

鋼ボックス内部の腐食環境と防錆について

A measurement on corrosion environment inside steel box structures
and their corrosion protection

藤野陽三*、 上田雅俊**、 延藤遵***

Yozo FUJINO, Masatoshi UEDA, and Jyun NOBUTOU

A measurement on corrosion environment inside steel box structures was conducted at the Oshima Ohashi bridge, Ehime. This paper describes preliminary results obtained from the measurement. Clean steel plates (10cm × 10cm) were placed inside the steel box towers and the steel box girder. One-year measurement indicates that corrosion rate inside the box girder is extremely low. The corrosion speed inside the steel box tower is also low but somewhat larger than that inside the steel girder. Holes in the towers for ventilation seems to be a cause of corrosion inside the tower. This low corrosion rate inside the box structures implies that necessity of heavy-duty coating should be reconsidered. Alternatives to coating for preventing inside of steel box structures from corrosion are also reviewed.

1. まえがき

鋼橋の防錆対策として、耐候性鋼板の使用、亜鉛メッキ橋の採用が漸増しているが、鋼橋の防錆は塗装により行なうと考えるのが橋梁界では普通である。確かに塗装は色彩をつけることができるという利点はあるものの、塗り替えが必要であり鋼橋のライフタイムコストから見たとき塗装に関わる費用は無視しえないものである。

鋼橋では、ボックス構造は外面塗装面積が少ない上に塗装が容易、美観上一般的に優れている等々の利点があり、今後ますます採用されると予想される。現状では外側は勿論、ボックスの内側も防錆のために塗装（場合によっては重防食塗装）されている。

ボックス内は漏水により滞水しうる、湿気がたまりやすい、つまり腐食環境としては必ずしもよくないと考えられている面がある。しかし、鋼ボックス内部は程度の差はあるものの密閉構造に近く、錆にとって好ましくない塩分などの不純物質が入り込みにくく、漏水がないかぎり直接雨水があたることもない。したがって外側に比べれば腐食環境はよく、かりに錆が生じたとしてもそれが有意な速度で進行するとは考えにくいという見方も一方では成り立つ。このように考えるとボックス内部の防錆については改善の余地があると思えてくる¹⁾。

* Ph.D 東京大学助教授 工学部総合試験所 (〒113 東京都文京区弥生2-11-16)

** 東京大学大学院 土木工学専攻

*** 工修 清水建設 土木本部設計部

そこで本研究では「我国の鋼ボックス内部の腐食環境がどのような状態にあるのかを調べ、現行の防錆塗装の見直し、あるいはそれに代わるより低コストの防錆法の模索」を目的として、私どものグループが行った実測、調査を報告する。

なお、現実のボックス構造内部では漏水による帯水が原因と思われる腐食が報告されている。本研究では、このような帯水による腐食については検討外にし、すなわち密閉度の高く漏水が生じないボックス構造のみを対象にしていることをあらかじめお断りしておく。

2. 鉄の錆と鋼ボックス内部の腐食環境について — 既往の知見から —

よく知られているように鉄が錆びるのは空気中の酸素と水と鉄との間に酸化反応が生じるからである。酸素の存在だけでは錆は生じず水が必要である。

鉄の表面に水がつくのは、鉄に雨水等が直接あたるか、もしくは結露の形で空気中の水分が表面につくかのどちらかである。理想状態では相対湿度（RH）が100%とならないと結露は生じないのであるが、鉄表面上に塵、ほこり、あるいは塩分などの吸湿性の物質が付くと、100%より低い相対湿度で結露が生じ、錆の発生する状況が整う。一般に大気中にさらされた鉄は、塵、塩分そして SO_2 などの大気汚染物質が付着すると相対湿度が50～70%で結露が生じ、錆の反応が始まると言われている。

鋼ボックス内部は、密閉度にもよるが外気に常にさらされているわけではなく、大気に含まれている塵、ほこり、海塩成分、大気汚染物質など錆にとって好ましくないものが一般に入りにくい、そして供給されにくい構造になっている。このような状況では、かなり高い相対湿度となっても鋼表面に結露が生じないことが考えられ、錆が全く進行しないまでも速度が遅いと想像される。

鋼橋のボックス構造内部の腐食環境について論じた論文は世界的にもほとんどなく、著者らの知る範囲ではVassie, P. R. が英国腐食学会誌に最近発表した論文（文献2）のみである。Vassieは鋼橋を対象に鋼ボックス、アンカレッジ、直接風雨のあたらない部位の腐食進行量をイギリス各地で数年にわたり実測し、極めて重要な資料を提供している。鋼ボックス内部の腐食環境に関して得られた知見として重要と思われるものは

- 1) 鋼ボックス桁内の相対湿度の変化は外に比べ格段に少なく、一日を通じて約80%（外は40～90%の間を変動）とコンスタントに近い（後述図7）。
- 2) 鋼ボックス内部に置いた抵抗線プローブにより6年間計測した錆の進行速度は $0.12\mu\text{m}/\text{年}$ 以下（単純に比例計算すると100年で 0.012mm 以下）と極めて低い。これは相対湿度を20%に一定に保った場合の錆の進行速度にほぼ匹敵する。ちなみに田園地帯におかれ外気にさらされた状態での錆の進行速度は $36\mu\text{m}/\text{年}$ でボックス内の約300倍である。
- 3) 海岸地方において2ヶ月間大気暴露により錆を発生させた鋼片をボックス内に入れたところ錆の進行速度は10分の1以下（約 $4\mu\text{m}/\text{年}$ ）に低下した。

