準密閉環境における一般構造用鋼の大気腐食*

— 橋梁鋼製箱桁内部環境の腐食性評価 —

廖 金孫**, 松井繁憲**, 串田守可**, 篠原 正***, 藤野陽三†

** 株式会社 栗本鐵工所

*** 独立行政法人 物質材料研究機構

† 東京大学 大学院工学系研究科

Atmospheric Corrosion of Structural Steel at Semi-Closed Environment*

— Corrosivity inside the Box Girder of Steel Bridges —

Jinsun Liao**, Shigenori Matsui**, Moriyoshi Kushida**,
Tadashi Shinohara*** and Yozo Fujino†

** Kurimoto, Ltd.

*** National Institute of Materials Science (NIMS)

† The University of Tokyo

In order to understand the atmospheric corrosion behavior of structural steels at semi-closed space such as box girder of steel bridge, the temperature and relative humidity were measured with thermo-hygrometers, and corrosion rate of structural steel was estimated using steel coupons with various deposited salt amount on the surface. Besides, Fe-Ag galvanic type ACM (Atmospheric Corrosion Monitor) sensors were employed to evaluate the influences of both the deposited salt amount and relative humidity on the corrosion of steels.

It was found that the relative humidity inside box girders was lower than that outside, but it may be as high as 100% in some cases. Although the pollutant deposition is possible near the entrance of box girder, the airborne pollutant hardly invade into the interior of the box girder. The corrosion rate of structural steel without pollutant deposition on the surface is extremely low inside the box girder. The pollutant deposited on the surface before exposure promotes the corrosion of steel, but the effect of pollutant on corrosion rate of steel becomes weak with time. It can be suggested that low corrosion rate of structural steel inside box girder results mainly from no invasion of airborne pollutant.

Key word : atmospheric corrosion, deposition of pollutant, relative humidity, ACM corrosion sensor, semi-closed environment, box girder of bridge.

1. は じ め に

大気中における鉄鋼材料の腐食は、鋼材の化学組成以外に、曝される大気環境に依存する。一般構造用鋼の大気腐食速度は、主に大気の温湿度、飛来不純物、降雨などの環境因子により決められる。大気腐食をモニタリングするため、ACM (Atmospheric Corrosion Monitor) 型腐食センサが開発され、大気環境因子の監視および鋼材の腐食速度の評価に適用されてきた。例えば、元田らは Ag-Fe 対の ACM センサを用いて、海洋性大気や工業化住宅内等の環境の腐食性を評価し^{1), 2)}、また押川らは雨がかりのない環境の腐食モニタリングを行った³⁾。

従来の大気腐食の研究は、屋外環境を対象としたものが多いが、密閉環境あるいは準密閉環境の腐食性に対する評価は非常に少ない。このため、密閉あるいは準密閉環境における鋼材の腐食発生挙動に対して十分理解でき

ているとは言い難い。例えば、著者らは北海道の田園環境に設置された鋼製箱桁内部において暴露試験を行い、箱桁内部の相対湿度 90% 以上の時間が年間数 100 時間であったにも関わらず、7 年間暴露した試験片表面に腐食がほとんど生じていないことを確認した。鋼橋箱桁内部のような外部との物質交換が少ない準密閉環境下の鉄鋼材料の腐食発生挙動を理解するためには、より系統的な研究調査が必要である。

本研究では、海洋環境に設置された準密閉環境と考えられる橋梁鋼製箱桁内部において、一般構造用鋼の試験片による暴露試験、ACM 型腐食センサを用いる腐食モニタリングなどを行い、鋼橋箱桁内部環境の腐食性を評価した。

2. 実 験 方 法

2.1 実橋箱桁内部の暴露試験

沖縄県那覇市の湾上に架設されている実橋の鋼製箱桁内部に ACM センサおよび一般構造用鋼試験片を設置し、暴露試験を実施した。鋼製箱桁の構造概要および各種センサ等の設置位置を Fig. 1 と Table 1 に示す。本実橋箱桁は、上部のコンクリート床版の幅が大きいこと、日照の影響が比較的少なかった。また、本橋が地上 10 数メートルの高所に架設されているため、地面から受ける湿

* 第 144 回腐食防食シンポジウム (東京, 2004 年 4 月) で発表

** 〒590-0977 堺市大浜西町 2-2 (Ohamanishimachi 2-2, Sakai-shi, 590-0977 Japan)

*** 〒305-0047 つくば市千現 1-2-1 (Sengen 1-2-1, Tsukuba, 305-0047 Japan)

† 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1 (Hongo 7-3-1, Bunkyo, Tokyo, 113-8656 Japan)

Fig. 1 Sketch of box girder of bridge.

