

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

佐藤雅之* 中野正則** 安波博道*** 市川和臣**** 中島和俊*****

1. はじめに

耐候性鋼材を用いた橋梁（耐候性鋼橋梁）は、塗替え塗装が原則不要であり、維持管理コストを低減することが可能であることから、既に多数供用されており、さび状態に関する様々な調査も実施されている。

そうした調査に基づき、裸仕様の耐候性鋼橋梁では、外観評価に基づく健全度評価や腐食の予測技術が確立されつつある。一方、さび安定化補助処理が施された耐候性鋼橋梁については、こぶ状さびが発生するなど、裸仕様の場合とは腐食の進行が異なるため、まだ十分に維持管理の方法が整備されているとはいえないのが実状である¹⁾。

今回、さび安定化補助処理が施された後、30年以上が経過してこぶ状さびが生じた橋梁について、現行提案されている評価法²⁾によって劣化状況を評価するとともに、今後の腐食進行を予測する手法を試行した事例を紹介する。

2. 橋梁の概要

写真-1に示す日和大橋（旧石巻河口橋）は昭和53年（1978年）に宮城県石巻市に建設され、全面にさび安定化補助処理（ウェザーコート処理）が施された無塗装の耐候性鋼橋梁である。

本橋梁は、旧北上川河口を跨ぐ15径間、全長716.6mの道路橋であり、1主箱桁（鋼床版）の中央径間部とその両側につながる4主钣桁（RC床版）の側径間部とから成る。側径間部についても建設時にはさび安定化補助処理が施されていたが、過去に補修塗装を実施している。一方、中央径間部（P6～P9間）については、建設時のさび安定化補助処理のままとなっている。



写真-1 日和大橋（中央径間部）

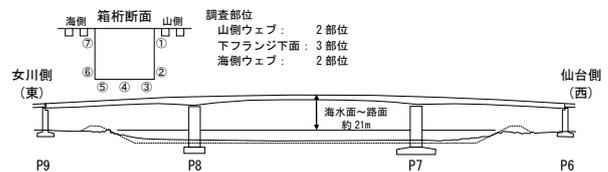


図-1 調査部位と計測項目

3. 調査の概要

調査は図-1に示す中央径間部の4基の橋脚上で行き、各橋脚で7部位（山側ウェブ2、下フランジ下面3、海側ウェブ2）を対象とした。

各部位において代表する1m×1mの範囲を選定して近接目視による外観評価をするとともに、さび厚（処理剤被膜が残留している部分は被膜厚）、残存板厚、付着塩分量の計測を行った。

4. 外観評価と腐食実態

4.1 外観評価基準の整理

近接目視から、以下のような知見が得られた。

- 1) 外観からは均一な微細粒子のさびに見えるが、実際には表層部に処理剤が残留している（グラインダー等で表面をケレンした際に粘着する）箇所が多く見られた。また、処理剤が残留していない状態では微細な（粒径1mm程度）均一さびは見られず、全ての部位で平均粒径5mm程度のさび状態となっていた。
- 2) うろこ状さび、層状さびは見られず、こぶ状さびが発生していた。また、こぶ状さびは径10mm～40mm程度まで様々な大きさのものが混在していた。
- 3) こぶ状さびは、処理剤被膜とは混在せず、平均粒径5mm程度のさびの中に分布していた。

Investigation of HIYORI OHASHI-bridge made of weathering steel with rust stabilizing surface treatment

表-1 耐候性鋼材のさび外観評価基準²⁾

さび・被膜の外観 (例)			処理被膜部のさび状況 (%: 1m ² 程度のさび面積率) 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	
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、裸仕様の目安に200μmを加算した。
 4. 被膜がなくなり全面がさびに置換した後は、裸仕様の基準にて評価し、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。

