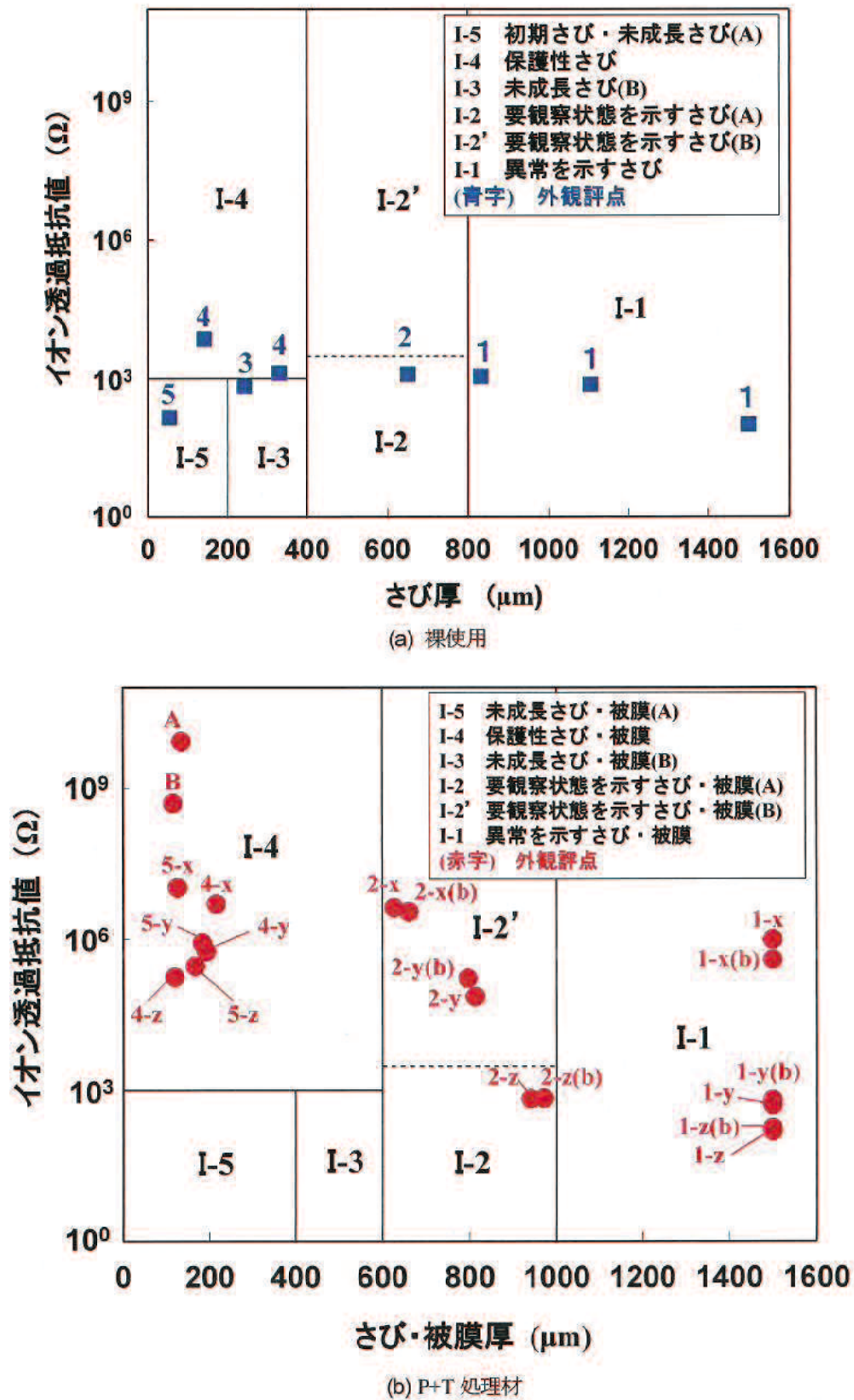


図-3.1 コア採取箇所近傍の裸使用と P+T 処理材におけるイオン透過抵抗法の評価結果

と被膜部からさびが生ずる段階にいたる。この段階の評価は、さびと被膜が混在している状態での定量的な評価が求められることになる。このような観点で、P+T処理材の評価にイオン透過抵抗法から得られるI 評点の領域区分が適用可能であることを考えることにした。

表-3.5の結果と図-3.1(b)の結果より、被膜残存面積率が97%以上、すなわちさび面積率が3%未満の外観評点5-x, 4-x, 2-x, 2-x(b), 1-x, 1-x(b)におけるイオン透過抵抗値は、M Ω オーダーの値を示していることがわかる。被膜残存面積率が70%未満、すなわちさび面積率が30%以上の外観評点5-z, 4-z, 2-z, 2-z(b), 1-z, 1-z(b)におけるイオン透過抵抗値は、k Ω オーダーの値を示していることがわかる。また、被膜残存面積率、さび面積率ともに上述の間の状態に位置する外観評点5-y, 4-y, 2-y, 2-y(b), 1-y, 1-y(b)におけるイオン透過抵抗値も、上述の間の値に推移することがわかった。これは、イオン透過抵抗法における縦軸であるイオン透過抵抗値が、被膜残存面積率が減少（さび面積率が増加）する、すなわち被膜の防食機能が劣化をすると、イオン透過抵抗値が減少することが確認された。

このように、イオン透過抵抗値で被膜の劣化傾向をとらえられた理由としては、イオン透過抵抗装置のプロープが2電極式のため、被膜残存面積率が97%以上、すなわちさび面積率が3%未満の場合（外観評点5-x, 4-x, 2-x, 2-x(b), 1-x, 1-x(b)）は、片方のプロープは混在被膜（さびと被膜が混在）に、もう片方のプロープは被膜部に接触する。このためイオン透過抵抗値には、被膜のイオン透過抵抗値が含まれるため、イオン透過抵抗値がM Ω オーダーの値を示したと考えられる。これに対して、被膜残存面積率が70%未満、すなわちさび面積率が30%以上の場合（外観評点5-z, 4-z, 2-z, 2-z(b), 1-z, 1-z(b)）は、両プロープとも混在被膜（さびと被膜が混在）に接触するので、イオン透過抵抗値としては、その混在被膜の値を計測していると考えられる。その結果として、イオン透過抵抗値は、k Ω オーダーの値を示したと考えられる。この内、外観評点2-z, 2-z(b), 1-z, 1-z(b)にいたっては、混在被膜の防食機能の劣化が進行し、被膜が剥離してさび層になっていたため、イオン透過抵抗値が0.16 k Ω ～0.71k Ω と低い値を示したと考えられる。

イオン透過抵抗法における横軸であるさび・被膜厚値は、腐食減耗量（板厚減少量）程度を見る指標であると考えている。この被膜に生じるさびの厚さが大きいほど、鋼材の腐食減耗量が大きくなることとなる。比較例としては、外観評点5-yのさび・被膜厚値183 μ m、板厚減少量0.00mm、外観評点2-yのさび・被膜厚値813 μ m、板厚減少量0.09mm、外観評点1-yのさび・被膜厚値1,500 μ m以上、板厚減少量1.88mmとなり、さび・被膜厚値が大きくなるほど、鋼材の板厚減少量が大きくなることを確認できる。

以上のことから、縦軸のイオン透過抵抗値の大小で、被膜の劣化程度を、横軸のさび・

被膜厚値の大小で、被膜減耗程度および板厚減少量を把握できるイオン透過抵抗法（I 評点による領域区分）は、P+T処理材の防食機能の劣化、腐食状態を評価する手法として有用であると考えられる。

図-3.1 b)に、コア採取箇所近傍のP+T処理材におけるイオン透過抵抗法から得られるI 評点の領域区分を示す。外観評点A, B, 4-x, 4-y, 4-zは、I 評点I-4（保護性さび・被膜）領域に、外観評点2-z, 2-z(b)は、I 評点I-2（要観察状態を示すさび・被膜(A)）領域に、外観評点2-x, 2-x(b), 2-y, 2-y(b)は、I 評点I-2'（要観察状態を示すさび・被膜(B)）領域に、外観評点1-x, 1-x(b), 1-y, 1-y(b), 1-z, 1-z(b)は、I 評点I-1（異常を示すさび・被膜）に、それぞれ対応させることで整理することができた。

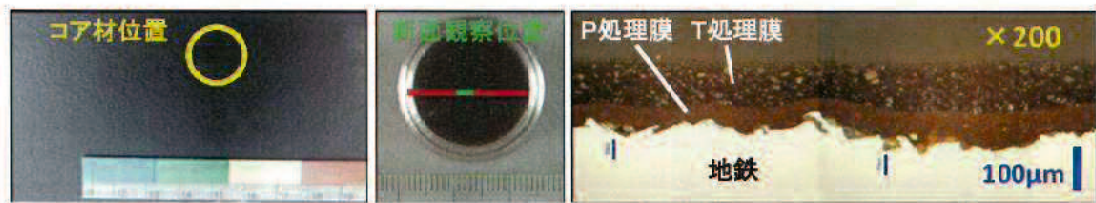
また、無塗装耐候性鋼橋梁において、上述のようなイオン透過抵抗法を用いた経年モニタリングを行った結果として、I 評点I-1の異常を示すさび、I 評点I-2, I-2'の要観察状態を示すさびの部位を検出した場合は、板厚測定やワッペン試験片の板厚減少量測定等を併用しながら、補修・補強の可否を検討することも重要である。

3. 3. 2 P+T 処理材の変化過程

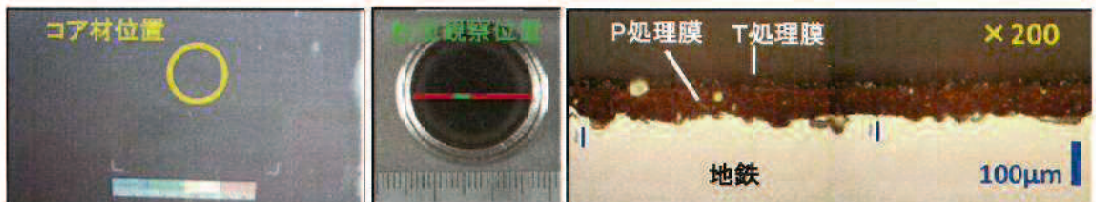
P+T処理材の防食機能の劣化と腐食過程を明らかにするため、P+T処理材が適用された部位から、防食機能の劣化水準別にコア材抜きを行った。コア材採取箇所近傍の外観観察と断面偏光顕微鏡観察の結果を図-3.2(a)～(g)に示す。

図-3.2(a)は、外観評点Aで、被膜に変退色がない部位のコア材断面である。14年経過したにも関わらず防食機能の劣化は見られず健全な状態を維持していた。図-3.2(b)は、外観評点Bで、紫外線等により被膜に変退色やイオン透過抵抗値の低下が観測された部位のコア材断面である。断面偏光顕微鏡観察結果から、T処理膜の減耗が確認されており、外観観察と断面偏光顕微鏡観察の両者の傾向が一致する。図-3.2(c)は、外観評点5-zであり、点さびが見られたコア材である。断面を観察するとT処理膜、P処理膜が連続的に残存している。P処理膜の下層に断続的に地鉄界面側から消光層（保護性さび）や偏光層（非保護性さび）が生成している。図-3.2(d)は、外観評点4-xであり、地鉄界面に連続的な消光層（保護性）のさびの生成が見られ、外層に位置していたT処理膜が薄く残存し、中間に連続的にP処理膜が見出される。下層の消光層の成長により、P+T処理膜が少しずつ押し上げられている様子が観察された。図-3.2(e)は、外観評点2-yの部位から採取したコア材である。地鉄界面に厚いクラックの多いさび層が成長して、P+T処理膜を押し上げている様子が観察された。図-3.2(f)は、外観評点2-z(b)の部位のコア材である。地鉄界面から縦横にクラックの

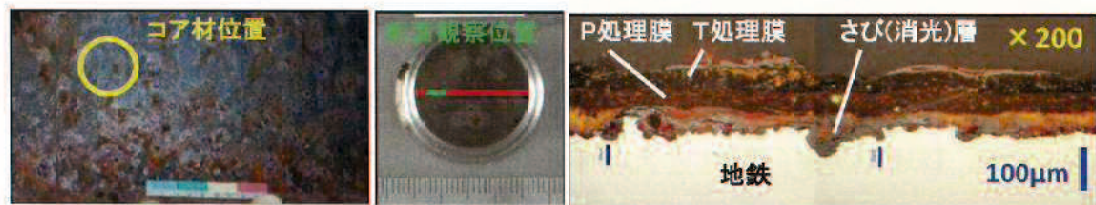
3. 3 調査結果



(a) 外観評点A, 被膜に変退色なし



(b) 外観評点B, 被膜に変退色あり



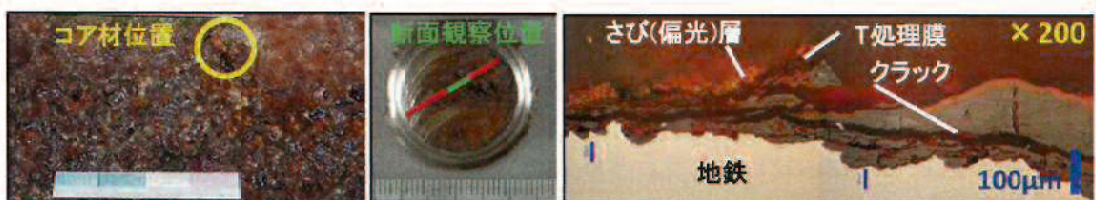
(c) 外観評点5-z, 被膜残存, 地鉄界面に消光層あり



(d) 外観評点4-x, 被膜部分的に残存, 地鉄界面に消光層あり, 横クラックあり

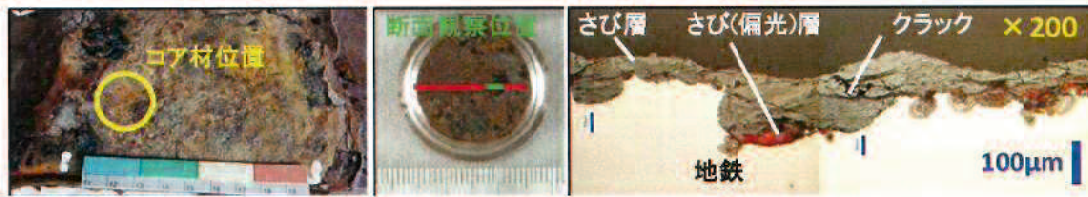


(e) 外観評点2-y, T処理膜部分的に残存, さび層には縦横にクラック発生し, 一部剥離さびあり



(f) 外観評点2-z(b), T処理膜わずかに残存, さび層には縦横にクラック発生し, 剥離さびあり

図-3.2 コア採取箇所近傍の外観評点毎におけるコア材の外観写真と断面偏光顕微鏡観察結果



(g) 外観評点1-z, 被膜消失, 層状剥離さびあり

図-3.2 コア採取箇所近傍の外観評点毎におけるコア材の外観写真と断面偏光顕微鏡観察結果

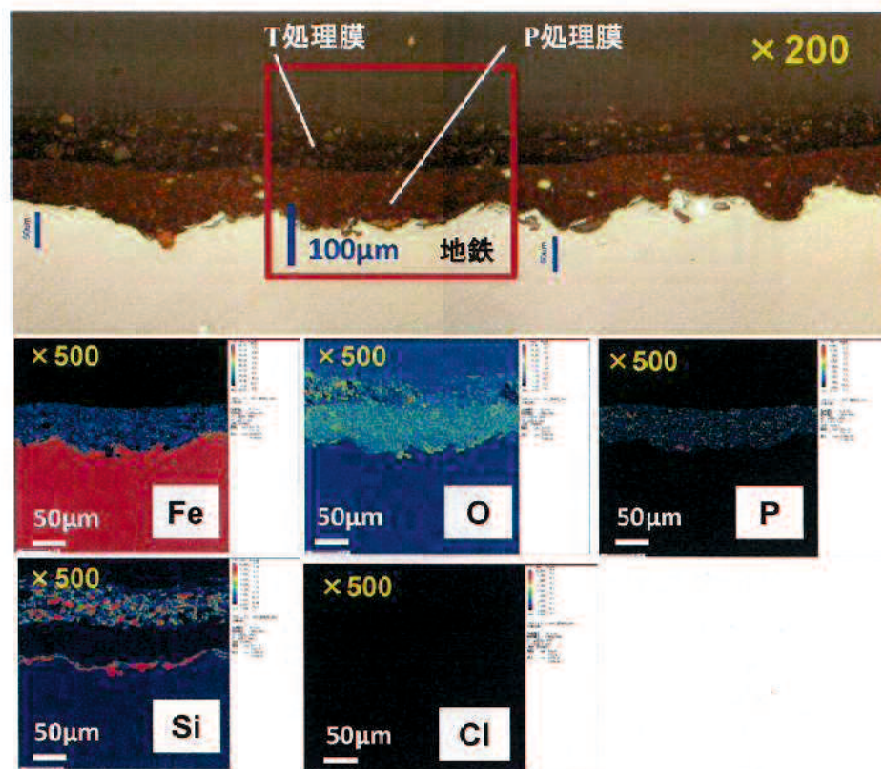
ある厚いさび層が生成し、さび層剥離のため、外層には偏光層とわずかに残るT処理膜が見られる。図-3.2(g)は、外観評点1-zのコア材である。断面偏光顕微鏡観察では、被膜は完全に消失し、層状剥離した後のクラックを含む残存さびが見られる。

P+T処理材は、経年的にT処理膜の減耗が生じ、T処理膜に防食機能の劣化が生じる。その後、T処理膜が薄く残存したままP処理膜下に部分的にさび（消光）層が形成し、成長して、P処理膜を押し上げる機構が確認された。また、P処理膜やT処理膜の上に生じたさび（偏光）層は、腐食により生じた鉄イオンが外部に流出し、沈殿・堆積・時効してできるので、P処理膜やT処理膜の上に形成しうる。さらに、異常さびが生ずるような厳しい腐食環境下では、繰り返されるさび層の風化剥離とともにT処理膜もP処理膜も消失することがある。このような場合には、地鉄界面に縦横のクラックのある厚いさびが発生する。

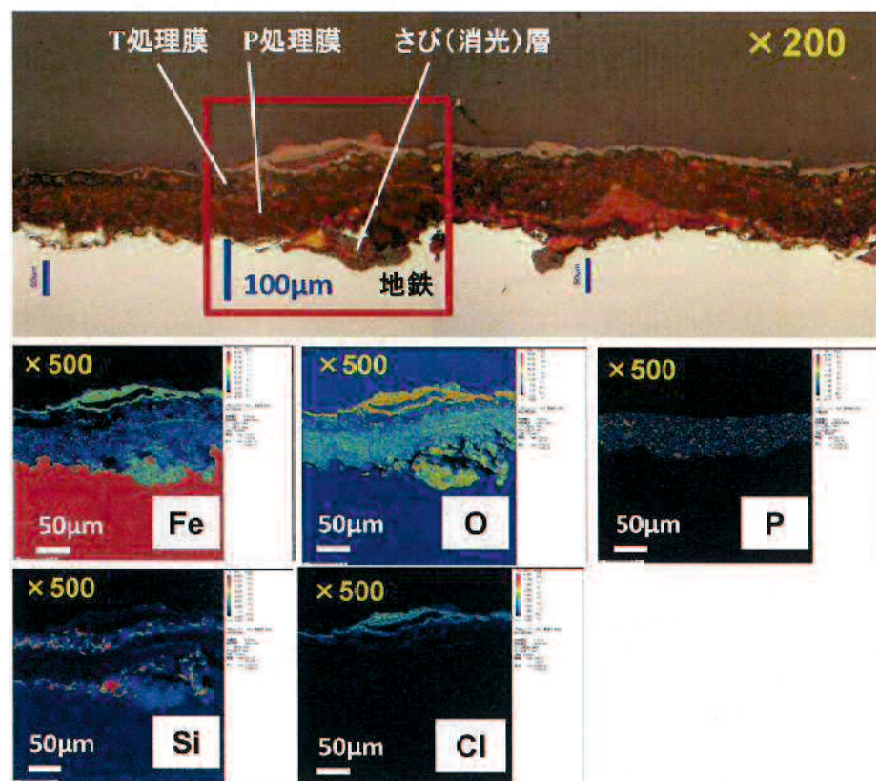
以上のことから、P+T処理材の防食機能の劣化、腐食する過程は、塗膜下にさびが生じ、そのさびが異常さびにいたり、異常さびが塗膜を押し上げるといった塗装鋼材の防食機能の劣化、腐食する過程^{12), 13), 14), 15)}と類似している。ただし、P+T処理材では、P機能膜の効果により保護性さび形成が促される点に違いがある。

3. 3. 3 P+T処理材の断面偏光顕微鏡観察および元素分布

P+T処理材の断面偏光顕微鏡観察およびEPMA元素分布を図-3.3(a)～(f)に示す。図-3.3(a)は、外観評点Aの部位のコア材である。初期からのP+T処理膜が確認される。P+T処理材は、外層にT処理膜（アクリル樹脂）に含有するSiが、内層にP処理膜（ブチラール樹脂）に含有するFe、P（磷酸鉄）が、それぞれ分布している。図-3.3(b)は、外観評点5-yの部位のコア材である。外層にはさび層に含まれるFeとOが、中間層上方には減耗したT処理膜に起因するSiが、中間層下方には厚みを維持したP処理膜に起因するFeとPが、内層の地鉄界面にはさび層に起因するFeとOが島状に分布している。外層のさび層中にはClが検出された。

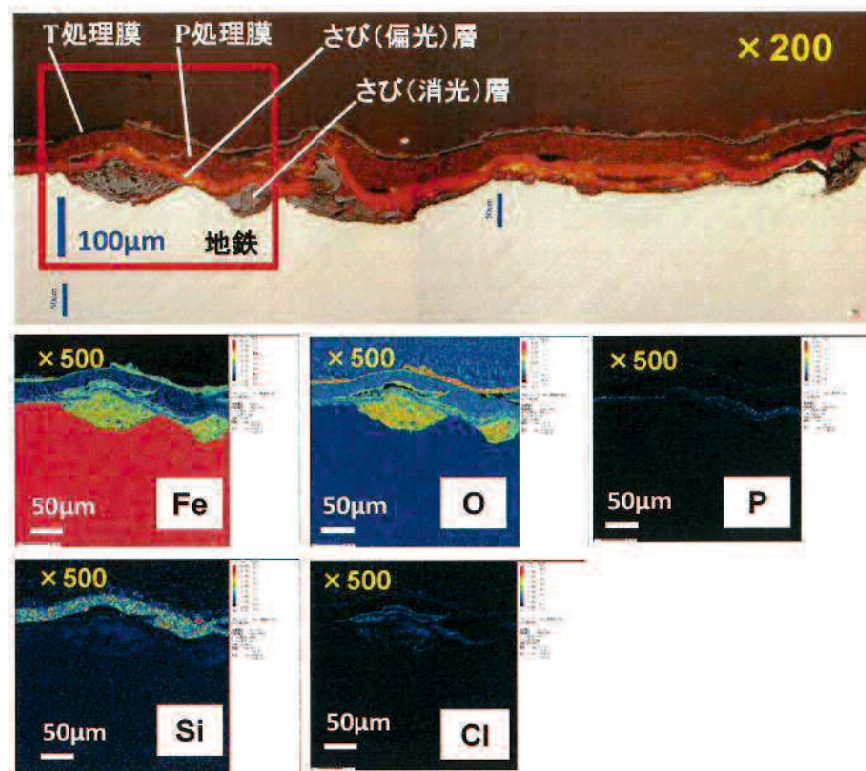


(a) 外観評点A, 被膜に変退色なし

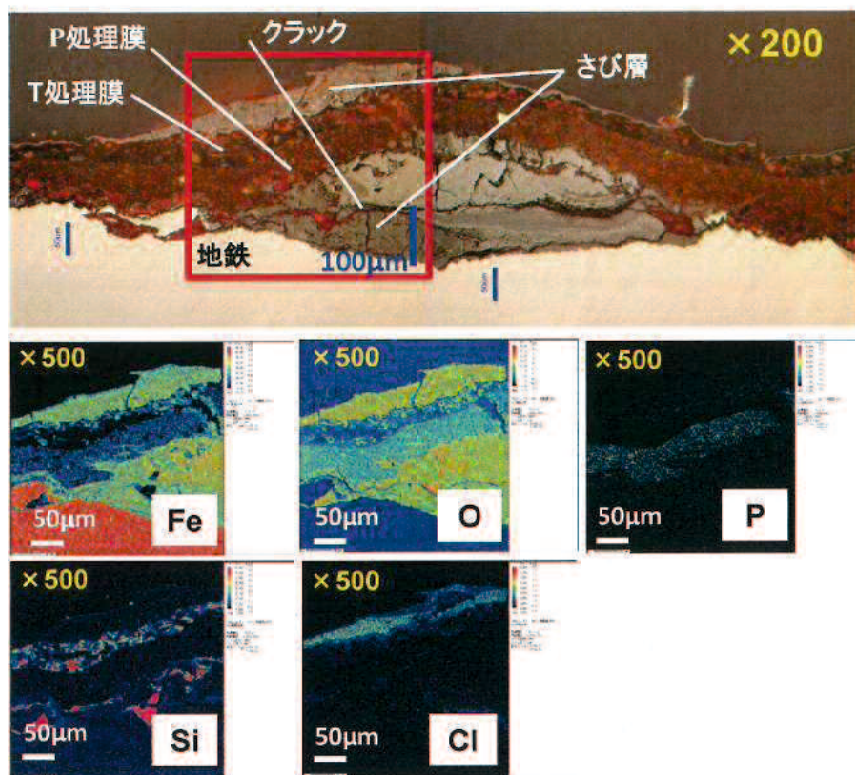


(b) 外観評点5-y, 地鉄界面に部分的に消光層あり

図-3.3 P+T 処理材の断面偏光顕微鏡観察および EPMA 元素分布

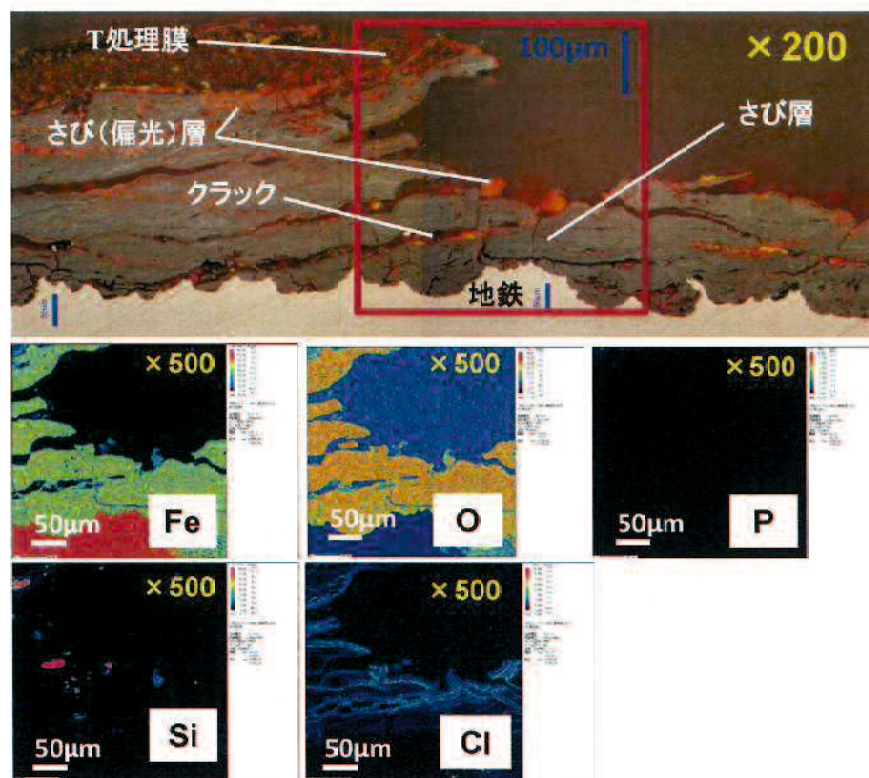


(c) 外観評点4-y, 地鉄界面に消光層あり

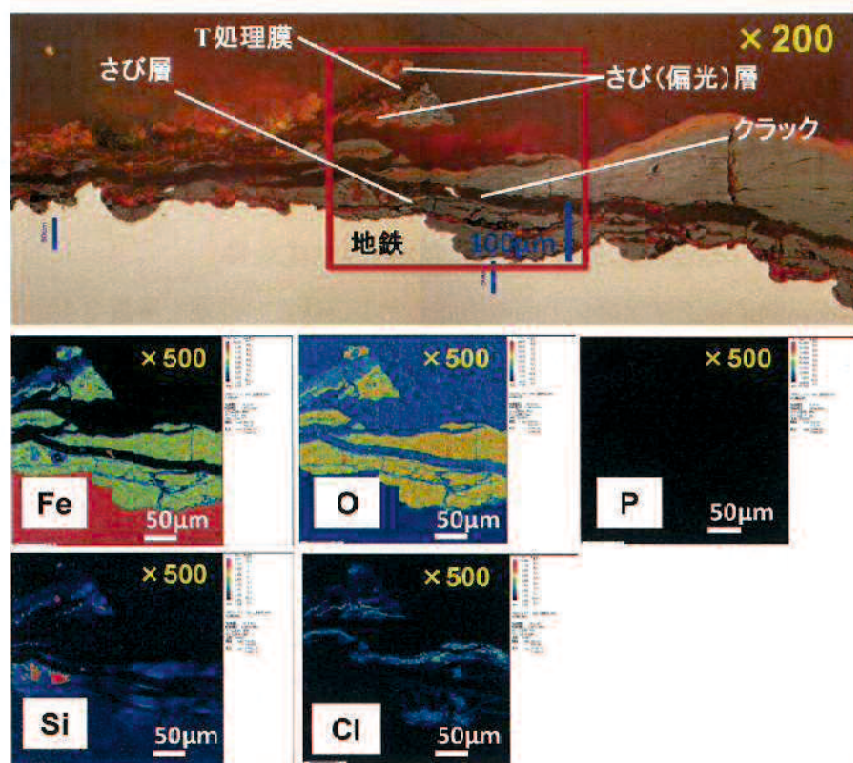


(d) 外観評点2-x, 地鉄界面の厚いさび層あり

図-3.3 P+T 処理材の断面偏光顕微鏡観察および EPMA 元素分布



(e) 外観評点2-y, さび層にクラックあり



(f) 外観評点2-z(b), さび層にクラック, 剥離さびあり

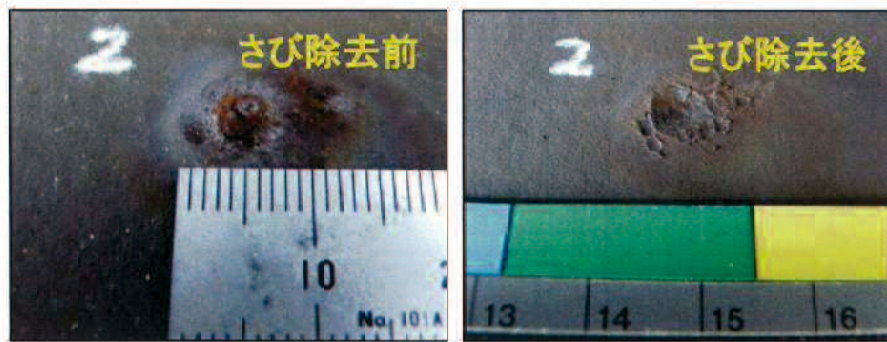
図-3.3 P+T 処理材の断面偏光顕微鏡観察および EPMA 元素分布

図-3.3(c)は、外観評点4-yのコア抜き材である。外層にはさび層に起因するFeとOが、中間層上方には減耗が進んだT処理膜に含まれるSiが、中間層下方には厚みを保持したP処理膜に起因するFeとPが、内層の地鉄界面にはさび層に起因したFeとOが分布している。外層のさび層中にはClが検出された。図-3.3(d)は、外観評点2-xのコア材である。外層にはさび層に起因したFeとOが、中間層上方には減耗が進んだT処理膜に起因するSi、中間層下方には厚みを保持したP処理膜に起因するFeとPが、内層の地鉄界面には厚いさび層に起因したFeとOがそれぞれ存在している。外層のさび層中には、Clが検出されている。外観評点2-yのコア抜き材の断面は、図-3.3(e)に示すとおり、外層にはさび層に起因するFeとOと、わずかに残存するT処理膜に起因したSiが検出できる。内層には厚いさび層に起因したFeとOが分布する。さび層中にはClが検出され、クラックに沿ってClが濃厚に分布する傾向が見られた。外観評点2-z(b)のコア抜き材断面を図-3.3(f)に示す。外層には剥離しつつあるさび層に起因したFeとOが、わずかに残留したT処理膜のSiとともに検出された。内層には厚いさび層に起因したFeとOが検出された。地鉄界面のさび層中とさび層に発生したクラック中にはClが検出された。

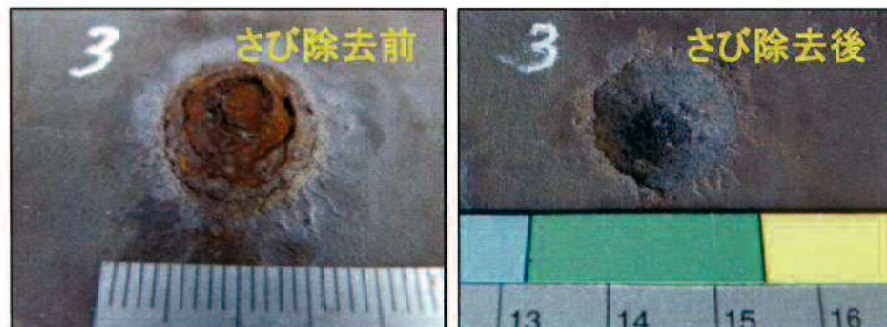
以上のことから、14年経過しても、P+T処理材が防食機能を保持している間、あるいは地鉄界面に緻密なさび層が形成されている間は、Clの地鉄界面への侵入が抑制されている。さびが厚くなり、さび層中にクラックが生じると、そのクラックに沿ってClが侵入する。これ以後は、加速的に腐食が進行し、異常さびが形成すると考えられる。

3. 3. 4 P+T処理材に生成したこぶ状さび生成条件

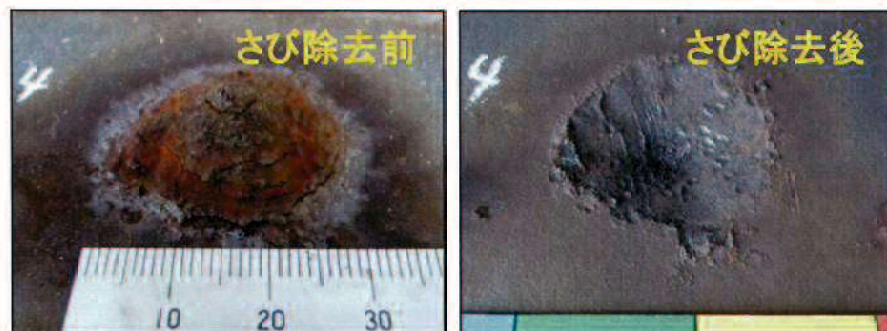
模擬橋梁試験体の下フランジ上面の生成したこぶ状さび外観を写真-3.4(a)～(d)に示す。こぶ状さび幅と腐食深さの関係を図-3.4に示す。写真-3.4(a)～(c)に示すように、こぶ状さびは、円錐状をしており、さび除去後の金属表面はすり鉢状をしていた。図-3.4に示す通り、こぶ状さび幅と腐食深さには、正の相関が確認された。こぶ状さび幅が広くなると、腐食深さが深くなることがわかる。こぶ状さびの断面構造は、写真-3.4(d)のように層状に重なりあっていた。こぶ状さびの発生部位は、写真-3.3のようにその大半が模擬橋梁試験体の下フランジ上面に集中して発生していた。他部位との違いを把握するために、被膜厚を測定した。その結果、被膜厚は、ウェブ面で約80 μ m、下フランジ下面で約90 μ mであるのに対して、下フランジ上面で約130 μ mと厚いことがわかった。この模擬橋梁試験体の製作履歴より、こぶ状さび発生が多い部位の素地調整は、カップワイヤー処理ではなく、サンドブラスト処理が行われていた。



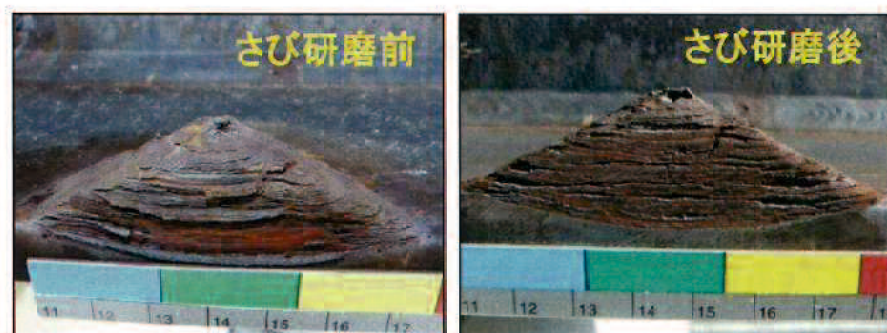
(a) こぶ状さび外観 (幅 5.7mm, 深さ 0.7mm)



(b) こぶ状さび外観 (幅 15.5mm, 深さ 2.5mm)



(c) こぶ状さび外観 (幅 29.8mm, 深さ 4.4mm)



(d) こぶ状さび外観 (幅 69.5mm)

