

第 I 部門

結露水流下による鋼材表面洗浄を考慮した付着塩分量評価

京都大学工学部 学生員 ○井伊 悠
 京都大学大学院工学研究科 学生員 秦 聡一朗
 京都大学大学院工学研究科 正 員 白土 博通

京都大学大学院工学研究科 学生員 野口 恭平
 京都大学大学院工学研究科 学生員 三歩一 奏人
 京都大学大学院工学研究科 正 員 八木 知己

1. 序論 筆者らの研究グループでは鋼橋の腐食に対する維持管理の合理的効率化を目的とし、部位別の付着塩分量推定を検討してきた。水は三大腐食因子の 1 つであるため、結露による水滴も基本的には腐食を促進させる要因と考えられる一方、その発生量が多くなれば流下する水滴が表面の付着塩分を洗浄する効果が考えられる。付着塩分量推定の際にこの効果を見逃すと予測値は過大になると考えられるが、結露水流下による洗浄効果についての検討は十分でない。そこで本研究では、図 1 に示す 3 主桁を有する鋼橋である天鳥橋（和歌山県）を対象とし、水滴流下による洗浄効果の測定と解析による主桁の温度変化及び結露発生量を計算した。そして、結露による洗浄を考慮した部位別の付着塩分量計算を行い、その結果について検討した。

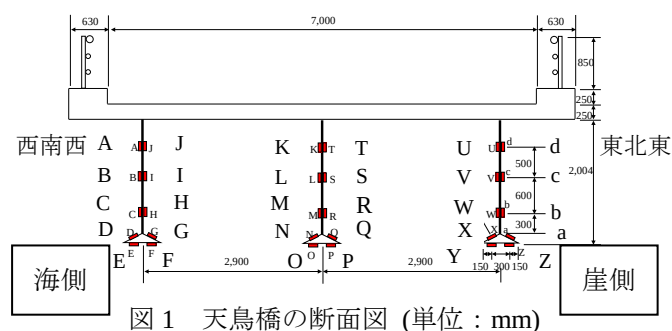
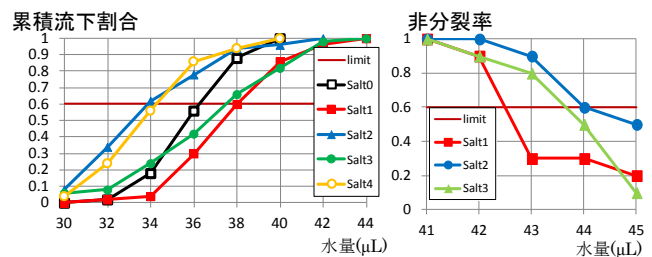


図 1 天鳥橋の断面図 (単位: mm)

2. 洗浄効果測定実験 付着量計算で洗浄の再現に必要な条件を実験で求めた。この条件とは、水滴が流れ出す水量（最少流下水量）、水滴が分裂せずに流下する水量（限界非分裂水量）、水滴流下による表面塩分の洗浄率の 3 つである。鉛直にした供試体表面にマイクロピペットを用いて任意の大きさの水滴を作成し以下の実験を行った。また表面塩分による違いも調べるため、塩分量ゼロも含めた複数の表面塩分量で実験を行った。なお、霧吹きによって供試体面に塩水を噴霧した。

2.1 最少流下水量及び限界非分裂水量 最少流下水量及び限界非分裂水量の実験結果を図 2 に示す。最少流下水量は徐々に水量を増やしつつ作成した全 50 滴のう

ち各水量以下で流下した水滴の割合（累積流下割合）を示す。限界非分裂水量は各水量別に作成した 10 滴のうち分裂しなかった水滴の割合（非分裂率）を示す。最少流下水量は、割合の急激な増加は見られず、供試体の表面状態の違いが影響したと考えられる。限界非分裂水量は、水量増加とともに水滴が分裂しやすくなるという妥当な結果が得られた。またどちらにおいても表面塩分量の違いによる明確な傾向は見られなかった。したがって、累積流下割合の Salt0 と非分裂率の Salt1 の結果を代表値とし、かつ 6 割を境界として最少流下水量を 38 μL 、限界非分裂水量を 42 μL と定めた。



左図：最少流下水量，右図：限界非分裂水量

図 2 最少流下水量及び限界非分裂水量の実験結果

2.2 洗浄効果測定実験 洗浄効果測定実験の結果を図 3 に示す。結果は洗浄前後の付着塩分量の比である残存塩分率で整理した。残存塩分率は表面塩分量によらず最少流下水量のときに最小となり、おおよそ単調増加に分布した。これは水量が小さくゆっくり流れる方がより多くの塩分を吸収できたためと考えられ、流下速度が洗浄に対し支配的とわかった。

