

鋼箱桁橋の桁内除湿システムの防食効果検証に関する検討

Study on Effectiveness of Dehumidification System Installed in Box Girder of Steel Bridge

加藤 真志 KATO Masashi JFE 技研 土木・建築研究部 主任研究員(副部長)・工博
安藤 誠 ANDO Makoto JFE 技研 数値解析研究室 主任研究員(副課長)・工博
橋本 光行 HASHIMOTO Mitsuyuki JFE エンジニアリング 鋼構造事業部 課長・Ph. D.

要旨

鋼箱桁橋内除湿機を設置し、桁内の湿度をコントロールすることにより内面塗装を省略し、ライフサイクルコストを削減することが可能な除湿システムが注目されている。通常箱桁内は、ダイヤフラムなどにより多くの部屋に仕切られているため、局所的な湿度の上昇が懸念される。本稿では、数値流体解析を適用して、水蒸気の移流拡散を解くことにより相対湿度分布の時間的変化を評価した。その結果、本除湿システムは均一に桁内湿度を低下させる有効なものであることが検証された。

Abstract:

Dehumidification system in a steel box girder bridge is an effective measure to reduce its life cycle cost (LCC) because the cost of painting inside the girder can be saved. In this study a system consisting of a dehumidifier and air ducts arranged in the box girder is designed. Computational fluid dynamics (CFD) combined with transport equations of moisture and temperature is applied to the flow inside the box girder. The effectiveness of this system is verified because humidity is uniformly removed without local concentration of moisture.

1. はじめに

鋼橋の長寿命化を実現する上で障害となる腐食に対しては、塗装以外にも、最近では防食性の高い鋼材や表面処理技術が開発されてきている。適切な防食対策を施せば鋼材の良さを活かした高い維持管理性能を持たせることが可能となる。

近年、除湿機を設置し、桁内の湿気を除去する手法が鋼橋に適用される例が、欧州を中心に増えている¹⁾。これは桁内の湿度を低下させ、塗装面積で多くを占める内面塗装を省略することにより、ライフサイクルコストを削減しようとするものである。日本では、新尾道大橋に除湿機が設置され、供用期間内の桁内面塗装費を、大幅に削減できることが示されている²⁾。

しかしながら、通常箱桁内はダイヤフラムなどにより多数の部屋に分割されており、局所的な湿度の上昇が懸念される。そこで、今回は除湿効果の定量化を図るため Navier-Stokes 方程式を解く数値流体解析手法を適用することを試みた。具体的には、流れの特性から、桁内の湿度分布を時間軸で評価するものである。

本稿では、まず除湿システムの概要について述べ、標準

的な橋梁を対象としてシステムの試設計を行う。次に、簡単な手法による除湿機の効果確認と、それと対比した数値流体解析手法による除湿システムの効果をも、シミュレーションにより検証した結果について述べる。

2. 桁内除湿システムの試設計

2.1 除湿システムの概要

桁内除湿システムは Fig. 1 に示すように、密閉状態に近い鋼箱桁内の水分を除湿機で除去しながら内部に乾燥空気を循環させ、桁内の湿度を一定値(臨界湿度)以下に保つことにより、内面の防食を図るものである。理論的には相対湿度が 100%にならない限り鋼板表面に結露は生

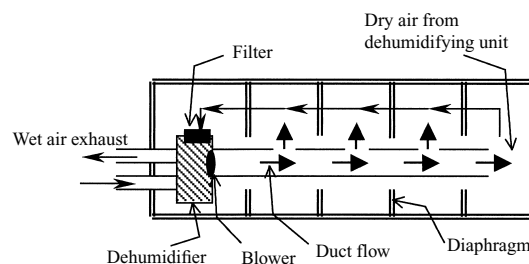


Fig.1 Dehumidification system

じず、腐食反応が起きないはずであるが、表面にダスト・塩類などが付着している場合、吸着効果により臨界湿度は50-70%に低下すると言われている³⁾。したがって、本稿では、臨界湿度を60%に設定し、システムの試設計ならびにシミュレーションを行う。