写真-3.4 模擬橋梁試験体に生成したこぶ状さび外観

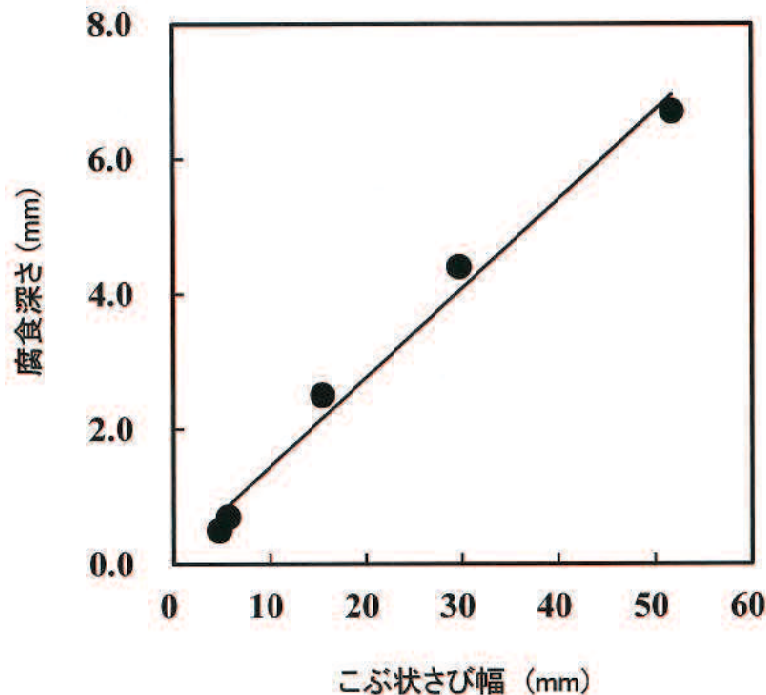


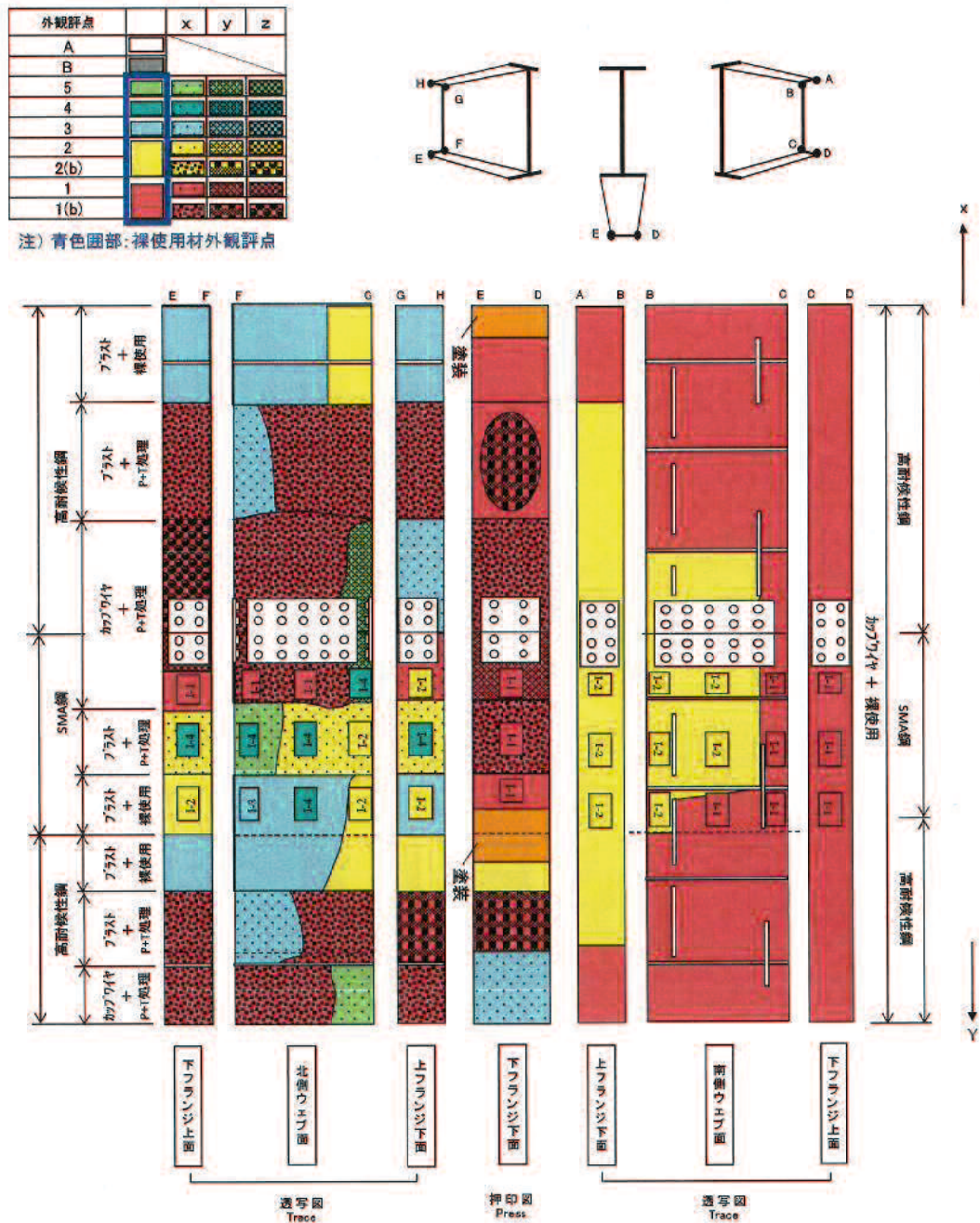
図-3.4 こぶ状さびの幅と腐食深さの関係

以上のことから、こぶ状さび発生の原因は、被膜が厚く密着性の良い被膜に、傷やピンホール等の初期欠陥が生じ、その後、この初期欠陥を起点として、厳しい腐食環境下でこぶ状さびにいたるような局所的な腐食が進行したためと推察した。また、こぶ状さびの対処法については、素地調整法と補修塗装仕様の検討が必要であると考えている。

3. 4 模擬橋梁試験体の防食機能の劣化、腐食マップ

模擬橋梁試験体の裸使用部分は、さび外観評点で評価し、P+T 処理部分は、表-3.3 の目視外観評価基準^{2), 6)}で評価した。この外観評価結果を図-3.5、図-3.6 に防食機能の劣化、腐食マップとして図示し、JIS 耐候性鋼材部分には、外観評点との比較のため、イオン透過抵抗法から得られた I 評点結果も図示した。

図-3.5 より、P+T 処理を施した海側桁外面は、外観評点が 5-x から 1-z、1-z(b)と正常な部位と異常な部位とが分布している。桁外面に正常な部位が存在していたのは、雨あたりの効果が部分的にあるからと考えられる。これに対して海側桁内面は、外観評点が 1-x(b)



から I-z, I-z(b)と異常な部位が全体に分布している。これは、雨あたりが全く無く、高飛来塩分環境の影響で、P+T 処理材の防食機能の劣化・腐食の進行が激しかったためと考えられる。

図-3.5, 図-3.6 より, JIS 耐候性鋼材部分(裸使用, P+T 処理)の外観評点とイオン透過抵抗法から得られた I 評点を比較すると, 外観評点 2~1 と I 評点 I-2~I-1 のように異常な部位の評価には, 良い一致が見られた。外観評点 5~3 と I 評点 I-5~I-3 のような正常な部位の評価には, ズレが見られた。このズレの要因を以下のように考えた。

- (a) I 評点の I-4 領域の中に, 外観評点 A, B, 5, 4 が含んでいること。
- (b) 外観評点 2-x, 2-x(b)の時のイオン透過抵抗値は, さび発生面積が 3%未満と小面積であるため, 被膜部の抵抗値を計測し易く, 計測される抵抗値は, I 評点が I-4 と I-2'では, 同様の高い抵抗値を示すこと。

但し, (b)は, 正確なさび・被膜厚測定を行うことで, イオン透過抵抗法としては正しい評価が可能と考えられる。

以上のズレの要因等を考慮すれば, P+T 処理材を施した耐候性鋼材の評価としてイオン透過抵抗法は, 熟練者の外観評価結果と一致する。そこで, 外観評価では十分な熟練が求められる未経験者であっても, イオン透過抵抗法を適用することで正確な評価が可能と考えられる。

以上のことから, 防食機能の劣化, 腐食マップを作成し管理しておく, 維持管理や補修検討を行う上で, 補修実施の有無検討, 補修範囲の選定に有効であると考えられる。

3. 5 第3章のまとめ

厳しい腐食環境に置かれたさびP+T処理材を施した耐候性鋼模擬橋梁試験体からコア材を採取し、P+T処理材の防食機能の劣化、腐食評価に関する基礎データ収集と、イオン透過抵抗法で評価した結果、得られた知見を以下に示す。

- (a) 熟練者の目視外観評価から得られた外観評点と、イオン透過抵抗法より得られたI 評点を比較したところ、外観評点A, B, 5-x, 5-y, 5-z, 4-x, 4-y, 4-zとI 評点I-4 (保護性さび・被膜)が、外観評点2-z, 2-z(b)とI 評点I-2 (要観察状態を示すさび・被膜(A))が、外観評点2-x, 2-x(b), 2-y, 2-y(b)がI 評点I-2' (要観察状態を示すさび・被膜(B))に、外観評点1-x, 1-x(b), 1-y, 1-y(b), 1-z, 1-z(b)がI 評点I-1 (異常を示すさび・被膜)に、それぞれ良く対応した。そこで、外観評価では十分な熟練が求められる未経験者であってもイオン透過抵抗法を適用することで、正確な評価が可能であることが明らかになった。
- (b) 縦軸のイオン透過抵抗値の大小で、被膜の劣化程度を、横軸のさび・被膜厚値の大小で、被膜減耗程度および板厚減少量を把握できるイオン透過抵抗法 (I 評点による領域区分) は、P+T処理材の防食機能の劣化、腐食状態を評価する手法として有用であると考えられる。
- (c) P+T処理材が健全である間、または地鉄界面に緻密なさび層が形成されている間は、塩分の地鉄界面への侵入が抑制されている。しかしながら、さび層が厚くなり、さび層中にクラックが生じると、そのクラックに沿ってClが侵入し、腐食が加速する。
- (d) P+T処理材の防食機能の劣化と腐食過程は、塗装した鋼材の防食機能の劣化と腐食過程に類似している。ただし、P+T処理材では、P機能膜の効果により保護性さび形成が促される点に違いがある。
- (e) こぶ状さび発生の原因は、被膜が厚く密着性の良い被膜に、傷やピンホール等の初期欠陥があると、その欠陥を起点として、厳しい腐食環境下で、こぶ状さびにいたるような局所的な腐食が進行したためと推察した。
- (f) 防食機能の劣化、腐食マップを作成し管理しておく、維持管理や補修検討を行う上で、補修実施の有無検討、補修範囲の選定に有効であると考えられる。

第3章の参考文献

- 1) (社)日本道路協会：鋼道路橋塗装・防食便覧，2005.
- 2) (社)日本鋼構造協会：テクニカルレポート No.73「耐候性鋼橋梁の可能性と新しい技術」，2006.
- 3) 今井篤実，立花仁，松本洋明，紀平寛：鋼構造物の腐食診断にむけたイオン透過抵抗法の適用，防錆管理，Vol.51，No.5，pp.216-221，2007.
- 4) 紀平寛，塩谷和彦，幸英昭，中山武典，竹村誠洋，渡辺祐一：耐候性鋼さび安定化評価技術の体系化，土木学会論文集，No.745/I-65，pp.77-87，2003.
- 5) 佐藤恒明，岩崎英治，加藤智久，野口成人，向井英和，立花仁，今井篤実：耐候性鋼橋の腐食状況のモニタリング追跡調査，土木学会第65回年次学術講演会，I-167，pp.333-334，2010.
- 6) (独)北海道開発土木研究所，(社)日本橋梁建設協会，(社)日本鉄鋼連盟：無塗装耐候性鋼橋の劣化判定基準法に関する研究報告書，2004.
- 7) 松崎靖彦，大屋誠，安食正太，武邊勝道，麻生稔彦：さび安定化補助処理された耐候性鋼橋梁の腐食実態と評価に関する一考察，土木学会論文集F，Vol.62，No.4，pp.581-591，2006.
- 8) ISO9223：Corrosion of metals and alloys-corrosively of atmospheres Classification，1992.
- 9) 今井篤実，佐野大樹，吉中智紀，大屋誠，武邊勝道，広瀬望，麻生稔彦：さび安定化補助処理剤を施した耐候性鋼橋梁へのイオン透過抵抗法の適用ーその2：イオン透過抵抗法を用いた評価基準の提案ー，土木学会第66回年次学術講演会，I-573，pp.1145-1146，2011.
- 10) 湯山真一，宮本太郎：美浜大橋における耐候性鋼材の塗装による補修工事，第31回鉄構塗装技術討論会発表予稿集，pp.119-126，2008.
- 11) 境昌宏，長谷部智久，美馬大樹，西弘明，小室雅人，岸徳光：30年以上経過した表面処理仕様耐候性鋼橋梁の腐食調査，材料と環境，Vol.61，pp.161-165，2012.
- 12) 増子昇：塗膜下腐食の発生と進行，防食技術，Vol.30，pp.699-704，1981.
- 13) 藤原博，菅野照造：鋼橋の塗膜劣化と塗膜下腐食との相関性に関する研究，土木学会論文集，No.557/I-35，pp.167-181，1996.
- 14) 伊藤義人，金仁泰，貝沼重信，門田桂久：素地調整が異なる塗装鋼板の腐食劣化に関する基礎研究，土木学会論文集，No.766/I-68，pp.291-307，2004.
- 15) (社)土木学会：海洋環境における鋼構造物の耐久・耐荷性能評価ガイドライン，2009.



第4章

さび安定化補助処理を施した耐候性鋼橋梁の 表面状態とその評価

第4章

さび安定化補助処理を施した耐候性鋼橋梁の 表面状態とその評価

4. 1 概要

耐候性鋼橋梁の機能を長期間維持するためには定期的な点検・維持管理が必要である¹⁾。点検の種類は一般に初期点検、定期点検、および詳細調査に区分される²⁾。初期点検（2年以内）は、初期不具合を是正するための点検であり、定期点検（10年程度後）は、橋梁定期点検要領（案）³⁾に沿って行うものであり、原則としては鋼材の腐食速度の把握や、アクシデント等がないことを確認するためのものである。万が一異常が見出された場合には、詳細調査を行い、対応措置（経過観察や補修設計）の検討に必要なデータを調べる。現在の詳細調査では、主に外観評価が用いられているが、評価者に経験が少ない場合は、誤った評価をする可能性がある。

裸使用の耐候性鋼橋梁の腐食評価においては、この経験少ない評価者であってもさびの状態を定量的に評価できるイオン透過抵抗法^{4), 5), 6), 7), 8)}を適用することが有用であるとの結論にいたっている。P+T 処理を施した耐候性鋼橋梁の防食機能の劣化、腐食評価としては、目視外観評価基準^{2), 9)}を主流としていたが、前章の模擬橋梁試験体に施した P+T 処理材の防食機能の劣化、腐食状態を定量的に評価できるイオン透過抵抗法を適用することが有用であるとの結論にいたっている。しかしながら、既設の P+T 処理を施した耐候性鋼橋梁は、前章の模擬橋梁試験体と比較して、被膜の風化、被膜の消失が不均一、さびの発生状態が非常に複雑である。その表面の被膜劣化やさびの保護性を目視外観評価基準だけで判定するには、評価者にさらなる熟練度が求められる¹⁰⁾。熟練度の低い者が評価するとバラツキが生ずることは明らかである。このため前章の模擬橋梁試験体の場合以上に、P+T 処理材の防食機能の劣化、腐食状態を定量的に評価ができるイオン透過抵抗法を適用が望まれている。

本研究では、既設の P+T 処理を施した耐候性鋼橋の防食機能の劣化、腐食評価にイオン透過抵抗法の適用性を検討した¹¹⁾。併せて、現状の P+T 処理を施した耐候性鋼橋梁における外観評価では、評価の前に行う前処理の実施の必要性が論じられていないことから、前処理の効果を検証し、適切な前処理方法についても検討する。

4.2 表面状態の評価

P+T処理（さび安定化補助処理）材に要求される機能としては、初期の流れさび発生を抑制し、周囲の着色を防いで景観性を調整する基本機能と、保護性さび形成を補助する働き、すなわち耐候性鋼材の腐食を抑制する付加機能がある。P+T処理材は、長期的には風化、消失し、その後は耐候性鋼材表面に保護性さびが形成するとされている。塗り替えは行わないのが標準とされている。P+T処理材は、防食機能の劣化、腐食の過程で経年により外観に変化が生ずる。P+T処理を施した耐候性鋼橋梁の被膜が不均一な色むらを生じている例を写真-4.1(a)に、被膜が風化等により消失して保護性さびに置き換わりつつある例を写真-4.1(b)に示す。P+T処理材は、母材となる耐候性鋼材の適用可能な環境条件で適用することを原則とする¹⁾。ここで、P+T処理材については、第1章の内容に若干の説明を下記に加える。

P+T処理材は、保護性さび形成を補助するP処理膜と、P機能型に環境緩和性のある樹脂被膜でT機能を付与したP+T処理材に分類される。P+T処理材は、それぞれの役割を内層と外層で分担するタイプもあれば、一層に両機能を持たせたものもある。樹脂膜が鋼材の腐食を防止している期間をT機能持続期間という。このT機能持続期間がみられるP+T処理材は、基本としてP機能が備わっていることから、P+T処理材に分類される。現在用いられているP+T処理材は、ごく一部の例外を除き、ほとんどがP+T処理材である²⁾。

現在の「さび安定化補助処理を施した耐候性鋼橋梁の外観評価基準^{2), 9)}」を表-4.1に示す。裸使用の外観評価を基本としてP処理材およびP+T処理材にかかわる防食機能の劣化を評価するために、評点A、および評点Bが付加されている。被膜評価部の範囲を約1m²とし、被膜評価部のうち、さびに置き換わった部分のさび面積率を目視でx（3%未満）、y（30%未満）、z（30%以上）とした上で、さびに置換した部分については裸使用の5段階外観評価を適用する。判断目安としてのさび・被膜厚のしきい値には、被膜の残留も考慮して裸使用の目安に200μmを加算する。正しく判定を行うためには、裸使用の判定目安である5段階評価の参考写真が経過期間9年で得たものであることを考慮しつつ、腐食速度をさび状態から推定しながら行う必要がある²⁾。

この「さび安定化補助処理を施した耐候性鋼橋梁の外観評価基準^{2), 9)}」は主流になりつつあるものの、被膜の風化、消失過程で生ずる浮き被膜の付着、さびおよび塵埃の堆積がある中で、被膜評価部のさび面積率の評価が判定に加わっていることが評価の難易度を上げている¹⁰⁾。耐候性鋼材の腐食状況評価は、評価者の熟練度で左右されない方法で行われる

4. 2 表面状態の評価



(a) 不均一な色むらを生じている例



(b) 保護性さびに置き換わりつつある例

写真-4.1 P+T 処理を施した耐候性鋼橋梁の外観例

表-4.1 さび安定化補助処理を施した耐候性鋼橋梁の外観評価基準^{2), 9)}

さび・被膜の外観(例)				被膜部のさび状況 (%:1m ² 程度範囲のさび面積率) ⁴⁾			さび厚 ^{2), 1)} (μm)	
				被膜にさびが見られない、または、被膜の下や中に僅かなさびが見られる。	x	y		z
					<3%	<30%		>30%
被膜の外観	正常	A	あきらかな変・退色なし	A				
		B	あきらかな変・退色あり	B				
さび部の外観	正常 ⁵⁾	5	腐食が進まず、薄いさび		5-x	5-y	5-z	<400
		4	微細で外観平均粒径1mm程度の均一なさび		4-x	4-y	4-z	<600
		3	微細で外観平均粒径が5mm程度のさび		3-x	3-y	3-z	<600
	要観察	2	外観粒径5～25mm程度のうろこ状さび		2-x	2-y	2-z	<1000
			外観直径25mm程度以下の小さなこぶ状さび ¹⁾		2-x(b)	2-y(b)	2-z(b)	<1000
	異常	1	層状さび		1-x	1-y	1-z	>1000
			外観直径25mm程度を超える大きなこぶ状さび ¹⁾		1-x(b)	1-y(b)	1-z(b)	>1000

注) 1. (b)はこぶ状さび(bumpy rust)であることを示す。

2. さび厚は目安としての参考値である。

3. 被膜の残留も考慮して、裸使用材の目安に200μmを加算した。

4. 被膜が無くなり全面がさびに置換した後は、裸使用材の基準にて評価し、1~5の評点で記述する。

5. 正常の判定は、さび発生後の経過期間が9年以上であることを前提とする。



(a) 浮き被膜



(b) さびの堆積



(c) 塵埃の堆積

写真-4.2 P+T 処理材を用いた日本海沿岸地区耐候性鋼橋梁における
浮き被膜，さびおよび塵埃堆積の状況の例

のが好ましい。P+T処理材の劣化状態に左右されず、統一的な評価を行うために、評価前の前処理について具体的に検討した。

4. 3 前処理, 測定方法の検討

4. 3. 1 被膜・さびの前処理

日本海沿岸からの離岸距離が5km以内に架設され、15年経過したP+T処理材を用いた耐候性鋼橋梁における浮き被膜の例を写真-4.2(a)、さびの堆積の例を写真-4.2(b)に、塵埃の堆積状況の例を写真-4.2(c)にそれぞれ示す。写真-4.2(a)では被膜に防食機能の劣化が生じ、ウェブ面に浮き被膜が付着している。写真-4.2(b)では防食機能の劣化により生じた被膜と腐食により生じたさびが下フランジ上面に混在し堆積している。写真-4.2(c)の下フランジ上面には、塵埃の堆積が見られる。このような外観評価の障害や誤診の原因となる浮き被膜の付着、さびおよび塵埃の堆積を除去するその工程を前処理と位置付け、その効果を検証した。

腐食が激しい橋梁や部位では、腐食による母材の凹凸が大きくなるので、前処理効果の検証をするために必要な浮き被膜やさびの堆積の確認が難しい。そこで、比較的マイルドな環境下に架設され、P+T処理材の防食機能の劣化が進み、浮き被膜が多く発生している耐候性鋼橋梁を選定した。また、同橋梁においては、浮き被膜の防食機能や保護性の程度についても検証した。

具体的には、太平洋沿岸からの離岸距離が約5km に架設され、38年経過（竣工年1973年）したP+T処理材を用いた耐候性鋼橋梁を選定した。前処理効果の検証試験内容を表-4.2に示す。試験対象は前処理しない段階の外観評点が2-zと評価される内桁ウェブ面の約1m²の中から300mm×300mmの隣り合わせの3箇所（面）とした。前処理については、前処理なし、刷毛処理、およびヘラ処理を、検証試験の評価項目は、外観評価、さび・被膜厚値、およびイオン透過抵抗値とした。図-4.1に各前処理後の評価結果とそれぞれの箇所の中心部の接写写真を示した。また、各前処理のさび・被膜厚測定結果（平均値、最大値、最小値）を図-4.2に、各前処理のイオン透過抵抗測定結果を図-4.3に示す。なお、図-4.1、図-4.2、図-4.3の前処理対象部位は、それぞれ同じ箇所の結果である。

図-4.1より、前処理しない段階では外観評点が2-zであったものが、刷毛処理後では外観評点が5-y、ヘラ処理後では外観評点が5-zとなることがわかる。このことは、P+T処理材

を用いた耐候性鋼橋梁においては、前処理実施の有無で外観評点が3ランク変化することを示している。前処理を実施することで外観評価（評点）は変化しているが、これは浮き被膜、浮きさびによる誤判定によるものと考えられる。環境条件も厳しいわけではなく、板厚も減少していないことから、外観評価を正確に実施するためには、誤診の原因となる浮き被膜、浮きさび、および塵埃堆積物を除去する工程として、前処理が必要である。図-4.2に示した通り、各前処理後のさび・被膜厚値測定結果では、前処理なしの段階で得た平均値 $669\mu\text{m}$ は要観察状態を示すさび、最大値 $1,114\mu\text{m}$ は異常を示すさびと評価される。これに対して、刷毛処理後は、平均値 $205\mu\text{m}$ 、最大値 $348\mu\text{m}$ と、ともに正常なさびと評価される。ヘラ処理後も、平均値 $195\mu\text{m}$ 、最大値 $318\mu\text{m}$ と、ともに正常なさびと評価される。このことから、防食性能の程度を評価するため、さび・被膜厚値を正確に測定するには、外観評価と同様に、前処理が必要である。前処理方法としてのヘラ処理は、力加減をコントロールすることが難しく、評価が処理作業の力加減の影響を受け、削りすぎてしまうことがある。このことから前処理としては、刷毛処理が適していると考えられる。

現在の「さび安定化補助処理を施した耐候性鋼橋梁の外観評価基準^{2), 9)}」において、評価区分のさび・被膜厚値に被膜残存分としての $200\mu\text{m}$ が加算されていることについては、前処理の実施の有無でさび・被膜厚値が約 $500\mu\text{m}$ も減少することを考慮すると、浮き被膜を除去した場合についてはその必要性がないものと考えられる。ただし、浮きさびについては、それを除去しても被膜は固着さび上に付着しているのが一般的²⁾であるため、加算は合理的である。実際には被膜が浮いている部分と、固着さび上に付着している部分が混在しており、現場での判別は難しい。ここでは一律に $200\mu\text{m}$ 加算する方式²⁾を踏襲することにする。

P+T処理材を施した耐候性鋼橋梁のイオン透過抵抗値は、図-4.3より、前処理なし、刷毛処理後、ヘラ処理後と比較して、若干のパラツキがあるものの、約 $1\text{k}\Omega$ とほぼ一定の値を示した。これは、イオン透過抵抗値が浮き被膜や浮きさびの有無に影響されにくく、浮き被膜や浮きさびは、防食機能や保護性を持たないことを示している。すなわち、浮き被膜は、被膜としての機能を持たず、測定対象面に単に付着、堆積しているだけのものであると解釈できる。

P+T処理材を施した耐候性鋼橋梁のさび、被膜の状態をイオン透過抵抗法^{4), 5), 6), 7), 8)}から得られるI 評点の領域区分を適用する場合は、外観評価と同様に、浮き被膜、さびおよび塵埃の堆積を除去する工程としての前処理が必要であり、前処理としては刷毛処理が適していると考えられる。

4. 3 前処理, 測定方法の検討

表-4.2 P+T処理材を用いた太平洋沿岸の耐候性鋼橋梁における前処理効果の検証試験内容

前処理	規格	評価内容
前処理なし	-	外観写真・外観評点(3箇所)
刷毛	筋違 30号 70mm	さび・被膜厚測定(18点/箇所)
ヘラ	ステンレス製	イオン透過抵抗測定(6点/箇所)

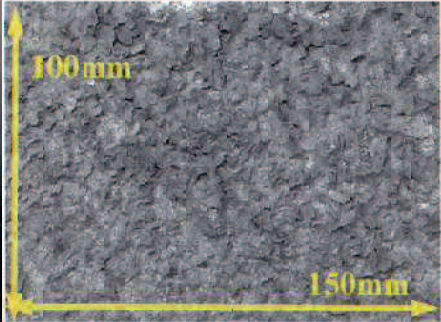
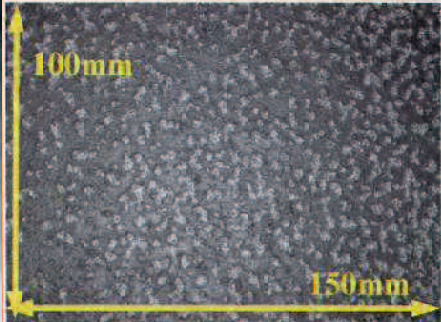
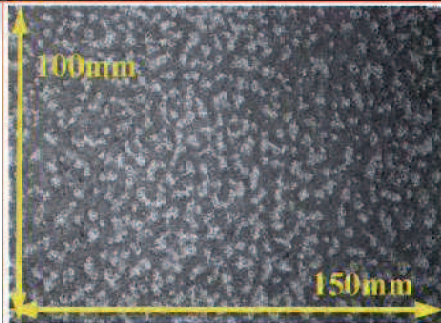
前処理	外観写真	外観評点
前処理なし		2-z
刷毛		5-y
ヘラ		5-z

図-4.1 各前処理の外観と外観評点

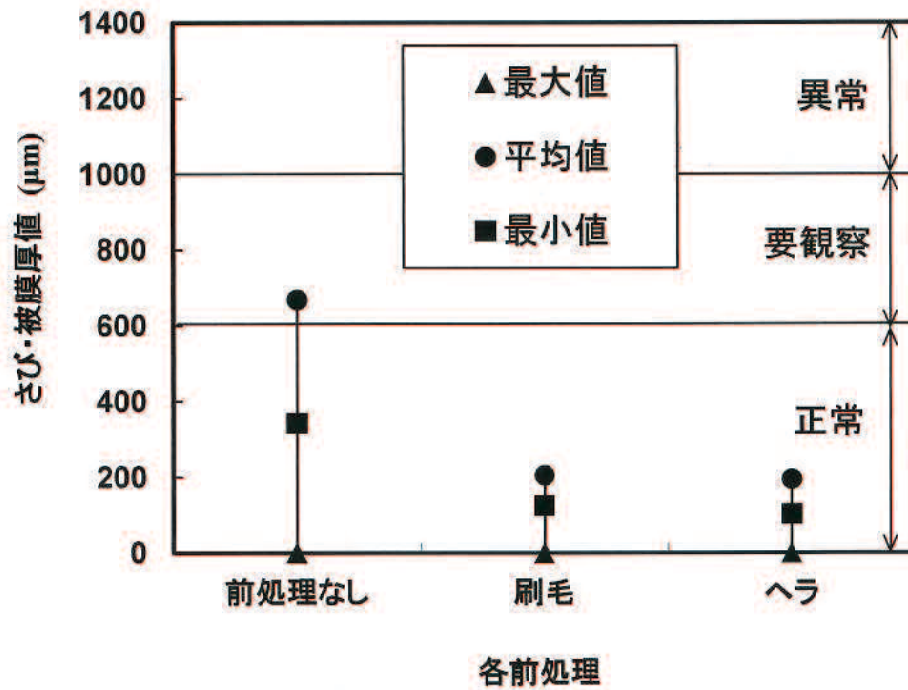


図-4.2 各前処理のさび・被膜厚値測定結果

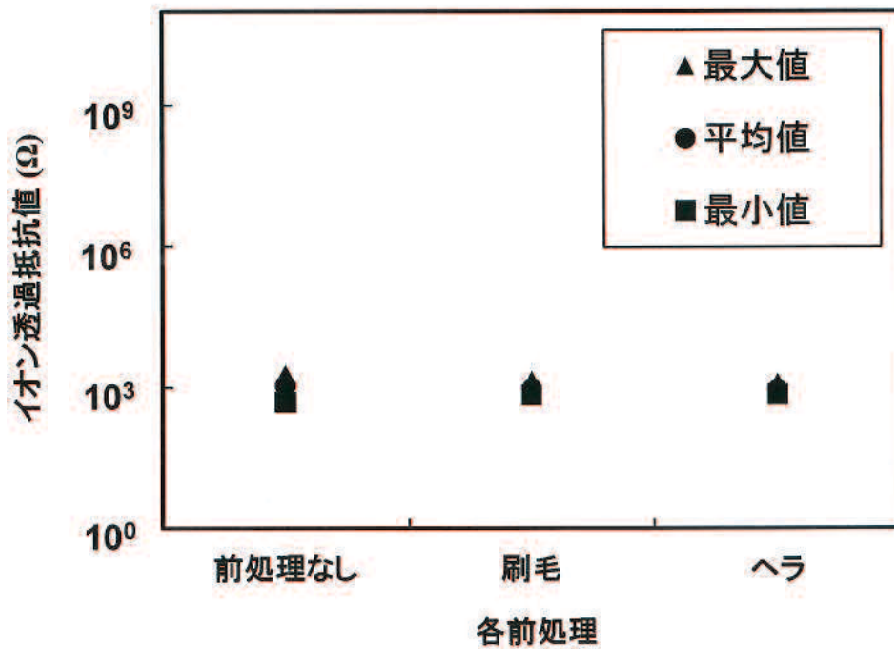


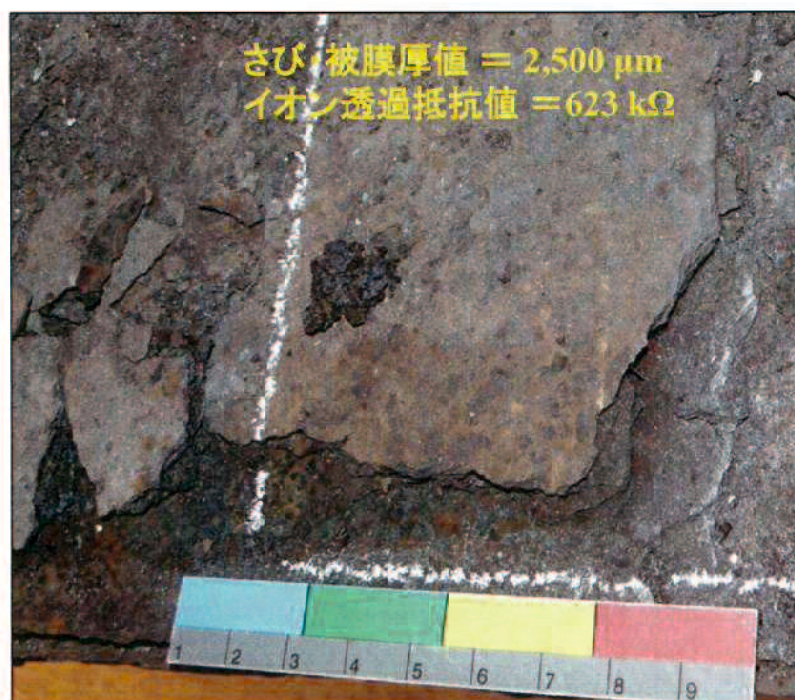
図-4.3 各前処理のイオン透過抵抗値測定結果

4. 3. 2 層状剥離さび発生部位の計測方法

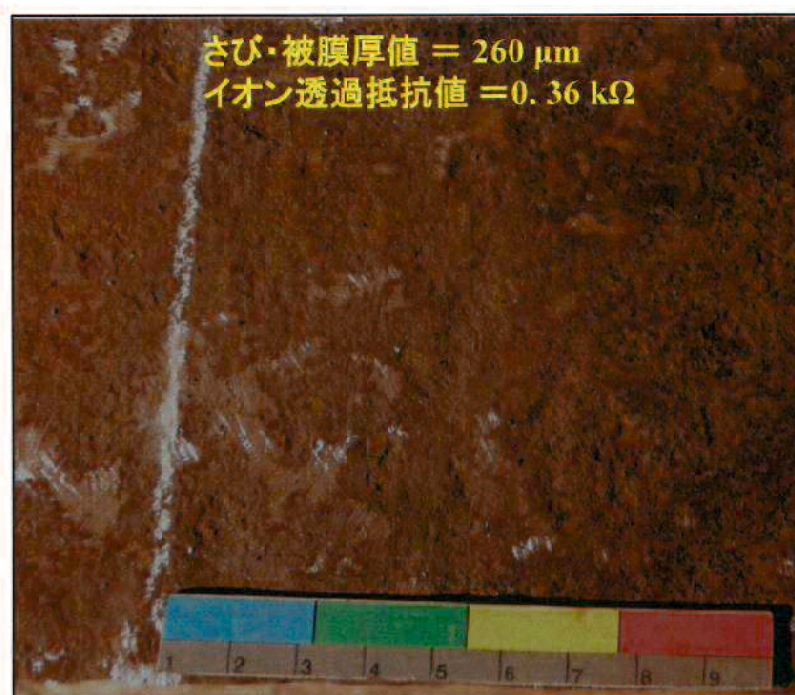
田園環境下で20年曝露したP+T処理材を用いた耐候性鋼橋梁の保護性さびをイオン透過抵抗法から得られるI 評点の領域区分で評価した結果、さび・被膜厚値は約100 μm 、イオン透過抵抗値は1k Ω 以上で保護性さびのI-4領域にあるとの知見^{2),13)}が報告されている。さびが安定化している状態でのイオン透過抵抗値の測定は比較的簡単であるが、層状剥離さびが生じたさび層をイオン透過抵抗法で評価する具体的な測定方法には留意が必要である。

イオン透過抵抗法とは、横軸に腐食速度のパラメータであるさび厚値を取り、縦軸にさび層の保護性のパラメータであるイオン透過抵抗値を取った評価図上で、プロットの位置によってさび性状を判定する手法である。さび厚値は、さび層に風化や剥離が生じない場合には、腐食速度と正の相関が得られる²⁾。ただし、さび層に風化や剥離が生じるとバラツキが大きくなる。層状さびの剥離直後の場合、層状さび剥離後に残ったさびが未成長さびや保護性さびに見える場合があるので、その目視判定は、十分に熟練している評価者でなければ困難である。イオン透過抵抗値は、地鉄界面に形成されるさびの機能を把握するものであり、測定するさび層の保護性が強ければ高く、保護性が弱ければ低くなる。このため、イオン透過抵抗値は鋼材表面のさび性状を判定する上で有効な指標となっている。ただし、イオン透過抵抗値が測定とすべき対象は、浮きさびや外層さびではなく、地鉄界面に生成するさびである¹³⁾。層状さび等の厚い異常さびが観測される場合には、さび厚を計測した後に外層さびや浮きさび層を除去し、固着さびのイオン透過抵抗を測定することが重要と考えられる。

以上のことを踏まえ、日本海沿岸からの離岸距離が5km以内に架設され15年経過し、層状剥離さびを生じたP+T処理材を用いた耐候性鋼橋梁にイオン透過抵抗法を適用する際の、さび・被膜厚値、イオン透過抵抗値の計り方について、具体的な検討を行った。層状剥離さび除去前後の外観、さび・被膜厚値、およびイオン透過抵抗値を図-4.4 に示す。層状剥離さびの除去には、ハンマーやヘラを用いた。図-4.4(a)に見られるように、P+T処理材の被膜はすでに消失し、層状剥離さび除去前のさび・被膜厚値は2,500 μm 、イオン透過抵抗値は623k Ω を示した。これらの値を、そのままイオン透過抵抗法から得られたI 評点の評価区分に当てはめると、異常さびを示すさびのI-1領域と診断される。また、図-4.4(b)より、層状剥離さび除去後のさび・被膜厚値は260 μm 、イオン透過抵抗値は0.36k Ω と低い値を示す。この値を、イオン透過抵抗法から得られたI 評点の評価区分にそのまま当てはめると、未成長さび・被膜(A)のI-5領域と評価される。つまり、層状剥離さびの除去の有無でイオン透過抵抗法の評価結果がI-1領域からI-5領域と大きく異なる。



