12年を経過した耐候性鋼無塗装橋梁及び暴露試験板の 安定さび形成調査

藤原 博*, 菅野照造**, 青澤正樹***, 長谷俊彦†

* 日本道路公団 東京建設局 横浜工事事務所

** 株式会社防蝕エンジニアリング

*** 日本道路公団 東北支社 仙台技術事務所

† 日本道路公団 試験研究所

Investigation of Protective Rust Formation on Non-painted Steel Bridge Girders and Exposure Test Panels of Weathering Steels after 12 Year Construction

Hiroshi Fujiwara*, Teruzou Sugano**, Masaki Aosawa*** and Toshihiko Nagatani†

* Yokohama Construction Office, Tokyo Construction Bureau, JH (Japan Highway Public Corporation)

** Anti-Corrosion Engineering Co., Ltd.

*** Sendai Technical Office, Tohoku Construction Bureau, JH

† Research Institute, JH

Non-painted bridge weathering steel was built and exposure test panels were installed on it on the highway of the Tohoku mountainous area. Twelve years having passed since then, investigations were made on conditions of rust layers formed on those surfaces.

It was found that rust on the bridge was deep reddish brown in general and protective rust seemed to have been formed steadily but ion properties resistance value was so low as 0.34 kΩ on average. On the other hand, in the investigations of rust layers of exposure test pieces, it was recognized there were almost uniform non-polarizing layers containing condensed Cr and Cu.

But many cracks were found on those rust layers and condensed Cl existed along them. It is supposed this may be the cause which made the ion properties resistance value low.

This Cl was supposedly produced from antifreeze agent spread on the road in winter time, and its mist may have accumulated and penetrated into the rust layers. In the future, it must be studied what effect this Cl will give to formation protective rust.

Key words : steel bridge, exposure test panels, weathering steel, protective rust, antifreeze agent, ion properties resistance, non-polarizing layers.

1. 緒 言

耐候性鋼を橋梁に無塗装で使用した場合の防食効果については、鋼材表面に形成されるさび層の性状を詳細に検討する必要があることから、多くの場合破壊調査が可能な試験片を各種の環境に暴露して追跡調査が行われてきた¹⁾。山下ら²⁾は、大気中に26年間という長期間暴露した試験片についてさび層の構造を詳細に調査し、最終的な安定さび層は、Crを含む微細なさび結晶が密に凝集した α -(Fe_{1-x},Cr_x)OOHからなる緻密なゲーサイト構造を有するさび層であり、本さび層が防食効果に寄与していることなどを明らかにしている。

一方、実用的な面からの設計・施工及び維持管理のあり方などの指針を得る目的で、建設省土木研究所は(社)鋼材倶楽部及び(社)日本橋梁建設協会との共同研究とし

て、1981年度より11年間にわたり国内全域の道路橋41箇所の各環境条件下に耐候性鋼無塗装暴露試験片を取り付け、防食効果について検討を行った。その結果、飛来塩分量(Cl⁻)が0.05 mdd (mg/dm²/day)以下の環境では耐候性鋼を無塗装で使用することは有効であると、その内容が1993年に公表³⁾されている。

このような趨勢にかんがみて日本道路公団(以下JH)では、鋼橋塗装の合理化を図ることを目的として1985年に東北縦貫道八戸線に初めて耐候性鋼無塗装橋梁(以下無塗装橋梁)を建設した。以降今日までに70橋を超える無塗装橋梁の建設が行われている。

本報は、東北縦貫道八戸線「大鳥第二橋」における建設12年目の調査結果を報告するものである。本調査では、実橋の各部位に取り付けた暴露試験片の①外観調査、②セロテープ剝離試験、③フェロキシル試験、④さび層のイオン透過抵抗(RST)測定、⑤腐食減量、⑥残存板厚測定、⑦さび層中のCl⁻、SO₄²⁻の測定、⑧さび層断面の偏光顕微鏡による安定さび形成状況の観察、⑨EPMAによる元素分析によりさび層中に含まれるCr、Cu、P及び塩分(Cl元素)の分布測定を行い⁴⁾、それらの元素が安定さび形成に及ぼす影響について調査した。本報ではこれらの項目の中から④～⑨の内容を主体に述べる。

* 〒241-0833 横浜市旭区南本宿町21-1 (21-1, Minami Honjyuku-cho, Asahi-ku, Yokohama, 241-0833 Japan)

