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

今井 篤実¹・大屋 誠²・武邊 勝道³・麻生 稔彦⁴

¹正会員 日鉄住金防蝕株式会社 技術部開発試験グループ (〒299-1141 千葉県君津市君津1)

E-mail: imai.atsumi@acc.nssmc.com

²正会員 松江工業高等専門学校准教授 環境・建設工学科 (〒690-8518 島根県松江市西生馬町14-4)

E-mail: ohya@matsue-ct.jp

³正会員 松江工業高等専門学校准教授 環境・建設工学科 (〒690-8518 島根県松江市西生馬町14-4)

E-mail: takebe@matsue-ct.jp

⁴正会員 山口大学大学院教授 理工学研究科社会建設工学専攻 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

E-mail: aso@yamaguchi-u.ac.jp

さび安定化補助処理を施した耐候性鋼橋梁の表面状態では、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、専門とする熟練者の判定が必要な実情にある。既往の評価法は外観評価を主体としたものなので、評価者の熟練度によりバラツキも生じている。本報では、既に裸使用材の耐候性鋼橋梁への定量的調査に適用しているイオン透過抵抗法を併用したさび安定化補助処理材の表面状態評価法を検討した。

Key Words : *weathering steel, bridge, rust, surface treatment, degradation, evaluation, ion transfer resistance method*

1. はじめに

日本において、耐候性鋼材が橋梁に適用され始めてからすでに 40 年以上が経過した。耐候性鋼橋梁においては、適切な環境下で、良好な状態にあれば、腐食速度の低下をもたらす保護性さびが形成され、ライフサイクルコストの縮減が期待される¹⁾。しかしながら、耐候性鋼橋梁は、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。

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。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、詳細調査を行う。詳細調査は、対応措置(経過観察や補修設計)の検討に必要なデータを得るために行う

ものである。現在の詳細調査では、主に外観評価が用いられているが、セロファンテープ試験、さび厚測定、残存板厚測定、電位測定、イオン透過抵抗測定を併用することにより、さびの状態をより正確に評価できる。これらにより官能検査である外観評価の個人差を縮減することができる。

耐候性鋼橋梁に用いられている JIS 耐候性鋼材には、使用条件により 2 種類の鋼材が規格化されており、塗装して使用する P タイプと無塗装で使用する W タイプの仕様がある。無塗装耐候性鋼橋梁には、この W タイプの鋼材を素地のまま使用する場合(以下、裸使用材と呼ぶ)と、さび安定化補助処理を施して使用する場合(以下、さび安定化補助処理材と呼ぶ)とに分類される。著者らは、裸使用材の異常さびの検知や詳細補修設計の検討をするための詳細調査として、評点付けしたさび外観評価法¹⁾と併用して、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評価区分する方法である。さび安定化補助処理材の評価では、外観評価基準²⁾⁹⁾を用い

(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-1 さび安定化補助処理を施した耐候性鋼橋梁の外観例

表-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),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	< 1000
			2 外観粒径5~25mm程度のうろこ状さび ¹⁾		2-x	2-y	2-z	
		要観察	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
			層状さび		1-x	1-y	1-z	
			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)	
	異常	1						

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。

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外観評価基準だけで判定するには、観察者が十分に熟練していることが求められる¹⁰⁾。熟練度の低い者が評価するとバラツキが生ずるので、定量的方法の併用が望まれる。そこで本報では、既に裸使用材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材への適用を検討した。併せて、現状のさび安定化補助処理材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することにした。

2. さび安定化補助処理を施した耐候性鋼橋梁の表面状態の評価

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おり、塗り替えは行わないのが標準とされている。その結果、経年により外観に変化が生ずる。さび安定化補助処理を施した耐候性鋼橋梁の処理被膜が不均一な色むらを生じている例を写真-1(a)に、処理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-1(b)に示す。さび安定化補助処理材は、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¹⁾とする。さび安定化補助処理材は、保護性さび形成を補助する P 機能型さび安定化補助処理材（以下、P 処理材と呼ぶ）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 機能型さび安定化補助処理材（以下、P+T 処理材と呼ぶ）に分類される²⁾。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。樹脂被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さび安定化補助処理材は、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²⁾。現在用いられているさび安定化補助処理材は、ごく一部の例外を除き、ほとんどが P+T 処理材と言える。

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⁾」を表-1に示す。裸使用材の外観評価基準を基本として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材の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、処理被膜の残留も考慮して裸使用材の目安に200μmを加算する。正しく判定を行うためには、裸使用材の判定目安である5段階評価の参考写真²⁾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。

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、処理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。耐候性鋼の腐食状況評価は、調査員の熟練度で左右されない方法で行われるのが好ましい。さび安定化補助処理材の劣化状態モードに左右されず、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。