(b) 層状剥離さび除去前



(a) 層状剥離さび除去後

図4.4 実橋梁での層状剥離さびの除去前後の外観。

さび・被膜厚値およびイオン透過抵抗値

外観評価においてもイオン透過抵抗法においても、さび・被膜厚値は、腐食速度の指標として用いるものである。したがって、厚い層状剥離さびが生じているにも関わらず、そのさびを取り除いてさび厚を計測してしまうと、腐食速度を現実よりもきわめて過小に評価してしまうことになる。イオン透過抵抗法の横軸としてのさび・被膜厚値には、層状さびの厚さを腐食速度で表すパラメータとしてそのまま採用するのがよい。一方、層状剥離さび除去前のイオン透過抵抗値測定では、空気層を含む厚い層状剥離さび^{14), 15)}そのものの抵抗値を計測してしまう。このため、図-4.4(a)の測定結果では、保護性さびの示す抵抗値（ $1k\Omega$ 以上）と比較して非常に高い値が得られたと考えられる。しかしながら、さび性状やさびの保護性を評価する目的において採用すべきイオン透過抵抗値は、このような外層さびや層状剥離さびの抵抗値ではなく、地鉄界面のさび、すなわち保護性の指標となるさびの抵抗値である。このため、層状剥離さび発生部位で、イオン透過抵抗法を採用する際には、層状剥離さび除去後に、イオン透過抵抗値を計測することが必要であると再認識した。

以上のことから、P+T処理材を用いた耐候性鋼橋梁に生じた層状剥離さび発生部位にイオン透過抵抗方法を適用する場合には、さび・被膜厚値は、層状剥離さび除去前の値を、イオン透過抵抗値はハンマーやヘラによる層状剥離さび除去後の値をそれぞれ測定し、評価区分に照らしながら評価することにした。

4. 4 既設の耐候性鋼橋梁で得られた結果

P+T処理材を用いた耐候性鋼橋梁の表面状態の確認とその評価方法を検討するため、表4.3に示す6地区に架設されたP+T処理材を施した19の耐候性鋼橋梁についてイオン透過抵抗法を適用し、297測定点の評価を実施した。ここで、北海道室蘭地区のさび・被膜厚、およびイオン透過抵抗測定値は、文献9)に記述されているものを用いた。

4. 4. 1 新潟県西蒲原地区

新潟県西蒲原地区橋梁におけるイオン透過抵抗法から得られたI 評点の領域区分の評価結果を図4.5に示す。また、図中の(a)～(e)は、表面状態の外観を示す写真4.3 (a)～(e)と対応している。図4.5と写真4.3からイオン透過抵抗法において評価された領域とその表面状態について記述する。図4.5に示す通りP+T処理材を用いた耐候性鋼橋梁についても裸使用と同様にイオン透過抵抗法から得られたI 評点の領域区分を行った。その領域区分としては、I-5 領域：未成長さび・被膜(A)，I-4 領域：保護性さび・被膜，I-3 領域：未成長さび・被膜(B)，I-2 領域：要観察状態を示すさび(A)，I-2'領域：要観察状態を示すさび(B)，I-1 領域：異常を示すさびに対応している。前述により、さび・被膜厚のしきい値には、裸使用のそれぞれに200 μm を加えてある。

図4.5の(a)、写真4.3(a)は、さび・被膜厚値98 μm 、イオン透過抵抗値0.8G Ω でI-4領域と判定され、被膜にチョーキングと思われる変退色が見られたので、外観評点Bとした。図4.5の(b)、写真4.3(b)は、さび・被膜厚値76 μm 、イオン透過抵抗値7M Ω でI-4領域と判定されたが、被膜に点さびの発生が観察されたので、外観評点5-yとした。図4.5の(c)、写真4.3(c)は、さび・被膜厚値104 μm 、イオン透過抵抗値13k Ω でI-4領域と判定されたが、被膜から保護性さびに置き換わりつつある状態であると見られたので、外観評点4-zとした。図4.5の(d)、写真4.3(d)は、さび・被膜厚値872 μm 、イオン透過抵抗値76 Ω でI-2領域と判定された。被膜は外観上見られず、うろこ状さびの発生が観察されたので、外観評点2-zとした。図4.5の(e)、写真4.3(e)は、さび・被膜厚値1,117 μm 、イオン透過抵抗値44 Ω でI-1領域と判定された。被膜は外観上見られず、全面に層状剥離さびが観察されたので、外観評点1-zとした。

イオン透過抵抗法におけるI-4領域には写真4.3(a)～(c)のような幅広い表面状態の外観が含まれる。この外観の違いは、初期被膜から被膜の防食機能の劣化を経て、保護性さび形成に至る各段階を表している。被膜は徐々に防食機能を劣化させながら保護性さびに置

4. 4 既設の耐候性鋼橋梁で得られた結果

表-4.3 評価対象橋梁

対象橋梁地域	橋梁数	測定点	P+T処理材の種類 (タイプ)	経年 (年)	離岸距離 (km)
新潟県西蒲原	4	34	燐酸塩／アクリル樹脂複層型 (熟成タイプ)	12～20	2～8
北海道室蘭 ⁹⁾	3	45	燐酸塩／アクリル樹脂複層型 (熟成タイプ)	25	0.8～1.2
富山県氷見	2	21	ブチラール樹脂／アクリル 樹脂複層型 (熟成タイプ)	18～20	3
鳥取県泊 ¹⁸⁾	1	36	ブチラール樹脂複層型 (促進タイプ)	9	0.5
島根県松江 ¹⁹⁾	1	33	ブチラール樹脂複層型 (促進タイプ)	1	13
島根県益田	8	128	燐酸塩／アクリル樹脂複層型 (熟成タイプ)	24	0.5～2
合 計	19	297	—	—	—

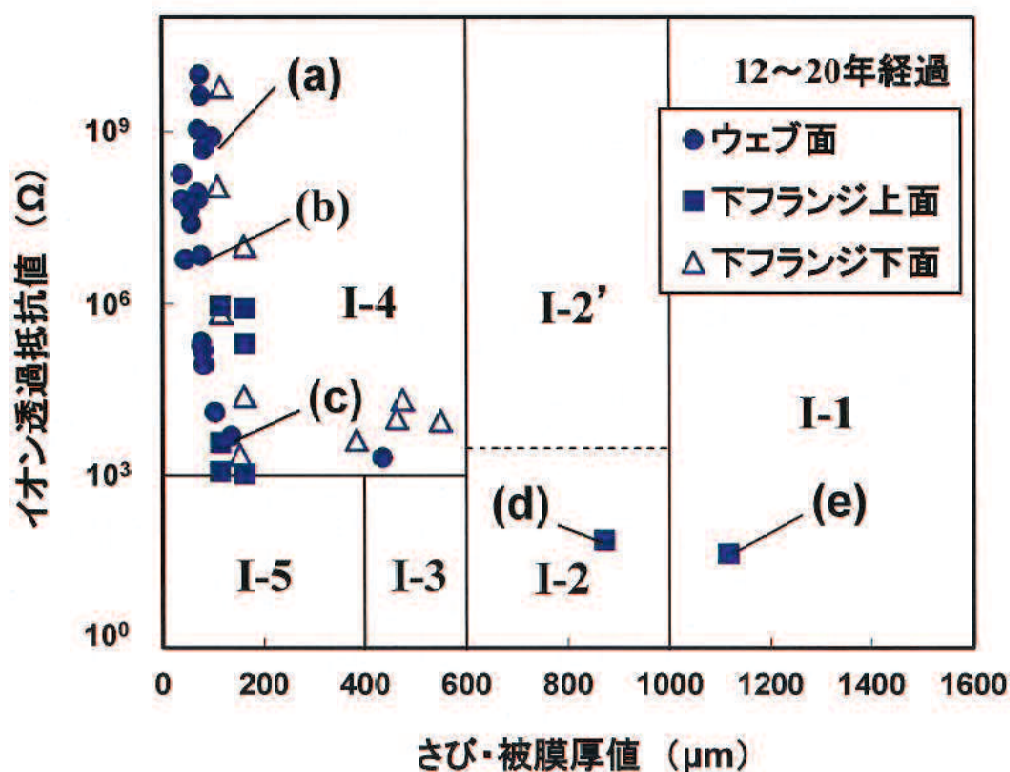
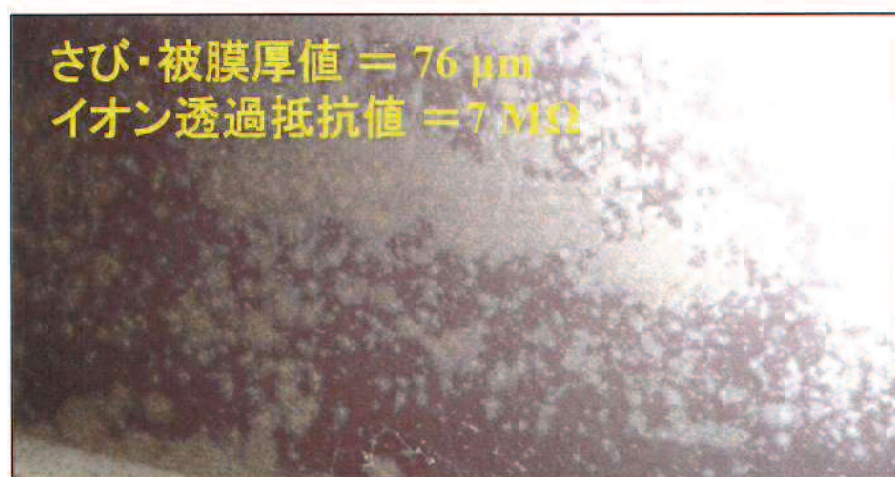


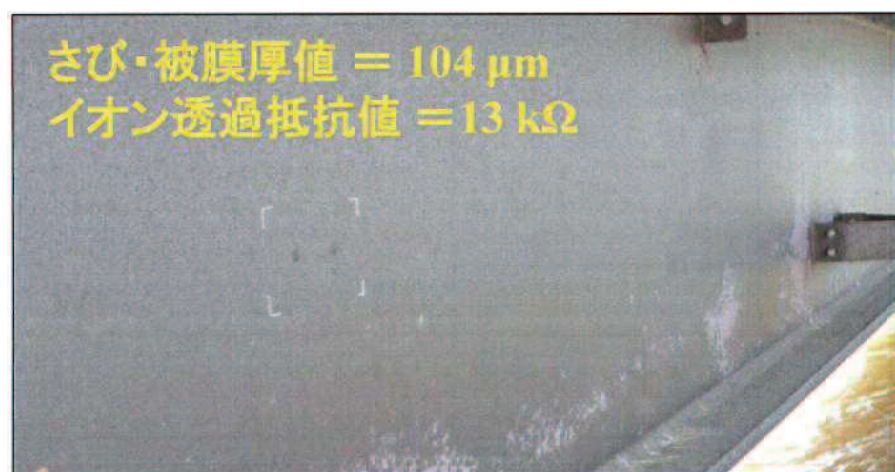
図-4.5 新潟県西蒲原地区橋梁におけるイオン透過抵抗法の評価結果



(a) 被膜変退色



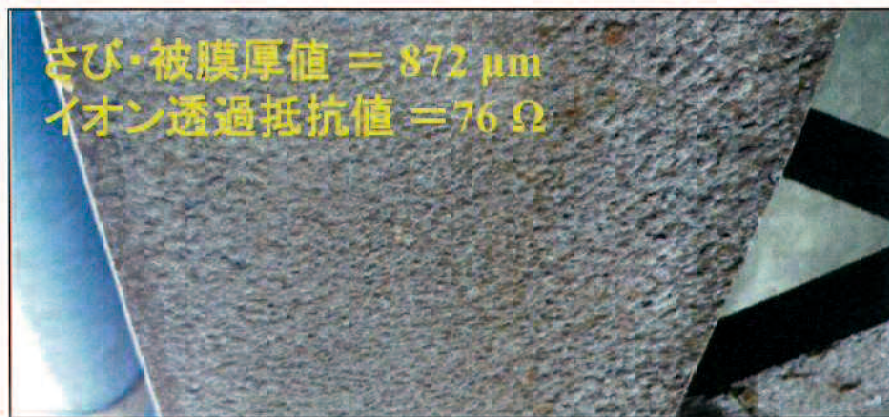
(b) 被膜に点さび発生



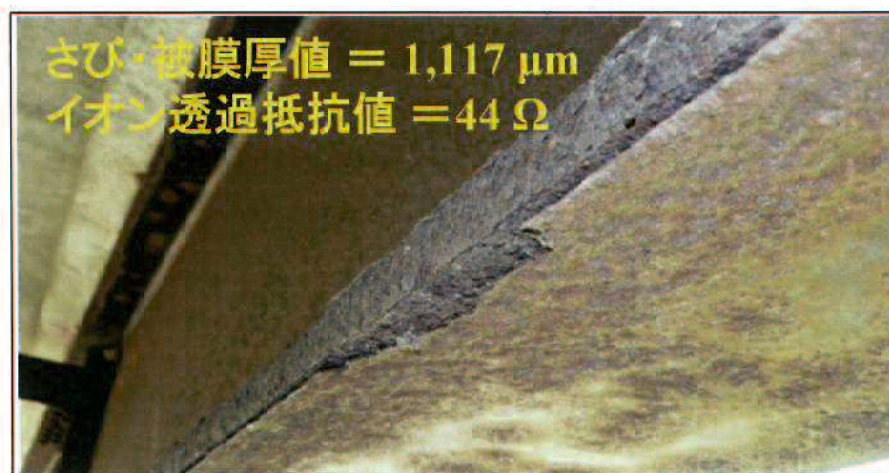
(c) 保護性さび

写真-4.3 新潟県蒲原地区耐候性鋼橋梁における表面状態の外観

(上記写真中(a)～(e)は図-4.5(a)～(c)と対応)



(d) 要観察状態を示すさび（うろこ状さび）



(e) 異常を示すさび（層状剥離さび）

写真-4.3 新潟県蒲原地区耐候性鋼橋梁における表面状態の外観

（上記写真中(a)～(e)は図-4.5(a)～(c)と対応）

き換わる。この過程では P+T 処理材の被膜に初期さびや保護性さびが混在する。当該橋梁における外観結果や境ら¹⁶⁾や守屋ら¹⁷⁾の報告から、実際には P+T 処理材の被膜が消失しながら被膜劣化が進行し、それと同時に、母材との界面に生成するさびの成長とともに被膜が徐々に外層に押し出されると考えられる。この被膜がすべて見かけ上見えなくなった時点で保護性さび形成に至ったと整理することができる。

イオン透過抵抗法の評価結果より、経年数 12 年～20 年で、測定点の 94%が変退色した被膜を含む I-4 領域の保護性さび・被膜に、測定点の 3%が I-2 領域の要観察状態を示すさび(A)に、測定点の 3%が I-1 領域の異常を示すさびに移行したと判定できた。補修等の対処法を検討する必要がある要観察状態を示すさび(A)と異常を示すさびを合わせると、測定

点の6%を占めた。部位的には下フランジ上面、下フランジ下面に多く発生していた。

4. 4. 2 北海道室蘭地区

北海道室蘭地区橋梁⁹⁾におけるイオン透過抵抗法から得られたI 評点の領域区分の評価結果を図-4.6 に示す。当該地区橋梁の評価結果より、経年数25年で、測定点の84%がI-4 領域の保護性さび・被膜、測定点の16%がI-2'領域の要観察状態を示すさび(B)と判定された。部位的にはウェブ面、下フランジ上面および下フランジ下面に発生していた。

4. 4. 3 富山県氷見地区

富山県氷見地区橋梁におけるイオン透過抵抗法から得られたI 評点の領域区分の評価結果を図-4.7 に示す。当該地区橋梁の評価結果より、経年数18年～20年で、測定点の95%がI-4 領域の保護性さび・被膜、測定点の5%がI-3 領域の未成長さび・被膜(B)と判定され、I-2 領域の要観察状態を示すさび(A)、I-2'領域の要観察状態を示すさび(B)、I-1 領域の異常を示すさびは見られなかった。

4. 4. 4 鳥取県泊地区

鳥取県泊地区橋梁¹⁸⁾におけるイオン透過抵抗法から得られたI 評点の領域区分の評価結果を図-4.8 に示す。当該地区橋梁の評価結果より、経年数9年で、測定点の69%がI-4 領域の保護性さび・被膜、測定点の3%がI-3 領域の未成長さび・被膜(B)、測定点の19%がI-2 領域の要観察状態を示すさび(A)、測定点の6%がI-2'領域の要観察状態を示すさび(B)、測定点の3%がI-1 領域の異常を示すさびと判定された。補修等の対処法を検討する必要がある要観察状態を示すさび(A)、(B)と異常を示すさびは合わせて、測定点の28%を占め、部位的には、支承周りの下フランジ上面に多く発生していた。この橋梁は、経年数9年と比較的早期に要観察状態を示すさび(A)、および異常を示すさびが生じていることから、さらに詳細診断を行い、詳細補修設計を検討する必要があると考えられる。

4. 4. 5 島根県松江地区

島根県松江地区橋梁¹⁹⁾におけるイオン透過抵抗法から得られたI 評点の領域区分の評価結果を図-4.9 に示す。当該地区橋梁の評価結果より、経年数1年で、測定点の100%が変退色なしと変退色ありの被膜を含むI-4 領域の保護性さび・被膜と判定された。経年数1年という早期の段階で保護性さび・被膜の生成に至った原因は、当該橋梁に適用されたP+T

処理材が早期に保護性さび生成効果を発揮したためと推察するのも可能ではあるが、1年で $1\text{M}\Omega$ 以下となるのはP+T処理材として見た場合に防食機能の劣化が早いとも仮説できるので、今後の推移を注意深く継続観察していく必要がある。

4. 4. 6 島根県益田地区

島根県益田地区橋梁におけるイオン透過抵抗法から得られたI評点の領域区分の評価結果を図-4.10に示す。当該地区橋梁の評価結果より、経年数24年で、測定点の2%がI-5領域の未成長さび・被膜(A)、測定点の69%がI-4領域の保護性さび・被膜、測定点の12%がI-3領域の未成長さび・被膜(B)、測定点の15%がI-2領域の要観察状態を示すさび(A)、測定点の2%がI-1領域の異常を示すさびと判定された。補修等の対処法を検討する必要がある要観察状態を示すさび(A)、(B)と異常を示すさびは、合わせて、測定点の17%を占め、部分的には下フランジ上面、下フランジ下面に多く発生していた。

4. 4. 7 地区橋梁のイオン透過抵抗法の評価結果比較

対象橋梁の地区別評価結果の比較を図-4.11 a)、部位別評価結果の比較を図-4.11 b)に示す。6地区橋梁の地区別評価結果より、測定点の1%がI-5領域の未成長さび・被膜(A)、測定点の80%が変退色なしと変退色ありの被膜を含むI-4領域の保護性さび・被膜、測定点の6%がI-3領域の未成長さび・被膜(B)、測定点の9%がI-2領域の要観察状態を示すさび(A)、測定点の3%がI-2'領域の要観察状態を示すさび(B)、測定点の1%がI-1領域の異常を示すさびと判定された。今回評価したP+T処理材を用いた耐候性鋼橋梁においては、測定点の87%が正常な表面状態(I-5領域+I-4領域+I-3領域)にあり、測定点の13%が正常でない表面状態(I-2領域+I-2'領域+I-1領域)であった。

部位別の評価結果(図-4.11 b))より、全ウェブ面の93%が正常な表面状態(I-5領域+I-4領域+I-3領域)にあり、測定点の7%が正常でない表面状態(I-2領域+I-2'領域+I-1領域)であると判定された。また、全下フランジ上面の68%が正常な表面状態(I-4領域+I-3領域)にあり、測定点の32%が正常でない表面状態(I-2領域+I-2'領域+I-1領域)であると判定された。さらに、全下フランジ下面の93%が正常な表面状態(I-4領域+I-3領域)にあり、測定点の7%が正常でない表面状態(I-2領域+I-2'領域)であると判定された。全ウェブ面と全下フランジ下面と比較して全下フランジ上面の方が要観察状態を示すさび(A)、要観察状態を示すさび(B)、および異常を示すさびを生じた測定点が約4倍多いことが確認された。

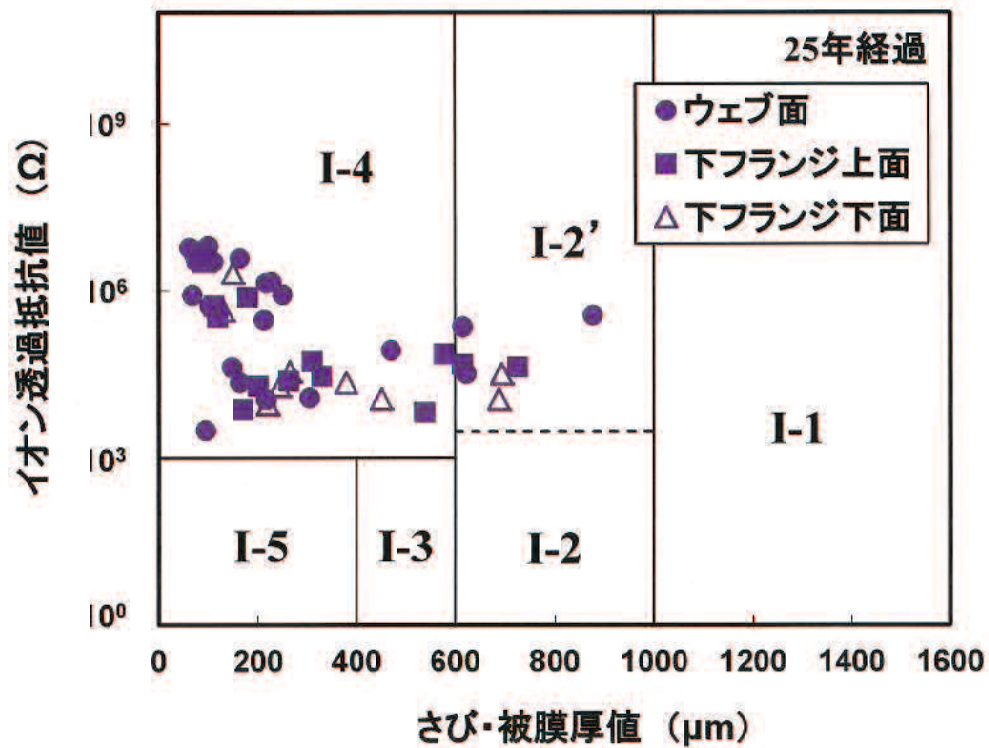


図-4.6 北海道室蘭地区橋梁⁹⁾におけるイオン透過抵抗法の評価結果

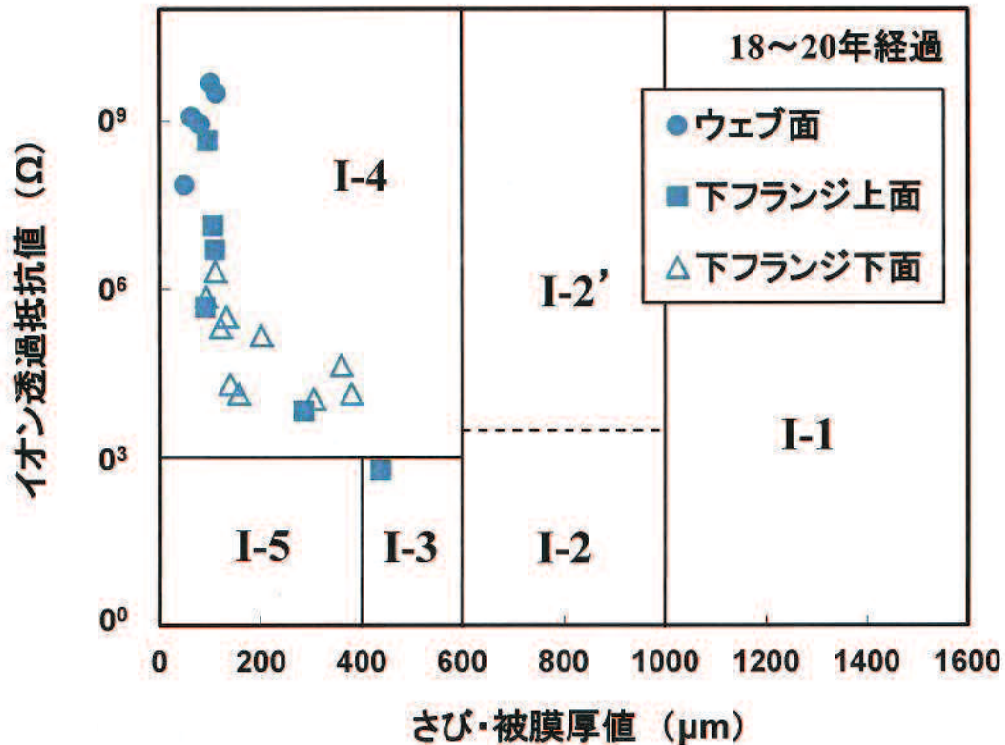


図-4.7 富山県氷見地区橋梁におけるイオン透過抵抗法の評価結果

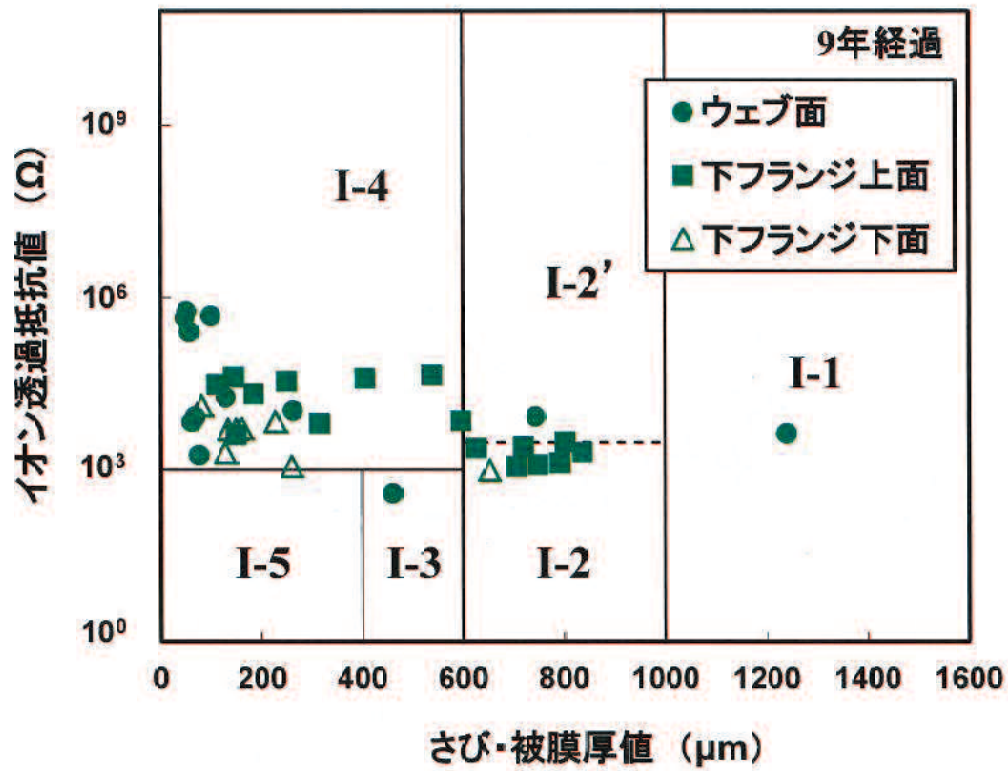


図-4.8 鳥取県泊地区橋梁¹⁸⁾におけるイオン透過抵抗法の評価結果

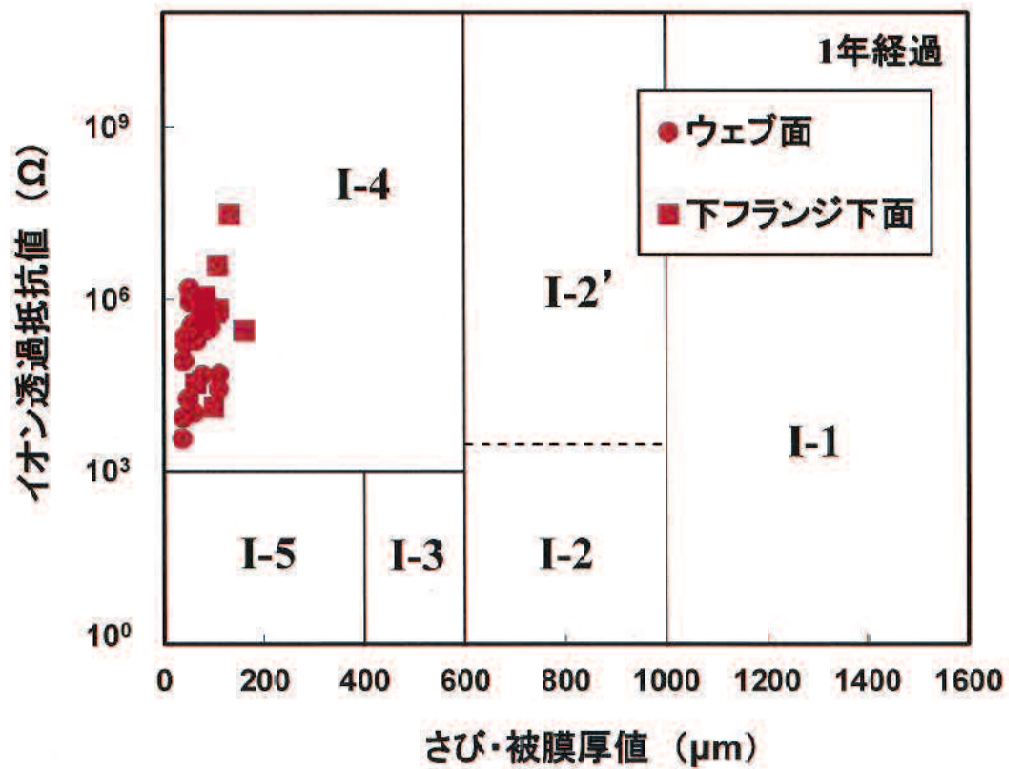


図-4.9 島根県松江地区橋梁¹⁹⁾におけるイオン透過抵抗法の評価結果

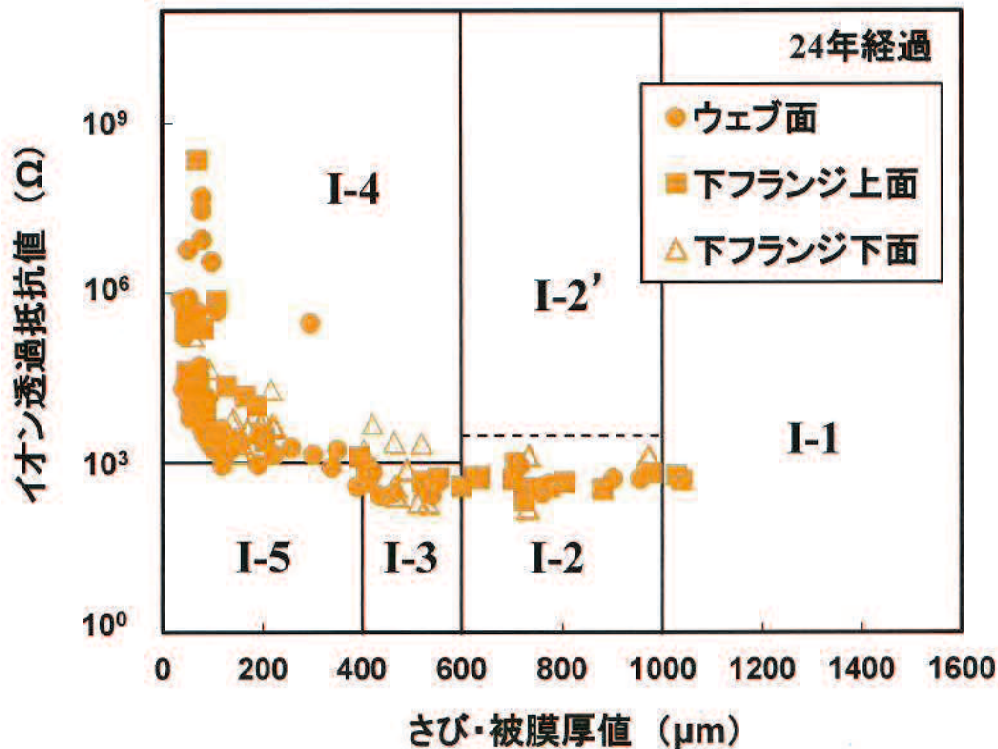
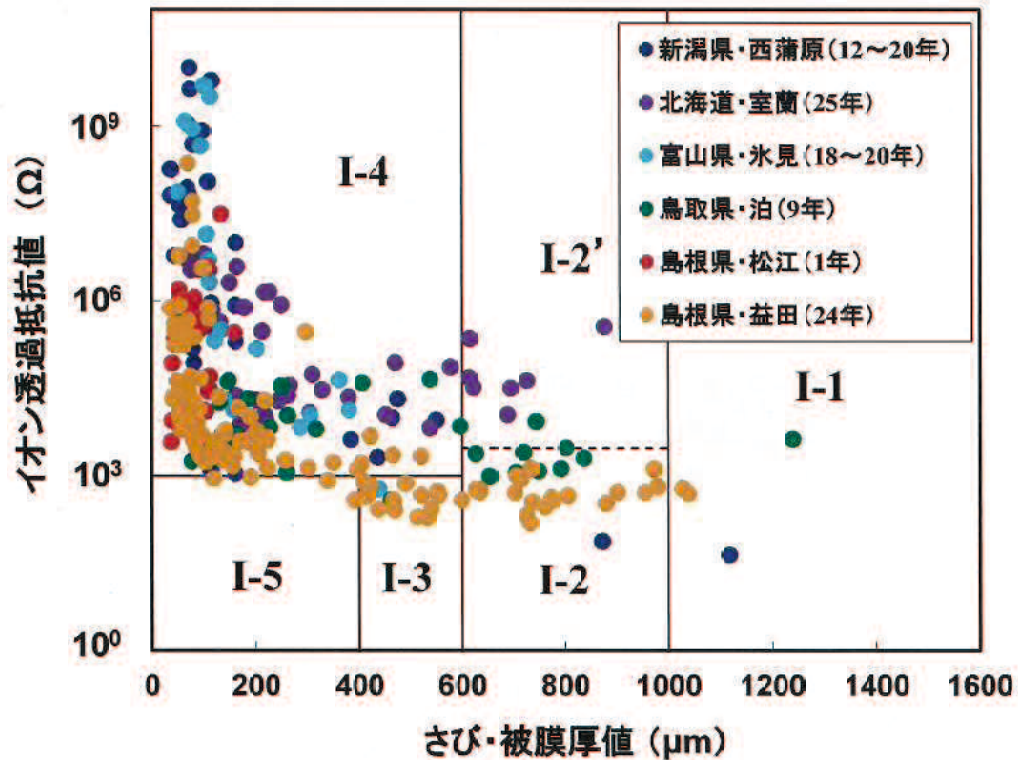


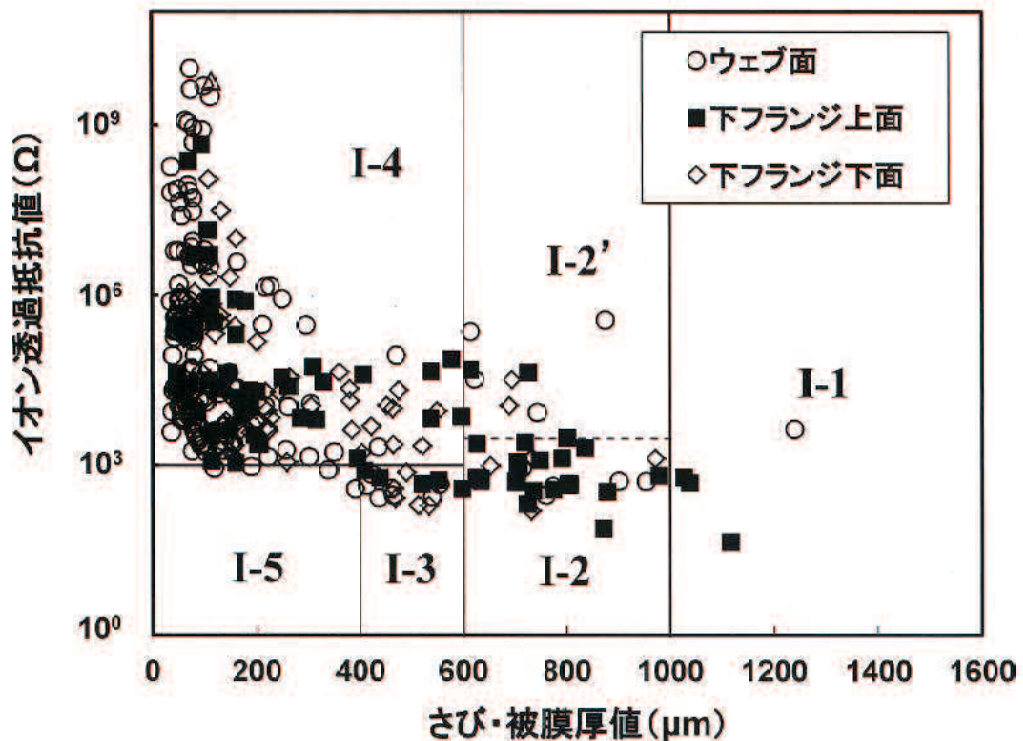
図-4.10 島根県益田地区橋梁におけるイオン透過抵抗法の評価結果

4. 5 イオン透過抵抗法の評価結果の解釈

P+T処理材を用いた6地区の耐候性鋼橋梁のイオン透過抵抗法から得られたI 評点の領域区分の評価結果から得られた図-4.11をもとに、防食機能の劣化、腐食がどのように進み、その進路はどう分類できるかを検討した。P+T処理材を用いた6地区の耐候性鋼橋梁の腐食環境や経年数はそれぞれが異なる中で、図-4.11に示す イオン透過抵抗法から得られたI 評点の領域区分の評価結果としての各測定点は、そこに留まるもの、さらに変化するものも含めて、様々な段階での防食機能の劣化あるいは腐食過程のある一時期の表面状態を描写していると考えられる。初期段階は、すべて外観評点Aに相当する被膜に変退色なし（初期被膜）から防食機能の劣化が始まり、そこから、現在の状態に移行した結果が図-4.11にプロットされた各測定点であると解釈される。これらP+T処理材を用いた耐候性鋼橋梁は、初期被膜からI-4領域の保護性さび・被膜へ、あるいは初期被膜からI-4領域を経てI-2領域の要観察状態を示すさび(A)、I-2' 領域の要観察状態を示すさび(B)へ向うことが想定できる。