** 〒270-0021 松戸市小金原7-32-17 (7-32-17, Koganehara, Matsudo, 270-0021 Japan)

*** 〒989-3121 仙台市青葉区郷六字庄子39-1 (39-1, Shoji, Gouroku, Aoba-ku, Sendai, 989-3121 Japan)

† 〒194-8508 町田市忠生1-4-1 (1-4-1, Tadao, Machida, 194-8508 Japan)

2. 調査方法

2.1 大鳥第二橋と暴露試験片の取り付け位置

大鳥第二橋は Fig. 1 に示したように橋長 49.45 m の単純合成鉄桁構造であり、本体の使用材質は JIS 規格による耐候性鋼 SMA 41 A・BW, SMA 50 BW で、ボルトは F 10 TW を使用している。本橋梁は岩手県最上部の山間地で海拔 185 m に位置し、東向き斜面を縦断する形で設置されており、風通しが良く耐候性鋼を無塗装で使用する環境としては良好な位置にある。また、海岸からの距離は約 20 km であって、飛来塩分量は $0.002 \text{ mg/dm}^2/\text{day}$ 以下と極めて低い測定値となっているので、その影響はほとんどないと考えられている。

本橋梁は 1985 年 6 月に架設され、1997 年 12 月に調査したので実質的な暴露期間は 12 年 6 か月となるが、データはすべて 12 年目のデータとして扱うことにした。

暴露試験片は、Fig. 2 に示したように橋梁本体に架台を設けて垂直・水平に取り付けた。試験片は $80 \times 150 \times 10$ (mm) の大きさの耐候性鋼材 (SMA 50 BW) と、照合材料として同じ大きさの普通鋼 (SM 50 B) を用いた。この試験片の化学分析値を Table 1 に示す。

2.2 さび層のイオン透過抵抗の測定

さび層の保護性を評価するため交流インピーダンス法

Fig. 1 Rough sketch of Ohtori Bridge No.2.

によりイオン透過抵抗を測定した。測定器には RST (Rust Stability Tester, 新日本製鐵株式会社製)⁵⁾ を用いて、橋梁本体について Fig. 2 に示した TS-1~TS-6 桁における各部位について測定した。電解液は 0.1 M

Fig. 2 Measuring place for Ohtori Bridge No.2.

Table 1 Chemical composition of the bridge material and exposure test panels (mass %).

Steel	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	V
Weathering steel	0.11	0.39	0.96	0.017	0.05	0.36	0.17	0.61	0.05
Carbon steel	0.17	0.40	0.14	0.019	0.002	—	—	—	—

Table 2 Evaluation on result by polarizing microscope observation.

Items	Evaluation	Appearance of Non-polarization layers
Ratio	○	Most rust layers are non-polarization ones
	△	Considerable layers are non-polarization ones
	×	Non-polarization layers are very few
Position	○	Most of steel surface is covered with non-polarization layers
	△	Fairly much part of steel surface is covered with non-polarization layers
	×	Most of steel surface is covered with polarization layers
Continuity	○	Horizontal continuity of non-polarization layers is very good
	△	Horizontal continuity of non-polarization layers is fairly good
	×	Horizontal continuity of non-polarization layers is very bad

Table 3 Evaluation for the formation of stabilizing rust.

Evaluation	Formation of stabilizing Rust	Appearance of Non-Polarization Layers
○	most proceeding	It closely resembles stabilizing rust on weathering steel.
△	fairly proceeding	It resembles, to some extent, stabilizing rust on weathering steel.
×	slow	It doesn't resemble stabilizing rust on weathering steel at all.

Na₂SO₄ 溶液を常温にて使用した。

2.3 腐食減量の測定

暴露試験片の腐食量は、クエン酸水素 2 アンモニウム（和光純薬工業株式会社製・試薬特級）10 wt % 水溶液にインヒビター（朝日化学工業株式会社製・イビット 2 S）を 0.3 wt % 添加した温度 90±5°C の 200 ml 溶液中に暴露試験片とブランク試験片を約 60 分浸漬することで除錆し、除錆前後の重量差により腐食量を求めた。