である。つまり、ボックス内では錆がほとんど生じず、また架設中などにボックス桁（タワー）内にかなり多量の塩分が付着しても閉合してしまえば錆の進行速度は格段に低くなるということである。

Vassieの論文はボックス内部の腐食環境について詳しく検討している。しかし「金属の腐食」は学問、技術として経験的な面も多分に残しており、気候条件あるいは細かい点で設計の異なる我国の鋼ボックスにおいて同じことが言えるのかどうかには実証的な研究が欠かせない。また、ボックス桁のように上面がアスファルトで覆われているのとは異なり、外面がすべて大気に曝されている吊形式橋梁の鋼製ボックスタワーはVassieの研究では対象外とされている。

3. 大島大橋での腐食環境調査

3. 1 裸鋼板による腐食度調査

本四公団の尾道今治ルートにおいて1988年1月完成した大島大橋（セントースパン560m）は我国の大規模吊橋ではじめて偏平ボックス補剛桁を採用した（図1、2）。タワーもボックス構造で89mの高さを有し、橋自身は海峡上に架かっている。タワーの現場接合はメタルタッチとボルトの併用構造である。補剛桁の鋼床板の現場接合は溶接され、路面から水が洩れ入るようなことはない構造となっている。

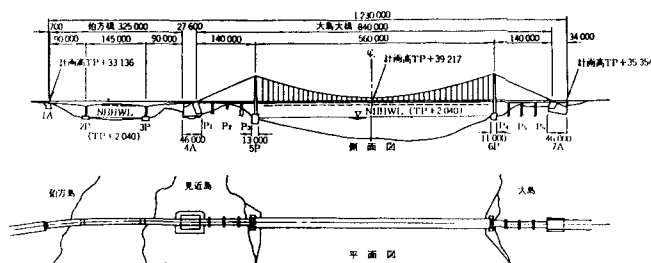


図1 大島大橋

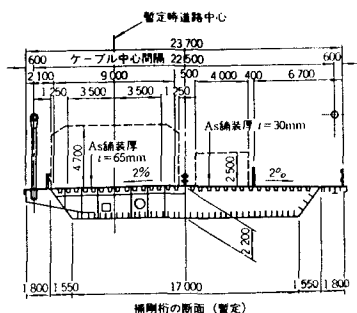


図2 大島大橋ボックス補剛桁

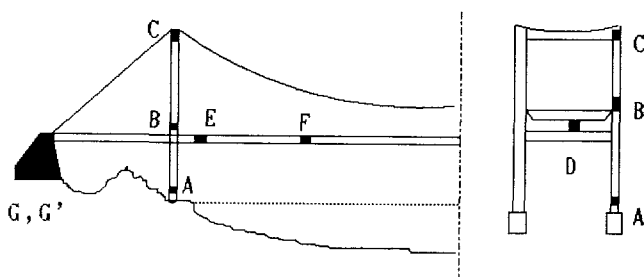


図3 測定位置（測定点A, B, C, E, F, Gはボックス内、D, G'は外気に接する点）

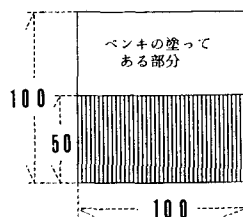


図4 試験用鋼板（単位mm）

錆の進行速度の調査としては種々の方法があるがここでは裸鋼板を一定期間放置し、その錆による重量減を測定する方法を採用した。この方法は時間は要するが、腐食環境を調べる方法としては簡便でかつ一般的な方法である。測定は図3に示すように、塔内、桁内、アンカレジ内、そして外気に触れるが雨はほとんどあたらない外部に、全く錆のない鋼板（巾10cm*10cm、厚さ0.3mm）を床、壁、床隅角部、空中に置き（アンカレジ内部、外気に触れる場所では空中のみ）、その腐食進行を調べる形で行った。鋼板は片面5cm*10cmの面積を残して防錆塗装を行い（図4）それを強力磁石により壁、床等に貼つけた。強力磁石により貼りつけられた鋼板はほぼボックス外板に密着しており、外板と温度条件などはほぼ同じと考えられる。なお、空中に紐で吊したものについては5cm*10cmの大きさの無塗装面を両側に設けている。用いた鋼板は約150枚である。使用した鋼板に含まれる炭素量は0.11%であり、軟鋼である。

1988年7月に置いた鋼板を1989年1月、7月の2回に分けて回収した。鋼板の錆をワイヤブラシで落とし、あらかじめ測っておいた重量との差、すなわち重量減を測定した。その結果を表1に示す。同じ部位で2枚以上のサンプルがあるときにはその平均値を記入してある。なお、錆落しにワイヤブラシを用いる場合、さびていない部分をも若干削り落としてしまうため、そのための重量減がある。この重量減についてはキャリブレーションを行い、その値で補正したのを表1には示してある。また、表1の6ヶ月データからの侵食度