2. 前処理、測定方法の検討

(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-2(a)、さびの堆積の例を写真-2(b)に、塵埃の堆積状況の例を写真-2(c)にそれぞれ示す。写真-2(a)では処理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-2(b)では防食機能の劣化

(a) 浮き被膜

(b) さびの堆積

(c) 塵埃の堆積

写真-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、さび堆積および塵埃堆積の状況の例

により生じた処理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-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、さび、および塵埃の堆積物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、さび安定化補助処理被膜の防食機能の劣化が進み、浮き被膜が多く発生してい

表-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)

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-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-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-2に、各前処理のイオン透過抵抗測定結果を図-3に示す。なお、図-1、図-2、図-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-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点は変化しているが、これは浮きさび・被膜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-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669μmは要観察状態を示すさび、最大値1,114μm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205μm、最大値348μmと、ともに正常なさびと評価される。ヘラ処理後も、平均値195μm、最大値318μm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のさび・被膜厚値を正確に測定するためには、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

図-1 各前処理の外観と外観評点

図-2 各前処理のさび・被膜厚値測定結果

図-3 各前処理のイオン透過抵抗測定結果

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、それを除去しても処理被膜は固着さび上に付着しているのが一般的であるため、加算は合理的である。実際には処理被膜が浮いているところと、固着さび上に付着しているところは混在しており、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処理材を用いた耐候性鋼橋梁のイオン透過抵抗値は、図-3より、前処理なし、刷毛処理後、へら処理後とを比較して、若干のバ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の有無に影響されにくく、浮き被膜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。

イオン透過抵抗値とさび・被膜厚値の関係からさび・被膜の状態を評価区分するイオン透過抵抗法^{4),5),6),7),8)}を適用する場合は、さび・被膜厚値を測定する必要がある。このことから、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には、外観評価と同様に、浮き被膜、さびの堆積、および塵埃の堆積物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。

(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を用いて診断した結果、さび・被膜厚値は約 $100\mu\text{m}$ 、イオン透過抵抗値は $1\text{k}\Omega$ 以上で保護性さびのI4領域にあるとの知見^{2),11)}が報告されている。さび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を用いて診断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

(a) 層状剥離さび除去前

(b) 層状剥離さび除去後

図-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

は、十分に熟練している観察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¹²⁾。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の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に示す。層状剥離さびの除去には、ハンマーやへらを用いた。図-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 $2,500\mu\text{m}$ 、イオン透過抵抗値は $623\text{k}\Omega$ を示した。これらの値を、そのままイオン透過抵抗法の評価区分図

表-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 ¹⁶⁾	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 ¹⁷⁾	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-5 新潟県西蒲原地区橋梁におけるイオン透過抵抗法
評価結果 (図中の(a)~(e)は写真-3(a)~(e)と対応)

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(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、イオン透過抵抗法の評価区分図にそのまま当てはめると、未成長さび・被膜(A)のI-5領域と診断される。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診断結果がI-1領域からI-5領域と、大きく異なってしまう。

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を表すパラメータとしてそのまま採用するのがよい。層状剥離さび除去前

(a) 被膜変退色

(b) 被膜に点さび発生

(c) 保護性さびに置き換わりつつある状態

(d) 要観察状態を示すさび(A) (うろこ状さび)

(e) 異常を示すさび(層状剥離さび)

写真-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-5(a)~(e)と対応)

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^{13, 14)}そのものの抵抗値を計測してしまう。このため、図-4(a)の測定結果では、保護性さびの示す抵抗値(1k Ω 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、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。

3. 既設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-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、301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。

(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評価結果を図-5に示す。また、図中の(a)~(e)は、表面状態の外観を示す写真-3(a)~(e)と対応している。図-5と写真-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-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材のイオン透過抵抗法におけるI評点区分を行った。I評点区分判定は、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、裸使用材のそれぞれに200 μm を加えてある。

図-5の(a)、写真-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るので、外観評点Bとした。図-5の(b)、写真-3(b)は、さび・被膜厚値76 μm 、イ

図-6 北海道室蘭地区橋梁⁹⁾におけるイオン透過抵抗法評価結果

図-7 富山県氷見地区橋梁におけるイオン透過抵抗法評価結果

図-8 鳥取県泊地区橋梁¹⁷⁾におけるイオン透過抵抗法評価結果

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-5の(c)、写真-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

図-9 島根県松江地区橋梁¹⁸⁾におけるイオン透過抵抗法評価結果

(a) 調査橋梁の地区別評価結果の比較

図-10 島根県益田地区橋梁におけるイオン透過抵抗法評価結果

(b) 調査橋梁の部位別評価結果の比較

図-11 6地区橋梁におけるイオン透過抵抗法評価結果比較

で、外観評点4-zとした。図-5の(d), 写真-3(d)は、さび・被膜厚値872 μ m, 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-5の(e), 写真-3(e)は、さび・被膜厚値1,117 μ m, 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-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¹⁵⁾や守屋ら¹⁶⁾の報告から、実際には P+T 処理材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 12~20 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・下面に多く発生していた。

