

耐候性鋼橋の適用環境および外観性状によるさび状態の評価に関する研究

岡田 紗也加¹・玉越 隆史¹

¹国土技術政策総合研究所 道路構造物研究部 橋梁研究室 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1)

道路橋への耐候性鋼材の適用環境評価指標には、環境因子による影響を加味しながら精緻に総合的に判断できることが求められている。また、供用後は、条件によって千差万別な外観性状を呈するため、保護性さびや、異常なさび等の区別がつきにくいことも多い。

本研究では、架橋位置固有の環境条件と鋼材の腐食特性の関連付け手法の確立を目的として鋼球暴露試験を行い、適用環境評価の検討を行った。また、耐候性鋼橋の診断がよりの確なものとなるよう、耐候性鋼橋に関する既往の様々な表面性状の事例や実橋のデータを収集・分析し、一般的に見られることの多いさび状態の外観性状について体系的にとりまとめた。

キーワード 耐候性鋼橋, 腐食減耗量, 適用環境, さび状態の外観性状, 写真集

1. はじめに

鋼道路橋の主な損傷は、鋼材の腐食である。一般国道や主要地方道、都道府県道の橋長15m以上の橋を対象とした架替実態調査では、腐食が鋼橋上部工の損傷による架替理由の約半分を占めている¹⁾ (図-1)。鋼橋の防食工法の1つに、耐候性鋼材を使用する方法がある。耐候性鋼材とは、鋼材に適量の合金元素 (Cu, P, Cr, Niなど) を添加することで、鋼材表面に連続的に生成された緻密なさび層²⁾ (以下、「保護性さび」という (図-2)) を生成させ、腐食の原因となる酸素や水から鋼材表面を保護し、さびの進展を制御するものである。しかし耐候性鋼橋は、適度に乾湿が繰り返され、かつ大気中の塩分量が少ないなど、適切な環境条件の下でなければ保護性さびの生成・維持ができないため、道路橋示方書では、大気中に含まれる飛来塩分量に応じて耐候性鋼材が無塗装で使用できる地域が示されている。

耐候性鋼材では、保護性さびが形成されても完全に腐食の進行が止まるわけではない。また、一旦保護性さびが形成された後も、水分や塩分の環境が変化して適当なものでなくなると保護性さびが失われて異常に腐食が進行する。そのため、供用後も適切な頻度で点検を行い、架設後の環境条件の変化にも留意する必要がある。そして、保護性さびの生成や維持が困難と見込まれた場合には、塗装を行うなどの適切な防食対策が行われる必要がある³⁾。以上のように、防食方法を選定する段階のみならず、保護性さびが形成された後も、架橋環境が耐候性鋼材に相当であるか否か見極める必要がある。

しかし、現地における架橋環境について耐候性鋼材に

適当な環境であるのかどうかを見極めるための塩分等の環境条件を計測する手法は限られている。特に架橋後に、短期間で耐候性鋼材の適用環境の適正を計測できる統一的な手法は確立していない。また架橋後に所定の保護性さびが形成しているのか、あるいは異常腐食が生じつつあり耐候性が期待出来ない状態なのかどうかは表面のさびの外観性状から判断することとなるが、さびの性状には極めて多くの色調や凹凸などのパターンがあり、これを的確に判断することが点検の際の課題となっている。

本研究は、これらの課題に着目して架橋現場において簡便かつ正確に環境条件を把握できる手法と、多様な性状を呈する耐候性鋼材の外観情報から実務者が的確にさびの状態を判断できるための支援ツールの開発を行ったものである。

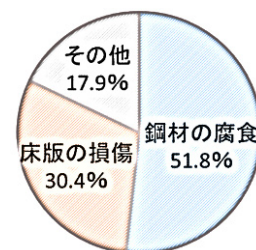


図-1 鋼橋上部工の損傷による架替理由

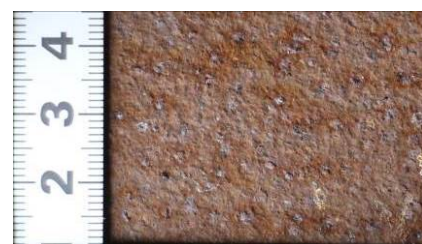


図-2 保護性さびの例 (単位: cm)

