

鋼製箱桁内部の環境腐食性および除湿剤による防錆に関する研究

廖 金孫¹・松井繁憲²・串田守可³・篠原 正⁴・藤野陽三⁵

¹ 工博 株式会社 栗本鐵工所 (〒590-0977 大阪府堺市大浜 2-2)

² 正会員 工修 株式会社 栗本鐵工所 (〒590-0977 大阪府堺市大浜 2-2)

³ 正会員 工博 株式会社 栗本鐵工所 (〒550-8580 大阪市西区北堀江 1-12-19)

⁴ 工博 独立行政法人 物質・材料研究機構 (〒305-0047 茨城県つくば市千現 1-2-1)

⁵ フェロー会員 Ph. D 東京大学工学系研究科社会基盤工学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

鋼橋建設コストの低減を目的として、塗装の代わりに除湿機を箱桁内部に設置し、湿度を制御することにより、箱桁内面の腐食を防止する工法が検討され、実用化されている。しかし、この防食方法には電源が必要不可欠な上、除湿機の設置・運転費用もかかる欠点がある。これらの欠点を解決するため、取扱いが容易で安価な除湿剤に着目し、除湿剤による箱桁内部の湿度制御効果について検討した。本文では、北海道および沖縄に架設された実橋を対象とした鋼製箱桁内部の環境腐食性の調査結果および、腐食環境が厳しい沖縄の実橋鋼製箱桁内部における除湿剤の湿度制御効果を解析し、鋼板の腐食発生挙動に及ぼす不純物付着量の影響を明らかにした上で、除湿剤を使用する鋼製箱桁内部の防錆システムを提案した。

Key Words: corrosion prevention, box girder, steel bridge, ACM (*Atmospheric Corrosion Monitor*) type corrosion sensor, humidity, desiccating agent

1. はじめに

鋼製箱桁内部の腐食は、主として現場継手ボルト連結部、ハンドホール等の開口部からの漏水および内面結露に起因し¹⁾、従来より、これを防ぐために箱桁内面に塗装を行っている。この塗装は、通常の構造用鋼のみならず、無塗装使用を前提として開発された耐候性鋼材に対しても施工されているのが実状である。当然の事ながら箱桁内面に塗装を施した場合、初期コストの他に、定期点検、補修塗装等のメンテナンスに関わるコストが発生する。

塗装関係のコストを減じることによる鋼橋総コストの低減を目的として、近年、箱桁内面塗装の省略が可能となる、箱桁内部の湿度制御による防錆技術が開発され^{2), 3), 4)}、国内外に報告されている^{5), 6), 7)}。この防錆技術は、現場継手ボルト連結部、ハンドホール等の開口部の密閉性を向上させた上で、除湿機を使用して箱桁内面の湿度をコントロールすることにより、箱桁内面の腐食を抑制するものである。しかしながら、除湿

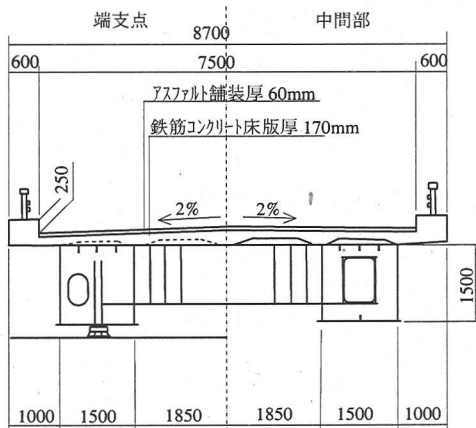
機を用いる湿度制御は、電源が必要不可欠な上に、設置費用、運転・維持管理等のランニングコスト、さらに耐久年数経過後の設備更新費用が発生する。

一方、箱桁の内部は密閉に近い構造であるため、塩類などの不純物の侵入がほとんどなく、鋼材の腐食速度は非常に小さいと考えられる。藤野²⁾は海上に架設された鋼製箱桁内部の環境腐食性を調査し、箱桁内部の環境が非常に緩やかであり、箱桁内部の鋼材の大気腐食速度が約 0.003~0.3 μm/y 程度であることを確認した。同様な調査結果は他の研究者においても得られている^{8), 9)}。例えば、P.R. Vassie は水浸入がなければ鋼製箱桁内面塗装の必要性があまりないと提言している⁹⁾。

しかし、箱桁の密閉性を向上させることにより、外部からの水浸入を防止できたとしても、相対湿度が比較的高い地域では、箱桁内部に結露が発生し、結露水の生成による腐食の可能性があるため、湿度制御が必要であると考えられる。結露水を防止するとの観点から、本研究では、取扱いが容易で安価な上、半永久的



(a)外観



(形式：2 径間連続非合成箱桁，支間割：2@43.9m)

(b)断面図

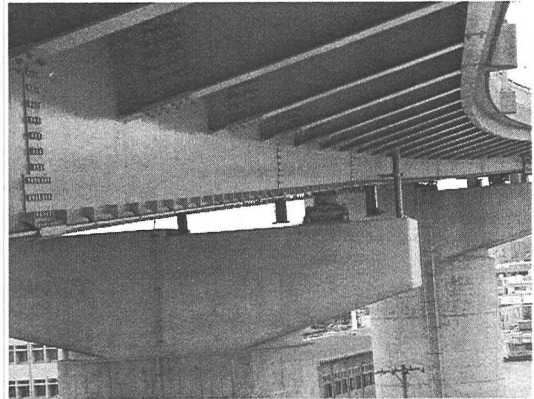
図-1 北海道における計測対象の実橋（1993 年竣工）

に除湿効果を維持できる除湿剤に着目し、除湿剤による箱桁内部の湿度制御の効果について検討した。本文では、まず、北海道の田園環境および沖縄の海浜環境に架設された実橋を対象とした鋼製箱桁内部の環境腐食性の調査結果および、腐食環境が厳しい沖縄の実橋鋼製箱桁内部における除湿剤の湿度制御効果を解析し、鋼板の腐食発生挙動に及ぼす不純物付着量の影響を明らかにした。その上で、除湿剤を使用する鋼製箱桁内部の防錆システムを提案した。

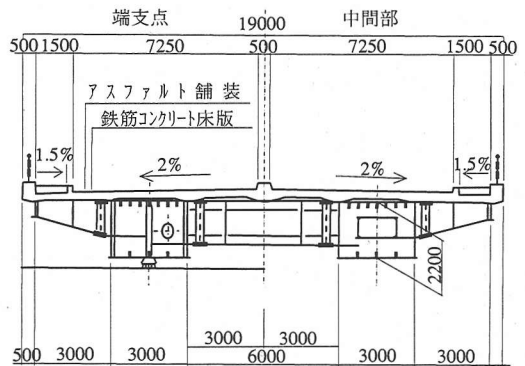
2. 箱桁内部の環境腐食性

(1) 環境腐食性の計測方法

鋼製箱桁内部の環境腐食性の調査は、温度変化の激しい北海道と海塩粒子飛来量の多い沖縄において、実



(a)外観



(形式：2 径間連続非合成箱桁，支間割：2@47.5m)