気の影響はなかった。

ACM センサによる腐食モニタリングは、1998 年 6 月から始まったが、2 年間が経過した 2000 年 8 月になっても、箱桁内部の ACM センサの出力が見られなかったため、2000 年 11 月に一部の ACM センサの表面に塩分 (NaCl) を付着させた。その際の塩分付着量を Table 1 に示している。

一般構造用鋼の試験片による暴露試験は 2001 年 1 月に開始した。ACM センサと同様に、暴露試験片の表面にも塩分付着を行った。塩分付着量は 0, 1, 10 および 100 mg/m² の 4 条件とした。

本研究に使用した ACM センサは、厚さ 0.8 mm の鉄基板の上に絶縁層を介して銀ペーストを印刷することにより作製した Ag-Fe 対 ACM センサである⁴⁾。暴露試験片は、板厚 1.2 mm の冷間圧延鋼板から 100×60 mm の寸法に切断し、片面に保護用塗装を施したものである。ACM センサおよび暴露試験片は、鋼橋箱桁内部のウェブ部に貼り付けた。

ACM センサによる腐食モニタリングと同時に、箱桁内外部の温度と湿度を計測した。温湿度の計測は、温湿度計を用いて 1 回/10 分の頻度で行った。

Table 1 Locations of sensors and specimen at bridge's box girder.

Site	ACM sensor		Thermo-hygrometer	Specimen
	Sensor No.	Amount of salt, mg/m ²		
①	No.1	0		
②	No.2	0.1	No.1	
③	No.3	1.0		
④	No.4	10		
⑤	No.5	0		○
⑥	No.6	0		
⑦	No.7	0		○
⑧	No.8	1.0	No.2	
⑨	No.9	10		○
⑩	No.10	0		
⑪	No.11	0.1		○
⑫	No.12	0	No.3	
⑬	No.13	0		
⑭	No.14	0	No.4	
⑮	No.15	0		
⑯				○
⑰				○
⑱				○

2.2 実験用箱桁内部の暴露試験

上記の実橋箱桁内部の暴露試験は、箱桁内部の一般部環境の腐食性を評価することができるが、外部の影響を受けやすい箱桁端部環境の腐食性に対しては評価できない。箱桁端部環境の腐食性を評価するため、実物大の箱桁を製作し、静岡市清水の東京海洋大学の暴露試験場（以下、清水試験場）に設置し、箱桁内部における暴露試験を実施した。実験用箱桁の構造概要を Fig. 2 に示す。本実験用箱桁では、上フランジの上部に設けた床版が小さいため、日照の影響が大きい。また、地面から 0.5 m しか離れていないため、地面の湿気の影響を受けやすいと考えられる。

実験用箱桁内部において、2001 年 10 月に ACM センサによる腐食モニタリングを始め、2002 年 2 月に一般構造用鋼試験片による暴露試験を開始した。各種センサの設置位置、ACM センサ表面の塩分付着状況を Table 2 に示す。実橋箱桁内部の暴露試験と同様に、暴露試験片の表面には 0, 1, 10 および 100 mg/m² の 4 条件の塩分付着を行った。

2.3 実橋箱桁内面の不純物付着量の測定

実橋箱桁内面の不純物付着量を把握するため、沖縄の海浜環境および北海道の田園環境の実橋に対して、箱桁内面に付着した不純物の量を測定した。不純物付着量の測定は、塩化物イオンおよび硫酸イオンを対象に、イオンクロマトグラフ法で行った。不純物の採取は、超純水で処理した清浄なガーゼを用いて、0.25 m² の面積内の不純物を 2 回にわたり拭き取り、拭取後のガーゼを超純水に浸漬し、超音波洗浄により不純物を抽出した。

2.4 暴露試験片腐食量の算出方法

箱桁内部では、不純物の侵入が少ないため、鉄鋼材料の腐食量が非常に少ない^{5), 6)}。暴露試験後に試験片表面のさびを除去し、試験片の重量減少を測定することにより、腐食量を求める従来の方法では、誤差が比較的大き

Fig. 2 Sketch of experimental box girder in Shimizu.