2.2 試設計結果

Fig. 2 に、試設計の対象とした鋼橋の概要を示す。幅員は15 m、橋長は120 m、桁高は3.75 mで、除湿対象は幅7.2 mの箱桁の内部空間である。

Table 1 に、除湿機とダクトの設計条件と設計結果を示す。除湿機台数の決定では、桁内初期の相対湿度は40%であるとし、一日の温度変化により桁内空気が収縮する際、外気とともに桁内へ流入する水分を除湿し、桁内の相対湿度が40%を超えないように維持するのに必要な性能を算定する。仮定した一日の温度変化は夏季、冬季ともに20℃、外気の相対湿度は80%で一定とした。計算に用いた除湿機の性能曲線を Fig. 3 に示す。

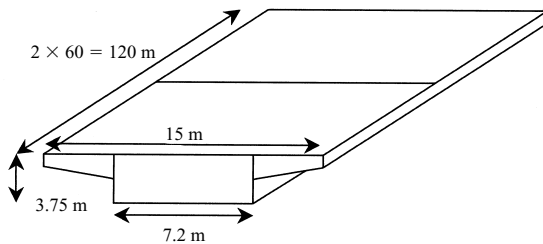


Fig. 2 1-box bridge girder

Table 1 Conditions and designs of dehumidifier and duct

<p>Conditions</p> <ul style="list-style-type: none"> Volume of girder 3 240 m³: 7.2 m width × 3.75 m height × 120 m length Supposed design condition Initial relative humidity inside girder: 40% Relative humidity outside girder: 80% constant Temperature Summer 30 ± 10°C Winter 10 ± 10°C Performance of dehumidifier Shown in Fig. 3
<p>Design</p> <ul style="list-style-type: none"> Length of duct: 120 m Diameter of duct: 100 mm Diameter of side hole: 9 mm Pitch of side holes: 2.5 m Inlet conditions of duct Volume of supplied dry air: 82.5 m³/h Blower: 82.5 m³/h Air velocity: 5.84 m/s Total pressure: 37 mmAq Outlet conditions of duct Volume of expelled air: 60.5 m³/h (Dry air from dehumidifier: 30.3 m³/h) Air velocity: 2.14 m/s Total pressure: 6.5 mmAq Volume expelled from each side hole 6.2-14.5 m³/h

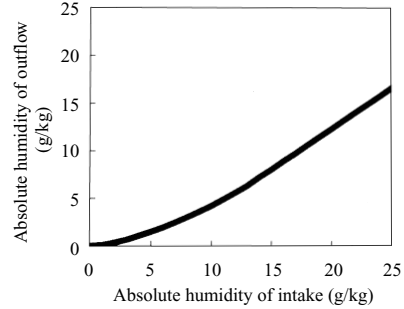


Fig. 3 Dehumidifier performance curve

なお、桁内には気流と、湿度の不均一な分布が生ずることが予想されるため、必ずしも除湿機の性能を最大限に活用できない可能性がある。そこで、除湿機の仕様ならびに台数は、ある程度余裕を持たせた条件で決定する。

この結果、箱桁内部容量 3 240 m³ に対し、82.5 m³/h の乾燥空気供給量を有する除湿機を1台設置することにした。なお、この性能は夏季の条件により決定されたものであり、冬季は約半分の性能で十分である。

除湿機は橋梁端部に設置され、そこから反対側の端部に向けて120 mのダクトが設置される。このダクト端から吐き出された乾燥空気が、除湿機に戻るまでに長時間を要するため、ダクトの側面には横孔を設けた。横孔の径、配置間隔については、Table 1 に示すとおりである。