表-2 修正したさび外観評価基準

さび・処理剤被膜の外観 (区分)				外観が混在する場合の表現 1m ² 範囲の面積率 (%)			
外観	評価	さび厚 目安 μm	さび状態	写真 10cm × 10cm	x: 3% 以下	y: 30% 以下	z: 30% 以上
処理剤被膜部	A	膜厚 < 200 程度	処理剤被覆が変色なく残留する		AとBの混在 B-x B-y B-z (B-xとはBがAの中に3%以下の割合で混在すること)		
	B	膜厚 < 200 程度	処理剤被覆が変色して均一なさび色を呈す		Bと3の混在 3-x 3-y 3-z (3-yとは3がBの中に30%以下の割合で混在すること)		
さび発生部	5	< 400	腐食進まず薄いさび		本橋梁では存在しない		
	4	< 600	微細均一さび		本橋梁では存在しない		
	3	< 600	微細で外観平均粒径が5mm程度のさび		3と2の混在 2-x 2-y 2-z (2-zとは2が3の中に30%以上の割合で混在すること)		
	2	< 1000	直径25mm程度以下のこぶ状さびを含む		3と1の混在 1-x 1-y 1-z (1-yとは1が3の中に30%以下の割合で混在すること)		
1	> 1000	直径25mm程度を超える大きなこぶ状さびを含む					

上記を踏まえて、一般的に用いられているさび安定化補助処理が施された耐候性鋼材の外観評価²⁾(表-1参照)を修正して、本橋梁の実態に合わせた表-2を作成し、各部位の外観評価を行うこととした。

4.2 各部位における外観評価

本橋梁の中央径間部における外観評価をまとめたものを図-2に、代表的な部位を写真-2にそれぞれ示す。評価は近接目視に基づいて行い、電磁膜厚計によるさび厚の計測値を補助資料として用いた。なお、写真-3に示す橋脚間や鋼床版下面についても可能な範囲で遠望目視を行い、表-2に従って外観評価を行っている。

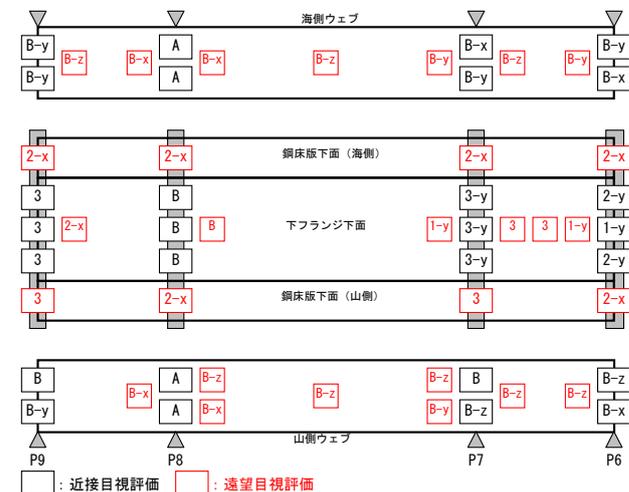


図-2 外観評価まとめ

土研センター

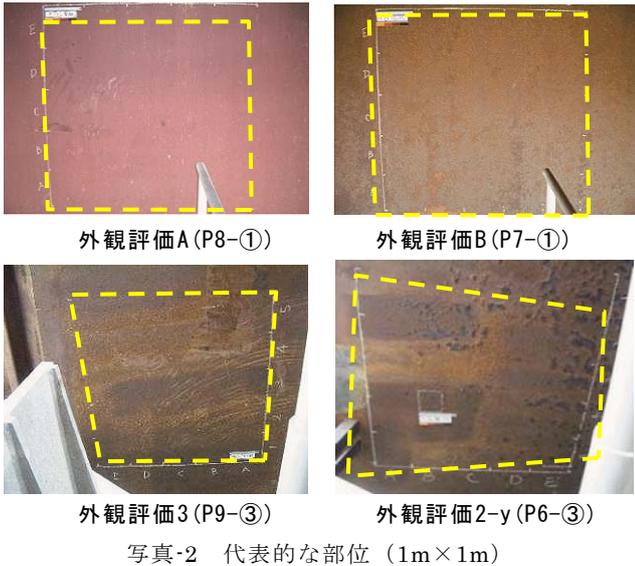


写真-2 代表的な部位 (1m×1m)



写真-3 遠望目視部位の例

図-2より、下記のことが分かる。

- 1) 供用後30年以上が経過しているが、ウェブでは処理剤被膜が健全な部分が多い。また、山側と海側の差異は見られなかった。
- 2) 下フランジ下面も大部分は健全であるが、一部こぶ状さびが発生しており、位置は各橋脚の東側(女川側)である。橋脚から10m程度の範囲に集中しており、直径は25mmを超えるものも見られた。この範囲は夏の海風(南東)が橋脚に当たり、鉛直に吹き上がって下フランジ下面に当たっていると考えられる。
- 3) 鋼床版下面も若干のこぶ状さびが発生していた。