くなる可能性がある。このため、暴露試験片の腐食量の算出には、従来の試験片重量減少法以外に、試験片の重量増加法⁷⁾も用いた。

まず、回収した暴露試験片をデシケーター内において約2週間乾燥させた後に、暴露試験片の重量を測定し、暴露前後の重量変化量を算出した。暴露期間には、腐食反応のため、暴露試験片の重量は増大するが、ほこり等の不純物の付着によっても重量が増加する。本方法の精度を高めるため、暴露試験片と同じ場所に、腐食が発生しない同寸法の標準試験片(SUS304 ステンレス鋼)を設置し、標準試験片の重量変化を差し引いた暴露試験片の重量増加量により、腐食量を求めた。すなわち、腐食生成物を FeOOH と仮定し⁸⁾、次の式により試験片の腐食量を算出した。

$$\begin{aligned} Fe_{\text{corr}}(\text{g}) &= [(W_a - W_b) - \Delta W_{\text{SUS304}}] \\ &\quad \times Fe \text{ 原子量} / \text{OOH 式量} \end{aligned} \quad (1)$$

式(1)中で、 Fe_{corr} は試験片の腐食量、 W_a は暴露後の試験片重量、 W_b は暴露前の試験片重量である。また、 ΔW_{SUS304} は同じ場所と期間に暴露した同寸法のSUS304試験片の暴露前後の重量変化で、暴露期間に試験片表面に付着したほこり等の不純物の量を反映したものである。

上記の重量増加法を用いて腐食量を算出した後に、暴露試験片表面のさびを中性還元剤にて除去し、さび除去後の試験片の重量測定により腐食量を算出した。

3. 実験結果及び考察

3.1 温度・湿度の変化

実橋箱桁内外部の相対湿度と温度の分布をFig. 3に、実験用箱桁内外部の相対湿度と温度の分布をFig. 4に示す。Figs. 3と4には、各季節を代表する2月、5月、8月および11月の相対湿度と温度のすべてのデータを示

Table 2 Locations of sensors and specimen at experimental box girder.

Site	ACM sensor		Thermo-hygrometer	Specimen
	Sensor No.	Amount of salt, mg/m^2		
①	No.1	0.0	No.1	
	No.2	0.1		
	No.3	1.0		
②	No.4	0.0	No.2	
	No.5	0.1		
	No.6	1.0		
③	No.7	0.0	No.3	
	No.8	0.1		
	No.9	1.0		
④	No.10	0.0		
	No.11	0.1		
	No.12	1.0		
⑤	No.13	0.0		
⑥	No.14	0.0		
⑦	No.15	0.0	No.4	
⑧				○
⑨				○

している。

箱桁外部では、相対湿度と温度の分布範囲はわかるが、相対湿度と温度の相関は明白ではない。これに対して、箱桁内部(特に実験用箱桁内部)では、相対湿度と温度との相関性、すなわち温度の低下に従い、相対湿度が上昇する傾向が認められる。また、沖縄の実橋箱桁内部では、5月ごろに相対湿度が高く、一時的に100%に達することがある。この高湿度は主に外部大気温度の急激な変化によるものと考えられる。すなわち、外部大気温度の急激な変化に伴い、箱桁内部空気温度が低下したが、箱桁内部の水分(あるいは絶対湿度)は高い状態のままに保持されたため、相対湿度が一時的に100%になったと考えられる。一方、清水の実験用箱桁内部では、5月～10月の間に相対湿度はたびたび100%となる。これは、Fig. 4から分かるように、主に夜間結露によるものと考えられる。すなわち、夜間での温度の低下に伴い、相対湿度が高くなり、100%に達したと考えられる。

上述の箱桁内部の温湿度変化傾向を把握するため、温度と相対湿度を用いて箱桁内外部の絶対湿度を算出した。実橋箱桁内外部における2月と8月の絶対湿度の経時変化をFig. 5に示す。実橋箱桁内部で相対湿度と温度との相関が明瞭に見られた8月(Fig. 3)には、箱桁内部の絶対湿度の変化幅が小さかった。箱桁内部は完全な密閉環境ではないため、長期的に見れば、内部空気の絶対湿度は外部大気の絶対湿度の影響を受けている。

実橋箱桁および実験用箱桁内外の1年間の相対湿度分布をFig. 6にまとめる。実橋箱桁より、実験用箱桁内部では高湿度の期間が非常に長かった。

3.2 ACM センサの出力挙動

実橋および実験用箱桁内部のACM センサ出力と温湿度の経時変化をそれぞれFigs. 7と8に示す。なお、ここに示しているのは、実橋および実験用箱桁各々の内部の相対湿度が最も高い時期の1カ月間のデータである。

Figs. 7と8から分かるように、実橋箱桁と実験用箱桁

Fig. 3 Relationships between relative humidity and temperature inside and outside bridge's box girder (inside : No.1, Outside : No.4, in 2001).