ダクトの除湿機側で5 m/s、反対側で2 m/s程度の流速が確保されるようにした。これは、ダイヤフラムで隔てられた各部屋に、横孔から均一に乾燥空気を配分する一方で、湿潤空気の除湿機への吸い込みを誘導する全体的な流れを確保するために、ダクトの端部にもある程度の流速が必要なためである。

なお、この際に、(1)ダクトの圧力損失により乾燥空気がダクト出口に達する前に、全水頭が消滅しないよう静圧を与えたこと、(2)横孔から乾燥空気を出しすぎると、出口における流量が確保できなくなることを考慮した。

2.3 除湿機性能の確認

設計された除湿機の性能を確認するために、桁内気流動を無視した場合、すなわち湿度が桁内で分布せず、瞬時に平均化されると仮定した場合の相対湿度と絶対湿度の経時変化について検討する。

絶対湿度の高い夏季を対象とし、海上橋梁の条件として適当な新木場標準年8月の気象データを参考にして、午後2時に最高32℃、午前5時に最低22℃を示すと仮定しその間は正弦曲線で気温を近似した。

次に、湿度の経時変化の計算方法について説明する。計算では、午後2時以降の1hごとの気温変化から、桁内体積の増減を算定し、その収縮にともなう桁外からの湿潤空気の流入、膨張にともなう桁内空気の排出を評価する。桁内では、除湿機の運転を継続させ Fig. 3 の性能曲線にし

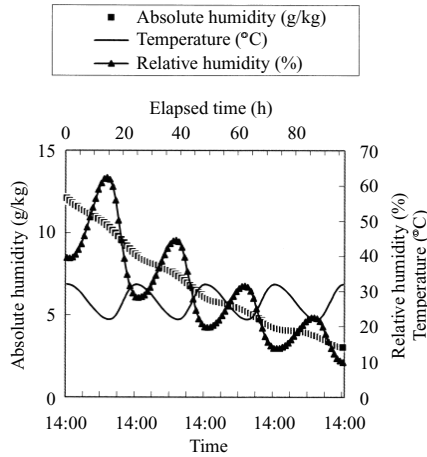


Fig. 4 Time history of humidity and temperature

たがい桁内空気を吸い込み、除湿できることとした。

初期の桁内相対湿度は40%で、この状態から次第に温度を低下させた。その理由は、温度が低下すると、収縮により桁外から湿潤空気が流入すること、飽和水蒸気量の低下により相対湿度が上昇することは、結果的に腐食性に関して、安全側の評価となるためである。なお、桁外は相対湿度80%で時間によらず一定とした。

Fig. 4に、午後2時に気温32℃で始めた場合の気温と相対湿度、絶対湿度の変化を示す。横軸は時刻と経過時間であり、4日間(96h)の推移を表している。気温の低下にともない相対湿度は上昇し、15h後の午前5時に、一時的に60%強まで上昇する。しかし、気温が上がり始めると、相対湿度は低下し、翌日の午後2時には30%以下になる。その状態から気温が低下すると、相対湿度は再度上昇するが、除湿機の効果により、次のピークは50%に達しない。その後も除湿機の効果により、相対湿度は徐々に低下していくことが分かる。

一方、絶対湿度は桁内の水分量を表す指標である。Fig. 4の結果から、水分量は基本的に単調減少することが分かる。つまり、相対湿度の急激な上昇は、温度低下による飽和水蒸気量の減少によるところが大きく、桁内空気の膨張、収縮にともなう水分の出入りの寄与は、Fig. 4の曲線の僅かな凹凸程度に過ぎない。実際の体積の増減は全体の数%程度であり、外気の流入が相対湿度、絶対湿度に及ぼす影響が小さいのはそのためであると考えられる。

以上の結果から、桁内の気流動を無視した計算結果によれば、夏季の厳しい条件においても、相対湿度は60%を大きく超えることはなく、絶対湿度も2日間でおおむね半減することが分かった。