(b)断面図

図-2 沖縄における計測対象の実橋（1985 年竣工）

橋箱桁内部の温度、湿度および不純物付着量を測定することによって行った。測定対象の一つである北海道の実橋は、田園地帯に架設された耐候性鋼板仕様の 2 ボックス構造で、現場継手部にシーリング処理が施され、桁内面の塗装を省略したものである（図-1）。一方、沖縄の実橋は、従来の普通鋼板重防食仕様の 2 ボックス構造で、湾上に架設されている（図-2）。温湿度の計測は、温湿度センサを用いて 1 回 / 10 分の頻度で行った。温湿度センサの設置位置は、北海道の実橋では箱桁端部のドア開口部から約 5m、65m および 80m の 3 箇所のウェブ部で、沖縄の実橋では箱桁端部のドア開口部から約 25m、50m および 75m の 3 箇所のウェブ部であった。箱桁内部の温湿度の評価には、3 箇所の平均値を用いた。箱桁内外部の温湿度を比較するため、箱桁外部の雨水が当たらないウェブの表面にも温湿度センサを設置した。また、鋼板表面とその近傍と

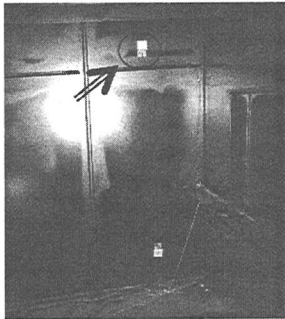
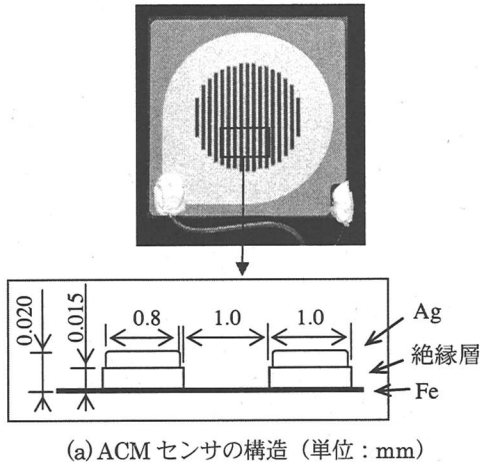


図-3 ACM センサの構造及びその箱桁内面における取付状況

の温度差を把握するため、北海道の実橋において、箱桁内面ウェブの鋼板表面にセンサを貼付けて、鋼板表面温度を測定した。不純物付着量の計測は、塩素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、 0.25m^2 の面積内の不純物を拭き取り、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。

また、腐食発生挙動を明らかにするため、沖縄の実橋箱桁内外面ウェブ部に ACM (Atmospheric Corrosion Monitor) 型腐食センサを設置し、腐食モニタリングを行った。本実験で使用した ACM センサは、図-3 に示すように、Ag-Fe 対 ACM 型腐食センサ¹⁰⁾である。同センサは、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もので、結露が発生した場合、Ag-Fe 異種金属間に電位差が生じ、電流が流れる。この電流の検出により結露と腐食発生状況を把握することができる。

さらに、箱桁内面の腐食速度を正確に測定するため、

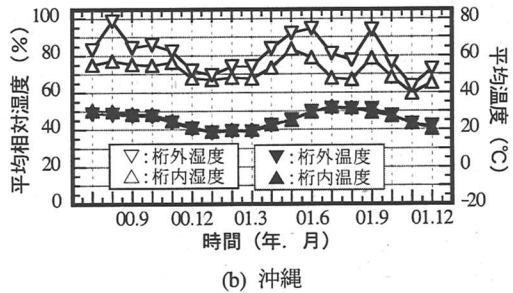
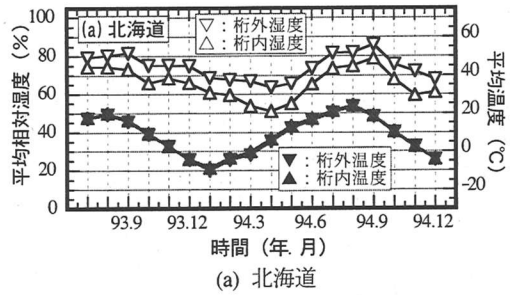
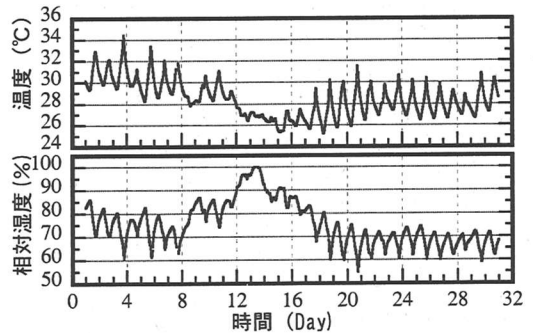


図-4 箱桁内外の温度と湿度の月平均値



沖縄の実橋箱桁内面ウェブ部の水平補剛材の上 (図-3 (b) に示す上の ACM センサの取付け位置と同様な場所) に $100 \times 60 \times 1.2$ (mm) の普通炭素鋼暴露試験片を貼付け、暴露試験片の重量減により腐食速度を評価した。

(2) 箱桁内外の温湿度

北海道および沖縄の実橋箱桁内外部の相対湿度と温度の月平均値の経年変化を図-4 に示す。両橋のいずれにおいても、箱桁内外の相対湿度 (または温度) の月平均値の経年変化傾向がほぼ同じであることから、箱桁内部の相対湿度および温度は、それぞれ外部の湿度と温度に影響されていると考えられる。また、同図から分かるように、温度は箱桁内外共ほぼ同じであるが、相対湿度は外部より箱桁内部の方が低い。

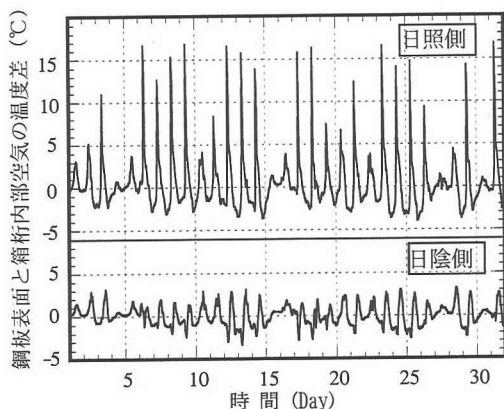


図-6 鋼板表面温度 (T1) と箱桁内部気温 (T2) との温度差 (T1-T2) (北海道実橋における 1994 年 5 月の実測値)