(a) 対象橋梁の地区別評価結果の比較



(b) 対象橋梁の部位別評価結果の比較

図-4.11 6地区橋梁におけるイオン透過抵抗法の評価結果比較

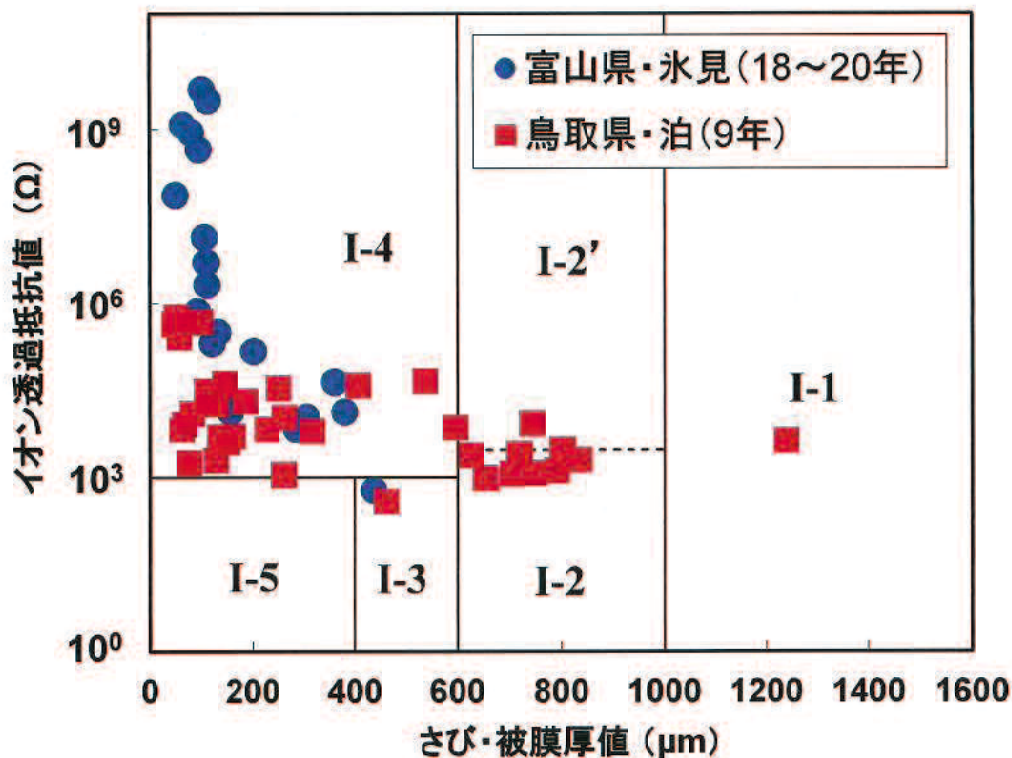


図-4.12 富山県氷見地区橋梁と鳥取県泊地区橋梁における
イオン透過抵抗法の評価結果の比較

具体的には、図-4.12に示す通り、富山県氷見地区橋梁は、経年数18年～20年にも関わらず、I-2領域の要観察状態を示すさび(A)，I-2'領域の要観察状態を示すさび(B)，I-1領域の異常を示すさびに至る経路上に測定点がなく、初期被膜からI-4領域の保護性さび・被膜へ移行し留まる典型と考える。ここで、未成長さび(B)のI-3の領域にある1測定点については、①調査時点で経年数も約20年経過していること、②さび・被膜厚が439 μm であることから、現状のプロットが早期に要観察状態を示すさび(A)，(B)に移行することは考えにくいと解釈している。

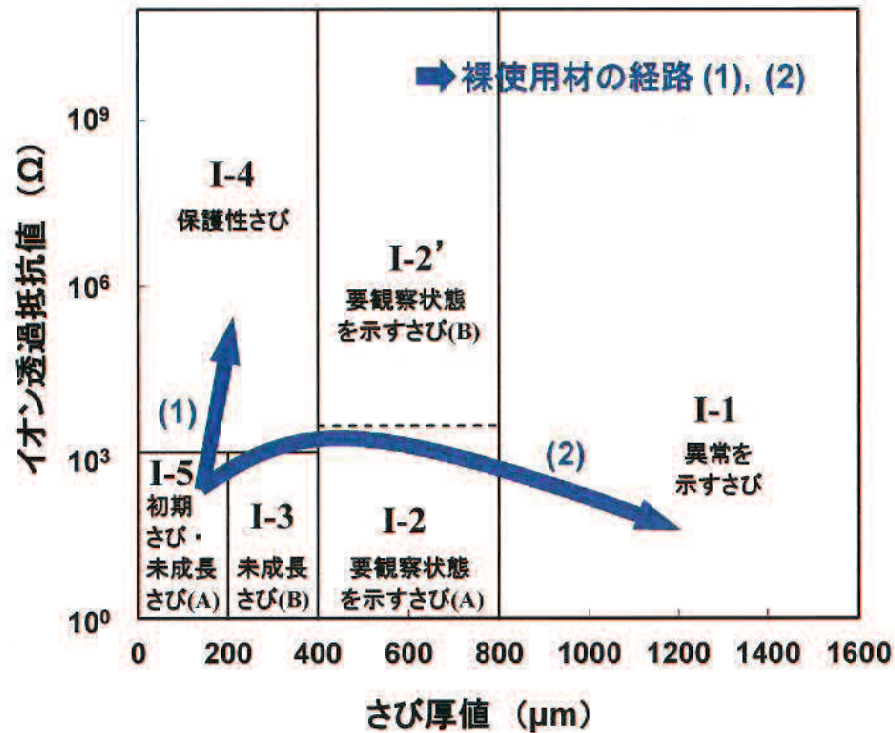
これに対して鳥取県泊地区橋梁は、経年数9年と短いにも関わらず、初期被膜からI-4領域の保護性さび・被膜の過程を早期に通過し、I-2領域の要観察状態を示すさび(A)，I-2'領域の要観察状態を示すさび(B)あるいはI-1領域の異常を示すさびに至る典型と考える。

以上のことから考えられる防食機能の劣化・腐食の進行経路のイメージを図-4.13に示した。裸使用の場合、図-4.13 a)の(1)が保護性さびにいたる経路で、(2)が要観察状態を示すさび(A)，異常を示すさびに至る²⁰⁾経路であると考えている。

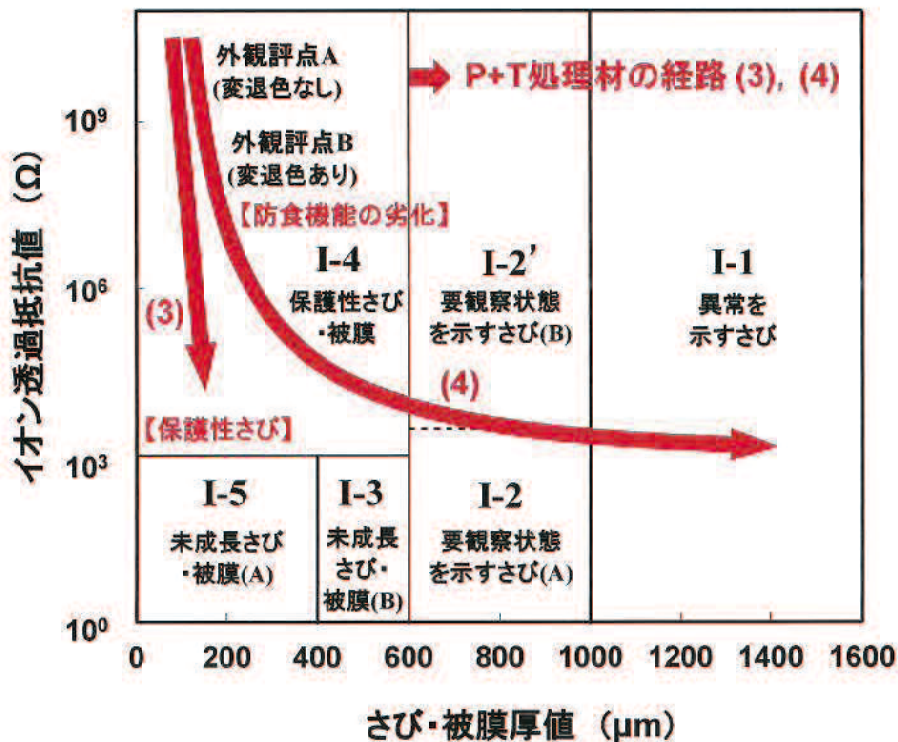
これに対しP+T処理材における防食機能の劣化・腐食の進行経路は、図-4.13 b)より、外観評点Aから外観評点Bの防食機能の劣化過程を経てI-4領域の保護性さび・被膜に至る経路(3)と、外観評点Aから外観の要観察状態を示すさび(A)、I-2' 領域の要観察状態を示すさび(B)やI-1領域の異常を示すさびに至る経路(4)があることがわかった。

P+T処理材を用いた耐候性鋼橋梁の評価にイオン透過抵抗法を適用する利点は、①外観評点法と比較してより定量的であること、②同じくさびの保護性判定が可能とされている電位法（30分/点²¹⁾）と比較して測定時間が約30秒～1分/点と短く測定効率が良いことがあげられる。これらの利点に加えて、③さび・被膜厚値の変化からだけでは推定できない表面状態の変化，すなわち，保護性さびに移行する経路にあるのか，異常を示すさびに移行する経路にあるのかを推定できる可能性が高い。

今後この防食機能の劣化・腐食の進行経路の正しさを検証するため，定点評価結果を蓄積することが課題である。



(a) 裸使用材における腐食の進行経路イメージ



(b) P+T 処理材における防食機能の劣化・腐食の進行経路イメージ

図4.13 イオン透過抵抗法の評価結果の防食機能劣化・腐食の進行経路イメージ

4. 6 第4章のまとめ

P+T処理材を用いた耐候性鋼橋梁の防食機能の劣化・腐食状態をイオン透過抵抗法から得られたI 評点の領域区分で評価した。その結果、得られた知見を以下に示す。

- (a) P+T処理材における防食機能の劣化・腐食の進行経路は、外観評点Aから外観評点Bの防食機能の劣化過程を経てI-4領域の保護性さび・被膜に至る経路(3)と、外観評点Aから外観評点Bの防食機能の劣化過程、I-4領域の保護性さび・被膜の過程を早期に通過し、I-2領域の要観察状態を示すさび(A)、I-2' 領域の要観察状態を示すさび(B)やI-1領域の異常を示すさびに至る経路(4)があることが解析できた。
- (b) P+T処理材を用いた耐候性鋼橋梁のイオン透過抵抗法を適用するには、外観評価と同様に、浮き被膜、さびおよび塵埃の堆積を除去する工程としての前処理が必要であり、前処理としては刷毛処理が適している。
- (c) P+T処理材を用いた耐候性鋼橋梁に生じた層状剥離さび発生部位にイオン透過抵抗法を適用する場合には、裸材の場合と同様に、さび・被膜厚値は、層状剥離さび除去前の値を、イオン透過抵抗値はハンマーやヘラによる層状剥離さび除去後の値を測定し、評価するのが良い。
- (d) 今回評価したP+T処理材を用いた耐候性鋼橋梁においては、測定点の87%が正常な表面状態 (I-5領域+I-4領域+I-3領域) にあり、測定点の13%が正常でない表面状態 (I-2領域+I-2' 領域+I-1領域) にあった。
- (e) 今回評価したP+T処理材を用いた耐候性鋼橋梁における部位別評価結果から、全ウェブ面と全下フランジ下面と比較して全下フランジ上面の方が要観察状態を示すさび(A)、要観察状態を示すさび(B)、および異常を示すさびを生じた測定点が約4倍多いことが確認された。

以上のことから、P+T処理材を用いた耐候性鋼橋梁の評価にイオン透過抵抗法から得られたI 評点の領域区分を適用することで表面状態を評価できることが明らかとなった。今後この防食機能の劣化や腐食の進行の経路の正しさを検証するため、定点評価結果を蓄積していきたい。また、今回評価対象とならなかった他のP+T処理材を用いた耐候性鋼橋梁でも同様な定点評価結果を蓄積していく必要がある。

第4章の参考文献

- 1) (社)日本道路協会：鋼道路橋塗装・防食便覧，2005.
- 2) (社)日本鋼構造協会：テクニカルレポート No. 73「耐候性鋼橋梁の可能性と新しい技術」，2006.
- 3) 国土交通省 国道・防災課：橋梁定期点検要領(案)，2004.
- 4) (社)日本鋼構造協会：テクニカルレポート No. 86「耐候性鋼橋梁の適用性評価と防食予防保全」，2009.
- 5) 今井篤実，立花仁，松本洋明，紀平寛：鋼構造物の腐食診断にむけたイオン透過抵抗法の適用，防錆管理，Vol.51，No.5，pp.216-221，2007.
- 6) 紀平寛，塩谷和彦，幸英昭，中山武典，竹村誠洋，渡辺祐一：耐候性鋼さび安定化評価技術の体系化，土木学会論文集，No.745/I-65，pp.77-87，2003.
- 7) 今井篤実，相賀武英，野田圭太郎，山本哲也：耐候性鋼橋梁の部分補修塗装事例(1)，土木学会第65回年次学術講演会，I-183，pp.365-366，2010.
- 8) 佐藤恒明，岩崎英治，加藤智久，野口成人，向井英和，立花仁，今井篤実：耐候性鋼橋の腐食状況のモニタリング追跡調査，土木学会第65回年次学術講演会，I-167，pp.333-334，2010.
- 9) (独)北海道開発土木研究所，(社)日本橋梁建設協会，(社)日本鉄鋼連盟：無塗装耐候性鋼橋の劣化判定基準法に関する研究報告書，2004.
- 10) 松崎靖彦，大屋誠，安食正太，武邊勝道，麻生稔彦：さび安定化補助処理された耐候性鋼橋梁の腐食実態と評価に関する一考察，土木学会論文集F，Vol.62，No.4，pp.581-591，2006.
- 11) 今井篤実，大屋誠，武邊勝道，麻生稔彦：さび安定化補助処理を施した耐候性鋼橋梁の表面状態とその評価，土木学会論文集A1(構造・地震工学)，Vol.69，No.2，pp.283-294，2013.
- 12) 伊藤陽一，山口伸一，増田一広，加藤忠一：長暴型さび安定化処理した耐候性鋼の諸特性，第17回防錆防食技術発表大会講演予稿集，pp.53-56，1997.
- 13) 紀平寛：耐候性鋼上の安定化さび形成状況評価と診断，材料と環境，Vol.48，pp.697-700，1999.
- 14) 伊藤実，宇佐見明，田辺康児，都築岳史，楠隆，富田幸男：無塗装使用可能な海浜耐候性鋼，新日鉄技報 371号，pp.78-83，1999.
- 15) 保坂鐵矢，加藤順，楠隆：高耐候性鋼の開発と無塗装橋梁への適用，橋梁と基礎，Vol.36，No.6，pp.31-38，2002.
- 16) 境昌宏，長谷部智久，美馬大樹，西弘明，小室雅人，岸徳光：30年以上経過した表面処理仕様耐候性鋼橋梁の腐食調査，材料と環境，Vol.61，pp.161-165，2012.

- 17) 守屋進, 前島実, 中原勝也, 岩瀬正佳, 西尾大, 上村孝之他: 北陸日本海海岸に 10 年間曝露した耐候性鋼保護性さび生成促進処理橋梁模擬試験体のさび性状, 土木学会第 65 回年次学術講演会, I-165, pp.329-330, 2010.
- 18) 佐野大樹, 吉中智弘, 永瀬禎, 廣瀬貴裕, 宇津田俊哉, 森脇由香, 武邊勝道, 大屋誠: さび安定化促進処理された既設耐候性鋼橋梁のさびの粗さとさび評価, 土木学会第 65 回年次学術講演会, I-173, pp.345-346, 2010.
- 19) 大屋誠, 武邊勝道: 平成22年度松江高専と島根県との共同研究「松江第五大橋道路の鋼橋における腐食環境の評価」報告書, 2011.
- 20) 麻生稔彦, 徳永浩三, 今井篤実: 耐候性鋼材のさび生成に関する基礎的実験, 鋼構造年次論文報告集, Vol.18, pp.617-624, 2010.
- 21) 鹿島和幸, 原修一, 岸川浩史, 幸英昭: 耐候性鋼さび層の電位による保護性評価, 材料と環境, Vol.49, pp.15-21, 2000.

第5章

無塗装耐候性鋼材の 異常さび対処法に関する検討

第5章

無塗装耐候性鋼材の異常さび対処法に関する検討

5.1 概要

耐候性鋼橋梁の多くは、腐食速度の低減が可能な保護性さびが生成され、この保護性さびが防食機能を発揮することで、塗装、めっき、溶射と異なり、塗り替え等の費用発生がなくライフサイクルコスト低減が期待される。一方で、飛来塩分の多い海浜地域や多くの凍結防止剤が散布される内陸地域では、局部的に異常さびが発生している事例も報告されている¹⁾。

耐候性鋼材が保護性さびを生成し、適切に防食機能を発揮できるための条件は、①適度に乾湿が繰り返されること、②滞水などにより絶えず湿潤な状態とならないこと、③通風性が確保されること、および④塩分等の異物の付着が少なく、付着した場合には速やかに洗い流されるなどにより表面に長期に滞留しないこととされている²⁾。ただし、海岸地区であっても、雨水水洗効果がある部位では、保護性さびが生成される場合が多いとの事例も報告されている³⁾。しかしながら、保護性さびの生成とその生成条件との関係は必ずしも明確になっていない。

異常さびが生成した場合の対処法としては、その原因の排除が前提となる。しかしながら、原因が排除できない場合には、維持管理コストを減らしながら長寿命化に向けた何らかの対応が必要となる。従来、鋼構造物では一部に変状が見られた場合には、全面を塗装することにより対応してきたが、維持管理の対象となる橋梁が増加していることや財政的な面から、コスト縮減に向け、全面補修ではなく部分補修^{4), 5)}などの新たな取り組みが実施されるようになった。耐候性鋼橋梁においても、わずかな変状をとらえ、異常部位を選定し、異常部位のみを部分補修塗装する対処法の実施例⁶⁾も報告されている。

しかしながら、このような補修塗装の場合は、塗装による今後の維持管理費の増加につながる可能性があるため、耐候性鋼材の防食機能を生かした補修による維持管理費の低減が可能な対処法が必要である。その対処法の一つとして桁水洗が考えられる。桁水洗は、近年、塗装橋梁において注目され、凍結防止剤を多く散布する塗装道路橋などで桁水洗効果があることが実証されつつあり、一部の地域では実用化^{7), 8)}されている。しかしながら、耐候性鋼橋梁に異常さびが生成した場合の桁水洗の実施例^{9), 10)}はわずかであり、耐候性鋼

材に異常さびが生じている場合の桁水洗の定量的な効果の検証は未だなされていない。高塩分環境下では、耐候性鋼材に生成しているさび内に高濃度の塩分が内在し、地鉄界面まで達していることから、その塩分の除去は容易ではないことが知られている^{11), 12)}。また、耐候性鋼材に生成したさびは非常に硬く、適切な前処理を行い、ブラストを行わなければさびに内在する塩分の除去は難しい^{13), 14)}。鋼構造物の防食の基本は、前処理（補修用一次素地調整）を行い、ブラストにより完全に塩分を除去することが理想ではあるが、簡易な方法でさびの生成速度を抑制する技術の開発も必要である。

本研究では、飛来塩分量や凍結防止剤の散布などによる異常さびの原因が排除できない場合の塗装以外に対処法として、高圧水洗処理とさびの除去処理を取り上げる。まず、異常さびの対処法を検証するための試験材の生成方法について説明し、次に、原因が排除されていないことを想定し、塩水散布を用いた加速試験により、各種の対処法および対処の組み合わせによる効果について検討する。

5. 2 試験内容

異常さびに対する対処法の検証のための試験材として、150mm×70mm×9mmの耐候性鋼材を用いて、表-5.1に示す通りの生成条件で加速試験を実施し、異常さびの生成を試みた。試験材は、密封箱内でさびを生成させ、0.2%塩水散布を各頻 2回/1日、1回/1日、1回/10日、1回/30日および0%純水噴霧を383日間で実施した。各条件での異常さび生成状況（さび厚値）を図-5.1に示す。図-5.1より、この期間においては、0%純水散布、0.2%塩水散布 1回/30日、0.2%塩水散布 1回/10日の条件では、400μm以下のさび厚さで異常さびの生成に至らなかった。0.2%塩水散布 1回/1日および0.2%塩水散布 2回/1日の条件は、400μm以上の異常さびが生成したことから、異常さび生成条件としては、0.2%塩水散布 1回/1日を採用し、試験材の作成を行った。また、対処後の環境として、塩分環境が改善されていないことを想定し、0.2%塩水散布 1回/1日により対処後、継続して加速試験を実施した。

この条件における層状剥離さび生成状況を写真-5.1に示す。写真-5.1(a)は、383日間加速試験実施後の状態である。写真-5.1(a)に示すように、厚い層状剥離さびの生成が確認された。対処試験前の運搬等で、試験材の層状剥離さびは写真-5.1(b)のようにほとんどが脱落を生じた。しかしながら、下層さびは残存していたため、本試験材を各種対処法の効果の確認試験に用いた。

表-5.1 異常さび生成試験条件

散布条件	頻度	曝露方向
0.2% 塩水	2 回 / 1 日	垂直
	1 回 / 1 日	
	1 回 / 10 日	
	1 回 / 30 日	
0% 純水	1 回 / 1 日	

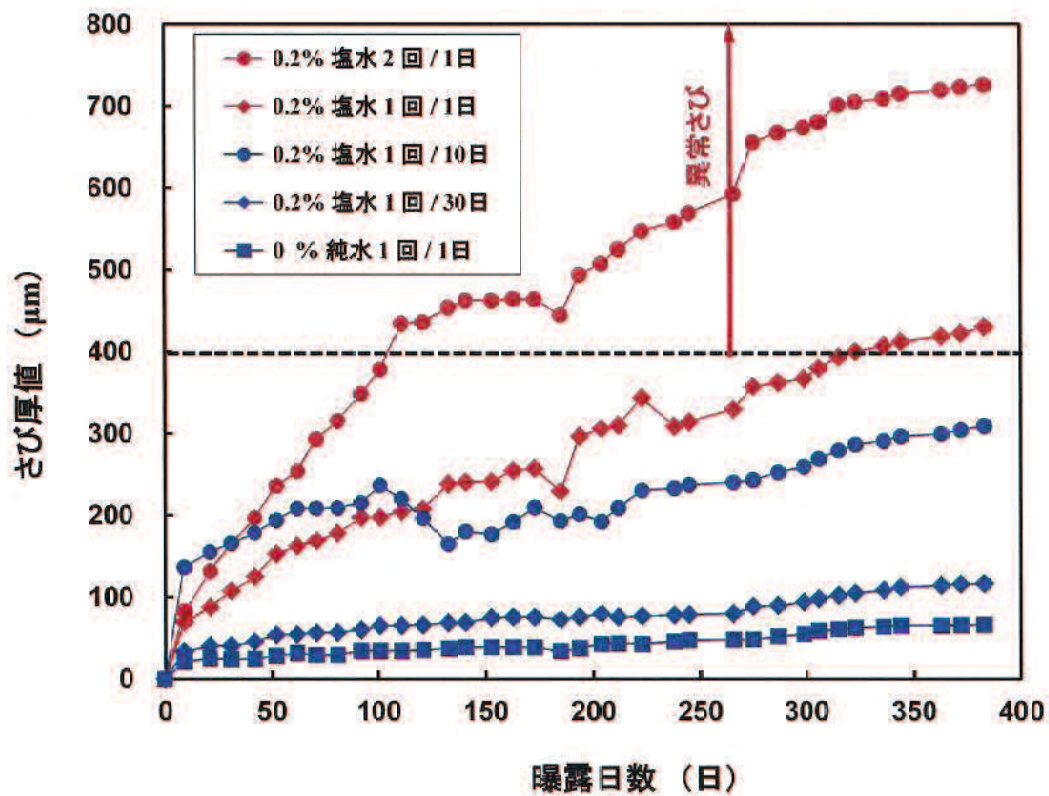


図-5.1 各条件での異常さび生成状況（さび厚値）

異常さびが生成した場合の補修塗装以外の延命化に向けた対処法として、高圧水洗処理と、ペーパーグラインダーによるさび除去処理（以下、グラインダー処理）を採用した。これは、異常さびを除去することによって、さび中に内在する塩分が除去される効果と保

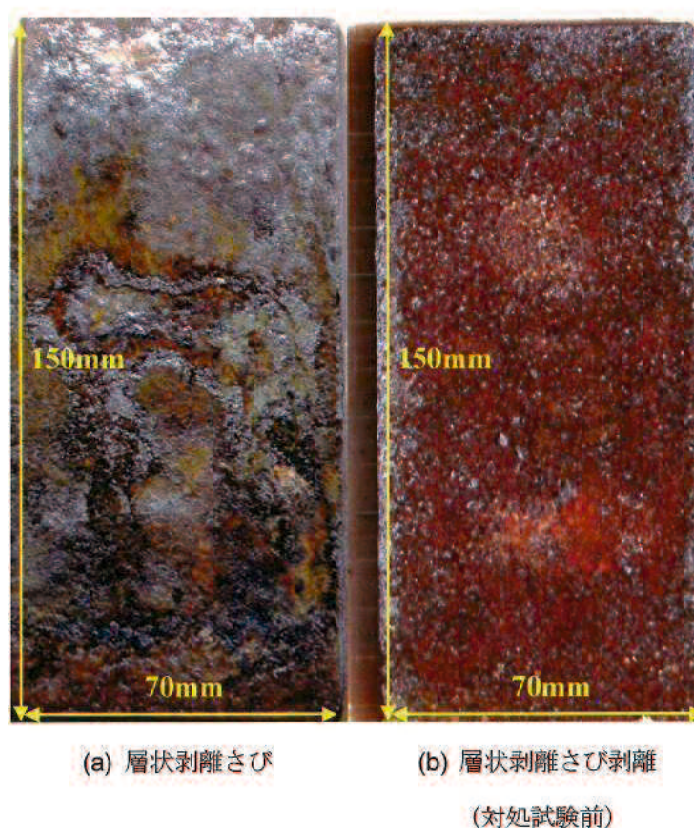


写真-5.1 異常さび生成状況の一例 (0.2% 塩水散布 1回/1日)

水性を持つさびが少なくなることによる濡れ時間（保湿時間）の減少を想定したためである。表-5.2に本章で採用した対処法と加速試験の概要を示す。異常さびが生成した場合の対処法としては、吐出圧力6.2 MPa～7.7MPaの高圧水洗処理（写真-5.2 (a)）のみの場合とグラインダー処理（写真-5.2(b)）のみの場合、更に、グラインダー処理のみでは完全にさびを除去できず、残存しているさび内に塩分が内在していることを想定している。塩分をなるべく除去した場合として、グラインダー処理を施した後に高圧水洗処理を行うこととした。この試験は、層状剥離さびが脱落した下層さびの状態のままの試験材とともに密封箱内に垂直方向に曝露した状態で保管し、0.2%塩水散布 1回/1日により加速試験を実施した。加速試験の密封箱（950mm×450mm×450mm）保管状況を写真-5.3(a), (b)に示す。異常さびの処理後の加速試験は、夏季から試験を開始し、336日間実施した。

本研究では、異常さびが生成した環境は改善されないことを想定し、異常さび生成環境と高圧水洗やグラインダー処理などの補修塗装を行わない対処法を施した後の環境を同一環境とし、異常さび生成箇所の処理方法による腐食速度の低減効果を観測した。腐食速度

表-5.2 各対処法と加速試験条件

試験片No.	対処前さび厚値 (μm)	対処法 (補修)	散布条件	頻度	曝露方向
D-1	207	無処理	0.2% 塩水	1 回 / 1 日	垂直
D-2	131				
D-5	175	高圧水洗 (5MPa以上)			
D-6	104				
D-9S	51	グラインダー処理			
D-10S	160				
D-13S	216	グラインダー処理 ＋ 高圧水洗 (5MPa以上)			
D-14S	94				



(a) 高圧水洗処理



(b) グラインダー処理

写真-5.2 高圧水洗処理およびさび除去処理状況



(a) 密封箱

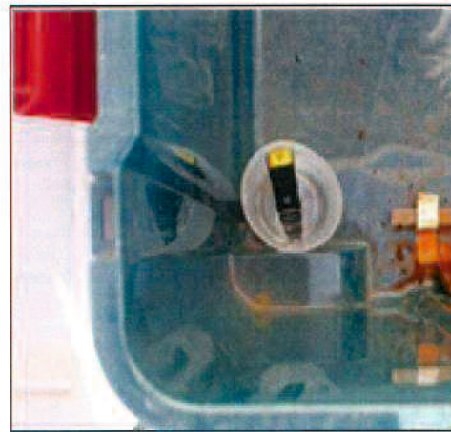


(b) 密封箱内部

表-5.3 加速試験用の密封箱とその内部



(a) 温湿度データロガー



(b) 温湿度データロガー設置

写真-5.4 密封箱内温湿度データロガー設置状況

の低減効果は、さび厚の変化とイオン透過抵抗法から得られるI評点の領域区分^{16), 17), 18)}の変化により評価することとした。

密封箱内と近傍に設置した開放箱内（外気を想定）に温湿度データロガーを設置（写真-5.4 (a), (b)）し、それぞれ10分ごとの継続計測を実施した。さび厚測定は、電磁膜厚計を用いて14点を10日ごとに測定し、得られたデータから大小2つずつの値を除いた10点の値の平均を供試材の平均さび厚値とした。さび生成過程のさび性状は、イオン透過抵抗法を用いて1点/枚の測定を実施した。

5.3 試験結果

密封箱内および開放箱(外気)における温度測定結果を図-5.2(a)に、湿度測定結果を図-5.2(b)に示す。図-5.2(a)の温度測定結果から、試験開始が秋季であったため、密封箱内と開放箱(外気)とも秋季から冬季に向け温度低下が見られ、夏季に向けて温度上昇がみられた。密封箱内と開放箱の温度は、秋季から冬季は、密封箱内の方が1℃程度高いが、冬季から夏季も、密封箱内の方が3℃程度高く、季節に関係なく、密封箱内の温度の方が高いことが確認できた。図-5.2(b)の湿度測定結果から、密封箱内と開放箱とも秋季から冬季は、密封箱内の方が2%程度低い、冬季から夏季も、密封箱内の方が6%程度低く、季節と関係なく、密封箱内の湿度の方が低いことが確認できた。異常さび除去後の加速試験の期間中

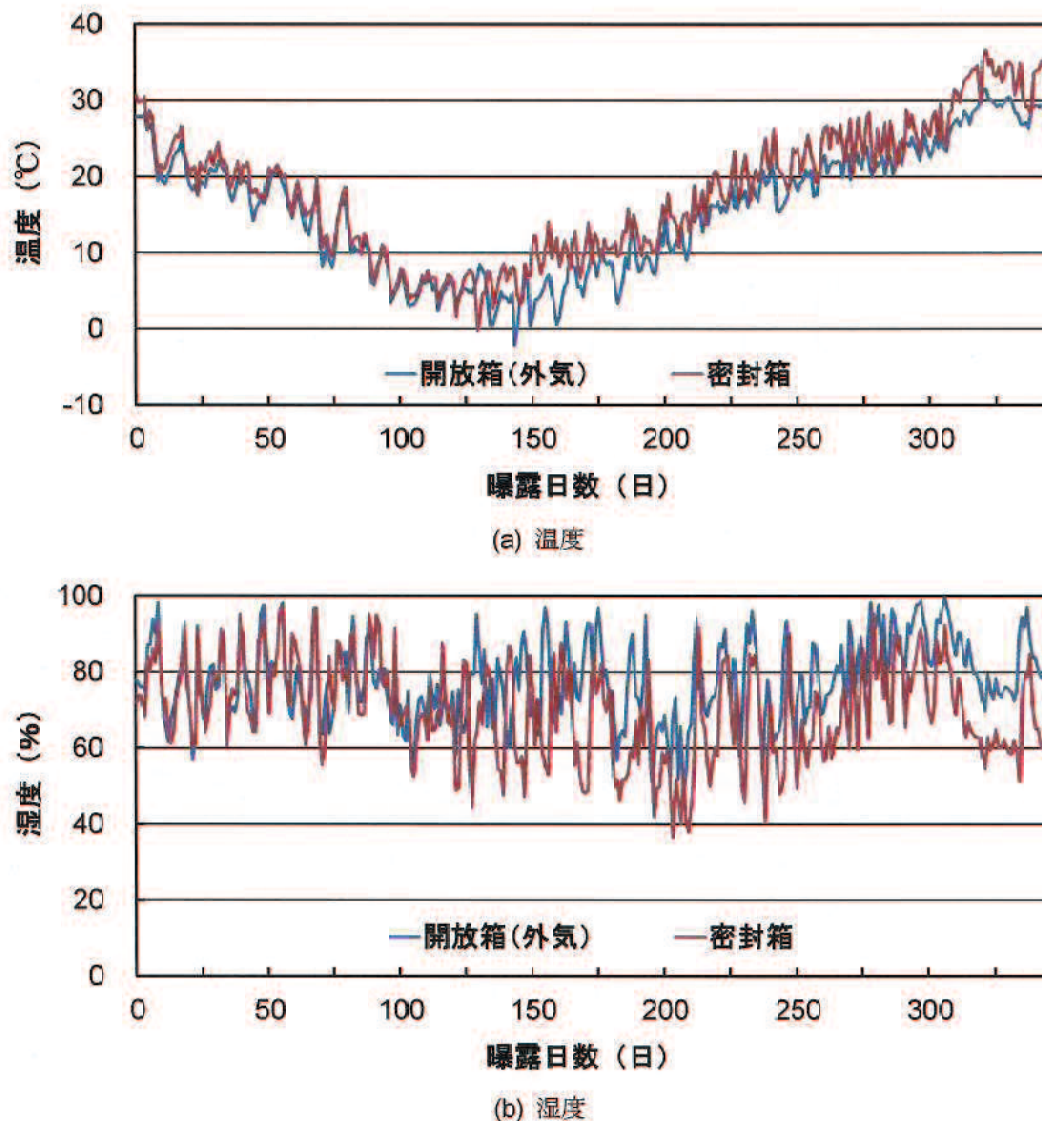


図-5.2 密閉箱内・開放箱(外気)の温湿度測定結果

の平均温度は18.1°Cであり、平均湿度は69.5%であった。

各種対処法の処理前と処理後のさび厚値測定結果を図-5.3に示す。図-5.3よりさび厚値の減少率は、高圧水洗処理試験材で平均2割程度、グラインダー処理試験材およびグラインダー＋高圧水洗処理試験材で8割程度であった。対処法として、高圧水洗処理は、他の二つの処理法と比べさびの除去能力が小さいことがわかった。また、各種対処法および加速試験を実施後のさび厚値の経時変化を図-5.4に示す。図-5.4より、全ての対処法（無処理含む）とも、加速試験開始からさび厚値は、緩やかな増加傾向を示し、夏季に向け増加傾向を示した。

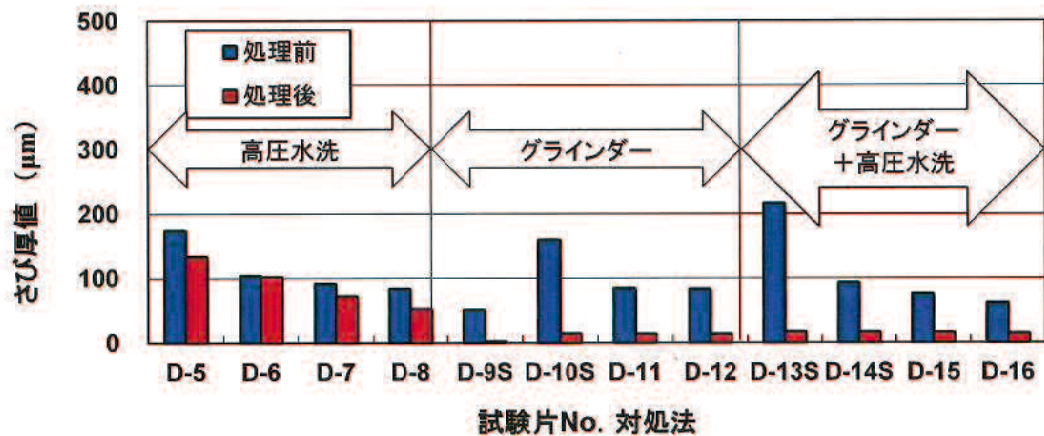


図-5.3 各対処法処理前、処理後のさび厚値

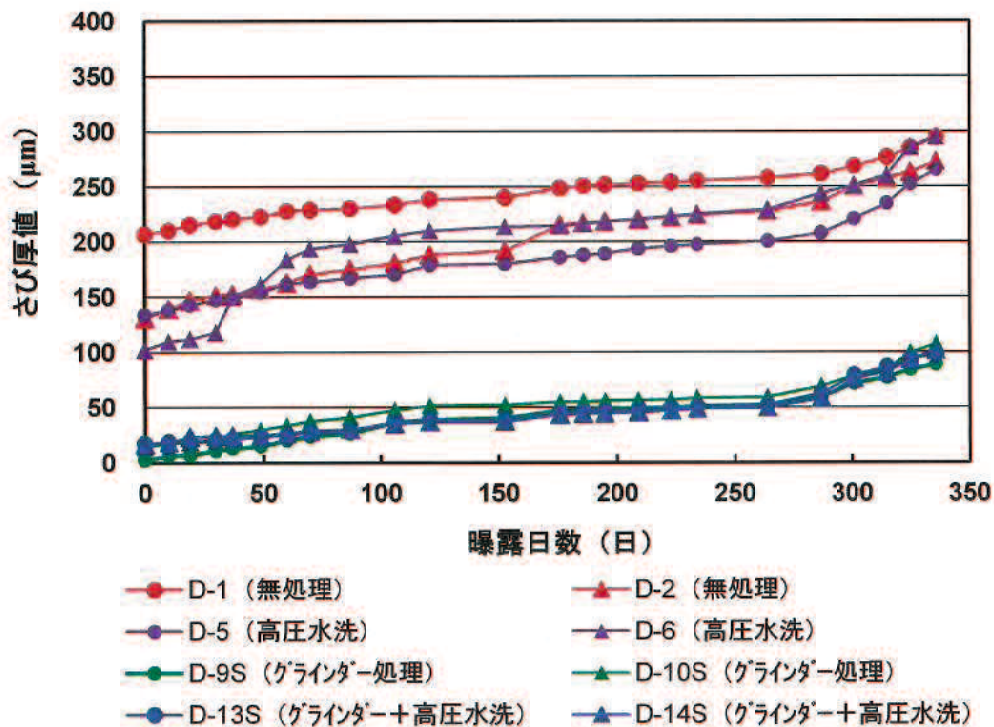


図-5.4 対処後のさび厚値の経時変化

各種対処法の対処前、対処直後、加速試験336日目のさび生成状況を写真-5.5～写真-5.8に示す。無処理のさび生成状況D-1は、写真-5.5のように加速試験336日目には薄い層状さびの生成が確認された。高圧水洗処理のさび生成状況D-5は、写真-5.6のように高圧水洗処理直後に外観上でさびの除去は確認できない。加速試験336日目に薄い層状剥離さびの生成