3. 数値流体解析による除湿システムの検証

3.1 数値流体解析手法の概要

解析には、FLUENT ver. 6を使用した。乱流モデルは

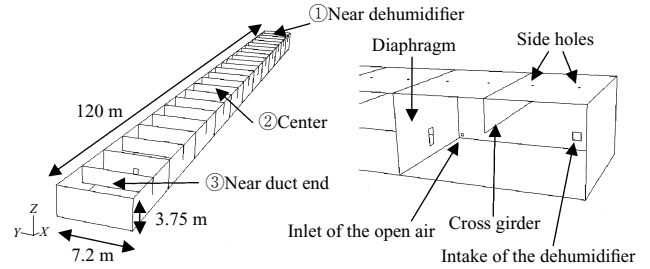


Fig. 5 Overview of the simulation model

standard k-ε である。時刻の経過にともなう温度変化を考慮するため、天井面および床面の温度を気温の変化に応じて変化させた。温度は、エンタルピーの輸送方程式、絶対湿度は水蒸気の輸送方程式を解くことによって評価した。なお、水蒸気の輸送方程式は、下記のように定式化した。

$$\frac{\partial M}{\partial t} + U_j \frac{\partial M}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu_t \frac{\partial M}{\partial x_j} \right] + M_{in} - M_{out}$$

M : 水蒸気量

U : 流速

x : 座標値

M_{in} : 水蒸気流入量

M_{out} : 除湿機による水蒸気損失量

ν_t : 乱流拡散係数

Fig. 5は、数値流体解析に使用したモデルの全体図、および除湿機が設置される端部の部屋を拡大した図である。要素は四面体で、その要素数は、約20万個である。ダイアフラムや横桁などは流体が透過しない壁として、箱桁を15の連続した部屋にモデル化した。なお、ダクトは桁内の上部に配管されると仮定し、各部屋の天井部に「ダクト横孔」を想定した排気口を設けた。また、桁内空気の温度変化による膨張、収縮により外気が流入する孔を、各部屋にそれぞれ2ヶ所ずつ、床付近に設置した。

温度の初期値は、天井面および床面で32℃とし、15h後に22℃まで下がると仮定した。相対湿度の初期値は桁内一様に40%としたが、桁外は80%で一様である。除湿機から送風される乾燥空気の量は、Table 1のとおり82.5 m³/hであり、このうち30.3 m³/hがダクト出口から残りがダクト横孔から放出されている。

3.2 絶対湿度分布の時間的变化

Fig. 6に、桁内絶対湿度の5、10、15h後の変化を、コーナー図にて示した。この図は、箱桁幅方向(7.2m)中央の鉛直断面における絶対湿度の分布を示したものである。色が青から赤くなるにつれ絶対湿度が高いことを示しているが、時間が経つにつれて桁全体が比較的均一に除湿されていくことが分かる。15h後の絶対湿度について