2.4 残存板厚の測定

12 年経過後の橋梁本体の板厚を超音波厚さ計（川鉄アドバンテック株式会社製、MODEL TI-12）を用いて、Fig. 2 の TS-1～TS-6 の各位置における P1～P5 の部分について測定した。測定部分のさび層は、ワイヤーブラシとサンドペーパーを用いて鋼素地が露出する程度まで除去し、その部分についてランダムに 20 点を測定して、その平均値をもってその部位の板厚とした。

2.5 さび層中の Cl⁻ と SO₄²⁻ の測定

前項同様に Fig. 2 に示した TS-1～TS-6 における P1～P5 の各部分について浮きさび（真鍮ブラシで軽く擦って落ちるさび）と、固着さび（浮きさびを採取した後、同じ部分をスクレーパーで素地が露出する程度に掻き落としたもの）を採取し、そのさびの中に含まれる Cl⁻ と SO₄²⁻ の量を JIS M 0202.1987「坑水・排水試験方法」により、イオンクロマトアナライザーを用いて測定した。

2.6 さび層の断面性状調査

腐食減量測定用試験片とは別に、同様に暴露された試験片についてさび層のイオン透過抵抗の測定を行った後、約 20×10 (mm) に切り出し、埋め込み樹脂（エ

ポキシ樹脂）で固定した後、試験片断面を鏡面研磨し、偏光顕微鏡にてさび層を観察した。

さらに EPMA にて、さび層中の Cr, Cu, P 及び 4 元素の分布状態を調査した。なお、測定項目の評価は Table 2 及び Table 3 に示す基準と比較して行った。

3. 結果及び考察

3.1 さび層のイオン透過抵抗

RST を用いて橋梁本体と暴露試験片に生成したさび層のイオン抵抗の測定を行い、その結果を Fig. 3 及び Fig. 4 に示した。

さび層のイオン透過抵抗値は、1 kΩ 以上でさび層の厚さが 300 μm 以下であればさび層は安定化に向かっていとされているが³⁾、大鳥第二橋の測定値は、橋梁本体及び暴露試験片ともに一部に 1 kΩ を越える箇所はあるものの、大部分は 1 kΩ 以下であり、橋梁本体の平均は 0.34 kΩ とかなり低い値であった。Fig. 3 には大鳥第二橋と架設位置の環境及び経過年が 12 年という類似の条件にある常磐道の新川橋（海拔約 100 m）の測定結果も併せて示した。この理由は前者の橋梁は冬季、凍結防止剤（NaCl）を常用するのに対し、後者の橋梁はほとんど使用しない（数年に 1～2 回使用する程度）ので、凍結防止剤の塩分が RST 値にどのように影響を及ぼしているかを検討するためである。

すなわち、新川橋の RST 値の平均は 2.3 kΩ と前者に比して大きく、塩分の影響を受けない環境では 12 年を経過することによりさび層は安定化に向かっていることが推察されるが、大鳥第二橋は塩分によりさび層の安定化が阻害されていると推察される。

暴露試験片では耐候性鋼、普通鋼ともに水平暴露された表面の平均値は 1.19～1.14 kΩ であるのに対し、垂直試験片では 0.12～0.16 kΩ とかなり低い値となって

Fig. 3 RST-Value comparison of each position shown above of Ohtori Bridge No.2 and Shinkawa Bridge.

いる。試験片の裏面は、水平・垂直に関係なく、0.1 kΩ 前後の値を示していた。山間地域の環境で12年を経過したさび層のRST値としては低い傾向にあるが、この理由は後述する偏光顕微鏡観察の結果と併せて考察する。

3.2 残存板厚測定

超音波厚さ計を用いて Fig. 2 に示した鉄桁の各部位について板厚を測定し、その結果を橋梁架設1年目に測定した値から差し引いた値を減少量 (mm) とし Fig. 5

に示した。減少量は、いずれの鉄桁とも下フランジ上面の部分が他の部分よりも大きいことが分かる。特に、TS-2の下フランジ上面の腐食量が大きいのは、この部分は塵埃の堆積が著しく、濡れ時間が長くなるため大部分が粗雑なウロコ状の層状さびを形成していたためと推測される。山側（北西に当たる）のTS-1・P5の上フランジ下面が下フランジ上面と同じような減少量を示しているのは、この部分では結露水の滞留の頻度が高くなり濡れ時間が長いので、このような部分では安定さびの形成は難しいものと推測される。