2. 新たな適用環境評価手法の開発

現在、道路橋に耐候性鋼材を用いる場合、道路橋示方書に示された海岸線からの距離を基本とした適用条件を参考に適用可否の判断が行われることが一般的である。

しかし、実際の架橋地点の環境は、周辺地形の影響や隣接構造物の影響によっても大きく左右される。また複雑に部材が組み合わされる橋では架橋後に橋そのものの存在や形状などによって部材や位置毎にも濡れ時間、風向風速、湿度、日射等の腐食に関わる要因は複雑に異なってくる。そのため、例えば、架設後に想定外の著しい腐食の進行により、耐候性鋼材の橋梁が落橋に至った事例³⁾もある。これらは、架橋地点や橋の位置毎の局地的な環境が、架橋前に十分に把握しきれなかったことも一因であると考えられる。

そこで本研究では、実際の架橋地点の環境や架橋後の橋梁の様々な部位の詳細な環境条件の違いを含めてできるだけ正確にかつ短期間で計測できることを意図して、球状の鋼製暴露供試体を設置して、そのさびデータを分析する手法について検討を行った。

(1) 鋼球式暴露試験法

鋼球式暴露試験法は、耐候性鋼材 (JIS G 3114 SMA) を直径45~50mmの球状に加工した鋼球供試体 (図-3) を、ナイロン製またはアクリル樹脂製の棒と、簡易な金具等を用いて現地に設置して、一定期間暴露し、供試体

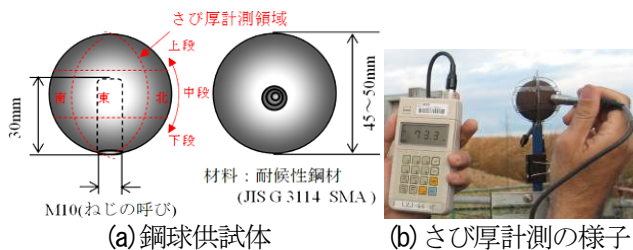


図-3 鋼球供試体およびさび厚計測の詳細

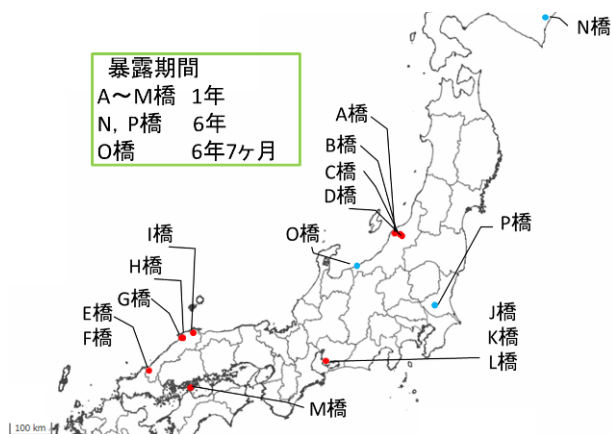


図-4 鋼球供試体設置箇所

(地図は国土地理院HP

(<http://maps.gsi.go.jp/#5/35.362222/138.731389>) より)

表面のさびの生成状況から設置位置の局地的な腐食環境を評価しようというものである。既往の代表的な環境評価法である、ポリタンクを現地に年単位で設置して飛来塩分を捕集する方法 (土研式)⁴⁾では、捕集口が一方にしかなく塩分の飛来方向との関係が単独では評価出来ないこと、装置が大きかりでかつ長期に設置する必要があるなどの課題があった。またガーゼ式や鋼製の薄板を部材等に貼付するワッペン式⁵⁾は比較的簡便に設置できるものの評価面の設置方向の影響があることや被貼付部材の存在そのものの、影響を大きく受けるという課題があった。提案する方法は鋼球供試体を被設置部材から離隔をとって評価面を設けることで被設置部材の影響が小さくできること、および全方向からの飛来塩分の影響を同時かつ相対比較できるよう球体を用いたことに特徴がある。