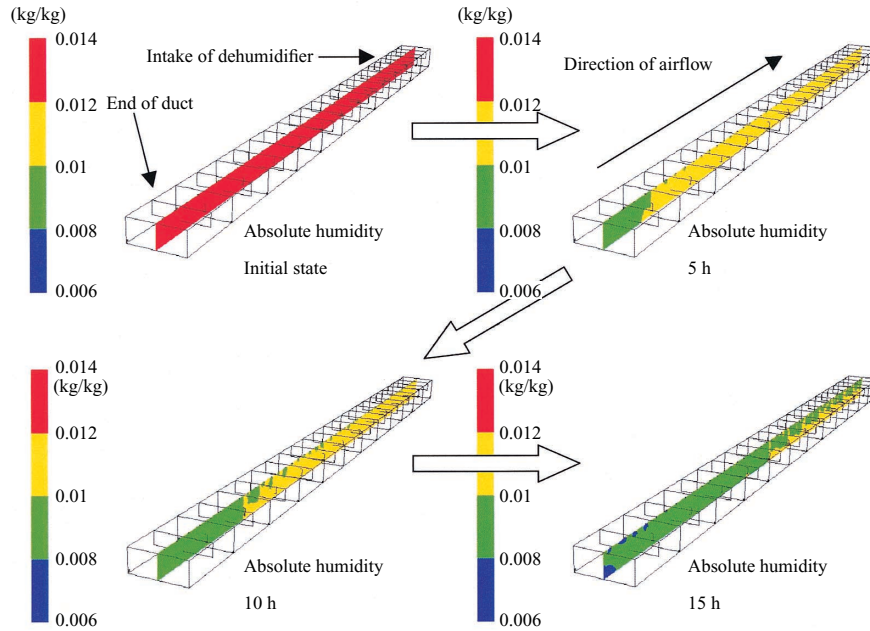


Fig. 6 Time history of absolute humidity

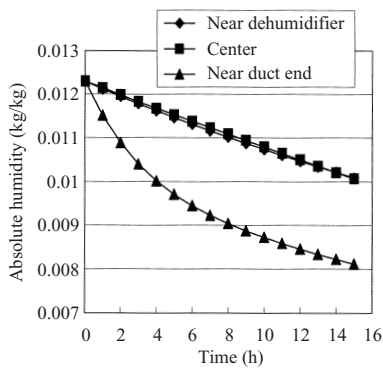


Fig. 7 Time history of absolute humidity in three areas of box girder

橋全体の積分値を算出したところ 9.8 g/kg となる。なお Fig. 4 の気流動を無視した場合の結果は、絶対湿度 10.3 g/kg であり、数値流体解析の結果とほぼ一致している。

Fig. 7 は、ダイアフラムで囲まれた部屋のうち 3 ヶ所に着目し、絶対湿度の変化を定量的に示したものである。着目した箇所は、除湿機に最も近い部屋 (Fig. 5 ①)、中間支点上の部屋 (Fig. 5 ②)、およびダクトの末端にあたる部屋 (Fig. 5 ③) であり、各部屋における絶対湿度の時間的変化を示した。ダクト末端にある部屋は、乾燥空気全量の約 36% (30.3 m³/82.5 m³) が流入するため除湿が最も速く進行するが、他の 2 部屋についても、ダクト横孔から放出される乾燥空気によって除湿が順調に進行していることが分かる。除湿機に最も近い空間と長さ方向の中央の空間ではほぼ同じ速さで除湿が進行しており、このグラフからも橋全体が比較的均一に除湿されていることが分かる。

3.3 相対湿度分布の時間的変化

2.3 節で述べたとおり、桁内の相対湿度の変化において桁内空気の膨張と収縮にともなう外気流入による寄与は小さく、温度低下による飽和水蒸気量の減少によるところが大きい。ここでは、桁内の相対湿度を評価し、局所的に相対湿度が上昇する可能性について考察する。

まず、Fig. 4 によれば、初期状態から 15 h 経過した時点で相対湿度が最も高くなり、62% を示している。一方 Fig. 8 は、数値流体解析によって相対湿度分布の時間的変化を示したものである。色が赤い部分は 60% 以上であることを示している。15 h 後の相対湿度分布に着目するとダクト末端を含む空間を除き、桁内全体にわたって 50-60% となっており、相対湿度が最も高くなった状態でも桁内のいずれの部屋においても急激な腐食が発生する可能性は低いことが予想される。

4. おわりに

鋼箱桁橋を対象に、除湿システムの有効性の検証を試みた。具体的には、除湿システムの試設計を行い、その諸元をもとに、水蒸気の輸送方程式を考慮した数値流体解析手法を適用し、桁内湿度分布の時間的変化を求めた。本稿では以下の結論が得られた。

- [1] 除湿機性能を確認するため、数値流体解析を実施する前段階として、温度変化にともなう桁内の相対湿度絶対湿度の経時変化を、桁内気流動を無視した手法で計算した。湿気の多い夏季の条件下において、温度低下により相対湿度は急激に上昇する。しかし、相対湿度