以上のようなことから、橋梁の水はけが良いウェブ面と水の滞留時間が長く塵埃が堆積しやすい水平部の板厚減少量とRST値、Cl⁻値をFig. 5に重ねてみると、板厚減少量とCl⁻との間にはやや関係があるように見えるが、RST値とは関係があるようには見受けられない。

これらの項目間の相関係数を求めると、板厚減少量とCl⁻は $r=0.51$ であり、低いながらもやや相関性が見受けられるが、RST値については $r=0.23$ とほとんど相関性は見られないことが分かった。このような傾向を各部位別に検討するため、各部位の測定値を要約してTable 4に示した。この測定値から各項目間の相関係数を求めるとTable 5のようになる。

すなわち、直接風雨の影響を受ける外桁外面では、RST値とCl⁻の間には低い相関性しか見られない。このような外桁に対し内桁の場合は、板厚減少量とCl⁻の間には $r=0.9$ と高い相関性が見られ、RST値との間にも $r=0.65$ と相関性が見られた。このことは、鋼材表面に付着したCl⁻が時間の経過に伴いそのまま蓄積される部分と、風雨などによって適度に除去される部分とではさび層の形成過程が異なるためと思われる。

Fig. 6には暴露試験片の12年目の腐食減量から、

Fig. 4 RST-value comparison of weathering steel and carbon steel of the exposure test panels (12 years after construction).

Fig. 5 Relation of corrosion loss, RST-value and Cl⁻ content of each position shown above Ohtori Bridge No.2.

暴露条件別に板厚減少量を求めた結果を示した。この結果からも水切れが良く塵埃が堆積しにくい垂直部は、平面部よりも板厚減少量が小さいことが分かる。この傾向は耐候性鋼も普通鋼も同様であるが、耐候性鋼の方が板厚減少量は小さく防食性のあることが示されている。

3.3 さび層中の Cl⁻ と SO₄²⁻ の含有量

Fig. 2 に示した各測定位置における浮きさび量と固着さび量の測定結果と、このさび（浮きさび量＋固着さびの全量）中に含まれる Cl⁻ 及び SO₄²⁻ の測定結果を Fig. 7 に重ねて示した。この結果によれば、さび量の多い箇所ではいずれの鈹桁とも内桁の下フランジ上面であ

Table 4 Corrosion loss, RST-value and Cl⁻ of materials below of Ohtori Bridge No.2.

Measuring position			Corrosion loss (mm)	RST-Value (kΩ)	Cl ⁻ Content (mg/dm ² ·Y)
Web plate	(TS-1) Mountain side (Outer side)	Vertical	0.07	0.209	0.005
		Horizontal	0.53	1.131	0.589
	(TS-6) Vertical (Outer side)	Vertical	0.21	0.072	0.001
		Horizontal	1.22	0.276	0.182
Lower flange (upper surface)	(TS-2) Inner side	Vertical	0.19	0.047	0.005
		Horizontal	0.50	1.250	0.211
	(TS-4) Inner side	Vertical	0.23	0.029	0.023
		Horizontal	0.32	1.900	0.015

Table 5 Coefficient of correlation series.

		Corrosion loss	RST-Value	Cl ⁻ content
Corrosion loss	Outer side	—	0.148	0.332
	Inner side	—	0.650	0.927**
RST-Value	Outer side	0.148	—	0.978**
	Inner side	0.650 *	—	0.322
Cl ⁻ content	Outer side	0.332	0.978 **	—
	Inner side	0.927 **	0.322	—

* medium correlation, ** strong correlation.

Fig. 6 Corrosion loss of the test panels after 12 years exposure.

って、さび量に比例して Cl^- 及び SO_4^{2-} 濃度が高くなっている。これは、この部分に付着した物質が降雨などの気象条件によって減量されるためと推測される。

浮きさび量と固着さび量の比は、サンプリング方法が精確でないために定量的な比較はできないが、今回のようなサンプリング方法で比較する限りでは、いずれの鋼桁とも P3 (水平面) を除いた各部位で固着さび量の多いことが示されている (ただし TS-6 を除く)。

耐候性鋼のさび層は、山下ら²⁾によって上層が $\gamma\text{-FeOOH}$ 、下層が $\alpha\text{-(Fe}_{1-x}\text{Cr}_x\text{)OOH}$ の 2 層から成っていることが明らかにされているが、 $\gamma\text{-FeOOH}$ を浮きさび層とし、下層の $\alpha\text{-(Fe}_{1-x}\text{Cr}_x\text{)OOH}$ を固着さび