鋼球は、表面を上下方向に3段の領域と4方位の分割の組み合わせによる12領域に区分し、各領域のさび性状の観察とさび厚の計測 (電磁膜厚計) を一定期間行い、最終的に鋼球を回収して実験室レベルで定量分析を行ったさび量とともに考察する。腐食量の推定は、スクレーパ、又はカッターナイフ等を用いて鋼球表面の生成さびを極力除去し、塩酸等を含有した除錆溶液への浸漬と水道水での洗浄を2、3回繰り返した後、除錆溶液への浸漬とナイロンブラシを用いた水洗ブラッシング洗浄を繰り返し実施してさび除去前後の鋼球の重量変化から腐食減耗量として、次式により求める。

$$\Delta t = \frac{W_1 - W_2}{0.00786 A_s} \quad (1)$$

ここに、 Δt : 腐食減耗量(mm)

W_1 : 試験片初期重量(g)

W_2 : 除錆終了後の試験片重量(g)

A_s : 試験片の表面積(ねじ穴開口部を控除)(mm²)

(2) 鋼球の特性の検討

さび厚計測結果の特徴および、実橋における腐食傾向、鋼球供試体設置箇所の周辺環境とを対比することで、腐食因子の検討を行った。

測定場所は、既設の耐候性鋼橋があり、かつ比較的飛来塩分量が多いと考えられる、海岸線からの距離が比較的近い箇所を基本とし、ワッペン式暴露試験等の既往の調査⁹⁾が行われている箇所を優先して、地域区分ごとの暴露試験場所を選定し、暴露試験を行った。暴露試験の場所および、暴露期間を図-4に示す。鋼球暴露試験法による耐候性鋼材の適用評価が、1年間の短期の暴露期間で評価ができるかを検討するため、全国各地に鋼球を設置し、長期暴露試験を行った。

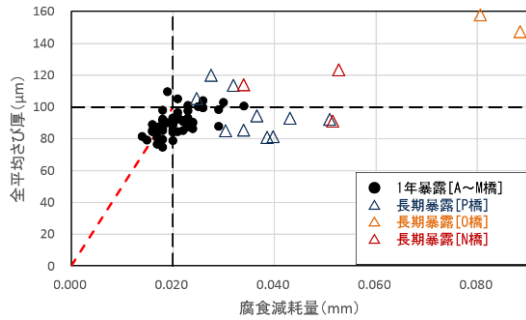


図-5 腐食減耗量と試験体12箇所のさび厚平均の関係

結果と1年間の暴露試験結果を対比し、分析を行った。鋼球暴露試験における腐食減耗量と、試験体12箇所のさび厚を平均したものをプロットしたグラフを、図-5に示す。

ワッペン試験片による1年間の暴露試験結果⁹⁾では、さび厚100 μm に対し腐食減耗量0.02mmで相関していることが示されている。鋼球暴露試験においても、ワッペン式暴露試験と同様に、全平均さび厚100 μm に対して腐食減耗量0.02mmが得られることが分かる。なお、全平均さび厚は100 μm 程度以上には増えない傾向にあり、これは供試体に直接受ける雨水によりさびが洗い流されていることが原因であると考えられる。1年以上の長期暴露試験結果は、全平均さび厚が81.0~158 μm と広い範囲で分布し、腐食減耗量は0.025~0.088mmとさらに広い範囲で分布している。また、1年以上の暴露試験では、平均さび厚が100 μm を大きく超過することがある。

これらのことから、さびの進行が大きく全平均さび厚が100 μm を超過する場合、平均さび厚よりも腐食減耗量で環境評価を行うのが良いと考えられる。反対に、全平均さび厚が100 μm を超過しない場合は、さび厚で環境評価を行うことができる可能性がある。これらのことから、1年間の短期暴露期間であっても、鋼球暴露試験法による耐候性鋼材の適用環境の評価が可能であると考えられる。

(3)腐食因子の検討

1年間の暴露試験結果において、腐食減耗量とさび厚の関係には線形の相関がみられることから、方向別のさび厚から腐食減耗量を推定することが可能と考えられる。鋼球供試体の上下方向のさび厚分布を図-6に示す。上部より中部の方がさび厚が大きく、中部より下部の方がさび厚が大きい傾向がみられた。