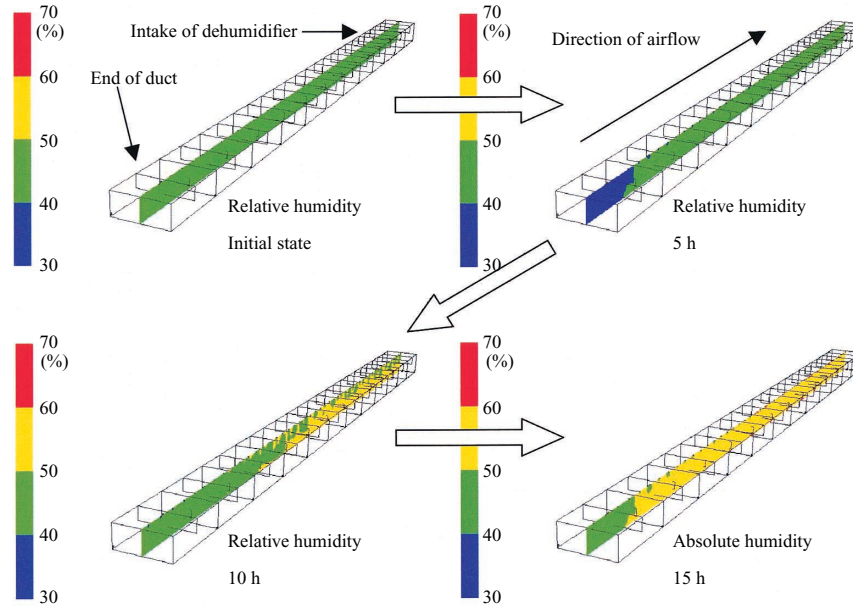


Fig. 8 Time history of relative humidity

度が60%を超えることはほとんどなく、除湿機の効果により次第に低下し、4日後には相対湿度は10%程度に至る。また、初期の相対湿度の上昇は、温度低下による飽和水蒸気量低下の影響が大きく、それに比べて温度収縮による外気流入の影響は小さいことが分かった。

2) 数値流体解析によって、桁内の相対および絶対湿度分布の時間的変化を視覚的かつ定量的に示した。桁内除湿システムは欧州を中心に適用例が増えているが、数値流体解析を用いて流れを考慮して、除湿性能の検討を行った例は見当たらない。流れを考慮した除湿性能の検討により、時間的な湿度変化だけでなく、空間的な湿度分布まで明らかになった。その結果、本稿で提案した除湿システムでは、桁内全体が比較的均一に除湿されることが分かり、部分的に腐食が進行する可能性は低いことが示された。

なお、本稿では、ダクトの横孔サイズと配置間隔を一律に設定したが、これらをパラメトリックに調節し、桁内全体を均一に除湿できる最適な手法があると考えられる。また、これら以外のパラメータとしては、桁内空間の大きさ、桁内の仕切り方、ダクトの径と長さ、乾燥空気の供給量

気象条件などが挙げられる。これらの最適化を図ることができれば、より経済的なシステムを構成することが可能になるであろう。最後に、鋼桁橋梁などにおいても、外装板を使用し箱桁と同程度の密閉状態が確保できれば、本除湿システムが適用可能であることを付言しておく。

参考文献

- 1) Bloomstine, M. L. et al. "Corrosion protection by means of dehumidification." IABSE Symp. Rio de Janeiro, 1999-08. p. 373-382.
- 2) 廣田昭次ほか. 新尾道大橋桁内除湿設備の最適運転の試み. 本四技報 vol. 26, no. 98, 2002, p. 18-24.
- 3) 松井茂憲ほか. 鋼箱桁内部防錆実験の報告. 鋼構造論文集. vol. 2 no. 7, 1995, p. 63-71.



加藤 真志



安藤 誠



橋本 光行