箱桁内部の相対湿度は外部相対湿度以外に、箱桁内部の温度にも密接に関係する (図-5)。外部大気の気団が同一ならば、その期間では大気の絶対湿度はほとんど変化しない¹¹⁾。この期間、箱桁内部の絶対湿度もほぼ変わらずに、箱桁内部の相対湿度は温度の日変動に伴い変化する。すなわち、相対湿度は、昼間では温度上昇に従い低くなり、夜間では温度低下により高くなる。雨天あるいは曇天の日 (例えば、図-5 中の 12~16 日の間) では、昼間でも温度の上昇が無く、桁内温度が持続的に低下し、相対湿度は 100% になることがしばしば見受けられる。

一方、結露と直接に関わる鋼板表面の相対湿度は、箱桁内部空気の相対湿度のみではなく、鋼板表面とその近傍の空気との温度差にも影響される。箱桁内面ウェブ部近傍の気温に比べ、鋼板表面の温度は昼間では高いが、夜間では低くなる。このため、夜間は結露が発生し易い。また、図-6 に示すように、鋼板表面温度とその近傍の空気との温度差は、日照側の方が日陰側より大きい。北海道のような温度変化の激しい地域では、この温度差は季節にも影響される。温度変化が激しい季節 (例えば、北海道では 5 月と 10 月) には、この温度差は若干大きくなる。

箱桁内外の相対湿度の年間分布を図-7 に示す。同図に示している沖縄の実橋箱桁外部の相対湿度の実測データでは、相対湿度が 100% となる時間が非常に長かった。これは、箱桁外部に設置した温湿度センサの周辺に飛来塩分が大量に集まり、実際の大气中の相対湿度が 100% より低い時にも結露が発生し、その結果、相対湿度が 100% と記録されたためであると考えられる。両橋の箱桁内外の湿度分布をみると、北海道より沖縄の実橋箱桁内部の相対湿度が高いことが分かる。

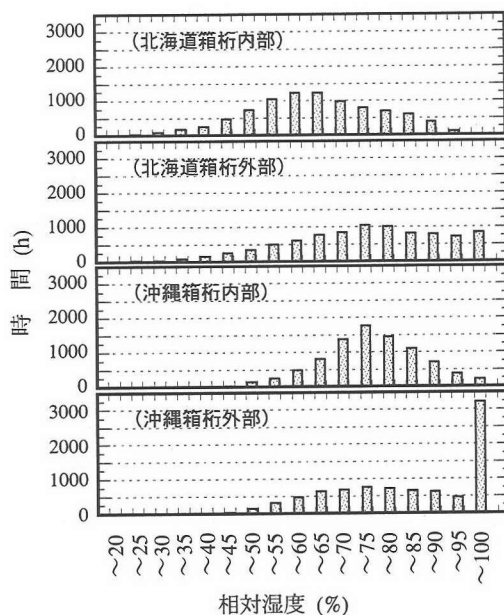


図-7 箱桁内外年間相対湿度分布 (北海道実橋: 1994 年 1 月~1994 年 12 月, 沖縄実橋: 2000 年 8 月~2001 年 7 月)

表-1 実橋箱桁内外不純物付着量 (単位: mg/m²)

部位	海浜環境 (沖縄) 通常箱桁		田園環境(北海道) 密閉処理箱桁		
	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	
桁内	ウェブ部	0.5	8.2	0.11	0.35
	床部	140	110	0.14	2.1
	スカーフ部	29	180	—	—
	ドア部	7.8	51	0.04	0.62
桁外	ウェブ部	3.4	8.7	—	—
	ドア部	55	500	0.24	5.1

特に、沖縄の実橋箱桁内部では、相対湿度 95~100% の時間が年間約 220 時間と非常に長く、箱桁内部に結露水が生じる可能性が高い。

(3) 箱桁内外の不純物付着量

北海道および沖縄における実橋の箱桁内外の塩素イオン (Cl⁻) および硫酸イオン (SO₄²⁻) の付着量の測定結果を表-1 に示す。沖縄の海浜環境にある実橋に比べて、北海道の田園環境にある実橋では、箱桁内部の不純物付着量が極めて少ない。北海道の実橋箱桁内部では、塩素イオン濃度が約 0.1~0.2 mg/m² で、硫酸イオン濃度が 2.1 mg/m² 以下であった。

一方、沖縄の実橋では、箱桁内部の不純物付着量は

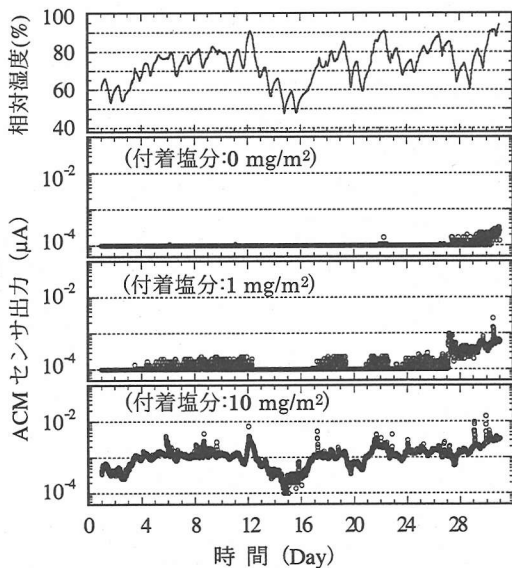


図-8 ACM センサ出力に及ぼす塩分と湿度の影響 (沖縄 実橋の自然桁内における 2001 年 4 月の実測値)

部位によってかなり異なる。人の出入りの影響を受けた床部および箱桁内部と外部の空気交換の経路部位であるスカラップ部では不純物付着量が非常に多いが、ドア部、特に一般ウェブ部では不純物付着量が少なく、塩素イオン濃度が 0.5 mg/m^2 で、硫酸イオン濃度が 10 mg/m^2 以下であった。

箱桁外部については、従来報告されているとおり、雨水の洗浄作用を受けるウェブ部に比べて、雨水の当たらないドア部の不純物付着量が多かった。

(4) 箱桁内部の腐食発生挙動

実橋箱桁内部の腐食発生挙動に及ぼす不純物付着量の影響を検討するため、沖縄の実橋箱桁内面ウェブ部に、表面に塩分を付着させた ACM センサを貼付け (図-3 参照)、ACM センサ出力を計測した。ACM センサ表面に付着させた塩分(NaCl)量は、0, 0.1, 1 および 10 mg/m^2 の 4 条件であった。

表面塩分付着量がそれぞれ 0, 1 および 10 mg/m^2 の ACM センサ出力の経時変化を図-8 に示す。塩分付着量が 0.1 mg/m^2 の ACM センサ出力の挙動は塩分付着量が 0 mg/m^2 の場合とほぼ同様であった。

図-8 から明らかなように、ACM センサの出力は、箱桁内部の湿度および ACM センサ表面塩分付着量に影響される。表面塩分付着量が 0, 0.1 mg/m^2 では、相対湿度に関わらず、 $5 \times 10^{-4} \mu\text{A}$ 以上¹⁰⁾の有意な ACM センサ出力は見られなかった。表面塩分付着量が 1 mg/m^2 では、相対湿度が 85% 以上の場合、有意な ACM センサの出力が度々認められたが、相対湿度が 85% 以下の場合、有意な出力は無かった。また、塩分付着量が 10 mg/m^2 の場合、有意な ACM センサ出力が観察された最低湿度は約 55% であった。相対湿度が同じ場合、塩分付着量が多いほど、ACM センサの出力は大きくなる。