方向別によるさび厚の差が、鋼球暴露試験体の固有の特性に起因するものであるか、方向別による耐候性鋼材の局地的な腐食環境特性が反映されているのであるかを検証するため、実橋の腐食状況と暴露試験結果を比較し、試験結果のさび厚の差の原因推定および、実橋における腐食因子の推定を行う。

図-7に示すように、B橋のウェブ外側においては保護

性さびが生成されていたが、下フランジの下側において、うろこ状の粒子の粗いさびが生成されていた。B橋周辺には、図-8に示すように、鋼球暴露供試体を設置した。暴露期間は1年間である。

図-9に、試験結果を示す。No.1, No.2の下段のさび厚は、上段・中段に比べ大きく出ており、B橋の腐食の傾

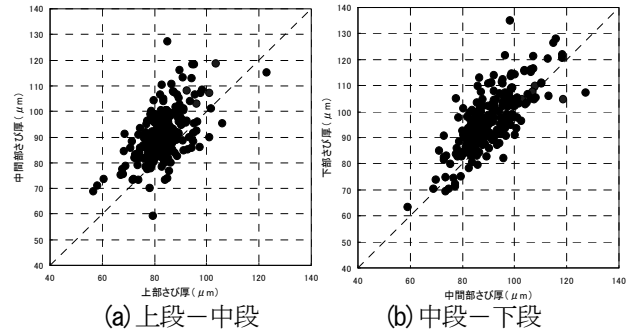


図-6 上下方向におけるさび厚の分布 (暴露期間1年)

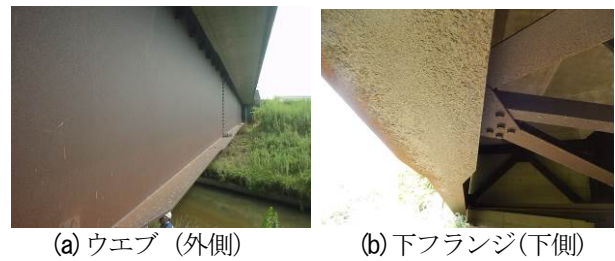


図-7 構造形式とさびの発生状況 (B橋)

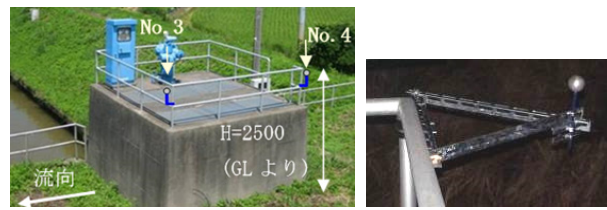
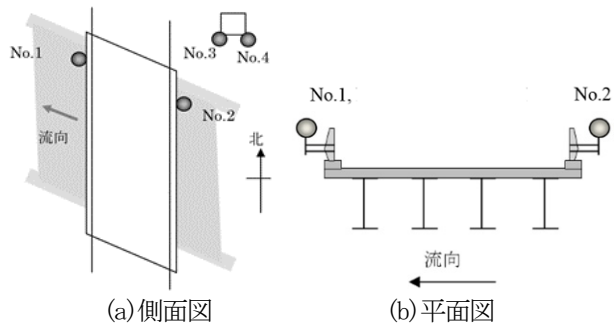


図-8 鋼球供試体設置位置 (B橋)

向と相関が見られる。一方で、B橋より離れ、鋼球No.3, No.4の下段のさび厚は、上段・中段のさび厚に比べ、方角によっては小さいところもある。

この原因として、No.1, No.2の供試体は、供試体下を流れる河川から湿気が発生しやすく、更に河川の土手に囲まれ、凹んだ土地であるため、下側に湿気がこもりやすいことが考えられる。一方で、No.3, No.4供試体設置位置は、河川から離れており、周辺は田畑が広がる平坦な土地であるため、通風性が良いと考えられる。濡れた鋼球が乾く過程においては、図-10に示すように、風向きによる影響を受けるものの、一般的には重力による水膜の厚さの違いによる影響や日射の影響が支配的となるため、上部から下部に向かって乾くと考えられる。このため、上部ほど濡れ時間が短くなり、結果として腐食は少ないと推定される。また、鋼球の上部は雨粒が直接当たるため、下部に比べるとさびが除去され易いと言える。このため、鋼球の下部に比べて上部のさび厚が薄くなることが想定される。これらの事柄が原因で、上下方向のさび厚の結果に差が出たと推定できる。