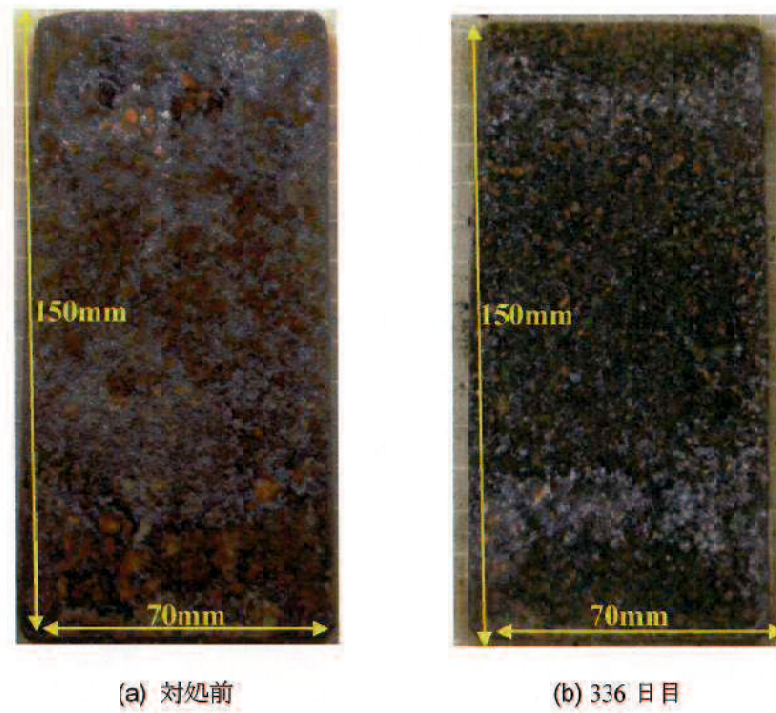


写真-5.5 無処理のさび生成状況【D-1】

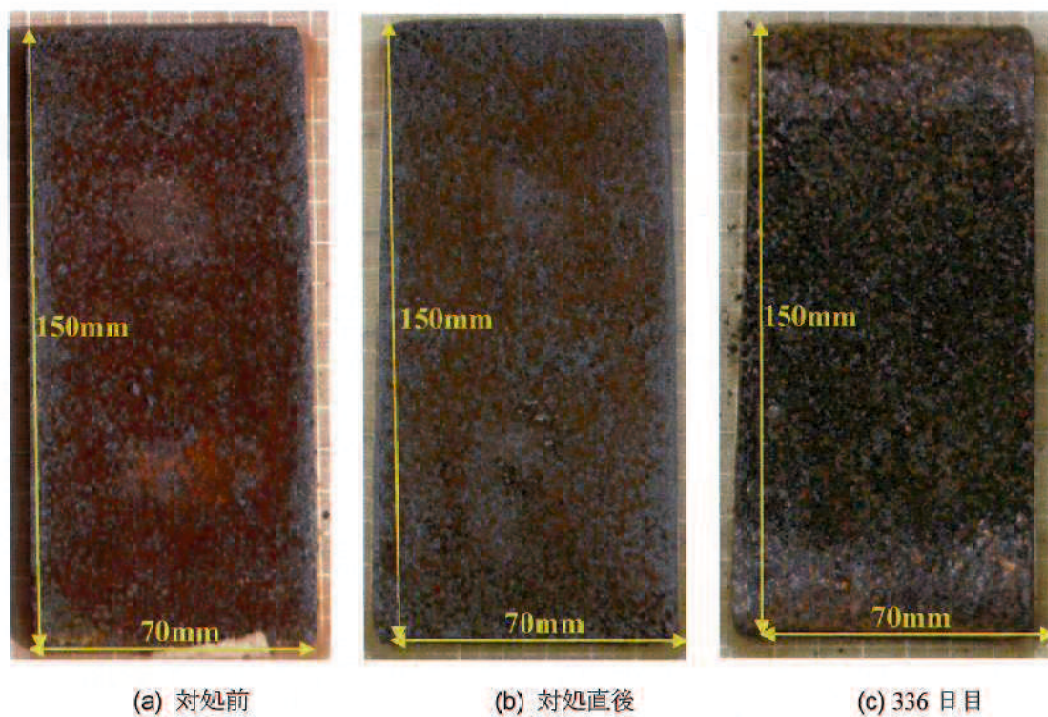


写真-5.6 高圧水洗処理のさび生成状況【D-5】

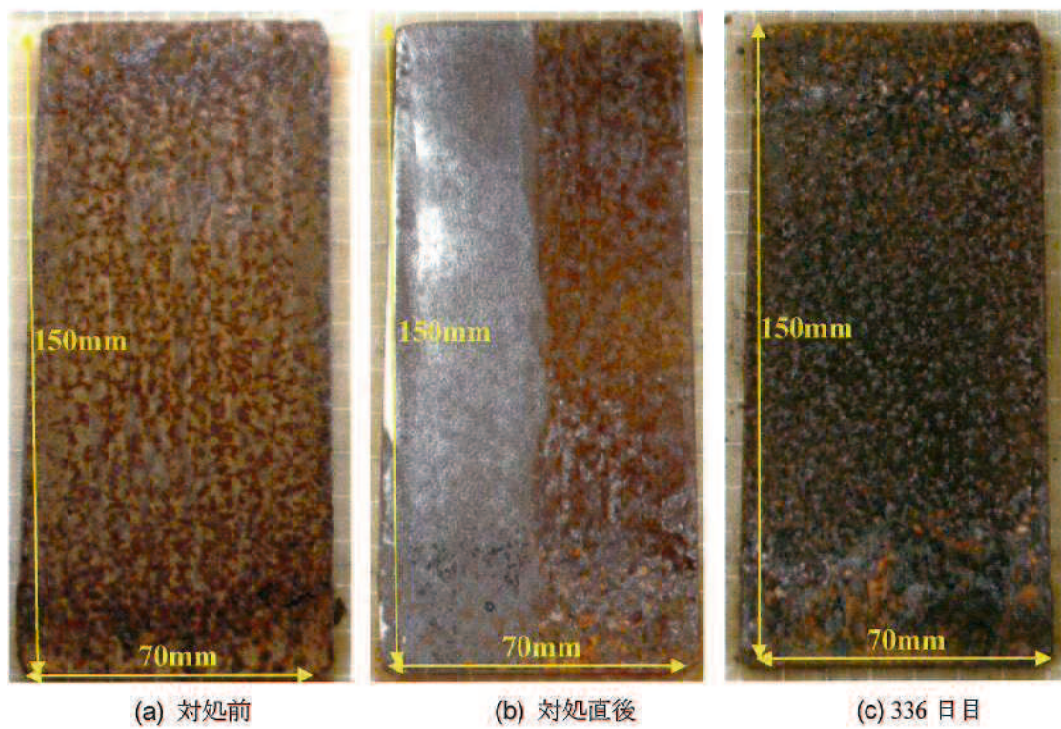


写真-5.7 グラインダー処理のさび生成状況【D-9】

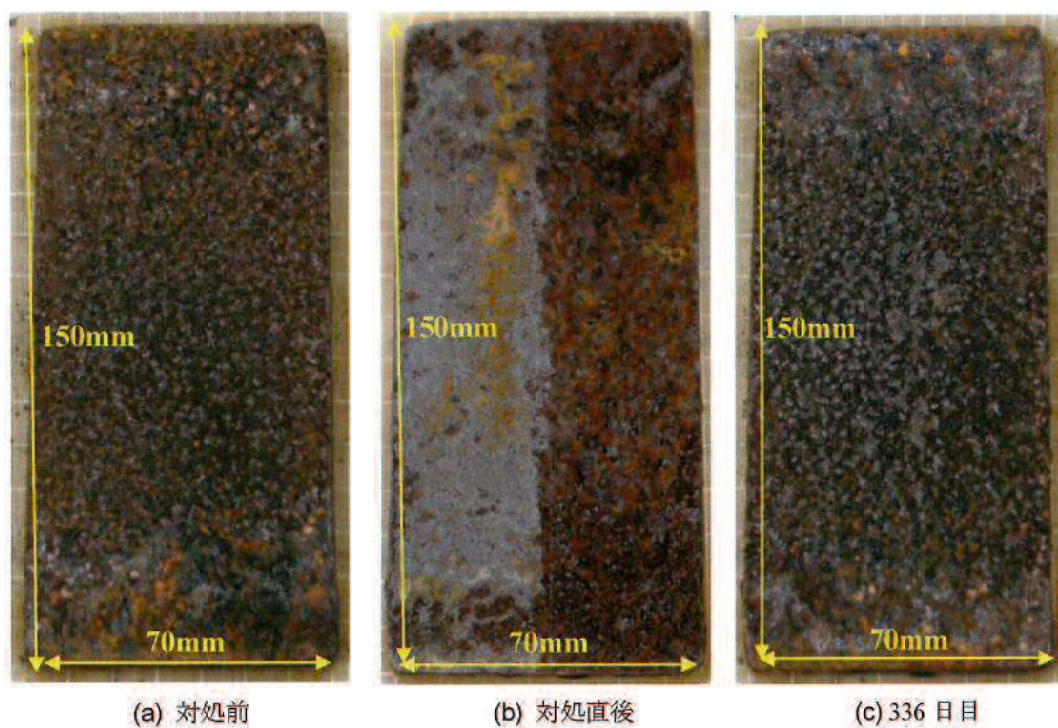
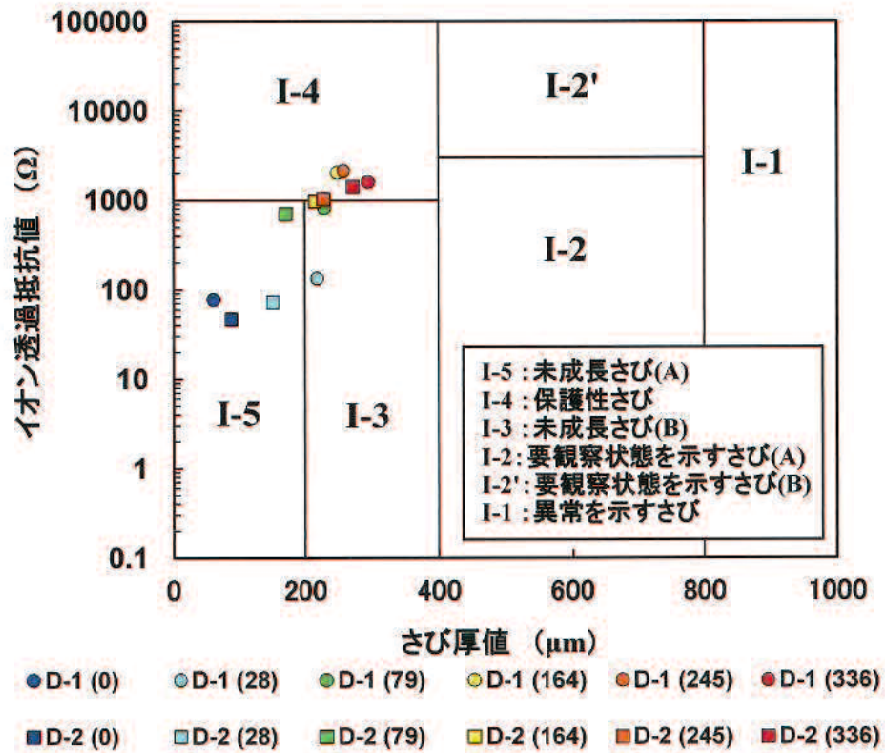


写真-5.8 グラインダー処理+高圧水洗処理のさび生成状況【D-13】

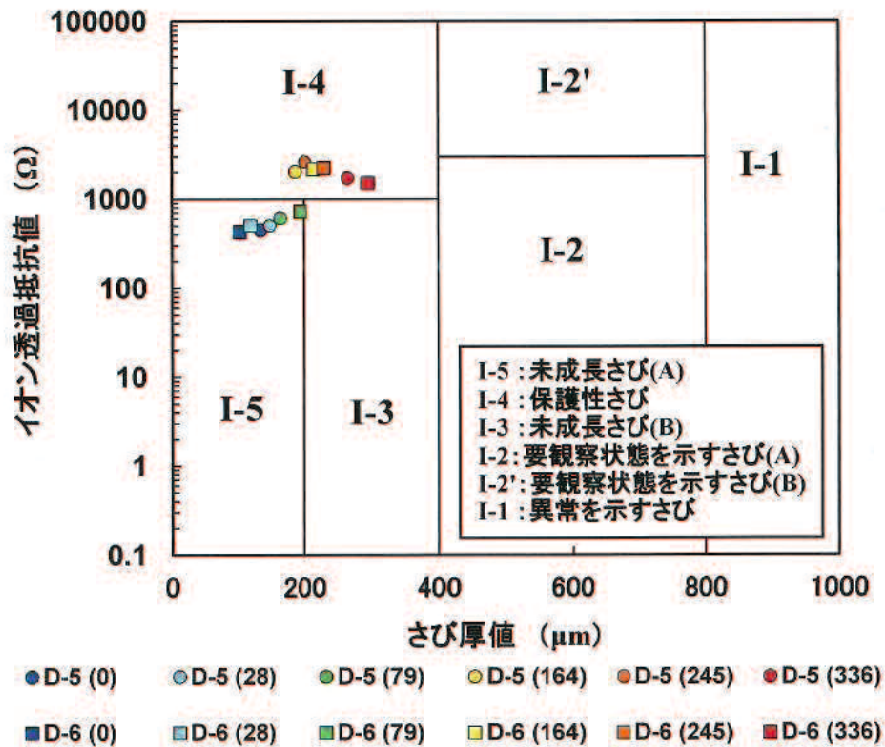
が確認された。グラインダー処理のさび生成状況D-9は、写真-5.7のようにグラインダー処理した直後の鋼材表面は、孔食以外のさびはほぼ除去された状況で、加速試験後は上、下端部を除いた部分にさび粒子が細かく均一なさびが生成した。グラインダー処理+高圧水洗処理のさび生成状況D-13は写真-5.8のようにグラインダー処理した直後の鋼材表面は孔食以外のさびはほぼ除去された状況で、高圧水洗直後に、孔食部から黄さびの発生が見られた。加速試験336日目には上、下端部を除いた部分にさび粒子が細かく均一なさびの生成がされた。

イオン透過抵抗測定は、処理直後、処理後28日目、79日目、164日目、245日目、336日目の計6回実施した。各種対処法のさび厚値とイオン透過抵抗測定値の関係を図-5.5に示す。図-5.5(a)より、無処理は、イオン透過抵抗値の増加よりさび厚値の増加が大きく、I-4領域の保護性さびあるいはI-3領域の未成長さび(B)の領域を経てI-2領域の要観察状態を示すさびの領域に達すると推測される¹⁹⁾。図-5.5(b)より、高圧水洗処理も、無処理と同様に、イオン透過抵抗値の増加よりさび厚値の増加が大きく、I-4の保護性さびあるいはI-3の未成長さび(B)の領域を経てI-2の要観察状態を示すさびの領域に達すると推測される¹⁹⁾。図-5.5(c)より、グラインダー処理は、さび厚値の増加よりイオン透過抵抗値の増加が大きく、現時点は、I-5領域の未成長さび(A)であるが、I-4領域の保護性さびに向かうと推測される¹⁹⁾。図-5.5(d)より、グラインダー処理+高圧水洗処理も、グラインダー処理と同様に、さび厚値の増加よりイオン透過抵抗値の増加が大きく、現時点では、I-5領域の未成長さび(A)であるが、I-4領域の保護性さびに向かうと推測される¹⁹⁾。イオン透過抵抗法から得られるI評点の結果より、高圧水洗処理、グラインダー処理およびグラインダー+高圧水洗処理の中で、グラインダー処理とグラインダー+高圧水洗処理を施した方法の方が、無処理や高圧水洗を施すより、生成するさび性状が良好に推移していることが確認される。

また、各種対処法における対処前さび厚値と加速試験164日目、336日目のさび厚の差、すなわちさび厚値の変化(増加)量を算出した結果を図-5.6に示す。図-5.6より、無処理と比較して、高圧水洗処理のさび厚値の変化(増加)量が大きく、グラインダー処理とグラインダー+高圧水洗処理のさび厚値の変化(増加)量が小さいことがわかる。このことから、グラインダー処理とグラインダー+高圧水洗処理は、さび厚値の変化(増加)量が無処理より小さいことから、腐食速度が異常さびの処理を行うことにより抑制されたことが確認された。ここで、高圧水洗処理のさび厚値の変化(増加)量が、無処理より大きくなった原因として、異常さび生成のために実施した0.2%塩水散布 1回/1日の加速試験を実施後、一時的にさびの生成が抑制されつつある段階で、高圧水洗処理を施したため、さび鋼材面

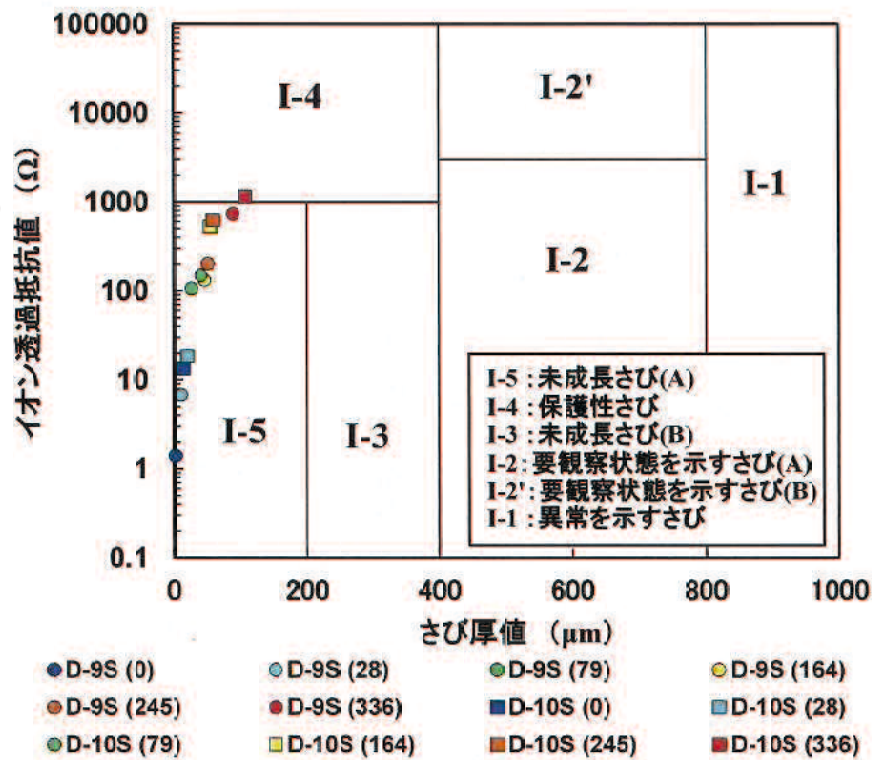


(a) 無処理

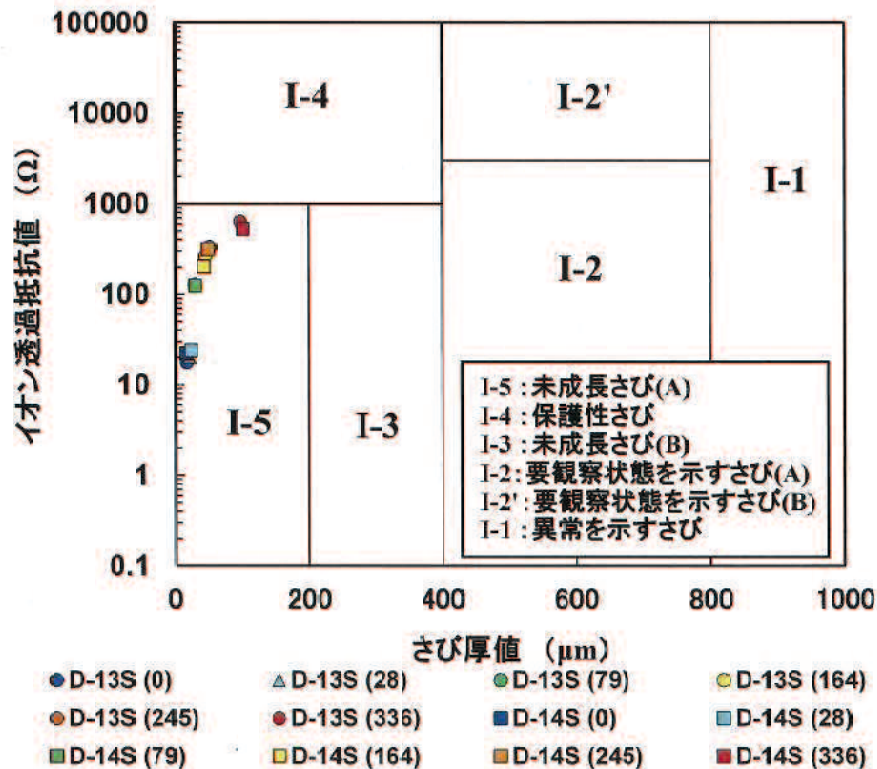


(b) 高圧水洗処理

図-5.5 各種対処法のさび厚とイオン透過抵抗値の関係



(c) グラインダー処理



(d) グラインダー処理+高圧水洗処理

図-5.5 各種対処法のさび厚とイオン透過抵抗値の関係

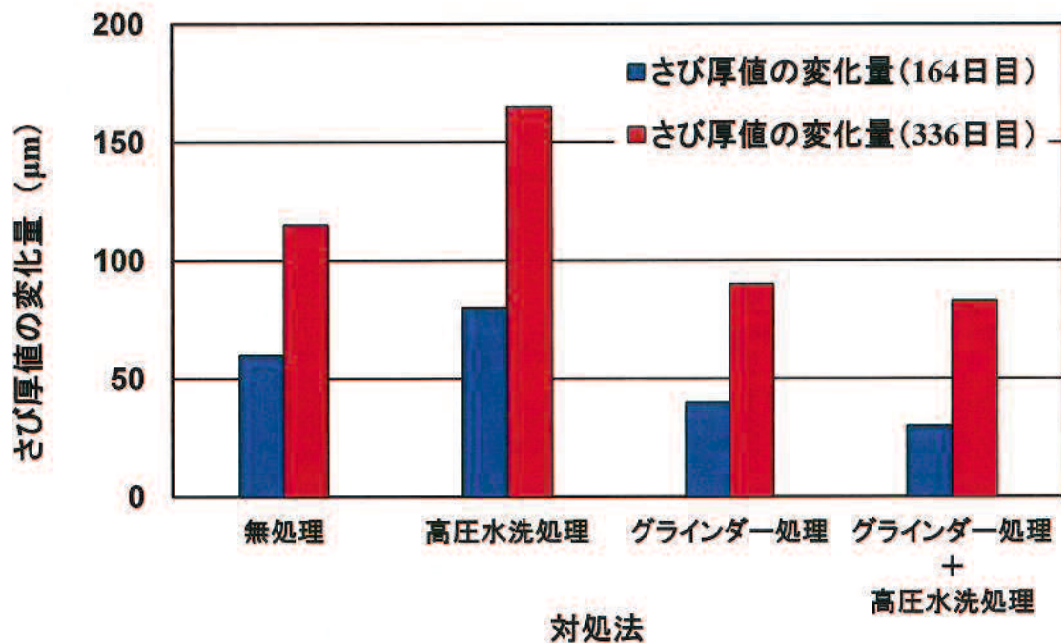


図-5.6 対処法ごとの加速試験後のさび厚値の変化(増加)量

が活性化し、早期にさびの生成が発生したと推察する。

以上のことから、高塩分環境下などの異常さびの原因が排除されない場合の部分補修塗装以外の耐候性鋼材の特性を生かした対処法として、耐候性鋼材表面にさび層ができている場合、高圧水洗はさびの生成を促進させる可能性があることが示された。また、グラインダー処理とグラインダー+高圧水洗処理は、環境が改善されない中でさびの生成の速度を低減させる可能性を示すことが確認された。

5. 4 第5章のまとめ

高塩分環境下などの異常さびの原因が排除されない場合の部分補修塗装以外の耐候性鋼材の特性を生かした対処法として、高圧水洗処理とさび除去処理を行った後の効果について、塩水散布による加速試験によりその効果を検討した結果、以下の知見を得た。

- (a) 高塩分環境下などで異常さびが生成した耐候性鋼材において、環境が改善されない場合、耐候性鋼材表面にさびが残留したままで高圧水洗を行うとさびの生成を促進させる可能性がある。
- (b) 高塩分環境下などで異常さびが生成した耐候性鋼材において、環境が改善されない場合の有効な対処法としては、現時点までの塩水散布による加速試験（336 日間、0.2%塩水散布）から、グラインダー処理やグラインダー＋高圧水洗処理などの異常さびを除去する方法が有効である。
- (c) 塩水散布による加速試験の結果から、さびを除去するだけでも腐食の速度を抑制できる可能性があることが確認された。

高塩分環境下などの異常さびを生成する環境が改善されない場合の耐候性鋼材の防食機能を生かした対処法として、グラインダー処理やグラインダー＋高圧水洗処理などのさび除去が有効であると考えるが、現時点の加速試験期間はまだ十分とは言えないため、試験の継続が必要である。特に、異常さびが生成した耐候性鋼材の対処法は、実橋梁に適用した際の処理コストの検討や実延命（耐用）期間の算出が必須と考えられる。

第5章の参考文献

- 1) (社)日本道路協会：鋼道路橋塗装・防食便覧，2006.
- 2) (社)日本鋼構造協会：テクニカルレポートNo. 73「耐候性鋼橋梁の可能性と新しい技術」，2006.
- 3) 三浦正純，和田雄基，川村文人：四国における耐候性鋼橋梁の現状と課題，土木学会四国支部研究発表会，13 巻，01 号，pp.18-19，2007.
- 4) 若林昌彦，斎藤一彦，安波博道，中島和俊：神取橋の補修塗装に関する調査検討，土木技術資料 Vol.51，No.6，pp.56-59，2009.
- 5) 玉越 隆史，赤川 正一，佐藤 和徳：鋼橋の部分塗替え塗装の取組みと試験施工，橋梁と基礎，Vol.45，No.5，pp.45-51，2011.
- 6) 今井篤実，山本哲也，麻生稔彦：耐候性鋼橋梁の防食補修塗装法の実施に関する一考察，土木学会論文集A1，Vol.68，No.2，pp.347-355，2012.
- 7) 永田和寿，渡辺泰成，小畑誠，宮本重信：効果的な桁洗浄のための飛来塩分の付着特性に関する調査，土木学会第64回年次学術講演会，I-073，pp.45-46，2003.
- 8) 磯光夫，三田村浩，勝俣盛，池田憲二，安江哲，藤野陽三：橋梁の付着物調査と洗浄技術の実用化，土木学会論文集F，Vol.66，No.2，pp.220-236，2010.
- 9) 畑山朗，藤野戸 宏樹，枝元勝哉，勝俣盛，磯光夫，渡辺 喜紀：橋梁における汚れや塩分の付着性状に関する研究），土木学会第57回年次学術講演会，I-254，pp.507-508，2002.
- 10) 原修一，三浦正純，内海靖，藤原俊明，倉本修：凍結防止剤が散布される耐候性鋼橋梁の水洗試験結果（その3），材料と環境講演集，pp.69-72，2003.
- 11) 今井篤実，斎藤誠，守屋進：耐候性鋼の塗装による補修方法に関する検討，第29回日本道路会議文集，No.2044，2011.
- 12) 今井篤実，守屋進，斎藤誠，藤城正樹，岩瀬嘉之，内藤義巳，後藤宏明：耐候性鋼の塗装による補修方法に関する検討—素地調整程度と塩分について—，第34 回鉄構塗装技術討論会，No.17，pp.129-136，2011.
- 13) 後藤宏明，守屋進，内藤義巳，山本基弘，斎藤誠，藤城正樹：耐候性鋼材の塗装による補修方法の検討，第33回鉄構塗装技術討論会発表予稿集，pp.105-112，2010.
- 14) 後藤宏明，守屋進，内藤義巳，山本基弘，藤城正樹，斎藤誠：耐候性鋼材の塗装による補修方法の検討，材料と環境，Vol.59，No.1，pp.10-17，2010.
- 15) A. Imai, T. Aso, S. Shimahara, M. Ohya and M. Takebe : Study on quick protective-rust generation and re-corrosion of weathering steel, Proceedings of The 13th Inspection, Appraisal, Repairs and

- Maintenance of Structures, pp. 103-109, 2012.
- 16) 紀平寛, 塩谷和彦, 幸英昭, 中山武典, 竹村誠洋, 渡辺祐一: 耐候性鋼さび安定化評価技術の体系化, 土木学会論文集, No.745, pp.77-87, 2003.
 - 17) 今井篤実, 立花仁, 松本洋明, 紀平寛: 鋼構造物の腐食診断にむけたイオン透過抵抗法の適用, 防錆管理, Vol.51, No.5, 2007.
 - 18) 佐藤恒明, 岩崎英治, 加藤智久, 野口成人, 向井英和, 立花仁, 今井篤実: 耐候性鋼橋の腐食状況のモニタリング追跡調査, 土木学会第65 回年次学術講演会, I-167, pp.333-334, 2010.
 - 19) 麻生稔彦, 徳永浩三, 今井篤実: 耐候性鋼材のさび生成に関する基礎的実験, 鋼構造年次論文報告集, Vol.18, pp.617-624, 2010.

第6章

無塗装耐候性鋼材に生成する
異常さびの効率的な除去技術の検討

第6章

無塗装耐候性鋼材に生成する異常さびの効率的な除去技術の検討

6. 1 概要

無塗装耐候性鋼橋梁は、適用環境条件が適切であれば、計画・設計時に想定した健全な状態を維持することができる。ただし、構造物に生ずる局所的な環境条件の悪化や、周辺環境の変化などに影響される場合は、鋼材に異常腐食が生じることがある。このような異常腐食は、定期的点検や診断を実施すれば容易に検知することが可能である。万が一に、異常腐食を検知した後の対応策としては、損傷に至る前に原因究明とその原因の排除を行う^{1), 2), 3)}。また、必要に応じ補修塗装を行うことになる。有効な補修塗装を行うためには良質な素地調整品質が必要であり、そのためにブラスト処理を行う必要がある^{4), 5)}。

ブラスト処理を行うと、粉塵や騒音の問題があると認識される。従来から素地調整に用いられている動力工具では、異常さびが形成した耐候性鋼材において良質な素地調整品質が得られない^{6), 7)}。その原因は、さびの緻密性や密着性を高めるために耐候性鋼材に合金元素が添加されていることにある。

本研究では、補修塗装における素地調整処理については、強固さびを除去可能な研削工具、研削技術が必要であると考えた。そこで、市販の動力工具で高速回転が可能なダイヤモンド工具^{8), 9), 10), 11)}を開発し、耐候性鋼材に生成した強固なさびの除去を試みた。また、実工事でのダイヤモンド工具の適用の確認も合わせて行った^{10), 11)}。この適用試験の結果から得られた課題を考慮して、既存ダイヤモンド工具に改良を試みた。さらに、改良したダイヤモンド工具を、他の市販ダイヤモンド工具と耐久性、表面粗さ、騒音を比較することで、補修用一次素地調整工具としての有効性を検討した。

6. 2 ダイヤモンド工具の開発

従来の素地調整処理に用いられている代表的な動力工具を図-6.1に示す。これらの動力工具で、耐候性鋼材に生じた異常さびの除去を実施した。除去結果は、図-6.2に示すように、カップファイヤーやペーパーグラインダーでは、表層さびしか除去できない。ジェット

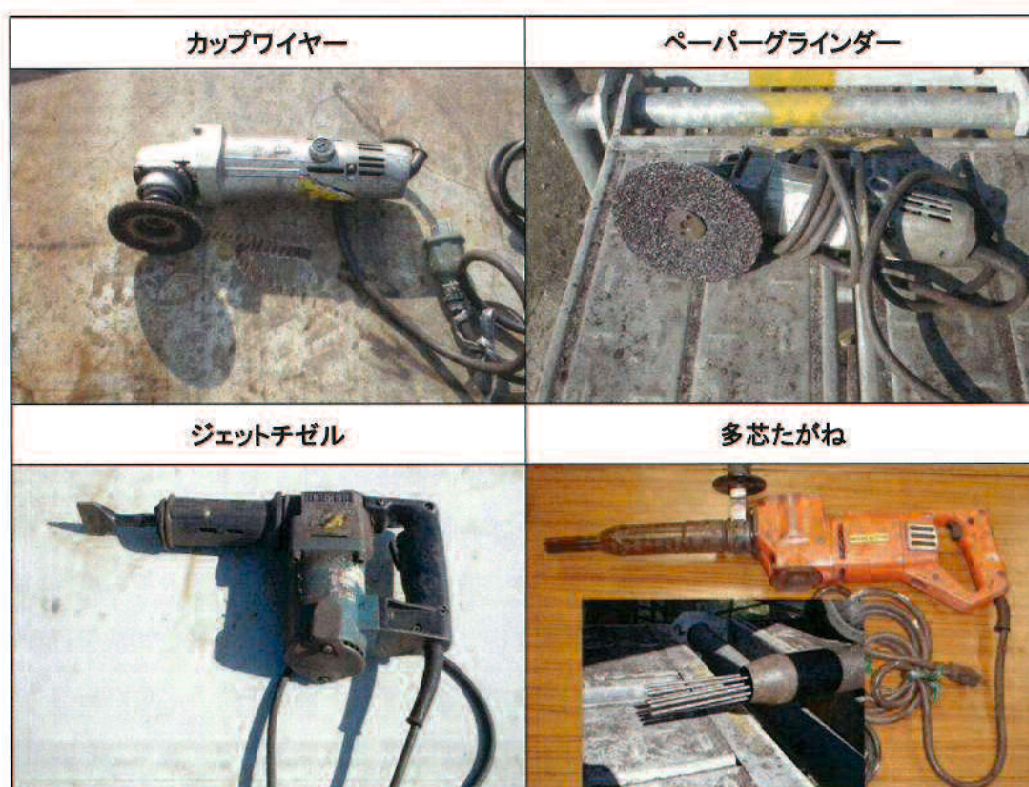


図-6.1 代表的な動力工具

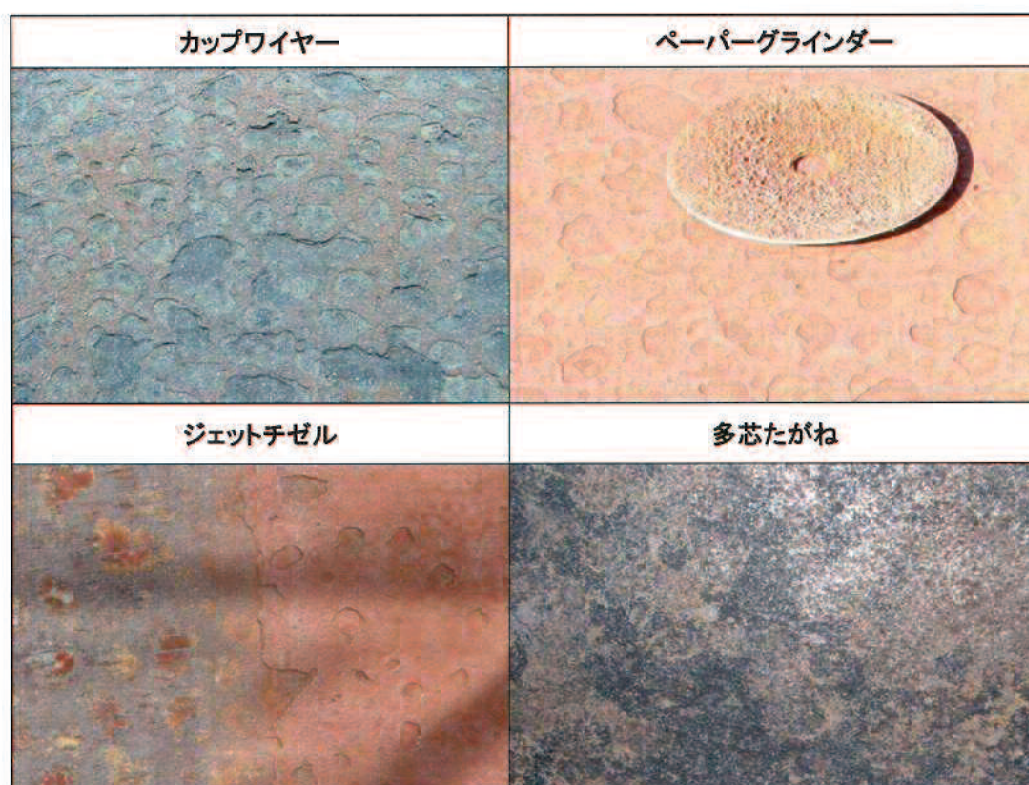


図-6.2 異常さびが生成した耐候性鋼材における代表的な動力工具の研削状況



写真-6.1 開発した曲面タイプのダイヤモンド工具の外観



写真-6.2 異常さびが生成した耐候性鋼材における開発ダイヤモンド工具の研削状況

チゼルや多芯たがねでは、時間をかければ表層さびは除去できるが、下層のさびは除去できない^{8), 9), 10), 11)}。この結果より、従来の動力工具では、耐候性鋼材に生じた強固なさびは、除去が困難である。そこで、強固なさびを除去するためには、研削する工具がより硬いこ