表-2 ISO9223 に基づく箱桁内部環境腐食性評価

結露の影響			汚染物質の影響						
結露時間 hour/year	分類		SO ₂ 付着速度 mg/(m ² ·d)	分類		塩分付着速度 mg/(m ² ·d)	分類		
$\tau \leq 10$	τ_1		$P_d \leq 10$	P_0		$S \leq 3$	S_0		
$10 < \tau \leq 250$	τ_2		$10 < P_d \leq 35$	P_1		$3 < S \leq 60$	S_1		
$250 < \tau \leq 2500$	τ_3		$35 < P_d \leq 80$	P_2		$60 < S \leq 300$	S_2		
$2500 < \tau \leq 5500$	τ_4		$80 < P_d \leq 200$	P_3		$300 < S \leq 1500$	S_3		
鉄鋼材料に対する大気環境腐食性評価									
	τ_1			τ_2			τ_3		
	S ₀ -S ₁	S ₂	S ₃	S ₀ -S ₁	S ₂	S ₃	S ₀ -S ₁	S ₂	S ₃
P ₀ -P ₁	C ₁	C ₁	C ₁ or C ₂	C ₁	C ₂	C ₃ or C ₄	C ₂ or C ₃	C ₃ or C ₄	C ₄
P ₂	C ₁	C ₁	C ₁ or C ₂	C ₁ or C ₂	C ₂ or C ₃	C ₃ or C ₄	C ₃ or C ₄	C ₃ or C ₄	C ₄ or C ₅
P ₃	C ₁ or C ₂	C ₁ or C ₂	C ₂	C ₂	C ₃	C ₄	C ₄	C ₄ or C ₅	C ₅
鉄鋼材料の腐食速度									
分類				腐食速度 (μm/y)					
C ₁				$r_{\text{corr}} \leq 1.3$					
C ₂				$1.3 < r_{\text{corr}} \leq 25$					
C ₃				$25 < r_{\text{corr}} \leq 50$					
C ₄				$50 < r_{\text{corr}} \leq 80$					
C ₅				$80 < r_{\text{corr}} \leq 200$					

(5) 箱桁内部環境腐食性の評価

大気環境の腐食性は、国際規格 ISO9223 (Corrosion of metals and alloys - Corrosivity of atmospheres - Classification) に基づき、結露時間および汚染物質の量で評価できる。同規格においては、結露時間は 0℃ 以上で相対湿度が 80% 以上の時間を指し、汚染物質の量は、大気中の SO₂ と海塩粒子量（一般に、塩素イオン Cl⁻ 濃度）である。

ISO9223 に基づく大気環境腐食性の評価方法を表-2 に示す。北海道の実橋箱桁内部では、相対湿度 80% 以上の時間は年間 1085 時間であり、 τ_3 範囲内 (250~2500 時間) にある。汚染物質 SO₂ の量は測定されていないが、SO₄²⁻ の付着量 (0.35~2.1 mg/m²) から判断すれば、P₀ (付着速度 ≤ 10 mg/(m²·day)) の範囲内にあると考えられる。また、飛来塩分量は 0.04~0.14mg/m² で、S₀ (付着速度 ≤ 3 mg/(m²·day)) の範囲内にある。したがって、鋼板の腐食速度は C2~C3、すなわち 1.3~50 μm/y となる。これに対して、沖縄の実橋箱桁内部では、相対湿度 80% 以上の時間は年間約 2401 時間であるが、北海道の実橋箱桁内部と同様に、 τ_3 範囲内にある。また、SO₄²⁻ の付着量は 8.2~180mg/m² であり、この付着量から判断すれば、沖縄の実橋箱桁内部においても、汚染物質 SO₂ の量は P₀ の範囲内にあると考えられる。飛来塩分量 (0.5~140 mg/m²) も、北海道の実橋箱桁内部と同様に、S₀ の範囲内にあると考えられる。すなわち、北海道に比べて、沖縄の実橋箱桁内部における相対湿度 80% 以上の時間および汚染物質量は多いが、ISO9223 に基づいて評価すれば、箱桁内部の環境腐食性は同程度 (1.3~50 μm/y) となる。

上述のように、ISO9223 規格に基づく大気環境腐食性の評価では、腐食速度の範囲は概ね把握できるが、具体的な腐食速度は分からない。箱桁内部の大気腐食性をより詳細に把握するため、ここでは、沖縄実橋箱桁内部の現地試験で得られた ACM センサ出力×時間 (すなわち、電気量) の総と不純物付着量との関係 (図-9) および、実験室での試験結果¹⁰⁾ から得られた電気量と鋼材腐食速度の関係 (図-10) を用いて、箱桁内部の各部位での鋼材腐食速度を求めることにした。

図-9 と図-10 を用いて推算した両橋の箱桁内面の各部位の腐食速度を表-3 に示す。図-9 に示す不純物付着量と電気量との関係は沖縄の実橋箱桁内部の実測結果であるため、北海道の実橋の箱桁内部の腐食性評価に使用される場合、得られた鋼材の腐食速度が実際の状況よりやや大きくなる可能性がある。また、沖縄の実橋箱桁内面の床およびスカラップ部位については、不純物付着量が非常に多く、図-9 の範囲を超えてい

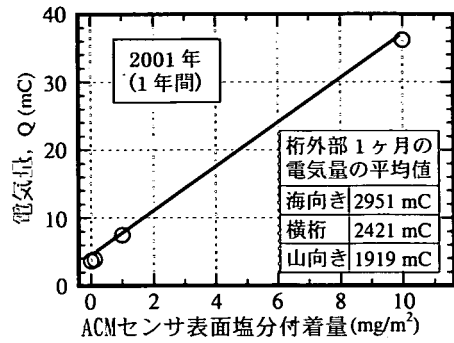


図-9 電気量に及ぼす不純物付着量の影響

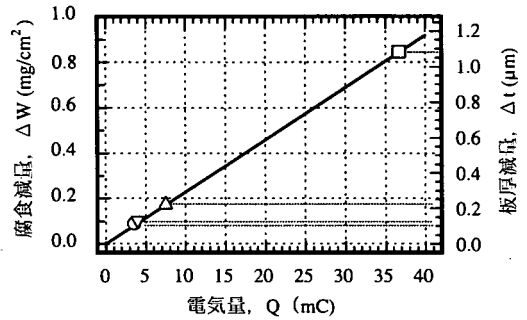


図-10 ACM センサ出力 (電気量) と腐食速度の関係¹⁰⁾ 及びそれによる沖縄箱桁内部の腐食速度の推測 (塩分付着量: ○ 0mg/m², ▽ 0.1mg/m², △ 1.0mg/m², □ 10mg/m²)