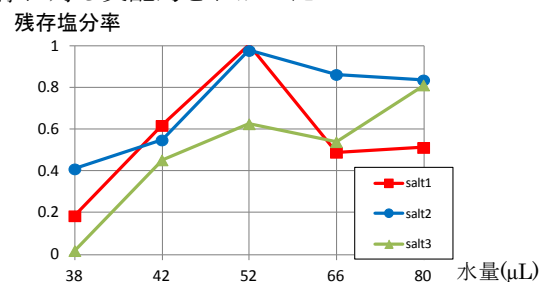


図 3 洗浄効果測定実験の結果

3. 結露解析¹⁾ 天鳥橋の3主桁を厚さ20 mmの3枚の鋼板としてモデル化し、主桁温度 T [K]の変化を1次元熱伝導方程式(式(1))の差分計算によって求めた。また、主桁表面においては対流熱伝達と放射による熱流を考え、式(2)を境界条件として用いた。対流熱伝達は外気と鋼板の熱交換であり、放射は直達、散乱、反射の日射を含めた短波放射 J'_{solar} [W/m²]と、天空からの放射 J'_a 、地面の放射 J_G 、鋼板自身の放射 J_r を含む長波放射から成る。ここで C_v : 熱容量 [J/m³/K], λ : 熱伝導率 [W/m/K], x : 厚さ方向 [m], α : 熱伝達率 [W/m²/K]であり、 T_{out} は外気温を表し、 T_s は鋼板表面温度を表す。

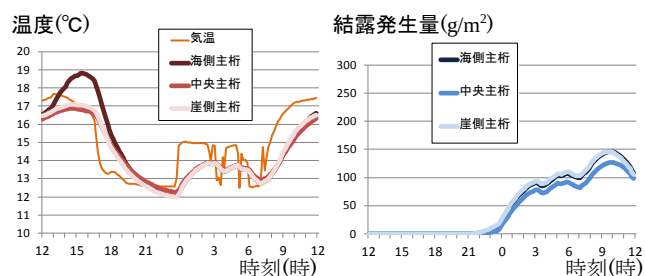
$$C_v \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (1)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha(T_{\text{out}} - T_s) + J'_{\text{solar}} + J'_a + J_G - J_r \quad (2)$$

次に、主桁の表面温度から式(3)を用いて結露発生量 W [kg/m²]を計算した。ここで α' : 湿気伝達率 [kg/m²/s], X_{out} : 外気絶対湿度 [kg/kg'], $X_{s,\text{sat}}$: 鋼板表面飽和絶対湿度 [kg/kg']である。

$$\Delta W = \alpha' (X_{\text{out}} - X_{s,\text{sat}}) \cdot \Delta t \quad (3)$$

入力値である気温、相対湿度、放射等の現地の気象データは領域気象モデルWRFによる計算値を用いた。解析は2013年3月22日からの約1年間にて行い、図4にある1日における気温と3主桁温度の時間変化と結露発生の様子を示す。解析の結果、主桁温度が気温に追従するという妥当な結果が得られた。また主桁温度が気温より低くなる午前中において結露が発生しやすいとわかった。一方、結露の発生も再現されたことがわかる。



左図：気温(WRF)と主桁温度，右図：結露発生量

図4 2014年2月2日における解析結果

4. 付着塩分量計算²⁾ 図1に示す対象橋梁に対して濃度フラックスの衝突と拡散による沈着から成る付着量計算を行い、雨がかりのある海側主桁海側面及び崖側主

桁崖側面では雨による洗浄を考慮した。これに結露発生による水量と塩分の潮解性による水膜形成由来の水量³⁾を加え、水滴流下及び洗浄の条件を付着量計算に反映させた。洗浄効果を考慮した計算領域は3主桁ウェブ部6面の50 mm(橋軸方向)×1,850 mm(鉛直方向)である。また、水滴の発生から洗浄までの処理は以下の通りである。まず結露発生に伴い水滴を乱数で配置した。水滴の成長は水量が増す度に水滴を新たに配置し、既存の水滴と重なった場合に合体させることで再現した。そして最少流下水量に達したら水滴を流下させて経路上の塩分を洗浄させた。その際、流下経路上にある水滴と合体して限界非分裂水量を超えた場合は、その水滴を分裂させた。図5に2013年12月11日～2014年3月11日における付着塩分量の観測値と計算値を示す。この図より、結露による洗浄効果が内側部位で明確に表れたことがわかる。したがって、雨がかりがなく計算値が過大となりやすい内側部位においてより長期の予測が可能になると考えられる。今後は主桁表面温度の計測や供試体を用いた結露発生の再現を行うことで、解析との比較及び妥当性の検証が必要である。

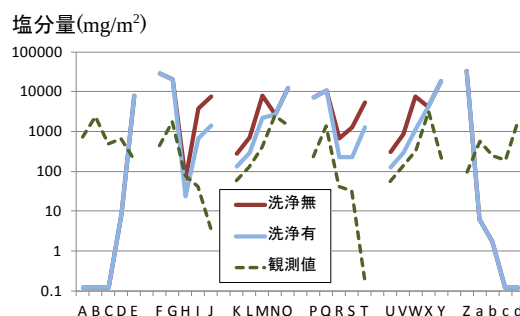


図5 付着塩分量の計算値と観測値

5. 結論と課題

- 1) 鋼橋の付着塩分量推定において結露水流下による洗浄効果を考慮するため、実験による水滴の洗浄力の測定と解析による結露発生量を求めた。
- 2) 結露による洗浄効果を考慮した部位別の付着塩分量を計算したところ、内側部位において長期予測の可能性が示された。
- 3) 今後は実現象との比較を行い、解析の妥当性を検証する必要がある。

謝辞 本研究の一部はJSPS科研費15H02261, 社団法人日本鉄鋼連盟, 財団法人防災研究協会の助成を受けた。

参考文献

- 1) 鉦井ら：日本建築学会環境系論文集，74，639，587-593，2009。
- 2) 野口ら：構造工学論文集，Vol.60A，613-621，2014。
- 3) 押川ら：Zairyo-to-Kankyo，52，293-298，2003。