Fig. 4 Relationships between relative humidity and temperature inside and outside the experimental box girder (inside : No.1, Outside : No.4, in 2002).

とも、箱桁内部の ACM センサの出力はセンサ表面の塩分付着量と相対湿度に密接に関係する。実橋箱桁内部では (Fig. 7), センサ表面の塩分付着量が 0 および 0.1 mg/m^2 の場合、有意な出力が見られなかったが、塩分付

着量が 1 mg/m^2 となると、相対湿度が 80% 以上の時には出力が認められた。また、実験用箱桁内部では (Fig. 8), センサ表面の塩分付着量が 0 mg/m^2 の場合、明瞭な出力が見られなかったが、塩分付着量が 0.1 mg/m^2 以上

Fig. 5 Absolute humidity inside and outside box girders (bridge's box girder in 2001).

Fig. 6 Annual distribution of relative humidity.

になると、出力が顕著に認められた。但し、塩分付着量が 0.1 mg/m^2 の場合には、相対湿度が 100% になったときに限り、ACM センサ出力が認められた。

ACM センサ表面の塩分付着量が同様な場合、実験用箱桁内部の ACM センサ出力は実橋箱桁内部より大きかった。これは実験用箱桁内部の相対湿度が高いだけでなく、後述のように、実験用箱桁内部に飛来不純物が侵入した可能性が高いためであると考えられる。

ACM センサの出力から算出した電気量 Q の月平均値を Fig. 9 に示す。実橋箱桁と実験用箱桁とも、箱桁内部の ACM センサ出力の電気量 Q は塩分付着量に大きく依存し、塩分付着量の増大に従い大きくなる。また、箱桁内部より、箱桁外部の ACM センサ出力の電気量 Q の方が大きい。これは、後述のように、外部 ACM センサ表面への飛来不純物量が多いためと考えられる。

Fig. 7 Temperature, relative humidity and ACM sensor's output inside real bridge's box girder in May, 2001.

Fig. 8 Temperature, relative humidity and ACM sensor's output inside experimental box girder in Aug., 2002.

(a) Bridge's box girder (Okinawa, 2001.1~2001.12)

(b) Experimental box girder (Shimizu, 2002.1~2002.12)

Fig. 9 Variation of daily average electricity Q with time.

3.3 飛来不純物の推定

鋼材の腐食は降雨の影響を除くと、結露状況（不純物付着量と相対湿度）に依存する。ACM センサの出力と相対湿度が分かれば、ACM センサ表面の不純物付着量を算出できる²⁾。箱桁内部への飛来不純物の付着挙動を把握するため、塩分付着がなかった ACM センサの出力と相対湿度を用いて、箱桁内外における飛来不純物の「海塩相当付着量」を求めた。算出した飛来不純物の海塩相当付着量の経時変化を Fig. 10 に示す。

実橋箱桁内部では、暴露開始から 4~5 年経過しても、No. 5 と No. 6 の ACM センサ表面に飛来不純物付着は認められなかった。しかし、No. 1 と No. 12 の ACM センサの表面には、不純物付着は一時的に認められたが、その後検出されなくなった。これは、箱桁内部を点検する時に外部から不純物が侵入し、ACM センサ表面に付着した後に、離脱した可能性があると考えられる。

実験用箱桁内部では、上下フランジに貼り付けた ACM センサ (No. 7 と No. 10) の表面に、暴露開始から約 9 カ月経過後に不純物の付着が見られる。西側のウェブに貼り付けた ACM センサ (No. 1) の表面に不純物付着が認められたのは約 11 カ月後であった。東側のウェブの ACM センサ (No. 4) の表面には、14 カ月経過しても不純物の付着は認められなかった。また、不純物の海塩相当付着量はいずれの ACM センサにおいてもほぼ同程度で、約 $1.0 \sim 10 \text{ mg/m}^2$ であった。

また、実験用箱桁外部では、海塩相当付着量は暴露開始から数日後に認められ、約 2 カ月後に定常となった。定常な海塩相当付着量は約 $10 \sim 100 \text{ mg/m}^2$ で、箱桁内部の 10 倍程度であった。ちなみに、沖縄の実橋箱桁外部

(a) Bridge's box girder (2001.1~2002.10)

(b) Experimental box girder (2001.11~2002.12)

Fig. 10 Variation of equivalent of deposited sea salt W_s with time.