表-3 実橋箱桁内外の各部位の腐食速度 (単位: μm/y)

部位		海浜環境 (沖縄) 通常箱桁	田園環境(北海道) 密閉処理箱桁
桁内	ウェブ部	0.20	0.13
	床部	—	0.15
	スカラップ部	—	—
	ドア部	1.40	0.10
桁外	ウェブ部	0.68	—
	ドア部	—	0.18

るため、正確な腐食速度は算定できなかった。なお、不純物から電気量を推算する時に、箱桁内面に付着した汚染物質 SO₂ の影響を無視し、付着塩分量の影響のみを考慮した。表-3 から分かるように、北海道の実橋箱桁内面の腐食速度が極めて小さく、沖縄の実橋箱桁内面においても、ドア部、特に一般ウェブ部の腐食速度が 1μm/y 以下で非常に小さい。

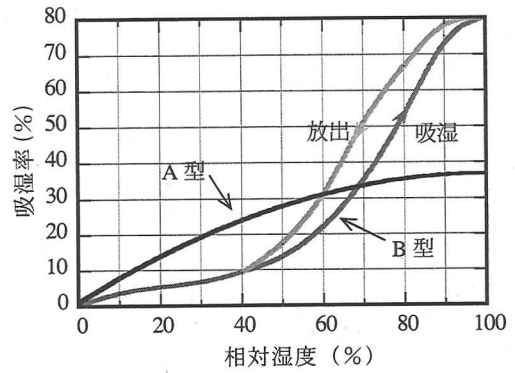
上述の計算結果の妥当性は沖縄の実橋箱桁内部における暴露試験により確認されている。塩分付着量が0, 1.0, 10 mg/m²の場合、暴露試験片鋼材の腐食速度がそれぞれ0.38, 0.55, 1.65 μm/yであり、計算結果とはほぼ同程度である。

実橋箱桁内部の大気腐食性に関する測定結果から分かるように、田園環境に架設される実橋の箱桁内面では不純物付着量が極めて少ない。沖縄の実橋のように海浜環境に架設された箱桁内面においても、設計段階における密閉性の向上、架設時における箱桁内面への不純物付着の防止対策、架設後における人の出入りの制限、あるいは、点検時の土足での出入りに対する措置を講じれば、不純物付着量は一般ウェブ部のような低レベルに抑えることが可能である。不純物付着量が少ない場合、外部からの水浸入および結露水の生成が無ければ、鋼板腐食速度は極めて小さい。したがって、箱桁内面を無塗装にする場合、まず、構造の密閉性を向上させることにより、飛来塩分の侵入と漏水を防止することが必要であり、さらに、箱桁内部の湿度を制御することにより結露水の生成を防ぐことが重要である。以下では、除湿剤による湿度制御効果、とりわけ結露水生成（すなわち、箱桁内部空気の相対湿度が100%に到達すること）の防止の可能性について検討する。

3. 除湿剤による湿度制御

(1) 除湿剤の特性および設置方法

沖縄の実橋において、一方の箱桁内部に除湿剤を設置し、他方の箱桁は自然状態にすることで、除湿剤による箱桁内面の湿度制御と結露水生成の防止効果を検証した。以下では、除湿剤を設置した箱桁を除湿桁と、自然状態にある箱桁は自然桁と略記する。除湿桁に設置した除湿剤は、日本工業規格 JIS Z 0701 に定めている B 型のシリカゲル乾燥剤で、粒子状の多孔質のケイ酸 (SiO₂) のゲルであった。この乾燥剤 (B 型) と従来一般に使用されている乾燥剤 (A 型) との違いは、A 型のシリカゲルは表面積が大きく、細孔容積が小さいことに対して、B 型のシリカゲルは表面積が小さく、細孔容積が大きいことにある。A 型のシリカゲルは、化学的な表面吸着が主要な吸湿方式で、低湿度での吸湿率が大きい。一方、B 型のシリカゲルは、物理的な毛細管凝縮が主要な吸湿方式で、低湿度での吸湿率が小さいが、高湿度での吸湿率は非常に大きい。また、A 型のシリカゲルは化学的吸着方式であるため、一定



(a) 除湿剤の吸湿特性



(b) 除湿剤の包装状況



(c) 除湿剤の設置状況

図-11 除湿剤の吸湿特性と設置状況

量の水分を吸着すると除湿能力を失い、シリカゲルの再利用に約 120℃での加熱処理が必要である。これに対して、B 型のシリカゲルは物理的な吸着方式であるため、常温でも周囲の湿度が低い時に、自動的に吸着水分を放出する。すなわち、本研究に使用した除湿剤 (B 型シリカゲル) は、周囲湿度が高い時に吸湿し、周囲湿度が低い時に水分を放出する特性を持ち、シリカゲルの毛細管構造が破壊されていない限り、半永久的に吸湿効果が期待できるものである。A, B 型のシリ

カゲルの吸湿特性を図-11 (a) に示す。図中の吸湿率は次式によるものである。

$$\text{吸湿率} = \frac{\text{シリカゲル吸水質量} - \text{シリカゲル乾燥質量}}{\text{シリカゲル乾燥質量}} \times 100\% \quad (1)$$

除湿桁内部に設置した除湿剤の量(W)は、日本工業規格JIS Z 0301¹²⁾ に準拠して、次式により算出した。

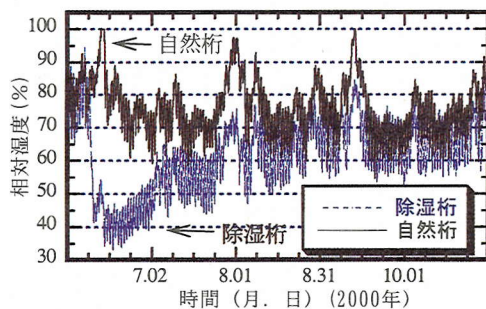
$$W = V \cdot H / [(C2 - C1) \times 10^{-2}] \quad (2)$$

式(2)において、Vは箱桁内部空間容積 (m³) で、Hは気象データに基づく鋼橋所在地の大気中の絶対湿度の年平均値 (g/m³) である。また、C1は鋼橋所在地の大気相対湿度の年平均値における除湿剤の吸湿と放出過程の吸湿率の平均値 (%) で、C2は箱桁内部の許容される最高相対湿度における除湿剤の吸湿過程の吸湿率 (%) である。箱桁内部の許容される最高相対湿度は、結露水の発生を抑えることができる最高湿度であり、鋼板表面と箱桁内部空気との温度差および箱桁内面の不純物付着量に依存するが、ここでは、沖縄の温度変化および箱桁内面の不純物付着量を考慮して、85%とした。実際、沖縄実橋の除湿桁に250kgのB型のシリカゲルを設置した。