4.3 本橋梁の劣化過程と環境の関係

さび安定化補助処理を施された耐候性鋼材の場合には処理剤被膜の劣化過程(被膜の風化過程)は、一般的には次のように考えられる。

- (1) 処理剤を内蔵して表層さびが成長し、さび厚が増加する。
- (2) 表面の凹凸を起点として付着塩分の集中化が起きる。
- (3) この点がマクロセル腐食の極となってこぶ状さびを形成する。

このような過程は、環境に応じどこかの段階で

安定するが、図-2の外観評価より、本橋梁においては(1)の段階にまでも達せず処理剤被膜の変色のない状態(さび外観A)に留まっている部位(ウェブ)がある一方、(3)の段階に達してこぶ状さびが発生している部位(下フランジ下面)もあることから、耐候性鋼材にとって適した環境と不適切な環境が混在していると考えられる。

また、各部位で電導度式付着塩分計を用いて計測した付着塩分量を表-3に示す。傾向としては、下フランジ下面、ウェブ上段が同程度に高く、ウェブ下段が低くなっているが、絶対値としてはそれほど大きくなく、過酷な環境という程ではない。また、外観評価とは一致しておらず(ウェブ上段は下フランジ下面より外観評価は良い)、付着塩分量以外の環境も考慮する必要があることを示している。

表-3 付着塩分量まとめ (mg/m²)

計測部位	P6	P7
山側ウェブ 上段	595	673
山側ウェブ 下段	59	341
下フランジ 山側	259	447
下フランジ 中央	392	685
下フランジ 海側	227	87
海側ウェブ 下段	29	13
海側ウェブ 上段	296	117(中段)

上記を踏まえて、本橋梁における環境と外観評価と相当する部位の関係を模式的にまとめると、図-3、表-4のようになると考えられる。

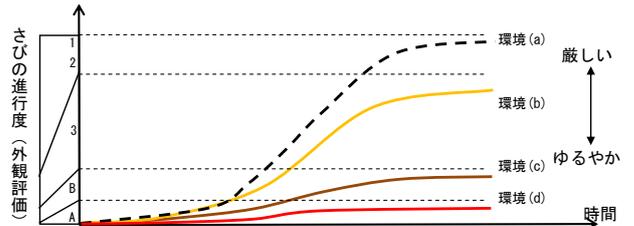


図-3 環境区分と外観評価の関係

表-4 環境の要因

環境	耐候性鋼材に影響を与える要因			日和大橋での相当部位
	海風	面の向き(湿潤性)	雨洗い	
環境(a)	海風を強く受け、雨洗いがなく、湿潤な環境(下向きの面)	強く受ける	受けにくい	下フランジ下面(橋脚東側の一部)
環境(b)	雨洗いがなく、湿潤な環境(下向きの面)	受けにくい	受けにくい	下フランジ下面全般、鋼床版下面全般
環境(c)	雨洗いはないが、乾いた環境(鉛直の面)	受けにくい	受けにくい	ウェブ面の上段部全般
環境(d)	雨洗いがあり、乾いた環境(鉛直の面)	受けにくい	受けにくい	ウェブ面の下段部(雨の当たる部分)

■：耐候性鋼材にとって不適切な条件
 ■：耐候性鋼材にとって適した条件

4.4 板厚減少量と外観評価の関係

構造安全性を確認するため、超音波板厚計を用いて各部位の板厚測定を行った。外観評価A~3の部位では、板厚減少は全く見られなかった。一方、こぶ状さびが発生している部分（外観評価2~1）については、こぶ状さび部分の凹凸の詳細を計測するため、下記の手順に従って、板厚減少量を測定した。

(1)対象部（こぶ状さび）をケレンし、電動ワイヤブラシによってさびを落とす。



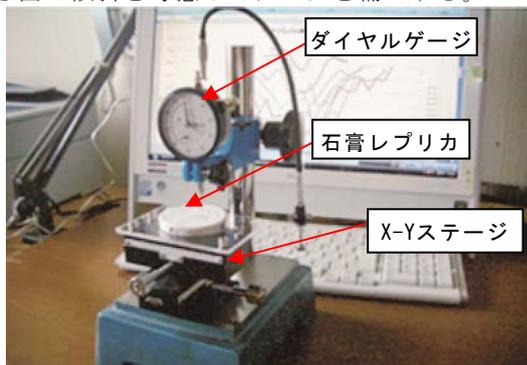
(2)シリコンゴムをさび面に押し付け、型取りをする。



(3)シリコンゴム硬化後、石膏によってレプリカを作成する。



(4)石膏レプリカからこぶ状さびの腐食形状を計測する。具体的にはX-Yステージ上に石膏レプリカを置き、ダイヤルゲージにて各位置の深さを計測する。なお、測定する面の傾斜を考慮してデータを補正する。