以上のことから、方向別による局地的な腐食環境の差を鋼球暴露試験法などで把握できると考えられ、簡易に耐候性鋼橋の腐食環境特性の推定ができると考えられる。

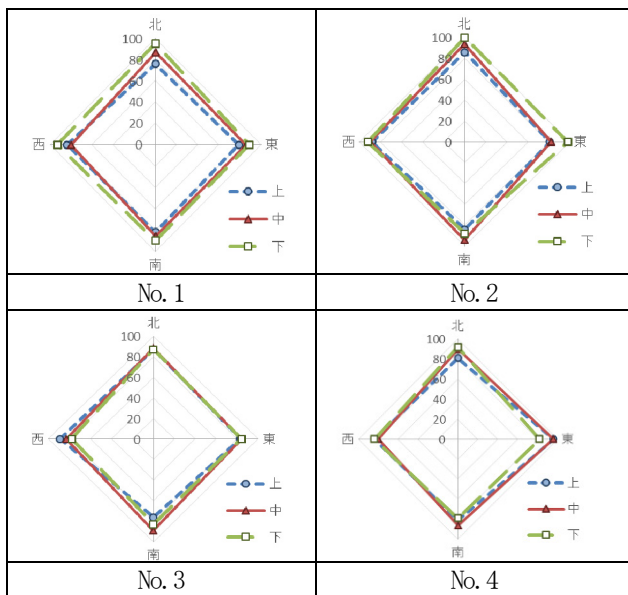
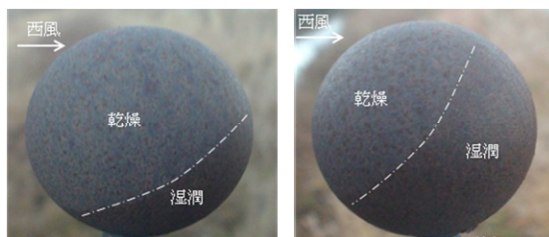


図-9 B橋暴露試験結果



(a) No. 1 (b) No. 2

図-10 鋼球の乾燥・湿潤の部位および風向き

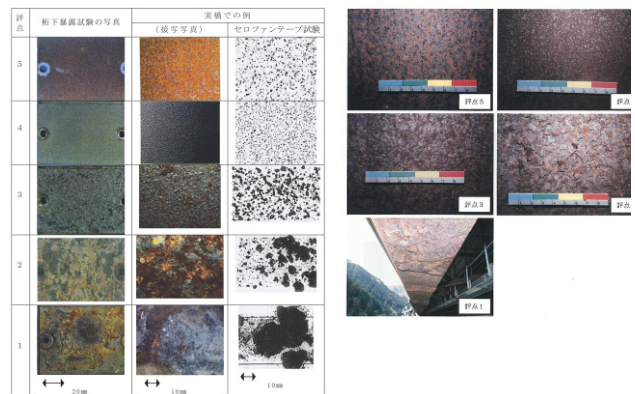
3. 外観性状によるさび状態評価支援ツールの開発

耐候性鋼橋の診断に関する、既往の文献の例を図-11に示す。鋼道路橋防食便覧には、さびの分類について、実橋におけるさびの写真による例と5段階に分類したさび外観評点の見本⁴⁾が示されている。一方、(一社)日本鋼構造協会では、耐候性鋼材の板厚減少量の進行速度を予測しながらさびの状態を評価するのが良いとしている。板厚減少量の予測には、環境や腐食状況によってさびの外観が大きく変化することを考慮するのが良いとされ⁶⁾、JSSCテクニカルレポート No.86⁶⁾には、各外観評点における代表的なさび外観(架設後10年以上経過した橋梁での事例)が示されている。