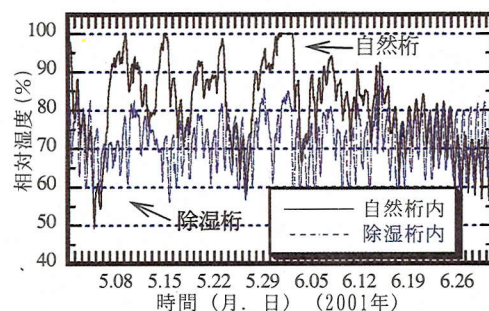
除湿桁内部における除湿剤の配置には、除湿剤の吸湿効率と配置作業の便利性の両方を考慮することが必要である。除湿剤の吸湿能力を高めるためには、除湿剤を箱桁内部に均一に分散させることが最も望ましいが、除湿剤自体を箱桁内部にばらまくことが出来ないため、水蒸気透過率が良いポリエステル不織布の袋に包装された状態 (図-11 (b)) で設置することが現実的である。本実験では、除湿剤を除湿桁の現場継手ボルト連結部および桁の両端部に配置し、配置数量は、桁両端部を除いて均等にした。桁両端部では、桁外部からの湿気が侵入し易いため、除湿剤の配置数量を現場継手ボルト連結部近傍の2倍にした。現場継手ボルト連結部における除湿剤の設置状況を図-11 (c) に示す。なお、本実験では、除湿剤の購入、現地への輸送および設置等の諸費用は合計45万円程度であった。

(2) 除湿剤による湿度制御効果

除湿剤設置直後および一年間経過後の箱桁内部相対湿度の経時変化を図-12 に示す。同図(a)に示されているように、除湿剤無しの場合に比べて、除湿桁内部の相対湿度は、除湿剤設置直後 (6月中旬) に急激に低下し、その後、徐々に上昇する。約2ヶ月後に、自然桁の相対湿度に接近するが、ほぼ85%以下に制御されている。また、同図(b)から明らかなように、一年間経過後も、自然桁内部では相対湿度が度々100%に達したが、除湿桁内部では相対湿度がほぼ85%以下であっ



(a)設置直後



(b)一年経過後

図-12 除湿剤による除湿効果

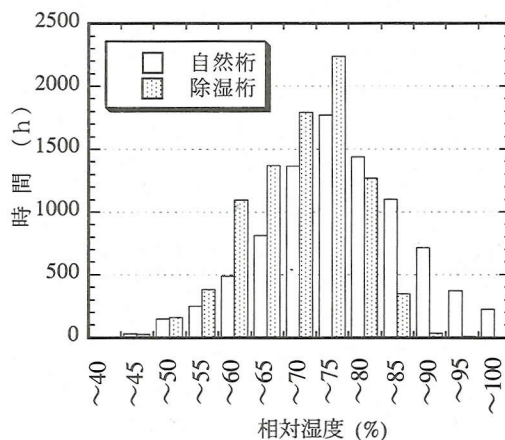


図-13 自然桁と除湿桁内部の年間相対湿度分布の比較 (2000年8月~2001年7月)

た。すなわち、除湿剤の湿度制御効果は長期間維持されている。

除湿桁内部の相対湿度の年間分布を図-13 に示す。相対湿度85%以上の時間は自然桁内部では年間1300時間であるが、除湿桁内部では36.8時間であった。また、除湿桁内部では相対湿度が95%以上の時間は0であった。

上述のように、除湿剤を設置した除湿桁では、相対

湿度がほぼ85%以下に制御されている。このような相対湿度レベルでは、不純物付着量が比較的少ない箱桁内部において、箱桁内部気温より鋼板表面温度が2~3℃程度低くなっても、結露水が発生しにくいと考えられる。

4. 除湿剤使用の箱桁内面の鋼材腐食に及ぼす不純物付着量の影響

上述のように、除湿剤を箱桁内部に設置することにより、箱桁内部の相対湿度を長期間85%以下にコントロールすることは可能であり、結露水の発生を防止できる。しかし、結露水が発生しなくても、不純物付着量が多ければ、相対湿度を85%以下に抑えても腐食が発生する可能性がある。したがって、除湿剤を設置する場合の鋼板腐食速度に及ぼす不純物付着量の影響、とりわけ鋼板の発錆を防止するための許容最大不純物付着量を明確にすることが必要である。このため、自然桁と除湿桁共に、桁内部にACMセンサおよび暴露試験片を設置し、腐食発生モニタリングおよび鋼板腐食速度の計測を行った。なお、ACMセンサ表面には、0, 0.1, 1および10 mg/m²の塩分(NaCl)を付着し、暴露試験片の表面には、0, 1, 10および100 mg/m²の塩分を付着した。

箱桁内部で一年間暴露した試験片の腐食減量を図-14、試験片の表面状況を図-15に示す。塩分付着量が0.1および1 mg/m²の場合では、自然桁と除湿桁とも腐食がほとんど発生せず、腐食速度は非常に小さかった(図-14)。ただし、暴露試験片の表面状況を詳細に観察すれば、極僅かであるが、自然桁内部に暴露した試験片表面に赤錆が観察された。これに対して、除湿桁内部の試験片には発錆が認められなかった(図-15)。