測定した石膏レプリカを図-4に、測定の結果得られた腐食形状の例を図-5にそれぞれ示す。なお、図-5内には読み取った直径、深さに合わせたsineカーブも記載した。こぶ状さびはsineカーブに比較的近い形状をしていると考えられる。

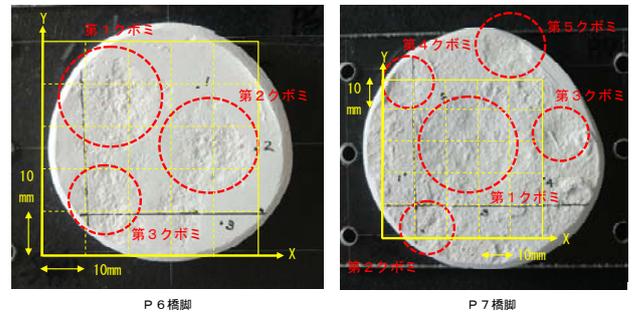


図-4 石膏レプリカ

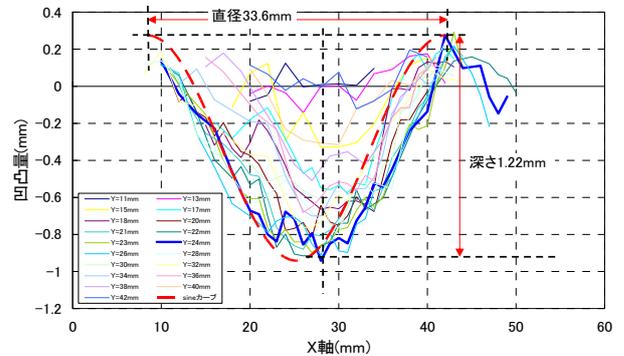


図-5 こぶ状さびの形状測定結果(P7-第1クボミ)

2個のレプリカから得られた計8個のこぶ状さびの直径と深さの関係を図-6に示す。図内には、最大値の包絡線（指数関数）も併せて示した。

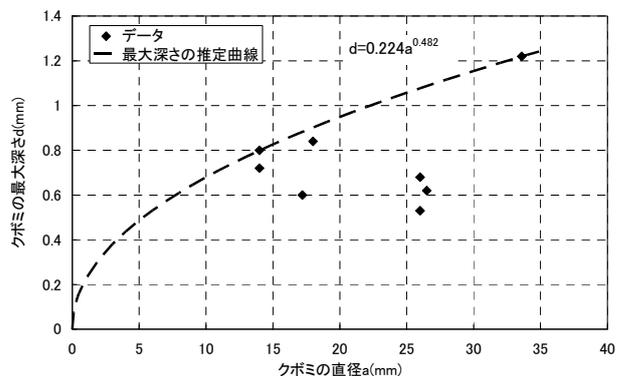


図-6 こぶ状さびの直径と深さの関係

包絡線関数と、こぶ状さびの形状仮定（sineカーブ）から、こぶ状さびの直径 a (mm)、深さ d (mm)と腐食の容積 V (mm^3)の関係を整理すると、下記のようなになる。

土研センター

$$d=0.224 \cdot a^{0.482}$$

(直径と深さの関係)

$$V=0.234 \cdot d \cdot a^2$$

(sineカーブの容積と直径・深さの関係)

より、

$$V \approx 0.052 \cdot a^{2.48}$$

これを用いてこぶ状さびが分布するエリアにおける平均板厚減少量 Δt (mm)を計算すると、以下のようになる。

$$\Delta t = \frac{\Sigma V}{A} = \frac{0.052 \Sigma a^{2.48}}{A}$$

ここで、

Δt ; 対象エリアの平均板厚減少量(mm)

A ; 対象エリアの面積(mm²)

a ; 対象エリア内各こぶ状さびの直径(mm)