層と仮定すると、大鳥第二橋の場合は $\alpha\text{-(Fe}_{1-x}\text{Cr}_x\text{)OOH}$ が多いことになり、安定さびの形成はかなり進んでいることになる。

TS-6 (谷側の外桁) を除いた他の桁の P3 位置は、いずれも浮きさび量が固着さび量より多くなっているが、この部分は前述したように塵埃の堆積しやすい箇所であり、しかも降雨時の水分及び冬季に散布する路面凍結防止剤の巻き上げにより Cl^- 量が多く含まれることが、浮きさび量を多くしている原因と推測され、Fig. 3 に示した RST 値及び Fig. 5 の板厚減少量の結果とも一致しており、この推測を裏付けているものと考えている。

TS-6 の桁が他の桁に比して浮きさび量、固着さび量、 Cl^- 及び SO_4^{2-} 量などが少ないのは、この面が地理的に降雨雪による洗浄作用が強く、また日照時間が長いなどの条件により濡れ時間が短いためと推測している。

3.4 暴露試験片の切断面分析

3.4.1 偏光顕微鏡観察

Table 2 に示した基準に基づいてさび層断面の偏光顕微鏡による観察を行った。その結果を Table 6 に示した。耐候性鋼の暴露試験片は、いずれの試験片とも非偏光層がはっきりと観察されたが、Table 6 に示したようにこのさび層には縦われ、横われを生じているのが特徴となっている。Fig. 4 に示した RST 値が、一部の試験片を除いて 12 年を経過しているにもかかわらず、いずれも 1.0 kΩ 以下という低い値を示しているのは、このわれに起因していると推測される。P3 の位置が高い RST 値を示しているのは、測定時に塵埃が固着堆積していたためで、さび層の抵抗に塵埃層の抵抗が加わったものと考えている。

Fig. 8 に安定さびのわれ発生状況の例を示したが、裏面側のさび層に顕著なわれが見られるのが特徴となっている。Table 6 の安定さび形成評価に△印が多いのは、このわれを考慮した評価であって、われのないものを○と評価した。

Fig. 7 Amount of rust on plate girders and the amount of Cl^- and SO_4^{2-} content included in them.

Table 6 Observation result for the characteristic of the rust layers on exposure test panels by polarizing microscope ($\times 200$).

Material	Exposure Condition	Test panels	Non-polarizing Layers				Remark
			Ratio	Position	Continuity	Formation of Stabilizing Rust	
Weathering steel	Valley side girders	Vertical	Front face	Δ	Δ	Δ	Crack
			Back face	Δ	$\bigcirc$	$\bigcirc$	Crack
		Horizontal	Front face	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	—
			Back face	Δ	$\times$	Δ	Crack
	Mountain side girders	Vertical	Front face	Δ	$\bigcirc$	$\bigcirc$	Crack
			Back face	Δ	$\bigcirc$	$\bigcirc$	Crack
		Horizontal	Front face	Δ	$\bigcirc$	$\bigcirc$	Crack
			Back face	Δ	$\bigcirc$	$\bigcirc$	Crack
	Inner girders	Vertical	Front face	Δ	$\bigcirc$	$\bigcirc$	Crack
			Back face	Δ	$\bigcirc$	$\bigcirc$	Crack
		Horizontal	Front face	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	—
			Back face	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	—
Carbon steel	Valley side girders	Vertical	Front face	$\bigcirc$	$\bigcirc$	Δ	Crack
			Back face	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	—
		Horizontal	Front face	Δ	$\bigcirc$	$\bigcirc$	Crack
			Back face	Δ	Δ	Δ	Crack
	Mountain side girders	Vertical	Front face	Δ	Δ	$\bigcirc$	Crack
			Back face	Δ	Δ	Δ	Crack
		Horizontal	Front face	Δ	Δ	Δ	Crack
			Back face	Δ	Δ	Δ	Crack
	Inner girders	Vertical	Front face	Δ	Δ	Δ	Crack
			Back face	Δ	Δ	Δ	Crack
		Horizontal	Front face	Δ	Δ	$\bigcirc$	Crack
			Back face	Δ	$\bigcirc$	Δ	Crack

紀平⁵⁾は、さび安定化はイオン透過性が指標となることを指摘しているが、このことは安定さびの緻密性が前提となるため、今回のようにわれが発生しているさび層は、連続性のある緻密なさび層とはいえず難く Δ と評価した。