表1 大島大橋における裸鋼板の6ヶ月後、1年後の腐食状況（侵食度：10-3mm/年）

設置場所		侵食度 (6カ月データ) ($\mu\text{m}/\text{year}$)	75年の 侵食深さ (mm)	侵食度 (1ヶ月データ) ($\mu\text{m}/\text{year}$)	75年の 侵食深さ (mm)	目視による 観察
塔頂 (C点)	空中	0	0.0	1.4	0.11	全面に錆
	壁	1	0.1	0.9	0.07	
	床	1	0.1	0.8	0.06	
	隅角部	2	0.2			
塔路面高さ (B点)	空中	2	0.1	3.1	0.23	全面に錆
	壁	3	0.2	1.8	0.14	
	床	3	0.2	2.6	0.20	
	隅角部	4	0.3			
塔基部 (A点)	空中	3	0.2	1.5	0.11	全面に錆
	壁	3	0.2	1.9	0.14	
	床	2	0.1	1.7	0.13	
	隅角部	5	0.4			
桁(塔付近) (E点)	空中	0	0.0	0.0	0.00	錆なし
	壁	0	0.0	0.1	0.01	
	床	0	0.0	0.1	0.01	
	隅角部	0	0.0	0.1	0.01	
桁(1/4点) (F点)	空中	0	0.0	0.0	0.00	錆なし
	壁	0	0.0	0.0	0.00	
	床	1	0.0	0.1	0.01	
	隅角部	0	0.0	0.0	0.00	
外部 仕切りの中 (D点) 通風が良い		7	0.3			全面に密な錆 全面に密な錆
		7	0.5			
外部 雨が当たる (D点) 他調査平均		130 *	9.6	130 *	9.6	1日で赤錆
		54 **	4.1	54 **	4.1	
アンカレジ室内-空中 (屋根の下) 室外-空中		3	0.2	1.6	0.12	全面に錆 全面に密な錆
		12	0.9			

*印) 外部水平材の直接雨が当たるところの鉄片(*印)は1日で回収、表中の値はその厚さ減を365倍した値である。

**印) 外部の環境を表わす指標がないので他調査(屋外暴露試験)のデータを引用した。

の有効数字が1桁低いのはブラッシングによる錆落しの精度が低いためである。

表中の*印のついたものは、設置後すぐに雨が降り赤い錆汁がでるほどであったので1日で回収し、それぞれ1年の値に換算している。これはあくまでも参考値である。結果は腐食速度の表示法の一つである侵食度（1年間の厚さ減： $\mu\text{m}/\text{year}$ 、 $1\mu\text{m}=10^{-6}\text{m}=10^{-3}\text{mm}$ ）で示した。

錆の進展は 外部に置かれた鋼板で最も速い。設置後すぐに雨が降りたった1日で赤い錆汁がでており、表面は真茶色であった。同じ外部でも直接雨の当たらないところは錆の進展はそれほど速くないが、鋼板の表面は回収時には全面焦げ茶色であった。

つぎに錆の進展が速いのは塔内部で、同じ位置では隅角部の鋼板に錆が多い。塔内部では鉛直方向で下から順に錆が多い傾向がある。塔内部の鋼板の表面の色はどれも全面焦げ茶色であったが、上部へいくほど錆の層が薄くなっていた。それに比べ、外部（D点）に設置したものの方が密に錆が詰まっているのが分かった。なお、東西南北各々の方向の壁面の錆の量についても比較検討したが有意な差は見られなかった。データは載せていないが塔頂（塔内C点）の東西南北それぞれの壁に設置した試片の間には腐食量の差があった。南北方向に設置したものより東西方向に設置したものが錆がより少なく、まだ部分的に鉄に無錆の部分が残っていることが見て取ることができた。

最も腐食速度の遅いのが桁内部である。1年を経過しても鋼板の表面はほとんど変わっておらず、光沢が衰えているか、ところどころにぼつぼつと錆があるかないかという程度であった。桁内部の腐食速度はすべて $1\mu\text{m}/\text{year}$ 以下である。ただし、これはあくまでも錆のない鋼板の1年間のデータによるものである。その後、あらかじめ錆を人為的に作った鋼板を4ヶ月放置したところ錆の進行がみとめられた。詳細は別の機会に報告するが、それでも $4\mu\text{m}/\text{year}$ のオーダーのようであり、錆の進行としては遅いといえる。

アンカレッジ室内に関しては密室となっているG点の腐食速度は塔内部桁位置A点より少し錆の進行が速い。外気と接している場所G'点（アンカレッジボックス外ではあるがコンクリート壁に囲まれており直接風雨は当たらない）は水平材上外部の雨の当たらないD点より少し錆の進行が遅い。鋼板の表面はどちらも全面焦げ茶色であった。外部D点は雨が当たらないところにおいてあるためか、錆の侵食度が一般に言われている値より小さい。

さて、屋外暴露試験での錆の進行速度は中村らの調査⁵⁾で全国平均侵食度は $54\mu\text{m}/\text{year}$ （1年間の計測による）、Vassieらの調査¹⁾では田園部で $36\mu\text{m}/\text{year}$ （3年間の計測による）という報告がなされている。海岸部ではおそらく $100\mu\text{m}/\text{year}$ のオーダーであろう。これらの数字と比べると、ボックス内部の錆の進行速度は非常に遅く、錆のない鋼板ではタワー内部で1/10以下、桁内部では1/100以下となる。ただし、錆を予め作った鋼板ではこれより大きい、それでも数 $\mu\text{m}/\text{year}$ のオーダーと推定され、やはり小さいといえる。

3. 2 不純物の蓄積量調査

海塩粒子に含まれるNa、Mgなどは吸湿性があり、鋼表面に付着すると結露の臨界湿度を下げる働きを有する。したがってこれらの不純物が付着すると錆の進行が速まる。

蒸留水で濡らした濾紙（ 113cm^2 ）を橋梁各部の表面に30分間はりつけ、それを脱イオン水100ccに溶かし、ICP分光分析装置を用いて海塩粒子の主成分の1つであるMg、Naの蓄積量を測定し、さらにその値から海塩粒子量を計算した。なお、ここで求めたMg、Na、海塩粒子量は大島大橋が建設されてからの全蓄積量とみなすことができる。結果を単位 100cm^2 （ dm^2 ）あたりの量（ mg/dm^2 ）として表2に示す。表中のNa/Mg比は参考として示したもので、海水の場合は約8である。