V ; 対象エリア内各こぶ状さびの容積 (mm³)
である。

この式を用いて、図-7に示す実際のこぶ状さびの分布から平均板厚減少量を算出する。破線で囲ったエリア (200mm×200mm) の中でこのこぶ状さびの面積比は40%程度であり、直径が25mmを超えるものを含むので、外観評価は「1-z」に相当する。

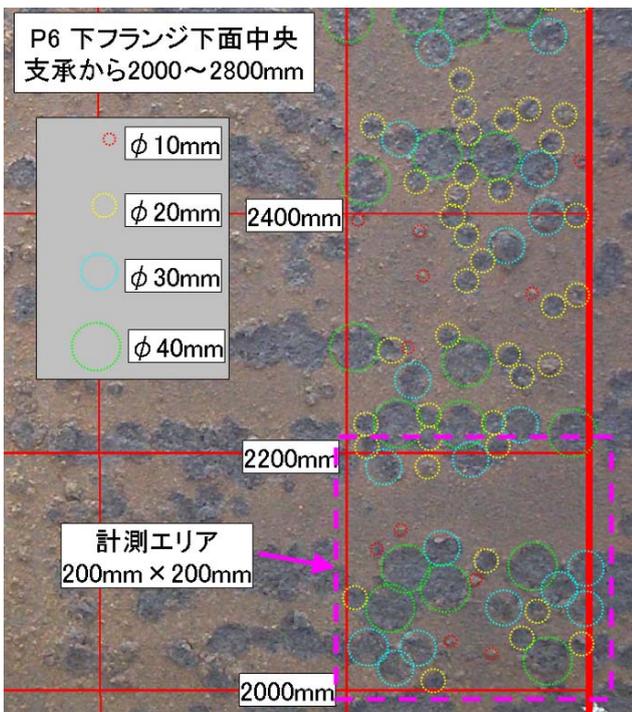


図-7 こぶ状さび分布例

このエリアの平均板厚減少量 Δt (mm)は、以下の計算から0.14mm程度となる。

外観評価「1-z」の平均板厚減少量 ;
対象表面の面積 $A = 40000 \text{ mm}^2$ 面積比
こぶ状さびの面積 = 15944 mm^2 40 %

a mm	N	$a^{2.48}$	$\Sigma a^{2.48}$	$\pi/4 \cdot a^2$	$\Sigma \pi/4 \cdot a^2$
40	5	9400	46998	1257	6283
30	10	4605	46053	707	7069
20	7	1685	11794	314	2199
10	5	302	1510	79	393
合計			106355		15944

$$\Delta t = \frac{\Sigma a^{2.48}}{A} \times 0.052$$

$$= \frac{106355}{40000} \times 0.052$$

$$= 0.138 \text{ mm}$$

同様の手法で、仮想的にこぶの数量・大きさを調整して外観評価「1-y」(こぶ状さびの面積比30%)、「1-x」(こぶ状さびの面積比3%)、「2-y」(こぶ状さびの面積比30%)、「2-x」(こぶ状さびの面積比3%)の平均板厚減少量を計算し、外観評価A~3の結果と合わせて整理したものを表-5に示す。外観評価において、「1-y」でも、腐食量は0.11mm程度に留まっており、経年数にもよるが、裸仕様の外観評価換算で「3」(正常)~「2」(要観察)に相当しており、裸仕様の外観評価「1」(早期の対策が必要)とは異なると考えられる。また、「2-y」と「1-y」の板厚減少量の差はそれほど小さくなく、こぶ状さびの評価を外観直径25mmで分ける意味は小さいと考えられる。

表-5 外観評価と平均板厚減少量の関係

外観評価	平均板厚減少量 (mm)	備考
A	0	処理剤被膜残留
B	0	処理剤被膜残留
3	≒ 0	表層さびの平均粒径が5mm程度
2-x	0.008	直径が25mm程度以下のこぶ状さびが3%以下発生している
2-y	0.080	直径が25mm程度以下のこぶ状さびが30%以下発生している
1-x	0.012	直径が25mm程度を超えるこぶ状さびが3%以下発生している
1-y	0.108	直径が25mm程度を超えるこぶ状さびが30%以下発生している

5. ワッペン式暴露試験による腐食進行予測

下フランジ下面には外観評価1、2となった部位が部分的に存在しており、今後の腐食進行について経過観察が必要である。

さび安定化処理が施された耐候性鋼材は、暴露される時間の経過に伴い、表面処理剤の風化とともに鋼材の腐食が進行するものであり、長期的将来の腐食進行を予測するためには、当該部位の現状が腐食進行のどのポジションにあるかを知ることが重要である。