ここで、既往の耐候性鋼橋の代表的な表面性状の例⁸⁾(図-12)を、図-11から、同じ写真見本を見つけてさびの評価が可能であるかどうかを検討する。

(a)は、支承に著しい層状に剥離したさびが生じた例、(b)は、主桁にうろこ状のさびが生じた事例であり、舗装の排水設備からの排水跡が見られる。また、(a)は、橙、茶色、褐色系、黒色の多様な色調で層状に剥離しており、(b)は、白みがかかった茶色の排水跡に、うろこ状のさびが生成している。

いずれの事例も、図-11(a)あるいは(b)に示されるさびの写真見本以外の、様々な外観性状のさびが見受けられた。さびの外観性状として、さびの大きさのほか、凹凸を含めた立体的形状や色調の違いがあり、これらの組み合わせによって、多くの種類のさびが見られた。また、さ



(a) 鋼道路橋防食便覧

(b) JSSCテクニカルレポート No.86

図-11 耐候性鋼橋の診断に関する既往の文献



(a) 支承周辺

(b) 主桁の下フランジ

図-12 耐候性鋼橋の代表的な表面性状の事例⁸⁾

びは橋ごと、あるいは部材ごとに一様ではなく、各種類のさびが生成している範囲は異なった。さびの種類のほか、生成している部位、範囲などもさびの原因の推定には有効な情報となる可能性がある。

以上より、耐候性鋼橋の診断のためにさびの状態を的確に評価するには、図-11 (a)あるいは(b)に示される5種類の写真見本だけでは不十分な場合も多いと推測され、さびの平面形状のほか凹凸も考慮した立体形状と大きさ、および色調も組み合わせて正確に分類・評価した判定基準の確立の必要があると考えられる。また、耐候性鋼材の診断は、板厚減少量の進行速度を予測しながらさびの状態を評価するのが良いとされている。一方で、既往のさびの外観性状に関する参考図書には、様々なさびの状態を網羅し、今後のさびの進展状況に関する情報が掲載されたものがない。

そこで本研究では、耐候性鋼橋の診断を行う技術者とそれらの助言を受けて措置等の意思決定を行う道路管理者の双方に対して、診断や意思決定がよりの確なものとなるように、耐候性鋼橋のさびに関する既往の様々な表面性状の事例を収集・分析した。一般的に見られることの多いさび状態の外観性状について確立した方法によって画像化、および整理を行い、さびの外観性状の事例集として体系的にとりまとめた（以下、「さび事例集」という）。また、耐候性鋼橋の現状に関する正確な評価のために重要となる、鋼材表面に生成されるさびの大きさ、および凹凸を表現するため、カラーアナグリフ写真を作成した。また、さび本来の色調の再現性を高めるため、写真の色調の補正を行った。

(1) 評価の分類の検討

本研究では、診断する技術者がよりさびの進展の予測がしやすいものとなるよう、さびの評価の分類を、「保護性さび」、「保護性さび以外のさび」、「その他」に分類し、さらに、「保護性さび以外のさび」については、さびの進展の制御が期待できる可能性があるか否かで分類した。また、さびの進展の制御が期待できないものについては、腐食の主な原因・さびの形状で分類した。「その他」評価においては、耐候性鋼材を適切に診断する上で妨げとなり得る、鋼材表面に堆積した塵あいや鳥のフンの付着等の例を示した。

(2) 立体視できるさびの写真の作成

鋼材表面に生成されるさびの大きさ、および凹凸を表現するため、カラーアナグリフ写真を作成した。

アナグリフとは、立体的な映像を得るための方式の一つである。アナグリフ加工した写真や図形を、カラーフィルタのついた専用メガネを使って閲覧することで、立体視が可能となる（図-14）。本研究では、カラーアナグリフ写真に関する閲覧条件は、図-15の通り設定した。

図-15に、さびのカラーアナグリフ写真を示す。カラ

ーフィルタのついた専用メガネで見ると、さびの凹凸が再現されていることが確認できる。また、異なる種類のさびのアナグリフ写真を比較することで、相互のさびの凹凸のちがいを確認することができる。以上より、耐候性鋼橋のさびの凹凸や大きさについて、カラーアナグリフ写真で体感できる可能性があることが示された。ただし、カラーアナグリフ写真は左右の色ちがいのカラーフィルタで閲覧することで凹凸を視覚的に把握する仕組みであることから、さび本来の色調を再現することが難しいことに留意する必要がある。