床における測定結果が場所における差を顕著に表わしている。海塩粒子の蓄積量は外部で最も多い。次に塔内部での海塩粒子の蓄積量が多く、鉛直方向で下から順に多い。最も海塩粒子の蓄積量が少ないのが桁内部である。

同じ場所では壁の海塩粒子の蓄積量は床に比べて少ないのは、壁面は垂直であるため付着しにくいからで

表2 大島大橋の各位置における不純物(Mg, Na)の蓄積量

(平成元年7月実施分、単位: mg/100cm²: dm²=100cm²)

場所	Mg 量 mg/dm ²	Na 量 mg/dm ²	Na/Mg比	海塩粒子量 mg/dm ²
塔頂 (C点)	東壁	0.04	4.71	0.64
	北壁	0.04	4.13	0.61
	東床	0.10	3.44	1.33
	北床	0.07	5.07	1.19
	隅角部	0.08	4.21	1.31
塔路面高さ (B点)	壁	0.03	4.03	0.52
	床	0.11	5.10	2.04
	隅角部	0.11	7.32	2.64
塔基部 (A点)	壁	0.04	4.19	0.63
	床	0.19	5.49	3.52
	隅角部	0.13	9.41	3.66
桁(塔付近) (E点)	壁	0.04	5.78	0.74
	床	0.03	5.99	0.66
桁(1/4点)	壁	0.07	3.36	1.00
	床	0.07	5.86	1.34
外部	壁	0.07	4.47	1.16
	床	0.24	4.04	3.66

表3 海塩粒子法による大島大橋における飛沫塩分量(平成元年9月実施)

場所	Mg量mg mg/dm ²	Na量mg mg/dm ²	Na/Mg比	海塩粒子量 mg/day/dm ²
タワ－基部	0.03	0.11	4.01	0.014
桁内部	0.02	0.09	4.32	0.011
外部	0.08	0.25	3.29	0.034

あろう。

海塩粒子法による測定結果を表3に示す。これはJIS-Z2381による方法で、100mm×100mmの捕集窓を持つ木枠にガーゼを2つ折りにして枠に取り付け、これを1ヶ月間垂直に暴露し、ガーゼに付いた海塩粒子量を測定したものである。外部では雨が直接あたらない通風のよいところで測定した。表からわかるように外部に比べ、タワー内部、桁内部は海塩粒子が少ない。

3. 3 温度・湿度測定

1989年7月22日より一週間、自記式温度湿度計によりタワー内（塔基部A点、塔頂C点）、桁内（F点）、外気に曝されている側径間検査路上（D点、タワーに近いところの橋桁の下で雨は直接には当たらない）で温度と相対湿度を連続的に測定した。その結果を図5に示す。自記式温度湿度計の誤差は温度、相対湿度ともに±5%である。

まず気温について述べる。昼間は塔、桁内部の気温は外部に比べて総じて高めとなり、特に桁内では5℃以上高く、38℃近くまで上昇する。これは鉄の比熱が低く温められやすいこと、桁では特に黒いアスファルトがあるため熱を吸収しやすく、それらにより桁内、塔内の空気が暖められたことが原因と考えられる。外部の気温には短周期の微妙な変動が認められるが、これは海上約37mの風通しの良い位置で測定したため風が影響したと考えられる。一方、塔内、桁内は直接風が当たらないため気温の変動はゆるやかである。夜間の気温は塔、桁内部とも外部と同じ程度まで下がっている。塔頂に近い内部A点の温度は少し高めである。

次に相対湿度については、昼間、気温の上昇とともに湿度は下がり、塔内部は外気と同じ程度まで、桁内部ではそれより数%低くなる。夜間気温が下がるため、相対湿度は上昇し、外部（D点）・塔基部（A点）では85%程度まで、桁内（F点）・塔頂（C点）ではそれより2～5%程度低めのところにとまっている。相対湿度の変化が気温の変化とほぼ1対1の関係にあるのは、空気中の水蒸気量が変わらない限り相対湿度は気温によって決まるからである。

今回のデータは、ボックス内部の相対湿度は外部より少し低めであるが、桁内部の温度・湿度は外気の変動にかかわらず大きな変動はないというVassieらによる調査結果（図6に示す）とは大きく異なり、湿度は50～90%の間を大きく変動している。なお、図6の測定は文献2には明記されていないが、セバーン橋（イギリス）の補剛桁でおこなわれたものとのことである（Vassieからの私信による）。この違いが日本とイギリスの気候条件の差によるとするには大きすぎる。Vassieの結果によると鋼ボックス内では温度がほとんど変動しないことになるが、このようなことが起こるとは考え難いというのが実測をした上での印象である。

3. 4 塔内と桁内にみられる侵食度の違い

同じボックス内部であるにもかかわらず、塔内部と桁内部では錆の進行速度に1オーダーかそれ以上の有意な差があることがわかった（表1）。桁内の湿度は塔内、外部に比べてそれほど違うわけではなく（図5）、この差の原因を相対湿度の違いに帰するのは無理がある。

この原因の1つとして塔内部と桁内部における外気の侵入度（密閉度）の違いが考えられる。塔には基部、桁位置に2つずつ、水平材のところには1つ、管理用入口があり、そこにはネットは張られているが通気する窓（25cm×25cm）がついている（図7）。また桁下と塔頂の水平材の上には通気口が2個ずつ