このポジションを探索するには過去の追跡調査

データが必要であるが、記録は存在していないため判定は困難である。一方、表面処理剤が風化した後の超長期の腐食減耗量として、表面処理剤を施していない耐候性鋼材の長期の腐食進行が把握できれば、現在のポジションと将来の腐食予測が可能となり、例えば外観評価「1-y」が放置可能なレベルなのか、早急な対策が必要なのかを判断することができる。

ここでは、図-8に示すように表面処理剤が風化した後から板厚減少が始まるというモデル化を行い、いつの時点から板厚減少が始まったのかを「ワッペン式暴露試験」²⁾により確認することとした(図-9参照)。

調査に併せてP6、P7橋脚上に設置したワッペン式暴露試験片(写真-4参照)は、1年後、3年後、5年後、10年後に回収を行う予定としており、回収したワッペン式暴露試験片の重量測定により、本環境下において、過去どのように腐食が進行したかの確認と、今後どのように腐食が進行するかを予測することが可能となる。

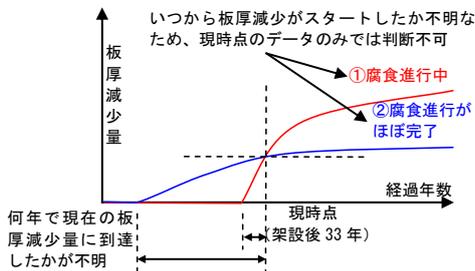


図-8 板厚減少モデル

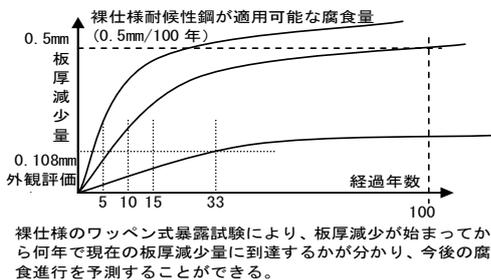


図-9 腐食状況の推定

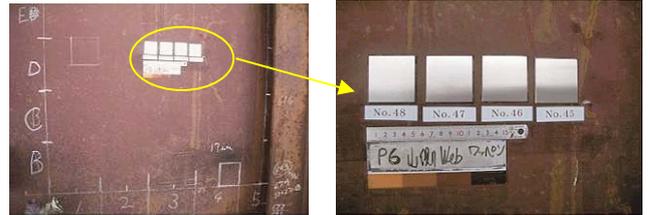


写真-4 ワッペン式暴露試験片(P6-②) 山側ウェブ

6. まとめ

日和大橋については、現時点の板厚減少量は、最大でも0.1mm強に留まっており、現時点では構造安全性に問題ないことを確認できた。また、今後の腐食進行については、ワッペン式暴露試験で予測可能である。

今回の調査ではさび安定化補助処理された耐候性鋼橋梁の腐食について、調査結果に基づき外観評価と板厚減少量について定量的な関係を提案したが、現行の外観評価基準と一致しない点も多数見られた。今後は、様々な環境下におけるこぶ状さびの状況を調査して外観評価基準の見直しを行うとともに、表面処理を施したワッペン試験片を用いて、さらに正確な腐食状況の推定ができないかについて検討していきたいと考えている。

最後に、2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震で被害に遭われました皆さま、ならびに関係の皆さまに、心よりお見舞い申し上げます。

参考文献

- 1) 松崎靖彦他：「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法に関する一考察」、土木学会論文集F、Vol.62、No.4、pp581～591、2006.10
- 2) (社)日本鋼構造協会:耐候性鋼橋梁の可能性と新しい技術、JSSCテクニカルレポートNo.73、2006.10

佐藤雅之*



宮城県東部土木事務所
道路管理班 主任主査
Masayuki SATO

中野正則**



財団法人土木研究センター
審議役
Masanori NAKANO

安波博道***



財団法人土木研究センター
材料・構造研究部長、工博
Dr.Hiromichi YASUNAMI

市川和臣****



財団法人土木研究センター
材料・構造研究部 主任研究員
Kazuomi ICHIKAWA

中島和俊*****



財団法人土木研究センター
材料・構造研究部 研究員
Kazutoshi NAKASHIMA