(3) さびの色調の再現性向上への取り組み

図-16に、実際の耐候性鋼橋の同じ位置における同じ状態のさびについて、日照条件が異なる写真を示す。日照条件を考慮せず、図-11 (a)あるいは図-11 (b)による外観評点を適用した場合、(a)を外観評点5、(b)を外観評点4と判断する可能性がある。図-13 (a)によると、外観評点5も4も板厚減少量は小さいものの、進行性の推定などを見誤る可能性がある。そのため、現場での点検時および写真等によるさびの記録時には、さび本来の色調を正確に把握すること、および記録の再現性が重要となる。そこで本研究では、さびの色調の再現性を高めるため、

評価	さびの状態(例) (表層さびの粒子の大きさと外観)	保護性さび	
		① さびの進展制御が期待できるさび	② さびの進展制御が期待できないさび
良い	5	1) さび粒子は細かいが、均一に付着する。 2) さびの色は、明るい色相で、むらがある。 3) 若いさびの状態。環境が非常に良い場合は長期間にわたりにこの状態が続く。 4) さび層の厚さは200μm程度未満である。 5) さびの平均外観粒径は1mm程度で幅が均一である。	① 保護性さび以外でのさび 保護性さびができる、できない両方の可能性あり ② さびの進展制御が期待できる、できない両方の可能性があるさび(標仕様で生成)
	4	1) さびの色は、暗褐色でむらがない。 2) 腐食速度は微小の領域に達している。 3) さび層の厚さは400μm程度未満である。	② さびの進展制御が期待できる、できない両方の可能性があるさび(表面処理耐利りの仕様で生成)
	3	1) さびの平均外観粒径は1~5mm程度である。 2) さびの色は、褐色~暗褐色でむらは少ない。 3) 腐食速度は微小の領域に達している。 4) さび層の厚さは400μm程度未満である。	さび進展の制御が期待できない
悪い	2	1) さびの平均外観粒径は5~25mm程度のうろこ状である 2) さびの色は、環境によって様々である。 3) さびが層状で厚い。割層がある。	③ さびの進展制御が期待できないさび-うろこ状さび(主に水分が原因)- ④ さびの進展制御が期待できないさび-コブ状さび(主に塩分が原因)-
	1	1) さびの色は、環境によって様々である。 2) さび層の厚さは800μm程度未満である。 3) さびの色は、環境によって様々である。 3) さび層の厚さは800μm程度を超える。	④ さびの進展制御が期待できないさび-層状剥離さび(主に水分が原因)- その他(汚れなど) ⑤ さび以外の汚れ(塵あい、鳥のフン)

(a) 鋼道路橋防食便覧 (b) 本研究
図-13 評価の分類の対比



図-14 カラーアナグリフ写真と専用メガネの例



○ カラーアナグリフ写真の尺度：実物大
図-15 設定したカラーアナグリフ写真の閲覧条件

色調の補正を行った。図-17 (a)に示す「Color Checker Passport (x-rite社製)®」(以下、「カラーチャート」という)を(b)のように、撮影したい対象のさびと同時に撮影し、カラーチャートの色調を元に画像処理ソフトを用いて、色調の補正を行った。なお、本研究では画像処理ソフトとして「Adobe photoshop CS6 (Adobe社製)®」および「ColorChecker Passport付属ソフト」を使用した。

図-16 (c)が、実際に色調を補正した例である。

(4) さび事例集のとりまとめ

実務者による耐候性鋼橋の診断が、よりの確なものとなるよう、さび事例集には、さび一事例に対して、様々な情報を掲載した。図-18に、さびの外観性状の事例集としてとりまとめた一例を示す。

3. (2)で検討したカラーアナグリフ写真に加え、さびの色調をより正確に把握できるように、近景写真を掲載した。また、さびの発生の方は橋や部材ごとに一様ではなく、さび生成している部位、範囲などもさびの原因の推定には有効な情報となる可能性があるため、中景写真を掲載したり、近景写真の撮影部位や橋梁形式についても、さび事例集にまとめた。さらに、さびを診断する際、併用して参考にすることが望ましいとされている⁷⁾、電磁膜厚計によるさび厚の測定、およびセロファンテープ試験による浮きさび等の採取に関する情報も掲載した。また、凍結防止剤の散布の頻度や離岸距離など、診断する上で重要な情報となり得る事柄もとりまとめた。