の定常な海塩相当付着量は約 $100 \sim 1000 \text{ mg/m}^2$ で、清水の実験用箱桁外部の 10 倍程度であった。

以上のことから、実橋箱桁内面の一般部では、外部からの飛来不純物はほとんどないと考えられる。また、実橋箱桁の端部に相当する実験用箱桁内部では、約 9 カ月後に飛来不純物の付着が認められ、腐食環境は実橋箱桁内部の一般部より厳しいことが推察される。

3.4 鋼材の腐食速度

月平均の電気量 $Q (\text{C/day})$ より、式 (2)³⁾ を用いて箱桁内外の腐食速度 (CR) を算出し、その結果を Table 3 に示す。

$$\text{Log } CR = 0.378 \text{ Log } Q - 0.636 \quad (2)$$

Table 3 に示しているのは、箱桁内外における腐食速度の月平均値の最小値と最大値である。実橋箱桁内部では、ACM センサ表面に塩分付着が 0 と 0.1 mg/m^2 の場合、2001 年 1 月~2002 年 12 月までの 2 年間のほとんどの期間において腐食速度は検出の限界 ($2.82 \mu\text{m/y}$) 以下であった。ACM センサ表面の塩分付着量が 1.0 mg/m^2 の場合では、腐食速度は相対湿度が高い数カ月間に約 $4 \sim 5 \mu\text{m/y}$ であるが、2 年間のほとんどの期間内では検出の限界以下である。ACM センサ表面に塩分付着量が 10 mg/m^2 の場合では、腐食速度は相対湿度に大きく影響され、相対湿度が高い時期では最大 $10 \mu\text{m/y}$ 程度となるが、相対湿度が比較的低い時期では $3 \mu\text{m/y}$ 程度であった。ちなみに、箱桁外部の腐食速度は最大約 $212 \mu\text{m/y}$ であった。

塩分付着量が同様な場合、実験用箱桁内部の腐食速度は実橋箱桁内部より大きい。例えば塩分付着量が 1.0 mg/m^2 の場合、腐食速度は実橋箱桁内部では最大約 $5 \mu\text{m/y}$ であるのに対して、実験用箱桁内部では最大約 37

Table 3 Calculated corrosion rate inside and outside box girder.(unit: $\mu\text{m}/\text{y}$)

Objective	Time	Inside box girder								Outside box girder	
		0 mg/m ²		0.1 mg/m ²		1 mg/m ²		10 mg/m ²		Min.	Max.
		Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.		
Real box girder	2001	<2.82*	3.55	<2.82*	3.60	<2.82*	5.10	4.01	10.60	44.91	116.36
	2002	<2.82*	3.50	<2.82*	3.56	<2.82*	4.51	2.98	10.21	50.54	212.45
Experimental box girder	2002	<2.82*	7.34	<2.82*	14.26	2.87	37.75	—	—	17.17	49.48

*: The limited minimum value resulted from ACM sensor.

$\mu\text{m}/\text{y}$ となる。これは、主に相対湿度の相違によるものと考えられる。

暴露試験片により求められた腐食速度を Fig. 11 に示す。試験片表面に塩分付着量が 0 と 1.0 mg/m² の場合、実橋箱桁と実験用箱桁とも腐食速度は 1 $\mu\text{m}/\text{y}$ 以下である。実験用箱桁内部では、暴露試験片から得られた腐食速度は ACM センサによる推定値よりかなり小さかった。これは、試験片が箱桁中央部に設置され、外部からの飛来不純物の影響がほとんどなかったためと推測される。

塩分付着量が 10 mg/m² の場合、実橋箱桁と実験用箱桁とも、1 年間の腐食量は約 1.5 μm である。ACM センサにより得られた腐食速度と比較すると、暴露試験片から得られた腐食速度は年間平均値が小さい。しかし、最初 6 カ月間の暴露試験片の腐食速度を比較すると、暴露試験片と ACM センサから得られた腐食速度はほぼ同程度であることが分かる。

塩分付着量が 100 mg/m² の場合、腐食速度は実橋箱桁内部で約 3.5 $\mu\text{m}/\text{y}$ 、実験用箱桁内部では約 5 $\mu\text{m}/\text{y}$ であ

Fig. 11 Thickness reduce of the specimen using mass gain method.