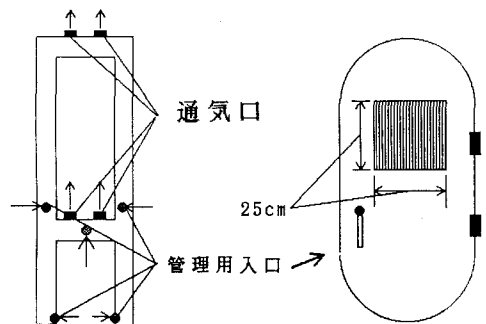


図7 大島大橋タワーにおける通気口の仕組み

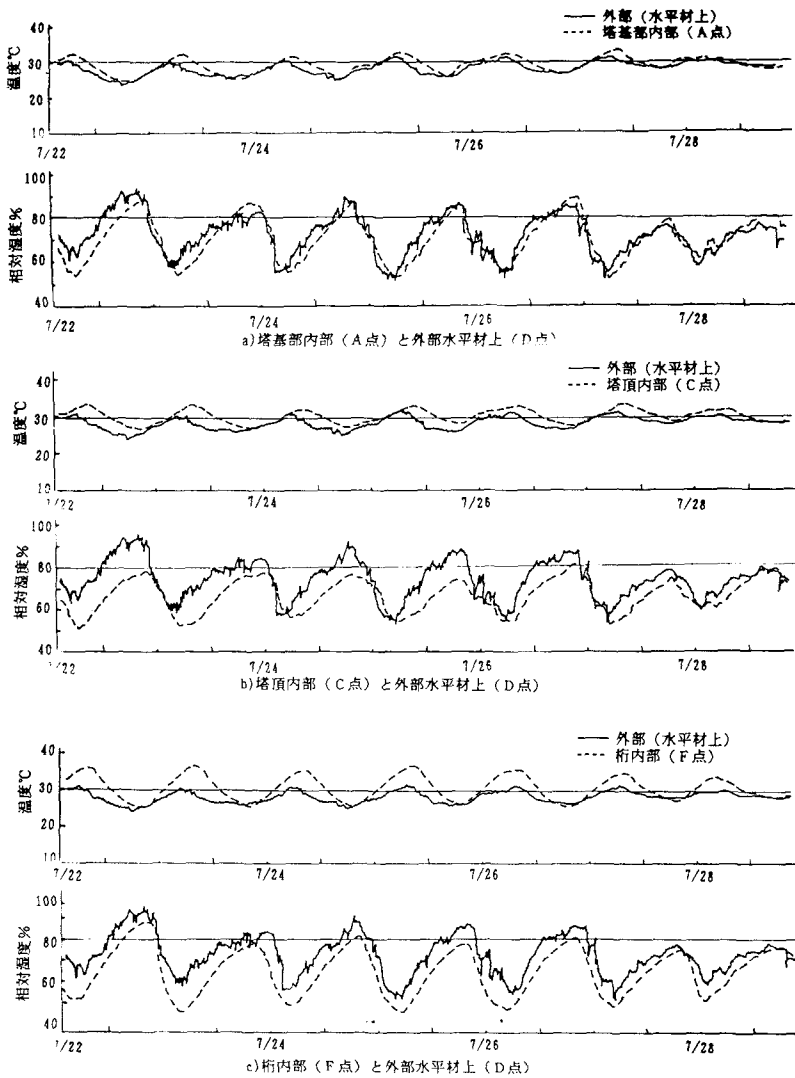


図5 大島大橋での温度、湿度の測定

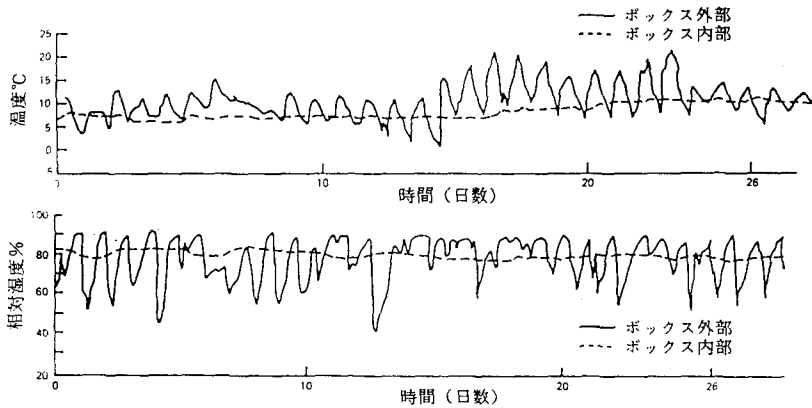


図6 セバーン橋 (イギリス) における温度、湿度の測定 (Vassieらによる)

設けられており、空気がこれらの窓、通気口を通じて流れる仕組みになっている（図7）。事実、煙突効果によって空気は流入し、それは塔頂付近でも肌でかすかに感じられるものであった。これらの窓、通気口により塔基部付近の海塩粒子を含んだ空気を吸い上げていると考えられる。表2に示された海塩粒子の量は桁内部より塔内部の方が多く、塔内部では下から順に多い。また、3. 1で述べたように塔頂内部（C点）においては東西と南北方向に腐食量の差が見られたが、南北方向に設置した試片は補剛材の陰にかくれ構造上空気が流れにくくなっている。ここでも東西南北方向床面上で測定した海塩粒子量は南北方向が少なく、錆量と整合的である。

一方、桁にも水抜き用の小さい穴（径1 cm程度）がところどころにあいているが、構造そのものが水平のため、外から空気が入って常時流れるようなことは考えられない。事実、桁内に入ってみると中の空気は正しく静止している感じであった。不純物の量が少ないのはこのためであろう。