3.4.2 EPMA による濃化元素の測定

EPMA にて暴露試験片のさび層中の元素を定性分析した結果を Fig. 9 に示す。岡田ら¹⁾は耐候性鋼の非偏光層であるさび層中に Cr, Cu 及び P の 3 つの元素の濃化を観察しているが、本結果では、これらの元素のうち P はいずれのさび層中にも見られず、Cr, Cu が主体であった。また、さび層のわれの部分には Cl が濃化しているのが特徴となっている。安定さび層のわれにはこの

Cl が影響していると推測される。

大鳥第二橋は、海岸から約 20 km 離れた海拔約 185 m の山間地域に位置しており、飛来塩分量は 0.002 mg/dm²/day と低いのでさび層中に含まれる Cl⁻ は飛来塩分によるものとは考え難く、冬季に路面凍結防止剤が散布されたため、この塩分ミストが堆積したものと推測される。外桁の部分は降雨による洗浄効果があるため、塩分の堆積は避けられるが、桁の内部については塵埃の堆積があり、ここに沈着した塩分はそのまま残留し、塵埃中に含まれる水分に溶解してさび層中に浸透したものと考えられる。この塩分が安定さび形成にどのように関与していくかは今後の検討課題である。

清水ら⁶⁾は、Cu-P 系耐食鋼の緻密なさび層は塩化物透過に対して障壁として作用するが、雰囲気湿度が高くさび層の濡れ時間が長いときは有効に機能しないことを述べている。Cr, Cu, P 系の耐候性鋼についても同様ながいことがいえるかどうかは未知である。しかし、内桁のフランジ上面の Cl⁻ を含んだ湿り気の多い塵埃の堆積条件は、この内容に類似しているため Cr, Cu 濃化による非偏光層が塩分を不活性化することは期待できない。従って、さび層内のわれは修復されることなく、このまま存在が継続されるものと推測される。

4. ま と め

山間地域で 12 年を経過した耐候性鋼無塗装橋梁及び暴露試験片について、安定さび形成の進行状態を調査した結果、次のことが分かった。

① 大鳥第二橋は、一様に黒褐色に近い褐色を呈しており、外観的には安定さびが順調に進行しているものと推測された。

② 冬季の凍結防止剤 (NaCl) を常用する橋梁と使

Fig. 8 Corrosion section of rust layers by polarizing microscope on weathering steel test panels exposed for 12 years.

Fig. 9 EPMA (WDS) analysis of rust layers formed on specimens exposed for 12 years.

用しない橋梁について比較した結果、前者の橋梁の方が明らかに RST 値は低く、塩分がさび層の形成に大きく影響しているものと推察された。また、暴露試験片による調査ではさび層中にわれが認められ、このわれに沿って Cl^- の濃化している現象が見られた。このことが RST 値を低くしている要因となっているものと推察した。

③ 路面凍結防止剤を散布する路線では、鋼材に付着する塩分がどのようにさび安定化に影響を及ぼしているかに重点を置いた調査検討が必要であり、更にはこの対策についても検討することが必要である。

参 考 文 献

- 1) 例えば、岡田秀弥, 細井祐三, 湯川憲一, 内藤浩光: 鉄

と鋼, 55[5] 353~365 (1969).

- 2) 山下正人, 幸 英昭, 長野博夫, 三沢俊平 (M. Yamashita, H. Miyuki, H. Nagano, and S. Misawa): 材料と環境 [*Zairyo-to-Kankyo* (*Corros.Eng.*)], 43, 26~32 (1994).
- 3) 建設省土木研究所, 社団法人鋼材倶楽部, 社団法人日本橋梁建設協会: 耐候性鋼材の橋梁への適用に関する共同研究(XX), (1993.3).
- 4) 日本道路公団試験所: 無塗装耐候性鋼材使用橋梁追跡調査要領(案), (1991.12).
- 5) 紀平 寛: 溶接学会誌, 63 [6] 435~440 (1994).
- 6) 清水義明, 田中賢逸, 西村俊哉 (Y. Shimizu, K. Tanaka and T. Nishimura): 材料と環境 [*Zairyo-to-Kankyo* (*Corros.Eng.*)], 44, 436~441 (1995).

(Manuscript received August 20, 1999;
in final form December 2, 1999)