写真-6.3 ニッケル系高耐候性鋼材に形成した強固な残存さびの研削状況

とが重要であると考え、工具自体の材料を工夫することとした。ここで、モース硬度が10と硬い材料であるダイヤモンドに着眼した。ダイヤモンド工具としては、曲面タイプのステンレス基盤に特定粒径の工業用ダイヤモンドをろう付けしたものである。工夫した点は、①ダイヤモンド粒子の配置、②ろう付けしたダイヤモンド粒子の突き出し程度、③ダイヤモンド粒子の形状などである。実際に開発した曲面タイプのダイヤモンド工具の外観を写真-6.1に示す。

曲面タイプのダイヤモンド工具の研削能力を確認するために、1,500 μm 程度の異常さびが生成した耐候性鋼材を用いて研削した。写真-6.2に示すように耐候性鋼材に生成した層状剥離さびを容易に除去することができ、鋼材面を露出するに至った^{8), 9), 10), 11)}。また、高飛来塩分環境でニッケル系高耐候性鋼材に異常さびが生じ、その異常さびを除去するためにガーネットブラスト処理¹²⁾を行ったが、鋼材面を露出することができなかった。そこで残存したさびの研削を開発したダイヤモンド工具で試みた。その結果、写真-6.3のように、残存したさび面を鋼材面が露出するまで研削できた。

6. 3 ダイヤモンド工具の適用性検証

開発した曲面タイプのダイヤモンド工具の研創程度や現場適用性を実証するため、数件の受注工事で当該工具を使用した^{10), 11)}。製鉄プラント内にあるエネルギー配管支柱（普通鋼材）の補修塗装工事に適用した実施例を図-6.3 に示す。ペーパーグラインダーでは、塗膜が剥離し、さびと化している部分においては、さびを除去することができなかった。これに対し曲面タイプのダイヤモンド工具では、孔食内のさび以外のさびを除去し、鋼材面を露出させることができた。曲面タイプのダイヤモンド工具を用いれば、いままで以上の素地調整レベルとなることが確認された。これにより補修塗装後の塗装寿命は大幅に延長されると期待される。

もう一つの事例としては、製鉄プラントの高架水槽（普通鋼材）全外面補修塗装に適用した例を図-6.4 に示す。ペーパーグラインダーと曲面タイプのダイヤモンド工具との 1m² 当たりの作業効率を図-6.5 に示す。適用した結果、さび面積率が 30%以下では両工具の作業効率に顕著な差がないことが判明した。しかしながら、さび面積率が 50%を越えると、曲面タイプのダイヤモンド工具の作業効率が良い結果となった。この結果から曲面タイプのダイヤモンド工具は、さび面積率によらずほぼ一定の作業効率で、鋼材面の素地調整品質を確保できることが確認された。一方で、普通鋼材といえどもさびの面積率が高くなると、ペーパーグラインダーでは、強固なさびを除去するのは困難であった。

以上のことから、開発した曲面タイプのダイヤモンド工具は、強固といわれる耐候性鋼材に生成したさびの除去が可能であることが確認された。また、異常腐食した普通鋼材の実工事に適用した結果、曲面タイプのダイヤモンド工具は、ペーパーグラインダーよりも、研創効率が良く、良好な素地調整品質の確保が可能であることが検証できた^{8), 9), 10), 11), 13), 14)}。

しかしながら、この曲面タイプのダイヤモンド工具を適用してきた結果、①さび面積率が小さい場合やさびが強固でないの場合、研創能率がよくない。②作業員が不快と感じる高音が発生するなどの課題が残った。



図-6.3 配管支柱の補修塗装工事に適用した実施例



図-6.4 高架水槽全外面補修塗装に適用した実施例

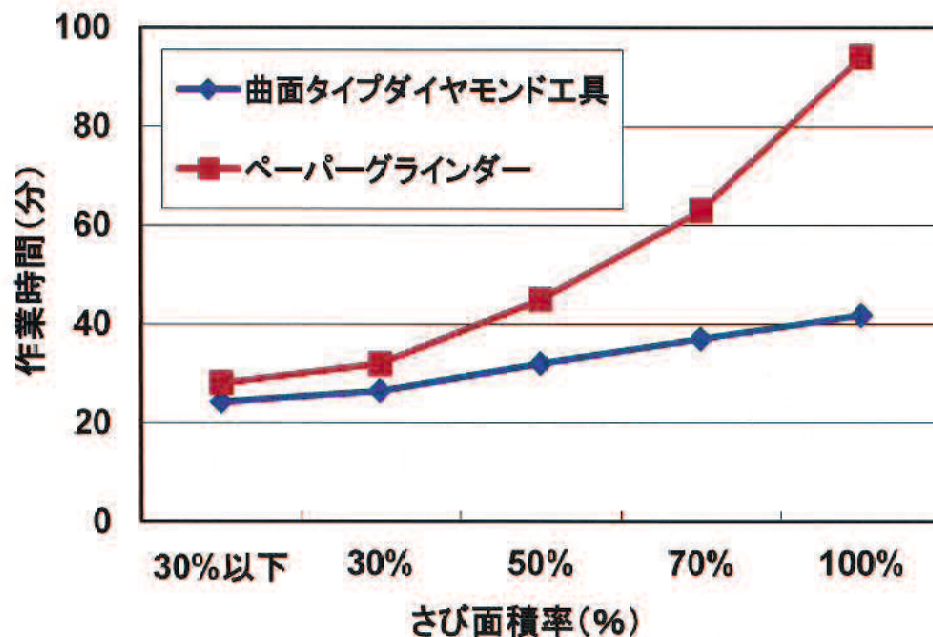


図-6.5 ペーパーグラインダーと曲面タイプダイヤモンド工具との1m²当たりの作業効率

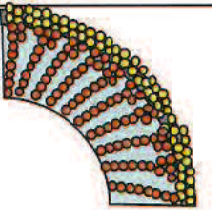
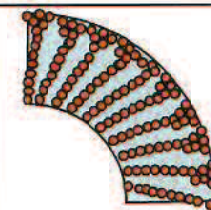
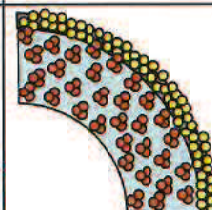
6. 4 ダイヤモンド工具の改良

前節で生じた曲面タイプのダイヤモンド工具の課題を克服するために、ダイヤモンド工具の改良を試みた。改良点としては、①研削効率向上、②耐久性向上、③音質改良を上げ、これらの改善を図った。

研削効率の改良では、曲面タイプのダイヤモンド工具は、研削時にさび面への接触面積が少ないことが研削効率の悪い原因と判断し、ダイヤモンド工具の形状を曲面タイプからフラットタイプへ変更した¹⁵⁾。この改良の結果、さび面に対する接触面積が大幅に増え、研削効率の向上に至った。

フラットタイプのダイヤモンド工具は、ダイヤモンド粒子の脱落リスクや目詰まりが発生する可能性が高まることが考えられた。この対策としては、ダイヤモンド粒子の配置を工夫することにした¹⁵⁾。ダイヤモンド粒子の配置は、表-6.1に示すように3水準を考案した。これらの3水準の比較試験を異常さびが生成した耐候性鋼材を用いて行った。放射配置の水準②は、研削能力がなく、ダイヤモンド粒子の脱落が多いことがわかった。ダイヤ

表-6.1 ダイヤモンド工具の粒径配置比較試験

水準	①放射配置 +外周部補強	②放射配置 +外周部補強なし	③均等配置 +外周部補強あり
断面図			
平面図			
鋼面露出度比較 (70%鋼面露出狙い)	○	×	○
研削速度比較 (70%鋼面露出まで研削)	○	×	×
ダイヤモンドツール外観観察 (粒子脱落の有無)	○	×	○
総合	◎	×	○

モンド粒子を均等に配置した水準③は、ダイヤモンド粒子に脱落は見られないが、研掃時に目詰まりを起すことがわかった。放射配置かつ外周部に多く粒子を配置した水準①は、研掃能力があり、ダイヤモンド粒子の脱落が少ないことがわかった。これらの結果より、水準①が最も良好であることが確認できた。

曲面タイプのダイヤモンド工具は、ステンレス基盤からなる一体構造であるため、ダイヤモンド付きステンレス基盤と鋼材面の金属とが接することで高音が発生する。そこで、工具と鋼材面の接触面に空間を設けることで、高音の発生を抑えられる可能性があると考えた。改良基盤は、ステンレス製基盤とアルミ製キャップからなる二層構造とした。アルミ製キャップの形状を大きく掘り込みを入れた構造とした。その結果、二層構造基盤と鋼材面との接触面に空間が生じ、研削時の高音の発生が大幅に解消された¹⁵⁾。

これらの改良を実施した後のフラットタイプのダイヤモンド工具（以下、ダイヤモンドツール）の外観を写真-6.4に示す。

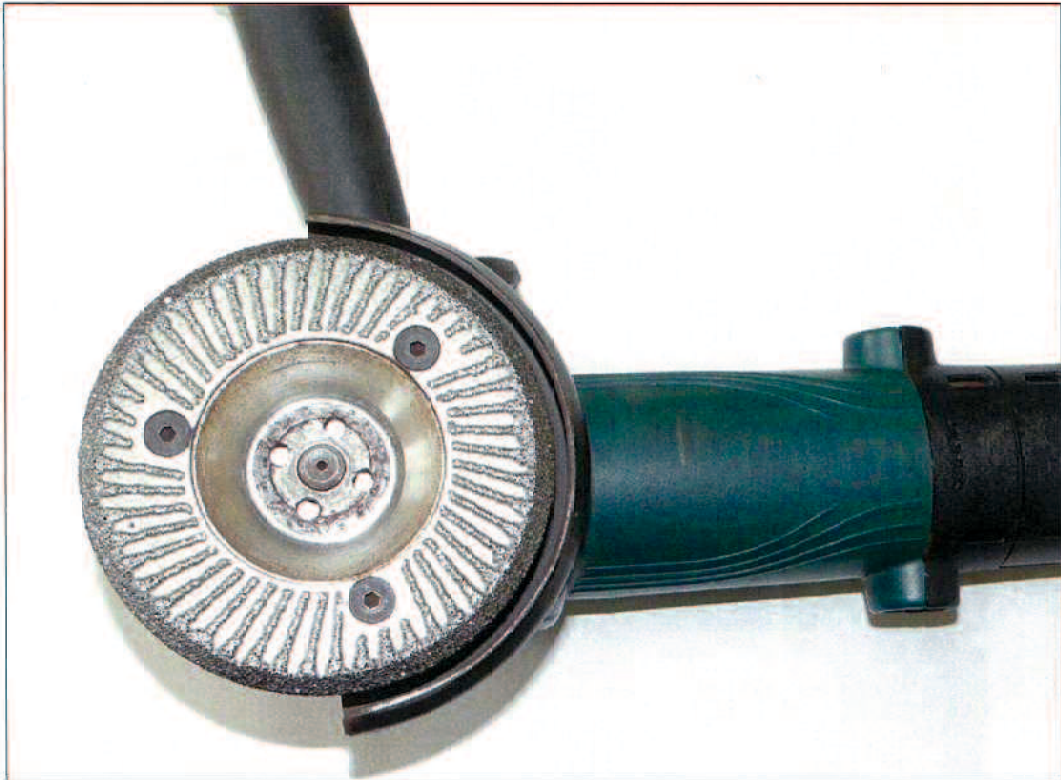


写真-6.4 改良後のフラットタイプダイヤモンド工具（ダイヤモンドツール）の外観

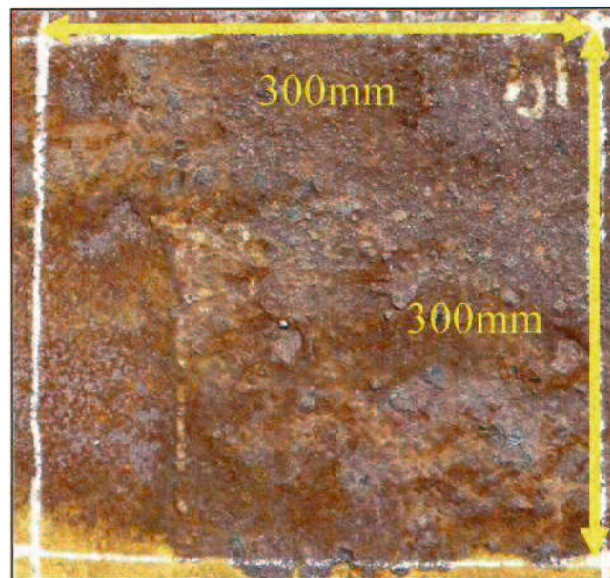
6. 5 ダイヤモンドツールの有効性検証試験

ダイヤモンドツールの補修用一次素地調整工具としての有効性を確認するため、ダイヤモンドツールと市販工具（市販ダイヤモンド工具 A, B, 市販ペーパーグラインダー#16）の耐久性、表面粗さ、騒音等の比較試験を実施した。

供試材は、2000mm×2000mm×15mm の普通鋼材に、さび厚が 800 μ m 以上の異常さびとなるまで、約 1 年間 0.5 wt% NaCl 水溶液を 1 回/1 日 散布を実施した。散布完了後の供試材外観を写真-6.5 に示す。試験は、300mm×300mm の面に対して表-6.2 に示す補修用一次素地調整工具を用いて、生成した異常さびの除去を鋼面が 70% 程度露出するまで実施することとした。補修用一次素地調整の実施見本を写真-6.6 に示す。補修用一次素地調整は、鋼面が 70% 程度露出したら、新たな面で実施する工程を繰り返し、素地調整中および完了後に、各種試験項目について測定を実施した。



(a) 供試材全景



(b) 供試材拡大

写真-6.5 供試材の外観

表-6.2 補修用一次素地調整工具一覧

名称	特徴	用途
ダイヤモンドツール (フラットタイプダイヤモンド工具)	・大粒のダイヤモンド砥粒により強固なさびの除去が可能。 ・目詰まりしにくい。 ・独自構造により作業時の騒音を低減。	・耐候性鋼材用さび落とし。 ・一般鋼材用さび落とし。
市販ダイヤモンド工具A	・衝撃吸収機構により作業時の負担軽減。 ・下地を傷めずきれいな仕上がり、後補修の手間も大幅低減。	・建築用塗膜剥がし。 ・フローアの改修。 ・接着剤の除去。
市販ダイヤモンド工具B	・全広範囲の作業に適用。 ・外周にも砥石を取り付け、塩ビ管等の切断も可能。 ・目詰まりしにくい。	・コンクリート、石材等の面取り、段差修正、凸部研削。 ・弾性塗膜剥がし。 ・タイル目地等の溝入れ。 ・塩ビ管、タイル、瓦の切断。 ・コンクリートひび割れ部補修前処理。
市販ペーパーグラインダー (#16)	・接着力、耐水性、耐熱性、柔軟性に優れた接着剤を使用。	・バリ取り。 ・さび落とし。 ・金属、コンクリート、石材の研磨。

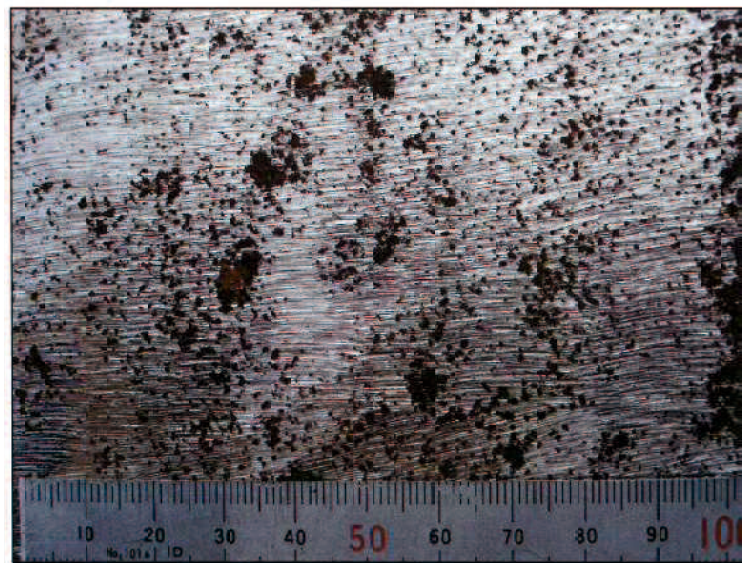


写真-6.5 補修用一次素地調整の実施見本（鋼面 70%程度露出）

耐久性試験は、鋼面が 70%程度露出するまでに要した時間を 1 面(300mm×300mm)毎に測定した。また、各工具の試験後の状態変化を見るため、試験前後における各工具の外観観察を実施した。外観観察は、目視による工具全体の観察と実体顕微鏡（ニコン製 SMZ800）を用いた観察を行った。補修用一次素地調整工具としての耐久性試験の結果を図-6.6 に示す。また、耐久性試験の開始前と完了後の全体外観と顕微観察結果を図-6.7 に示す。

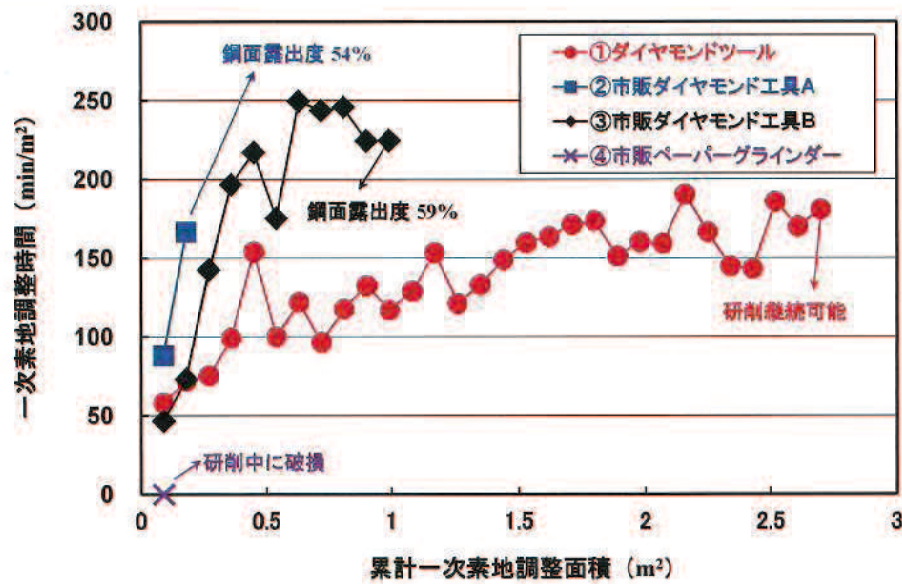


図-6.6 補修用一次調整工具の耐久性結果

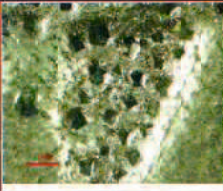
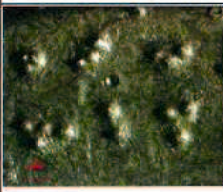
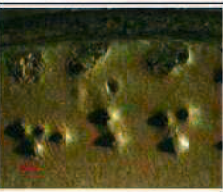
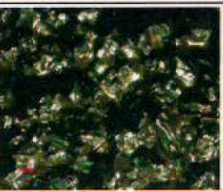
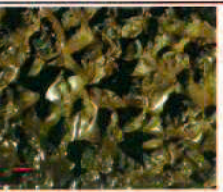
	① ダイヤモンドツール		② 市販ダイヤモンド工具A	
	一次素地調整前	2.7m ² 一次素地調整後	一次素地調整前	0.2m ² 一次素地調整後
全体				
拡大				
	③ 市販ダイヤモンド工具B		④ 市販ペーパーグラインダー#16	
	一次素地調整前	1.0m ² 一次素地調整後	一次素地調整前	<0.1m ² 一次素地調整後
全体				
拡大				

図-6.7 耐久性試験の開始前と完了後の全体外観と顕微鏡観察結果

図-6.6 より、ダイヤモンドツールは、鋼面が 70%程度露出することが可能な補修一次素地調整面積が 2.7m^2 に至っている。市販ダイヤモンド工具 A は、補修一次素地調整面積約 0.1m^2 で、素地調整後の鋼面が 70%程度露出するに至らなかった。市販ダイヤモンド工具 B は、補修一次素地調整面積約 1.0m^2 で、素地調整後の鋼面が 70%程度露出するに至らなかった。市販ペーパーグラインダーは、補修一次素地調整面積 0.1m^2 に至る前の素地調整中に破損した。図-6.7 より、ダイヤモンドツールは、補修一次素地調整面積が 2.7m^2 に至っているが、ダイヤモンド砥粒は残存しており、まだ継続した補修用一次素地調整が可能であると考え、市販ダイヤモンド工具 A は、補修一次素地調整面積約 0.1m^2 で、外側に付随している刃の大部分に破損、摩耗が確認された。市販ダイヤモンド工具 B は、補修一次素地調整面積約 1.0m^2 で、ダイヤモンド砥粒と基材の摩耗が全周にわたって確認された。市販ペーパーグラインダーは、補修一次素地調整面積 0.1m^2 に至る前に破損した。

ダイヤモンドツール、市販ダイヤモンド工具 A および市販ダイヤモンド工具 B で、補修用一次素地調整を行った後の鋼材表面粗さを、JIS B 0601 (1994) に準拠し、十点平均粗さ（以下、 Rz_{JIS} と記す）で測定した。表面粗さは、表面粗さ計（ミットヨ製、SJ-301）を用いて、面（ $300\text{mm} \times 300\text{mm}$ ）中央部の 3 側線（ $L=12.5\text{mm}$ ）で計測を行い、その平均値を用いた。ダイヤモンドツール、市販ダイヤモンド工具 A および市販ダイヤモンド工具 B の Rz_{JIS} の測定結果を図-6.8 に示す。 Rz_{JIS} の値は、ダイヤモンドツールが $48.3\mu\text{m}$ 、市販ダイヤモンド工具 A が $25.7\mu\text{m}$ および市販ダイヤモンド工具 B が $49.7\mu\text{m}$ となり、当該工具による補修用一次素地調整面は、鋼道路橋塗装・防食便覧⁷⁾による $Rz_{JIS}=80\mu\text{m}$ 以下を満足する値となり、防食下地として有機ジンクリッチペイントを塗布するのに問題ない素地調整粗さであった。

ダイヤモンドツール、市販ダイヤモンド工具 A および市販ダイヤモンド工具 B の騒音は、開放環境で工具使用による騒音発生源から 1, 3, 5, 10, 30m 離れた距離で、距離毎 4 方向についてそれぞれ 2 回ずつ測定し、その平均値とした。騒音測定は、騒音計（フソー製、SD-2200）を用いた。ダイヤモンドツール、市販ダイヤモンド工具 A および市販ダイヤモンド工具 B の騒音測定結果を図-6.9 に示す。騒音発生源から 1m 離れた位置での騒音値は、ダイヤモンドツールが 92dB、市販ダイヤモンド工具 A が 105dB および市販ダイヤモンド工具 B が 99dB となり、ダイヤモンドツールが最も低い騒音レベルを示した。また、騒音発生源から 3m, 5m, 10m および 30m 離れた位置においても、ダイヤモンドツールの騒音レベルが、市販ダイヤモンド工具 A、市販ダイヤモンド工具 B の騒音レベルを下回る値を示した。

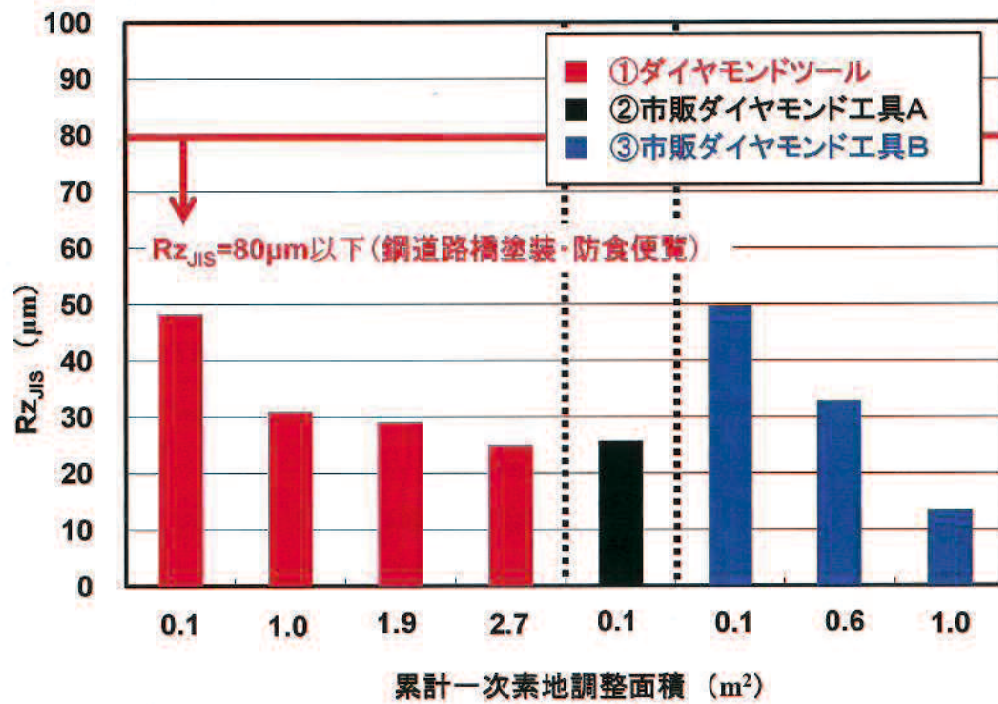


図-6.8 補修用一次素地調整面の Rz_{JIS}測定結果

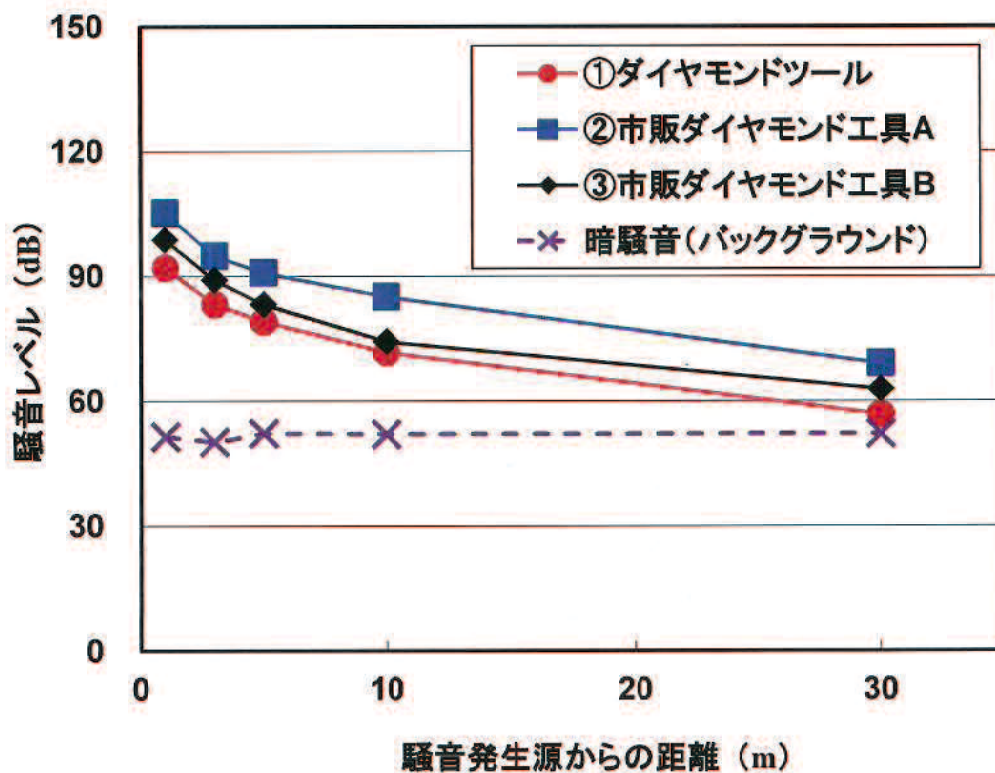


図-6.9 補修用一次調整時の騒音測定結果

6. 6 第6章のまとめ

補修塗装における素地調整については、より高硬度な研削材を使用する必要があると考えた。そこでダイヤモンド工具を開発し、市販の電動工具で高速回転させて、耐候性鋼材に生成した強固なさびの除去を試み、従来動力工具との比較試験を実施した。また、実工事でのダイヤモンド工具の適用性結果の報告も合わせて行った。適用試験結果で得られた課題をさらに改良したダイヤモンド工具の製作を試みた。改良したダイヤモンドツールは、他の市販工具（市販ダイヤモンド工具 A, B, 市販ペーパーグラインダー#16）と耐久性、表面粗さ、騒音を比較し、補修用一次素地調整工具としての有効性を検討した。

上記検討結果から得られた知見を下記に示す。

- (a) 耐候性鋼材に生成した層状剥離さびは、ダイヤモンド工具を用いて研削した結果、孔食内のさび以外のさびを除去し、鋼材面を露出することができた。
- (b) 形状をフラット構造にするとともに、粒子を放射状に配置したことで、研削力と耐久性の向上させることができた。高音対策としては、二層かつ空間構造とすることで改善された。
- (c) ダイヤモンドツールは、本供試材を用いた試験結果市販ダイヤモンド工具 A, 市販ダイヤモンド工具 B および市販ペーパーグラインダーと比べ、補修用一次素地調整工具として有効であることが確認された。
- (d) ダイヤモンドツールは、鋼面が 70%程度露出するまでの補修一次素地調整面積が 2.7m^2 に至っており、外観上もダイヤモンド砥粒が残存していることから、継続した補修用一次素地調整が期待できる。

今後は、ダイヤモンドツールが補修用一次素地調整工具として更なる有効性を確認するため、耐候性鋼橋梁に生成したさびの性状を考慮した検証とコスト面の検討が必要である。

第6章の参考文献

- 1) (社)日本道路協会：鋼道路橋塗装・防食便覧，2005.
- 2) (社)日本鋼構造協会：テクニカルレポートNo.73「耐候性鋼橋梁の可能性と新しい技術」，2006.
- 3) (社)日本鋼構造協会：テクニカルレポートNo.86「耐候性鋼橋梁の適用性評価と防食予防保全」，2009.
- 4) 江成孝文，田中誠，町田洋人，遠藤三郎：耐候性鋼材に使用した無塗装桁の補修塗装，第22回鉄構造塗装技術討論会発表予稿集，pp.59-64，1999.
- 5) 江成孝文，田中誠，町田洋人，遠藤三郎：耐候性鋼材に使用した無塗装桁の補修塗装，第21回防錆防食技術発表大会講演予稿集，pp.119-122，2001.
- 6) 後藤宏明，守屋進，内藤義巳，山本基弘，斎藤誠，藤城正樹：耐候性鋼材の塗装による補修方法の検討－暴露5年後の調査結果－，第33回鉄構造塗装技術討論会発表予稿集，pp.105-112，2010.
- 7) 後藤宏明，守屋進，内藤義巳，山本基弘，藤城正樹，斎藤誠：耐候性鋼材の塗装による補修方法の検討，材料と環境，Vol.59，No.1，pp.10-17，2010.
- 8) 平松幹次郎，三塚喜彦，今井篤実，相賀武英，松本剛司，永井昌憲，里隆幸，木下俊也，紀平寛：鋼構造物の腐食診断と新しい補修塗装工法の提案(2)－異常さび部の効率的な下地処理工法の開発－，第29回鉄構造塗装技術討論会発表予稿集，pp.7-10，2006.
- 9) 平松幹次郎，今井篤実，相賀武英，松本剛司，里隆幸，永井昌憲，木下俊也，紀平寛：第27回防錆防食技術発表大会講演予稿集，pp.115-118，2007.
- 10) 今井篤実：異常を示すさび発生部の高効率補修塗装工法開発，第160回腐食防食シンポジウム，pp.67-72，2007.
- 11) 今井篤実：無塗装橋梁の防食 Contingency Plan (1)，第55回材料と環境討論会講演集，pp.357-360，2008.
- 12) 加藤敏行，飯田眞司：「プラスト処理工法」とその考え方(その2)，橋梁・鋼構造物塗装，Vol.38，No.1，pp.8-19，2010.
- 13) 紀平寛：無塗装橋梁用鋼材のプロダクト・セキュリティ向上への取り組み，SE Report，Vol.154，pp.10-15，2009.
- 14) 松本剛司，里隆幸，永井昌憲，平松幹次郎，今井篤実，相賀武英，木下俊也，紀平寛：鋼構造物補修に適した新規有機ジンクリッチペイントと新規電動工具を使用した補修工法の

開発, 防錆管理, Vol.52, No.8, pp.293-297, 2008.

- 15) 西山研介, 立花仁, 今井篤実: 耐候性鋼に生成する異常さびの効率的な除去技術の検討, 第 32 回防錆防食技術発表大会講演予稿集, pp.175-178, 2012.