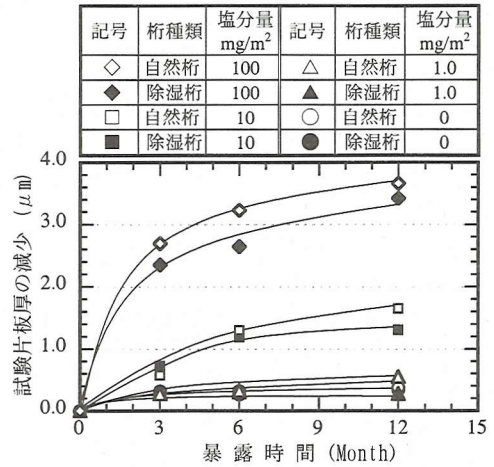


図-14 暴露試験片腐食減量

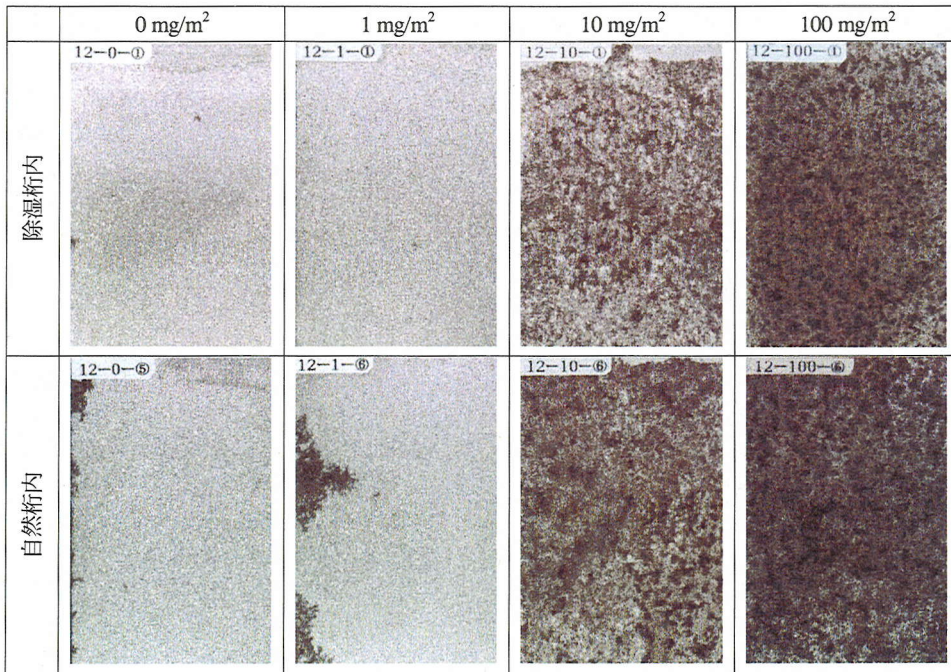
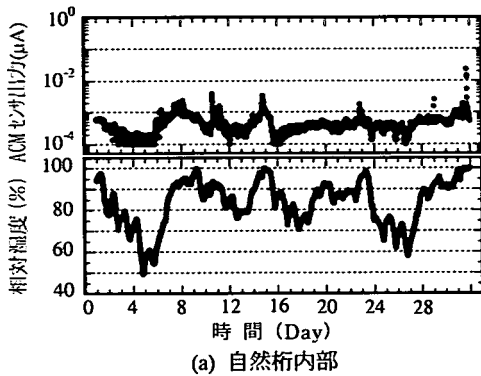
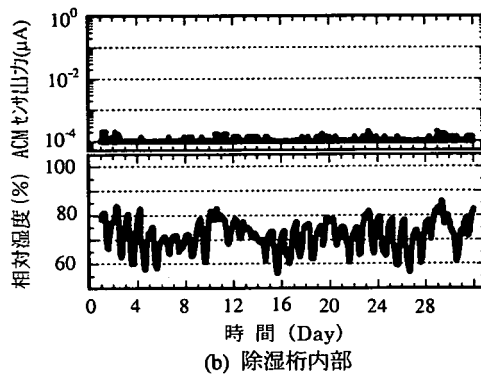


図-15 一年間暴露した試験片の表面状況



(a) 自然桁内部



(b) 除湿桁内部

図-16 除湿剤による湿度制御と腐食抑制 (ACM センサ表面に 1 mg/m^2 塩分付着, 沖縄実橋における 2001 年 5 月の実測値)

塩分付着量が少ない場合の除湿剤による防食効果を図-16により説明できる。同図には自然桁と除湿桁内部の相対湿度および表面に 1 mg/m^2 の塩分を付着させた ACM センサの出力の経時変化を示している。自然桁内部では、湿度が 85% ないし 100% に達することがしばしば発生し、その時、有意な ACM センサの出力が認められることから、腐食は発生したと考えられる。これに対して、除湿桁内部では、湿度がほぼ 85% 以下に制御されているため、有意な ACM センサ出力がほとんど認められなく、鋼板の腐食は抑えられたと考えられる。

塩分付着量が多い場合 (例えば、 10 mg/m^2 以上の場合) では、図-14 から分かるように、除湿剤を箱桁内部に設置することにより、鋼板の腐食速度が抑制されたが、腐食発生は防止できなかった。塩分付着量が多い場合での鋼板発錆を完全に防止するためには、相対湿度をさらに低く制御しなければならないことが分かった。

以上の結果より、除湿剤を用いて箱桁内面の鋼板発錆を防ぐには、箱桁内面の不純物付着量を 1 mg/m^2 以下にコントロールすることが必要であることが分かった。

5. 箱桁内部無塗装防錆システムの提案

実橋箱桁内部の大気腐食性評価結果から分かるように、北海道と沖縄の実橋箱桁内面の一般部の不純物付着量は少なく、鋼板腐食速度は非常に小さかった。また、除湿剤を箱桁内部に設置することにより、箱桁内部の湿度を長期間 85% 以下に制御することができ、結露水の発生を防止できた。箱桁内部の発錆を防ぐには、除湿剤を箱桁内部に設置すると共に、箱桁内面の不純物付着量を 1 mg/m^2 以下に抑えることが必要である。これらの知見に基づいて、箱桁内部無塗装防錆システムを以下のように提案する。

まず、外部からの水浸入を防止しなければならない。外部からの水浸入ルートは、排水管が箱桁内部を通過する構造でなければ、現場継手ボルト連結部、ハンドホール部およびドア部等の開口部と考えられる。このため、現場継手ボルト連結部、ハンドホール部およびドア部にシーリングを施す等の構造上の改良をすれば、箱桁内部への水の浸入を防ぐことができる。特に、現場全断面溶接を行う場合、現場継手部に特別な措置を施さなくても、外部からの水の浸入を防止できる。

次に、結露水の生成を防ぐことが必要である。箱桁内部の結露防止には、図-12 から明らかなように、“自己呼吸”機能を持つ除湿剤は有効である。前述のように、本除湿剤は、毛细管構造が破壊されない限り、その除湿効果が半永久的に継続する。この種の除湿剤を箱桁内部に設置すれば、結露水の生成が防止でき、ミニマムメンテナンスが達成できる。

さらに、箱桁内面への不純物付着量を 1 mg/m^2 以下に抑えることが必要である。結露水がないことを前提として、箱桁内部の不純物付着量を低レベルにコントロールすることにより、鋼材の発錆が防止できる。表-1 に示す部位ごとの不純物付着量を見ると、飛来塩分量が非常に多い沖縄の実橋箱桁構造では、人の出入りによる床部の汚染および、スカラップ部、ドア部などの開口部からの不純物侵入が問題となっている。これらの開口部に対して、密閉性向上などの構造改良を施し、また、人の出入りによる床部の汚染に対して対策を講じれば、箱桁内部への不純物付着量を低レベルに制御することが可能である。

一方、箱桁内面を無塗装とした場合、架設後のみならず、箱桁の製作、輸送および架設中においても、一時的な防錆対策を講じる必要がある。このことを考えると、箱桁に使用する鋼板は、一時的防錆機能を有する原板プライマー鋼板が最適であると考えられる。

以上をまとめると、箱桁内面無塗装システムは以下

のようになる。

- ① 箱桁構造密閉性を向上する等の構造上の改良により、外部からの水の浸入を防ぐこと。(万が一、外部から少量の水が浸入した場合、原板プライマー鋼板を使用することにより、プライマー層の一時的な防錆効果を期待する。設計上で外部からの水浸入の可能性がある場合、箱桁内部に温湿度センサおよび ACM センサを設置し、モニタリングを行うことが一つの対策と考えられる。ACM センサにより漏水が検知された場合、迅速な対応を行う。)
- ② 除湿剤(または除湿機)の設置により、結露を防止すること。
- ③ 構造密閉性の向上で不純物付着量を最小限にコントロールし、鋼板の腐食を極低レベルに制御すること。
- ④ 製作、輸送および架設過程での腐食を防止するため、一時的な防錆機能を有する原板プライマー鋼板を使用すること。