これらの事実から錆の進行速度と付着物の量の間に密接な関係があると考えられ、塔の通気口、窓を閉じることにより外気の侵入を断てば塔内部の錆の進行速度を桁内部の程度にまで落とすことも可能かもしれない。この考えに基づき現在我々は、大島大橋と名港西大橋において一方のタワーの通気口を閉じ、他方は閉じない状態で裸鋼板による実測を行い、密閉度の影響を調べている。平成2年1月に、4ヶ月放置した鋼片を回収したが、それによると両者の錆量には明らかに差がある。結果は別の機会に発表したい。

我が国の吊型式橋梁のタワーでは通気のために意図的に通気口を設けるようであるが（文献6）、腐食環境の面からみたときには疑問があり、海上橋の場合には再考する必要があるのではないかと考えている。

また、横須賀走水の海岸近くにドラムカンを用いて同様に鋼板の腐食度を調べる実験を行っている。ポンプを使って換気回数N（1時間に入れ替わる空気の総容積に対する割合）を0.02に保ったドラムカン内部では1年近く実験を続けているが鋼板表面に錆はほとんど生じておらず、綺麗なままである。同じ換気回数で化学物質（KCl）の飽和水蒸気圧を利用して相対湿度を86%前後に保ったドラムカン内部でさえ鋼板表面にはまばらに錆ができる程度であり、この腐食量は大島大橋の桁内部と同じか少し多い程度である。ドラムカンの熱容量は橋と比べると圧倒的に小さく夜間輻射などの影響を受けやすいため結露が生じやすい（事実、結露が生じた形跡が認められる）。したがって錆も発生しやすいはずである。にもかかわらず錆がほとんど発生しないというのは、大気の入出りを減らし海塩粒子の侵入を防げば、錆の進行は極めて遅くなることを意味している。

4. 鋼ボックス内部の防錆

4. 1 序

今回の測定から、水もれ、あるいは汚染物質、塩分などを含む外気が多量に侵入しない限り、すなわち密閉性が高ければ鋼ボックス内部の腐食環境は非常によい、すなわちさびの進行が遅いことが判明した。これはVassieの論文（文献1）の結果とも整合的である。

大島大橋のタワーあるいは桁にしてもその規模が大きく中の空気の熱容量が大きいため、容易には結露が生じない状況にあり、そのことが低い侵食度につながった面もあるかもしれない。同橋のメンテナンスを担当している技術者からも、点検中にタワー、桁内に結露を見つけたことはないときいている。通常の規模のボックスの内部あるいは気象環境の著しく異なる場合にもさびの進行が著しく遅いかどうかについてはまだ疑問は残るが、1オーダー異なるようなことはないであろう。

ある橋梁の保全担当の方によると、すでに供用されているボックス構造で、水もれによる滞水で内面のさびが進行した例はあるが、内部は概して問題がないとのことである。確かに水もれ以外の原因で内面の塗装がはげ、さびが生じた例もあるようであるが、稀のようであり、これが本当に結露によって生じたかどうかは定かではない。現行のボックス内部の腐食発生状況とその原因の把握はボックス内部の防錆を考える上で、

もう一つの重要なポイントと考えている。

ところで、防錆法としては塗装によるのが鋼橋では一般的であるが除湿法というのもありいろいろな分野で使われているが、本格的にこの方法を橋梁に適用している例が世界に一つだけある。それはファロー橋（デンマーク）であり、それを少し紹介しておく。

4. 2 ファロー橋の除湿コントロールによる防錆^{7,8)}

同橋は斜張橋部をふくめ全長1.7kmの完全溶接逆台形断面ボックス構造となっている（図8）。表4（文献9）に示すような種々の断面の中で外側塗装面積の最も少ない逆台形断面が選ばれた。しかし、外側の塗装面積が8万m²に対し、内側の塗装面積はダイヤフラム、リブなどのために37万m²にもものぼるため、リトルベルト橋で試験的に使われていた除湿機を導入してコスト削減をはかった。乾式除湿機（12kW）が6台分散配置され、夜間電力を利用して1日4～5時間稼働させている。年間の電力消費量は約12万kW（我国の電気代に換算して150万程度）であり、除湿機の寿命（約10年）、メンテナンス等を含めたライフタイムコストを考えても37万m²の塗装費用に比べ格段に小さいとのことである。

なお、我国でも吊橋のアンカレッジ内のケーブルの防錆のために除湿器が用いられている例（大鳴門橋など）はある。

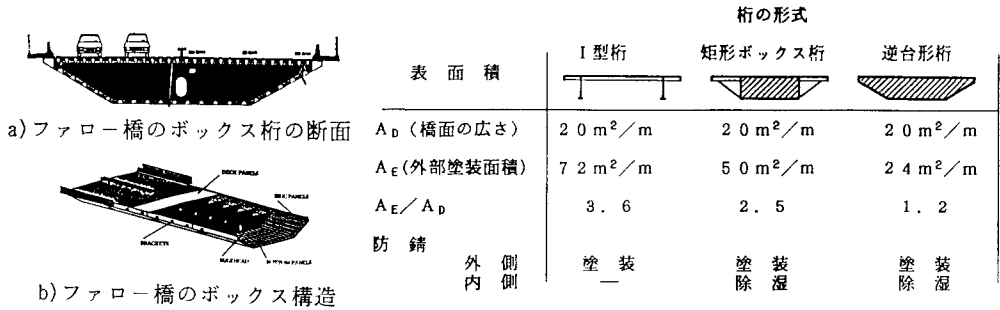


図8 ファロー橋の補剛桁

表4 塗装面積からみた各断面形状の比較
（ファロー橋での検討：文献9）

4. 3 明石海峡大橋主塔内の除湿機による防錆

明石海峡大橋（全長4 km）の主塔を除湿機による防錆のモデルケースとして選んでみた。その形状は図9に示す形でほぼ決まりつつあるが、1基のタワーは2本の脚よりなり、各々の脚の矩形ボックス断面の寸法がおおよそ13m×7m、高さが300mに達する巨大タワーである。もちろん鋼製であり、接合はボルトと溶接によって行われる予定である。