第7章

無塗装耐候性鋼橋梁の防食補修塗装法の実施例

第7章

無塗装耐候性鋼橋梁の防食補修塗装法の実施例

7.1 概要

耐候性鋼橋梁は、環境遮断性の保護性さびを形成して LCC の低減と長寿命を実現するためには、計画的な点検と異常が発見された場合の適切な処置が必要である¹⁾。しかしながら、耐候性鋼橋梁では、架設地点が海岸に近く、飛来塩分の影響が大きい環境下や凍結防止剤を多く散布する地域で層状剥離さびが生じた事例も報告されている^{2), 3)}。耐候性鋼橋梁の維持管理において最も留意すべき点は、層状剥離さびやうろこ状さびといった異常さびを早期に発見し、著しい板厚減耗量にいたる前に適切な補修を施すことである。

耐候性鋼材の異常さびを判定するためにイオン透過抵抗法から得られた I 評点の領域区分^{4), 5), 6)}を用いて評価し、その評価結果に基づく部分的な防食補修塗装法の開発^{7), 8), 9)}を行ってきた。異常さびが発見された場合の処置は、発生原因を的確に把握し、その原因を排除することが基本であるが、原因の排除が困難な場合は、補修塗装を検討することになる。補修塗装については、現時点で耐久性が高いと推奨されている Rc-I 塗装系を準用し、塗装面の付着塩分量を $50\text{mg}/\text{m}^2$ 以下とすべきと提案されている¹⁾。しかしながら、耐候性鋼橋梁への適用例は、耐候性鋼橋梁の一部を試験的に補修塗装した事例^{10), 11), 12)}や Rc-I 塗装系に近い塗装系である C-3 塗装系で補修塗装した事例¹³⁾があるものの、その事例数は少ない状況にある。

また、耐候性鋼材に生成した強固なさびの除去は容易ではないとの報告¹⁴⁾があり、素地調整の品質確保の方策は確立されていない。さらに、付着塩分量を $50\text{mg}/\text{m}^2$ 以下にすることは、被塗面については水洗やスチーム水洗による方法が示されている¹⁾が、耐候性鋼材のさび面についての具体的方策は示されていない。その結果、Rc-I 塗装系を耐候性鋼橋梁に適用する具体的な補修塗装や施工フローは未だ示されておらず、対象案件ごとに工法の詳細検討が必要となっている。

本研究では、耐候性鋼橋梁の補修塗装に Rc-I 塗装系を適用するための補修用素地調整とさび中に内在する塩分の除去方法を検討し、実橋梁へ適用可能な補修塗装の方策を提案¹⁵⁾する。

7.2 対象橋梁

今回対象とした山根橋は、鳥取県日南町上石見に平成2年（1990年）に架設された3主桁単純非合成鈑桁の無塗装耐候性鋼橋梁である。架設位置は離岸距離が約35kmで、冬季は凍結防止剤の散布が行われる積雪寒冷地域である。山根橋の架設概要を表-1に、架設位置を図-7.1に、下流側から見た全景を写真-7.1に、平面図を図-7.2にそれぞれ示す。

平成18年9月の点検により、図-7.2に示すように、桁端部の伸縮装置からの漏水が確認された。この漏水が飛散、流下した桁端部に異常さびが発見された。

このことから、異常さびの発生原因は、散布された凍結防止剤を含む漏水が伸縮装置から桁等にかかり、凍結防止剤に含まれる塩分によって異常さびの生成を助長されたものと考えられる。そこで、平成20年8月に防食補修範囲と補修方法の検討のため調査を実施した。調査項目は、外観観察、さび厚測定、イオン透過抵抗測定および付着塩分測定である。

外観観察より、G1桁A2橋台の伸縮装置から漏水が確認され、この漏水が流下した形跡に沿って写真-7.2のようにG1桁A2橋台側近傍のウェブ面と下フランジ下面のみ層状剥離さびの広がりが見られた。それ以外のG1桁、G2桁、G3桁には層状剥離さび等の異常さびは見られず、正常なさびが生成していた。

層状剥離さびが発生したG1桁A2橋台側におけるイオン透過抵抗値とさび厚値の測定結果を図-7.3に示す^{4) 5) 6)}。図-7.3のイオン透過抵抗値とさび厚値の関係から、異常を示すさびI-1領域からa, bを、要観察状態を示すさびI-2領域からc, dを、保護性さび領域におけるe, fの計6測定点a～fを施工前のさび性状別の代表点として選定した。測定点a, bは、膜厚計測器の測定限界の1,500 μ mを超える値であったため、図-7.3には>1,500としてプロットした。図-7.4にG1桁の異常さび分布と測定点a～fの位置を示す。また、イオン透過抵抗測定点の付着塩分量と評点を表-7.2に示す。これらより、測定点a（下フランジ上から垂直150mmまでのウェブ面）は、付着塩分量が1,999mg/m²以上、測定点b（下フランジ下面全幅）は、付着塩分量が360mg/m²で、測定点a, bは、I-1領域に位置し、外観観察において層状剥離さびを確認した。桁端から5m離れた測定点c（下フランジ上面から垂直方向に100mmまでのウェブ面）は、付着塩分量が105mg/m²、測定点d（下フランジ下面全幅）は、付着塩分量が60mg/m²、測定点c, dは、I-2領域に位置し、要観察状態を示すさびと判定した。桁端から9m離れた測定点e（下フランジ上面から垂直方向に150mm～300mmまでのウェブ面）は、付着塩分量が42mg/m²で保護性さびであるI-4領域を示した。測定点f（下フランジ上面）は、付着塩分量が550mg/m²であるにも関わらず保護性さびであるI-4領域を示し、

7. 2 対象橋梁

表-7.1 山根橋架設概要

橋梁名	山根橋
架設場所	鳥取県日南町上石見
架設年	平成 2 年(1990 年)
供用年数	19 年
橋長	約 33m
橋梁形式	3 主桁単純非合成鈹桁
使用鋼材	JIS-SMA 無塗装耐候性鋼材
離岸距離	約 35km
架設環境区分	積雪寒冷地域
凍結防止剤散布	散布あり

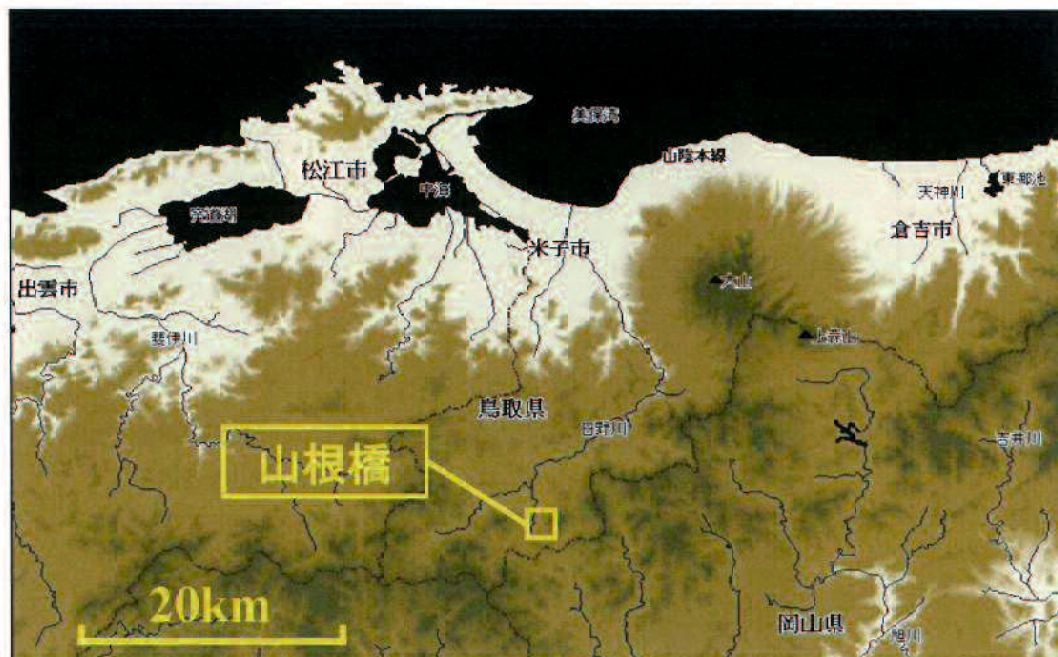


図-7.1 山根橋架設位置

その表面状態は、写真-7.3 (a) のようである。堆積した塵埃がさび層中に入り込み、凍結防止剤の塩分を含む水の侵入が阻害されることも考えられる。しかしながら、この現象の解明は今後の課題である。

一方、ウェブ面の異常さびが下フランジ上面から垂直100mm～150mmの範囲に生じていることから、下フランジ上面を流れる水の毛細管現象によるものと考え、測定点cの下フラ



写真-7.1 山根橋全景



(a) 漏水発生箇所と流下形跡に沿った層状剥離さび山根橋全景



(b) 下フランジ下面の層状剥離さび

写真-7.2 G1桁 A2 橋台側端部の外観

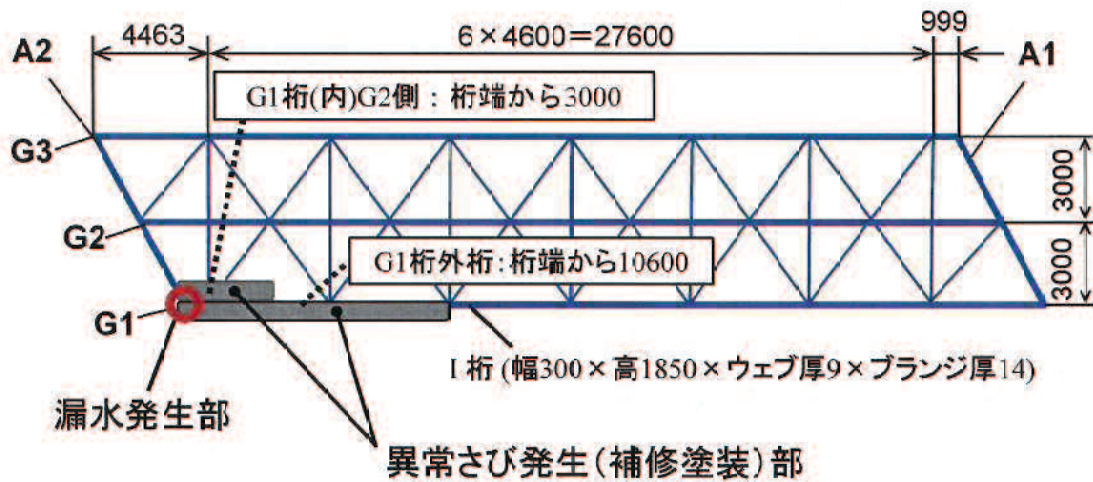
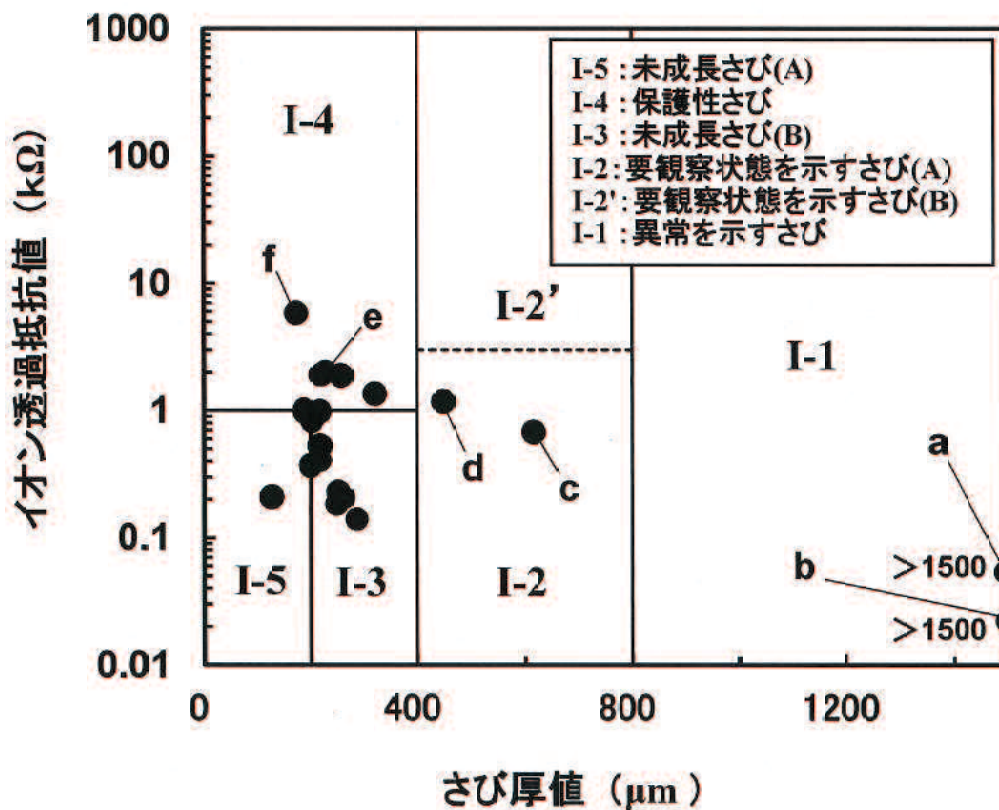


図-7.2 山根橋平面図

図-7.3 イオン透過抵抗値とさび厚値^{4), 5), 6)}

ンジ上面を水で濡らして1時間後の状況を観察した。写真-7.3(b)に見られるように、下フランジ上面より約30mm水が上がって濡れる現象を確認した。

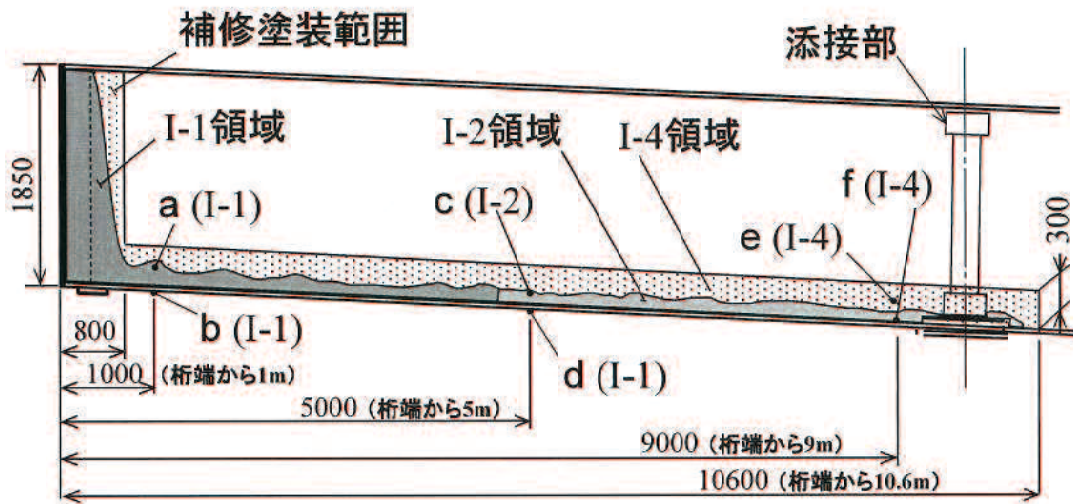
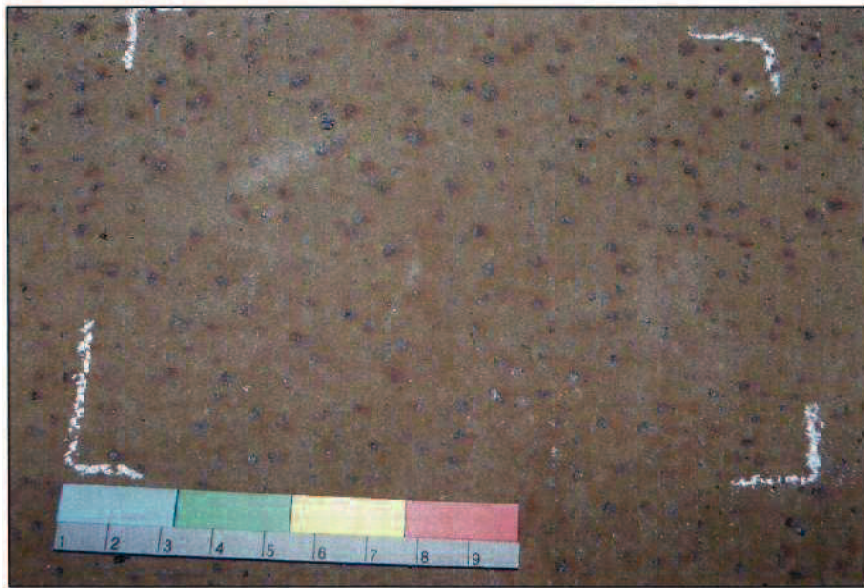


図-7.4 G1桁外側の異常さび分布とイオン透過抵抗測定位置および補修塗装範囲

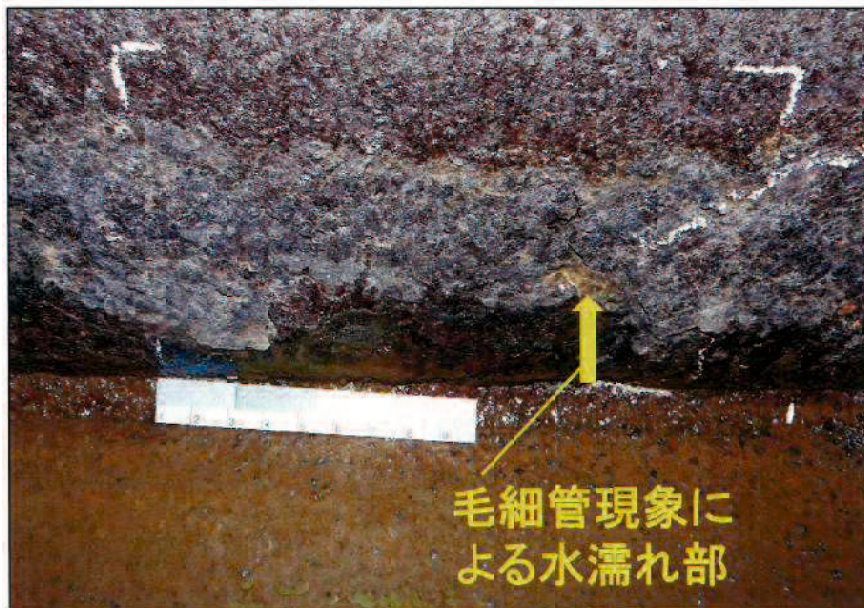
表-7.2 イオン透過抵抗測定点における付着塩分量とI 評点

測定点	付着塩分量 (mg/m ²)	I 評点
a	> 1,999	I-1
b	360	I-1
c	105	I-2
d	60	I-2
e	42	I-4
f	550	I-4

以上の調査結果より、異常さびの発生原因は、G1桁A2橋台側の伸縮装置から凍結防止剤を含んだ漏水が主であると考えた。異常さび範囲（層状剥離さびと要観察状態さび）は、G1桁外側桁端より約10mの位置にある添接板、G1桁内側端部より約3mの位置までとなっている。この異常さび範囲に施工性や施工後に生じる塗装部と無塗装部の境界が弱点となることを防止するため、補修塗装との境界を無塗装部で問題のない正常さび部とした結果、図-7.2に示す通りG1桁外側桁端から10.6m、G1桁内側桁端から3.0mのウェブ面の一部と下フランジ上下面を補修範囲とし、補修塗装面積は約14m²となった。



(a) 測定点fの塵埃堆積状況



(b) 測定点Cにおける毛細管現象

写真-7.3 イオン透過抵抗測定点の外観

7. 3 補修塗装方法の検討

実橋梁にRc-I 塗装系による補修塗装を適用する方法を確立するために、補修用素地調整方法とさび中に内在する塩分の除去方法の検討を行った。耐候性鋼材で付着塩分を議論す

表-7.3 補修用一次素地調整試験水準

試験水準	研掃法	仕様
1	ハンマーケレン	ハンマー木柄頭重量 450g
2	ダイヤモンドツール	ディスク外径 $\phi 100\text{mm}$
		ダイヤモンド粒径 約 $\phi 0.8\text{mm}$
		ダイヤモンド粒密度 $30\text{個}/\text{cm}^2$ 以上
3	ディスクサンダー	ディスク外径 $\phi 100\text{mm}$
		サンドペーパー #16
4	ブラスト法	研掃材 アルミナグリッド
		粒番号 #30

る場合、測定対象が塗装面ではなく、さび面であるため、そのさび表面の塩分のみではなく、さび中に内在される塩分も強く影響すると考えられる。しかし、現状ではさび中に内在する塩分量を正確に測定することは困難である。そこで、本研究ではさび表面の塩分量に着目している。ただし、今回の補修法ではさび層を除去し水洗を実施することにより、さび中に内在する塩分の除去も図っている。

7. 3. 1 補修用素地調整方法の検討

補修用素地調整方法を検討するために、異常さび（層状剥離さび）を生成した耐候性鋼さび鋼板を用いて、表-7.3に示す試験水準にて、補修用素地調整方法の除さび試験を行った。耐候性鋼さび鋼板は、5%-NaCl水溶液の週2回スプレー散布を1年継続して約 $1,500\mu\text{m}$ ～ $3,000\mu\text{m}$ の層状剥離さびを人工的に生成させたものを使用した。補修用一次素地調整方法は、ハンマーケレン、ダイヤモンドツール^{7), 8), 9)}、ディスクサンダーおよびブラスト法（研掃材はアルミナ）の4種類である。除さび面積は、 0.01m^2 である。試験結果は、図-7.5に示すように、ハンマーケレンとディスクサンダーでは層状剥離さびを除去することはできなかった。ブラスト法ではISO 8501-1が定義するSa 2 1/2¹⁰⁾の表面状態まで仕上げる事ができたが、240秒/ 0.01m^2 と処理に時間がかかり、実施工への採用は作業効率上の問題があると考えられる。

ダイヤモンドツールによる補修用一次素地調整は、図-7.6に示す素地調整グレードで、

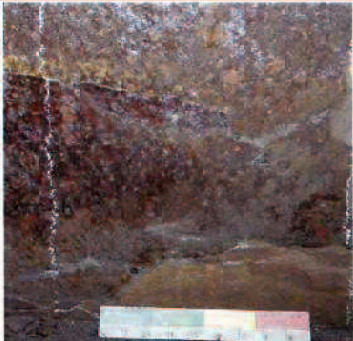
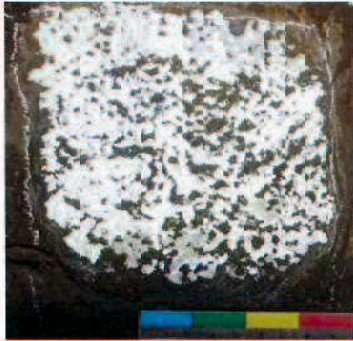
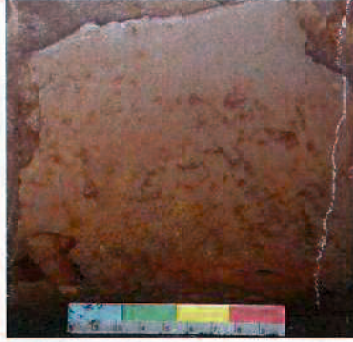
試験水準	研掃後の外観	研掃効率 研掃後の表面状況
1		20秒/0.01㎡ 層状さび残存
2		20秒/0.01㎡ 孔食内さびは残るが、ほぼSa 2相当
3		240秒/0.01㎡ 層状さび残存
4		240秒/0.01㎡ Sa 2 1/2 相当

図-7.5 補修用一次素地調整試験結果

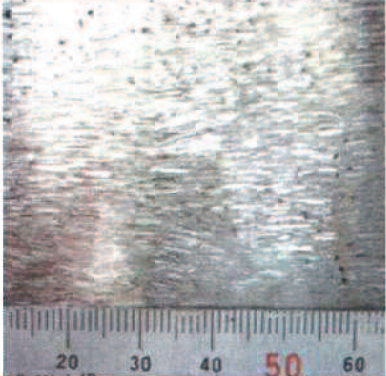
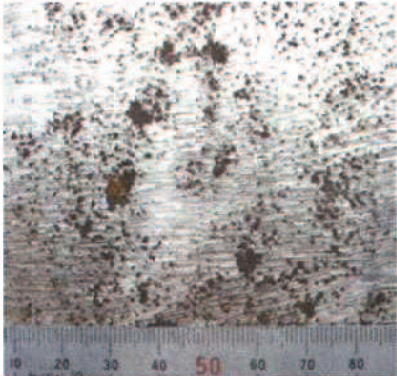
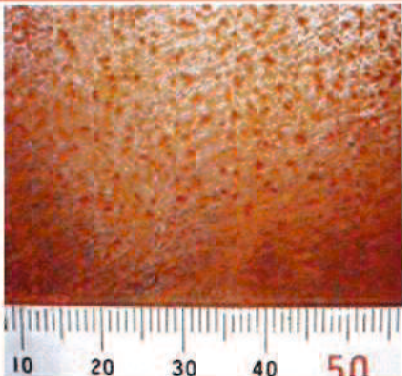
ダイヤモンドツール 素地調整グレード	処理後外観
除さび率 95%以上 St 2	
除さび率 67%以上 St 2	
除さび率 67%以下 St 2	

図-7.6 ダイヤモンドツールの素地調整グレード

St 2 除さび率67%以上まで仕上げるのに20秒/0.01m²となり，ブラスト法と比較して効率的であった。また，ダイヤモンドツールによる処理面は，従来の回転動力工具では得られなかった金属光沢面を呈し，孔食内にさびが残存することを除けばブラスト法に相当する表面となった。

表-7.4 ダイヤモンドツール研創試験結果

試験条件	処理法	板厚10点平均値 (mm)
1	ペーパーディスクサンダー (#16) St 2 仕上げ	8.20
2	無処理	8.18 【8.28 ^{注1)} -0.1 ^{注2)} =8.18】
3	ダイヤモンドツール St 2 仕上げ	8.20

注1)さび付鋼板の板厚測定値

注2)さび付鋼板のさび厚10点平均値

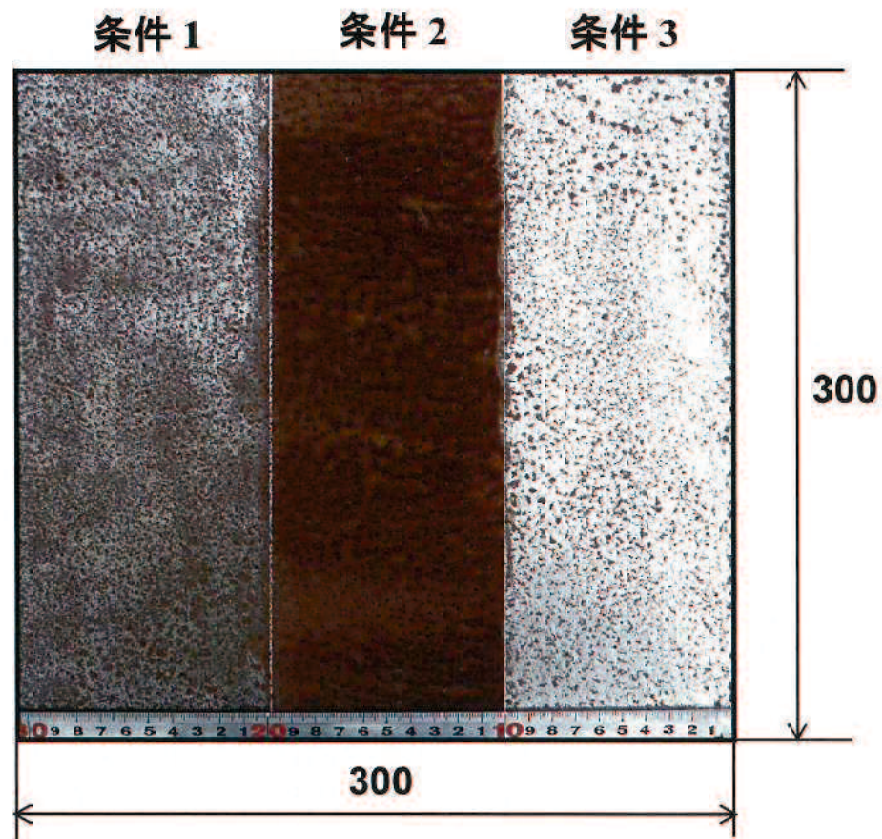


図-7.7 ダイヤモンドツール研創試験後外観

ダイヤモンドツール処理を実施した場合、耐候性鋼材に板厚減少が生じるかの有無を確認するため、ダイヤモンドツール研削試験を実施した。さび付鋼板は、田園地域に5年間大気曝露したJIS耐候性鋼（300mm×300mm×8mm）を用いた。表-7.4に示す条件1は、ペーパーディスクサンダー処理を行い、さび付鋼板をSt 2仕上げに、条件3は、ダイヤモンドツール処理を行い、さび付鋼板をSt 2仕上げとした。ただし、条件2は、無処理のさび付鋼板とした。表-7.4における板厚測定は、両球面マイクロメーターで測定し、さび付鋼板のさび厚測定は電磁膜厚計で測定した。研削試験後の外観と無処理のさび付鋼板の外観を図-7.7に示す。

表-7.4の板厚測定結果より、条件2の無処理さび付鋼板の板厚は8.18mm、さびが多く残存していたペーパーディスクサンダー処理後の板厚は8.20mm、除さび率67%以上となったダイヤモンドツール処理後の板厚は8.20mmと、3試験条件とも板厚値がほぼ同じ値であった。このことから、さび付鋼板をダイヤモンドツール処理で除さび率67%以上とした耐候性鋼は、板厚減少にいたっていないことが確認できた。ここで、条件2の無処理のさび付鋼板の板厚が0.02mmと薄い値を示したのは、測定機器の測定誤差と考え、0.02mmの差に有意差はないと考えた。

ダイヤモンドツール処理によって除去しきれなかった孔食内のさび除去のために、ダイヤモンドツール処理後に補修用二次素地調整としてブラスト法を行うことを考えた。耐候性鋼橋梁に補修用二次素地調整としてブラスト法を用いるには、耐候性鋼橋梁に生成する固着さびが強固であることを考慮し、サンドブラストではなく、研掃材にはアルミナもしくはスチールグリットといった硬いものを採用する必要がある。

以上のことから、山根橋の施工計画において、素地調整は補修用一次素地調整としてダイヤモンドツールを、補修用二次素地調整としてスチールグリット（JIS G70相当、粒径420 μ m～1,000 μ m）によるブラスト法を採用した。

7. 3. 2 さび中に内在する塩分の除去方法の検討

耐候性鋼橋梁の表層さびやさび中に内在している塩分を除去する方法として、水洗もしくはスチーム水洗が行われ、水圧は5～20MPaで水道水を用いたとの報告¹⁷⁾がある。また、水圧は2.5MPaでは不十分であり、5MPaが望ましいという報告¹⁸⁾もある。そこで、山根橋の施工計画におけるさび中に内在する塩分の除去方法としては、5MPa以上の水洗を水道水で行うこととした。しかし、水洗処理では孔食内に内在するさび中の塩分を全て除去することは困難と考え、付着塩分量が50mg/m²を上回る100mg/m²～150mg/m²でも防食性が期待

できる特殊有機ジンクリッチペイント^{7), 19)}を下塗に採用した。この特殊有機ジンクリッチペイントは、既往有機ジンクリッチペイントに腐食性イオン固定化剤を配合することにより、塩化物イオンや硫酸イオン等の腐食性イオンとイオン交換し、腐食性イオンを不溶性の塩として固定化する機能を持っている。また、同時にイオン交換時に放出されたアニオン性腐食抑制剤が鋼材を不動態化するなどの機能も持っている¹⁹⁾。

7. 4 山根橋への補修塗装の適用

実施工を開始するに当たり、施工の障害となる伸縮装置からの漏水は、パテを用いて止水処置を行った。また、施工が平成22年1月という冬季であったため、気温5℃以上および相対湿度85%以下の管理を厳格に行った。

7. 4. 1 補修用素地調整

測定点b（下フランジ下面）の層状剥離さび部における各補修用素地調整段階の表面状態を図-7.8に示す。事前試験用と同様に、補修用一次素地調整であるダイヤモンドツールによって孔食部を除いては金属光沢面が得られ、補修用二次素地調整の1回目のブラストによってSa 2相当の仕上がりを見せた。最終的には、補修用二次素地調整の2回目ブラスト後はSa2 1/2相当の表面を得ている。これに対して、孔食の少ないウェブ面においては、補修用二次素地調整の1回目のブラスト後にSa 2 1/2相当の表面が得られた。

7. 4. 2 内在塩分除去

内在塩分除去は、基準値の50mg/m²以下とするため、水圧約6.5MPaにて水洗を行った。水洗後の排水処理は、さび片等をナイロンメッシュで回収し、ナイロンメッシュを通過した水洗後水は、管理者の許可を得て、河川に放水した。図-7.9に各補修用素地調整の段階における付着塩分量を示す。付着塩分測定は、電導度法を用いた。孔食の少ないウェブ面である測定点aでは、施工前において計測器の測定限界1,999mg/m²以上であり、補修用二次素地調整の1回目ブラスト後で約250mg/m²となり、水洗にて急激に低下しほぼ50mg/m²以下となった。

これに対して、孔食の多い下フランジ下面である測定点bでは、施工前の値が約150mg/m²程度であったが、補修用二次素地調整の1回目のブラスト後に約360mg/m²と上昇し、水洗

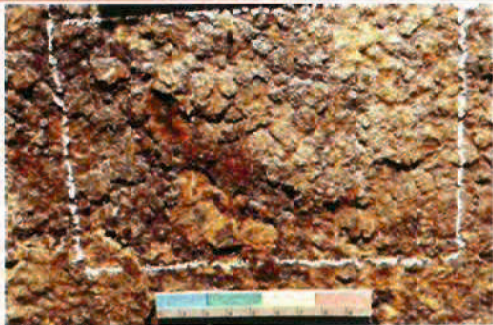
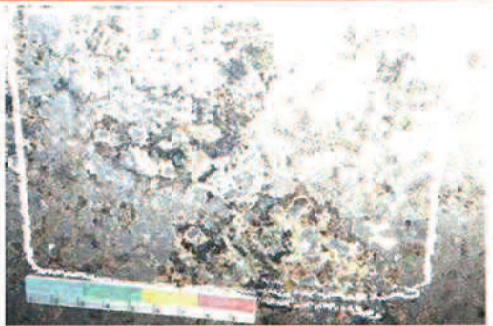
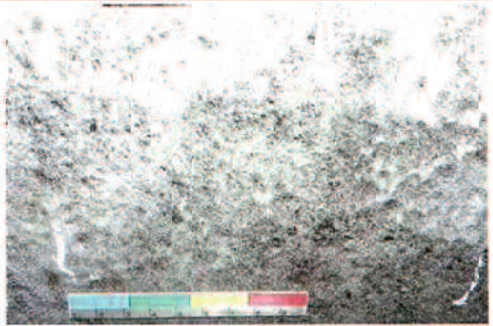
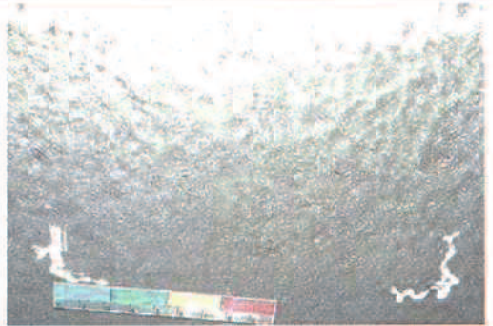
素地調整工程	素地調整外観
施工前 層状剥離さび (評点I-1)	
補修用一次素地調整 ダイヤモンドツール 除さび率 67%以下 St 2 孔食内さび残存	
補修用二次素地調整 ブラスト1回目 除さび率 67%以上 St 2 孔食内さびが僅かに残存	
補修用二次素地調整 ブラスト2回目 Sa 2 1/2相当 孔食内さび除去	

図-7.8 測定点b下フランジ下面の層状剥離さび部における
各補修用素地調整段階の表面状態

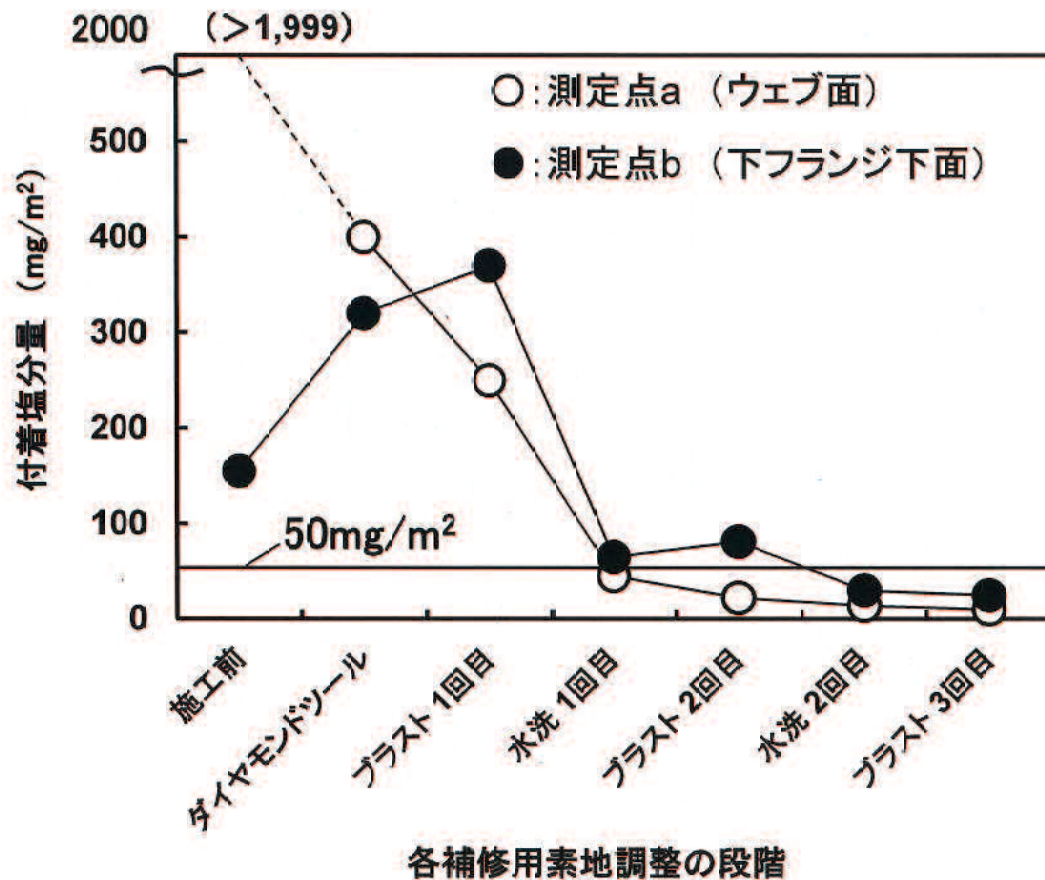


図-7.9 各補修用素地調整の段階における付着塩分量

後でも約60mg/m²であり50mg/m²以下にはならなかった。このため、補修用二次素地調整の2回目のブラストを行ったが、それでも50mg/m²以上であり、その後に2回目の水洗することによって50mg/m²以下とすることができた。これは、孔食があった場合、補修用素地調整する過程で孔食内のさびから当初計測できなかった塩分が掻き出され、一時的に表面の塩分が上昇したものと考えている。したがって、さび中に内在する塩分の除去は、実施工では、図-7.9に示すように補修用素地調整の各段階で素地調整面の付着塩分量測定値をチェックし、管理基準の50mg/m²以下に達することを確認することが重要である。

7. 4. 3 補修塗装と施工後の評価

補修塗装は施工条件を整えるため、板張シート養生内に送排風機やジェットヒーターを入れ、換気と温度と相対湿度の調整を行った。塗装系は Rc-I 塗装系に準じた。ただし、下塗には前述の耐塩分性を有する特殊有機ジンクリッチペイントを、上塗には中塗と兼



写真-7.4 補修塗装の完工状況

表-7.5 補塗装の完工直後の初期塗膜評価結果

評価箇所	塗膜厚値 (μm)	イオン透過抵抗値 ($\text{G}\Omega$)
測定点a (ウェブ面)	264	>20
測定点b (下フランジ下面)	259	>20

用の厚膜形ふっ素樹脂塗料を用いて省工程とし、コストダウンを図った。補修塗装の完工状況を写真-7.4 に示す。上塗の色彩は無塗装部のさび色に合わせた茶褐色を採用し、外観としても違和感のない仕上がりを目指した。異常さび部を部分的な補修塗装によって高品質に補修し、通常の重防食塗装（C 塗装系）と同じ20年以上の寿命を期待している。補修塗装部の防食機能を評価するために、完工直後に塗膜性能評価を桁端部から約1mの箇所で実施した。評価は、外観観察、塗膜厚値測定、イオン透過抵抗値測定を行い、

測定点 a のウェブ面、測定点 b の下フランジ下面について実施した。その結果を表-7.5 に示す。外観観察では、塗膜に膨れ、傷、さび等の発生は見られず、イオン透過抵抗値が $20\text{G}\Omega$ 以上の高い値⁵⁾であることから、初期（施工完工直後）塗膜として良好な防食機能を発揮していることが確認できた。

7. 5 適用結果の考察

以上の検討と実施から、考察できることを以下に述べる。

- (a) 山間部の凍結防止剤を散布する耐候性鋼橋梁においては、伸縮装置等からの漏水があった場合、散布した凍結防止剤を含む水の流下の跡に沿って異常さびが発生する可能性がある。
- (b) 異常さびが著しく進行し、層状剥離さびとなる部分は、下フランジ下面とウェブ面下部である。
- (c) ウェブ面においては、漏水箇所の近傍と、漏水箇所から離れたところでは下フランジ上面から立ち上がりの数100mmの箇所に層状剥離さびが発生しやすい。これは、凍結防止剤の塩分を含む水が下フランジ上面を流れ、そこから毛細管現象によって水が昇る影響と推察される。
- (d) 補修用二次素地調整のプラスト法は、補修用一次素地調整から用いると処理時間がかかるが、ダイヤモンドツールによる補修用一次素地調整後に実施した場合、処理時間が短縮され、孔食内さびの除去にも有効であると考えられる。
- (e) 補修用素地調整の各段階の中で一時的に計測される素地調整面の付着塩分量が上昇する現象を確認した。この現象は、孔食の少ない面では確認されなかったため、補修用素地調整の過程で孔食内のさびから塩分が掻き出されるためと考えられる。
- (f) 水洗は、付着塩分量の除去効果は大きいですが、孔食が多い面では1回的水洗で $50\text{mg}/\text{m}^2$ 以下とできない場合がある。これは、水洗前の補修用一次素地調整において孔食内のさびの除去が不十分なためと考えられる。なぜならば、補修用二次素地調整のプラストで、Sa 2～Sa 2 1/2相当まで処理した面からの水洗では $50\text{mg}/\text{m}^2$ 以下まで付着塩分量を除去できたからである。
- (g) 初期（施工完工直後）に補修塗装部の防食機能を評価した結果、外観観察では、塗膜に膨れ、傷、さび等の発生は見られず、イオン透過抵抗値が $20\text{G}\Omega$ 以上の高い