った。この場合は、塩分付着量が 10 mg/m² の場合と同様に、腐食速度は暴露試験開始からの数カ月間では非常に大きい、その後、顕著に低下した。

重量増加方法と重量減少方法による腐食速度の相関性を Fig. 12 に示す。両方法で得られた腐食速度には良い相関性が認められる。

また、試験片の表面に塩分付着量が少なく、腐食量が小さい場合では、両方法で得られた腐食速度はほぼ同じであったが、試験片の表面に塩分付着量が多く、腐食量が比較的大きい場合では、重量減少方法より重量増加方法で得られた腐食速度の方がやや小さかった。

3.5 箱桁内部の腐食支配因子に関する考察

大気中における鉄鋼材料の腐食は薄い水膜下での酸化還元反応過程であるため、鋼材表面の濡れ状態（すなわち水膜の厚さ）が最も重要であることは言うまでもない。鋼材表面における水膜の厚さは鋼材表面の相対湿度のみではなく、鋼材表面の不純物付着量にも関係する。篠原によると、水晶微小天秤法（QCM）を用いて、鋼材表面の吸着水量におよぼす海塩付着量と相対湿度の影響を検討した結果、海塩付着量が 1.0 mg/m² 以下であれば、相対湿度が 90% であっても、吸着水量が 10 mg/m² 程度であることが分かった⁹⁾。この吸着水量を水膜の厚さに換算すれば約 0.01 μm となる。すなわち、鋼材表面の不純物付着が 1.0 mg/m² 以下の場合、相対湿度が 90% であっても、水膜の厚さが 0.01 μm 以下であり、腐食はほとんど発生しないと考えられる。実際、箱桁内部における暴露試験では、試験片表面の塩分付着量が 0 と 1.0 mg/m² の場合、鋼材の腐食速度が 1 $\mu\text{m}/\text{y}$ 以下であった。したがって、箱桁内部において、外部からの水の侵入がない場合、不純物付着量が腐食に対して最も重要な影響因子であると考えられる。

一方、箱桁内面の不純物には、供用前（すなわち製造から架設完了までの期間）に付着したものと、供用中に侵入したものがある。箱桁内部の一般部では、Fig. 10 より分かるように、飛来不純物の侵入が少なく、箱桁内面

Fig. 12 Comparison of corrosion rate calculated using mass gain method and mass loss method.

Table 4 Amount of chloride ion and sulfuric ion on the surface of box girder. (unit : mg/m²)

Location		Box girder at coast area of Okinawa		Box girder at countryside of Hokkaido	
		Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
Inside	Web	0.5	8.2	0.11	0.35
	Floor	140	110	0.14	2.1
	Opened corner	29	180	—	—
	Closed door	7.8	51	0.04	0.62
Outside	Web	3.4	8.7	—	—
	Closed door	55	500	0.24	5.1

の不純物付着量は主に供用前に付着したものと考えられる。供用前における箱桁内部への不純物付着量は、Table 4 に示すように、橋梁の架設現場により異なり、田園環境の箱桁内面では非常に少ないが、海浜環境の箱桁内面では比較的多い。また、海浜環境の箱桁内部では床部の不純物が非常に多いことから、箱桁内面への不純物付着は、主に架設時の作業者の出入りによるものと考えられる。供用前に箱桁内面へ付着した不純物付着量が少ない場合、前述のように腐食速度は非常に小さいが、この不純物付着量が比較的多い場合では、腐食進行におよぼす不純物影響は以下のように考えられる。