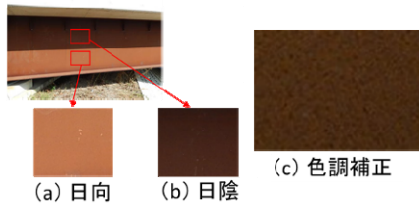


図-16 日照条件の違いによるさびの色調・色調補正の例



図-17 色調補正に使用した用具および撮影例

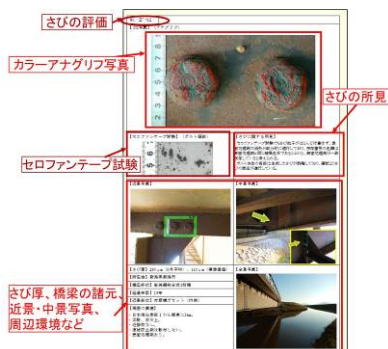


図-18 さびの外観性状の事例集の一例

4. まとめ

従来の耐候性鋼材の適用評価手法は、装置が大がかりでかつ長期に設置する必要があったり、評価面の設置方向の影響があることや被貼付部材の存在そのもの影響を大きく受けるという課題があった。これに対し、本研究で行った鋼球暴露試験法は、大がかりな装置を必要とせず、被設置部材から離隔をとって評価面を設けることで被設置部材の影響が小さくできること、および全方向からの環境因子による影響を同時かつ相対比較できる特徴がある。鋼球暴露試験を実施した結果、1年間暴露した供試体のさび厚と実橋の腐食状態に相関があったことから、方向別による腐食原因の特定が可能であると考えられる。なお、鋼球暴露試験法の特性を検討した結果、暴露した鋼球の全平均さび厚が100 μ mを超過しない場合は、さび厚で環境評価を行うのが、さびの厚さが100 μ mを超過する場合は腐食減耗量で環境評価を行うのが良いと考えられる。本検討結果から、データを蓄積することにより、簡易に架設候補地における耐候性鋼橋の腐食環境特性の推定が、高い精度で可能になると考えられる。

また、外観性状によるさび状態の評価に関するとりまとめについては、カラーアナグリフ写真を適用することで、耐候性鋼橋のさびの凹凸や大きさを体感できる可能性が示された。また、撮影環境による写真の色調の差が生じるという課題に対しては、撮影対象のさびとカラーチャートを同時に撮影し、画像処理ソフトで補正することで、さび本来の色調の再現性が高まり、耐候性鋼材の多様な外観性状をよりの確に表現できるものとなった。

今後の研究課題として、鋼球暴露試験による耐候性鋼橋の適用環境評価手法とさびの見本集とを組み合わせ、さびの評価と環境の評価両面からのより適切な維持管理手法の構築を進めていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 国土技術政策総合研究所：国土技術政策総合研究所資料第693号平成23年度道路構造物に関する基本データ集，2012.9
- 2) (公社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編，2012.3
- 3) 下里哲弘：辺野喜橋崩落に関する緊急報告会，2009.7
- 4) (公社) 日本道路協会：鋼道路橋防食便覧，2014.3
- 5) 国土技術政策総合研究所：国土技術政策総合研究所資料第777号 耐候性鋼橋の適用環境評価手法の高度化に関する研究 (I)-耐候性鋼材の適用環境評価手法に関する検討，2012.9
- 6) (社) 日本鋼構造協会：JSSC 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，2009.9
- 7) (社) 日本鋼構造協会：JSSC 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，2006.10
- 8) 国土技術政策総合研究所：国土技術政策総合研究所資料第748号 道路橋の定期点検に関する参考資料(2013年版)-橋梁損傷事例写真集，2013.9
- 9) 国土技術政策総合研究所：国土技術政策総合研究所資料第828号 耐候性鋼橋の外観性状によるさび状態の評価法に関する研究，2015.2