値であることから、初期（施工完工直後）塗膜として良好な防食機能を発揮していることが確認できた。

以上の考察から、耐候性鋼の異常さびへの補修塗装の施工フローを図-7.10のように提案する。ここで、異常さび発生原因が確実にかつ長期間にわたって排除可能と判断できる場合には、補修用の素地調整を終え、素地調整程度Sa 2以上（Sa 2 1/2相当）かつ付着塩分量の測定値が 50mg/m^2 以下とした場合、無塗装耐候性鋼として継続することも選択肢の一つとした。しかしながら、異常さび発生原因の排除が不可能あるいは一時的である場合は、補修用二次素地調整の戻りさび除去のブラスト処理完了後、防食補修塗装を実施する。具体的な補修塗装においてRc-I 塗装系の工程と異なる部分は、ブラストに入る前に補修用一次素地調整を行うこと、水洗を補修用二次素地調整の後に位置付けたこと、付着塩分量の測定値が 50mg/m^2 以下とならない場合に再ブラストと再水洗を設けたことである。再ブラストと再水洗をせず、安価な施工をするためには、補修用一次素地調整と補修用二次素地調整を確実に実行して、Sa 2 1/2相当の表面に仕上げておくことが重要であると考えている。その理由は、本施工後に行った同様の工事において、補修用一次素地調整と補修用二次素地調整による除さびを厳格に行い、水洗を1回にできた実績によるものである。

以上のことから、耐候性鋼橋梁における Rc-I 塗装系を準用し、付着塩分量を 50mg/m^2 以下とする方策の一例を示した。

7. 6 施工後経年調査結果

補修塗装部の防食機能を評価するために、補修塗装後、1.5 ヶ月、19 ヶ月、25 ヶ月、28 ヶ月、31 ヶ月、34 ヶ月（2 年 10 ヶ月）目の塗膜能評価を実施した。外観観察は、補修塗装部位全般を対象に、塗膜厚値測定、イオン透過抵抗測定は、桁端部から 1m の箇所、3 箇所、桁端部から 5.6m の 3 箇所、桁端部から 9m の 3 箇所、および桁端部から 10.6m の塗装端部の 1 箇所で行った。図-7.11 に測定位置を示す。

補修塗装部位の外観観察結果では、34 ヶ月（2 年 10 ヶ月）が経過しても、補修塗膜部位全般に防食機能の劣化は見られず、良好な状態を維持していた。補修塗膜厚値は、初期と変化ないことが確認された。また、イオン透過抵抗値による補修塗膜の評価結果は、図-7.12 に示した。図-7.12 より、補修塗膜のイオン透過抵抗値は、10 箇所とも $1\text{G}\Omega$ 以上

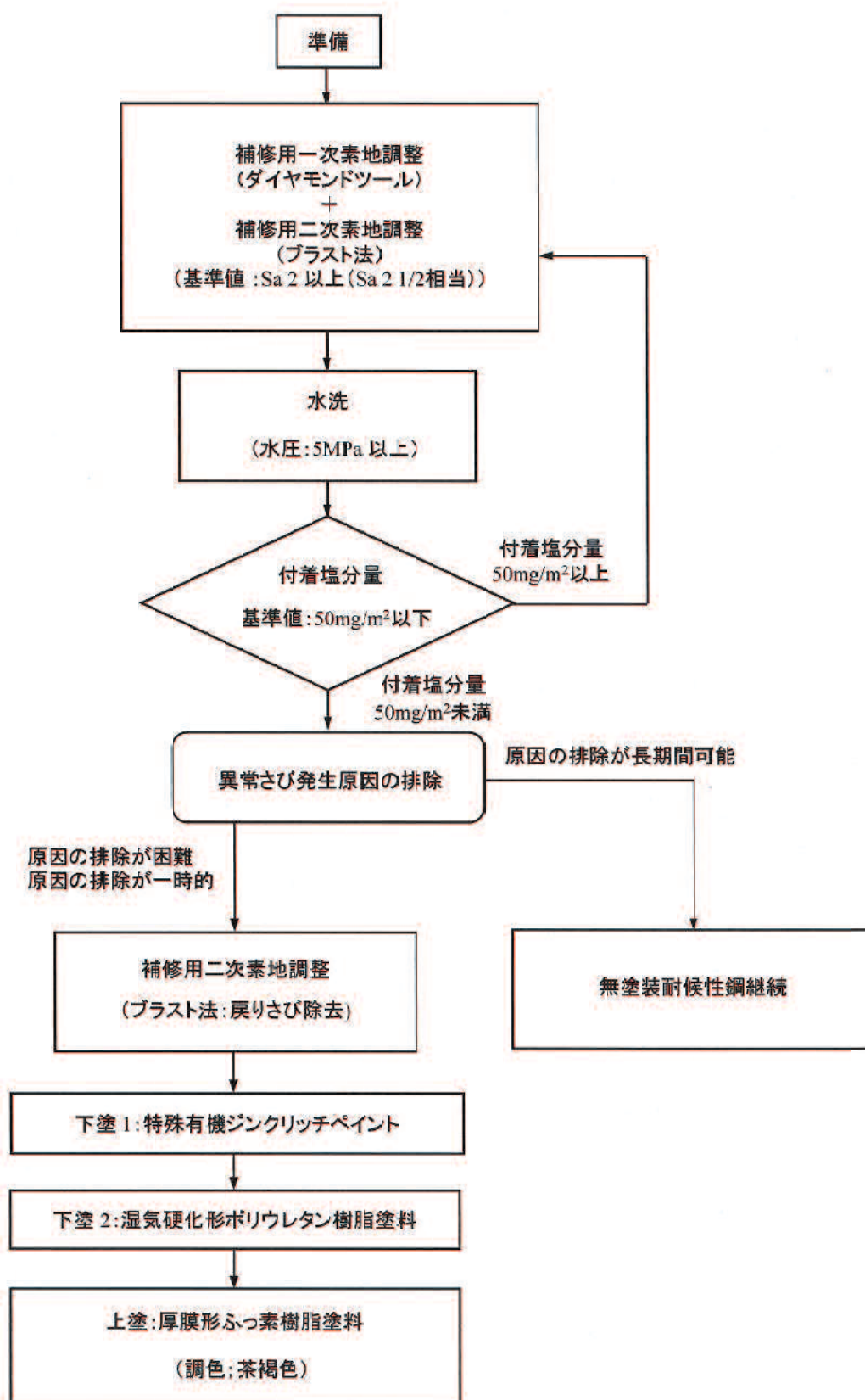


図-7.10 施工フロー

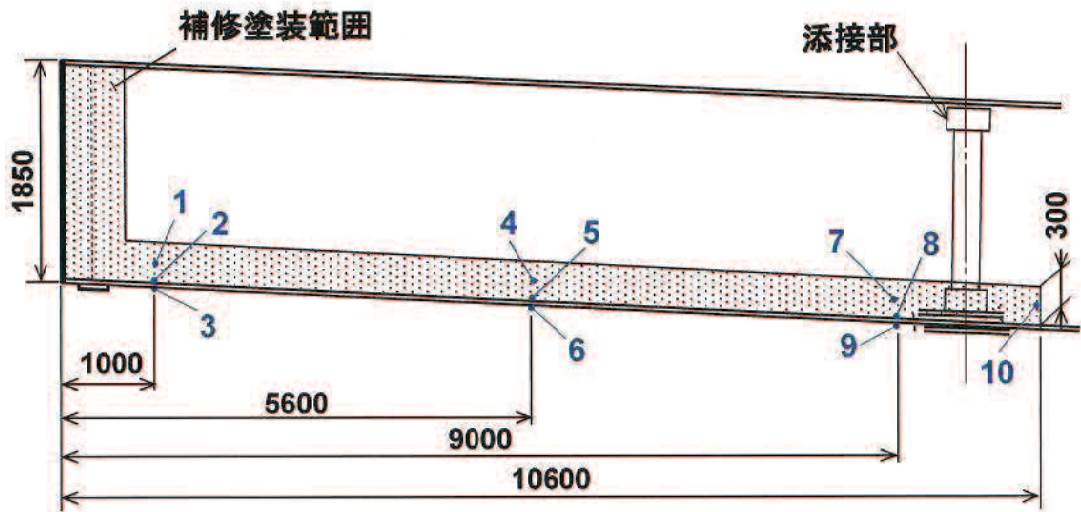


図-7.11 山根橋補修塗装部位におけるイオン透過抵抗測定位置

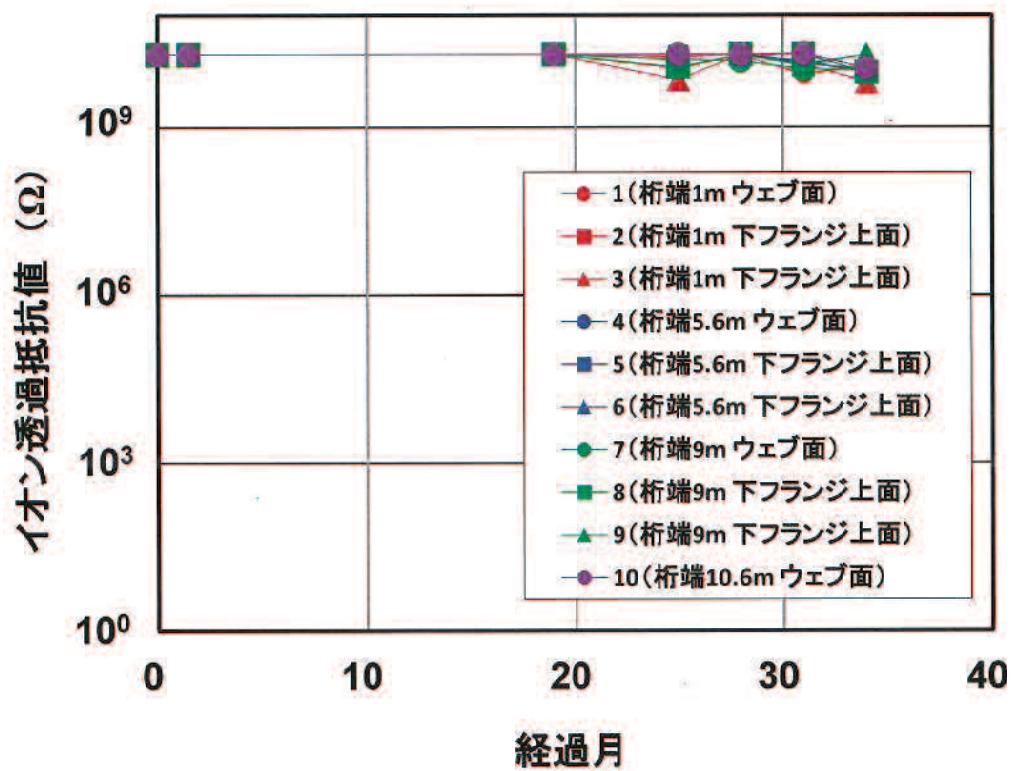


図-7.12 山根橋補修塗装部位におけるイオン透過抵抗値の経時変化

の高い抵抗値を維持していることから、良好な塗膜の状態であることが示唆された。

7. 7 第7章のまとめ

層状剥離さびが発生した無塗装耐候性鋼橋梁に対して、補修用素地調整およびさび中に内在する塩分の除去方法を検討する観点から、実橋梁へ適用可能な補修塗装の方策を提案した。

この検討結果から得られた知見を以下に列記する。

- (a) 補修用一次調整のダイヤモンドツール処理で孔食内のさび以外のさびを除去、補修用二次調整のブラスト処理（Sa 2 1/2相当）で孔食内の残存さびを除去、その後の水洗処理を施すことで付着塩分量を50mg/m²以下まで除去でき、良好な素地調整品質が確保することができた。
- (b) 付着塩分除去は水圧5MPa以上の水道水による水洗が有効であり、50mg/m²以下とするためには補修用素地調整の各段階で素地調整面の付着塩分量測定値の推移を把握し、施工管理することが重要と考えられる。
- (c) 無塗装耐候性鋼の異常さび部の補修塗装について実施可能な施工フローを示した。今後は、山根橋の補修塗装部の防食機能の劣化の過程を追跡調査およびその調査結果の検討を行い、実施した本工法が十分な防食寿命を発揮するかどうかの確認は、補修塗膜端部からのさびの侵入を評価することが重要である。
- (d) 補修塗装後34ヶ月（2年10ヶ月）が経過後の補修塗膜の診断結果は、外観観察では、ふくれ、さび等の防食機能の劣化は見られない。また、塗膜厚値は、初期と変化なく、塗膜のイオン透過抵抗値も、1GΩ以上の高抵抗を示し、良好な塗膜が維持されていることが示唆された。

第7章の参考文献

- 1) (社)日本道路協会：鋼道路橋塗装・防食便覧，2005.
- 2) 山口栄輝，中村聖三，廣門公二，森田千尋，園田佳臣，麻生稔彦，渡辺浩，山口浩平，岩坪要：九州・山口地区における耐候性鋼橋梁の実態調査，土木学会論文集A，Vol.62，No.2，pp.243-254，2006.
- 3) 山田稔，渡辺祐一，加納勇，山井俊介：凍結防止剤による耐候性鋼橋梁の現状と課題，第57回土木学会年次学術講演会，I-257，pp.513-514，2002.
- 4) 紀平寛，塩谷和彦，幸英昭，中山武典，竹村誠洋，渡辺祐一：耐候性鋼さび安定化評価技術の体系化，土木学会論文集，No.745/I-65，pp.77-87，2003.
- 5) 今井篤実，立花仁，松本洋明，紀平寛：鋼構造物の腐食診断にむけたイオン透過抵抗法の適用，防錆管理，Vol.51，No.5，2007.
- 6) (社)日本鋼構造協会：テクニカルレポートNo.86「耐候性鋼橋梁の適用性評価と防食予防保全」，2009.
- 7) 平松幹次郎，三塚喜彦，今井篤実，相賀武英，松本剛司，永井昌憲，里隆幸，木下俊也，紀平寛：鋼構造物の腐食診断と新しい補修塗装工法の提案(2)―異常さび部の効率的下地処理工法の開発―，第29回鉄構塗装技術討論会発表予稿集，pp.7-10，2006.
- 8) 今井篤実：異常さびを示すさび発生部の高効率補修塗装工法の開発，第160回腐食防食シンポジウム予稿集，pp.67-72，2007.
- 9) 紀平寛：無塗装橋梁用鋼材のプロダクト・セキュリティ向上への取り組み，SE Report，Vol.154，pp.10-15，2009.
- 10) (社)日本鋼橋梁塗装専門会：劣化した耐候性鋼の塗装仕様の作成，鋼橋塗装，Vol.26，No.2，pp.1-23，1998.
- 11) 江成孝文，田中誠，町田洋人，遠藤三郎：耐候性鋼材に使用した無塗装桁の補修塗装，第22回鉄構造塗装技術討論会発表予稿集，pp.59-64，1999.
- 12) 江成孝文，田中誠，町田洋人，遠藤三郎：耐候性鋼材に使用した無塗装桁の補修塗装，第21回防錆防食技術発表大会講演予稿集，pp.119-122，2001.
- 13) 湯山真一，宮本太郎：美浜大橋における耐候性鋼材の塗装による補修工事，第31回鉄構塗装技術討論会発表予稿集，pp.119-126，2008.
- 14) 後藤宏明，守屋進，内藤義巳，山本基弘，藤城正樹，斎藤誠：耐候性鋼材の塗装による補修方法の検討，材料と環境，Vol.59，No.1，pp.10-17，2010.

- 15) 今井篤実, 山本哲也, 麻生稔彦: 耐候性鋼橋梁の防食補修塗装法の実施に関する一考察, 土木学会論文集A1(構造・地震工学), Vol.68, No.2, 347-355, 2012.
- 16) ISO 8501-1: 塗料及びその関連製品の施工前の鋼材素地調整, 表面清浄度の目視評価, pp.105-112, 1983.
- 17) 磯光夫, 三田村浩, 勝俣盛, 池田憲二, 安江哲, 藤野陽三: 橋梁洗浄に関する北海道での取り組みと米国における実態調査, 橋梁と基礎, Vol.38, pp.29-33, 2004.
- 18) 磯光夫, 三田村浩, 勝俣盛, 池田憲二, 安江哲, 藤野陽三: 橋梁の付着物調査と洗浄技術の実用化, 土木学会論文集F, Vol.66, No.2, pp.220-236, 2010.
- 19) 松本剛司, 里隆幸, 永井昌憲, 平松幹次郎, 今井篤実, 相賀武英, 木下俊也, 紀平寛: 鋼構造物補修に適した新規有機ジンクリッチペイントと新規電動工具を使用した補修工法の開発, 防錆管理, pp.9-13, 2008.

第8章

結 論

第 8 章 結論

8. 1 本研究のまとめ

無塗装耐候性鋼橋梁はこれまでに多く建設されており、今後の建設数も増加すると考えられる。これらの無塗装耐候性鋼橋梁を有効に使用し、本来期待されているライフサイクルコストの縮減を可能とするためにも、維持管理技術の確立は急務である。しかしながら、無塗装耐候性鋼の維持管理技術は、同じ鋼橋である塗装橋梁の維持管理技術のそのものであり、現場適用は大幅に遅れているのが実状である。具体的には、塗装橋梁は、塗膜評価をする場合の評価基準や補修する場合の補修塗装仕様が基準化され、実用化に至っている。これに対して無塗装耐候性鋼橋梁の場合の腐食評価は、裸使用とさび安定化補助処理に関わらず、外観評価が主体で、その腐食評価は、評価者の経験に依存してしまう。また、無塗装耐候性鋼橋梁を補修塗装する場合の補修仕様は、ほとんど基準化が進んでないため、個々の補修事例で独自の補修設計が行われ、その設計に沿って補修塗装工事が実施されている。補修塗装後の効果検証もほとんど行われていない。

この上述の課題を解決するために、本研究では、無塗装耐候性鋼橋梁の腐食状態の評価法の高度化ならびに腐食した無塗装耐候性鋼材の防食補修法の開発を目的とした。その結果、外観評価の代わりに着目したイオン透過抵抗法を裸使用とさび安定化補助処理の双方に適用できる高抵抗まで測定可能な測定装置の改良に至った。また、この測定装置を用いて、裸使用とこれまであまり適用されていなかったさび安定化補助処理への適用について検討した。さらに、この手法を用いて全国のさび安定化補助処理が施された耐候性鋼橋梁の表面状態について調査した。これらから、無塗装耐候性鋼橋梁の裸使用とさび安定化補助処理の双方の腐食の状態を判定できる新しい評価基準を提案できた。

腐食した無塗装耐候性鋼材の防食補修法にはいくつかの段階が考えられる。そのため、本研究では、まず、簡易に塩分を除去できると推測される水洗処理・グラインダー処理を異常さび生成した試験片で実施した。その結果、さびを除去する効果が大きいグラインダー処理の方が水洗処理より腐食を抑制する効果があることが確認された。

つぎに、長期的な防食補修効果が期待できる部分補修塗装について、その効果を検討するため、強固な異常さびや異常さびに内在する塩分を除去可能な補修用素地調整法を新たに考案した。そこで、架設後 20 年経過し異常さびを生じた裸使用の耐候性鋼橋梁において

部分的な防食補修塗装を実施した。この防食補修塗装において、上述の補修塗装用素地調整法を適用し、補修用素地調整として理想的に近い防食下地を形成することができ、さらに、現時点で最適と考えられる施工フローを提案するに至った。

以下、本研究で得られた結論を各章ごとに要約する。

第1章

本研究の背景と目的、既往の研究の現状とその課題および論文の内容と構成を述べた。

第2章

裸使用の耐候性鋼曝露材のさび状態を評価可能なイオン透過抵抗法に着眼した。しかしながら、既存のイオン透過抵抗測定装置の使用環境は、室内での使用が主体で、測定範囲も裸使用の耐候性鋼材のさび状態の評価が可能な抵抗領域までであった。そこでまず、測定範囲としては、P+T 処理材の初期被膜が持つ高抵抗領域の抵抗測定を可能にするとともに、現場適用性の向上を実現するための改良を試みた。つぎに、改良したイオン透過抵抗装置を用いて、明らかになっていない裸使用の耐候性鋼材のイオン透過抵抗法とさび外観評価との整合性の確認を被検者テストという手法で検証した。また、既設の裸使用の耐候性鋼橋梁の評価を実際にイオン透過抵抗法から得られる I 評点の領域区分で評価して、その有用性を検証した。さらに、さび安定化補助処理を施した耐候性鋼材の防食機能の劣化、腐食評価に、イオン透過抵抗測定が有用であるかも検証した。

以上の検討した結果から得られた知見を下記に示す。

- (a) 既存のイオン透過抵抗測定装置は、改良によって、P+T 処理材の初期被膜が持つ高抵抗領域（最大 20GΩ）が測定できる装置となり、現場適用性も大幅に向上した。
- (b) 被検者テストから、評価者のさび外観評価とイオン透過抵抗法から得られる I 評点の領域区分の評価は、ほぼ一致することから、イオン透過抵抗法は裸使用の耐候性鋼材の評価法として有用であることが確認できた。
- (c) 評価者は、機器を用いなくても正しい評点をつけられるが、経験の浅い評価者の場合はそうも行かない。誤った評点付けに起因して、誤った維持管理がなされないよう、定量的なイオン透過抵抗法による腐食評価が必要と考えている。
- (d) 実橋梁の腐食評価結果より、イオン透過抵抗法から得られる I 評点の領域区分と実橋梁のさびの状態が良く一致していることがわかり、イオン透過抵抗法が裸使用の耐候性鋼橋梁のさびの状態の評価に有用であることが確認された。

- (e) さび安定化補助処理を施した耐候性鋼材のイオン透過抵抗値は、被膜が劣化するとともに、イオン透過抵抗値が減少することから、被膜の防食機能の劣化、腐食評価にイオン透過抵抗測定が有用であることが確認できた。

第3章

厳しい腐食環境に置かれたさびP+T処理材を施した耐候性鋼模擬橋梁試験体からコア材を採取し、P+T処理材の防食機能の劣化、腐食評価に関する基礎データ収集と、イオン透過抵抗法で評価した結果、得られた知見を以下に示す。

- (a) 熟練者の目視外観評価から得られた外観評点と、イオン透過抵抗法より得られたI 評点を比較したところ、外観評点A, B, 5-x, 5-y, 5-z, 4-x, 4-y, 4-zとI 評点I-4 (保護性さび・被膜)が、外観評点2-z, 2-z(b)とI 評点I-2 (要観察状態を示すさび・被膜(A))が、外観評点2-x, 2-x(b), 2-y, 2-y(b)がI 評点I-2' (要観察状態を示すさび・被膜(B))に、外観評点1-x, 1-x(b), 1-y, 1-y(b), 1-z, 1-z(b)がI 評点I-1 (異常を示すさび・被膜)に、それぞれ良く対応した。そこで、外観評価では十分な熟練が求められる未経験者であってもイオン透過抵抗法を適用することで、正確な評価が可能であることが明らかになった。
- (b) 縦軸のイオン透過抵抗値の大小で、被膜の劣化程度を、横軸のさび・被膜厚値の大小で、被膜減耗程度および板厚減少量を把握できるイオン透過抵抗法 (I 評点による領域区分) は、P+T処理材の防食機能の劣化、腐食状態を評価する手法として有用であると考えられる。
- (c) P+T処理材が健全である間、または地鉄界面に緻密なさび層が形成されている間は、塩分の地鉄界面への侵入が抑制されている。しかしながら、さび層が厚くなり、さび層中にクラックが生じると、そのクラックに沿ってClが侵入し、腐食が加速する。
- (d) P+T処理材の防食機能の劣化と腐食過程は、塗装した鋼材に防食機能の劣化と腐食過程に類似している。ただし、P+T処理材では、P機能膜の効果により保護性さび形成が促される点に違いがある。
- (e) こぶ状さび発生の原因は、被膜が厚く密着性の良い被膜に、傷やピンホール等の初期欠陥が生じ、その後、この初期欠陥を起点として、厳しい腐食環境下でこぶ状さびにいたるような局所的な腐食が進行したためと推察した。
- (f) 防食機能の劣化、腐食マップを作成し管理しておく、維持管理や補修検討を行う上で、補修実施の有無検討、補修範囲の選定に有効であると考えられる。

第4章

既に裸使用の耐候性鋼橋梁の詳細調査に適用しているイオン透過抵抗法のさび安定化補助処理への適用を検討した。併せて、現状のさび安定化補助処理の詳細調査における外観評価では評価の前に行う前処理の実施の必要性が論じられていないことから、前処理の効果を検証し、適切な前処理方法について検討した。P+T処理材を用いた耐候性鋼橋梁の防食機能の劣化・腐食状態をイオン透過抵抗法から得られたI 評点の領域区分で評価した。その結果、得られた知見を以下に示す。

- (a) P+T処理材における防食機能の劣化・腐食の進行経路は、外観評点Aから外観評点Bの防食機能の劣化過程を経てI-4領域の保護性さび・被膜に至る経路(3)と、外観評点Aから外観評点Bの防食機能の劣化過程、I-4領域の保護性さび・被膜の過程を早期に通過し、I-2領域の要観察状態を示すさび(A)，I-2' 領域の要観察状態を示すさび(B)やI-1領域の異常を示すさびに至る経路(4)があることが解析できた。
- (b) P+T処理材を用いた耐候性鋼橋梁のイオン透過抵抗法を適用するには、外観評価と同様に、浮き被膜、さびおよび塵埃の堆積を除去する工程としての前処理が必要であり、前処理としては刷毛処理が適している。
- (c) P+T処理材を用いた耐候性鋼橋梁に生じた層状剥離さび発生部位にイオン透過抵抗方法を適用する場合には、裸材の場合と同様に、さび・被膜厚値は、層状剥離さび除去前の値を、イオン透過抵抗値はハンマーやヘラによる層状剥離さび除去後の値を測定し、評価するのが良い。
- (d) 今回評価したP+T処理材を用いた耐候性鋼橋梁においては、測定点の87%が正常な表面状態（I-5領域+I-4領域+I-3領域）にあり、測定点の13%が正常でない表面状態（I-2領域+I-2' 領域+I-1領域）にあった。
- (e) 今回評価したP+T処理材を用いた耐候性鋼橋梁における部位別評価結果から、全ウェブ面と全下フランジ下面と比較して全下フランジ上面の方が要観察状態を示すさび(A)，要観察状態を示すさび(B)，および異常を示すさびを生じた測定点が約4倍多いことが確認された。

以上のことから、P+T処理材を用いた耐候性鋼橋梁の評価にイオン透過抵抗法から得られたI 評点の領域区分を適用することで表面状態を評価できることが明らかとなった。今後この防食機能の劣化や腐食の進行の経路の正しさを検証するため、定点評価結果を蓄積していきたい。また、今回評価対象とならなかった他のP+T処理材を用いた耐候性鋼橋梁でも同様な定点評価結果を蓄積していく必要もある。

第5章

高塩分環境下などの異常さびの原因が排除されない場合の部分補修塗装以外の耐候性鋼材の特性を生かした対処法として、高圧水洗処理とさび除去処理を行った後の効果について、塩水散布による加速試験によりその効果を検討した結果、以下の知見を得た。

- (a) 高塩分環境下などで異常さびが生成した耐候性鋼材において、環境が改善されない場合、耐候性鋼材表面にさびが残留したままで高圧水洗を行うとさびの生成を促進させる可能性がある。
- (b) 高塩分環境下などで異常さびが生成した耐候性鋼材において、環境が改善されない場合の有効な対処法としては、現時点までの塩水散布による加速試験（336 日間、0.2%塩水散布）から、グラインダー処理やグラインダー＋高圧水洗処理などの異常さびを除去する方法が有効である。
- (c) 塩水散布による加速試験の結果から、さびを除去するだけでも腐食の速度を抑制できる可能性があることが確認された。

高塩分環境下などの異常さびを生成する環境が改善されない場合の耐候性鋼材の防食機能を生かした対処法として、グラインダー処理やグラインダー＋高圧水洗処理などのさび除去が有効であると考えるが、現時点の加速試験期間はまだ十分とは言えないため、試験の継続が必要である。特に、異常さびが生成した耐候性鋼材の対処法は、実橋梁に適用した際の処理コストの検討や実延命（耐用）期間の算出が必須と考えられる。

第6章

補修塗装における素地調整については、より高硬度な研削材を使用する必要があると考えた。そこでダイヤモンド工具を開発し、市販の電動工具で高速回転させて、耐候性鋼材に生成した強固なさびの除去を試み、従来動力工具との比較試験を実施した。また、実工事でのダイヤモンド工具の適用性結果の報告も合わせて行った。適用試験結果で得られた課題をさらに改良したダイヤモンド工具の製作を試みた。改良したダイヤモンドツールは、他の市販工具（市販ダイヤモンド工具 A, B, 市販ペーパーグラインダー#16）と耐久性、表面粗さ、騒音を比較し、補修用一次素地調整工具としての有効性を検討した。

上記検討結果から得られた知見を下記に示す。

- (a) 耐候性鋼材に生成した層状剥離さびは、ダイヤモンド工具を用いて研掃した結果、孔食内のさび以外のさびを除去し、鋼材面を露出することができた。
- (b) 形状をフラット構造にするとともに、粒子を放射状に配置したことで、研削力と耐

久性の向上させることができた。高音対策としては、二層かつ空間構造とすること改善された。

- (c) ダイヤモンドツールは、本供試材を用いた試験結果市販ダイヤモンド工具 A、市販ダイヤモンド工具 B および市販ペーパーグラインダーと比べ、補修用一次素地調整工具として有効であることが確認された。
- (d) ダイヤモンドツールは、鋼面が 70%程度露出するまでの補修一次素地調整面積が 2.7m^2 に至っており、外観上もダイヤモンド砥粒が残存していることから、継続した補修用一次素地調整が期待できる。

今後は、ダイヤモンドツールが補修用一次素地調整工具として更なる有効性を確認するため、耐候性鋼橋梁に生成したさびの性状を考慮した検証とコスト面の検討が必要である。

第7章

補修塗装については、現時点で耐久性が高いと推奨されている Rc-I 塗装系を準用し、塗装面の付着塩分量を $50\text{mg}/\text{m}^2$ 以下とすべきと提案されている。しかしながら、耐候性鋼材に生成した強固な固着さびの除去は容易ではなく、素地調整の品質確保の方策は確立されていない。実際に層状剥離さびが発生した無塗装耐候性鋼橋梁に対して、補修用素地調整およびさび中に内在する塩分の除去方法を検討する観点から、実橋梁へ適用可能な補修塗装の方策を提案した。この検討結果から得られた知見を以下に列記する。

- (a) 補修用一次調整のダイヤモンドツール処理で孔食内のさび以外のさびを除去、補修用二次調整のブラスト処理 (Sa 2 1/2相当) で孔食内の残存さびを除去、その後の水洗処理を施すことで付着塩分量を $50\text{mg}/\text{m}^2$ 以下まで除去でき、良好な素地調整品質が確保することができた。
- (b) 付着塩分除去は水圧 5MPa 以上の水道水による水洗が有効であり、 $50\text{mg}/\text{m}^2$ 以下とするためには補修用素地調整の各段階における各段階で素地調整面の付着塩分量測定値の推移を把握し、施工管理することが重要と考えられる。
- (c) 無塗装耐候性鋼の異常さび部の補修塗装について実施可能な施工フローの一例を示した。今後は、山根橋の補修塗装部の防食機能の劣化の過程を追跡調査およびその調査結果の検討を行い、実施した本工法が十分な防食寿命を発揮するかどうかの確認は、補修塗膜端部からのさびの侵入を評価することが重要である。
- (d) 補修塗装後34ヶ月（2年10ヶ月）が経過後の補修塗膜の診断結果は、外観観察では、ふくれ、さび等の防食機能の劣化は見られない。また、塗膜厚値は、初期と変化な

く、塗膜のイオン透過抵抗値も、 $1G\Omega$ 以上の高抵抗を示し、良好な塗膜が維持されていることが示唆された。

8. 2 今後の展望とその課題

(1) 無塗装耐候性鋼橋梁の評価法

無塗装耐候性鋼橋梁の評価法は、イオン透過抵抗法を評価ツールとして、今後もデータを蓄積していくことで、イオン透過抵抗法から劣化・腐食のイメージパターンが得られる。この劣化・腐食イメージパターンを解析することで、補修の最適時期の推定が可能となると考える。ただし、この補修の最適時期推定を可能にするためには、各種環境条件でのデータ収集が必要である。

(2) 無塗装耐候性鋼橋梁の簡易補修工法

無塗装耐候性鋼の防食補修法としては、本研究で示した防食補修法を適用することが最善であると考えている。その一方で、腐食評価後、直ちに防食補修法の適用が困難な場合、すなわち、予算的な措置が早期に付かない場合等が想定できる。このような場合の簡易的な補修工法として、グラインダーによるさび除去が腐食を抑制することから、一時的な延命法として適用できる可能性が得られた。ただし、本研究での検証試験は、試験片による加速試験結果であるため、実際の無塗装耐候性鋼橋梁での試験施工データを収集する必要がある。

(3) 無塗装耐候性鋼橋梁の防食補修塗装

本研究で提案した無塗装耐候性鋼橋梁の防食補修塗装施工フローを適用し基準化することで、今まで、独自仕様で施工された補修塗装部で発生する早期欠陥が生じるケースはなくなると考えられる。ただし、水洗水の回収・処理法についての検討やコスト面の改善が必要であろう。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、研究の着手から本論文を取りまとめる過程で、終始変わらぬ懇切丁寧なご指導をいただきました山口大学大学院理工学研究科 麻生稔彦教授に、心から感謝の意を表しますとともに、厚くお礼申し上げます。麻生稔彦教授には、中国地区耐候性鋼橋梁研究会や各種学会活動を通じて、鋼構造物の維持管理に関する研究開発の重要性や専門分野以外の技術交流の必要性、研究者としての心得など、研究を遂行する上で基本的かつ最も重要な事項をご指導いただきました。また、会社業務と研究生生活との両立を送る中で、両立がおぼつかない私に辛抱強く付き合ってください、いく度も励ましていただことに、重ねて感謝申し上げます。

論文をまとめるにあたり、ご多忙な公務中にもかかわらず、有益なご教授を頂きました山口大学大学院理工学研究科 進士正人教授、中村秀明教授、中山雅晴教授、渡邊学歩准教授に、深く感謝いたします。

研究生生活で山口大学にうかがう際、いつも真摯に、親切に接していただいた山口大学大学院麻生研究室の学生諸氏に、深く感謝いたします。

論文をまとめるための共同研究をする機会を与えて頂き、現場から得られる知識の重要性と、この知識を言語化する必要性について熱心にご指導いただいた松江工業高等専門学校 大屋誠准教授、武邊勝道准教授、広瀬望准教授に、深く感謝いたします。特に、耐候性鋼橋梁で生じた腐食原因の究明や今後の耐候性鋼の維持管理に関する議論にお付き合いいただき、非常に有意義な議論を重ねられたことに改めて深く感謝いたします。

学位取得するにあたり、背中をおしていただいた元(独)土木研究所 守屋進氏、元(関西ペイント㈱) 中野正氏、関西ペイント㈱ 浜村寿弘部長、新日鐵住金㈱ 楠隆氏、林公隆主幹研究員、清水開悟主幹、田中睦人室長、藤井康盛次長、本間宏二室長、松岡和巳上席研究員、東北大学大学院 武藤泉准教授、長岡技術科学大学 岩崎英治教授、大日コンサルタント㈱ 坂井田実部長、小松シヤリング㈱ 竹澤博社長、元新日鐵住金㈱(現日鉄住金防蝕㈱) 技術開発部長) 紀平寛上席研究員に深く感謝いたします。特に、紀平寛上席研究員との出会いは、研究開発を始めるきっかけとなり、研究に向かう姿勢など多くのことをご指導いただき、ここに感謝の意を表します。

研究を進めるにあたり、共同研究者としてご協力いただいた新日鐵住金㈱ 長澤慎主任研究員、大日本塗料㈱ 里隆幸取締役執行役員、岩瀬嘉之部長、松本剛司チームリーダー、

為信一郎グループ長，元大日本塗料㈱ 永井昌憲氏，日本ペイント㈱ 藤城正樹係長，関西ペイント㈱ 後藤宏明課長，中国塗料㈱ 斉藤誠主管，神東塗料㈱ 内藤義巳部長，木更津工業高等専門学校 佐藤恒明副校長に，心から感謝の意を表します。

山口大学大学院博士課程の先輩にあたります松崎靖彦氏（㈱ウエスコ），後藤悟史氏（宇部興産機械㈱）には，さまざまな助言を賜り，心より感謝の意を表します。また，耐候性鋼橋梁の現場調査の師である㈱四電技術コンサルタント 三浦正純次長，元住友金属テクノロジー㈱ 原修一氏には，心より感謝の意を表します。

そして，社会人ドクターとして山口大学大学院への入学を許し，ご支援いただいた日鉄住金防蝕㈱ 赤崎宏雄社長，相賀武英取締役，安藤豊男顧問，元日鉄住金防蝕㈱ 宮嶋義洋部長をはじめとする技術開発部の諸氏に，心より謝意を表すとともに，社の皆様に，厚くお礼申し上げます。

最後に，私の社会人ドクター生活を暖かく応援してくれた両親と妻子（妻：佳代，長女：悠）をはじめとする家族に，感謝の意を表します。