Fig. 11 に示すように、塩分付着量が比較的多い（例えば 10 および 100 mg/m²）試験片では、暴露開始からの 6 カ月間に腐食速度が大きい。この期間の腐食速度は ACM センサによる推定結果とはほぼ同程度である。しかし、6 カ月後では腐食の進行が緩やかとなり、年間の腐食速度は比較的小さかった。この腐食速度の低下理由として、箱桁内面へ飛来不純物の付着が非常に少なく、継続的な不純物の累積はないことなどが考えられる。すなわち、供用前に箱桁内面へ付着した不純物の腐食におよぼす影響は限定的であると考えられる。実際、箱桁外部に数カ月暴露した試験片を箱桁内部に移設すると、腐食の進行がほとんど停止していたことが報告されている⁵⁾。

供用前に箱桁内面へ付着した不純物より、供用中に侵入する飛来不純物の方が腐食の進行に及ぼす影響が大きいことから、橋梁箱桁内部、特に箱桁端部の腐食を抑えるためには、マンホール、ドア部や現場継手部などの開

口部の密閉性を向上させ、飛来不純物の侵入を阻止することが重要であると考えられる。

5. ま と め

実橋および実験用箱桁内部に ACM センサおよび暴露試験片を設置し、箱桁内部環境の腐食性を評価した。得られた結果を以下にまとめる。

1) 橋梁箱桁内部の相対湿度は外部大気湿度と箱桁内部の温度変化に影響され、場合により 100% に達することがある。しかし、箱桁外部に比べると、箱桁内部の相対湿度は比較的低い。

2) 箱桁内部の一般部では飛来不純物の侵入がほとんどなく、箱桁内面への不純物付着量は主に、製造から架設完了までの期間に付着したものである。しかし、箱桁入口近傍では飛来不純物が侵入する可能性がある。

3) 箱桁内部のように鋼材表面に不純物付着量が少ない場合、相対湿度が高くても、鋼材の腐食速度は非常に小さい。また、供用前に箱桁内面へ付着した不純物は、初期段階では腐食を促進させるが、時間の経過に伴い、その影響は軽微となる。

4) 箱桁内部のような緩やかな腐食環境においては、重量増加法による暴露試験片の腐食速度の推定が有効である。

参 考 文 献

- 1) S. Motoda, Y. Suzuki, T. Shinohara, S. Tsujikawa, W. Oshikawa, S. Itomura, T. Fukusima and S. Izumo, *Zairyo-to-Kankyo*, **44**, 218 (1995).
- 2) S. Motoda, Y. Suzuki, T. Shinohara and S. Tsujikawa, *Zairyo-to-Kankyo*, **47**, 651 (1998).
- 3) W. Oshikawa, S. Itomura, T. Shinohara and S. Tsujikawa, *Zairyo-to-Kankyo*, **51**, 398 (2002).
- 4) T. Shinohara, Y. Fujino and S. Tsujikawa, Proc. 37th Japan Conf. Materials and Environments, p.279, JSCE (1990).
- 5) P. R. Vassie, *British Corrosion Journal*, **22** [1] 37 (1987).
- 6) Y. Fujino, *Boshoku-Gijutsu* (presently *Zairyo-to-Kankyo*), **38**, 546 (1989).
- 7) E. Johansson and C. Leygraf, *British Corrosion Journal*, **34** [1] 27 (1999).
- 8) T. Misawa, *Boshoku-Gijutsu* (presently *Zairyo-to-Kankyo*), **32**, 657 (1983).
- 9) T. Shinohara, *J. Mater. Test. Res. Assoc. Jpn.*, **42** [3] 181 (1997).

(Manuscript received May 27, 2004;
in final form August 26, 2004)

要 旨

準密閉環境での鋼材の腐食挙動を把握するため、本研究では、実橋および実験用鋼製箱桁内部に ACM 型腐食センサ、温度・湿度センサおよび一般構造用炭素鋼暴露試験片を設置し、箱桁内部のような、飛来不純物のほとんどない準密閉環境の腐食性を評価した。

箱桁内部の相対湿度は箱桁外部より低い、場合により 100% になることがある。また、箱桁端部では不純物付着の可能性があるが、一般部では飛来不純物の侵入はほとんどない。箱桁内部では、表面に不純物付着のない鋼材の腐食速度は極めて小さい。供用あるいは暴露前に付着した不純物は、初期段階で鋼材の腐食を促進させるが、時間の経過に伴い、その影響は軽微となる。これらの実験結果より、箱桁内部のような準密閉環境における鋼材の腐食要因が明らかになった。

キーワード 大気腐食、不純物付着、相対湿度、ACM 型腐食センサ、準密閉環境、橋梁箱桁