防錆を行うために必要なエネルギーを以下の条件のもとに試算した。まず、塔一基の内体積は80000m³とし、塔内部のエレベータホールをダクトとして用い（図9）、

- 1) ダクトは完全に断熱されており、除湿された空気はタワーの頂部に達しても冷却されない。
- 2) タワーの各フロアーの環境状態はすべて同一とし、鉛直方向の温度差、気圧差は無視する。
- 3) 除湿された空気は一時間以内に各フロアーの隅々まで均等に行きわたる。
- 4) 塔の空気と外気との入れかわりは換気回数Nとして0.01もしくは0.02（100時間、50時間で内体積と同じ量の空気が入れかわる）である。

とする。また、除湿機としては吸湿材除湿法を用いた乾式除湿機（12kW、1台～3台）を用い、処理空気、再生空気として共に外気を用いる。

解析に用いる気候モデルとしては、一時間きざみで温度、湿度、雲量などを与える標準気候モデル（東京）

を用いた。除湿機の作動条件としては、塔内の空気を常に循環させておき、循環してきた空気が除湿機まで戻ってきたときの相対湿度が40%以上であれば除湿機を作動するものとする。用いた気候モデルは東京のものであるが、明石海峡大橋における気候は東京に比べ湿度がやや高いが、大きな差はない。

このような条件で計算した結果を表5に示す。必要電気量は10万～20万kwで稼働時間は1日平均数時間であるという結果が得られた。タワーは密閉構造とすることができるので、換気回数 $N=0.02$ という仮定はかなり大きめの数字であり、実際には容易にもっと小さい値にすることができる。

除湿プラントの運転に要する電気代はタワー一基あたり高々200万円/年程度のオーダーにしかならず、初期のプラント設置費、更新費、運営管理費を考えても、18万 m^2 の内部塗装に要する費用に比べて経済的なものとなろう。

ただし、タワー内は板で仕切られたセル構造になっており、除湿された空気が内部の隅々にまで行きわたるかという空気循環の問題をはじめいくつか検討すべき点¹⁰⁾はまだ残っている。ここでの計算は試算と理解していただきたい。

表-5 除湿のために一年間に必要となる
総エネルギー量・総稼働時間

換気回数		$N = 0.01$	$N = 0.02$
除湿機台	エネルギー量	9.6×10^4 kw時	1.4×10^5 kw時
	稼働時間	2.8×10^3 時間	4.6×10^3 時間
除湿機台	エネルギー量	1.3×10^5 kw時	1.8×10^5 kw時
	稼働時間	1.5×10^3 時間	2.8×10^3 時間
除湿機台	エネルギー量	1.5×10^5 kw時	2.2×10^5 kw時
	稼働時間	1.0×10^3 時間	1.9×10^3 時間

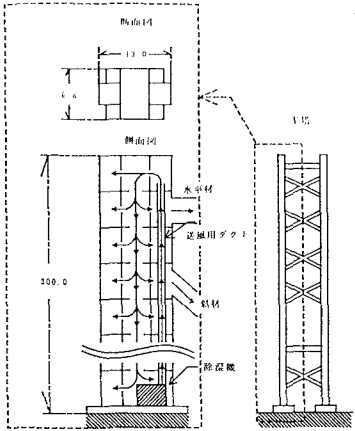


図9 明石大橋主塔と
除湿プラントモデル図[単位m]

4. 4 現行の防錆法についてのコメント

4. 2, 4. 3で述べたように除湿コントロールによる鋼ボックス内の防錆は費用的にみても現行の防錆法に代わる有力な方法と思われる。しかし、3.で述べたようにボックス内の腐食の進行が数 $\mu m/year$ のオーダー以下であるとすれば、除湿機を動員した除湿コントロールすらも不用なかもしれない。

セバーン橋、第一ボスボラス橋のボックス補剛桁は内面も塗装が施されているが、桁内には吸湿剤シリカゲルを置き湿度が高まるのを防いでいる⁶⁾。シリカゲルの量はボスボラス橋で40kg/300 m^3 （1ブロック）であり、その交換は2～3年に一度ということである。塗装の長寿命化をねらったものと考えられる。

シリカゲルを2～3年に一度しか交換しなくてもよいということはまず第一に桁内に入る水、湿気の量が少ないことであり、またメンテナンスの立場からも2, 3年に一度の交換というのであれば許容される頻度のように思われる。ちなみにシリカゲルは安価であり、また熱して水分を放出してやれば繰り返しての使用が可能である。桁内のシリカゲルの自動乾燥法の導入など、もう少し工夫が必要かもしれないが、シリカゲルの使用を前提とした塗装の軽減、さらには無塗装という方式も考えられてよいと思う。なお、このためには腐食（さび）を一定量までは許容するという考え方を橋梁に導入することが必要となろう。