(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評価結果を図-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。

(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評価結果を図-7に示す。当該地区橋梁の評価結果より、経年数18~20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) 鳥取県泊地区

鳥取県泊地区橋梁¹⁷⁾におけるイオン透過抵抗法評価結果を図-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)、要観察状態を示すさび(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)、要観察状態を示すさび(B)、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。

(5) 島根県松江地区

島根県松江地区橋梁¹⁸⁾におけるイオン透過抵抗法評価結果を図-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IMQ以下となるのはP+T処理材として見た場合に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。

(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評価結果を図-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3%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1%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)、および異常を示すさびは、合わせて、測定点の16%を占

め、部位的には下フランジ上面・下面に多く発生していた。

(7) 6地区橋梁のイオン透過抵抗法の評価結果比較

調査橋梁の地区別評価結果の比較を図-11(a)、部位別評価結果の比較を図-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% (I-5領域+I-4領域+I-3領域) が正常な表面状態にあり、測定点の13% (I-2領域+I-2'領域+I-1領域) が正常でない表面状態であった。

部位別の評価結果(図-11(b))より、全ウェブ面の93% (I-5領域+I-4領域+I-3領域) が正常な表面状態にあり、測定点の7% (I-2領域+I-2'領域+I-1領域) が正常でない表面状態であると判定された。また、全下フランジ上面の68% (I-4領域+I-3領域) が正常な表面状態にあり、測定点の32% (I-2領域+I-2'領域+I-1領域) が正常でない表面状態であると判定された。さらに、全下フランジ下面の93% (I-4領域+I-3領域) が正常な表面状態にあり、測定点の7% (I-2領域+I-2'領域) が正常でない表面状態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。

4. 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の評価結果から得られた図-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-11に示すイオン透過抵抗法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、すべて外観評価点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-11にプロットされた各測定点であると解釈される。すなわち、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

(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-12 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

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)へ向う経路が想定できる。

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-12に示した。裸使用材の場合、図-12(a)の(1)および(2)の経路で、保護性さび、あるいは要観察状態を示すさび(A), 異常を示すさびに至る¹⁹⁾と考へてられている。これに対しP+T処理材における防食機能劣化・腐食の進行経路は、図-12(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)があることがわかった。

この進行経路の考え方で、例えば、図-7の富山県氷見地区橋梁と図-8の鳥取県泊地区橋梁を比較すると、富山県氷見地区橋梁は、経年数18~20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(4)上にある測定点が少なく、異常さびを示すさびへの移行する速度も遅いことがわかる。これに対して、鳥取県泊地区橋梁は、経年数9年で経路(4)上にある測定点が多く、特定の部位ではあるが異常さびを示すさびへの移行する速度が速いことがわかる。

以上の防食機能劣化・腐食の進行経路イメージは、6地区の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した評価結果の経年数からの推察である。

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²⁰⁾)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。

5. 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で評価した。得られた知見を以下に示す。

- (1) P+T処理材における防食機能劣化・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)があると解析できた。
- (2) 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物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。
- (3) 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。

- (4) 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% (I-5領域+I-4領域+I-3領域) が正常な表面状態にあり、測定点の13% (I-2領域+I-2' 領域+I-1領域) が正常でない表面状態にあった。
- (5) 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。

謝辞：新潟県西蒲原地区、富山県氷見地区のさび安定化補助処理を施した耐候性鋼橋梁調査結果をご提供戴いた新日鐵住金株式会社に深く感謝いたします。また、資料整理にご協力いただいた佐野大樹氏（日鉄住金防蝕株式会社）に深謝する。

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, 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, 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，麻生捻彦：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) 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予稿集，pp.53-56, 1997.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 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.
- 15) 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.
- 16) 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 年間暴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, 2010.
- 17) 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，pp.345-346, 2010.
- 18) 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.
- 19) 麻生俊彦，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.
- 20) 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.

(2012.6.1 受付)

EVALUATION FOR THE SURFACE STATE OF WEATHERING STEEL BRIDGES WITH SUPPLEMENTAL RUST CONTROLLING SURFACE TREATMENT

Atsumi IMAI, Makoto OHYA, Masamichi TAKEBE and Toshihiko ASO

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 order to improve such situation, the applicability of ion transfer resistance method to surface treated weathering steel bridges is verified. It is confirmed that the method based on ion transfer resistance measurement is very useful to evaluate the degradation stages of weathering steel bridges which are coated with supplemental rust controlling film.