また、現場全断面溶接構造では、特別な措置を取らなくても箱桁の密閉性が確保できるため、箱桁内部無塗装防錆システムをより効果的に適用できることを付記しておく。

本文で提案する箱桁内部無塗装防錆システムは、初期コストのみならず、ライフサイクルコスト(以下LCCと略記)の大幅な低減を可能とするシステムである。ここで、JH 鋼橋標準設計における3径間連続箱桁に本システムを適用した場合のLCCを概算し、従来の内面塗装仕様を適用した場合のLCCと比較することで、本システムの経済的見地からの有用性を説明する。なお、LCCの算出には以下の条件、仮定等を用いた。

- 本来、ライフサイクルコストを算定する場合、部材だけを対象とするのではなく、発注者(機関)、ユーザー、第3者に関わる総コストを計上すべきであるが、ここでは、発注者の立場から、本システムを適用した場合の、防食に関わる「初期コスト+維持管理コスト」におけるコストメリットを示すものである。
- 割引率および経済成長率は考慮しない。
- 内面塗装の塗替えインターバルは25年とする。
- LCC比較期間は100年とする。
- 橋梁全体を対象とした場合、撤去コスト・更新コストを勘案すべきであるが、防食という観点のみに着目することから、撤去・更新コストは比較対象としない。
- LCC算出のための適用式

表-4 LCC算出対象塗装系

CASE	塗装系	
	新設塗装	塗替え塗装
CASE 1	D-3	d-1 (3種別)
CASE 2	D-4	d-2 (3種別)
CASE 3	無塗装	—
CASE 4	一般部:無機ゾク(原板)	変性EP 1層 (3種別)
	添接部:変性EP 1層	
備考	形式	3径間連続箱桁
	橋長*幅員	211.3m*10.690m (9.000m)
	支間割	3@70m
	箱桁幅*高さ	1.950m*2.800m
	工場塗装面積	6528m ²
	現場塗装面積	288m ²
	鋼重	713ton

表-5 LCC算出結果

CASE	LCCの相対比
CASE 1	0.90
CASE 2	1.00
CASE 3	0.15
CASE 4	0.33

$$LCC = I + \sum M_t \quad (3)$$

ここに、Iは初期コストで、Mtはt年目の維持補修費用である。

LCC算出対象とする塗装系を表-4に、LCC算出結果を表-5に示す。CASE 1と2は従来の塗装の場合で、CASE 3と4は、本システムを用いた場合である。表-5から分かるように、本システムを用いた場合は、塗装の場合に比べて6割以上のコスト低減が期待できる。

6. おわりに

本研究では、除湿剤を用いた鋼製箱桁内部防錆システムの開発を目的として、実橋箱桁内部の環境腐食性および除湿剤による箱桁内部の湿度制御と防食効果を調査した。その結果、箱桁内面の一般部では不純物付着量が少なく、鋼板の腐食速度は極めて小さいこと、除湿剤を箱桁内部に設置することにより、結露水の発生が防止できることが分かった。また、箱桁構造の密閉性の向上、箱桁内面への不純物付着の防止策、除湿剤による箱桁内部の湿度制御などを通して、箱桁内面の鋼板発錆を防ぐことが可能であることが分かった。

しかしながら、ACMセンサおよび暴露試験片による箱桁内面鋼板腐食状況の計測は、ACMセンサと暴露試

験片が構造（あるいは構造の一部）そのものではないために、その結果が実構造の腐食状況を完全に反映しているとは言い切れない面がある。今後、内面を無塗装とした実物大の鋼製箱桁を用いての暴露試験を通して、箱桁内面鋼板腐食状況を検証していくことが必要である。

謝辞：鋼橋大気腐食の研究に関して、ご指導を頂いた辻川東大名誉教授に感謝の意を表します。また、実橋試験場を提供して下さった北海道十勝支庁の関係方々および沖縄総合事務局那覇港湾空港工事事務所の関係方々にお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 村越潤, 名取錫: 鋼橋の腐食とその原因, 橋梁と基礎, Vol. 27, No. 6, pp.39-44, 1993.
- 2) 藤野陽三: 橋梁の防錆 - ボックス構造内部の腐食環境と湿度コントロールによる防錆 -, 防食技術, Vol. 38, No. 10, pp.546-552, 1989.
- 3) 藤野陽三, 上田雅俊, 延藤遵: 鋼ボックス内部の腐食環境と防錆について, 構造工学論文集, Vol. 36A, pp. 1021-1033, 1990.
- 4) 上田雅俊: 東京大学修士論文, 1990.
- 5) Vassie, P. R.: Corrosion of Structural Steelwork in Bridge Enclosures, Box Section and Anchorage, *British Corrosion Journal*, Vol. 22, No. 1, pp.37-44, 1987.
- 6) 松井繁憲, 寺西功, 三田哲也, 藤野陽三: 鋼箱桁内部防錆実験の報告, 鋼構造論文集, Vol. 2, No. 7, pp. 63-71, 1995.
- 7) 金子正猪, 溝上嘉昭, 内藤真: 乾燥空気による箱桁内部防食 - 新尾道大橋 -, 橋梁と基礎, Vol. 33, No. 5, pp.31-34, 1999.
- 8) 森 幸夫: 大島大橋箱桁内腐食環境調査, 第 121 回腐食防食シンポジウム資料, pp.38-45, 2001.
- 9) 内海 靖: 箱桁内は良環境 - 苅安賀高架橋桁内環境調査 -, 川田技報, Vol. 21, pp.92-93, 2002.
- 10) 篠原正, 藤野陽三, 辻川茂男: ACM 型腐食センサによる鋼橋のボックス構造内の腐食環境の検討, 第 37 回腐食防食討論会講演集, C-204, 1990.
- 11) 斎藤平蔵: 建築気候 (初版 17 刷発行), 共立出版 (株), pp.101-105, 1991.
- 12) (社) 日本規格協会: JIS Z 0301 (1989) 「防湿包装方法」.

(2003. 3. 18 受付)

PREVENTION OF CORROSION INSIDE STEEL BOX GIRDER OF BRIDGE

Jinsun LIAO, Shigenori MATSUI, Moriyoshi KUSHIDA, Tadashi SHINOHARA
and Yozo FUJINO

The corrosivity inside box girders of steel bridges was investigated. The humidity controlling and rust prevention using a special desiccant were studied. The desiccant used in this study is capable of absorbing and releasing the moisture at high and low humidity respectively. The effects of humidity controlling and rust prevention of the desiccant were confirmed by the field test inside the box girders. On the basis of above investigations, a rust preventing system was proposed, in which the desiccant was used instead of painting inside the box girders. The life-cycle cost for the rust prevention of steel box girders can be remarkably reduced by this rust preventing system.