5. おわりに

鋼ボックス内部の腐食環境について本四公団、大島大橋にて実測を行ない、その結果

1) 錆の全くない裸鋼板の腐食進行速度(1年間)からすると、ボックス桁内の腐食進行は厚さにして0.1~0.3 μm /年のオーダーであり非常に小さい。

2) タワー内の腐食進行速度は桁内に比べ、1オーダー高い。

ことが判明した。

タワー内の腐食進行速度が桁内に比べ高い原因は現時点では明確になっていないが、塔基部等のドアについている風ぬき窓、桁下、塔頂水平材についている通気口を通じて塩分を含んだ空気が流入するためと考えられる。タワーの通気口が錆に及ぼす影響に関する実測結果の詳細は別の機会に報告するが、現行のタワーに設けられている通気口には再考の余地があろう。

塗装の代替として除湿機を用いた湿度コントロールによる防錆法は大型ボックス構造の場合費用的にみてもまたメンテナンス的にも十分可能な方法と考えられるが、現行のボックス桁構造は漏水がなければすでに十分よい腐食環境にあり、シリカゲルによる除湿防錆を塗装の代用にするなど簡便な防錆法の可能性があらわれる。

なお、既存のI型多主桁の橋の周りをFRPなどで囲みボックス構造とし、防錆・美観の向上を計るような試みもすでにイギリスなどでは具体化しているようである¹¹⁾。錆はメンテナンスにとって厄介な問題の一つでありこれに対しいろいろな可能性があることを指摘しておきたい。

なお、今回の実験は錆のない鋼板を用いての腐食環境調査の結果である。本文中でも触れたように、あらかじめ錆を人工的に作成した鋼板ではタワー、桁内においても、進行は遅いものの数カ月で錆が進行するとの実測結果を得ている。これらの点も含め、現在もいくつかの橋梁においてボックス内の腐食環境調査を継続しており、データの蓄積をはかっている。錆の実測には時間がかかるが、近い将来ボックス内部の腐食環境と防錆についてもう少し明確なことが言えるものと期待している。

錆には水が大敵である。冒頭にも述べたように現実のボックス構造では漏水による帯水がみられ、錆の主要な原因となっている。漏水がないというのが本論文の前提となっているが、鋼ボックス構造においてそれをいかにして達成するかも大きな問題であり、この点についての研究も重要であることを最後におことわりしておく。

本論が、橋梁技術者の間でこの問題に対し関心を持っていただく糸口になれば幸甚である。

謝辞

東京大学工学部土木工学科 伊藤学教授には常々橋梁一般について御教示いただいている。同金属材料学科の辻川茂男教授、篠原正講師には「鋼橋のさび」に興味をもっていただき、本研究を行なうに際しいろいろ御教示いただくとともに試験片、実験装置などにおいて多大の便宜もはかっていたい。

また、大島大橋の測定に関しては本四公団大三島管理事務所福井所長、帆足技術課長他の方々に協力を頂いた。名港西大橋での測定については伊勢湾岸道路工事事務所古郷所長、和氣氏他に、横須賀でのドラムカンを用いての実験では大野友則助教授(防衛大)に、十勝中央大橋、花畔大橋、横浜ベイブリッジにおいても測定を行っているが、そこでも多くの方にお世話になっている。

除湿機による湿度コントロールに関しては竹倉氏(高砂熱学)、千田助手(東大工学部総合試験所)に、現行の橋梁のボックス内部の腐食については中西氏(大阪市橋梁課)に、第一ボスボラス橋の防錆については秋山氏(本四公団、現在トルコ政府へ派遣中)、松沢氏(IHI)に情報をいただいた。また、本論文に対し長岡技術科学大学 長井正嗣助教授により有益なコメントをいただいた。これらの方々に心よりお礼を申し上げたい。

なお、本研究は科学研究費(一般研究B、代表藤野陽三)の補助を受けている。

参考文献

- 1) 藤野陽三：鋼橋の防錆ーボックス内部の腐食環境と湿度コントロールによる防錆ー、防食技術、38号、1989年10月、pp.546-552.
- 2) Vassie,P.R. : Corrosion of structural steelwork in bridge enclosures , box section , and anchorage chambers , British Corrosion Journal, Vol.22 No.1, 1987, pp.37~44.
- 3) 延藤遵、藤野陽三、伊藤学：湿度コントロールによる鋼製ボックス断面内部の防錆の可能性について（その1）、土木学会第43回年次講演会概要集、1988、pp.536~537.
- 4) 上田雅俊、延藤遵、藤野陽三、辻川茂男、篠原正：湿度コントロールによる鋼製ボックス断面内部の防錆の可能性について（その2）ーボックス内部の腐食環境についてー、土木学会第44回年次講演会概要集、1989、pp.606~607.
- 5) 中村素：各種金属材料および防錆被覆の大気腐食に関する研究（第1報）（その2）、防食技術、Vol.12, No.2, pp.14~19.
- 6) 成瀬輝男、松下貞義：鋼構造物の設計、新体系土木工学38、技報堂、1986年、pp258~260.
- 7) Ostenfeld (COWI コンサルタント) との私信.
- 8) 井澤衛：ファロー橋の設計、施工（概要）、橋梁、1986年7月、pp.24~31.
- 9) Haas,G and Schülein,E.H:Steel Box Girders Optimization of Construction and Maintenance Costs ,COWI Consultant Technical Report.
- 10) 延藤遵、藤野陽三、野村卓史：湿度コントロールによる鋼製ボックス断面内部の防錆の可能性について（その3）ー除湿機設置時のタワー内部の空気循環についてー、土木学会第44回年次講演会概要集、1989、pp.608~609.
- 11) Head,P. : Use of Fibre Reinforced Plastics in Bridge Structures,Proc.IABSE Congress, 1988 Helsinki, pp.123~128.

(1989年10月2日受付)